

И л ь и н а И р и н а Л ь в о в н а

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ
ЦИКЛИЧЕСКОГО КУЛОНОМЕТРИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ
МИКРОВЛАЖНОСТИ ГАЗОВ**

С п е ц и а л ь н о с т ь 0 5 . 1 1 . 1 3 — Приборы и методы контроля
природной среды, веществ,
материалов и изделий.

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Т о 1 2 0 0 2 г .

Работа выполнена на кафедре промышленной электроники и информационно – измерительной техники Ангарской государственной технической академии.

Научный руководитель:	Бадеников Виктор Яковлевич д.т.н., профессор АГТА, г. Ангарск
Научный консультант:	Кузнецов Борис Федорович к.т.н., доцент АГТА, г. Ангарск
Официальные оппоненты:	Ройтман Марсель Самуилович д.т.н., профессор ТПУ, г. Томск; Салов Валерий Михайлович к.т.н., профессор ИрГТУ, г. Иркутск
Ведущая организация:	Федеральное государственное унитарное предприятие "Восточно-Сибирский научно-исследовательский институт физико- технических и радиотехнических измерений" г. Иркутск

Защита диссертации состоится “ 9 ” декабря 2002 г. в 15 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.269.09 при Томском политехническом университете по адресу: Россия, 634034, г. Томск, ул. Савиных, 3, библиотека НИИ интероскопии.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан “8” ноября 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета

Б.Б.Винокуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Развитие новых технологий, совершенствование уже существующих, повышение требований к качеству продукции приводят к необходимости измерения тех параметров, контроль которых ранее не требовался, либо ужесточают требования к точности и расширению диапазона измерения параметров технологических процессов. Одним из таких параметров является влажность. Контроль влажности необходим во многих технологических процессах химии, нефтехимии, нефтепереработки, электронной промышленности, при транспортировке и переработке природного газа. В настоящее время наиболее актуальной проблемой является измерение микроконцентраций влажности в широком круге анализируемых сред. Так в электронной промышленности при производстве интегральных схем требуется контроль влажности в гидридах (арсин, фосфин, моносилан) в пределах единиц ppm. Как правило, полученная при измерении информация используется для формирования управляющих воздействий, то есть предъявляются жесткие требования к метрологическим характеристикам измерительных преобразователей, в том числе и динамическим.

Обзор методов измерения микроконцентраций влажности, выполненный автором, выявил общий недостаток, присущий почти всем методам: необходимость градуировки измерительных преобразователей по образцовым смесям, создание которых в области микроконцентраций достаточно сложно. Только два метода не требуют градуировки приборов по образцовым смесям: метод точки росы и кулонометрический метод. Наиболее перспективным из них является кулонометрический метод при использовании циклического принципа работы измерительного преобразователя, который позволяет минимизировать погрешность от фоновых токов и измерять влажность газов, реагирующих с продуктами электролиза воды.

Одной из основных задач, которая решается при разработке измерительного преобразователя, является минимизация его погрешности. Приведенный анализ работы циклического кулонометрического измерительного преобразователя показывает, что статическая и динамическая составляющие погрешности являются взаимосвязанными величинами. При этом при увеличении динамической составляющей погрешности наблюдается уменьшение статической составляющей и наоборот. Показано, что суммарная погрешность измерительного преобразователя циклического действия имеет минимум.

Очевидной является зависимость динамической погрешности не только от параметров измерительного преобразователя, но и от скорости изменения измеряемой величины – параметра технологического процесса. В реальных условиях измеряемый параметр подвержен влиянию ряда недетерминированных воздействий: изменение характеристик сырья и материалов, технологического оборудования, условий окружающей среды. Поэтому использование модели входного воздействия в виде стационарного случайного процесса представляется адекватным описанием технологических параметров.

Основным препятствием при разработке измерительных преобразователей циклического действия является отсутствие математической модели, позволяющей оптимизировать его параметры.

Таким образом, разработка моделей и методов оптимизации параметров циклических преобразователей позволит создавать эффективные измерительные преобразователи микроконцентраций влажности.

Цель работы и задачи исследования

Основной целью настоящей работы является разработка метода оптимизации параметров циклического кулонометрического измерительного преобразователя по критерию минимума суммарной погрешности в случае, когда входной сигнал представлен как стационарный случайный процесс.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд следующих задач:

- разработать модель циклического кулонометрического измерительного преобразователя и найти аналитическое выражение для его статической характеристики;
- получить зависимость погрешности преобразователя от длительности времени измерения и определить время измерения, обеспечивающее значение погрешности не превышающее заданное;
- установить теоретическую зависимость динамической погрешности от длительности цикла работы преобразователя и параметров входного сигнала;
- найти зависимость погрешности от фоновых токов чувствительного элемента;
- на основании зависимостей динамической погрешности от времени накопления и погрешности от фонового тока получить зависимости, позволяющие оптимизировать цикл работы преобразователя по критерию минимума суммарной погрешности;
- проверить полученные теоретически зависимости, минимизирующие суммарную погрешность преобразователя, с помощью имитационной модели.

Методы исследования.

При решении поставленных задач использованы современные методы теории случайных процессов, статистического анализа, имитационного моделирования, метрологии.

Научная новизна данной работы состоит в следующем:

- создана математическая модель циклического кулонометрического измерительного преобразователя;
- получена теоретическая зависимость динамической погрешности преобразователя циклического действия от длительности цикла его работы и параметров входного сигнала;
- разработан метод минимизации суммарной погрешности преобразователя циклического действия.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

- разработан метод параметрической оптимизации циклического кулонометрического измерительного преобразователя для случая, когда измеряемый параметр представлен как случайный стационарный процесс с известными статистическими характеристиками;

- разработанная методика принята для использования в ОАО «Ангарское опытно-конструкторское бюро автоматики» при проектировании циклических кулонометрических датчиков влажности;
- результаты исследований используются в учебном процессе Ангарской государственной технической академии в курсах «Метрология, стандартизация и сертификация», «Технологические измерения и приборы», «Электрические измерения неэлектрических величин».

Положения, выносимые на защиту

- математическая модель циклического кулонометрического измерительного преобразователя;
- метод параметрической оптимизации циклического кулонометрического измерительного преобразователя для случаев, когда входной сигнал представлен как стационарный случайный процесс.

Апробация работы.

Данная работа выполнена на кафедре промышленной электроники и информационно – измерительной техники Ангарской государственной технической академии. Результаты работы докладывались и обсуждались на заседаниях научного семинара факультета технической кибернетики АГТА, на научно-технической конференции «Современные технологии и научно-технический прогресс», на IV региональной конференции «Интеллектуальные и материальные ресурсы Сибири», на XV Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях».

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения, изложенных на страницах 117, иллюстрируется 41 рисунком, содержит 34 таблицы, список литературы, включающий 110 наименований. Приложение содержит рекомендации по параметрической оптимизации циклического кулонометрического измерительного преобразователя и программу расчета динамической и суммарной погрешности.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, рассматриваемой в работе, определены цель и задачи исследования, выделены основные положения, отражающие новизну и практическую значимость выполненной работы.

Первая глава диссертации посвящена анализу методов измерения микроконцентраций влажности и обоснованию выбора циклического кулонометрического метода измерения. Здесь же рассмотрен вопрос о выборе математической модели входного воздействия. Сформулированы цель и основные задачи работы.

При анализе методов измерения микроконцентраций влажности в газах показано, что практически всем им присущ существенный недостаток: необходимость градуировки измерительных преобразователей по образцовым смесям, создание которых в области микроконцентраций представляет сложную задачу. Только два метода не требуют градуировки по образцовым смесям: метод точки росы и кулонометрический метод. Наиболее перспективным из них является ку-

лонометрический метод, отличающийся высокой точностью, а так же простотой и надежностью чувствительного элемента. Но он имеет ряд ограничений:

- при измерении микроконцентраций влаги возникает погрешность из-за наличия фоновго тока, обусловленного неионными механизмами проводимости;
- невозможность измерения влажности газовых смесей, компоненты которых химически реагируют с продуктами электролиза воды.

Использовать достоинства кулонометрического метода и значительно уменьшить его недостатки позволяет циклический принцип работы прибора. Цикличность процесса измерения исключает взаимодействие анализируемого газа с продуктами электролиза воды, за счет чего обеспечивается достоверность контроля влаги, а при измерении ультрамалых концентраций позволяет накопить в слое сорбента такое количество влаги, которое минимизирует погрешность от наличия фоновго тока.

Технологические параметры можно рассматривать как случайные процессы, так как на них оказывают влияние, как различные недетерминированные внешние воздействия, так и изменения характеристик технологического оборудования. С другой стороны, оценка погрешности при случайном воздействии дает некоторую усредненную величину погрешности по ансамблю сигналов, а не по одному какому-либо элементарному сигналу. Это является важным доводом в пользу таких оценок. Таким образом, использование модели входного воздействия в виде случайного процесса представляется адекватным описанием параметров химико-технологических процессов.

Во второй главе предложена модель циклического кулонометрического измерительного преобразователя и получена его статическая характеристика. Статическая характеристика гигрометра представляет собой зависимость количества электричества, затраченного на электролиз накопленной в чувствительном элементе влаги, от влажности анализируемого газа и параметров преобразователя. Упрощенная функциональная схема циклического кулонометрического измерительного преобразователя представлена на рис.1.

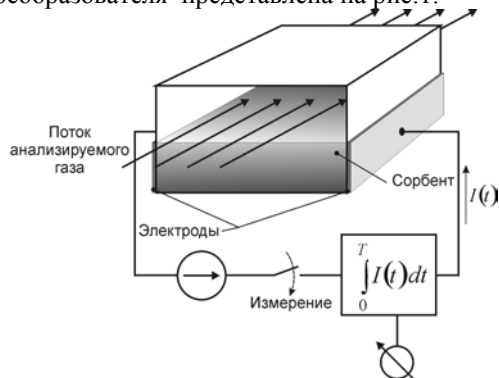


Рис.1. Функциональная схема циклического кулонометрического измерительного преобразователя

В коробе прямоугольного сечения размещены два параллельных электрода, между которыми нанесена пленка сорбента. Над поверхностью пленки пропус-

кается анализируемый газ. Принцип работы преобразователя заключается в поглощении влаги из анализируемого газа пленкой сорбента. При этом напряжение на электродах отсутствует. Затем к электродам подключается напряжение питания и происходит электролиз накопленной в сорбенте влаги.

При расчете формы импульса тока приняты следующие допущения:

1. Граница фронта увлажнения представляет собой плоскость, расположенную перпендикулярно направлению движения газового потока.
2. Напряжение питания значительно больше потенциала разложения воды.

Количество влаги M_1 в граммах, поступившей в кулонометрический чувствительный элемент за время накопления T_n , определяется выражением

$$M_1 = c_0 G T_n, \quad (1)$$

где c_0 – концентрация влаги в анализируемом газе, г/м³; G – расход анализируемого газа, м³/с; T_n – время накопления влаги из анализируемого газа в чувствительном элементе с.

С другой стороны, количество поглощенной в чувствительном элементе влаги M_2 , определяется формулой

$$M_2 = a_0 l h x_0, \quad (2)$$

где a_0 – концентрация влаги в сорбенте, определяемая изотермой сорбции $a_0 = f(c_0)$, г/м³; l – расстояние между электродами, м; h – высота слоя сорбента, м; x_0 – длина увлажненного слоя, м.

При условии полного поглощения влаги из анализируемого газа в чувствительном элементе $M_1 = M_2$, и длина увлажненного слоя сорбента определяется выражением

$$x_0 = \frac{c_0 G T_n}{l h f(c_0)}. \quad (3)$$

Согласно закону Фарадея изменение массы воды в пленке сорбента за счет ее разложения на электродах за время Δt выражается уравнением

$$\Delta M = - \frac{\mu I \Delta t}{n F},$$

где μ – молекулярная масса воды, г; I – ток электролиза, А; n – количество электронов, участвующих в разложении одной молекулы воды; F – число Фарадея, Кл.

На основании этих зависимостей получено дифференциальное уравнение

вида: $\frac{dI}{dt} = -\alpha \cdot I^{\frac{1}{2}}$, где $\alpha = \frac{2\mu}{nFl} \cdot \sqrt{\frac{Ukf(c_0)}{c_0 G T_n}}$.

Решение этого уравнения с учетом начальных условий (при $t=0$

$I = I_0 = \frac{Ukf(c_0)c_0 G T_n}{l^2}$) представляет собой зависимость тока электролиза от времени

$$I = \frac{I_0}{\left(\frac{t}{\tau} + 1\right)^2}, \quad (4)$$

где $\tau = \frac{2nFl^2}{\mu U k f(c_0)}$ – время, через которое амплитуда тока уменьшится в четыре раза по сравнению с начальным значением I_0 .

Интегрируя это выражение в пределах от нуля до бесконечности и подставляя значения для I_0 и α , получим статическую характеристику циклического кулонометрического преобразователя

$$Q = \frac{c_0 G T_u n F}{\mu}. \quad (5)$$

Из формулы видно, что количество электричества, затраченного на электролиз накопленной влаги, зависит только от влажности анализируемого газа и параметров прибора – расхода газа и времени накопления.

Эта зависимость справедлива для времени измерения (времени электролиза) равного бесконечности. На практике время измерения ограничено, что приводит к неполному извлечению влаги из чувствительного элемента и, соответственно, погрешности измерения. Составляющую абсолютной статической погрешности кулонометрического преобразователя циклического действия за счет неполного извлечения влаги из чувствительного элемента можно определить из соотношения $\Delta = \tau I_0 / (T_u / \tau + 1)$. Относительная погрешность измерения определяется выражением $\delta = 1 / (T_u / \tau + 1)$.

Аналогичные зависимости получены и для цилиндрического чувствительного элемента, приведенного на рис.2.

Во внутреннем канале стеклянного цилиндрического корпуса помещены два платиновых электрода, выполненных в виде геликоидальных несоприкасающихся спиралей. Между электродами нанесена пленка частично гидратированной пятиокиси фосфора. В этом случае значение временной характеристики преобразователя определяется выражением $\tau = \frac{n F d^2}{\mu U k f(c_0)}$, где d диаметр электродов, а статическая

характеристика – ранее полученным уравнением $Q = \frac{c_0 G T_u n F}{\mu}$.

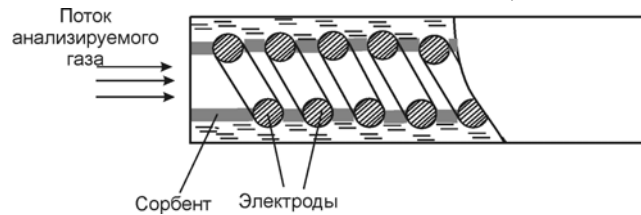


Рис. 2. Кулонометрический чувствительный элемент

Третья глава посвящена экспериментальному подтверждению полученных теоретических зависимостей. Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис.3.

Экспериментально получены кривые зависимости тока электролиза от времени при различных значениях влажности анализируемого газа и времени накопления. Кривые аппроксимированы полученной теоретической зависимо-

стью тока электролиза от времени. На рис.4 приведены экспериментальные и аппроксимирующие кривые для влажности анализируемого газа 46 ppm и времени накопления равного 1, 2, 3, 4 и 5 минутам. Среднеквадратичная погрешность аппроксимации не превышает 2%.

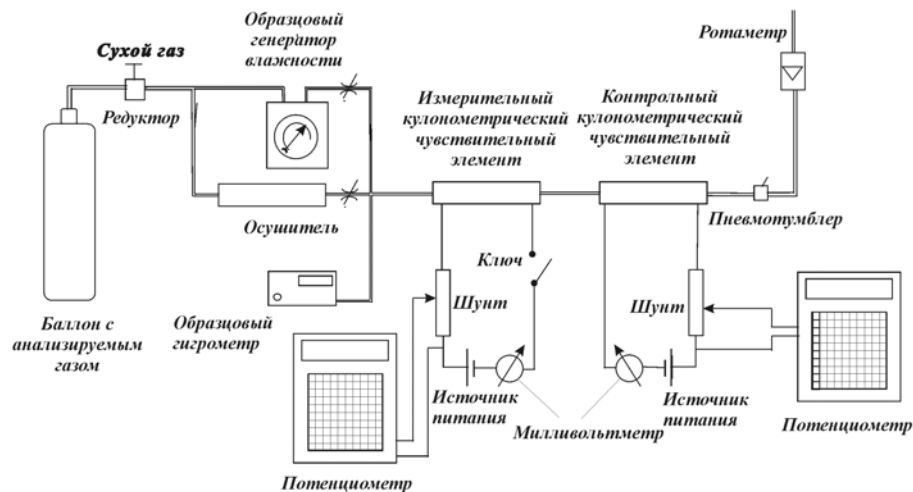


Рис.3. Принципиальная схема экспериментальной установки

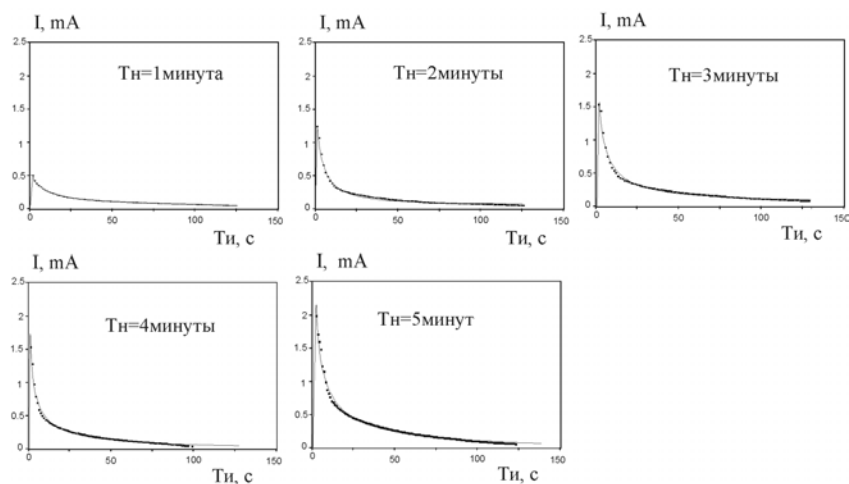


Рис.4. Зависимость тока электролиза от времени при влажности анализируемого газа 46 ppm

Количество электричества, затраченное на электролиз накопленной влаги, фиксировалось интегратором. По формуле (5) было рассчитано теоретическое значение количества электричества. Экспериментально полученные и рассчитанные статистические характеристики приведены на рис. 5. Погрешность измерения составила 12%, что значительно превышает допустимое для эксперимента

значение. Такое занижение показаний объясняется тем, что время измерения составило 3 минуты.

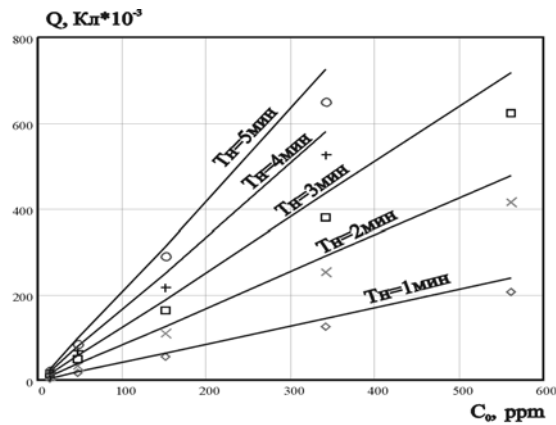


Рис. 5. Графики статических характеристик.

○ + □ × ◇ - экспериментальные значения для различного времени накопления;
— - рассчитанные значения

Уменьшить погрешность за счет неполноты извлечения влаги из чувствительного элемента можно не увеличивая время измерения за счет введения поправочного множителя $\kappa = (T_{II} + \tau)/T_{II}$ к показаниям интегратора. При значении времени измерения $T_{II}=180$ с и среднем значении временной характеристики преобразователя $\tau_{cp}=24.5$ с $\kappa=1.13$.

Для определения максимального времени накопления и проверки допущений, сделанных при выводе формулы статической характеристики, получена зависимость количества электричества от времени накопления для различных значений влажности анализируемого газа (рис.6).

На экспериментальных кривых можно выделить три участка. Первый участок - прямолинейный, что соответствует полному поглощению влаги чувствительным элементом. Второй участок является криволинейным из-за частичного "проскока" влаги, который фиксируется контрольным чувствительным элементом. Третий участок, представляющий собой прямую, параллельную оси времени, соответствует полному насыщению измерительного чувствительного элемента.

На основании полученной экспериментально зависимости количества электричества от времени накопления можно сделать ряд выводов:

1. Графики зависимости в рабочем диапазоне циклического кулонометрического преобразователя прямолинейны.
2. Переходной интервал незначителен, и это позволяет сделать вывод, что принятое допущение о том, что граница фронта увлажнения прямолинейна и перпендикулярна направлению движения газового потока, справедливо.

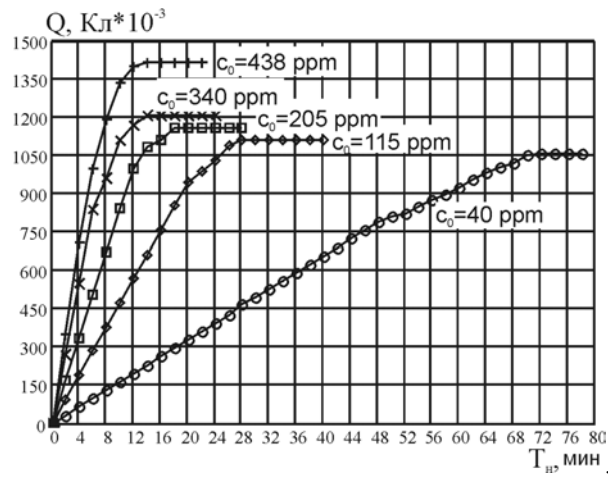


Рис.6. Зависимость количества электричества от времени накопления

Экспериментально проверена также зависимость временной характеристики преобразователя от напряжения питания, приложенного к электродам чувствительного элемента.

График зависимости относительного значения временной характеристики преобразователя от напряжения питания приведен на рис. 7. Экспериментальные точки аппроксимированы зависимостью вида A_0/U . При значении $A_0=9.2$ среднеквадратическая погрешность аппроксимации равна 0.03.

На основании анализа экспериментальных данных можно сделать вывод об адекватности полученной модели циклического кулонометрического измерительного преобразователя реальному объекту исследования.

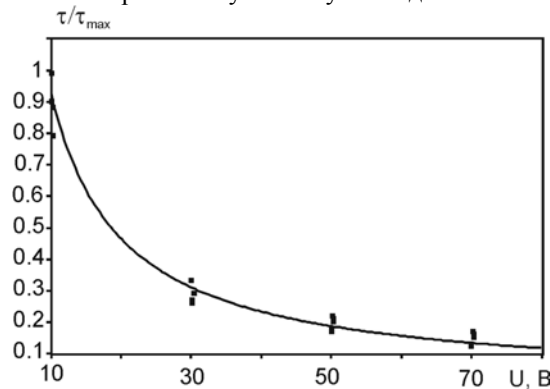


Рис.7. Зависимость относительного значения постоянной преобразователя от напряжения питания; $\blacklozenge$ - экспериментальные данные, — аппроксимирующая кривая

В четвертой главе выведена зависимость динамической погрешности измерительного преобразователя, возникающей за счет дискретизации и накопле-

ния непрерывного входного сигнала, от параметров преобразователя и статистических характеристик входного воздействия.

Цикличность процесса измерения приводит к появлению динамической погрешности преобразователя, вызванной тем, что дискретный процесс лишь приближенно повторяет непрерывный процесс на входе преобразователя. Эта погрешность тем больше, чем длительнее цикл работы, то есть чем больше шаг дискретизации. В общем случае погрешность дискретной аппроксимации непрерывных сигналов зависит от шага дискретизации, метода дискретизации, вида входного сигнала, характеристик системы и от выбранной числовой меры погрешности. В первую очередь необходимо определить вид входного сигнала. В работе проведен анализ двух параметров технологического процесса получения этилена: влажность пирогаза на выходе процесса осушки и влажность этилена на выходе процесса осушки. Как показано автором и в ряде работ, использование модели входного воздействия в виде случайного процесса представляется адекватным описанием параметров химико-технологического процесса.

Спектральный состав входного сигнала можно характеризовать функцией спектральной плотности или автокорреляционной функцией. На основании анализа исследуемых параметров показано, что использование в качестве модели случайного процесса нормированной автокорреляционной функции экспоненциального вида позволяет получить достаточную точность аппроксимации.

Ошибку выходного сигнала, вызванную дискретизацией непрерывного входного сигнала импульсным элементом и равную $\Delta U(t) = U(t) - Y^*(t)$, можно представить как выходной сигнал схемы (рис.8).

На схеме: $U(t)$ – входной аналоговый сигнал преобразователя; ИЭ – импульсный элемент; $U[n]$ – дискретизированный входной сигнал; ИФ – интерполирующий фильтр (формирующий элемент); $U^*(t)$ – восстановленный сигнал; К – непрерывная часть преобразователя; $Y^*(t)$ – выходной сигнал преобразователя.

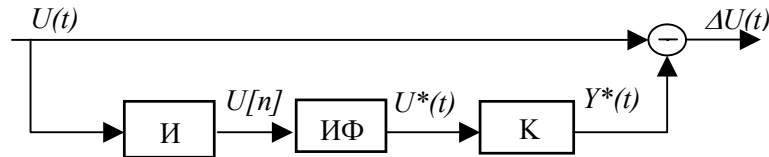


Рис.8. Структурная схема преобразователя циклического действия

Дисперсия ошибки выходного сигнала $\Delta U^*(t)$ данной схемы можно вычисляется по известной формуле

$$\sigma_{\text{ош}}^2 = \int_0^{\infty} \left\{ G(\omega) \left[1 - \frac{2}{T} \operatorname{Re} K(i\omega) K_0(i\omega) \right] + \frac{1}{T} \Phi(\omega) |K(i\omega) K_0(i\omega)|^2 \right\} d\omega, \quad (6)$$

где T – период дискретизации исходного непрерывного процесса; $K_0(i\omega)$ – передаточная функция интерполирующего фильтра; $K(i\omega)$ – передаточная функция приведенной непрерывной части преобразователя; $\Phi(\omega)$ – спектральная

плотность мощности дискретного случайного процесса на выходе импульсного

$$\text{элемента } \Phi(\omega) = \frac{sh \omega_* T}{ch \omega_* T + \cos \omega T}.$$

Цикл работы преобразователя состоит из двух основных составляющих: времени накопления и времени измерения $T_{\text{ц}} = T_H + T_{\text{И}}$. В преобразователях циклического действия динамическая погрешность вызвана не только дискретизацией входного сигнала, но и длительностью процессов накопления и измерения входной величины. В этом случае восстановление сигнала может быть выполнено ступенчатой симметричной интерполяцией, на основе метода прямоугольников со сдвигом на величину $(1.5 T_H + T_{\text{И}})$ от начального значения. Это позволяет использовать зависимость (6) для описания работы преобразователя циклического действия.

Преобразуем формулу (6), подставив значения $K_0(i\omega)$, $K(i\omega)=1$, $\Phi(\omega)$ и введем относительную частоту $\varpi = \omega / \omega_*$ и относительные значения времени накопления $T_u^* = T_u \cdot \omega_*$, времени измерения $T_c^* = T_c \cdot \omega_*$, а также переменную Ω равную отношению времени накопления к времени измерения $\Omega = T_H / T_{\text{И}}$. Динамическая погрешность преобразователя циклического действия в этом случае определяется формулой:

$$\delta_{\text{дин}}^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left\{ \frac{2}{\varpi^2 + 1} \cdot \left[1 - 4 \cdot \sin \frac{\varpi \cdot (\Omega + 1) \cdot T_u^*}{2} \cdot \frac{\cos(\varpi \cdot (1.5 \cdot \Omega + 1) \cdot T_u^*)}{\varpi \cdot (\Omega + 1) \cdot T_u^*} \right] + \right. \\ \left. + \frac{4}{(\Omega + 1) \cdot T_u^*} \cdot \frac{sh((\Omega + 1) \cdot T_u^*)}{ch((\Omega + 1) \cdot T_u^* - \cos(\varpi \cdot (\Omega + 1) \cdot T_u^*))} \cdot \frac{\sin^2 \left(\frac{\varpi \cdot (\Omega + 1) \cdot T_u^*}{2} \right)}{\varpi^2} \right\} \cdot d\varpi \quad (7)$$

При эксплуатации измерительных преобразователей в промышленных условиях они достаточно часто включаются как составная часть в информационно-измерительные системы, измерительные каналы которых можно представить как сумму типовых динамических звеньев. Введение в измерительную цепь преобразователя дополнительных элементов приводит к увеличению динамической погрешности. В работе рассмотрено влияние типовых звеньев на динамическую погрешность. На рис.9 приведены зависимости динамической погрешности от параметра Ω для случаев, когда передаточная функция приведенной непрерывной части преобразователя безинерционное звено с коэффициентом усиления равным единице (а) и звено чистого запаздывания при $T_{\text{И}}^* = 0.001$ (б).

В работе получены зависимости динамической погрешности для измерительных преобразователей с различными типовыми передаточными функциями приведенной непрерывной части. Представленные графики иллюстрируют зависимость динамической погрешности измерительного преобразователя циклического действия от его параметров. Однако из-за большой размерности задачи для графического представления зависимости динамической погрешности от возможных соотношений параметров преобразователя для каждого из рассмот-

ренных случаев требуется комплект графиков. Для преодоления этого затруднения на основании результатов исследования, полученных в данной главе, разработана программа, обеспечивающая расчет динамической погрешности в широком диапазоне параметров и для различных структур измерительных преобразователей.

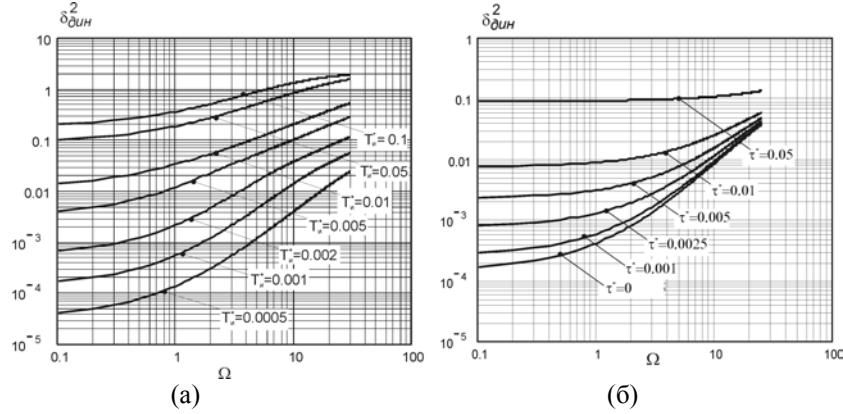


Рис.9. Зависимости динамической погрешности от параметра Ω

В пятой главе предлагается метод параметрической оптимизации циклических преобразователей, находящихся под воздействием стационарных случайных процессов, по критерию минимума суммарной погрешности. В работе показано, что статическая погрешность из-за наличия фонового тока определяется зависимостью:

$$\delta_{\text{ст}} = \beta \frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{н}}} = \frac{\beta}{\Omega} \quad (8),$$

где $\beta = \frac{\mu I_{\phi}}{c_0 G n F}$ - коэффициент, зависящий от параметров измерительного преобразователя и фонового тока.

Учитывая полученное в главе 4 выражение для динамической погрешности, можно определить суммарную погрешность циклического кулонометрического измерительного преобразователя. При определении суммарной погрешности будем исходить из того, что статическая и динамическая составляющие погрешности статистически независимы. В этом случае квадрат суммарной погрешности δ_{Σ}^2 циклического кулонометрического преобразователя определяется выражением

$$\delta_{\Sigma}^2(\Omega, T_{II}^*, \beta) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left\{ \frac{2}{\varpi^2 + 1} \cdot \left[1 - 4 \cdot \sin \frac{\varpi \cdot (\Omega + 1) \cdot T_{II}^*}{2} \cdot \frac{\cos(\varpi \cdot (1.5 \cdot \Omega + 1) \cdot T_{II}^*)}{\varpi \cdot (\Omega + 1) \cdot T_{II}^*} \right] + \right. \\ \left. + \frac{4}{(\Omega + 1) \cdot T_{II}^*} \cdot \frac{sh((\Omega + 1) \cdot T_{II}^*)}{ch((\Omega + 1) \cdot T_{II}^* - \cos(\varpi \cdot (\Omega + 1) \cdot T_{II}^*))} \cdot \frac{\sin^2 \left(\frac{\varpi \cdot (\Omega + 1) \cdot T_{II}^*}{2} \right)}{\varpi^2} \right\} \cdot d\varpi + \left(\frac{\beta}{\Omega} \right)^2 \quad (9)$$

В работе поставлена задача определения параметров измерительного преобразователя циклического действия, при которых суммарная погрешность имеет минимальное значение. В общем случае оптимизация параметров измерительного преобразователя является многокритериальной задачей поиска минимума целевой функции на ограниченном множестве варьируемых параметров. Аналитическое решение этой задачи представляет значительные трудности из-за большого числа варьируемых переменных, часть из которых являются конструктивными параметрами, а также сложности нахождения частных производных. Вследствие этого, предложено решить эту задачу численным методом. Однако, в силу большой размерности задачи (количество переменных свыше трех), графическое представление решения затруднено. Для преодоления этой трудности была разработана программа, позволяющая рассчитывать суммарную погрешность измерительного преобразователя циклического действия в широком диапазоне его параметров.

Характер зависимости суммарной погрешности от параметра Ω иллюстрируется на рис. 10. Кривые имеют минимум при некоторых значениях Ω , которые являются оптимальными для данных значений T_{II}^* и $\beta=0.001$. Возрастание значения T_{II}^* уменьшает оптимальное значение отношения времени накопления к времени измерения Ω . Графики на рис. 10 позволяют определить минимальное значение суммарной погрешности при $\beta=0.01$ и различных значениях T_{II}^* .

По описанной выше методике в данной главе получены зависимости суммарной погрешности преобразователя от параметра Ω для всех перечисленных видов передаточных функций приведенной непрерывной части преобразователя циклического действия и представлены соответствующие графики, которые позволяют наглядно продемонстрировать зависимость суммарной погрешности от различных параметров.

При заданном значении суммарной погрешности для нахождения оптимальных параметров циклического преобразователя в ряде случаев удобнее пользоваться графиком изолиний равной суммарной погрешности, приведенных на рис. 11. Построение графиков изолиний равной суммарной погрешности для $\delta_{\Sigma}(\Omega, T_{II}^*, \beta) = \delta_{зад.}$ и области значений β и T_{II}^* основано на решении уравнения $\delta_{\Sigma}(\Omega, T_{II}^*, \beta) - \delta_{зад} = 0$ относительно β для определенных значений T_{II}^* .

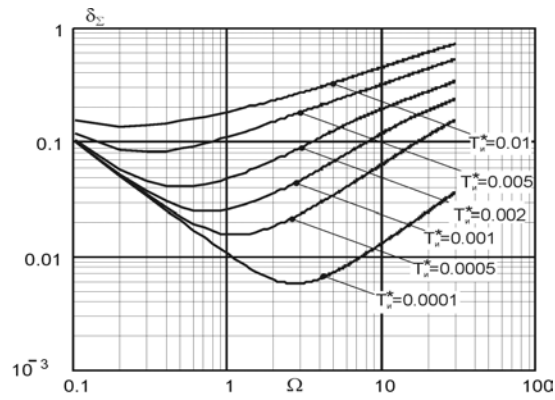


Рис.10. Графики зависимости суммарной погрешности преобразователя от параметра Ω при $\beta=0.01$

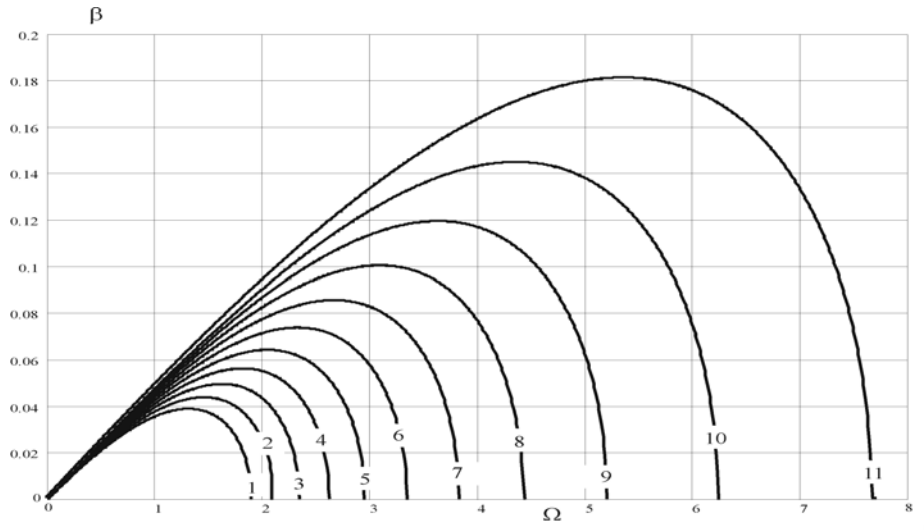


Рис.11. График изолиний квадрата суммарной погрешности $\delta_{\Sigma}^2 = 0.0025$ для различных значений $T_{н}^*$. 1 - $T_{н}^* = 0.0005$; 2 - $T_{н}^* = 0.006$; 3 - $T_{н}^* = 0.00074$; 4 - $T_{н}^* = 0.008$; 5 - $T_{н}^* = 0.0009$; 6 - $T_{н}^* = 0.001$; 7 - $T_{н}^* = 0.0011$; 8 - $T_{н}^* = 0.0012$; 9 - $T_{н}^* = 0.0013$; 10 - $T_{н}^* = 0.0014$; 11 - $T_{н}^* = 0.0015$.

В шестой главе рассматривается имитационная модель циклического кулонометрического измерительного преобразователя.

Полученная в главе 4 теоретическая зависимость динамической погрешности измерительного преобразователя циклического действия от времени накопления требует экспериментальной проверки. Однако проведение физического эксперимента, требующего генерации потока газа с микроконцентрацией влажности, изменяющейся случайным образом, представляет собой достаточно

сложную техническую задачу. Поэтому, как альтернатива физическому эксперименту, была построена математическая имитационная модель измерительного преобразователя циклического действия, позволяющая провести численный эксперимент в диапазоне реальных значений режима работы измерительного преобразователя циклического действия. Проведение модельного эксперимента позволяет решить задачу проверки гипотез об адекватности полученных теоретических зависимостей результатам численного эксперимента.

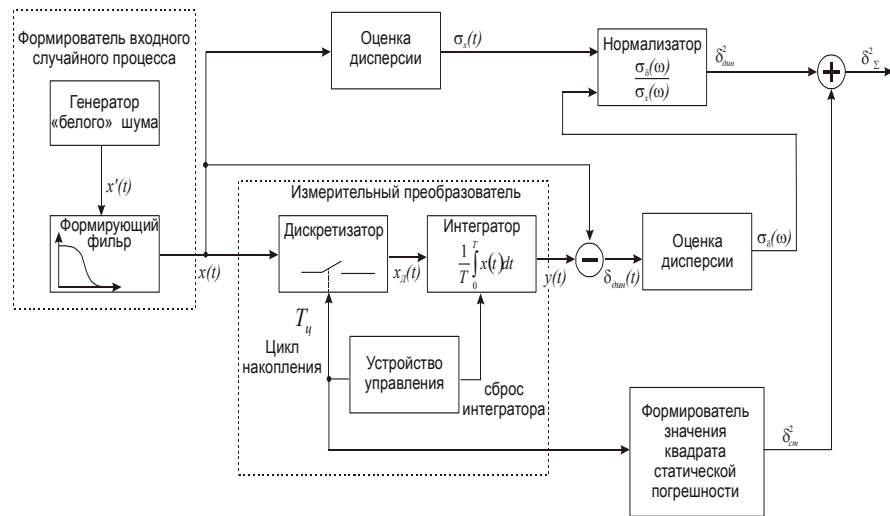


Рис.12. Структурная схема модели

Модель преобразователя циклического действия разработана в пакете моделирования динамических систем Simulink. Структурная схема разработанной модели представлена на рис.12. В состав схемы входят следующие блоки: формирователь входного случайного процесса; измерительный преобразователь, включающий в себя дискретизатор, интегратор и устройство управления; сумматор, формирующий сигнал ошибки; блок оценки дисперсии входного сигнала; блок оценки квадрата динамической погрешности; нормализатор; блок, формирующий квадрат статической погрешности; сумматор, вычисляющий квадрат суммарной погрешности.

На основе построенной модели был проведен ряд численных экспериментов для различных значений $T_{ц}^*$ и Ω .

Для проверки адекватности полученных данных аналитической модели суммарной погрешности измерительного преобразователя циклического действия использовался t – критерий. Критическое значение статистики на уровне значимости $\alpha = 0.05$ составляет 2.262. Во всех случаях вычисленные значения критерия не превышают критического, на основании чего можно полагать, что аналитическая модель динамической погрешности адекватно отображает зависимость погрешности от параметра Ω .

Заключение

Разработан метод оптимизации параметров циклического кулонометрического измерительного преобразователя по критерию минимума суммарной погрешности в случае, когда входной сигнал представлен как стационарный случайный процесс. В ходе проведения теоретических и экспериментальных исследований по тематике работы получены следующие основные научные результаты:

- разработана модель циклического кулонометрического измерительного преобразователя и найдено аналитическое выражение для его статической характеристики;
- получена зависимость погрешности преобразователя от длительности времени измерения и определено время измерения, обеспечивающее значение погрешности не превышающее заданное;
- установлена теоретическая зависимость динамической погрешности преобразователя от длительности цикла работы преобразователя и статистических параметров входного сигнала;
- найдена зависимость статической погрешности от длительности цикла измерения и параметров измерительного преобразователя;
- разработана методика оптимизации параметров циклического кулонометрического преобразователя по критерию минимума суммарной погрешности;
- результаты исследования имитационной модели показали хорошее совпадение экспериментальных и теоретически рассчитанных значений суммарной погрешности циклического кулонометрического измерительного преобразователя.

Основные положения диссертации отражены в работах:

1. Пинхусович Р.Л. Ильина И.Л. Исследование динамических погрешностей приборов циклического действия. //“Современные технологии и научно-технический прогресс”. Тезисы доклада, научно-техническая конференция. Ангарск, 1994. – с. 38.
2. Ильина И.Л., Кнутас Е.В. К вопросу об исследовании динамических погрешностей приборов циклического действия.// “Современные технологии и научно-технический прогресс”. Тезисы доклада, научно-техническая конференция. Ангарск, 1995. – с. 59.
3. Пинхусович Р.Л. Ильина И.Л. Минимизация суммарной погрешности приборов циклического действия. //“Современные технологии и научно-технический прогресс”. Тезисы доклада, научно-техническая конференция. Ангарск, 1996. – с. 76.
4. Пинхусович Р.Л. Ильина И.Л. Минимизация суммарной погрешности приборов циклического действия. //“Современные технологии и научно-технический прогресс”. Тезисы доклада, научно-техническая конференция. Ангарск, 1997. – с. 110-112.
5. Пинхусович Р.Л. Ильина И.Л. Экспериментальное определение статической погрешности преобразователя циклического действия. //“Современные технологии и научно-технический прогресс”. Тезисы доклада, научно-техническая конференция. Ангарск, 1998. – с. 137-138.

6. Пинхусович Р.Л. Ильина И.Л. Минимизация погрешности преобразователей циклического действия. //Известия Восточно-Сибирского отделения метрологической академии. Иркутск, 1999. – с. 37-39.
7. Пинхусович Р.Л. Кузнецов Б.Ф. Ильина И.Л. Оценка эффективности измерительных преобразователей стохастических сигналов.//«Наука, технологии, образование»: тезисы доклада, научно – техническая конференция, Ангарск, 2000 г. – с.24-27.
8. Пинхусович Р.Л. Кузнецов Б.Ф. Ильина И.Л. Параметрическая оптимизация измерительных преобразователей стохастических сигналов. //Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. Москва 2000 г. №2. – с. 62-65.
9. Пинхусович Р.Л., Ильина И.Л., Кузнецов Б.Ф. Модель циклического кулонометрического гигрометра. //Материалы IV региональной конференции «Интеллектуальные и материальные ресурсы Сибири». Иркутск, 2001. – с. 153-160.
10. Пинхусович Р.Л., Кузнецов Б.Ф., Ильина И.Л. Математическое моделирование динамической погрешности измерительного преобразователя циклического действия. //Известия Восточно-Сибирского отделения метрологической академии. Иркутск, 2001. – с. 5-9.
11. Ильина И.Л., Кузнецов Б.Ф., Пинхусович Р.Л. Семчевский А.К. Циклический кулонометрический метод измерения микроконцентраций влажности в газах.// Приборы №5 2001. – с.32-35. Статическая характеристика и статическая погрешность циклического кулонометрического преобразователя.
12. Ильина И.Л., Кузнецов Б.Ф., Пинхусович Р.Л. Имитационная модель измерительного преобразователя циклического действия. //XV международная конференция «Математические методы в технике и технологиях» 2002. – с. 28-33.
13. Пинхусович Р.Л., Кузнецов Б.Ф., Ильина И.Л. Построение математической модели входного воздействия измерительного преобразователя. //“Современные технологии и научно-технический прогресс”. Тезисы доклада, научно-техническая конференция. Ангарск, 2002. – с. 29-31.