

На правах рукописи

Болдырев Илья Анатольевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ
АБСОРБЦИИ**

05.11.16 - Информационно-измерительные и управляющие системы
(по отраслям)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2010

Работа выполнена в Московском энергетическом институте (техническом университете) на кафедре информационно-измерительной техники.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Желбаков Игорь Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор кафедры управления и
информатики Московского энергетического
института (технического университета)
Филаретов Геннадий Федорович

кандидат технических наук,
доцент кафедры информатики и
технологии программирования Волгоградского
государственного технического университета
Лясин Дмитрий Николаевич

Ведущая организация: ОАО «НИИТеплоприбор»

Защита состоится « 9 » сентября 2010 г. в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.157.08 при Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу:

Москва, ул. Красноказарменная, д.14, Малый актовй зал МЭИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ (ТУ).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Ученый совет МЭИ (ТУ).

Автореферат разослан « » мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.157.08,
кандидат технических наук, доцент

Анисимов Д.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В промышленности широко распространены процессы абсорбции. Они применяются для получения готового продукта, для выделения ценных компонентов из газовых смесей, для очистки газовых выбросов от вредных примесей, а также для осушки газов. Аппараты, в которых протекают процессы абсорбции, называют абсорберами. Они представляют собой крупногабаритные цилиндрические колонны, в которых происходит контакт газовой смеси и абсорбента. При этом один из компонентов смеси растворяется в абсорбенте и в дальнейшем может быть выделен в чистом виде.

Абсорбер как объект управления представляет собой сложную техническую систему, обладающую большой инерционностью. Система управления процессом абсорбции может быть разбита на ряд локальных контуров регулирования: температуры газовой смеси, давления в колонне, уровня насыщенного абсорбента, количества подаваемого в колонну абсорбента и другие.

Известно большое количество различных способов управления процессами абсорбции. Одним из них является способ, направленный на повышение эффективности протекания процесса абсорбции, основанный на использовании обобщенного показателя - степени насыщения абсорбента. Для реализации указанного способа необходимо обеспечить измерение текущего значения степени насыщения, для чего требуется информационно-измерительная система, являющаяся частью системы управления.

Работа по созданию системы измерения степени насыщения абсорбента для управления процессом абсорбции проводилась в рамках выполнения гранта РФФИ по проекту № 10-08-00125-а.

Целью работы является создание измерительной системы для управления процессом абсорбции и анализ ее метрологических характеристик для снижения методической динамической погрешности системы.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Проведен анализ аппаратов и процессов абсорбции, анализ систем автоматического управления процессами абсорбции, а также метрологических характеристик измерительных систем.

2. Разработано уравнение измерения степени насыщения абсорбента, учитывающее динамические свойства объекта измерения.

3. Разработана система для измерения степени насыщения абсорбента.

4. Построены и проверены на адекватность математические модели метрологических характеристик измерительной системы.

5. Проведено исследование зависимости метрологических характеристик от значений параметров настройки измерительной системы.

6. Разработана и опробована методика снижения методической динамической погрешности обработки информации в измерительной системе, основанная на предложенных моделях погрешности.

7. Рассмотрены переходные процессы и качество управления процессом абсорбции при использовании алгоритмов управления по степени насыщения абсорбента.

Методы исследования. При выполнении работы использовались методы теории случайных функций, теории линейных и нелинейных цепей и сигналов, теории автоматического управления, а также метод имитационного моделирования.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Предложено уравнение измерения текущего значения степени насыщения абсорбента, учитывающее динамические свойства объекта измерения и предназначенное для реализации способа управления процессом абсорбции.

2. Предложены математические модели формирования методической динамической погрешности в программно-аппаратной измерительной системе при действии на систему помех типа «белый шум» и помех с корреляционной функцией экспоненциального вида при измерении степени насыщения абсорбента по уравнению, учитывающему динамические свойства объекта измерения.

3. Предложена методика снижения методической динамической погрешности в программно-аппаратной системе для измерения степени насыщения абсорбента, основанная на предложенных моделях погрешности.

Практическая значимость работы. Основные результаты диссертационного исследования, имеющие практическую значимость, заключаются в следующем:

1. Разработана программно-аппаратная система для измерения степени насыщения абсорбента, состоящая из полевого изменяемого прибора и пакета прикладных программ для обеспечения его функционирования.

2. Разработан пакет прикладных программ для имитационного моделирования метрологических характеристик системы для измерения степени насыщения абсорбента.

3. Разработан стенд для диагностики программного обеспечения и измерительных каналов многофункциональных систем контроля и управления. Стенд используется в учебном процессе на кафедре «Автоматизации технологических процессов и производств» филиала ГОУВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Межвузовской научно-практической конференции студентов и молодых ученых (г. Волжский, 2006 г.), XV Межвузовской научно-практической конференции студентов и молодых ученых (г. Волжский, 2009 г.), XXII – Международной Научной Конференции «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-22» (г. Иваново, 2009 г.), Межрегиональной конференции «Моделирование и создание объектов энергоресурсосберегающих технологий» (г. Волжский, 2009 г.), Шестнадцатой Меж-

дународной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радио-электроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2010 г.).

Внедрение результатов работы. Информационно-измерительная система внедрена на ОАО «Волжский Оргсинтез» в составе системы регулирования степени насыщения абсорбента на установке получения цианистого натрия. Разработанные модели метрологических характеристик измерительной системы и экспериментальная установка используются филиалом ГОУВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском для проведения лабораторных занятий по дисциплинам «Интегрированные системы проектирования и управления», «Технические средства автоматизации» и «Автоматизация технологических процессов и производств».

Достоверность результатов исследований подтверждена методом имитационного моделирования и результатами экспериментов. Эксперименты по проверке адекватности моделей сигналов и объектов проводились на ОАО «Волжский Оргсинтез». Эксперименты по проверке работоспособности алгоритмов измерительной системы и моделей погрешностей проводились на экспериментальной установке, созданной специально для этих целей.

Положения, выносимые на защиту.

1. Уравнение измерения текущего значения степени насыщения абсорбента, учитывающее динамические свойства объекта измерения и предназначенное для реализации способа управления процессом абсорбции.

2. Математические модели формирования методической динамической погрешности в программно-аппаратной измерительной системе при действии на систему помех типа «белый шум» и помех с корреляционной функцией экспоненциального вида при измерении степени насыщения абсорбента по уравнению, учитывающему динамические свойства объекта измерения.

3. Методика снижения методической динамической погрешности в программно-аппаратной системе для измерения степени насыщения абсорбента, основанная на предложенных моделях погрешности.

4. Программно-аппаратная система для измерения степени насыщения абсорбента, состоящая из полевого изменяемого прибора и пакета прикладных программ для обеспечения его функционирования.

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Лично автором проведены следующие этапы научного исследования:

1. При разработке математических моделей методических динамических погрешностей лично автором проведены аналитические расчеты и выкладки, а также проверка адекватности моделей на физической экспериментальной установке.

2. Разработана и опробована методика снижения методической динамической погрешности системы для измерения степени насыщения абсорбента.

3. Разработан изменяемый полевой прибор.

4. Разработан пакет прикладных программ для обеспечения функционирования полевого прибора.

5. Разработан пакет прикладных программ для имитационного моделирования метрологических характеристик системы для измерения степени насыщения абсорбента.

6. Разработан пакет прикладных программ для визуализации процессов измерения на экспериментальной установке.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость результатов работы, кратко изложено содержание диссертационной работы, приведены данные о структуре и объеме работы.

В первой главе диссертации проведен анализ аппаратов и процессов абсорбции, анализ систем автоматического управления процессами абсорбции, а также метрологических характеристик измерительных систем, применяемых в системах автоматического управления технологическими процессами.

На основе анализа литературы показано, что для управления процессом абсорбции целесообразно использовать критерий качества протекания процесса – степень насыщения абсорбента:

$$\psi(t) = \frac{X_2(t) - X_1(t)}{X_2^* - X_1(t)}, \quad (1)$$

где $X_1(t)$ - концентрация абсорбируемого вещества в абсорбенте на входе в абсорбер; $X_2(t)$ - концентрация абсорбируемого вещества в абсорбенте на выходе из абсорбера; X_2^* – значение равновесной концентрации абсорбируемого вещества в абсорбенте.

Анализ литературы показал, что измерительные системы, применяемые в системах автоматического управления технологическими процессами, работают в динамическом режиме, при этом значительную долю в итоговой погрешности занимает динамическая составляющая. Исходя из того, что значение последней может быть снижено путем подбора оптимальных значений параметров настройки компонентов системы без изменения её аппаратной структуры, сделан вывод, что рассмотрение методической динамической составляющей погрешности представляется важным.

Показано, что измерительная информация, которой оперируют измерительные системы, применяемые в системах управления технологическими процессами, является стохастической, поэтому наиболее подходящими для анализа и построения метрологических характеристик таких систем являются статистические методы.

На основе анализа литературы сделан вывод, что существующие модели динамических погрешностей измерительных систем не соответствуют структуре рассматриваемой системы, так как не учитывают дробной нелинейности уравнения измерения (1), а также компенсации динамических свойств объекта измерения.

Во второй главе рассмотрена структура системы для измерения степени насыщения абсорбента, выбраны математические модели компонентов измерительных каналов. Получено уравнение измерения степени насыщения абсорбента, учитывающее динамические свойства объекта измерения. Получены математические модели метрологических характеристик системы для измерения степени насыщения абсорбента.

Измерительная информация $G(t)$ на входе в измерительный канал системы была представлена как сумма случайной функции полезного сигнала концентрации вещества в абсорбенте $X(t)$ с отличным от нуля математическим ожиданием Mx и случайной центрированной помехи $n(t)$:

$$G(t) = X(t) + n(t). \quad (2)$$

Корреляционная функция полезного сигнала представлена в виде:

$$K_X(t) = Dx \exp(-\alpha t), \quad (3)$$

где Dx - дисперсия величины концентрации; α – скорость изменения корреляционной функции концентрации.

Были рассмотрены помехи двух видов: высокочастотные помехи типа «белый шум» с корреляционной функцией вида (4) и помехи с корреляционной функцией экспоненциального вида (5) с конечной скоростью изменения.

$$K_n(t) = S\delta(t), \quad (4)$$

$$K_n(t) = Dn \exp(-\beta t), \quad (5)$$

где S – уровень шума, $\delta(t)$ – дельта-функция Дирака, Dn - дисперсия помехи, β – скорость изменения корреляционной функции помехи.

Использование модели (4) позволяет дать оценку помехи по верхнему уровню в условиях априорной неопределенности, то есть когда невозможно получить для помехи более точного аналитического описания.

Были рассмотрены два процесса абсорбции: сероуглерода и цианистого натрия. На основе архивных данных системы управления процессом абсорбции цианистого натрия были получены следующие модели измерительной информации:

- автокорреляционная функция центрированной случайной функции концентрации цианистого натрия в абсорбенте на входе в абсорбер и на выходе из абсорбера, соответственно:

$$Kx_1(t) = 3,94 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(-2,5 \cdot 10^{-2} \cdot t); \quad (6)$$

$$Kx_2(t) = 2,52 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(-2,0 \cdot 10^{-2} \cdot t); \quad (7)$$

- взаимная корреляционная функция центрированных случайных функций концентраций цианистого натрия в абсорбенте на входе и на выходе из абсорбера, приведенных к одному моменту измерения:

$$Kx_{12}(t) = 3,15 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(-3,3 \cdot 10^{-2} \cdot t); \quad (8)$$

- автокорреляционная функция помехи, наложенной на полезный сигнал концентрации цианистого натрия в абсорбенте на входе в абсорбер и на выходе из абсорбера, соответственно:

$$Kn_1(t) = 2,72 \cdot 10^{-5} \cdot \exp(-3,3 \cdot 10^{-1} \cdot t); \quad (9)$$

$$Kn_2(t) = 1,74 \cdot 10^{-5} \cdot \exp(-3,3 \cdot 10^{-1} \cdot t). \quad (10)$$

Для процесса очистки сероуглерода получены следующие модели измерительной информации:

- автокорреляционная функция центрированной случайной функции концентрации сероуглерода в абсорбенте на входе в абсорбер и на выходе из абсорбера, соответственно:

$$Kx_1(t) = 0,15 \cdot \exp(-2,5 \cdot 10^{-2} \cdot t); \quad (11)$$

$$Kx_2(t) = 0,15 \cdot \exp(-2,0 \cdot 10^{-2} \cdot t); \quad (12)$$

- взаимная корреляционная функция центрированных случайных функций концентраций сероуглерода в абсорбенте на входе и на выходе из абсорбера, приведенных к одному моменту измерения:

$$Kx_{12}(t) = 0,06 \cdot \exp(-3,3 \cdot 10^{-2} \cdot t); \quad (13)$$

- автокорреляционная функция помехи, наложенной на полезный сигнал концентрации сероуглерода в абсорбенте на входе в абсорбер и на выходе из абсорбера, соответственно:

$$Kn_1(t) = 10^{-5} \cdot \delta(t); \quad (14)$$

$$Kn_2(t) = 10^{-5} \cdot \delta(t). \quad (15)$$

Для проведения статистического анализа погрешности выражение (1) было линеаризовано разложением в ряд Тейлора в окрестности рабочей точки с номинальными значениями концентраций $X_1(t)$ и $X_2(t)$. Линеаризованное выражение (1) представлено в виде:

$$\psi(t) = A_1 G_1(t) + A_2 G_2(t) + A_3, \quad (16)$$

где $A_1 = \frac{Mx_2 - X_2^*}{(X_2^* - Mx_1)^2}$; $A_2 = \frac{1}{X_2^* - Mx_1}$; $A_3 = \frac{Mx_1^2 - Mx_1 \cdot Mx_2}{(X_2^* - Mx_1)^2}$ - коэффициенты линеаризации.

Каждый измерительный канал системы был представлен как последовательное соединение компонентов: первичного и вторичного преобразователей, аналого-цифрового преобразователя, блока перевода в требуемые единицы измерения, программного фильтра помех, компенсатора динамических свойств абсорбера, блока линеаризации и восстанавливающего элемента.

Первичные преобразователи представлены в виде апериодических звеньев первого порядка с весовой функцией:

$$hp_i(t) = \frac{Kp_i}{Tp_i} e^{-\frac{t}{Tp_i}}, \quad (17)$$

где i – номер измерительного канала; Kp_i – коэффициент преобразования, характеризующий статические свойства первичного преобразователя; Tp_i – постоянная времени, характеризующая динамические свойства преобразователя.

Нормирующий преобразователь был представлен простым усилительным звеном с коэффициентом усиления Kn_i и весовой функцией:

$$hn_i(t) = Kn_i \delta(t). \quad (18)$$

Операция аналого-цифрового преобразования включает в себя квантование сигнала по уровню и дискретизацию по времени. В связи с тем, что на значение динамической составляющей погрешности влияет операция дискретизации, модель аналого-цифрового преобразования задана в следующем виде:

$$hq_i(n) = \delta\left(n - E\left[\frac{t}{Ts}\right]\right), \quad (19)$$

где Ts – период опроса датчиков, n – порядковый номер дискретного времени в решётчатой функции; $E[\dots]$ – целая часть числа.

Для компенсации статических преобразований, осуществляемых над измеряемым сигналом в первичном и нормирующем преобразователях, используется операция перевода в требуемые единицы измерения с весовой функцией вида:

$$hs_i(n) = \frac{1}{Kn_i Kp_i} \delta(n). \quad (20)$$

Динамическая характеристика программного фильтра была задана в виде массива весовых коэффициентов:

$$hf_i(n) = \frac{Ts}{Tf_i} \left(1 - \frac{Ts}{Tf_i}\right)^n. \quad (21)$$

Весовая функция $hl_i(t)$ звена линеаризации определяется следующим образом:

$$hl_i(t) = A_i \delta(t). \quad (22)$$

Весовая функция восстанавливающего элемента, реализующего ступенчатую экстраполяцию, имеет вид единичной функции-окна:

$$hr(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 \leq t - kTs \leq Ts; \\ 0, & \text{при } t - kTs > Ts. \end{cases} \quad (23)$$

Для повышения точности измерений в состав измерительных каналов включены программно реализованные компенсаторы динамических свойств объекта измерения, имеющие импульсные характеристики вида:

$$hc_i(t) = \delta(t - Tc_i), \quad (24)$$

где Tc_i – постоянная времени компенсатора динамических свойств объекта измерения, определяемая как время запаздывания абсорбера по соответствующему каналу.

Действие компенсатора заключается в смещении по времени значения концентрации $X_1(t)$ для создания условий одномоментного измерения с соответствующим ему значением $X_2(t)$.

Наличие компенсаторов в составе измерительных каналов позволяет на основе выражения (1) получить уравнение измерения степени насыщения абсорбента, учитывающее динамические свойства объекта измерения:

$$\psi(t) = \left(X_2(t) - \int_{t-Tc}^t hc(\mu)X_1(t-\mu)d\mu \right) / \left(X_2^* - \int_{t-Tc}^t hc(\mu)X_1(t-\mu)d\mu \right). \quad (25)$$

Методическая динамическая погрешность $\Delta_o(t)$ представлена разностью показаний программно-аппаратной и эталонной измерительных систем (см. рис. 1).

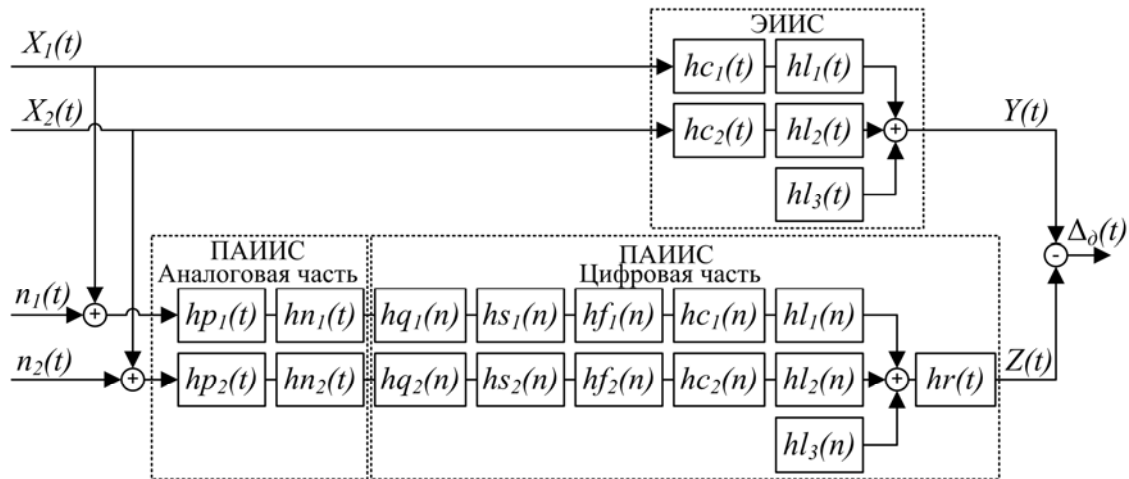


Рис. 1. Схема выделения методической динамической погрешности:

ПАИИС – программно-аппаратная измерительная система;

ЭИИС – эталонная измерительная система.

На основе моделей измерительной информации и компонентов измерительных каналов были получены математические модели дисперсии показаний программно-аппаратного канала для измерения концентрации абсорбируемого вещества в абсорбенте в случае действия помех типа «белый шум»:

$$D_{z_i}^{ИК} = \frac{A_i^2 Ts}{2Tf_i - Ts} \left(1 - \frac{Ts}{Tf_i} \right)^{-2E \left[\frac{Tc_i}{Ts} \right]} \left[\left(\frac{S_{ii}}{2Tp_i} - \frac{Dx_{ii} \alpha_{ii} Tp_i}{1 - (\alpha_{ii} Tp_i)^2} \right) \frac{Tf_i - e^{-Ts/Tp_i} (Tf_i - Ts)}{Tf_i + e^{-Ts/Tp_i} (Tf_i - Ts)} + \frac{Dx_{ii}}{1 - (\alpha_{ii} Tp_i)^2} \frac{Tf_i - e^{-\alpha_{ii} Ts} (Tf_i - Ts)}{Tf_i + e^{-\alpha_{ii} Ts} (Tf_i - Ts)} \right], \quad (26)$$

и помех с корреляционной функцией экспоненциального вида:

$$\begin{aligned}
D_{z_i}^{МК} &= \frac{A_i^2 T_s}{2Tf_i - T_s} \left(1 - \frac{T_s}{Tf_i}\right)^{-2E\left[\frac{Tc_i}{T_s}\right]} \times \\
&\times \left[\frac{Dx_{ii}}{1 - (\alpha_{ii}Tp_i)^2} \frac{Tf_i - e^{-\alpha_{ii}T_s}(Tf_i - T_s)}{Tf_i + e^{-\alpha_{ii}T_s}(Tf_i - T_s)} + \frac{Dn_{ii}}{1 - (\beta_{ii}Tp_i)^2} \frac{Tf_i - e^{-\beta_{ii}T_s}(Tf_i - T_s)}{Tf_i + e^{-\beta_{ii}T_s}(Tf_i - T_s)} - \right. \\
&\quad \left. - \left(\frac{Dx_{ii}\alpha_{ii}Tp_i}{1 - (\alpha_{ii}Tp_i)^2} + \frac{Dn_{ii}\beta_{ii}Tp_i}{1 - (\beta_{ii}Tp_i)^2} \right) \frac{Tf_i - e^{-T_s/Tp_i}(Tf_i - T_s)}{Tf_i + e^{-T_s/Tp_i}(Tf_i - T_s)} \right]. \quad (27)
\end{aligned}$$

Также получена модель взаимной корреляции показаний эталонного и программно-аппаратного каналов для измерения концентрации абсорбируемого вещества в абсорбенте:

$$\begin{aligned}
K_{yz_i}^{МК}(0) &= \frac{A_i^2 T_s Dx}{\alpha_{ii}Tp_i - 1} \left(1 - \frac{T_s}{Tf_i}\right)^{-E\left[\frac{Tc_i}{T_s}\right]} \times \\
&\times \left(\frac{e^{-2\alpha_{ii}T_s}}{Tf_i - e^{-\alpha_{ii}T_s}(Tf_i - T_s)} - \frac{2\alpha_{ii}Tp_i}{\alpha_{ii}Tp_i + 1} \frac{e^{-\frac{2T_s}{Tp_i}}}{Tf_i - e^{-\frac{T_s}{Tp_i}(Tf_i - T_s)}} \right). \quad (28)
\end{aligned}$$

Были получены модели динамической погрешности в случае воздействия на систему помех типа «белый шум»:

$$\begin{aligned}
D\Delta_\delta &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 A_i A_j Dx_{ij} e^{-\alpha_{ij}|Tc_i - Tc_j|} - 2 \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{A_i A_j T_s Dx_{ij}}{\alpha_{ij}Tp_i - 1} \left(1 - \frac{T_s}{Tf_i}\right)^{-E\left[\frac{Tc_i}{T_s}\right]} \times \\
&\times \left(\frac{e^{-2\alpha_{ij}T_s}}{Tf_i - e^{-\alpha_{ij}T_s}(Tf_i - T_s)} - \frac{2\alpha_{ij}Tp_i}{\alpha_{ij}Tp_i + 1} \frac{e^{-\frac{2T_s}{Tp_i}}}{Tf_i - e^{-\frac{T_s}{Tp_i}(Tf_i - T_s)}} \right) + \\
&+ \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{A_i A_j}{Tp_i + Tp_j} \left(1 - \frac{T_s}{Tf_i}\right)^{-E\left[\frac{Tc_i}{T_s}\right]} \left(1 - \frac{T_s}{Tf_j}\right)^{-E\left[\frac{Tc_j}{T_s}\right]} \times \\
&\times \left(\left(S_{ij} - \frac{2Dx_{ij}\alpha_{ij}Tp_j^2}{1 - (\alpha_{ij}Tp_j)^2} \right) \frac{Tf_j - e^{-T_s/Tp_j}(Tf_j - T_s)}{Tf_j + e^{-T_s/Tp_j}(Tf_j - T_s)} + \right. \\
&\quad \left. + \frac{2Dx_{ij}Tp_j}{1 - (\alpha_{ij}Tp_j)^2} \frac{Tf_j - e^{-\alpha_{ij}T_s}(Tf_j - T_s)}{Tf_j + e^{-\alpha_{ij}T_s}(Tf_j - T_s)} \right). \quad (29)
\end{aligned}$$

и помех с корреляционной функцией экспоненциального вида:

$$\begin{aligned}
D\Delta_{\delta} = & \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 A_i A_j D x_{ij} e^{-\alpha_{ij} |Tc_i - Tc_j|} - 2 \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{A_i A_j T_s D x_{ij}}{\alpha_{ij} T p_i - 1} \left(1 - \frac{T_s}{T f_i}\right)^{-E \left[\frac{Tc_i}{T_s} \right]} \times \\
& \times \left(\frac{e^{-2\alpha_{ij} T_s}}{T f_i - e^{-\alpha_{ij} T_s} (T f_i - T_s)} - \frac{2\alpha_{ij} T p_i}{\alpha_{ij} T p_i + 1} \frac{e^{-\frac{2T_s}{T p_i}}}{T f_i - e^{-\frac{T_s}{T p_i} (T f_i - T_s)}} \right) + \\
& + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{2A_i A_j T p_j}{T p_i + T p_j} \left(1 - \frac{T_s}{T f_i}\right)^{-E \left[\frac{Tc_i}{T_s} \right]} \left(1 - \frac{T_s}{T f_j}\right)^{-E \left[\frac{Tc_j}{T_s} \right]} \times \\
& \times \left(\frac{D x_{ij}}{1 - (\alpha_{ij} T p_j)^2} \frac{T f_j - e^{-\alpha_{ij} T_s} (T f_j - T_s)}{T f_j + e^{-\alpha_{ij} T_s} (T f_j - T_s)} + \frac{D n_{ij}}{1 - (\beta_{ij} T p_j)^2} \frac{T f_j - e^{-\beta_{ij} T_s} (T f_j - T_s)}{T f_j + e^{-\beta_{ij} T_s} (T f_j - T_s)} - \right. \\
& \left. - \left(\frac{D x_{ij} \alpha_{ij} T p_j}{1 - (\alpha_{ij} T p_j)^2} + \frac{D n_{ij} \beta_{ij} T p_j}{1 - (\beta_{ij} T p_j)^2} \right) \frac{T f_j - e^{-T_s / T p_j} (T f_j - T_s)}{T f_j + e^{-T_s / T p_j} (T f_j - T_s)} \right). \quad (30)
\end{aligned}$$

Здесь i, j - номер измерительного канала; α_{ij} , β_{ij} , Dx_{ij} , Dn_{ij} , S_{ij} - соответственно, элементы матриц скорости изменения концентрации, скорости изменения помехи, коэффициентов корреляции измеряемых сигналов и помех, уровня шума (при $i = j$ элементы матриц являются дисперсиями измеряемых величин, при $i \neq j$ являются характеристиками взаимных корреляционных функций).

Показано, что математическое ожидание случайной функции методической динамической погрешности равно нулю.

В разработанном пакете прикладных программ проведен анализ зависимости нормированной дисперсии методической динамической погрешности $\eta_{\Delta_{\delta}}$ от значений настроечных коэффициентов каналов и системы, а также от параметров измеряемых сигналов.

$$\eta_{\Delta_{\delta}} = \frac{D\Delta_{\delta}}{D_y}, \quad (31)$$

где $D\Delta_{\delta}$ - дисперсия погрешности определения искомой величины, D_y - дисперсия показаний эталонной измерительной системы:

$$D_y = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 A_i A_j D x_{ij} e^{-\alpha_{ij} |Tc_i - Tc_j|}. \quad (32)$$

Показано (рис. 2), что при уменьшении периода опроса датчиков T_s происходит уменьшение динамической погрешности, так как при этом снижается влияние на погрешность потери информации, связанной с дискретизацией сиг-

налов по времени. Существует верхняя оценка T_s^{2p} , начиная с которой дальнейшее уменьшение периода опроса датчиков практически не приводит к снижению динамической погрешности, так как большее влияние на значение погрешности начинают оказывать динамические свойства компонентов измерительных каналов. Уменьшение периода опроса датчиков меньше верхней оценки с целью снижения динамической погрешности обработки информации в измерительной системе является нерациональным, так как уменьшение погрешности при этом происходит незначительно, но существенно возрастает вычислительная нагрузка на измерительную систему.

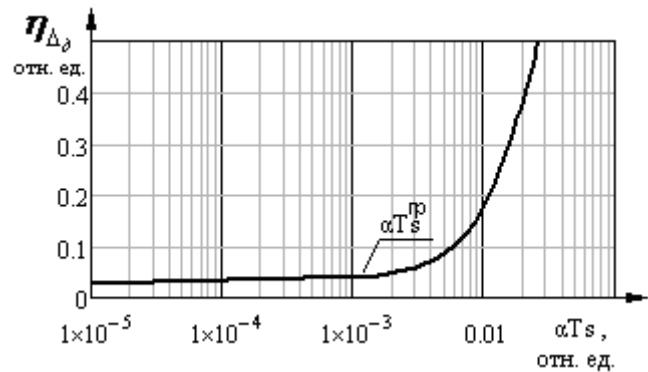


Рис. 2. График зависимости погрешности от периода опроса датчиков

($Tf_1=800$ с, $Tf_2 = 600$ с, $Tc_2 = 1300$ с, $\alpha_{11}=3 \cdot 10^{-4}$ 1/с)

Показано, что дробное взаимодействие измеряемых сигналов приводит к различию видов зависимостей динамической погрешности от настроечных коэффициентов динамических преобразователей в программно-аппаратной измерительной системе. При увеличении постоянной времени программного фильтра в канале измерения концентрации вещества в абсорбенте на входе в абсорбер Tf_1 происходит уменьшение динамической погрешности (рис. 3а).

Зависимость методической динамической погрешности от параметров программного фильтра в канале измерения концентрации вещества в абсорбенте на выходе из абсорбера Tf_2 имеет минимум (рис. 3б), соответствующее которому значение постоянной времени программного фильтра целесообразно выбирать при настройке параметров программно-аппаратной измерительной системы.

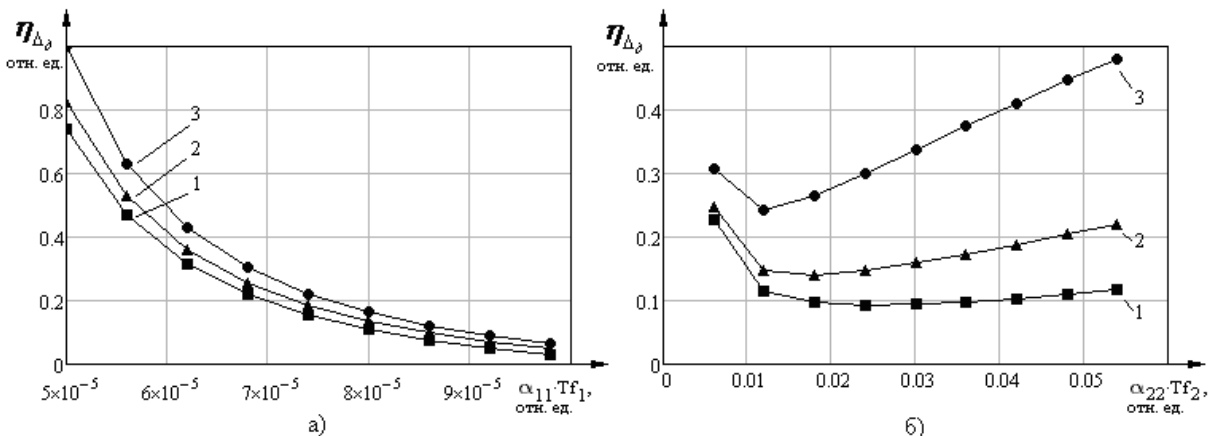


Рис. 3. График зависимости погрешности постоянной времени фильтра

а) в первом канале при разной скорости изменения первого сигнала ($T_s = 50$ с, $Tf_2 = 550$ с, $Tc_2 = 1300$ с): 1 — $\alpha_{11} = 1,0 \cdot 10^{-7}$ 1/с; 2 — $\alpha_{11} = 1,4 \cdot 10^{-3}$ 1/с; 3 — $\alpha_{11} = 1,4 \cdot 10^{-2}$ 1/с.

б) во втором канале при разной скорости изменения второго сигнала ($T_s = 50$ с, $Tf_1 = 500$ с, $Tc_2 = 1300$ с): 1 — $\alpha_{22} = 1,0 \cdot 10^{-4}$ 1/с; 2 — $\alpha_{22} = 2,0 \cdot 10^{-4}$ 1/с; 3 — $\alpha_{22} = 5,0 \cdot 10^{-4}$ 1/с.

Показано, что характер зависимости методической динамической погрешности от постоянной времени датчика в канале измерения концентрации вещества в абсорбенте на входе в абсорбер изменяется с увеличением скорости изменения сигнала (рис. 4а).

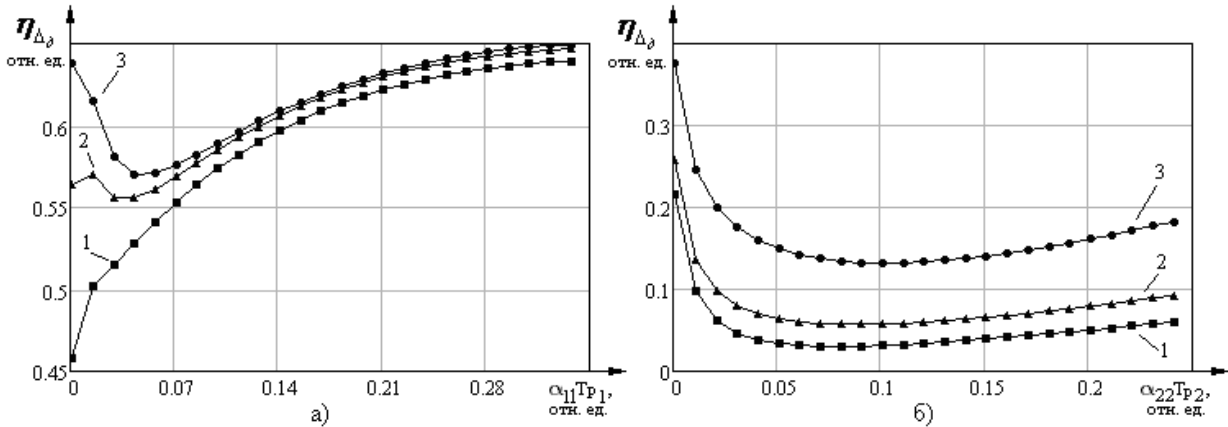


Рис. 4. График зависимости погрешности от постоянной времени датчика

а) в первом канале при разной скорости изменения первого сигнала ($T_s = 50$ с, $Tf_1 = 500$ с, $Tf_2 = 150$ с, $Tp_2 = 10$ с, $Tc_2 = 1300$ с):

$$1 - \alpha_{11} = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ 1/с}; 2 - \alpha_{11} = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ 1/с}; 3 - \alpha_{11} = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ 1/с}.$$

б) во втором канале при разной скорости изменения второго сигнала ($T_s = 50$ с, $Tf_1 = 500$ с, $Tf_2 = 150$ с, $Tp_1 = 10$ с, $Tc_2 = 1300$ с):

$$1 - \alpha_{22} = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ 1/с}; 2 - \alpha_{22} = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ 1/с}; 3 - \alpha_{22} = 5,0 \cdot 10^{-4} \text{ 1/с}.$$

При меньшей скорости сигнала характер зависимости погрешности от постоянной времени датчика является монотонно возрастающим. При увеличении скорости изменения сигнала на кривой зависимости появляется минимум.

Показано, что зависимость погрешности от постоянной времени датчика в канале измерения концентрации вещества в абсорбенте на выходе из абсорбера имеет минимум при любых значениях скорости изменения сигнала (рис. 4б). При больших скоростях изменения сигнала минимум на кривой является более выраженным.

Значения постоянных времени датчиков, соответствующие минимумам на рассмотренных кривых, целесообразно выбирать при настройке параметров программно-аппаратной измерительной системы.

В третьей главе представлена программно-аппаратная система для измерения степени насыщения абсорбента, состоящая из полевого прибора и пакета прикладных программ для обеспечения его функционирования.

В работе предложен изменяемый, то есть свободно конфигурируемый, полевой прибор, имеющий возможность подключения до четырех первичных преобразователей. Предложенный прибор позволяет получать значения технологических параметров по результатам косвенных измерений. Функциональная схема прибора показана на рисунке 5.

Основу прибора составляет микроконтроллер (МК) PIC16F877. Прибор оснащен двухстрочным дисплеем (ДСПЛ) для отображения текущего значения степени насыщения, и служебной информации, клавиатурой (КЛ) для измене-

ния настроечных коэффициентов, цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП), генерирующим токовый сигнал 4-20 мА для передачи значения степени насыщения в вышестоящую управляющую систему. Прибор также оснащен цифровым интерфейсным преобразователем (ИП) RS232 для передачи результатов измерений в ЭВМ. Блок питания (БП) обеспечивает требуемое напряжение питания для компонентов прибора.

Пакет прикладных программ рассматриваемой измерительной системы состоит из программы, хранящейся в памяти микроконтроллера, и обеспечивающей функционирование прибора, а также программного обеспечения, устанавливаемого на ЭВМ, предназначенного для визуализации процессов изменения измерительной информации, поступающей с прибора по цифровому интерфейсу.

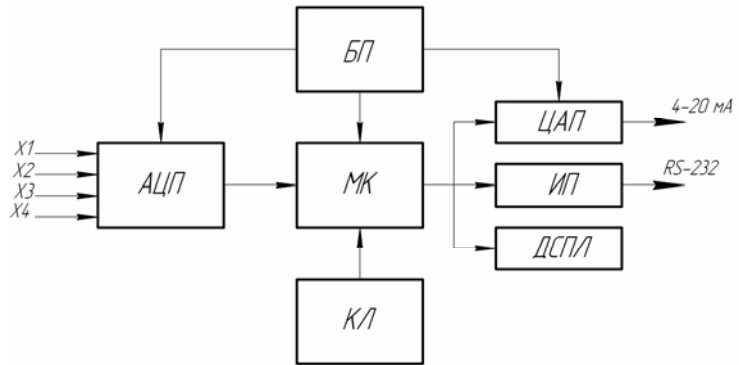


Рис. 5. Функциональная схема изменяемого полевого прибора

Четвертая глава посвящена экспериментальной проверке работоспособности полевого изменяемого прибора и адекватности математических моделей методической динамической погрешности системы измерения степени насыщения абсорбента.

Для проведения экспериментов была разработана программно-аппаратная установка (см. рис. 6), которая содержит программный блок генерации сигналов 1 и связанный с ним программно-аппаратный блок обработки измерительной информации 2. Блок 1 представляет собой проект ПО «Trace Mode» и состоит из блока имитации измерительной информации 3, блока интерфейса пользователя 4, блока регистрации измерительной информации 5, соединенных с блоком приема-передачи измерительной информации 6.

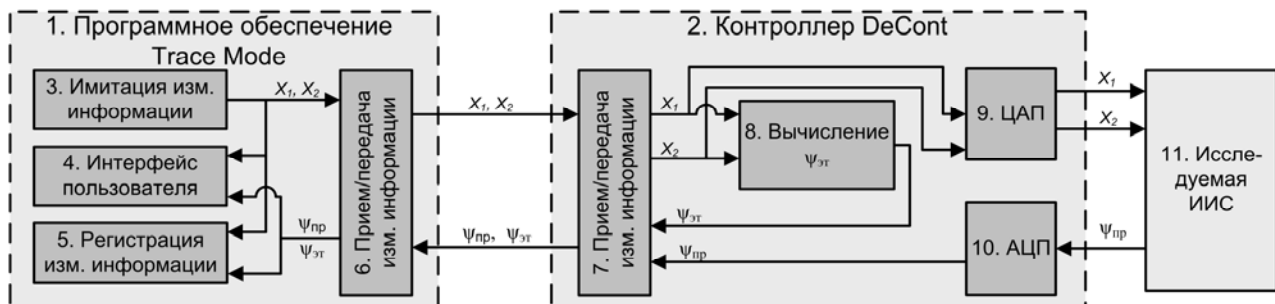


Рис. 6. Функциональная схема стенда для проверки работоспособности устройств систем контроля и управления

Блок обработки измерительной информации 2 реализован на базе промышленного контроллера DeCont и содержит блок приема-передачи измерительной информации 7, связанный с блоком вычисления эталонного значения параметра $\psi_{эт}$ 8, блоком вывода сигналов (ЦАП) 9 и блоком ввода сигналов

(АЦП) 10. К вводам и выводам стенда подключается исследуемая измерительная система 11.

В блоке имитации сигналов генерируется измерительная информация с заданными статистическими характеристиками (математическое ожидание, дисперсия, скорость изменения), передаваемая в блок эталонных вычислений, а также в исследуемую систему. Результаты измерений с выхода исследуемой измерительной системы ψ_{np} и блока эталонных вычислений $\psi_{эм}$ передаются в блок интерфейса пользователя для отображения, а также записываются в архив блоком регистрации измерительной информации для последующего анализа.

Проверка адекватности математических моделей методической динамической погрешности измерительной системы осуществлялась путем сопоставления по критериям Фишера и Стьюдента результатов, получаемых расчетом по математическим моделям, с результатами, полученными на экспериментальной установке.

Сравнение полученных значений критериев с табличными показало, что отличие значений математического ожидания и дисперсии, полученных расчетом по математическим моделям от оценок, полученных расчетом по экспериментальным реализациям, можно считать несущественным. Из этого был сделан вывод, что полученные в работе математические модели адекватно описывают зависимость методической динамической погрешности измерения степени насыщения абсорбента от параметров работы измерительной системы.

В пятой главе рассматривается применение предложенной методики снижения методической динамической погрешности. Также в главе рассмотрены результаты моделирования переходных процессов в системе и качество управления процессом абсорбции при использовании способа управления по степени насыщения абсорбента.

На рисунке 7 показана схема системы управления процессом абсорбции по степени насыщения абсорбента. Здесь 1 – абсорбер; 2 – система для измерения степени насыщения абсорбента; 3 – сумматор; 4 – регулятор; 5 – регулирующий клапан; 6 и 7 – датчики концентраций вещества в абсорбенте.

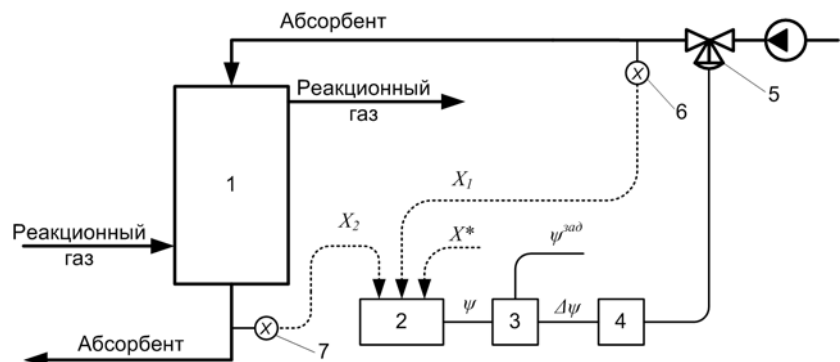


Рис. 7. Принципиальная схема реализации способа управления процессами абсорбции

Проведенный анализ результатов моделирования переходных процессов, а также анализ качества управления процессом абсорбции при использовании способа управления по степени насыщения абсорбента без компенсации и с

компенсацией динамических свойств абсорбера показывает работоспособность способа управления.

На основе полученных математических моделей была предложена методика снижения методической динамической погрешности измерительной системы, согласно которой определяют статистические характеристики сигналов и параметры объекта измерения, строят графики зависимостей методической динамической погрешности от параметров работы системы по выражениям (29) или (30) и выбирают значения настроечных коэффициентов системы, обеспечивающие уменьшение динамической погрешности.

Применение предложенной методики снижения методической динамической погрешности при определении значений настроечных коэффициентов измерительной системы рассмотрено для двух процессов абсорбции в технологических процессах производства цианистого натрия и сероуглерода, осуществляемых на ОАО «Волжский Оргсинтез».

Для процесса абсорбции цианистого натрия показано, что при существующих параметрах настройки измерительных каналов системы управления ($T_s = 1$ с, $Tf_1 = Tf_2 = 300$ с, $Tr_1 = Tr_2 = 0,5$ с) доверительный интервал относительной методической динамической погрешности при $P = 0,95$ составляет $\delta_\delta = \pm 0,96$ %. Применение предлагаемой методики позволяет определить значения настроечных коэффициентов ($T_s = 4$ с, $Tf_1 = 600$ с, $Tf_2 = 10$ с, $Tr_1 = 10$ с, $Tr_2 = 15$ с), при которых относительная методическая динамическая погрешность может быть снижена до $\delta_\delta = \pm 0,03$ %.

Для процесса абсорбции сероуглерода показано, что при существующих параметрах настройки измерительных каналов системы управления ($T_s = 1$ с, $Tf_1 = Tf_2 = 240$ с, $Tr_1 = Tr_2 = 0,5$ с) доверительный интервал относительной методической динамической погрешности при $P = 0,95$ $\delta_\delta = \pm 6,5$ %, при этом

суммарная относительная погрешность измерения степени насыщения абсорбента составляет $\delta = \pm 7,6$ %. При выбранных согласно предлагаемой методике значениях настроечных коэффициентов системы ($T_s = 2$ с, $Tf_1 = 700$ с, $Tf_2 = 60$ с, $Tr_1 = 0,5$ с, $Tr_2 = 20$ с) относительная динамическая погрешность может быть снижена до $\delta_\delta = \pm 1,0$ %. В таком

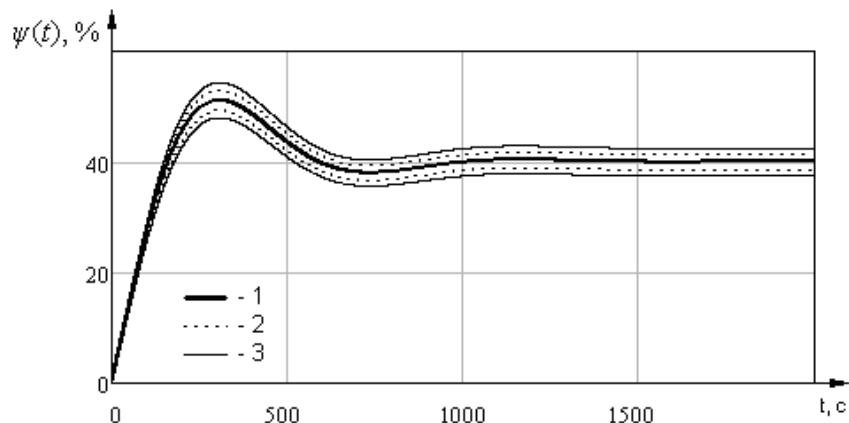


Рис. 8. Переходный процесс в системе регулирования с учетом погрешности измерения степени насыщения абсорбента

1 – Истинное значение степени насыщения абсорбента;
2 – Погрешность измерения степени насыщения абсорбента при отсутствии динамической составляющей;
3 – Погрешность измерения степени насыщения абсорбента при наличии динамической составляющей.

случае доверительный интервал суммарной относительной погрешности измерения степени насыщения абсорбента составит $\delta = \pm 4,0 \%$, что в 1,9 раза меньше погрешности при существующих параметрах настройки системы.

Таким образом, применение предложенной в работе методики позволяет практически в два раза снизить погрешность измерения степени насыщения абсорбента для процесса абсорбции сероуглерода.

На рисунке 8 показан переходный процесс в системе управления абсорбером с учетом погрешности измерения степени насыщения абсорбента. Очевидно, что наличие погрешности приводит к отклонению измеренного значения степени насыщения абсорбента от истинного значения, которое является оптимальным. В свою очередь, это приводит к снижению точности регулирования, то есть, к перерасходу абсорбента. Учитывая масштабы производства, следует отметить, что повышение точности поддержания оптимального значения расхода абсорбента позволяет значительно повысить экономическую эффективность производства.

Основные результаты и выводы по работе

1. Предложено уравнение измерения текущего значения степени насыщения абсорбента, учитывающее динамические свойства объекта измерения.

2. Получены математические модели измерительной информации для двух технологических процессов абсорбции: цианистого натрия и сероуглерода.

3. Построены модели метрологических характеристик измерительной системы для определения степени насыщения абсорбента.

4. Показано, что методическая динамическая погрешность измерительной системы является центрированной случайной функцией, зависящей от статистических характеристик измерительной информации, а также от значений настроечных коэффициентов измерительной системы.

5. Предложены модели дисперсии методической динамической погрешности системы для измерения степени насыщения абсорбента с учётом динамических свойств объекта измерения и дробного взаимодействия измеряемых сигналов в уравнении измерения. Модели могут быть использованы для определения значений настроечных коэффициентов системы в случае, когда в качестве верхней оценки воздействующих помех можно применить аппроксимацию свойств помех сигналом типа “белый шум” и когда корреляционные функции помех могут быть аппроксимированы экспоненциальной зависимостью.

6. Для определения текущего значения степени насыщения абсорбента предложена программно-аппаратная измерительная система, состоящая из изменяемого полевого прибора и пакета прикладных программ для обеспечения его функционирования.

7. Экспериментально доказано, что построенные модели адекватно описывают зависимость методической динамической составляющей погрешности

измерения степени насыщения абсорбента от параметров измерительной информации и значений настроечных коэффициентов измерительной системы.

8. На основе предложенной методики снижения методической динамической погрешности измерительной системы были найдены значения параметров измерительных систем, применяемых в системах управления процессами абсорбции цианистого натрия и сероуглерода, обеспечивающие снижение методической динамической погрешности. Показано, что применение предложенной методики снижения методической динамической погрешности измерительной системы для процесса производства сероуглерода позволяет существенно снизить значение методической динамической составляющей погрешности измерения степени насыщения абсорбента, что уменьшает итоговую погрешность практически в два раза.

9. Рассмотрены результаты моделирования переходных процессов в системе при использовании способа управления по степени насыщения абсорбента. Показано, что способ является работоспособным и может применяться в промышленности для управления процессами абсорбции.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1. Болдырев И.А., Качегин Д.А., Шевчук В.П. Прибор для измерения степени насыщения абсорбента // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2008. – № 2. – с. 30-34.**
- 2. Шевчук В. П., Болдырев И. А. Метрологические характеристики информационно-измерительной системы для определения степени насыщения абсорбента // Метрология. – 2009. - № 12. – с. 31- 40.**
- 3. Шевчук В. П., Болдырев И. А. Система измерения степени насыщения абсорбента для управления процессом абсорбции // Вестник МЭИ. – 2010. - № 2. – с. 127-132.**
4. Качегин Д.А., Болдырев И.А., Загребин В.Н. Система стабилизации степени насыщения абсорбента // Ресурсо-энергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов: Материалы Всероссийской научно-практической конференции / Сборник научных статей. – Волжский: Филиал ГОУ ВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском, 2006 – с. 141-144.
5. Качегин Д.А., Болдырев И.А., Загребин В.Н. Виртуальный прибор для измерения степени насыщения абсорбента // Ресурсо-энергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов: Материалы Всероссийской научно-практической конференции / Сборник научных статей. – Волжский: Филиал ГОУ ВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском. – 2006. – с. 151-153.
6. Болдырев И.А. Метрологические характеристики информационно-измерительной системы для определения значения степени насыщения абсорбента // XV Межвузовская научно-практическая конференция студентов и молодых ученых, г.Волжский. – 2009. – с. 27-28.

7. Болдырев И. А. Модель динамической погрешности измерения текущего значения степени насыщения абсорбента // XXII – Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-22» Псковский государственный политехнический институт. – 2009. – с. 186-187.
8. Болдырев И.А., Шевчук В.П. Методика оптимизации параметров информационно-измерительной системы для определения степени насыщения абсорбента // Межрегиональная конференция «Моделирование и создание объектов энерго-ресурсосберегающих технологий»: Материалы научно-практической конференции / Сборник научных статей. – Волжский: Филиал ГОУ ВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском. – 2009. – с. 126-131.
9. Болдырев И.А., Желбаков И.Н. Система измерения степени насыщения абсорбента для управления процессом абсорбции // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Шестнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3 т. Т. 1. М.: Издательский дом МЭИ. – 2010. – с. 453-454.
10. Пат. 84965 МПК G01D3/02 Изменяемый полевой прибор / Шевчук В. П., Болдырев И. А.; патентообладатель: ГОУВПО «МЭИ (ТУ)». - №2009110109/22; заявл. 20.03.2009; опубл. 20.07.2009; бюл. № 20.