3730

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Методические указания к лабораторным работам

Рязань 2005

УДК 681.3

Аналитические методы и приборы экологического контроля: Методические указания к лабораторным работам /Рязан. гос. радиотехн. акад.; Сост.: М.В.Зубков, В.В. Гудзев, А.А. Байдов. Рязань, 2005. 24 с.

Содержат материал для изучения общих принципов построения и конструктивных решений аналитических систем, применяемых в экологии и медицине.

Предназначены для студентов дневного отделения специальности 190500 «Биотехнические и медицинские аппараты и системы».

Ил. 20.

Анализатор, спектрофотометр, иономер, дымомер

Печатается по решению методического совета Рязанской государственной радиотехнической академии.

Рецензент: кафедра биомедицинской и полупроводниковой электроники РГРТА (зав. кафедрой проф. С.П.Вихров)

Аналитические методы и приборы
экологического контроля
Составители : З у б к о в Михаил Владимирович
Г у д з е в Валерий Владимирович
Б а й д о в Александр Александрович

Редактор Е.В. Ипатова
Корректор С.В. Макушина
Подписано в печать Формат бумаги 60 ×84 1/16.
Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,5.
Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 50 экз. Заказ
Рязанская государственная радиотехническая академия.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТА.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1
Изучение спектрофотометра

Цель работы: ознакомление с основными методами фотометрического анализа и устройством спектрофотометра КФК-3.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В основе фотометрических методов измерения лежит закон Бугера-Ламберта-Бера, связывающий уменьшение интенсивности света, прошедшего через раствор I, с концентрацией вещества в растворе С и толщиной стеклянного сосуда - кюветы, в которую помещают изучаемый раствор. Чтобы учесть потери света на отражение и рассеяние, сравнивают интенсивность света, прошедшего через исследуемый раствор и растворитель (рис. 1).

При одинаковой толщине кювет, изготовленных из кварцевого стекла и содержащих один и тот же растворитель, потери на отражение и рассеяние света примерно одинаковы у обоих пучков. Уменьшение интенсивности света, прошедшего через раствор, характеризуется коэффициентом пропускания Т:

$$T = \frac{I}{I_0}, \qquad (1)$$

где I_0 - интенсивность света, прошедшего через растворитель.

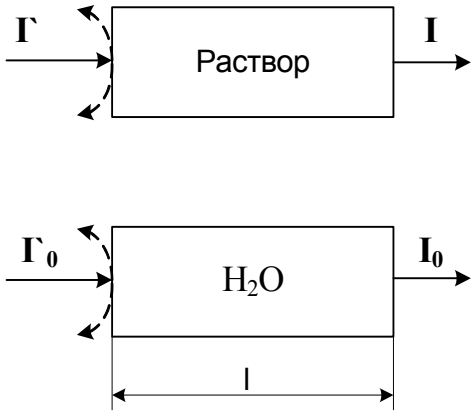


Рис. 1

Взятый с обратным знаком десятичный логарифм Т называется оптической плотностью D:

$$-\lg T = -\lg\frac{I}{I_0} = \lg\frac{I_0}{I} = D. \qquad (2)$$

Согласно закону Бугера - Ламберта – Бера

$$I = I_0 10^{-\varepsilon l C} \quad (3)$$

или $-lgT = D = \varepsilon l C,$ (4)

где ε - коэффициент поглощения, С - концентрация примеси в растворе. Коэффициент поглощения зависит от длины волны, температуры растворителя и не зависит от толщины слоя l и концентрации.

При наличии в растворе нескольких окрашенных веществ

$$D = l(\varepsilon_1 C_1 + \varepsilon_2 C_2 + \ldots + \varepsilon_k C_k). \quad (5)$$

Распределение по длинам волн значений оптической плотности называется спектром поглощения (рис. 2).

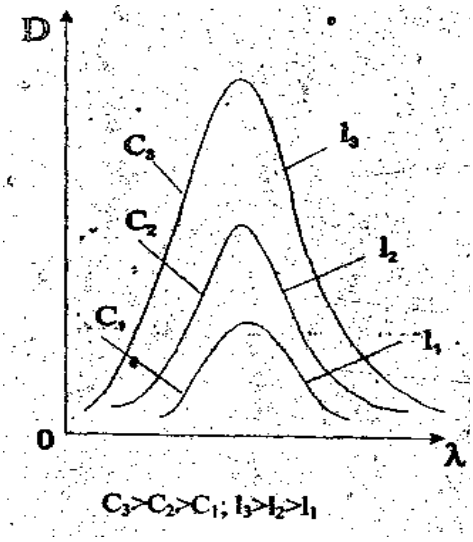


Рис. 2

Условия анализа

Спектр поглощения содержит один или несколько максимумов (полос). При анализе длину волны выбирают на максимуме полосы поглощения. Если в спектре имеется несколько полос, выбор останавливают на более интенсивной. Это обеспечивает наиболее высокую чувствительность определения концентрации.

Необходимым условием фотометрического анализа является реакция превращения водного раствора изучаемого реагента в окрашенное (светопоглощающее) соединение. Окрашенные соединения в растворе получают в результате реакций окисления-восстановления.

При решении некоторых задач удобнее оперировать коэффициентом пропускания, а не оптической плотностью. На рис. 3 приведена зависимость относительной погрешности от пропускания раствора. Из рисунка видно, что относительная погрешность возрастает при очень малых и очень больших значениях Т. При Т=0,37 достигается наибольшая точность измерений. Расчеты и опыт показывают, что для растворов, имеющих $0{,}33 \geq D \geq 2{,}0$, фотометрические исследования сопровождаются большими погрешностями.

Уравнение (3) показывает, что чем больше толщина слоя, тем больше оптическая плотность и, следовательно, тем больше чувствительность. Однако с ростом толщины кюветы возрастают и потери на рассеяние света. Поэтому кюветы с толщиной слоя больше 5 см обычно не применяют.

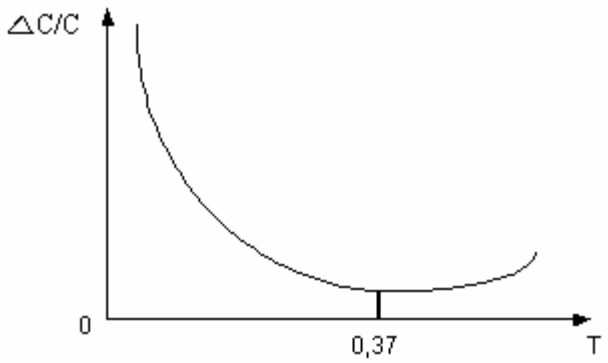


Рис. 3

Чувствительность и точность метода

Минимальную концентрацию, которую можно определить фотометрическим методом, рассчитывают по соотношению:

$$C_{\min} = \frac{D_{\min}}{\varepsilon l} \quad , \tag{6}$$

Если принять

$D_{min}=0,01;\ l=1см;\ \varepsilon=10^3$, то $C_{min}=10^{-5}$ моль/л.

Иногда в качестве показателя чувствительности фотометрической реакции указывают просто величину ε. Погрешность фотометрических методов обычно составляет 1...2 %.

Метод градуировочного графика

В соответствии с законом Бугера – Ламберта - Бера график в координатах D=f(C) должен быть линеен и прямая должна проходить через начало координат. Градуировочный график строят не менее чем по трем точкам, что повышает точность определений. На рис. 4 в качестве примера приведена градуировочная кривая для определения содержания аммиака в воде.

Для построения графика готовят ряд стандартных растворов с различной концентрацией примеси и определяют их оптическую плотность.

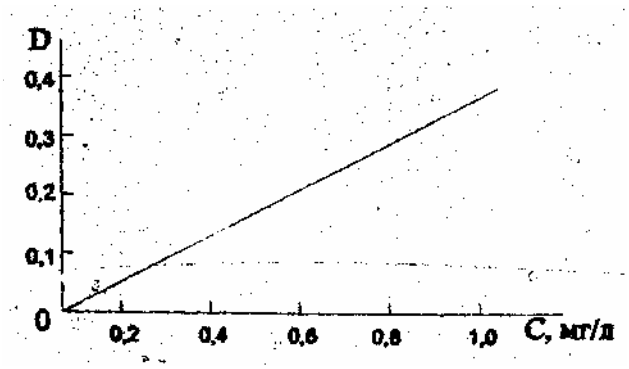


Рис. 4

Метод молярного коэффициента поглощения

По этому методу определяют оптическую плотность нескольких стандартных растворов $D_{ст}$, для каждого раствора рассчитывают $\varepsilon=D_{СТ}/C_{СТ}$ и полученное значение усредняют. Затем измеряют оптическую плотность анализируемого раствора D_x и рассчитывают C_x по формуле $C_x=D_x/\varepsilon l$.

Метод добавок

Этот метод применяют при анализе растворов сложного состава. Сначала измеряют оптическую плотность D_x анализируемого раствора, содержащего определяемый компонент неизвестной концентрации C_x. Затем в анализируемый раствор добавляют известное количество определяемого компонента $C_{ст}$ и вновь измеряют оптическую плотность $D_{x+ст}$. Оптическая плотность D_k анализируемого раствора

$$D_x=\varepsilon lC\ , \qquad (7)$$

а оптическая плотность анализируемого раствора с добавкой стандартного

$$D_{x+ст} = \varepsilon l(C_x + C_{ст}). \qquad (8)$$

Из уравнений (7) и (8) находят концентрацию анализируемого раствора:

$$C_x = C_{ст}\frac{D_x}{D_{x+ст} - D_x} \quad . \qquad (9)$$

УСТРОЙСТВО ФОТОМЕТРА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КФК–3

Фотометр фотоэлектрический КФК–3 предназначен для измерения коэффициентов пропускания и оптической плотности прозрачных жидкостных растворов и прозрачных твердых образцов, а также для измерения скорости изменения оптической плотности вещества и определения концентрации вещества в растворах после предварительной градуировки фотометра потребителем.

Спектральный диапазон работы фотометра от 315 до 990 нм. В качестве диспергирующего элемента в фотометре применена

дифракционная решетка. Источник излучения – лампа галогенная КГМ 12–10. Приемник излучения – фотодиод ФД–288Б.

Микропроцессорная система (МПС) обеспечивает выполнение семи задач:

НУЛЬ – измерение и учет сигнала при неосвещенном фотоприемнике;

Г – градуировка фотометра;

Е – измерение оптической плотности;

П – измерение коэффициента пропускания;

С – измерение концентрации;

А – измерение скорости изменения оптической плотности;

F – ввод коэффициента факторизации.

Принцип действия фотометра

Принцип действия фотометра основан на сравнении светового потока Φ_0, прошедшего через растворитель или контрольный раствор, по отношению к которому производится измерение, и светового потока Ф, прошедшего через исследуемую сферу.

Световые потоки Φ_0 и Ф фотоприемником преобразуются в электрические сигналы U_0, U и U_T (U_T – сигнал при неосвещенном приемнике), которые обрабатываются микроЭВМ и представляются на цифровом табло в виде коэффициента пропускания, оптической плотности, скорости изменения оптической плотности, концентрации.

Коэффициент пропускания (τ)

$$\tau = \frac{\Phi}{\Phi_0} \cdot 100\% = \frac{U - U_N}{U_0 - U_T} \cdot 100\% . \qquad (10)$$

Оптическая плотность (D)

$$D = \lg\frac{1}{\tau} = \lg\frac{U_0 - U_T}{U - U_T} . \qquad (11)$$

Скорость изменения оптической плотности (А)

$$A = \frac{D_2 - D_1}{t} , \qquad (12)$$

где t – интервал времени (1,2,..., 9 минут)

Концентрация C=D9·F,

где F – коэффициент факторизации, вводится с клавиатуры от 0,001 до 9999.

Схема электрическая функциональная

Представлена на рис. 5.

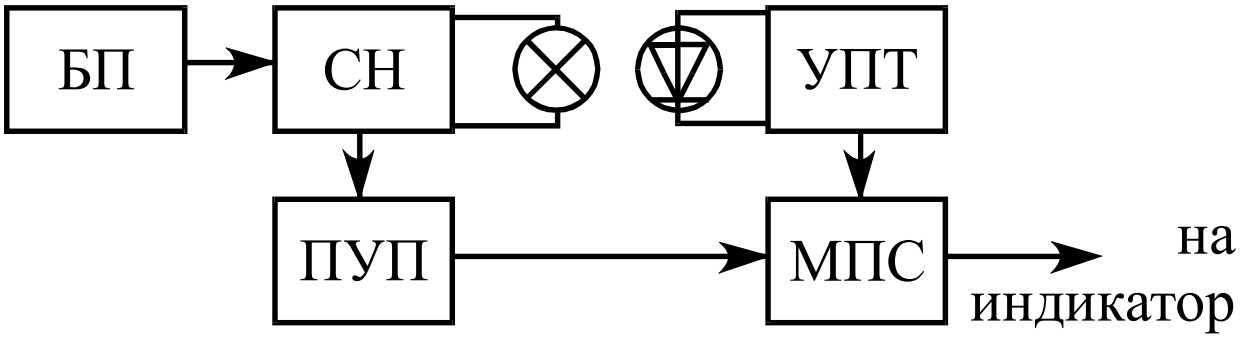


Рис. 5

Она состоит из преобразователя светового излучения в электрический сигнал (фотодиод), усилителя постоянного тока (УПТ), микропроцессорной системы (МПС), преобразователя угла поворота дифракционной решетки в напряжении (ПУП), стабилизатора напряжения осветителя (СН) и блока питания фотометра (БП).

С целью выравнивания зависимости тока фотодиода от длины волны напряжение питания лампы линейно изменяется в зависимости от положения решетки. Напряжение стабилизатора изменяется от 12,6 до 10,0 В при изменении выделяемой волны.

Усиленный сигнал с выхода УПТ через соответствующие разъемы подается на микропроцессорную систему и обрабатывается. Результаты обработки выводятся на табло системы.

Усилитель постоянного тока

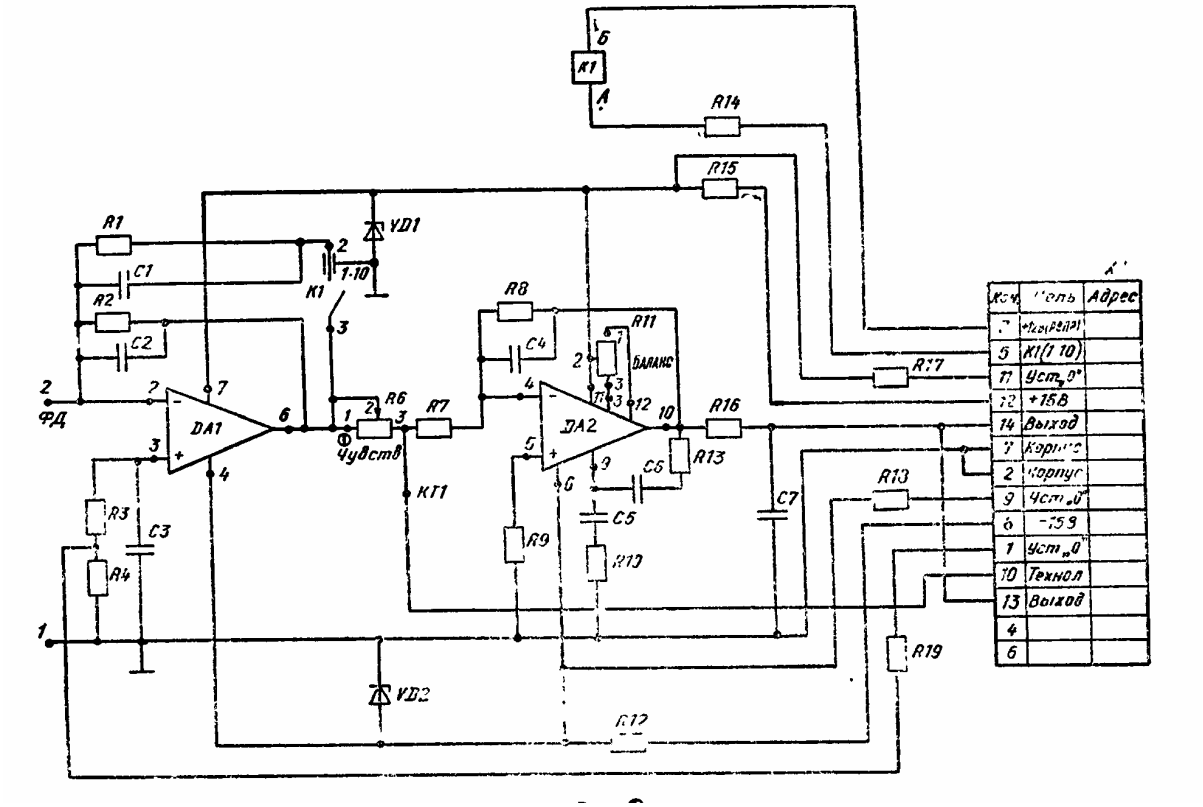


Рис. 6

Ток фотодиода, возникающий в нем под воздействием светового потока, проходящего через исследуемый раствор, подается на вход УПТ (рис. 6). Фотодиод включен на инвертирующий вход ОУ DA1. Нагрузкой фотодиода является входное сопротивление ОУ, которое при замкнутой цепи отрицательной обратной связи (через резисторы R1 и R2) является достаточно малым. Для обеспечения высокой линейности работы фотометра фотодиод по схеме включения работает практически в режиме короткого замыкания. Схема УПТ построена на 2-х ОУ DA1 и DA2. В первом каскаде использована микросхема КР544УД, 1А с малыми входными токами (не более 0,05 нА), а во втором каскаде – прецизионный ОУ типа КР551УД, 1А, обладающий малым напряжением смещения и высокой стабильностью электрических характеристик.

В УПТ предусмотрено изменение чувствительности за счет переключения сопротивления нагрузки фотодиода (реле К1). Общая максимальная чувствительность УПТ определяется минимальным измеряемым потоком фотодиода на длине волны 315 нм. Общий коэффициент усиления и величина нагрузки фотодиода R_1 и R_2 выбраны так, чтобы на 315 нм выходного напряжения УПТ было достаточным для работы МПС. Выбор чувствительности осуществляется автоматически МПС.

R6 изменяет коэффициент усиления 2-го каскада в пределах 1-12. Он служит для изменения общей чувствительности фотометра в процессе заводской настройки и при проведении регламентных работ (компенсации потери чувствительности фотодиода или уменьшение потока осветителя в процессе эксплуатации).

R11 для балансировки УПТ – установка нулевого напряжения на выходе при перекрытом световом потоке.

УПТ имеет собственную параметрическую стабилизацию $U_{ПИТ}$ микросхем (VД1–R15 и VД2–R12), что повышает стабильность его электрических параметров.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить прибор в сеть и прогреть в течении 15 минут. Используя генератор, осциллограф и вольтметр В3–39 измерить напряжения в контрольных точках, обозначенных на принципиальной схеме. На вход 2 с генератора подать сигнал известной амплитуды и определить с помощью вольтметра напряжение на выходе 14 (рис. 6). Определить коэффициент передачи УПТ, а также дрейф нуля, измеряя с помощью вольтметра в точках 6 и 14 напряжение в течении 15-20 минут.
2. Определение погрешности, вносимой дрейфом нуля в измерении спектральной плотности. Определить зависимость спектральной плотности от выходного напряжения УПТ. Построить график. Для этого произвести несколько измерений с различным числом светофильтров, регистрируя при этом выходное напряжение и соответствующую ему оптическую плотность.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2
Изучение газоанализатора, основанного на поглощении инфракрасного излучения

Цель работы: изучение устройства и составных частей анализатора ГИАМ – 25.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Инфракрасные газоанализаторы, так же как и спектрофотометры (см. лаб. раб. № 1), исходят из закона Бугера-Ламберта-Бера. Как уже отмечалось, этот закон действует в определенных границах.

Поглощением в инфракрасной области обладают практически все вещества, которые содержат в молекуле по крайней мере два типа атомов. Поглощение не проявляется у элементарных газов, таких как кислород, азот, галогены, благородные газы, которые имеют в своей молекуле только один тип атомов. Поскольку инфракрасные анализаторы могут применяться для определения самых разнообразных веществ, то это может явиться и одним из их недостатков, особенно при анализе сложных смесей, когда линии поглощения отдельных веществ перекрываются и результаты определения становятся неточными или уменьшается селективность, что характерно главным образом для бездисперсионных приборов. Инфракрасные анализаторы состоят из источника инфракрасного излучения, кювет с анализируемой и сравнительной смесями и детектора инфракрасного излучения. Предположим, что источник инфракрасного излучения обеспечивает непрерывное излучение, содержащее все длины волн в определенной части спектра. (Спектр непрерывного излучения представлен на рис. 1, а), где по оси абсцисс отложены длины волн λ, а по оси ординат - энергия излучения Е). Предположим для простоты, что это излучение проходит через измерительную кювету, заполненную смесью только двух веществ, из которых одно поглощает инфракрасное излучение в области длин волн, обозначенной площадками, заштрихованными крест-накрест, а другое - в области, обозначенной белыми площадками (рис. 1, б). Тогда на детектор поступает непоглощенная часть излучения, обозначенная параллельной штриховкой. Чем больше концентрация поглощающих веществ, тем больше площади поглощения и тем меньше соответственно энергия, попадающая на детектор. Отсюда ясно, что в таком исполнении инфракрасный анализатор был бы неселективным, поскольку любое вещество, поглощающее инфракрасную радиацию и присутствующее в кювете, ослабляло бы излучение, попадающее на детектор.

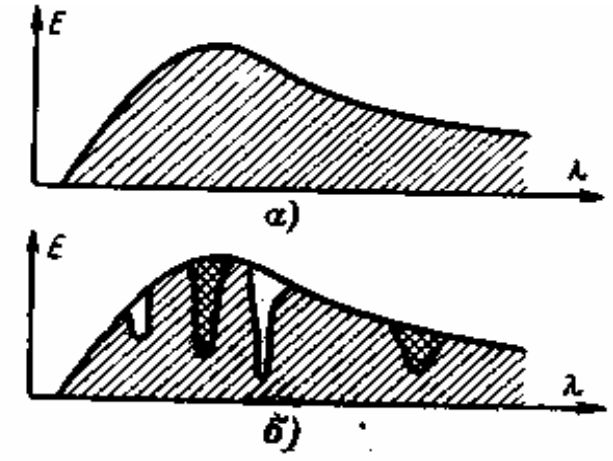


Рис. 1

С функциональной и конструктивной точек зрения инфракрасные анализаторы можно разделить на ***бездисперсионные и дисперсионные***.

Бездисперсионные анализаторы работают без разложения света, так что часто используется поглощение в довольно широкой области спектра. Их селективность достигается специальными методами, которые будут показаны на отдельных анализаторах.

Дисперсионные анализаторы основаны на принципе поглощения монохроматического излучения. Для разложения света применяются призмы, решетки или интерференционные фильтры.

Бездисперсионные анализаторы намного проще и дешевле, что определило их более широкое распространение несмотря на то, что в ряде случаев их селективность существенно ниже, чем у дисперсионных анализаторов. Бездисперсионные инфракрасные анализаторы можно разделить на анализаторы с положительной и с отрицательной фильтрациями.

Сравнение анализаторов с положительной и отрицательной фильтрацией

Инфракрасный анализатор с отрицательной фильтрацией имеет неселективный детектор излучения. От источника непрерывного спектра детектор воспринимает весь непрерывный спектр (рис. 2, а), и изменения энергии в нем происходят только в пределах заштрихованной части, т. е. на длинах волн, соответствующих поглощению анализируемого компонента (рис. 2, б). Анализатор с положительной фильтрацией, использующий селективный детектор, улавливает изменения энергии только в области длин волн, соответствующей поглощению определяемого компонента, как это показано на рис. 2, в. Отсюда видно, что в соответствии с концентрацией определяемого компонента меняется вся энергия, попадающая на детектор. Следовательно, у анализаторов с положительной фильтрацией относительное изменение энергии, попадающей на

индикаторы, намного больше, чем у анализаторов с отрицательной фильтрацией. С этой точки зрения анализатор с положительной фильтрацией более чувствителен. Анализатор с положительной фильтрацией менее чувствителен к колебаниям окружающей температуры, чем анализатор с отрицательной фильтрацией, который нуждается в термостатировании. С другой стороны, у анализатора с отрицательной фильтрацией нет подвижных частей. Кроме того, он применим также для анализа жидкостей.

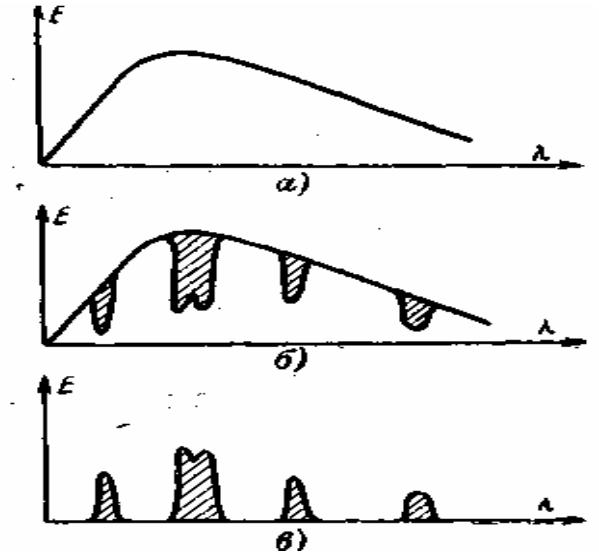


Рис. 2

УСТРОЙСТВО ГАЗОАНАЛИЗАТОРА ГИАМ–25

Газоанализатор ГИАМ–25 предназначен для определения концентрации окиси углерода (CO), углеводородов (CH) в выхлопных газах двигателей внутреннего сгорания.

Технические характеристики

1. Диапазон измерения объемной доли окиси углерода (CO) от 0 до 0,5 %
2. Диапазон измерения объемной доли углеводородов (CH) от 0 до 0,2 %
3. Максимальная амплитуда выходного напряжения на нагрузке 2 кОМ на выходе канала 10 В.

Описание функциональной схемы

Газоанализатор содержит оптический блок, блок обработки сигналов, блок индикации (рис. 1). Оптический блок состоит из излучателей E_1 и E_2, создающих потоки ИК–энергии, которые попадают в кюветы, каждая из которых содержит две камеры: рабочую камеру (РК) с анализируемой газовой смесью и сравнительную камеру (СК) без анализируемой газовой

смеси; обтюратора О, вращающегося от электродвигателя М; интерференционных фильтров $ИФ_{со}$ и $ИФ_{сн}$; фоконов Ф1 и Ф2 с приемниками ИК–излучения П1 и П2; оптоэлектронных пар, выдающих информацию о положении обтюратора; датчика температуры $Дt^{o}$.

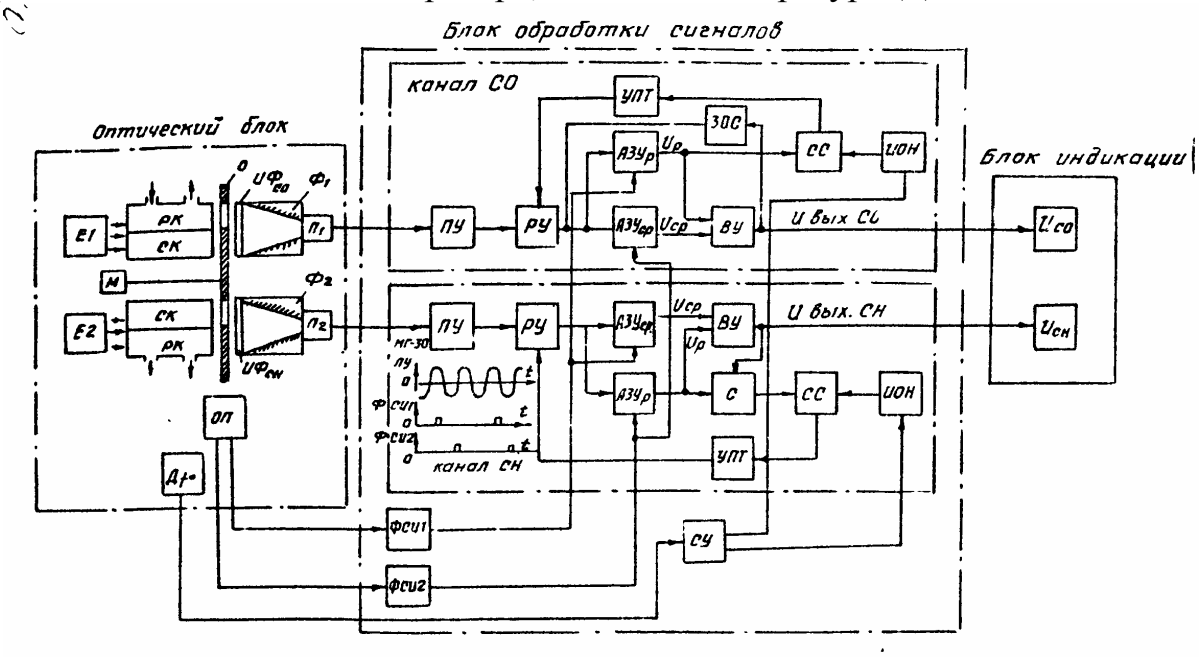


Рис. 1

Блок обработки сигналов состоит из двух каналов обработки для СО и СН и формирователей синхроимпульсов ФСИ1 и ФСИ2. Каждый канал обработки сигнала включает в себя предварительный усилитель ПУ, регулируемый усилитель РУ, усилитель постоянного тока УПТ, аналоговое запоминающее устройство сигналов с рабочей и сравнительной камер $АЗУ_{р}$ и $АЗУ_{ср}$, выходной усилитель ВУ, схему сравнения СС, источник опорного напряжения ИОН.

Блок индикации состоит из двух индикаторов, один из которых индицирует содержание СО, другой – СН.

В зависимости от положения обтюратора поток излучения излучателя попадает на приемник либо через рабочую камеру, либо через сравнительную. На приемнике регистрируется переменный сигнал, который несет информацию о количестве ИК–энергии, поглощенной анализируемым газом с частотой обтюрации, и, следовательно, о концентрации анализируемого газа. Сигнал с приемника, усиленный с помощью предварительного усилителя, поступает на регулируемый усилитель, с выхода которого сигнал проходит на два аналоговых запоминающих устройства $АЗУ_{р}$ и $АЗУ_{ср}$, управляемых формирователями синхроимпульсов, выдающих информацию о положении обтюратора в момент максимального открытия рабочей и сравнительной камер.

С выходов запоминающих устройств сигналы поступают на дифференциальный выходной усилитель постоянного тока и на индикаторное устройство.

Для повышения линейности статической характеристики газоанализатора в канал СО введено звено обратной связи ЗОС с выхода выходного усилителя ВУ на входы $АЗУ_р$ и $АЗУ_{ср}$. В канал СН введен сумматор С, суммирующий напряжение с $АЗУ_р$ и с ВУ, которое поступает на схему сравнения СС, которая через УПТ управляет коэффициентом передачи РУ таким образом, чтобы сигнал с $АЗУ_р$ был равен сигналу с ИОН.

Для температурной компенсации чувствительности газоанализатора в ИОН введен сигнал с датчика температуры $Дt^o$ через согласующий усилитель СУ.

Описание схемы соединений газовых линий

Газ через газозаборник Г3 поступает на входной штуцер "Δ" фильтра-осушителя ФО (рис. 2).

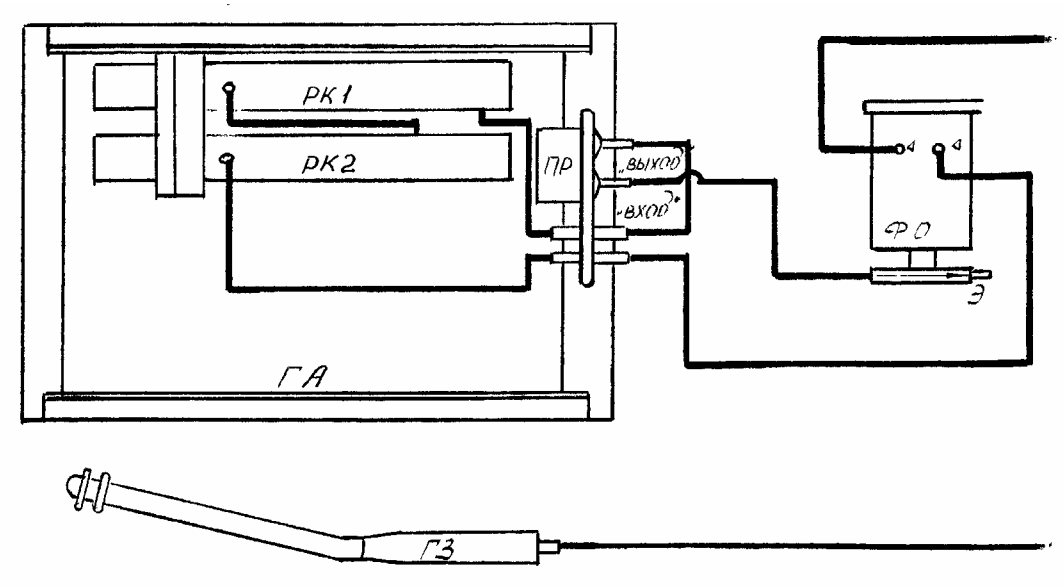


Рис. 2

Далее через выходной штуцер "▷" фильтра осушителя ФО, штуцер "ВХОД" газоанализатора и рабочие камеры каналов СО и СН газ прокачивается побудителем расхода ПР. Пройдя через рабочую камеру газоанализатора, газ поступает на вход эжектора Э, который осуществляет выброс конденсата из фильтра осушителя за счет создаваемого разрежения.

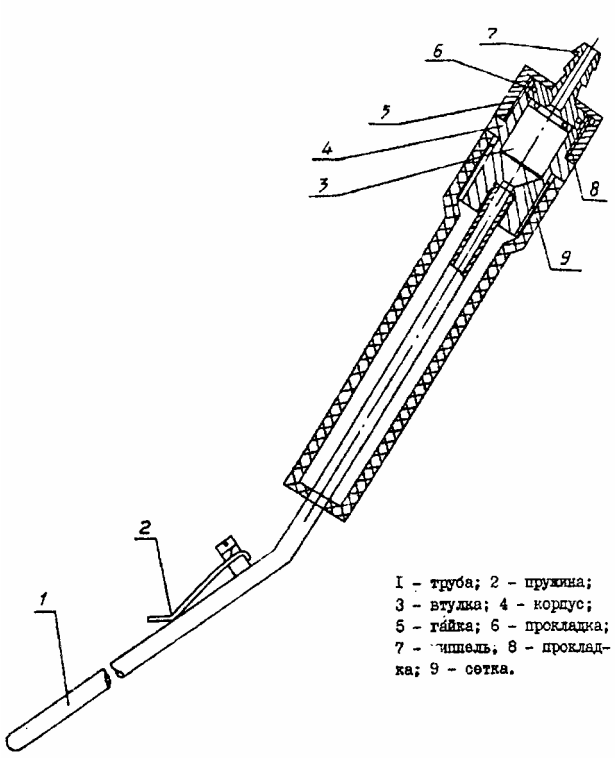


Рис. 3.

Устройство и работа составных частей газоанализатора.

Газозаборник (рис. 3) предназначен для отбора газовой пробы из выхлопной трубы автомобиля. Газ засасывается через радиальные отверстия трубы 1, проходит в корпус 4, очищается от крупных металлических частиц с помощью сетки 9 и металлокерамической втулки 3. На выходной ниппель 7 одевается трубка поливинилхлоридная. Для уплотнения газового канала служат прокладки 8 и 6. Газозаборник фиксируется на выхлопной трубе пружиной 2.

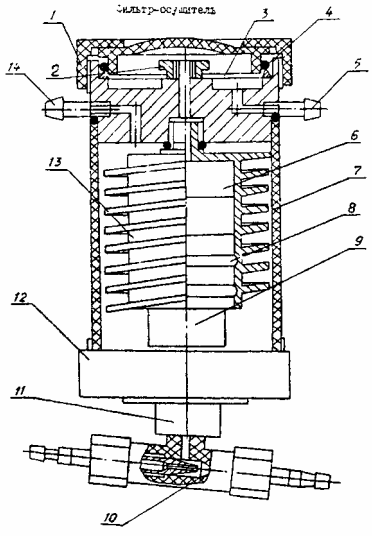


Рис. 4

Фильтр-осушитель (рис. 4) ФО, предназначен для очистки и сушки анализируемой газовой пробы. Газ из газозаборника по линии транспортирования поступает на вход фильтра через штуцер 14, а затем в корпус 7 с охладителем 13, где происходит конденсация влаги. Далее через металлокерамический фильтр 9 газовая проба поступает на фильтрующий элемент 6, выполненный из кремнеземного материала, затем по цилиндрическому каналу на фильтрующий элемент 3, выполненный из стекловолокна. Очищенная газовая проба через входной штуцер 5 поступает на вход газоанализатора. Конденсированная влага поступает во влагосборник 11, из которого отводится с помощью эжектора 10, работающего от побудителя расхода газоанализатора.

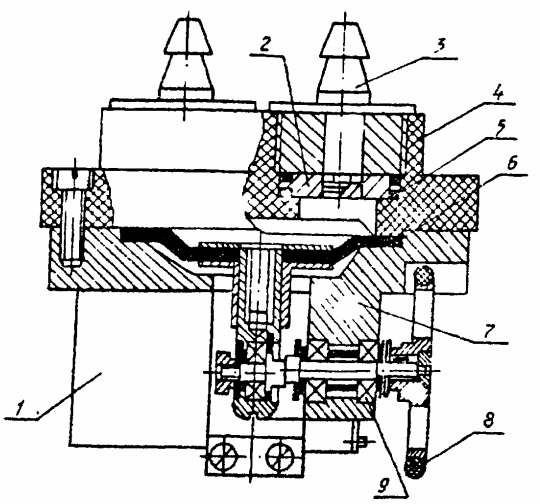


Рис. 5

Побудитель расхода газа (рис. 5) состоит из двух основных блоков: блока клапанов и блока привода. Основной частью блока клапанов является корпус 4, в котором расположены всасывающий и нагнетательный лепестковые клапаны 2. Корпус блока клапанов с помощью четырех винтов соединяется с корпусом привода 7 и зажимает мембрану 6. Мембрана установлена между дисками. При подаче напряжения питания на побудитель расхода газа электродвигатель 1 через кольцо (пассик) 8 с помощью кривошипного механизма передает возвратно поступательное движение мембране 6, обеспечивающей такты всасывания нагнетания смеси.

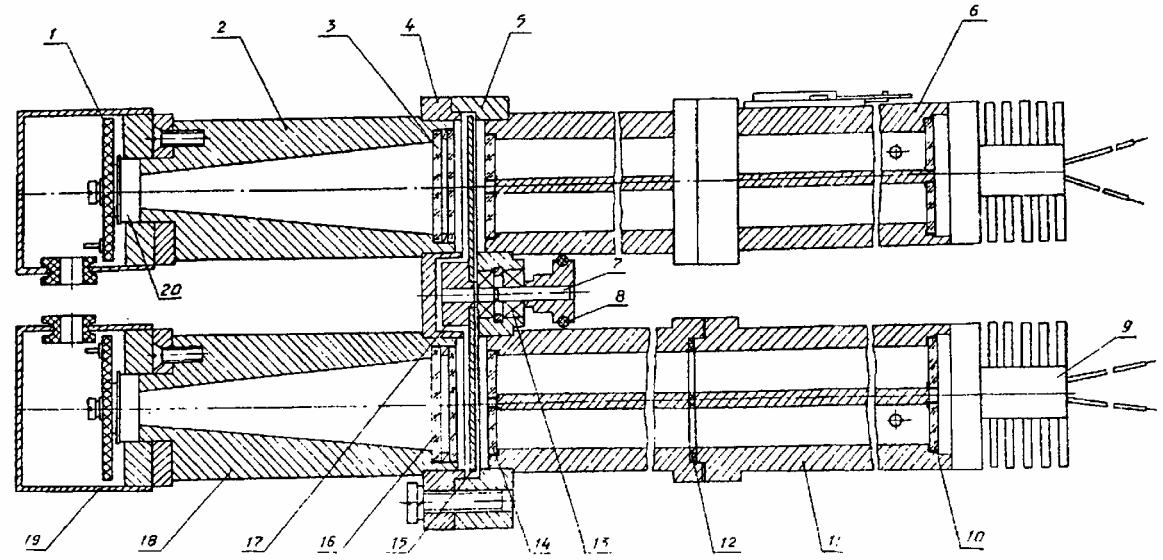


Рис. 6

Оптический блок (рис. 6) состоит из двух фланцев 4 и 5. На фланцах расположены по обе стороны две камеры 6, 11 и два фланца 2, 18, выполняющие роль фоконов. На оси 7 установлен обтюратор 15, который приводится в движение с помощью пассика 8. Обтюратор состоит из диска, крепящегося к втулке 17 посредством винтов, и вращается в подшипниках 13. Диск обтюратора имеет вырезы, обеспечивающие циклическое прерывание ИК-потока в камерах и оптоэлектронных парах. Каждая камера имеет две полости с зеркальной внутренней поверхностью. С двух сторон камера закрыта стеклами, пропускающими ИК-излучение. Для обеспечения возможности разборки и промывки камер они собираются из двух частей и герметизируются прокладкой 12. Полость рабочей камеры имеет два штуцера для ввода и вывода анализируемой

смеси. К камере крепится излучатель 9, состоящий из корпуса с отражателем и нагревательного элемента. Соосно камере к корпусу крепится фокон, с одного торца которого находится интерференционный фильтр 3, с другой стороны – приемник излучения 20, который неподвижно крепится к корпусу фокона. Приемник излучения установлен на плате. Платы приемников излучения защищены от воздействия электромагнитных полей экранами 19. Также оптический блок включает в себя датчик температуры, который представляет собой терморезистор, установленный на корпусе камеры, оптоэлектронные пары на светодиодах и фоторезисторах, двигатель с платой управления для привода обтюратора, источники излучения Е1, Е2, выполненные из нихромовой проволоки в виде спирали. Блок индикации выполнен на отдельной печатной плате, включает в себя два цифровых жидкокристаллических индикатора и два аналого-цифровых преобразователя с внешними элементами для задания режима функционирования АЦП.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Проверить исходное положение кнопок на лицевой панели прибора. Кнопки "насос", "калибр", "сеть", а также тумблер "ГЕН" должны быть выключены. Тумблер "R_t" должен находиться в положении "внутрь".
2. Включить газоанализатор и осциллограф.
3. Перевести кнопку "ГЕН" в положение "включено".
4. Потенциометр "КОНЦ" установить на "0".
5. Проверить показания цифрового табло. Если показания отличаются от нуля, то ручками СО и СН установить нулевые значения.
6. Включить кнопку "КАЛИБР". На цифровых индикаторах должны установиться показания (3000±500) СО и (1500±200) СН. Если показания отличаются от указанных значений, то с помощью потенциометров регулировки чувствительности СО и СН установить требуемое значение.
7. Выключить кнопку "КАЛИБР". Проверить нулевые показания индикаторов. Если показания не нулевые, то повторить операции 5 и 6.
8. Установить потенциометр "КОНЦ" в положение "1".
9. Записать показания газоанализатора.
10. Зарисовать осциллограммы в основных точках аппарата: на входах предварительного и регулируемого усилителей, на выходах формирователей синхроимпульсов рабочей и сравнительной камер, на выходах запоминающих устройств и на входе блока индикации.
11. Потенциометр "КОНЦ" установить в положение "2".
12. Провести измерения по пунктам 9-11.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3
Измерение дымности отработавших газов дизельных двигателей

Цель работы: изучение устройства портативного дымомера МЕТА-01.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Выхлопные газы автомобильных двигателей представляют собой смесь, состоящую приблизительно из 200 газообразных компонентов, а также значительного количества твердых взвесей, основу которых составляет сажа в виде фракций диаметром 0,04 – 0,05 мкм. Присутствием сажи объясняется цвет (дымность) выхлопных газов дизельных двигателей. Удельная поверхность частиц сажи достигает 75 $м^2/г$ и на этой поверхности конденсируется значительное количество смолистых веществ, известных своими канцерогенными свойствами. Дизельные двигатели выбрасывают в окружающую среду значительно больше сажи (10 - 1100 $мг/м^3$) по сравнению с карбюраторными (0 - 40 $мг/м^3$). визуально при концентрации свыше 130 $мг/м^3$ выброс становится видимым, при 600 $мг/м^3$ плотность окраски достигает степени средней черноты. При этих интенсивностях активная поверхность сажи в 1 $м^3$ выхлопа достигает 10 - 45 $м^2$. В соответствии с ГОСТ 21393-75 дымность отработавших газов дизельных двигателей не должна превышать 15 %.

Виды дымомеров

Принцип действия дымомера основан на измерении интенсивности световой энергии, прошедшей через дым. В зависимости от концентрации взвешенных частиц (интенсивности дыма) меняется поглощение световой энергии. Ослабление начальной интенсивности света является мерой содержания распыленных частиц в анализируемом газе.

Дымомеры по устройству подразделяют на расположенные вне потока анализируемого газа и введенные непосредственно в поток газа.

Схема дымомера, установленного вне потока газа, приведена на рис.1.

Анализируемый газ с помощью инжектора 6 засасывается из дымохода 5 в измерительную часть прибора и сбрасывается опять в дымоход. Дымомер состоит из трубки и размещенных в ней источника света 1, линз 3 и 4 и детектора светового излучения 2. В дымомерах в качестве источников света используются лампы накаливания или светодиоды, а в качестве детекторов - фотодиоды или селеновые фотоэлементы. Достоинством рассмотренной конструкции дымомера является исключение влияния высокой температуры на процесс измерений, а недостатком - необходимость применения эжекторов для всасывания анализируемого газа.

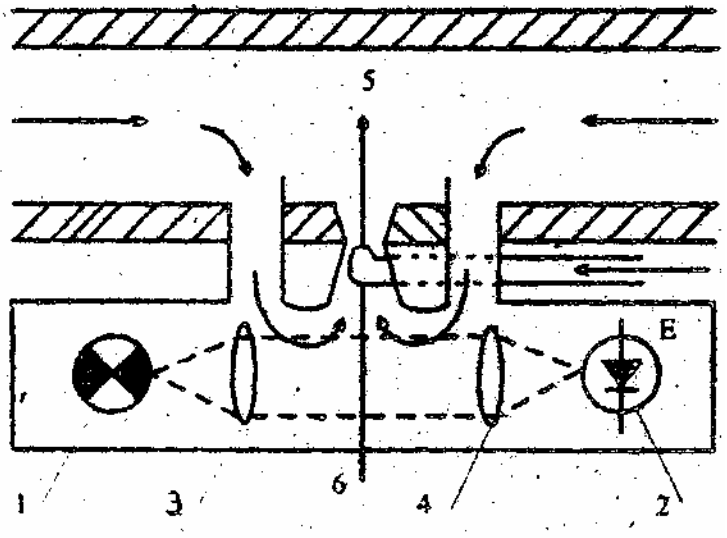


Рис. 1. Схема дымомера с искусственным подводом анализируемого газа

На рис. 2 приведена схема дымомера, введенного непосредственно в поток газа. Источник 1 и приемник 5 излучения расположены в обособленном корпусе 7, отделенном от основного потока стеклянной перегородкой 6, предохраняющей измерительную часть от попадания сажи.

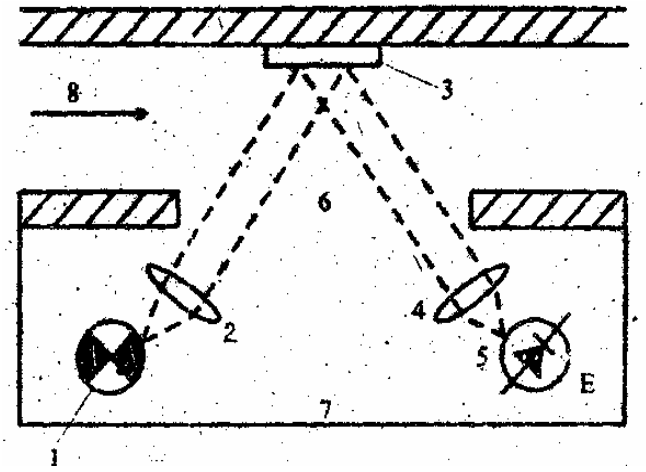


Рис. 2. Схема дымомера с отражательным зеркальцем

Оптическая схема устройства состоит из зеркала 3, на которое попадает свет от источника и двух фокусирующих линз 2 и 4. Недостатком приведенной выше конструкции дымомера является быстрое загрязнение зеркала и стеклянной перегородки. На рис. 3 изображен двухсторонний дымомер, в котором с одной стороны дымохода находятся источник света 1, линза 2 и защитное стекло 3, а с другой стороны - защитное стекло 4, линза 5 и фотоэлемент 6. Анализируемый дым через отверстия 7 попадает в поле зрения дымомера.

Устройство и работа дымомера

Портативный дымомер МЕТА-01 предназначен для экспрессного контроля дымности дизельных двигателей. Результат измерений представляется в единицах коэффициента поглощения натурального показателя ослабления в соответствии с рекомендациями ООН по правилам № 24 ЕЭК.

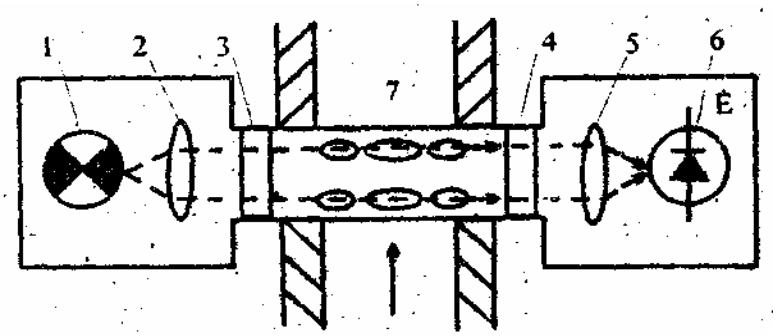


Рис. 3. Двухсторонний дымомер для двух блоков

Дымомер выполнен в виде носимого прибора с автономным питанием и состоит из приборного блока и оптического датчика (рис. 3). Пробоотборник служит для доставки отработавших газов от выхлопной трубы до оптического датчика, установленного вне зоны влияния отработавших газов.

Оптический датчик содержит размещенные в патрубках излучатель (светоизлучающий диод типа АЛ-107) и фотоприемник (фотодиод типа ФД 265А). Патрубки расположены соосно с измерительной камерой, выполненной в виде равномерно перфорированного патрубка. В полости измерительной камеры размешена хромель-копелевая термопара, предназначенная для измерения температуры анализируемого газа. Оптический датчик снабжен кабелем для подключения к приборному блоку.

Принцип действия дымомера основан на измерении величины поглощения инфракрасного излучения и температуры анализируемого газа в лазерном объеме и преобразовании аналитических сигналов к единицам коэффициента поглощения.

Коэффициент поглощения натурального показателя ослабления К, $м^{-1}$, определяется из выражения:

$$K = -\frac{273 + t}{373 \cdot L} \cdot \ln T, \qquad (1)$$

где L = 0,43 м - эффективная база дымомера;

T - коэффициент пропускания слоя в измерительном канале;

t - температура отработанных газов.

Выражение (1) получено приведением коэффициента поглощения к единице длины поглощающего слоя и температуре газа 100 ˚С.

Дымность отработавших газов N, %, можно определить по коэффициенту пропускания слоя в измерительном канале Т:

$$N = 1 - \frac{T}{100}. \qquad (2)$$

Согласно ГОСТ 17.2.2.02.-86 коэффициент поглощения натурального показателя ослабления определяется по формуле:

$$K = -\frac{l}{C}\ln(1 - \frac{N}{C}). \qquad (3)$$

Дымомер позволяет определять значения коэффициента поглощения натурального показателя ослабления в пределах от 0 до 9,99 м$^{-1}$.

Описание функциональной схемы

Функциональная схема прибора приведена на рис. 4. Импульсное излучение излучателя 1, возбуждаемого генератором прямоугольных импульсов 12, преобразуется в электрический сигнал фотоприемником 2 и усиливается усилителем 4. Логарифмирующее устройство 6 преобразует усиленный сигнал фотоприемника в последовательность импульсов, длительность которых пропорциональна логарифму амплитуды исходного сигнала.

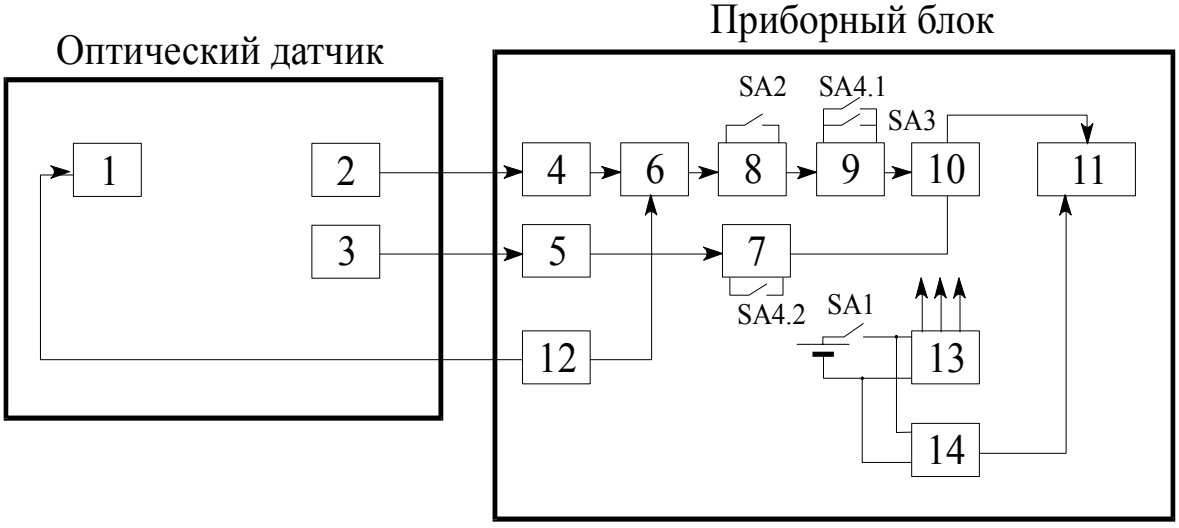


Рис. 4. Функциональная схема дымомера МЕТА-01

1 - излучатель; 2 - фотоприемник; 3 - термопара; 4 - усилитель; 5 - термопреобразователь; 6 - логарифмическое устройство; 7, 9 - пиковые детекторы; 8 - корректор нуля; 10 - аналогоцифровой преобразователь; 11 - цифровой индикатор; 12 - импульсный генератор; 13 - стабилизированный преобразователь напряжения; SA1 - выключатель питания; SA2 - кнопка коррекции нуля; SA3 - переключатель режимов работы; SA4 - кнопка сброса показаний; 14 - устройство индикации разряда батареи.

Усилитель тока 5 термоэлектрического преобразователя 3 формирует сигнал пропорциональный абсолютной температуре анализируемого газа, который перемножается с сигналом логарифмирующего устройства 6

аналого-цифровым преобразователем 10. Результирующий сигнал отображается цифровым индикатором 11 в единицах коэффициента поглощения излучения, приведенного к единице длины поглощающего слоя и температуре газа 100 ^{0}C. При замыкании контактов кнопки коррекции нуля SA2 корректор нуля 8 автоматически устанавливает начальные условия логарифмирующего устройства, соответствующие нулевым показаниям индикатора. Пиковые детекторы 9 и 7 фиксируют максимальные значения аналитических сигналов измерения оптической плотности и температуры анализируемого газа. Исходное значение сигналов устанавливается при замыкании контактов кнопки сброс SA4. При замыкании контактов переключателя режимов работы SA3 (в режим регистрации текущих значений дымности) пиковый детектор 9 блокируется и повторяет сигнал, поступающий на его вход. Устройство индикации разряда батареи 14 формирует сигнал управления при снижении напряжения питания до 7 В, при этом в левом секторе цифрового индикатора отображается знак “+ –“. Стабилизированный преобразователь напряжения 13 обеспечивает питанием измерительные цепи прибора.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подключить лабораторный стенд к сети 220 В.
2. Установить переключатель режима работы в положение регистрации текущих значений дымности “~”.
3. Включить питание приборного блока тумблером SA1 в положение “ВКЛ”. На индикаторе установятся показания “П”.
4. Нажать и отпустить кнопку SA4 сброса показаний “⊗”.
5. Нажать и отпустить кнопку коррекции нуля “>0<”. При этом на цифровом индикаторе устанавливаются показания 0,00–0,02.
6. Установить контрольный светофильтр в гнездо оптического датчика, при этом переключатель режимов работы должен быть в положении регистрации текущих значений дымности “~”.
7. Измерить напряжения и зарисовать осциллограммы в контрольных точках прибора: на выходе импульсного генератора, усилителя, термопреобразователя, логарифмирующего устройства, пиковых детекторов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4
Изучение прибора для измерения водородного показателя

Цель работы: изучение устройства и принципа действия иономера И-130.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Иономер лабораторный И-130 предназначен для измерения активности ионов водорода (pH) и активности других одновалентных (двухвалентных) анионов и катионов (pX) и окислительно-восстановительных потенциалов (Eh) в водных растворах.

Усилитель иономера построен по схеме с модуляцией и демодуляцией входного сигнала (МДМ) и сигнала обратной связи.

Структура указанной схемы показана на рис. 1.

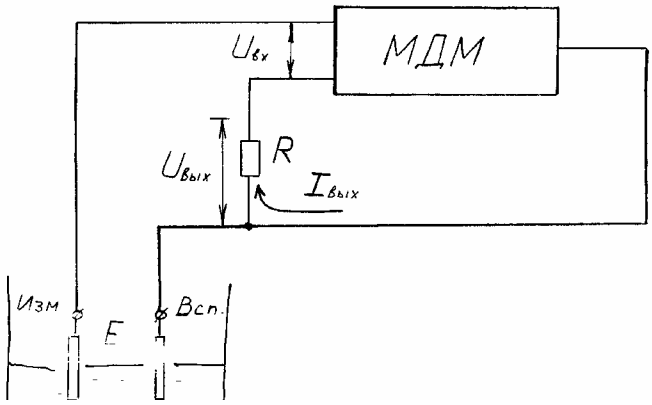


Рис. 1.

В процессе измерения водородного показателя водного раствора электродвижущая сила (E) электродной системы сравнивается с падением напряжения на сопротивлении R, через которое протекает выходной ток ($I_{вых}$) оконечного каскада усилителя. На вход усилителя подается напряжение $U_{вх}= E-U_{вых}= E-I_{вых}\cdot R$. Напряжение $U_{вх}$ преобразуется модулятором в переменное напряжение, которое затем усиливается и с помощью фазочувствительного детектора вновь преобразуется в постоянное напряжение. Это напряжение управляет током $I_{вых}$ оконечного каскада усилителя. При достаточно большом коэффициенте усиления усилителя напряжения $U_{вых}$ мало отличается от эдс E и благодаря этому ток, протекающий через электроды в процессе измерения эдс, очень мал.

Технические характеристики

1. Диапазон измерительного преобразователя:

а) в режиме измерения активности ионов от -20 до +20 единиц –pH(pX);

б) в режиме измерения эдс от $-2\cdot10^3$ до $+2\cdot10^3$ нВ.

2. Электрическое сопротивление цепи измерительного электрода от 0 до 10^3 МОм.
3. Электрическое сопротивление цепи вспомогательного электрода от 0 до 20 КОм.

4. Входное сопротивление преобразователя не менее 10^{12} Ом при входном напряжении 2В.
5. Максимальные входные напряжения 2 В и 100 мВ для нагрузок с сопротивлением 4 КОм и 50 КОм соответственно.

Структурная схема И-130

Структурная схема иономера И-130 приведена на рис. 2.

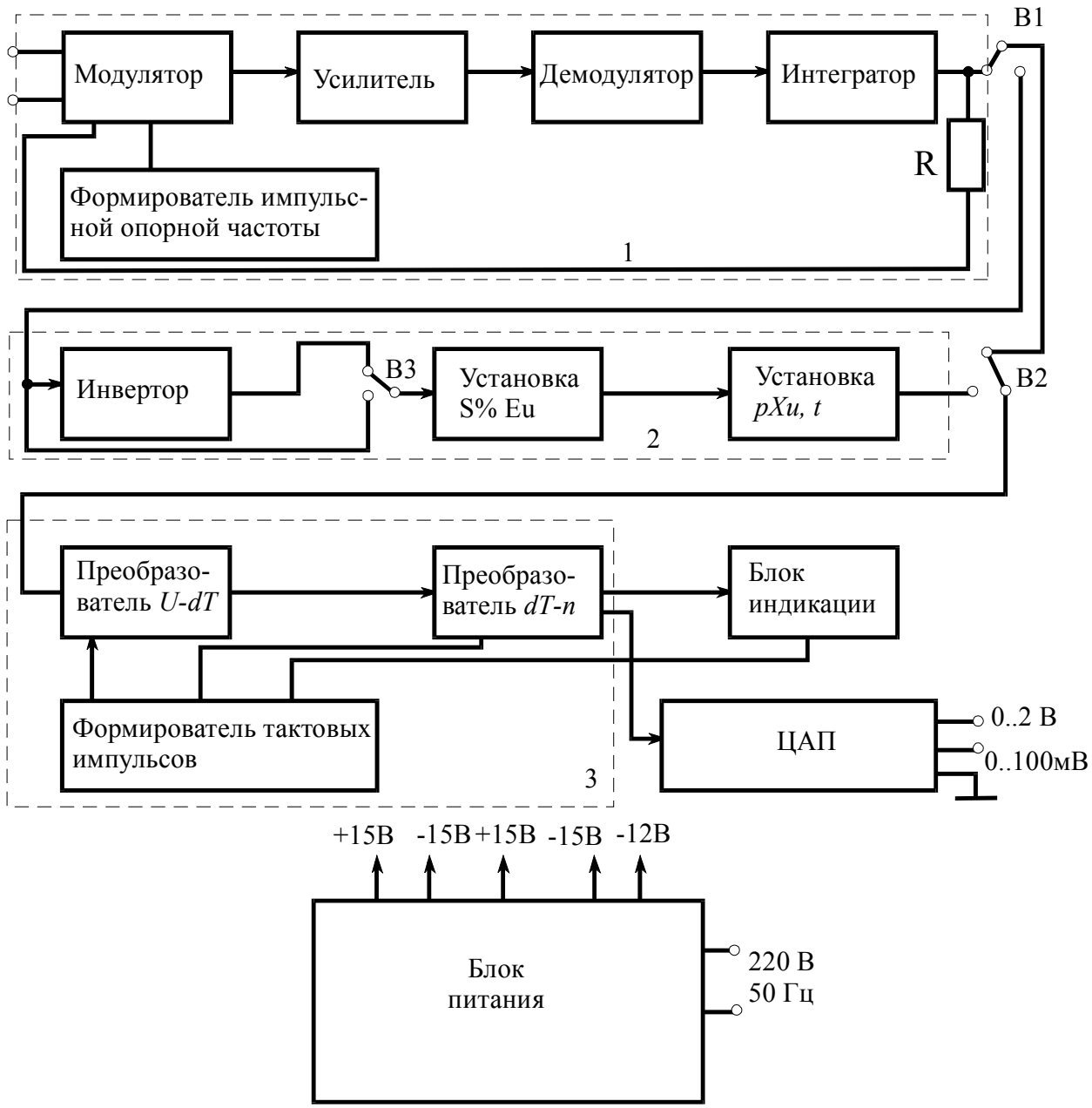


Рис. 2

1 - усилитель; 2 - измерительная схема; 3 - аналого-цифровой преобразователь.

Иономер состоит из следующих функциональных узлов: усилителя, измерительной схемы, аналого-цифрового преобразователя, блока

индикации, блока питания. В качестве модулятора МДМ используется двухтактный фотоэлектронный модулятор, выполненный на светодиодах и высокоомных фоторезисторах. Управляющий сигнал на светодиоды вырабатывается формирователем импульсов опорной частоты 12,5 Гц путем деления частоты сигнала. Усиление промодулированного сигнала производится усилителем, выполненном на 2-х интегральных микросхемах, первая из которых имеет высокое входное сопротивление и низкий уровень шумов. Демодулятор осуществляет фазочувствительное однополупериодное выпрямление усилительного сигнала. Уменьшение пульсаций входного сигнала осуществляется интегратором. МДМ канал, применяемый в усилителе, обеспечивает высокое выходное сопротивление, высокий коэффициент усиления по переменному напряжению (около 3000) и малый дрейф нуля.

Измерительная схема реализует следующие функции: установку координат изопотенциальной точки (Eu pXu), настройку крутизны, температурную коррекцию эдс электродной системы.

При работе режиме измерения эдс измерительная схема не используется.

Измерительная схема выполнена на трех усилителях, первый из которых является инвертором, во втором осуществляется установка коэффициента передачи в зависимости от валентности и значения крутизны реальной электродной системы, а также установка значения Eu. Третий усилитель реализует установку координаты pXu и температурную коррекцию.

Преобразование постоянного напряжения с выхода усилителя в цифровой код для индикации результатов цифровым табло осуществляется аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Здесь же осуществляется гальваническое разделение сигналов между входными цепями преобразователя и его выходом, что позволяет производить измерения в заземленных растворах при заземленных выходных цепях преобразователя.

Аналого-цифровой преобразователь состоит из преобразователя измеряемого напряжения в интервалы времени (Ux –ΔT), преобразователя интервалов времени в пропорциональное им количество импульсов (ΔT–u), формирователя тактовых импульсов.

Блок индикации служит для подсчета количества импульсов и индикации результатов анализа.

МДМ канал, применяемый в усилителе, обеспечивает высокое выходное сопротивление, высокий коэффициент усиления по переменному напряжению (около 3000) и малый дрейф нуля.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить в сеть иономер И-130 и прогреть в течение 15 минут.
2. Установить время индикации 1 с. Нажать кнопку “О АЦП” (на задней панели) и установить “0,000” по цифровому табло шлицом переменного резистора “О АЦП”. Отжать кнопку “О АЦП”.
3. Подать на вход усилителя постоянное напряжение 0,5 В с источника питания.
4. Измерить напряжения и зарисовать осциллограммы в контрольных точках № 1, № 2, № 3, № 4, обозначенных на корпусе иономера.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

М.В. ЗУБКОВ,
В.Н. ЛОКТЮХИН,
А.С. СОВЛУКОВ

ДАТЧИКИ И ИМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Рязань 2013

Министерство образования и науки Российской Федерации
Рязанский государственный радиотехнический университет

М.В. ЗУБКОВ,
В.Н. ЛОКТЮХИН,
А.С. СОВЛУКОВ

ДАТЧИКИ И ИМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Учебное пособие

Рязань 2013

УДК 681.518.3: 621.371

Зубков М.В., Локтюхин В.Н., Совлуков А.С.

Датчики и измерительные преобразователи для контроля окружающей среды: Учеб. пособие / М.В. Зубков, В.Н. Локтюхин, А.С. Совлуков; Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2009. – 64 с.

Рассматриваются принципы построения датчиков и измерительных преобразователей, применяемых в качестве анализаторов состояния окружающей среды и физических свойств жидкостей и газов. Даются основы проектирования микропроцессорных измерительных преобразователей.

Предназначено для студентов специальности 200401 «Биотехнические и медицинские аппараты и системы».

Ил. 23. Библиогр.: 9 назв.

Датчик, измерительный преобразователь, анализаторы газов и жидкости, измерительная и микропроцессорная система.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра биомедицинской и полупроводниковой электроники РГРТУ (зав. кафедрой проф. С.П. Вихров)

© Рязанский государственный
радиотехнический университет, 2013

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ АНАЛИЗАТОРОВ

Основные понятия

В системах экологического и аналитического контроля внешней среды и физико-химических свойств веществ широко применяются датчики и измерительные преобразователи (ИП). Эти устройства в сфере экологического контроля и медико-биологических исследований часто называют анализаторами.

Под общим *понятием «анализатор»* чаще всего подразумевают автоматически или полуавтоматически действующее измерительное устройство (или измерительный преобразователь), которое указывает количественно и качественно состав анализируемого вещества на основе параметров, характеризующих его физические или физико-химические свойства.

Действие анализатора может быть непрерывным или периодическим. Отбор проб также может быть непрерывным или периодическим, ручным или автоматическим. Результат анализа указывается по шкале или регистрируется. О критических значениях результата могут формироваться специальные предупреждающие сигналы.

Типичными анализаторами являются, например, приборы, основанные на измерении поглощения излучения, теплопроводности, магнитной восприимчивости и т.п. К анализаторам можно отнести автоматически действующие вискозиметры, плотномеры, влагомеры, рефрактометры и т.п., поскольку их показания характеризуют состав веществ.

Автоматический анализатор относится к числу устройств, которые действуют полностью автоматически, начиная с отбора пробы и кончая выходным сигналом. Эти приборы могут служить в качестве элементов автоматических регулирующих систем или сигнализирующих устройств, так называемых *сигнализаторов*. Автоматические анализаторы по своим размерам и массе обычно представляют собой стационарные устройства. Для своего функционирования они требуют, за очень редкими исключениями, подвода вспомогательной энергии, чаще всего электрической. В большинстве случаев они работают непрерывно.

Полуавтоматический анализатор является более низкой ступенью автоматическою анализатора. Полуавтоматический анализатор в своей работе обычно предполагает наличие ручных операций, которые состоят либо в периодической подаче анализируемой пробы, либо в дополнительной обработке результатов анализа. Приборы такого типа не могут применяться в качестве элементов автоматических регулирующих систем. Полуавтоматическим анализатором является, например, хроматограф с ручным дозированием пробы.

Индикатор является разновидностью полуавтоматического анализатора. Обычно он работает периодически и, как правило, требует ручного обслуживания. Часто он выполняется как переносной прибор.

Пробы в большинстве случаев отбираются вручную, а результат анализа не регистрируется. Он может быть либо указан по шкале, либо должен отсчитываться с помощью графиков или других вспомогательных шкал.

Требования к точности индикатора бывают ниже, чем у анализатора, и главное значение придается скорее качественной стороне анализа, чем его количественной оценке. Важное значение имеют, прежде всего, скорость и простота определения, использование наиболее дешевого и легкого переносного устройства с простым обслуживанием.

К индикаторам относятся переносные приборы, такие, например, как приборы для поиска нарушений герметичности в различных устройствах, приборы для контроля концентрации токсических или взрывоопасных веществ в атмосфере, основанные на самых разнообразных принципах. К индикаторам также относятся и так называемые индикаторные патроны.

Наряду с названием «индикатор» применяется также обозначение *детектор*. Однако под понятием детектор чаще всего подразумевается собственно измерительное устройство – чувствительный элемент анализатора.

Классификация анализаторов

Анализаторы классифицируются по различным признакам. Каждая из принятых классификаций имеет свои преимущества и недостатки.

1. Самым простым является деление анализаторов по ***физическому*** (агрегатному) ***состоянию*** анализируемого вещества (анализируемой фазы).

В соответствии с этим различают газоанализаторы, анализаторы (концентратомеры) жидкостей, анализаторы твердых веществ.

Газоанализаторы образуют самую многочисленную группу автоматических анализаторов. Количество используемых принципов и методов здесь намного больше, чем у приборов других групп.

Анализаторы жидкостей (концентратомеры) имеют очень широкое применение, но существующие типы приборов не удовлетворяют всем требованиям промышленности. Конструктивно эти приборы сложнее, чем газоанализаторы. В некоторых случаях это – сложные автоматы, часто подражающие действиям аналитика в лаборатории. В целях упрощения конструкций количество операций, как правило, приходится ограничивать, что, однако, не должно осуществляться за счет точности анализа.

Анализаторы твердых веществ (в частности, сыпучих) до настоящего времени являются наименее разработанными приборами. Практически они находятся на начальной стадии своего развития. Наибольшие трудности представляют автоматический отбор представительной (средней) пробы и ее

дальнейшая обработка при минимальном запаздывании в выдаче результата анализа. Во многих случаях известными на сегодня методами и техникой еще не удается получить удовлетворительного решения.

2. По числу определяемых компонентов анализаторы можно разделить на одно- и многокомпонентные.

Однокомпонентные анализаторы – это приборы, которые определяют одну составляющую анализируемого вещества. К ним относится подавляющее большинство анализаторов и индикаторов.

Многокомпонентные анализаторы – это, прежде всего, хроматографы и масс-спектрометры. Другие приборы, например дисперсионные и бездисперсионные инфракрасные анализаторы, тоже можно оформить так, чтобы они обеспечивали определение нескольких компонентов анализируемой смеси.

3. Согласно ***принципу действия*** анализаторы можно разделить на две группы.

Анализаторы, основанные на физических принципах, – это приборы, измеряющие некоторую физическую величину, зависимость которой от химического состава анализируемого вещества точно определена.

Важным свойством этих анализаторов является то, что при измерении не происходит ни количественных, ни качественных изменений анализируемой смеси. Их преимуществом, как правило, является малая постоянная времени, поскольку эти приборы не требуют введения вспомогательного реагента (газа или раствора).

Определенным недостатком физических анализаторов является зависимость значений физических величин от давления, температуры и концентрации сопутствующих компонентов.

Из физических величин для анализа веществ используются измерения плотности, коэффициента преломления, вязкости, теплопроводности, магнитной восприимчивости, поглощения, различных излучений и т.д.

4. Анализаторы, основанные на физико-химических принципах. Действие этих анализаторов основано на контроле физических явлений, сопровождающих химическую реакцию, в которой определяемое вещество либо участвует само, либо на которую оно оказывает существенное влияние. В некоторых случаях анализируемая смесь сама содержит достаточное количество вещества, необходимого для реакции с определяемым веществом, а иногда к анализируемой смеси приходится добавлять вспомогательное вещество в газовой или жидкой фазе.

Запаздывание в показаниях (постоянная времени) у физико-химических анализаторов больше, чем у приборов, основанных на физических принципах.

К физико-химическим анализаторам относятся, например, приборы, основанные на измерении теплоты реакции, некоторые электрохимические анализаторы и т.п.

2 ОБЩИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К АНАЛИЗАТОРАМ

Применение анализаторов в медицине и экологии преследует цель получения объективных и точных результатов измерения. Поэтому к рабочим характеристикам анализаторов обычно предъявляются высокие требования.

Разработка анализаторов должна учитывать необходимость наиболее широкого применения этих приборов в самых разнообразных рабочих условиях. Выполнить требования универсальности анализаторов весьма трудно. Как правило, каждый тип анализатора предназначается только для данного вещества, определенного диапазона измерения и данных рабочих условий.

Из требований, предъявляемых к анализатору, особо выделяют *общие* и *конструктивные*.

Общие требования

Разработка отдельных типов анализаторов должна иметь целью выполнение следующих общих требований:

- максимально возможная надежность приборов в работе;
- минимум расходов на их эксплуатацию;
- большой срок службы;
- более широкая область применения;
- минимальная стоимость;
- необходимая производительность (постоянная времени);
- наличие выходных сигналов для взаимодействия с исполнительными устройствами.

Конструктивные требования

Конструкция анализатора определяется характером среды, в которой ему придется работать. С этой точки зрения различают следующие исполнения анализаторов:

1) обычное;
2) взрывозащищенное;
3) для работы в условиях агрессивных или запыленных сред;
4) вибро- и тряскопрочное.

Обычные анализаторы сконструированы для невзрывоопасных условий работы. Специальные требования к исполнению, естественно, повышают стоимость прибора.

При проектировании анализаторов должны учитываться все обстоятельства, которые могли бы неблагоприятно отразиться на четкости их работы.

При этом необходимо придерживаться следующих основных правил:

1. Приборы не должны иметь более широкого диапазона измерения, чем это действительно необходимо для конкретной задачи.

2. Чувствительность прибора должна быть такой, какая оправдывается потребностями контроля. Слишком чувствительные приборы, как правило, являются очень сложными в эксплуатации, более дорогими и требуют более квалифицированного обслуживания.

3. В течение длительного времени должна сохраняться точность прибора.

4. Анализатор должен быть спроектирован так, чтобы в процессе эксплуатации его можно было переградуировать.

5. Анализаторы, являющиеся датчиками и измерительными преобразователями, должны обладать минимальной постоянной времени и унифицированным выходным сигналом.

6. Приборы должны быть относительно простыми, чтобы их обслуживание не требовало высокой квалификации работников.

7. Индикаторы должны удовлетворять такому важному требованию, как скорость измерения. Здесь большой скорости измерения с меньшей точностью обычно отдают предпочтение перед измерением более точным, но более длительным.

3 ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ (СИСТЕМ)

3.1 Методологические основы организации микропроцессорной измерительной системы (МПИС)

Современные анализаторы стоятся с использование микропроцессоров, однокристальных микроЭВМ и персональных компьютеров. В связи с этим при их проектировании данные приборы целесообразно рассматривать как микропроцессорные измерительные преобразователи или системы (МПИС). Такого рода МПСИ относятся к классу измерительно-вычислительных биотехнических систем (БТС).

На системном этапе проектирования МПИС, как части измерительной цепи, множество решаемых ее функциональных задач (ФЗ) формируются с учетом ее назначения и способов представления электрических сигналов, несущих с датчика информацию о контролируемых физических процессах или параметрах контролируемого вещества.

Под термином «датчик» понимается конструктивно обособленная совокупность одного или нескольких первичных преобразователей (ПП) или чувствительных элементов (ЧЭ), воспринимающих входные величины и преобразующие их в измерительные (чаще всего электрические) сигналы.

Для измерительных систем перечень выполненных системой функциональных задач формируется исходя из обеспечения таких необходимых метрологических характеристик анализатора, как точность измерения, быстродействие, достоверность получаемой информации и др. Эти характеристики обеспечиваются совокупностью измерительных и вычислительных средств системы, а также реализуемых методов, уравнений измерения и алгоритмов вычислительной обработки первичной измерительной информации, получаемой с датчика.

В связи с этим является важным выбор эффективной организации процессорных измерительных средств с аналоговыми датчиками, при которой основная тяжесть по формированию требуемых характеристик измерительной системы переносится на ее вычислительные устройства, что позволяет добиться необходимой точности измерения при значительном упрощении конструкции датчика.

Для иллюстрации структурно-функциональной организации таких систем на рис. 3.1 приведена укрупненная структура микропроцессорной измерительной системы с электрическими датчиками. Система состоит из первичного измерительного преобразователя ПП (или датчика) и вторичного –

линейного (ЛП) или вычислительного (ВП) преобразователя, связанного через системный интерфейс с ядром МПС или персональным компьютером.

Вычислительный преобразователь наряду с преобразованием формы информации выполняет одновременно несложные математические операции по предварительной обработке первичной информации. Выполнение этих операций дает возможность разгрузить процессорный блок МПС и передать ему выполнение других функций по переработке информации.

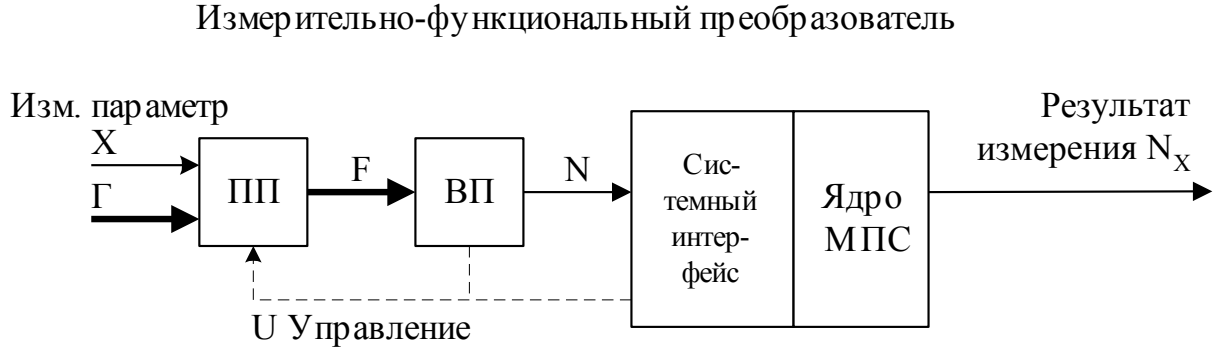


Рисунок 3.1 – Укрупненная структура микропроцессорной измерительной системы с частотными датчиками

С выхода ПП снимается совокупность электрических сигналов $\mathbf{F}=\{F_1, F\gamma_1, F\gamma_2, ..., F\gamma_m\}$, несущих, например, информацию: о физической величине X (в частности, об уровне сред H, размере D, расстоянии R, влажности B и т.д.) в виде частоты F_1 и возмущающих воздействиях $\mathbf{\Gamma}=\{\gamma_1, \gamma_2,..., \gamma_m\}$ в виде частотных параметров $F_1, F\gamma_1, F\gamma_2,..., F\gamma_m$. Система также при необходимости формирует вектор **U** управляющих сигналов для управления датчиком, участвуя в процессе получения измерительных данных.

Первичный ПП и вторичный ВП преобразователи совместно с ядром МПС можно рассматривать как измерительно-функциональный преобразователь информации (ФПИ), формирующий результат X^* об измеряемом параметре X, например в виде кода N_X. Такое утверждение обосновывается тем, что с целью анализа и синтеза измерительной системы и ее вычислительных средств целесообразно уравнение измерения представить в виде двух функциональных зависимостей или операторов преобразования:

$$\mathbf{F}=L_1(X, \mathbf{\Gamma}) \qquad (3.1)$$

и

$$N_H = L_2(\mathbf{F}). \qquad (3.2)$$

В соответствии с этой записью, измерительная система осуществляет на основе датчика преобразование контролируемого параметра X и неинформативных параметров **Г** в электрические сигналы **F**, а на базе ФПИ, как совокупности ВП и ядра МПС, – преобразование и математическую переработку полученных с датчика вектора параметров **F,** осуществляемых с

целью исключения влияния множества $\mathbf{\Gamma}=\{\gamma_1,\gamma_2,...,\gamma_m\}$ возмущающих воздействий на процесс формирования результата N_X, линейно связанного с измеряемым физическим параметром:

$$N_X = K_X X, \qquad (3.3)$$

где $K_X = N_{Xmax} / X_{max}$ – масштаб измерения (преобразования $X \rightarrow N$).

Таким образом, выбранный для процессорной измерительной системы с аналоговыми датчиками метод измерения в виде уравнений (3.1) и (3.2) предопределяет и способы, и средства формирования его результата на базе получения и функционального преобразования частотно-временных и амплитудных параметров сигналов с его датчика. Зависимость (3.1) называют выходной характеристикой сенсора (датчика).

3.2 Методика анализа погрешностей датчиков и принципы формирования функциональных задач по их коррекции (на примере радиоволновых датчиков)

Формирование для процессорных средств измерительного преобразователя (системы) перечня функциональных задач по коррекции влияния на результат измерения погрешностей аналогового датчика осуществляется на основе анализа процессов измерения. При выявлении погрешностей используется один из возможных вариантов представления измерительного процесса, в котором упор делают на отличие реального результата измерения X^* от истинного значения X измеряемой величины на погрешность ΔX результата измерения:

$$X^* = X + \Delta X. \qquad (3.4)$$

В связи с этим определение функциональных задач $ФЗ_i$ измерительной системы базируется на анализе составляющих статической погрешности ΔF_1 частотного датчика, которые проявляются на его выходе в частоте F_1, несущей информацию об измеряемом параметре X. При этом в зависимости от закономерности их проявления можно в величине F_1 выделить следующие виды погрешностей, составляющих ΔF_1: *систематические, случайные и грубые*. При выявлении каждой из них следует установить причину и место ее возникновения. В зависимости от этого указанные погрешности еще характеризуют как *методические, инструментальные, дополнительные* (или от влияния внешних причин), *субъективные* и т.д.

Так, в радиоволновых (резонансных) датчиках расстояния R, уровня H, влаги B, толщины D и других измеряемых параметров причиной систематических инструментальных погрешностей выступают технологические или инструментальные погрешности в изготовлении резонатора как части чувствительного элемента (ЧЭ) первичного преобразователя. Эти погрешности

приводят к нелинейности частотной характеристики датчика, которую описывают в виде идеализируемой зависимости $F_1=\psi(X)$.

Следующей существенной причиной возникновения систематической погрешности является паразитная чувствительность характеристики датчика к неинформативным дестабилизирующим электрофизическим параметрам $\gamma_1, \gamma_2,..., \gamma_m$ внешней и контролируемой среды. При контроле параметров R, H, B, D для диэлектрических сред в качестве неинформативных параметров чаще всего выступают диэлектрическая проницаемость ε контролируемой и окружающей $\varepsilon_{окр}$ среды, температура θ, плотность ρ и др. Для электропроводных сред учитывают такие возмущающие параметры как электропроводность σ и магнитная проницаемость μ_0. Поэтому статическая характеристика измерительного канала датчика является нелинейной функцией вида

$$F_1=\Phi(X, \gamma_1, \gamma_2,..., \gamma_m), \qquad (1.5)$$

где $X\in\{R, H, B, D\}$ – измеряемая величина, F_1 – частота измерительного канала датчика, $\gamma_1,\gamma_2,...,\gamma_m$ – неинформативные параметры.

Для компенсации влияния m возмущений необходимо, чтобы система измерения содержала наряду с измерительным каналом датчика также m дополнительных датчиков (или корректирующих каналов) с частотными характеристиками $F_{2k}=\Phi_k(\gamma_k)$, k=1, 2,…, m.. Сигналы с частотой F_{2k}, полученные с дополнительных первичных измерительных преобразователей «$\gamma_k\rightarrow F_{2k}$», вводятся в вычислительный преобразователь системы наряду с сигналом F_1. Тогда величину измеряемого параметра X можно найти, решив систему из (m+1) нелинейных уравнений вида:

$$F_1=\Phi(X, \gamma_1, \gamma_2,...,\gamma_m), \qquad (3.6)$$

$$F_{2k}=\Phi_i(\gamma_k),k=1, 2,…, m.$$

Однако процесс определения численного значения X^* на их основе носит итерационный характер и требует значительного времени и оборудования. Поэтому при построении инвариантных резонансных измерительных устройств чаще всего используются два одинаковых частотных датчика, образующих измерительный и компенсационный каналы. Измерительный канал (ИК) формирует частоту F_1 с информацией о контролируемом параметре X, а компенсационный (КК) – частоту F_2 с информацией о параметре γ_1, наиболее влияющем на формирование результата измерения: $F_1=\psi(X, \gamma_1)$, $F_2=\lambda(\gamma_1)$ или $F_2=\lambda(X, \gamma_1)$. Отметим, что при радиоволновых измерениях в качестве компенсационного канала может быть использован один и тот же частотный датчик, если изменить его функцию преобразования и получать с него измерительный сигнал в режиме мультиплексирования. Это позволяет

увеличить число компенсационных каналов без существенного возрастания затрат на их аппаратную реализацию.

В качестве неинформативного электрофизического параметра γ_1, как правило, выступает диэлектрическая проницаемость ε либо электропроводность σ. Это объясняется тем, что через их значения косвенно отражаются еще такие возмущающие воздействия, как температура θ контролируемой среды, ее плотность ρ, прогрессирующие во времени инструментальные погрешности Δ_t и технологические отклонения Δ_T, вызванные старением аналоговых элементов и конструкции датчика, и др.

Дополнительные погрешности измерения, вызываемые влияющими величинами ε (или σ, μ_0), $\varepsilon_{окр}$, θ, ρ, Δ_t, Δ_T и др., трудно поддаются аналитической оценке. Поэтому их предлагается определять по результатам работы системы измерения на основе набора исходных, тарировочных характеристик датчика, полученных в результате его калибровки, например, для ряда значений неинформативного параметра $\gamma_{1\varphi}$ при заданных параметрах $\varepsilon_{окр}$, θ_0 и Δ_{T0}. В результате формируется набор r тарировочных характеристик датчика

$$F_{1i}=\psi_i(X)\big|_{\gamma_{1j},\ \varepsilon окр,\ \theta_0,\ \Delta_{T0}},\ i=0,\ 1,\ldots,\ r\text{-}1. \qquad (3.7)$$

Далее рассмотрен пример оценки влияния диэлектрической проницаемости ε контролируемой среды на девиацию частоты F_1 датчика уровня H на основе его тарировочных характеристик для ряда значений ε: ε_1, ε_2, ε_3 и ε_4.

Изменение ε приводит к погрешности $\Delta_\varepsilon F_1$ в выходном сигнале $F_1=\psi(H,\varepsilon)$ измерительного канала. В табл. 3.1 для значений уровня $H=H_{max}$, когда $F_1(H_{max})=F_2$, приведена характеристика погрешности

$$\Delta_\varepsilon F_1^*(H_{max},\varepsilon)=\Delta F_2^*(\varepsilon)=F_2^*-F_{22}^* \qquad (3.8)$$

при изменении диэлектрической проницаемости жидкой среды ε относительно начального значения $\varepsilon_{нач.}=\varepsilon_2$, на величину $\Delta\varepsilon=\varepsilon_i-\varepsilon_2$, где i=1, 3, 4; $F_{22}^*=F_{22}^*(\varepsilon_2)$. Значения $F_2^*=F_2/F_{2max}$ представляют собой нормированные значения частот F_2 датчика, когда $0<F_2^*\le 1$.

Таблица 3.1 Характеристика изменения частот F_2^* и $\Delta_\varepsilon F_2^*$ от ε; $H_{max}=l=1$ м

ε_i	ε_1=1,1799	ε_2=1,2299	ε_3=1,4299	ε_3=1,5599
$F_2^*=F_1^*(H_{max})$	0,92035	0,90145	0,88403	0,80044
$\Delta_\varepsilon F_1^*(H_{max,})=\Delta_\varepsilon F_2^*=F_{2i}^*-F_{22}^*$	+0,01889	0	-0,01742	-0,10101
$\Delta\varepsilon_i=\varepsilon_i-\varepsilon_2$	-0,0500	0	0,2000	0,3300

Наличие погрешности $\Delta_\varepsilon F_1^*$ приводит к отклонению оценки уровня H на величину $\Delta_\varepsilon H$. Для расчета дополнительной погрешности $|\Delta_\varepsilon H|_{max}$ от влияния ε необходимо на основе тарировочной характеристики $F_1^*=\psi(H^*, \varepsilon_2)$ датчика найти полином $P_2(F_1^*)\approx H^*$, аппроксимирующий функцию $H^*=\psi^{-1}(F_1^*)$, где $H^*=H/H_{max}$ – приведенные значения уровня. В таблице 3.2 приведена тарировочная характеристика $F_1^*=\psi(H^*, \varepsilon_2)$ датчика и первые конечные разности $\Delta^1H^*=(H^*_j-H^*_{j-1})/(F^*_{1j}-F^*_{1j-1})$, показывающие крутизну функции $\psi^{-1}(H^*)$ для случая, когда $H_{max} = l$=1.1 м, $F_1^*=F_1/F_{1max}$.

Таблица 3.2 Тарировочная характеристика $F_1^*=\psi(H^*)$ датчика уровня (l=1.1 м)

$F_1^*=F_1/F_{1max}$	$H^*=H/H_{max}$	$\Delta^1H^*=(H^*_{j+1}-H^*_j)/(F^*_{1j+1}-F^*_{1j})$
0,999999	0,0	–
0,989531	0,1	9,5247
0,979248	0,2	9,7248
0,969152	0,3	9,9049
0,959232	0,4	10,0800
0,949463	0,5	10,2040
0,939807	0,6	10,4166
0,930222	0,7	10,4329
0,920678	0,8	10,482
0,911118	0,9	10,520
0,901669	1,0	10,5920

В соответствии с приведенными в ней данными можно рассчитать приближение функции $H^*=\psi^{-1}(F_1^*)$ в виде полинома 2-ой степени

$$H^*\approx P_2(F_1^*)=15{,}3597–21{,}1145\ F_1^*+5{,}7549\ F_1^{*2} \qquad (3.9)$$

с методической ошибкой $\sigma_м$=0,0001.

Найдем погрешность $\Delta_\varepsilon H^*$ и $|\Delta_\varepsilon H^*|_{max}$ от изменения $\Delta_\varepsilon F_1^*$, вызванного отклонением ε от ε_2 на величину Δε:

$$\Delta_\varepsilon H^*\approx (\partial P_2(F^*_1)/\partial F^*_1)\,\Delta_\varepsilon F_1^* = -21{,}1145\Delta_\varepsilon F_1^*+2\cdot 5{,}7549\ F_1^*\Delta_\varepsilon F_1^*,$$

$$|\Delta_\varepsilon H^*|_{max}\approx -21{,}1145\Delta_\varepsilon F_1^*+2\cdot 5{,}7549F1^*\Delta_\varepsilon F_1^*. \qquad (3.10)$$

Для $F_1^*\approx(F_1^*{}_{max}–F_1^*{}_{min})/2$, а $\Delta\varepsilon_2=\varepsilon_1-\varepsilon_2=-0{,}05$ и $\Delta\varepsilon_4=\varepsilon_4-\varepsilon_2=0{,}33$ значения $\Delta_\varepsilon F_1^*$ равны $\Delta_{\varepsilon 2}F_1^*=0{,}01889$ и $\Delta_{\varepsilon 4}F_1^*=-0{,}10101$. Подставляя $\Delta_\varepsilon F_1^*$ и F_1^* в формулу (1.10), найдём, что $|\Delta_{\varepsilon 2}H^*|_{max}\approx 0{,}2$, а $|\Delta\varepsilon_4 H^*|_{max}\approx 1{,}1$.

Таким образом, как следует из анализа ошибок $|\Delta_\varepsilon H^*|_{max}$, даже незначительное отклонение ε (всего на 5%) приводит к погрешности в измерении уровня, составляющей около 20%. Такая высокая чувствительность к изменению ε объясняется, во многом, значительной крутизной характеристики датчика $F_1=\psi^{-1}(H)$. Для коррекции влияния ε на показания уровнемера следует реализовать специальные алгоритмы компенсации, например, в виде дифференциальных и логометрических зависимостей. Поэтому одной из задач, которую должны выполнять его вычислительные средства, является компенсация влияния погрешности $\Delta_\varepsilon F_1$ датчика от изменения электрофизических свойств среды на показания прибора.

Аналогичным образом на основе анализа тарировочных характеристик по различным параметрам можно для измерительного канала выделить следующие типичные составляющие (а – д) *систематической погрешности* резонансного датчика.

а) Погрешность $\Delta_X F(X)$ от нелинейности характеристики датчика.

Анализ характеристик (3.7) также указывает на наличие погрешности нелинейности $\Delta_X F(X)$, характеризуемой тем, что зависимость $F_1=\psi(X)$ отличается от линейной $F_1=M_F X$ на величину

$$\Delta_X F(X)= \psi(X) - M_F X, \qquad (3.11)$$

где M_F – масштаб преобразования, $M_F=F_{1max}/X_{max}$.

Данная систематическая погрешность имеет сложную зависимость от X и является детерминированной для конкретного датчика при фиксированных значениях ε_o, θ_o, Δ_{To}. Поэтому ее часто описывают не в виде отдельной составляющей $\Delta_X F(X)$ погрешности, а в виде нелинейной тарировочной характеристики идеального датчика

$$F_1=\psi(X))\,\big|_{\gamma 10}. \qquad (3.12)$$

Такое представление погрешности нелинейности датчика позволяет затем компенсировать ее путем вычисления во вторичном преобразователе функции $X=\varphi^{-1}(F_1)$, обратной (3.12). В погрешности от нелинейности характеристики датчика обычно учитывают и технологические погрешности Δ_T из-за отклонений в конструкции датчика.

б) Погрешность $\Delta_{\gamma l} F_1$ от влияния диэлектрической проницаемости ε или электропроводности σ контролируемой среды.

Анализ тарировочных характеристик датчиков для измерения R, H, B и D свидетельствует о сильном влиянии электрофизических параметров ε или

электропроводности σ на изменение значения F_1, которое можно оценивать систематической погрешностью $\Delta_{\gamma l}F_1$ от влияния $\gamma_1 \in \{\varepsilon, \sigma\}$.

в) Погрешность $\Delta_{окр}F_1$ от влияния диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{окр}$ (или $\varepsilon_г$) окружающей среды.

Данную составляющую следует учитывать, например, при измерении уровня криогенных сред в резервуарах значительной высоты – (10-20) м и более, а также при измерении геометрических размеров изделий.

г) Дрейфовая (прогрессирующая) погрешность $\Delta_t F_1$.

Эта погрешность медленно изменяется во времени t и, как правило, вызывается технологическими процессами старения тех или иных аналоговых элементов (резисторов, конденсаторов), а также налетами измерительной среды на конструкцию отрезков длинной линии, как чувствительного элемента датчика.

д) Погрешность $\Delta_M F_1$ модуляции выходного сигнала $F_1(t)$ датчика.

Причиной методической погрешности $\Delta_M F_1$, связанной с частотной модуляцией выходного сигнала F_1, является метод построения схемы резонансного датчика. Он заключается в модуляции по определенной форме, например пилообразной, синусоидальной, или по случайному закону частоты $\Delta_M F_1(t)$ около среднего значения F_1 для формирования устойчивого резонанса.

Частотная модуляция F_q приводит к изменению $F_1(t)$ около среднего значения F_1 по закону, который может быть приближенно описан как

$$\Delta_M F_1(t)=|\Delta F_q| \sin 2\pi t/T_p. \qquad (3.13)$$

Таким образом,

$$F_1(t)=F_1+\Delta_M F_1(t), \qquad (3.14)$$

где $\Delta_M F_1(t)$ представляет собой отклонения $F_1(t)$ от среднего значения частоты F_1.

е) <u>Аномальная погрешность $F_1(\xi)$ датчика</u>.

В результате воздействия на датчик случайных импульсных помех ξ, приводящих к его сбоям, а также при резком изменении диэлектрических свойств измеряемой среды, возможно появление на выходе ПП аномальных сигналов (АС) $F_1(\xi)$. Эти сигналы могут приводить к аномальным погрешностям измерения. После появления АС истинное значение F_1 установится на выходе датчика только по окончании действия АС.

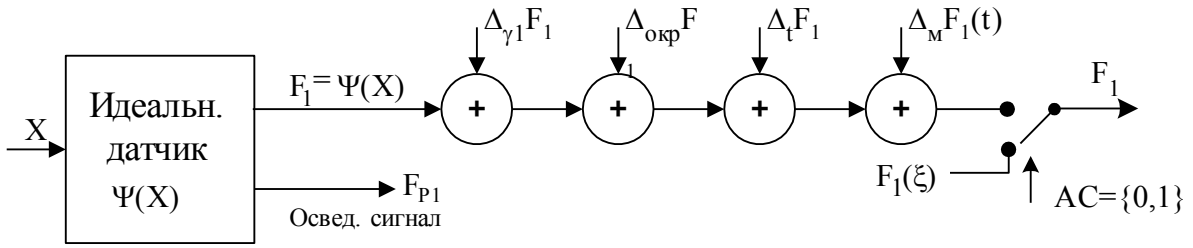
Таким образом, на основании проведенного анализа составляющих погрешностей выходной характеристики измерительного канала резонансного датчика (ИК), выраженных в виде отклонений от выходной частоты F_1, может

быть построена *математическая модель учета его погрешностей*, описываемая в виде реальной характеристики:

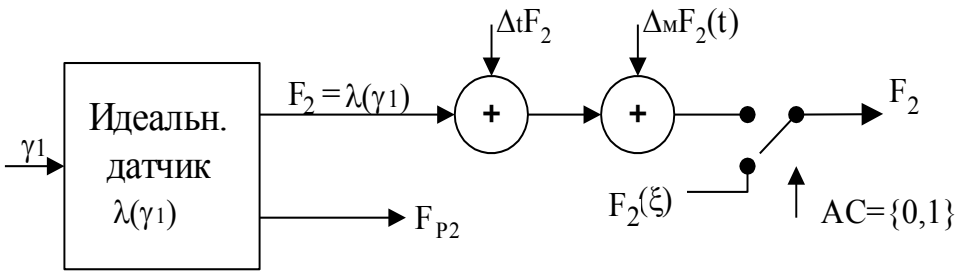
$$F_1 = \#AC\cdot[\psi(X)|_{\gamma 1o} + \Delta_{\gamma 1}F_1 + \Delta_t F_1 + \Delta_{окр}F_1 + \Delta_M F_1] + AC\cdot[F_1(\xi)], \qquad (3.15)$$

где $\psi(X)|_{\gamma 1o}$ – тарировочная функция датчика, AC={1,0} – логическая функция, определяющая факт наличия аномального сигнала, # – знак инверсии.

В соответствии с выражением (3.15) целесообразно построить эквивалентную схему учета (анализа) погрешностей ИК датчика (рис. 3.2,а). Приведенная схема дает наглядное представление о процессе формирования датчиком измерительной информации в виде частоты F_1 с учетом причин, влияющих на появление в F_1 различных погрешностей.



а) измерительный канал, $\gamma 1=\gamma 1_0$



б) компенсационный канал, X=const

Рисунок 3.2 – Эквивалентная схема учета погрешностей измерительного (а) и компенсационного (б) каналов датчика

Учитывая идентичность построения резонансных датчиков, можно аналогичным образом получить для компенсационного канала (для которого X_0=X=const) эквивалентную схему (рис. 3.2,б) и модель его погрешностей в виде выражения:

$$F_2 = \#AC\cdot[\lambda(\gamma 1)|_{Xo} + \Delta_t F_2 + \Delta_M F_2] + AC\cdot[F_2(\xi)]. \qquad (3.16)$$

На основании выявленных составляющих погрешностей а) – е) резонансного датчика, можно сформулировать перечень соответствующих функциональных задач по их коррекции процессорными средствами

измерительной системы. К ним относятся задачи: по линеаризации характеристики датчика; по коррекции (компенсации) влияния неинформативных электрофизических параметров контролируемой и окружающей среды и др.

Рассмотренная методика определения составляющих погрешностей на базе исходного уравнения измерения и выявления причин и характера их проявления на базе градуировочных характеристик и принципов построения сенсора может быть распространена на другие типы аналоговых датчиков.

3.3 Перечень основных функциональных задач измерительных систем с аналоговыми датчиками

На основании проведенного анализа работы датчика формулируется перечень функциональных задач ФЗ, которые необходимо реализовать вычислительными средствами измерительной системы, чтобы скорректировать погрешности, вносимые датчиком, и обеспечить необходимые метрологические характеристики прибора (в этот перечень также включают типичные для ИС задачи: $ФЗ_0$, $ФЗ_{11}$).

Этот перечень содержит следующие функциональные задачи:

$ФЗ_0$ – преобразование формируемых датчиком аналоговых сигналов (частоты, временного интервала, напряжения) в код;

$ФЗ_1$ – линеаризация непрерывных нелинейных характеристик датчика;

$ФЗ_2$ – коррекция влияния на выходную характеристику датчика неинформативных параметров измеряемой среды;

$ФЗ_6$ – коррекция прогрессирующих (дрейфовых) погрешностей;

$ФЗ_7$ – своевременное выявление и исключение влияния на результат аномальных сигналов $F(\xi)$, обусловленных срывами работы датчика;

$ФЗ_{11}$ – сервисные функции (контроль работоспособности ВП, диагностика неисправностей датчика, интерфейс с другими системами и т.д.), повышающие функциональные возможности ИС.

3.4 Основные показатели качества измерительно-вычислительных средств обработки аналоговых сигналов

Проведенный анализ погрешностей датчиков на примере радиоволновых первичных преобразователей определил круг функциональных задач $ФЗ_i$, выполнение которых с помощью вычислительных средств измерительной системы позволяет улучшить ее метрологические характеристики и расширить функциональные возможности. Отмечая достаточно широкий спектр

выявленных для достижения этой цели $ФЗ_i$, можно констатировать тот факт, что эффективная их реализация, особенно при увеличении их числа, требует применения микропроцессорных средств обработки измерительной информации и применения специальных алгоритмов и методов преобразования и математической обработки сигналов.

При проектировании микропроцессорной ИС с аналоговыми датчиками необходимо, в первую очередь, произвести выбор показателей ее эффективности (качества). При этом учитывают, что их перечень в значительной степени определяется назначением измерительного прибора и теми его основными технико-экономическими показателями (типичными требованиями), которые доминируют в задании на разработку системы. Можно выделить три основные характеристики качества процессорной измерительной системы, определяющие ее эффективность: точность измерения, быстродействие, затраты на ее создание.

Точность обычно оценивается такими количественными нормированными метрологическими характеристиками, как основная погрешность измерения $\Delta_{ОСН}$ и дополнительная погрешность $\Delta_{ДОП}$, вызванная внешними влияющими факторами, например, влиянием электрофизических свойств среды ε и др. В ряде случаев оценку точности проектируемого прибора производят на основе результирующей погрешности измерения Δ_X и ее составляющих – неисключенной систематической и случайной погрешностей. Часто указывают диапазон измеряемых величин, число разрядов k результата измерения.

Быстродействие ИС целесообразно оценивать временем измерения $T_И$, или периодом измерения $T_Ц$. Для автоматизированных приборов, как правило, $T_Ц=T_И$. Фактически $T_И$ характеризует еще такую метрологическую характеристику, как динамическую погрешность

$$\Delta_Д=X'T_И,$$

где X' – скорость изменения контролируемого параметра X на отрезке $T_И$.
Снижая $T_И$, можно свести $\Delta_Д$ к предельно допустимому значению $\Delta_{Ддоп}$.

В качестве *стоимостной (затратной)* С характеристики могут выступать общие затраты на систему, масса и габариты прибора, его аппаратные затраты в числе микросхем и др.

Наряду с этим, для измерительной системы также указываются характеристики, определяющие *функциональные возможности* прибора:

наличие режимов самоконтроля, диагностики неисправностей датчика, пультовых операций, возможность работы прибора в режиме передача и отображение результатов, формирование сигналов управления, оперативное изменение программы работы и т.д. Сюда часто относят возможность прибора адаптироваться к типу контролируемой среды.

При проектировании измерительного преобразователя (ИП) как составной части цепи контроля, наряду с его затратами С в качестве показателей качества преобразователя выступают время $T_{ПР}$ и погрешность преобразования $\Delta_{ПР}$, характеризующие его как инструментарий для реализации функционального преобразования информации. Эти характеристики существенным образом влияют на эффективность процессорной ИС в целом. Для ИП, как одного из видов аналого-цифрового преобразователя (АЦП), является характерной следующая постановка задачи проектирования:

$$C \rightarrow \min \qquad (3.17)$$

при

$$\Delta_{ПР} \leq \Delta_{Пр max},$$

$$T_{ПР} \leq T_{Пр max},$$

при которой оптимизируют затраты С, а остальные параметрами задаются в соответствии с техническим заданием на разработку как ограничения. При этом является актуальным поиск целевой функции и разработка методики (или процедуры) синтеза новых вариантов структур ИП, как ядра измерительных процессорных систем с частотными датчиками.

В качестве *интегрального показателя* качества (для оценки $\Delta_{ПР}$ и $T_{ПР}$) системы обработки измерительной информации целесообразно в ряде случаев выбирать оценку максимальной пропускной способности $C_{П}$, которая связывает точность (в числе разрядов k результата) и время преобразования: $C_{П} = k/T_{пр}$.

Как уже отмечалось, достижение необходимых метрологических характеристик систем измерения обеспечивается решением необходимого множества функциональных задач $ФЗ_i$, выявленных при анализе погрешностей датчиков и типичных задач систем сбора первичной обработки измерительных данных. Учитывая обоснованное представление измерительной системы в виде совокупности первичного и вторичного (функционального) преобразователя, их конструктивное выполнение в общем случае может быть распределено между указанными подсистемами.

3.5 Методы процессорной реализации операций коррекции погрешностей датчиков

Далее рассматриваются варианты выполнения операций коррекции, линеаризации и преобразования формы представления информации. Они базируются на двух основных методах их реализации: либо на основе их совместного выполнения, либо – раздельного или частично-раздельного.

Применение при первичной обработке измерительных данных процессорных средств позволяет осуществить целенаправленную автоматическую компенсацию погрешностей, вызванных неидеальностью характеристики частотного датчика. Существуют два основных метода процессорной реализации операций преобразования формы представления информации $ФЗ_0$, линеаризации, $ФЗ_1$ и коррекции $ФЗ_2$: либо на основе их совместного выполнения, либо – раздельного или частично-раздельного.

Рассмотрим для частотных измерений примеры типичных математических формульных записей для операций коррекции и линеаризации, а также варианты их выполнения с учетом преобразования формы представления информации.

Для компенсации влияния неинформативного электрофизического параметра γ на формирование результата N_X об измеряемой величине X математическая переработка частот

$$F_1=\psi(X, \gamma)$$

и

$$F_2=\lambda(X, \gamma)$$

идеализированных измерительного и компенсационного каналов резонансного датчика должна производиться по одному из выбранных алгоритмов компенсации, например, логометрическому

$$Z = \frac{F_{01}/F_1 - 1}{F_{02}/F_2 - 1} = \varphi(X), \qquad (3.18)$$

где F_{01} и F_{02} – частоты F_1 и F_2, соответствующие нулевому значению X: $F_{01}=F_1(0)$; $F_{02}=F_2(0)$. В ряде случаев $F_2=\lambda(\gamma)$.

Поскольку зависимость Z (3.18) является нелинейной от X, то для получения линейной зависимости выходного кода N_X от величины измеряемого параметра X

$$N_X=M_XX$$

($M_X = N_{max}/H_{max}$ – масштаб преобразования), необходимо после операции коррекции (3.18) осуществить линеаризацию зависимости $Z=\varphi(X)$ путем воспроизведения функции

$$X = \varphi^{-1}(Z), \qquad (3.19)$$

обратной кривой $Z = \varphi(X)$.

При воспроизведении зависимости $X=\varphi^{-1}(Z)$ (3.19) она приближается другой функцией, например полиномом $P_m(Z)$ m-й степени

$$X=\varphi^{-1}(Z)\approx P_m(Z)=a_0+a_1Z+a_2Z^2+.....+a_mZ^m \qquad (3.19)$$

с заданной методической ошибкой $\Delta_M X$. Тогда для получения необходимого значения кода $N_X = M_XX$, линейно связанного с измеряемой величиной X независимо от электрофизических свойств среды γ, измерительное устройство должно реализовать следующую систему математических уравнений:

$$Z = \frac{F_{01}/F_1 - 1}{F_{02}/F_2 - 1}, \qquad (3.20)$$

$$X\approx a_0+a_1Z+a_2Z^2+.....+a_mZ^m,$$

$$N_X=M_XX.$$

Поиск уравнений математического описания алгоритмов отдельных функциональных задач (ФЗ) должен вестись с учетом возможных вариантов их пространственно-временной совокупности с алгоритмами решения других задач. Этот поиск идет в направлении получения совместного алгоритма и его реализации в целом с таким составом и порядком выполнения операторов $P_{ФЗi}$ отдельных ФЗ на базе ориентированных для его выполнения процессорных средств, чтобы достигались необходимые технико-экономические показатели системы. Для описания возможных вариантов алгоритма формирования величины измеряемого параметра целесообразно применять операторные модели для представления возможной совокупности операций $P_{ФЗi}$.

Далее приведены варианты операторных моделей возможных алгоритмов для определения результата измерения $N_X \equiv X$ на основе выполнения минимально возможного числа операторов $P_{Фзi}$, отображающих ФЗ преобразования формы информации, компенсации влияния неинформативного параметра и линеаризации. На базе этих моделей также можно составить соответствующие функционально-логические схемы функциональных преобразователей информации (ФПИ) для системы измерения и определить наиболее целесообразные пути их структурной организации и физической реализации.

1. Линеаризация ($ФЗ_1$) совмещается с преобразованием ($ФЗ_0$) частотно-импульсной формы представления (F_1 и F_2) измерительной информации об X и γ с выполнением операции коррекции ($ФЗ_2$) влияния γ на результат измерения N_X, представленный в цифровой форме. При этом процесс обработки информации для получения N_X можно описать в операторной форме:

$$N_X=(F_1 \cup F_2)(P_{Ф30} \cup P_{Ф31} \cup P_{Ф32}). \qquad (3.21)$$

2. Линеаризация осуществляется после преобразования и операции коррекции. Здесь возможны три основных варианта обработки $ФЗ_i$ (i=0, 1, 2) во времени и пространстве:

$$\text{а) } N_X=(F_1 P_{Ф30} \cup F_2 P_{Ф30})P_{КМ}P_{Ф31}P_{Ф32},$$

$$\text{б) } N_X=(F_1 \cup F_2) P_{КМ}P_{Ф30}P_{Ф31}P_{Ф32}, \qquad (3.22)$$

$$\text{в) } N_X=(F_1 \cup F_2) P_{КМ}(P_{Ф30} \cup P_{Ф31})P_{Ф32},$$

где $P_{КМ}$ – оператор коммутации сигналов F_1 и F_2.

Первый вариант реализации алгоритма измерения целесообразен при построении ФПИ, в которых выполнение всех функций ФПИ для выполнения $ФЗ_0$, $ФЗ_1$ и $ФЗ_2$ производятся только специализированными аппаратными средствами, например, на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС).

Второй вариант реализации алгоритмов а), б) и в) для формирования N_X целесообразен для микропроцессорных вычислительных преобразователей, в которых можно выделить для МПСОИ аппаратный или аппаратно-программный вариант реализации задачи преобразования $ФЗ_0$ и программный для реализации линеаризации $ФЗ_1$ и коррекции $ФЗ_2$.

3.6 Процедура структурного проектирования микропроцессорной измерительной системы (МПИС)

Разработку МПИС как анализатора с требуемыми техническими характеристиками необходимо осуществлять в соответствии с выбранной целевой функцией (3.17) и принятой при этом процедурой проектирования ее ядра в виде измерительного или функционального преобразователя информации (ФПИ).

Одним из распространенных методов его проектирования является *метод сравнительного анализа*. При его применении выбор структуры (схемы) и алгоритма работы создаваемого преобразователя базируется на сравнительном анализе альтернативных вариантов из набора (библиотеки) устройств. При формулировании задачи проектирования МПИС для данного метода целесообразно в качестве показателей точности указывать результирующую погрешность измерения

$$\Delta_X = \Delta_{НСП} + \Delta^0_X$$

и две ее составляющие: неисключенную систематическую погрешность (НСП) $\Delta_{НСП}$ и случайную погрешность Δ^0_X, как правило, являющуюся инструментальной погрешностью $\Delta_И$.

Такой выбор обусловлен тем, что погрешность $\Delta_{НСП}$ показывает: до какой степени в процессе разработки прибора удалось за счет выполнения специальных разработанных алгоритмов, методов преобразования и математической переработки измерительной информации скомпенсировать ошибки от неидеальности частотной характеристики датчика, а ошибка $\Delta_И$ – вес погрешности, вносимой инструментальными средствами проектируемой МПИС, в качестве которых выступает преобразователь информации ФПИ.

Тогда с учетом выбранных показателей точности и представления ядра измерительной системы в виде ФПИ, можно постановку задачи ее проектирования записать в виде:

$$\begin{gathered} \min \leftarrow C, \\ \Delta_{НСП} \le \Delta_{НСПдоп}, \\ \Delta_И \le \Delta_{Идоп}, \\ T_И \le T_{Идоп}. \end{gathered} \qquad (3.23)$$

Для заданной схемы первичного преобразователя в качестве оптимизируемого (минимизируемого) параметра МПИС можно выбрать

частный показатель затрат С: либо массу прибора за исключением датчика, например в количестве микросхем, либо его стоимость, либо какую-то другую характеристику затрат. На остальные показатели качества системы – на погрешности $\Delta_{НСП}$ и $\Delta_{И}$, а также на время измерения $T_{И}$ накладывают ограничения. В постановку (3.23) задачи проектирования МПИС, поддерживающей выполнение функциональной задачи коррекции аномальных погрешностей $\Delta_{АН}$, может быть включено ограничение вида

$$\Delta_{АН} \le \Delta_{АНдоп.}$$

Поскольку в качестве основы МПИС с аналоговыми датчиками выступает функциональный преобразователь, то в качестве целевой функции задачи проектирования целесообразно использовать показатель затрат $C=Q_{ФПИ}$ ФПИ. В общем случае для трехуровневой организации микропроцессорной измерительной системы (МПС) со специализированными устройствами преобразования формы информации на нижнем уровне его целевую функцию можно записать в виде:

$$C = Q_{ФПИ}^{(r)} = \sum_{\mu=1}^{3} \sum_{\eta=1}^{m} g_{\mu\eta}^{(r)} Q_{\mu\eta}^{(r)}, \quad r = 1, 2, \ldots, l. \qquad (3.24)$$

Аргументами функции (3.24) являются элементы матрицы $g_{\mu\eta}^{(r)}$, определяющие по сути состав операционных устройств базовой 3-уровневой структуры МПС обработки измерительной информации и связи между ними, а также условные затраты отдельных аппаратно-программных средств МПС $Q_{\mu\eta}^{(r)}$ на реализацию η-х функций нелинейного преобразования из выбранного базиса m функций Φ_i ФПИ для заданной элементной базы r. Условные затраты показывают «вес» отдельных элементов $K_{\mu\eta}^{(r)}$ структуры в формировании показателя затрат $C=Q_{ФПИ}^{(r)}$ проектируемой системы. Базис функций ФПИ содержит операторы преобразования $\Phi_{ПР}$, вычисления $\Phi_{В}$, сопряжения $\Phi_{С}$, управления $\Phi_{У}$, хранения $\Phi_{П}$, определения интервала аппроксимации $\Phi_{И}$, управления коммутацией $\Phi_{упр.ком}$ и др.

С учетом вышеизложенного, задача структурного проектирования микропроцессорной ИС формулируется следующим образом. Необходимо создать алгоритм получения, преобразования и обработки измерительных сигналов для формирования действительного значения контролируемой величины. Далее распределить его выполнение между аппаратно-программными средствами выбранной 1-, 2- или 3-уровневой базовой структуры МПС обработки данных при выполнении ограничений на

допустимые значения погрешностей $\Delta_И \le \Delta_{И.доп}$, $\Delta_{НСП} \le \Delta_{НСПдоп}$ и времени $T_И \le T_{Идоп}$ измерения, обеспечив минимизацию показателя затрат С путем поиска сочетания параметров $g_{\mu\eta}^{(r)}$ и $Q_{\mu\eta}^{(r)}$ целевой функции $C=Q_{ФПИ}^{(r)}$, характеризующих оптимальную структуру процессорных средств измерительной системы.

Исходя из обоснованного представления микропроцессорной измерительной системы с аналоговыми датчиками в виде функционального преобразователя, можно для сформулированной задачи проектирования определить последовательность разработки (рис. 3.3) алгоритмического обеспечения МПИС и структуры ФПИ, как ее ядра:

1. Выявляется на основе моделей погрешностей датчика и формулируется перечень функциональных задач (ФЗ) измерительной системы, решение которых возлагается на ФПИ.

2. Разрабатываются в базисе функций $Ф_i$ функционального преобразователя алгоритмы и математические уравнения выполнения отдельных функциональных задач системы, решение которых обеспечивает ее необходимые (желаемые) метрологические характеристик.

3. На их основе создается алгоритм решения задачи измерения в целом, или ее частей, например, в виде алгоритма функционирования системы, операторных моделей и (или) функционально-логических схем (ФЛС) организации ИС и ее подсистем через совокупность функций и (или) блоков ФПИ.

4. Производится отображение функций $Ф_i$ ФПИ на операционные средства микропроцессорной системы обработки импульсно-аналоговой информации (МПСОИ) с 1-. 2- или 3-уровневой организацией и формируются матрицы (модели) структур функциональных преобразователей аналоговых сигналов.

5. Для выбранных матриц генерируются структуры ФПИ с учетом элементной базы и конструктивного исполнения функционального преобразователя в виде адаптера персонального компьютера или отдельного микропроцессорного модуля (прибора).

6. Производится сравнительный анализ и выбор (или разработка) структуры, анализ и расчет параметров ФПИ, обеспечивающего совместно с первичным преобразователем заданные характеристики измерительного устройства.

Последовательность выполнения этих этапов или какой-либо их части может циклически повторяться до получения структуры вычислительного преобразователя и системы в целом, удовлетворяющей необходимым показателям ее качества при минимуме затрат.

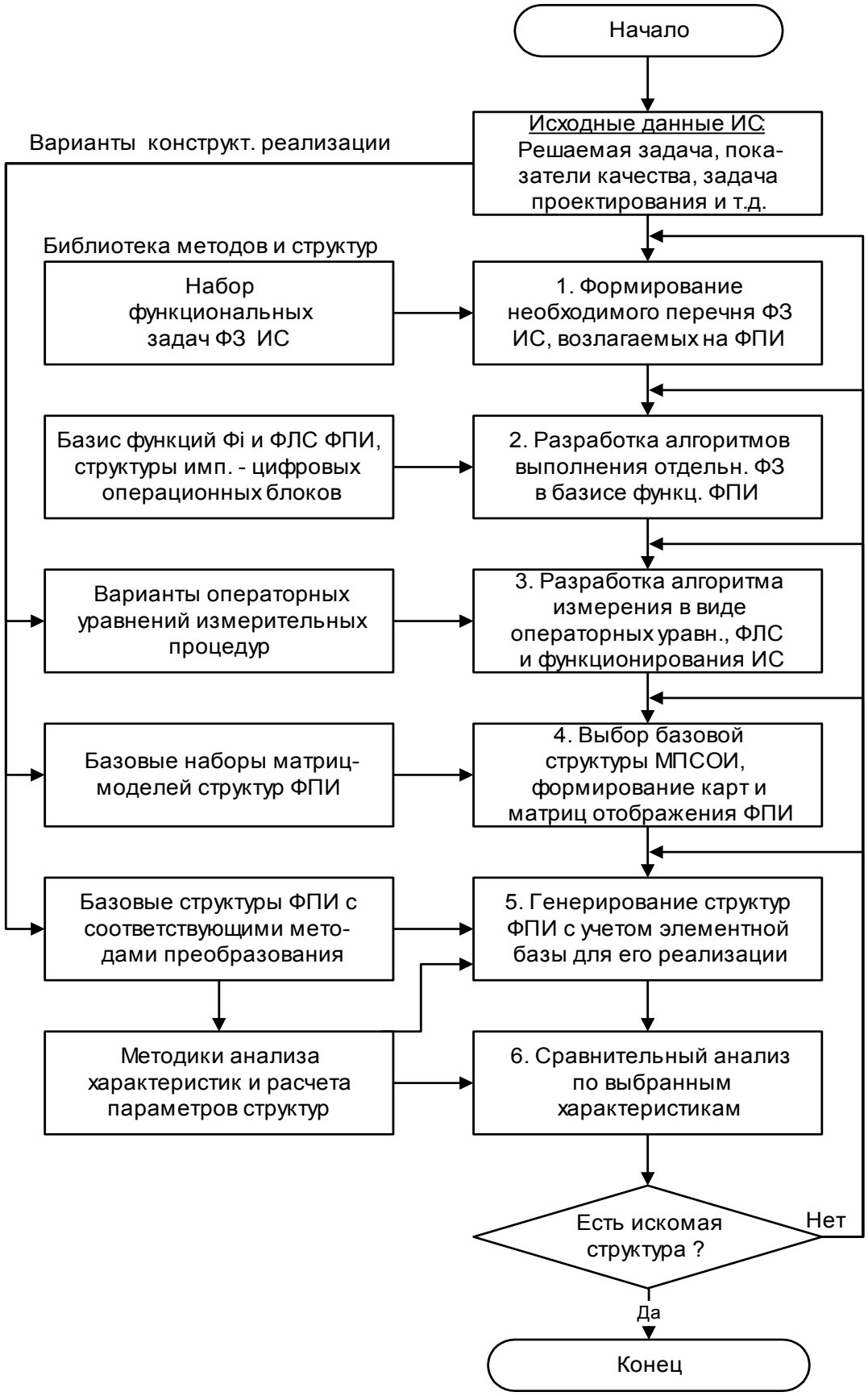


Рисунок 3.3 – Схема процедуры структурного проектирования микропроцессорной измерительной системы с аналоговыми датчиками

Поиск оптимальной структуры и алгоритмов работы разрабатываемого устройства в соответствии с приведенной на рис. 3.3 схемой процедуры проектирования сокращается за счет задания его конструкторского исполнения в виде адаптера или модуля устройства сопряжения ЭВМ с объектом контроля (УСО), а также ограничения перечня типов элементной базы для его физической реализации и т.д. При этом математическое описание выполняемых алгоритмов целесообразно производить на основе (или в базисе) множества функций Φ_i преобразователя информации ПФИ, в качестве которого представляют вычислительные средства ИС.

Поиск уравнений математического описания базовых алгоритмов решения отдельных ФЗ или их пространственно-временной совокупности должен вестись в направлении получения алгоритмов с таким составом и порядком выполнения функциональных операторов на базе операционных средств МПСОИ, чтобы достигались высокие показатели метрологических характеристик (точности, быстродействия, достоверности измерения и др.) измерительного устройства (анализатора).

Таким образом, представленная процедура разработки специальных алгоритмов и математических уравнений получения, преобразования и нелинейной обработки измерительной информации с аналоговых датчиков и структур вычислительных средств для формирования действительного значения контролируемого параметра является основой создания эффективного структурно-алгоритмического обеспечения МПИС с высокими метрологическими характеристиками.

4 СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ

Рассмотрим основные методы построения автоматических анализаторов на примере газоанализаторов. Количество используемых методов газового анализа велико, поэтому здесь описываются основные методы.

4.1 Термокондуктометрические газоанализаторы

Принцип действия таких анализаторов основан на зависимости теплопроводности газовой смеси от ее состава. Для большинства практически важных случаев справедливо уравнение:

$$\lambda = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \cdot C_i \,, \tag{4.1}$$

где λ – теплопроводность смеси;
λ_i – теплопроводность i-го компонента;
n – число компонентов;
C_i – его концентрация.

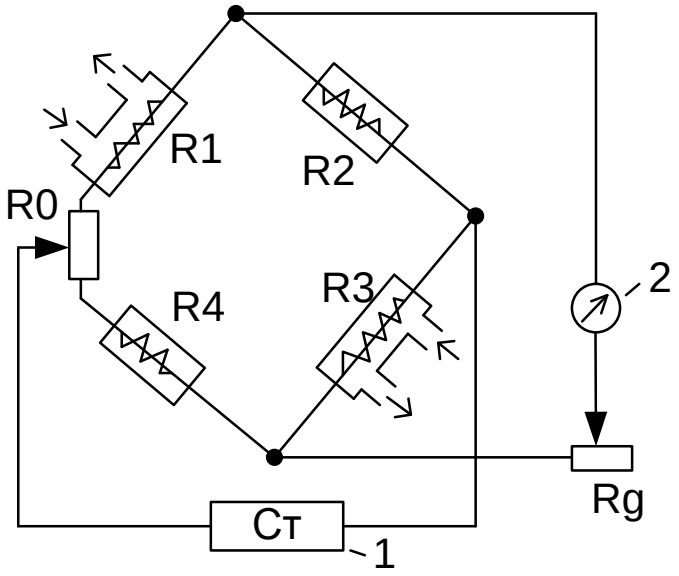
Термокондуктометрические газоанализаторы не обладают высокой избирательностью и используются, если контролируемый компонент по теплопроводности существенно отличается от остальных, например для определения концентраций H_2, He, CO_2 в газовых смесях, содержащих N_2, O_2 и др. Диапазон измерения – от единиц до десятков процентов по объему.

Изменение состава газовой смеси приводит к изменению ее теплопроводности и, как следствие, температуры и электрического сопротивления нагреваемого током металлического или полупроводникового терморезистора, размещенного в камере, через которую пропускается газовая смесь. При этом:

$$\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} = \frac{\alpha}{a} \cdot I^2 \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right), \tag{4.2}$$

где a – конструктивный параметр камеры,
R_1 и R_2 – сопротивление терморезистора в случае пропускания через него тока,
I – сила тока,
λ_1 и λ_2 –теплопроводность газовой среды,
α – температурный коэффициент электрического сопротивления терморезистора.

На рис. 4.1 приведена схема, применяемая во многих термокондуктометрических газоанализаторах.



1 – источник стабилизированного напряжения; 2 – вторичный прибор;
R_1 и R_3 – рабочие терморезисторы; R_2 и R_4 – сравнительные терморезисторы;
R_0 и R_g – потенциометры; вход и выход анализируемой газовой смеси показаны стрелками.

Рис. 4.1. Термокондуктометрический газоанализатор

Чувствительные элементы R_1 и R_3 (рабочие терморезисторы) омываются анализируемой смесью, сравнительные терморезисторы R_2 и R_4 помещены в герметичные ячейки, заполненные сравнительным газом точно известного состава. Потенциометры R_0 и R_g предназначены для установки нулевых показаний и регулировки диапазона измерения.

Мера концентрации определяемого компонента – электрический ток, проходящий через R_g, который измеряется регистрирующим прибором. Термокондуктометрические газоанализаторы широко применяют для контроля процессов в производстве H_2SO_4, NH_3, HNO_3, в металлургии и др.

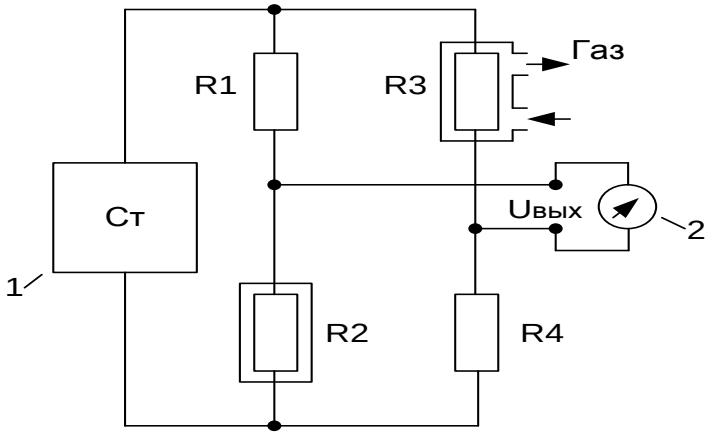
4.2. Термохимические газоанализаторы

В этих приборах измеряют тепловой эффект химической реакции, в которой участвует определяемый компонент. В большинстве случаев используется окисление компонента кислородом воздуха; катализаторы – марганцево-медный (гопкалит) или мелкодисперсная Pt, нанесенная на поверхность пористого носителя. Изменение температуры Δt при окислении измеряют с помощью металлического или полупроводникового терморезистора. В ряде случаев поверхность платинового терморезистора используют как катализатор. Величина Δt связана с числом молей M окислившегося компонента и тепловым эффектом q соотношением:

$$\Delta t = kMq, \qquad (4.3)$$

где k – коэффициент, учитывающий потери тепла, зависящие от конструкции прибора.

Схема (рис. 4.2) включает измерительный мост с резисторами (R_1 и R_4) и двумя терморезисторами, один из которых (R_2) находится в атмосфере сравнительного газа, а второй (R_3) омывается потоком анализируемого газа.



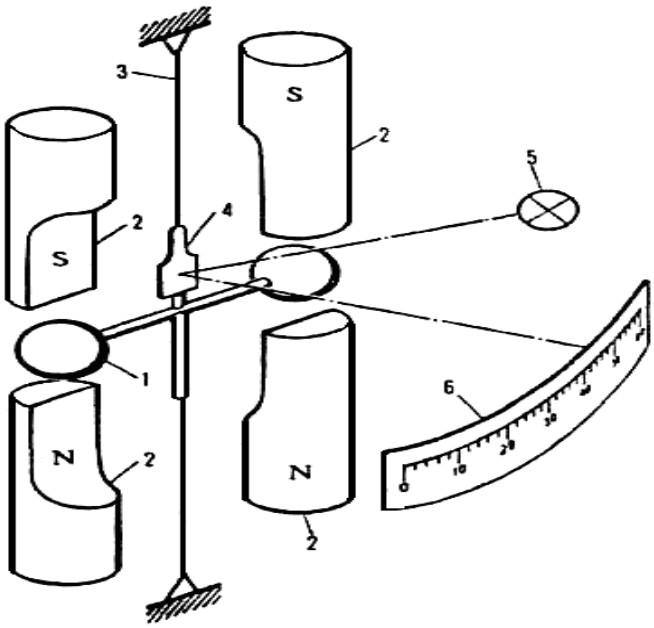
1 – источник стабилизированного напряжения;
2 – измерительный прибор; R_1 и $R4$ – постоянные резисторы;
R_2 и R_3 – соответственно сравнительный и рабочий терморезисторы.

Рис. 4.2. Термохимический газоанализатор

Напряжение $U_{вых}$ в диагонали моста пропорционально концентрации определяемого компонента. Для устойчивой работы газоанализатора исключают влияние температуры среды (термостатированием или термокомпенсацией), стабилизируют напряжение, поддерживают постоянным расход газа, очищают его от примесей, отравляющих катализатор ($C1_2$, HC1, H_2S, SO_2 и др.) Обычно термохимические газоанализаторы используют в качестве газосигнализаторов горючих газов и паров (H_2, углеводороды и др.) в воздухе, а также при электролизе воды для определения примесей водорода в кислороде (диапазон измерения 0,02-2%) и кислорода в водороде (0,01-1%).

4.3 Магнитные газоанализаторы

Данные анализаторы применяют в основном для определения концентрации кислорода. Их действие основано на зависимости магнитной восприимчивости газовой смеси от концентрации кислорода, объемная магнитная восприимчивость которого на два порядка больше, чем у большинства остальных газов. Такие газоанализаторы позволяют избирательно определять содержание O_2 в сложных газовых смесях. Наиболее распространены магнитомеханические и термомагнитные газоанализаторы.



1– ротор; 2 – полюсы магнита; 3 – растяжка; 4 – зеркальце; 5 – осветитель;
6 – шкала измерительного прибора.

Рис. 4.3. Магнитомеханический газоанализатор

В магнитомеханических газоанализаторах (рис. 4.3) измеряют силы, действующие в неоднородном магнитном поле на помещенное в анализируемую смесь тело (обычно ротор). Сила *F,* выталкивающая тело из магнитного поля, определяется выражением:

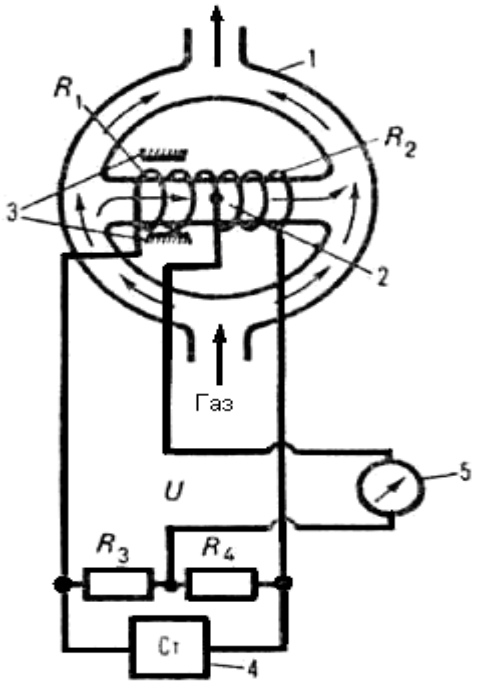
$$F = (\chi - \chi_T) \cdot \int_0^V H \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \cdot dV \,, \qquad (4.4)$$

где χ и χ_T – объемная магнитная восприимчивость соответствующей анализируемой смеси и тела, помещенного в газ;
V – объем тела; H –напряженность магнитного поля.

Действие термомагнитных газоанализаторов основано на термомагнитной конвекции газовой смеси в неоднородных магнитном и температурном полях. Часто применяют приборы с кольцевой камерой (рис. 4.3), которая представляет собой полое металлическое кольцо.

Вдоль его диаметра установлена тонкостенная стеклянная трубка, на которую намотана платиновая спираль, нагреваемая электрическим током. Спираль состоит из двух секций – R_1 и R_2, первая из которых помещается между полюсами магнита. При наличии в газовой смеси O_2 часть потока направляется через диаметральный канал, охлаждая первую секцию

платиновой спирали и отдавая часть тепла второй. Изменение сопротивлений R_1 и R_2 вызывает изменение выходного напряжения U, пропорциональное содержанию O_2 в анализируемой смеси.



1 – кольцевая камера; 2 – стеклянная трубка; 3 – постоянный магнит;
4 –источник стабилизированного напряжения; 5 – вторичный прибор;
R_1 и R_2 –рабочий и сравнительные терморезисторы (секции платиновой спирали);
R_3 и R_4 – постоянные резисторы.

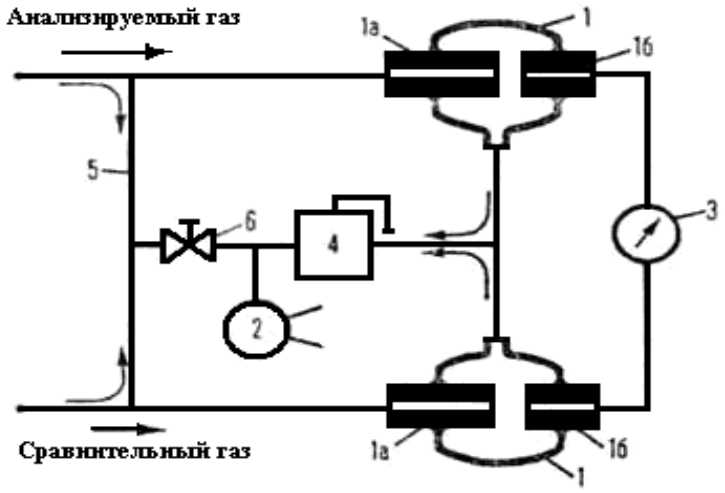
Рис. 4.4. Термомагнитный газоанализатор

4.4. Пневматические газоанализаторы

Их действие основано на зависимости плотности ρ и вязкости η газовой смеси от ее состава. Изменения плотности и вязкости определяют, измеряя гидромеханические параметры потока. Распространены пневматические газоанализаторы трех типов.

Газоанализаторы с дроссельными преобразователями измеряют гидравлическое сопротивление дросселя (капилляра) при пропускании через него анализируемого газа. При постоянном расходе газа перепад давления на дросселе – функция плотности (турбулентный дроссель), вязкости (ламинарный дроссель) или того и другого параметра одновременно.

Струйные газоанализаторы измеряют, динамический напор струи газа, вытекающего из сопла. Содержат два струйных элемента типа "сопло-приемный канал" (рис. 4.5).

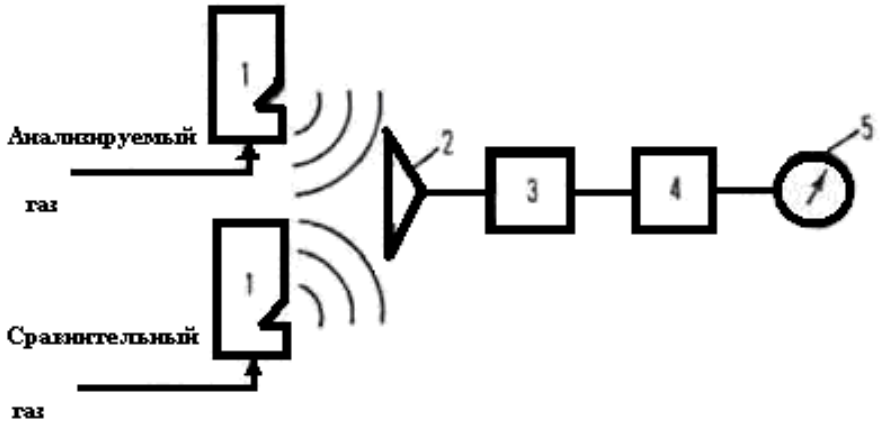


1 – элемент "сопло-приемный канал"; 1а – сопло; 1б – приемная трубка; 2–эжектор; 3 – вторичный прибор; 4 – регулятор давления; 5 – соединительный канал; 6 – вентиль.

Рис. 4. 5. Пневматический струйный газоанализатор

Для подачи анализируемого и сравнительного газов служит эжектор 2. Давление на выходе из элементов поддерживается регулятором 4. Равенство давлений газов на входе в элементы обеспечивается соединительным каналом 5 и настройкой вентиля 6. Разница динамических давлений (напоров), воспринимаемых трубками 1б, – функция отношения $\frac{\rho}{\eta^2}$ и мера концентрации определяемого компонента газовой смеси.

Время установления показаний этих газоанализаторов не превышает нескольких секунд, поэтому их применяют в газосигнализаторах довзрывных концентраций газов и паров некоторых веществ (например, дихлорэтана, винилхлорида) в воздухе промышленных помещений. Пневмоакустические газоанализаторы содержат два свистка (рисунок 6) с близкими частотами (3-5 кГц), через один из которых проходит анализируемый газ, через второй – сравнительный.



1 – свисток; 2 – смеситель частот; 3 – усилитель - преобразователь;
4 – частотно-аналоговый преобразователь; 5 – измерительный прибор.

Рис. 4.6. Пневмоакустический газоанализатор

Частота биений звуковых колебаний в смесителе частот зависит от плотности анализируемого газа. Биения (частота до 120 Гц) усиливаются и преобразуются в пневматические колебания усилителем. Для получения выходного сигнала (давления) служит частотно-аналоговый преобразователь.

Пневматические газоанализаторы не обладают высокой избирательностью. Они пригодны для анализа смесей, в которых изменяется концентрация только одного из компонентов, а соотношение между концентрациями других остается постоянным. Диапазон измерения – от единиц до десятков процентов. Пневматические газоанализаторы не содержат электрических элементов и поэтому могут использоваться в помещениях любой категории пожаро-, и взрывоопасности. Элементы схемы, контактирующие с газами, выполнены из стекла и фторопласта, что позволяет анализировать весьма агрессивные газы (хлор-, серосодержащие и др.).

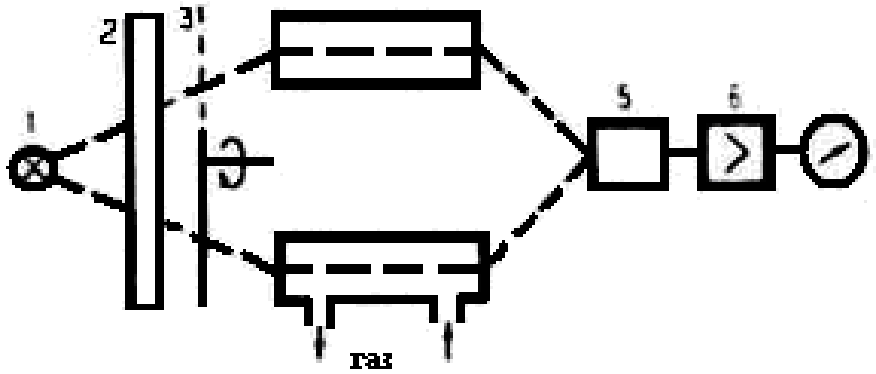
4.5 Инфракрасные газоанализаторы

Данные приборы основаны на избирательном поглощении молекулами газов и паров инфракрасного излучения в диапазоне 1-15 мкм. Это излучение поглощают все газы, молекулы которых состоят не менее чем из двух различных атомов. Высокая специфичность молекулярных спектров поглощения различных газов обусловливает высокую избирательность таких газоанализаторов и их широкое применение в лабораториях и промышленности. Диапазон измеряемых концентраций от тысячной доли до ста процентов.

В *дисперсионных ИК*-анализаторах используют излучение одной длины волны, полученное с помощью монохроматоров (призмы, дифракционной решетки). В *недисперсионных* газоанализаторах, благодаря особенностям

оптической схемы прибора (применению светофильтров, специальных приемников излучения и т.д.), используют немонохроматическое излучение. В качестве примера на рис. 4.7 приведена наиболее распространенная схема такого газоанализатора.

Излучение от источника последовательно проходит через светофильтр и рабочую кювету, в которую подается анализируемая смесь, и попадает в специальный приемник. Если в анализируемой смеси присутствует определяемый компонент, то в зависимости от концентрации он поглощает часть излучения, и регистрируемый сигнал пропорционально изменяется. Источником излучения обычно служит нагретая спираль с широким спектром излучения, реже – ИК-лазер или светодиод, испускающие излучение в узкой области спектра. Если используется источник немонохроматического излучения, избирательность определения достигается с помощью селективного приемника.



1 – источник излучения; 2 – светофильтр; 3 – модулятор;
4 и 4' – соответственно рабочая и сравнительная (внизу) кюветы;
5 – приемник излучения; 6 – усилитель; 7 – измерительный прибор.

Рис. 4.7. Недисперсионный инфракрасный газоанализатор

Наиболее распространены газоанализаторы с газонаполненным оптико-акустическим приемником. Приемник представляет собой герметичную камеру с окном, заполненную именно тем газом, содержание которого нужно измерить. Этот газ, поглощая из потока излучения определенную часть с характерным для данного газа набором спектральных линий, нагревается, вследствие чего давление в камере увеличивается. Посредством механического модулятора поток излучения прерывается с определенной частотой. В результате с этой же частотой пульсирует давление газа в приемнике. Амплитуда пульсации давления – мера интенсивности поглощенного газом излучения, зависящая от того, какая часть характерного излучения поглощается тем же газом в рабочей кювете. Другие компоненты смеси излучение на этих длинах волн не поглощают. Таким образом, амплитуда пульсации давления в приемнике

излучения – мера количества определяемого компонента в анализируемой смеси, проходящей через рабочую кювету. Изменение давления измеряют обычно конденсаторным микрофоном или микроанемометром (датчиком расхода газа). Заменяя газ в приемнике излучения оптико-акустического газоанализатора, можно избирательно измерять содержание различных компонентов смесей.

В инфракрасных газоанализаторах используют также неселективные приемники излучения – болометры, термобатареи, полупроводниковые элементы. Тогда в случае источников с широким спектром излучения избирательность определения обеспечивают применением интерференционных и газовых фильтров. Для повышения точности и стабильности измерения часть потока излучения обычно пропускают через сравнительную кювету, заполненную газом, не поглощающим регистрируемое излучение, и измеряют разность или отношение сигналов, полученных в результате прохождения излучения через рабочую и сравнительную кюветы.

Инфракрасные газоанализаторы широко используют для контроля качества продукции, анализа отходящих газов, воздуха помещений. С их помощью определяют, например: CO, CO_2, NH_3, CH_4, пары ряда растворителей в воздухе промышленных помещений, оксиды азота, SO_2, CO и углеводороды в выхлопных газах автомобилей.

4.6. Ультрафиолетовые газоанализаторы

Принцип их действия основан на избирательном поглощении молекулами газов и паров излучения в диапазоне 200-450 нм. Избирательность определения одноатомных газов весьма велика. Двух- и многоатомные газы имеют в УФ-области сплошной спектр поглощения, что снижает избирательность их определения. Однако отсутствие УФ-спектра поглощения у N_2, O_2, CO_2 и паров воды позволяет во многих практически важных случаях проводить достаточно селективные измерения в присутствии этих компонентов. Диапазон определяемых концентраций обычно 10^{-2}–100% (для паров ртути нижняя граница диапазона $2{,}5 \cdot 10^{-6}$ %).

Схема ультрафиолетового газоанализатора аналогична схеме, приведенной на рис. 4.7. Имеются также приборы с двумя детекторами излучения без модулятора, в которых световые потоки не прерываются. В качестве источников излучения обычно применяют ртутные лампы низкого (λ= 253,7 нм) и высокого (спектр с большим набором линий) давлений, газоразрядные лампы с парами др. металлов (λ=280, 310 и 360 нм), лампы накаливания с вольфрамовой нитью, водородные и дейтериевые газоразрядные лампы. Приемники излучения – фотоэлементы и фотоумножители. При использовании неселективного источника излучения избирательность

измерения в большинстве приборов обеспечивают с помощью оптических фильтров (стеклянных или интерференционных).

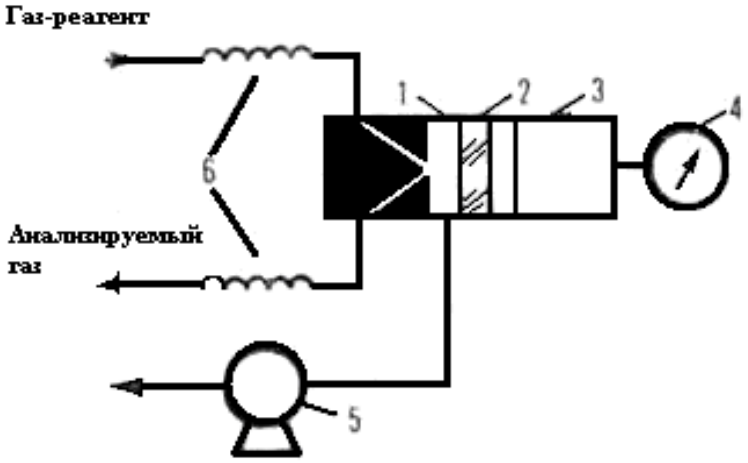
Ультрафиолетовые газоанализаторы применяют главным образом для автоматического контроля содержания $C1_2$, O_3, SO_2, NO_2, H_2S, $C1O_2$, дихлорэтана, в частности в выбросах промышленных предприятий, а также для обнаружения паров ртути.

4.7. Люминесцентные газоанализаторы

В хемилюминесцентных газоанализаторах измеряют интенсивность люминесценции, возбужденной благодаря химической реакции контролируемого компонента с реагентом в твердой, жидкой или газообразной фазе. Пример: взаимодействие NO с O_3, используемое для определения оксидов азота:

$$NO + O_3 \Rightarrow NO_2^+ + O_2 \Rightarrow NO_2^+ + h\upsilon + O_2$$

Схема хемилюминесцентного газоанализатора с газообразным реагентом представлена на рис.4.8.



1 – реакционная камера; 2 – светофильтр; 3 – фотоумножитель; 4 – измерительный прибор; 5 – побудитель расхода газа; 6 – дроссели.

Рис. 4.8. Хемилюминесцентный газоанализатор.

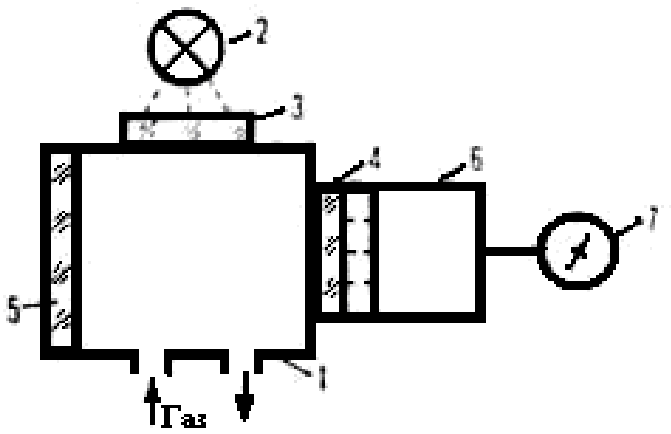
Анализируемая смесь и реагент через дроссели поступают в реакционную камеру. Побудитель расхода (насос) обеспечивает необходимое давление в камере. При наличии в смеси определяемого компонента излучение, сопровождающее хемилюминесцентную реакцию, через светофильтр подается на катод фотоумножителя, который расположен в непосредственной близости к реакционной камере. Электрический сигнал с фотоумножителя, пропорциональный концентрации контролируемого компонента, после усиления поступает на измерительный прибор. При измерении слабых

световых потоков, возникающих при малых концентрациях определяемого компонента, фотокатод охлаждают электрическими микрохолодильниками с целью уменьшения темнового (фонового) тока.

Для измерения содержания NO_2 в приборе предусмотрен конвертер, где NO_2 превращается в NO, после чего анализируемая смесь направляется в реакционную камеру. При этом выходной сигнал пропорционален суммарному содержанию NO и NO_2. Если же смесь поступает, минуя конвертер, то по выходному сигналу находят концентрацию только NO. По разности этих сигналов судят о содержании NO_2 в смеси.

Высокая избирательность хемилюминесцентных газоанализаторов обусловлена специфичностью выбранной реакции, однако сопутствующие компоненты в смеси могут изменять чувствительность прибора. Такие газоанализаторы применяют для определения NO, NO_2, NH_3, O_3 в воздухе в диапазоне 10^{-7}–1%.

В флуоресцентных газоанализаторах измеряют интенсивность флуоресценции (длина волны λ_2), возникающей при воздействии на контролируемый компонент УФ-излучения (с частотой ν_1). В качестве примера на рис.4.9 представлена схема такого газоанализатора для определения SO_2 в воздухе.



1 – детекторная камера; 2 – источник УФ-излучения;
3 – светофильтр возбуждающего излучения; 4 – светофильтр люминесценции;
5 – зеркало; 6 –фотоумножитель; 7– измерительный прибор.

Рис. 4.9. Флуоресцентный газоанализатор

Анализируемая смесь поступает в детекторную камеру, которая отделена от импульсного источника УФ-излучения и от фотоумножителя светофильтрами 3 и 4, пропускающими излучение с длинами волн соответственно λ_1 и λ_2. Фотоумножитель, расположенный под углом 90° к источнику излучения, регистрирует импульсы флуоресценции, амплитуда которых пропорциональна концентрации определяемого компонента в камере.

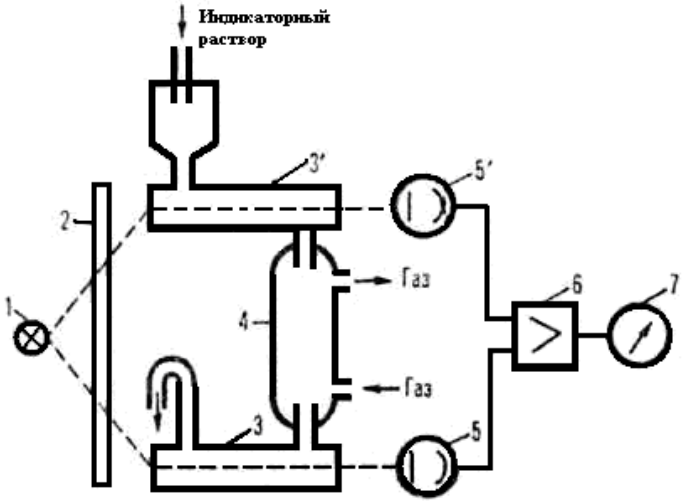
Электрический сигнал с фотоумножителя после усиления и обработки поступает на измерительный прибор. Газоанализаторы для определения SO_2 характеризуются высокой чувствительностью и избирательностью. Они используются в автоматических станциях контроля окружающей среды.

Для удаления паров воды, влияющих на показания люминесцентных анализаторов, применяют специальные фильтры (типа молекулярного сита) на входе потока газа в камеру.

4.8. Фотоколориметрические газоанализаторы

Эти приборы измеряют интенсивность окраски продуктов избирательной реакции между определяемым компонентом и специально подобранным реагентом. Реакцию осуществляют, как правило, в растворе (жидкостные газоанализаторы) или на твердом носителе в виде ленты, таблетки или порошка (соответственно ленточные, таблеточные, порошковые газоанализаторы).

Принципиальная схема жидкостного газоанализатора приведена на рис. 4.10.



1 – источник излучения; 2 – светофильтр; 3 и 3' – рабочая и сравнительная кюветы; 4 – абсорбер; 5 и 5' – приемники излучения; 6 – усилитель; 7 – измерительный прибор.

Рис. 4.10. Жидкостный фотоколориметрический газоанализатор

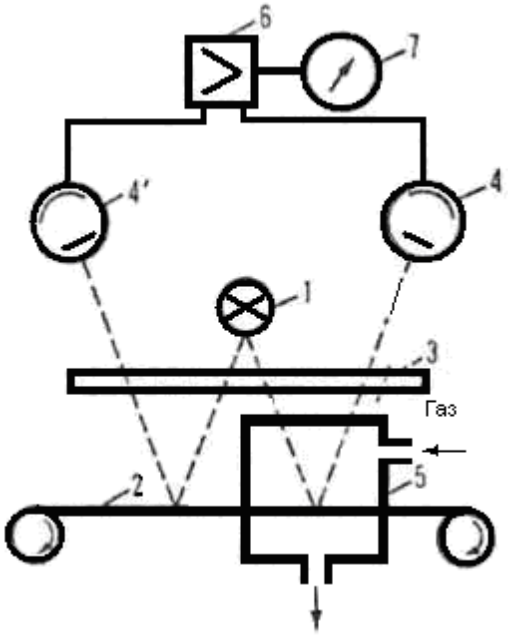
Излучение от источника проходит через рабочую и сравнительные кюветы и поступает на соответствующие приемники излучения. Индикаторный раствор протекает с постоянной скоростью через обе кюветы и абсорбер. Навстречу потоку раствора через абсорбер барботирует анализируемый газ.

Определяемый компонент, присутствующий в газе, взаимодействует с реагентом, вызывая изменение оптической плотности в рабочей кювете, пропорциональное концентрации компонента. В результате интенсивность излучения через одну из кювет изменяется, а через другую нет. Разность (или

отношение) сигналов рабочего и сравнительного каналов – мера концентрации определяемого компонента в анализируемой смеси.

Подача раствора может быть как непрерывной, так и периодической. При периодической подаче анализируемый газ пропускают в течение некоторого времени через одну и ту же порцию раствора, что позволяет повысить чувствительность определения. Такие газоанализаторы дают возможность измерить среднюю концентрацию определяемого компонента за заданный промежуток времени, например при установлении среднесменных или среднесуточных концентраций токсичных примесей в воздухе.

В ленточных газоанализаторах (рис. 4.11) анализируемый газ поступает в газовую камеру, через которую непрерывно или с заданной периодичностью протягивается лента с нанесенным на нее реактивом.



1 – источник излучения; 2 – индикаторная лента; 3 – светофильтр;
4 и 4' –приемники излучения; 5 – газовая камера; 6 – усилитель; 7 – измерительный прибор.

Рис. 4.11. Ленточный фотоколориметрический газоанализатор

В результате реакции с определяемым компонентом на ленте образуется цветовое пятно, интенсивность окраски которого пропорциональна концентрации компонента. Разность (или отношение) световых потоков, отраженных от окрашенного и неокрашенного участков ленты, – мера концентрации контролируемого компонента в смеси. Иногда используют индикаторную ленту с жидким реактивом. В этом случае реактив наносится на ленту из капельницы непосредственно перед ее контактом с газом.

Принцип действия таблеточных и порошковых газоанализаторов такой же, как у ленточных. Однако эти приборы, как правило, циклического действия. Для получения чистой поверхности перед каждым циклом измерения срезается верхний окрашенный слой таблетки или заменяется порция порошка.

Время работы ленточных и таблеточных газоанализаторов без замены ленты или таблетки достигает 30 суток и более. Источники излучения в фотоколориметрических газоанализаторах – обычно лампы накаливания и полупроводниковые светодиоды, фотоприемники – фотоумножители, фотоэлементы, фотодиоды и фототранзисторы. Эти приборы позволяют с высокой избирательностью определять различные газообразные (парообразные) вещества в диапазоне концентраций 10^{-5}–1%. Особенно высока чувствительность у газоанализаторов периодического действия; их недостаток – некоторое запаздывание показаний.

Фотоколориметрические газоанализаторы применяют главным образом для измерения концентраций токсичных примесей (например оксидов азота, O_2, $C1_2$, CS_2, O_3, H_2S, NH_3, HF, фосгена, ряда органических соединений) в атмосфере промышленных зон и в воздухе промышленных помещений. При контроле загрязнений воздуха широко используют переносные приборы периодического действия. Значительное число фотоколориметрические газоанализаторы применяют в качестве газосигнализаторов.

4.9. Электрохимические газоанализаторы

Их действие основано на зависимости между параметром электрохимической системы и составом анализируемой смеси, поступающей в эту систему.

В кондуктометрических газоанализаторах измеряется электропроводность раствора при селективном поглощении им определяемого компонента. Обычно схема прибора включает электрический мост постоянного или переменного тока с двумя кондуктометрическими ячейками, через которые протекает электролит. В одну из ячеек электролит поступает после контакта с потоком анализируемого газа. Выходной сигнал пропорционален разности электропроводностей раствора до и после контакта с контролируемой смесью. Эта разность зависит от концентрации растворенного в электролите определяемого компонента. Изменяя расходы электролита и анализируемой смеси, можно в широких пределах изменять диапазон определяемых концентрации. Недостатки этих газоанализаторов – низкая избирательность и длительность установления показаний при измерении малых концентраций. Кондуктометрические газоанализаторы широко применяют для определения O_2, CO, SO_2, H_2S, NH_3 и др.

Действие потенциометрических газоанализаторов основано на зависимости потенциала E индикаторного электрода от активности a электрохимически активных ионов, образовавшихся при растворении определяемого компонента:

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln a \,, \qquad (4.5)$$

где E^0 – стандартный электродный потенциал;
R – универсальная газовая постоянная;
T – абсолютная температура;
F – число Фарадея;
n – число электронов, участвующих в электрохимической реакции;
a – активность ионов.

Измеряемое значение E пропорционально концентрации контролируемого компонента, растворенного в электролите. Эти газоанализаторы применяют для определения CO_2, H_2S, HF, NH_3, SO_2 и др.

Большое распространение получили потенциометрические газоанализаторы с твердым электролитом для измерения содержания O_2. Керамическая пластина на основе CaO и ZrO_2 при высокой т-ре начинает проводить ионы кислорода, т.е. ведет себя как электролит. На поверхность такой пластины с обеих сторон наносят тонкие слои пористой платины (платиновые электроды). С одной стороны пластины подают анализируемую газовую смесь, с другой – сравнительный газ. Разность потенциалов между электродами – мера содержания O_2. Термостат поддерживает температу электрохимической ячейки в нужном диапазоне. С помощью таких газоанализаторов определяют O_2 в широком диапазоне концентраций (10^{-4} – 100% по объему). Присутствие углеводородов в анализируемой смеси приводит к искажению результатов из-за их окисления при высокой температуре.

Действие амперометрических газоанализаторов основано на зависимости между электрическим током и количеством определяемого компонента, прореагировавшим на индикаторном электроде. Если контролируемый компонент полностью вступает в электрохимическую реакцию, то выполняется закон Фарадея:

$$I = nFQC \,, \qquad (4.6)$$

где I – ток;
Q – расход газа;
C – концентрация определяемого компонента;
F – число Фарадея;
n – число электронов, участвующих в реакции.

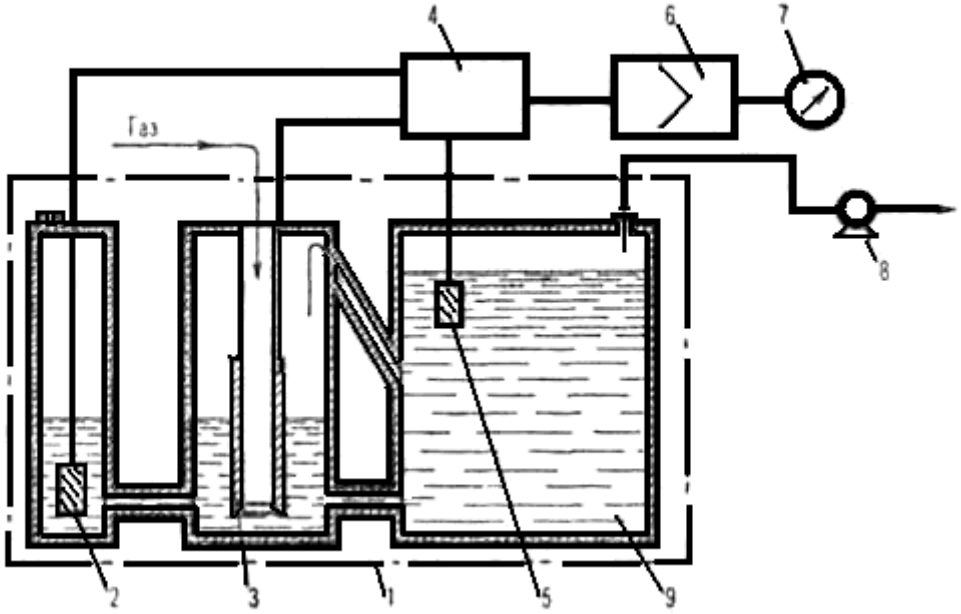
Электрохимическое превращение данного компонента газовой смеси со 100%-ным выходом по току (т.е. отсутствие побочных электродных реакций) обеспечивается выбором индикаторного электрода и его потенциала. Необходимое постоянное значение разности потенциалов поддерживается благодаря тому, что сравнительный и индикаторный электроды выполняют из двух разных специально подобранных металлов, например из Au и Zn, Au и Pb,

Ni и Cd (ячейки гальванического типа). Разность потенциалов можно стабилизировать и посредством электронной системы с использованием третьего вспомогательного электрода (ячейки потенциостатического типа).

Амперометрические газоанализаторы применяют для определения газов, обладающих окислительно-восстановительными свойствами, например SO_2, NO_2, H_2S, O_2, $C1_2$, O_3. В газоанализаторе для измерения содержания SO_2 в воздухе (рис. 4.12) анализируемый газ поступает на измерительный электрод 3 электрохимической ячейки и по газовому каналу - в камеру с запасным электролитом 9, в которой помещен электрод сравнения 5.

Вспомогательный электрод 2 расположен в отдельной камере, которая, как и камера 9, соединена с камерой измерительного электрода электролитическим каналом. Достоинства амперометрических газоанализаторов – высокая чувствительность и избирательность.

Кроме рассмотренной выше конструкции электрохимической ячейки барботажного типа (с непосредственным продуванием смеси через электролит) широкое применение находят ячейки с так называемыми газодиффузионными электродами, где газ отделен от электролита пористой газопроницаемой полимерной мембраной. Со стороны, контактирующей с электролитом, на мембрану наносят мелкодисперсный электродный материал (Pt, Pd, Au). Такие системы отличаются более высокой чувствительностью и стабильностью характеристик.



1 – электрохимическая ячейка; 2 – вспомогательный электрод; 3 – измерительный электрод; 4 – потенциостат; 5 – электрод сравнения; 6 –усилитель; 7 – измерительный прибор; 8 – побудитель расхода газа; 9 – камера с запасным электролитом.

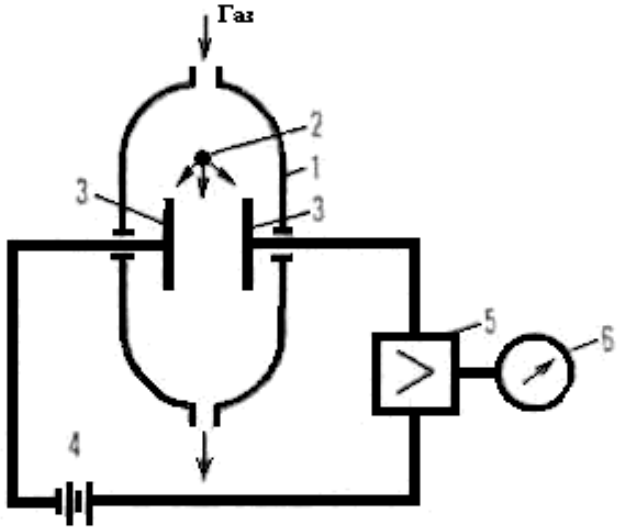
Рис. 4.12. Амперометрический газоанализатор

В основе кулонометрических газоанализаторов компенсационного типа лежит метод кулонометрического титрования, который заключается в электрохимическом получении (генерировании) реагента – титранта, способного быстро взаимодействовать с определяемым компонентом газовой смеси, растворенным в электролите. Этот газоанализатор включает цепи генерирования и индикации. Электрохимическая ячейка содержит соотвенно две пары электродов – катод и анод, на которых идет электролиз и генерируется титрант, а также индикаторный электрод и электрод сравнения. Ток электролиза автоматически поддерживается постоянным. После того как все контролируемое вещество полностью прореагирует с электрогенерированным титрантом, окислительно-восстановительный потенциал системы резко изменяется, что обнаруживается по скачку потенциала индикаторного электрода. Количество электричества, прошедшее через ячейку до завершения реакции, эквивалентно концентрации определяемого компонента.

4.10. Ионизационные газоанализаторы

Их действие основано на зависимости электрической проводимости ионизованных газов от их состава. Появление в газе примесей оказывает дополнительное воздействие на процесс образования ионов или на их подвижность и, следовательно, рекомбинацию. Возникающее при этом изменение проводимости пропорционально содержанию примесей.

Все ионизационные газоанализаторы содержат проточную ионизационную камеру (как на рис. 4.13), на электроды которой подают определенную разность потенциалов.



1 – ионизационная камера; 2 – источник ионизации; 3 – электроды; 4 –источник напряжения; 5 – усилитель; 6 – измерительный прибор.

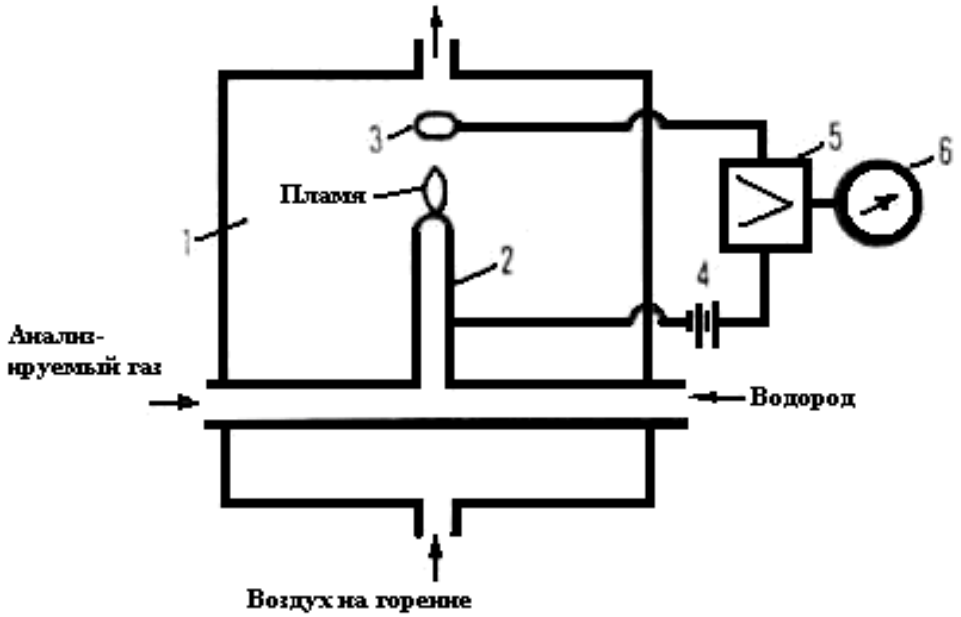
Рис.4. 13. Радиоизотопный ионизационный газоанализатор

Эти приборы широко применяют для контроля микропримесей в воздухе, а также в качестве детекторов в газовых хроматографах. К радиоизотопным газоанализаторам (рис. 4.13), в которых ионизацию газов осуществляют радиоактивным излучением, относятся приборы на основе сечения ионизации, электронно-захватные и аэрозольно-ионизационные. В анализаторах первого типа используют разницу в сечениях (вероятности) ионизации компонентов смеси. Ионизацию осуществляют обычно β-излучением ^{90}Sr, ^{3}H, ^{63}Ni, ^{147}Pm. Эти газоанализаторы не избирательны, их применяют для анализа смесей H_2-N_2, N_2-CO_2, H_2 - этилен, H_2-CH_4, H_2-CH_3SiCl_3, H_2-$BC1_3$ и т.п.; диапазон измерения 0,01-100%; время установления показаний – до 0,1 с.

Действие электронно-захватных газоанализаторов основано на способности молекул ряда веществ (O_2, H_2O, галогены, галогенсодержащие органические соединения, ароматические углеводороды, спирты, карбонильные соединения и др.) захватывать свободные электроны, возникающие при ионизации газов, и превращаться при этом в ионы. Последние имеют меньшую подвижность, чем электроны, в результате чего ионизационный ток падает пропорционально концентрации вещества. Электронно-захватные газоанализаторы применяют для контроля примесей (в частности, галогенов при их концентрации 10^{-3}–10^{4}%) в чистых газах и воздухе. При определении примесей в воздухе на входе газоанализатора обычно помещают полимерные мембраны, задерживающие O_2.

В основе действия аэрозольно-ионизационных газоанализаторов лежит зависимость ионизационного тока от концентрации аэрозольных частиц, образующихся после предварительного избирательного перевода определяемого компонента смеси в аэрозоль. Этот перевод осуществляют обычно химической реакцией с соответствующим реагентом или фотохимической реакцией в газовой фазе, пиролизом исследуемого вещества, а также сочетанием пиролиза с последующей химической реакцией с реагентом. Например, при определении NH_3 в качестве реагента можно использовать пары соляной кислоты; в результате образуется аэрозоль NH_4C1. Размер аэрозольных частиц 10^{-7}–10^{-4} см. Концентрации анализируемых компонентов 10^{-5}–10^{-3}%. Аэрозольно-ионизационный газоанализатор используют, в частности, для определения микропримесей NH_3, аминов, HC1, HF, NO_2, паров HNO_3, карбонитов Ni и Co, фосгена и ряда других соединений в воздухе промышленных помещений.

В пламенно-ионизационных газоанализаторах определяемые органические соединения ионизуют в водородном пламени. Эффективность ионизации пропорциональна числу атомов углерода, поступающих в пламя в единицу времени, но зависит также от наличия в молекуле вещества атомов других элементов. Схема такого прибора представлена на рис.4.14.



1 – ионизационная камера; 2 – горелка; 3 – коллекторный электрод;
4 –источник напряжения; 5 – усилитель; 6 – измерительный прибор.

Рис. 4.14. Пламенно-ионизационный газоанализатор

Горелка служит одним из электродов ионизационной камеры. Второй электрод ("коллекторный") – тонкостенный цилиндр или кольцо. Эти газоанализаторы используют для определения органических веществ в воздухе и технологичных газах. При совместном присутствии ряда органических компонентов находят либо их сумму, либо концентрацию компонентов со значительно большей эффективностью ионизации.

С помощью пламенно-ионизационных газоанализаторов контролируют изменения суммарного содержания углеводородов в атмосфере и токсичные примеси в воздухе промышленных помещений, чистоту выхлопных газов автомобилей, утечки газов из трубопроводов и подземных коммуникаций. Диапазон измеряемых концентраций 10^{-5}–1%. Имеется непосредственная взаимосвязь между эффективностью ионизации органических газов и паров и степенью взрывоопасности их смесей с воздухом. Это позволяет контролировать довзрывные концентрации органических веществ в промышленных помещениях, шахтах, туннелях.

В поверхностно-ионизационных газоанализоторах образуются положительные ионы при адсорбции газов на нагретых поверхностях металлов или их оксидов. Ионизоваться могут компоненты с достаточно низкими потенциалами ионизации, сравнимыми по величине с работой выхода электронов из нагретой поверхности (эмиттера). Обычно ионизуются не контролируемые компоненты смеси, а продукты их реакций на каталитически активной поверхности. В качестве эмиттеров применяют, например, нагреваемые током спирали из Pt, оксидов Mo или W. Нагретый эмиттер

одновременно служит одним из электродов ионизационной камеры. Второй ("коллекторный") электрод выполняют в виде наружного цилиндра. Температуру нагрева эмиттера изменяют от 350 °С до 850 °С. С помощью таких газоанализаторов определяют фенол, уксусную и муравьиную кислоты, а также (с высокой избирательностью) азотсодержащие органические соединения, в частности анилин, амины, гидразины. Диапазон измеряемых концентраций 10^{-5}-10^{-2}%.

В фотоионизационных газоанализаторах молекулы определяемого компонента ионизуются УФ-излучением. Это возможно, если энергия фотонов не ниже потенциала ионизации молекул. В качестве источников излучения используют лампы, генерирующие фотоны с энергиями 9,5; 10; 10,2; 10,9 и 11,7 эВ. Основные компоненты воздуха (O_2, N_2, CO, CO_2, H_2O), а также CH_4 имеют потенциалы ионизации в диапазоне 12–20 эВ и такими фотонами не ионизуются. Фотоионизационные газоанализаторы применяют для контроля примесей ароматических и непредельных углеводородов, альдегидов, кетонов, спиртов и других органических соединений в воздухе с пределами обнаружения 10^{-5}–10^{-4}%. Подбирая излучение с подходящей энергией, можно избирательно определять, например, ароматические соединения в присутствии алканов и кислородсодержащих органических соединений, меркаптаны в присутствии H_2S.

5 АНАЛИЗАТОРЫ ЖИДКОСТЕЙ

В настоящее время разработано большое число автоматических анализаторов жидкостей, базирующихся на механических, тепловых, электрических, оптических, акустических методах измерений, хроматографов, радиоизотопных анализаторов и др. Рассмотрим некоторые из этих методов. С более подробным рассмотрением методов анализа жидкостей можно ознакомиться по монографиям, указываемым в конце книги.

5.1 Методы анализа жидкостей

Кондуктометрический метод измерения основан на измерении электропроводности растворов электролитов, в которых перенос тока происходит за счет движения ионов. Электропроводность характеризует суммарную концентрацию ионов в растворе. Зависимость электропроводности от концентрации носит сложный характер: с увеличением концентрации электропроводность раствора сначала увеличивается, а затем уменьшается. Поэтому для каждого кондуктометрического концентратомера установлены свои пределы измерений в единицах электропроводности (См/см) или концентрации (г/л).

Для измерения концентрации растворов по их электропроводности используют электродные и безэлектродные приборы Электродный датчик концентратомера представляет собой четырехэлектродную ячейку, через которую непрерывно протекает анализируемый раствор. Через внешние электроды ячейка подключена к источнику питания, который поддерживает в ней постоянную силу тока. В этом случае напряжение между внутренними электродами будет зависеть от электропроводности анализируемого раствора, т. е. от его концентрации. Это напряжение измеряют автоматическим потенциометром.

Для измерения растворов, способных загрязнять электроды, применяют безэлектродные датчики. В таком датчике анализируемый раствор протекает по кольцевой пластмассовой трубе. Эта труба является одновременно вторичной обмоткой трансформатора, к первичной обмотке которого подведено напряжение и первичной обмоткой трансформатора. Напряжение, снимаемое со вторичной обмотки этого трансформатора, является выходным сигналом датчика. Это напряжение будет тем больше, чем больше концентрация анализируемого раствора.

Потенциометрический метод анализа основан на зависимости между э. д. с, развиваемой датчиком, и концентрацией водородных ионов в

анализируемой жидкости. Концентрацию водородных ионов, характеризующую кислотность и щелочность раствора, принято измерять в единицах водородного показателя pH: при pH = 7 раствор нейтральный, при pH > 7 – щелочной, при pH < 7 – кислотный. Поэтому потенциометрические анализаторы называют также pH-метрами. Датчик pH-метра (рис. 5.1) состоит из двух электродов: измерительного 1 и сравнительного 2. Измерительный электрод представляет собой стеклянную трубку, к нижней части которой приварен шарик из специального стекла, содержащего металл (литий или натрий). Ионы водорода из раствора проникают в стекло шарика, а ионы металла переходят из стекла в раствор, в результате на поверхности шарика возникает потенциал, величина которого зависит от концентрации водородных ионов в растворе. Сравнительный электрод, в отличие от измерительного, не меняет свой потенциал относительно раствора. Поэтому э. д. с. датчика E_X зависит только от потенциала измерительного электрода и, следовательно, pH раствора.

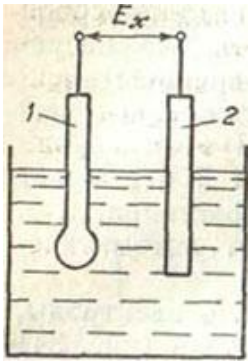


Рисунок 5.1 – Потенциометрический датчик

Стеклянный электрод датчика имеет очень высокое сопротивление. Поэтому для измерения э. д. с. датчика применяют специальный потенциометр, имеющий высокоомный вход, или используют промежуточный преобразователь также с высокоомным входом.

В **оптических** анализаторах используется связь между составом анализируемой жидкости и законами распространения через нее света. Наиболее распространенными оптическими анализаторами являются рефрактометры и колориметры.

В **рефрактометрах** для анализа используется способность света изменять свое направление при переходе из одной среды в другую вследствие различия их оптических свойств. Если оптические свойства одной среды остаются неизменными (эталонная среда), а другой – зависят от концентрации одного из

компонентов жидкости, то по отклонению луча света можно измерять концентрацию этого компонента.

Рефрактометры применяют для анализа бензина, керосина, соляной и азотной кислот, спиртов и других жидкостей. Конструкция кювет некоторых рефрактометров позволяет использовать их для агрессивных, токсичных, полимеризующихся и высокотемпературных сред.

Действие **колориметрических** анализаторов основано на поглощении или рассеивании светового потока, проходящего через жидкость, например суспензию, образованную частицами определяемого вещества в жидкой фазе. Анализаторы, измеряющие концентрацию по интенсивности света, прошедшего через слой дисперсной системы, называются турбидиметрами, а по интенсивности рассеянного дисперсной системой света – нефелометрами.

Колориметрические анализаторы применяют для измерения концентрации твердых частиц в технологических растворах (пульпы, эмульсии, взвеси), а также для анализа качества воды в системах водоподготовки и водоочистки (мутномеры).

5.2 Методы влагометрии

Влажность газов, жидкостей и твердых материалов – один из важных показателей в эко- и технологических процессах. Влажность газов, например, необходимо измерять в сушильных установках, при очистке газов, в газосборниках, при кондиционировании воздуха и т.д. Измерение содержания воды в нефти, спиртах, ацетоне проводят в процессах нефтепереработки и нефтехимии, в пульпах – в производстве серной кислоты и минеральных удобрений. Измерение влажности твердых сыпучих материалов занимает важное место в производстве красок, минеральных удобрений, строительных материалов; влажность волокнистых материалов определяет качество продукции при производстве бумаги и картона.

Влажность газов обычно измеряют психрометрическим методом.

Действие психрометрических влагомеров основано на измерении двух температур: температуры «сухого» термодатчика, помещенного в анализируемый газ, и температуры «мокрого» термодатчика, завернутого в чулок из влажной ткани, конец которой опущен в воду. За счет испарения воды этот термодатчик охлаждается до температуры меньшей, чем температура газа. С увеличением влажности газа испарение идет менее интенсивно и температура «мокрого» термометра растет. При влажности 100 % вода вообще не будет испаряться и температуры обоих термодатчиков сравняются.

В промышленных влагомерах в качестве термодатчиков обычно используют термометры сопротивления, включенные в схему для измерения отношения их сопротивлений, т. е. отношения температур «мокрого» и «сухого» термометров.

Из принципиальной схемы влагомера (рис. 5.2) видно, что она состоит из двух неуравновешенных мостов 1 и 3, реостата (реохорда) 2, усилителя 4, реверсивного электродвигателя 5 и показывающего устройства 6. В плечи неуравновешенных мостов включены соответственно «сухой» (R_C) и «мокрый» (R_M) термометры. Выходной сигнал моста – напряжение U_2 включен встречно с напряжением U_3, снимаемым с движка реохорда. Их разность ΔU приложена к входу усилителя. Там она усиливается и приводит в действие реверсивный электродвигатель. Вал электродвигателя перемещает движок реохорда и связанную с ним стрелку показывающего устройства.

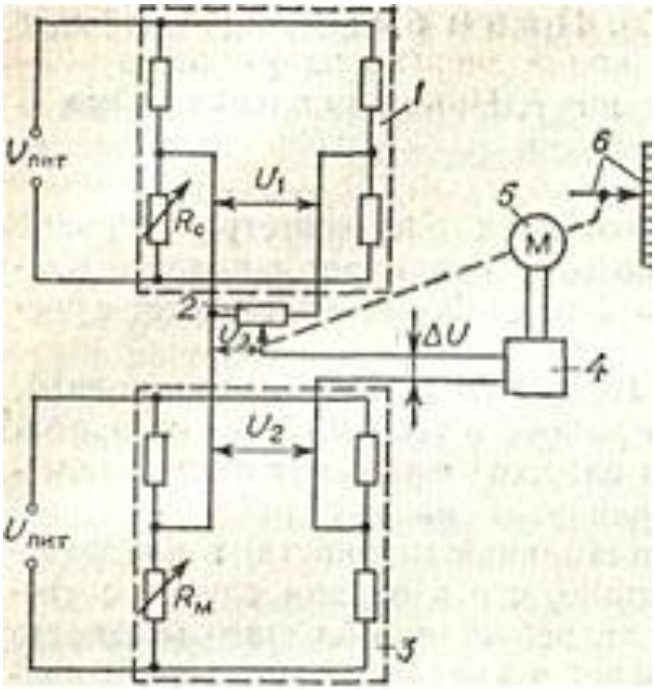


Рисунок 5.2 – Психрометрический влагомер

Состояние равновесия в схеме наступает при равенстве напряжений U_2 и U_3. При этом $\Delta U = 0$, поэтому движок реохорда и стрелка прибора перестают перемещаться. Положение движка реохорода в момент равновесия зависит от отношения напряжений U_1 и U_2, а значит, от отношения температур «сухого» и «мокрого» термометров. Таким образом, положение стрелки прибора однозначно связано с измеряемой влажностью газа. Для измерения влажности жидкостей применяют как специальные влагомеры, так и приборы, измеряющие какое-либо свойство жидкости, если оно связано с ее влажностью.

Например, одной из характеристик пульп является соотношение жидкость: твердое в ее составе. Эту величину измеряют обычно плотномерами. В тех случаях, когда из пульпы удаляется только жидкая фаза (выпаривание, фильтрование), показания плотномера будут определяться содержанием жидкости в пульпе. В этом случае плотномер выполняет функцию влагомера.

В специальных влагомерах для жидкостей используют емкостный и абсорбционный методы измерения.

Действие емкостных влагомеров основано на изменении диэлектрической проницаемости жидкости при изменении содержания в ней воды. Электрическая схема такого влагомера аналогична электрической схеме емкостного уровнемера. Изменение влажности жидкости приводит к изменению емкости C_X и выходного напряжения моста U. Такими влагомерами измеряют содержание воды в нефти на нефтеперерабатывающих заводах. Диапазон измерения прибора 0-1 %.

Принцип действия абсорбционных влагомеров для жидкости основан на поглощении водой энергии излучения в области спектра, близкой к инфракрасной.

Жидкость пропускают через камеру, где через нее проходит поток излучения от источника. Так как в камере часть энергии поглощается влагой, энергия выходящего потока будет тем меньше, чем больше концентрация влаги в смеси.

Источником излучения служит лампа накаливания, приемником – фоторезистор. Промышленные анализаторы влажности служат для определения концентрации влаги в ацетоне и спиртах от 0 до 5 %.

Сложность измерения влажности твердых сыпучих и волокнистых материалов заключается в том, что при взаимодействии датчика с материалом может изменяться его структура, насыпная плотность и другие факторы, существенно увеличивающие погрешность прибора. Поэтому в промышленности нашли применение в основном бесконтактные методы измерения: оптический и сверхвысокочастотный.

В оптических влагомерах используется связь между влажностью вещества и потоком отраженного от него излучения. Для получения наибольшей чувствительности применяют излучение в инфракрасной области спектра, которое создается источником. Отраженный анализируемым материалом световой поток направляется собирающим устройством на приемник. Чем больше влажность материала, тем лучше он поглощает инфракрасное излучение и тем меньше величина отраженного потока.

Поскольку таким методом можно измерить влажность лишь тонкого слоя, влагомер обычно применяют для сыпучих материалов, транспортируемых по конвейерным лентам.

5.3 Радиоволновые методы измерения

В настоящее время существенное развитие и применение для анализа веществ, в частности жидкостей, получили *радиоволновые* методы и средства измерений. Рассмотрим здесь их сущность и примеры применения.

Среди известных методов измерения различных неэлектрических величин определенными преимуществами обладают радиоволновые методы. Эти методы наиболее широко используются для измерения влагосодержания различных жидкостей, газов, сыпучих и твердых веществ. Основанные на этих методах измерительные устройства имеют высокую чувствительность к влагосодержанию в различных частотных диапазонах и обеспечивают возможность проведения высокоточных, бесконтактных измерений и измерений, осредненных по контролируемому объему вещества.

Вопросы теории и применений известных радиоволновых влагомеров (концентратомеров) рассмотрены в многочисленных публикациях. Такие влагомеры на практике подтвердили свою эффективность во многих применениях.

Сущность радиоволновых методов

Измерение концентрации смесей, в частности, влагосодержания жидкостей, газов, твердых и сыпучих веществ является традиционной задачей, для решения которой используется радиоволновый метод, базирующийся на применении для зондирования контролируемых объектов электромагнитных волн высокочастотного (ВЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазонов частот. В многочисленных работах по радиоволновой влагометрии (концентратометрии) рассматриваются принципы построения и области практического применения влагомеров, связанных с применением различных информативных параметров радиоволновых датчиков влажности. Такие влагомеры, которые в большинстве случаев являются СВЧ-влагомерами (диапазон частот ~ 1 ÷ 100 ГГц), относятся к числу бесконтактных (чаще всего), содержащих антенные устройства для зондирования контролируемого вещества волнами в свободном пространстве. Распространены также датчики влажности, использующие волноводы и объемные резонаторы.

В методах СВЧ-влагометрии основным информативным параметром, наиболее часто используемым на практике, является амплитуда или мощность волны, отраженной от поверхности контролируемого вещества или прошедшего через его слой. Поглощение энергии в данном веществе, зависящее от количества присутствующей в веществе влаги, приводит к

уменьшению этих величин и позволяет получить полезную информацию о влагосодержании. Регистрируемым параметром может служить затухание A (дБ), которое связано с влажностью W следующим приближенным соотношением:

$$A = 8{,}68\alpha_b W_{\rho k} D + |\Gamma|, \tag{5.1}$$

где D – толщина слоя контролируемого вещества, ρ – плотность влажного вещества, k – эмпирическая константа, α_b – коэффициент затухания для воды (дБ/м), выражаемый соотношением

$$\alpha_в = \frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\frac{\varepsilon_в}{2}\left(\sqrt{1+tg^2\delta_в}-1\right)}, \tag{5.2}$$

в котором $|\Gamma| = |\Gamma' + i\Gamma''|$ – модуль коэффициента отражения от границы раздела сред «воздух-вещество»; $\varepsilon_в$ и $\mathrm{tg}^2\delta_в$ – соответственно, диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь для воды, λ – длина электромагнитной волны.

Помимо амплитудных методов, находят применение фазовые методы влагометрии (концентратометрии), основанные на измерении фазового сдвига волны при ее взаимодействии с влажным веществом. При контроле влагосодержащего слоя вещества толщиной D сдвиг фаз падающей и прошедшей волн есть

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi D}{\lambda}\left[\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}\left(1+\sqrt{1+tg^2\delta}\right)}-1\right], \tag{5.3}$$

где ε и $\mathrm{tg}\delta$ – соответственно, диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь контролируемого вещества, λ – длина электромагнитной волны.

Известны и другие методы измерения в свободном пространстве, например, по изменению в зависимости от влажности поляризации волны при отражении от влажного вещества или прохождении через его слой, по изменению угла Брюстера при наклонном зондировании слоя вещества и др.

Для целей влагометрии разработаны, изготовлены и используются на практике многочисленные конструкции ВЧ- и СВЧ-влагомеров, в которых в зависимости от влажности вещества, находящегося в электромагнитном поле

резонатора того или иного типа, например, объемного резонатора, или направляющей системы, изменяются колебательные характеристики (собственная частота, добротность) резонатора, характеристики распространения волны вдоль направляющей системы (амплитуда, фаза, частота биений модулированных волн, коэффициент отражения и др.).

Возможность эффективного решения задач измерения влажности различных веществ радиоволновыми влагомерами обусловлено существенным отличием электрофизических параметров (ε и $\mathrm{tg}\delta$) исследуемых веществ и воды. Для воды имеет место значительная частотная дисперсия $\varepsilon_в$ и $\mathrm{tg}\delta_в$ в СВЧ-диапазоне частот. Диэлектрическая проницамость воды, как видно, имеет в диапазоне частот < 1 ГГц значение $\varepsilon_в$ = 81, а выше ~ 1 ГГц значение $\varepsilon_в$ монотонно уменьшается, имея, в частности, при f = 10 ГГц (λ = 3 см) значение $\varepsilon_в$ = 65, а при f = 37,5 ГГц (λ = 8 мм) значение $\varepsilon_в$ = 21,8 (при температуре 20 ^{0}C). В то же время большинство веществ, влажность которых подлежит измерению, имеет значение ε намного меньшее указанных значений $\varepsilon_в$ для воды.

При измерении влагосодержания информативными параметрами *резонаторных* датчиков могут служить собственная (резонансная) частота $f_р$ электромагнитных колебаний, а также добротность Q резонатора. Так, для объемного резонатора, весь объем которого заполнен влагосодержащим веществом, выполняются следующие соотношения:

$$f_p(\dot{\varepsilon}) = \frac{f_{p0}}{\sqrt{\dot{\varepsilon}}}, \tag{5.4}$$

$$Q(\dot{\varepsilon}) = \frac{f_p}{2\Delta f} = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon''} = \frac{1}{tg\delta}, \tag{5.5}$$

где $\dot{\varepsilon} = \varepsilon' - i\varepsilon''$ – относительная комплексная диэлектрическая проницаемость влагосодержащего вещества; ε' и ε'' – действительная и мнимая составляющие $\dot{\varepsilon}$; $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь влагосодержащего вещества; Δf – ширина резонансной кривой на уровне 0,707 ее амплитуды; $f_{р0}$ – начальная резонансная частота резонатора (при $\dot{\varepsilon}$ = 1).

Для определения концентрации смесей, в частности, влагосодержания веществ могут быть применены датчики как на основе отрезков длинных линий, так и объемных, в частности волноводных, резонаторов. Датчики на базе отрезков длинной линии работают на частотах, как правило, до 100 МГц, датчики на основе объемных резонаторов работают, как правило, в СВЧ-диапазоне частот электромагнитных волн.

В качестве примеров ниже рассмотрены некоторые радиоволновые методы концентратометрии применительно к конкретным областям применения, а именно, для определения концентрации жидкостей (водных растворов).

Методы измерений с применением датчиков на основе отрезков длинной линии

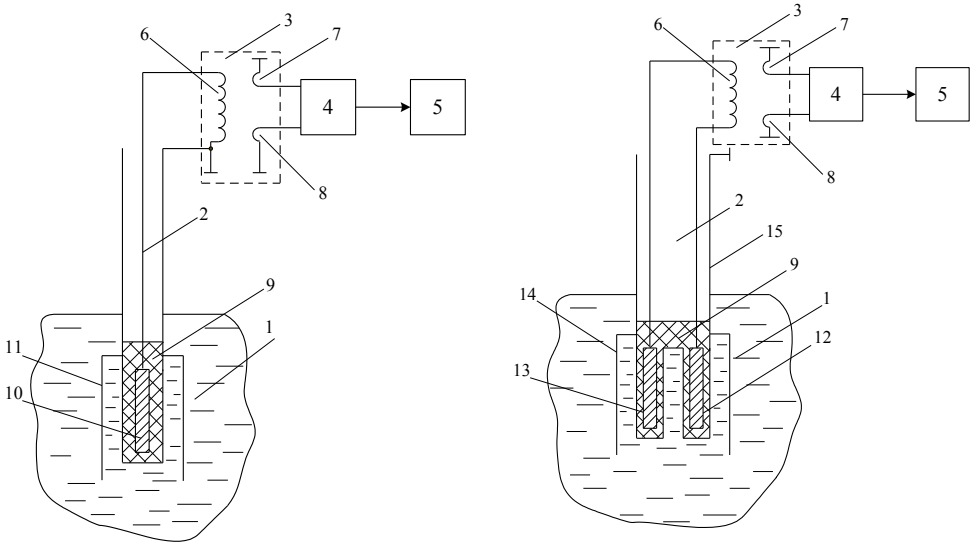
Измерение концентрации растворов. Концентрация различных двухкомпонентных жидкостей, в частности водных растворов, является важным технологическим параметром. Высокоточное определение влагосодержания растворов важно во многих отраслях промышленности (пищевой, химической и др.), для решения экологических проблем, вызванных необходимостью определять наличие и степень содержания примесей в воде. Радиоволновые методы и средства измерений успешно применяются для решения многих подобных проблем.

Известны различные конструкции радиоволновых датчиков для изучения диэлектрических жидкостей. Однако некоторые практически важные задачи характеризуются необходимостью измерять концентрацию двухкомпонентных жидкостей, одна или обе компоненты которых являются несовершенными диэлектриками, например, водно-спиртовых растворов. Кроме того, существует необходимость измерять весьма большие и весьма малые концентрации какой-либо жидкости в воде (с содержанием одной из компонент менее 1%).

Рассмотрим решение этой актуальной проблемы. Для решения данной задачи – высокоточных измерений влагосодержания диэлектрической жидкости с потерями – разработаны радиочастотные датчики. Был предложен ряд схем концентратомеров, изготовлены образцы этих приборов и проведены с ними эксперименты с некоторыми водосодержащими растворами. Эти эксперименты показали, что датчики в виде отрезков длинной линии с проводниками, покрытыми диэлектрическими оболочками, являются эффективными при контроле водосодержащих жидкостей с большими диэлектрическими потерями. Рассмотрим возможные варианты реализации устройства.

Концентратомеры с датчиками на основе отрезка коаксиальной длинной линии. *В первом варианте* реализации устройства (рис. 5.3,а) отрезок длинной линии выполнен в виде отрезка коаксиальной линии с чувствительным элементом 1 на одном из его концов в виде цилиндрического конденсатора; другой конец отрезка такой линии соединен с катушкой индуктивности 3. Катушка индуктивности 3 содержит три обмотки 6, 7 и 8: одну основную 6 и две дополнительные 7 и 8. Основная обмотка 6 соединена с помощью отрезка длинной линии (коаксиальной или двухпроводной) с чувствительным элементом 1, а дополнительные обмотки 7 и 8 служат для индуктивной связи с автогенератором 4 и предназначены, соответственно, для возбуждения электромагнитных колебаний в отрезке длинной линии и съема информативного сигнала. При этом дополнительные обмотки 7 и 8 должны иметь минимальную связь непосредственно между собой. Поэтому они располагаются у противоположных концов основной обмотки 6. Центральный

электрод 10 чувствительного элемента помещен в герметичную диэлектрическую оболочку 9. Эта оболочка требуется для повышения добротности такого резонатора с зондом, содержащим контролируемую жидкость, которая является несовершенным диэлектриком. Наружный электрод 11 (экран) электрически соединен с наружным проводником коаксиальной линии 2.



а) б)

1 – чувствительный элемент, 2 – отрезок длинной линии, 3 – катушка индуктивности, 4 - автогенератор, 5 – частотомер, 6, 7 и 8 – соответственно, основная и дополнительные обмотки катушки индуктивности, 9 – диэлектрическая оболочка, 10, 11, 12 и 13 – электроды чувствительных элементов, 14 и 15 – заземленный проводник (экран).

Рисунок 5.3 – Резонаторные измерительные устройства с чувствительными элементами в виде:
а) отрезка коаксиальной линии; б) отрезка двухпроводной линии.

Концентратомеры с датчиками на основе отрезка двухпроводной длинной линии. *Во втором варианте* реализации устройства (рис. 5.3,б) чувствительный элемент 1 может представлять собой плоский конденсатор, состоящий из двух электродов 12 и 13, находящихся в металлической полости 14 (экране). Эта полость (экран) электрически соединена с заземленным проводником 15 – экраном двухпроводной линии 2, выполненном, в частности, в виде металлической трубы. Электроды 12 и 13 также помещены в соответствующую герметичную диэлектрическую оболочку 9.

Здесь отрезок длинной линии выполнен в виде отрезка экранированной двухпроводной линии с экранированным плоским конденсатором на одном из его концов; другой конец такого отрезка линии, как и в первом варианте

реализации устройства, соединен с катушкой индуктивности 3. Эта катушка индуктивности имеет также два индуктивных элемента связи. Они служат для подсоединения резонатора к схемному анализатору посредством линий связи (коаксиальных кабелей), обеспечивая возбуждение электромагнитных колебаний в рассматриваемом отрезке длинной линии (резонаторе) и съем информативных сигналов. Измеряемыми параметрами являются резонансная частота $f_р$ электромагнитных колебаний и добротность Q резонатора. Элементы связи должны иметь минимальное взаимовлияние; поэтому они располагаются у противоположных концов катушки индуктивности. Такой чувствительный элемент погружается в контролируемую жидкость (несовершенный диэлектрик). Измеряемая таким путем резонансная частота резонатора зависит от электрофизических параметров (диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь) этой жидкости.

Радиочастотный чувствительный элемент содержит две металлические пластины с диэлектрическим покрытием; они закреплены с помощью диэлектрической втулки. Эти пластины находятся внутри металлического цилиндра (экрана), имеющего отверстия для свободного доступа контролируемой жидкости в пространство между пластинами. Зонд сконструирован таким образом, чтобы контролируемое вещество заполняло пространство между пластинами чувствительного элемента. В этом случае обеспечивается максимальное возмущение электрического поля зонда и, соответственно, максимальное изменение резонансной частоты датчика. Чувствительный элемент состоит из двух металлических пластин, электрически изолированных друг от друга и от контролируемого вещества с помощью диэлектрического покрытия и закрепленных на диэлектрическом основании. Пластины находятся в полости металлического кожуха-экрана с отверстиями, которые обеспечивают свободный доступ контролируемого вещества в эту полость.

В обоих вышерассмотренных вариантах реализации устройства чувствительный элемент 1, отрезок длинной линии 2 и катушка индуктивности 3 образуют электромагнитную колебательную систему. Ее резонансная частота электромагнитных колебаний зависит от параметров всех входящих в нее элементов. Параметры отрезка длинной линии 2 и катушки индуктивности 3 стабильны и практически не зависят от параметров контролируемого вещества. Поэтому резонансная частота изменяется функционально только с изменением емкости чувствительного элемента 1, которая, в свою очередь, зависит от электрофизических параметров (диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь) контролируемого вещества, которым заполняется пространство между проводниками чувствительного элемента 1. В частности,

таким веществом может являться водо-спиртовая смесь, процентное содержание спирта в которой подлежит определению.

Поскольку данная колебательная система включена в частотозадающую цепь автогенератора 4, с помощью которого в отрезке длинной линии 2 с нагрузочным чувствительным элементом 1 возбуждаются электромагнитные колебания. Частота генерации автогенератора 4 соответствует резонансной частоте данной колебательной системы. Измеряя частоту генерации с помощью частотомера 5, подсоединенного к автогенератору 4, можно определить электрофизические параметры контролируемого вещества и функционально с ними связанное влагосодержание веществ.

Водосодержащие смеси являются несовершенными диэлектриками. Поэтому для увеличения добротности рассматриваемой колебательной системы и, соответственно, возможности получения информации путем измерения частоты генерации, зависящей от резонансной частоты колебательной системы, по меньшей мере, один электрод, в частности, центральный электрод коаксиального чувствительного элемента (цилиндрического конденсатора) и оба электрода симметричного чувствительного элемента (плоского конденсатора), соответственно, в первом и втором вариантах его реализации, помещены в диэлектрическую оболочку 9, препятствующую к тому же проникновению контролируемого вещества в пространство между проводниками отрезка длинной линии 2 (см. рис. 5.3,а и рис. 5.3,б). При этом вещество с произвольными электрофизическими параметрами является здесь одним из слоев двухслойного диэлектрика, образуемого оболочкой 9 и контролируемой жидкостью и характеризуемого эффективной диэлектрической проницаемостью.

Диапазон рабочих частот отрезка длинной линии 2 с нагрузкой в виде чувствительного элемента 1 зависит от длины отрезка линии. При длине 1 м рабочая частота ~ 75 МГц (для короткозамкнутого на одном конце отрезка линии; изменение частоты определяется диапазоном измерения концентрации смеси).

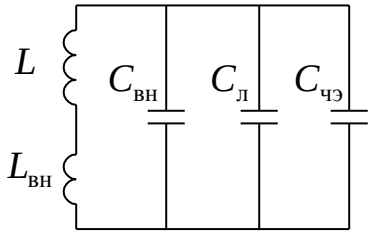


Рисунок 5.4 – Эквивалентная схема датчика

Рассматриваемый отрезок длинной линии 2 с оконечным чувствительным элементом 1 и катушкой индуктивности 3 – колебательную систему - можно в общем случае представить в виде эквивалентной схемы, приведенной на рис. 5.4. Здесь обозначено: L – индуктивность собственно катушки; $L_{вн}$ – индуктивность, вносимая элементами связи; $C_{вн}$ – емкость, вносимая элементами связи; $C_{л}$ – емкость отрезка длинной линии, соединяющей катушку индуктивности и чувствительный элемент 1; $C_{чэ}$ – емкость чувствительного элемента в отсутствие контролируемого вещества.

Так, в частности, в реальном устройстве на основе отрезка коаксиальной длинной линии значения указанных элементов следующие: L = 5 мкГн, $C_{л}$ = 2 пФ, $C_{чэ}$ = 6,5 пФ. Размеры отрезка коаксиальной линии: длина 100 мм, диаметр наружного проводника (экрана) 10 мм, диаметр внутреннего проводника 1 мм. Размеры чувствительного элемента: длина 50 мм, диаметр экрана 23 мм, диаметр внутреннего проводника 12 мм, толщина его диэлектрической оболочки из фторопласта 1 мм. При этих значениях частота автогенератора, соответствующая $f_{р}$, составляет ~ 25 МГц при отсутствии контролируемого вещества и ~ 12 МГц при погружении его в водно-спиртовой раствор. На рисунке 5.5 приведен полученный экспериментально график зависимости изменения частоты f – f(9,2%), в килогерцах, от процентного содержания C спирта в воде в диапазоне его изменения 9,2% - 15,1 %. Здесь f(9,2%) – значение частоты f при C = 9,2 %. При проведении данных измерений применено рассматриваемое устройство на основе отрезка коаксиальной линии, имеющее вышеуказанные параметры. Данный график свидетельствует о работоспособности устройства и его возможности практического применения для измерения концентрации смесей.

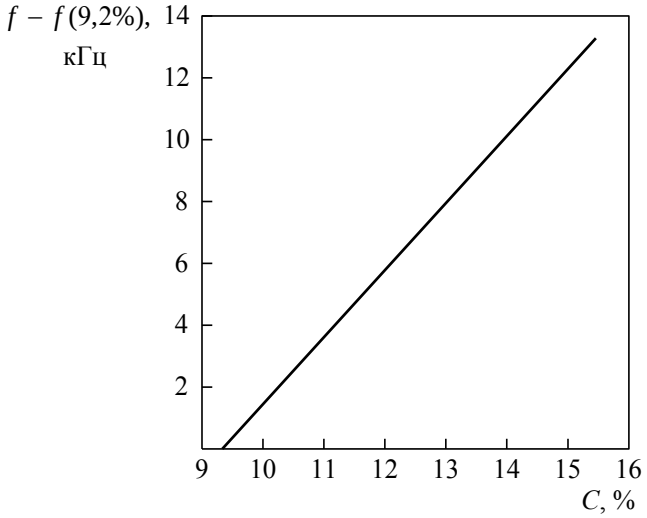


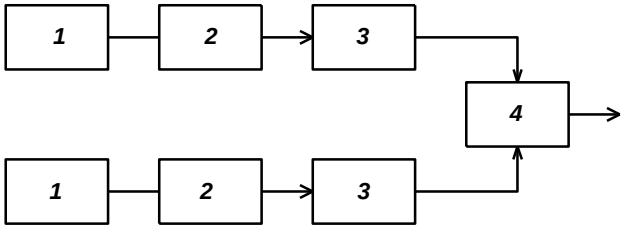
Рисунок 5.5 – Зависимость изменения частоты автогенератора от концентрации водно-спиртового раствора

Для обеспечения максимальной чувствительности к контролируемому параметру (концентрации) необходимо обеспечить выполнение следующего неравенства: $C_{чэ} >> C_{л} + C_{вн}$. На практике выполнить данное условие удается не всегда; вместе с тем при вышеуказанных, в частности, конкретных значениях параметров элементов чувствительность устройства является вполне достаточной. Кроме того, для обеспечения минимальной погрешности необходимо минимизировать величину $C_{вн}$, поскольку эта величина наиболее нестабильная. Ее величина определяется входящими в нее емкостью линий связи и собственной емкостью автогенератора.

Для обеспечения надежной работы конструкции устройства с симметричным чувствительным элементом – плоским конденсатором – необходимо также иметь и симметричное его возбуждение, что наилучшим образом реализуется только при индуктивной связи, применяемой в данном устройстве.

При контроле водно-спиртовых растворов с применением датчика на основе отрезка двухпроводной длинной линии относительное изменение резонансной частоты f составило 4 % при изменении концентрации C (содержания спирта в воде) в пределах 9,2 ÷ 15,1 %; погрешность измерения не более 1%. Добротность резонатора достаточно высокая во всем измеряемом диапазоне (намного больше минимально допустимой величины Q = 10, требуемой для проведения резонаторных измерений).

Двухканальная схема измерительного устройства. Чаще всего применяется дифференциальная схема концентратомера (рис. 5.6). Она имеет два канала с измерительным и эталонным датчиками: в одном из них датчик заполняется контролируемой двухкомпонентной жидкостью, а в другом (опорном канале) – идентичный датчик заполняется только одной из жидкостей, образующих контролируемую смесь. Каждый датчик включен в частотозадающую цепь соответствующего автогенератора, находящегося в электронном блоке каждого датчика. Электронный блок содержит и другие компоненты схемы, приведенные на рисунке 5.6.



1 – чувствительный элемент, *2* – автогенератор, *3* – делитель частоты, *4* – вычитающее устройство

Рисунок 5.6 – Структурная схема концентратомера

Структурная схема рассматриваемого высокочувствительного концентратомера построена по двухканальному принципу и состоит из двух идентичных измерительных каналов – рабочего и опорного. Каждый из этих каналов содержит чувствительный элемент 1, автогенератор 2, делитель частоты 3. С выхода делителя частоты каждого из каналов сигналы поступают на вычитающее устройство 4. Чувствительный элемент включается в частотозадающую цепь автогенератора и определяет его частоту генерации. Обычно генерируемые частоты лежат в диапазоне 1–100 МГц и зависят, в основном, от геометрических параметров чувствительного элемента. С выхода автогенератора высокочастотные колебания поступают на делитель частоты, в котором производится уменьшение (деление) частоты автогенератора до приемлемых значений (10–100 кГц). Вычитающее устройство 4 может быть реализовано на базе как цифровых, так и аналоговых схем, соответственно, выходной сигнал вычитающего устройства, являющегося выходным сигналом измерительного устройства, может также быть цифровым или аналоговым.

Так как измерительный и опорный каналы находятся в одинаковых условиях, то возможные возмущающие факторы приводят к одинаковым отклонениям частоты соответствующих автогенераторов в дифференциальной схеме устройства. Поэтому точность измерения влагосодержания не зависит от этих возмущений.

Рассмотренный метод измерения может быть применен для высокоточного контроля различных бинарных смесей (растворов) с произвольными диэлектрическими потерями их компонент, в частности, высокоточного определения концентрации водно-спиртовых растворов и других смесей различных веществ.

***

Рассмотренные здесь принципы построения датчиков и измерительных преобразователей, а также основы проектирования микропроцессорных измерительных преобразователей могут быть использованы при анализе состояния окружающей среды и измерении физических свойств различных жидкостей и газов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электронно-технические измерения при физико-химических исследованиях/ Ветров В.В., Долгов Е.Н., Катушкин В.П., Маркелов А.А. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. 1979. 272 с.
2. Андреев В.С., Попечителев Е.П. Лабораторные приборы для исследования жидких сред. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние. 1981. 312 с.
3. Фарзане Н.Г., Илясов Л.В., Азим-Заде А.Ю. Автоматические детекторы газов и жидкостей. М.: Энергоатомиздат. 1983. 96 с. (Б-ка по автоматике; Вып. 639).
4. Бензарь В.К. Техника СВЧ-влагометрии. Минск: Вышэйшая школа. 1974. 349 с.
5. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Высокочастотный метод измерения неэлектрических величин. М.: Наука. 1978. 280 с.
6. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М.: Энергоатомиздат. 1989. 208 с.
7. Локтюхин В. Н. Микропроцессоры и ЭВМ (в 4-х кн.). Кн. 4. Микропроцессорные системы сбора и первичной обработки импульсно-аналоговой информации. Учеб. пособие для вузов. М:. Энергоатомиздат. 2000. 156 с.
8. Локтюхин В.Н., Совлуков А.С. Интеллектуальный резонансный датчик на основе метода следящего преобразования частоты в код // Датчики и системы, №7, 2003. С. 7-9.
9. Локтюхин В.Н. Процедура структурного проектирования микропроцессорной измерительной системы с частотными датчиками. Новые информационные технологии: Межвуз. сб. Рязань: РГРТА. 2003. С. 69-74.
10. Собкин Б. Л. Автоматизация проектирования аналого-цифровых приборов на микропроцессорах. М.: Машиностроение. 1986. 128 с.
11. Теория и практика экспресс-влагометрии твердых и жидких веществ // Кричевский Е.С., Бензарь В.К., Венедиктов М.В. и др. М.: Энергия. 1980. 240 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ АНАЛИЗАТОРОВ…..3
2. ОБЩИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К АНАЛИЗАТОРАМ..6
3. ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ (СИСТЕМ)……..8
4. СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ…… ……..……..…….…...28
5. АНАЛИЗАТОРЫ ЖИДКОСТЕЙ …….…....48
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК…...……...……..63

Зубков Михаил Владимирович
Локтюхин Виктор Николаевич
Совлуков Александр Сергеевич

Датчики и измерительные преобразователи для контроля окружающей среды

Редактор Н.А.Орлова
Корректор С.В. Макушина
Подписано в печать 29.11.13. Формат бумаги 60х841/16.
Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ.л. 4,0.
Тираж 25 экз. Заказ **2780** .
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ

Оператор ЭДО ООО "Компания "Тензор"

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

СОГЛАСОВАНО **ФГБОУ ВО "РГРТУ", РГРТУ,** Литвинов Владимир Георгиевич, Заведующий кафедрой МНЭЛ **15.10.26** 16:33 (MSK) Простая подпись