

О динамических характеристиках автоматических анализаторов

М. А. КАРАБЕГОВ

Научно-производственное объединение «ЦНИИТМАШ», Москва, Россия,
e-mail: karabegov@rambler.ru

Приведены основные динамические характеристики средств измерений, в качестве примера рассмотрены автоматические фотометрические и рефрактометрические анализаторы.

Ключевые слова: динамические характеристики, автоматические фотометрические и рефрактометрические анализаторы.

The basic dynamic characteristics of measuring instruments exemplified on automatic photometric and refractometric analyzers are considered.

Key words: dynamic characteristics, automatic photometric and refractometric analyzers.

Модернизация экономики, создание новых и развитие традиционных технологий, сложность технологических сред, тяжелые и часто экстремальные условия эксплуатации ставят новые задачи по автоматизации, компьютеризации и оптимизации технологических комплексов, автоматическому формированию информации о параметрах технологических процессов. Важная роль принадлежит автоматическим средствам измерений (СИ) — приборам, комплексам и системам, на разных стадиях определяющих параметры технологических процессов и показатели качества продукции. Все это предъявляет новые требования к развитию автоматической информационно-измерительной техники, реализации новых подходов к обеспечению достоверности и инвариантности результатов автоматических измерений.

Автоматические информационно-измерительные приборы являются динамическими системами, которые контролируют изменяющиеся во времени параметры нестационарных технологических процессов.

Динамические (инерционные) свойства приборов обусловлены особенностями схем и конструкций, модулей и элементов, они усложняют зависимость между входным и выходным сигналами измерительных систем. Динамические характеристики автоматических приборов как информационных датчиков играют существенную роль в процессах оптимизации систем управления технологических процессов и контроля качества продукции, определяют в ряде случаев ошибку регулирования.

Динамическими характеристиками называют свойства СИ в динамическом режиме, когда время изменения измеряемой величины сравнимо со временем измерения. Это метрологическая характеристика свойств СИ, проявляющаяся в том, что на его выходной сигнал влияют значения входного сигнала и любые изменения этих значений во времени. Динамические характеристики отражают инерционные свойства СИ при воздействии на них меняющихся во времени параметров входного сигнала, внешних влияющих величин, нагрузки. Временная характеристика — динамическая характеристика СИ, являющаяся функцией времени и описывающая изменение выходного сигнала во времени при воздействии входного сигнала, принятого за типовой.

Динамические метрологические характеристики СИ должны способствовать обеспечению единства измерений, при котором их результаты выражены в допущенных к применению в РФ единицах величин, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы. Для выполнения первого требования результаты измерений выражают в единицах международной системы SI; для второго — устанавливают определенные (нормированные) значения динамических метрологических характеристик СИ. Указанные характеристики регламентированы стандартами [1, 2] и др. По степени полноты описания инерционных свойств они могут быть полными и частными. Полные динамические характеристики описывают (математически, графически) математическую модель динамических свойств СИ и наиболее информативны. Например, решение $Y(t)$ дифференциального уравнения, характеризующего функционирование СИ, описывает его выходной сигнал при воздействии входного сигнала $X(t)$. Порядок уравнения бывает высоким, выше 2-го, решение которого даже при известном виде функции $Y(t)$ затруднено. Дифференциальные уравнения высокого порядка можно представлять системой дифференциальных уравнений 1-го и 2-го порядков.

Частная динамическая характеристика СИ — функционал или параметр полной динамической характеристики, или характеристика, не отражающая полностью динамических свойств, но необходимая для выполнения измерений с требуемой точностью (например, время установления показаний) или контроля однородности свойств СИ данного типа; показатель точности.

У аналоговых СИ, которые можно рассматривать как линейные, полными динамическими характеристиками могут быть [1]:

- переходная $h(t)$;
- импульсная переходная $g(t)$;
- амплитудно-фазовая $G(j\omega)$;
- амплитудно-частотная $A(\omega)$ (для минимально-фазовых СИ);
- совокупность амплитудно-частотной и фазово-частотной;
- передаточная функция $G(S)$.

К их частным динамическим характеристикам относятся:

- время реакции t_p ;
- коэффициент демпфирования g_d ;

постоянная времени T ;
амплитудно-частотная характеристика на резонансной частоте $A(\omega_0)$;

резонансная собственная круговая частота ω_0 .

У аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и цифровых измерительных приборов (ЦИП), время реакции которых не превышает интервала времени между двумя измерениями, соответствующего максимальной частоте (скорости) $f_{\max}$ измерений, а также цифроаналоговых преобразователей (ЦАП), частными динамическими характеристиками могут быть у АЦП время реакции t_p , погрешность датирования отсчета $t_{\text{дат}}$; максимальная частота (скорость) измерений $f_{\max}$; у ЦАП — время реакции преобразователя t_p .

К динамическим характеристикам аналого-цифровых СИ (в том числе измерительных каналов измерительных систем и измерительно-вычислительных комплексов, оканчивающихся АЦП), время реакции которых больше интервала времени между двумя измерениями, соответствующего максимально возможной для данного типа СИ частоте (скорости) измерений $f_{\max}$, относятся:

полные динамические характеристики эквивалентной аналоговой части этих СИ; погрешность датирования отсчета $t_{\text{дат}}$; максимальная частота (скорость) измерений $f_{\max}$.

Приведем определения некоторых динамических характеристик. Переходная и импульсная переходная характеристики — временные характеристики СИ, полученные при ступенчатом изменении входного сигнала и его изменении в виде дельта-функции Дирака. Амплитудно-фазовая характеристика — зависящее от круговой частоты отношение преобразований Фурье выходного сигнала линейного СИ и его входного сигнала при нулевых начальных условиях. Амплитудно-частотная характеристика — зависящее от круговой частоты отношение амплитуд выходного сигнала линейного СИ в установившемся режиме и входного синусоидального сигнала. Минимально-фазовое СИ — прибор, у которого фазово- и амплитудно-частотные характеристики однозначно функционально взаимосвязаны. Фазово-частотная характеристика — зависящая от частоты разность фаз между выходным сигналом и входным синусоидальным сигналом линейного СИ в установившемся режиме. Передаточная функция — отношение преобразований Лапласа выходного сигнала линейного СИ и входного сигнала при нулевых начальных условиях. Время реакции — время установления показаний (для измерительного прибора с визуальным отсчетом); время установления выходного сигнала (для измерительного преобразователя); время, прошедшее с момента подачи управляющего сигнала до момента, начиная с которого выходной сигнал преобразователя или меры отличается от установившегося значения не более чем на заданное значение для ЦАП или многозначной управляемой меры; время, прошедшее с момента скачкообразного изменения измеряемой величины в сторону возрастания и одновременной подачи сигнала запуска до момента, начиная с которого показания ЦИП или выходной код АЦП отличаются от установившегося показания или установившегося выходного кода на значение, не превышающее заданного (для АЦП или ЦИП). Коэффициент демпфирования — коэффициент g_d в дифференциальном уравнении, описывающем линейное СИ 2-го порядка. Погрешность датирования отсчета АЦП или ЦИП — случайная величина — интервал времени, начинающийся в момент начала цикла преобразования (запуска) АЦП или ЦИП и заканчивающийся в момент, когда значения из-

меняющейся измеряемой величины и выходного цифрового сигнала на данном цикле преобразования оказались равны. При этом значение выходного цифрового сигнала АЦП или ЦИП выражено в единицах измеряемой величины.

В проблеме развития и применения автоматической информационно-измерительной техники одно из важнейших мест принадлежит аналитическим приборам для физико-химических измерений (анализаторам), определяющим прямые показатели качества продукции — ее состав и свойства. При помощи аналитических приборов выполняют измерения параметров жидких, газообразных и твердых веществ в атомной и тепловой энергетике, медицине и биологии, агрохимии, экологии, химической и пищевой промышленности, в условиях космоса, подводного флота и др. Измерения осуществляются в автоматическом режиме в натурных условиях с использованием анализаторов (проточных, погружных), встроенных в технологические линии и объекты. Жидкие среды — растворы и дисперсные системы — наиболее распространенные природные и технологические объекты физико-химического контроля. Основной задачей аналитических измерений является определение свойств или концентрации (количества) растворенного (взвешенного) вещества с заданной точностью. Автоматический контроль актуален, а определяемые значения свойств или концентрации являются базовой первичной информацией для сохранения природной среды, обеспечения качества и безопасности продукции, управления процессами, функционирования систем.

Структуры автоматических анализаторов могут включать пробоотборные и пробоподготовительные системы (устройства). Первые предназначены для отбора контролируемой жидкости из технологических линий и транспортирования ее до входного устройства прибора, вторые — для подготовки пробы контролируемой жидкости к измерению. Пробоподготовительные системы бывают непрерывного или непрерывно-циклического действия, могут содержать фильтры, дозаторы пробы и реагентов, нагреватели, холодильники, термостаты, мешалки и др. Алгоритм функционирования пробоподготовительной системы реализует процедуры методики измерения. Пробоотборные и пробоподготовительные устройства являются частями конструкции прибора, не участвуют в процессе непосредственного измерения, их динамические свойства наиболее часто характеризуют временем транспортного запаздывания.

Информативный параметр анализатора формируется при взаимодействии чувствительного элемента (датчика, сенсора) с контролируемой жидкостью; у погружных анализаторов — непосредственно в технологическом объеме или специальной емкости, у проточных — только в специальной емкости (чувствительной ячейке — кювете), в которой находится (протекает) отобранная из процесса контролируемая жидкость. В общем случае в зависимости от принципа действия и построения структура анализаторов может включать звенья, построенные на основе физических, химических, электрических, механических, гидравлических модулей, источников и приемников излучения (энергии), а также электронно-логических компонентов, объединенных в программируемые и детерминированные системы. Наличие в структурах автоматических анализаторов звеньев с различными физической природой и динамическими свойствами делает особенно актуальной задачу оптимизации их динамических характеристик для обеспечения эффективного контроля

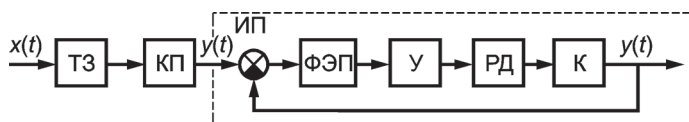


Рис. 1. Структурная схема автоматического фотометрического анализатора:

ТЗ — транспортное звено; КП, ИП, ФЭП — кюветный, измерительный и фотопреобразователь, соответственно; У — усилитель; РД — реверсивный двигатель; К — компенсатор

качества продукции, функционирования автоматизированных систем управления, решения других задач. Ниже в качестве примера рассмотрены динамические характеристики автоматических проточных фотометрических и рефрактометрических анализаторов.

Фотометрический (спектрофотометрический) метод анализа — один из наиболее распространенных при аналитическом контроле жидких сред, на его основе определяют концентрацию растворенных (взвешенных) веществ и оптические характеристики поглощения, пропускания, отражения, рассеяния и других видов излучения, контактировавшего с контролируемой средой. Согласно закону Бугера — Ламберта — Бера оптическая плотность D раствора и концентрация C растворенного вещества связаны соотношением $D = \alpha Cl$, где α — коэффициент поглощения вещества, l — толщина просвечиваемого слоя контролируемой среды (оптическая база). Закон определяет информативный параметр фотометрического анализатора (ФА) — интенсивность излучения в некотором интервале длин волн, выходящего из кюветы, и статическую характеристику $y_{\text{ФА}} = k_{\text{ФА}} \Delta D$, где ΔD — изменение оптической плотности контролируемой среды; $k_{\text{ФА}}$ — коэффициент параметров прибора. Анализаторы измеряют интенсивность излучения (изменение) и градуируются в единицах оптической плотности (изменения), коэффициента пропускания, концентрации, относительных единиц и др.

На рис. 1 приведена структурная схема автоматического ФА с компенсационной измерительной схемой (оптическая компенсация). Транспортное звено ТЗ представляет собой участок трубопровода от точки отбора контролируемой жидкости до входного штуцера прибора (пробоотборное устройство) и от входного штуцера до кюветы (кюветного преобразователя).

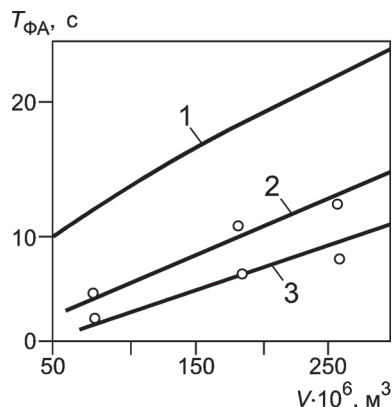


Рис. 2. Экспериментальные зависимости постоянной времени фотометрического анализатора от объема кюветы при расходах $1 \cdot 10^{-5}$; $2 \cdot 10^{-5}$; $1 \cdot 10^{-5}$ м³/с — соответственно кривые 1 — 3

зователя) КП. Излучение выделенного спектра просвечивает кювету и поглощается контролируемой жидкостью пропорционально оптической плотности и концентрации вещества. Интенсивность выходящего из кюветы излучения изменяется, возникает разбаланс фотопреобразователя ФЭП. Напряжение разбаланса после усилителя У поступает на реверсивный двигатель РД, вращающий компенсатор К (оптический клин) до достижения баланса. Звенья ФЭП, У, РД, К составляют измерительный преобразователь ИП (следящую систему).

Характеризуется ТЗ временем τ транспортного запаздывания, учитываемом в функции выходной величины:

$$y(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 < t < \tau; \\ x(t - \tau) & \text{при } t > \tau, \end{cases}$$

его передаточная функция

$$W_{\text{ТЗ}}(p) = e^{-p\tau}, \quad (1)$$

где p — оператор Лапласа.

Кювета проточного ФА представляет емкость со штуцерами для входа и выхода контролируемой жидкости. Передаточная функция кюветы $W_{\text{КП}}$ определяется из уравнения материального баланса $dy_1/dt = (Q/V)(x - y_1)$, откуда

$$W_{\text{КП}}(p) = y_1(p)/x(p) = K_{\text{КП}}/(T_{\text{КП}}p + 1), \quad (2)$$

где x — входная величина кюветы (изменение концентрации контролируемой жидкости); y_1 — ее выходная величина (изменение интенсивности выходящего излучения); $K_{\text{КП}} = y_1(t)/x(t)_{t \rightarrow \infty}$ — передаточный коэффициент; $T_{\text{КП}} = V/Q$ — постоянная времени (отношение объема V кюветы к расходу Q контролируемой жидкости без учета перемешивания).

Передаточная функция ИП без учета постоянных времени У и РД имеет вид

$$W_{\text{ИП}}(p) = y(p)/y_1(p) = K_{\text{ИП}}/(T_{\text{ИП}}p + 1), \quad (3)$$

где $y(p)$ — выходная величина; $K_{\text{ИП}} = y(t)/y_1(t)_{t \rightarrow \infty}$ — передаточный коэффициент; $T_{\text{ИП}}$ — постоянная времени (время перемещения компенсатора в пределах размаха шкалы при максимальной скорости).

Передаточная функция ФА определяется как $W_{\text{ФА}}(p) = W_{\text{ТЗ}}(p)W_{\text{КП}}(p)W_{\text{ИП}}(p)$, откуда с учетом (1) — (3):

$$W_{\text{ФА}}(p) = y(p)/x(p) = K_{\text{ФА}} e^{-p\tau} / [(T_{\text{КП}}p + 1)(T_{\text{ИП}}p + 1)], \quad (4)$$

где $K_{\text{ФА}} = K_{\text{КП}}K_{\text{ИП}} = y(t)/x(t)_{t \rightarrow \infty}$ — передаточный коэффициент прибора.

Динамические свойства автоматического ФА зависят от времени τ запаздывания ТЗ, постоянной времени $T_{\text{КП}}$ и параметров измерительной системы, постоянная времени $T_{\text{ФА}}$, в основном, обусловлена значением $T_{\text{КП}}$. На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости $T_{\text{ФА}}$ от расхода Q жидкости и объема V кюветы. Уменьшить τ можно при сокращении длины подводящего трубопровода, $T_{\text{КП}}$ — при оптимизации объема и конструкции кюветы, увеличении расхода контролируемой жидкости. Быстродействие компенсационной измерительной системы обеспечивается при работе ИП без или с минимальной динамической погрешностью [3]. Для этого скорость изменения входной величины v_x должна быть

меньше максимальной скорости v_p компенсации разбаланса. Для ФА условие $v_x < v_p$ можно представить в виде уравнения

$$X / T_{\text{КП}} < v_p = \Delta / t_p,$$

где X — амплитуда скачкообразного изменения входной величины; t_p , Δ — время и перемещение компенсатора (указателя) до достижения баланса измерительной системы; при $X = X_{\text{max}} = \Delta$ работа ИП в режиме слежения соответствует условию $t_p < T_{\text{КП}}$.

Динамическая погрешность СИ — разность между действительным значением измеряемой величины и его значением, определенным по показанию прибора в один и тот же момент времени. Соответственно, функция динамической погрешности фотометрического анализатора выражается в виде

$$\varepsilon(t) = x(t)y(t)/K_{\text{ФА}} \text{ или } \varepsilon(p) = x(p)y(p)/K_{\text{ФА}},$$

а после преобразований с учетом (4)

$$\varepsilon(p) = x(p) [1 - W_{\text{ФА}}(p)/K_{\text{ФА}}].$$

Определение рефрактометрической константы — показателя преломления и концентрации веществ на основе функциональной связи с показателем преломления в бинарных средах — распространено в практике контроля технологических сред. Анализ тройных и более сложных смесей также часто осуществляется рефрактометрическим методом с определением иных физических свойств или с химической пробоподготовкой контролируемой жидкости и последующим расчетом по определенному алгоритму.

Автоматические рефрактометрические анализаторы (РА) для контроля относительно прозрачных жидкостей наиболее часто основаны на методе жидкостной разностной призмы Андерсона (дифференциальный метод) [4]. Базовый тип разностной кюветы включает две емкости — проточную для контролируемой жидкости с показателем преломления n и замкнутую со сравнительной жидкостью с известным показателем преломления n_3 , размещающую внутри проточной для выравнивания температур жидкостей (рис. 3).

Структурная схема РА аналогична приведенной на рис. 1 для ФА, компенсатор K выполнен в виде механизма перемещения фотоприемника. Изменение показателя преломления n (концентрации) контролируемой жидкости вызывает отклонение луча β , выходящего из кюветы, пропорциональное $\Delta n = n - n_3$. На основе данной зависимости формируется информативный параметр рефрактометрического анализатора — изменение угла отклонения (перемещения) луча, выходящего из кюветы, и статическая характеристика $\beta = \Delta n \tan \gamma$, где γ — угол между входящим лучом и перпендикуляром к границе раздела проточной и замкнутой емкостей. Анализаторы измеряют относительное значение показателя преломления и градуируются в единицах показателя преломления (разности), концентрации или относительных единицах.

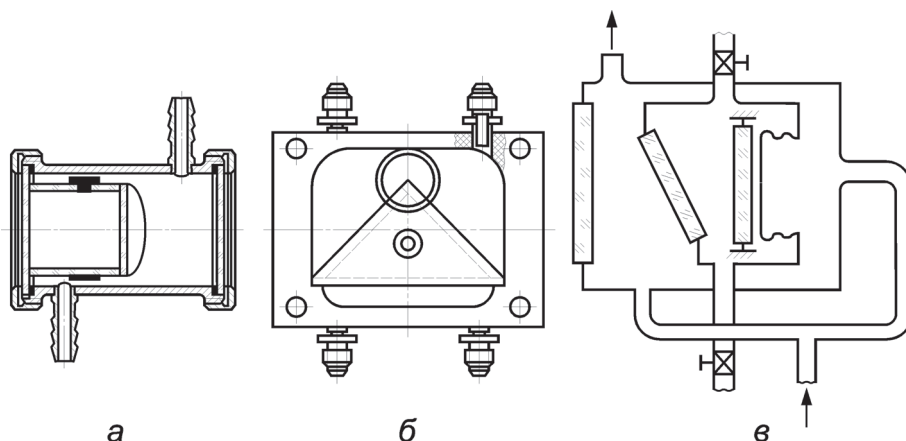


Рис. 3. Разностные кюветы с замкнутыми емкостями разных типов: а — с расположением над входным штуцером; б — в виде полый призмы с двумя преломляющими гранями; в — с сифонным компенсатором давления жидкости

При постоянной температуре контролируемой жидкости передаточные функции кюветы и РА описываются уравнениями, аналогичными (2), (4), и последняя функция имеет вид

$$W_{\text{РА}}(p) = y(p)/x(p) = K_{\text{РА}} e^{-p\tau} / [(T_{\text{КП}}p + 1)(T_{\text{ИП}}p + 1)],$$

где $K_{\text{РА}} = K_{\text{КП}}K_{\text{ИП}} = y(t)/x(t)_{t \rightarrow \infty}$ — передаточные коэффициенты РА.

В указанных температурных условиях при работе ИП в режиме слежения и входном воздействии $x(p) = x_0/p$ динамическую погрешность $\varepsilon(t)$ и ее интегральное значение ε можно определить как

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} x_0 & \text{при } 0 < t < \tau; \\ x_0 e^{-(t-\tau)/T_{\text{КП}}} & \text{при } t > \tau; \end{cases}$$

$$\varepsilon = 4(\tau + T_{\text{КП}}).$$

При рефрактометрических измерениях основным неинформативным параметром является температура контролируемой жидкости. В упрощенном виде зависимость показателя преломления от температуры имеет вид

$$n = n_0 + b(\theta - \theta_0),$$

где n , n_0 — показатели преломления при текущей θ и начальной θ_0 температурах; b — температурный градиент показателя преломления контролируемой жидкости.

Температуры контролируемой и сравнительной жидкостей функционально связаны: при изменении температуры контро-

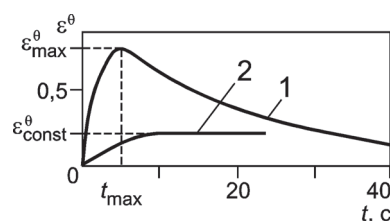


Рис. 4. Динамическая погрешность рефрактометрического анализатора при изменении температуры жидкости, двигающейся скачкообразно и с постоянной скоростью, — кривые 1, 2, соответственно

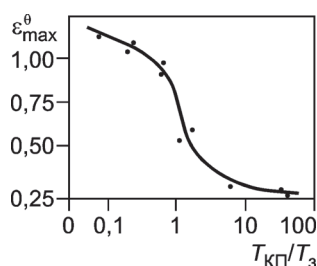


Рис. 5. Зависимость максимальной динамической погрешности рефрактометрического анализатора от отношения постоянных времени кюветы и замкнутой емкости при гармоническом законе изменения температуры θ контролируемой жидкости

жидкостями в проточной и замкнутой емкостях кюветы и носит динамический характер [5].

Передаточные функции замкнутой $W_3^\theta(p)$ и проточной $W_n^\theta(p)$ емкостей кюветы при изменении температуры контролируемой жидкости выражаются как

$$W_3^\theta(p) = \theta_3(p)/\theta_{\text{вх}}(p) = K_3^\theta / [(T_{\text{КП}}p + 1)(T_3p + 1)];$$

$$W_n^\theta(p) = \theta_{\text{вых}}(p)/\theta_{\text{вх}}(p) = K_n^\theta / (T_{\text{КП}}p + 1), \quad T_3 = mC_p/(\alpha S),$$

где θ_3 , $\theta_{\text{вх}}$, $\theta_{\text{вых}}$ — температура жидкости в замкнутой емкости, на входе и выходе проточной емкости; T_3 , S — постоянная времени и площадь стенок замкнутой емкости; m , C , α — масса, теплоемкость, коэффициент теплопередачи сравнительной жидкости; $K_3^\theta = \theta_3(t)/\theta_{\text{вх}}(t)_{t \rightarrow \infty}$, $K_n^\theta = \theta_{\text{вых}}(t)/\theta_{\text{вх}}(t)_{t \rightarrow \infty}$ — передаточные коэффициенты замкнутой и проточной емкостей при изменении температуры.

Передаточная функция динамической погрешности кюветы при изменении температуры контролируемой жидкости $W_{\text{КП}}^\varepsilon$ определяется как разность

функций проточной W_n^θ и замкнутой W_3^θ емкостей

$$W_{\text{КП}}^\varepsilon(p) = b[W_n^\theta(p) - W_3^\theta(p)].$$

При $t \rightarrow \infty$ имеем $\theta_{\text{вых}}(t) = \theta_3(t)$ и $K_3^\theta = K_n^\theta$, тогда

$$W_{\text{КП}}^\varepsilon(p) = K_{\text{КП}}^\theta b T_3 p / [(T_{\text{КП}}p + 1)(T_3p + 1)].$$

Передаточная функция погрешности РА при изменении температуры контролируемой жидкости выражается в виде

$$W_{\text{РА}}^\varepsilon(p) = W_{\text{КП}}^\theta(p) W_{\text{ИП}}^\theta(p) \quad \text{или}$$

$$W_{\text{РА}}^\varepsilon(p) = y(p)/x(p) =$$

$$= K_{\text{РА}}^\theta b T_3 p / [(T_{\text{КП}}p + 1)(T_{\text{ИП}}p + 1)(T_3p + 1)].$$

лируемой жидкости изменяются ее показатель преломления, температура и показатель преломления жидкости в замкнутой емкости кюветы, возникает динамическая погрешность, значение и характер которой зависят от режима и параметров прибора. В фиксированный момент времени динамическую погрешность можно определить согласно функции $\varepsilon^\theta \approx b(\theta - \theta_3)$, где θ_3 — температура сравнительной жидкости. Температурная компенсация ($\varepsilon^\theta \rightarrow 0$) осуществляется в режиме пассивного теплообмена между

Сигнал динамической погрешности при изменении температуры контролируемой жидкости формируется аналогично сигналу информативного параметра, его значение можно определить по отклонению выходного сигнала от установленного значения, т. е. $\varepsilon^\theta(p) = y(p)$, соответственно $\varepsilon^\theta(p) = W_{\text{РА}}^\theta(p)x(p)$.

При скачкообразном изменении температуры контролируемой жидкости на входе в кювету $x(p) = \theta_{\text{вх}}/p$ функцию динамической погрешности $\varepsilon^\theta(t)$ и ее интегральное значение ε^θ можно определить из уравнений

$$\varepsilon^\theta(t) = bT_3\theta_{\text{вх}} \{ [T_{\text{КП}}/(T_{\text{КП}} - T_3)] e^{-t/T_{\text{КП}}} + [T_3/(T_{\text{КП}} - T_3)] e^{-t/T_3} \};$$

$$\varepsilon^\theta = bT_3\theta_{\text{вх}}.$$

Зависимости динамической погрешности РА при постоянном и скачкообразном изменении температуры показаны на рис. 4. Снизить эту погрешность можно путем оптимизации m , C_p , S , α и уменьшения T_3 . В связи с трудностями теоретического исследования значение T_3 определяли экспериментально. При исследовании и расчетах приняли условия $T_3 \gg T_{\text{КП}}$; $\varepsilon^\theta(t) = \varepsilon_{\text{max}}^\theta$; $t = t_{\text{max}}$. Тогда уравнение постоянной времени имеет вид

$$T_3 = t_{\text{max}} / \ln(b\theta_{\text{вх}}/\varepsilon_{\text{max}}^\theta).$$

При проверке условия $T_3 \gg T_{\text{КП}}$ было установлено, что при $T_3/T_{\text{КП}} = 2...30$ погрешность аппроксимации не превышает 1 с. При изменении температуры контролируемой жидкости с постоянной скоростью для входного воздействия $x(p) = v_\theta/p^2$ с учетом амплитуды X уравнение постоянной времени приобретает вид

$$T_3 = \varepsilon_{v\theta} / (bv_\theta),$$

где $\varepsilon_{v\theta}$ — установившееся значение динамической погрешности; v_θ — скорость изменения температуры контролируемой жидкости.

Значения $\varepsilon_{\text{max}}^\theta$, t_{max} определяли по диаграммной ленте. В таблице приведены экспериментальные значения параметров кювет разного типа.

Параметр	Значение							
V , см ³	2	2	2	5	5	5	2	5
S , см ²	20	20	11	28	28	28	11	28
$\theta_{\text{вх}}$, °C	2	3	4	4	5	6	—	—
t_{max} , с	9	9	10	15	17	20	—	—
$\varepsilon_{\text{max}}^\theta$, деление шкалы	20	32	17,8	22	17	31,1	—	—
$b\theta_{\text{max}}$, деление шкалы	30	45,6	22,2	27	34	41	—	—
v_θ , °C/с	—	—	—	—	—	—	0,016	0,018
$\varepsilon_{v\theta}$, деление шкалы	—	—	—	—	—	—	4,45	9
bv_θ , деление шкалы/с	—	—	—	—	—	—	0,09	0,118
$\Delta\eta_{\text{max}} \cdot 10^{-4}$	6,6	6,6	18	14,6	14,6	14,6	18	14,6
T_3 , с	23	26	45	75	78	74	49	76

В процессе эксплуатации РА при постоянных конструктивных параметрах проточной и замкнутой емкостей температурная динамическая погрешность может меняться в зависимости от расхода контролируемой жидкости, т. е. для разных значений постоянных времени $T_{\text{кп}}$. На рис. 5 представлена зависимость максимального значения динамической погрешности рефрактометрического анализатора от отношения $T_{\text{кп}}/T_3$ при гармоническом законе изменения температуры контролируемой жидкости.

Детализированная передаточная функция кюветы с проточной и замкнутой емкостями при изменении температуры контролируемой жидкости определяется как

$$W_{\text{кп}}^{\theta} = \varepsilon^{\theta}(p)/\theta(p) = [kbT_3p(T_0p + 1)] / [(T_0p + 1)(T_3p + 1) \times (T_0p + 1) - k_1(T_{\text{вх}}p + 1)]. \quad (5)$$

Здесь $k = Q_c / (Q_c + \alpha_c S_c + \alpha_3 S_3)$; $T_3 = m_3 C / (\alpha_3 S_3)$; $T_c = mC_{pc} / (\alpha_c S_c)$; $T_0 = mC_p / (Q_c + \alpha_c S_c + \alpha_3 S_3)$; $k_1 = (\alpha_c S_c + \alpha_3 S_3) / (Q_c + \alpha_c S_c + \alpha_3 S_3)$; $T_{\text{вх}} = (\alpha_c S_c T_3 + \alpha_3 S_3 T_c) / (\alpha_3 S_3 + \alpha_c S_c)$; нижним индексом «с» обозначены величины, относящиеся к стенкам кюветы.

В уравнении (5) входная величина — изменение температуры контролируемой жидкости $\theta(p)$ от начального значения θ_0 ($\theta_0 = \theta_{30}$; $\varepsilon_0^{\theta}(p) = 0$), выходная — температурная погрешность $\varepsilon^{\theta}(p)$. При расходе жидкости через проточную емкость $Q \rightarrow \infty$; $k_1 \rightarrow 0$; $k \rightarrow 1$. Если полагать расход Q большим и $k_1 = 0$, то (5) можно записать как

$$W_{\text{кп}}^{\theta}(p) = bT_3p / [(T_0p + 1)(T_3p + 1)]. \quad (6)$$

В общем случае температурная погрешность прибора будет иметь вид

$$\varepsilon^{\theta}(p) = \{[(bkT_3/a_1)(T_0p + 1)] / [(p - p_1)(p - p_2)(p - p_3)]\} \theta(p),$$

где $a_1 = T_0 T_3 T_c$; p_1, p_2, p_3 — корни характеристического уравнения.

Решение характеристического уравнения позволяет вычислить коэффициенты и поправки для (5). Они отображают влияние составляющих на тепловые процессы в кювете, учитывают влияние $T_{\text{вх}}$ и параметров стенок кюветы T_c . Зная параметры кюветы, коэффициенты и поправки, можно определить $\Delta\varepsilon^{\theta}(p)$ в интервале 10—30 с, когда эта погрешность достигает максимума. Если для данного интервала выполняется условие $[\Delta\varepsilon^{\theta}(p) / \varepsilon_{\text{max}}^{\theta}] \ll 1$, где $\varepsilon_{\text{max}}^{\theta}$ определяется из уравнения температурной погрешности с передаточной функцией (6), то уравнение (5) позволяет получить достаточно точный результат. В других случаях передаточная функция запишется как

$$W_{\text{кп}}^{\theta}(p) = (bkT_3/a_1) \{[(T_0p + 1)] / [(p - p_1)(p - p_2)(p - p_3)]\}.$$

В некоторых ситуациях режим $Q \rightarrow \infty$ недопустим из-за конструктивных и методических факторов, так как увеличение расхода может привести к появлению мертвых зон, ухудшению перемешивания и др. Таким образом, модель проточной кюветы ограничена значением Q_{max} . В то же время при контроле, например, вязких полимеризующихся пластмасс, масел для обеспечения эффективного потока необходимо увеличивать расход жидкости. Задачу можно решить применением РА с цилиндрической кюветой с внутренним протоком, в которой расход жидкости неограничен и отсутствуют застойные зоны. По результатам исследования моделей РА в одинаковых условиях установили, что в случае анализатора с кюветой с внутренним протоком T_3 и, соответственно, $\Delta\varepsilon^{\theta}(p)$ меньше, чем у РА с кюветой с внешним протоком.

К полным динамическим метрологическим характеристикам СИ, описывающим математическую модель динамических свойств, относится дифференциальное уравнение, характеризующее функционирование СИ. Тогда динамику рассмотренных автоматических анализаторов (без звена ТЗ) можно характеризовать линейным дифференциальным уравнением 2-го порядка вида

$$T_{\text{кп}} T_{\text{ип}} d^2 y(t) / dt^2 + (T_{\text{кп}} + T_{\text{ип}}) dy(t) / dt + y(t) = K_{\text{кп}} K_{\text{ип}} x(t)$$

и соответствующим уравнением динамической погрешности

$$\varepsilon(p) = (T_{\text{кп}} T_{\text{ип}} p + T_{\text{кп}} + T_{\text{ип}}) p X(p).$$

Л и т е р а т у р а

1. **ГОСТ 8.009—84.** ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
2. **ГОСТ 8.256—77.** ГСИ. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. Основные положения.
3. **Котченко Д. Д.** Следящие системы автоматических компенсаторов. М.: Недра, 1965.
4. **Карабегов М. А.** Автоматические рефрактометры разностной призмы для контроля технологических жидкостей // Измерительная техника. 2007. № 6. С. 31—37; **Karabegov M. A.** Automatic differential prism refractometer for monitoring process liquids // Measurement Techniques. 2007. V. 50. N 6. P. 619—628.
5. **Карабегов М. А., Налбандов Л. В., Хуршудян С. А.** Исследование автоматических оптико-аналитических приборов контроля состава жидкостей в динамическом режиме // Труды метролог. ин-тов СССР. 1976. Вып. 193(253). С. 28—35.

Дата принятия 05.12.2011 г.