

На правах рукописи



БАБЕНКОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ И РЕГУЛЯТОРОВ
СОСТОЯНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭКСТРАКЦИОННОЙ
ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ)**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Старооскольском технологическом институте
им. А.А. Угарова (филиале) ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент
Кривонос Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты:

Лабутин Александр Николаевич
доктор технических наук, профессор,
Ивановский государственный химико-
технологический университет,
заведующий кафедрой технической кибернетики и
автоматики

Бажанов Александр Геральдович
кандидат технических наук,
Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова,
доцент кафедры технической кибернетики

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО «Российский химико-
технологический университет имени Д.И.
Менделеева»**

Защита диссертации состоится « __ » _____ 2016 года в __ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.132.13 при ФГАОУ ВПО Национальный
исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119049,
Москва, Ленинский проспект, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС» и на сайте НИТУ
«МИСиС» (www.misis.ru).

Автореферат разослан « __ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Лычев Андрей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень ее разработанности. Автоматизация непрерывных технологических процессов (ТП), выходы которых определяются в результате лабораторного анализа, вызывает ряд проблем, обусловленных отсутствием информации о поведении объекта в промежутках времени между измерениями. В современных автоматизированных системах управления (АСУ) такими процессами осуществляется автоматический контроль и стабилизация заданных расходов входных потоков или их соотношений. Формирование же для реализованных контуров управления «уставок», обеспечивающих выход ТП на регламентный режим и его стабилизацию, осуществляет оператор технологического процесса. Качество управления в таких АСУ ТП и, следовательно, эффективность производства существенно зависят от квалификации и опыта оператора. Выбор рациональных управляющих воздействий зачастую осложняется следующими факторами: высокой инерционностью и многомерностью объекта, большим периодом отбора проб для лабораторного анализа, высокой чувствительностью показателей эффективности к резким изменениям технологических параметров, наличием существенных погрешностей в показаниях некоторых расходомеров.

Существенный вклад в исследование, моделирование и создание систем управления сложными технологическими процессами внесли ученые: В.В. Кафаров, В.Б. Земельман, Р. Турсунходжаев, А.А. Гафуров, Э.М. Кольцова, А.Ф. Егоров, Ф.А. Туляганов, Ф.С. Мусаев, Р.Х. Аюпов, А.Н. Лабутин, Е.В. Ерофеева, В.С. Кудряшов, М.В. Мееров, С.В. Хилэкос (St. W. Hilakos) и др. Вопросам построения наблюдателей и регуляторов состояния динамических систем посвящены работы Р. Калмана, К. Браммера, С.К. Коровина, В.В. Фомичева, Н.Т. Кузовкова, С.А. Красновой, В.А. Уткина, В.В. Тютикова, С.В. Тарарыкина, Б.Т. Федосова. Теории и практике промышленных компьютерных тренажеров посвящены работы В.М. Дозорцева, Т.Б. Чистяковой, Д.В. Кнеллера, О.В. Ершовой, Н.В. Шестакова.

Однако в их трудах в недостаточной мере раскрыты вопросы реализации в составе действующих АСУ ТП системы контроля и управления технологическими параметрами с использованием наблюдателей и регуляторов состояния динамических объектов, а также программных тренажеров для повышения квалификации операторов ТП. В связи с этим актуальной является научно-техническая задача повышения эффективности управления сложными технологическими процессами путем более точного поддержания регламентных режимов, что позволяет рациональнее использовать сырье и энергию, а также снизить процент брака в продукции.

Целью работы является разработка системы непрерывного контроля и управления состоянием технологического процесса, выходы которого измеряются с большим периодом дискретности, а также проработка вопросов практической реализации такой системы в составе действующей АСУ ТП на примере производства экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК).

Задачи исследования. Для достижения поставленной в работе цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ состояния проблем контроля и управления непрерывными технологическими процессами рассматриваемого класса;
- разработать многосвязную динамическую математическую модель ТП производства ЭФК;

- построить наблюдатели состояния (НС) объекта управления;
- синтезировать сепаратные контуры управления технологическими параметрами на основе регуляторов состояния (РС);
- разработать многосвязную систему контроля и управления технологическими параметрами;
- интегрировать разработанную систему контроля и управления в действующую АСУ ТП производства экстракционной фосфорной кислоты;
- разработать программный тренажер оператора ТП и реализовать его в составе действующей АСУ ТП;
- исследовать повышение эффективности управления ТП на основе экспериментальных данных производства экстракционной фосфорной кислоты.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Подход к математическому описанию рассматриваемого класса технологических объектов, основанный на использовании в структуре модели нелинейного статического блока, содержащего уравнения материального баланса ТП, и линейных динамических звеньев, отражающих динамику протекающих процессов.

2. Многосвязная динамическая математическая модель процесса производства ЭФК в полугидратном режиме, состоящая из матрицы передаточных функций локальных каналов формирования концентрационных характеристик и уровня пульпы в экстракторе, а также матрицы перекрестных связей объекта в установившемся режиме, является основой для построения системы контроля и управления состоянием технологического процесса.

3. Непрерывно-дискретный НС, формирующий оценки координат состояния объекта и низкочастотных трендов возмущающих воздействий и разработанный на основе математической модели объекта в пространстве состояний (дифференциальных уравнений первого порядка, связывающих переменные входа, выхода и состояния), формирует непрерывные оценки по непрерывным измерениям входных сигналов, при этом дискретные измерения значений выходных сигналов позволяют сформировать короткие корректирующие импульсы, управляющие приближением наблюдателя к реальной траектории движения динамической системы.

4. Подход к адаптации матрицы коррекции, основанный на использовании в процессе наблюдения нескольких наборов коэффициентов при неизменной структуре НС, повышает быстродействие наблюдателя и уменьшает чувствительность его оценок к погрешностям измерений в установившемся режиме на величину, заданную при настройке коэффициентов коррекции.

5. Многосвязная система контроля и управления технологическими параметрами, включающая в себя сепаратные контуры стабилизации и матрицу перекрестных связей между регуляторами, формирует значения «уставок» для реализованных в АСУ ТП контуров управления расходами входных потоков с учетом компенсации взаимного влияния локальных каналов управления и с целью стабилизации процесса в регламентном режиме.

6. На основе разработанной математической модели, имитирующей динамику ТП, и многосвязной системы контроля и управления технологическими параметрами, формирующей рекомендации по рациональному управлению процессом, разработан обучающий тренажер оператора ТП производства ЭФК, включающий блок оптимального управления и формирующий у операторов навыки рационального управления процессом без традиционного привлечения эксперта по управлению.

Научная новизна

1. Построена многосвязная динамическая математическая модель процесса экстракции фосфорной кислоты в виде совокупности локальных каналов формирования технологических параметров и матрицы перекрестных связей объекта. Модель отличается от существующих математических описаний данного процесса структурой и ориентированностью на разработку на ее основе многосвязной системы контроля и управления технологическими параметрами, а также программного тренажера оператора ТП.

2. Разработан непрерывно-дискретный НС, представляющий собой описание объекта в пространстве состояний с расширенным вектором оцениваемых координат и канал коррекции с использованием импульсного элемента и коэффициента усиления импульсов. В отличие от традиционных непрерывного или дискретного вариантов разработанный НС: а) формирует непрерывную оценку состояния технологического объекта, а также входных возмущений, используя непрерывные измерения входных сигналов и дискретные данные лабораторного анализа; б) параметры матрицы коррекции адаптируются в процессе наблюдения, что сокращает время выхода оценок наблюдателя в окрестности истинных значений координат состояния объекта и уменьшает чувствительность к погрешностям измерений выходов.

3. Синтезирована многосвязная система контроля и управления технологическими параметрами. Особенностью системы является то, что в ней используется полная информация о состоянии объекта и входных возмущений от НС, а РС в сепаратных контурах реализуют принцип модального управления, обеспечивающий желаемый вид переходных процессов.

Теоретическая значимость работы состоит в: разработке общего подхода к построению структуры и определению параметров математических моделей рассматриваемого класса технологических объектов для целей управления; разработке непрерывно-дискретного наблюдателя состояния для непрерывного контроля текущего состояния объекта, выходы которого измеряются в дискретные моменты времени с большим периодом дискретности; подходе к адаптации матрицы коррекции в процессе наблюдения; структуре и алгоритме функционирования многосвязной системы контроля и управления технологическими параметрами на основе наблюдателей и регуляторов состояния; структуре и алгоритме функционирования программного тренажера для обучения операторов ТП.

Практическая значимость работы. Предложенные в работе модели и алгоритмы реализованы в виде специального программно-технического комплекса и ориентированы на практическое использование в составе действующей АСУ ТП промышленного производства, а также на локальных компьютерных станциях для обучения операторов ТП.

Использование результатов работы для решения прикладных задач обучения оперативного персонала и непосредственного управления промышленным производством позволяет повысить его эффективность за счёт более рационального использования сырья при сохранении регламентного качества продукции.

Методология и методы исследования. В работе использованы методы математического моделирования динамических систем, методы современной теории автоматического управления, методы имитационного моделирования.

Методологическую и теоретическую основу диссертационной работы составили научные труды отечественных и зарубежных авторов в области теории экстракции фосфорной кислоты, моделирования сложных технологических процессов, теории непрерывных и дискретных асимптотических наблюдателей, автоматического управления, модального управления, создания компьютерных тренажерных систем.

Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается строгостью использования математических методов, результатами моделирования объекта и системы контроля и управления с помощью специализированного ПО Simulink Matlab и языка программирования C++, совпадением экспериментальных данных с результатами имитационного моделирования при оценке адекватности модели, положительными отзывами о внедрении и эксплуатации разработанного тренажера, положительными результатами испытания системы контроля и управления в информационно-советующем режиме.

Реализация и внедрение результатов работы. Реализованный программный тренажер оператора ТП используется в процессе обучения операторов-технологов отделения ЭФК-3,4 ООО «Балаковские минеральные удобрения» (ООО «БМУ») с 2013 года.

Основные практические результаты, полученные при разработке многосвязной системы контроля и управления технологическими параметрами процесса экстракции фосфорной кислоты, прошли испытания и рекомендованы к внедрению в Балаковском филиале АО «Апатит».

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиала) ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» в дисциплинах «Моделирование систем и процессов» и «Проектирование систем управления».

Апробация результатов.

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 10 международных и всероссийских научно-технических конференциях: «Современные научные достижения» (Чехия, Прага, 2013 г.); «Научная мысль информационного века» (Польша, г. Перемышль, 2014 г.); «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2014» (г. Севастополь, 2014 г.); «Последние тенденции в области науки и технологий управления» (Великобритания, г. Лондон, 2014 г.); «Информационные системы и технологии» (Украина, г. Харьков, 2014 г.); «Наукоемкие технологии и инновации» (г. Белгород, 2014 г.); «Наука, образование, общество: проблемы и перспективы развития» (г. Тамбов, 2015 г.); IX, X, XI всероссийских научно-практической конференциях с международным участием (г. Старый Оскол, 2013-2014 г.г.).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 17 научных работах, в том числе 3 статьях в рецензируемых научных журналах и 2 свидетельствах о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объемы работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 124 наименований, содержит 55 рисунков и 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы исследования, представлены основные результаты работы, определены их научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведено краткое содержание работы по главам, определены приоритетные направления повышения эффективности управления ТП, поставлена цель и обозначены задачи исследования.

В первой главе выполнен обзор особенностей управления сложными технологическими процессами, проблем контроля и управления процессом экстракции фосфорной кислоты и существующих подходов к их решению.

ТП производства ЭФК относится к категории непрерывных процессов и состоит из трех основных стадий: 1) разложение фосфата серной кислотой в присутствии раствора разбавления; 2) кристаллизация сульфата кальция; 3) разделение образуемой пульпы на продукционную кислоту и фосфогипс.

Степень перехода P_2O_5 из апатита в фосфорную кислоту оценивается коэффициентом выхода $K_{вых}$, который является одним из основных показателей эффективности производства и вычисляется по формуле

$$K_{вых} = (K_{раз} \times K_{отм}) / 100, \quad (1)$$

где $K_{раз}$ – коэффициент разложения апатита (%);

$K_{отм}$ – коэффициент отмывки фосфогипса (%).

Управление процессом заключается в стабилизации технологических параметров в регламентном режиме, что создает оптимальные условия для практически полного разложения апатита с формированием малорастворимого осадка с наилучшими фильтрующими свойствами. Выход технологических показателей за рамки технологического регламента резко ухудшает процессы экстракции и фильтрации.

Анализ технологического объекта управления (ОУ) позволил выделить входные и выходные переменные, которые отражены на рисунке 1.

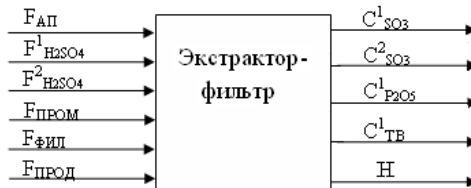


Рис.1. Модель ОУ производства ЭФК,

где $F_{АП}$ – расход апатита, т/ч; $F^1_{H_2SO_4}$ – расход H_2SO_4 на входе в 1-й бак экстрактора, $м^3/ч$; $F^2_{H_2SO_4}$ – расход H_2SO_4 на входе во 2-й бак экстрактора, $м^3/ч$; $F_{ФИЛ}$ – расход пульпы на выходе из экстрактора, $м^3/ч$; $F_{ПРОМ}$ – расход промывочной воды, $м^3/ч$; $F_{ПРОД}$ – расход продукционной кислоты, $м^3/ч$; $C^1_{SO_3}$, $C^2_{SO_3}$ – концентрация SO_3 в фильтрате пульпы 1-го и 2-го реакторов соответственно, г/дм³; $C^1_{P_2O_5}$ – массовая доля P_2O_5 в фильтрате пульпы первого реактора, %; $C^1_{ТВ}$ – концентрация твердого вещества в пульпе первого реактора, %; H – уровень пульпы от крышки экстрактора, м.

Действующие в настоящее время АСУ ТП производств ЭФК осуществляют автоматический контроль и стабилизацию заданных расходов материальных потоков. Кроме того, действующие АСУ ТП эффективно осуществляет автоматическую стабилизацию температуры пульпы в экстракторе за счет регулирования расхода воздуха на линии подачи в аппарат воздушного охлаждения или изменения вакуума в вакуум-испарителе. Расход апатита $F_{АП}$ определяет производительность

технологической линии и выбирается, исходя из наличия сырья и пропускной способности фильтров.

Выбор «уставок» для контуров управления расходами остальных материальных потоков с целью стабилизации желаемых значений концентрационного состава и уровня пульпы в экстракторе осуществляет оператор ТП на основе анализа технологической ситуации. Задача управления осложнена многосвязностью и нелинейностью объекта, отсутствием непрерывного контроля выходных величин, наличием систематических погрешностей в показаниях расходомеров управляемых потоков вследствие отложения инкрустированных осадков на чувствительных элементах средств измерения. Поэтому определение рациональных «уставок» по всем управляемым потокам участка «экстрактор-фильтр» для оперативного персонала требует глубокого понимания технологического процесса, длительного обучения и стажировки под руководством опытных, высококвалифицированных наставников.

С целью повышения эффективности управления технологическим процессом промышленного производства в данной диссертационной работе разрабатывается многосвязная система контроля и управления технологическими параметрами, а также программный тренажер оператора ТП.

Во второй главе разработана многосвязная динамическая математическая модель процесса экстракции фосфорной кислоты в полугидратном режиме. Построение модели выполнено в несколько этапов: 1) разработка нелинейной модели формирования концентрационных характеристик пульпы; 2) линеаризация разработанной модели в окрестностях номинального режима; 3) разработка линейной модели изменения уровня пульпы в экстракторе; 4) составление матрицы перекрестных связей объекта; 5) построение многосвязной динамической математической модели путем объединения линеаризованной модели формирования концентрационных характеристик пульпы, линейной модели изменения уровня пульпы и матрицы перекрестных связей объекта.

Структурная схема нелинейной модели формирования концентрационных характеристик пульпы представлена на рисунке 2.

Выходы нелинейного статического блока формирования концентрационного состава пульпы в установленном режиме вычисляются по формулам:

$$C_{SO_3}^{1_UCT} = \frac{F_{ЖФ}^{PP} \cdot C_{SO_3}^2 + 1000 \cdot (F_{H_2SO_4}^1 \cdot d_{H_2SO_4} \cdot 0,01 \cdot C_{H_2SO_4} \cdot 80/98 - F_{АП} \cdot \Delta W_{SO_3}^1)}{F_{ЖФ}^{PP} + F_{ВОД}^{PP} + F_{H_2SO_4}^1 - F_{ИСП}^1 - F_{АП} \cdot \Delta V_{ЖФ}^1}, \quad (2)$$

$$C_{P_2O_5}^{1_UCT} = \frac{F_{ЖФ}^{PP} \cdot d_{ЖФ} \cdot C_{P_2O_5}^2 + 100 \cdot F_{АП} \cdot \Delta W_{P_2O_5}^1}{F_{ЖФ}^{PP} \cdot d_{ЖФ} + F_{ВОД}^{PP} + F_{H_2SO_4}^1 \cdot d_{H_2SO_4} - F_{ИСП}^1 - F_{АП} \cdot \Delta W_{ЖФ}^1}, \quad (3)$$

$$C_{ТВ}^{1_UCT} = \frac{F_{АП} \cdot (1 + \Delta W_{ТВ}^1)}{F_{ЖФ}^{PP} \cdot d_{ЖФ} + F_{ВОД}^{PP} + F_{АП} + F_{H_2SO_4}^1 \cdot d_{H_2SO_4} - F_{ИСП}^1} \cdot 100, \quad (4)$$

где $F_{ЖФ}^{PP}$ и $F_{ВОД}^{PP}$ - расходы в раствор разбавления жидкой фазы пульпы и воды соответственно;

$d_{H_2SO_4}$ и $C_{H_2SO_4}$ - плотность и концентрация серной кислоты;

$\Delta W_{SO_3}^1$, $\Delta W_{P_2O_5}^1$, $\Delta W_{ТВ}^1$ - изменение массы SO_3 , P_2O_5 и твердого вещества соответственно при разложении одной тонны апатита и кристаллизации фосфополугидрата в 1-ом реакторе;

$\Delta V_{ЖФ}^1$ - изменение объема жидкой фазы при разложении одной тонны апатита и кристаллизации фосфополугидрата в 1-ом реакторе;

$d_{\text{жф}}$ – плотность жидкой фазы пульпы;

$F^1_{\text{исп}}, F^2_{\text{исп}}$ – испарения воды в 1-ом и 2-ом реакторах экстрактора.

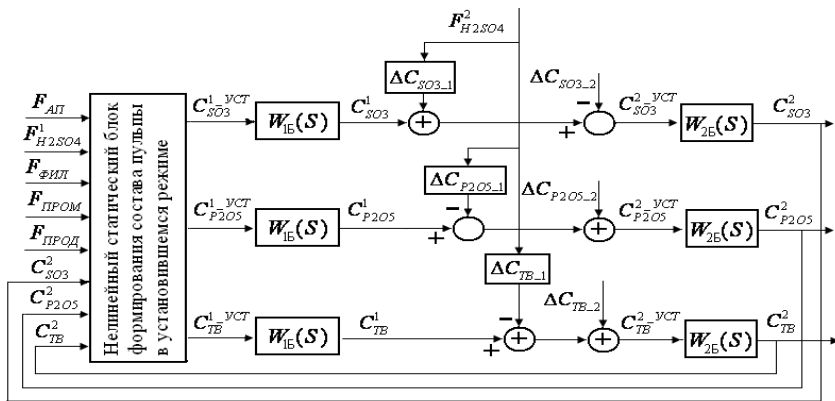


Рис. 2. Структурная схема нелинейной модели формирования концентрационного состава пульпы в двухсекционном экстракторе,

где $\Delta C_{\text{SO}_3,1}$, $\Delta C_{\text{P}_2\text{O}_5,1}$, $\Delta C_{\text{TB},1}$ – изменение концентрационного состава пульпы, вызванное подачей 1 м³/ч H₂SO₄ во 2-й реактор; $\Delta C_{\text{SO}_3,2}$, $\Delta C_{\text{P}_2\text{O}_5,2}$, $\Delta C_{\text{TB},2}$ – изменение концентрационного состава пульпы при завершении процесса кристаллизации; $C^1_{\text{SO}_3}$, $C^1_{\text{P}_2\text{O}_5}$, C^1_{TB} , $C^2_{\text{SO}_3}$, $C^2_{\text{P}_2\text{O}_5}$, C^2_{TB} – текущие значения концентрационных характеристик пульпы в 1-ом и 2-ом реакторах соответственно; $C^1_{\text{уст}}_{\text{SO}_3}$, $C^1_{\text{уст}}_{\text{P}_2\text{O}_5}$, $C^1_{\text{уст}}_{\text{TB}}$, $C^2_{\text{уст}}_{\text{SO}_3}$, $C^2_{\text{уст}}_{\text{P}_2\text{O}_5}$, $C^2_{\text{уст}}_{\text{TB}}$ – расчетные значения концентрационного состава пульпы в 1-ом и 2-ом реакторах экстрактора в установившемся режиме; $W_{1Б}(s)$ и $W_{2Б}(s)$ – передаточные функции первого и второго реакторов экстрактора соответственно.

Соотношения (2) – (4) отражают материальный баланс по SO₃, P₂O₅ и твердой фазе в пульпе 1-го бака экстрактора в результате реакции разложения апатита.

Формулы для вычисления значений концентрационных характеристик пульпы на выходе из 2-го реактора в установившемся режиме:

$$C^2_{\text{уст}}_{\text{SO}_3} = C^1_{\text{SO}_3} + \Delta C_{\text{SO}_3,1} \cdot F^2_{\text{H}_2\text{SO}_4} - \Delta C_{\text{SO}_3,2}, \quad (5)$$

$$C^2_{\text{уст}}_{\text{P}_2\text{O}_5} = C^1_{\text{P}_2\text{O}_5} - \Delta C_{\text{P}_2\text{O}_5,1} \cdot F^2_{\text{H}_2\text{SO}_4} + \Delta C_{\text{P}_2\text{O}_5,2}, \quad (6)$$

$$C^2_{\text{уст}}_{\text{TB}} = C^1_{\text{TB}} - \Delta C_{\text{TB},1} \cdot F^2_{\text{H}_2\text{SO}_4} + \Delta C_{\text{TB},2}. \quad (7)$$

Значения $\Delta W^1_{\text{SO}_3}$, $\Delta W^1_{\text{P}_2\text{O}_5}$, ΔW^1_{TB} и $\Delta V^1_{\text{жф}}$ получены в результате статистической обработки экспериментальных данных отделения ЭФК-3,4 ООО «БМУ».

Линеаризация нелинейной модели формирования концентрационных характеристик пульпы выполнена в окрестностях номинального режима по каналам формирования концентрации SO₃, P₂O₅ и твердого вещества. Модель изменения уровня Н пульпы в экстракторе описывается реальным интегрирующим звеном, параметры которого получены по геометрическим размерам двух баков экстрактора.

Локальными управляющими воздействиями v_i каждого из каналов формирования концентрационных характеристик пульпы, а также уровня пульпы в экстракторе являются линейные комбинации реальных управляющих воздействий, составляющих вектор $U_1 = (\Delta F^1_{\text{H}_2\text{SO}_4}, \Delta F_{\text{Фил}}, \Delta F_{\text{ПРОМ}}, \Delta F_{\text{ПРОД}})^T$. Необходимо отметить, что в вектор U_1 не включено управляющее воздействие $\Delta F^2_{\text{H}_2\text{SO}_4}$, которое используется в автономном

контуре стабилизации $C_{\text{SO}_3}^2$, так как его действие практически не сказывается на формировании $C_{\text{P}_2\text{O}_5}^1$, C_{TB}^1 , а его влияние на $C_{\text{SO}_3}^1$ и ΔH компенсируется отдельно. Связь вектора локальных $V=(v_1, v_2, v_3, v_4)^T$ управляющих воздействий с вектором U_1 описывается матрицей G перекрестных связей объекта в установившемся режиме

$$V=G \cdot U_1. \quad (8)$$

Составляющими матрицы G являются статические коэффициенты усиления линейных моделей формирования концентрационных характеристик первого бака и уровня пульпы в экстракторе.

Таким образом, многосвязная динамическая математическая модель процесса экстракции фосфорной кислоты состоит из 4-х локальных каналов формирования технологических параметров и матрицы перекрестных связей объекта G . Входами модели являются отклонения расходов управляемых потоков от их значений в номинальном режиме ($\Delta F_{\text{H}_2\text{SO}_4}^1$, $\Delta F_{\text{H}_2\text{SO}_4}^2$, $\Delta F_{\text{Фил}}$, $\Delta F_{\text{ПРОМ}}$, $\Delta F_{\text{ПРОД}}$), выходами – отклонения ($\Delta C_{\text{SO}_3}^1$, $\Delta C_{\text{SO}_3}^2$, $\Delta C_{\text{P}_2\text{O}_5}^1$, ΔC_{TB}^1) концентрационных характеристик пульпы в 1-ом и 2-ом баках, а также уровня пульпы в экстракторе (ΔH) от номинальных значений. Структурная схема линейаризованной многосвязной динамической математической модели процесса экстракции фосфорной кислоты в полугидратном режиме представлена на рисунке 3.

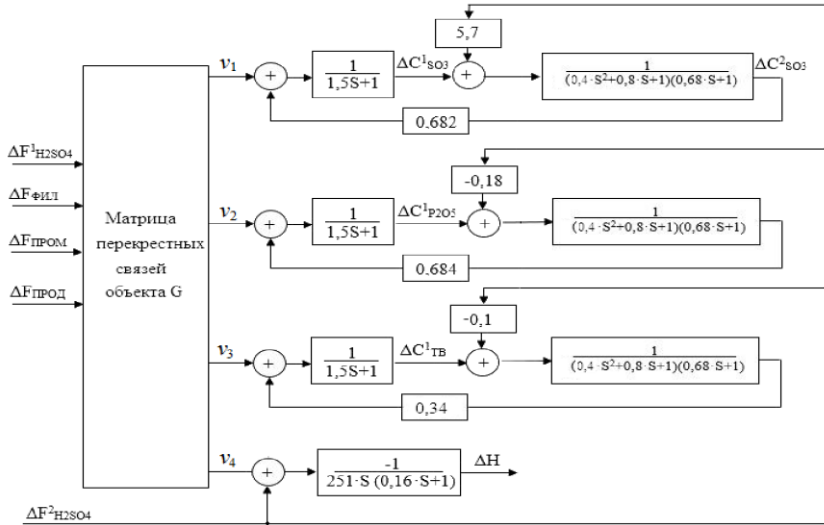


Рис. 3. Структурная схема линейаризованной многосвязной динамической математической модели процесса экстракции

Многосвязная динамическая математическая модель процесса экстракции фосфорной кислоты в полугидратном режиме в матричной форме имеет вид

$$Y(s) = W(s) \cdot (G \cdot U_1(s)) = W(s) \cdot V(s), \quad (9)$$

где $W(s)$ – матрица передаточных функций (ПФ); $Y(s) = (\Delta C_{\text{SO}_3}^1, \Delta C_{\text{P}_2\text{O}_5}^1, \Delta C_{\text{TB}}^1, \Delta H)^T$.

Матрица $W(s)$ состоит из ПФ локальных каналов и имеет вид

$$W(s) = \begin{pmatrix} W_1(s) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_2(s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_3(s) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_4(s) \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\text{где } W_1(s) = \frac{0,272s^3 + 0,944s^2 + 1,48s + 1}{0,408s^4 + 1,68s^3 + 3,164s^2 + 2,98s + 0,318} - \text{ПФ канала } v_1 \rightarrow \Delta C^1_{\text{SO}_3};$$

$$W_2(s) = \frac{0,272s^3 + 0,944s^2 + 1,48s + 1}{0,408s^4 + 1,68s^3 + 3,164s^2 + 2,98s + 0,318} - \text{ПФ канала } v_2 \rightarrow \Delta C^1_{\text{P}_2\text{O}_5};$$

$$W_3(s) = \frac{0,272s^3 + 0,944s^2 + 1,48s + 1}{0,408s^4 + 1,68s^3 + 3,164s^2 + 2,98s + 0,76} - \text{ПФ канала } v_3 \rightarrow \Delta C^1_{\text{TB}};$$

$$W_4(s) = -\frac{1}{40,16s^2 + 251s} - \text{ПФ канала } v_4 \rightarrow \Delta \text{H}.$$

Проверка разработанной модели на экспериментальных данных о функционировании отделения ЭФК-3,4, имеющихся в архиве распределенной системы управления Centum CS 3000 ООО «БМУ», подтвердила ее адекватность.

В третьей главе разработан непрерывно-дискретный НС, а также синтезирована многосвязная система контроля и управления на основе наблюдателей и регуляторов состояния динамического объекта.

В рамках данной главы диссертационной работы для динамической системы разработан непрерывно-дискретный наблюдатель, непрерывно оценивающий текущее значение вектора координат состояния $X(t)$ и низкочастотные тренды вектора возмущения $F(t)$ по непрерывным измерениям управляющих воздействий $U(t)$ и данным контроля выхода $Y(t)$, получаемым в дискретные моменты времени.

Для построения непрерывно-дискретного наблюдателя координат состояния используется описание объекта в пространстве состояний в виде системы уравнений

$$\begin{cases} X'(t) = A \cdot X(t) + B \cdot U(t) + D \cdot F(t); \\ Y(t) = C \cdot X(t), \end{cases} \quad (11)$$

где $X(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T$ – вектор координат состояния;

$U(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_r(t))^T$ – вектор управляющих воздействий;

$F(t) = (f_1(t), f_2(t), \dots, f_p(t))^T$ – вектор возмущающих воздействий;

$Y(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t))^T$ – вектор измеряемых выходных сигналов;

A – $n \times n$ матрица состояния;

B – $n \times r$ матрица управления;

D – $n \times p$ матрица возмущения;

C – $m \times n$ матрица выхода объекта.

Учитывая, что поставлена задача восстановления не только координат состояния $X(t)$, но и возмущений $F(t)$, составляющие $F(t)$ включены в вектор $\hat{X}(t)$ оцениваемых

наблюдателем координат $\hat{X}(t) = (\hat{x}_1(t), \dots, \hat{x}_n(t), \hat{f}_1(t), \dots, \hat{f}_p(t))^T$. Символом " \wedge " обозначены оценки соответствующих сигналов. Для задач контроля и управления основной интерес представляют низкочастотные возмущения, поэтому с целью определения именно таких трендов возмущений в модели наблюдателя полагается, что скорости изменения всех оцениваемых $\hat{f}_i(t)$ равны нулю

$$\frac{d\hat{f}_i(t)}{dt} = 0 \quad \forall i = \overline{1, p} \quad (12)$$

Уравнения традиционного непрерывного НС в матричной форме имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \hat{X}'(t) = A_H \cdot \hat{X}(t) + B_H \cdot U(t) + K \cdot \Delta Y(t); \\ \hat{Y}(t) = C_H \cdot \hat{X}(t), \end{cases} \quad (13)$$

где $A_H - (n+p) \times (n+p)$ матрица состояния наблюдателя;

$B_H - (n+p) \times r$ расширенная матрица управления;

$K - (n+p) \times m$ матрица коррекции;

$\Delta Y(t) = Y(t) - \hat{Y}(t)$ - вектор рассогласования между выходом объекта $Y(t)$ и оценкой $\hat{Y}(t)$ этого выхода наблюдателем;

$C_H - m \times (n+p)$ матрица выхода наблюдателя.

Вектор $\Delta Y(t)$ в непрерывном наблюдателе определен в каждый момент времени, что позволяет постоянно корректировать оценки координат состояния по результатам измерения выхода $Y(t)$. Однако в ситуации, когда измерение выходов объекта производится с периодом дискретности T_H , коррекцию движения наблюдателя необходимо осуществлять именно в эти моменты, используя короткие корректирующие импульсы $\lambda \cdot \Delta Y(t)$, длительность τ которых значительно меньше T_H :

$$\Delta Y(t) = \begin{cases} Y(t) - \hat{Y}(t) & \text{при } j \cdot T_H \leq t \leq j \cdot T_H + \tau, (j = 0, 1, 2, \dots); \\ 0 & \text{при } j \cdot T_H + \tau < t < (j+1) \cdot T_H, (j = 0, 1, 2, \dots). \end{cases} \quad (14)$$

Коэффициент λ усиления импульсов коррекции выбирается так, чтобы обеспечить необходимую скорость процесса наблюдения.

Непрерывные оценки координат состояния в непрерывно-дискретном наблюдателе на интервалах времени между импульсами формируются на основе измеряемого управления $U(t)$ и математической модели объекта. В моменты поступления данных лабораторного анализа $Y(t)$ срабатывает канал коррекции, изменяющий оценки наблюдателя с целью приближения их к истинным значениям соответствующих координат объекта.

Для каналов формирования концентрационных характеристик пульпы разработаны и настроены непрерывно-дискретные НС, а для канала изменения уровня пульпы – традиционный непрерывный НС. Полученные наблюдатели для каждого момента времени формируют оценки текущих значений координат состояния объекта, в перечень которых включены низкочастотные тренды возмущающих воздействий. Такой контроль состояния объекта позволяет синтезировать замкнутую систему управления непрерывного действия.

Многосвязная система контроля и управления технологическими параметрами процесса должна обеспечивать выход ТП из любого возможного начального состояния на регламентный режим и стабилизацию этого режима в условиях действия входных возмущающих воздействий $f_i(t)$. При этом, учитывая технологические особенности процесса экстракции фосфорной кислоты, переходные процессы в системе должны быть плавными, без резких изменений. Синтез многосвязной системы контроля и управления технологическими параметрами состоит в разработке и настройке сепаратных контуров управления, а также компенсации перекрестных связей между локальными регуляторами.

Сепаратные контуры построены на основе наблюдателей и регуляторов состояния, которые вырабатывают локальные управляющие воздействия $v_i(t)$ для стабилизации «своей» управляемой величины. Настройка РС выполнена по принципу модального управления с использованием полученных выше моделей локальных

каналов формирования технологических параметров. При этом вектор коэффициентов усиления регулятора R вычисляется из соотношения

$$R \cdot L(s) = M(s) - G(s), \quad (15)$$

где $L(s)$ – $n \times 1$ вектор-столбец числителей передаточных функций;

$M(s)$ – стандартная форма «желаемого» характеристического уравнения;

$G(s)$ – характеристический полином объекта.

Наиболее приемлемый характер переходных процессов для стабилизации концентрационных характеристик пульпы был достигнут, когда характеристический полином замкнутого контура управления имел биномиальную стандартную форму.

Схема контура управления с регулятором состояния приведена на рисунке 4.

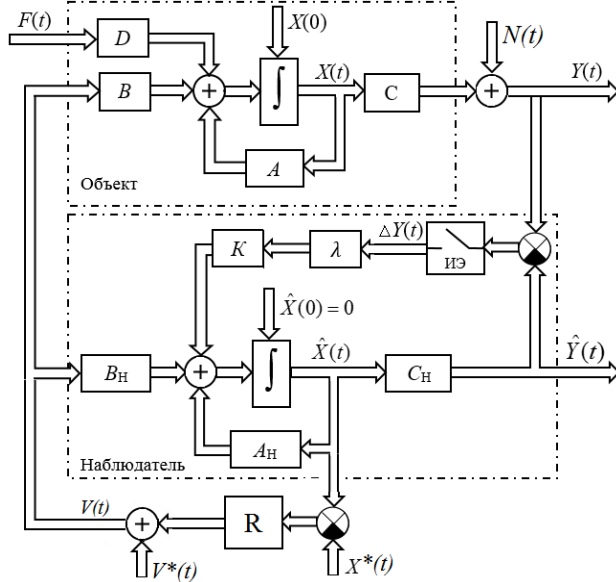


Рис. 4. Структурная схема отдельного контура управления на основе непрерывно-дискретного НС и РС,

где R – матрица коэффициентов регулятора; $X^*(t)$ – вектор желаемых значений координат состояния; $V^*(t)$ – вектор значений локальных управляющих воздействий, обеспечивающих в статике значения координат состояния объекта, равные $X^*(t)$; $N(t)$ – вектор погрешностей лабораторного анализа.

Качество управления РС сравнивалось с альтернативным вариантом – типовыми промышленными ПИ-регуляторами, первоначальная настройка которых выполнена по методу Зиглера-Николса, а окончательная – с использованием моделирования работы контура в среде Matlab и численных методов оптимизации по обобщенному квадратичному критерию

$$J_{21} = \int_0^{\infty} (e^2(t) + \tau^2 \cdot \dot{e}^2(t)) dt \rightarrow \min, \quad (16)$$

где $e(t)$ и $\dot{e}(t)$ – величина рассогласования между желаемым и модельным значением выхода системы и скорость ее изменения соответственно;

τ – постоянная величина, определяющая вес скорости изменения параметра.

В диссертационной работе выполнено многократное моделирование функционирования всех контуров управления с РС и типовыми промышленными ПИ-регуляторами в условиях действия входного возмущающего воздействия $f(t)$ и наличия погрешностей лабораторного анализа $p(t)$. На последовательностях полученных данных оценивались дисперсии стабилизируемых величин. Результаты моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты сравнительного анализа функционирования
сепаратных контуров управления

Регулятор	Метод настройки	Дисперсия D_i выходных величин					Оценка J_{21}
		$C_{SO_3}^1$	$C_{SO_3}^2$	$C_{P_{2O_5}}^1$	C_{TV}^1	Н	
Регулятор состояния	Модальное управление	2,04	2,02	0,31	0,25	0,023	4,4-8,9
Дискретный ПИ-регулятор	Зиглера-Николса, средства ПО Matlab	4,1	3,92	0,35	0,36	0,034	11,2-23,2

Анализ результатов показал, что во всех сепаратных контурах управления РС по всем показателям обеспечивают более высокое качество в сравнении с ПИ-регуляторами. При этом переходные процессы обладают высоким быстродействием и меньшей чувствительностью к погрешностям лабораторного анализа $p(t)$.

При синтезе системы управления многосвязным объектом выполнена компенсация перекрестных связей между локальными регуляторами. Для обеспечения расчетных режимов работы локальных контуров «уставка» вектора реальных расходов U^* определяется по формуле

$$U^* = G_R^{-1} V, \quad (17)$$

где $G_R = G^{-1}$ - матрица перекрестных связей между локальными регуляторами.

Исследования показали хорошую обусловленность (число обусловленности $\text{cond}(G) = 88,4992$) и невырожденность матрицы G , что позволило получить коэффициенты матрицы G_R .

На рисунке 5 приведена схема управления технологическим процессом экстракции фосфорной кислоты с использованием многосвязной системы контроля и управления и управления технологическими параметрами.

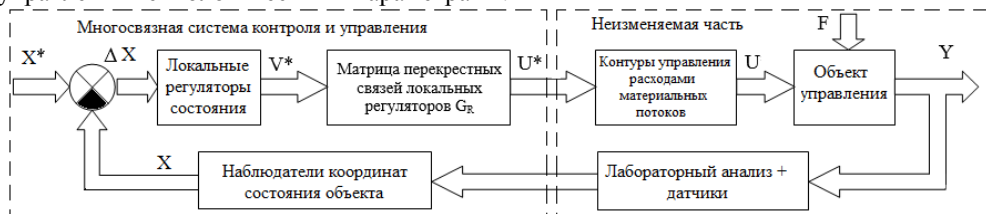


Рис. 5. Структурная схема управления исследуемым объектом

Результаты моделирования работы многосвязной системы контроля и управления технологическими параметрами в среде Simulink пакета Matlab показывают высокое качество управления. Графики переходных процессов из неблагоприятного начального состояния при включении системы в работу приведены на рисунке 6.

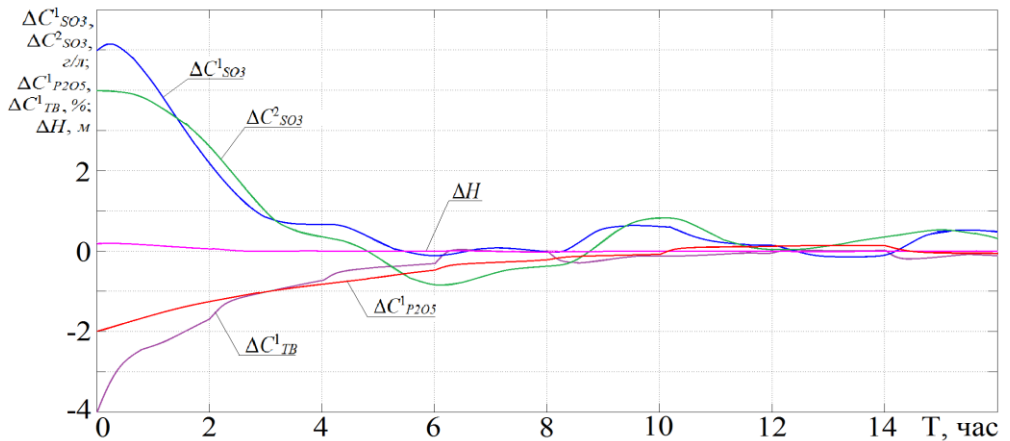


Рис. 6. Графики изменения технологических параметров процесса экстракции фосфорной кислоты

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы:

- практически за первые 6 часов работы процесс экстракции с исходными нарушениями технологического регламента стабилизируется в номинальном режиме;
- вырабатывается адекватная оценка возмущающего воздействия, которое компенсируется соответствующими управляющими воздействиями;
- в установившемся режиме в условиях действия возмущающего воздействия и наличия погрешностей измерения параметры процесса поддерживаются в окрестностях номинального режима, который гарантирует высокую эффективность производства;
- значения концентрационных характеристик пульпы, а также расходов материальных потоков при стабилизации процесса не имеют резких изменений.

При существующем подходе к управлению технологическими параметрами процесса экстракции фосфорной кислоты опытному оператору ТП требуется для выведения процесса в регламентный режим по всем параметрам в среднем 10-12 часов, после чего не исключены нарушения регламента.

В четвертой главе разработан программный тренажер, рассмотрены вопросы практической реализации многосвязной системы контроля и управления технологическими параметрами в составе действующей АСУ ТП производства ЭФК, а также тренажера оператора ТП. Оба направления позволяют повысить эффективность управления процессом при максимально возможном сохранении состава технического и программного обеспечения АСУ ТП. В данной главе также проведены экспериментальные исследования повышения эффективности управления ТП.

Структурная схема многосвязной системы контроля и управления, включающей подсистему наблюдения состояния объекта и подсистему стабилизации технологических параметров, в составе существующей АСУ ТП отделения ЭФК-3,4 представлена на рисунке 7.



Рис. 7. Структурная схема системы контроля и управления в составе существующей трехуровневой распределенной АСУ ТП

Работа подсистемы наблюдения состояния объекта основывается на обработке непрерывных данных, полученных от датчиков измерения уровня пульпы в экстракторе и расходов материальных потоков, а также дискретных данных лабораторного анализа пульпы, которые поступают в АСУ ТП из промышленной лаборатории посредством информационной сети предприятия.

Подсистема стабилизации технологических параметров выполняет расчет значений расходов управляемых материальных потоков и передает их станции управления участком в качестве «уставок».

Алгоритм функционирования многосвязной системы контроля и управления технологическими параметрами процесса производства ЭФК приведен на рисунке 8.

Система контроля и управления реализована на верхнем уровне АСУ ТП с использованием интерфейса станции инженера.

Экранная форма системы, которая включена в общую систему визуализации отделения ЭФК-3,4, разработана при помощи стандартного средства проектирования ПО Centum CS3000.

Разработанный программный тренажер реализован в составе действующей в отделении ЭФК-3,4 АСУ ТП на отдельной станции обучения.

Структурная схема тренажера имеет вид, представленный на рисунке 9.

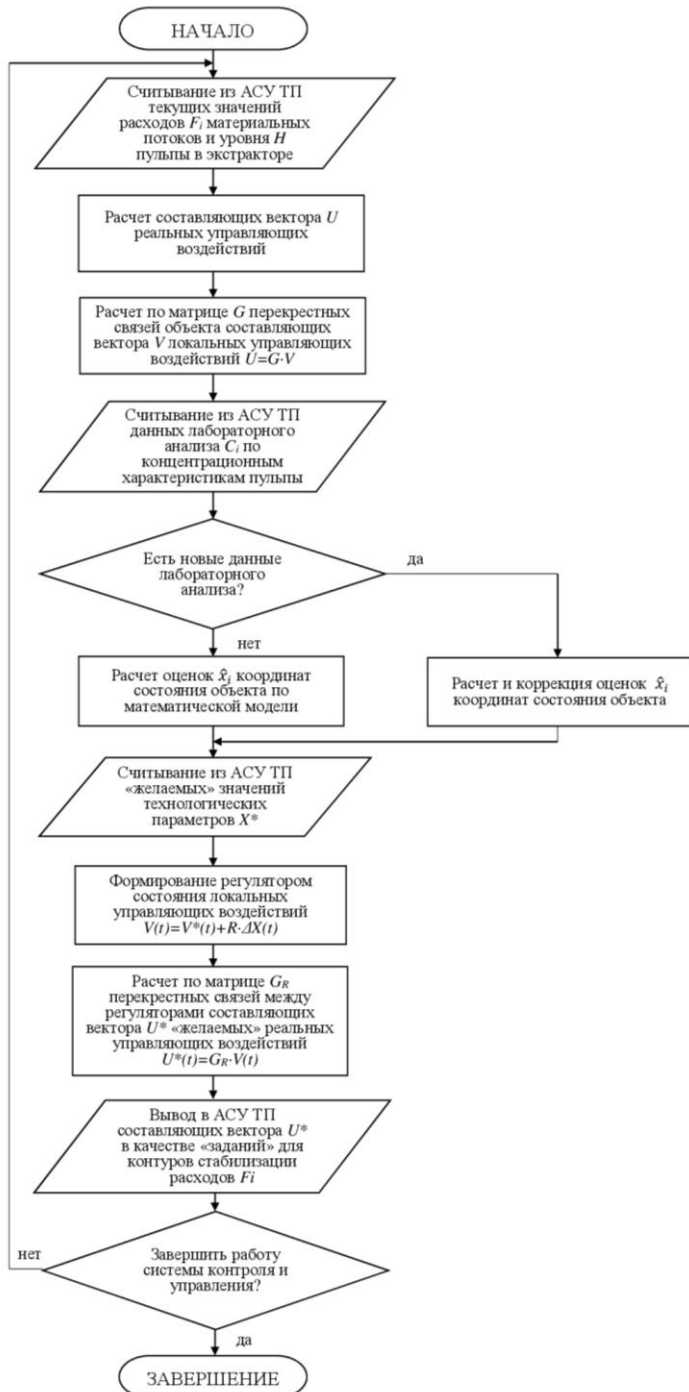


Рис. 8. Алгоритм функционирования системы контроля и управления технологическими параметрами процесса производства ЭФК

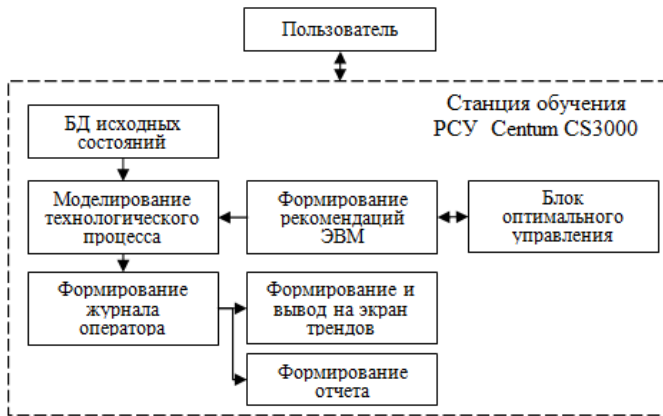


Рис. 9. Структурная схема программного тренажера оператора ТП производства ЭФК

Блок оптимального управления в составе тренажера состоит из дискретных вариантов наблюдателей и регуляторов состояния, входящих в многосвязную систему контроля и управления технологическими параметрами процесса экстракции фосфорной кислоты.

На станции тренажера используется программное обеспечение существующей АСУ ТП, что позволяет использовать экранные формы реальной системы визуализации отделения ЭФК-3,4. Для работы тренажера разработаны вспомогательные графические окна, позволяющие формировать отчеты, выдавать рекомендации по управлению и выбирать исходные характеристики процесса. Алгоритм функционирования разработанного тренажера приведен на рисунке 10.

В диссертационной работе выполнена оценка повышения эффективности управления ТП производства ЭФК на ООО «БМУ» по результатам внедрения тренажера оператора и испытаний многосвязной системы контроля и управления технологическими параметрами.

Для этого проанализированы экспериментальные данные о функционировании объекта, изъятые из архива АСУ ТП отделения ЭФК-3,4, за три последовательных периода времени: I - до внедрения тренажера оператора ТП; II - спустя шесть месяцев после внедрения компьютерного тренажера; III - во время проведения испытаний многосвязной системы контроля и управления технологическими параметрами в информационно-советующем режиме.

Аналитический отчет, формируемый информационной системой производства, позволяет оценить средние значения коэффициента выхода $K_{\text{вых}}$ за указанные периоды, а дополнительная статистическая обработка значений выходов объекта позволяет оценить дисперсии технологических параметров.

Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 2.

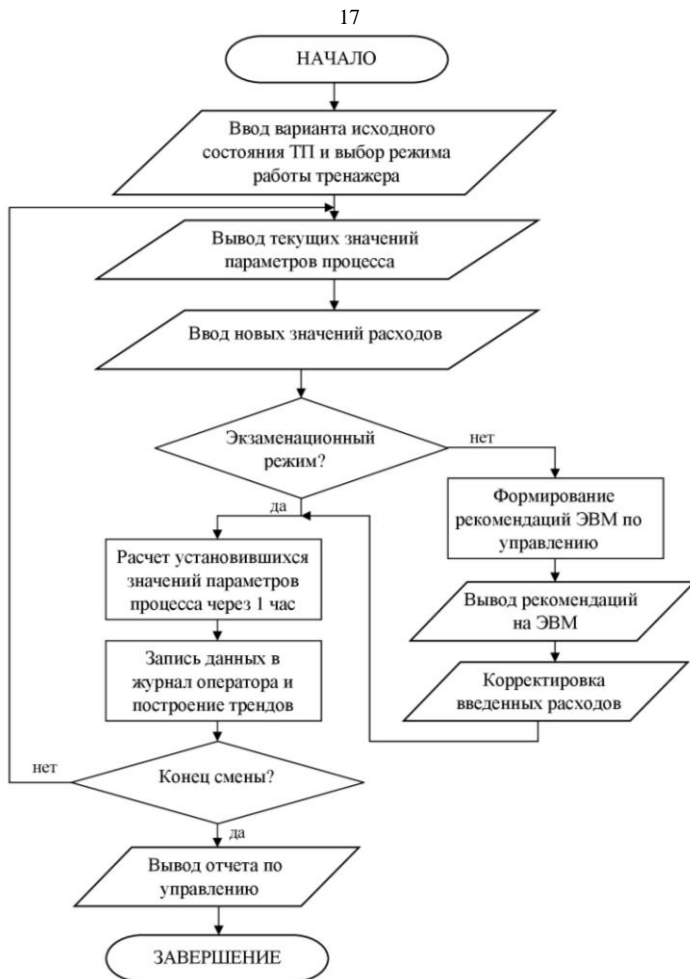


Рис. 10. Алгоритм функционирования программного тренажера оператора ТП производства ЭФК

Таблица 2

Эффективность управления и производства за различные периоды времени

Период времени исследуемых данных	Среднее значение коэффициента выхода $K_{\text{вых}}$, %	Дисперсия D_i выходных величин				
		D_{C1S03}	D_{C2S03}	D_{IP205}	D_{ITB}	D_H
I (до внедрения)	95,7	3,05	3,21	0,68	0,75	0,041
II (после внедрения тренажера оператора ТП)	95,8	2,89	2,97	0,59	0,61	0,032
III (во время испытаний системы контроля и управления)	96,1	2,14	2,09	0,51	0,29	0,021

Статистическая обработка экспериментальных данных подтверждает повышение точности стабилизации выходных величин в регламентном режиме. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о повышении коэффициента выхода ЭФК из сырья на 0,1 % при внедрении программного тренажера в процесс обучения операторов ТП и на 0,3 % при использовании оператором ТП рекомендаций многосвязной системы контроля и управления технологическими параметрами при выборе значений расходов материальных потоков. Полученное повышение эффективности производства ЭФК обеспечивает дополнительную прибыль около 40 млн. рублей в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена решению важной научно-технической задачи повышения эффективности управления сложными технологическими процессами путем реализации в составе действующих АСУ ТП системы контроля и управления технологическими параметрами с использованием наблюдателей и регуляторов состояния динамических объектов, а также программного тренажера для повышения квалификации операторов ТП.

В ходе решения данной задачи лично автором были получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ проблем контроля и управления технологическими параметрами сложных технологических процессов промышленных производств, выявлены направления, способствующие повышению эффективности управления.

2. Разработана многосвязная динамическая математическая модель процесса экстракции фосфорной кислоты в полугидратном режиме.

3. Разработан непрерывно-дискретный наблюдатель для формирования непрерывной оценки состояния объекта, входы которого измеряются непрерывно, а выходы - в дискретные моменты времени с большим периодом дискретности.

4. Выполнен синтез сепаратных контуров управления технологическими параметрами на основе РС, реализующих принцип модального управления. Получена матрица компенсации перекрестных связей между локальными регуляторами, что устраняет взаимное влияние контуров.

5. Разработана многосвязная система контроля и управления технологическими параметрами процесса, разработан алгоритм функционирования системы.

6. Предложена структура программно-технического комплекса, интегрирующего разработанную систему контроля и управления в действующую АСУ ТП.

7. Разработан и реализован в составе действующей АСУ ТП программный тренажер оператора.

8. На примере производства ЭФК выполнено исследование повышения эффективности управления ТП в результате реализации разработанных в диссертации решений: внедрение тренажера оператора повышает эффективность производства на 0,1%, внедрение системы контроля и управления – на 0,3%.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах

1. **Бабенков, В.А.** Математическая модель процесса экстракции и фильтрации производства фосфорной кислоты ООО «Балаковские минеральные удобрения»

[Текст] / В.А. Кривоносов, В.А. Бабенков, В.В. Соколов и др. // Автоматизация в промышленности. – 2013. – №7. – С.24-29.

2. **Бабенков, В.А.** Непрерывно-дискретный наблюдатель состояния химико-технологического процесса [Текст] / В.А. Кривоносов, В.А. Бабенков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – №1. – С.128-135.

3. **Бабенков, В.А.** Система управления технологическими параметрами процесса производства экстракционной фосфорной кислоты [Текст] / В.А. Кривоносов, В.А. Бабенков // Информационные системы и технологии. – 2015. – №2. – С.73-80.

Свидетельства на программы для электронных вычислительных машин

4. Свидетельство № 2014619294 Российская Федерация. Тренажер оператора технологического процесса производства экстракционной фосфорной кислоты на ООО «Балаковские минеральные удобрения»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / В.А. Кривоносов, В.А. Бабенков, В.В. Соколов; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» - № 2014616963; заявл. 17.07.2014; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12.09.14. – [1] с.

5. Свидетельство № 2015614179 Российская Федерация. Система стабилизации технологических параметров процесса экстракции фосфорной кислоты: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / В.А. Кривоносов, В.А. Бабенков; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» - № 2015610799; заявл. 13.02.2015; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08.04.15. – [1] с.

Статьи и материалы конференций

6. **Бабенков, В.А.** Программный тренажер оператора технологического процесса производства экстракционной фосфорной кислоты [Текст] / В.А. Бабенков, В.А. Кривоносов, В.В. Соколов // European Researcher. – 2013. – Вып. 40, № 2-1. – С. 253 – 258.

7. **Бабенков, В.А.** Повышение эффективности обучения операторов технологического процесса производства экстракционной фосфорной кислоты на базе компьютерного тренажера [Текст] / В.А. Бабенков, В.А. Кривоносов, В.В. Соколов // Наука и образование – 2012/2013: материалы IX Междунар. научно-практической конф.. – Прага (Чехия), 2013. – Т.20 – С. 60-63.

8. **Бабенков, В.А.** Компьютерный тренажер оператора химико-технологического процесса производства экстракционной фосфорной кислоты в полугидратном режиме [Текст] / В.А. Бабенков // Девятая всероссийская научно-практическая конф. студентов и аспирантов: сборник научн. и научно-практических докладов. – Старый Оскол, 2013. – С. 60-63.

9. **Бабенков, В.А.** Математическая модель процесса экстракции фосфорной кислоты для повышения эффективности контроля и управления [Текст] / В.А. Бабенков // X всероссийская научно-практическая конф. с международным участием: материалы конф.. – Старый Оскол, 2013. – С. 173-176.

10. **Бабенков, В.А.** Непрерывный контроль текущего состояния химико-технологического процесса на основе дискретной информации о выходах [Текст] / В.А. Кривоносов, В.А. Бабенков // Научная мысль информационного века – 2014: материалы конф.. – Перемышль (Польша), 2014. – Вып. 31. – С. 41-44.

11. **Бабенков, В.А.** Непрерывно-дискретный наблюдатель состояния для химико-технологических процессов [Текст] / В.А. Бабенков // X Междунар. молодежной научно-технической конф. «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2014»: материалы конф.. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2014. – С. 197.

12. **Бабенков, В.А.** Оценка состояния технологического процесса экстракции фосфорной кислоты и входных возмущений на основе непрерывно-дискретного наблюдателя [Текст] / В.А. Кривоносов, В.А. Бабенков // 2-я Международная конф. «Последние тенденции в области науки и технологий управления»: материалы конф. – Лондон (Великобритания): Изд-во SCIEURO, 2014. – С. 104 – 115.

13. **Бабенков, В.А.** Наблюдатель состояния технологического процесса в составе АСУ ТП производства экстракционной фосфорной кислоты [Текст] / В.А. Кривоносов, В.А. Бабенков // 3-я Международная научно-техническая конф. «Информационные системы и технологии» «ИСТ–2014»: материалы конф.. – Харьков (Украина), 2014. – С. 56 – 57.

14. **Бабенков, В.А.** Система стабилизации технологических параметров процесса производства экстракционной фосфорной кислоты [Текст] / В.А. Бабенков // Юбилейная Международная научно-практическая конф., посвященная 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова «Наукоемкие технологии и инновации» (XXI научные чтения): сборник докладов. – Белгород, 2014. – Ч. 6. – С. 98 – 102.

15. **Бабенков, В.А.** Адаптивный наблюдатель состояния технологических объектов [Текст] / В.А. Кривоносов, В.А. Бабенков // XI Всероссийская научно-практическая конф. с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство»: материалы конф.. – Старый Оскол, 2014. – Т.1. – С. 236 – 241.

16. **Бабенков, В.А.** Математическая модель процесса экстракции и фильтрации производства фосфорной кислоты Балаковского филиала ОАО «Апатит» [Текст] / В.А. Кривоносов, В.А. Бабенков, В.В. Соколов, Е.Ю. Шибанов, В.П. Перекрестов // Труды НИУИФ 1919-2014: Сборник научных трудов / Сост. В.С. Сущев, В.И. Суходалова; НИУИФ. – М., 2014. – С. 222 – 231.

17. **Бабенков, В.А.** Непрерывно-дискретный наблюдатель состояния динамического объекта управления [Текст] / В.А. Бабенков, В.А. Кривоносов, Г.С. Бут // Наука, образование, общество: проблемы и перспективы развития: сборник научных трудов по материалам Междунар. научно-практической конф. 31 июля 2015 г. – Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2015. – Т.3 – С. 63-64.

Личный вклад автора в работы, выполненные в соавторстве, состоит в: построении математической модели исследуемого процесса [1, 16], разработке структуры и уравнений непрерывно-дискретного наблюдателя координат состояния [2, 10, 12, 13, 17], разработке подхода к адаптации матрицы коррекции наблюдателя [15], разработке сепаратных контуров стабилизации технологических параметров и синтезе многосвязной системы контроля и управления [3], разработке структуры и алгоритма работы программного тренажера [6], разработке программного обеспечения [4, 5].