УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

# В.В. Коротаев, В.А. Рыжова

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ



Санкт-Петербург 2020

### МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

# В.В. Коротаев, В.А. Рыжова ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО

по направлениям подготовки 12.03.02 «Оптотехника», 16.03.01 «Техническая физика» в качестве учебно-методического пособия для реализации основных профессиональных образовательных программ высшего образования бакалавриата

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург 2020 Коротаев В.В., Рыжова В.А. Измерительные оптико-электронные приборы – СПб: Университет ИТМО, 2020. – 130 с.

Рецензент(ы):

Карпова Галина Васильевна, кандидат технических наук, доцент, тьютор факультета прикладной оптики, Университета ИТМО.

Пособие предназначено для использования в рамках учебного процесса по образовательным программам бакалавриата (направления подготовки 12.03.02 «Оптотехника», 16.03.01 «Техническая физика») и содержит материалы лабораторных работ по дисциплинам «Оптикоэлектронные приборы и системы», «Аналитика и исследование оптикоэлектронных приборов», «Измерительные оптико-электронные «Оптико-электронные приборы», приборы линейных И угловых перемещений».

Расширенный и доработанный авторами лабораторный практикум предлагается обучающимся для освоения учебно-лабораторного комплекса, содержащего оптико-электронные измерительные установки и приборы. К лабораторным работам сформулированы контрольные вопросы и предложены примеры выполнения. Пособие подготовлено на факультете прикладной оптики.

ЭНИВЕРСИТЕТ ИТМО

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

> © Университет ИТМО, 2020 © Коротаев В.В., Рыжова В.А., 2020

СОДЕРЖАНИЕ	
ВВЕДЕНИЕ	4
Лабораторная работа №1. Прибор управления лучом ПУЛ-6	6
Лабораторная работа №2. Прибор управления лучом ПУЛ-Н	. 30
Лабораторная работа №3. Эллипсометр ЛЭФ-3М-1	. 43
Лабораторная работа №4. Однокоординатный оптико-электронный автоколлиматор	. 58
Лабораторная работа №5. Ультрафиолетовый фотометрический газоанализатор озона	. 68
Лабораторная работа №6. Хемилюминесцентный газоанализатор озон	1 <b>a</b> . 81
Лабораторная работа №7. Инфракрасный фотометрический	
газоанализатор	. 91
Лабораторная работа №8. Оптико-акустический газоанализатор	103
СПИСОК ИНФОРМАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ	115
ПРИЛОЖЕНИЕ А	118
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	120

#### ВВЕДЕНИЕ

Современный этап научно-технического прогресса характеризуется повышением интереса к измерениям, которые играют определяющую роль в решении как фундаментальных, так и прикладных проблем познания действительности. Измерения являются основным процессом получения объективной информации о свойствах различных объектов, материалов и сред, связанных с практической деятельностью человека.

Специалист в области проектирования высокотехнологичных оптико-электронных приборов и систем все чаще сталкивается как при проведении научных исследований, так и при практической реализации их результатов с необходимостью постановки и проведения измерительных экспериментов.

Измерения представляют собой физический эксперимент, выполнение которого основано на использовании тех или иных физических явлений. Совокупность физических явлений, на которых основаны измерения, называются принципом измерения [1, 2].

Решение метрологических проблем В народном хозяйстве выполняется посредством технических измерений, отличительным признаком которых является то, что они проводятся по специально разработанным, предварительно изученным и аттестованным методикам. Технические измерения выполняются с целью контроля и управления экспериментами, параметров научными контроля изделий, технологических процессов, управления движением различных видов заболеваний, загрязнённости транспорта, диагностики контроля окружающей среды.

Измерительная установка функционально — ЭТО совокупность измерений (измерительных приборов, объединенных средств преобразователей) вспомогательных устройств, измерительных И предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем и расположенная в одном месте [2].

Измерительный прибор – средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем [1].

Настоящее пособие содержит описание лабораторного практикума для проведения измерительных экспериментов с использованием оптикоэлектронных измерительных установок и приборов.

В пособии представлены два цикла работ, первый из которых посвящен исследованию оптико-электронных приборов для измерения линейных и угловых перемещений объектов контроля, а второй – для измерения параметров сред распространения оптического излучения.

Данное пособие является расширенной, доработанной и дополненной версией прошлых пособий, указанных также в перечне источников.

Описание каждой лабораторной работы содержит краткие теоретические сведения об объекте измерения и принципах построения технических средств для реализации измерительного эксперимента, описание лабораторной установки, порядок выполнения работы и обработки результатов, содержание отчета, контрольные вопросы для В конце пособия приведены список подготовки к защите отчета. источников, рекомендуемых для теоретической информационных подготовки к работе, и два приложения.

В соответствии с требованиями техники безопасности, студенты выполняют работы в группах под контролем преподавателя.

Организация лабораторного практикума предусматривает наличие текущего контроля успеваемости обучающихся с использованием оценочных средств в виде отчета и защиты полученных результатов в формате доклада и ответов на вопросы преподавателя.

Отчет о лабораторной работе содержит следующие обязательные разделы:

- 1. Цель и задачи лабораторной работы
- 2. Методика проведения исследования
- 3. Анализ погрешностей
- 4. Результаты: представить необходимые расчеты, диаграммы и таблицы по итогам обработки полученных экспериментальным путем метрологических параметров и характеристик прибора.
- 5. Выводы: представить заключение по каждой пункту, определяющему цели и задачи выполнения лабораторной работы.

Лабораторный практикум направлен на подготовку обучающихся к решению научных и технических задач метрологической деятельности при построении измерительных оптико-электронных приборов и систем (ОЭПиС), способствует приобретению умений И навыков для профессиональных формирования компетенций инженера оптикоэлектронного приборостроения.

Лабораторная работа №1. Прибор управления лучом ПУЛ-6

# Цели работы:

- 1. Изучение теоретических основ построения и функционирования приборов с оптической равносигнальной зоной (ОРСЗ).
- 2. Изучение режимов работы и устройства прибора ПУЛ-6.
- 3. Получение практических навыков работы с прибором ПУЛ-6 и исследования его основных метрологических параметров и характеристик.
- 4. Исследование источников и составляющих основной погрешности прибора ПУЛ-6.

## Краткие теоретические сведения

Оптическая равносигнальная зона может быть определена как область пересечения двух или более электромагнитных полей оптического диапазона, в которой некоторые информативные (основные) параметры этих полей равны, а прочие (дополнительные) – различаются [3, 4]. Основные информативные параметры используются для количественной оценки измерительной информации, а дополнительные – для векторной оценки (знака). Приборы с ОРСЗ широко используются в ряде областей народного хозяйства:

- в машиностроении (контроль прямолинейности направляющих станин высокоточных станков, контроль позиционирования рабочих органов механизмов);
- в строительстве (контроль уровня укладки асфальтовых и бетонных покрытий площадок, дорог, взлетно-посадочных полос аэродромов, насыпей, разработка траншей и каналов);
- в железнодорожном строительстве (контроль фактического положения железнодорожного пути в продольном профиле и в плане, измерения в процессе непрерывной выправки железнодорожного пути высокопроизводительными путевыми машинами при его отклонении от проектного положения);
- в судостроении и судоремонте (контроль соосности валопроводов на судах, деформации плавающих доков);
- в сельскохозяйственном строительстве (измерения при укладке дренажных труб, при планировке земельных участков для сплошного равномерного залива водой участков пашни под рисовые чеки).

Приборы управления лучом (ПУЛ) относятся к группе приборов с OPC3 и предназначены для контроля линейных смещений объекта **Б** в направлениях, перпендикулярных базовой плоскости xOz, которая задается пучком лучей с OPC3, сформированным прожектором **I** (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – К пояснению принципа работы приборов с ОРСЗ: **A** – базовый объект; **Б** – контролируемый объект; **I** – прожектор; **II** – приемное устройство; **III** – блок обработки информации; ОУ – отсчетное устройство; ИМ – исполнительный механизм

Электрический сигнал на выходе приемного устройства II, установленного на контролируемом объекте **Б**, содержит информацию о величине смещения и его направлении. Этот сигнал поступает на блок обработки информации III, выходные сигналы которого  $\Delta u_1$  и  $\Delta u_2$ используются для индикации смещения отсчетным устройством ОУ и для управления исполнительным механизмом ИМ, который возвращает контролируемый объект в исходное положение [4, 5].

#### Формирование пучка лучей с оптической равносигнальной зоной

Объектив 1 и установленный в его фокальной плоскости источник излучения 2 (рис. 1.2) формируют пучок лучей с ОРСЗ. Источник излучения содержит две области 2′ и 2″ с различной информационной окраской. Это достигается следующими способами:

- модуляцией излучения с различными частотами  $f_1$  и  $f_2$ ;
- модуляцией излучения с одной частотой, но в противофазе;
- использованием излучения с различным спектральным составом;
- использованием излучения с различными параметрами состояния поляризации.

Наиболее распространенными на практике являются первые два способа.

На рисунке 1.2 показан ход лучей, которые формируются оптической системой прожектора, источник излучения 2 которого расположен в фокальной плоскости объектива 1. Лучи от нижней половины источника 2' формируют на расстоянии l от объектива пятно засветки E', распределение облученности которого в сечении L'L'' показано на графике E'(y,l) [5].

Лучи от верхней половины источника 2 " формируют на расстоянии l от объектива пятно засветки E", распределение облученности которого в сечении L'L" показано на графике E''(y,l).

При расположении входного зрачка объектива 3 приемного устройства на оптической оси прожектора (положение a) в него попадут потоки излучения от обеих половин источника 2 ′ и 2 ″ в равной степени ( $\Phi'=\Phi''$ ).



Рисунок 1.2 – К пояснению структуры пучка лучей с ОРСЗ

При смещении входного зрачка объектива 3 приемного устройства вверх относительно оптической оси прожектора поток излучения  $\Phi'$  от нижней половины источника 2' будет увеличиваться, а поток излучения  $\Phi''$  от верхней половины источника 2'' будет уменьшаться. В положении **b** будут справедливы следующие соотношения:  $\Phi''=0$ ,  $\Phi'=\Phi'_{MAX}$ .

При смещении входного зрачка объектива 3 приемного устройства вниз относительно оптической оси прожектора поток излучения  $\Phi'$  от нижней половины источника 2' будет уменьшаться, а поток излучения  $\Phi''$ от верхней половины источника 2'' будет увеличиваться. В положении *с* будут справедливы следующие соотношения:  $\Phi'=0$ ,  $\Phi''=\Phi''_{MAX}$ .

График разности потоков  $\Delta \Phi = \Phi' - \Phi''$  от величины смещения *h* входного зрачка (график  $\Delta \Phi(h)$  на рисунке 1.2) соответствует малому

размеру входного зрачка объектива приемного устройства. В общем случае вид зависимости будет определяться размером и формой входного зрачка.

#### Способы реализации источника оптического излучения

Источник излучения, состоящий из двух половин, может быть реализован в виде марки 1, которая подсвечивается первичным источником излучения 2 с помощью конденсора 3 (рис. 1.3). При этом половины марки 1 ′ и 1 ″ могут быть выполнены в виде спектральных или поляризационных фильтров.



Рисунок 1.3 – Ход лучей в оптической системе прожектора: 1 – марка, 1 ′ и 1 ″ – половины марки, 2 – источник излучения, 3 – конденсор, 4 – объектив

В первом случае половины марки могут пропускать излучение в двух различных спектральных интервалах  $\Delta\lambda_1$  и  $\Delta\lambda_2$ .

Во втором случае половины марки могут пропускать излучение с двумя различными состояниями поляризации, например, линейнополяризованное излучение с азимутами α<sub>1</sub>=0 и α<sub>2</sub>=90<sup>0</sup>.

Недостатком такой реализации источника излучения является относительно сложная система выделения сигналов от двух половин погрешность также относительно большая измерения, марки, a большого влияющих факторов. обусловленная наличием числа В частности, на погрешность прибора влияет качество границы раздела двух половин марки, которое при таком исполнении не может быть достаточно высоким. Источник, состоящий из двух половин, может быть реализован в виде составного полупроводникового излучающего диода (ПИД), но качество границы раздела в этом случае также недостаточно высокое.

Более удачной реализацией источника, состоящего из двух половин, является его выполнение в виде зеркальной призмы 1, подсвечиваемой с двух направлений первичными источниками излучения. В этом случае качество границы раздела, определяемое качеством ребра зеркальной призмы, может быть очень высоким [5, 6].

Наибольшее распространение получили две реализации прожектора приборов с ОРСЗ (рис. 1.4, 1.5). Первая реализация (рис. 1.4) основана на использовании в качестве источника излучения лампы накаливания 2 с внешней модуляцией потока механическим модулятором-прерывателем 9, вращаемым двигателем 10.



Рисунок 1.4 – Оптическая система прожектора на основе лампы накаливания: 1 – зеркальная призма; 2 – лампа накаливания; 3, 4 – конденсоры; 5, 6, 7, 8 – зеркала; 9 – механический модулятор; 10 –двигатель; 11 – объектив

Вторая реализация (рис. 1.5) основана на использовании в качестве источников излучения полупроводниковых излучающих диодов (ПИД) 2 и 3 с внутренней модуляцией потока излучения по цепи питания от генератора 4. Конденсоры обеспечивают концентрацию энергии излучения источников на зеркальной призме 1 [5, 7].



Рисунок 1.5 – Оптическая система прожектора на основе ПИД: 1 – зеркальная призма; 2, 3 – ПИД; 4 – генератор; 5, 6 – конденсоры; 7, 8 – зеркала; 9 – объектив

#### Приборы с ОРСЗ с амплитудно-фазовой модуляцией излучения

В приборах с амплитудно-фазовой модуляцией излучение двух пучков лучей модулируется в противофазе, например, либо по цепи питания источника, что удобно при использовании ПИД, либо путем модуляции механическими модуляторами-прерывателями, что используется при применении ламп накаливания.

Последний вариант применен в приборе ПУЛ-6. Схема прибора приведена на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Схема прибора ПУЛ – 6: I – прожектор; II – приемное устройство; III – блок обработки информации и индикации; IV – блок питания. 1 – зеркальная призма; 2 – лампа накаливания; 3, 4 – конденсоры; 5, 6, 7, 8 – зеркала; 9 – модулятор-прерыватель; 10 – двигатель; 11 – объектив; 12 – зеркало; 13, 15 – ПОИ; 14 – объектив; 15 – ПОИ; 16, 17 – усилители; 18 – мультипликатор; 19 – интегратор; 20 – амплитудно-фазовый детектор; 21 – отсчетное устройство

Прибор ПУЛ-6 состоит из прожектора **I**, приемного устройства **II**, блока обработки информации и индикации **III** и блока питания **IV**.

Прожектор I содержит зеркальную призму 1, лампу накаливания 2, конденсоры 3 и 4, зеркала 5, 6, 7, 8, модулятор-прерыватель 9, вращаемый двигателем 10, объектив 11, а также зеркало 12 и приемник оптического излучения (ПОИ) 13, которые образуют канал опорного сигнала.

Приемное устройство II содержит объектив 14 и ПОИ 15. Блок обработки информации и индикации III содержит усилители 16 и 17 опорного и основного каналов, мультипликатор 18 и интегратор 19, которые образуют амплитудно-фазовый детектор 20, а также отсчетное устройство 21.

Прибор работает следующим образом. Излучение от лампы накаливания 2 с помощью системы зеркал 5, 6, 7, 8 и конденсоров 3 и 4 направляется на зеркальные грани призмы 1.

Потоки излучения Ф' и Ф", проходящие через две ветви прожектора модулируются механическим модулятором-прерывателем 9 в противофазе (рис. 1.7 а, б).

Часть потока излучения Ф<sub>оп</sub> из одной ветви прожектора направляется зеркалом 12 на ПОИ 13 для формирования опорного сигнала (рис. 1.7, в).

Объектив 11 формирует пучок лучей с ОРСЗ и направляет его на приемное устройство **II**. Поток излучения, падающий на ПОИ 15, образуется потоками из обеих ветвей прожектора **I**, которые попадают во входной зрачок объектива 14. Соотношение потоков, идущих из указанных ветвей и попадающих во входной зрачок, определяется положением входного зрачка в направлении оси *y* (рис. 1.2), то есть входной зрачок выполняет функцию анализатора положения приемного устройства **II**.

Работа прибора поясняется временными диаграммами на рисунке 1.7, которые приведены для трех положений приемного устройства a, b, c (рис. 1.2): при нулевом смещении h=0 (положение a), при смещении вверх h>0 (положение b), при смещении вниз h<0 (положение c).

Если центр входного зрачка объектива 14 совпадает с ОРСЗ (*h*=0), то потоки излучения из обеих ветвей прожектора, попадающие во входной зрачок объектива 14, равны и переменная составляющая потока  $\Phi_{\Pi O U}$ , падающего на ПОИ 15, равна нулю (рис. 1.7, г).

Если центр входного зрачка объектива 14 смещен вверх относительно ОРСЗ (h>0), то поток излучения из нижней ветви прожектора ( $\Phi'$ ), падающий на ПОИ 15 увеличится, а поток излучения из верхней ветви прожектора ( $\Phi''$ ) уменьшится. В результате у потока излучения  $\Phi_{\Pi O U}$ , падающего на ПОИ 15 появляется переменная составляющая, совпадающая по фазе с потоком  $\Phi'(t)$  (рис. 1.7, г').

Амплитуда переменной составляющей потока возрастает с увеличением смещения *h*.



Рисунок 1.7 – Временные диаграммы сигналов прибора с ОРСЗ с амплитудно-фазовой модуляцией оптического излучения (ПУЛ – 6)

Если центр входного зрачка объектива 14 смещен вниз относительно OPC3 (h<0), то поток излучения из нижней ветви прожектора ( $\Phi'$ ), падающий на ПОИ 15, уменьшается, а поток излучения из верхней ветви прожектора ( $\Phi''$ ), падающий на ПОИ 15, увеличивается. В результате переменная составляющая потока излучения  $\Phi_{\Pi O H}$  совпадает по фазе с потоком  $\Phi''(t)$  (рис. 1.7,  $\Gamma''$ ,).

Следовательно, амплитуда переменной составляющей потока излучения  $\Phi_{\Pi O H}$  (рис. 1.7, г, г', г"), падающего на ПОИ 15, определяется величиной смещения, а фаза зависит от направления смещения.

ПОИ 15 преобразует оптический сигнал в электрический. Усилитель 17 выделяет переменную составляющую сигнала и усиливает ее. Вид сигнала  $U_c(t)$  на выходе усилителя 17 для трех положений приемного устройства показан на рис. 1.7, д, д', д".

Часть потока излучения  $\Phi_{on}$  из одной ветви прожектора направляется зеркалом 12 на ПОИ 13 для формирования опорного сигнала (рис. 1.7, в). Вид опорного сигнала  $U_{on}$  на опорном входе амплитудно-фазового детектора показан на рис. 1.7, е, е ', е ".

Сигналы  $U_{c}(t)$  и  $U_{on}(t)$  поступают на основной и опорный входы амплитудно-фазового детектора 20.

Идеально выполненный амплитудно-фазовый детектор формирует на выходе сигнал  $U_{oy}$  по следующему алгоритму, который является оптимальным по критерию максимума правдоподобия [4, 5, 7]:

$$U_{\text{oy}} = \frac{1}{e_0} \int_{o}^{T_{\text{H}}} [U_{\text{c}}(t)f(t)]dt$$
$$e_0 = \int_{o}^{T_{\text{H}}} [f(t)]^2 dt,$$

где  $e_0$  - удельная энергия сигнала за время измерения сигнала  $T_u$ ;  $f(t)=U_{on}(t)/U_{on}$  – нормированная функция модуляции сигнала.

Практически амплитудно-фазовые детекторы реализуют указанный алгоритм с той или иной погрешностью. В результате на выходе амплитудно-фазового детектора формируется постоянный сигнал  $U_{oy}$  (рис. 1.7, ж, ж', ж"), величина которого пропорциональна амплитуде входного сигнала  $U_c(t)$ , а знак определяется фазой входного сигнала. Далее сигнал  $U_{oy}$ , пропорциональный величине измеряемого смещения h, поступает на отсчетное устройство 21, с которого снимаются показания величины h.

Оптическая схема прожектора прибора ПУЛ-6 представлена на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8 – Оптическая схема прожектора ПУЛ-6

Оптическая система содержит источник излучения - лампу накаливания 1, трехлинзовый конденсор, состоящий из линз 2, 3, 10, зеркала 4 и 9, зеркальную призму 8, объектив 5, а также зеркало 6 и приемник оптического излучения 7 опорного канала. Особенностью оптической системы является вертикальная ориентация основных элементов (призмы 8 и объектива 5) по отношению к остальным элементам, расположенным в горизонтальной плоскости. В качестве объектива используется серийный объектив НАП-1 с фокусным расстоянием f=60 мм, корригированный для инфракрасной области спектра (от 0,8 до 1,1 мкм).

Электрическая схема прожектора прибора ПУЛ-6 представлена на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 – Электрическая схема прожектора ПУЛ-6

Электрическая схема амплитудно-фазового детектора представлена на рисунке 1.10. Амплитудно-фазовый детектор содержит трансформаторы основного и опорного каналов TV1 и TV2, два транзисторных ключа VT1– VT2 и VT3–VT4, интегрирующую цепочку R1–C2 (R1=1кОм, C2=100мкФ), резистор нагрузки R6, микроамперметр PA1 и два шунтирующих резистора R4 и R5.



Рисунок 1.10 – Электрическая схема амплитудно-фазового детектора

Опорный сигнал  $U_{on}(t)$  (см. рис. 1.7е) в положительные и отрицательные полупериоды поочередно замыкает и размыкает ключи VT1–VT2 и VT3–VT4, в результате чего на конденсаторе C2 образуется

постоянное напряжение, величина которого определяется амплитудой сигнала  $U_c$ , а знак определяется соотношением фаз сигналов  $U_c(t)$  и  $U_{on}(t)$ .

С помощью микроамперметра РА1 и делителя, состоящего из резисторов R6–R4(R5), измеряется напряжение на конденсаторе фильтра C2.

Переключатель SA1 обеспечивает выполнение измерений смещения приемного устройства, задаваемого микрометрическим винтом, в режимах "грубо" и "точно".

Конструкция приемного устройства ПУЛ-6 представлена на рисунке 1.11. Основой конструкции является корпус 6, в котором установлен двухлинзовый объектив 3, 4 и кремниевый фотодиод 12 в оправе 11, а также розетка разъема 19. Перед объективом установлена щелевая диафрагма 2.



Рисунок 1.11 – Конструкция приемного устройства прибора ПУЛ-6

#### Порядок выполнения лабораторной работы

Перед выполнением лабораторной работы следует внимательно ознакомиться с данным описанием.

1. Проведение измерений.

1.1. Включение прибора ПУЛ-6 и подготовка его к исследованию.

- 1.1.1. Проверить подключение приемного устройства II (рис. 1.12) к блоку обработки информации и индикации III с помощью кабеля 16 (разъем 11).
- 1.1.2. Проверить соединение кабелей 20 и 22 согласно схеме на рис. 1.12.
- 1.1.3. Установить переключатель диапазонов напряжений генератора сигналов 17 в положение 0,001. Установить значение частоты генератора *f*<sub>r</sub>=30 Гц.
- 1.1.4. Установить переключатель диапазонов измерения милливольтметра 18 в положение 3 мВ.
- 1.1.5. Установить переключатель диапазонов измерения милливольтметра 19 в положение 10 В.
- 1.1.6. Включить генератор сигналов 17.
- 1.1.7. Включить милливольтметры 18 и 19.
- 1.1.8. Установить значение напряжения генератора **17** U<sub>г</sub> =1 мВ по показанию милливольтметра 18. Указанное значение поддерживать постоянным в течение времени эксперимента.
- 1.1.9. Установить переключатель 9 блока обработки информации и индикации **III** в положение "**грубо**".
- 1.1.10. Установить микрометрический винт 7 механизма перемещения приемного устройства в положение "**60,00 мм**".

## Этот отсчет в дальнейшем полагать нулевым (0 мм).

- 1.1.11. Включить блок питания **IV** выключателем 12
- 1.1.12. Включить прожектор **I** выключателем 3.
- 1.1.13. Включить модулятор прожектора I выключателем 4.
- 1.1.14. Вывести светофильтр из пучка лучей прожектора I перемещением каретки 5.
- 1.1.15. Включить блок обработки информации и индикации **III** выключателем 8.
- 1.1.16. Установить нулевое значение показаний отсчетного устройства
   10 поворотом дифференциального винта 2, то есть поворотом прожектора I [5].



Рисунок 1.12 – Схема лабораторной установки

1.1.17. Установить переключатель 9 в положение "точно".

1.1.18. Проверить установку нулевого значения показаний отсчетного устройства 10. В случае отклонения показаний от нулевого значения установить нулевое значение поворотом дифференциального винта 2.

В результате выполнения перечисленных операций прибор ПУЛ-6 готов к исследованию. Нулевой отсчет по шкале отсчетного устройства 10 совпадает с нулевым отсчетом **(0 мм)** микрометрического винта 7.

<u>1.2. Определение нестабильности нулевого отсчета прибора за</u> первые 10 минут работы.

1.2.1. Снять отсчеты *I* выходного сигнала прибора ПУЛ-6 по показаниям отсчетного устройства 10 с интервалом в 2 минуты и внести их в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Нестабильность нулевого отсчета прибора

Время	<i>t</i> , мин	0	2	4	6	8	10
Показания	<i>I</i> , мкА						
Показания	<i>h</i> , мм						

Пересчет показаний в единицы измеряемой величины смещения *h* выполняется при обработке результатов согласно п. 2.4.

1.2.2. Установить приемное устройство в положение "0 мм" поворотом микрометрического винта 7.

<u>1.3. Исследование распределения освещенности в сечении пучка</u> лучей прожектора **I** в зависимости от расстояния до выходного зрачка.

- 1.3.1. Установить переключатель 9 в положение "грубо".
- 1.3.2. Ввести в ход лучей прожектора лист белой бумаги и, используя его в качестве экрана, наблюдать распределение освещенности в различных сечениях.

Обратить внимание на следующее:

 в сечениях, близких к выходному зрачку прожектора, распределение освещенности определяется формой выходного зрачка и имеет форму круга;

– в сечениях на расстоянии примерно 300 мм от выходного зрачка наблюдается два изображения нити накала лампы, образованные двумя каналами прожектора;

– в сечениях на расстоянии примерно 1200 мм отчетливо наблюдается изображение ребра зеркальной призмы 8 (рис. 1.8), в этом сечении чувствительность прибора максимальна.

<u>1.4. Определение статической характеристики прибора ПУЛ-6 в</u> режиме "**грубо**" [5, 8]. 1.4.1. Установить величины смещения *h* приемного устройства **II** в диапазоне от -5 мм до +5 мм с шагом 1 мм, снять отсчеты *I* по показаниям отсчетного устройства 10 и внести их в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Статическая характеристика прибора ПУЛ-6 в режиме "**грубо**"

P • · · · · ·		••										
Смещение	<i>h</i> , мм	- 5	- 4	- 3	- 2	- 1	0	1	2	3	4	5
Показания	<i>I</i> , мкА											

График статической характеристики прибора ПУЛ-6 построить при обработке результатов измерений, согласно п. 2.1.

1.4.2. Установить приемное устройство в положение "0 мм" поворотом микрометрического винта 7.

<u>1.5. Определение статической характеристики прибора ПУЛ-6 в</u> режиме "точно" [5, 8].

- 1.5.1. Перевести переключатель 9 в положение "точно".
- 1.5.2. Проверить установку нулевого положения прибора по показаниям отсчетного устройства 10.

При необходимости установить нулевое значение показаний отсчетного устройства 10 поворотом дифференциального винта 2.

1.5.3. Установить величины смещений  $h_j$  приемного устройства **II** в диапазоне от -0,5 мм до +0,5 мм с шагом 0,1 мм, снять отсчеты  $I_j$  по показаниям отсчетного устройства 10 и внести их в таблицу 1.3.

Таблица 1.3 – Статическая характеристика прибора ПУЛ-6

в режиме "	точно"											
Смещение	$h_{ m j}$ , мм	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
без светофи	льтра											
Показания	<i>I</i> ј, мкА											
Чувствитель	Sj,											
ность	мкА/мм											
со светофил	ьтром											
Показания	<i>I</i> ј, мкА											
Чувствитель	$S_{j}$ ,											
ность	мкА/мм											

1.5.4. Установить приемное устройство в положение "0 мм".

<u>1.6. Определение влияния пропускания оптической системы прибора</u> на его чувствительность.

1.6.1 Ввести в ход пучка лучей прожектора нейтральный светофильтр HC-1 перемещением каретки 5.

- 1.6.2. Проверить установку нулевого положения прибора по показаниям отсчетного устройства 10. При необходимости установить нулевое значение показаний отсчетного устройства 10 поворотом дифференциального винта 2.
- 1.6.3. Установить величины смещений  $h_j$  приемного устройства II в диапазоне от -0,5 мм до +0,5 мм с шагом 0,1 мм, снять отсчеты  $I_j$  и внести их в табл. 1.3.
- 1.6.4. Расчет значений чувствительности S<sub>j</sub> и  $\overline{S}$  выполнить при обработке результатов измерений согласно п. 2.2. и п. 2.3.
- 1.6.5. Установить приемное устройство в положение "0 мм".
- 1.6.6. Вывести светофильтр HC-1 из хода лучей прожектора перемещением каретки 5.
- 1.6.7. Установить нулевое значение показаний отсчетного устройства 10 поворотом дифференциального винта 2.

1.7. Измерение напряжения шумов прибора ПУЛ-6.

- 1.7.1. Установить величины смещения приемного устройства II h = -0,5 мм и h = +0,5 мм и снять отсчет напряжения сигнала  $U_c$  на выходе усилителя по показаниям милливольтметра 19 и отсчет  $I_{OY}$  по показаниям отсчетного устройства 10.
- 1.7.2. Выключить модулятор прожектора I выключателем 4 (с обратной стороны прожектора) и выждать время (около 3 минут) до полной остановки модулятора.
- 1.7.3. Снять отсчет напряжения шума  $U_{u\phi yc}$  по показаниям милливольтметра 19.
- 1.7.4. Выключить прожектор I выключателем 3 и снять отсчет напряжения шума темнового тока ПОИ и усилителя  $U_{u \, m \, yc}$  по показаниям милливольтметра 19.

1.7.5. Отсоединить вилку 11 кабеля 16 от блока обработки информации и индикации III и снять отсчет напряжения шума усилителя  $U_{uyc}$ .

Обработку результатов измерения выполнить согласно п. 2.6.

<u>1.8. Исследование амплитудно-частотной характеристики усилителя</u> <u>прибора ПУЛ-6.</u>

1.8.1. Выключить прибор ПУЛ-6 выключателем 8 и 12.

- 1.8.2. Проверить соединение кабелей 20 и 22 согласно схеме лабораторной установки на рисунке 1.12.
- 1.8.3. Установить переключатель диапазонов напряжений генератора сигналов 17 в положение 0,001 мВ. Установить значение частоты генератора *f*<sub>r</sub>=30 Гц.
- 1.8.4. Установить переключатель диапазонов измерения милливольтметра 18 в положение 3 мВ.

- 1.8.5. Установить переключатель диапазонов измерения милливольтметра 19 в положение 3 В.
- 1.8.6. Отключить кабель 11 от блока обработки информации и индикации. Подключить кабель 21 к вилке 11 разъема блока обработки информации и индикации **III**.
- 1.8.7. Включить блок питания прибора ПУЛ-6 и блок обработки информации выключателями 12 и 8.
- 1.8.8. Включить генератор сигналов 17.
- 1.8.9. Включить милливольтметры 18 и 19.
- 1.8.10.Установить значение напряжения генератора 17  $U_{\rm r} = 1$  мВ по показанию милливольтметра 18. Указанное значение поддерживать постоянным в течение времени эксперимента.
- 1.8.11.Установить значения частоты f<sub>г</sub> выходного сигнала генератора, указанные в таблице 1.4, и снять отсчеты напряжения U<sub>вых</sub> на выходе усилителя прибора ПУЛ-6 по показаниям милливольтметра 19. Внести отсчеты в таблицу 1.4.

Talarrea	1 /	A				
гаолица	1.4 - I	АМПЛИТУДН	но-частотная	характе	ристика	усилителя

$f_{\Gamma}$ , Гц	$U_{\rm вых j}$ , м ${ m B}$	$K_{\rm ycj}$	$f_{\scriptscriptstyle \Gamma}, \Gamma$ ц	<i>U</i> <sub>вых ј</sub> , мВ
50			1000	
100			1200	
150			1400	
200			1600	
300			1800	
400			2000	
500			3000	
600			5000	
700			20000	
800			100000	
900			200000	

Рассчитать значения коэффициента усиления  $K_{yc}$  и построить график амплитудно-частотной характеристики усилителя  $K_{yc}(f)$  согласно п. 2.5.

- 1.8.12. Установить переключатель диапазонов измерения милливольтметра 19 в положение 300 В.
- 1.8.13. Установить переключатель диапазонов измерения милливольтметра 18 в положение 300 В.
- 1.8.14. Выключить генератор сигналов 17 и милливольтметры 18 и 19.
- 1.8.15. Отсоединить кабель 21 генератора сигналов 17 от разъема 11 блока обработки информации и индикации **III**.
- 1.8.16. Подключить кабель 16 к вилке 11 разъема блока обработки информации и индикации **III**.

K<u>ycj</u>

1.9. Проверка пределов измерения и основной погрешности ПУЛ-6.

- 1.9.1. Установить приемное устройство **II** в положение "0 мм" (60,00 мм) поворотом микрометрического винта 7.
- 1.9.2. Включить прожектор I выключателем 3.
- 1.9.3. Включить модулятор прожектора I выключателем 4.
- 1.9.4. Проверить установку нулевого положения прибора ПУЛ-6 по показаниям отсчетного устройства 10.
- При необходимости установить нулевое значение показаний отсчетного устройства 10 поворотом дифференциального винта 2.
- 1.9.5. Выждать 10 минут.
- 1.9.6. Проверить установку нулевого положения прибора ПУЛ-6 по показаниям отсчетного устройства 10. При необходимости установить нулевое значение показаний отсчетного устройства 10 поворотом дифференциального винта 2.
- 1.9.7. Сместить приемное устройство **II** с помощью микрометрического винта 7 в положения, указанные в таблице 1.5, и снять отсчеты  $h'_{j,i}$  и  $h''_{j,i}$  по показаниям отсчетного устройства 10.

№№ точек	Смеще-	Показания отсчетного устройства, мм									
диа-	ние	1 - я	1 - я серия 2 - я серия 3 - я серия 4 - я серия 5 -								
пазона		$\rightarrow^*$	$\leftarrow^{**}$	$\rightarrow$	$\leftarrow$	$\rightarrow$	$\leftarrow$	$\rightarrow$	←	$\rightarrow$	$\leftarrow$
j	$h_{ m j,}$ мм	$h_{\rm j}$ ′ 1	$h_{j}''_{1}$	<i>h</i> <sub>j</sub> ′ <sub>2</sub>	$h_{j}''_{2}$	<i>h</i> <sub>j</sub> ′ 3	<i>h</i> <sub>j</sub> ″ <sub>3</sub>	$h_{ m j}$ ′ 4	$h_{\rm j}''_4$	hj′ 5	$h_{ m j}''_5$
1	-0,4										
2	-0,2										
3	0										
4	0,2										
5	0,4										

Таблица 1.5 – Экспериментальные данные

\*→ - Смещение приемного устройства вправо.

\*\* - Смещение приемного устройства влево.

Отсчеты снимать в единицах величин смещения h (в мм). При этом использовать градуировку шкалы отсчетного устройства, указанную в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Номинальная статическая характеристика прибора

Показания	<i>I</i> , мкА	-200	-160	-120	-80	-40	0	40	80	120	160	200
Показания	<i>h</i> , мм	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5

Выполнить n (n = 5) серий измерений. В каждой *i*-той серии отсчеты  $h'_{j,i}$  снимаются при медленном непрерывном смещении приемного устройства со стороны меньших значений, а отсчеты  $h''_{j,i}$  снимаются при медленном непрерывном смещении приемного устройства со стороны больших значений.

1.9.8. Обработать результаты измерений в соответствии с п. 2.5.

- 1.9.9. Установить приемное устройство **II** в положение "0 мм" поворотом микрометрического винта 7.
- 1.9.10. Выключить все выключатели прибора ПУЛ-6 (3, 8, 12), переключатель 9 перевести в положение "грубо".

#### 2. Порядок обработки результатов измерений.

2.1. <u>Построить графики статической характеристики прибора ПУЛ-6</u> <u>в режимах "грубо" и "точно" [5, 8]</u>.

2.1.1. Построить график статической характеристики  $I(h)_{\Gamma}$  в режиме "**грубо**" на основании результатов измерений, выполненных в соответствии с п. 1.4. (табл. 1.2).

Таблицу 1.2 и график *I*(*h*)<sub>г</sub> привести в отчете.

2.1.2. Построить график статической характеристики  $I(h)_{\rm T}$  в режиме "точно" на основании результатов измерений, выполненных в соответствии с п. 1.5. (табл. 1.3). График  $I(h)_{\rm T}$  привести в отчете.

<u>2.2. Рассчитать действительное значение чувствительности прибора</u> <u>ПУЛ-6.</u>

2.2.1. Рассчитать значение чувствительности прибора ПУЛ-6 на основании результатов измерений, выполненных согласно п. 1.5. для каждой *j*-й точки диапазона измерений, по формуле:

$$S_j = \frac{I_j}{h_j}.$$
(1.1)

Результаты расчетов внести в таблицу 1.3.

2.2.2. Рассчитать среднее значение чувствительности прибора ПУЛ-6 по формуле:

$$\overline{S} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^{n} S_j , \qquad (1.2)$$

где *п* - число отсчетов.

- 2.2.3. Сравнить действительное значение чувствительности  $\overline{S}$  с номинальным значением  $S_{\text{ном}} = 400$  мкА/мм (см. таблицу 1.6).
- 2.2.4. Определить составляющую погрешности прибора ПУЛ-6, обусловленную отклонением действительного значения  $\overline{S}$

чувствительности от номинального  $S_{\text{ном}}$  на краю диапазона измерений ( $h_{\text{max}}$ ), по формуле:

$$\Delta h = \frac{\overline{S} - S_{\text{HOM}}}{S_{\text{HOM}}} h_{\text{max}} \,. \tag{1.3}$$

2.2.5. Указать элементы прибора ПУЛ-6 и параметры элементов, нестабильность которых приводит к изменению чувствительности прибора, а также факторы, которые влияют на эти параметры. Внести их в таблицу 1.7., которую привести в отчете.

Таблица 1.7 – Источники изменения чувствительности прибора

№ п/п	Элементы	Параметры	Факторы

<u>2.3. На основании измерений, выполненных согласно п. 1.6.,</u> рассчитать значения чувствительности прибора при наличии светофильтра HC-1 по формулам: (1.1) и (1.2).

Результаты расчетов внести в таблицу 1.3., привести ее в отчете.

<u>2.4. Определить величину нестабильности нулевого отсчета прибора</u> ПУЛ-6 за первые 10 минут работы в единицах измеряемой величины *h*.

2.4.1. Рассчитать отклонения смещений *h* от нулевого значения на основании измерений, выполненных согласно п.1.2. (табл. 1.1), по формуле:

$$h = \frac{I}{S_{\text{HOM}}},\tag{1.4}$$

где *S*<sub>ном</sub>= 400 мкА/мм - номинальное значение чувствительности.

2.4.2. Определить максимальное значение отклонений  $h_{max}=max(h_k)$  и внести его в отчет.

Таблицу 1.1 привести в отчете.

2.4.3. Указать элементы прибора ПУЛ-6 и параметры элементов, нестабильность которых приводит к изменению нулевого отсчета прибора, а также факторы, которые вызывают указанную нестабильность. Внести их в таблицу 1.8, которую привести в отчете.

2.5. <u>Построить амплитудно-частотную характеристику усилителя</u> прибора ПУЛ-6 на основании измерений, выполненных согласно п. 1.8. (табл. 1.4).

2.5.1. Рассчитать коэффициент усиления усилителя по формуле:

$$K_{\rm yc_j} = \frac{U_{\rm Bbix_j}}{U_{\rm r}} \,. \tag{1.5}$$

Результаты расчетов внести в таблицу 1.4 и привести в отчете.

Таблица 1.8 – Источники нестабильности нулевого отсчета прибора

№ п/п	Элементы	Параметры	Факторы

2.5.2. Построить график амплитудно-частотной характеристики усилителя  $K_{yc}(f)$ .

2.6. <u>Определить параметры основной погрешности прибора ПУЛ-6</u> на основании измерений, выполненных согласно п.1.9 (табл. 1.5) [2, 8].

2.6.1. Определить реализации погрешностей Δ'<sub>*ji*</sub> и Δ''<sub>*ji*</sub> измерения в каждой *j*-й точке диапазона измерений для каждой *i*-й серии измерений по формулам:

$$\Delta'_{ji} = h'_{ji} - h_j, \Delta''_{ji} = h''_{ji} - h_j.$$
(1.6)

Результаты расчетов внести в таблицу 1.9.

Таблица 1.9 – Реализации погрешностей

		1										
NºNº	Сме-		Реализации погрешностей, мм									
точек	щение		Реализации погрешностей, мм									
j	$h_{j,}$ мм	$\Delta'_{j1}$	$\Delta_{j1}''$	$\Delta'_{j2}$	$\Delta_{j2}''$	$\Delta'_{j3}$	$\Delta_{j3}''$	$\Delta'_{j4}$	$\Delta_{j4}''$	$\Delta'_{j5}$	$\Delta_{j5}''$	
1												
2												
3												
4												
5												

2.6.2. Определить средние значения  $\overline{\Delta}'_{j}$  и  $\overline{\Delta}''_{j}$  погрешностей в каждой *j*-й точке диапазона по формулам:

$$\overline{\Delta}'_{j} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \Delta'_{ji} , \ \overline{\Delta}'_{j} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \Delta''_{ji} .$$
(1.7)

Результаты расчетов внести в таблицу 1.10.

2.6.3. Определить оценку  $\tilde{\Delta}_{SH}$  систематической составляющей  $\Delta_{S}$  основной погрешности в каждой точке  $h_j$  диапазона измерений по формуле:

$$\widetilde{\Delta}_{SH_j} = \frac{\overline{\Delta'}_j + \overline{\Delta''}_j}{2}.$$
(1.8)

Результаты расчетов внести в таблицу 1.10.

Определить максимальное значение систематической составляющей основной погрешности  $\tilde{\Delta}_{SH\,{
m max}}$  и внести его в протокол испытаний.

				Системати-	<u> </u>	CKO
№№ точек	Сме- щение, мм	Сре; знач погр нос м	днее ение оеш- сти, м	ческая составляющая основной погрешности, MM	Вариация показаний, мм	случайной составляющей основной погрешности, MM
j	$h_j$ '	$\overline{\Delta}'_{j}$	$\overline{\Delta}_{j}''$	$\widetilde{\Delta}_{\scriptscriptstyle SHj}$	${\widetilde H}_{oj}$	$ ilde{\sigma} { egin{bmatrix} {}^{o} \ \Delta_{H} \end{bmatrix}_{j} }$
1						
2						
3						
4						
5						

Таблица 1.10 – Составляющие основной погрешности

2.6.4. Определить оценку вариации показаний  $\tilde{H}_{0j}$  в каждой точке  $h_j$  диапазона измерений по формуле:

$$\widetilde{H}_{0j} = \left| \overline{\Delta}'_j - \overline{\Delta}''_j \right|. \tag{1.9}$$

Результаты расчетов внести в таблицу 1.10.

Определить максимальное значение вариации  ${ ilde H}_{0{
m max}}$  .

2.6.5. Определить оценку  $\tilde{\sigma} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta_H \end{bmatrix}_j$  среднего квадратического отклонения

случайной составляющей основной погрешности в каждой точке  $h_j$  диапазона измерений по формуле [8]:

$$\widetilde{\sigma}\begin{bmatrix}0\\\Delta H\end{bmatrix}_{j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\Delta'_{ji} - \overline{\Delta}'_{j})^{2} + \sum_{i=1}^{n} (\Delta''_{ji} - \overline{\Delta}''_{j})^{2}}{2 \cdot n - 1}}$$

Результаты расчетов внести в таблицу 1.10.

Определить максимальное значение  $\tilde{\sigma} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta_H \end{bmatrix}_{\max}$  среднего квадратического отклонения случайной составляющей основной погрешности.

- 2.6.6 Зафиксировать в отчете результаты определения максимальных значений составляющих основной погрешности измерения линейных смещений контролируемого объекта:
  - максимальное значение систематической составляющей основной погрешности  $\widetilde{\Delta}_{SH \max}$ , мм;

- максимальное значение вариации показаний  $\widetilde{H}_{0\max}$ , мм;
- максимальное значение среднего квадратического отклонения случайной составляющей основной погрешности  $\tilde{\sigma} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta_H \end{bmatrix}_{max}$ , мм.

#### Контрольные вопросы

- 1. Назначение и области применения оптико-электронных приборов, реализующих принцип формирования пучка лучей с ОРСЗ.
- 2. При каких условиях возможно измерение смещений объекта **Б** в направлениях, перпендикулярных оси *Oz*?
- 3. Принцип формирования пучка лучей с ОРСЗ. Возможные реализации оптической системы прожектора.
- 4. Приборы для контроля поперечных линейных смещений объектов на основе пучка лучей с ОРСЗ с амплитудно-фазовой модуляцией сигнала.
- 5. Источники погрешности в приборах с ОРСЗ с амплитудно-фазовой модуляцией сигнала.

Лабораторная работа №2. Прибор управления лучом ПУЛ-Н

# Цели работы:

- 1. Изучение теоретических основ построения и функционирования приборов с ОРСЗ с частотной модуляцией оптического излучения.
- 2. Изучение режимов работы и устройства прибора ПУЛ-Н.
- 3. Получение практических навыков работы с прибором ПУЛ-Н и исследования его основных метрологических параметров и характеристик.
- 4. Исследование источников и составляющих основной погрешности прибора ПУЛ-Н.

# Краткие теоретические сведения

Рассмотрим приборы с OPC3 с частотной модуляцией оптического сигнала. В указанных приборах излучение источников прожектора модулируется с различными частотами  $f_1$  и  $f_2$ .

Принцип построения оптической системы, конструктивное исполнение прожектора I и приемного устройства II при этом практически не изменяются (см. «Краткие теоретические сведения» к лабораторной работе №1). В блоке обработки информации выделяются сигналы с частотами  $f_1$  и  $f_2$  и определяется разность их амплитуд  $\Delta I$ , величина которой пропорциональна измеряемому смещению.

Достоинством частотной модуляции оптического сигнала является раздельное выполнение блока питания прожектора и блока обработки информации, а также возможность исключить электрическую связь между передающей и приемной частями прибора. По такой схеме построен прибор ПУЛ-Н. Схема прибора представлена на рисунке 2.1.

Основными конструктивными блоками прибора являются блок питания прожектора БПП, прожектор I, приемное устройство II, блок обработки информации БОИ. Блок питания прожектора БПП и прожектор I образуют передающую часть прибора, а приемное устройство II и блок обработки информации БОИ образуют приемную часть прибора [5, 7, 9].

Блок питания прожектора **БПП** содержит генератор Г, делители частоты Д1 и Д2, частотные фильтры Ф1 и Ф2, усилители У1 и У2.

Прожектор I содержит источники излучения (полупроводниковые излучающие диоды ПИД1 и ПИД2), конденсоры К1 и К2, две призмы АР-90<sup>0</sup> П1 и П2, призму П3, объектив ОБ1.

Приемное устройство **II** содержит инфракрасный фильтр ИКФ, объектив ОБ2, приемник оптического излучения ПОИ, предварительный усилитель ПУ.



Рисунок 2.1 – Схема прибора с ОРСЗ с частотной модуляцией оптического излучения

Блок обработки информации **БОИ** содержит усилитель У, активные фильтры АФ1 и АФ2, амплитудные детекторы В1 и В2, устройство сравнения УС, отсчетное устройство ОУ. Кроме того, прибор содержит блоки питания, устройства наведения, устройства крепления и другие элементы, не отмеченные на схеме.

Прибор работает следующим образом [4, 5]. Генератор Г формирует сигнал прямоугольной формы с частотой  $f_{\Gamma}$  ( $f_{\Gamma}$ =16 кГц). Делители частоты Д1 и Д2 делят частоту сигнала в соотношении 1:2,5 (например, на 10 и 4), что обеспечивает значения частот  $f_1$ =1600 Гц и  $f_2$ =4000 Гц. Такое соотношение частот  $f_1$  и  $f_2$  обеспечивает минимальное взаимное влияние кратных гармоник сигналов одного канала на работу второго.

Фильтры  $\Phi 1$  и  $\Phi 2$  выделяют первые гармоники сигналов  $f_1$  и  $f_2$ . Усилители У1 и У2 обеспечивают требуемый уровень сигналов, подаваемых на полупроводниковые излучающие диоды ПИД1 и ПИД2.

Конденсоры К1 и К2 проецируют излучение ПИД1 и ПИД2 на призму П3 (в приборе ПУЛ-Н увеличение конденсора составляет 2,5). Объектив ОБ1 формирует пучок лучей с ОРС3. Соотношение потоков излучения двух источников с частотами модуляции  $f_1$  и  $f_2$  соответственно, которые проходят через входной зрачок объектива ОБ2, определяется положением входного зрачка в направлении, перпендикулярном оптической оси прожектора (см. рис. 1.2).

Инфракрасный фильтр ИКФ уменьшает влияние фоновых, в том числе солнечных, засветок на режим работы ПОИ.

ПОИ преобразует оптический сигнал в электрический, который усиливается усилителями ПУ и У, и поступает на входы активных фильтров АФ1 и АФ2.

Фильтры АФ1 и АФ2 выделяют сигналы с частотами  $f_1$  и  $f_2$ , соответственно. Разность амплитуд этих сигналов определяется смещением приемного устройства **II** относительно ОРСЗ. Амплитудные детекторы В1 и В2 формируют на выходе постоянные токи  $I_1$  и  $I_2$ , величины которых пропорциональны амплитудам переменных сигналов на их входе.

Устройство сравнения УС формирует на выходе постоянный сигнал  $\Delta I$ , величина которого пропорциональна разности сигналов на его входе  $\Delta I = \kappa_1 (I_1 - I_2).$ 

Таким образом, величина сигнала на выходе устройства сравнения УС определяется величиной смещения приемного устройства **II** относительно ОРСЗ. В пределах малых смещений *h* имеет место прямая пропорциональная зависимость:  $\Delta I = \kappa \Delta h$ , где  $\kappa$  – коэффициент пропорциональности.

В этом случае шкала отсчетного устройства ОУ может быть отградуирована в единицах измеряемой величины – смещения *h*.

Общий вид системы ПУЛ-Н представлен на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Общий вид прибора ПУЛ-Н

Система ПУЛ-Н содержит прожектор 1, блок питания прожектора 2, блок аккумуляторов 3, теодолит 4, установленный на треноге 5, приемное устройство 6, блок обработки информации 7, блок аккумуляторов 8, соединительные кабели 9, 10, 11.

Прожектор 1 установлен на зрительной трубе теодолита 4 с помощью механизма задания уклона (на рисунке не показан).

Теодолит 4 обеспечивает установку оптической оси прожектора 1 в горизонтальной плоскости или с заданным уклоном. Уклон может быть задан также с помощью специального механизма задания уклона.

Наведение прожектора 1 на приемное устройство 6 осуществляется с помощью визира теодолита (грубо) и его зрительной трубы (точно).

Приемное устройство 6 содержит визир, обеспечивающий наведение приемного устройства 6 на прожектор 1.

Оптическая система прожектора ПУЛ-Н (рис. 2.3) содержит два полупроводниковых излучающих диода АЛ-107 Б (поз. 1), два конденсора (поз. 2 и 3) с увеличением 2.5, две призмы АР-90<sup>0</sup> (поз. 4), зеркальную призму (поз. 5) и трехлинзовый объектив (поз. 6, 7, 8).



Рисунок 2.3 – Оптическая схема прожектора ПУЛ–Н

Конструкция прожектора прибора ПУЛ-Н показана рисунке 2.4. Блок излучателей (поз. 1) и объектив (поз. 2) выполнены в виде сборочных единиц, устанавливаемых в корпусе (поз. 3).



Рисунок 2.4 – Конструкция прожектора ПУЛ-Н

Оптическая система приемного устройства (рис. 2.5) содержит инфракрасный светофильтр (поз. 3) и двухлинзовый объектив (поз. 1 и 2).



Рисунок 2.5 – Оптическая схема приёмного устройства ПУЛ-Н

Электрическая схема блока питания прожектора представлена на рисунке 2.6. Задающий генератор ЗГ собран на микросхеме A1 типа К155ЛАЗ и кварцевом резонаторе Z1.



Рисунок 2.6 – Электрическая схема блока питания прожектора ПУЛ-Н

Задающий генератор ЗГ представляет собой мультивибратор на основе двух логических элементов 2И-НЕ, два других логических элемента выполняют функции развязки и согласования. Вырабатываемые задающим генератором прямоугольные импульсы с частотой  $f_r=16$  кГц подаются на делители частоты Д1 и Д2.

Делитель частоты Д1, выполненный на основе микросхемы A2 типа K155ИE2, производит деление частоты на 10 и формирует импульсы прямоугольной формы с частотой  $f_1$ =1600 Гц и скважностью, равной двум.

Делитель частоты Д2 выполнен на основе микросхемы A3 типа K155TM2 и представляет собой два D-триггера, включенные
последовательно, в результате чего получено деление частоты задающего генератора на 4. Делитель Д2 формирует импульсы прямоугольной формы с частотой  $f_1$ =4000 Гц и скважностью равной 2.

Фильтры Ф1 и Ф2 выполнены на основе цепочек L1-C3 и L2-C4, соответственно. На выходе фильтров Ф1 и Ф2 формируются сигналы синусоидальной формы с частотами 1600 Гц и 4000 Гц соответственно.

Усилители У1 и У2 выполнены на основе составных транзисторов V1-V3 и V2-V4 соответственно. Они обеспечивают необходимую величину тока, подаваемого на полупроводниковые излучающие диоды типа АЛ-107 Б.

Светоизлучающий диод V5 служит для индикации наличия питающего напряжения 6В.

Электрическая схема предварительного усилителя прибора ПУЛ-Н представлена на рисунке 2.7.



ПУЛ-Н

Фотодиод VD1 типа ФД-9К включен в фотогальваническом режиме на сопротивление нагрузки R1, сигнал с которого подается на двухкаскадный усилитель напряжения, выполненный на микросхемах DA1 типа К284УД1Б и DA2 типа К140УД8Б.

### Порядок выполнения лабораторной работы

Перед выполнением лабораторной работы следует внимательно ознакомиться с ее описанием. Схема установки [5] приведена на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Схема лабораторной установки

1. Порядок проведения измерений.

1.1 Включение установки и подготовка ее к исследованию.

- 1.1.1. Включить блок питания Б5-8.
- 1.1.2. Нажав левую красную кнопку «ВКЛ» на лабораторном блоке, подать питание на него, при этом должна загореться лампочка «СЕТЬ».
- 1.1.3. Включить кнопку «ВКЛ Ф-У».
- 1.1.4. Включить кнопку «КЗ», при этом должна загореться лампочка «Л1».
- 1.1.5. Включить тумблеры «К1» и «К2».
- 1.1.6. Вращая микрометрический винт блока прожектора, добиться нулевого показания на микроамперметре 10.

1.2. Определение статической характеристики прибора ПУЛ-Н.

1.2.1. Вращая микрометрический винт 2 блока приемника, устанавливать показания микроамперметра 10, начиная с нулевого, согласно таблице 2.1.

Показания <i>I</i> , мкА	1	2	3	4	5	Среднее смещение <i>h<sub>cp</sub></i> , мм
-100						
-80						
-60						
-40						
-20						
0						
20						
40						
60						
80						
100						

Таблица 2.1 – Статическая характеристика прибора ПУЛ-Н

1.2.2. Для каждого значения тока снять по 5 значений смещения по шкале микрометрического винта.

<u>1.3.</u> Исследование амплитудно-частотных характеристик активных фильтров прибора ПУЛ-Н.

- 1.3.1. Включить питание генератора 17.
- 1.3.2. Включить питание милливольтметра 18.
- 1.3.3. Выключить тумблеры К1 и К2 (тумблеры в нижнем положении).
- 1.3.4. Подключить кабель 13 к выходу лабораторного блока Р2.
- 1.3.5. Установить переключатель диапазонов напряжения генератора сигналов 17 «предел шкалы» в положение 1В.
- 1.3.6. Установить переключатель диапазона измерений милливольтметра 18 в положение 100 мВ.

- 1.3.6. Установить значение напряжения генератора 17 U<sub>г</sub> = 0,7 В по показанию вольтметра генератора вращением ручки «рег.вых.». Поддерживать это значение постоянным в течение всего времени измерения.
- 1.3.7. Подключить кабель 14 милливольтметра 18 к выходу лабораторного блока Р1.
- 1.3.8. Установить значение частоты f<sub>г</sub> выходного сигнала генератора, указанное в таблице 2.2, и снять отсчеты напряжений U<sub>вых</sub> на выходе усилителя прибора ПУЛ-Н по показаниям милливольтметра 18.
- 1.3.9. Рассчитать значения коэффициента усиления  $K_{yc}=U_{Bbix}/U_{r}$  и построить график амплитудно-частотной характеристики  $K_{yc}(f)$ .

		11	-			
$f_{\Gamma}$ , Гц	$U_{\scriptscriptstyle  m B bix}$ , м $ m B$	$K_{ m yc}$		$f_{ m r}$ , Гц	$U_{ m bbix}$ , м ${ m B}$	$K_{ m yc}$
250				2 000		
500				2 200		
800				2 500		
1 200				3 000		
1 400				3 400		
1 500				3 700		
1 600				3 900		
1 700				4 100		
1 800				4 300		
1 900				4 600		
2 000				5 000		
2 200				6 000		
2 500				7 000		
3 000				8 000		
3 500				9 000		
4 000				10 000		
6 000				16 000		

Таблица 2.2 – Амплитудно-частотные характеристики активных фильтров

- 1.3.10. Подключить кабель 14 милливольтметра 18 к выходу лабораторного блока РЗ.
- 1.3.11. Установить значение частоты f<sub>г</sub> выходного сигнала генератора, указанное в таблице 2.2, и снять отсчеты напряжений U<sub>вых</sub> на выходе усилителя прибора ПУЛ-Н по показаниям милливольтметра 18.
- 1.3.12. Рассчитать значения коэффициента усиления  $K_{yc} = U_{Bbix} / U_{\Gamma}$  и построить амплитудно-частотную характеристику  $K_{yc}(f)$ .
- 1.3.13. Установить переключатель диапазонов измерения милливольтметра 18 в положение 300 В.

1.4. Выключение установки

- 1.4.1. Вращая микрометрический винт блока прожектора, установить показание микроамперметра 10 «РАВНОСИГНАЛЬНАЯ ЗОНА» в нулевое положение.
- 1.4.2. Выключить тумблеры «К1» и «К2».
- 1.4.3. Выключить кнопку «КЗ», при этом должна погаснуть лампочка «Л1».
- 1.4.4. Выключить кнопку «ВКЛ Ф-У», при этом должна погаснуть лампочка «Ф-У».
- 1.4.5. Выключить кнопку «ВКЛ», при этом должна погаснуть лампочка «СЕТЬ».
- 1.4.6. Выключить блок питания Б5-8.

### 2. Порядок обработки результатов измерений

1) При построении статической характеристики I(h) прибора необходимо учесть, что полученные в таблице 2.1 значения смещений приемного устройства содержат неизбежные погрешности. Поэтому необходимо прибегнуть к такому способу построения приближенного многочлена, при котором ошибки эксперимента не оказывали бы существенного влияния на результат. Для этого используется расчет погрешности на основе метода наименьших квадратов [8, 10].

2) Необходимо определить некоторый многочлен вида  $P_m(h) = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + ... + a_m h^m$ , который достаточно точно представляет искомую функцию I(h). В данной лабораторной работе рекомендуется использовать линейный многочлен вида  $P_m(h) = a_0 + a_1 h$ ; m = 1.

3) Составить систему уравнений, используя формулу

$$\sum_{i=0}^{n} \left[ I_i - a_0 - a_1 h_i - \ldots - a_m (h_i)^m \right] \times (h_i)^k = 0,$$

где k – степень многочлена,  $a_0$ ,  $a_1$  – коэффициенты искомого многочлена. Поскольку  $P_m(h) = a_0 + a_1 h$  – линейный многочлен, то k = 0, 1.

Пример составления системы уравнений:

- a)  $(I_1 a_0 a_1 h_1) + (I_2 a_0 a_1 h_2) + \dots (I_{11} a_0 a_1 h_{11}) = 0$
- b)  $(I_1-a_0-a_1h_1)h_1+(I_2-a_0-a_1h_2)h_2+\dots(I_{11}-a_0-a_1h_{11})h_{11}=0$

4) Решить систему уравнений относительно значений коэффициентов *a*<sub>0</sub>, *a*<sub>1</sub>. Записать найденный линейный многочлен *P<sub>m</sub>*(*h*).

5) На координатной плоскости изобразить полученные экспериментально точки статической характеристики *I*(*h*) и график аппроксимирующей функции *P<sub>m</sub>*(*h*).

### Пример расчета

В таблице 2.3 приведен пример экспериментальных данных, на основе которых рассчитываем средние значения смещения приемного устройства для каждого значения тока.

п	Среднее	1	2		4	~
Показания	смещение,	1	2	3	4	5
	$h_{cp}$ , MM					
-100	-0,6	-0,62	-0,6	-0,58	-0,59	-0,61
-80	-0,49	-0,47	-0,51	-0,49	-0,48	-0,5
-60	-0,37	-0,36	-0,37	-0,38	-0,35	-0,39
-40	-0,26	-0,25	-0,27	-0,26	-0,24	-0,28
-20	-0,11	-0,11	-0,1	-0,12	-0,13	-0,09
0	0	-0,01	0,02	0,03	0	-0,04
20	0,12	0,13	0,11	0,12	0,14	0,1
40	0,25	0,25	0,24	0,26	0,23	0,27
60	0,4	0,39	0,41	0,38	0,42	0,4
80	0,54	0,54	0,55	0,56	0,52	0,53
100	0,68	0,66	0,7	0,68	0,67	0,69

Таблица 2.3 – Экспериментальные данные примера расчета

Используя рассчитанные средние значения  $h_{cp}$  из таблицы 2.3, составляем систему уравнений:

$$\begin{aligned} (-100 - \alpha_0 - (-0, 6) \cdot \alpha_1) + (-80 - \alpha_0 - (-0, 49) \cdot \alpha_1) + \\ + (-60 - \alpha_0 - (-0, 37) \cdot \alpha_1) + (-40 - \alpha_0 - (-0, 26) \cdot \alpha_1) + \\ + (-20 - \alpha_0 - (-0, 11) \cdot \alpha_1) + (0 - \alpha_0 - 0 \cdot \alpha_1) + \\ + (20 - \alpha_0 - 0, 12 \cdot \alpha_1) + (40 - \alpha_0 - 0, 25 \cdot \alpha_1) + \\ + (60 - \alpha_0 - 0, 4 \cdot \alpha_1) + (80 - \alpha_0 - 0, 54 \cdot \alpha_1) + (100 - \alpha_0 - 0, 68 \cdot \alpha_1) = 0 \end{aligned}$$
$$(-100 - \alpha_0 - (-0, 6) \cdot \alpha_1)(-0, 6) + (-80 - \alpha_0 - (-0, 49) \cdot \alpha_1)(-0, 49) + \\ + (-60 - \alpha_0 - (-0, 37) \cdot \alpha_1)(-0, 37) + (-40 - \alpha_0 - (-0, 26) \cdot \alpha_1)(-0, 26) + \\ + (-20 - \alpha_0 - (-0, 11) \cdot \alpha_1)(-0, 11) + (20 - \alpha_0 - 0, 12 \cdot \alpha_1)(0, 12) + \\ + (40 - \alpha_0 - 0, 25 \cdot \alpha_1)(0, 25) + (60 - \alpha_0 - 0, 4 \cdot \alpha_1)(0, 4) + \\ + (80 - \alpha_0 - 0, 54 \cdot \alpha_1)(0, 54) + (100 - \alpha_0 - 0, 68 \cdot \alpha_1)(0, 68) = 0 \end{aligned}$$

Упростив и решив систему уравнений, находим значения коэффициентов линейного многочлена  $a_0$  и  $a_1$ :  $a_1$ =155,99 и  $a_0$ = -2,27.

Строим график функции: *Р<sub>m</sub>*(*h*)=155,99·*h*-2,27 (рис. 2.9).



Рисунок 2.9. – Пример построения графика

Среди полученных смещений устанавливаем такое, которое реализует минимум величины *h*:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{n+1}\sum_{i=0}^n \left(h_i - h_{cp}\right)^2},$$

называемое средним квадратическим отклонением смещения h от среднего значения  $h_{cp}$ .

Пример расчета  $\sigma_n$  для первой строки таблицы:

$$\sigma_{n1} = \sqrt{\frac{1}{5+1}} \Big[ (-0,62+0,6)^2 + (-0,6+0,6)^2 + (-0,58+0,6)^2 + (-0,59+0,6)^2 + (-0,61+0,6)^2 \Big]$$
  
$$\sigma_{n1} = 0,013$$

Аналогично

получаем:

 $\sigma_{n2} = \sigma_{n3} = \sigma_{n4} = \sigma_{n5} = \sigma_{n7} = \sigma_{n8} = \sigma_{n9} = \sigma_{n10} = \sigma_{n11} = 0,013$ , а  $\sigma_{n6} = 0,022$ . Значения  $\sigma_n$  не всегда совпадают.

### Контрольные вопросы

- 1. ОЭП контроля поперечных линейных смещений объектов на основе пучка лучей с ОРСЗ. ОЭП с частотной модуляцией сигнала.
- 2. Источники погрешности в ОЭП с ОРСЗ с частотной модуляцией сигнала.
- Сравните схемы реализации приборов управления лучом с амплитудно-фазовой и частотной модуляцией излучения. Сформулируйте преимущества и недостатки каждой из них.

# Лабораторная работа №3. Эллипсометр ЛЭФ-3М-1

### Цели работы:

- 1. Изучение принципа действия поляризационных приборов на основе компенсационной схемы измерения.
- 2. Изучение принципа действия и устройства лазерного фотоэлектрического эллипсометра ЛЭФ-3М-1.
- 3. Изучение методики выполнения измерений на эллипсометре.
- 4. Получение практических навыков определения оптических констант отражающих материалов, толщин, оптических постоянных поверхностных пленок с использованием эллипсометрического метода измерения.

### Краткие теоретические сведения

Лазерный фотоэлектрический эллипсометр ЛЭФ-3М-1 предназначен измерения оптических констант и толщин материалов и сред для посредством фиксации изменений состоянии поляризации В монохроматического излучения, возникающих В результате взаимодействия его с исследуемым образцом. Эллипсометр построен по схеме PCSA (polarizer-compensator-sample-analyzer), рабочая длина волны излучения лазера λ=0,6328 мкм [11, 12, 13].

Измерительный поляризационный прибор имеет ручное управление и визуальный отсчет азимутальных углов оптических элементов (поляризатора, компенсатора и анализатора).

Поляризатором и анализатором в эллипсометре служат призмы Глана из исландского шпата, компенсатором – хроматическая четвертьволновая пластинка из кристаллического кварца.

### Структурная схема эллипсометра

Структурная схема эллипсометра ЛЭФ-3М-1 представлена на рисунке 3.1 [5, 14]. Эллипсометр состоит из следующих функционально связанных блоков: плеча поляризатора (1-9), плеча анализатора (11-18), электронного блока обработки (ЭБО), предметного столика 10, а также механического устройства поворота плеч 19 с отсчетным устройством 20 угла падения.

Устройство поворота плеч поляризатора и анализатора 19 позволяет изменять угол падения излучения на измеряемый образец в пределах от 45° до 90°. С помощью отсчетного устройства 20 определяется угол падения светового пучка на образец.



Рисунок 3.1 – Структурная схема эллипсометра ЛЭФ-3М-1

Плечо поляризатора состоит из источника излучения 1 (серийный гелий-неоновый лазер ЛГН-207Б ОДО.397.255ТУ), поворотных зеркал 2, 3, 4, механического модулятора света 5, двух пластинок  $\lambda/4$  6, 7, поляризатора 8, компенсатора 9. Кроме использования штатного источника излучения, в эллипсометре предусмотрен ввод излучения внешнего источника «И.Н.» с соответствующей мощностью, длиной волны и допуском на угловую расходимость. В этом случае необходимо воспользоваться ручкой переключателя источника.

Пройдя плечо поляризатора, световой пучок падает на исследуемый образец, расположенный на поверхности столика 10. Отразившись от поверхности образца, он поступает в плечо анализатора.

Плечо анализатора состоит из анализатора 11, поворотных зеркал 12, 13, 14, зеркальной диафрагмы 16, затвора 17 и фотоприемного устройства (ФЭУ-84-3 ОДО.335.664 ТУ) 18. Фотоприемное устройство служит для преобразования модулированного светового потока на выходе оптической системы в электрический сигнал. Зеркальная диафрагма выводит изображение падающего на него светового пучка в центр перекрестия экрана 15. Предусмотрена возможность использования дополнительного фотоприемника «П.Н.», который крепится вместо крышки на боковой поверхности плеча анализатора. При этом зеркало переключают ручкой переключателя фотоприемника, расположенной на передней панели прибора.

В состав электронного блока обработки входят следующие основные компоненты: синхронный детектор 21, регулятор 23, источник питания 25, стабилизатор высоковольтного преобразователя 24 и нуль-индикатор 22.

ЭБО предназначен для автоматической регулировки усиления (АРУ) фотосигнала и синхронного детектирования сигнала, а также для питания модулятора, фотоприемного устройства и ламп подсвета шкал отсчетных устройств.

Источник питания, входящий в состав ЭБО, преобразует переменное напряжение электросети (220В) в ряд переменных и постоянных напряжений, используемых для питания электронных схем внутри блока, а также модулятора, фотоприемника и ламп освещения шкал отсчетных устройств.

При кратковременно нажатой кнопке «АРУ» на передней панели ЭБО (рис. 3.2) напряжение  $U_{\rm np}$  постепенно нарастает, пока выходной сигнал  $U_{\rm CD}$  не достигает уровня  $U_{\rm H}$ , соответствующего начальному отклонению стрелки индикатора (0,5 .... 0,7 от шкалы), после чего рост  $U_{\rm np}$ прекращается, и усиление фиксируется на достигнутом значении.

При повторных нажатиях кнопки после настройки оптической системы по минимуму показаний нуль-индикатора описанный процесс повторяется, пока напряжение питания ФЭУ не достигнет максимума, установленного при настройке блока.

Включение АРУ при зашкаливании нуль-индикатора приводит к снижению усиления и также устанавливает стрелку нуль-индикатора в начальное положение. Выключение питания ФЭУ по окончании очередного измерения производится путем установки счетчика на нуль сигналом сброса от кнопки «СБРОС» [13].

Кроме кнопки «АРУ» и «СБРОС» (см. рис. 3.2) на передней панели блока расположены кнопочный выключатель сети «СЕТЬ», переключатели постоянной времени синхронного детектора «Т1» и «Т2», и три кнопки включения ламп освещения шкал угломерных устройств, отмеченные символами «А», «Р», «УГОЛ».



Рисунок 3.2 – Передняя панель электронного блока обработки

### Принцип действия прибора

В основу принципа действия эллипсометра положен «нулевой» оптический метод, который предусматривает в данном случае достижение минимальной интенсивности пучка света на выходе анализатора путем поочередных поворотов поляризатора и анализатора [12, 13]. Угловое положение компенсатора при измерениях фиксируется так, чтобы его «быстрая» ось находилась под углом +45<sup>0</sup> или под углом -45<sup>0</sup> к плоскости падения пучка света на образец.

В каждом фиксированном рабочем положении компенсатора можно выявить две независимые комбинации угловых положений поляризатора и анализатора, при которых может быть достигнута минимальная интенсивность пучка света на выходе анализатора. Еще две комбинации можно выявить при повороте на  $180^{\circ}$  поляризатора и анализатора. Таким образом, для четырех положений компенсатора таких комбинаций 16. Из них независимыми являются четыре, что и обусловливает формирование четырех измерительных зон (i = 1, 2, 3, 4).

Номер измерительной зоны определяется угловым положением компенсатора и анализатора, т.е. значениями С и А, соответственно.

Для определения номера измерительной зоны, к которой относятся получаемые результаты измерений, необходимо выполнить анализ этих результатов с помощью рисунка 3.3.

На рисунке 3.3 представлены изображения лимба поляризатора 1, анализатора выбранным положительным компенсатора 2 3 с И обозначены направлением ИХ вращения, на которых значения юстировочных параметров поляризационных элементов оптической схемы  $P_{o}$ ,  $C_{o}$ ,  $A_{o}$ , а также с учетом поворота элементов  $P_{o}$ +180°,  $C_{o}$ +45°,  $C_{o}$ -45°,  $A_{o}$ -90°,  $A_{o}$ -180°.

Положению  $C=C_{o}+45^{\circ}$  соответствует поворот «быстрой» оси компенсатора по часовой стрелке на 45°, а положению  $C=C_{o}-45^{\circ}$  соответствует поворот «быстрой» оси компенсатора против часовой стрелки на 45° [11, 13].



Рисунок 3.3 – Схематическое изображение лимбов: 1) – поляризатора; 2) – компенсатора; 3) - анализатора

Если компенсатор установлен в положении  $C=C_0+45^\circ$ , то при значениях A, соответствующих первой и третьей четверти изображения лимба, измерение относят к первой зоне. При значениях A, соответствующих второй и четвертой четверти изображения лимба, измерение относят ко второй зоне.

Если компенсатор установлен в положении  $C=C_o - 45^\circ$ , то при значениях A, соответствующих первой и третьей четверти изображения лимба, измерение относят к третьей зоне. При значениях A, соответствующих второй и четвертой четверти изображения лимба, измерение относят к четвертой зоне.

В соответствии с номером измерительной зоны, для расчета значений поляризационного угла  $\Delta$  применяется одна из формул:

$$\psi_1 = \psi_A^{(1)}, \qquad \Delta_1 = -2\gamma_p^{(1)} - \frac{\pi}{2} + 2\pi l \qquad \text{в первой зоне}$$
(3.1)

$$\psi_2 = \psi_A^{(2)}, \qquad \Delta_2 = -2\gamma_p^{(2)} + \frac{\pi}{2} + 2\pi l$$
 во второй зоне (3.2)

$$\psi_3 = \psi_A^{(3)}, \qquad \Delta_3 = 2\gamma_p^{(3)} + \frac{\pi}{2} + 2\pi l$$
 в третьей зоне (3.3)

$$\psi_4 = \psi_A^{(4)}, \qquad \Delta_4 = 2\gamma_p^{(4)} - \frac{\pi}{2} + 2\pi l$$
 в четвертой зоне, (3.4)

где  $\gamma_{P}^{(i)} = P_i - P_o$ , а значения поляризационного угла  $\psi_A^{(i)}$  рассчитываются из соотношений  $\psi_A^{(i)} = |A_i - (A_o + 90^o)|$ .

Юстировочные параметры и положение «быстрой» оси компенсатора определяются при запуске прибора в эксплуатацию, то есть считаются известными.

### Функционирование прибора

Эллипсометр работает следующим образом (см. рис. 3.1). Источник излучения 1 генерирует световой пучок, который модулируется по интенсивности модулятором 5 и направляется на образец под заданным углом є к отражающей поверхности образца. Пройдя оптические элементы плеча поляризатора, пучок отражается от образца, а затем попадает в плечо анализатора. В плече анализатора пучок света попадает на переключатель, который направляет его либо на экран 15, либо на фотоприемник 18 (после предварительного гашения на экране для предотвращения засветки фотоприемника световым потоком большой интенсивности) [13, 14].

В фотоприемнике световой поток преобразуется в электрический сигнал. Так как минимальная интенсивность светового потока очень мала (минимальный полезный сигнал гораздо меньше собственных шумов фотоприемного устройства), для выделения такого сигнала применена модуляция (прерывание) светового потока с помощью механического модулятора, что создает переменную составляющую в выходном напряжении фотоприемного устройства, которая совпадает по фазе с опорным напряжением [15].

Опорное напряжение вырабатывается датчиком опорного напряжения, установленном в узле модулятора. Синфазность выходного сигнала с опорным напряжением является отличительным признаком полезного сигнала, по которому он выделяется из шумов и помех с помощью синхронного детектирования в ЭБО.

Переменная составляющая выходного напряжения фотоприемника в электронном блоке детектируется синхронным детектором 21. Выходное напряжение синхронного детектора, пропорциональное интенсивности светового потока, поступает на нуль-индикатор 22, по минимуму

отклонения которого оператор определяет положение настройки поляризационных элементов эллипсометра.

Поляризационная оптика эллипсометра придает пучку света на отдельных отрезках определенное состояние поляризации. Первая четвертьволновая пластинка 6 устраняет эллиптичность поляризации пучка, которая в небольшой степени имеет место на выходе трубки лазера и в результате отражений от поворотных зеркал 2, 3, 4 в плече поляризатора.

Вторая четвертьволновая пластинка 7 установлена своими осями под углом в 45° к плоскости поляризации входящего пучка света. После прохождения четвертьволновой пластинки световой пучок приобретает круговую поляризацию. Этим самым обеспечивается неизменность интенсивности пучка света для всех рабочих угловых положений поляризатора [11, 12, 14].

Поляризатор 8 формирует линейную поляризацию пучка света с азимутальными углами в пределах от 0 до 180°. Когда плоскость поляризации падающего на образец пучка света совпадает с азимутами осей компенсатора 9, то на его выходе получается линейная поляризация. Если плоскость поляризации находится под углами ±45° к этим осям, то на выходе компенсатора имеет место круговая поляризация. При других значениях азимута плоскости поляризации излучения на выходе поляризатора компенсатор превращает линейную поляризацию падающего на него пучка света в эллиптическую в соответствии с ориентацией оси поляризатора.

При отражении света от поверхности образца состояние его поляризации в общем случае изменяется. Если поляризатор установлен в положение, соответствующее минимальной интенсивности пучка света, падающего на фотоприемник, то отраженный от образца пучок света имеет *линейную* поляризацию. Азимут этой поляризации определяет угловое положение анализатора 11, которое соответствует минимальной интенсивности пучка света на выходе системы. При этом плоскость максимального пропускания анализатора находится под прямым углом к плоскости линейной поляризации отраженного от образца пучка света. Таким образом, перед считыванием значений *P* и *A* сигнал на фотоприемном устройстве практически равен нулю.

Установка таких состояний в каждой измерительной зоне достигается с помощью фотоприемного устройства, электронного блока и стрелочного нуль-индикатора. Итак, процесс каждого измерения на приборе состоит из двух этапов [5, 13, 14]:

1) вывод световой информации на экран и визуальное гашение светового пучка;

2) измерение ослабленного светового сигнала с помощью фотоприемного устройства для точного определения положений гашения.

### Порядок выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть работы.

2. Получить у преподавателя исследуемый образец.

3. Произвести подготовку к измерениям.

4. Измерить азимутальные углы поляризации А и Р.

5. Определить номер измерительной зоны и выполнить расчет поляризационных углов Δ и ψ.

6. Обработать экспериментальные данные при помощи компьютерной программы *ELLIPS*.

### Проведение измерений на эллипсометре

Для исследуемой отражающей поверхности существует бесконечное множество значений азимутов поляризатора, анализатора и компенсатора, при которых достигается гашение света на выходе оптической схемы эллипсометра. Поэтому правильное определение поляризационных углов по полученным значениям азимутов указанных оптических элементов – задача сложная, требующая знания методики выполнения измерений и ее строгого соблюдения [14].

### Подготовка к измерениям

1. Ознакомиться с данными методическими указаниями для выполнения измерений на эллипсометре.

2. Ознакомиться со схемой прибора и уяснить назначение органов управления элементами схемы.

3. Проверить переключателей положение ручек светового сигнала, которые находиться В исходных должны положениях, обеспечивающих работу эллипсометра со штатным источником излучения и со штатным фотоприемником с визуальной индикацией светового пучка на экране:

- ручка переключателя источника в положении «ИВ» (горизонтально);
- ручка переключателя индикации в положении «+» (вертикально);
- ручка переключателя приемника в положении «ПВ» (горизонтально).

4. Подключить сетевой шнур электронного блока эллипсометра к сети и подать напряжение. Включить ЭБО нажатием кнопки «СЕТЬ». При этом загорится лампа подсветки шкалы индикатора интенсивности пучка света, на предметном столике появится световое пятно лазера.

5. Расположить на предметном столике исследуемый образец так, чтобы световое пятно пучка света попало на измеряемую площадку. При необходимости повернуть столик вокруг своей оси или сдвинуть

микровинтами в горизонтальной плоскости.

6. Установить заданный угол падения пучка на образец путем вращения маховика с ручкой в ту или иную сторону. Для удобства в этом и в последующих разделах будем обозначать угол падения  $\varphi_0$ . Угол разворота плеч ( $2\varphi_0$ ) необходимо контролировать по показаниям угломерного устройства на экране после включения лампы подсветки кнопкой «УГОЛ». Установку заданного угла  $2\varphi_0$  завершить поворотом маховика с ручкой по часовой стрелке, чтобы исключить «зависание» плеч относительно поворотного механизма.

Отьюстировать 7. окончательно положение отражающей поверхности образца и добиться попадания отраженного от образца светового пучка через центр диафрагмы плеча анализатора в перекрестие экрана. Для этого изменить положение отражающей поверхности образца покачивания верхней относительно горизонта путем площадки предметного столика или путем опускания (подъема) кронштейна предметного столика. Если интенсивность светового пятна на экране окажется недостаточной, увеличить ее путем поворота одного из рабочих элементов эллипсометра на небольшой (10-20°) угол.

## Поиск минимума сигнала с помощью фотоприемного устройства

1. Переключить световой пучок на ФЭУ поворотом ручки переключателя индикации в горизонтальное положение «–».

Ручка переключателя Внимание! индикации переводится В горизонтальное положение только на время использования фотоприемного устройства с нуль-индикатором, то есть при необходимости точного определения угловых положений рабочих элементов эллипсометра, соответствующих минимальной интенсивности пучка света. Эта операция должна проводиться после предварительного гашения светового пучка на экране с визуальным контролем. Невыполнение этого требования может привести к неоправданно большой засветке фотокатода ФЭУ И чрезмерному току ФЭУ, что отрицательно отразится на работоспособности устройства в целом [13].

2. Включить автоматическую регулировку усиления фотоприемного устройства нажатием кнопки «АРУ» на время, необходимое для увеличения сигнала до необходимого уровня или до уровня, составляющего примерно 0,6 от максимального значения показания шкалы нуль-индикатора. Во втором случае АРУ отключается автоматически.

Результат поиска минимума светового сигнала считается удовлетворительным, если при достижении предельного коэффициента усиления фотометрического устройства сигнал на нуль-индикаторе не превышает 10% от максимального значения шкалы. Большие сигналы на

нуль-индикаторе указывают на несовершенство отражающей поверхности образца.

3. По завершении поиска минимума светового сигнала выключить питание ФЭУ кнопки «СБРОС», нажатием ручку а переключателя индикации установить в вертикальное положение «+».

# Процедура измерений [13]

1. Исследуемый образец положить на предметный столик 2 (рис. 3.4.).

2. Вращая маховик с ручкой 17 по часовой стрелке, установить по экрану 13 заданный угол падения света  $\phi_{01}=60^\circ$  и  $\phi_{02}=70^\circ$ . Подсветка экрана осуществляется при нажатии кнопки «УГОЛ» (рис 3.4).

3. Путем поворота юстировочных винтов предметного столика (рис 3.5) добиться попадания отраженного светового пучка в трубу анализатора так, чтобы отраженный от образца световой луч попал в центр сетки зеркальной диафрагмы. Для контроля по экрану 14 с перекрестием в центре повернуть ручку переключателя 1 в положение ПВ (рис. 3.6, (2)).

4. Установить ручкой 6 (рис.3.6, (1)) компенсатор в положение, которое определяется в соответствии с формулой  $C = C_0 + 45^\circ = 126^\circ 54'$ . Контролировать по экрану 7. Подсветку включать при помощи кнопки Р.

5. Поворотом анализатора ручкой 5 (рис. 3.6, (2)) и поляризатора ручкой 4 (рис 3.6, (1)) добиться минимальной интенсивности пучка света (гашения) на зеркальной диафрагме, контролируя уменьшение светового пятна по экрану 14 (см. рис.3.4). При этом ручка переключателя индикации 2 находится в вертикальном положении «+» (рис. 3.6, (2)).

6. Поворотом ручки переключателя индикации из положения «+» в положение «ПВ» переключить световой пучок на фотоприемник и добиться гашения сигнала по минимуму отклонения стрелки нульиндикатора, изменяя положения поляризатора и анализатора. Поиск минимума сигнала производить в соответствии с требованиями п. 2.2.

7. Определить по экранам 12 и 15 (рис. 3.4) первую пару значений  $P_1$  и  $A_1$ , соответствующих гашению излучения на выходе эллипсометра и результаты измерения занести в таблицу 1. Подсветка экранов 12 и 15 осуществляется при нажатии соответствующих кнопок «Р» и «А».

8. Произвести сброс «АРУ» кнопкой «СБРОС» и переключить режим работы прибора из фотоэлектрического в визуальный, т.е. из положения «ПВ» в положение «+».

9. Ручкой 4 (рис. 3.6, (1)) повернуть поляризатор на 90° в любую сторону и зафиксировать это положение.

10. По экрану 15 (рис. 3.4) определить значение  $A_2$ , соответствующее гашению излучения, не используя нуль-индикатор, т.е. визуально по экрану 14 (см. рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Общий вид эллипсометра ЛЭФ-3М-1 [13]: 1 – основание, 2 – предметный столик, 3 – плечо поляризатора, 4 – плечо анализатора, 5 – электронный блок обработки (ЭБО), 6 – нуль-индикатор, 7 - опоры, регулируемые по высоте и позволяющие устанавливать прибор горизонтально по круглому уровню 6 (см. рис. 4.2), 8 – вертикальная направляющая типа «ласточкин хвост» для перемещения кронштейна 9 предметного столика, 10 – ручка перемещения кронштейна, 11 – ручка фиксации кронштейна в установленном положении, 12 – экран для отображения угла поворота поляризатора, 13 – экран для отображения угла разворота плеч поляризатора и анализатора (2 $\phi_0$ ), равный удвоенному значению угла падения светового пучка на образец ( $\phi_0$ ), 14 – экран для визуализации изображения светового пятна, 15 – экран для отображения угла поворота анализатора, 16 - лампа подсветки шкалы отсчетного устройства для измерения угла разворота плеч, 17- маховик с ручкой.



Рисунок 3.5 – Эллипсометр ЛЭФ-3М-1(вид сбоку) [13]:

1 - винты для юстировки устройства отсчета угла падения луча, 2 - винты, обуславливающие качание поверхности столика, 3 - микровинты для взаимно-перпендикулярного перемещения столика, 4 - держатель лазера (крепится к корпусу плеча поляризатора), 5 - фотоприемник, 6 - юстировочный уровень для установки прибора горизонтально, 7 - стопорный винт для фиксации отъюстированного положения пластинки λ/4, 11 - винты-«заглушки»



Рисунок 3.6 – Фрагменты измерительных плеч эллипсометра [13]: 1) поляризатора; 2) анализатора

11. Определить точные значения  $P_2$  и  $A_2$  по нуль-индикатору, добиваясь гашения сигнала на выходе фотоприемника изменением положений поляризатора и анализатора. Ручка переключателя индикации в положении «ПВ». Результаты измерения занести в таблицу 3.1.

	<b>(</b> ) a	Измерительные зоны								
N⁰		Ι		II		III		IV		
образца		$C = C_0 + 45^\circ = 126^\circ 54'$				$C = C_0 - 45^\circ = 36^\circ 54'$				
		$P_1$	$A_1$	$P_2$	$A_2$	<b>P</b> <sub>3</sub>	A <sub>3</sub>	$P_4$	$A_4$	
1	60									
	70									
2	60									
	70									
•	60									
	70									

Таблица 3.1 – Результаты измерения

12. Повторить п. 8.

13. Установить ручкой 6 (рис.3.6) компенсатор в положение, которое определяется в соответствии с формулой  $C = C_0 - 45^\circ = 36^\circ 54'$ .

14. Проделать операции, аналогичные описанным в п.п. 5 $\div$ 12, и определить третью и четвертую пары значений *P* и *A*. Результаты занести в таблицу 3.1.

15. Определить номер измерительной зоны. Для этого провести анализ результатов измерений, руководствуясь методикой, описанной в разделе «Принцип действия прибора».

16. Рассчитать значения поляризационных углов Δ и ψ в каждой измерительной зоне и усреднить результаты по двум (для каждого углового положения компенсатора) и по четырем зонам.

Значения поляризационных углов  $\Delta$  и  $\psi$ , полученные в каждой из четырех измерительных зон, а также значения, полученные в результате усреднений по двум и четырем зонам, в общем могут расходиться на 3-4°.

Это характеризует неидеальность элементов оптической системы эллипсометра, включая компенсатор и образец. Наиболее предпочтительными для дальнейшего использования поляризационных углов  $\Delta$  и  $\psi$  считаются те значения, которые получены в результате усреднения по четырем зонам.

Усреднение по четырем зонам осуществляется следующим образом:

$$\overline{\Delta}^{(1234)} = \frac{-P_1 - P_2 + P_3 + P_4}{2} + l\pi; \qquad (3.5)$$

$$\overline{\Psi}^{(1234)} = \frac{|A_1 - A_2| + |A_3 - A_4|}{4}.$$
(3.6)

Если удовлетворительными считаются результаты усреднения значений поляризационных углов  $\Delta$  и  $\psi$  по двум зонам, то эти значения могут быть получены согласно следующим формулам:

1) для положения компенсатора  $C = C_0 + 45^\circ$ , т.е. усреднение проводится по первым двум зонам:

$$\overline{\Delta}^{(1,2)} = -(P_1 + P_2 - 2P_0) + l\pi, \ \overline{\Psi}^{(1,2)} = \frac{|A_1 - A_2|}{2};$$
(3.7)

2) для положения компенсатора  $C = C_o - 45^\circ$ , т.е. усреднение проводится по третьей и четвертой зонам:

$$\overline{\Delta}^{(3,4)} = P_3 + P_4 - 2P_0 + l\pi, \ \overline{\psi}^{(3,4)} = \frac{|A_3 - A_4|}{2}, \tag{3.8}$$

где *P* и *A* - значения углов, полученные в результате измерений; *P*<sub>0</sub> – юстировочный параметр.

Двухзонная методика позволяет избежать влияния систематических ошибок, связанных с неидеальностью оптических элементов прибора и влиянием температуры окружающей среды на поляризационные параметры компенсатора.

### Обработка данных с использованием программы ELLIPS

В программе предусмотрен ввод значений азимутальных углов *P<sub>i</sub>* и *A<sub>i</sub>*, измеренных в каждой из четырех измерительных зон. Значения углов вводятся как целое число градусов и вещественное число минут.

В данном подразделе приводится алгоритм программы расчета параметров реального компенсатора: вносимого сдвига фаз  $\delta_c$  и относительного пропускания вдоль «быстрой» и «медленной» осей  $\rho_c$ . Расчет производится для каждого фиксированного положения компенсатора. Для этого система выводит запрос:

ВЫБОР ЗОНЫ:

- ЗОНЫ 1-2 (1);

ЗОНЫ 3-4 (2).

После выбора соответствующей клавиши программа выполняет расчет истинных значений  $\delta_c$  и  $\rho_c$  по результатам измерений азимутов поляризующих элементов в двух эквивалентных зонах (1 и 2 или 3 и 4) при фиксированном положении компенсатора («быстрая» ось расположена под углом ±45° к плоскости падения).

Программа производит итеративную процедуру по нахождению показателя преломления непоглощающей изотропной пленки n при заданных пределах поиска и расчет толщины пленки d, мкм.

Далее при помощи приложенной к работе таблицы определить материал подложки и слоя. В таблице учитывается рабочая длина волны эллипсометра λ=0,6328 мкм.

## Контрольные вопросы

- 1. Поясните назначение поляризационных элементов оптической схемы эллипсометра.
- 2. Сравните преимущества компенсационного (нулевого) метода измерения по сравнению с ненулевым?
- 3. Существует ли угол падения света, для которого какой-либо из коэффициентов отражения в формулах Френеля обращается в ноль? Как называется этот угол?
- 4. Как влияет температура окружающей среды на точность работы прибора? Проанализируйте источники погрешностей эллипсометрического эксперимента.
- 5. Как следует выбирать углы падения, чтобы обеспечить максимально высокую точность определения искомых параметров структуры?

# Лабораторная работа №4. Однокоординатный оптико-электронный автоколлиматор

## Цели работы:

- 1. Изучение принципа действия оптико-электронного измерительного прибора, реализующего автоколлимационный метод высокоточного углового позиционирования объектов.
- 2. Изучение и освоение методики выполнения угловых измерений с использованием однокоординатного фотоэлектрического автоколлиматора.
- 3. Получение практических навыков измерения и анализа параметров и метрологических характеристик прибора.

### Краткие теоретические сведения

Оптико-электронные автоколлиматоры предназначены для высокоточного углового позиционирования различных объектов, в частности, позиционирования рабочих органов манипуляторов, элементов зеркально-призменных систем приборов [16].

особенностью Отличительной оптико-электронного автоколлиматора является регистрация автоколлимационного изображения оптического излучения источника с помощью позиционночувствительного фотоприемника с последующим преобразованием сигнала из оптического в электрический. В качестве коллимационной светящаяся поверхность излучателя марки используется В соответствующем исполнении (штрих, точка), расположенная в фокальной плоскости объектива автоколлиматора, и в той же плоскости расположен приемник оптического излучения [17, 18].

На входе системы задается угол  $\varphi$  отклонения автоколлимационного отражателя от положения, перпендикулярного визирной оси. На выходе измеряются значения электрического тока (или иного параметра) как функции угла отклонения  $I=I(\varphi)$ . Обеспечение высокоточного измерения угла отклонения требует исследования процесса преобразования измеряемой величины в величину отсчета по шкале измерительного прибора, а также параметров и характеристик прибора, определяющих его точностные свойства.

В случаях аналитической постановки измерительных задач качество измерения определяется степенью соответствия реального физического процесса, в ходе которого получается интересующая информация, его идеальной модели, построенной в соответствии с поставленной целью. Следовательно, понятие точности как критерия качества измерения также имеет смысл относительно имеющейся идеальной модели.

Так, мы можем измерять угол отклонения отражателя в нашем автоколлиматоре с помощью цифрового измерительного прибора с нормированной погрешностью плюс-минус половина цены деления младшего разряда и, исходя из этой погрешности, делать вывод о точности измерения и, соответственно, о количестве информации в отсчетной величине.

Такое суждение будет иметь смысл только в предположении, что мы измеряем угол отклонения отражателя, хотя на самом деле мы измеряем электрический ток, зависящий также от дрейфа параметров элементов электрической схемы, напряжения источника питания, погрешностей балансировки измерительного моста, погрешностей изготовления и установки призмы-отражателя в устройстве, задающем угол ее поворота, от погрешностей изготовления самого устройства и т.д.

Таким образом, результат отсчета будет достоверным лишь в пределах точности, определяемой всей совокупностью указанных погрешностей, и точностные свойства оконечного измерительного прибора могут оказаться неиспользуемыми.

при построении информационно-измерительной Следовательно, определить критерий выбора оптимального системы можно измерительного прибора. Так, в случае исследования информационноизмерительных свойств автоколлиматора можно, исходя из точностных свойств механизма позиционирования автоколлимационного отражателя, значений определить число Ν достоверно различных угла позиционирования, которое можно задать с помощью такого механизма на диапазоне исследования.

Далее совершенно очевидными оказываются требования, чтобы каждому из этих N значений задаваемого угла позиционирования соответствовало свое, достоверно отличное от соседних, состояние каждого из последующих звеньев системы вплоть до отсчетного прибора, и эти состояния преобразовывались бы друг в друга при переходе от позиции к позиции на входе системы.

При конкретных измерениях угла позиционирования можно, исходя из точностных свойств системы, проводить многократные измерения и путем статистической обработки их результатов получать значительно более высокие точности и, соответственно иную картину информационных свойств системы.

В данной лабораторной работе требуется определить чувствительность автоколлиматора, а также метрологически корректно, с максимально достижимой в серии однократных измерений точностью, построить передаточную статическую характеристику оптикоэлектронного угловых автоколлиматора В диапазоне отклонений отражателя, рычажно-микрометрического задаваемых с помощью механизма.

В практике исследования оптико-механических систем в качестве средства познания сложилось понятие статической характеристики системы как отношения величин выходного и входного параметров на диапазоне исследования системы.

Современные методы исследования базируются на разработанных к настоящему времени более общих понятиях оператора передачи процесса и, соответственно, передаточной функции системы, в свою очередь определяемой по отношению к процессу, а то и задаваемой искусственно как средство его организации. Такие понятия позволяют создавать единую методику описания и, соответственно, инженерии систем и процессов, существенных для человеческой практики и основанных на разнообразных принципах в любом сочетании.

Как известно, чувствительность есть свойство системы физически реагировать на малые изменения входного воздействия, а потому никак не связано непосредственно с ее точностными свойствами. Так, входное звено системы может реагировать на чрезвычайно малые изменения входного воздействия (а когда чувствительность измеряется в окрестности нуля, то, естественно, реагировать на чрезвычайно малые по величине входные воздействия), но погрешности данного звена и последующих звеньев могут позволить достоверно различить на выходе системы лишь достаточно большие изменения на ее входе.

Соответственно, система менее чувствительная, но имеющая меньшие погрешности преобразования в своих звеньях, может в итоге оказаться более точной в данном конкретном случае. Чувствительность, таким образом, характеризует не реальные точностные свойства системы, а потенциальные возможности достижения требуемой точности при решении измерительных задач с ее помощью.

Таким образом, хотя принципиально можно определить чувствительность системы простым дифференцированием ее статической характеристики, точное измерение этого свойства представляет самостоятельную задачу, где результат определяется прежде всего точностью самого измерительного прибора.

Если построения статической характеристики ДЛЯ системы достаточно. чтобы минимальное достоверное различие состояний входного звена системы, вызываемое изменением входного воздействия, отображалось бы достоверно измерительным прибором на ее выходе, то в случае измерения чувствительности требуется измерить величину этого различия при выполнении требований к точности измерения.

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка содержит автоколлиматор с механизмом для задания угла поворота автоколлимационного отражателя и электронный

блок обработки сигнала автоколлиматора со стрелочным и цифровым отсчетными устройствами [5].

В исследуемом автоколлиматоре используется приемно-излучающее устройство 1 (рис. 4.1, вид А), которое содержит укрепленные на общем полупроводниковый излучающий основании 2 диод (ПИД) 3. выполненный в виде штриха, и позиционно-чувствительный приемник представляющий оптического излучения, два разделенных узкой прямолинейной границей селенид-кадмиевых фоторезистора 4 и 4'.

Излучение ПИД проходит через объектив 5 и, отразившись от призмы 6 типа БР-180°, с помощью того же объектива 5 образует изображение диода на поверхности фотоприемника.

Призма 6 закреплена в оправе 7, в которой предусмотрена возможность поворота вокруг оси, перпендикулярной входной грани призмы 6. Оправа 7 установлена на поворотном столике (на рисунке не показан), угол поворота которого задается с помощью жестко связанного с ним рычага 8 с микрометрическим винтом 9.



Рисунок 4.1 – Схема лабораторной установки

При расположении эквивалентного зеркала призмы перпендикулярно оптической оси автоколлиматора и, соответственно, симметричном расположении ПИД и границы раздела фотоприемников, изображение штриха будет располагаться симметрично линии раздела чувствительных площадок фоторезисторов, сопротивления которых в этом случае будут равны.

Фоторезисторы 4 и 4' включены в плечи мостовой схемы (рис. 4.2), в диагонали которой измеряется ток, пропорциональный разности их сопротивлений. В нулевом положении призмы разность сопротивлений и соответствующий ток равны нулю.

Поворот призмы 6 вокруг оси, перпендикулярной плоскости чертежа, например, вокруг оси О, приводит к сдвигу изображения штриха излучающего диода 3 с линии раздела фоторезисторов 4 и 4' (рис. 4.1). При этом сопротивления фоторезисторов становятся различными, и в диагонали моста появляется ток, величина и направление которого регистрируются стрелочным или цифровым измерительным прибором.

Угол поворота автоколлимационной призмы отражателя задается с помощью микрометрического винта 9 с ценой деления 0,01 мм и определяется по приближенной формуле [16, 18]:

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta x}{l},$$

где  $\Delta x$  – величина осевого перемещения микрометрического винта, l – длина рычага 8, образуемого механизмом поворота автоколлимационного отражателя, равная 525 мм.

Электронный блок обработки сигнала 10 состоит из понижающего трансформатора Tp1 (рис.4.2), выпрямителей и измерительной схемы с микроамперметром, имеющей также выход для включения в диагональ моста внешнего цифрового измерительного прибора 11 (рис. 4.1).



Рисунок 4.2. – Электрическая схема автоколлиматора

Выпрямитель на диодах Д1 и Д2 со стабилитронами Д3, Д4, собранный по схеме с удвоением напряжения, обеспечивает напряжение 24В для питания измерительного моста (рис. 4.2).

Выпрямитель на диодах Д5-Д8, собранный по мостовой схеме со стабилитроном Д9, обеспечивает напряжение 3,3В для питания излучающего диода Д10.

Измерительная схема представляет собой мост постоянного тока со стрелочным или цифровым измерительным прибором в диагонали. Два плеча моста образованы описанными выше фоторезисторами, обозначенными на схеме R7 и R8, а два других - резисторами R2, R4. Потенциометр R3 служит для балансировки моста при отсутствии сигнала. С помощью резистора R6 регулируется ток излучающего диода Д10.

### Порядок выполнения работы

1. Изучить устройство лабораторной установки для исследования автоколлиматора.

2. Обосновать выбор измерительного прибора для определения чувствительности и снятия статической характеристики автоколлиматора.

3. Определить величину шага отсчета при измерениях для определения чувствительности и снятия статической характеристики.

4. Определить чувствительность автоколлиматора в окрестности нулевого отсчета (±1 шаг) в обоих направлениях проведения измерений. Оценить влияние гистерезиса на результат измерений.

5. Снять статические характеристики автоколлиматора в диапазоне задаваемых поворотов автоколлимационного отражателя  $\pm 1'$ . Повороты отражателя выполняются с помощью микрометрического винта при его движении в прямом и обратном направлении. Результат оформить графически. Объяснить зависимость статических характеристик:

- a) от расстояния между коллиматором и автоколлимационным отражателем;
- б) от выставленного начального положения отражателя в плоскости, перпендикулярной визирной оси автоколлиматора.

6. Выполнить линейную интерполяцию одной из полученных статических характеристик по методу наименьших квадратов. Оценить погрешность измерения угловых перемещений при пользовании линеаризованной статической характеристики.

## Последовательность действий при выполнении работы

1. Включить электронный блок обработки сигнала автоколлиматора и цифровой измерительный прибор для выхода на установившийся режим. Для этого необходимо:

– включить тумблер на задней стенке блока обработки сигнала (расположен горизонтально). При этом на передней панели должна загореться цифра 2 на индикаторе, обозначающая номер установленного диапазона чувствительности прибора в соответствии

с первоначальной настройкой работы. Стрелка измерительного прибора может занять положение, отличное от нулевого, но в пределах отсчетной шкалы;

– включить тумблер «СЕТЬ» на передней панели цифрового измерительного прибора. При этом должна высветиться некоторая величина отсчета в милливольтах, примерно соответствующая положению автоколлимационного отражателя.

Время выхода электронного блока обработки сигнала и цифрового прибора на установившийся режим составляет примерно 20 минут. В этот период возможен существенный дрейф показаний, поэтому точные измерения невозможны.

2. Изучить материал описания и выполнить необходимые расчетнотеоретические работы по п.п. 1 - 4 Порядка выполнения работы.

3. Убедиться, что лабораторная установка настроена (отклонение стрелки измерительного прибора происходит на всю шкалу при задании угла поворота отражателя в обе стороны от нулевого положения).

Определить чувствительность автоколлиматора согласно п.5 задания. Для этого провести последовательно по 5 серий измерений в окрестности нулевого отсчета в направлениях прямого и обратного хода микрометрического винта при задании угла поворота отражателя. Окрестность нулевого отсчета (± 1 шаг) определяется из п.3 Порядка выполнения работы.

Механизм поворота автоколлимационного отражателя обладает некоторыми свойствами, которые могут снижать точность работы прибора. В частности, мертвый ход механизма, возникающий вследствие зазоров (люфтов) в сопрягаемых деталях и их упругих деформаций, приводит к разнице в положениях выходного звена механизма при одинаковых положениях его входного звена при прямом и обратном движении механизма.

Мертвый ход приводит к тому, что положения микрометрического винта, соответствующие нулевому отсчету и, соответственно, его окрестностям, могут не совпадать при разных направлениях поворота отражателя. Поэтому для точного определения чувствительности в окрестностях нулевого положения следует снимать отсчеты раздельно в нуле и в окрестных точках для каждого направления вращения микрометрического винта. В связи с этим предлагается следующая методика проведения измерений чувствительности:

3.1. Установить с помощью микрометрического винта нулевое показание измерительного прибора, после чего повернуть микрометрический винт в сторону увеличения по модулю показаний измерительного прибора на 5-6 отсчетных шагов.

3.2. Плавно вращая микрометрический винт в обратную сторону и сохраняя направление приложенного усилия, вывести его в положение,

соответствующее нулевому показанию измерительного прибора. Снять со шкалы микрометрического винта этот отсчет. Записать это значение и принимать его за нулевое при движении винта в прямом направлении.

3.3. Повернуть микрометрический винт в ту же сторону на один отсчетный шаг. Плавно вращая микрометрический винт в обратную сторону и сохраняя направление приложенного усилия, вывести его в положение, соответствующее нулевому показанию измерительного прибора. Снять отсчет соответствующего положения микрометрического винта и записать его значение как принятое за нулевое при движении в обратном направлении.

3.4. Так же повернуть микрометрический винт на один шаг в ту же сторону (в точку окрестности «–1») и снять отсчет соответствующего показания измерительного прибора. Занести его в таблицу как первый отсчет в положении «–1» для движения в обратном направлении.

3.5. Повернуть винт в том же направлении еще на один-два отсчетных шага. Плавно вращая его в обратную сторону и сохраняя направление приложенного к нему усилия, установить его в точку окрестности «–1» для движения в прямом направлении, рассчитанное по результату п.3.2. Снять отсчет соответствующего показания измерительного прибора и занести его в таблицу как 1-й отсчет в положении «–1» отсчетный шаг для движения в прямом направлении.

3.6. Повернуть микрометрический винт на один шаг в ту же сторону, сохраняя направление приложенного к нему усилия (т.е. в положение, отмеченное в п.3.2), снять отсчет соответствующего показания измерительного прибора и занести его в таблицу как 1-й отсчет в нулевом положении при движении в прямом направлении.

**Примечание**: при аккуратном выполнении п.п. 3.2...3.6 отсчет по п.3.6 будет соответствовать нулевому или незначительно от него отличаться на величину операторской ошибки. Значительное отличие указывает на неисправность лабораторной установки либо на неправильную работу на ней.

3.7. Действуя аналогично п. 3.6, снять и занести в таблицу первый отсчет показания измерительного прибора в точке окрестности «+1» шаг для движения в прямом направлении.

3.8. Повернуть микрометрический винт в том же направлении еще на 1-2 отсчетных шага, после чего, плавно поворачивая его в обратную сторону и сохраняя направление приложенного к нему усилия, установить его в положение «+1» шаг для движения в обратном направлении, рассчитанное по результату п.3.3. Снять и занести в таблицу соответствующий 1-й отсчет по измерительному прибору для положения «+1» шаг для движения в обратном направлении. 3.9. Действуя аналогично п. 3.6, снять и занести в таблицу первый отсчет в нулевом положении для движения в обратном направлении (т.е. в положении, отмеченном в п.3.3)

3.10. Продолжая действовать по п.п.3.4...3.9, получить по 5 отсчетов для каждой из трех отсчетных точек («–1», «0», «+1») для каждого направления, т.е. всего 30 отсчетных точек.

3.11. На основании полученных данных определить чувствительность автоколлиматора в положительной и отрицательной окрестностях нулевого отсчета для каждого направления проведения измерений, среднюю для каждого направления и среднюю в целом. Чувствительность определяется на основании общей формулы как отношение изменения отсчета по измерительному прибору, к углу поворота автоколлимационного отражателя на один отсчетный шаг, путем подстановки конкретных значений физических параметров, полученных выше опытным путем, с указанием размерностей.

4. В соответствии с расчетами по п.2 снять необходимое число отсчетов для построения статических характеристик автоколлиматора при движении от нулевого отсчета в одну из сторон (в прямом или обратном направлении) до угла отклонения автоколлимационного отражателя в 1', затем обратно до отклонения в 1' противоположного знака и далее с возвращением в исходную точку. Предлагается следующая методика проведения измерений статических характеристик:

4.1. Поворотом микрометрического винта 9 вывести автоколлимационный отражатель в положение небольшого отрицательного отклонения (2-3 шага).

4.2. Плавным поворотом винта 9, не меняя направление приложения к нему усилия, установить нулевое положение автоколлимационного отражателя и снять соответствующий отсчет по микрометрическому винту.

4.3. Плавно повернуть микрометрический винт 9 в ту же сторону на один отсчетный шаг, не меняя направления приложения к нему усилия, и снять отсчет по измерительному прибору.

4.4. Действуя аналогичным образом, снять отсчеты для всех промежуточных положений отражателя автоколлиматора в диапазоне отклонений 0...+1'.

4.5. Повернуть микрометрический винт в ту же сторону еще на один шаг и снять отсчет положения отражателя по измерительному прибору.

4.6. Повернуть микрометрический винт в обратную сторону на один шаг, не меняя при подходе к этой точке направления приложения к нему усилия, и снять отсчет положения отражателя, соответствующий положению винта +1' для обратной ветви статической характеристики.

4.7. Действуя аналогичным образом, снять отсчеты для построения всей обратной ветви статической характеристики в диапазоне +1' ... –1'.

4.8. Выполнить действия по п.п. 4.5. и 4.6. и снять отсчет положения отражателя, соответствующий положению винта –1' для прямой ветви статической характеристики.

4.9. Действуя аналогично п. 4.7., снять отсчеты для построения прямой ветви статической характеристики в диапазоне – 1'...0

5. Построить на основании полученных данных графики статических передаточных характеристик и представить их руководителю занятий вместе с результатами определения чувствительности по п. 3.

6. Выключить цифровой измерительный прибор тумблером «СЕТЬ» на лицевой панели и лабораторную установку тумблером на задней стенке блока обработки сигналов.

### Содержание отчета

1. Схема лабораторной установки с обоснованием выбора измерительного прибора в соответствии с п.3 задания.

2. Обоснование выбора величины шага отсчета по п.4 задания.

3. Результаты измерений и расчетов по п.5 задания. Вывод о влиянии гистерезиса на результат измерений.

4. Статические характеристики по п.6 задания с текстовыми пояснениями по вопросам а и б.

5. Расчет линейной интерполяции статической характеристики по п.7 задания. Оценка точности измерения угловых перемещений при пользовании линеаризованной статической характеристикой.

### Контрольные вопросы

1. Каким образом изображение излучателя может быть построено в плоскости фотоприемника в зависимости от позиционирования отражателя? Пояснить графически.

2. Пояснить зависимость погрешности отсчета угла поворота автоколлимационного отражателя от местоположения оси поворота?

3. Как должна быть расположена приемно-излучающая матрица относительно оптической оси объектива автоколлиматора, чтобы при перпендикулярном расположении автоколлимационной призмыотражателя относительно данной оси изображения штриха излучателя располагалось бы симметрично линии раздела приемников излучения максимальной оптического при чувствительности автоколлиматора?

4. Насколько оправдано использование в оптико-электронном автоколлиматоре метода прямого измерения сигнала рассогласования? При каких условиях было бы более целесообразно использование компенсационного метода, и что требуется для выявления таких условий?

## Лабораторная работа №5. Ультрафиолетовый фотометрический газоанализатор озона

# Цели работы:

- 1. Изучение общих принципов работы и устройства фотометрических газоанализаторов.
- 2. Измерение содержания озона в озоновоздушных смесях.
- 3. Исследование метрологических характеристик ультрафиолетового фотометрического газоанализатора озона Ф102-2 с помощью генератора озона Г7601.

## Краткие теоретические сведения

## Общие сведения об озоне и его содержании в атмосфере

Озон (химическая формула О<sub>3</sub>) – бесцветный, очень токсичный газ (его токсичность превосходит токсичность синильной кислоты), действие которого на организм подобно действию ионизирующих излучений [19].

Присутствие озона в атмосфере в небольших количествах весьма важно для жизни на Земле. Благодаря поглощению солнечного ультрафиолетового излучения стратосферным озоном, биосфера Земли защищена от вредного излучения, а поглощение инфракрасного излучения тропосферным озоном поддерживает глобальный температурный баланс. Разрушение озонового слоя приводит к усилению ультрафиолетовой радиации, вызывающей канцерогенный эффект, и нарушает процесс фотосинтеза растений [20, 21].

Источником образования озона в технике являются все искрящие и генерирующие жесткое электромагнитное излучение установки: электросварочные машины, системы зажигания двигателей внутреннего сгорания, рентгеновские аппараты, а также множительная аппаратура. Озон образуется во многих промышленных процессах как побочный продукт. Он широко используется в различных технологиях очистки воды, обезвреживания отходов, хранения сельскохозяйственной продукции, в медицине [22, 23, 24]. В связи с этим возникает необходимость в контроле его содержания в технологических газовых средах и в воздухе рабочей зоны.

В то же время озон образуется в атмосфере под воздействием ультрафиолетового излучения и при одновременном присутствии оксидов азота и углеводородов [20]. Ущерб растениям приносит массовая концентрация озона в воздухе в 150 мкг/м<sup>3</sup>. Одной из причин гибели лесов служат фотооксиды, к числу которых относится и озон.

Согласно существующим оценкам, содержание озона в приземном слое атмосферы с начала эпохи индустриализации возросло примерно на

100% и ежегодно повышается на 1,0 – 1,6%. Понижение содержания озона может быть достигнуто за счёт существенного уменьшения выбросов азота.

Предельно допустимая концентрация (ПДК) озона в атмосферном воздухе населенных мест [21]:

- максимальная разовая – 0,16 мг/м<sup>3</sup> [25];

- среднесуточная – 0,03 мг/м<sup>3</sup>.

Для измерений в области естественных (природных) концентраций озона (характерные значения составляют 20–50 мкг/м<sup>3</sup>) и концентраций, близких к ПДК, наиболее пригодны хемилюминесцентные озонометры (ХЛО), благодаря их высокой чувствительности и сравнительно низкой стоимости. При более высоких концентрациях ХЛО теряют свои преимущества перед оптико-абсорбционными приборами [26].

Диапазон 0,10–2,0 мг/м<sup>3</sup> относится к области средних концентраций, применение ХЛО неоправданным становится из-за низкой гле стабильности чувствительности эффектов "памяти", сильно И проявляющихся диапазоне хемилюминесцентных В этом У озоночувствительных элементов, а также из-за недостаточной ИХ долговечности при таких концентрациях озона. Условия для реализации фотометрического метода измерения для этого диапазона концентраций остаются достаточно жесткими, так как поглощение оптического озоносодержащего излучения слоем воздуха первых В десятках сантиметров еще мало и лежит в диапазоне (10<sup>-4</sup> – 10<sup>-2</sup>) %.

Выделение полезного сигнала, составляющего столь малую долю от фонового, требует применения высокостабильных фотоприемников, усилителей и источников зондирующего света.

## Физические основы действия оптико-абсорбционных (фотометрических) газоанализаторов

Принцип действия таких газоанализаторов основан на том, что измеряется поглощение оптического излучения исследуемым газом в том участке спектра, где он имеет интенсивную полосу поглощения, не совпадающую с полосами поглощения других газов, присутствие которых возможно в анализируемой газовой смеси [27].

Поток излучения, проходящий через бесконечно тонкий слой *dl* поглощающей среды, уменьшается согласно закону Ламберта-Бера:

$$\Phi_{\lambda}(\lambda) - \Phi_{\lambda 0}(\lambda) = -\Phi_{\lambda 0}(\lambda) \chi(\lambda) \rho \, dl, \qquad (5.1)$$

где  $\Phi_{\lambda}(\lambda)$ ,  $\Phi_{\lambda 0}(\lambda)$  – спектральная плотность потока излучения с длиной волны  $\lambda$ , прошедшего соответственно через поглощающую и непоглощающую среды;  $\chi(\lambda)$  – массовый показатель поглощения вещества для данной длины волны  $\lambda$ ;  $\chi(\lambda) = a'(\lambda)/\rho$ ;  $a'(\lambda)$  – спектральный натуральный показатель поглощения вещества;  $\rho$  – массовая концентрация

вещества, поглощающего оптическое излучение. Для слоя толщиной *l* справедливо выражение:

$$\Phi_{\lambda}(\lambda) = \Phi_{\lambda 0}(\lambda) \exp\left(-\chi(\lambda)\rho l\right).$$
(5.2)

Логарифмируя полученное выражение, получим:

$$\ln \left[ \Phi_{\lambda}(\lambda) / \Phi_{\lambda 0}(\lambda) \right] = -\chi(\lambda) \rho l, \qquad (5.3)$$

или

$$lg \left[ \Phi_{\lambda}(\lambda) / \Phi_{\lambda 0}(\lambda) \right] = -2,303 \chi(\lambda) \rho l = -D(\lambda) , \qquad (5.4)$$

где  $D(\lambda)$  - оптическая плотность слоя поглощающей среды на данной длине волны. Для слабого поглощения можно написать:

$$\Delta \Phi_{\lambda} = \Phi_{\lambda}(\lambda) - \Phi_{\lambda 0}(\lambda) = -\Phi_{\lambda 0}(\lambda) \chi(\lambda) \rho l$$
(5.5)

ИЛИ

$$\Phi_{\lambda}(\lambda)/\Phi_{\lambda 0}(\lambda) = \tau(\lambda) = 1 - \chi(\lambda) \rho l_{,} \qquad (5.6)$$

где  $\tau(\lambda)$  - коэффициент пропускания оптического излучения слоем среды толщиной *l*.

Видно, что для слабого поглощения прошедший через среду поток излучения линейно зависит от концентрации поглощающего свет вещества. Для газов, загрязняющих воздух и имеющих низкую концентрацию, это условие, как правило, выполняется.

#### Структурные схемы фотометрических газоанализаторов

Газоанализаторы, реализующие оптико-абсорбционный метод, представляют собой высокочувствительные фотометры с фиксированной рабочей спектральной полосой, соответствующей полосе поглощения определяемого газа.

Фотометры могут быть однолучевыми и двухлучевыми [28]. Наиболее перспективными являются двухлучевые фотометры. В двухлучевых фотометрах оптическое излучение от источника 1 (рис.5.1) разделяется на два одинаковых пучка.

Один из них проходит через кювету 2 с измеряемым газом, а другой - через такую же кювету 3, заполненную так называемым "нулевым" газом, не содержащим измеряемой составляющей. Каждый пучок оптического излучения направляется в отдельные фотоприемники 4 и 5, сигналы от которых поступают на дифференциальный усилитель 6.

При слабом поглощении света в измерительной кювете разность между фототоками обоих фотоприемников оказывается пропорциональной массовой концентрации поглощающего свет вещества (5.5); при сильном поглощении света пропорциональным концентрации будет логарифм отношения сигналов от фотоприемников (5.4).



Рисунок 5.1 – Схема двухлучевого фотометра с двумя фотоприемниками: 1 – источник, 2 – рабочая кювета, 3 – кювета с "нулевым" газом, 4, 5 – приемники оптического излучения, 6 – дифференциальный усилительпреобразователь, 7 – регистратор.

В двухлучевых схемах оптическое излучение в пучках может подвергаться модуляции по интенсивности модулятором 5 (рис.5.2) в противофазе в одном пучке относительно другого. Тогда оба потока направляются на один приемник оптического излучения 4, а затем на усилитель-преобразователь 6.

При слабом поглощении оптического излучения модулированных пучков амплитуда переменной составляющей фототока приемника будет пропорциональной концентрации (5.5); при сильном поглощении пропорциональным концентрации будет логарифм отношения максимального и минимального уровня сигнала от фотоприемника за период модуляции (5.4).



Рисунок 5.2 – Схема двухлучевого фотометра с модулятором: 1 – источник излучения; 2 – рабочая кювета; 3 – кювета с "нулевым" газом; 4 – приемник оптического излучения; 5 – модулятор; 6 – усилитель-преобразователь; 7 – регистратор.
случае слабого поглощения, как правило, пренебрегают В нелинейной зависимостью фототока приемника от падающего на него потока, если таковая имеется, так как полезная составляющая сигнала составит лишь малую долю от фона. Необходимо только, чтобы фотоприемник и первичный усилитель не находились в режиме Требование насыщения. идентичности характеристик обоих К фотоприемников также оказывается не слишком жестким, и разброс в их чувствительности может быть скомпенсирован изменением параметров электрических цепей (например, ослаблением сигнала от одного из фотоприемников с помощью делителя напряжения), либо оптическим методом – диафрагмированием одного из пучков.

Можно заметить, что сигнал от фотоприемника, воспринимающего излучение, прошедшее через кювету с "нулевым" газом, зависит только от величины потока излучения источника и при неизменном потоке излучения остается постоянным. Тогда весь канал сравнения фотометра может быть заменен источником постоянного напряжения или тока, соответствующего по величине сигналу от фотоприемника, когда измерительная кювета заполнена "нулевым" газом. Это значительно упрощает конструкцию прибора и удешевляет его. Такой фотометрр становится однолучевым.

Работа однолучевого газоанализатора строится следующим образом: в его единственную кювету подают "нулевой" газ. Усиленный предварительным усилителем сигнал от фотоприемника запоминается.

Например, устанавливается такая величина опорного напряжения, чтобы индикатор, показывающий концентрацию измеряемого газа, давал ее нулевое значение. После этого через кювету пропускают исследуемый газ и производят измерения. Если поглощение оптического излучения газом мало, то величина полезного сигнала составит лишь малую часть от фона, и даже незначительное изменение потока излучения от источника может сильно исказить результат.

В этом случае требования к стабильности параметров источника оптического излучения и фотоприемника оказываются очень высокими, что не всегда может быть выполнено. В результате эта схема чаще всего применяется для определения газов, имеющих сравнительно высокую концентрацию и поглощение.

# Назначение и принцип действия ультрафиолетового газоанализатора озона Ф102-2

Газоанализатор озона Ф102-2 предназначен для измерения массовых концентраций озона в озоновоздушной, озонокислородной и других озоносодержащих газовых смесях в лабораторных, производственных и натурных условиях [26].

Исследования показали, что длина волны излучения 253,7 нм является оптимальной для определения концентрации озона, так как на ней расположен один из максимумов полосы поглощения озона с сечением дифференциального поглощения  $10^{-17}$  см<sup>2</sup>. Примеси, содержащиеся в атмосферном воздухе (H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NO<sub>2</sub> и др.), имеют на этой длине волны в сотни раз меньшие сечения поглощения.

Поэтому для измерения концентрации озона в газовых смесях в качестве зондирующего оптического излучения часто используют излучение ртутной лампы низкого давления на резонансной линии 254 нм. Излучение можно считать практически монохроматическим (ширина линии составляет доли нанометра), в сравнении с шириной полосы поглощения озона (десятки нанометров). Тогда соотношение (5.4) можно переписать в виде:

$$\Phi - \Phi_0 = -\Phi_0 \chi(\lambda) \rho l, \qquad (5.7)$$

где Ф и Ф<sub>0</sub> – непосредственно измеряемые потоки излучения после его прохождения через кювету с анализируемой концентрацией газа и после его прохождения через кювету, когда газ из нее удален, соответственно;  $\chi(\lambda)$  – массовый показатель поглощения озона (на длине волны 254 нм массовый показатель поглощения озона равен  $\chi(0,254) = 0,144 \text{ м}^3/(\Gamma \cdot \text{см})$ ); *l* – длина кюветы, см;  $\rho$  – массовая концентрация, г/м<sup>3</sup>.

Из (5.7) найдем выражение для массовой концентрации газа р :

$$\rho = (\Phi_0 - \Phi) / \Phi_0 \chi(\lambda) l$$
(5.8)

или, заменив потоки излучения на соответствующие им электрические сигналы:

$$\rho = (kU_0 - U) / \underline{kU}_0 \chi(\lambda) l, \qquad (5.9)$$

где *k* – коэффициент преобразования потока излучения в информационный сигнал, обеспечивающий индикацию нулей на цифровом табло озонометра при прохождении воздуха, лишенного озона, через измерительную кювету.

#### Основные технические характеристики прибора

Диапазон измеряемых массовых концентраци	ий 100 – 10000 мкг/м <sup>3</sup>
Погрешность измерений	не более 10%
Быстродействие	не хуже 20 с
Ресурс	более 10000 час
Macca	12 кг
Условия эксплус	атации
Температура	$+10 - +45 \ ^{0}C$
Давление	700 – 820 мм.рт.ст.
Влажность	до 95%
Питание	220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность	35 Вт

#### Структурная схема газоанализатора Ф102-2

Газоанализатор озона Ф102-2 построен по классической схеме однолучевого фотометра (рис.5.3) [28]. Ультрафиолетовое излучение от источника 1 коллимируется линзой 2, проходит параллельным пучком света через кювету 3, фокусируется линзой 4 в плоскости фотоприемника 5 («солнечно-слепой», карбид-кремниевый фотодиод SiC-1.25).



Рисунок 5.3 – Схема УФ-фотометрического газоанализатора озона Ф102-2

Электрический сигнал с фотодиода SiC-1.25 усиливается электрометрическим усилителем 6, подвергается аналого-цифровому преобразованию в АЦП 7 и передается на плату центрального процессора 8, который обрабатывает сигнал и выводит результаты на алфавитно-цифровой дисплей 9.

Газовая схема, кроме кюветы 3, включает штуцер «вход» 11, фильтр «нуль газа» 12, ручной клапан – переключатель газовых потоков 10, «деозонатор» – утилизатор озона 13, насос 14, штуцер «выход» 15.

Поскольку в формулах (5.8), (5.9) фигурируют фактически отношения световых потоков или соответствующих им сигналов, то безразлично, в каких единицах они измеряются. Процессор выводит на дисплей в единицах счета АЦП (для справки 1 ед. АЦП соответствует 76 мкВ) следующие величины:



где Ux – текущее значение сигнала,  $U_0$  – значение сигнала, занесенное в «память» при последнем нажатии кнопки со знаком «↑», dU – значение разностного сигнала  $dU = U_0 - Ux$ .

Период обновления результатов – две секунды.

#### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из газоанализатора Ф102-2 (рис.5.4) и генератора озона ГС-7601, при помощи которого создается газовая смесь

с неизвестным содержанием озона, концентрацию которого требуется определить [26]. Генератор озона и озонометр соединены фторопластовой трубкой через газовую развязку, которая служит для согласования расходов воздуха генератора и озонометра и обеспечивает нормальную работу генератора при работе озонометра в режиме установки нуля.

Расход генератора озона должен быть больше расхода газоанализатора. Избыточная газовая смесь через газовую развязку поступает в атмосферу, что можно проконтролировать с помощью ротаметра.



Рисунок 5.4 – Схема лабораторной установки

Расход генератора и газоанализатора должен быть отрегулирован таким образом, чтобы поплавок ротаметра постоянно находился в приподнятом положении.

#### Назначение и принцип действия генератора озона ГС-7601

Генератор озона ГС-7601 предназначен для проверки и градуировки автоматических газоанализаторов микроконцентраций озона с диапазоном измерения массовых концентраций (0 – 1,0) мг/м<sup>3</sup> [26].

#### Основные технические характеристики генератора

Время прогрева и выхода на режим	не более 1 ч.
Время установления выходного сигнала	
при переключении с одной концентрации на другую	
(при постоянно включенном побудителе расхода)	не более 1 мин.
Потребляемая мощность	не более 60 Вт
Расход создаваемой озоновоздушной смеси	не менее 1,3 л/мин.
Длительность непрерывной работы	не более 8 ч.

В генераторе используется фотолитический метод, основанный на резонансном поглощении оптического излучения в спектральной области 0,2 мкм молекулами кислорода, при этом образуются молекулы озона. Реакция фотохимического синтеза озона может быть записана в следующем виде:

$$O_2 + h\nu \rightarrow O \bullet + O \bullet;$$

 $O \bullet + O_2 \rightarrow O_3$ .

Значения концентраций озона, создаваемых генератором, и допускаемые отклонения этих концентраций приведены в таблице 5.1.

Положение переключателя	Номинальные значения и допускаемые отклонения		
концентраций, %	массовой концентрации, мг/м <sup>3</sup>		
10	0,100±0,007		
25	0,250±0,018		
50	0,500±0,035		
80	0,800±0,056		
100	1,000±0,070		

Таблица 5.1 – Формируемые генератором концентрации озона

#### Работа генератора озона ГС-7601

Атмосферный воздух очищается от пыли, влаги и озона трехзвенным сорбирующим фильтром Ф1, Ф2, Ф3 (рис.5.5) и через побудитель расхода А2, регулятор давления, регулятор расхода, индикатор расхода (ротаметр) ИП подается в преобразователь (фотолитический реактор) [26, 28].



Рисунок 5.5 – Электропневматическая функциональная схема генератора

В преобразователе газовая смесь облучается ультрафиолетовой кварцевой ртутной лампой ДРТ-240, которая работает в режиме стабилизированного тлеющего разряда. Режим работы лампы обеспечивается с помощью устройства ее питания.

Для изменения концентрации озона разрядный ток меняется с помощью переключателя режимов работы. Внутренний объем преобразователя термостатируется.

Аварийный режим работы генератора (отсутствует свечение ультрафиолетовой лампы) сигнализируется светодиодом "РЕАКТОР" на передней панели генератора (рис. 5.6).



Рисунок 5.6 – Передняя панель генератора озона ГС-7601

Нажатие на кнопку "НАСОС" приводит в действие побудитель расхода, обеспечивающий расход исходного воздуха не менее 1,3 л/мин. Атмосферный воздух поступает в фильтр Ф1 для очистки от пыли, затем - в фильтр Ф2 для осушки, а потом - в фильтр Ф3 для очистки от озона.

Фильтр Ф2 заполнен силикагелем-индикатором. Замена силикагеля его осушка производится приблизительно или через 100 часов эксплуатации генератора при изменении цвета силикагеля с синего на розовый. Сушка производится в сушильном шкафу при температуре 180 °C в течение 2,5 ч. Сушка считается законченной, если цвет силикагеля изменился с розового на синий. Фильтр Φ3 заполнен vглем активированным АГ-3 СКТ6. Замена фильтрующего объема или производится через 2000 ч эксплуатации.

Регулятор давления служит для регулирования и поддержания постоянного давления в газовом тракте, независимо от колебания атмосферного давления.

Регулятор расхода служит для регулирования и поддержания постоянного расхода. Последовательно с регулятором расхода включен индикатор расхода (ротаметр), по которому определяют приблизительно расход воздуха, который составляет не менее 1,3 л/мин.

Выработанная озоновоздушная смесь через штуцер Ш2 подается на испытуемый объект.

Генератор озона может работать при использовании баллона с очищенным сжатым воздухом. При этом побудитель не включается (S2 выключен). Воздух из баллона через редуктор ( $P = 0,5 \text{ кг/см}^2$ ) подается в штуцер ШТ1.

Питание узлов и блоков генератора осуществляется от сети 220 В 50Гц через устройство питания.

#### Порядок выполнения работы

- 1. Подготовка к проведению лабораторной работы
- 1.1. Убедиться, что кнопки "СЕТЬ", "НАСОС" и все кнопки переключения концентраций озона на передней панели генератора озона ГС-7601 находятся в выключенном состоянии (рис.5.6).
- 1.2. Включить генератор, нажав кнопку "СЕТЬ". При этом должны загореться индикаторные лампы "СЕТЬ", "ТЕРМОСТАТ" и "PEAKTOP".
- 1.3. Нажать кнопку "НАСОС" на передней панели генератора. Наличие расхода воздуха определяется по приподнятому поплавку ротаметра.
- 1.4. Проверить работу генератора путем нажатия одной из кнопок переключателя концентраций. При этом должна погаснуть лампа индикации "PEAKTOP".
- 1.5. Последовательно отключив кнопки концентрации смеси, "НАСОС" и "СЕТЬ", выключить генератор.
- 1.6. Включить газоанализатор Ф102-2 тумблером "Вкл." (рис. 5.7).



Рисунок 5.7 – Передняя панель ультрафиолетового фотометрического газоанализатора озона Ф102-2

- 1.7. На дисплее газоанализатора появится прямой отсчет времени прогрева и состояния зондирующей лампы (не горит/зажглась). Нормальное время прогрева прибора составляет 30 минут, однако если прибор был уже прогрет и ненадолго (до 5 минут) выключался до этого, время прогрева можно сократить, нажав кнопку П.
- 1.8. После окончания прогрева прибор автоматически переходит в режим «измерение». Рекомендуется следующий порядок проведения измерений на газоанализаторе (рис. 5.7) [26]:
  - а) переключить клапан 10 в положение «0-газ» и убедиться, что величина *dU* находится в пределах ±1 ед. АЦП и не дрейфует в течение, по крайней мере, одной минуты;
  - b) если имеет место дрейф сигнала, необходимо продолжить прогрев прибора, ничего не предпринимая и наблюдая за дрейфом *dU*;

- с) если дрейф сигнала достаточно мал (менее 3 ед. АЦП/мин, но значение  $dU \neq 0$ ), следует нажать кнопку  $\uparrow$  (при этом текущее значение Ux будет занесено в память как Uo);
- d) после получения не дрейфующих, близких к нулю, показаний *dU* переключить клапан 10 в положение «Изм.» (показания *dU* начнут расти до некоторого значения);
- е) после стабилизации роста показаний следует записать значение *dU* и вычислить концентрацию озона.

При длительных измерениях следует периодически (раз в 10 минут) проводить проверку и при необходимости переустанавливать нуль прибора, как указано в пункте а) порядка проведения измерений.

Момент обновления показаний АЦП может сопровождаться звуковым сигналом, для чего достаточно нажать кнопку ↓. Повторное нажатие кнопки ↓ отключает звуковой сигнал.

Кнопка **П** переводит программу из режима «Прогрев» в режим «Измерение» и обратно. При этом меняется только вид индикации на дисплее прибора Ф102-2.

- 1.9. После окончания работы на приборе его следует выключить тумблером "Вкл".
- 2. Измерение содержания озона в озоновоздушных смесях

Производится измерение массовой концентрации озона в озоновоздушной смеси, вырабатываемой генератором ГС-7601, на нескольких концентрациях  $\rho_i$ , указанных преподавателем.

- 2.1 Собрать схему лабораторной установки по рисунку 5.4.
- 2.2 Выполнить п.п. 1.1 1.4 и п. 1.6 подготовки к проведению лабораторной работы.
- 2.3 Нажать требуемую кнопку концентраций на генераторе.
- 2.4 Дать приборам прогреться в течение 30 минут
- 2.5 Установить нуль газоанализатора и измерить величины  $U_0$  и dU.
- 2.6 В течение 15 мин через 30 с выполнить 30 измерений на данной концентрации озона, записывая показания индикатора газоанализатора в таблицу 5.2.
- 2.7 Вычислить значение концентрации озона в озоновоздушной газовой смеси. Расчетная формула для вычисления малых концентраций озона:

$$\rho = (U_0 - U_x)/U_0 / (\chi(\lambda) l) = dU/U_0 / (\chi(\lambda) l),$$

где  $\chi(\lambda) = 1,44 \cdot 10^{-4} (\text{см} \cdot \text{мг/м}^3)^{-1}$  для  $\lambda = 254$  нм, l = 10 см.

- 2.8 Занести вычисленные значения концентрации озона в таблицу 5.2.
- 2.9 Нажать следующую кнопку концентраций на генераторе. Повторить п.п. 2.5. 2.7 для очередной концентрации.

№ п/п	ρ <sub>i</sub> , мг/м <sup>3</sup>	$U_0$	dU
1			
2			
30			

Таблица 5.2 – Результаты измерений концентрации озона

3. <u>Исследование метрологических характеристик ультрафиолетового</u> фотометрического газоанализатора

По результатам измерения массовой концентрации озона в соответствии с п.2 Порядка выполнения работы рассчитать погрешности измерений для полученных концентраций.

- 3.1 Рассчитать доверительные границы случайной погрешности и неисключенной систематической погрешности (НСП) результата измерения (см. прил. Б).
- 3.2 Вычислить абсолютную и относительную погрешность результата измерения, принимая за границу НСП результата измерения допускаемую основную погрешность озонометра.
- 3.3 Записать результаты измерений с найденными доверительными границами погрешности.
- 3.4 Проанализировать результаты и сформулировать вывод о том, какая из погрешностей вносит наибольший вклад в результат измерения.

## Содержание отчета

1. Принцип работы ультрафиолетового фотометрического озонометра.

- 2. Схемы и описание установки по измерению содержания озона.
- 3. Таблицы с результатами измерений.
- 4. Расчет и анализ погрешностей измерений.
- 5. Выводы по работе.

## Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Ламберта-Бера.

2. Каким образом в озонометре Ф102-2 осуществляется вычитание сигналов до и после поступления в измерительный канал прибора озоновоздушной смеси с исследуемой концентрацией озона?

3. Объясните физический смысл коэффициента *k* в выражении (5.9).

4. Объясните назначение отдельных узлов блок-схемы озонометра.

Лабораторная работа №6. Хемилюминесцентный газоанализатор озона

## Цели работы:

- 1. Изучение общих принципов работы и устройства и устройства хемилюминесцентного газоанализатора.
- 2. Измерение содержания озона в озоновоздушных смесях.
- 3. Исследование метрологических характеристик хемилюминесцентного газоанализатора озона 3-02 ППУ-1 с помощью генератора озона ГС-7601.

## Краткие теоретические сведения

Хемилюминесценцией называется явление испускания квантов света в результате прохождения какой-либо химической реакции [25, 29]. Химические превращения в веществе сопровождаются перестройкой внешних электронных оболочек атомов, молекул. Использование явления хемилюминесценции для газового анализа основано на том, что молекулы продуктов реакции возбужденных (атомы, ионы) В электронных, колебательных и вращательных состояниях вызывают свечение В оптическом диапазоне.

При взаимодействии оксида азота, оксида углерода и других газов с некоторыми реагентами, например, с озоном или атомарным кислородом, при определенных условиях возникает хемилюминесценция. Измерение потока возникающего оптического излучения используется для Поток определения содержания газов. излучения этих хемилюминесценции зависит от многих физических и химических факторов, к числу которых относятся химический состав и строение молекул, энергетическое состояние, содержание люминесцирующих веществ, примеси, температура, давление [26, 29].

В ходе химической реакции в излучение переходит энергия, не превышающая сумму энергий активации и теплового эффекта реакции. Прежде чем излучить эту энергию, молекула удерживает ее в виде внутренней энергии (энергия возбуждения). Процесс хемилюминесценции происходит в две стадии.

Стадия возбуждения – это образование в химической реакции богатых энергией частиц (продукта реакции) **Р** в том состоянии (**P**\*), из которого возможен излучательный переход [27]

$$A + B \to P^* + K + M, \tag{6.1}$$

где *А* и *В* – исходные реагенты; *Р*\* - возбужденный продукт; *К*, *М* – другие продукты реакции.

Вторая стадия люминесценции – переход возбужденных молекул **Р**\* в нормальное состояние *P* с излучением фотона:

$$\boldsymbol{P^* \to P} + h \boldsymbol{v} . \tag{6.2}$$

Более подробно хемилюминесцентные реакции можно записать следующим образом:

 $A + B \xrightarrow{k_i} P^*$ - образование возбужденной частицы, (I) $P^* \xrightarrow{k_j} P + hv$ - люминесценция, (II)

 $P * \xrightarrow{k_d} P$ - безызлучательная дезактивация, (III)

где k<sub>i</sub> – константа скорости возбуждающей реакции; k<sub>i</sub> – константа люминесценции; k<sub>d</sub> – константа скорости реакции при безызлучательном переходе.

Спектральная плотность потока излучения описывается следующим выражением:

$$\Phi_{\mathbf{v}} = k_j[\mathbf{P}^*] = \eta_1 \,\eta_2 \, k_i[\mathbf{A}][\mathbf{B}],$$

где  $\eta_1$  – квантовый выход возбуждающей реакции;  $\eta_2$  - квантовый выход люминесценции;  $\eta_2 = \frac{k_j}{k_j + k_d}$ .

От других видов люминесценции хемилюминесценция отличается только механизмом образования возбужденных частиц. Дальнейшее их поведение не зависит от механизма возбуждения. При этом дезактивация может происходить различными путями [27, 28]:

 $P^* + M \xrightarrow{k_d} P + M$  - тушение люминесценции частицей M;

 $P^* + M \rightarrow P + M^*$  - перенос энергии на частицу M;

 $P^* + M \rightarrow PM$  - химическое взаимодействие с частицей M;

 $P^* \xrightarrow{k_d} P$ - внутримолекулярный безызлучательный переход.

Анализу хемилюминесцентным (ХЛ) методом могут быть подвергнуты лишь газы, обладающие высокой химической активностью и энергетическим потенциалом, окислительным или восстановительным, достаточным для того, чтобы в результате взаимодействия с вводимыми реагентами могли образоваться продукты реакции в электронновозбужденном состоянии. Это, прежде всего, озон (O<sub>3</sub>), окислы азота (NO и NO<sub>2</sub>) и серы (SO<sub>2</sub>).

Реагент, с которым взаимодействует анализируемый газ, может также находиться в газообразном состоянии (в этом случае процесс гомогенный), жидком и твердом (в этом случае процесс гетерогенный, поскольку взаимодействующие вещества находятся в разном агрегатном состоянии).

Метод гомогенного ХЛ газового анализа имеет достаточную чувствительность и линейную зависимость потока излучения от содержания анализируемого газа. Однако он требует расходуемых источников газа-реагента, систем подготовки газовых смесей, что усложняет конструкцию прибора и его эксплуатацию, требует квалифицированного обслуживания.

Использование жидких реагентов также весьма нежелательно в приборах, предназначенных для широкого использования. От перечисленных недостатков свободны твердотельные гетерогенные ХЛ газоанализаторы с твердыми реагентами [26, 28].

Реальный механизм ХЛ реакции оказывается много сложнее, чем описано выше, особенно когда вводимым реагентом является твердое вещество. ХЛ композиция на основе галловой кислоты и одного из родаминов (Rh C, Rh 6-Ж) изначально не чувствительна к озону, т.е. в воздействия первые моменты на нее озона поток излучения хемилюминесценции практически равен нулю. Однако под действием озона с течением времени наблюдается возрастание потока излучения ХЛ чувствительности. соответственно, Такой процесс называется И, активировкой [30].

После прекращения воздействия озона датчик на его чувствительность медленно уменьшается, но не достигает нулевого уровня даже через несколько месяцев пребывания без контакта с озоном. Таким образом, при взаимодействии исходного состава ХЛ композиции с озоном образуется сравнительно устойчивый промежуточный продукт, последующее взаимодействие которого с озоном сопровождается хемилюминесценцией.

реакций Однако, объяснение механизма твердотельной озончувствительной композиции с озоном, ведущих К хемилюминесценции, основано не только на анализе взаимодействия молекул. Следует говорить также о реакции в слоях, где отдельные композиции образуют участки (слои), составляющие обладающие полупроводниковыми свойствами и имеющие разный тип проводимости. Контакт между такими участками твердотельной озончувствительной композиции подобен *p-n*-переходу. Прохождение через него электронов, участвующих в окислительно-восстановительных реакциях с озоном, сопровождается люминесценцией.

Таким образом, реакции на поверхности твердого тела лишь в редких случаях могут быть описаны простой физико-химической моделью и требуют комплексного исследования.

Чувствительный элемент, содержащий ХЛ композицию такого газоанализатора, представляет собой плоскую пористую таблетку диаметром около 20 мм, имеет длительный срок эксплуатации и хранения, чрезвычайно высокую чувствительность, не достижимую другими методами и ограниченную только чувствительностью фотоэлектрического преобразователя, высокое быстродействие, также не достижимое другими

методами. Первичный преобразователь "содержание газа - электрический сигнал" достаточно прост по сравнению с другими методами.

В связи со сказанным, недостаток, который состоит в изменении чувствительности в процессе эксплуатации ХЛ элемента, не перекрывает достоинств рассмотренного метода.

# Структурная схема гетерогенных хемилюминесцентных газоанализаторов

Обобщенная структурная схема ХЛ газоанализаторов достаточно проста и представлена на рисунке 6.1.



Рисунок 6.1 – Структурная схема хемилюминесцентного газоанализатора: 1 – заборный патрубок; 2 – ротаметр; 3 – газовый коммутатор; 4 – фильтр-поглотитель; 5 – калибратор; 6 – ХЛ-реактор; 7 – насос; 8 – приемник оптического излучения; 9 – усилитель; 10 – процессор; 11 – индикатор.

Анализируемый газ поступает в заборный патрубок прибора и через коммутатор попадает в ХЛ реактор 6. Излучение хемилюминесценции при помощи приемника оптического излучения (ПОИ) 8 преобразуется в электрический сигнал, усиливается в усилителе 9, преобразуется в цифровой код, подвергается функциональной обработке в процессоре 10, и результат высвечивается на табло индикатора 11.

Для корректировки изменяющейся чувствительности ХЛ датчика служит встроенный генератор стандартной массовой концентрации измеряемого газа (калибратор) 5. Блок 10 при подаче газа от калибратора устанавливает такие параметры преобразования электрического сигнала от индикатора соответствовали ПОИ, чтобы показания известной концентрации определяемого газа от калибратора. Тогда при измерении неизвестной концентрации индикатор будет показывать значения непосредственно в единицах массовой концентрации.

# Назначение и принцип работы хемилюминесцентного газоанализатора 3-02 ППУ-1

Газоанализатор озона 3-02 ППУ-1 предназначен для измерения массовой концентрации озона в атмосферном воздухе, в воздухе рабочей

зоны производственных помещений и для выполнения различных научноисследовательских задач. Газоанализатор является цифровым показывающим прибором дискретного действия [26].

#### Основные технические характеристики прибора

Диапазон измеряемых массовых концентраций	15 - 500 мкг/м <sup>3</sup>
Погрешность измерений:	
предел допускаемой основной относительной	
погрешности анализатора ( $\Delta_{\rm A}$ )	±15%
предел допускаемой вариации измеряемой	
газоанализатором концентрации	не более 0,5 <b>Д</b> <sub>д</sub>
предел допускаемого изменения измеряемой	
концентрации за 24 часа непрерывной работы прибора	не более 0,5 <b>Д</b>
наибольшая допускаемая относительная	
погрешность от изменения температуры в пределах	
рабочих условий на каждые 10°С отклонения	
температуры от номинальной (20 <sup>0</sup> С)	не более 1,0Дд
наибольшая допускаемая дополнительная	
погрешность от изменения напряжения питания на	
каждые 11В отклонения напряжения питания от	
номинального (220 В)	не более 0,3 <b>Д</b> <sub>д</sub>
дополнительные погрешности от изменения	
частоты питания, изменения содержания неизмеряемых	
компонентов, изменения пространственного положения	
и изменения влажности окружающей среды - каждая	не более 0,2 <b>Д</b> <sub>д</sub>
Выходной сигнал: цифровой	0 – 1999 мкг/м <sup>3</sup>
аналоговый	0 – 10 мВ
Предел допускаемого времени установления	
показаний	не менее 10 с
Macca	4,5 кг
Условия эксплуатации	
Температура	$+10 - +40  {}^{\circ}\text{C}$
Давление 70	00 – 820 мм рт. ст.
Влажность	до 95%
Питание	220 В, 50 Гц
потреоляемая мощность	33 BT

Параметры анализируемого атмосферного воздуха на входе

газоанализатора

Температура	$+10 - +40 \ ^{0}C$
Давление	700 – 820 мм рт.ст.
Объемный расход	не менее 2,0 л/мин.

#### Относительная влажность

до 95%

Предельные значения массовой концентрации неизмеряемых компонентов в анализируемой пробе смеси должны быть следующими:

не более 0,25 мг/м <sup>3</sup> ;
не более 5 мг/м <sup>3</sup> ;
не более 1 мг/м <sup>3</sup> ;
не более 17000 мг/м <sup>3</sup> ;
не более 50 мг/м <sup>3</sup> ;
не более 10 мг/м <sup>3</sup> ;
не более 5 мг/м <sup>3</sup> ;
не более 50 мг/м <sup>3</sup> .

Газоанализатор представляет собой газовый компаратор, обеспечивающий высокую линейность функции преобразования сигнала. Компарирование осуществляется между смесью от источника ПГС (калибратора) и анализируемым газом.

В основу работы озонометра положен эффект гетерогенной хемилюминесценции, возникающей в результате экзотермической реакции озона с окисляемыми химическими веществами композиции.

Основные особенности процесса взаимодействия ХЛ композиции при не слишком высоких концентрациях озона и небольшой его длительности, удовлетворительно описываются простой кинетической моделью:

$A \xrightarrow{O_3} P^*$	- образование возбужденной частицы;	(I)
$P^* \xrightarrow{O_3} P + h v$	- люминесценция;	(II)
$P^* \longrightarrow P$	- безызлучательная дезактивация.	(III)

Поток излучения люминесценции пропорционален содержанию озона в анализируемой газовой смеси. Максимум спектральной плотности потока возникающего излучения находится в области 560 нм.

Структурная схема газоанализатора представлена на рисунке 6.2.



Рисунок 6.2 – Схема хемилюминесцентного газоанализатора 3-02 ППУ-1: 1 - хемилюминесцентный реактор; 2 - калибратор; 3 - фотоумножитель; 4 - модуль сопряжения; 5 – аналого-цифровой преобразователь; 6 - цифровой индикатор; 7 - насос. После включения прибора в сеть автоматически включается насос 7. Воздушный поток проходит через хемилюминесцентный реактор 1. Свечение, появляющееся при реакции озона с органической композицией датчика, регистрируется фотоумножителем 3, на выходе которого подключен модуль сопряжения 4, где происходит преобразование тока в напряжение. Далее информация преобразуется в цифровой сигнал в АЦП 5 и выводится на цифровой индикатор 6.

При помощи кнопки "Калибровка" на передней панели газоанализатора (рис. 6.3) в ручном режиме работы включается калибрующий, встроенный в прибор, генератор озона 2 (рис. 6.2), вырабатывающий воздушную смесь с известной концентрацией озона.



Рисунок 6.3 – Передняя панель хемилюминесцентного газоанализатора

Через определенное время, необходимое для того, чтобы в калибрующем генераторе, подводящих трубопроводах и в самом хемилюминесцентном датчике прошли переходные процессы (от 30 до 40 секунд), на цифровом табло индикатора 6 устанавливается значение концентрации озона, известное заранее, и модуль сопряжения 4 автоматически устанавливает такой коэффициент преобразования сигнала от фотоумножителя 3, который обеспечивает индикацию на табло именно этого числа.

После этого необходимо включить кнопку "Измерение". Калибрующий генератор отключается, и на цифровом табло высвечивается значение концентрации озона, содержащегося в анализируемом газе. Кнопка "Сброс" (рис.6.3) предназначена для установки прибора в исходное состояние.

В автоматическом режиме (переключатель на задней панели прибора "Автомат/Ручной" (рис. 6.4.) в положении "Автомат") периодически через 8 мин включается калибрующий генератор 2, и происходит калибровка прибора. *Режим "Активация" включать не рекомендуется.* 

Для измерения концентрации свободного от озона воздуха на передней панели генератора озона отключают все кнопки концентраций озона. При этом на цифровом табло прибора устанавливается нулевое значение концентрации озона.



Рисунок 6.4 – Задняя панель хемилюминесцентного газоанализатора

Свободный от озона воздух получают, пропуская окружающий воздух через фильтр-поглотитель, имеющийся в генераторе озона.

## Особенности конструкции

Озон имеет чрезвычайно высокую химическую активность и вступает во взаимодействие с большинством конструкционных материалов, разрушаясь на их поверхности [31]. Поэтому все элементы пневмотракта приборов, контактирующие с озоном (трубки, внутренние части реакторов, переключателей газовых потоков и т.д.), изготавливаются из пассивных и химически стойких материалов, таких как фторопласт и нержавеющая сталь.

## Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис.5.4) состоит из газоанализатора (в данном случае, ХЛ газоанализатора озона 3-02 ППУ-1) и генератора озона (в данном случае, генератора ГС-7601), при помощи которого создается газовая смесь, концентрацию озона в которой требуется измерить [26]. Подробное описание генератора приведено в лабораторной работе №5. Газовая смесь из генератора озона подается на газоанализатор через газовую развязку. Расход смеси генератора должен быть больше расхода газоанализатора, избыток смеси поступает в атмосферу через газовую развязку и контролируется с помощью ротаметра.

## Порядок выполнения работы

- 1. Подготовка к проведению лабораторной работы
- 1.1 Проверить положение кнопок на передней панели генератора озона ГС-7601. В исходном состоянии кнопки "СЕТЬ", "НАСОС" и все кнопки переключателя концентраций озона в выключенном положении (рис.5.6).
- 1.2 Подключить генератор к электрической сети. Нажать кнопку "СЕТЬ" генератора. При этом должны загореться индикаторные лампы "СЕТЬ", "ТЕРМОСТАТ" и "РЕАКТОР".

- 1.3 Нажать кнопку "НАСОС" на передней панели генератора. Наличие расхода воздуха определяется по приподнятому поплавку индикатора расхода (ротаметра).
- 1.4 Проверить работу генератора путем нажатия одной из кнопок переключателя концентраций. При этом должна погаснуть лампа индикации "PEAKTOP".
- 1.5 Последовательно отключив кнопки концентрации смеси, "НАСОС" и "СЕТЬ", выключить генератор.
- 1.6 Включить газоанализатор тумблером "СЕТЬ" (рис. 6.3).
- 1.7 Убедиться, что на цифровом табло озонометра индицируется нулевое значение концентрации озона.
- 1.8 Нажатием кнопки "КАЛИБРОВКА" на передней панели озонометра провести его калибровку. При этом загорается индикаторная лампа "КАЛИБРОВКА". По окончании калибровки переключить прибор в режим измерения. При этом загорается индикаторная лампа "ИЗМЕРЕНИЕ".
- 1.9 Выключить газоанализатор тумблером "СЕТЬ".

## 2. Измерение содержания озона в озоновоздушных смесях

Производится измерение массовой концентрации озона в озоновоздушной смеси, вырабатываемой генератором ГС-7601, на нескольких концентрациях  $\rho_i$ , указанных преподавателем.

- 2.1 Собрать схему лабораторной установки по рисунку 5.4.
- 2.2 Выполнить п.п. 1.1 1.4 и п. 1.6 подготовки к проведению лабораторной работы. Дать приборам прогреться в течение 30 мин.
- 2.3 Произвести калибровку газоанализатора в соответствии с п.1.7 подготовки к проведению лабораторной работы.
- 2.4 Нажать требуемую кнопку концентраций на генераторе. Лампа "PEAKTOP" должна погаснуть. По истечении 5 минут с интервалом 30 с произвести 30 отсчетов концентрации озона с цифрового табло озонометра. Результаты записать в таблицу 6.1.

№ п/п	$\rho_i, \mathrm{Mr/M}^3$
1	
2	
3	
30	

Таблица 6.1 – Результаты измерения концентрации озона

- 2.5 Отжать кнопку концентраций на генераторе, что соответствует нулевой концентрации газа. Лампа "РЕАКТОР" должна вспыхнуть.
- 2.6 Нажать другую кнопку концентраций на генераторе. Лампа "PEAKTOP" должна погаснуть. По истечении 5 мин с интервалом 30

с произвести 30 отсчетов концентрации озона с цифрового табло озонометра. Результаты записать в таблицу 6.1.

- 2.7 Выполнить п.п. 1.5, 1.6, 1.9 подготовки к проведению лабораторной работы.
- 3. Измерение содержания озона в воздухе лаборатории
- 3.1 В схеме лабораторной установки по рис. 5.4 отсоединить выход генератора озона.
- 3.2 Выполнить п. 1.6 подготовки к проведению лабораторной работы.
- 3.3 Произвести калибровку газоанализатора в соответствии с п.1.7 подготовки к проведению лабораторной работы.
- 3.4 Произвести отсчет концентрации озона в воздухе лаборатории с цифрового табло озонометра с интервалом 30 с. Результаты 30 отсчетов записать в табл. 6.1.
- 3.5 Выключить газоанализатор тумблером "СЕТЬ".
- 4. Исследование метрологических параметров и характеристик хемилюминесцентного газоанализатора

По результатам измерения массовой концентрации озона в соответствии с п.2 Порядка выполнения работы рассчитать погрешности измерений для полученных концентраций.

- 4.1 Рассчитать доверительные границы случайной погрешности и неисключенной систематической погрешности (НСП) результата измерения (см. прил. Б).
- 4.2 Вычислить абсолютную и относительную погрешность результата измерений, принимая за границу НСП результата измерения допускаемую основную погрешность озонометра.
- 4.3 Сделать вывод о том, какая из погрешностей измерения вносит наибольший вклад в погрешность результата измерения.

## Содержание отчета

- 1. Принцип работы хемилюминесцентного озонометра.
- 2. Схемы и описание установки по измерению содержания озона.
- 3. Таблицы с результатами измерений.
- 4. Расчет и анализ погрешностей измерений.
- 5. Выводы по работе.

#### Контрольные вопросы

- 1. Что такое хемилюминесценция?
- 2. В чем заключается метод компарирования в газовом анализе?
- 3. Каково назначение калибровки хемилюминесцентного озонометра?
- 4. Какой цели служит фильтр-поглотитель озона в газоанализаторе?

## Лабораторная работа №7. Инфракрасный фотометрический газоанализатор

## Цели работы:

- 1. Изучение принципа работы и устройства инфракрасного фотометрического газоанализатора.
- 2. Измерение содержания двуокиси углерода в атмосфере.
- 3. Исследование метрологических характеристик анализатора двуокиси углерода.

## Краткие теоретические сведения

#### Общие сведения об углекислом газе и его содержании в атмосфере

Как известно, при сжигании ископаемых видов топлива образуется два окисла углерода [32]:

- монооксид углерода СО (окись углерода);
- диоксид углерода СО<sub>2</sub> (двуокись углерода).

Окись углерода СО относится к токсичным веществам. При дыхании образуется ее соединение с гемоглобином - карбоксигемоглобин, приводящий к блокировке кислородного питания всего организма. Источник СО - черная и цветная металлургия и, главное, автотранспорт. Допустимое содержание карбоксигемоглобина в крови - 1,5%. У городских жителей оно часто выше.

Растения используют двуокись углерода CO<sub>2</sub> и выделяют кислород в процессе фотосинтеза. Большинство растений и животных потребляют кислород при дыхании. При дыхании же они выделяют CO<sub>2</sub> как конечный продукт обмена. Поэтому двуокись углерода является естественным компонентом атмосферы.

В пробе обычного воздуха при нормальных условиях (температура - 293 $\pm$ 2 К, давление - 101325 Па = 760 мм рт. ст., относительная влажность - 70%) присутствует до 0,03% двуокиси углерода, а всего ее в атмосфере Земли 2,3 $\cdot$ 10<sup>12</sup> тонн.

За прошедшее столетие уровни выброса СО<sub>2</sub> выросли на 25% [32, 33]. Чтобы стабилизировать климат Земли, использование энергетического сократить 60%. При отсутствии топлива следует на жесткой регламентации ожидаемое увеличение потребления энергетического топлива в ближайшие 40 лет удвоится. В целом можно ожидать, что общее количество сжигаемого топлива будет ежегодно возрастать по сравнению с нынешнем уровнем на 3-4%.

Увеличению содержания двуокиси углерода в атмосфере также способствует вырубка тропических дождевых лесов для сельскохозяйственных целей. Кроме этого, значительное количество

углекислого газа поступает из недр Земли вследствие природной вулканической деятельности.

Есть прогнозы, что с потеплением на 1°С климатические зоны передвинутся на 100-150 км к северу, а таяние ледников к 2050 году обусловит подъем уровня Мирового океана на 1,2 м.

Половина количества двуокиси углерода аккумулируется, т.е. не потребляется при фотосинтезе и не растворяется в океанах. Она остается в атмосфере. Основным природным регулятором содержания  $CO_2$  служит океан, в котором содержится в 100 раз больше  $CO_2$ , чем в атмосфере. Согласно закону Генри, если содержание  $CO_2$  в атмосфере (а следовательно, и давление) окажется выше установленной величины, то океан поглотит большую часть этого избытка, и наоборот (при 0°C в 1 л морской воды содержится 50 см<sup>3</sup>  $CO_2$  и 8 см<sup>3</sup>  $O_2$  при давлении, соответственно, 0,23 и 158,8 мм рт. ст.).

Двуокись углерода препятствует рассеянию тепла с поверхности Земли за счет излучения в космическое пространство (парниковый эффект); это ведет к глобальному потеплению на Земле. Если из атмосферы исключить CO<sub>2</sub>, то средняя годовая температура понизилась бы на 21°C, а если удвоить его содержание - повысилась бы на 4°C.

Двуокись углерода тяжелее атмосферного воздуха и поэтому может скапливаться в опасных количествах в погребах и колодцах. В угольных шахтах из-за медленного окисления угля содержание CO<sub>2</sub> также выше, чем на открытом воздухе. Служба охраны труда должна следить за тем, чтобы оно не превышало установленной нормы (30 мг/м<sup>3</sup>) [21]. ПДК углекислого газа для воздуха рабочих мест - 9000 мг/м<sup>3</sup>.

Для измерения содержания газов - загрязнителей атмосферы может быть использовано их поглощение за счет электронного перехода с основного энергетического уровня на более высокий или поглощение, обусловленное колебаниями атомов или их групп в составе молекулы газа. Спектры поглощения, в зависимости от природы данного вещества, имеют индивидуальный характер, что и позволяет идентифицировать эти вещества.

Электронные спектры поглощения газов лежат, как правило, в ультрафиолетовой (УФ) области спектра и представляют собой достаточно широкие и интенсивные полосы. Если они расположены в области длин волн, меньших 254 нм, то измерения поглощения связаны с рядом трудностей. В этом диапазоне поглощает свет большинство оптических материалов, в том числе, начинает сказываться и поглощение кварца, являющегося сравнительно дешевым и удобным материалом для баллонов ламп и оптических элементов, таких как линзы, окна, светофильтры и т.д. Получить источник света с узкой спектральной полосой излучения в этом диапазоне также оказывается непростой задачей. Кроме того, спектры поглощения многих газов в диапазоне длин волн 250-180 нм накладываются друг на друга, что ведет к потере избирательности в регистрации того или иного газа. Эти обстоятельства заставляют обратиться к инфракрасному (ИК) диапазону спектра, где молекулы каждого газа имеют характерные узкие полосы поглощения с присущими только им частотами. Техника ИК-спектроскопии хорошо разработана и освоена, имеются необходимые оптические материалы, светофильтры и источники излучения [34].

Для измерения содержания углекислого газа используются инфракрасные оптико-абсорбционные (фотометрические) газоанализаторы. Их особенность заключается в том, что они позволяют измерять содержание различных газов, линии поглощения которых лежат в инфракрасном диапазоне. К таким газам относится и оксид углерода CO<sub>2</sub>, который является основным загрязнителем атмосферы больших городов, так как 80% глобальных выбросов CO<sub>2</sub> связаны с автотранспортом.

В данной лабораторной работе предлагается измерять содержание углекислого газа, так как это не токсичный газ и работа с ним не представляет опасности в учебной лаборатории. Как правило, при измерении содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере на станциях мониторинга используются дорогостоящие высокочувствительные газоанализаторы с многоходовыми кюветами, длина оптического пути на которых может достигать двадцати метров. В предложенном газоанализаторе рабочая кювета имеет длину 30 см. Этого достаточно, чтобы померить содержание углекислого газа с погрешностью до 0,01% [26].

## Физические основы поглощения углекислым газом инфракрасного излучения

При прохождении оптического излучения через газовую кювету молекулы поглощая кванты излучения, соответствующие газа, определенным частотам, возбуждаются, т.е. увеличивают запас своей энергии. Если поглощается ультрафиолетовое, видимое ИЛИ коротковолновое инфракрасное излучение, то повышается запас энергии электронов, соответствующей колебанию ядер атомов, и энергии вращения молекулы вокруг центра тяжести.

Если поглощаются кванты, соответствующие более длинноволновой области спектра оптического излучения (от нескольких микрометров до сотен микрометров), то возбуждаются колебательно-вращательные и, соответственно, чисто вращательные степени свободы. В результате спектры поглощения молекул состоят из ряда полос, имеющих весьма сложную структуру. На рисунке 7.1 показана часть колебательновращательного спектра поглощения углекислого газа, снятого при толщине слоя газа 100 мм, давлении 10000 ppm и температуре +20°С.



углекислого газа

Инфракрасное излучение поглощают все газы, за исключением  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$ ,  $Cl_2$  и одноатомных газов. Спектр поглощения одноатомных газов или паров металлов отличается от инфракрасных спектров поглощения молекул своей относительной простотой и состоит не из полос, а из отдельных линий, расположенных, в основном, только в ультрафиолетовой области спектра.

В ИК диапазоне спектра есть специфические особенности регистрации поглощения анализируемого газа по сравнению с УФ диапазоном. Для средней части УФ диапазона (250 – 300 нм) характерны достаточно широкие электронные полосы поглощения при возможности использования весьма узкополосных интенсивных источников света за счет выделения отдельных линий спектра паров ртути, прежде всего резонансной линии 254 нм. Благодаря этому в соотношении, выражающем закон Ламберта-Бера:

$$\Phi_{\lambda}(\lambda) = \Phi_{\lambda 0}(\lambda) \exp\left(-\chi(\lambda)\varphi l\right), \qquad (7.1)$$

где  $\varphi$  – объемная доля вещества, поглощающего оптическое излучение, l – толщина слоя поглощающей среды, можно не учитывать спектральное распределение потока излучения источника и форму кривой поглощения, то есть вид функции  $\chi(\lambda)$  [34, 35].

Используют известное значение  $\chi$  анализируемого газа для длины волны источника, или, если ширина полосы излучения источника сравнима с шириной полосы поглощения газа, усредненное по спектру излучения источника эффективное значение коэффициента поглощения  $\chi_{эф\phi}$ . При этом учитывается интегральный по спектру источника поток излучения, который как раз и регистрируется фотоприемниками. Тогда закон Ламберта-Бера выражается так:

$$\Phi = \Phi_{o} \exp\left(-\chi \varphi l\right), \tag{7.2}$$

где  $\chi$  и *l* известны, а измеряется отношение прошедшего через слой *l* газа потока к входящему потоку  $\Phi/\Phi_0$  или их разность при слабом поглощении.

Для ИК-диапазона характерны узкие полосы поглощения газов и сравнительно широкие спектральные полосы источников зондирующего Рассмотрим, излучения. как это сказывается на зависимости прошедшего интенсивности через излучения содержания газ OT измеряемого газа.

Фотоприемник реагирует на интегральный прошедший через газ поток излучения:

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda}(\lambda) d\lambda , \qquad (7.3)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – границы спектра излучения источника. Тогда вместо соотношения (5.2) мы должны рассмотреть результат его интегрирования по длинам волн:

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda 0}(\lambda) \exp(-\chi(\lambda)\varphi l) d\lambda$$
 (7.4)

В этом выражении не удается выделить параметр φ, т.е. представить функцию в виде:

$$\Phi = \Phi_0 F_1(\varphi) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_2[\chi(\lambda)] d\lambda , \qquad (7.5)$$

где  $F_1(\phi)$ ,  $F_2[\chi(\lambda)] - \phi$ ункции с разделенными переменными, и поэтому простая зависимость:

$$\ln \Phi/\Phi_0 = -\chi(\lambda) \varphi l, \qquad (7.6)$$

вытекающая из (5.3), вообще говоря, не выполняется (особенно в случае сильного поглощения).

В данном случае имеет смысл говорить не о нарушении закона Ламберта-Бера, а об ограничении его применимости случаем монохроматического излучения или случаями, когда немонохроматичностью можно пренебречь, как это было рассмотрено выше.

Для слабого поглощения (см. (5.5)) закон Ламберта-Бера может быть представлен в виде:

$$\Delta \Phi_{\lambda}(\lambda) = \Phi_{\lambda}(\lambda) - \Phi_{\lambda 0}(\lambda) = -\Phi_{\lambda 0}(\lambda)\chi(\lambda) \varphi l. \qquad (7.7)$$

Проинтегрировав (7.7) по интервалу длин волн, получим:

$$\Delta \Phi = \Phi - \Phi_0 = -\varphi l \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda 0} (\lambda) \chi(\lambda) d\lambda, \qquad (7.8)$$

то есть наблюдается линейная зависимость разности прошедшего через анализируемый газ и входящего потоков излучения от объемной доли вещества вне зависимости от формы полос излучения источника и полосы поглощения определяемого газа. Здесь функция  $\chi(\lambda)$  может заменена ее эффективным значением  $\chi_{эф\phi}$ , и тогда выражение (7.8) принимает вид:

$$\Delta \Phi = -\varphi l \chi_{ab\phi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda 0}(\lambda) \, d\lambda = \Phi_0 \, \chi_{ab\phi} \, \varphi l \tag{7.9}$$

или, если измеряется отношение потоков  $\Phi/\Phi_0$ :

$$\Phi / \Phi_0 = 1 - \chi_{\mathfrak{H}\phi} \varphi l. \tag{7.10}$$

Для того, чтобы определить значение величины  $\chi_{3\phi\phi}$ , измеряют  $\Phi/\Phi_0$  для газа с известной объемной долей  $\phi$ , или ( $\Phi - \Phi_0$ ) для известной  $\phi$  и фиксированного значения  $\Phi_0$ , или соответствующие этим величинам выходные сигналы прибора.

В общем случае, когда поглощение нельзя считать слабым, т.е. соотношение (7.6) не выполняется, строят градуировочные кривые, измеряя электрический сигнал на выходе прибора для ряда образцовых газовых смесей с известным содержанием определяемого газа [26, 35, 36].

#### Описание инфракрасного газоанализатора

Схема прибора представлена на рисунке 7.2. Измерения производятся в непрерывном режиме [35].



Рисунок 7.2 – Схема ИК фотометрического газоанализатора

Источник излучения 1 представляет собой нихромовую проволоку, нагреваемую электрическим током до температуры около 800°С. ИК излучение от источника поступает в две расположенные рядом и параллельно друг другу кюветы 2 и 3. Через кювету 2 прокачивается анализируемый газ. Кювета 3 содержит воздух, свободный от двуокиси углерода, и образует канал сравнения. Далее пучки оптического излучения подвергаются модуляции в противофазе друг относительно друга при помощи обтюратора 4, представляющего собой вращающийся диск с прорезями. Затем оптическое излучение проходит через интерференционный светофильтр 5, имеющий максимальное пропускание  $\tau_m = 80\%$  на  $\lambda_m = 4.2$  мкм при ширине полосы пропускания на уровне 0,5 от максимального значения  $\delta\lambda_{0.5} = 0,1$  мкм. В эту полосу попадает линия поглощения двуокиси углерода. Примерный вид спектра ИК излучения, прошедшего кювету с газом 2 и светофильтр 5, представлен на рисунке 7.3. Далее оба модулированных пучка при помощи концентратора 6 направляются на пироэлектрический фотоприемник 7 марки МГ-30.



Рисунок 7.3 – Спектральные плотности потока ИК излучения: пунктирная кривая Φ<sub>λ0</sub> - до прохождения кюветы с газом и фильтра; сплошная кривая Φ<sub>λ</sub> - после прохождения кюветы с анализируемым газом и фильтром; а) в случае среднего поглощения (около 30%); б) при сильном поглощении газом (> 90%).

В фотоприемнике осуществляется преобразование потока излучения в пропорциональный ему по величине переменный электрический сигнал и происходит его предварительное усиление. Затем сигнал усиливается в основном усилителе 8 и разделяется на составляющие, соответствующие потокам излучения, прошедшего через кюветы 2 и 3, в синхронном детекторе 9. Работа детектора синхронизируется с вращением обтюратора при помощи фотодатчика 12. Далее сигналы поступают в блок обработки 10, где они вычитаются, и результирующий *разностный* сигнал измеряется стрелочным индикатором прибора - микроамперметром 11 [26].

#### Метод регистрации содержания углекислого газа

Величина разностного при слабом поглощении сигнала В соответствии с выражением (7.8)оказывается пропорциональной объемной доле ф измеряемого газа. Рассмотрим, какова будет зависимость этого сигнала от объемной доли при величине поглощения, достаточной, чтобы соотношение (7.6) не выполнялось. Вычтем из правой и левой частей уравнения (7.1)  $\Phi_{\lambda 0}(\lambda)$  и изменим знак в обеих его частях:

$$\Phi_{\lambda 0}(\lambda) - \Phi_{\lambda}(\lambda) = \Phi_{\lambda 0} \left[ 1 - \exp\left(-\chi(\lambda)\varphi l\right) \right], \quad (7.11)$$

проинтегрировав это выражение по интервалу длин волн, получим:

$$\Phi_{\rm o} - \Phi = \int_{\lambda_{\rm l}}^{\lambda_{\rm 2}} \Phi_{\lambda 0}(\lambda) \ \left[1 - \exp(-\chi(\lambda)\varphi l)\right] d\lambda \ . \tag{7.12}$$

Интервал длин волн может быть ограничен участком, где  $\chi(\lambda)$  заметно отличается от нуля. При достаточно узкой линии поглощения по сравнению с полосой зондирующего оптического излучения значение  $\Phi_{\lambda 0}$  на этом интервале длин волн изменяется слабо и, в соответствии с

теоремой о среднем, можно вынести  $\Phi_{\lambda 0}$  за знак интегрирования, заменив ее на некоторое среднее эффективное значение  $\Phi_{\lambda 0.9 d \phi}$ .

При тех же условиях и не очень сильном поглощении  $\chi(\lambda)$  также может быть заменена на  $\chi_{3\phi\phi}$ , а функция  $\exp(-\chi_{3\phi\phi} \phi l)$  вынесена за знак интеграла. Тогда:

$$\Phi_{o} - \Phi = \Phi_{\varphi\phi\phi} \left[ 1 - \exp(-\chi_{\varphi\phi\phi} \phi l) \right], \tag{7.13}$$

где  $\Phi_{\varphi\varphi\phi} = \Phi_{\lambda 0.\varphi\phi\phi} (\lambda_2 - \lambda_1).$ 

При очень сильном поглощении, когда спектр прошедшего через кювету с поглощающим газом ИК излучения принимает вид, изображенный на рисунке 7.3 б, в выражении (7.13) величины  $\Phi_{\lambda 0.3 \phi \phi}$  и  $\chi_{3 \phi \phi}$  уже нельзя считать постоянными параметрами, так как они изменяют свое значение.

Приведенный математический аппарат используется при переходе от идеального условия монохроматичности оптического излучения, для которого сформулирован закон Ламберта-Бера, к реальным условиям.

Прямое решение задачи потребовало бы точного знания функций  $\Phi_{\lambda 0}(\lambda)$  и  $\chi(\lambda)$ , что весьма затруднительно и привело бы к громоздким выражениям, которые могут быть рассчитаны лишь численными методами интегрирования и лишены наглядности. Конечный же результат имел бы меньшую ценность, так как пригоден только для совершенно конкретных  $\Phi_{\lambda 0}(\lambda)$  и  $\chi(\lambda)$  и лишен общности.

Тем не менее, определен вид зависимости и условия, при которых справедливы сделанные допущения. Допустив, что преобразование потоков излучения во всем тракте от фотоприемника до индикатора линейно, вместо выражения (7.13) можно записать

$$\Phi_{\text{Bbix}} = \Delta \Phi = \Phi_{\Rightarrow \phi \phi} [1 - \exp(-b_1 \phi)], \qquad (7.14)$$

где *b*<sub>1</sub> – константа.

Из (7.13) и (7.14) видно, что величины  $\Delta \Phi$  и  $\Phi_{3\phi\phi}$  зависят от  $\Phi_0$ , то есть необходим высокостабильный источник оптического излучения [26, 35, 37].

В исследуемом приборе применен электронный способ исключения влияния возможной нестабильности источника. В электронном тракте прибора коэффициент усиления электрического сигнала одинаков для обоих каналов и автоматически регулируется так, чтобы он был пропорционален  $\Phi_0$ . Это осуществить значительно проще, чем осуществить долговременную стабилизацию источника оптического излучения. Тем самым обеспечивается также исключение нестабильности параметров и характеристик всего оптического тракта.

В этом случае уравнение (7.14) можно переписать в виде:

$$I_{\rm Bbix} = a_1 \left[ 1 - \exp(-b_1 \phi) \right], \tag{7.15}$$

где *I*<sub>вых</sub> – выходной ток; *a*<sub>1</sub> – константа.

Вид зависимости, отражающий функцию (7.15) для постоянной длины оптического тракта (l = const), представлен на рисунке 7.4.



Рисунок 7.4 – Зависимость разностного сигнала от концентрации газа

Для определения содержания двуокиси углерода пользуются градуировочным графиком, где по числу делений, на которое отклоняется стрелка индикатора, находят объемную долю двуокиси углерода в процентах. Градуировочный график измерительного прибора должен иметь вид, подобный представленному на рисунке 7.4 [26, 36].

## Проверка соответствия формы градуировочной кривой теоретическим выражениям

В работе можно проверить соответствие градуировочной кривой уравнению (7.15). Для этого продифференцируем выражение (7.15):

$$dI_{\rm BMX} / d\phi = a_1 \, b_1 \exp\left(-b_1 \phi\right) \tag{7.16}$$

и полученное выражение прологарифмируем:

$$\ln (dI_{\text{Bbix}}/d\varphi) = \ln (a_1 b_1) - b_1 \varphi$$
(7.17)

или

$$y = a_2 - b_1 \varphi, \tag{7.18}$$

где  $y = \ln (dI_{\text{вых}}/d\phi), a_2 = \ln (a_1 b_1).$ 

Применим указанные процедуры к заданной градуировочной кривой и проверим, насколько полученный результат совпадает с прямой линией. Численное дифференцирование рекомендуется проводить по точкам.

Для этого по градуировочному графику заполняют таблицу 7.1:

		1		U U	U
$1.90\pi M H = K$	THODENVE	MONIT	LUJUUUUUUUUU	IIIIOII	UNUDOU
1 a O M M M a / 1 - K	IDODUDIU	WUUMDI	Ιμαμγήμουου	AUON	NUMBOR
1 .	1 1	1 1			1

n	$\varphi_n$	$I_n$	$(dI_{\text{Bbix}}/d\phi)_n$	$\ln(dI_{\text{BMX}}/d\phi)_n$
1				
2				

Затем по полученным данным строят график зависимости  $\ln(dI_{Bbix}/d\phi)_n$  от  $\phi_n$  и аппроксимируют его прямой линией в области от  $\phi = 0$  до  $\phi = \phi_x$ , где полученные точки удовлетворительно ложатся на прямую, не испытывая систематического отклонения от нее в ту или другую сторону.

#### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка создана на базе ИК фотометрического газоанализатора [26]. Для измерения содержания двуокиси углерода в помещении лаборатории воздушная смесь на вход газоанализатора 4 подается, как показано на рисунке 7.5.



Рисунок 7.5 – Схема для измерения содержания двуокиси углерода в помещении лаборатории

Компрессор 1 нагнетает воздух через фильтр-осушитель 2, расход смеси контролируется с помощью ротаметра 3.

#### Порядок выполнения работы

- 1. Подготовка газоанализатора к проведению лабораторной работы
- 1.1. Подключить прибор к сети и, нажав кнопку "СЕТЬ" (рис. 7.6), включить его.
- 1.2. Подождать 30 минут, пока прибор прогреется.
- 2. Измерение объемной доли углекислого газа в воздухе лаборатории
- 2.1. Собрать газовую схему, как показано на рисунке 7.5.
- 2.2. Включить микрокомпрессор и нажать кнопку "СЕТЬ" газоанализатора (рис.7.6).
- 2.3. С интервалом 30 с снять 30 показаний с микроамперметра газоанализатора. Результаты занести в таблицу 7.2.
- 2.4. Выполнить серии измерений по п.2.3 для трех различных местоположений микрокомпрессора в лаборатории.
- 2.5. После замеров отключить микрокомпрессор и газоанализатор.



Рисунок 7.6 – Лицевая панель инфракрасного газоанализатора

2.6. По градуировочной кривой, предоставленной преподавателем, определить объемные доли углекислого газа в воздухе лаборатории.

				2
	N п/п	φ <sub>1</sub> , ppm	φ <sub>2</sub> , ppm	φ <sub>3</sub> , ppm,
	1			
	2			

Таблица 7.2 – Результаты измерения концентрации углекислого газа

3. <u>Исследование метрологических характеристик инфракрасного</u> <u>газоанализатора</u>

30

По результатам измерения объемной концентрации углекислого газа в соответствии с п.2 Порядка выполнения работы рассчитать погрешности измерений для полученных концентраций.

- 3.1. Рассчитать доверительные границы случайной погрешности и неисключенной систематической погрешности (НСП) результата измерения (см. приложение Б).
- 3.2. Вычислить абсолютную и относительную погрешность результата измерения.
- 3.3. Записать результаты измерений с найденными доверительными границами погрешности.
- 3.4. Сделать вывод о том, какая из погрешностей измерения, случайная или неисключенная систематическая, вносит наибольший вклад в погрешность результата измерения.
- 3.5. По градуировочному графику (*I*<sub>вых</sub>(мкА) от φ(%)) газоанализатора определить участок, где зависимость *I*<sub>вых</sub> можно считать линейной.
- 3.6. Проверить соответствие градуировочной кривой уравнению (7.18).
- 3.7. По градуировочному графику определить диапазон объемной доли двуокиси углерода в помещении, где в пределах погрешности прибора может быть применена линейная зависимость выходного сигнала от объемной доли двуокиси углерода: I (дел) = bc. Определить значение коэффициента b и его размерность.

3.8. По результатам замеров объемной доли двуокиси углерода в лаборатории определить ее среднее значение, перечислить и оценить составляющие погрешности измерений при прямом преобразовании сигналов в инфракрасном газоанализаторе.

#### Содержание отчета

- 1. Принцип работы инфракрасного газоанализатора углекислого газа.
- 2. Схемы и краткое описание установки по измерению объемной доли двуокиси углерода в газовой смеси.
- 3. Результаты измерений объемной доли двуокиси углерода в атмосфере.
- 4. Расчет и анализ погрешностей измерений.
- 5. Выводы по работе.

#### Контрольные вопросы

- 1. Каковы основные особенности спектров поглощения газов в ИК диапазоне?
- 2. Для чего выполняется модуляция интенсивности излучения в инфракрасном газоанализаторе?
- 3. Какие факторы влияют на изменение содержания углекислого газа в атмосфере?

#### Лабораторная работа №8. Оптико-акустический газоанализатор

## Цели работы:

- 1. Изучение принципа работы и устройства оптико-акустического газоанализатора.
- 2. Измерение объемной доли двуокиси углерода в атмосфере.
- 3. Исследование метрологических характеристик оптико-акустического газоанализатора двуокиси углерода ГИАМ-15М.

## Краткие теоретические сведения

## Оптико-акустический эффект

Оптические методы газового анализа отличаются высокой избирательностью и чувствительностью. Одно из первых мест среди них в занимает оптико-акустический метод, избирательность которого, в противоположность обычным спектроскопическим методам, достигается без спектрального разложения, за счет применения селективных оптикоакустических приемников, использующих специфичность инфракрасных спектров поглощения газообразных, парообразных и жидких веществ [34].

Оптико-акустический эффект был открыт в 1880 году Беллом, Тинделем и Рентгеном. Этот эффект состоит в следующем. Если в сосуд, содержащий газ, способный поглощать инфракрасное излучение, направлять прерываемый с некоторой частотой поток излучения, то в газе возникает пульсация давления, субъективно воспринимаемая как звук, если частота прерывания имеет соответствующую величину. Пульсация давления происходит из-за того, что молекулы газа, поглощая кванты падающего излучения, приходят в возбужденное состояние, а затем энергия возбуждения их колебательно-вращательных степеней свободы переходит, в результате неупругих ударений между молекулами, в энергию поступательного движения последних, то есть в тепло, соответствующее повышению давления [36, 37].

Экспрессный оптико-акустический метод и первый лабораторный образец оптико-акустического газоанализатора были разработаны в СССР профессором М.Л. Вейнгеровым. Метод основан на поглощении прерывистого инфракрасного излучения и преобразовании энергии акустических колебаний в электрическое напряжение.

Универсальность оптико-акустического метода состоит в возможности анализировать все газообразные вещества, за исключением одноэлементных [38, 39].

## Физические основы действия оптико-акустических газоанализаторов

Оптико-акустические газоанализаторы основаны на одновременном использовании ряда физических явлений, главными из которых являются:

1) избирательное поглощение инфракрасного потока излучения большинством газов и паров, зависящее от толщины слоя газа, в котором происходит поглощение;

2) возбуждение акустических колебаний в замкнутом объеме, заполненном поглощающим газом, под воздействием модулированного с определенной частотой потока инфракрасного излучения.

Поглощение оптического излучения в полосах двухатомных линейных молекул типа СО<sub>2</sub> в пределах до эквивалентной толщины (произведение массовой концентрации поглощающего газа ρ на действительную толщину слоя *l* смеси поглошаюшего газа с непоглощающей примесью при нормальных температуре и давлении) слоя газа [37]

$$U^{\text{лин}}_{\text{макс}} = 16,8\delta / \alpha p \sqrt{m}, \qquad (8.1)$$
$$m = B h c / kT;$$

подчиняется (с точностью до нескольких процентов) закону линейного поглощения:

$$\Phi_{\Pi \Gamma \Pi} = \Phi_{\nu} \, \alpha_1 \, U \,, \tag{8.2}$$

где  $\Phi_{\text{погл}}$  - поток излучения, поглощенный в пределах полосы поглощения;  $\delta$  - полуширина вращательных линий полосы поглощения;  $\alpha_1$  – интегральный коэффициент поглощения в соответствующей полосе единичным слоем газа;  $\Phi_v$  - спектральная плотность потока источника излучения в центре полосы; p - постоянная, в большинстве случаев равная единице; B - вращательная постоянная молекулы; h - постоянная Планка; c- скорость света; k - постоянная Больцмана; T - термодинамическая температура газа.

При выполнении условия

$$U^{\text{лин}}_{\text{макс}} \leq U \leq U^{\sqrt{}}_{\text{макс}},$$

где

$$U_{\text{Makc}}^{\vee} \approx 1.46 \beta_{\text{p}}^{2} / (\alpha_1 \delta \sqrt{m}) , \qquad (8.3)$$

справедлив закон квадратного корня:

$$\Phi_{\text{погл}} \cong \frac{4.1 \quad \Phi_{\nu} \sqrt{\alpha_1 \delta U}}{\sqrt{p} \quad \sqrt[4]{m}} \quad , \tag{8.4}$$

если δ≤ β<sub>*p*</sub>/2π. Это допущение на практике при обычных условиях почти всегда соблюдается. Полученные формулы справедливы для широкого круга газов [37, 38].

В таблице 8.1 приведены значения основных параметров ряда полос поглощения и эквивалентной толщины слоев различных газов,

соответствующих верхним пределам применимости законов линейного поглощения (8.2) и квадратного корня (8.4).

np•	пределы применимоети закономерноетен потлощения						
	λ₀,	δ,	В,	α,	U <sub>макс</sub> лин,	U <sub>макс</sub> ,	Δν,
Газ	МКМ	см-1	см-1	см-2	СМ	СМ	см-1
	2,7	0,12		27+39	0,36	1,3	
$CO_2$	4,26	0,12	0,39	2700	0,009	0,03	110
	14,8	0,064		170	0,08	0,94	
CO	4,7	0,065	1,93	300	0,039	2,9	240
CH <sub>4</sub>	3,31	0,1	5,25	300	0,037	8,7	480

Таблица 8.1 – Основные параметры полос поглощения газов и прелелы применимости закономерностей поглошения

Примечание. λ<sub>0</sub> - длина волны центра полосы поглощения.

Как показали исследования, амплитуда *P* колебаний давления в оптико-акустической камере приближенно может быть выражена следующей формулой (при бесконечно большом акустическом сопротивлении стенок камеры и микрофона):

$$P = \frac{P_0 Q}{TG\sqrt{1 + \omega^2 C_V^2 / G^2}} , \qquad (8.5)$$

где  $P_0$  - статическое давление газа в камере; T - термодинамическая температура; G - тепловая проводимость системы газ-камера;  $C_V$  - теплоемкость газа;  $\omega$  - круговая частота модуляции; Q - амплитуда теплового потока, поглощенного в камере.

Очевидна справедливость соотношения Q=0,5  $\Phi_{\text{погл}}$ , где  $\Phi_{\text{погл}}$  - поток излучения, поглощенный в газе, заполняющем камеру, в полупериод освещения, и определяемый по формулам (8.2) или (8.4).

Таким образом, величина оптико-акустического эффекта определяется, при прочих равных условиях, величиной поглощенного в камере потока излучения и тепловыми параметрами заполняющей камеру газовой смеси. У многих газов теплопроводность и теплоемкость соответственно близки по величине. Поэтому можно принять в первом приближении, что относительная величина оптико-акустического эффекта при разном заполнении камеры определяется отношением потоков излучения, поглощенных в газах, заполняющих камеру.

#### Описание оптико-акустического газоанализатора

В основу разработки оптико-акустических газоанализаторов была положена оптическая схема измерения, основанная на дифференциальном методе. Сущность всякого дифференциального метода измерения сводится к определению разности значений измеряемой величины и величины известной, служащей мерой сравнения [26, 37, 38]. Оптико-акустический газоанализатор с дифференциальной оптической схемой состоит из двух идентичных оптических каналов, дифференциального фотоприемника и двух источников инфракрасного излучения 1 (рис. 8.1), излучение от которых направляется с помощью вогнутых зеркал 2 в оптические каналы.

На рисунке 8.1 светлые (зеленые) стрелки соответствуют поглощению сопутствующих (неопределяемых) компонентов контролируемой газовой смеси, темные (фиолетовые) - поглощению компонента, концентрация которого определяется [26].



Рисунок 8.1 – Дифференциальная схема оптико-акустического газоанализатора: 1 – излучатели; 2 - отражатели; 3 - двигатель модулятора; 4 – дисковый модулятор; 5, 6 – рабочая и сравнительная газовые камеры; 7, 8 - фильтровые камеры; 9, 10 - лучеприемные цилиндры; 11 - мерная камера с конденсаторным микрофоном.

В оптические каналы системы поступает как прямое излучение, так и излучение, отражаемое зеркалами. Потоки излучения прерываются в одной и той же фазе обтюратором 4 с частотой несколько герц.

В первом канале системы находится рабочая газовая камера 5, через которую непрерывно протекает газовая смесь. Симметрично, во втором канале расположена сравнительная газовая камера 6, которую заполняют азотом или чистым воздухом и герметически закрывают.

Пройдя газовые 5, 6 и фильтровые 7, 8 камеры, оба потока излучения попадают в лучеприемное устройство 9,10,11. Оно состоит из двух камер, называемых лучеприемными цилиндрами 9, 10, в которых поглощаются потоки излучения, и мерной камеры 11, разделенной упругой мембраной микрофона на две половины, каждая из которых соединена с соответствующим цилиндром.

Лучеприемные цилиндры 9, 10 герметически закрыты окнами, пропускающими инфракрасное излучение. Лучеприемное устройство (цилиндры и мерную камеру) заполняют газовой смесью, состоящей из измеряемого компонента и азота или воздуха. Поток инфракрасного излучения при прохождении через рабочую газовую камеру 5 частично поглощается исследуемой газовой смесью, в то время как в сравнительной камере 6 поглощения не происходит. Таким образом, в лучеприемные цилиндры 9, 10 по двум каналам поступают потоки излучения, разность значения которых зависит от содержания измеряемого газа, протекающего через рабочую камеру 5.

Под воздействием прерывистого излучения, поступающего в лучеприемные цилиндры, в них возникают периодические колебания температуры и давления заполняющего их газа. Давление газа преобразуется конденсаторным микрофоном, установленным в мерной камере лучеприемного устройства, в напряжение переменного тока, которое усиливается и регистрируется.

Чтобы уменьшить влияние на показания газоанализатора содержания в анализируемой газовой смеси неопределяемых компонентов, поглощения которых частично совпадают co спектры спектром анализируемого поглощения газа, смесью неопределяемых газов заполняют фильтровые камеры 7, 8. При этом часть энергии излучения, соответствующая полосам поглощения неопределяемых компонентов, поглощается в фильтровых камерах обоих каналов и в лучеприемное устройство не поступает.

## Назначение и принцип действия газоанализатора ГИАМ-15М

Изучение принципа работы оптико-акустического газоанализатора производится на промышленном приборе ГИАМ-15М [26]. Этот газоанализатор предназначен контроля атмосфере для В И В различных технологических процессах производств одного ИЗ компонентов: окиси углерода (CO), двуокиси углерода (CO<sub>2</sub>), метана  $(CH_4)$ , двуокиси серы  $(SO_2)$ , окиси азота (NO).

## Основные технические данные и характеристики

Диапазоны измерения об	0-500 ppm; 0–1000 ppm					
Предел допускаемой осн						
погрешности измерений	не более ±10%					
Предел допускаемого сре						
отклонения случайной составляющей основной						
приведенной погрешност	не более 0,3Δ					
Предел допускаемой вари	не более 0,1∆					
Выходной сигнал:	цифровой	0–500; 0–1000				
	аналоговый	0-5 мА				
Время прогрева		не более 180 мин.				
Время установления пока	не более 15 с.					
Macca		12,5 кг				
#### Условия эксплуатации

Температура Давление Относительная влажность Питание Потребляемая мощность +5 – +45 °C 630 – 800 мм рт. ст. от 30 до 80% 220 В, 50 Гц 90 Вт

#### Параметры анализируемого атмосферного воздуха на входе газоанализатора

Температура	+5 - +45 <sup>0</sup> C
Давление	700 – 820 мм рт. ст.
Объемный расход газовой смеси	(1±0,3) л/мин.
Влагосодержание	от 0,005 до 1 г/м <sup>3</sup>
Предельные значения объемной доли неизмеряемы	IX КОМПОНЕНТОВ В
анализируемой пробе смеси должны быть следуюц	цими:
$\mathrm{CH}_4$	не более 10000 ррт;

$CH_4$	не оолее 10000 ppm;
СО	не более 50000 ррт.
Содержание пыли	не более 1 мг/м <sup>3</sup>

### Структурная схема газоанализатора ГИАМ-15М

Газоанализатор ГИАМ-15М построен по дифференциальной оптической схеме с положительной фильтрацией (рис. 8.2) [26, 35]. Источниками ИК излучения являются два излучателя: И2 – в рабочем канале, И1 – в сравнительном канале. Поток ИК излучения поступает в два оптических канала. Оба потока поочередно прерываются с частотой 6,25 Гц обтюратором О1, приводимым во вращение синхронным двигателем М1.

В рабочем канале поток излучения проходит последовательно фильтровую ФК и рабочую РК камеры и поступает в левый лучеприемный цилиндр мерной камеры МК. В сравнительном канале поток излучения проходит последовательно фильтровую ФК и сравнительную СК камеры и поступает в правый лучеприемный цилиндр мерной камеры МК.

Через рабочую камеру непрерывно проходит анализируемая газовая смесь, сравнительная камера заполнена не поглощающим ИК энергию газом – азотом. Приемником ИК излучения является конденсаторный микрофон С, помещенный в мерную камеру, заполненную смесью измеряемого газа и аргона, что обеспечивает избирательность анализа.

Амплитуда возникающих колебаний мембраны конденсаторного микрофона зависит от объемной доли измеряемого компонента в анализируемой смеси. Колебания конденсаторного микрофона в мерной камере преобразуются в переменное напряжение, которое поступает на вход электронной схемы обработки сигнала У2.



Рисунок 8.2 – Структурная схема газоанализатора ГИАМ-15М

Синхронное детектирование сигнала от приемника ИК излучения обеспечивается закреплением на валу двигателя М малого обтюратора О2, который, вращаясь в одной фазе с основным обтюратором О1, прерывает световой поток светодиода Д1. Световые импульсы воспринимаются фотодиодным датчиком Д2 синхронного детектора.

Для начальной установки нулевой точки и балансировки потоков излучения служит нулевая заслонка ОЗ, которая вводится в сравнительный канал в процессе юстировки газоанализатора. Индикация расхода газовой смеси через рабочую кювету реализуется ротаметром РМ.

Электрическое питание источников и обеспечение рабочих режимов устройства синхронного детектирования осуществляются электронным устройством У1. Считывание показаний об измеренной объемной доле осуществляется по устройству цифровой индикации ЦИ [26].

### Электронная схема обработки сигнала измерительного канала газоанализатора ГИАМ-15М

Переменный сигнал конденсаторного микрофона С мерной камеры МК (рис. 8.3) усиливается согласующим усилителем СУ1 с высоким (не менее 1 ГОм) входным сопротивлением и поступает на плату измерительного усилителя АПИ5.103.039, на входе которой установлено контрольное гнездо Х13 "ВЫХ. КАМЕРЫ".

На входе измерительного усилителя установлены два избирательных усилителя ИУ1 и ИУ2, имеющих резонансные частоты  $f_{p1} = 6,3$  Гц и  $f_{p2} = 6,2$  Гц, что обеспечивает повышение отношения сигнал-шум и уменьшение влияния изменения частоты питания сети на показания газоанализатора.

Потенциометр R32, установленный на печатной плате измерительного усилителя, регулирует коэффициент усиления газоанализатора по переменному напряжению. Суммарный максимальный коэффициент усиления усилителей ИУ1 и ИУ2 - не менее 100. На выходе усилителя ИУ2 установлено контрольное гнездо X15 "ВЫХ.УС".



Рисунок 8.3 – Функциональная схема платы измерительного усилителя

Сигнал переменного напряжения с выхода ИУ2 поступает на синхронный детектор СД, который управляется от устройства управления УУ. Датчиком устройства управления является фотодиод Д2, который установлен в узле модулятора оптической части газоанализатора.

Для контроля работы синхронного детектора на печатной плате установлено контрольное гнездо X16 "ФАЗА".

Выходной сигнал синхронного детектора поступает на вход сумматора СУМ. Контроль уровня выходного постоянного напряжения сумматора осуществляется на контрольном гнезде X19 " ВЫХ.  $\Sigma$ ".

Регулировка начального нулевого уровня на выходе сумматора осуществляется установленным на передней панели газоанализатора потенциометром R136 " > 0 < ". Выходной сигнал сумматора через потенциометры R144 и R146 на передней панели газоанализатора, регулирующие усиление, и через переключатель диапазонов ПД поступает на вход линеаризатора. Линеаризатор состоит из четырех элементов:

- входного нормирующего усилителя НУ1;
- функционального преобразователя ФП, работающего по методу кусочно-линейной линеаризации;
- выходного коммутирующего усилителя НУ2;
- коммутирующего устройства К.

Нормирующий усилитель НУ1 осуществляет установку нулевых показаний потенциометром R76 и установку коэффициента передачи линеаризатора потенциометром R74.

Работа линеаризатора в двух диапазонах измерения обеспечивается коммутирующим устройством К, которое управляет напряжением U<sub>упр</sub>, поступающим от переключателя диапазонов ПД.

Контрольные гнезда X20 "ВХ. ЛИН." и X21 "ВЫХ. ЛИН." позволяют контролировать соответственно величину входного или выходного постоянного напряжения линеаризатора.

Выходное постоянное напряжение линеаризатора поступает на преобразователь «напряжение-ток» ПР и на устройство цифровой индикации ЦИ, расположенное на другой плате.

На второй вход сумматора поступает постоянное напряжение термокомпенсации начала шкалы  $U_{TK0}$ . На выходе усилителя  $Y_0$  формируется напряжение  $U_{TK0}$  разбаланса термозависимого резистивного моста постоянного тока  $M_0$ , в одно из плеч которого включено медное термосопротивление R19.2, расположенное в корпусе мерной камеры оптико-акустического блока. Величина  $U_{TK0}$  контролируется на контрольном гнезде X18 "TK<sub>0</sub>". Регулировка уровня напряжения на входе сумматора осуществляется потенциометром R70.

На третий вход сумматора поступает постоянное напряжение термокомпенсации конца шкалы. На выходе усилителя  $Y_K$  формируется напряжение  $U_{TKK}$  разбаланса термозависимого резистивного моста постоянного тока  $M_K$ , в одно из плеч которого включено медное термосопротивление R19.1, расположенное в корпусе мерной камеры оптико-акустического блока.

Таким образом, напряжение  $U_{TKK}$  зависит как от температуры окружающей среды, так и от величины измеряемой газоанализатором объемной доли измеряемого компонента. Величина  $U_{TKK}$  контролируется на контрольном гнезде X17 "TK<sub>K</sub>", а регулировка его уровня осуществляется потенциометром R48.

#### Режимы работы газоанализатора

Предел измерения в газоанализаторе устанавливается путем выбора одной из кнопок (рис. 8.4):

1) режим автоматического выбора предела измерения;

2) I - режим работы на первом пределе измерения (до 500 ppm);

3) II - режим работы на втором пределе измерения (до 1000 ppm).



Рисунок 8.4 – Лицевая панель газоанализатора ГИАМ-15М

Над кнопками расположены светодиоды для индикации предела измерения. Под цифровым табло расположен потенциометр регулировки нуля. Под кнопками I и II расположены потенциометры регулировки пределов измерений, предназначенные для регулировки показаний газоанализатора в процессе поверки эталонными газовыми смесями. Кнопка "К" предназначена для калибровки.

На задней панели (рис. 8.5) расположены штуцеры "ВХОД ГАЗА" и "ВЫХОД ГАЗА", предназначенные для подачи анализируемой газовой смеси. Под колпачком штуцера "ВЫХОД ГАЗА" находится сетчатый фильтр для очистки измеряемой смеси от пыли.



Рисунок 8.5 – Задняя панель газоанализатора

Штуцеры "ВХОД АЗОТА" и "ВЫХОД АЗОТА" предназначены для продувки оптико-акустического блока газоанализатора азотом.

Для предлагаемой лабораторной работы газоанализатор ГИАМ-15М настроен на измерение содержания двуокиси углерода (исходя из соображений безопасности для здоровья) [26].

Для измерения объемной доли двуокиси углерода в помещении лаборатории воздушная смесь на вход газоанализатора подается как показано на рисунке 7.5.

### Порядок выполнения работы

- 1. Подготовка газоанализатора к проведению лабораторной работы
- 1.1. "СЕТЬ" лицевой Включить кнопку (рис. 8.4) на панели газоанализатора. При должны загореться ЭТОМ светодиод. предназначенный для индикации наличия потока ИК излучения, цифровое табло, предназначенное для индикации показаний измеренной газоанализатором объемной доли, и один из светодиодов в зависимости от выбора пределов режимов измерения.
- 1.2. Подождать 30 минут, пока прибор прогреется.
- 1.3. Подключить шланг от штуцера "ВЫХОД ГАЗА" на штуцер сбросовой линии.
- 1.4. Произвести калибровку газоанализатора. Включить кнопку "К". Записать показания с цифрового табло. Используя калибровочное число, можно впоследствии устанавливать нулевые показания без процедуры продувки азотом.
- 2. Измерение объемной доли двуокиси углерода в воздухе лаборатории
- 2.1 Собрать газовую схему, как показано на рисунке 7.5.
- 2.2 Включить микрокомпрессор и кнопку "СЕТЬ " газоанализатора.
- 2.3 С интервалом в 30 с снять 30 показаний с табло газоанализатора. Результаты занести в таблицу 8.2
- 2.4 Выполнить серии измерений по п.2.3 последовательно для трех различных местоположений микрокомпрессора в лаборатории.
- 2.5 После замеров отключить микрокомпрессор и газоанализатор.

N п/п	φ <sub>1</sub> , ppm	φ <sub>2</sub> , ppm	φ <sub>3</sub> , ppm,
1			
2			
3			
30			

Таблица 8.2 Результаты измерения концентрации углекислого газа

### 3. Исследование метрологических характеристик оптико-акустического газоанализатора

По результатам измерения объемной концентрации двуокиси углерода в соответствии с п.2 Порядка выполнения работы рассчитать погрешности измерений для полученных концентраций [40, 41].

- 3.1. Рассчитать доверительные границы случайной погрешности и неисключенной систематической погрешности (НСП) результата измерения (см. приложение Б).
- 3.2. Вычислить абсолютную и относительную погрешность результата измерения.
- 3.3. Записать результаты измерений с найденными доверительными границами погрешности.
- 3.4. Сделать вывод о том, какая из погрешностей измерения, случайная или неисключенная систематическая, вносит наибольший вклад в погрешность результата измерения.
- 3.5. По результатам замеров объемной доли двуокиси углерода в лаборатории определить ее среднее значение и оценить составляющие погрешности.

### Содержание отчета

- 1. Принцип работы оптико-акустического газоанализатора.
- 2. Схемы и краткое описание установки по измерению объемной доли двуокиси углерода в газовой смеси.
- 3. Результаты измерений объемной доли двуокиси углерода в атмосфере.
- 4. Расчет и анализ погрешностей измерений.
- 5. Выводы по работе.

#### Контрольные вопросы

- 1. Сформулируйте, в чем заключается оптико-акустический эффект.
- 2. Чем определяется величина оптико-акустического эффекта?
- 3. Что такое газовый фильтр оптического излучения?
- 4. В чем смысл калибровки газоанализатора?

### СПИСОК ИНФОРМАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1. РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. URL: <u>http://docs.cntd.ru/document/1200115154</u>
- Селиванов М.Н., Фридман А.Э. Кудряшова Ж.Ф. Качество измерений: Метрологическая справочная книга. – Л.: Лениздат, 1987. – 295с.
- 3. Цуккерман С.Т., Гридин А.С. Управление машинами при помощи оптического луча. М.: Машиностроение, 1969.
- 4. Джабиев А.Н., Мусяков В.Л., Панков Э.Д., Тимофеев А.Н. «Оптикоэлектронные приборы и системы с оптической равносигнальной зоной». Монография / Под. общ. ред. Э.Д. Панкова - СПб., ИТМО, 1998. – 238с.
- 5. Коротаев В.В. Измерительные оптико-электронные приборы. Методические указания по выполнению лабораторных работ. 2011. URL: <u>http://oeps.ifmo.ru/uchebn/LR\_IOEP\_3.pdf</u>
- Коротаев В. В., Мараев А. А., Тимофеев А. Н. «Телеориентирование в луче с оптической равносигнальной зоной». Монография /Под общей редакцией А. Н. Тимофеева. СПб: Университет ИТМО, 2015. – 326 с. ISBN 978-5-7577-0522-4
- Коняхин И.А., Мараев А.А., Тимофеев А.Н., Гусаров В.Ф. Контроль смещений в оптико-электронных системах с оптической равносигнальной зоной // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т.58, №1. - С. 38 – 44.
- 8. ГОСТ 8.009-84 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. URL: <u>http://docs.cntd.ru/document/1200004505</u>
- Valery V. Korotaev, Anton V. Pantiushin, Mariya G. Serikova, Andrei G. Anisimov "Deflection measuring system for floating dry docks", Ocean Engineering Vol. 117 (2016), pp. 39–44; doi:10.1016/j.oceaneng.2016.03.012
- 10. Р 50.2.028-2003 ГСИ. Алгоритмы построения градуировочных характеристик средств измерений состава веществ и материалов и оценивание их погрешностей (неопределенностей). Оценивание погрешности (неопределенности) линейных градуировочных характеристик при использовании метода наименьших квадратов. URL: <u>http://www.gosthelp.ru/text/R5020282003GSIAlgoritmypo.html</u>
- 11. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981. 584 с.
- 12. Эллипсометрия метод исследования поверхности / Отв. ред. А.В. Ржанов. Новосибирск: Наука, 1983.-180 с.
- 13. Эллипсометр ЛЭФ-3М-1. Паспорт. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.

- 14. Коротаев, В. В. Измерительные оптико-электронные приборы. Методические указания по выполнению лабораторных работ : методические указания / В. В. Коротаев, Краснящих.А.В.. — Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2006. — 104 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <u>https://e.lanbook.com/book/43599</u> (дата обращения: 05.10.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
- 15. Панков Э.Д., Коротаев В.В. Поляризационные угломеры. М., Недра, 1992 г., 240 с., ил.
- 16. Бондаренко И.Д., Принципы построения фотоэлектрических автоколлиматоров. Минск. Изд-во «Университетское», 1984.
- 17. Афанасьев В.А., Жилкин А.М., Усов В.С. Автоколлимационные приборы. М., Недра, 1982, 144 с.
- 18. Аникст Д.А. и др. Высокоточные угловые измерения. Под ред. Ю.Г. Якушенкова. М.: Машиностроение, 1987., 480 с., ил.
- 19. Разумовский С.Д., Раковски С.К., Шопов Д.М. Озон и его реакции с органическими соединениями, София, 1983.
- 20. Меннинг У.Д., Федер У.А. Биомониторинг загрязнения атмосферы с помощью растений. Л.; Гидрометиздат, 1985.
- 21. Контроль химических и биологических параметров окружающей среды / Под ред. Исаева Л.К. СПб: Эколого-аналитический информационный центр "Союз", 1998. 896 с.
- 22. Богдан М.В., Зарембо Ю.М., Богдан М.М., Хилько С.В. Использование экологически чистых технологий. Здоровье и окружающая среда, РНПЦГ, вып.3, 2004.
- 23. Соловьёва О.А., Фалова О.Е. Озонирование как экологически безопасная процедура очистки питьевой воды. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2012. № 1. С. 103-104 4.
- 24. Миков А.Г., Соломонов А.Б., Глушанкова И.С., Морозовский А.И., Вайсман Я.И. Опыт применения озонирования для очистки промышленных и хозбытовых стоков. Научные исследования и инновации. 2010. Т. 4. № 3. С. 56-63.19
- 25. Горелик Д.О., Конопелько Л.А. Мониторинг загрязнения атмосферы и источников выбросов. М.; из-во Стандартов, 1992, 432 с.
- 26. М.А. Кустикова, М.Н. Мешалкина, В.Л. Мусяков, А.Н. Тимофеев Методические указания к лабораторным работам по разделу «Оптико-электронные газоанализаторы». Санкт-Петербург, 2010, URL: <u>http://oeps.ifmo.ru/uchebn/LR IOEP 2.pdf</u>
- 27. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия М., 1962.
- 28. Соколов В. А. Методы анализа газов. Гостоптехиздат, 1958.
- 29. Вронский В. А. Прикладная экология. Ростов-на-Дону: Феникс, 1996. -512с.

- 30. Гордон П., Грегори П. Органическая химия красителей: перевод с английского. Москва: Мир, 1987. С. 24, 105, 274.
- Фомин Г.С., Фомина О.Н. Воздух. Контроль загрязнений по международным стандартам. Справочник. – М.: Госстандарт России, 2002.
- 32. Левин А.С. Введение в общую экологию. Курс лекций Таллин: LEX, 1996. -174 с.
- Горелик Д.О., Конопелько Л.А., Панков Э.Д. Экологический мониторинг. Оптико-электронные приборы и системы. Том 1 – СПб, Крисмас+, 1998. -735 с.
- 34. Бёккер Ю. Спектроскопия = Spektroskopie / Пер. с нем. Л. Н. Казанцевой, под ред. А. А. Пупышева, М. В. Поляковой. М.: Техносфера, 2009. 528 с. ISBN 978-5-94836-220-5.
- 35. Франко Р.Т., Кадук Б.Г., Кравченко А.А. Газоаналитические приборы и системы. М., Машиностроение, 1983, 128 с.
- 36. Бродский А.К. Краткий курс общей экологии. С-Пб, 1992, 152с.
- Горелик Д.О., Конопелько Л.А., Панков Э.Д. Экологический мониторинг. Оптико-электронные приборы и системы. Том 2 – СПб, Крисмас+, 1998. – 592 с.
- 38. Козинцев В.И., Белов М.Л., Городничев В.А. Федоров Ю.В. Лазерный оптико-акустический анализ многокомпонентных газовых смесей. Монография. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. ISBN: 5-7038-2134-7
- 39. Старикова М., Кузнецова И., Костюкова Н. Лазерный оптикоакустический спектрометр для газоанализа в медицине // Фотоника. Лазеры и лазерные системы. 2015. №3. - С. 84-93.
- 40. ГОСТ Р 8.736-2011 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.
- 41. ГОСТ Р ИСО 5479-2002. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения

### ПРИЛОЖЕНИЕ А

#### Измеряемые величины и их единицы

Основной задачей газового анализа является определение вида газов, присутствующих в многокомпонентной газовой смеси, и значений их содержаний, т. е. нахождение спектра содержаний.



Рисунок А.1 – Спектр содержаний многокомпонентной газовой смеси

На рисунке А.1 по оси абсцисс отложены номера *i* соответствующих компонентов газовой смеси, по оси ординат – их содержания *X<sub>i</sub>*.

Содержания компонентов газовой смеси могут выражаться различными физическими величинами. Наиболее распространенными из них являются:

1) массовая концентрация, определяемая отношением массы *m<sub>i</sub> i*-го компонента газовой смеси к объему *V* смеси:

$$\rho_i = m_i / V \tag{A.1}$$

Массовая концентрация обычно выражается:

числом граммов вещества в 1 л (г/л); числом граммов вещества в 1 м<sup>3</sup> (г/м<sup>3</sup>); числом миллиграммов вещества в 1 л (мг/л); числом миллиграммов вещества в 1 м<sup>3</sup> (мг/м<sup>3</sup>);

2) массовая доля, определяемая отношением массы *m<sub>i</sub> i*-го компонента к общей массе смеси:

$$w_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$$
 100, (A.2)

Массовая доля выражается числом граммов вещества в 100 г смеси (%).

3) объемная доля, определяемая отношением объема  $V_i$  *i*-го компонента к общему объему  $V = \sum_{i=1}^{n} V_i$  газовой смеси:

$$\varphi_i = \frac{V_i}{V} \,. \tag{A.3}$$

Объемная доля обычно выражается:

числом миллилитров вещества в 100 мл смеси (%);

числом миллилитров вещества в 1 л (%);

числом миллилитров вещества в 1 м<sup>3</sup> (млн<sup>-1</sup>; международное обозначение – ppm (parts per million) – миллионная доля):

$$1 \text{ ppm} = 1/10^6$$

Очень малые доли выражаются во внесистемных единицах - миллиардных долях - ppb (parts per billion):

1 ppb =
$$1/10^9$$
.

При необходимости можно переходить от одних единиц к другим, воспользовавшись известными формулами.

Соотношение между млн<sup>-1</sup> и мг/л при 25 °С и 760 мм рт. ст.:

1 млн<sup>-1</sup> = 24 450/
$$M$$
 мг/л; (A.4)

$$1 \text{ мг/л} = M/24 450 \text{ млн}^{-1},$$
 (A.5)

где *М* – молярная масса вещества, содержание которого выражается.

Массовая концентрация ρ может быть пересчитана в объемную долю φ и обратно по формулам:

$$ρ = 0,16 φM p/T, Γ/M3,$$
(A.6)

$$\varphi = -\rho T / 0.16 \text{ pM}$$
, %, (A.7)

где *р* – давление газа, мм рт. ст.; *Т* - абсолютная температура, К.

Формулы (А.6) и (А.7) справедливы только для идеального газа; однако они остаются достаточно точными для реальных газов при обычных температурах и давлениях.

Содержание газообразных веществ иногда удобно выражать их парциальным давлением. Парциальное давление можно пересчитать в миллионные доли по формуле:

парциальное давление компонента

----- 10<sup>6</sup> = доля компонента в миллионных долях. общее давление

### ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Обработка результатов наблюдений при прямых измерениях

Статистическая обработка результатов наблюдений при прямых измерениях выполняется в соответствии с положениями ГОСТ Р 8.736-2011, ГОСТ Р ИСО 5479-2002 и включает следующие операции:

- исключение известных систематических погрешностей из результатов наблюдений;
- вычисление среднего арифметического исправленных результатов наблюдений, принимаемого за результат измерения;
- вычисление оценки среднего квадратического отклонения результата наблюдения;
- вычисление оценки среднего квадратического отклонения результата измерения;
- проверка гипотезы о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению с уровнем значимости q = 10...2%;
- обнаружение и исключение грубых погрешностей;
- вычисление доверительных границ случайной погрешности (случайной составляющей погрешности) результата измерения при доверительной вероятности α = 0,95; если измерение нельзя повторить, то допускается дополнительно указывать границы для α = 0,99; в особых случаях допускается принимать α > 0,99;
- вычисление доверительных границ неисключенной систематической погрешности (неисключенных остатков систематической погрешности) результата измерения;
- вычисление доверительных границ погрешности результата измерения.

### Исключение известных систематических погрешностей из результатов наблюдений

Следует проанализировать результаты наблюдений и при обнаружении систематических погрешностей (или если они известны) исключить их. Например, уровень шумов измерительного прибора надо вычесть из всех результатов наблюдений.

## Вычисление среднего арифметического исправленных результатов наблюдений, принимаемого за результат измерения

Результат измерения вычисляется по формуле:

$$\widetilde{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} X_{i}, \qquad (5.1)$$

где *n* – число результатов наблюдений; *X<sub>i</sub>* – *i*-ый результат наблюдения.

### Вычисление оценки среднего квадратического отклонения результата наблюдений

Оценка среднего квадратического отклонения (СКО) результата наблюдений определяется формулой:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (X_i - \widetilde{X})^2} .$$
 (5.2)

### Вычисление оценки среднего квадратического отклонения результата измерения

Оценка СКО результата измерения определяется формулой:

$$S(\tilde{X}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n} (X_i - \tilde{X})^2} = \frac{S}{\sqrt{n}}.$$
 (B.3)

Ответ следует записать, оставив 1 значащую цифру (или 2 значащие цифры, если цифра старшего разряда меньше или равна 3).

# Проверка гипотезы о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению с уровнем значимости *q* от 10% до 2%

Проверка гипотезы о нормальном распределении проводится для числа результатов наблюдений *n* > 15.

При  $n \leq 15$  их принадлежность к нормальному распределению не проверяется. В этом случае нахождение доверительных границ случайной погрешности результата измерения по данной методике допустимо лишь в случае, когда заранее известно, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению.

Если же результаты наблюдений не принадлежат нормальному распределению, то методика вычисления доверительных границ случайной погрешности результата измерения должна быть другой.

### Проверка нормальности распределения результатов наблюдений при *n* ≥ 50

В этом случае для проверки предпочтительным является один из критериев:  $\chi^2$  Пирсона или  $\omega^2$  Мизеса-Смирнова. Рассмотрим проверку по критерию Пирсона.

1. Весь диапазон полученных результатов наблюдений разбивается на r интервалов  $\Delta X_j$  (j = 1, 2, ..., r). Количество интервалов выбирается в соответствии с таблицей Б.1.

Таблица Б.1 – К в	ыбору количест	за интервалов
-------------------	----------------	---------------

п	r
50 - 100	7 - 9
100 - 500	8 –12

2. Для каждого интервала  $\Delta X_j$  подсчитывается число наблюдений  $m_j$ , попавших в него, то есть число  $X_i$ , для которых  $X_j < X_i \le X_{j+1}$ .

Ширина интервалов может быть неодинаковой. Ее следует уменьшать с ростом относительного числа наблюдений, попадающих в интервал.

3. Рассчитывается доверительная вероятность  $\alpha_j$  попадания в интервал  $\Delta X_j$  при условии, что рассматриваемая выборка принадлежит нормальному распределению:

 определяются выборочное среднее (среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений) X и выборочное СКО (оценка СКО результата наблюдений) S по формулам (Б.1), (Б.2);

2) для каждого интервала  $\Delta X_j$  рассчитываются значения

$$\zeta_j = (X_j - \widetilde{X}) / S$$
,  $\zeta_{j+1} = (X_{j+1} - \widetilde{X}) / S$ ;

 3) по таблице Б.2 определяются значения нормированной функции Лапласа Φ(|ζ<sub>j</sub> |) и Φ(|ζ<sub>j+1</sub>|);

4) рассчитываются доверительные вероятности  $\alpha_j$  попадания результата наблюдения в интервал  $\Delta X_j$  по формуле:

$$\alpha_j = \zeta_{j+1} \Phi(|\zeta_{j+1}|) / |\zeta_{j+1}| - \zeta_j \Phi(|\zeta_j|) / |\zeta_j|.$$

После определения  $\alpha_j$  проводится коррекция интервалов  $\Delta X_j$ : если для какого-нибудь интервала  $\Delta X_j$  получится, что  $n\alpha_j < 5$ , то этот интервал объединяется с тем из соседних, у которого доверительная вероятность  $\alpha_j$  меньше.

4. Определяется значение величины

$$U = \sum_{j=1}^{r} \frac{\left(m_{j} - n_{j}\alpha_{j}\right)^{2}}{n\alpha_{j}}$$

5. Проверяется нормальность распределения результатов наблюдений. Распределение нормально, если:

$$\chi^2_{r-3, q/2} < U < \chi^2_{r-3, 1-q/2}$$
,

где  $\chi^2_{r-3, q/2}$ ,  $\chi^2_{r-3, 1-q/2}$  – квантили  $\chi^2$ -распределения с n = (r-3) степенями свободы при вероятности q/2 и (1-q/2), соответственно (см. таблицу Б.3).

Таблица Б.2 – Значения функции  $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{z} e^{-\frac{x}{2}} dx$ 

Z.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,0000	00399	00798	01197	01595	01994	02392	02790	03188	03586
0,1	03983	04380	04776	05172	05567	05962	06356	06749	07142	07535
0,2	07926	08317	08706	09095	09483	09871	10257	10642	11026	11409
0,3	11791	12172	12552	12930	13307	13683	14058	14431	14803	15173
0,4	15542	15910	16276	16640	17003	17364	17724	18082	18439	18793
0,5	19146	19497	19847	20194	20540	20884	21226	21566	21904	22240
0,6	22575	22907	23237	23565	23891	24215	24537	24857	25175	25490
0,7	25804	26115	26424	26730	27035	27337	27637	27935	28230	28524
0,8	28814	29103	29389	29673	29955	30234	30511	30785	31057	31327
0,9	31594	31859	32121	32381	32639	32894	33147	33398	33646	33891
1,0	34134	34375	34614	34850	35083	35314	35543	35769	35993	36214
1,1	36433	36650	36864	37076	37286	37493	37698	37900	38100	38298
1,2	38493	38686	38877	39065	39251	39435	39617	39796	39973	40147
1,3	40320	40490	40658	40824	40988	41149	41309	41466	41621	41774
1,4	41924	42073	42220	42364	42507	42647	42786	42922	43056	43189
1,5	43319	43448	43574	43699	43822	43943	44062	44179	44295	44408
1,6	44520	44630	44738	44845	44950	45053	45154	45254	45352	45449
1,7	45543	45637	45728	45818	45907	45994	46080	46164	46246	46327
1,8	46407	46485	46562	46638	46712	46784	46856	46926	46995	47062
1,9	47128	47193	47257	47320	47381	47441	47500	47558	47615	47670
2,0	47725	47778	47831	47882	47932	47982	48030	48077	48124	48169
2,1	48214	48257	48300	48341	48382	48422	48461	48500	48537	48574
2,2	48610	48645	48679	48713	48745	48778	48809	48840	48870	48899
2,3	48928	48956	48983	49010	49036	49061	49086	49111	49134	49158
2,4	49180	49202	49224	49245	49266	49286	49305	49324	49343	49361
2,5	49379	49396	49413	49430	49446	49461	49477	49492	49506	49520
2,6	49534	49547	49560	49573	49585	49598	49609	49621	40632	49643
2,7	49653	49664	49674	49683	49693	49702	49711	49720	49728	49736
2,8	49744	49752	49760	49767	49774	49781	49788	49795	49801	49807
2,9	49813	49819	49825	49831	49836	49841	49846	49851	49856	49861

Проверка нормальности распределения при 15 < *n* < 50

В этом случае проверка производится по составному критерию. *Критерий 1.* Результаты наблюдений распределены нормально, если:

$$d_{_{1-q_{1}/2}} < \widetilde{d} \leq d_{_{q_{1}/2}}$$
 ,

где  $\widetilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^{n} |X_i - \widetilde{X}|}{nS^*}$ ; S\* – смещенная оценка СКО; S\* =  $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \widetilde{X})^2}{n}}$ ;  $d_{1-q_1/2}$  и  $d_{1-q_1}$  – квантили распределения для заданных n,  $q_1/2$  и  $(1 - q_1/2)$  из таблицы Б.4., где  $q_1$  – заранее выбранный уровень значимости критерия.

<i>n</i> - 1	Вероятность ү								
	0,01	0,02	0,05	0,1	0,9	0,95	0,98	0,99	
1	0,00016	0,00063	0,00393	0,0158	2,706	3,841	5,412	6,635	
2	0,0201	0,0404	0,103	0,211	4,605	5,991	7,824	9,210	
3	0,115	0,185	0,352	0,584	6,251	7,815	9,837	11,345	
4	0,297	0,429	0,711	0,064	7,779	9,488	11,668	13,277	
5	0,554	0,752	1,145	1,610	9,236	11,070	13,388	15,086	
6	0,872	1,134	1,635	2,204	10,645	12,592	15,033	16,812	
7	1,239	1,564	2,167	2,833	12,017	14,067	16,622	18,475	
8	1,646	2,032	2,733	3,490	13,362	15,507	18,168	20,090	
9	2,088	2,532	3,325	4,168	14,684	16,919	19,679	21,666	
10	2,588	3,059	3,940	4,865	15,987	18,307	21,161	23,209	
11	3,053	3,609	4,575	5,578	17,275	19,675	23,618	24,725	
12	3,571	4,178	5,226	6,304	18,549	21,026	24,054	26,217	
13	4,107	4,765	5,892	7,042	19,812	22,362	25,472	27,688	
14	4,660	5,368	6,571	7,790	21,064	23,685	26,873	29,141	
15	5,229	5,985	7,261	8,547	22,307	24,996	28,259	30,578	
16	5,812	6,614	7,962	9,312	23,296	26,296	29,633	32,000	
17	6,408	7,255	8,672	10,085	24,769	27,587	30,995	33,409	
18	7,015	7,906	9,390	10,865	25,989	28,869	32,346	34,805	
19	7,633	8,567	10,117	11,651	27,204	30,144	33,687	36,191	
20	8,260	9,237	10,851	12,443	28,412	31,410	35,020	37,566	
21	8,897	9,915	11,591	13,240	29,615	32,671	36,343	38,932	
22	9,542	10,600	12,338	14,041	30,813	33,924	37,659	40,289	
23	10,196	11,293	13,091	14,848	32,172	35,168	38,959	41,638	
24	10,856	11,992	13,848	15,659	33,196	36,415	40,270	42,980	
25	11,524	12,697	14,611	16,473	34,382	37,652	41,566	44,314	
26	12,198	13,409	15,379	17,292	35,563	38,886	42,856	45,642	
27	12,879	14,125	16,151	18,114	36,741	40,113	44,140	46,963	
28	13,565	14,847	16,928	18,939	37,916	41,337	45,419	48,278	
29	14,256	15,574	17,708	19,768	39,087	42,557	46,693	49,588	
30	14,953	16,306	18,493	20,599	40,258	43,773	47,962	50,982	

Таблица Б.3 – Квантили  $\chi^2_{n-1,\gamma}$ 

Таблица Б.4 – К проверке по первому критерию при 15 < n < 50

n	$(q_1/2)$ .	100%	$(1 - q_1/2)$	)• 100%
	1%	5%	95%	99%
16	0,9137	0,8884	0,7236	0,6829
21	0,9001	0,8768	0,7304	0,6950
26	0,8901	0,8686	0,7360	0,7040
31	0,8826	0,8625	0,7404	0,7110
36	0,8769	0,8578	0,7440	0,7167
41	0,8722	0,8540	0,7470	0,7216
46	0,8682	0,8508	0,7496	0,7256
51	0,8648	0,8481	0,7518	0,7291

#### Критерий 2.

Результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению, если не более *m* разностей  $|X_i - \tilde{X}|$  превзошли значение  $z_{\alpha/2}S$ , где *S* – выборочное СКО (по формуле (Б.2));  $z_{\alpha/2}$  – верхняя квантиль распределения нормированной функции Лапласа (таблица Б.2), отвечающая вероятности  $\alpha/2$ . Вероятность  $\alpha$  определяется по выбранному уровню значимости критерия  $q_2$  и числу наблюдений *n* в таблице Б.5.

При выбранном уровне значимости, отличающемся от приведенных в таблице Б.5., значение вероятности определяется путем линейной интерполяции.

Если при проверке нормальности распределения по составному критерию выбраны уровни значимости  $q_1 \neq q_2$ , то результирующий уровень значимости составного критерия  $q \leq q_1 + q_2$ .

		1 1 1		
n	т			
		1%	2%	5%
10	1	0,98	0,98	0,96
11 - 14	1	0,99	0,98	0,97
15 -20	1	0,99	0,99	0,98
21 - 22	2	0,98	0,97	0,96
23	2	0,98	0,98	0,96
24 - 27	2	0,98	0,98	0,97
28 - 32	2	0,99	0,98	0,97
33 - 35	2	0,99	0,98	0,98
36 - 49	2	0,99	0,99	0,98

Таблица Б.5 – К проверке по второму критерию при 15 < *n* < 50

Если хотя бы один из критериев не соблюдается, то считают, что распределение результатов наблюдений не соответствует нормальному.

#### Обнаружение грубых погрешностей

Если результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению, то грубые погрешности исключают.

Сначала проверяется, не являются ли максимальный  $X_{max}$  и минимальный  $X_{min}$  результаты наблюдений результатами с грубыми погрешностями.

Результат наблюдений, определяющий наибольшее значение величины U, является результатом с грубой погрешностью для принятого уровня значимости q, если  $U > l_{n, 1-q}$ , где

$$U = \frac{\max(|X_{\min} - \widetilde{X}|, |X_{\max} - \widetilde{X}|)}{S};$$

 $\tilde{X}$  – выборочное среднее (см. (Б.1)); *S* – выборочное СКО (см. (Б.2));  $X_{min} = min X_i$  (1 < *i* < *n*);  $X_{max} = max X_i$  (1 < *i* <*n*);  $l_{n, 1-q}$  — квантили распределения, приведенные в таблице Б.6.

Выявленный результат наблюдений с грубой погрешностью исключают из выборки и повторяют все предыдущие действия. Эта процедура повторяется, пока все результаты наблюдений с грубыми погрешностями не будут исключены, то есть пока не будет  $U < l_{n, 1-q}$ .

п	q			п	q		
	0,01	0,05	0,10		0,01	0,05	0,10
3	1,414	1,414	1,412	28	3,258	2,929	2,764
4	1,718	1,710	1,689	29	3,275	2,944	2,778
5	1,972	1,917	1,869	30	3,291	2,958	2,792
6	2,161	2,067	1,996	31	3,307	2,972	2,805
7	2,310	2,182	2,093	32	3,322	2,985	2,818
8	2,431	2,273	2,172	33	3,337	2,998	2,830
9	2,532	2,349	2,238	34	3,351	3,010	2,842
10	2616	2,414	2,294	35	3,364	3,022	2,853
11	2,689	2,470	2,343	36	3,377	3,033	2,864
12	2,753	2,519	2,387	37	3,389	3,044	2,874
13	2,809	2,563	2,426	38	3,401	3,055	2,885
14	2,859	2,602	2,461	39	3,413	3,065	2,894
15	2,905	2,638	2,494	40	3,424	3,074	2,904
16	2,946	2,670	2,523	41	3,435	3,084	2,913
17	2,983	2,701	2,551	42	3,445	3,094	2,922
18	3,017	2,728	2,577	43	3,455	3,103	2,931
19	3,049	2,754	2,601	44	3,465	3,112	2,940
20	3,079	2,779	2,623	45	3,474	3,120	2,948
21	3,106	2,801	2,644	46	3,783	3,129	2,956
22	3,132	2,823	2,664	47	3,492	3,137	2,964
23	3,156	2,843	2,683	48	3,501	3,145	2,972
24	3,179	2,862	2,701	49	3,510	3,152	2,980
25	3,200	2,880	2,718	50	3,518	3,160	2,987
26	3,220	2,897	2,734	51	3,526	3,167	2,994
27	3,239	2,913	2,749	52	3,966	3,175	3,001

Таблица Б.6 – К обнаружению грубых погрешностей

### Вычисление доверительных границ случайной погрешности результата измерения

Доверительные границы є (без учета знака) случайной погрешности результата измерения находят по формуле:

$$\varepsilon = t(n-1;\alpha)S(\widetilde{X}) ,$$

где  $t(n-1;\alpha)$  – коэффициент Стьюдента, определяемый по доверительной вероятности  $\alpha$  и числу результатов наблюдений *n* в таблице Б.7.

<i>n</i> - 1	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,99$	<i>n</i> - 1	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,99$
3	3,182	5,841	16	2,120	2,921
4	2,776	4,604	18	2,101	2,878
5	2,571	4,032	20	2,086	2,845
6	2,447	3,707	22	2,074	2,819
7	2,365	3,499	24	2,064	2,797
8	2,306	3,355	26	2,056	2,779
9	2,262	3,250	28	2,048	2,763
10	2,228	3,169	30	2,043	2,750
12	2,179	3,055	$\infty$	1,960	2,576
14	2,145	2,977			

Таблица Б.7 – К определению коэффициента Стьюдента

### Вычисление доверительных границ неисключенной систематической погрешности результата измерения

Неисключенная систематическая погрешность (НСП) результата измерения образуется из составляющих, в качестве которых могут быть НСП метода, средств измерений и НСП, вызванные другими источниками. Например, в качестве границ НСП принимают пределы допускаемых основной и дополнительной погрешностей средств измерений, если случайные составляющие погрешности пренебрежимо малы.

При суммировании составляющих НСП результата измерения НСП средств измерений каждого типа и погрешности поправок рассматривают как случайные величины. При отсутствии данных о виде распределения этих случайных величин их распределения принимают за равномерные.

Границы НСП результата измерения вычисляют путем построения композиции распределений составляющих НСП. При равномерном распределении составляющих НСП эти границы определяются по формулам:

 $\theta = \theta_1$  при m = 1,

где *т*—число составляющих НСП;

$$\theta = K(\alpha, m) \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \theta_i^2}$$
 при  $m \ge 2$ ,

где θ<sub>i</sub> – граница *i*-той составляющей НСП. Доверительную вероятность α для вычисления границ НСП принимают той же, что и при вычислении доверительных границ случайной погрешности результата измерения.

При доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  принимают K(0,95; m) = 1,1. При  $\alpha = 0,99$  берут K(0,99; m) = 1,4, если m > 4. Если же  $m \le 4$ , то значение K(0,99; m) определяют по графику зависимости K = f(m,l), приведенному на рисунке Б.1, где  $l = \theta_1/\theta_2$ .

При m = 3 или m = 4 в качестве  $\theta_1$  принимают составляющую, по численному значению наиболее отличающуюся от других, а в качестве  $\theta_2 -$ ближайшую к  $\theta_1$  составляющую.



Ответ следует записать, оставив 1 значащую цифру (или 2 значащие цифры, если цифра старшего разряда меньше или равна 3).

### Вычисление доверительных границ погрешности результата измерения

При определенных соотношениях между доверительными границами случайной погрешности и НСП можно пренебречь той или другой. Для выявления указанных соотношений необходимо вычислить доверительную границу результата измерений, воспользовавшись следующей системой уравнений:

$$\Delta = \begin{cases} \varepsilon & \text{при } \frac{\theta}{S(\widetilde{X})} < 0.8; \\ \theta & \text{при } \frac{\theta}{S(\widetilde{X})} > 8. \end{cases}$$

Возникающая при этом погрешность не превышает 15%.

Если соотношения не выполняются, то доверительную границу погрешности результата измерения находят путем построения композиции распределений случайной погрешности и НСП, рассматриваемых как случайные величины, аналогично расчету доверительной границы НСП.

Если при этом доверительные границы случайной погрешности найдены, то доверительную границу погрешности результата измерения допускается вычислять по формуле:

$$\Delta = K S_{\Sigma} ,$$

где  $S_{\Sigma}$  – оценка суммарного СКО результата измерения; K – коэффициент, зависящий от соотношения доверительных границ случайной погрешности и НСП:

$$K = \frac{\varepsilon + \theta}{S(\widetilde{X}) + \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \frac{\theta_i^2}{3}}} ,$$
  
$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \frac{\theta_i^2}{3} + S^2(\widetilde{X})} .$$

Ответ следует записать, оставив 1 значащую цифру (или 2 значащие цифры, если цифра старшего разряда меньше или равна 3).

#### Представление результатов измерения

Результат измерения записывается в виде:

1)  $\tilde{X} \pm \Delta$ ,  $\alpha = ... -$  при симметричной доверительной погрешности; значение  $\tilde{X}$  должно быть округлено так, чтобы последняя значащая цифра была в том же разряде, что и у значений  $\Delta$ ,  $S(\tilde{X})$ ,  $\theta$ ;

2)  $\tilde{X}$ ;  $S(\tilde{X})$ ; n;  $\theta$ ;  $\alpha$  – при отсутствии данных о функциях распределения составляющих погрешности.

Коротаев Валерий Викторович Рыжова Виктория Александровна

### Измерительные оптико-электронные приборы

Учебное пособие

В авторской редакции Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО Зав. РИО Н.Ф. Гусарова Подписано к печати Заказ № Тираж Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А