МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

на правах рукописи

04.2.01 0 60314

БОЛДЫРЕВ ИЛЬЯ АНАТОЛЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ АБСОРБЦИИ

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

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Желбаков И. Н.

Москва, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

Введение **4**

1. Анализ информационно-измерительных и управляющих систем процессом абсорбции **9**

1.1 Анализ особенностей процесса жидкостной абсорбции газов 9

1.2 Анализ систем управления процессами абсорбции 11

1.3 Анализ метрологических характеристик измерительных систем, применяемых при управлении технологическими процессами 17

1.4 Анализ методов количественной оценки динамических погрешностей измерительных систем 21

1.5 Выводы и постановка задач исследования 30

2. Математическое описание элементов измерительной системы **33**

2.1 Модели измерительной информации 34

2.2 Модель измерительной системы для управления процессом абсорбции 40

2.3 Исследование погрешности линеаризации измерительной системы 43

2.4 Математические модели компонентов измерительной системы 44

2.5 Исследование свойств показаний программно-аппаратной измерительной системы 49

2.6 Модели метрологических характеристик измерительной системы 58

2.7 Свойства динамической погрешности измерительной системы 70

2.8 Выводы 75

3. Разработка системы для измерения степени насыщения абсорбента **77**

3.1 Разработка аппаратной части измерительной системы.....78

3.2 Разработка программного обеспечения измерительной системы 86

3.3 Выводы.....92

4. Исследование метрологических характеристик изменяемого полевого прибора.....94

5. Определение параметров измерительной системы.....100

5.1 Система измерения в процессе производства цианистого натрия.....100

5.2 Система измерения в процессе производства сероуглерода.....111

5.3 Исследование качества управления процессами абсорбции.....120

5.4 Методика снижения динамической погрешности 123

5.5 Выводы.....124

Заключение.....125

Список литературы.....129

Приложения.....139

Приложение 1. Алгоритмическое обеспечение полевого изменяемого прибора 139

Приложение 2. Программа функционирования полевого изменяемого прибора 142

Приложение 3. Результаты эксперимента.....147

Приложение 4. Акт внедрения в эксплуатацию алгоритма регулирования 150

ВВЕДЕНИЕ

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 (абсорберы), 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 [1], 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.

Таким образом, актуальной является работа по созданию системы измерения степени насыщения абсорбента для управления процессом абсорбции и анализ ее метрологических характеристик для повышения точности измерений.

Многие исследователи отмечают, что для измерительных систем, применяемых в системах управления технологическими процессами, динамическая составляющая погрешности может достигать достаточно

больших значений. Так как значение методической динамической погрешности измерительных систем может быть снижено путем подбора оптимальных параметров настройки компонентов измерительных каналов без изменения аппаратной структуры систем, то важным является анализ именно динамической составляющей погрешности.

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

Анализ литературных источников показал, что известные модели динамических погрешностей измерительных систем не соответствуют структуре рассматриваемой системы с дробно-нелинейным взаимодействием измеряемых сигналов и компенсацией динамических свойств объекта измерения. Поэтому, **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 система 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 применяется в учебном процессе на кафедре «Автоматизации технологических процессов и производств» филиала ГОУВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском.

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

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 приводится анализ аппаратов и процессов абсорбции, анализ систем автоматического управления процессами абсорбции, анализ моделей метрологических характеристик измерительных систем, применяемых в системах автоматического управления технологическими процессами.

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.

В третьей главе представлена программно-аппаратная система для измерения степени насыщения абсорбента, состоящая из полевого

изменяемого прибора и пакета прикладных программ для обеспечения его функционирования.

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

В пятой главе предложена методика снижения методической динамической погрешности и рассмотрено её применение для определения параметров настройки измерительных систем при управлении процессами абсорбции цианистого натрия и сероуглерода. Также в главе рассмотрены результаты моделирования переходных процессов в системе и качество управления процессом абсорбции при использовании способа управления по степени насыщения абсорбента.

Автор выражает глубокую благодарность д.т.н., профессору Шевчуку Валерию Петровичу за ряд консультаций, которые повлияли как на направление диссертационного исследования, так и на выбор применяемых в диссертации методов и подходов к исследованию.

1. АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ПРОЦЕССОМ АБСОРБЦИИ

1.1 Анализ особенностей процесса жидкостной абсорбции газов

Абсорбцией называется процесс поглощения индивидуального газа, а также избирательного поглощения одного или нескольких компонентов газовой смеси жидким поглотителем — абсорбентом. Поглощение газа может происходить либо за счет его растворения в абсорбенте, либо в результате его химического взаимодействия с абсорбентом. В первом случае процесс называют физической абсорбцией, а во втором случае — хемосорбцией [2].

Физическая абсорбция (или просто абсорбция) обычно обратима. На этом свойстве абсорбционных процессов основано выделение поглощенного газа из раствора — десорбция. Десорбцию газа проводят отгонкой его в токе инертного газа или водяного пара в условиях подогрева абсорбента или снижения давления над абсорбентом. Отработанные после хемосорбции абсорбенты обычно регенерируют химическими методами или нагреванием.

Сочетание абсорбции и десорбции позволяет многократно применять абсорбент и выделять поглощенный газ в чистом виде.

Абсорбентами служат индивидуальные жидкости или растворы активного компонента в жидком растворителе. Во всех случаях к абсорбентам предъявляют ряд требований, среди которых наиболее существенными являются: высокая абсорбционная способность, селективность, низкое давление паров, химическая инертность по отношению к распространенным конструкционным материалам (при физической абсорбции — также к компонентам газовых смесей), низкая токсичность, огне- и взрывобезопасность, доступность и невысокая стоимость [2].

В промышленности абсорбцию применяют для решения следующих основных задач [3]:

1. Для получения готового продукта (например, абсорбция SO_3 в производстве серной кислоты, абсорбция HCl с получением хлороводородной кислоты, абсорбция оксидов азота водой в производстве азотной кислоты и т.д.); при этом абсорбцию проводят без десорбции.

2. Для выделения ценных компонентов из газовых смесей (например, абсорбция бензола из коксового газа; абсорбция ацетилена из газов крекинга или пиролиза природного газа и т. д.); при этом абсорбцию проводят в сочетании с десорбцией.

3. Для очистки газовых выбросов от вредных примесей (например, очистка топочных газов от SO_2, очистка от фтористых соединений газов, выделяющихся при производстве минеральных удобрений и т.д.). Очистку газов от вредных примесей абсорбцией используют также применительно к технологическим газам, когда присутствие примесей недопустимо для дальнейшей переработки газа (например, очистка коксового и нефтяного газов от H_2S, очистка азотоводородной смеси для синтеза аммиака от CO_2 и CO и т. д.). В этих случаях извлекаемые из газовых смесей компоненты обычно используют, поэтому их выделяют десорбцией.

4. Для осушки газов, когда в абсорбционных процессах (абсорбция, десорбция) участвуют две фазы - жидкая и газовая - и происходит переход вещества из газовой фазы в жидкую (при абсорбции) или, наоборот, из жидкой фазы в газовую (при десорбции), причем инертный газ и поглотитель являются только носителями компонента, соответственно, в газовой и жидкой фазах и в этом смысле в массопереносе не участвуют.

Аппараты, в которых проводят процессы абсорбции, называют абсорберами. Они представляют собой цилиндрические колонны, в которых происходит контакт очищаемого газа и абсорбента. Для увеличения площади поверхности контакта применяют различные методы. В зависимости от метода различают поверхностные, барботажные и распылительные абсорберы.

Наиболее простым является распылительный форсуночный абсорбер, показанный на рисунке 1.1 [2].

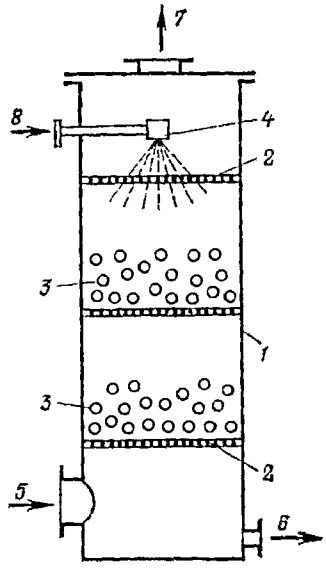

Рисунок 1.1 – Распылительный форсуночный абсорбер

Форсуночный абсорбер представляет собой полую колонну 1, в которой восходящий поток газа, подводимого снизу через патрубок 5, движется навстречу абсорбенту, подаваемому сверху через патрубок 8, и распыляемому на мелкие капли форсункой 4. Для увеличения площади контакта применены шаровые насадки 3, расположенные на решетках 2. Насыщенный абсорбент отводится через патрубок 6, очищенный газ уходит через патрубок 7.

1.2 Анализ систем управления процессами абсорбции

Абсорбционная установка как объект управления представляет собой сложную крупногабаритную техническую систему, которая управляется локальными контурами регулирования: температуры реакционных газов, давления в колонне, уровня насыщенного абсорбента, расхода тощего абсорбента, расхода насыщенного абсорбента. Для каждого из этих контуров существуют как различные способы воздействия на управляемую величину, так и алгоритмы управления. Правильная и надежная работа всех этих

систем обеспечивает эффективную работу абсорбционной установки в целом.

Рассмотрим наиболее распространенные на большинстве промышленных предприятий системы управления абсорбционными установками. В рамках настоящей работы основной интерес представляют установки с повторным использованием абсорбента. В таких системах абсорбент, насыщенный поглощенным газом, направляется в десорбер для очистки, а затем обратно в абсорбер.

Типовая схема регулирования абсорбционно-десорбционной установки показана на рисунке 1.2 [4]. По этой схеме работу абсорбера стабилизируют подачей постоянного количества жидкости, отвод жидкости из абсорбера регулируют по ее уровню в сборнике (нижней части абсорбера). Работа десорбера регулируется подачей пара на обогрев кипятильника в зависимости от температуры в верхней части десорбера. Работу дефлегматора регулируют подачей воды на охлаждение в зависимости от температуры газа после дефлегматора (на рисунке не показано), а возврат флегмы в десорбер — по уровню жидкости в сепараторе.

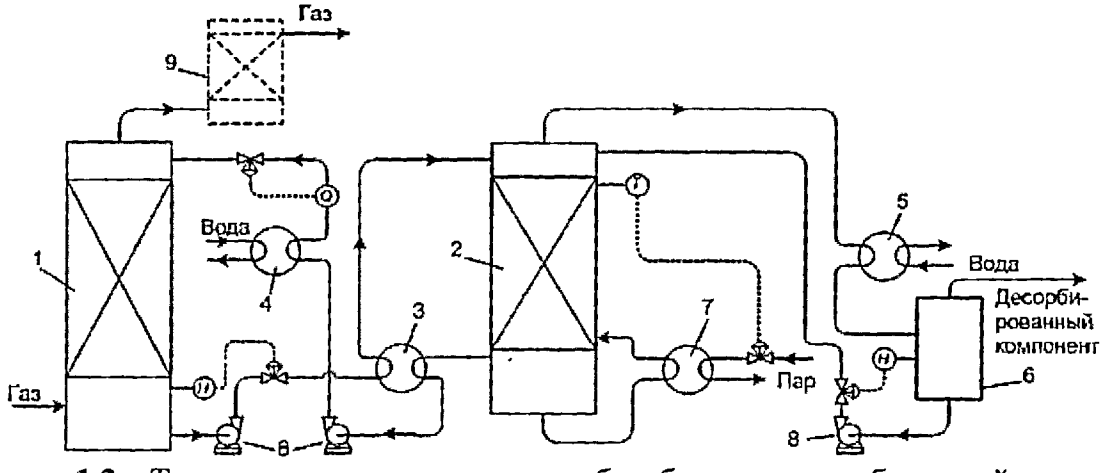

Рисунок 1.2 – Типовая схема регулирования абсорбционно-десорбционной установки
1 – абсорбер; 2 – десорбер; 3 – теплообменник; 4 – холодильник; 5 – дефлегматор; 6 – сепаратор; 7 – кипятильник; 8 – насосы; 9 – дополнительный абсорбер.
Н – уровнемер; Q – расходомер; Т – измеритель температуры.

Действие дефлегматора состоит в том, что в нем при неполном охлаждении газа происходит частичная конденсация более высококипящей

составляющей. Образовавшийся промежуточный конденсат называют флегмой. Флегма возвращается в десорбер, а обогащенный компонентом газ попадает в холодильник, где подвергается уже полной конденсации.

К настоящему времени разработано большое количество способов управления абсорберами, улучшающих работу приведенной выше схемы [5, 6, 7]. Повышение качества управления достигается за счет использования в алгоритмах управления обобщенных критериев качества работы системы управления.

В авторском свидетельстве [8] описан способ управления процессом абсорбции-десорбции (см. рисунок 1.3), в котором осуществляется косвенное измерение обобщенного показателя – теплового эффекта реакции Δq (1.1) по результатам прямых измерений температуры и расхода вещества.

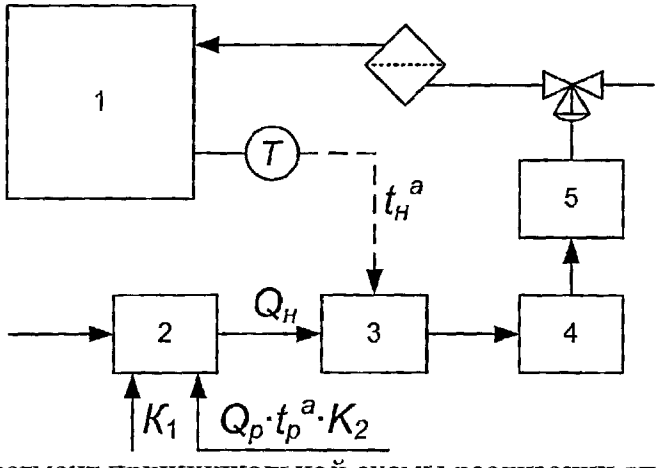

Рисунок 1.3 – Фрагмент принципиальной схемы реализации способа управления процессом абсорбции-десорбции

Температуру подаваемого в абсорбер 1 регенерированного абсорбента регулируют подачей охлаждающего агента регулятором 5, заданием для которого служит сигнал с блока 4, в котором вычисляется разность между текущим значением теплового эффекта Δq процесса абсорбции, вычисляемого блоком 3, и заданным значением теплового эффекта, полученного расчетом теплового баланса. Управление процессом производит регулятор 2 расхода регенерированного абсорбента. Блок 3 реализует следующий алгоритм:

$$\Delta q = Q_H \cdot t_H^a \cdot K_1 - Q_P \cdot t_P^a \cdot K_2 \text{ ккал/ч}, \qquad (1.1)$$

где $t_н^a$ – температура насыщенного абсорбента, измеряемая в нижней части абсорбера; $t_р^a$ – температура регенерированного абсорбента, измеряемая в нижней части десорбера; $Q_н$ – расход насыщенного абсорбента; $Q_р$ – расход регенерированного абсорбента; K_1, K_2 – постоянные коэффициенты.

Известен способ управления процессом абсорбции [9] путем изменения расхода абсорбента с коррекцией по концентрации абсорбируемого компонента в газе после абсорбции. Расход абсорбента корректируют по разности между концентрацией абсорбируемого компонента в газе после абсорбции и концентрацией этого компонента в газовой фазе, равновесной с абсорбентом, при температуре абсорбции, путем сравнения этой разности с заданной величиной. В данном случае обобщенным показателем, характеризующим эффективность протекания процесса, является разность фактической и равновесной концентраций абсорбируемого компонента.

Известен способ автоматического управления процессом абсорбции двуокиси серы труднорастворимыми и слабощелочными реагентами, например известковым молоком [10]. Способ реализован путем изменения расхода известкового молока в зависимости от концентрации поглощаемого компонента в отходящем газе с учетом значения pH известкового молока. Для повышения качества регулирования этот расход корректируется по разности pH известкового молока и исходной воды, идущей на его приготовление. Коррекция в работу автоматического устройства вносится по разности pH, полученного в аппарате известкового молока и технической воды. Значение этой разности соответствует изменению концентрации гидроксильных ионов при добавлении дробленого известняка, т.е. нейтрализующей способности полученного известкового молока.

Известен способ управления абсорбционно-десорбционными процессами очистки технологических газов [11], применяющийся в химической, газовой и нефтеперерабатывающей промышленности.

Управление абсорбционно-десорбционным узлом реализовано путем изменения расходов поглотительного раствора, пара и сорбента в раствор. При этом расход сорбента изменяется в зависимости от концентраций поглощаемого компонента в неочищенном и очищенном газах, температуры орошения абсорбера. С целью оптимизации процесса расходы корректируются по концентрации поглощаемого компонента в насыщенном растворе, концентрации сорбента в растворе, а также по температуре верха и низа десорбера и давлению неочищенного газа.

Также известен способ управления процессом абсорбции-десорбции [12], который позволяет оптимизировать процесс за счет повышения его избирательности, уменьшения энергозатрат и потерь продукта. Управление процессом абсорбции производится путем изменения подачи абсорбента регулятором. Заданием при этом служит сигнал с блока вычисления обобщенного показателя – степени насыщения абсорбента ε, вычисляемого по соотношению:

$$\varepsilon = \frac{Q_н - Q_р}{Q_н}, \qquad (1.2)$$

где $Q_н$ - расход насыщенного абсорбента, кг/ч; $Q_р$ - расход регенерированного абсорбента, кг/ч.

Температуру подаваемого в абсорбер регенерированного абсорбента регулируют подачей охлаждающего агента регулятором, заданием для которого служит сигнал с блока вычисления разности между текущим значением теплового эффекта процесса абсорбции и заданным значением теплового эффекта, полученного расчетом теплового баланса.

Анализ литературных источников показал, что для указанного способа управления процессом абсорбции [12] исследование метрологических характеристик системы для измерения степени насыщения абсорбента не производилось.

В работе [1] рассмотрены способы управления процессами абсорбции и предложены методы повышения эффективности протекания

технологического процесса. В качестве критерия управления применяется текущее значение степени насыщения абсорбента $\psi(t)$, которое вычисляется по выражению:

$$\psi(t) = \frac{X_2(t) - X_1(t)}{X_2{}^* - X_1(t)}, \qquad (1.3)$$

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

Принципиальная схема предлагаемой авторами системы регулирования показана на рисунке 1.4. Система работает следующим образом. Расход абсорбента на входе в абсорбер 1 корректируют по разности текущего и заданного значений степени насыщения абсорбента. Текущее значение степени насыщения определяется измерительной системой 2 по выражению (1.3) на основе прямых измерений датчиками 6 и 7 значений концентрации абсорбируемого вещества в абсорбенте на входе и на выходе из абсорбера. В сумматоре 3 вычисляется сигнал рассогласования, на основании которого регулятором 4 вырабатывается управляющее воздействие на регулирующий клапан 5.

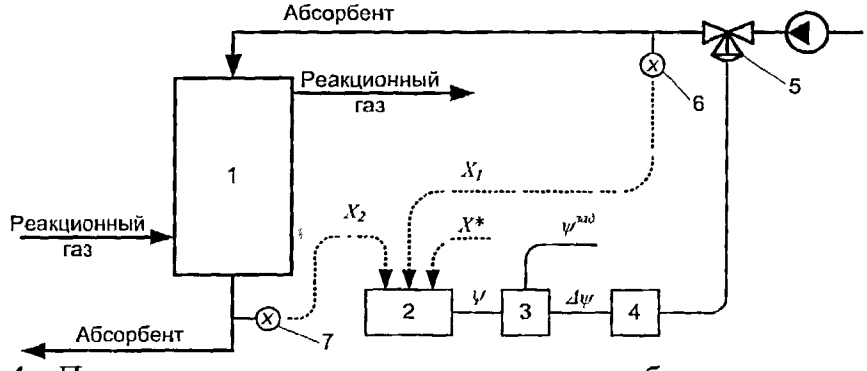

Рисунок 1.4 – Принципиальная схема реализации способа управления процессами абсорбции

Авторами рассмотрены различные варианты построения алгоритмов регулирования: без компенсации динамических свойств абсорбера, с

компенсацией динамических свойств абсорбера, а также с адаптацией настроек регулятора.

Для реализации предложенной в [1] системы управления требуется создание информационно-измерительной системы для измерения текущего значения степени насыщения абсорбента, чему и посвящена настоящая работа.

1.3 Анализ метрологических характеристик измерительных систем, применяемых при управлении технологическими процессами

В настоящее время большинство технологических процессов в промышленности оснащаются автоматическими системами управления (АСУ ТП), неотъемлемой частью которых являются информационно-измерительные системы. Основной особенностью функционирования информационно-измерительных каналов систем при работе в составе АСУ ТП является то, что в рабочем режиме АСУ ТП входные сигналы измерительных каналов изменяют свое значение во времени. В соответствии с классификацией по условиям изменения измеряемой величины, приведенной в [13], такие измерения являются динамическими.

Одним из основных факторов, определяющих эффективность работы систем автоматического управления, является точность поддержания заданных значений параметров технологических процессов. В информационно-измерительных системах, выходные сигналы которых используются для управления технологическими процессами, наличие погрешности измерения приводит к отклонению значений параметров технологических процессов от заданных, что может привести к значительным экономическим потерям, т.е. снижению эффективности функционирования АСУ ТП [14, 15].

В определениях [16] измерения могут считаться эффективными, если их результаты обеспечивают необходимое качество реализации функций управления технологическими процессами, а затраты на измерения, включая

метрологическое обслуживание средств измерений, минимальны. При этом для обеспечения эффективности измерений при установлении необходимой точности измерений, разработке и аттестации методик, выборе средств измерений, методов их метрологического обслуживания, решении других метрологических задач необходимо учитывать экономические потери и другие неблагоприятные последствия из-за погрешности измерений, как в сфере производства, так и в сфере использования продукции. Также необходимо учитывать связи измеряемых параметров с производительностью технологического оборудования, себестоимостью и качеством продукции, безопасностью труда и экологической безопасностью. Последнее положение для рассматриваемой в настоящей работе измерительной системы обеспечивается непосредственно тем, что она предназначена для определения показателя эффективности протекания технологического процесса, который используется в алгоритме управления, направленном на повышение производительности и снижение себестоимости продукции.

Таким образом, согласно задачам повышения эффективности измерений, требуется определить экономически эффективные методы расчета метрологических характеристик измерительных систем и снижения погрешностей, вносимых в результат измерений.

Рассматриваемая система предназначена для измерения обобщенного показателя технологического процесса. Структурно такие системы состоят из нескольких измерительных каналов, предназначенных для измерения технологических параметров, функционально связанных с оцениваемым показателем. Каналы представляют собой набор последовательно соединенных функциональных блоков – компонентов измерительных каналов, выполняющих преобразования и обработку измеряемых сигналов. К таким блокам можно отнести различного рода преобразователи, фильтры, аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые (ЦАП) преобразователи и т.д. Необходимо отметить, что некоторые компоненты каналов представляют

собой аппаратные средства (например, первичные и нормирующие преобразователи), а другие - программные средства, реализующие, например, алгоритмы фильтрации, нормирования и коррекции. В связи с этим современные измерительные каналы называют программно-аппаратными (ПА ИИК) [17]. Структура измерительной системы, осуществляющей косвенные измерения обобщенного показателя, приведена на рисунке 1.5. Параметры технологического процесса $X_1(t)$, $X_2(t)$, ..., $X_n(t)$ подвергаются прямым измерениям и обработке в измерительных каналах ИИК$_1$, ИИК$_2$,... , ИИК$_n$. Измерительная информация на выходе каналов $Y_1(t)$, $Y_2(t)$, ..., $Y_n(t)$ преобразуется блоком вычисления параметра (БВ) в текущее значение обобщенного показателя $Z(t)$, которое передается потребителю информации (в подсистему управления, регистрации, информационную подсистему более высокого уровня).

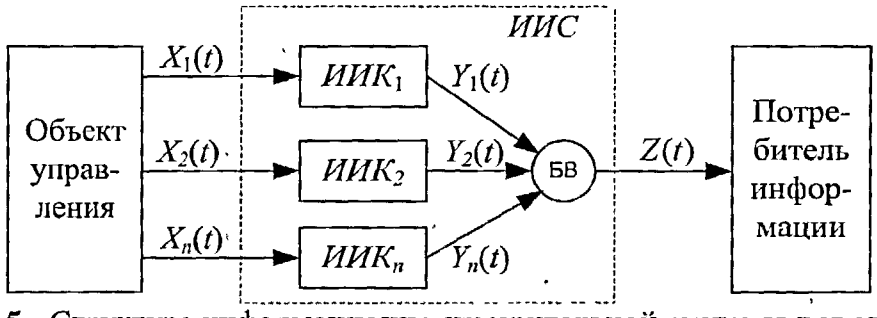

Рисунок 1.5 - Структура информационно-измерительной системы для определения обобщенных показателей

Сложная структура каждого канала в отдельности и всей системы в целом, наличие в цепи обработки измеряемых непрерывных сигналов операций цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразований, нелинейных операций обработки сигналов приводит к появлению погрешностей измерения. Природа возникновения этих погрешностей кроется во многих факторах, среди которых необходимо отметить неточности применяемых преобразователей, влияние на измеряемые сигналы различного рода случайных помех, отличие спектров программно обрабатываемых сигналов от спектров входных сигналов.

Как отмечено выше, особенностью рассматриваемой измерительной системы является то, что измерения осуществляются системой в динамическом режиме. При этом возникает дополнительная – динамическая составляющая погрешности. Под ней понимается разность между погрешностью в динамическом режиме измерения и статической погрешностью [18].

Исследованию динамических погрешностей измерительных систем посвящено большое количество работ [19, 20, 21, 22]. Авторы этих работ отмечают, что динамическая погрешность в некоторых случаях может достигать значений, превышающих основную составляющую погрешности.

Основной причиной возникновения динамической составляющей погрешности является дискретизация во времени измерительной информации [23], а также несоответствие динамических свойств компонентов измерительных каналов характеру входного сигнала [24]. Под динамическими свойствами необходимо понимать те свойства компонентов каналов, которые проявляются в зависимости отклика измерительной системы не только от входного воздействия, имеющего место в настоящий момент времени, но и от воздействий в предыдущие моменты времени. Примерами динамических операций, обладающих подобными свойствами, являются алгоритмы цифровой фильтрации сигналов. При анализе динамической погрешности измерительной системы необходимо также учитывать инерционность измерительных устройств (в частности – первичных преобразователей), которые в некоторых случаях могут значительно изменять частотный состав измеряемого сигнала.

Как отмечается в [17], исследование метрологических характеристик измерительных систем, подобных рассматриваемой, должно производиться в соответствии с системным подходом, который заключается в том, что анализ системы и ее элементов осуществляется не изолированно друг от друга, а в непосредственном взаимодействии между собой и с источником измерительной информации. В связи с этим, авторы [25] вводят понятие

методической динамической составляющей погрешности измерений. Этим термином подчеркивается зависимость данной составляющей погрешности от свойств измерительной системы и взаимодействующих компонентов измерительного канала.

Значение методической динамической составляющей погрешности измерения во многом определяется параметрами настройки компонентов измерительных каналов и их взаимным влиянием, а также параметрами измеряемых сигналов, поэтому возможно снизить методическую динамическую погрешность путем определения оптимальных значений настроечных коэффициентов компонентов измерительных каналов без изменения аппаратной реализации системы.

1.4 Анализ методов количественной оценки динамических погрешностей измерительных систем

Исследованию метрологических характеристик сложных измерительных систем посвящено множество научных работ. Для решения оптимизационных задач по улучшению метрологической, информационной и структурно-алгоритмической эффективности информационно-измерительных систем значительный интерес представляют структурные и метрологические модели информационно-измерительных каналов, разработанные О.Н. Новоселовым, Г.И. Кавалеровым, С.М. Мандельштамом, А.Ф. Фоминым и другими учеными [26, 27, 28]. Разработанные Э.И. Цветковым в [29, 30] операторные математические модели последовательных преобразований сигналов в процессорных средствах измерения позволяют производить формализованный анализ измерительных каналов. Задачам повышения точности и метрологическому обеспечению динамических измерений посвящены работы М.Я. Гинзбурга, А.И. Заико, П.П. Орнатского [31, 32]. Исследованиям неоднородной программно-аппаратной структуры измерительной системы и особенностям

операций аналого-цифро-аналогового преобразования, посвящены работы Л.А. Баранова [33].

В перечисленных выше работах рассматривались преимущественно теоретические основы принципов математического описания измерительных систем. Целью настоящей работы является разработка ориентированных на практическое применение математических моделей и методик поиска оптимальных значений параметров нелинейной измерительной системы, используемой для управления технологическим процессом.

В настоящее время чаще других используются следующие методы оценки метрологических характеристик измерительных систем: детерминированный, информационный и вероятностный.

Детерминированный метод используется преимущественно в условиях детерминированных, т.е. неслучайных входных воздействий [34, 35, 36, 37].

Информационный метод использует аппарат раздела теории вероятностей – теории информации. Критерием качества здесь является количество информации, извлеченное измерительной системой, и его производные, тесно связанные с погрешностями системы. Погрешность выражается через количество информации, извлекаемой измерительной системой за i-е статистическое измерение [26]:

$$J[X] = H[X] - H[X/X_i], \qquad (1.4)$$

где $H[X]$-априорная энтропия информации об измеряемой величине, $H[X/X_i]$-апостериорная энтропия после i-го измерения. Энтропия случайной величины определяется в теории информации как степень ее неопределенности или, иначе, как объем информации, который необходимо получить, чтобы узнать значение случайной величины. Величина $J[X]$ функционально связана с вероятностью того, что выполняется условие $X \in [\overline{X} - \Delta X, \overline{X} + \Delta X]$.

Исследованию измерительных систем в рамках информационного подхода посвящены, например, работы [38, 39].

Вероятностный метод в качестве теоретической основы использует корреляционный анализ и теорию случайных функций. В статическом режиме измеряемые сигналы рассматриваются как реализации случайной величины, а динамическом – случайной функции. В таком случае определяющими параметрами измеряемых сигналов являются плотность вероятности для статического режима и корреляционная функция для режима динамического. В динамическом режиме показания измерительной системы $y(t)$ являются случайной функцией и определяются через интеграл свертки:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{t} x(\upsilon)h(t-\upsilon)d\upsilon, \qquad (1.5)$$

где $x(\upsilon)$ – сигнал на входе измерительного канала; $h(t)$ – весовая функция измерительного канала.

Метрологическими характеристиками являются статистические параметры (математическое ожидание, корреляционная функция) случайной функции:

$$e(t) = y(t) - x(t). \qquad (1.6)$$

Выражение (1.6) можно также интерпретировать как разность значения, полученного при прохождении измерительной информации через реальную измерительную систему и через эталонную систему с идеальным оператором преобразования, к реализации которого стремятся при создании системы. Исследованию измерительных систем в рамках вероятностного подхода посвящены, например, работы [28, 40].

Использование вероятностного метода для анализа метрологических характеристик рассматриваемой измерительной системы представляется более предпочтительным в связи с его адекватностью задачам исследования сложных систем в динамическом режиме.

Рассмотрим более подробно существующие модели метрологических характеристик измерительных систем, наиболее близких по структуре и задачам к рассматриваемой системе.

В работе [41] значение технико-экономического показателя определяется следующим образом:

$$\eta(t) = \eta[\tilde{x}_1(t), \tilde{x}_2(t), ..., \tilde{x}_n(t)], \tag{1.7}$$

где $\tilde{x}_1(t), \tilde{x}_2(t), ..., \tilde{x}_n(t)$ - значение величины, измеренной i-ым каналом:

$$\tilde{x}_i(t) = \int_{-\infty}^{t} x_i(\tau) h_i(t-\tau) d\tau,$$

где $h_i(t)$ – весовая функция i-го динамического канала. Схема измерения величин $\tilde{x}_1(t), \tilde{x}_2(t), ..., \tilde{x}_n(t)$ приведена на рисунке 1.6.

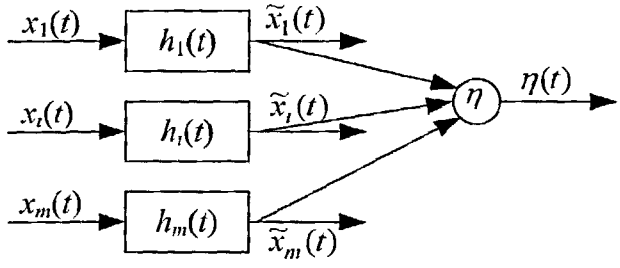

Рисунок 1.6 – Схема измерения отдельных величин, используемых для вычисления технико-экономических показателей

Необходимо отметить, что в работе [41] особое внимание уделено расчету не текущего значения показателя, а его усредненного за некоторый промежуток времени θ значения:

$$\eta^*(\theta) = \eta\left\{\frac{\Delta t}{\theta}\sum_{k=1}^{\theta/\Delta t}\tilde{x}_1^*(k), \frac{\Delta t}{\theta}\sum_{k=1}^{\theta/\Delta t}\tilde{x}_2^*(k), ..., \frac{\Delta t}{\theta}\sum_{k=1}^{\theta/\Delta t}\tilde{x}_m^*(k),\right\}. \tag{1.8}$$

Погрешность вычисления показателя по формуле (1.8) равна:

$$\Delta\eta(\theta) = \eta\left\{\frac{1}{\theta}\int_0^{\theta} x_1(t)dt, \frac{1}{\theta}\int_0^{\theta} x_2(t)dt, ..., \frac{1}{\theta}\int_0^{\theta} x_m(t)dt\right\} - \eta^*(\theta). \tag{1.9}$$

В качестве характеристики погрешности используется среднеквадратическая погрешность. Она вычисляется как дисперсия случайной функции (1.9). Математические модели для среднеквадратической погрешности выражены как функции параметров измеряемых сигналов, динамических характеристик измерительных каналов и длины реализации. Однако использование этих моделей в качестве

теоретической основы при расчете оптимальных значений настроечных коэффициентов измерительной системы представляется затруднительным, так как каждый из измерительных каналов представлен одним «сквозным» динамическим оператором, не учитывающим сложной структуры канала. Еще одним недостатком этих моделей является невозможность их использования для оценки погрешности вычисления текущих значений технико-экономических показателей.

Методики из работ Кузнецова Б.Ф. позволяют определить (на основе вероятностного подхода) динамические погрешности измерительных каналов, применяемых для управления технологическим процессом [15, 19, 20, 21]. Однако авторами рассматривается измерительный канал, состоящий из одного измерительного преобразователя (линейного или нелинейного).

К примеру, на рисунке 1.7 показана схема выделения динамической погрешности линейного непрерывного измерительного преобразователя. Здесь $x(t)$, $y(t)$ – соответственно входной и выходной сигнал преобразователя, $K(j\omega)$ – передаточная функция преобразователя, $S_x(\omega)$ – спектральная плотность входного сигнала, $S_\Delta(\omega)$ – спектральная плотность динамической погрешности.

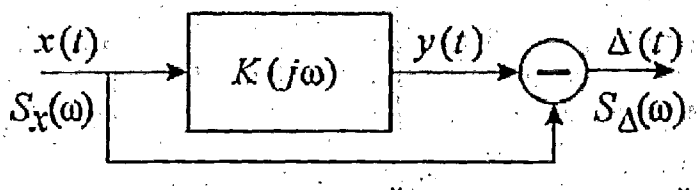

Рисунок 1.7 – Схема выделения динамической погрешности линейного непрерывного измерительного преобразователя

Для такого преобразователя спектральная плотность динамической погрешности определяется соотношением:

$$S_\Delta(\omega) = S_x(\omega)\left|1 - K(j\omega)\right|^2. \qquad (1.10)$$

Отсюда можно вычислить дисперсию динамической погрешности в соответствии с соотношением:

$$\Delta^2_{дин} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}\left|1 - K(j\omega)\right|^2 S_x(\omega)d\omega. \qquad (1.11)$$

Для нелинейного непрерывного преобразования стохастического сигнала авторы предлагают использование регрессионной модели динамической погрешности, построенной на основе факторного эксперимента. Математическая модель динамической погрешности представляется в следующем виде:

$$\eta^2_{дин} = \varphi(X) + \xi, \qquad (1.12)$$

где $\varphi(...)$ – функция, учитывающая степень влияния входящих в неё переменных; $\eta^2_{дин}$ – оценка квадрата динамической погрешности, предсказанная регрессионной моделью, $X = (B,\ m_x,\ \sigma_x^2)$ – вектор факторов; ξ – остаточная случайная компонента.

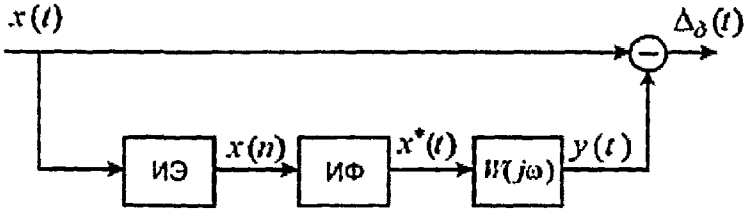

Рисунок 1.8 – Схема выделения динамической погрешности циклического преобразователя

Схема определения динамической погрешности для циклических приборов (например, хроматограф, масспектрометр) представлена на рисунке 1.8 [15]. На схеме $x(t)$ – входной аналоговый сигнал преобразователя, ИЭ – импульсный элемент, $x(n)$ – дискретная последовательность входного сигнала, ИФ – интерполирующий фильтр (формирующий элемент), $x^*(t)$ – восстановленный сигнал, $W(j\omega)$ – приведенная непрерывная часть преобразователя, $y(t)$ – выходной сигнал преобразователя.

Динамическая погрешность $\Delta_д$ циклического преобразователя определяется следующим выражением:

$$\Delta_{\partial}^{2}=\frac{1}{\pi}\int_{0}^{\infty}\left\{\frac{2}{\omega^{2}+1}\left[1-4\sin\frac{\omega(\Omega+1)T_{и}^{*}}{2}\frac{\cos(\omega(\Omega+1)T_{и}^{*})}{\omega(\Omega+1)T_{с}^{*}}\right]+\right.$$

$$\left.+\frac{4}{(\Omega+1)T_{и}^{*}}\frac{sh\left((\Omega+1)T_{и}^{*}\right)}{ch\left((\Omega+1)T_{и}^{*}\right)-ch\left(\omega(\Omega+1)T_{и}^{*}\right)}\frac{\sin^{2}\left(0{,}5\omega(\Omega+1)T_{и}^{*}\right)}{\omega^{2}}\right\}d\omega, \quad (1.13)$$

где T – период дискретизации исходного процесса $x(t)$, $Tu^{*} = T_{и}\cdot\alpha$ – относительное время накопления, $T_{и}$ – абсолютное время накопления, α – параметр случайного процесса $x(t)$, Ω – отношение времени накопления к времени измерения.

В работе [23] авторы рассматривают особенности динамических свойств приборов, применяемых в целях учета энергоресурсов. Однако авторы не приводят моделей динамической погрешности или точных указаний по её снижению.

Анализу динамических погрешностей информационно-измерительных систем также посвящены работы [25, 42 - 45].

Авторы работ [46, 47] рассматривают общий метод определения динамической погрешности измерительной системы. Под динамической погрешностью понимают максимальное отклонение функции показаний измерительной системы $y(t)$ от эталонной функции $y_0(t)$, смещенной на период времени τ. Эталонная функция отличается от реальной только отсутствием динамической составляющей. При этом рассматривается относительная динамическая погрешность:

$$\varepsilon(\tau)=\max_{t}\left(\left|\frac{y(t)-y_{0}(t-\tau)}{y_{m}}\right|\right), \quad (1.14)$$

где $y_{m}=\max(|y_{0}(t)|)\approx\max(|y(t)|)$ - максимальное значение показаний измерительной системы.

Показания системы $y(t)$ определяются через КЧХ системы $H(i\omega)$ и Фурье-образ измеряемого сигнала $X(\omega)$:

$$y(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}H(i\omega)X(\omega)\exp(i\omega t)d\omega. \quad (1.15)$$

Верхняя граница случайной функции динамической погрешности определяется как:

$$\varepsilon_D(\omega_B) \approx \frac{\left\| H(i\omega_B) \right| - \left| H_0 \right\|}{\left| H_0 \right|}, \qquad (1.16)$$

где $H(i\omega_B)$ – значение КЧХ системы при граничной частоте полосы пропускания, H_0 – значение КЧХ системы при $\omega = 0$.

Автор [48] рассматривает динамические погрешности определения координат движущегося объекта. В качестве источника динамических погрешностей рассматривается дискретизация по времени и запаздывание системы при реагировании на изменение положения объекта. В качестве метода снижения динамических погрешностей предлагаются методы прогнозирования, в частности, фильтр Калмана.

Наиболее близкой по целям и структуре рассматриваемой нами измерительной системе является работа [49], посвященная анализу метрологических характеристик системы с мультипликативным взаимодействием измеряемых сигналов. Измерительная система в работе представлена как динамическая система, преобразующая по выражению (1.17) несколько входных сигналов $X_1(t)$, $X_2(t)$, ..., $X_N(t)$ – случайных функций, связь между которыми мультипликативна, в реакцию системы $Y(t)$ – также случайную функцию.

$$Y(t) = X_1(t)X_2(t)...X_N(t). \qquad (1.17)$$

Здесь $X_1(t)$, $X_2(t)$, ..., $X_N(t)$ – некоторые входные параметры, с которыми функционально связан результат измерения $Y(t)$.

Анализ метрологических характеристик системы осуществляется статистическими методами, для применения которых производится линеаризация выражения (1.17) в окрестности точки $M(M_{x1}, M_{x2},..., M_{xN})$, где M_x – математическое ожидание функции $X(t)$. Схема выделения погрешности системы представлена на рисунке 1.9.

На рисунке 1.9: $X_1(t)$, $X_2(t)$, ..., $X_m(t)$ – измеряемые сигналы; $n_1(t)$, $n_2(t)$, ..., $n_m(t)$ – помехи, аддитивно накладывающиеся на полезный сигнал в

каждом из каналов; $h_{э1}(t)$, $h_{э2}(t)$, ..., $h_{эm}(t)$ – весовые функции эталонных каналов; $h_{p1}(t)$, $h_{p2}(t)$, ..., $h_{pm}(t)$ – весовые функции реальных каналов.

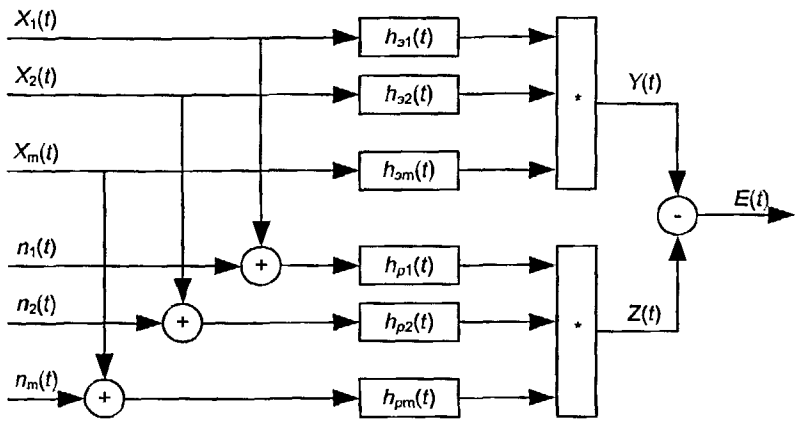

Рисунок 1.9 – Схема формирования погрешности измерения информации в системе, содержащей мультипликативные связи между измерительными каналами

Погрешность измерения рассматривается как разность показаний программно-аппаратной измерительной системы $Z(t)$ и эталонной измерительной системы $Y(t)$:

$$E(t) = Z(t) - Y(t). \tag{1.18}$$

В работе [49] было получено выражение для нахождения дисперсии погрешности измерений для случая воздействия на измерительный канал системы помехи типа «белый шум», для случая воздействия коррелированной помехи, а также для случая измерения в рамках системы коррелированных между собой полезных сигналов.

Однако зависимости, полученные в [49] для мультипликативного взаимодействия измеряемых величин, не могут быть применены к исследуемой в настоящей работе измерительной системе. В работе [49] рассмотрен случай перемножения измерительной информации, получаемой по нескольким измерительным каналам одного и того же материального потока, то есть не разделённых динамикой объекта управления, тогда как исследуемый в настоящей работе обобщенный показатель вычисляется по уравнению измерения (1.3), то есть является частным от деления результатов

измерения по двум измерительным каналам, разделенным динамикой абсорбера.

1.5 Выводы и постановка задач исследования

В промышленности широко используются процессы абсорбции. Абсорбер, как объект управления, представляет собой сложную техническую систему. В настоящее время управление этой технической системой осуществляется с помощью локальных контуров регулирования. К ним относится контур управления температурой газовой смеси, контур регулирования давления в абсорбционной колонне, контур регулирования уровня абсорбента в нижней части колонны, контур регулирования количества подаваемого в колонну абсорбента и др. Следует отметить, что большая часть абсорбционных установок представляет собой массивные аппараты, обладающие большой инерционностью, что необходимо учитывать при управлении ими.

В работе [1] предложен новый алгоритм управления абсорбционной установкой, направленный на повышение эффективности протекания процесса абсорбции и основанный на использовании обобщенного показателя - степени насыщения абсорбента. Для реализации указанного алгоритма необходимо измерять степень насыщения абсорбента, для чего требуется создание информационно-измерительной системы, являющейся частью системы управления.

Актуальной является задача создания системы измерения степени насыщения абсорбента для управления процессом абсорбции и анализ ее метрологических характеристик для определения параметров настройки системы, обеспечивающих максимальную точность измерений.

Многие исследователи отмечают, что для измерительных систем, применяемых для управления технологическими процессами, динамическая составляющая погрешности может достигать достаточно больших значений. Так как значение методической динамической погрешности измерительной

системы может быть снижено путем подбора оптимальных параметров настройки ее компонентов без изменения аппаратной структуры системы, то важным является анализ именно динамической составляющей погрешности.

Измерительная информация, которой оперируют измерительные системы, применяемые при управлении технологическими процессами, является стохастической, поэтому наиболее подходящими для анализа и построения метрологических характеристик таких систем являются статистические методы.

Анализ литературных источников показал, что известные модели динамических погрешностей информационно-измерительных систем не соответствуют структуре рассматриваемой системы, особенностью которой является дробно-нелинейное взаимодействие измерительной информации и учет динамических свойств объекта измерения.

Таким образом, **целью работы** является разработка измерительной системы для управления процессом абсорбции и анализ ее метрологических характеристик для снижения методической динамической погрешности системы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

- провести анализ аппаратов и процессов абсорбции, анализ систем автоматического управления процессами абсорбции, а также метрологических характеристик измерительных систем;
- разработать уравнение измерения степени насыщения абсорбента, учитывающее динамические свойства объекта измерения;
- разработать систему для измерения степени насыщения абсорбента;
- построить и проверить на адекватность математические модели метрологических характеристик измерительной системы;
- провести исследование зависимости метрологических характеристик от значений параметров настройки измерительной системы;

- разработать и опробовать методику снижения методической динамической погрешности обработки информации в измерительной системе, основанную на предложенных моделях метрологических характеристик;

- рассмотреть переходные процессы и качество управления процессом абсорбции при использовании алгоритмов управления по степени насыщения абсорбента.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Создание современной информационно-измерительной системы для управления процессом абсорбции невозможно без анализа метрологических характеристик информационной подсистемы АСУ ТП, в структуре которой функционирует программно-аппаратный прибор для измерения степени насыщения абсорбента. В главе 1 показано, что существующие методы расчета методической динамической погрешности обработки измерительной информации не учитывают наличие в алгоритмах обработки информации динамических свойств объекта управления. Такой учет особенно необходим, если в системе используется критерий управления, для вычисления которого необходимо измерять входные и выходные переменные объекта управления. Известно [17, 25], что динамические погрешности процесса измерения тесно связаны с динамическими погрешностями процесса управления, так как оба процесса происходят в реальном масштабе времени. Поэтому необходимо обеспечить приведение входных и выходных переменных объекта управления к одному моменту времени. Виртуальное приведение к единому моменту времени существенно снижает динамические погрешности в системе управления и значительно повышает качество измерения критерия управления. В свою очередь, оценка качества измерения критерия управления невозможна без учёта метрологических характеристик процесса измерения в информационно-измерительной системе. Поэтому в данной главе на основе анализа статистических характеристик измерительной информации, а также динамических свойств компонентов информационно-измерительной системы построены модели метрологических характеристик системы измерения степени насыщения для управления процессом абсорбции.

2.1 Модели измерительной информации

Для анализа метрологических характеристик системы измерения степени насыщения абсорбента необходимо определить параметры и свойства измерительной информации.

Анализу свойств промышленных сигналов посвящено большое количество работ, в которых предлагаются различные аналитические модели измеряемых сигналов и воздействующих на них помех [27, 50, 51, 52, 53]. Процессы управления в технических системах описываются детерминированными функциями. Однако измерительная информация в процессе измерения, в силу различных возмущений и помех измерения, приобретает стохастический характер.

В [54] отмечено, что адекватными моделями большей части измеряемых процессов являются нестационарные случайные процессы, характеристики которых изменяются во времени. Причиной нестационарности являются изменение режимов технологического процесса, изменение характеристик оборудования и сырья, импульсные воздействия на контролируемый объект в виде включения-выключения двигателей, ударных воздействий, отказы в работе контролируемого объекта.

В [41] отмечено, что для класса непрерывных промышленных производств, в котором агрегаты производят непрерывную обработку материалов практически в стационарном режиме (то есть когда режим обработки почти не зависит от момента времени), существуют квазистационарные режимы работы, при которых статистические характеристики измеряемых процессов можно считать практически стационарными. Для упрощения анализа подобных процессов их можно привести к стационарным. Подобная точка зрения также приводится и в работе [55], где среди особенностей, присущих АСУ ТП, отличающих их от других систем, выполняющих функции измерений, отмечена следующая. Режим работы АСУ непрерывными технологическими процессами по большей части является стационарным, при этом основную часть времени

(более 90 %) измеряемые параметры технологического процесса и оборудования находятся вблизи номинальных значений, а значения внешних влияющих факторов находятся вблизи некоторых установившихся значений, характерных для данного технологического процесса.

В работе [52] авторы отмечают, что гауссово распределение для полезного сигнала и помехи в случае наложения большого числа независимых влияющих воздействий является хорошей начальной аппроксимацией. В предельном случае при наложении бесконечно большого числа независимых элементарных процессов получается точное гауссово распределение, например, при наличии шумов в электронных схемах. Так как шумовые помехи в измерительной системе возникают большей частью за счет наложения большого числа неконтролируемых и независимых друг от друга импульсных воздействий и помех, то предположение о наличии такого распределения оправдано.

В работе [25] предложено представление измерительной информации $G(t)$ в виде квазистационарного эргодического случайного процесса:

$$G(t) = X(t) + n(t), \tag{2.1}$$

где $n(t)$ – помеха, наложенная на полезный сигнал, принятая в виде некоррелированной с полезным сигналом случайной функции $n(t)$ с нулевым математическим ожиданием; $X(t)$ – полезный сигнал, являющийся квазистационарным эргодическим случайным процессом с постоянным математическим ожиданием Mx и корреляционной функцией вида:

$$Kx(t) = Dx \cdot e^{-\alpha|t|}, \tag{2.2}$$

где Dx – дисперсия сигнала, α - скорость изменения сигнала, t – текущий момент времени.

В качестве основной характеристики помехи применялась корреляционная функция:

$$Kn(t) = Dn \cdot e^{-\beta|t|}, \tag{2.3}$$

где Dn – дисперсия помехи, β - скорость изменения корреляционной функции.

В случае высокочастотной помехи (спектр помехи значительно шире спектра полезного сигнала, то есть выполняется условие $\beta >> \alpha$) выражение (2.3) в пределе стремится к белому шуму – непрерывной стационарной случайной функции, спектральная плотность которой постоянна на всех частотах от 0 до ∞.

Корреляционная функция такой случайной функции выражается как

$$Kn(t) = S \cdot \delta(t), \qquad (2.4)$$

где S – уровень шума; $\delta(t)$ – дельта-функция Дирака.

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

Для выбора моделей измерительной информации в настоящей работе были проанализированы архивы значений параметров двух технологических процессов абсорбции: сероуглерода и цианистого натрия.

Для определения статистических характеристик измерительной информации при производстве цианистого натрия были использованы значения концентраций абсорбента из архива АСУ ТП.

На рисунке 2.1 показан вид случайной функции концентрации цианистого натрия в растворе едкого натра на выходе из абсорбера.

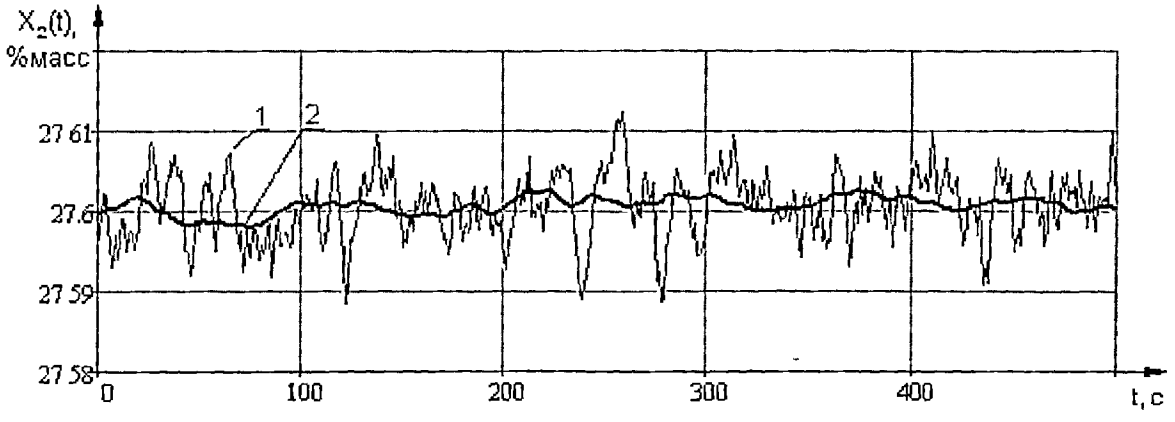

Рисунок 2.1 – Вид случайной функции концентрации цианистого натрия в растворе едкого натра на выходе из абсорбера
1 – Сигнал с наложенной помехой
2 – Сглаженный сигнал

Статистические характеристики полезного сигнала были определены по методике, приведенной в [56], согласно которой были найдены корреляционные функции центрированных сглаженных сигналов. Сглаживание проводилось методом скользящего среднего [41] при размере выборки N = 50 значений.

Корреляционные функции центрированных случайных функций концентрации цианистого натрия в растворе едкого натра показаны на рисунке 2.2. Взаимная корреляционная функция центрированных случайных функций построена после приведения сигналов к одному моменту времени путем смещения измеренных значений концентраций цианистого натрия в абсорбенте на время запаздывания (15 мин [1]).

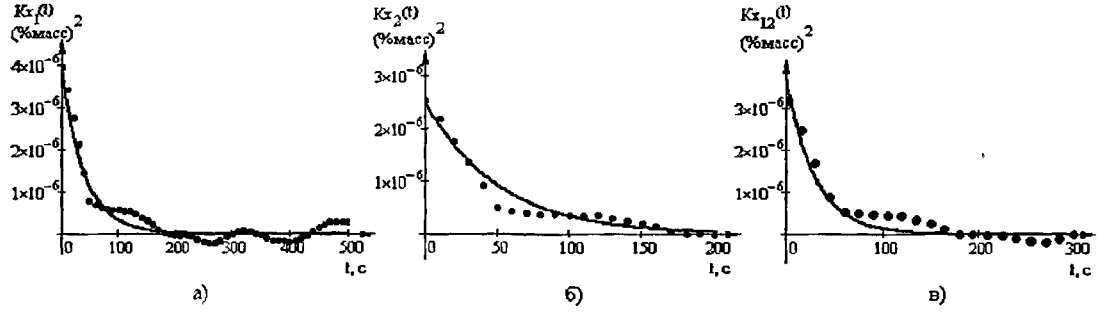

Рисунок 2.2 – Корреляционные функции сигналов концентрации цианистого натрия

а) – на входе в абсорбер
б) – на выходе из абсорбера
в) – на входе и на выходе из абсорбера

... - экспериментальные значения;
___ - аппроксимирующая кривая.

Свойства помехи можно описать корреляционными функциями, которые получены как разность исходных и сглаженных сигналов. Корреляционные функции помех измерения показаны на рисунке 2.3.

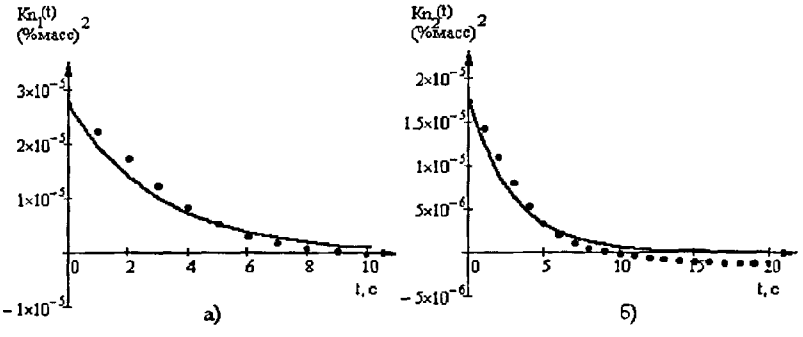

Рисунок 2.3 – Корреляционные функции помехи в канале измерения концентрации цианистого натрия

а) – на входе в абсорбер
б) – на выходе из абсорбера

... - экспериментальные значения;
___ - аппроксимирующая кривая.

После аппроксимации полученных корреляционных функций экспоненциальной зависимостью получены следующие модели измерительной информации:

- автокорреляционная функция центрированной случайной функции концентрации цианистого натрия в растворе едкого натра на входе в абсорбер:

$$Kx_1(t) = 3{,}94 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(-2{,}5 \cdot 10^{-2} \cdot t); \qquad (2.5)$$

- автокорреляционная функция центрированной случайной функции концентрации цианистого натрия в растворе едкого натра на выходе из абсорбера:

$$Kx_2(t) = 2{,}52 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(-2{,}0 \cdot 10^{-2} \cdot t); \qquad (2.6)$$

- смещенная взаимная корреляционная функция центрированных случайных функций концентраций цианистого натрия в растворе едкого натра на входе и на выходе из абсорбера:

$$Kx_{12}(t) = 3{,}15 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(-3{,}3 \cdot 10^{-2} \cdot t); \qquad (2.7)$$

- автокорреляционная функция помехи, наложенной на полезный сигнал концентрации цианистого натрия в растворе едкого натра на входе в абсорбер:

$$Kn_1(t) = 2{,}72 \cdot 10^{-5} \cdot \exp(-3{,}3 \cdot 10^{-1} \cdot t); \qquad (2.8)$$

- автокорреляционная функция помехи, наложенной на полезный сигнал концентрации цианистого натрия в растворе едкого натра на выходе из абсорбера:

$$Kn_2(t) = 1{,}74 \cdot 10^{-5} \cdot \exp(-3{,}3 \cdot 10^{-1} \cdot t). \qquad (2.9)$$

Статистические характеристики сигналов значений концентраций абсорбента при производстве сероуглерода были определены на основе данных из лабораторных журналов. В настоящее время автоматические анализаторы концентраций сероуглерода в абсорбенте не применяются, а концентрация его в абсорбенте на входе и на выходе из абсорбера определяется лаборантом цеха четыре раза в сутки. На основе лабораторных

данных были определены математическое ожидание и дисперсия значений концентраций.

В рассматриваемом случае параметры помех, наложенных на полезный сигнал, точно не могут быть определены. Поэтому помехи были приняты в виде «белого шума». Численная оценка уровня шума производилась по выражению [56]:

$$S = Dx_i \cdot Dn_i, \tag{2.10}$$

где Dx_i - дисперсия значений концентраций сероуглерода в абсорбенте; Dn_i - дисперсия помехи.

Учитывая, что технические средства, применяемые при производстве сероуглерода и цианистого натрия, во многом аналогичны, значения скорости изменения сигналов и дисперсий помех были приняты равными соответствующим значениям для процесса производства цианистого натрия.

После аппроксимации полученных корреляционных функций экспоненциальной зависимостью получены следующие модели измерительной информации в процессе очистки сероуглерода:

- автокорреляционная функция центрированной случайной функции концентрации сероуглерода в абсорбенте на входе в абсорбер:

$$Kx_1(t) = 0{,}15 \cdot \exp(-2{,}5 \cdot 10^{-2} \cdot t); \tag{2.11}$$

- автокорреляционная функция центрированной случайной функции концентрации сероуглерода в абсорбенте на выходе из абсорбера:

$$Kx_2(t) = 0{,}15 \cdot \exp(-2{,}0 \cdot 10^{-2} \cdot t); \tag{2.12}$$

- смещенная взаимная корреляционная функция центрированных случайных функций концентраций сероуглерода в абсорбенте на входе и на выходе из абсорбера:

$$Kx_{12}(t) = 0{,}06 \cdot \exp(-3{,}3 \cdot 10^{-2} \cdot t); \tag{2.13}$$

- автокорреляционная функция помехи, наложенной на полезный сигнал концентрации сероуглерода в абсорбенте на входе в абсорбер:

$$Kn_1(t) = 10^{-5} \cdot \delta(t); \tag{2.14}$$

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

$$Kn_2(t) = 10^{-5} \cdot \delta(t). \qquad (2.15)$$

2.2 Модель измерительной системы для управления процессом абсорбции

Обобщенная функциональная схема системы для измерения степени насыщения абсорбента приведена на рисунке 2.4.

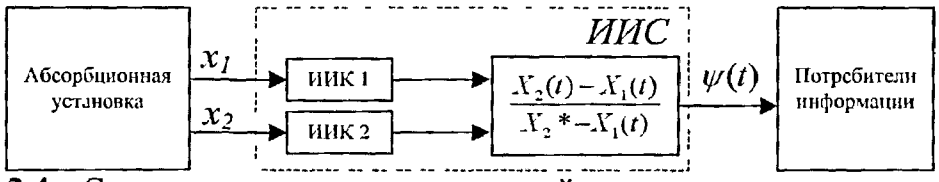

Рисунок 2.4 – Структурная схема измерительной системы для определения степени насыщения абсорбента

Показания информационно-измерительной системы – степень насыщения абсорбента $\psi(t)$ – определяются по уравнению измерения (1.3) на основании прямых измерений концентраций вещества в абсорбенте. Выражение (1.3) представляет собой дробную зависимость. Таким образом, система измерения относится к классу нелинейных систем.

В качестве математического аппарата для описания свойств исследуемой системы была выбрана теория случайных функций, позволяющая выразить характеристики реакции системы на входное воздействие по известным характеристикам этого входного воздействия. В качестве характеристик измеряемых сигналов используются математическое ожидание, корреляционные функции. В рамках теории случайных функций поставленная задача имеет точное решение только для линейного взаимодействия измеряемых сигналов [57]. Решение подобной задачи для класса нелинейных систем возможно лишь с некоторым приближением.

Одним из способов решения указанной проблемы нелинейности является линеаризация системы [58]. Любая непрерывная

дифференцируемая функция в достаточно узких пределах изменения аргументов может быть приближенно заменена линейной. При этом ошибка, возникающая при линеаризации, тем меньше, чем уже границы изменения аргументов и чем ближе функция к линейной. Ошибка линеаризации, безусловно, влияет на точность конечной математической модели, однако ее значение может быть оценено и отнесено к методической погрешности при использовании модели.

Линеаризации должна подвергнуться функция двух переменных:

$$\psi(x_1,x_2)=\frac{x_2-x_1}{X_2{}^*-x_1}. \qquad (2.16)$$

В последнем выражении x_1, x_2 – случайные величины, представляющие собой значения случайных функций $X_1(t)$, $X_2(t)$ в некоторый произвольный момент времени. Сделать переход от выражения (1.3) к выражению (2.16) позволяет сделанное ранее допущение о том, что сигналы $X_i(t)$ являются квазистационарными случайными процессами.

Линеаризация функции $\psi(x_1, x_2)$ в выражении (2.16) может быть проведена путем ее разложения в ряд Тейлора в окрестности точки $M(Mx_1,Mx_2)$, где Mx_1, Mx_2 - математические ожидания случайных величин x_1, x_2, с сохранением в разложении лишь членов первого порядка:

$$\psi(x_1,x_2)\approx\psi(Mx_1,Mx_2)+\psi'_{x_1}(Mx_1,Mx_2)\cdot(x_1-Mx_1)+$$

$$+\psi'_{x_2}(Mx_1,Mx_2)\cdot(x_2-Mx_2),$$

где $\psi'_{x_i}(Mx_1,Mx_2)$ - значение первой частной производной функции $\psi(x_1,x_2)$ по переменной x_i в точке М.

Подставляя в последнее выражение функцию $\psi(x_1,x_2)$ (2.16), получим:

$$\psi(x_1,x_2)\approx\frac{Mx_2-X_2{}^*}{(X_2{}^*-Mx_1)^2}x_1+\frac{1}{X_2{}^*-Mx_1}x_2+\frac{Mx_1{}^2-Mx_1Mx_2}{(X_2{}^*-Mx_1)^2}. \qquad (2.17)$$

Введем обозначения коэффициентов линеаризации:

$$A_1=\frac{Mx_2-X_2{}^*}{(X_2{}^*-Mx_1)^2};\ A_2=\frac{1}{X_2{}^*-Mx_1};\ A_3=\frac{Mx_1{}^2-Mx_1\cdot Mx_2}{(X_2{}^*-Mx_1)^2}. \qquad (2.18)$$

Тогда выражение (2.17) преобразуется к виду:

$$\psi(x_1, x_2) \approx A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_3. \qquad (2.19)$$

Выражение (2.19) представляет собой линеаризованную в окрестности точки М функцию $\psi(x_1,x_2)$.

Таким образом, структура линеаризованной информационно-измерительной системы имеет следующий вид (см. рис. 2.5).

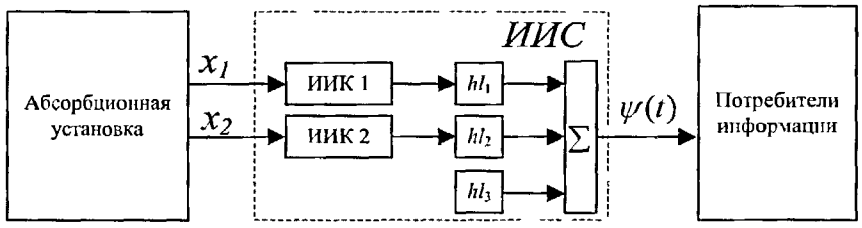

Рисунок 2.5 - Схема линеаризованной измерительной системы

Из рисунка 2.5 видно, что замена дробного взаимодействия сигналов на аддитивное сопровождается появлением в структуре каждого канала информационно-измерительной системы дополнительного звена, характеризующегося весовой функцией $hl_i(t)$.

Весовая функция позволяет выразить реакцию $Y(t)$ линейного динамического объекта на некоторое входное воздействие $X(t)$ при помощи интеграла свертки [59]:

$$Y(t) = \int_{-\infty}^{t} X(\nu) h(t-\nu) d\nu. \qquad (2.20)$$

Как следует из выражения (2.19), для i-го измерительного канала системы, весовая функция $hl_i(t)$ дополнительно появляющегося звена определяется следующим образом:

$$hl_i(t) = A_i \delta(t), \qquad (2.21)$$

где A_i – соответствующий коэффициент линеаризации уравнения измерения (см. выражения (2.18)).

2.3 Исследование погрешности линеаризации измерительной системы

Оценку погрешности, вносимой операцией линеаризации, можно осуществить, сохранив в разложении функции не только линейные члены, но и некоторые члены более высокого порядка. В таком случае погрешность линеаризации будет выражаться как разность характеристик случайной функции, полученных при ее разложении в ряд Тейлора с несколькими членами и разложении только с линейными членами. При этом будем считать, что аргументы функции распределены по закону, близкому к нормальному.

Разлагая функцию $\psi = f(x_1, x_2)$ в ряд Тейлора в окрестности точки $M(M_1, M_2)$ и сохраняя в разложении члены не выше второго порядка, имеем приближенно:

$$\psi = f(Mx_1, Mx_2) + \sum_{i=1}^{2}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_M (x_i - Mx_i) + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{2}\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2}\right)_M (x_i - Mx_i)^2 +$$

$$+\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2}\right)_M (x_1 - Mx_1)(x_2 - Mx_2). \qquad (2.22)$$

Посмотрим, как влияет линеаризация на дисперсию случайной величины ψ. Как показано в [57], в случае некоррелированных случайных величин $x_1, x_2, \ldots, x_N$ при распределении, близком к нормальному, дисперсия функции случайных аргументов равна:

$$D_\psi = \sum_{i=1}^{2}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_M^2 Dx_i + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{2}\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2}\right)_M^2 Dx_i^2 + \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2}\right)_M^2 Dx_1 Dx_2. \qquad (2.23)$$

Два последних слагаемых представляют собой поправку на нелинейность функции и могут служить для оценки точности метода линеаризации при вычислении дисперсии.

Таким образом, рассчитав значение двух последних слагаемых в выражении (2.23), мы получим погрешность по дисперсии, вносимую при линеаризации функции разложением в ряд Тейлора.

$$\Delta D_{лин} = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2}\right)_M^2 Dx_i^2 + \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2}\right)_M^2 Dx_1 Dx_2 . \qquad (2.24)$$

Однако оценивать значение погрешности линеаризации, которая при таком подходе становится методической составляющей систематической погрешности измерений, удобнее не по величине $\Delta D_{лин}$ из выражения (2.24), а по относительной погрешности линеаризации, которая позволяет соотнести значение погрешности линеаризации со значением линеаризуемой величины ψ:

$$\delta_{лин} = \frac{\sqrt{\Delta D_{лин}}}{\psi} . \qquad (2.25)$$

Погрешность линеаризации уменьшается с уменьшением границ изменения аргументов линеаризуемой функции, которые однозначно определяются их дисперсиями.

Чем меньше отношение среднеквадратичного отклонения сигнала к его математическому ожиданию, тем меньше становится относительная погрешность линеаризации. Анализ свойств промышленных сигналов в условиях установившихся режимов технологических процессов абсорбции показал, что они характеризуются небольшими отклонениями от математического ожидания. При этом относительное значение погрешности линеаризации не превышает 0,5 % и 0,005 % для абсорбции сероуглерода и цианистого натрия, соответственно.

2.4 Математические модели компонентов измерительной системы

Как ранее было отмечено, измерительные каналы системы состоят из набора компонентов, последовательно преобразующих измерительную

информацию. Определим состав и математические модели компонентов измерительных каналов рассматриваемой системы.

Программно-аппаратная измерительная система состоит из аналоговой и цифровой частей, в которых производятся следующие этапы преобразования измерительной информации [28, 60]:

1) аналоговая часть:

- формирование первичным преобразователем измерительного сигнала о значении измеряемой физической величины;

- формирование нормированного измерительного сигнала для передачи по каналам связи в цифровую часть измерительной системы;

2) цифровая часть:

- аналого-цифровое преобразование нормированного измерительного сигнала для дальнейшей обработки измерительной информации в цифровой части измерительной системы;

- фильтрация помех;

- перевод в требуемые единицы измерения;

- компенсация динамических свойств объекта измерения;

- вычисление значения измеряемого параметра;

- представление результатов измерения потребителям информации.

В структуре измерительной системы каждый из компонентов может быть представлен в виде функционального блока с собственной динамической характеристикой – весовой функцией, – определяющей то преобразование, которое осуществляет данный блок над измерительной информацией.

Определим весовые функции всех компонентов, входящих в измерительные каналы системы.

В [61] показано, что первичные преобразователи являются динамическими объектами, которые можно аппроксимировать апериодическими звеньями первого порядка:

$$hp_i(t) = \frac{Kp_i}{Tp_i} e^{-\frac{t}{Tp_i}}, \tag{2.26}$$

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

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

$$hn_i(t) = Kn_i \delta(t). \tag{2.27}$$

Операция аналого-цифрового преобразования включает в себя квантование сигнала по уровню и дискретизацию по времени. В связи с тем, что в настоящей работе рассматривается динамическая составляющая погрешности, на значение которой влияет операция дискретизации, то модель аналого-цифрового преобразования может быть задана в следующем виде [17]:

$$hq_i(n) = \delta\left(n - E\left[\frac{t}{Ts}\right]\right), \tag{2.28}$$

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

Основным назначением операции перевода в требуемые единицы измерения является компенсация статических преобразований, осуществляемых над измеряемым сигналом в первичном и нормирующем преобразователях. Для преобразователей с весовыми функциями (2.26) и (2.27) блок компенсатора статических преобразований может быть описан в виде звена с весовой функцией вида [61]:

$$hs_i(n) = \frac{1}{Kn_i Kp_i} \delta(n). \tag{2.29}$$

Операция фильтрации сигнала необходима для уменьшения искажения значения измеряемой величины помехой, присутствующей в полученном от датчика сигнале с целью повышения точности оценки измеряемой величины.

В системах управления наиболее широкое распространение нашли фильтр скользящего среднего, экспоненциальный фильтр и статистический фильтр нулевого порядка. Сравнительный анализ работы этих фильтров приведен в работе [41], где отмечается, что в подавляющем большинстве практических случаев целесообразно использовать фильтр экспоненциального сглаживания. Он обеспечивает приемлемое качество фильтрации, прост в реализации, требует для хранения промежуточных значений минимальный объем оперативной памяти.

В дискретном варианте экспоненциальный фильтр представляет собой рекуррентное соотношение, определяющее текущее значение выходного сигнала фильтра как функцию текущего значения входа и предыдущего значения выхода:

$$y^*(n) = y^*(n-1) + \frac{Ts}{Tf_i}[x^*(n) - y^*(n-1)],$$

где Tf_i - постоянная времени фильтра в i-м измерительном канале.

Динамическая характеристика такого фильтра может быть представлена в виде массива весовых коэффициентов:

$$hf_i(n) = \frac{Ts}{Tf_i}\left(1 - \frac{Ts}{Tf_i}\right)^n. \qquad (2.30)$$

Наличие в структуре канала блока компенсации динамических свойств объекта измерения связано с необходимостью приведения входных параметров объекта управления к его выходным параметрам. В работе [62] отмечено, что многоканальная система проводит измерения в нескольких точках технологического процесса. За счет инерционности объекта управления, значения выходных сигналов объекта, измеренные в некоторый момент времени t_l, являются реакцией объекта управления не на значение входных сигналов в этот же момент времени t_l, а «запоздалой» реакцией на

значение входных сигналов в момент времени $t_2 = t_1 - Tc$. Поэтому при построении системы, предназначенной для измерений изменяющихся во времени величин, необходимо компенсировать запаздывание сигналов Tc приведением всех измеряемых сигналов к одному моменту измерения, что достигается добавлением в структуру измерительного канала программного звена – компенсатора динамических свойств объекта управления.

В [41] отмечается, что при рассмотрении математической модели типовой измерительной системы целесообразным является представление компенсатора в виде звена транспортного запаздывания. В этом случае весовая функция динамического компенсатора будет иметь следующий вид:

$$hc_i(n) = \delta\left(n - E\left[\frac{Tc_i}{Ts}\right]\right), \qquad (2.31)$$

где Tc_i – время запаздывания абсорбера по i-му измерительному каналу.

Применительно к измерению степени насыщения абсорбента будем считать, что сигналы приводятся к моменту измерения концентрации вещества в абсорбенте на выходе из абсорбера, т.е. $Tc_2 = 0$. В таком случае из выражения (1.3) получаем уравнение измерения текущего значения степени насыщения абсорбента, учитывающее динамические свойства объекта измерения [63]:

$$\psi(t) = \left(X_2(t) - \int_{t-Tc_1}^{t} hc_1(\mu)X_1(t-\mu)d\mu\right) \Big/ \left(X_2 * - \int_{t-Tc_1}^{t} hc_1(\mu)X_1(t-\mu)d\mu\right). \qquad (2.32)$$

Дополнительные звенья, появившиеся в измерительных каналах в результате операции линеаризации, имеют динамические характеристики вида (2.21).

Восстановление сигналов (преобразование его из дискретной в аналоговую форму) для представления потребителю информации удобно осуществлять методом ступенчатой экстраполяции, когда о значении измеряемой величины в некоторый момент времени t судят по предшествующему этому времени замеру kTs, для которого $k=E[t/Ts]$.

Алгоритм функционирования такого восстанавливающего элемента можно описать выражением [64]:

$$y(t) = x(kTs), \quad kTs \le t \le (k+1)Ts,$$

где $y(t)$ – восстановленная информация; $x(kTs)$ – цифровой сигнал на входе восстанавливающего элемента (блока представления результатов); k – номер отсчета.

Весовая функция блока представления результатов, реализующего ступенчатую экстраполяцию, имеет вид единичной функции-окна:

$$hr(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 \le t - kTs \le Ts; \\ 0, & \text{при } t - kTs > Ts. \end{cases} \tag{2.33}$$

В состав измерительных каналов линеаризованной эталонной системы входят два компонента. Первым является динамический компенсатор. Его весовая функция аналогична выражению (2.31), но с непрерывным аргументом:

$$hc_i(t) = \delta(t - Tc_i). \tag{2.34}$$

Вторым компонентом эталонной измерительной системы является звено линеаризации с весовой функцией (2.21).

2.5 Исследование свойств показаний программно-аппаратной измерительной системы

Для определения погрешности будем рассматривать в дальнейшем показания как программно-аппаратной, так и идеализированной эталонной измерительной системы, поэтому для ясности будем обозначать показания i-го измерительного канала программно-аппаратной и эталонной системы соответственно $Z_i(t)$ и $Y_i(t)$, а показания самой программно-аппаратной и эталонной системы соответственно $Z(t)$ и $Y(t)$.

Определим статистические характеристики (математическое ожидание и корреляционную функцию) выходного сигнала $Z(t)$ программно-аппаратной измерительной системы, представляющего собой сумму выходных сигналов измерительных каналов:

$$Z(t)=\sum_{i=1}^{2} Z_i(t), \tag{2.35}$$

когда на входы системы воздействуют случайные квазистационарные процессы $G_i(t) = X_i(t) + n_i(t)$.

Обобщенная структурная схема программно-аппаратной измерительной системы представлена на рисунке 2.6, где $G_i(t)$ – сигнал на входе i-го канала, $Z_i(t)$ – выходной сигнал i-го канала, $ha_i(t)$ – эквивалентная весовая функция аналоговой части канала, $hq_i(t)$ – весовая функция операции аналого-цифрового преобразования, $hd_i(t)$ - эквивалентная весовая функция цифровой части канала, $hr_i(t)$ - весовая функция блока представления результатов.

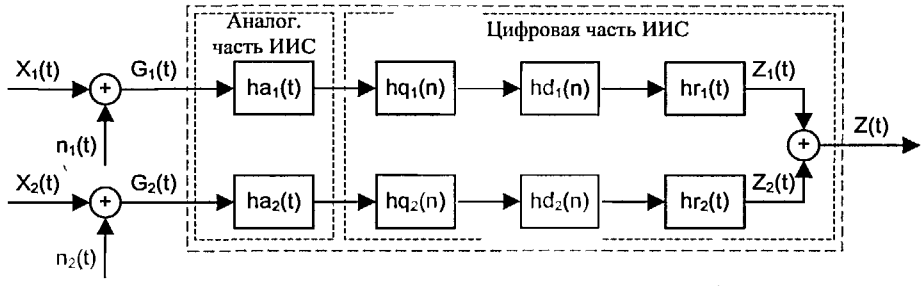

Рисунок 2.6 - Обобщенная структура программно-аппаратной измерительной системы

Чтобы определить реакцию программно-аппаратного канала $Z_i(t)$ на входное воздействие $G_i(t)$, запишем уравнения преобразований, осуществляемых на каждом из этапов обработки измеряемого сигнала.

Отклик аналоговой части $Ya_i(t)$ на входной сигнал $G_i(t)$ равен:

$$Ya_i(t)=\int_0^{\infty} ha_i(\mu)G_i(t-\mu)d\mu. \tag{2.36}$$

Сигнал на выходе АЦП представим в виде:

$$Yq_i(n)=Ya_i(nTs). \tag{2.37}$$

Сигнал на входе блока представления результатов $Yd_i(n)$ определяется через дискретный аналог операции свертки входного сигнала с

эквивалентной весовой функцией цифровой части i-го измерительного канала $hd_i(n)$:

$$Yd_i(n) = \sum_{l=0}^{\infty} hd_i^*(l) Yq_i^*(n-l). \qquad (2.38)$$

Восстановленный сигнал $Yr_i(t)$ на выходе i-го измерительного канала равен:

$$Yr_i(t) = \sum_{n=-\infty}^{E[t/Ts]} Yd_i^*(n) hr_i(t - nTs). \qquad (2.39)$$

Применив замену переменных вида $t - nTs = kTs + \xi Ts$, где $k = m - n$ $m = E[t/Ts]$, а $\xi = t/Ts - m$, и обозначив $Yr_i[(m+\xi)Ts]$ через $Yr_i[m,\xi]$, выражение (2.39) можно преобразовать к виду:

$$Yr_i[m,\xi] = \sum_{k=0}^{\infty} hr_i[k,\xi] Yd_i(m-k). \qquad (2.40)$$

Переменная ξ может принимать любые значения в диапазоне от 0 до 1.

Так как $Z_i(t) = Yr_i(t)$, подставим выражение (2.38) в (2.40):

$$Z_i[m,\xi] = \sum_{k=0}^{\infty} hr_i[k,\xi] \sum_{l=0}^{\infty} hd_i^*(l) Yq_i^*(m-k-l) = |k + l = n| =$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} Yq_i^*(m-n) \sum_{k=0}^{\infty} hr_i[k,\xi] hd_i^*(n-k).$$

Таким образом,

$$Z_i[m,\xi] = \sum_{n=0}^{\infty} hw_i[n,\xi] Yq_i(m-n), \qquad (2.41)$$

где

$$hw_i[n,\xi] = \sum_{k=0}^{\infty} hr_i[k,\xi] hd_i(n-k) \qquad (2.42)$$

есть эквивалентная весовая функция цифровой части i-го измерительного канала и блока представления результатов. Подставим выражение (2.37) в (2.41). При этом получим:

$$Z_i[m,\xi]=\sum_{n=0}^{\infty} hw_i[n,\xi]Ya_i[(m-n)Ts]. \qquad (2.43)$$

Подставив (2.36) в (2.43), получим окончательное выражение для выходного сигнала i-го программно-аппаратного измерительного канала:

$$Z_i[m,\xi]=\sum_{n=0}^{\infty} hw_i[n,\xi]\int_0^{\infty} ha_i(\mu)G_i[(m-n)Ts-\mu]d\mu. \qquad (2.44)$$

Тогда выражение для выходного сигнала информационно-измерительной системы примет вид:

$$Z[m,\xi]=\sum_{i=1}^{2}\sum_{n=0}^{\infty} hw_i[n,\xi]\int_0^{\infty} ha_i(\mu)G_i[(m-n)Ts-\mu]d\mu. \qquad (2.45)$$

Можно показать, что математическое ожидание случайной функции $Z(t)$ равно:

$$Mz(t)=M\{Z[m,\xi]\}=\sum_{i=1}^{2}\sum_{n=0}^{\infty} hw_i[n,\xi]\int_0^{\infty} ha_i(\mu)Mg_i[(m-n)Ts-\mu]d\mu, \qquad (2.46)$$

где $Mg_i(t)$ – математическое ожидание входного сигнала $G_i(t)$ i-го программно-аппаратного измерительного канала, которое в общем случае зависит от времени.

Получим выражение для корреляционной функции выходного сигнала $Z(t)$, которая по определению равна:

$$K_z(t,t+\tau)=M\left\{\overset{\circ}{Z}(t)\overset{\circ}{Z}(t+\tau)\right\}. \qquad (2.47)$$

Выражение для центрированного случайного сигнала $\overset{\circ}{Z}(t)$, определяемого как $\overset{\circ}{Z}(t)=Z(t)-Mz(t)$, с учетом (2.45) и (2.46) будет иметь вид:

$$\overset{\circ}{Z}[m,\xi]=\sum_{i=1}^{2}\sum_{n=0}^{\infty} hw_i[n,\xi]\int_0^{\infty} ha_i(\mu)\overset{\circ}{G}_i[(m-n)Ts-\mu]d\mu, \qquad (2.48)$$

где $\overset{\circ}{G}_i(t)$ - центрированный случайный сигнал на входе i-го измерительного канала. В дальнейшем для краткости записи значок ° в обозначении центрированных функций будем опускать.

Отсюда получим:

$$K_z(t,t+\tau)=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{n=0}^{\infty}hw_i[n,\xi]\sum_{l=0}^{\infty}hw_j[l,\psi]\times$$

$$\times\int_0^{\infty}\int_0^{\infty}ha_i(\mu)ha_j(\nu)M\{G_i[(k-n)Ts-\mu]G_j[(k+m-l)Ts-\nu]\}d\nu d\mu .$$

Последнее выражение будет равно:

$$K_z(t,t+\tau)=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{n=0}^{\infty}hw_i[n,\xi]\sum_{l=0}^{\infty}hw_j[l,\psi]\times$$

$$\times\int_0^{\infty}\int_0^{\infty}ha_i(\mu)ha_j(\nu)Kg_{ij}[(l-m-n)Ts-\mu+\nu]d\nu d\mu=|\mu-\nu=\lambda|=$$

$$=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{n=0}^{\infty}hw_i[n,\xi]\sum_{l=0}^{\infty}hw_j[l,\psi]\int_{-\infty}^{\infty}Kg_{ij}[(l-m-n)T_s-\lambda]\int_0^{\infty}ha_i(\nu)ha_j(\nu+\lambda)d\nu d\lambda=$$

$$=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{n=0}^{\infty}hw_i[n,\xi]\sum_{l=0}^{\infty}hw_j[l,\psi]\int_{-\infty}^{\infty}Raa_{ij}(\lambda)Kg_{ij}[(l-m-n)Ts-\lambda]d\lambda . \qquad (2.49)$$

Здесь

$$Raa_{ij}(t)=\int_0^{\infty}ha_i(\mu)ha_j(\mu+t)d\mu \qquad (2.50)$$

есть корреляционная функция весовых функций аналоговой части программно-аппаратных измерительных каналов; $Kg_{ij}(t)$ - корреляционная функция измерительной информации на входе программно-аппаратных измерительных каналов.

Выражение (2.49) можно переписать в следующем виде:

$$K_z(t,t+\tau)=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{n=0}^{\infty}hw_i[n,\xi]\sum_{l=0}^{\infty}hw_j[l,\psi]Kya_{ij}[(l-m-n)Ts]=|l-n=k|=$$

$$=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=-\infty}^{\infty}Kya_{ij}[(k-m)T_s]\sum_{n=0}^{\infty}hw_i[n,\xi]hw_j[n+k,\psi], \qquad (2.51)$$

где

$$Kya_{ij}(t)=\int_{-\infty}^{\infty}Raa_{ij}(\lambda)Kg_{ij}(t-\lambda)d\lambda \qquad (2.52)$$

- корреляционная функция сигналов на выходе аналоговой части каналов.

Таким образом, корреляционная функция сигнала на выходе измерительной системы зависит от обоих своих аргументов t и τ. Это означает, что случайная функция $Z(t)$ не является стационарной. Однако, как показано в [65], стационарной будет случайная последовательность, представляющая собой значения функции $Z(t)$ в моменты времени $t_k=(k+\xi)Ts$, где ξ имеет любое фиксированное значение в диапазоне $0\leq\xi<1$, k=1,2,3... Корреляционную функцию последовательности $Z(k, \xi)$ будем обозначать $K_z^{\xi}(bTs)$, подчеркивая тем самым, что она существует только при значениях аргумента, кратных Ts, и при этом значения функции зависят от параметра ξ, который можно трактовать как континуальный номер последовательности.

Окончательное выражение для корреляционной функции сигнала на выходе программно-аппаратной измерительной системы примет следующий вид:

$$K_z^{\xi}(bTs)=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=-\infty}^{\infty}Kya_{ij}[(k-b)Ts]Rww_{ij}^{\xi}(kTs), \qquad (2.53)$$

где

$$Rww_{ij}^{\xi}(kT_s)=\sum_{n=0}^{\infty}hw_i[n,\xi]hw_j[n+k,\xi] \qquad (2.54)$$

- корреляционная функция непрерывных весовых функций $hw_i(t)$.

Из (2.53) можно получить выражение для автокорреляционной функции сигнала на выходе i-го измерительного канала системы:

$$K_{z_i}^{ИК\xi}(bTs) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} Kya_{ii}[(k-b)Ts]Rww_{ii}^{\xi}(kTs)\,. \qquad (2.55)$$

Для эталонной измерительной системы значение $Y(t)$ является суммой показаний эталонных измерительных каналов $Y_i(t)$, которые можно определить через значения измеряемых величин $X_i(t)$ с помощью интеграла Дюамеля:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^{2} \int_0^{\infty} hg_i(\mu) X_i(t-\mu) d\mu\,, \qquad (2.56)$$

где $hg_i(\mu)$ - весовая функция i-го эталонного измерительного канала.

В таком случае математическое ожидание эталонного значения искомой величины (аналогично (2.46)) будет равно:

$$My(t) = M\{Y(t)\} = \sum_{i=1}^{2} \int_0^{\infty} hg_i(\mu) Mx_i(t-\mu) d\mu\,, \qquad (2.57)$$

где $Mx_i(t)$ – математическое ожидание величины $X_i(t)$.

Центрированный случайный сигнал $\overset{\circ}{Y}(t)$ равен (аналогично (2.48)):

$$\overset{\circ}{Y}(t) = Y(t) - My(t) = \sum_{i=1}^{2} \int_0^{\infty} hg_i(\mu) \overset{\circ}{X}_i(t-\mu) d\mu\,.$$

Тогда взаимная корреляционная функция случайных последовательностей $Y[k,\xi]$ и $Z[k,\xi]$:

$$K_{yz}^{\xi}(nTs) = M\{Y[k,\xi]Z[k+n,\xi]\} = M\left\{\sum_{i=1}^{2} \int_0^{\infty} hg_i(\nu) X_i[(k+\xi)Ts-\nu] d\nu \times \right.$$

$$\left. \times \sum_{j=1}^{2} \sum_{l=0}^{\infty} hw_j[l,\xi] \int_0^{\infty} ha_j(\mu) G_j[(k+n-l)Ts-\mu] d\mu \right\}.$$

Здесь и далее для краткости записи значок ° в обозначении центрированных функций опущен.

В результате дальнейших преобразований получим:

$$K_{yz}^{\xi}(nTs) = \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{2} \sum_{l=0}^{\infty} hw_j[l,\xi] \times$$

$$\times \int_0^\infty \int_0^\infty hg_i(\nu) ha_j(\mu) M\{X_i[(k+\xi)Ts-\nu] G_j[(k+n-l)Ts-\mu]\} d\nu d\mu \cdot$$

Последнее выражение можно записать в следующем виде:

$$K_{yz}^{\xi}(nTs) = \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{l=0}^{\infty} hw_j[l,\xi] \int_0^\infty \int_0^\infty hg_i(\nu) ha_j(\mu) Kgx_{ij}[(l-n+\xi)Ts-\nu+\mu] d\mu d\nu ,$$

где $Kgx_{ij}(\tau)$ - взаимная корреляционная функция сигнала на входе программно-аппаратного измерительного канала и измеряемой величины. Введя замену переменных вида ν-μ=λ, получим:

$$K_{yz}^{\xi}(nTs) = \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{l=0}^{\infty} hw_j[l,\xi] \int_{-\infty}^{\infty} Kgx_{ij}[(l-n+\xi)Ts-\lambda] \int_0^\infty ha_j(\mu) hg_i(\mu+\lambda) d\mu d\lambda =$$

$$= \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{l=0}^{\infty} hw_j[l,\xi] \int_{-\infty}^{\infty} Kgx_{ij}[(l-n+\xi)Ts-\lambda] Rag_{ji}(\lambda) d\lambda , \qquad (2.58)$$

где

$$Rag_{ji}(t) = \int_0^\infty ha_j(\mu) hg_i(\mu+t) d\mu \qquad (2.59)$$

- взаимная корреляционная функция весовых функций операции эталонного преобразования измеряемой величины и аналоговой части программно-аппаратного измерительного канала.

В результате дальнейших преобразований получим:

$$K_{yz}^{\xi}(nTs) = \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{l=0}^{\infty} hw_j[l,\xi] Kyay_{ij}[(l-n+\xi)Ts] , \qquad (2.60)$$

где

$$Kyay_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} Rag_{ji}(\lambda) Kgx_{ij}(t-\lambda) d\lambda \qquad (2.61)$$

- взаимная корреляционная функция сигнала на выходе аналоговой части программно-аппаратного канала и эталонного значения величины.

Таким образом, окончательное выражение для взаимной корреляционной функции показаний эталонной и программно-аппаратной измерительных систем $K_{yz}^{\xi}(nTs)$ будет иметь следующий вид:

$$K_{yz}^{\xi}(nTs)=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{l=0}^{\infty}hw_j[l,\xi]Kyay_{ij}[l-n,\xi], \qquad (2.62)$$

где $Kyay_{ij}[l-n,\xi]=Kyay_{ij}[(l-n+\xi)Ts]$.

Соответственно, выражение для вычисления взаимной корреляционной функции программно-аппаратного и эталонного измерительного канала $K_{yz_i}^{ИК\xi}(nTs)$ будет иметь следующий вид:

$$K_{yz_i}^{ИК\xi}(nTs)=\sum_{l=0}^{\infty}hw_i[l,\xi]Kyay_{ii}[l-n,\xi], \qquad (2.63)$$

Как было отмечено выше, центрированное эталонное значение $Y(t)$ искомой величины представляет собой стационарный случайный процесс. Следовательно, корреляционная функция случайного процесса $Y(t)$ будет зависеть только от одного аргумента:

$$K_y(\tau)=M\{Y(t)Y(t+\tau)\}=M\left\{\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\int_0^{\infty}hg_i(\mu)X_i(t-\mu)d\mu\int_0^{\infty}hg_j(\nu)X_j(t+\tau-\nu)d\nu\right\}=$$

$$=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\int_0^{\infty}\int_0^{\infty}hg_i(\mu)hg_j(\nu)Kx_{ij}(\tau-\nu+\mu)d\nu d\mu=\left|\nu-\mu=\lambda\right|=$$

$$=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\int_{-\infty}^{\infty}Kx_{ij}(\tau-\lambda)\int_0^{\infty}hg_i(\mu)hg_j(\mu+\lambda)d\mu d\lambda=$$

$$=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\int_{-\infty}^{\infty}Kx_{ij}(\tau-\lambda)Rgg_{ij}(\lambda)d\lambda, \qquad (2.64)$$

где

$$Rgg_{ij}(t)=\int_0^{\infty}hg_i(\mu)hg_j(\mu+t)d\mu \qquad (2.65)$$

есть корреляционная функция эквивалентных весовых функций $hg_i(t)$ и $hg_j(t)$.

2.6 Модели метрологических характеристик измерительной системы

На основе полученных в предыдущих разделах выражений для корреляционных функций измерительной информации и моделей компонентов измерительных каналов получим математические модели метрологических характеристик измерительной системы, а именно: модель дисперсии показаний программно-аппаратного измерительного канала, модель взаимной корреляции показаний программно-аппаратного и эталонного измерительных каналов, а также модель методической динамической погрешности цифровой обработки измерительной информации при дробном взаимодействии измеряемых параметров в случае измерения степени насыщения абсорбента.

Схема выделения погрешности представлена на рисунке 2.7.

Методическая динамическая погрешность измерения степени насыщения абсорбента является разностью показаний эталонной и программно-аппаратной измерительных систем:

$$\Delta_{\partial}(t) = Y(t) - Z(t). \qquad (2.66)$$

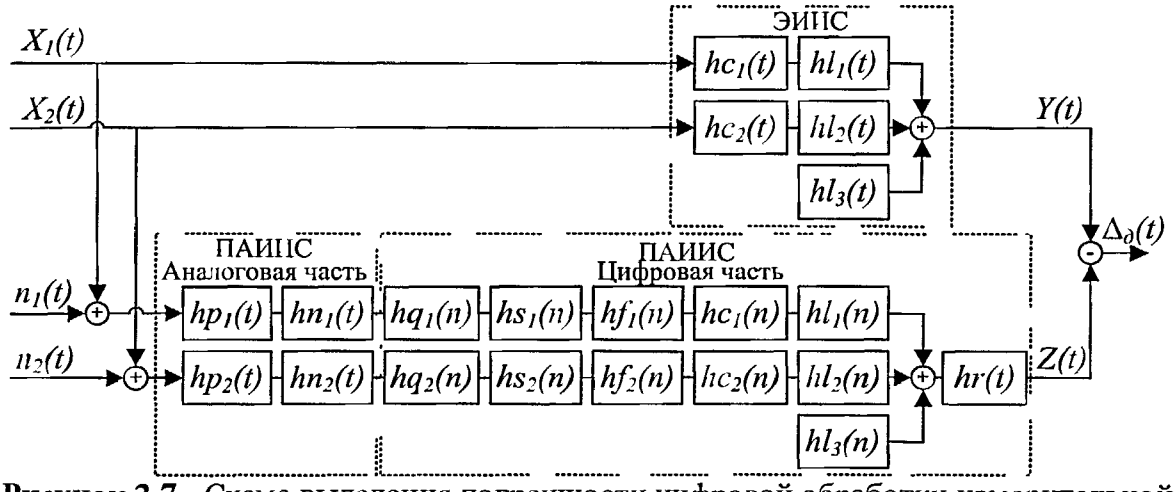

Рисунок 2.7 - Схема выделения погрешности цифровой обработки измерительной информации в измерительной системе
ЭИИС – эталонная измерительная система;
ПАИИС – программно-аппаратная измерительная система.

Согласно принятой в работе модели измерительной информации, измеряемые величины $X(t)$ принадлежат к классу квазистационарных случайных процессов. В случае, когда операция вычисления значения искомой величины по значению измеряемой величины описывает работу стационарной линейной системы, эталонное значение $Y(t)$ искомой величины также будет квазистационарной случайной функцией. В свою очередь, оценка $Z(t)$ искомой величины, как было доказано ранее, принадлежит к классу нестационарных случайных процессов. В итоге, погрешность $\Delta_\partial(t)$ определения искомой величины, рассчитываемая по выражению (2.66), будет нестационарным случайным процессом. В то же время, учитывая стационарность случайной последовательности $Z[(k+\xi)Ts]$, можно предположить, что случайная последовательность также будет стационарной.

Определим статистические характеристики случайной последовательности $\overset{\circ}{\Delta}_\partial[k,\xi]=\overset{\circ}{\Delta}_\partial[(k+\xi)Ts]$, а именно: корреляционную функцию и математическое ожидание.

Корреляционная функция случайной последовательности $\Delta_\partial[k,\xi]$:

$$K^{\xi}_{\Delta_\partial}(nT_s)=M\{\overset{\circ}{\Delta}_\partial[k,\xi]\overset{\circ}{\Delta}_\partial[k+n,\xi]\}=M\{(\overset{\circ}{Y}[k,\xi]-\overset{\circ}{Z}[k,\xi])\times$$

$$\times(\overset{\circ}{Y}[k+n,\xi]-\overset{\circ}{Z}[k+n,\xi])\}=K_y(nTs)-2K^{\xi}_{yz}(nTs)+K^{\xi}_{z}(nTs), \qquad (2.67)$$

где $K_y(t)$ - корреляционная функция эталонного значения $Y(t)$ искомой величины, $K^{\xi}_{z}(iTs)$ - корреляционная функция случайной последовательности $Z[k,\xi]$, $K^{\xi}_{yz}(iTs)$ - взаимная корреляционная функция случайных последовательностей $Y[k,\xi]$ и $Z[k,\xi]$.

Подставив в (2.67) выражения (2.56), (2.62) и (2.64) получим:

$$K^{\xi}_{\Delta_\partial}(nTs)=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=-\infty}^{\infty}Kya_{ij}[(k-n)Ts]Rww^{\xi}_{ij}(kTs)-$$

$$-2\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{l=0}^{\infty}hw_j[l,\xi]Kyay_{ij}[l-n,\xi]+\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\int_{-\infty}^{\infty}Kx_{ij}(nTs-\lambda)Rgg_{ij}(\lambda)d\lambda. \qquad (2.68)$$

Дисперсия случайной последовательности $\Delta_\partial[(k+\xi)Ts]$ будет равна значению корреляционной функции $K_{\Delta_\partial}^{\xi}(nTs)$ при n=0:

$$D_{\Delta_\partial}^{\xi}=K_y(0)-2K_{yz}^{\xi}(0)+K_z^{\xi}(0). \qquad (2.69)$$

Эквивалентная весовая функция $h_a(t)$ аналоговой части программно-аппаратного измерительного канала, состоящей из первичного и нормирующего преобразователей, будет равна:

$$ha_i(t)=\int_0^t hp_i(\mu)hn_i(t-\mu)d\mu, \qquad (2.70)$$

где $hp_i(t)$ - весовая функция первичного преобразователя, $hn_i(t)$ - весовая функция нормирующего преобразователя.

С учетом (2.26) и (2.27), получим:

$$ha_i(t)=\int_0^t\frac{Kp_i}{Tp_i}e^{-\frac{\mu}{Tp_i}}Kn_i\delta(t-\mu)d\mu=\frac{Kp_iKn_i}{Tp_i}e^{-\frac{t}{Tp_i}}. \qquad (2.71)$$

Цифровая часть программно-аппаратного канала состоит из алгоритмов статической компенсации, цифровой фильтрации, динамической компенсации и звена линеаризации уравнения измерения. Эквивалентная весовая функция цифровой части может быть определена через дискретную свертку соответствующих весовых функций:

$$hd_i(n)=hs_i(n)*hf_i(n)*hc_i(n)*hl_i(n),$$

где $hs(n)$, $hf(n)$, $hc(n)$, $hl(n)$ – найденные ранее весовые функции компонентов измерительных каналов (2.21), (2.29) – (2.31). Получим:

$$hd_i(n)=\begin{cases}\dfrac{A_i}{Kn_iKp_i}\dfrac{Ts}{Tf_i}\left(1-\dfrac{Ts}{Tf_i}\right)^{n-E\left[\frac{Tc_i}{Ts}\right]} & при \quad n-E\left[\dfrac{Tc_i}{Ts}\right]\geq 0,\\ 0 \quad при \quad n-E\left[\dfrac{Tc_i}{Ts}\right]<0.\end{cases} \qquad (2.72)$$

Эквивалентную весовую функцию цифровой части и восстанавливающего элемента $hw_i(n,\xi)$ получим, подставив (2.33) и (2.72) в (2.42).

$$hw_i(n,\xi)=\begin{cases}\dfrac{A_i}{Kn_iKp_i}\dfrac{T_s}{Tf_i}\left(1-\dfrac{Ts}{Tf_i}\right)^{n-E\left[\frac{Tc_i}{Ts}\right]} & при \quad (n+\xi)Ts-E\left[\dfrac{Tc_i}{Ts}\right]\geq 0,\\ 0 \quad при \quad (n+\xi)Ts-E\left[\dfrac{Tc_i}{Ts}\right]<0.\end{cases} \tag{2.73}$$

Корреляционная функция весовой функции аналоговой части канала, согласно (2.50), с учетом (2.71) равна:

$$Raa_{ij}(\tau)=\int_0^\infty ha_i(t)ha_j(t+\tau)dt=\frac{Kp_iKp_jKn_iKn_j}{Tp_i+Tp_j}e^{-\frac{\tau}{Tp_j}}. \tag{2.74}$$

Согласно принятой модели измерительной информации измеряемая величина и помеха некоррелированы между собой, следовательно, корреляционная функция сигналов на входе программно-аппаратной измерительной системы равна:

$$Kg_{ij}(\tau)=Kx_{ij}(\tau)+Kn_{ij}(\tau).$$

При вычислении корреляционной функции выходного сигнала аналоговой части измерительного канала рассмотрим случай, когда на полезный сигнал с корреляционной функцией (2.2) накладывается помеха типа белый шум (2.4) и случай, когда корреляционная функция помехи может быть аппроксимирована одной экспонентой (2.3).

В случае помехи типа «белый шум» корреляционная функция сигнала на выходе аналоговой части измерительного канала будет равна (см. выражение (2.40)):

$$Kya_{ij}(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\frac{Kp_iKp_jKn_iKn_j}{Tp_i+Tp_j}e^{-\frac{|\lambda|}{Tp_j}}\left(Dx_{ij}e^{-\alpha_{ij}|t-\lambda|}+S_{ij}\delta(t-\lambda)\right)d\lambda=$$

$$=\frac{Kp_iKp_jKn_iKn_j}{Tp_i+Tp_j}\left(Dx_{ij}\int_{-\infty}^{\infty}e^{-\frac{|\lambda|}{Tp_j}}e^{-\alpha_{ij}|t-\lambda|}d\lambda+S_{ij}\int_{-\infty}^{\infty}e^{-\frac{|\lambda|}{Tp_j}}\delta(t-\lambda)d\lambda\right).$$

Определив значения интегралов, получим:

$$Kya_{ij}(t)=\frac{Kp_iKp_jKn_iKn_j}{Tp_i+Tp_j}\left(Dx_{ij}\frac{2Tp_j}{1-(\alpha_{ij}Tp_j)^2}\left(e^{-\alpha_{ij}|t|}-\alpha_{ij}Tp_je^{-\frac{|t|}{Tp_j}}\right)+S_{ij}\cdot e^{-\frac{|t|}{Tp_j}}\right). \quad (2.75)$$

Здесь и далее α_{ij}, β_{ij}, Dx_{ij}, Dn_{ij}, S_{ij} представляют собой соответственно элементы матриц скорости изменения корреляционных функций концентрации и помехи, коэффициентов корреляции измеряемых значений концентрации и помех, а также уровня шума (при $i = j$ элементы матриц являются дисперсиями измеряемых величин, при $i \neq j$ являются характеристиками взаимных корреляционных функций).

Теперь рассмотрим второй случай, когда корреляционная функция помехи может быть аппроксимирована экспонентой.

В этом случае корреляционная функция сигнала на выходе аналоговой части программно-аппаратных измерительных каналов будет равна:

$$Kya_{ij}(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\frac{Kp_iKp_jKn_iKn_j}{Tp_i+Tp_j}e^{-\frac{|\lambda|}{Tp_j}}\left(Dx_{ij}e^{-\alpha_{ij}|t-\lambda|}+Dn_{ij}e^{-\beta_{ij}|t-\lambda|}\right)d\lambda=$$

$$=\frac{Kp_iKp_jKn_iKn_j}{Tp_i+Tp_j}\left(Dx_{ij}\int_{-\infty}^{\infty}e^{-\frac{|\lambda|}{Tp_j}}e^{-\alpha_{ij}|t-\lambda|}d\lambda+Dn_{ij}\int_{-\infty}^{\infty}e^{-\frac{|\lambda|}{Tp_j}}e^{-\beta_{ij}|t-\lambda|}d\lambda\right)=$$

$$=\frac{Kp_iKp_jKn_iKn_j}{Tp_i+Tp_j}\left(Dx_{ij}\frac{2Tp_j}{1-(\alpha_{ij}Tp_j)^2}\left(e^{-\alpha_{ij}|t|}-\alpha_{ij}Tp_je^{-\frac{|t|}{Tp_j}}\right)+\right.$$

$$\left.+Dn_{ij}\frac{2Tp_j}{1-(\beta_{ij}Tp_j)^2}\left(e^{-\beta_{ij}|t|}-\beta_{ij}Tp_je^{-\frac{|t|}{Tp_j}}\right)\right). \quad (2.76)$$

Чтобы получить выражение для корреляционной функции эквивалентной весовой функции цифровой части измерительного канала и восстанавливающего элемента, подставим выражение (2.73) в (2.54):

$$Rww_{ij}^{\xi}(mTs)=\frac{A_i}{Kn_iKp_i}\frac{A_j}{Kn_jKp_j}\left(1-\frac{Ts}{Tf_i}\right)^{-E\left[\frac{Tc_i}{Ts}\right]}\left(1-\frac{Ts}{Tf_j}\right)^{|m|-E\left[\frac{Tc_j}{Ts}\right]}. \qquad (2.77)$$

Дисперсия последовательности отсчетов $Z[k,\xi]$ случайного сигнала на выходе программно-аппаратной измерительной системы будет различной в случае помехи типа «белый шум» и помехи, корреляционная функция которой может быть аппроксимирована одной экспонентой. Подставив выражения (2.75) и (2.77) в (2.55), получим, что в случае, когда на вход программно-аппаратного измерительного канала воздействует измеряемая величина с аддитивно наложенной помехой типа «белый шум», дисперсия равна:

$$Dz^{\xi}=Kz^{\xi}(0)=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{-\infty}^{\infty}\left\{\frac{A_i}{Kn_iKp_i}\frac{A_j}{Kn_jKp_j}\left(1-\frac{Ts}{Tf_i}\right)^{-E\left[\frac{Tc_i}{Ts}\right]}\left(1-\frac{Ts}{Tf_j}\right)^{|k|-E\left[\frac{Tc_j}{Ts}\right]}\times\right.$$

$$\left.\times\frac{Kp_iKp_jKn_iKn_j}{Tp_i+Tp_j}\left(Dx_{ij}\frac{2Tp_j}{1-(\alpha_{ij}Tp_j)^2}\left(e^{-\alpha_{ij}|kTs|}-\alpha_{ij}Tp_je^{-\frac{|kTs|}{Tp_j}}\right)+S_{ij}e^{-\frac{|kTs|}{Tp_j}}\right)\right\}.$$

Окончательно получим:

$$Dz^{\xi}=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\frac{A_iA_j}{Tp_i+Tp_j}\left(1-\frac{Ts}{Tf_i}\right)^{-E\left[\frac{Tc_i}{Ts}\right]}\left(1-\frac{Ts}{Tf_j}\right)^{-E\left[\frac{Tc_j}{Ts}\right]}\times$$

$$\times\left(\left(S_{ij}-\frac{2Dx_{ij}\alpha_{ij}Tp_j^2}{1-(\alpha_{ij}Tp_j)^2}\right)\frac{Tf_j-e^{-Ts/Tp_j}(Tf_j-Ts)}{Tf_j+e^{-Ts/Tp_j}(Tf_j-Ts)}+\right.$$

$$+\frac{2Dx_{ij}Tp_j}{1-(\alpha_{ij}Tp_j)^2}\frac{Tf_j-e^{-\alpha_{ij}Ts}(Tf_j-Ts)}{Tf_j+e^{-\alpha_{ij}Ts}(Tf_j-Ts)}\Bigg). \qquad (2.78)$$

В случае, когда корреляционная функция помехи, накладывающейся на полезный сигнал, может быть аппроксимирована экспонентой, дисперсия последовательности отсчетов $Z[k,\xi]$ случайного сигнала на выходе программно-аппаратной измерительной системы будет равна:

$$Dz^{\xi}=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=-\infty}^{\infty}\frac{A_iA_j}{Tp_i+Tp_j}\left(1-\frac{Ts}{Tf_i}\right)^{-E\left[\frac{Tc_j}{Ts}\right]}\left(1-\frac{Ts}{Tf_j}\right)^{-E\left[\frac{Tc_j}{Ts}\right]}\times$$

$$\times\left(\frac{2Dx_{ij}Tp_j}{1-(\alpha_{ij}Tp_j)^2}\left(e^{-\alpha_{ij}Ts|k|}-\alpha_{ij}Tp_je^{-\frac{Ts|k|}{Tp_j}}\right)+\frac{2Dn_{ij}Tp_j}{1-(\beta_{ij}Tp_j)^2}\left(e^{-\beta_{ij}Ts|k|}-\beta_{ij}Tp_je^{-\frac{Ts|k|}{Tp_j}}\right)\right).$$

Последнее выражение будет равно:

$$Dz^{\xi}=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\frac{2A_iA_jTp_j}{Tp_i+Tp_j}\left(1-\frac{Ts}{Tf_i}\right)^{-E\left[\frac{Tc_i}{Ts}\right]}\left(1-\frac{Ts}{Tf_j}\right)^{-E\left[\frac{Tc_j}{Ts}\right]}\times$$

$$\times\left(\frac{Dx_{ij}}{1-(\alpha_{ij}Tp_j)^2}\frac{Tf_j-e^{-\alpha_{ij}Ts}(Tf_j-Ts)}{Tf_j+e^{-\alpha_{ij}Ts}(Tf_j-Ts)}+\frac{Dn_{ij}}{1-(\beta_{ij}Tp_j)^2}\frac{Tf_j-e^{-\beta_{ij}Ts}(Tf_j-Ts)}{Tf_j+e^{-\beta_{ij}Ts}(Tf_j-Ts)}-\right.$$

$$\left.-\left(\frac{Dx_{ij}\alpha_{ij}Tp_j}{1-(\alpha_{ij}Tp_j)^2}+\frac{Dn_{ij}\beta_{ij}Tp_j}{1-(\beta_{ij}Tp_j)^2}\right)\frac{Tf_j-e^{-Ts/Tp_j}(Tf_j-Ts)}{Tf_j+e^{-Ts/Tp_j}(Tf_j-Ts)}\right). \qquad (2.79)$$

Аналогично можно получить значения дисперсии последовательности показаний одного программно-аппаратного измерительного канала в случае действия помех типа «белый шум»:

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

$$\left.+\frac{Dx_{ii}}{1-(\alpha_{ii}Tp_i)^2}\frac{Tf_i-e^{-\alpha_{ii}Ts}(Tf_i-Ts)}{Tf_i+e^{-\alpha_{ii}Ts}(Tf_i-Ts)}\right]; \qquad (2.80)$$

и помех с корреляционной функцией экспоненциального вида:

$$D_{z_i}^{ПКЕ} = \frac{A_i^2 Ts}{2Tf_i - Ts}\left(1 - \frac{Ts}{Tf_i}\right)^{-2E\left[\frac{Tc_i}{Ts}\right]} \times$$

$$\times\left[\frac{Dx_{ii}}{1-(\alpha_{ii}Tp_i)^2}\frac{Tf_i - e^{-\alpha_{ii}Ts}(Tf_i - Ts)}{Tf_i + e^{-\alpha_{ii}Ts}(Tf_i - Ts)} + \frac{Dn_{ii}}{1-(\beta_{ii}Tp_i)^2}\frac{Tf_i - e^{-\beta_{ii}Ts}(Tf_i - Ts)}{Tf_i + e^{-\beta_{ii}Ts}(Tf_i - Ts)} - \right.$$

$$\left. -\left(\frac{Dx_{ii}\alpha_{ii}Tp_i}{1-(\alpha_{ii}Tp_i)^2} + \frac{Dn_{ii}\beta_{ii}Tp_i}{1-(\beta_{ii}Tp_i)^2}\right)\frac{Tf_i - e^{-Ts/Tp_i}(Tf_i - Ts)}{Tf_i + e^{-Ts/Tp_i}(Tf_i - Ts)}\right]. \qquad (2.81)$$

Найдем взаимную корреляционную функцию весовых функций операции эталонного преобразования измеряемой величины и аналоговой части программно-аппаратного измерительного канала, подставив выражения (2.71) и (2.73) в (2.59):

$$Rag_{ij}(t) = \int_0^{\infty} \frac{Kp_i Kn_i}{Tp_i} e^{-\frac{\mu}{Tp_i}} A_j \delta(\mu + t) d\mu .$$

Откуда непосредственно следует:

$$Rag_{ij}(t) = \begin{cases} A_j \dfrac{Kp_i Kn_i}{Tp_i} e^{-\frac{t}{Tp_i}} & при \quad t \geq 0, \\ 0 \quad при \quad t < 0. \end{cases} \qquad (2.82)$$

Взаимная корреляционная функция сигнала на входе измерительного канала и измеряемой величины равна:

$$Kgx_{ij}(\tau) = M\left\{\left[\overset{\circ}{X}_i(t) + \overset{\circ}{N}_i(t)\right] \cdot \overset{\circ}{X}_j(t+\tau)\right\} = Kx_{ij}(\tau) + Knx_{ij}(\tau) = Kx_{ij}(\tau) .$$

Определим взаимную корреляционную функцию сигнала на выходе аналоговой части программно-аппаратного измерительного канала и эталонного значения искомой величины, подставив выражение (2.82) в (2.61):

$$Kyay_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{t} A_j Dx_{ij} e^{-\alpha_{ij}|\lambda|} \frac{Kp_i Kn_i}{Tp_i} e^{-\frac{t-\lambda}{Tp_i}} d\lambda .$$

Для $t \geq 0$ получим:

$$Kyay_{ij}(t) = A_j \frac{Kp_i Kn_i}{Tp_i} \frac{Dx_{ij}}{\alpha_{ij} Tp_i - 1} \left(\frac{2\alpha_{ij} Tp_i}{\alpha_{ij} Tp_i + 1} e^{-\frac{t}{Tp_i}} - e^{-\alpha_{ij} t} \right). \qquad (2.83)$$

Подставив выражения (2.73) и (2.83) в (2.62) получим, что взаимная корреляционная функция случайных последовательностей отсчетов эталонной величины $Y[k,\xi]$ и выходного сигнала программно-аппаратной измерительной системы $Z[k,\xi]$ при нулевом значении аргумента равна:

$$Kyz(0) = \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{2} \frac{A_i A_j Ts Dx_{ij}}{\alpha_{ij} Tp_i - 1} \left(1 - \frac{Ts}{Tf_i} \right)^{-E\left[\frac{Tc_i}{Ts}\right]} \times$$

$$\times \left(\frac{e^{-2\alpha_{ij} Ts}}{Tf_i - e^{-\alpha_{ij} Ts}(Tf_i - Ts)} - \frac{2\alpha_{ij} Tp_i}{\alpha_{ij} Tp_i + 1} \frac{e^{-2\frac{Ts}{Tp_i}}}{Tf_i - e^{-\frac{Ts}{Tp_i}}(Tf_i - Ts)} \right). \qquad (2.84)$$

Аналогично можно определить и выражение для взаимной корреляционной функции случайных последовательностей показаний эталонного и программно-аппаратного измерительного канала:

$$K_{yz_i}^{ИК\xi}(0) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{A_i}{Kn_i Kp_i} \frac{Ts}{Tf_i} \left(1 - \frac{Ts}{Tf_i} \right)^{k - E\left[\frac{Tc_i}{Ts}\right]} \times$$

$$\times A_i \frac{Kp_i Kn_i}{Tp_i} \frac{Dx_i}{\alpha_{ii} Tp_i - 1} \left(\frac{2\alpha_{ii} Tp_i}{\alpha_{ii} Tp_i + 1} e^{-\frac{2Ts}{Tp_i}} - e^{-2\alpha_{ii} Ts} \right) =$$

$$= \frac{A_i^2 Ts Dx}{\alpha_{ii} Tp_i - 1} \left(1 - \frac{Ts}{Tf_i} \right)^{-E\left[\frac{Tc_i}{Ts}\right]} \times$$

$$\times \left(\frac{e^{-2\alpha_{ii} Ts}}{Tf_i - e^{-\alpha_{ii} Ts}(Tf_i - Ts)} - \frac{2\alpha_{ii} Tp_i}{\alpha_{ii} Tp_i + 1} \frac{e^{-2\frac{Ts}{Tp_i}}}{Tf_i - e^{-\frac{Ts}{Tp_i}}(Tf_i - Ts)} \right). \qquad (2.85)$$

Весовая функция эталонного измерительного канала равна:

$$hg_i(t) = \int_0^{\infty} hc_i(\mu) hl_j(\mu + t) d\mu = \int_0^{\infty} \delta(\mu - Tc_i) A_i \delta(\mu + t) d\mu = A_i \delta(t - Tc_i). \qquad (2.86)$$

Тогда корреляционная функция эквивалентной весовой функции операции эталонного преобразования измеряемой величины в искомую равна:

$$Rgg_{ij}(t)=\int_0^{\infty}A_i\delta(\mu-Tc_i)A_j\delta(\mu+t-Tc_j)d\mu=A_iA_j\delta\left(t-\left|Tc_i-Tc_j\right|\right). \qquad (2.87)$$

С учетом (2.87) получим, что дисперсия эталонного значения искомой величины равна:

$$D_y=K_y(0)=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\int_{-\infty}^{\infty}Dx_{ij}e^{-\alpha_{ij}|\lambda|}A_iA_j\delta\left(\lambda-\left|Tc_i-Tc_j\right|\right)d\lambda=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}A_iA_jDx_{ij}e^{-\alpha_{ij}\left|Tc_i-Tc_j\right|}. \qquad (2.88)$$

Подставив выражения (2.78), (2.84) и (2.88) в (2.69), получим выражение для дисперсии последовательности отсчетов $\Delta_\partial[k,\xi]$ случайной функции методической динамической погрешности. При этом будем считать, что значение методической динамической погрешности максимально при $\xi \to 1$, то есть перед началом следующего отсчета. В случае воздействия помехи типа «белый шум» имеем:

$$D\Delta_\partial=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}A_iA_jDx_{ij}e^{-\alpha_{ij}\left|Tc_i-Tc_j\right|}-2\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\frac{A_iA_jTsDx_{ij}}{\alpha_{ij}Tp_i-1}\left(1-\frac{Ts}{Tf_i}\right)^{-E\left[\frac{Tc_i}{Ts}\right]}\times$$

$$\times\left(\frac{e^{-2\alpha_{ij}Ts}}{Tf_i-e^{-\alpha_{ij}T_s}(Tf_i-Ts)}-\frac{2\alpha_{ij}Tp_i}{\alpha_{ij}Tp_i+1}\frac{e^{-2\frac{Ts}{Tp_i}}}{Tf_i-e^{-\frac{Ts}{Tp_i}}(Tf_i-Ts)}\right)+$$

$$+\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\frac{A_iA_j}{Tp_i+Tp_j}\left(1-\frac{Ts}{Tf_i}\right)^{-E\left[\frac{Tc_i}{Ts}\right]}\left(1-\frac{Ts}{Tf_j}\right)^{-E\left[\frac{Tc_j}{Ts}\right]}\times$$

$$\times\left(\left(S_{ij}-\frac{2Dx_{ij}\alpha_{ij}Tp_j^2}{1-(\alpha_{ij}Tp_j)^2}\right)\frac{Tf_j-e^{-Ts/Tp_j}(Tf_j-Ts)}{Tf_j+e^{-Ts/Tp_j}(Tf_j-Ts)}+\right.$$

$$\left.+\frac{2Dx_{ij}Tp_j}{1-(\alpha_{ij}Tp_j)^2}\frac{Tf_j-e^{-\alpha_{ij}Ts}(Tf_j-Ts)}{Tf_j+e^{-\alpha_{ij}Ts}(Tf_j-Ts)}\right). \qquad (2.89)$$

Выражение для дисперсии последовательности отсчетов $\Delta_\partial[k,\xi]$ в случае помехи с корреляционной функцией экспоненциального вида получим, подставив выражения (2.79), (2.84) и (2.88) в (2.69):

$$D\Delta_\partial = \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2} A_i A_j Dx_{ij} e^{-\alpha_{ij}|Tc_i - Tc_j|} - 2\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2} \frac{A_i A_j Ts Dx_{ij}}{\alpha_{ij} Tp_i - 1}\left(1 - \frac{Ts}{Tf_i}\right)^{-E\left[\frac{Tc_i}{Ts}\right]} \times$$

$$\times\left(\frac{e^{-2\alpha_{ij}Ts}}{Tf_i - e^{-\alpha_{ij}Ts}(Tf_i - Ts)} - \frac{2\alpha_{ij}Tp_i}{\alpha_{ij}Tp_i + 1}\frac{e^{-2\frac{Ts}{Tp_i}}}{Tf_i - e^{-\frac{Ts}{Tp_i}}(Tf_i - Ts)}\right) +$$

$$+\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\frac{2A_i A_j Tp_j}{Tp_i + Tp_j}\left(1 - \frac{Ts}{Tf_i}\right)^{-E\left[\frac{Tc_i}{Ts}\right]}\left(1 - \frac{Ts}{Tf_j}\right)^{-E\left[\frac{Tc_j}{Ts}\right]} \times$$

$$\times\left(\frac{Dx_{ij}}{1-(\alpha_{ij}Tp_j)^2}\frac{Tf_j - e^{-\alpha_{ij}Ts}(Tf_j - Ts)}{Tf_j + e^{-\alpha_{ij}Ts}(Tf_j - Ts)} + \frac{Dn_{ij}}{1-(\beta_{ij}Tp_j)^2}\frac{Tf_j - e^{-\beta_{ij}Ts}(Tf_j - Ts)}{Tf_j + e^{-\beta_{ij}Ts}(Tf_j - Ts)} -\right.$$

$$\left.-\left(\frac{Dx_{ij}\alpha_{ij}Tp_j}{1-(\alpha_{ij}Tp_j)^2} + \frac{Dn_{ij}\beta_{ij}Tp_j}{1-(\beta_{ij}Tp_j)^2}\right)\frac{Tf_j - e^{-Ts/Tp_j}(Tf_j - Ts)}{Tf_j + e^{-Ts/Tp_j}(Tf_j - Ts)}\right). \qquad (2.90)$$

Математическое ожидание случайной последовательности методической динамической погрешности $\Delta_\partial[k,\xi]$ будет равно:

$$M\Delta_\partial[k,\xi] = M\{\Delta_\partial[k,\xi]\} = M\{Y[k,\xi] - Z[k,\xi]\} = My[k,\xi] - Mz[k,\xi], \qquad (2.91)$$

где $My[k,\xi]$ – математическое ожидание случайной последовательности $Y[k,\xi]$, $Mz[k,\xi]$ – математическое ожидание случайной последовательности $Z[k,\xi]$.

Математическое ожидание последовательности отсчетов $Z[k,\xi]$ случайного сигнала на выходе программно-аппаратной измерительной системы:

$$Mz(t) = \sum_{i=1}^{2}\sum_{n=0}^{\infty} hw_i[n,\xi]\int_0^\infty ha_i(\mu)Mg_i[(m-n)Ts - \mu]d\mu, \qquad (2.92)$$

где $Mg_i(t) = M\{X_i(t) + n_i(t)\} = Mx_i(t) + Mn_i(t)$ - математическое ожидание сигнала на входе в i-й программно-аппаратный измерительный канал.

С учетом того, что измеряемые сигналы являются квазистационарными, а математические ожидания помех по каждому из измерительных каналов можно принять равными нулю, получаем, что математическое ожидание сигнала на входе программно-аппаратного измерительного канала равно:

$$Mg_i(t) = Mx_i .$$

В таком случае получим значение математического ожидания последовательности отсчетов $Z[k,\xi]$ случайного сигнала на выходе программно-аппаратной измерительной системы:

$$Mz(t) = \sum_{i=1}^{2} Mx_i A_i \frac{Ts}{Tp_i Tf_i} \sum_{n=0}^{\infty} \left(1 - \frac{Ts}{Tf_i}\right)^n \int_0^{\infty} e^{-\frac{\mu}{Tp_i}} d\mu =$$

$$= \sum_{i=1}^{2} Mx_i A_i \frac{Ts}{Tf_i} \sum_{n=0}^{\infty} \left(1 - \frac{Ts}{Tf_i}\right)^n = \sum_{i=1}^{2} Mx_i A_i . \qquad (2.93)$$

Математическое ожидание последовательности отсчетов показаний эталонной измерительной системы:

$$My[k,\xi] = \sum_{i=1}^{2} \int_0^{\infty} hg_i(\mu) Mx_i[(k+\xi)Ts - \mu] d\mu .$$

С учетом (2.86):

$$My[k,\xi] = \sum_{i=1}^{2} Mx_i A_i .$$

Таким образом, получаем, что математическое ожидание случайной функции методической динамической погрешности измерения степени насыщения абсорбента равно нулю:

$$M\Delta_\partial[k,\xi] = M\{\Delta_\partial[k,\xi]\} = \sum_{i=1}^{2} Mx_i A_i - \sum_{i=1}^{2} Mx_i A_i = 0 . \qquad (2.94)$$

Полученные выражения (2.89, 2.90) определяют зависимость методической динамической составляющей погрешности обработки информации в системе для измерения степени насыщения абсорбента от статистических характеристик измерительной информации (α, β, Dx, Dn, S),

настроечных коэффициентов компонентов программно-аппаратных измерительных каналов (Tp, Tn, Tf, A) и настроечных коэффициентов измерительной системы в целом (Ts, Tc).

2.7 Свойства динамической погрешности измерительной системы

В качестве оценок погрешности удобнее всего использовать относительные величины, в частности, нормированное значение дисперсии динамической погрешности измерения степени насыщения абсорбента [66]:

$$\eta_{\Delta_\partial} = \frac{D\Delta_\partial}{D_y}, \tag{2.95}$$

где $D\Delta_\partial$ - дисперсия погрешности определения искомой величины, определяемая по выражению (2.89) и (2.90), D_y - дисперсия эталонного значения искомой величины (2.88).

На основе полученных выражений (2.89), (2.90), а также (2.95) в расчетно-моделирующей среде Mathcad был разработан пакет прикладных программ для имитационного моделирования метрологических характеристик системы для измерения степени насыщения абсорбента.

Рассмотрим зависимость методической динамической погрешности измерительной системы от параметров измерительной информации и настроечных коэффициентов.

Зависимость погрешности от периода опроса датчиков. Вид зависимости η_{Δ_∂} от периода опроса датчиков, Ts (см. рисунок 2.8), показывает, что при уменьшении Ts происходит снижение динамической погрешности. Это объясняется тем, что с уменьшением периода опроса снижается влияние на погрешность потери информации, связанной с дискретизацией сигналов по времени.

Однако существует верхняя оценка $Ts^{гр}$, начиная с которой дальнейшее уменьшение периода опроса датчиков практически не приводит к существенному снижению динамической погрешности, так как большее

влияние на значение погрешности начинают оказывать динамические свойства компонентов каналов (фильтров, компенсаторов, датчиков). 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.

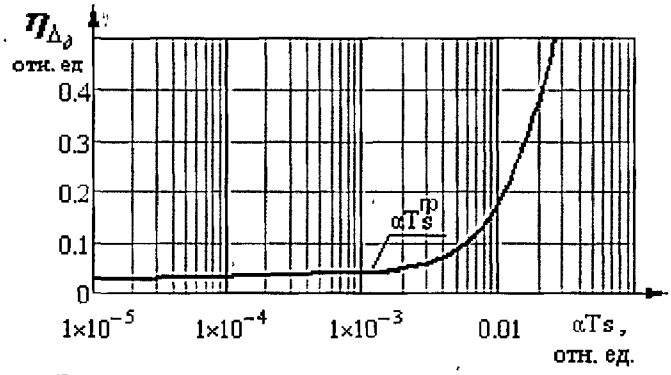

Рисунок 2.8 - Зависимость погрешности от периода опроса датчиков $Tf_1 = 800$ с, $Tf_2 = 600$ с, $Tc_2 = 1300$ с, $\alpha_{11} = 3 \cdot 10^{-4}$ 1/с

Таким образом, значение периода опроса датчиков, Ts, в программно-аппаратной измерительной системе для определения степени насыщения абсорбента целесообразно выбирать равным верхней оценке.

Зависимость погрешности от скорости изменения сигналов на входе измерительной системы. Анализ зависимости методической динамической погрешности обработки информации в программно-аппаратной измерительной системе от характеристик измеряемых сигналов показывает, что увеличение скорости изменения сигналов при фиксированном периоде опроса датчиков и настройках программных фильтров приводит к увеличению погрешности (см. рисунок 2.9).

Максимум погрешности достигается при равенстве скоростей изменения корреляционных функций полезного сигнала и шума, так как при этом помеха по своим свойствам максимально приближена к свойствам измеряемой величины. Однако в реальности такой режим практически не

достижим, так как обычно скорость изменения помехи значительно выше, чем скорость изменения полезного сигнала.

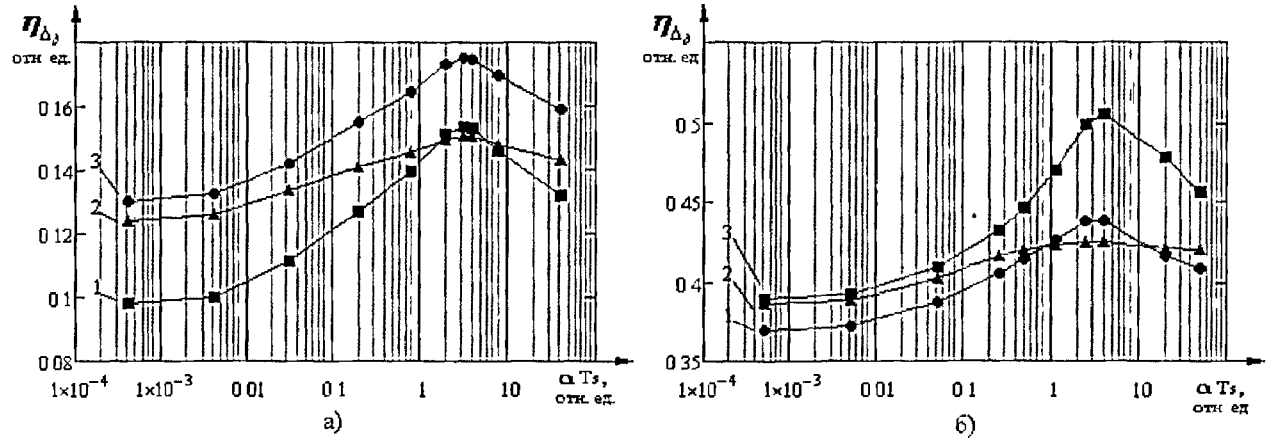

Рисунок 2.9 - Зависимость погрешности от скорости изменения сигналов в первом канале а) при разных постоянных времени фильтров (Ts = 40 с, Tc_2 = 1300 с, $\beta_{11}\,Ts$ = 3)
1 – Tf_1=900 с, Tf_2 = 500 с; 2 – Tf_1=1400 с, Tf_2 = 700 с; 3 – Tf_1=1000 с, Tf_2 = 600 с.
б) при разных постоянных времени датчика в первом канале
(Ts = 50 с, Tf_1=800 с, Tf_2 = 700 с, Tp_2 = 8 с, Tc_2 = 1300 с, $\beta_{11}\,Ts$ = 3)
1 – Tp_1 = 15 с; 2 – Tp_1 = 55 с; 3 – Tp_1 = 2 с.

Зависимость погрешности от постоянных времени фильтров в измерительных каналах. Дробное взаимодействие измеряемых сигналов приводит к различию вида зависимостей относительной динамической погрешности от настроечных коэффициентов динамических преобразователей в программно-аппаратной измерительной системе. Например, при увеличении постоянной времени программного фильтра в канале измерения концентрации вещества в абсорбенте на входе в абсорбер, Tf_1, происходит уменьшение динамической погрешности. При малых значениях Tf_1 скорость изменения измеряемого сигнала оказывает большее влияние на значение погрешности (см. рисунок 2.10а).

Зависимость методической динамической погрешности от параметров программного фильтра в канале измерения концентрации вещества в абсорбенте на выходе из абсорбера Tf_2 имеет минимум (см. рисунок 2.10 б), соответствующее которому значение постоянной времени программного фильтра целесообразно выбирать при настройке параметров программно-аппаратной измерительной системы.

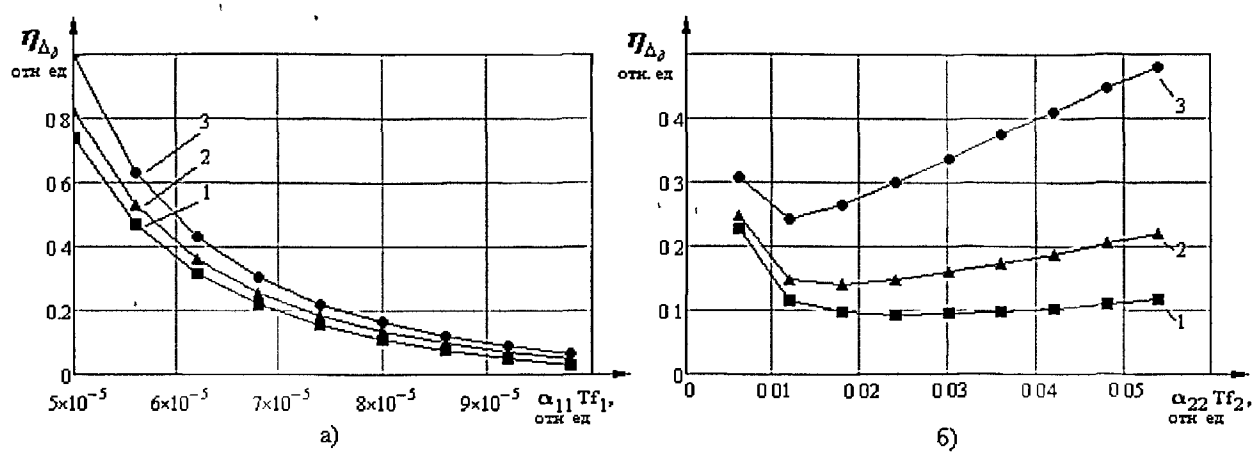

Рисунок 2.10 - Зависимость погрешности от постоянной времени фильтра
а) в первом канале при разной скорости изменения первого сигнала
(Ts = 50 с, Tf_2 = 550 с, Tc_2 = 1300 с)

$1 - \alpha_{11} = 1{,}0 \cdot 10^{-7}$ 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 (Ts= 50 с, Tf_1 = 500 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.

Зависимость относительной динамической погрешности от постоянной времени датчика в измерительном канале. Характер зависимости методической динамической погрешности от постоянной времени датчика в первом канале измерения концентрации вещества в абсорбенте на входе в абсорбер изменяется с увеличением скорости изменения сигнала (см. рисунок 2.11 а).

При меньшей скорости сигнала характер зависимости погрешности от постоянной времени датчика является монотонно возрастающим (кривая 1 на рисунке 2.11 а). При увеличении скорости изменения сигнала на кривой зависимости появляется минимум.

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 (рисунок 2.11 б). 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.

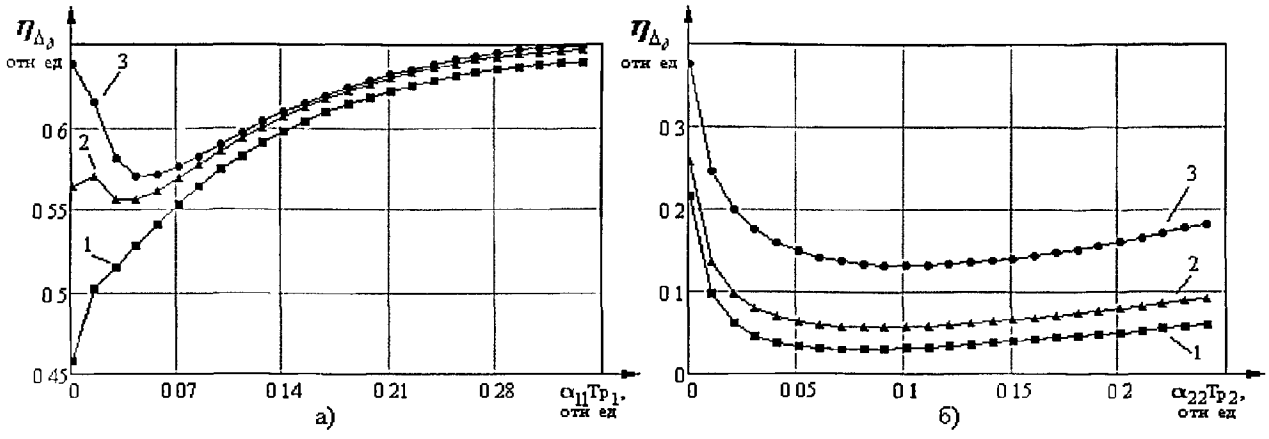

Рисунок 2.11 - Зависимость погрешности от постоянной времени датчика
а) в первом канале при разной скорости изменения первого сигнала (Ts = 50 с, Tf_1 = 500 с, Tf_2 = 150 с, Tp_2 = 10 с, Tc_2 = 1300 с)

$1 - \alpha_{11} = 0{,}5\cdot10^{-2}$ 1/с; $2 - \alpha_{11} = 1{,}0\cdot10^{-2}$ 1/с; $3 - \alpha_{11} = 1{,}4\cdot10^{-2}$ 1/с.

б) Во втором канале при разной скорости изменения второго сигнала (Ts = 50 с, Tf_1 = 500 с, Tf_2 = 150 с, Tp_1 = 10 с, Tc_2 = 1300 с)

$1 - \alpha_{22} = 1{,}0\cdot10^{-4}$ 1/с; $2 - \alpha_{22} = 2{,}0\cdot10^{-4}$ 1/с; $3 - \alpha_{22} = 5{,}0\cdot10^{-4}$ 1/с.

Переход от динамических к статическим измерениям. Уменьшение до нуля дисперсии и скорости изменения измеряемых сигналов означает переход к статическим условиям измерения (см. рисунок 2.12).

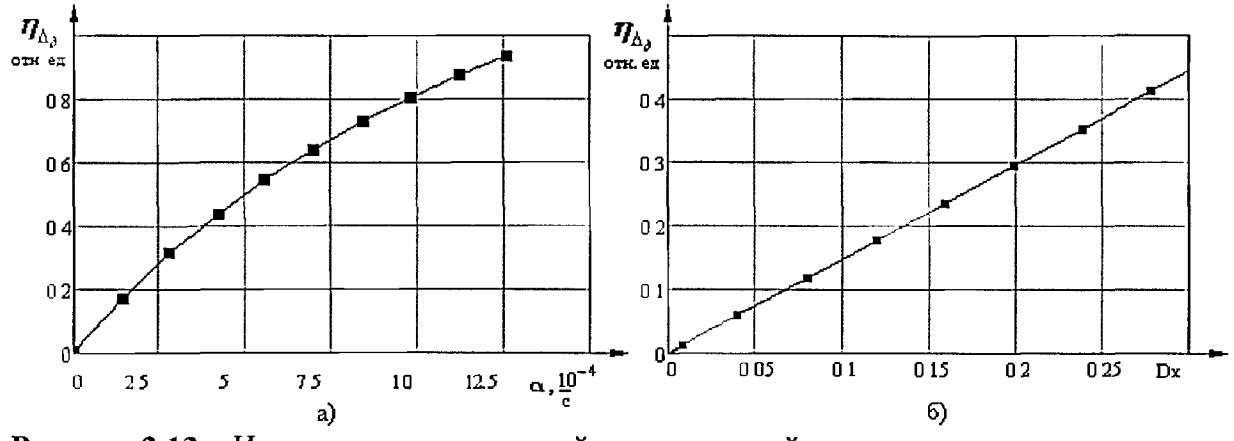

Рисунок 2.12 – Изменение методической динамической погрешности при переходе из динамических к статическим условиям измерения
а) при уменьшении скорости изменения сигналов
б) при уменьшении дисперсии (Ts = 150 с, Tf_2 = 500 с, Tf_1=800 с, Tc_2 = 1300 с)

При выбранной модели формирования погрешности обработки информации в измерительной системе это означает равенство нулю её динамической составляющей.

2.8 Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Выражения (2.5) – (2.9) определяют модели измерительной информации для процесса абсорбции цианистого натрия. Выражения (2.11) – (2.15) определяют модели измерительной информации для процесса абсорбции сероуглерода.

2. Выражение (2.32) представляет собой уравнение измерения текущего значения степени насыщения абсорбента, учитывающее динамические свойства абсорбера и предназначенное для реализации способа управления процессом абсорбции.

3. Выражения (2.80) и (2.81) определяют дисперсию показаний программно-аппаратного измерительного канала в случае действия соответственно помех типа «белый шум» и помех с корреляционной функцией экспоненциального вида с учётом динамических свойств объекта измерения и дробного взаимодействия измеряемых сигналов в уравнении измерения.

4. Выражение (2.85) определяет взаимную корреляционную функцию показаний эталонного и программно-аппаратного измерительных каналов с учётом динамических свойств объекта измерения и дробного взаимодействия измеряемых сигналов в уравнении измерения.

5. Полученные выражения (2.89) и (2.90) определяют дисперсию методической динамической погрешности системы для измерения степени насыщения абсорбента с учётом динамических свойств объекта измерения и дробного взаимодействия измеряемых сигналов в уравнении измерения и могут быть использованы соответственно 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 в случае, когда корреляционные

функции помех могут быть аппроксимированы экспоненциальной зависимостью.

6. Методическая динамическая погрешность измерительной системы является центрированной случайной функцией, зависящей от статистических характеристик измерительной информации, а также от значений настроечных коэффициентов измерительной системы.

3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СТЕПЕНИ НАСЫЩЕНИЯ АБСОРБЕНТА

Система для измерения степени насыщения абсорбента является частью системы управления абсорбционной установкой и предназначена для определения текущих значений степени насыщения абсорбента на основе результатов прямых измерений концентраций вещества в абсорбенте до и после абсорбера. Наиболее простым вариантом реализации системы является подключение датчиков концентраций вещества в абсорбенте к входным каналам микроконтроллера или контроллера управляющей системы и задания уравнения измерения в технологической программе микроконтроллера или контроллера.

Прямое подключение датчиков к программируемому контроллеру программно-технического комплекса, управляющего процессом абсорбции, не всегда возможно, так как все входные и/или выходные каналы комплекса могут быть заняты, объем технологической программы контроллера может быть заполнен, стоимость прокладки кабеля от датчиков до шкафа управления может быть слишком высокой и т.п. Также возможно, что АСУ ТП построена не в виде централизованной системы на базе программно-технического комплекса, а в виде совокупности локальных контуров регулирования на базе аналоговой аппаратуры.

В указанных выше случаях требуется наличие недорогой локальной измерительной системы на основе изменяемого, то есть перепрограммируемого, полевого прибора. Разработке такой измерительной системы и посвящена настоящая глава.

Сформулируем основные требования к разрабатываемой измерительной системе. Измерительная система должна определять степень насыщения абсорбента на основе результатов прямых измерений концентраций вещества в абсорбенте, а также быть универсальной, т.е. иметь возможность переконфигурирования для измерения других

обобщенных показателей. Так как основное количество последних вычисляется на основе взаимодействия не более четырех измерительных каналов [60], то измерительный прибор (полевой изменяемый прибор [67]), входящий в состав измерительной системы, должен иметь четыре аналоговых входа для подключения датчиков. Результат измерений должен отображаться на дисплее измерительного прибора, а также передаваться в вышестоящую систему, как по аналоговому каналу связи, так и по цифровому каналу связи.

Таким образом, измерительная система состоит из аппаратной и программной частей. Аппаратная часть представляет собой полевой прибор и выполняет функции приема сигналов о текущих значениях концентраций и передачи вычисленного значения степени насыщения в управляющую систему и на вторичный прибор (дисплей). Задачей программной части является управление работой аппаратной части, вычисление текущего значения степени насыщения абсорбента и отображение результата вычисления.

3.1 Разработка аппаратной части измерительной системы

Анализ патентов на конфигурируемые цифровые приборы показал, что наиболее полно поставленным нами требованиям соответствует изменяемый полевой прибор [68] производства фирмы Endress+Hauser. Прибор предназначен для автоматизации технологических процессов и содержит измерительный преобразователь, соединенный с сенсорным блоком, к которому подключен цифровой сигнальный процессор модуля обработки сигналов. Процессор соединен с коммуникационным модулем для связи полевого прибора с вышестоящим блоком управления и обработки, состоящим из коммуникационного блока и/или аналогового блока. Прибор снабжен перепрограммируемым модулем, благодаря этому обеспечивается возможность произвольно конфигурировать аппаратное и программное обеспечение.

Однако прибор [68] имеет возможность подключения только одного первичного преобразователя, может быть использован только для прямых измерений параметров технологического процесса (уровень, давление, температура и т.д.), и поэтому применение прибора для измерения степени насыщения абсорбента затруднительно.

В рамках настоящей работы был разработан прибор [69], расширяющий функциональные возможности известного прибора и полностью удовлетворяющий поставленным требованиям. Разработанный прибор имеет возможность проведения четырех прямых измерений и косвенного вычисления показателей, в частности, степени насыщения абсорбента.

Функциональная схема разработанного прибора показана на рисунке 3.1.

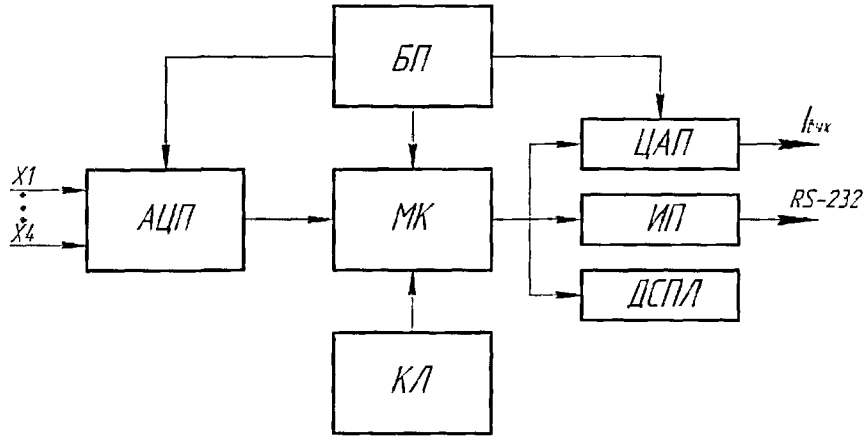

Рисунок 3.1 - Схема функциональная полевого изменяемого прибора

Прибор работает следующим образом. Сигналы (X_1, ..., X_4) от измерительных преобразователей поступают на входы аналого-цифрового преобразователя (АЦП), являющегося частью вычислительного устройства – микроконтроллера (МК), в котором производится обработка измерительной информации и вычисление текущего значения степени насыщения абсорбента. Измеренное значение передается в вышестоящую систему регулирования с помощью интерфейсного преобразователя (ИП) по

цифровому интерфейсу RS-232 и токовым сигналом 4-20 мА с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), а также вместе со служебной информацией (режим работы прибора, установленное значение равновесной концентрации растворенного вещества в абсорбенте) отображается на дисплее прибора (ДСПЛ). Настройка прибора производится при помощи клавиатуры (КЛ) на его лицевой панели. Необходимое напряжение питания формируется блоком питания прибора (БП). Полная принципиальная схема прибора [69] показана на рисунке 3.2.

В качестве центрального вычислительного устройства использован микроконтроллер PIC16F877. Для формирования токового сигнала 4-20 мА применена микросхема ЦАП AD420, которая представляет собой промышленный цифро-аналоговый преобразователь с унифицированным выходным сигналом. В качестве интерфейсного преобразователя для преобразования логических уровней сигнала в уровни интерфейса RS-232 использована микросхема MAX232. Для индикации режимов работы и данных использован двухстрочный жидкокристаллический индикатор с восемью символами в строке.

Рассмотрим составные части прибора, способ подключения и метод их функционирования.

Подключение микроконтроллера к источнику питания. PIC-микроконтроллер требует напряжения питания от 4 до 6 вольт, поэтому в приборе применена схема стабилизации напряжения питания на основе микросхемы DA2 LM7805 [70]. Блок питания прибора имеет два выходных напряжения: 5 В и 15 В. Напряжение 5 В является стабилизированным и используется для питания всех элементов прибора, кроме микросхемы цифро-аналогового преобразователя DA1 AD420, которая имеет встроенный стабилизатор и требует напряжения питания от 12 В до 32 В [71].

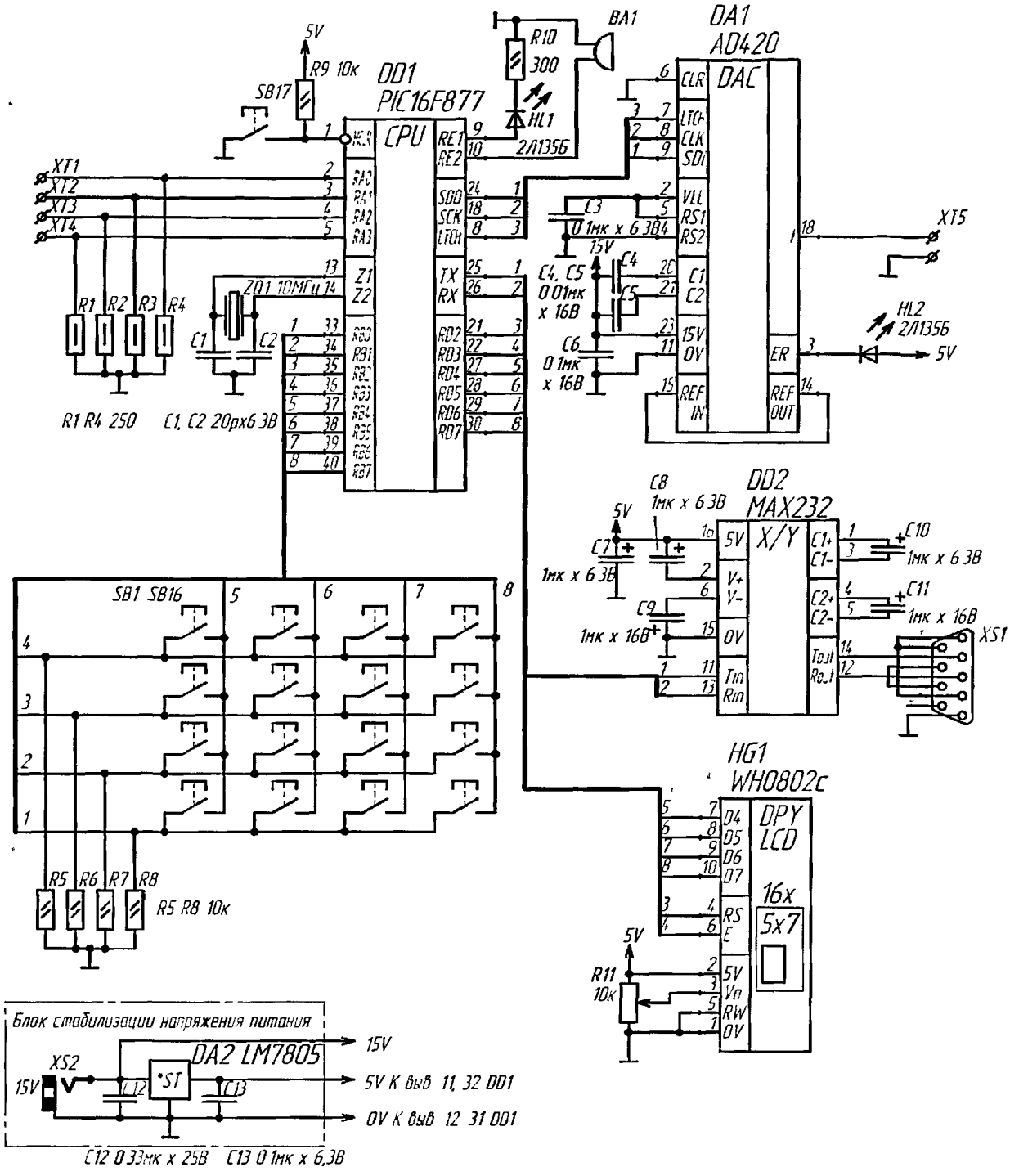

Рисунок 3.2 - Схема электрическая принципиальная полевого изменяемого прибора

Напряжение питания подается на вывод Vdd микроконтроллера, вывод Vss микроконтроллера соединяется с общим проводом прибора. За перезапуск микроконтроллера отвечает вход сброса MCLR. Сброс микроконтроллера происходит при низком логическом уровне сигнала на входе MCLR [72, 73]. К выходам Z1 и Z2 подключается кварцевый резонатор ZQ1.

Светодиод HL1, подключенный к выводу RE1 контроллера, является индикатором нормальной работы программного обеспечения прибора. Пьезокерамическая головка BA1 используется для звукового сопровождения событий (нажатие на кнопки клавиатуры, переход в режим работы и в режим программирования).

Взаимодействие с матричной клавиатурой. Для настройки режима работы прибора необходимо обеспечить возможность ввода значений настроечных коэффициентов локально: с клавиатуры, расположенной на корпусе прибора.

В настоящее время в промышленных приборах чаще всего применяются пленочные клавиатуры, которые обладают существенным преимуществом по сравнению с кнопочными клавиатурами: герметичностью, что обеспечивает защиту прибора от неблагоприятных внешних воздействий (пыли, влаги). Субъективным недостатком пленочных клавиатур является их меньшее удобство в работе, т.к. момент нажатия на клавишу тактильно не ощущается. Для устранения данного недостатка требуется реализация звукового сопровождения нажатий на клавиши.

Клавиатура прибора построена как двумерная коммутационная матрица. Каждый ее узел содержит кнопку (клавишу) SB1 – SB16, которая при нажатии соединяет один столбец матрицы с одной из строк.

Согласно рекомендациям [73], для подключения клавиатуры использован порт B микроконтроллера. Входы этого порта снабжены внутренними резисторами, подключаемыми к напряжению питания, а выходы портов в схемном отношении аналогичны транзисторным ключам с открытым стоком.

При опросе клавиатуры текущий вывод микроконтроллера переводится в режим выхода, и на него выдается логическая единица. Затем происходит считывание линий строк. Процесс повторяется для других столбцов. Подобным образом обеспечивается сканирование всей клавиатуры, и производится поиск нажатых клавиш.

Для исключения помех и ложного детектирования нажатий линии драйверов строк соединены с общим проводом прибора через токоограничивающие резисторы R5 – R8.

Управление жидкокристаллическим дисплеем. Для подключения жидкокристаллического дисплея HG1 используется однорядный разъем с 14 контактами, назначение этих контактов указано в таблице 3.1. [72]:

Таблица 3.1 - Назначение контактов жидкокристаллического дисплея

№ вывода	Назначение вывода
1	«Земля» (общий)
2	Vcc (Напряжение питания)
3	Управление контрастом
4	R/S - команда/выбор регистра
5	R/W - чтение/запись
6	E - тактовые импульсы
7-14	DO - D7 - выводы данных

Подаваемое на дисплей напряжение управления контрастом регулируется с помощью потенциометра R11 [74], который выполняет функцию делителя напряжения.

Жидкокристаллический дисплей подключается через шину, которая обеспечивает быструю запись на дисплей и считывание данных с него [75]. Каждый символ кода для отображения символов (ASCII) имеет восьмибитный формат и пересылается на жидкокристаллический дисплей в виде 4-разрядных кодовых посылок. При этом отсылаются два полубайта данных: сначала старший, а затем младший, сопровождаемые синхроимпульсами по линии E.

Для передачи измерительной информации на ЭВМ наиболее удобен цифровой интерфейс. Из протоколов интерфейса передачи данных, применяемых в настоящее время для связи нескольких цифровых систем или частей одной системы между собой, используются следующие протоколы: RS-420, RS-232, Modbus и другие. Нами использован протокол RS-232 как наиболее доступный.

Интерфейс RS-232 – стандарт (протокол) передачи данных, который предусматривает применение сигналов со следующими уровнями напряжения [76]: состояние «Mark» (логическая единица) реально соответствует уровню напряжения минус 12 В, а «Space» (логический ноль) - уровню напряжения плюс 12 В. Уровни напряжения в области переключения (от минус 3 В до плюс 3 В) считаются неопределенными и могут восприниматься, и как логический ноль, и как логическая единица - в зависимости от конкретного интерфейсного устройства.

Устройство передачи данных и принимающее устройство всегда связаны общим проводом. Эта линия оказывается весьма критичной для интерфейса RS-232, от нее зависит работа входных преобразователей уровней, с помощью которых определяются реальные логические уровни входных напряжений линий [77].

Современные схемы подключения к интерфейсу RS-232 предусматривают использование, так называемой, трехпроводной схемы. В этом случае линии RTS/CTS и DTR/0SR фактически закорачиваются со стороны компьютера или микроконтроллера [78]. Линии DCD и RI остаются неподключенными, а линии RTS/CTS и DTR/0SR соединяются между собой. При этом данные могут передаваться и приниматься достаточно простым способом, что не требует разработки специальных программ управления, реализующих различные логические протоколы обмена.

Для преобразования логических уровней в уровни интерфейса RS-232 в разрабатываемой системе применена микросхема MAX232 DD2, подключенная по стандартной схеме [79, 80].

Цифро-аналоговый преобразователь. Основными интерфейсами передачи измерительной информации от вторичных приборов в вычислительное устройство измерительной системы являются сигнал по напряжению (0-5 В) и токовый сигнал (0-20 мА или 4-20 мА). Цифровые интерфейсы передачи измерительной информации от датчиков (или вторичных преобразователей) до контроллера в настоящее время широко не

распространены, т.к. большинство вторичных преобразователей, используемых в промышленности, оснащены только аналоговым выходом.

Токовый сигнал (токовая петля) имеет следующее преимущество перед сигналом по напряжению: он не зависит от сопротивления линии передачи и от помех, появляющихся в линии при прохождении ее рядом с электроустановками. При этом следует отметить, что в некоторых случаях импульсные значения наводок могут достигать 60 В, что при сигнале по напряжению 0-5 В недопустимо.

В отличие от токовой петли 0-20 мА, сигнал 4-20 мА обладает свойством самоконтроля обрыва цепи, т.к. сила тока 4 мА соответствует значению 0 %, а 20 мА соответствует 100 % значения измеряемой величины, поэтому наличие тока в цепи меньше 4 мА в нормальном режиме не допускается и означает обрыв [81].

Также аналоговый выход 4 – 20 мА удобен и для линии передачи измеренного значения степени насыщения в вышестоящую систему управления, т.к. данный интерфейс присутствует во всех промышленных системах управления, начиная от самых простейших регуляторов и заканчивая мощными системами на базе контроллеров.

Для формирования токового сигнала 4-20 мА применена микросхема DA1 цифро-аналогового преобразователя AD420 [71]. Для обмена данными между микросхемами микроконтроллера DD1 и ЦАП DA1 используется интерфейс SPI, который предусматривает передачу данных в 8-разрядном формате и использование трех линий для взаимодействия с внешними устройствами [82, 83].

Вывод данных синхронизируется по фронту тактовых импульсов, при этом первым выводится старший бит. Синхронизирующие импульсы формируются микроконтроллером (режим Master). Процедура передачи данных по интерфейсу SPI проиллюстрирована на рисунке 3.3.

Микросхема AD420 обладает функцией контроля обрыва токовой петли. При обнаружении обрыва на выход ER микросхемы подается

положительный потенциал, который может быть использован как для сигнализации, так и для передачи в вышестоящую систему. В рассматриваемом приборе к данному выходу подключен светодиод HL2 красного цвета, расположенный на лицевой панели прибора.

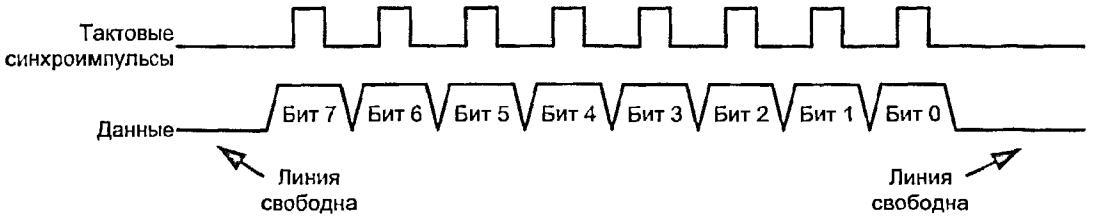

Рисунок 3.3 - Временные диаграммы передачи данных по интерфейсу SPI

3.2 Разработка программного обеспечения измерительной системы

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

Программное обеспечение, обеспечивающее функционирование прибора. Согласно требованиям к разрабатываемой измерительной системе, программное обеспечение должно выполнять функции обработки измерительной информации, поступающей с датчиков, вычислять значение степени насыщения и отображать его на дисплее прибора, а также передавать в вышестоящую систему по цифровому и аналоговому интерфейсам. Также требуется обрабатывать данные, поступающие с клавиатуры прибора и озвучивать нажатия на клавиши.

Для обеспечения поставленных требований прибор имеет два режима работы: режим вычислений и режим конфигурирования.

В режиме вычислений производится опрос каналов АЦП для получения текущих значений концентраций абсорбируемого вещества в

абсорбенте, фильтрация сигналов, приведение полученных значений концентраций к требуемым единицам измерения, вычисление степени насыщения, индикация результатов вычислений на дисплее, преобразование результатов вычислений в токовый сигнал и передача результатов по интерфейсу RS-232. В режиме конфигурирования производится изменение значений параметров настройки прибора. Программное обеспечение прибора создано в среде отладки и написания программ для микроконтроллеров «MicroPascal for PIC» [84] на языке верхнего уровня Pascal.

Схема алгоритма работы прибора представлена в приложении 1, текст программы на языке Pascal приведен в приложении 2.

Согласно рекомендациям [85, 86], программное обеспечение прибора оформлено в виде набора подпрограмм. Рассмотрим более подробно каждую из них.

Основная часть программы (см. рисунок П.1.1) выполняется каждый раз при запуске микроконтроллера. Она состоит из секции подготовки и секции выполнения расчетов.

В секции подготовки производится объявление переменных, а также инициализация функций работы с периферийными устройствами и настройка режимов работы портов микроконтроллера.

Команда Tris настраивает соответствующие порты микроконтроллера на работу в режиме ввода или вывода данных. Команда ADCon устанавливает параметры работы АЦП.

Команда Sound_Init(PORTE, 2) подключает поддержку библиотеки звуков из комплекта поставки ПО «MicroPascal for PIC» и настраивает вывод 2 порта E микроконтроллера на работу с пьезокерамическим динамиком BA1.

Команда Keypad_Init(PORTB) подключает библиотеку работы с клавиатурой и переводит порт B микроконтроллера в режим опроса клавиатуры.

Команда Lcd_Init(PORTD) настраивает выводы порта D микроконтроллера на работу с дисплеем HG1 по четырехбитному интерфейсу.

Команда Spi_Init_Advanced(MASTER_OSC_DIV64, DATA_SAMPLE _MIDDLE, CLK_IDLE_LOW, LOW_2_HIGH) включает поддержку библиотеки работы с интерфейсом SPI. Параметры команды устанавливают следующий режим работы SPI: режим Master с частотой, равной 1/64 частоты микроконтроллера, данные передаются в середине импульса, режим положительных синхронизирующих импульсов, информация передается по фронту сигнала.

Команда Usart_Init(9600) включает поддержку библиотеки работы с универсальным синхронно-асинхронным приемопередатчиком (USART) для передачи данных в микросхему DD2 (MAX232) и устанавливает скорость передачи равной 9600 бод.

Секция выполнения расчетов представляет собой бесконечный цикл, внутри которого выполняется подпрограмма «Расчет».

Подпрограмма «Расчет» (см. рисунок П.1.2) состоит из секции подготовки и цикла, в теле которого выполняется опрос АЦП, вычисление значения степени насыщения, вывод информации на дисплей и передача в вышестоящую систему.

В начале подпрограммы в первой строке дисплея прибора выводится сообщение, что прибор находится в режиме измерения, а во второй строке – установленное значение равновесной концентрации вещества в абсорбенте в десятичном формате с двумя знаками после запятой. После этого инициируется звуковой сигнал, означающий начало работы.

Далее открывается бесконечный цикл, в котором производится косвенное измерение степени насыщения абсорбента. Для индикации того, что программа выполняется в штатном режиме, на лицевой панели прибора предусмотрен светодиод зеленого цвета HL1, который зажигается командой SetBit(PORTE, 1). Далее производится опрос клавиатуры на предмет нажатой

клавиши перехода в режим конфигурирования. Если клавиша была нажата подряд определенное количество циклов работы прибора, то осуществляется запуск подпрограммы конфигурирования. При этом оператор имеет возможность изменять значение равновесной концентрации вещества в абсорбенте. Ожидание перехода к подпрограмме «Конфигурирование» осуществляется в псевдофоновом режиме [87] для того, чтобы не прерывать измерение степени насыщения.

После этого производится опрос каналов АЦП микроконтроллера. Полученные с АЦП текущие значения концентраций вещества в абсорбенте подготавливаются для вычисления степени насыщения. При этом производится нормирование и фильтрация сигналов. Результат вычислений отображается в правой части первой строки дисплея прибора, а также передается по интерфейсам SPI и USART в микросхемы DA1 и DD2 соответственно для преобразования в аналоговый сигнал 4-20 мА и цифровой код.

Переход к **подпрограмме «Конфигурирование» (см. рис. П.1.3)** осуществляется из подпрограммы «Расчет». Подпрограмма выполняется циклически до появления флага возврата в режим вычислений. В начале выполнения подпрограммы генерируется звуковой сигнал, и в первую строку дисплея выводится информация о переходе в режим конфигурирования, а также текущее значение равновесной концентрации вещества в абсорбенте.

Во время выполнения подпрограммы производится опрос клавиатуры, и, в зависимости от нажатой клавиши, осуществляется вызов соответствующей подпрограммы уменьшения, увеличения константы или переход в режим расчета степени насыщения.

Подпрограммы изменения настроечных коэффициентов (см. рисунок П.1.1) выполняются по нажатию клавиш «Увеличить» и «Уменьшить» в режиме настройки. Процедуры «ПлюсП» и «МинусП» выполняют соответственно увеличение и уменьшение значения равновесной

концентрации вещества в абсорбенте на 0,01 %масс. После выполнения подпрограмм выдерживается пауза для того, чтобы оператор успел отпустить нажатую клавишу. Процедуры «Плюс» и «Минус» выполняют соответственно циклическое увеличение и уменьшение значения равновесной концентрации вещества в абсорбенте на 0,01 %масс в каждом цикле. Это позволяет быстро изменять значение в большом диапазоне.

Подпрограмма «Сохранить» выполняется в случае нажатия на клавишу «Сохранить» в режиме конфигурирования. Во время выполнения подпрограммы происходит опрос клавиатуры, и в случае, если во время определенного количества циклов выполнения подпрограммы была постоянно нажата клавиша «Сохранить», то осуществляется переход в режим вычислений и запоминание введенного значения равновесной концентрации вещества в абсорбенте.

Программное обеспечение для визуализации измерительной информации. Отображение измерительной информации на экране ЭВМ реализовано двумя способами: в окне утилиты «USART terminal», входящей в комплект поставки ПО «MicroPascal for PIC», и на мнемосхеме, созданной в программном комплексе «TRACE MODE» [88].

Окно утилиты «USART terminal» показано на рисунке 3.4. Для отображения данных необходимо подключить прибор к последовательному порту ЭВМ при помощи соединительного кабеля и установить необходимые настройки в утилите: номер последовательного порта ЭВМ, скорость передачи информации, количество стоповых битов, количество информационных битов.

«TRACE.MODE» – это программный комплекс, предназначенный для разработки, запуска в реальном времени распределенных автоматизированных систем управления технологическими процессами и решения ряда задач управления предприятием. [88]

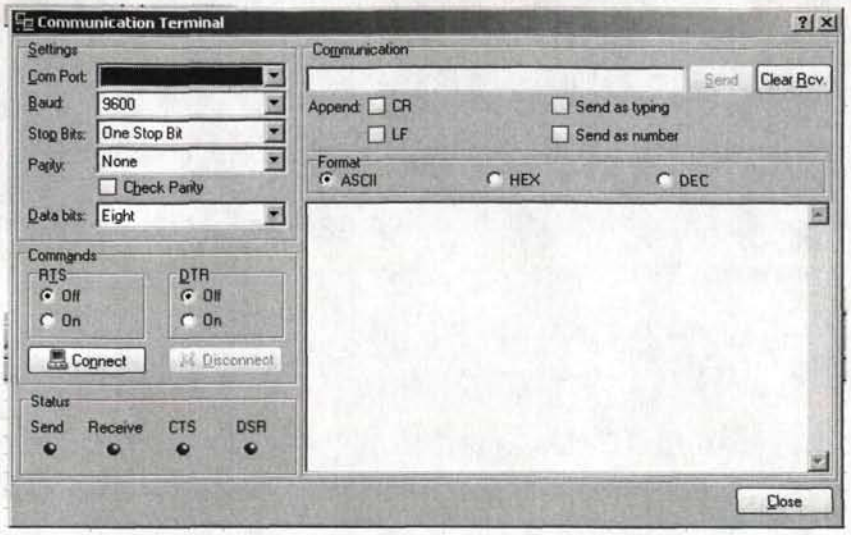

Рисунок 3.4 – Окно утилиты USART terminal

Комплекс состоит из трех частей:

- Интегрированная среда разработки проекта – единая программная оболочка, содержащая все необходимые средства для разработки проекта.

- Исполнительные модули (мониторы реального времени) – программные модули различного назначения, под управлением которых в реальном времени выполняются составные части проекта, размещаемые на отдельных компьютерах или в контроллерах.

- Драйверы обмена – драйверы, используемые мониторами «TRACE MODE» для взаимодействия с устройствами, протоколы обмена с которыми не встроены в мониторы.

Для отображения данных в «TRACE MODE» был создан проект, содержащий операторский интерфейс (мнемосхему), показанную на рисунке 3.5, и прикладную программу. На мнемосхеме отображается информация о значениях концентраций вещества в абсорбенте, а также о текущем значении степени насыщения абсорбента.

Прикладная программа содержит два входных канала аналогового ввода для подключения датчиков концентраций абсорбируемого вещества в абсорбенте до и после абсорбера, а также один входной канал цифрового ввода для получения сигнала текущего значения степени насыщения абсорбента из измерительной системы. Получаемые данные отображаются

на мнемосхеме, записываются в архив, а также по протоколу обмена DDE записываются в документ MS Excel.

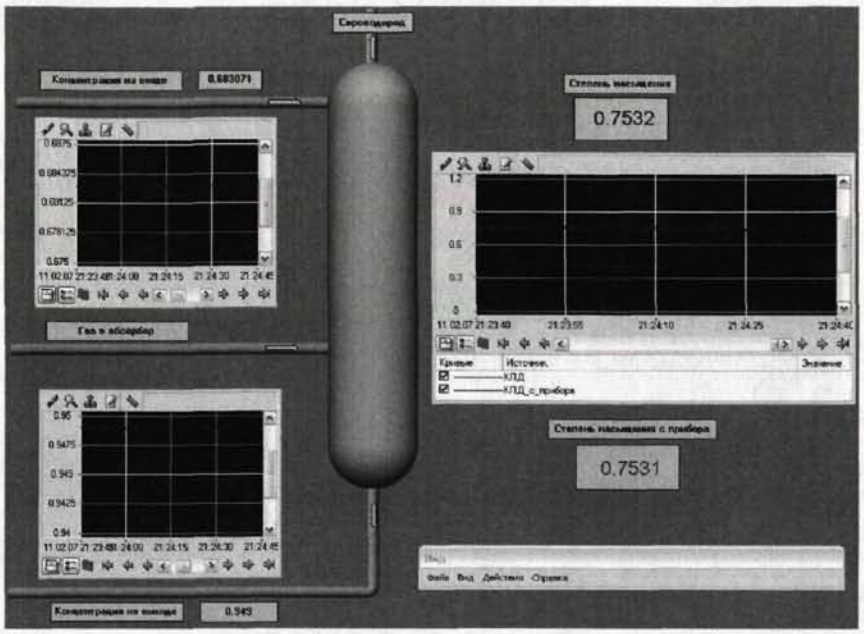

Рисунок 3.5 – Мнемосхема для отображения измерительной информации с прибора для измерения степени насыщения абсорбента

3.3 Выводы

Для определения текущего значения степени насыщения абсорбента была разработана программно-аппаратная измерительная система для управления процессом абсорбции, которая состоит из изменяемого полевого прибора [67] и пакета прикладных программ для обеспечения его функционирования (см. приложения 1 и 2).

Основу полевого изменяемого прибора [67] составляет микроконтроллер, осуществляющий косвенное измерение степени насыщения абсорбента на основе прямых измерений концентраций растворенного в абсорбенте вещества на входе и на выходе из абсорбера. Измеренное значение степени насыщения абсорбента передается в вышестоящую систему регулирования по цифровому интерфейсу RS-232 и по аналоговому интерфейсу 4-20 мА, а также вместе со служебной информацией (режим работы прибора, установленное значение равновесной

концентрации растворенного вещества в абсорбенте) отображается на дисплее прибора. Настройка прибора производится при помощи клавиатуры на его лицевой панели.

Пакет прикладных программ полевого изменяемого прибора позволяет отображать на экране ЭВМ изменение измерительной информации в реальном масштабе времени.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕНЯЕМОГО ПОЛЕВОГО ПРИБОРА

Проверка работоспособности системы для измерения степени насыщения абсорбента и проверка адекватности математических моделей метрологических характеристик измерительной системы, которые описаны в главе 2, проводились на специально созданной для этих целей экспериментальной установке (стенде).

Функциональная схема экспериментальной установки показана на рисунке 4.1.

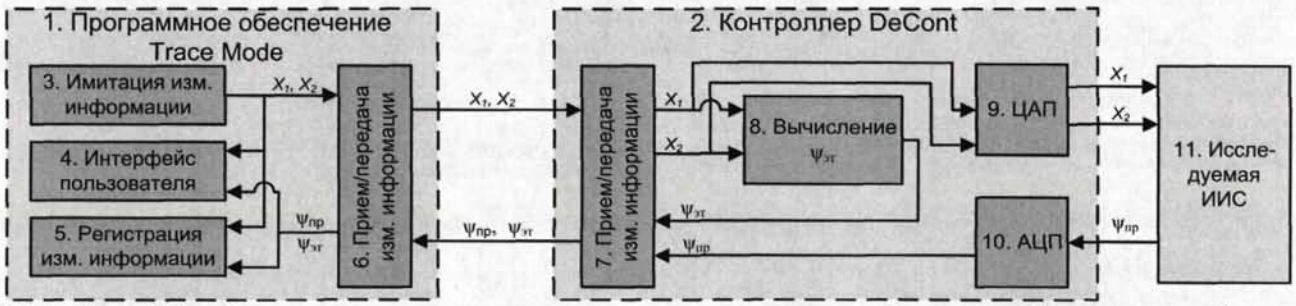

Рисунок 4.1 – Функциональная схема стенда для проверки работоспособности устройств систем контроля и управления

Экспериментальная установка является доработкой мобильного стенда для проверки программного обеспечения и оборудования многофункциональных систем контроля и управления [89] и содержит программный блок генерации сигналов 1 и связанный с ним программно-аппаратный блок обработки измерительной информации 2. Блок 1 представляет собой проект программного обеспечения стенда на основе интегрированной информационной системы для управления промышленным производством TRACE MODE [88] 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.

Блок эталонной обработки измерительной информации 2 реализован на базе промышленного контроллера DeCont [90, 91] 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 мобильного стенда подключается исследуемая измерительная система 11.

Стенд работает следующим образом. В блоке интерфейса пользователя 4, представляющем собой мнемосхему процесса измерения, задают статистические характеристики сигналов имитируемой измерительной информации (математическое ожидание, дисперсия сигнала, скорость изменения сигнала). В блоке 3 по методике из работы [17] моделируются сигналы с заданными характеристиками по соотношению:

$$x^*(n) = e^{-\alpha\Delta t} \cdot x^*(n-1) + \sqrt{D_v \cdot (1 - e^{-2\alpha\Delta t})} \cdot v^*(n), \qquad (4.1)$$

где $x^*(n)$ и $x^*(n\text{-}1)$ – соответственно текущее и предыдущее значения генерируемого сигнала; $v^*(n)$ – элемент последовательности независимых случайных чисел с равномерным законом распределения, Δt – период дискретизации генерируемых сигналов, α, D_v – параметры корреляционной функции генерируемого сигнала.

Случайная последовательность $x^*(n)$ является цифровой моделью центрированного сигнала. Чтобы получить случайный процесс с отличным от нуля математическим ожиданием, к рассчитываемым по алгоритму (4.1) значениям добавляется требуемое значение Mx:

$$X^*(n) = x^*(n) + Mx. \qquad (4.2)$$

Для получения равномерно распределенных величин используются программные генераторы случайных чисел. Для каждой имитируемой величины применяется отдельный генератор, что обусловлено необходимостью получения некоррелированных случайных процессов.

При формировании помех, представляющих собой стационарные случайные процессы с нулевым математическим ожиданием, используется выражение, аналогичное (4.1).

Имитируемая измерительная информация передается в блок интерфейса пользователя 4 для индикации, регистрируется в блоке 5 для последующей обработки и передается в блок приема-передачи измерительной информации 6. В блоке 2 сигналы принимаются блоком приема-передачи измерительной информации 7, и далее параллельно передаются в блок вычисления $\psi_{эт}$ 8, где производятся эталонные вычисления, а также в блок вывода измерительной информации 9, который преобразует их в аналоговые и дискретные сигналы на выходных каналах ЦАП. Измерительная информация поступает на входы исследуемой измерительной системы 11. Показания измерительной системы принимаются каналами блока ввода 10. Информация с выхода блока вычислений 8 и исследуемой измерительной системы 11 передается по протоколу OPC (OLE for Process Control) [83] через блоки приема-передачи 6 и 7 в блок 1, где регистрируется в блоке 5 и отображается на вторичном приборе (дисплей компьютера) посредством блока интерфейса пользователя 4.

На рисунке 4.2 показан стенд для проверки работоспособности устройств систем контроля и управления с подключенным изменяемым полевым прибором.

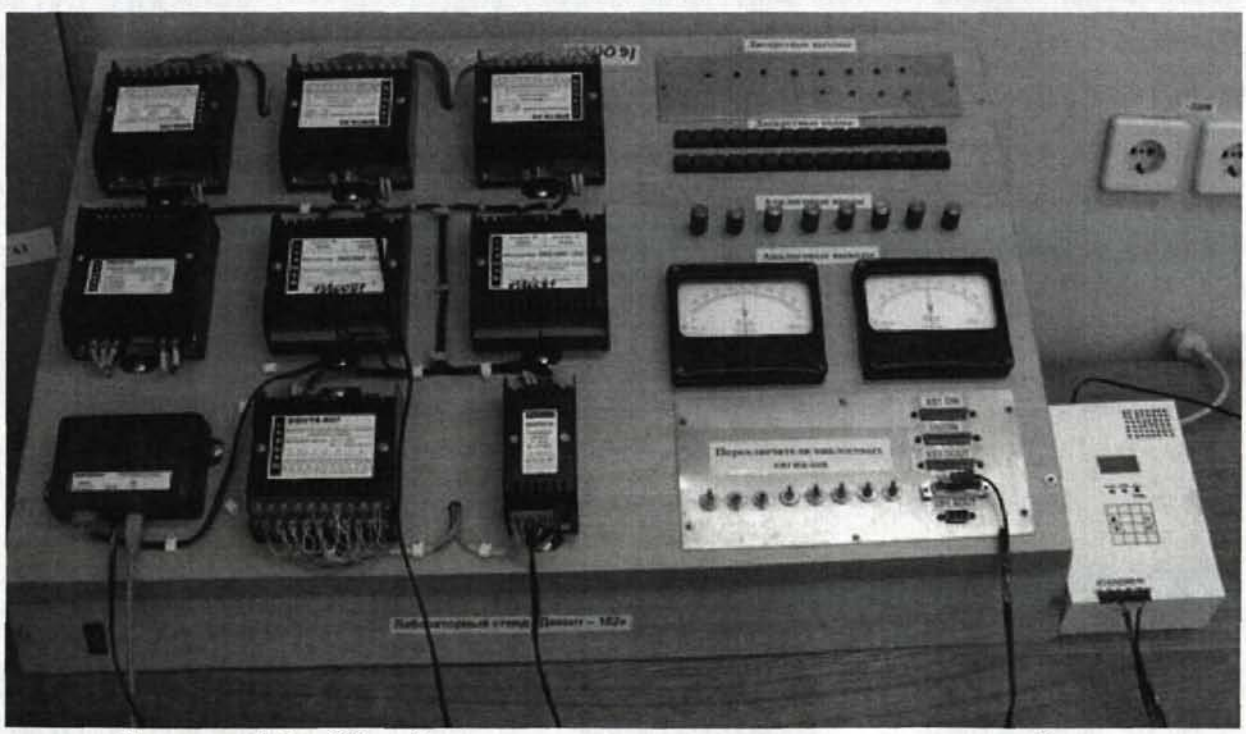

Рисунок 4.2 – Общий вид стенда с подключенным полевым прибором

Проверка адекватности математических моделей метрологических характеристик измерительной системы, которые описаны в главе 2, осуществлялась путем сопоставления результатов, получаемых расчетом по математическим моделям (2.89) и (2.90) с результатами, полученными на экспериментальной установке.

Вывод об адекватности математических моделей был сделан на основе сравнения значений математического ожидания и дисперсии случайной функции погрешности, рассчитанных по математической модели, с оценками, полученными расчетом по экспериментальным реализациям.

Проверка соответствия математического ожидания $M\Delta_\partial$, рассчитанного по математической модели, оценке $\hat{M}\Delta_\partial$, полученной по результатам эксперимента на опытной установке, осуществлялась с помощью критерия Стьюдента t.

Для этого вычислялось отношение [92]:

$$t = \frac{|\hat{M}\Delta_\partial - M\Delta_\partial|}{\sigma_{\Delta_\partial}}, \tag{4.3}$$

где $\hat{M}\Delta_\partial = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\Delta_{\partial_i}^{эксп}$ - оценка математического ожидания значений методической динамической погрешности по результатам эксперимента; $M\Delta_\partial = 0$ - теоретическое значение методической динамической составляющей погрешности измерительной системы; $\sigma_{\Delta_\partial} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)}\sum_{i=1}^{N}(\Delta_{\partial_i}^{эксп} - \hat{M}\Delta_\partial)^2}$ - среднеквадратическое отклонение оценки $\hat{m}_{\Delta_\partial}$ математического ожидания; N – количество отсчетов, составляющих случайную последовательность методической динамической погрешности.

Вычисленное значение t сравнивалось с табличным $t_{q,\nu}$ для распределения Стьюдента при уровне значимости риска q равном 0,05 и числе степеней свободы [57]:

$$\nu = N - 1. \tag{4.4}$$

Если $t < t_{q,\nu}$, то отличие оценки математического ожидания $\hat{M}\Delta_\partial$ от значения $M\Delta_\partial$ можно считать несущественным, а математическую модель адекватной по математическому ожиданию.

Проверка соответствия значения дисперсии $D\Delta_\partial$, рассчитанной по математической модели, оценке $\hat{D}\Delta_\partial$, полученной по результатам эксперимента на опытной установке, осуществлялась с помощью критерия Фишера F. Для этого вычислялось отношение:

$$F = \frac{\max[D\Delta_\partial, \hat{D}\Delta_\partial]}{\min[D\Delta_\partial, \hat{D}\Delta_\partial]}, \tag{4.5}$$

где $\max[D\Delta_\partial, \hat{D}\Delta_\partial]$, $\min[D\Delta_\partial, \hat{D}\Delta_\partial]$ - соответственно максимальная и минимальная из дисперсий.

Здесь оценка дисперсии вычислялась по выражению [93]:

$$\hat{D}\Delta_\partial = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\Delta_{\partial_i} - \hat{M}\Delta_\partial)^2. \tag{4.6}$$

Вычисленное значение F сравнивалось с табличным $F_{табл}$ при уровне значимости риска равном 0,05. Число степеней свободы для теоретического значения дисперсии динамической погрешности $D\Delta_\partial$ принималось равным количеству варьируемых коэффициентов в выражениях (2.89) и (2.90) [57] ($m = 13$ и $m = 15$ соответственно). Для оценки дисперсии $\hat{D}\Delta_\partial$, вычисленной по результатам эксперимента, число степеней свободы принималось равным:

$$\nu = N - m. \tag{4.7}$$

Если $F < F_{табл}$, то различие между дисперсиями $D\Delta_\partial$ и $\hat{D}\Delta_\partial$ можно считать несущественным, а математическую модель адекватной по дисперсии.

На рисунке 4.3 показана часть одной из экспериментальных реализаций показаний исследуемой измерительной системы и блока эталонных вычислений.

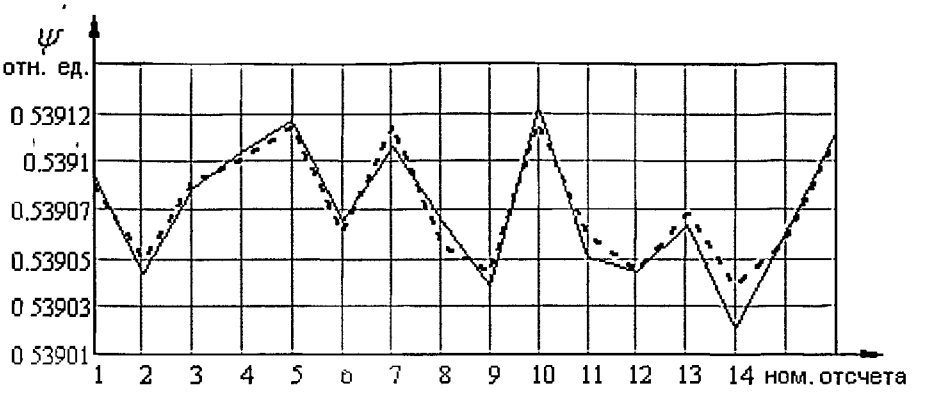

Рисунок 4.3 - Пример показаний систем в процессе проведения эксперимента
_ _ _ - показания блока эталонных вычислений;
_____- показания исследуемой измерительной системы.

Результаты обработки экспериментальных данных, полученных путем обработки 30 реализаций текущих значений степени насыщения, представлены в приложении 3. Анализ результатов обработки экспериментальных данных показывает, что значения математического ожидания и дисперсии, полученных расчетом по математическим моделям, мало отличаются от значений, полученных в результате эксперимента. Анализ проводился путем сравнения экспериментальных значений критериев Стьюдента и Фишера с табличными значениями этих же критериев ($t_{q,\nu}$, $F_{табл}$). Значение математического ожидания погрешности измерения, рассчитанное по математической модели, в таблице не приведено по причине равенства нулю для любых наборов настроечных параметров измерительной системы.

Таким образом, математические модели метрологических характеристик, полученные в главе 2 [см. выражения (2.89), (2.90)], адекватно описывают зависимость методической динамической составляющей погрешности измерения степени насыщения абсорбента от настроечных коэффициентов измерительной системы.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

В данной главе рассмотрено применение измерительной системы для определения степени насыщения абсорбента в системах управления конкретными технологическими процессами производства цианистого натрия и сероуглерода на ОАО «Волжский Оргсинтез». Рассмотрены переходные процессы в системах автоматического регулирования при использовании способа управления процессом абсорбции по степени насыщения абсорбента.

5.1 Система измерения в процессе производства цианистого натрия

Общая характеристика производства цианистого натрия. Производство цианистого натрия на ОАО «Волжский Оргсинтез» начато в 1987 г. Проектная мощность производства составляет 8925,8 т/год.

Метод производства - окислительный аммонолиз метана с последующей абсорбцией получаемого цианистого водорода раствором едкого натра. Технологический регламент производства устанавливает требования к физико-химическим свойствам раствора цианистого натрия (см. таблицу 5.1).

Таблица 5.1 – Физико-химические свойства цианистого натрия

Наименование показателя	Норма
Внешний вид	Бесцветная или с желтоватым оттенком жидкость
Массовая доля цианистого натрия, %,	25-35
Примеси (по отношению к 100 % цианистому натрию):	
Массовая доля свободного едкого натра, %	2-5
Массовая доля карбоната натрия, %, не более	6
Массовая доля формиата натрия, %, не более	2
Массовая доля хлоридов (в пересчете на ионы хлора), %, не более	0,03

Технологический процесс производства водного раствора цианистого натрия заключается в абсорбции цианистого водорода, получаемого каталитическим синтезом из метана, аммиака и кислорода воздуха, раствором едкого натра.

Технологический процесс производства водного раствора цианистого натрия состоит из следующих стадий:

1. Стадия подготовки и смешения сырья, в состав которой входят:
   - процесс разбавления едкого натра;
   - процесс очистки природного газа;
   - процесс приготовления топливного газа;
   - процесс испарения аммиака;
   - процесс подготовки воздуха;
   - процесс смешения газов.
2. Стадия катализа (получение цианистого водорода).
3. Стадия абсорбции (получение водного раствора цианистого натрия).
4. Стадия обработки отходов.

Процесс производства цианистого водорода основывается на реакции взаимодействия природного газа, аммиака и кислорода, проводится в газовой фазе на катализаторе, которым являются платино-родиевые сетки. Реакция поддерживается самостоятельно при температуре от 980 °С до 1150 °С.

Реакция образования цианистого водорода является эндотермической. Наряду с ней идут побочные реакции: неполного окисления метана, а также сжигания водорода, обеспечивающие теплоту, необходимую для поддержания основной реакции.

Фрагмент функциональной схемы стадии абсорбции-десорбции цианистого натрия показан на рисунке 5.1.

Получение раствора цианистого натрия осуществляется методом абсорбции цианистого водорода раствором едкого натра в абсорберах 3 и 4, представляющих собой вертикальные аппараты с трубным пучком внутри.

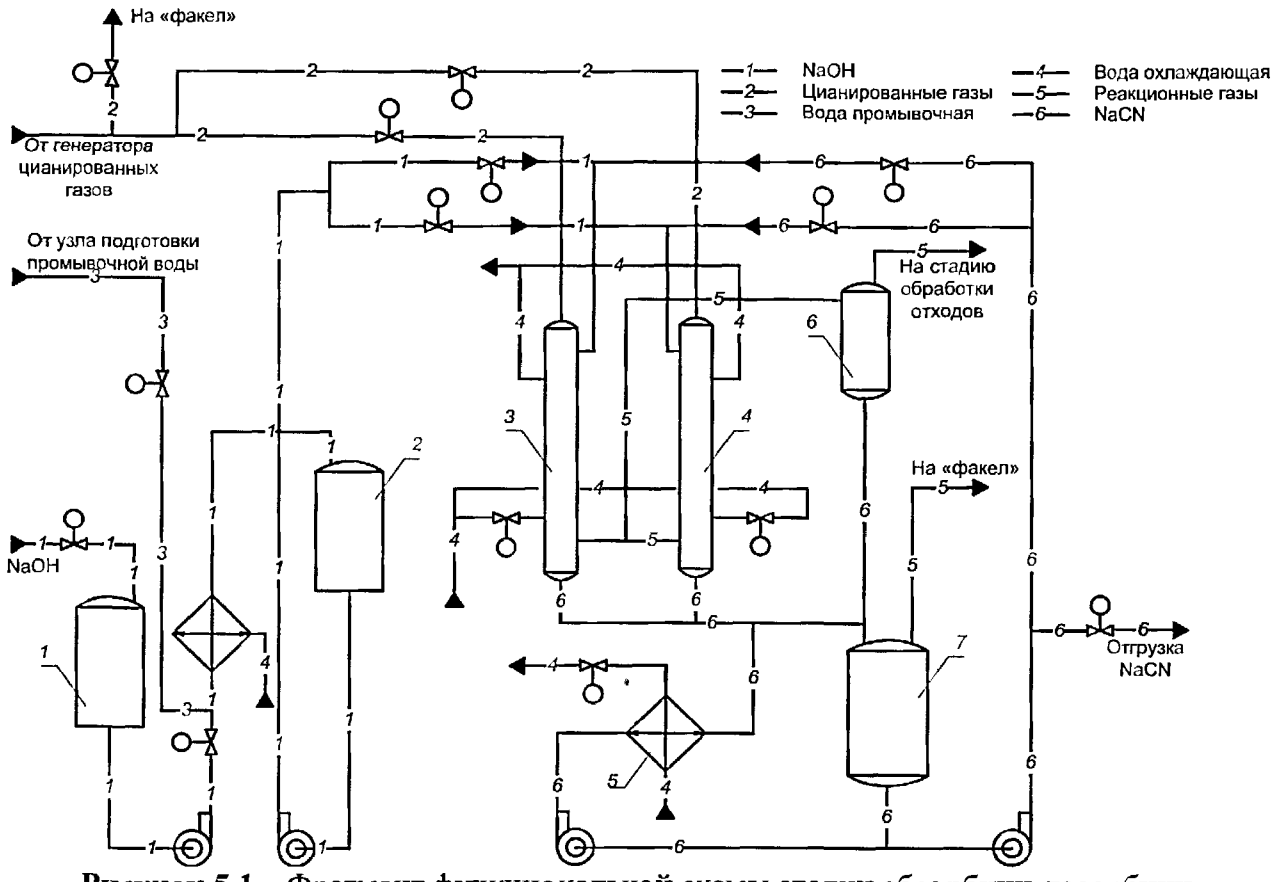

Рисунок 5.1 – Фрагмент функциональной схемы стадии абсорбции-десорбции цианистого натрия

Цианированные газы после стадии катализа, выходящие из генератора, распределяются в равных количествах на два потока и направляются в верхнюю часть абсорберов 3 и 4.

Раствор едкого натра, подаваемый из хранилища 1 и 2, распределяется на два потока и смешивается с раствором цианистого натрия, который подается из сборника охлажденного цианида 7, представляющего собой вертикальную цилиндрическую емкость.

В верхней части абсорберов 3 и 4 на каждой подводящей трубке установлены тефлоновые эжекторы, с помощью которых происходит эффективное смешение растворов едкого натра и цианистого натрия с цианированными газами. Далее реакционная смесь тонким слоем стекает по внутренней поверхности трубок абсорберов.

В результате реакции, протекающей в пленочном слое, происходит получение водного раствора цианистого натрия. Его раствор, выходящий из абсорберов 3 и 4, во избежание разложения цианистого натрия подвергается резкому охлаждению. Для этого через гидравлические затворы раствор поступает в циркуляционный контур, где смешивается с поступающим после холодильника 5 охлажденным раствором цианистого натрия. Холодильник 5 представляет собой горизонтальный спиральный теплообменник, охлаждаемый водой. Полученный охлажденный раствор цианистого натрия самотеком поступает в сборник 7.

На линиях выхода раствора цианистого натрия из абсорберов расположены пробоотборники для отбора раствора на анализ. Текущий показатель массовой доли свободного едкого натра в растворе цианистого натрия на выходе из абсорберов 3, 4 контролируется с помощью автоматических анализаторов.

Не абсорбировавшиеся газы из абсорберов 3 и 4 поступают в циклон 6, где происходит отделение жидкой фазы от газообразной, при этом жидкая фаза стекает в сборник 7, а остаточные газы направляются на стадию обработки отходов.

Система управления процессом получения цианистого натрия построена по трехуровневой схеме.

Согласно данным технологического регламента нижний уровень управления формируется на базе средств контрольно-измерительной техники и исполнительных механизмов отечественного и иностранного производства, а именно:

- преобразователей давления (класс точности 0,5);
- преобразователей разности давления (класс точности 0,5);
- уровнемеров буйковых (класс точности 1), герконовых (класс точности 3);
- клапанов регулирующих и отсечных;

- газоанализаторов для контроля довзрывных концентраций метана в воздухе, для контроля содержания вредных веществ в воздухе;

- расходомеров индукционных (класс точности 0,5), массовых (класс точности 0,2);

- ротаметров (класс точности 1);

- сигнализаторов уровня поплавковых, вибрационных;

- преобразователей термоэлектрических (класс точности 2);

- вспомогательного оборудования (преобразователей, барьеров искробезопасности, фильтр–редукторов, реле протока, реле расхода, радиоизотопных реле уровня).

Средний и верхний уровень управления сформирован на основе автоматической системы управления CS3000 «Yokogawa», на мониторы которой выведено графическое изображение технологической схемы (мнемосхемы) с отображением значений контролируемых параметров, сигнализации по минимальным и максимальным значениям параметров, сигнализации о срабатывании клапанов с возможностью управления клапанами дистанционно и в автоматическом режиме.

Значение допускаемой относительной погрешности аналогового входа контроля технологических параметров ПТК CS3000 составляет ± 0,02 %.

Акт внедрения алгоритма регулирования степени насыщения абсорбента на установке получения цианистого натрия приведен в приложении 4.

Определение значений настроечных коэффициентов системы измерения степени насыщения абсорбента в процессе производства цианистого натрия.

Определим значения параметров настройки системы для измерения степени насыщения абсорбента при производстве цианистого натрия.

1. Определяем статическую погрешность измерения степени насыщения абсорбента согласно [94].

При косвенном измерении степени насыщения абсорбента требуется два измерительных канала для определения значений концентраций цианистого натрия в растворе едкого натра на входе и на выходе из абсорбера. В составе измерительных каналов предполагается использовать:

- первичный преобразователь (датчик): кориолисовый расходомер с функцией измерения плотности и концентрации OPTIMASS 1000 типоразмера S15 производства фирмы «KROHNE» [95];

- вторичный (нормирующий) преобразователь: MFC 300 производства фирмы «KROHNE» [96];

- аналоговый вход ПТК CS 3000.

Согласно данным фирмы «KROHNE» погрешности нормируются для комплекта «датчик и вторичный преобразователь». Для расчета погрешности измерения концентрации производитель рекомендует использовать следующее выражение [97]:

$$\Delta X = \pm \frac{X_{\max} - X_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_{\min}} \cdot \Delta\rho, \qquad (5.1)$$

где ΔX - абсолютная погрешность измерения концентрации раствора; $X_{\max}$ и $X_{\min}$ - максимальное и минимальное возможные значения концентраций раствора; $\rho_{\max}$ и $\rho_{\min}$ - соответствующие концентрациям значения плотности раствора; $\Delta\rho$ - абсолютная погрешность измерения плотности раствора.

Значение абсолютной допускаемой погрешности измерения плотности раствора прибором OPTIMASS 1000 в комплекте с преобразователем MFC 300 составляет ± 2 кг/м^3. Дополнительная погрешность от изменения температуры окружающей среды составляет 0,0075 % от основной погрешности измерения плотности при отклонении температуры на 1 °С. Номинальное значение температуры окружающей среды составляет 20 °С, рабочий диапазон составляет от 0 до 40 °С. При этом максимальное значение дополнительной погрешности составляет 0,003 кг/м^3, поэтому в дальнейших расчетах данной составляющей погрешности пренебрегаем.

Постоянная времени датчика, согласно данным производителя, может быть установлена от 0,5 до 20 с.

Номинальные значения влияющих величин и условия эксплуатации прибора приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Значения влияющих величин при производстве цианистого натрия

Величина	Характеристика	Ед. изм.	Значение
Расход измеряемой среды	Номинальный	кг/ч	4800
	На входе в абсорбер	кг/ч	1557
	На выходе из абсорбера	кг/ч	1878
Давление измеряемой среды	Номинальное	МПа	0,1
	На входе в абсорбер	МПа	0,035
	На выходе из абсорбера	МПа	0,035
Температура измеряемой среды	Номинальная	°С	от 20 до130
	На входе в абсорбер	°С	70
	На выходе из абсорбера	°С	70
Плотность измеряемой среды	Диапазон измерения	кг/м^3	от 400 до 2500
	Диапазон изменения	кг/м^3	от 1102 до 1194

Все компоненты ПТК располагаются в кондиционируемых помещениях, т.е. находятся в нормальных условиях:

- температура окружающего воздуха: 20±5 °С;
- относительная влажность воздуха: 60±20 %;
- атмосферное давление: 101±10 кПа.

По данным технологического регламента максимальное и минимальное значения концентрации цианистого натрия в растворе составляют X_{max} = 35,0 %масс, X_{min} = 20,0 %масс. Указанным значениям концентраций соответствует плотность растворов: ρ_{max} = 1194 кг/м^3; ρ_{min} = 1102 кг/м^3. Тогда по выражению (5.1) получаем предел абсолютной статической погрешности измерения концентрации растворенного в абсорбенте цианистого натрия $\Delta X = \pm 0{,}33$ %масс.

Анализ архивов значений концентраций цианистого натрия в растворе (см. раздел 2.1) показывает, что в номинальном режиме работы установки значения концентраций на входе и на выходе из абсорбера составляют соответственно: Mx_1 = 23,5 %масс; Mx_2 = 27,6 %масс. Значение равновесной концентрации цианистого натрия в растворе едкого натра равно X^* = 35,0 %масс.

Значение предельной относительной погрешности измерения концентрации цианистого натрия в абсорбенте на входе в абсорбер:

$$\delta_{X_1} = \frac{\Delta X}{Mx_1} = \pm\frac{0{,}33}{23{,}5}\cdot 100\% = \pm 1{,}39\,\%. \qquad (5.2)$$

Среднее квадратическое отклонение погрешности измерения концентрации цианистого натрия в абсорбенте на входе в абсорбер:

$$\sigma\left[\delta_{X_1}\right] = \frac{\delta_{X_1}}{\sqrt{3}} = \frac{0{,}0139}{\sqrt{3}} = 8{,}0\cdot 10^{-3}. \qquad (5.3)$$

Согласно паспорту на ПТК АСУ ТП предел допускаемой относительной погрешности аналогового входа для измерения параметров:

$$\delta_{ИИК} = \pm 0{,}02\ \%. \qquad (5.4)$$

Среднее квадратическое отклонение погрешности аналогового входа для измерения параметров:

$$\sigma\left[\delta_{ИИК}\right] = \frac{\delta_{ИИК}}{\sqrt{3}} = \frac{2\cdot 10^{-4}}{\sqrt{3}} = 1{,}15\cdot 10^{-4}. \qquad (5.5)$$

Среднее квадратическое отклонение случайной статической погрешности каналов измерения концентрации цианистого натрия в абсорбенте на входе в абсорбер:

$$\sigma\left[\delta_1\right] = \sqrt{\sigma^2\left[\delta_{X_1}\right] + \sigma^2\left[\delta_{ИИК}\right]} = 8{,}16\cdot 10^{-3}. \qquad (5.6)$$

Доверительный интервал относительной погрешности измерения концентрации цианистого натрия в абсорбенте на входе в абсорбер при доверительной вероятности P = 0,95 и нормальном законе распределения погрешности:

$$\delta_1 = 1{,}96 \cdot \sigma[\delta_1] \cdot 100\% = \pm 1{,}6\ \%. \qquad (5.7)$$

Аналогично получаем доверительный интервал относительной погрешности измерения концентрации цианистого натрия в абсорбенте на выходе из абсорбера:

$$\delta_2 = \pm 1{,}4\ \%. \qquad (5.8)$$

Находим абсолютную статическую погрешность измерения степени насыщения абсорбента.

Значения производных уравнения измерения в рабочей точке:

$$\frac{\partial \psi}{\partial X_1} = \frac{Mx_2 - X^*}{(Mx_1 - X^*)^2} = -5{,}6\,; \ \frac{\partial \psi}{\partial X_2} = \frac{1}{X^* - Mx_1} = 8{,}7\,. \qquad (5.9)$$

В рассматриваемой системе в процессе измерения производится учет и компенсация динамических свойств объекта измерения. Наличие в составе измерительных каналов системы динамических компенсаторов позволяет сделать предположение о коррелированности погрешностей измерения концентрации цианистого натрия в абсорбенте на входе и на выходе из абсорбера. В таком случае расчет предельных значений абсолютной статической погрешности измерения степени насыщения ведем по выражению:

$$\Delta_{cm} = \frac{\partial \psi}{\partial X_1} \cdot Mx_1 \cdot \delta_1 + \frac{\partial \psi}{\partial X_2} \cdot Mx_2 \cdot \delta_2 = \pm 1{,}1\ \%. \qquad (5.10)$$

Предел относительной статической погрешности измерения степени насыщения составляет:

$$\delta_{cm} = \frac{\Delta_{cm}}{\psi} \cdot 100\,\% = \pm \frac{1{,}1}{36{,}0} \cdot 100\,\% = \pm 3{,}2\ \%. \qquad (5.11)$$

2. Определяем статистические характеристики измерительной информации (см. раздел 2.1).

3. При определении характера зависимости методической динамической погрешности от параметров настройки измерительной системы удобно рассматривать не абсолютное, а нормированное значение методической динамической погрешности μ:

$$\mu = \frac{\sqrt{D\Delta_{\partial}}}{\sigma[\Delta_{\text{ст}}]} \cdot 100\%, \qquad (5.12)$$

где $D\Delta_{\partial}$ - дисперсия методической динамической погрешности измерения степени насыщения абсорбента; $\sigma[\Delta_{\text{ст}}]$ – среднеквадратическое отклонение статической погрешности измерения степени насыщения абсорбента.

Используя выражение (5.12), где $D\Delta_{\partial}$ определяем по (2.90), строим график зависимости динамической погрешности от периода опроса датчиков (см. рисунок 5.2). В качестве верхней оценки значения периода опроса датчиков можно принять $Ts^{гр}$ = 4 с, т.к. дальнейшее уменьшение Ts не приводит к существенному снижению динамической погрешности.

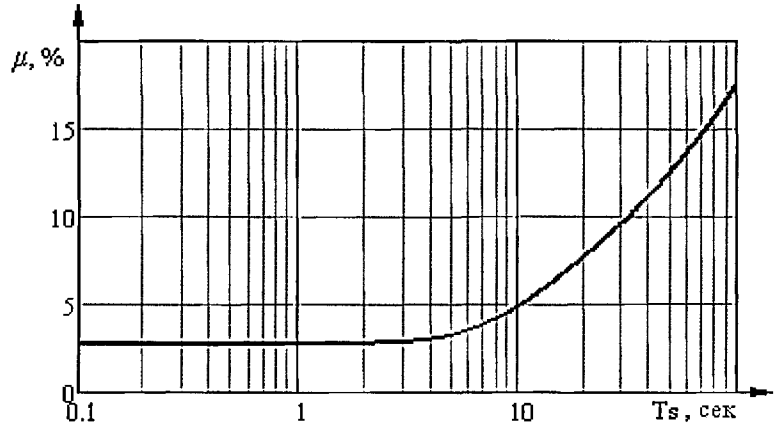

Рисунок 5.2 – Зависимость нормированной динамической погрешности от периода опроса датчиков

4. Строим графики зависимости динамической погрешности от постоянных времени цифровых фильтров (см. рисунок 5.3). Значение постоянной времени фильтра в канале измерения концентрации вещества на входе в абсорбер целесообразно выбрать равным Tf_1 = 600 с. Значение постоянной времени фильтра в канале измерения концентрации вещества на выходе из абсорбера целесообразно выбрать равным Tf_2 = 10 с.

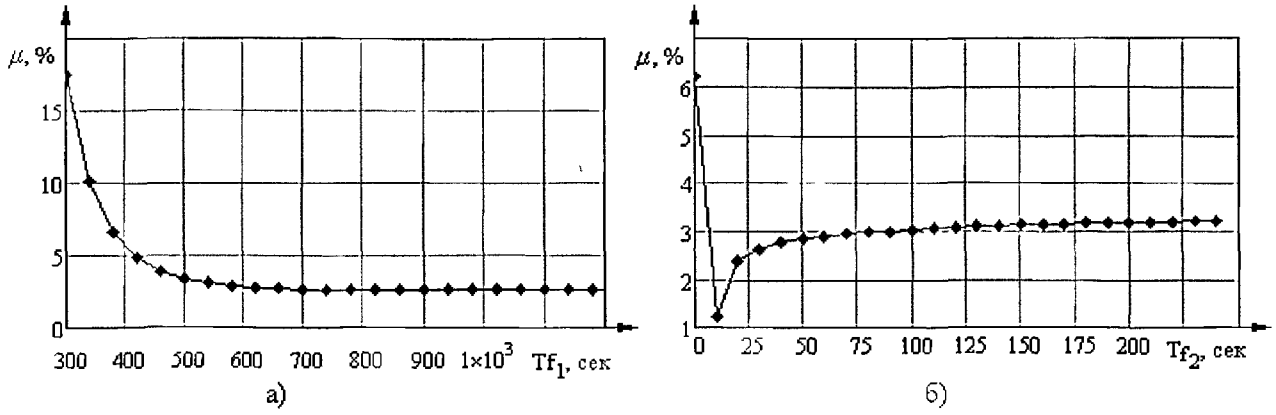

Рисунок 5.3 – Зависимость нормированной динамической погрешности от постоянной времени фильтра
а) в канале измерения концентрации вещества на входе в абсорбер;
б) в канале измерения концентрации вещества на выходе из абсорбера.

5. Строим графики зависимости динамической погрешности от постоянных времени датчиков в каналах измерения концентрации цианистого натрия на входе и на выходе из абсорбера (см. рисунок 5.4). Значениями постоянных времени датчиков выбираем равными: Tp_1 = 10 с, Tp_2 = 15 с.

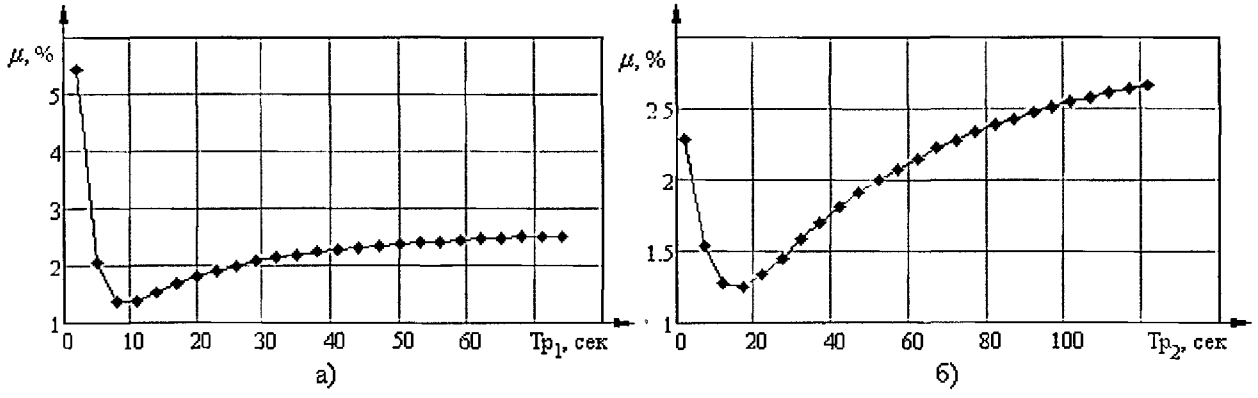

Рисунок 5.4 – Зависимость нормированной динамической погрешности от постоянной времени датчика
а) в канале измерения концентрации вещества на входе в абсорбер;
б) в канале измерения концентрации вещества на выходе из абсорбера.

6. Использование выражения (2.90) для определения методической динамической погрешности при существующих параметрах настройки компонентов измерительных АСУ ТП (Ts = 1 с, Tf_1 = 300 с, Tf_2 = 300 с, Tp_1 = 0,5 с, Tp_2 = 0,5 с) позволяет получить значение доверительного интервала относительной методической динамической погрешности при

P = 0,95: $\delta_д$ = ± 0,96 %, что составляет 30 % от статической погрешности измерения степени насыщения абсорбента.

При увеличении периода опроса датчиков до Ts = 4 с и выборе значений настроечных параметров измерительной системы с использованием (2.90) (Tf_1 = 600 с, Tf_2 = 10 с, Tp_1 = 10 с, Tp_2 = 15 с) доверительный интервал методической динамической погрешности может быть уменьшен до $\delta_д$ = ± 0,03 %.

Таким образом, определение значений настроечных коэффициентов измерительной системы по предложенным математическим моделям позволяет снизить в 30 раз значение методической динамической погрешности измерения степени насыщения абсорбента, а также позволяет в 4 раза увеличить период опроса датчиков, что существенно уменьшает затраты процессорного времени управляющего контроллера.

5.2 Система измерения в процессе производства сероуглерода

Общая характеристика производства сероуглерода. Производство сероуглерода на ОАО «Волжский Оргсинтез» начато в марте 1970 года. Проектная мощность производства составляет 60000 т/год.

Производство сероуглерода состоит их трех технологических потоков синтеза и единого для всех систем потока конденсации, абсорбции, дистилляции сероуглерода и рекуперации серы из сероводорода.

Метод производства: парофазный синтез сероуглерода из природного газа (метана) и серы при температуре 650-680 °С на катализаторе – активированный глинозем (боксит).

Сероуглерод синтетический технический выпускается согласно [98] и по физико-химическим показателям должен соответствовать нормам и требованиям, указанным в таблице 5.3.

Сероуглерод применяется для получения искусственных волокон, четыреххлористого углерода, ускорителей вулканизации, фотореагентов и ядохимикатов для сельского хозяйства.

Таблица 5.3 - Физико-химические показатели сероуглерода

Наименование показателя	Норма
Внешний вид	Прозрачная бесцветная жидкость
Массовая доля нелетучего остатка, %, не более	0,002
Реакция	Нейтральная
Содержание сероводорода	Отсутствие
Цветность в единицах Хазена, не более	20
Плотность при 20 °С, г/см^3	1,26
Показатель преломления N_D^{20}	1,627-1,629

В начале технологического процесса производства сероуглерода расплавленная сера и природный газ (метан) поступают в змеевик печи синтеза, где происходит их подогрев, испарение жидкой серы и диссоциация ее молекул. Уже в змеевике печи начинается частичное взаимодействие паров серы и метана, окончательно реакция проходит в реакторе с катализатором.

Образовавшиеся на стадии синтеза реакционные газы, в основном содержащие серу, сероуглерод, сероводород и непрореагировавший метан, направляются на следующие стадии процесса. На стадии конденсации происходит охлаждение реакционных газов, выделение из них серы и возврат ее на синтез (рецикл). На стадии абсорбции-десорбции сероуглерода происходит дальнейшее разделение реакционной смеси на сероводород (направляемый потребителям и на стадию рекуперации серы) и сероуглерод.

Абсорбция сероуглерода. Фрагмент функциональной схемы стадии абсорбции сероуглерода показан на рисунке 5.5.

Выделенный на стадии конденсации жидкий сероуглерод и несконденсированные газы синтеза поступают в конденсатор, представляющий собой горизонтальный аппарат трубчатого типа, охлаждаемый оборотной водой. Сконденсированный в конденсаторе сероуглерод самотеком поступает в сборник сероуглерода-сырца, который представляет собой горизонтальный цилиндрический аппарат, где

происходит накапливание сконденсированного сероуглерода и разделение технологических продуктов на газовую, водную и органические фазы.

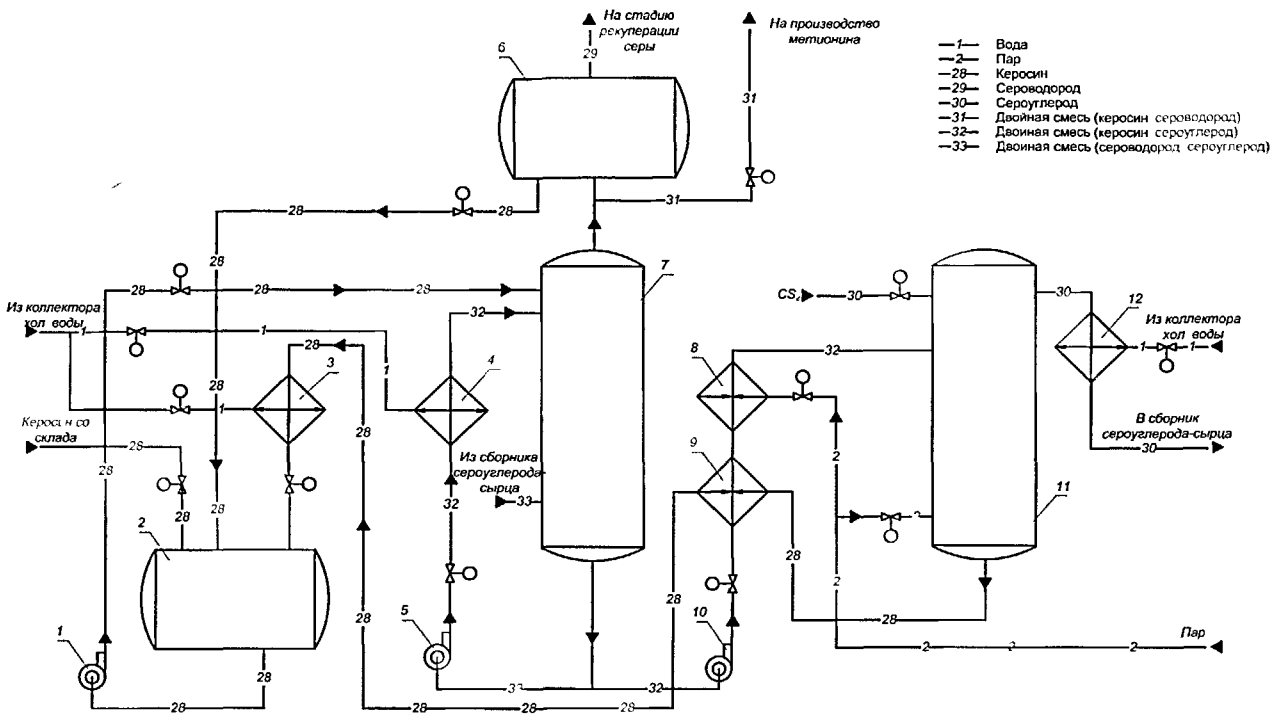

Рисунок 5.5 – Фрагмент функциональной схемы стадии абсорбции сероуглерода

Несконденсированные газы, состоящие из паров сероуглерода, сероводорода и небольшого количества метана из сборника и из конденсатора по трубопроводу поступают в абсорбционную колонну 7, в которой происходит поглощение сероуглерода из газовой фазы абсорбентом. В качестве абсорбента используется керосин.

Абсорбционная колонна 7 представляет собой цилиндрический вертикальный аппарат с 28-ю тарелками и отбойной сеткой в головной части колонны. Несконденсированные газы подаются в нижнюю часть колонны, абсорбент для поглощения сероуглерода стекает сверху колонны.

Абсорбент на орошение колонны 7 подается насосом 1 из сборника жидких нефтепродуктов 2.

Процесс абсорбции является экзотермическим, поэтому часть абсорбента на уровне девятой тарелки выводится из колонны 7 и насосом 5 направляется в промежуточный холодильник 4. Там абсорбент охлаждается

до температуры не более 40 °С и опять возвращается в колонну на уровне восьмой тарелки.

Охлаждение абсорбента в промежуточном холодильнике 4 производится оборотной водой, подаваемой в трубки. Абсорбент подается в межтрубное пространство. Количество абсорбента, подаваемого на охлаждение, регулируется автоматически и составляет не более 10000 кг/ч.

Обогащенный сероуглеродом абсорбент собирается в кубе абсорбционной колонны 7 и постоянно откачивается насосом 10 через теплообменники 8 и 9 в десорбционную колонну 11, откуда через холодильник 12 направляется в сборник сероуглерода-сырца.

Освобожденные от сероуглерода технологические газы, выходящие из головной части абсорбционной колонны 7, с температурой не более 40 °С поступают в брызгоотделитель 6, представляющий собой вертикальный цилиндрический аппарат с отбойным слоем в верхней части. Газы синтеза в брызгоотделитель поступают через специальный штуцер, распложенный в средней части аппарата под каплеотбойной решеткой. Отбойный слой способствует отделению из реакционных газов остатков абсорбента, который собирается в нижней части брызгоотделителя.

Система управления процессом получения сероуглерода построена по современной трехуровневой схеме. Нижний уровень системы основан на базе технических средств, аналогичных применяемым при производстве цианистого натрия (см. раздел 5.1).

Средний и верхний уровни АСУ ТП построены на базе технических средств micro TDC 3000 фирмы «Honeywell» и являются объединением аппаратной части, представленной промышленными контроллерами, а также программного обеспечения, реализующего человеко-машинный интерфейс. Это позволяет в полной мере реализовать технические требования на указанную систему управления, предоставить технологическому персоналу эффективный доступ к любому элементу технологического процесса, обеспечить необходимые вычислительные мощности в создаваемой системе

управления, обеспечить требуемую глубину архивации технологических данных, формировать необходимый объём оперативной технологической документации.

Система micro TDC 3000 измеряет и управляет двумя видами каналов (сигналов):

- Аналоговый канал:
  - Аналоговый вход;
  - Аналоговый выход;
  - Миливольтовый вход. Этот вход может использоваться как для термоэлектрических преобразователей, так и для термопреобразователей сопротивления.
- Дискретный канал.

По данным технологического регламента, предел допускаемой основной приведённой погрешности измерительных каналов системы micro TDC 3000 составляет ± 0,05 % для аналоговых входов и выходов.

Определение значений настроечных коэффициентов системы измерения степени насыщения абсорбента в процессе абсорбции сероуглерода.

Производим поиск значений параметров системы для измерения степени насыщения абсорбента при производстве сероуглерода.

1. Определяем статическую погрешность измерения степени насыщения абсорбента согласно [94].

При косвенном измерении степени насыщения абсорбента требуется два измерительных канала для определения значений концентраций сероуглерода в абсорбенте на входе и на выходе из абсорбера. В составе измерительных каналов предполагается использовать:

- первичный преобразователь (датчик): кориолисовый расходомер с функцией измерения концентрации OPTIMASS 1000 типоразмера S25 производства фирмы «KROHNE»;

- вторичный (нормирующий) преобразователь: MFC 300 производства фирмы «KROHNE»;

- аналоговый вход УСО программно-технического комплекса.

Номинальные значения влияющих величин и условия эксплуатации прибора приведены в таблице 5.4.

Все компоненты ПТК располагаются в кондиционируемых помещениях, т.е. находятся в нормальных условиях:

- температура окружающего воздуха: 20 ± 5 °С;

- относительная влажность воздуха: 60 ± 20 %;

- атмосферное давление: 101 ± 10 кПа.

Таблица 5.4 – Значения влияющих величин при производстве сероуглерода

Величина	Характеристика	Ед. изм.	Значение
Расход измеряемой среды	Номинальный	кг/ч	20000
	На входе в абсорбер	кг/ч	17000
Давление измеряемой среды	Номинальное	МПа	0,1
	На входе в абсорбер	МПа	0,25
Температура измеряемой среды	Номинальная	^{0}С	от 20 до130
	На входе в абсорбер	^{0}С	40
Плотность измеряемой среды	Диапазон измерения	кг/м^3	от 400 до 2500
	Диапазон изменения	кг/м^3	от 812 до 863

Предел абсолютной статической погрешности измерения концентрации растворенного в абсорбенте сероуглерода, рассчитанный по (5.1), составляет $\Delta X = \pm 0{,}6$ %масс, при этом, согласно данным технологического регламента, составляющие (5.1) равны: ρ_{max} = 863 кг/м^3; ρ_{min} = 803 кг/м^3; X_{max} = 20,0 %масс; X_{min} = 1,0 %масс.

В рабочей точке значения концентраций абсорбента составляют: Mx_1 = 1,1 %масс; Mx_2 = 18,0 %масс; X^* = 20,0 %масс.

Аналогично расчету для цианистого натрия (см. раздел 5.1), получаем предел абсолютной статической погрешности измерения степени насыщения при производстве сероуглерода:

$$\Delta_{cm} = \frac{\partial \psi}{\partial X_1} \cdot Mx_1 \cdot \delta_1 + \frac{\partial \psi}{\partial X_2} \cdot Mx_2 \cdot \delta_2 = \pm 3{,}4\ \%. \qquad (5.13)$$

Относительная статическая погрешность измерения степени насыщения:

$$\delta_{cm} = \frac{\Delta_{cm}}{\psi} \cdot 100\,\% = \pm \frac{3{,}4}{90{,}0} \cdot 100\,\% = \pm 3{,}8\ \%. \qquad (5.14)$$

2. Определяем статистические характеристики измерительной информации (см. раздел 2.1).

3. Используя выражение (5.12), где $D\Delta_\partial$ определяем по (2.89), строим график зависимости динамической погрешности от периода опроса датчиков (см. рисунок 5.6). В качестве верхней оценки значения периода опроса датчиков целесообразно принять $Ts^{гр}$ = 2 с, т.к. дальнейшее уменьшение Ts не приводит к существенному снижению динамической погрешности.

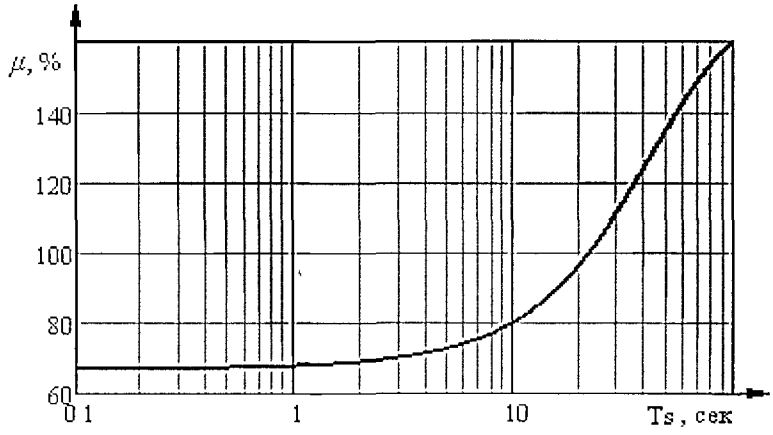

Рисунок 5.6 – Зависимость нормированной динамической погрешности от периода опроса датчиков

4. Строим графики зависимости динамической погрешности от постоянных времени цифровых фильтров (см. рисунок 5.7). Значение постоянной времени фильтра в канале измерения концентрации вещества на входе в абсорбер целесообразно выбрать равным Tf_1 = 700 с. Значение

постоянной времени фильтра в канале измерения концентрации вещества на выходе из абсорбера целесообразно выбрать равным $Tf_2 = 60$ с.

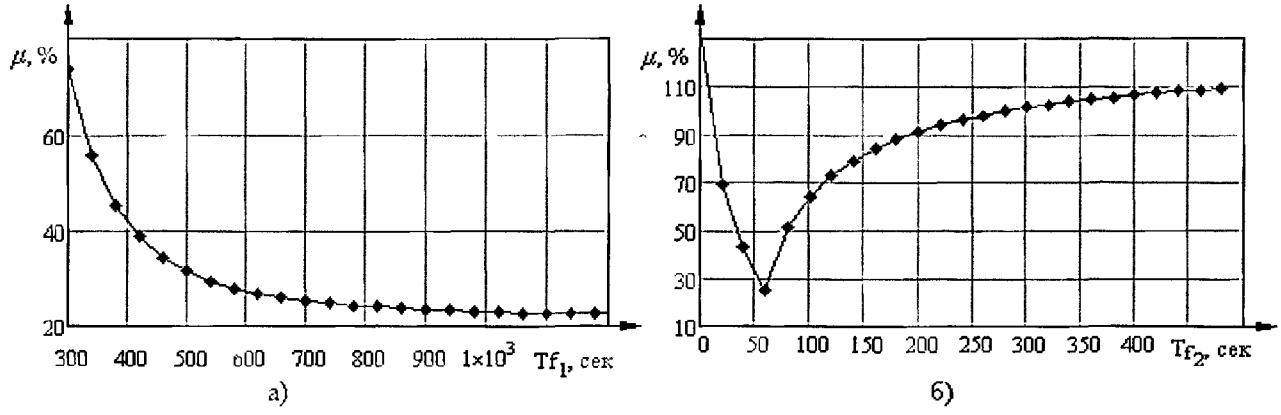

Рисунок 5.7 – Зависимость нормированной динамической погрешности от постоянной времени фильтра

а) в канале измерения концентрации вещества на входе в абсорбер;

б) в канале измерения концентрации вещества на выходе из абсорбера.

5. Строим графики зависимости динамической погрешности от постоянных времени датчиков в каналах измерения концентрации цианистого натрия на входе и на выходе из абсорбера (см. рисунок 5.8). Значения постоянных времени датчиков принимаем равными: Tp_1 = 0,5 с, $Tp_2 = 20$ с.

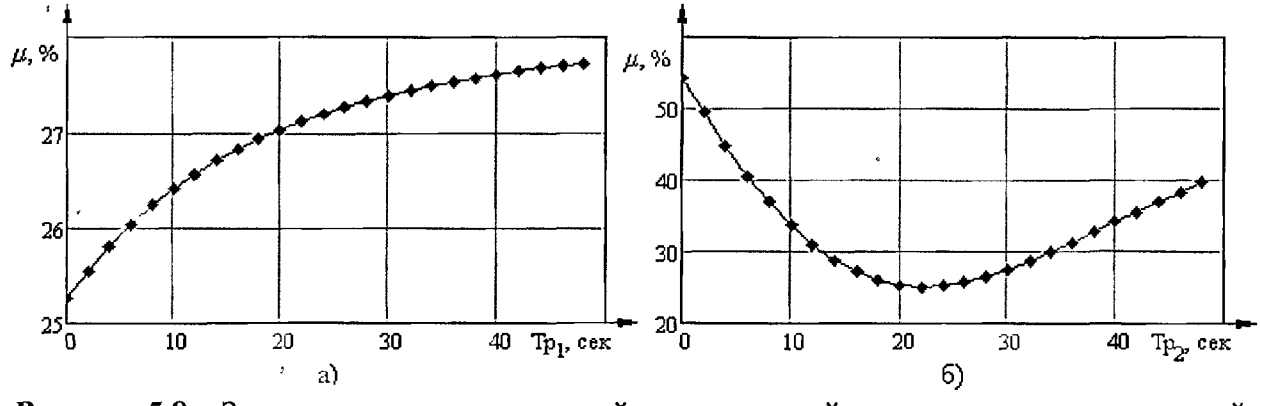

Рисунок 5.8 – Зависимость нормированной динамической погрешности от постоянной времени датчика

а) в канале измерения концентрации вещества на входе в абсорбер;

б) в канале измерения концентрации вещества на выходе из абсорбера.

6. Использование выражения (2.89) для определения методической динамической погрешности при существующих параметрах настройки

компонентов измерительных каналов АСУ ТП при производстве сероуглерода (Ts = 1 с, Tf_1 = 240 с, Tf_2 = 240 с, Tp_1 = 0,5 с, Tp_2 = 0,5 с) позволяет получить значение доверительного интервала относительной методической динамической погрешности при P = 0,95: δ_∂ = ± 6,5 %, что составляет 170 % от статической погрешности измерения степени насыщения абсорбента. В таком случае предел суммарной абсолютной погрешности измерения степени насыщения абсорбента составляет $\Delta = \pm 1{,}96\sqrt{\sigma[\Delta_{ст}]^2 + \sigma[\Delta_\partial]^2} = \pm 6{,}8$ %. Предел относительной погрешности измерения степени насыщения абсорбента составляет δ = ± 7,6 %.

При выбранных с помощью математической модели динамической погрешности (2.89) значениях настроечных параметров измерительной системы (Ts = 2 с, Tf_1 = 700 с, Tf_2 = 60 с, Tp_1 = 0,5 с, Tp_2 = 20 с) доверительный интервал относительной динамической погрешности может быть уменьшен до δ_∂ = ± 1,0 %, что составляет 25 % от статической погрешности измерения степени насыщения абсорбента для процесса производства сероуглерода.

В таком случае предел суммарной абсолютной погрешности измерения степени насыщения абсорбента составит Δ = ± 3,5 %, а предел относительной погрешности δ = ± 4,0 %, что в 1,9 раза меньше погрешности при существующих параметрах настройки измерительной системы.

Таким образом, при неоптимальных значениях настроечных коэффициентов измерительной системы значение методической динамической погрешности может существенно превышать статическую погрешность. Применение предлагаемой методики снижения динамической погрешности позволяет практически в два раза уменьшить итоговую погрешность измерения степени насыщения абсорбента. Снижение погрешности приводит к повышению точности регулирования, а, следовательно, к уменьшению перерасхода абсорбента.

На рисунке 5.9 показан переходный процесс в системе управления абсорбером с учетом погрешности измерения степени насыщения абсорбента.

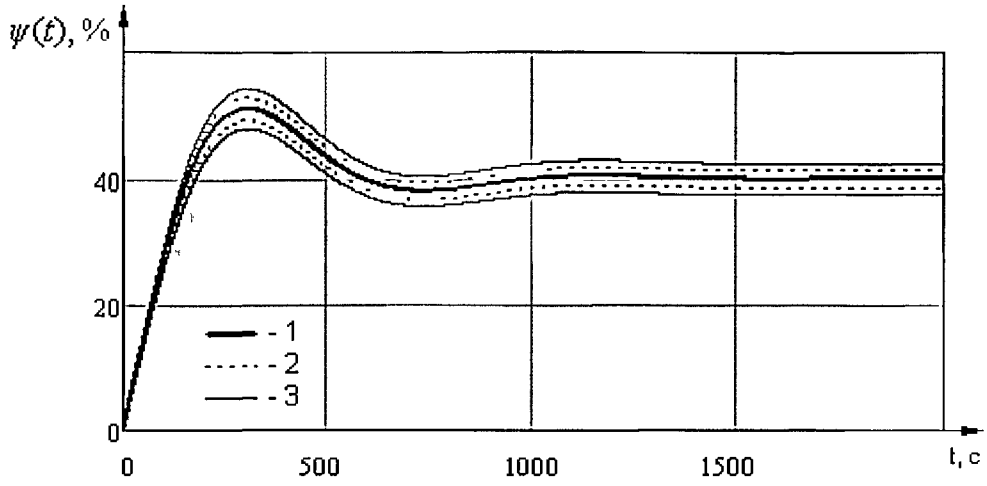

Рисунок 5.9 – Переходный процесс в системе регулирования с учетом погрешности измерения степени насыщения абсорбента
1 – Истинное значение степени насыщения абсорбента;
2 – Погрешность измерения степени насыщения абсорбента при отсутствии динамической составляющей;
3 – Динамическая погрешность измерения степени насыщения абсорбента при наличии динамической составляющей.

На рисунке показано, 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.

5.3 Исследование качества управления процессами абсорбции

Рассматриваемая в настоящей работе система для измерения степени насыщения абсорбента предназначена для реализации предложенного в работе [1] способа управления абсорбционной установкой.

Перед применением способа управления для конкретного объекта, методами теории автоматического управления производится поиск оптимальных значений параметров настройки регуляторов (коэффициента передачи, постоянных времени интегрирования и дифференцирования

регулятора), а также оценка качества и устойчивости переходного процесса в системе.

Для оценки качества работы системы регулирования, как правило, применяется несколько критериев. Критериями качества регулирования являются: максимальное отклонение регулируемой величины, $y_{дин}$, от установившегося значения (см. рисунок 5.10); время регулирования, $T_{рег}$, в течение которого отклонение регулируемой величины от установившегося значения достигает некоторой малой величины Δ (чаще всего принимается равной 5 %) и в дальнейшем остается меньше ее; а также степень затухания Ψ, которая вычисляется по выражению [99]:

$$\Psi = \frac{y_{дин1} - y_{дин2}}{y_{дин1}} \cdot 100\%. \qquad (5.15)$$

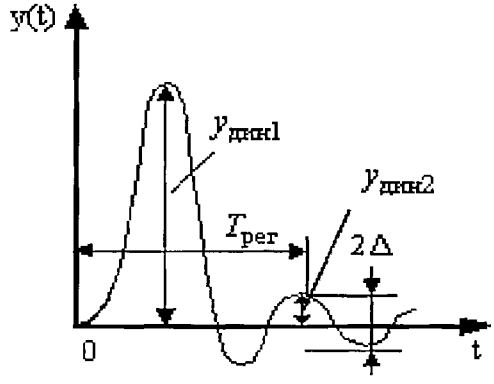

Рисунок 5.10 - Прямые показатели качества процесса регулирования

Широко применяются интегральные критерии качества управления, дающие общую оценку времени регулирования и степени отклонения управляемой величины от установившегося значения в переходном процессе в совокупности, без нахождения того и другого в отдельности. Наиболее употребимой является линейная квадратичная интегральная оценка качества [100]:

$$I = \int_0^{\infty} \varepsilon^2(t)dt, \qquad (5.16)$$

где $\varepsilon(t)$ – ошибка регулирования.

Стремление оценки I к нулю приближает кривую процесса к единичной функции $1(t)$, что, в свою очередь, вызывает значительное увеличение скорости в начальный момент времени. Поэтому наряду с этим критерием при оценке качества процессов управления следует использовать критерий, отражающий скорость регулирования в начальный момент времени:

$$\lambda = \frac{dy(t)}{dt}\Big|_{t=0}, \qquad (5.17)$$

где $y(t)$ - регулируемый параметр.

В работе [1] на основе результатов активного и пассивного эксперимента были найдены передаточные функции абсорбционной установки цианистого натрия по каналам управления и возмущения, а также определены значения параметров настройки систем регулирования с компенсацией и без компенсации динамических свойств абсорбера.

В работе [1] проведено моделирование переходных процессов в системе управления для алгоритма без компенсации динамических свойств объекта управления при значениях параметров настройки регулятора $k_{рег1} = 0{,}216$ и $T_{и1} = 934$ с. Показано, что время регулирования составляет 356 минут, а максимальное отклонение регулируемого параметра $y_{дин} = 0{,}091$ при задании степени насыщения 40 %.

Применение алгоритма с компенсацией динамических свойств объекта управления позволяет обеспечить время регулирования 138 минут, а максимальное отклонение регулиремого параметра $y_{дин} = 0{,}034$ при значении параметра настройки регулятора [1]: $k_{рег1} = 0{,}216$.

По результатам моделирования переходных процессов авторами [1] сделан вывод, что способ управления процессом абсорбции по степени насыщения абсорбента является работоспособным, а компенсация динамических свойств абсорбера позволяет уменьшить перерегулирование и увеличить скорость регулирования в системе.

5.4 Методика снижения динамической погрешности

Расчеты показывают, что применение математических моделей метрологических характеристик [63, 66] для определения значений настроечных коэффициентов измерительных каналов системы управления процессом абсорбции позволяет существенно снизить значение методической динамической составляющей погрешности измерения степени насыщения абсорбента.

Характер зависимостей методической динамической погрешности от параметров настройки измерительной системы (см. раздел 2.7) позволяет выделить основные этапы методики снижения динамической погрешности измерительной системы:

1. На основе [94] определяют статическую абсолютную погрешность измерения степени насыщения абсорбента $\Delta_{ст}$.

2. Проводят аппроксимацию корреляционных функций измерительной информации зависимостями вида (2.2) – (2.4).

Выражение (2.4) используют в случае высокочастотной помехи (при $\beta >> \alpha$).

По выражениям (2.2) – (2.4) определяют статистические характеристики измерительной информации (дисперсия, скорость изменения корреляционной функции полезного сигнала и помехи).

3. Строят график зависимости нормированной методической динамической погрешности μ (5.12) от периода опроса датчиков Ts.

По графику зависимости $\mu(Ts)$ определяют значение $Ts^{гр}$, дальнейшее уменьшение периода опроса датчиков после которого, не приводит к значительному снижению погрешности.

4. Строят графики зависимости μ от постоянных времени цифровых фильтров в каналах измерения концентрации вещества в абсорбенте на входе и на выходе из абсорбера.

По графикам зависимости определяют значения соответствующих постоянных времени цифровых фильтров.

5. Строят графики зависимости μ от постоянных времени датчиков в каналах измерения концентрации вещества в абсорбенте на входе и на выходе из абсорбера.

По графикам зависимости определяют значения соответствующих постоянных времени датчиков.

6. На основе выбранных значений настроечных коэффициентов по выражению (2.89) или (2.90) получают значение методической динамической погрешности измерения степени насыщения абсорбента.

5.5 Выводы

Расчеты показывают, что применение математических моделей метрологических характеристик для определения значений настроечных коэффициентов измерительных каналов системы управления процессом абсорбции в процессе производства сероуглерода позволяет существенно снизить значение методической динамической составляющей погрешности измерения степени насыщения абсорбента и уменьшает итоговую погрешность практически в два раза (с 7,6 % до 4,0 %).

Характер зависимостей методической динамической погрешности от параметров настройки измерительной системы позволяет сформулировать методику снижения динамической погрешности измерительной системы.

Снижение погрешности измерения степени насыщения абсорбента за счет компенсация динамических свойств абсорбера в измерительном канале приводит к уменьшению времени регулирования и величины перерегулирования и позволяет существенно повысить качество управления процессом абсорбции.

Результаты моделирования переходных процессов в системе при использовании способа управления по степени насыщения абсорбента показывают, что способ является работоспособным и может применяться в промышленности для управления процессами абсорбции

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В промышленности широко используются процессы абсорбции. Абсорбер как объект управления представляет собой сложную техническую систему. В работе [1] предложен новый способ управления абсорбционной установкой, направленный на повышение эффективности протекания процесса абсорбции и 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.

Так как для измерительных систем, применяемых в системах управления технологическими процессами, динамическая составляющая погрешности может достигать достаточно больших значений и может быть снижена путем подбора оптимальных параметров настройки компонентов измерительных систем без изменения аппаратной структуры систем, то важным является анализ именно динамической составляющей погрешности.

Анализ литературных источников показал, что известные модели динамических погрешностей измерительных систем не соответствуют структуре рассматриваемой системы с дробно-нелинейным взаимодействием измеряемых сигналов.

Актуальной является задача создания системы измерения степени насыщения абсорбента для управления процессом абсорбции и анализ ее метрологических характеристик для определения параметров настройки системы, обеспечивающих максимальную точность измерений.

В результате проведенного диссертационного исследования были получены следующие результаты:

1. Предложено уравнение измерения текущего значения степени насыщения абсорбента, учитывающее динамические свойства объекта измерения (2.32).

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. Полученные модели (2.80) и (2.81) определяют дисперсию показаний программно-аппаратного измерительного канала в случае действия помех типа «белый шум» и помех с корреляционной функцией экспоненциального вида с учётом динамических свойств объекта измерения и дробного взаимодействия измеряемых сигналов в уравнении измерения.

5. Полученное выражение (2.85) определяет взаимную корреляционную функцию показаний эталонного и программно-аппаратного измерительных каналов с учётом динамических свойств объекта измерения и дробного взаимодействия измеряемых сигналов в уравнении измерения.

6. Полученные выражения (2.89) и (2.90) определяют дисперсию 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.

7. Методическая динамическая погрешность измерительной системы является центрированной случайной функцией, зависящей от статистических характеристик измерительной информации, а также от значений настроечных коэффициентов измерительной системы.

8. На основе результатов анализа зависимостей методической динамической погрешности измерительной системы от параметров работы

системы построена методика снижения методической динамической погрешности системы измерения степени насыщения абсорбента.

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

10. Для проверки работоспособности измерительной системы и адекватности построенных математических моделей методической динамической погрешности измерения степени насыщения абсорбента была разработана программно-аппаратная экспериментальная установка.

11. 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.

12. На основе 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 (с 7,6 % до 4,0 %).

13. Рассмотрены результаты моделирования переходных процессов в системе при использовании способа управления по степени насыщения абсорбента. Показано, что предложенный в работе [1] способ управления абсорбером по степени насыщения абсорбента является работоспособным.

Таким образом, на защиту выносятся:

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевчук В.П., Качегин Д.А., Загребин В.Н. Система управления процессом абсорбции по степени насыщения абсорбента // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. - №7. - с. 1-8.
2. Гильперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. - М.: Химия, 1981. – 812 с.
3. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. Изд. 2-е, в 2-х кн. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. - М.: Химия, 1995.-368 с.
4. Рамм В. М. Абсорбция газов. - Изд. 2-е, переработ, и доп. - М.: «Химия», 1976. - 656 с.
5. Способ автоматического управления абсорбцией сероводорода из коксового газа / Полещук И.С. и др.; Пат. 2023485. - № 4784154/26; заявл. 18.06.1990; опубл. 30.11.1994.
6. Устройство для автоматического управления процессом абсорбции / Размолодин Л. П. и др.; Пат. 691176. - № 2509814; заявл. 14.07.1977; опубл. 15.10.1979; бюл. № 38.
7. Способ управления процессом многоступенчатой абсорбции / Кондрашов С.Н., Шумихин А.Г.; Пат. 2055633. - № 92002656/26; заявл. 29.10.1992; опубл. 10.03.1996.
8. Способ автоматического управления процессом абсорбции – десорбции / Шевчук В.П., Ковалева Т.Н. и др; А. с. 736418. – опубл. 29.01.80.
9. Способ управления процессом абсорбции / Кузьмина Е. Я. и др.; Пат. 689711. - № 2478106; заявл. 13.04.1977; опубл. 05.10.1979; бюл. № 37.
10. Способ автоматического управления процессом абсорбции / Гольцман М.И., Верзилова Н. В; Пат. 504546. - № 1969289/23-26; заявл. 14.11.73; опубл. 28.02.76; бюл. № 8.

11. Способ управления абсорбционно-десорбционными процессами / Смольянов В. А., Рульнов А.А., Бессмертная Е. К.; Пат. 521914. - 2014480/26; заявл. 12.04.1974; опубл. 25.07.1976; бюл. № 27.

12. Способ управления процессом абсорбции-десорбции / Ухабин М. М., Шевчук В. П. и др.; Пат. 1364357. - № 4049262; заявл. 03.04.1986; опубл. 07.01.1988; бюл. № 1.

13. РМГ 29-99 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. – Введ. 2001-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 44 с.

14. Миф, Н.П. Оптимизация точности измерений в производстве. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 136 с.

15. Кузнецов Б.Ф., Пинхусович Р.Л. Минимизация динамической погрешности измерительных преобразователей // Измерительная техника. – 2004. - № 1. – с.12-14.

16. МИ 2233-2000 Государственная система обеспечения единства измерений. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Основные положения. – Введ. 2000-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 3 с.

17. Шевчук В.П. Метрология интеллектуальных измерительных систем: Монография / В.П. Шевчук, В.И. Капля, А.П. Желтоногов, Д.Н. Лясин; под ред. В.П. Шевчука. - Волгоград: изд-во ВолгГТУ, 2005. – 210 с.

18. Электрические измерения / Р.М. Демидова-Панферова, В.Н. Малиновский, В.С. Попов и др.; Под ред. В.Н. Малиновского. – М.: Энергоиздат, 1982. – 392 с., ил.

19. Кузнецов Б.Ф., Пинхусович Р.Л., Пудалов А.Д. Расчет дополнительных погрешностей каналов ИИС АСУТП // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2006. - №6. – с. 51-54.

20. Метрология динамических измерений / Б.Ф. Кузнецов и др.// Сборник научных трудов: Естественные и технические науки. Социально гуманитарные и экономические науки. – Ангарск: АГТА, 2001.

21. Кузнецов Б.Ф. Анализ динамического режима работы неравноточных измерительных каналов АСУТП // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС.- 2004. - № 4. – с. 99-103.
22. Шевчук В.П., Коровина Е.В. Оптимизация режимных параметров работы измерительных каналов виртуального прибора по учету потребленной тепловой энергии // Измерительная техника. - 2007. - № 10. – с.10-14.
23. Коптев В.С., Сычев Г.И. Теорема о среднем (О динамических погрешностях измерительных преобразователей) // Датчики и системы. – 2004. - № 12. - с. 52-55.
24. Грановский В.А. Динамические измерения: основы метрологического обеспечения. - Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 220 с.
25. Шевчук В.П. Расчет динамических погрешностей интеллектуальных измерительных систем. – М.: Физматлит, 2008. – 288 с.
26. Кавалеров Г.И., Мандельштам С.М. Введение в информационную теорию измерений. - М.: Энергия, 1974. - 375 с.
27. Новоселов О.Н., Фомин А.Ф. Основы теории и расчета информационно измерительных систем. - М.: Машиностроение, 1991. - 336 с.
28. Шевчук В.П. Теория информационных каналов систем управления. Математические основы описания линейных и нелинейных программно-аппаратных каналов обработки информации: Учебное пособие. - Волгоград: ВолгГТУ, 1993.- 128 с.
29. Цветков Э.И. Процессорные измерительные средства. - Л.: Энергоатомиздат, 1989. - 224 с.
30. Цветков Э. И. Основы математической метрологии. – СПб.: Политехника, 2005. – 510 с.: ил.
31. Заико А.И. Точность аналоговых линейных измерительных каналов ИИС. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 135с.

32. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы аналоговые и цифровые. - Киев: Вища школа, 1980. - 558 с.

33. Баранов Л.А. Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 304 с.

34. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. - М.: Издательство стандартов,1985. - 226 с.

35. Айвазян С.А., Внюков И.С., Мешалкин Л.Д. Основы моделирования и первичной обработки данных. - М.: Финансы и статистика,1983. - 471 с.

36. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. - Л.: Энергоатомиздат, 1990. - 228 с.

37. Коломейцев Л.А. Хрулло В.М. Номенклатура нормируемых характеристик ИВК и их контроль при испытаниях // Теоретические и прикладные исследования в области системных измерений: сб.науч. трудов. – Львов: ВНИИМИУС, 1987. – с. 24-30.

38. Жовинский А.Н., Жовинский В.Н. Инженерный экспресс-анализ случайных процессов. – М.: Энергия, 1979. – 112 с.

39. Чернявский Е.А., Селиванов Е.Н., Сильвеструк Ю.А. Информационная теория средств измерений и контроля. - Саратов: изд-во Саратовского университета, 1988. – 125 с.

40. Быков Ю.М. Основы обработки информации в АСУ химических производств: Теория и расчет информационных подсистем. - Л.: Химия, 1986. - 152 с.

41. Ицкович Э.Л. Контроль производства с помощью вычислительных машин. - М.: Энергия, 1975. - 417 с.

42. Лачков В.И. О методической погрешности учета по средним значениям параметров энергопотребления // сборник «Средства автоматизации коммерческого учета энергоносителей». - СПб: МЦЭНТ, 1994. - с. 65-69.

43.Башкин Б.В., Милейковский Ю.С. Новые предложения для эффективного решения проблем энергоснабжения // Энергосбережение. – 2002. - №4. - с.32-33.

44.Шевчук В.П., Свиридова О.В. Пакет прикладных программ для синтеза динамических компенсаторов в системах управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.- 2006. - №6. – с. 21-25.

45.Самойлов Л.К., Жуков А.В. Выбор частоты дискретизации реальных сигналов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. - №1. – с. 31-35.

46.Hessling Jan Peter A Novel Method Of Estimating Dynamic Measurement Errors // XVIII IMEKO World Congress. Metrology for a Sustainable Development. - Rio de Janeiro, Brazil, September 17 – 22 2006.

47.Hessling Jan Peter, Mannikoff Anders Dynamic Measurement Uncertainty Of HV Voltage Dividers // XIX IMEKO World Congress. Fundamental and Applied Metrology. - Lisbon, Portugal, September 6-11 2009.

48.Ronald T. Azuma Correcting for Dynamic Error // SIGGRAPH '97 Course Notes #30: Making Direct Manipulation Work in Virtual Reality, August 1997.

49.Лясин Д.Н. Параметрический синтез информационно – измерительных систем с мультипликативным взаимодействием измерительных каналов: дис. канд техн. наук: 05.11.16; ВолгГТУ. - Волгоград, 2001.- 116 с.

50.Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах. – М.: Мир, 1986. – 398 с.

51.Дороговцев А.Я. Теория оценок параметров случайных процессов. – Киев: Вища школа, 1982. – 192 с.

52.Краус М., Вашны Э. Измерительные информационные системы. - М.: Мир, 1975. - 310 с.

53. Куликов Е.И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. - М.: Сов. радио, 1978. – 296 с.

54. Шелухин О.И., Беляков И.В. Негауссовские процессы. - Спб.: Политехника, 1992. – 312 с.

55. Корнюхов М.И., Рогачев Н.Н. Особенности метрологического обеспечения АСУТП // Измерительная техника. – 1991. - №8. - с. 11-14.

56. Шевчук В.П., Муха Ю.П. Прикладные методы для автоматического проектирования АСУ ТП. Часть 2. Методы проектирования управляющих подсистем АСУ ТП: Учеб. Пособие. - Волгоград: Волгоград. Политехн. Ин-т., 1990. – 80 с.

57. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. - М.: Наука, 1969 г. - 576 с.: ил.

58. Тихонов В. И. Нелинейные преобразования случайных процессов. – М.: Радио и связь, 1986. – 296 с.: ил.

59. Быков Ю. М. Теория информационных каналов АСУ: Конспект лекций. - М.: МИХМ, 1976. - ч. 1. - 38 с. - ч. 2. - 48 с.

60. Шевчук В.П. Исследование динамических погрешностей ИИК в системах автоматического управления по косвенным показателям: Дис. д-ра техн. наук: 05.11.16. - Волжский, 1995. - 390 с.

61. Лясин Д.Н., Данилов С.И., Шевчук В.П. Оптимизация параметров линейных программно-аппаратных измерительных каналов в АСУТП; ВолгГТУ. - Волгоград, 1999. - 19 с. - Деп. в ВИНИТИ 10.06.99, № 1883 - В99.

62. Исследования в области методологии метрологического обеспечения ИИС / сб. науч. трудов. - Львов: ВНИИМИУС, 1984. – 84 с.

63. Шевчук В. П., Болдырев И. А. Система измерения степени насыщения абсорбента для управления процессом абсорбции // Вестник МЭИ. – 2010. - № 2. – с. 127-132.

64. Острем, К. Системы управления с ЭВМ. - М.: Мир, 1987. – 480 с.

65. Данилов С.И. Параметрический синтез измерительных каналов в автоматизированной системе управления технологическим процессом: Дис. канд. техн. наук: 05.11.16; ВолгГТУ. - Волгоград, 2000. - 146 с.

66. Шевчук В. П., Болдырев И. А. Метрологические характеристики информационно-измерительной системы для определения степени насыщения абсорбента // Метрология. – 2009. - № 12. – с. 31-40.

67. Изменяемый полевой прибор / Шевчук В. П., Болдырев И. А; Пат. 84965 МПК G01D3/02. - № 2009110109/22; заявл. 20.03.2009; опубл. 20.07.2009; бюл. № 20.

68. Изменяемый полевой прибор для автоматизации процессов / Да Сильва Нето Еугенио Ферейра, Ротт Йорг; Пат. 2327113. - № 2004136606/28; заявл. 15.05.2003; опубл. 20.06.2008; бюл. № 17.

69. Болдырев И.А., Качегин Д.А., Шевчук В.П. Прибор для измерения степени насыщения абсорбента // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, № 2, 2008, стр. 30-34.

70. LM7800 series 3-terminal fixed voltage regulators FCI semiconductor data sheet. - URL: http://www.allcomponents.ru/pdf/fci/lm7800.pdf.

71. AD420 serial input 16-bit 4mA-20mA, 0mA-20 mA DAC Analog Devices Data sheet. - URL: http://www.analog.com/ static/ imported-files/ data_sheets/AD420.pdf.

72. Предко М. Справочник по PIC-микроконтроллерам. – М.: ДМК Пресс, 2002. – 512 с.

73. Белов А. В. Конструирование устройств на микроконтроллерах. – СПб.: Наука и Техника, 2005. – 256 с.: ил.

74. Самарин А. Основы схемотехники жидкокристаллических дисплеев // Схемотехника. – 2001. - № 3.

75. WH0802C 8x2 character Winstar Professional LCD module manufacture Data Sheet. - URL: http://www.winstar.com.tw/ products_detail_ov.php? lang=ru&ProID=13.

76. Несвижский В. Программирование аппаратных средств в Windows. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. - 880 с.: ил.

77. Николайчук О. И. Системы малой автоматизации. - М.: СОЛОН-Пресс, 2003. - 256 с.

78. Щелкунов Н. Н., Дианов А. П. Микропроцессорные средства и системы.— М.: Радио и связь, 1989.-288 с: ил.

79. MAX202E–MAX213E, MAX232E/MAX241E ±15kV ESD-Protected, 5V RS-232 transceivers Maxim 19-0175; Rev 3; 5/96. - URL: http://www.allcomponents.ru/ pdf/maxim/max202.pdf.

80. MAX232, MAX232I DUAL EIA-232 DRIVER/RECEIVER SLLS047G – FEBRUARY 1989 – REVISED AUGUST 1998 Texas Instruments Incorporated. - URL: http://www.compel.ru/ pdf/TI/MAX232.pdf.

81. Стюарт Р. Болл Аналоговые интерфейсы микроконтроллеров. — М.: Изд. дом «Додэка-XX1», 2007. — 360 с: ил.

82. Serial Peripheral Interface (SPI) Technical Data Sheet Part Number: T-CS-PE-0009-100 Document Number: I-IPA01-0124-USR Rev 06 July 2006 / Cadence Design Foundry, UK Ltd. - URL: http://www.cadence.com/ Products/sd/Pages/SPI_DataSheet.pdf.

83. Куцевич И. В., Григорьев А. Б. Стандарт OPC путь к интеграции разнородных систем // Мир компьютерной автоматизации. – 2001. - № 1. – с. 12-21.

84. Mikropascal For PIC PRO/mikroElectronika. - URL: http:// www.mikroe.com/pdf/mikropascal_pic_pro/mikropascal_pic_pro_manual_ v101.pdf.

85. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / И. В. Петров; под ред. проф, В. П. Дьяконова. — М.: СОЛОН-Пресс, 2004. — 256 с.: ил.

86. Сташин В.В., Урусов А.В., Мологонцева О.Ф. Проектирование цифровых устройств на однокристальных микроконтроллерах. — М.: Энергоатомиздат, 1990. - 224 с.

87. Бродим В.Б., Калинин А.В. Системы на микроконтроллерах и БИС программируемой логики. — М.: Изд-во ЭКОМ, 2002.— 400 с.: ил.

88. Интегрированная информационная система для управления промышленным производством TRACE MODE / AdAstra. - URL: http://www.adastra.ru.

89. Мобильный стенд для проверки программного обеспечения и оборудования многофункциональных систем контроля и управления / Лаврик Г. В. и др.; Пат. 71760. - № 2007119037/22; заявл. 23.05.2007; опубл. 20.03.2008; бюл. № 8.

90. Информационный, измерительный и управляющий комплекс «Деконт» (общепромышленная серия). Руководство по эксплуатации. ДЕПЛ.421457.202РЭ ТУ4252-001-48531244-2007. Часть 1. Техническое описание. Москва, 2009 г. / Компания ДЭП. - URL: http://www.dep.ru/ downloads/ doc_hard/ DECONT-UG.pdf.

91. Информационный, измерительный и управляющий комплекс «Деконт». Руководство по эксплуатации. РЭ 4205-002-48531244-99. Часть 3. Описание программного обеспечения. Редакция – сентябрь 2008 г. / Компания ДЭП. - URL: http://www.dep.ru/ downloads/ doc_soft /Decont.pdf.

92. Ходасевич Г.Б. Обработка экспериментальных данных на ЭВМ : учеб. пособие. Ч. 1. Обработка одномерных данных; С.-Петерб. ун-т телекоммуникаций. – СПб. - URL: http://dvo.sut.ru /libr/opds/ i130hodo_part1/5.htm.

93. Румшинский Л. З. Элементы теории вероятностей. - М.: Наука, 1970. - 254 с.

94. РД 153-34.0-11.201-97 Методика определения обобщенных метрологических характеристик измерительных каналов ИИС и АСУ ТП по метрологическим характеристикам агрегатных средств измерений. – Введ. 1999-02-01. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 16 с.

95. Прибор для измерения массового расхода Optimass 1000. Руководство по монтажу и эксплуатации. - URL: http://www.krohne.com/ fileadmin/Picture_Gallery/ KROHNE_companies/ Russia/ Manuals/ OPTIMASS_manual_rus.pdf.

96. Преобразователь модульного типа MFC 300 для массовых расходомеров. - URL: http://www.krohne.com/ fileadmin/ Picture_Gallery/KROHNE_companies/Russia/ Manuals/mfc_300.pdf.

97. Руководство для массовых расходомеров по измерению концентрации. - URL: http://www.krohne.com/ fileadmin/ Picture_Gallery/ KROHNE_companies/ Russia/Manuals/ OPTIMASS _manual_ Concentration_rus.pdf.

98. ГОСТ 19213-73 Сероуглерод синтетический технический. Технические условия. Введ. 1973-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 53 с.

99. Кузьмин Л.В., Схиртладзе А.Г. Теория систем автоматического управления: Учебное пособие.- Ульяновск: УдГГУ, 2002. - 212 с.

100. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования; издание третье, исправленное. - М.: Наука. – 1975. – 768 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Алгоритмическое обеспечение полевого изменяемого прибора

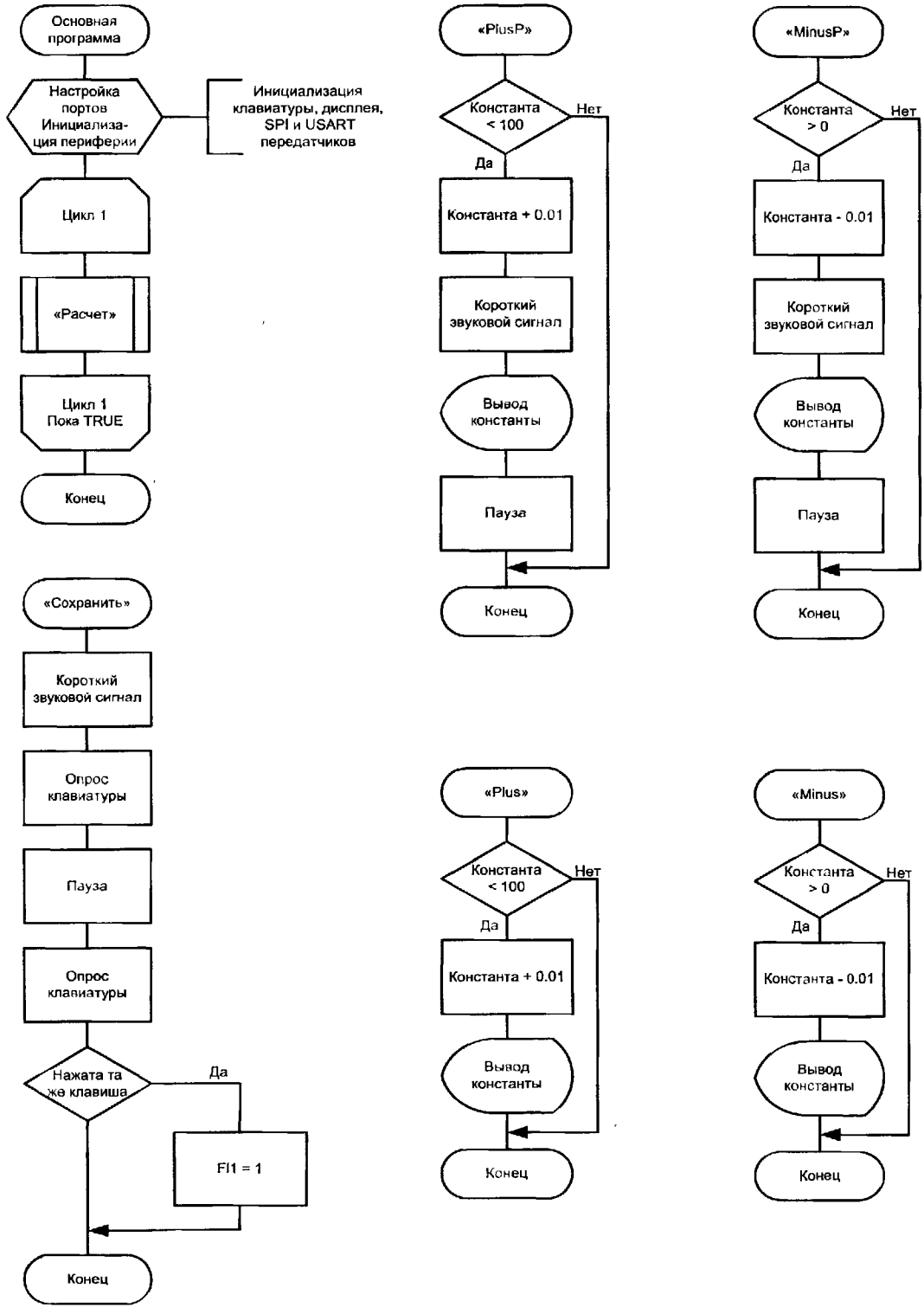

Рисунок П.1.1 – Схема алгоритма основной программы и подпрограмм «Плюс», Минус», «ПлюсП», «МинусП»

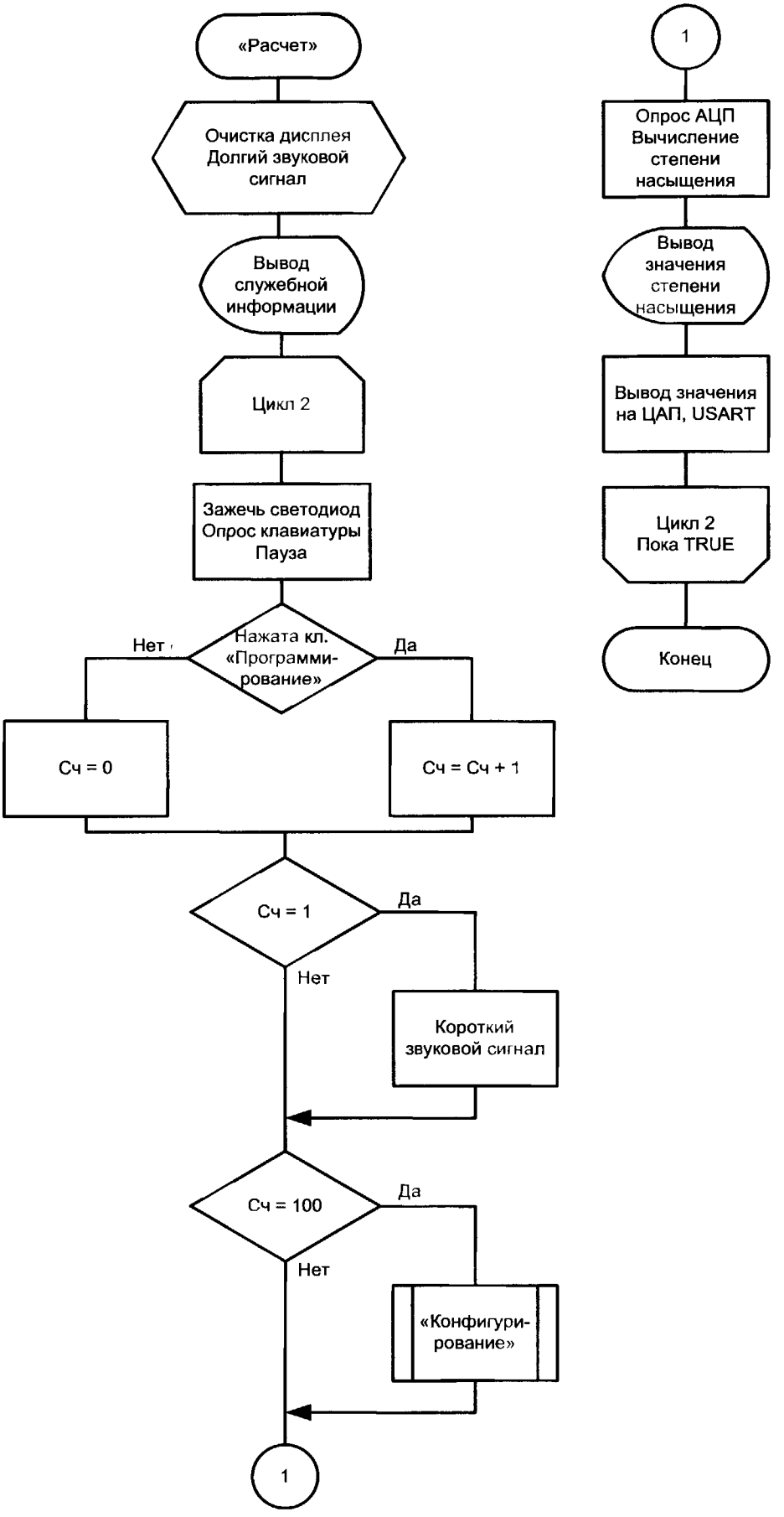

Рисунок П.1.2 – Схема алгоритма подпрограммы «Расчет»

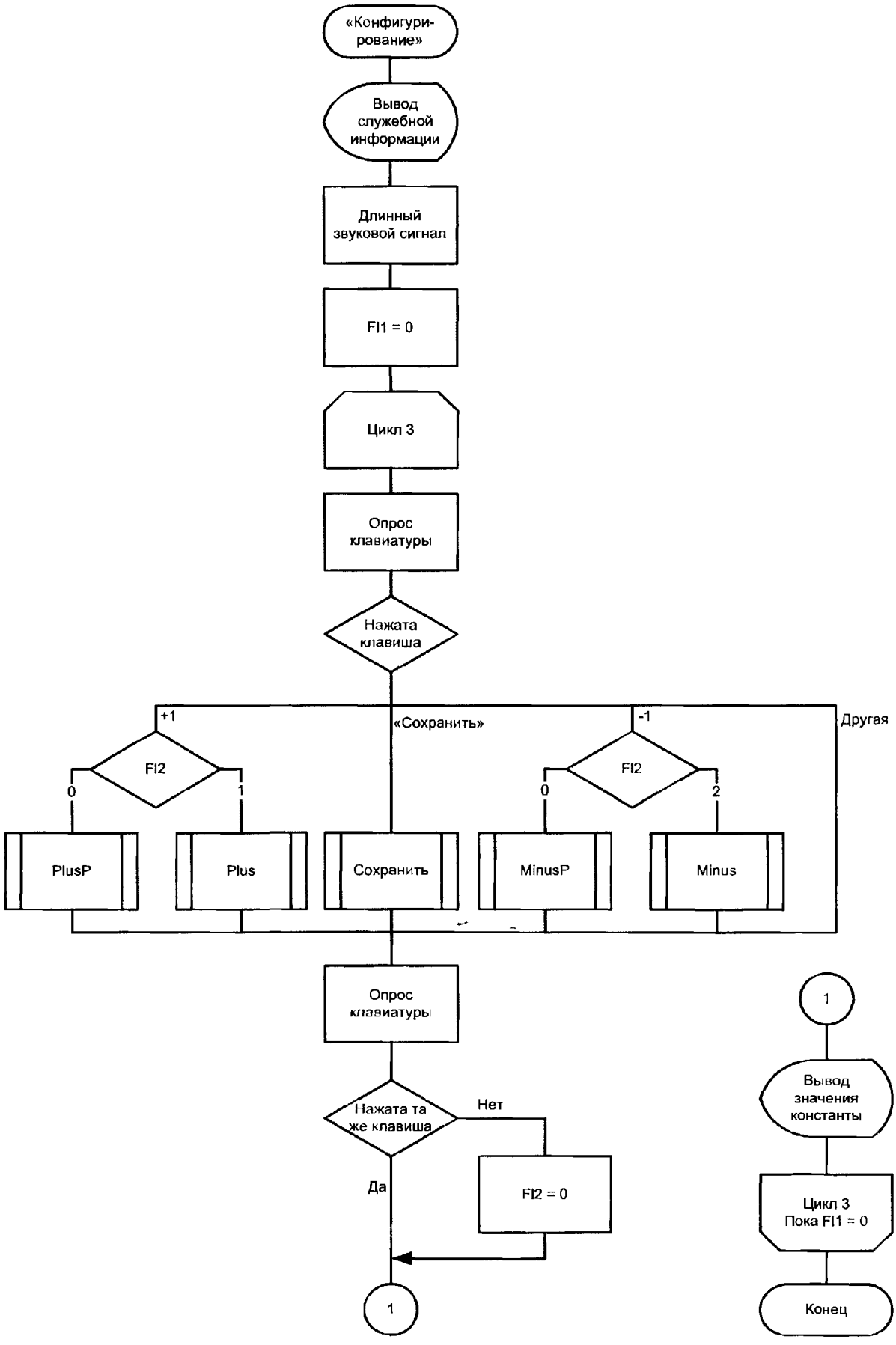

Рисунок П.1.3 – Схема алгоритма основной подпрограммы «Конфигурирование»

Приложение 2. Программа функционирования полевого изменяемого прибора

```
program MainPr;
var
	kp, kp1, kp2, cnt, fl, fl2: byte;
	txt, res_txt: string[5];
	temp_res1, temp_res2, temp_res11, temp_res21, temp_res12, temp_res22,
	spi_res,res2, res1, res3, constanta,constanta2: word;
	txt2: string[6];
	resR, res: real;

procedure PlusP;  //Процедура увеличения константы на 0,01
begin
	if constanta < 10001 then
		begin
			constanta := constanta + 1;   //Увеличить константу
Lcd_Out(1, 4, '+1');  // Индикация на дисплее увеличения константы
			Sound_Play(100, 200);  //Озвучивание нажатия на клавишу
			Delay_ms(1000);  //  пауза
			fl2 := 1; // флаг того, что была нажата клавиша увеличения
		end;
end;

procedure Plus;  //Процедура циклического увеличения константы
begin
	if constanta < 10001 then
	begin
		constanta := constanta + 1;  //Увеличить константу
		Lcd_Out(1,  4,  '+1');    //  Индикация  на  дисплее  увеличения
константы
	end;
end;

procedure MinusP;  //Процедура уменьшения константы на 0,01
begin
	if ( constanta >= 0) and ( constanta < 10001) then
		begin
			constanta := constanta - 1;   //Уменьшить константу
Lcd_Out(1, 4, '-1');   // Индикация на дисплее уменьшения константы
			Sound_Play(100, 200);  //Озвучивание нажатия на клавишу
			Delay_ms(1000);  //   пауза
			fl2  :=  2;       //флаг  того,  что  была  нажата  клавиша
уменьшения
```

```
            end;
end;

procedure Minus;  //Процедура циклического уменьшения константы
begin
        if (constanta >= 0) and (constanta < 10001) then
            begin
                constanta := constanta - 1;  //Уменьшить константу
Lcd_Out(1, 4, '-1');  // Индикация на дисплее уменьшения константы
            end;
end;

procedure Save;  //запомнить константу и перейти в режим работы
var
        kp1: byte;
begin
        Sound_Play(100, 200); // озвучивание нажатия на клавишу
        kp := Keypad_Read(); //опрос клавиатуры
        Delay_ms(2000);    //пауза
        kp1:=Keypad_Read(); //повторный опрос клавиатуры
        if kp = kp1 then //если клавиша все еще нажата, то осуществляем
переход
            begin
                fl:= 1; //флаг перехода
            end;
end;

procedure Konfig;  //режим конфигурирования
begin
        Lcd_Cmd(LCD_CLEAR);   //очистить дисплей
        Lcd_Out(1, 1, 'Pr!');  //индикация перехода в режим конфигурирования
        fl := 0;  //флаг перехода в режим работы
        cnt:=0;
        Sound_Play(100,     400);     //озвучивание     перехода     в     режим
конфигурирования
        kp1 := 0;
        fl2 :=0; //флаг нажатия клавиши увеличения/уменьшения константы
repeat begin
        kp1 := Keypad_Read();  //опрос клавиатуры
        //вызов подпрограммы в зависимости от нажатой клавиши
        if kp1 = 14 then
            save;
        if kp1 = 3 then begin
            if fl2 =0 then
                PlusP;
```

```
            if fl2 =1 then
                Plus;
        end;
        if kp1 = 2 then begin
            if fl2 =0 then
                MinusP;
            if fl2 =2 then
                Minus;
        end;
        kp2:=  Keypad_Read();
        if kp2 >< kp1 then
            fl2 := 0; //сброс флага нажатой клавиши
            //проверка значения константы
        if (constanta < 0) or (constanta > 10001) then
            constanta :=0;
            //индикация константы
        WordToStr(constanta, txt);
        txt2[0] := txt[0];
        txt2[1] := txt[1];
        txt2[2] := txt[2];
        txt2[3] := ',';
        txt2[4] := txt[3];
        txt2[5] := txt[4];
        Lcd_Out(2, 0,txt2);
end;
until fl = 1;  //пока не нажата клавиша перехода в режим работы
end;

procedure Raschet; //подпрограмма режима вычислений
begin
        Lcd_Cmd(LCD_CLEAR);  //очистка дисплея
        Lcd_Out(1, 1, 'Rb!'); //индикация режима вычислений
        Lcd_Out(2, 1, 'Ct:');
        //индикация значения константы
        WordToStr(constanta, txt);
        txt2[0] := txt[0];
        txt2[1] := txt[1];
        txt2[2] := txt[2];
        txt2[3] := ',';
        txt2[4] := txt[3];
        txt2[5] := txt[4];
        Lcd_Out(2, 3,txt2 );
        //обнуление счетчиков
        kp :=0;
        fl := 0;
```

```
res:=0;
Sound_Play(100, 400);  //озвучивание перехода в режим вычислений
repeat begin
SetBit(porte,1); //зажечь светодиод для индикации правильности работы программы
kp := Keypad_Read();//опрос клавиатуры
if kp = 15 then //переход в режим конфигурирования производим в фоновом режиме
        Inc(cnt) //по долгому нажатию на кнопку
else
        cnt := 0;
case cnt of
        1 : Sound_Play(100, 200);
        90 : Konfig;
end;
temp_res12 := ADC_read(1);    //опрос АЦП
temp_res22 := ADC_read(2);
//Экспоненциальные фильтры
temp_res1 := temp_res11+ temp_res12 div 12;
temp_res1 := temp_res1 - temp_res11 div 12;
temp_res2 := temp_res21+ temp_res22 div 12;
temp_res2 := temp_res2 - temp_res21 div 12;
//нормирование сигналов
temp_res11 := temp_res1 ;
temp_res21 := temp_res2;
constanta2 := constanta/10;
//вычисление степени насыщения
res1 := temp_res1 - temp_res2;
res3 := constanta2 - temp_res2;
resR :=  res1/res3;
//преобразование результата вычислений
res := resR*65535; //в двухбайтовый вид для SPI и RS
res2 := resR*100; //для индикации на дисплее
//индикация результата
wordToStr(res2, res_txt);
lcd_out(1,4,res_txt);
//отправка в SPI
spi_res := res;
Spi_Write(hi(spi_res)); //старший байт
Spi_Write(lo(spi_res)); //младший байт
SetBit(PORTe,0); // формирование импульса
Delay_us(5);    //  в линии latch для сигнала
ClearBit(PORTe, 0);  // о загрузке всего слова в ЦАП
// и для формирования оптимального периода опроса
Usart_Write(spi_res); //передача в RS
```

```
end;
until False;
end;
begin
//настройка портов на ввод/вывод
        TrisC := 0;
        TrisE := 0;
        ADCON1 := $80;
        TrisA  := $0f;
        SetBit(porte,1);
        //инициализация периферии
        Sound_Init(PORTe, 2);
        Keypad_Init(PORTB);
        Lcd_Init(PORTD);
        Lcd_Cmd(LCD_CLEAR);
        Lcd_Cmd(LCD_CURSOR_OFF);
        Spi_Init_Advanced(MASTER_OSC_DIV64,  DATA_SAMPLE_MIDDLE,
        CLK_IDLE_LOW,LOW_2_HIGH {HIGH_2_LOW});
        Usart_Init(9600);
        kp :=  0;
        cnt := 0;
        constanta :=  8000;
        temp_res11:= 0;
        temp_res21:= 0;
repeat begin
        Raschet;
end;
until FALSE;
end.
```

Приложение 3. Результаты эксперимента

Таблица П.3.1 - Результаты эксперимента при воздействии на измеряемую информацию высокочастотной помехи

№ эксп	Параметры полезных сигналов						Параметры помех		Настроечные коэффициенты					Отн дисп		Крит Фишера	
	Mx_1	Mx_2	Dx_1	Dx_2	α_1 $\cdot 10^{-2}$	α_2 $\cdot 10^{-2}$	S_1 $\cdot 10^{-5}$	S_2 $\cdot 10^{-5}$	Ts, с	Tp_1, с	Tp_2, с	Tf_1, с	Tf_2, с	теор	эксп	эксп	табл
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0,0	37,6	0,25	0,18	6,1	1,7	4,7	1,2	15	13	22	793	371	0,75	1,05	1,395	2,358
2	17,6	67,7	0,00	0,56	0,7	3,4	2,7	4,5	6	12	21	591	233	0,74	1,04	1,404	2,358
3	0,9	12,1	0,81	0,24	6,5	3,7	3,5	4,5	14	18	20	569	232	0,82	1,43	1,738	2,358
4	10,5	27,6	0,21	0,61	1,0	8,0	1,3	0,4	14	28	3	673	971	1,29	1,82	1,408	2,358
5	24,7	58,8	0,55	0,59	2,3	5,3	2,6	0,9	3	12	3	401	221	0,84	1,72	2,052	2,358
6	5,2	83,8	0,11	0,49	9,2	8,0	2,0	3,9	17	21	14	342	152	1,01	1,13	1,114	2,358
7	21,3	48,5	0,75	0,74	6,6	1,4	2,9	1,1	10	17	22	771	9	0,33	0,45	1,366	2,358
8	42,3	74,4	0,54	0,62	4,9	4,0	3,4	0	9	19	20	870	644	0,92	1,27	1,382	2,358
9	2,7	45,8	0,44	0,81	5,0	1,4	2,2	0,6	19	1	11	726	415	0,81	1,36	1,683	2,358
10	4,4	74,4	0,70	0,58	5,1	0,7	0	1,6	11	8	1	594	791	0,74	1,08	1,460	2,358
11	29,7	59,9	0,44	0,91	6,9	5,7	3,0	0,2	9	27	5	536	699	1,03	1,14	1,106	2,358
12	3,6	73,5	0,58	0,73	6,1	5,5	2,9	0,9	17	22	9	780	658	1,07	1,82	1,698	2,358
13	0,3	57,2	0,63	0,67	0,1	3,1	1,1	0,8	9	12	6	237	535	0,54	0,73	1,353	2,358
14	16,0	35,2	0,50	0,32	1,0	8,1	0	4,4	20	27	15	797	54	1,02	1,89	1,856	2,358
15	18,1	42,5	0,70	0,31	8,6	2,8	0,4	1,0	15	12	13	849	260	0,85	1,39	1,629	2,358
16	5,0	51,7	0,19	0,11	7,5	9,0	4,3	3,2	4	11	18	629	863	0,97	1,42	1,472	2,358
17	13,5	75,2	0,18	0,85	3,8	7,4	4,1	4,5	17	22	12	617	87	1,01	1,68	1,665	2,358
18	1,7	35,5	0,46	0,16	5,5	3,6	3,5	4,6	10	22	25	251	709	0,53	0,72	1,358	2,358
19	22,7	49,2	0,10	0,08	9,6	2,3	2,7	0,8	1	6	8	788	864	0,89	1,51	1,695	2,358

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
20	15,6	70,0	0,09	0,64	1,8	2,3	0,7	2,8	11	20	2	714	293	0,93	1,75	1,882	2,358
21	6,3	14,8	0,93	0,55	1,3	5,4	3,6	4,7	11	11	26	511	645	0,72	0,99	1,365	2,358
22	28,7	34,2	0,90	0,41	9,5	0,5	0,2	2,9	17	3	9	855	829	0,77	0,76	1,013	1,865
23	16,2	69,3	0,23	0,47	0,3	5,2	3,2	1,3	13	6	1	307	872	1,24	1,79	1,438	2,358
24	13,9	42,7	0,41	0,15	0,6	0,9	0,4	1,8	6	20	12	473	913	0,66	0,90	1,371	2,358
25	25,9	96,7	0,63	0,74	1,3	8,9	4,7	4,0	2	21	1	192	440	0,47	0,51	1,073	2,358
26	23,4	65,3	0,45	0,83	8,6	1,5	1,4	0,4	17	2	26	995	354	0,71	0,94	1,319	2,358
27	29,9	82,2	0,60	0,87	7,2	9,3	4,9	3,0	6	1	12	648	428	0,96	1,72	1,800	2,358
28	18,3	29,1	0,86	0,30	0,1	0,5	1,5	1,0	3	9	18	574	900	0,00	0,01	1,698	2,358
29	8,0	81,7	0,63	0,13	7,1	3,4	1,8	3,2	17	12	26	275	774	0,92	1,14	1,238	2,358
30	25,2	75,6	0,57	0,79	2,2	4,0	1,1	3,0	12	2	18	839	90	0,65	0,80	1,243	2,358

Таблица П.3.2 - Результаты эксперимента при воздействии на измеряемую информацию низкочастотной помехи

№ эксп	Параметры полезных сигналов						Параметры помех				Настроечные коэффициенты					отн дисп		Крит Фишера	
	Mx_1	Mx_2	Dx_1	Dx_2	$\alpha_1 \cdot 10^{-2}$	$\alpha_2 \cdot 10^{-2}$	$Dn_1 \cdot 10^{-5}$	$Dn_2 \cdot 10^{-5}$	β_1	β_2	Ts, с	Tp_1, с	Tp_2, с	Tf_1, с	Tf_2, с	теор	эксп	эксп	табл
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	7,3	58,5	0,48	0,84	6,6	1,5	1,98	6,90	0,28	0,35	0,1	22	28	643	187	0,36	0,47	1,307	2,197
2	18,1	35,0	0,95	0,54	9,3	0,9	0,47	4,91	0,42	0,06	10	20	7	901	377	0,58	1,23	2,106	2,197
3	17,5	82,3	0,84	0,57	1,1	4,7	0,36	6,53	0,00	0,19	30	7	26	915	677	1,03	2,25	2,171	2,197
4	14,8	17,4	0,10	0,64	5,6	3,3	0,82	6,40	0,02	0,43	18	30	6	480	708	1,16	2,10	1,806	2,197
5	22,2	71,1	0,87	0,76	9,0	6,1	5,69	8,31	0,13	0,25	41	27	23	758	123	1,20	1,43	1,198	2,197
6	18,6	30,4	0,94	0,16	8,7	2,8	2,19	8,78	0,35	0,34	9	27	11	745	731	0,92	1,92	2,077	2,197
7	9,1	24,1	0,24	0,79	3,9	4,4	3,05	9,62	0,07	0,18	36	18	19	563	228	1,20	1,94	1,621	2,197
8	14,7	17,3	0,13	0,44	6,7	2,2	4,11	7,26	0,43	0,38	15	22	22	822	134	0,60	0,76	1,268	2,197
9	27,3	98,9	0,47	0,51	2,8	5,2	2,52	3,74	0,11	0,00	5	23	12	435	457	0,91	1,05	1,149	2,197

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10	11,9	21,8	0,03	0,07	9,8	0,1	5,09	8,53	0,16	0,37	7	12	29	303	612	0,79	1,07	1,360	2,197
11	0,9	20,0	0,46	0,98	5,9	7,7	9,88	7,44	0,30	0,40	49	22	10	626	413	1,57	3,16	2,008	2,197
12	9,5	53,2	0,14	0,62	1,3	9,7	1,22	2,36	0,48	0,36	6	27	19	326	289	0,92	1,48	1,612	2,197
13	9,2	60,2	0,21	0,37	6,0	9,0	7,07	7,84	0,19	0,27	0,5	12	15	485	858	0,96	1,07	1,110	2,197
14	3,3	16,6	0,80	0,86	3,6	2,2	2,95	5,63	0,12	0,05	27	15	8	562	157	1,22	1,87	1,531	2,197
15	25,5	45,1	0,66	0,24	4,8	4,8	5,25	1,24	0,30	0,05	30	23	2	696	963	1,60	2,88	1,798	2,197
16	4,6	5,7	0,78	0,05	9,5	4,1	5,17	4,14	0,01	0,08	8	10	14	910	812	1,27	1,50	1,180	2,197
17	2,4	78,3	0,84	0,17	3,8	8,4	8,29	1,71	0,46	0,34	23	11	19	889	68	1,02	1,99	1,957	2,197
18	19,2	52,0	0,50	0,22	5,1	4,3	1,04	2,41	0,11	0,44	3	2	8	607	398	0,88	0,73	1,205	1,81
19	16,4	87,6	0,08	0,79	9,0	7,3	9,47	2,25	0,48	0,29	39	30	19	801	734	1,21	1,74	1,438	2,197
20	12,3	95,6	0,36	0,08	3,3	0,8	4,74	6,98	0,20	0,06	26	12	3	815	597	0,86	1,32	1,544	2,197
21	14,0	53,9	0,41	0,14	5,7	8,5	9,19	6,43	0,17	0,37	44	12	15	651	564	1,48	2,09	1,411	2,197
22	4,6	46,2	0,30	0,56	3,5	3,6	3,65	3,30	0,31	0,24	48	8	21	983	206	1,22	2,29	1,881	2,197
23	22,1	86,2	0,75	0,63	2,9	0,9	6,60	3,21	0,15	0,40	27	7	11	499	179	0,56	0,93	1,658	2,197
24	24,8	78,0	0,06	0,45	1,2	1,9	5,07	1,63	0,45	0,17	23	19	29	567	320	0,78	0,94	1,204	2,197
25	26,2	99,7	0,36	0,33	8,1	9,1	2,80	2,77	0,16	0,50	43	26	14	862	835	1,34	2,01	1,501	2,197
26	9,0	61,1	0,16	0,28	6,9	3,1	7,91	2,36	0,23	0,47	39	12	16	990	856	1,17	2,05	1,758	2,197
27	3,8	26,6	0,13	0,87	7,7	3,4	8,58	6,25	0,21	0,32	50	29	24	403	443	1,40	1,25	1,119	1,81
28	23,5	84,0	0,18	0,87	7,2	2,7	4,64	5,83	0,06	0,07	31	10	22	399	48	0,86	1,37	1,597	2,197
29	18,3	37,6	0,25	0,80	3,4	1,7	4,42	7,12	0,07	0,23	13	18	2	931	301	0,87	1,22	1,411	2,197
30	2,2	67,7	0,35	0,64	4,8	0,7	3,79	7,14	0,06	0,02	42	27	30	578	221	0,42	0,54	1,275	2,197

Приложение 4. Акт внедрения в эксплуатацию алгоритма регулирования

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
"ВОЛЖСКИЙ ОРГСИНТЕЗ"

Дата 29.03.2007 № 239

Акт
рабочей комиссии о приемке в постоянну эксплуатацию
алгоритма регулирования степени насыщения абсорбента на установке получения NaCN после комплексного опробования на рабочих средах в режиме опытной эксплуатации

Рабочая комиссия в составе:
Председатель – директор службы ПЭБОТ Т.В. Рудакова
Члены комиссии:
Главный метролог В.А. Попов
Начальник ОА и АСУТП П.В. Шиповаленко
установила:

1. Цехом 22 предъявлен к приемке алгоритм регулирования степени насыщения абсорбента на установке получения NaCN после комплексного опробования на рабочих средах в режиме опытной эксплуатации.
2. Комплексное опробование алгоритма проводилось с 25.03.07 г. по 28.03.07 г.
3. В процессе комплексного опробования алгоритма произведена его отладка.

Решение рабочей комиссии:

алгоритм регулирования степени насыщения абсорбента на установке получения NaCN показал хорошее качество регулирования процесса, повысил качественные показатели продукта на выходе технологической установки, тем самым достигнута экономия сырья.
Алгоритм регулирования степени насыщения абсорбента на установке получения NaCN прошедший комплексное опробование в режиме опытной эксплуатации, считать принятым в промышленную эксплуатацию с 29.03.2007 г.

Председатель комиссии Т.В. Рудакова

Члены комиссии: В.А. Попов

П.В. Шиповаленко

404117, Россия, Волгоградская область, г. Волжский, ул. Александрова, 100, ИНН 3435900563
Справка (8443) 22-57-37, факс (8443) 25-74-44, Телетайп 310124 "ЛОТОС"
E-mail: mail@zos-v.ru, Интернет: www.zos-v.ru