

На правах рукописи



Иванов Константин Александрович

**Автоматизированная система стабилизации потока органической фазы
в каскаде экстракционных колонн**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2018

Работа выполнена в научно-образовательной лаборатории «Электроника и автоматика физических установок» (НОЛ ЭАФУ) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ).

Научный руководитель **Горюнов Алексей Германович,**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты **Дмитриев Вячеслав Михайлович**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВО «Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники»,
профессор кафедры компьютерных систем в
управлении и проектировании (КСУП),
г. Томск

Макеева Инга Равильевна
кандидат физико-математических наук,
ФГУП «Российский федеральный ядерный
центр – Всероссийский научно-
исследовательский институт технической
физики имени академика Е.И. Забабахина»,
начальник лаборатории, г. Снежинск

Ведущая организация Акционерное общество
«Высокотехнологический научно-
исследовательский институт неорганических
материалов имени академика А.А. Бочвара»,
АО «ВНИИНМ», г. Москва.

Защита состоится «26» декабря 2018 г. в ____:____ на заседании диссертационного совета Д 212.269.14 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ) по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 2, 10-й корпус, ауд. ____.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ТПУ, расположенной по адресу: г. Томск, ул. Белинского, д. 53а и на сайте <http://portal.tpu.ru:7777/council/4060/worklist>

Автореферат разослан «__» _____ 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Д.Г. Видяев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Поскольку радиохимическое производство является неотъемлемой частью ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), то научно-исследовательские работы по его совершенствованию весьма актуальны и своевременны. С другой стороны, высокие требования, предъявляемые к его безопасности, эффективности и качеству ведения технологических процессов, ставят новые задачи по точному и надёжному управлению этими процессами.

В связи с концентрацией конверсии производства урана, с 2011 года на Радиохимическом заводе (РХЗ) проводились работы по увеличению производственной программы, в том числе за счет увеличения производительности процессов аффинажа урана в экстракционном каскаде с аппаратами колонного типа. В результате были внесены изменения в технологическое оборудование и технологические регламенты. По этой причине появились новые режимы работы каскада экстракционных колонн, что потребовало новых исследований каскада как объекта управления и последующей модернизации действующей системы автоматизированного управления.

Подводя итог вышесказанному, актуальность данной работы определяется:

- высокими требованиями к безопасности ведения технологического процесса;
- необходимостью повышения эффективности производства конечного продукта;
- требованием введения современных программно-технических средств;
- необходимостью обеспечения работы каскада экстракционных колонн на новых режимах.

Степень разработанности. Исследования каскада экстракционных колонн как объекта автоматизации проводятся с 1978 года, начиная с исследований, проводимых сотрудниками АО «ВНИИНМ», г. Москва Молчановым А.В., Калининым О.В., Белобородовым П.В., Щербатых В.И., Андроновым В.Г., Рубесовым В.Н., Волком В.И. и другими, а также сотрудниками АО «СХК» Семеновым Е.Н., Пурыгиным В.Я., и другими. Данные исследования состояли в разработке систем автоматического регулирования технологическим процессом экстракции в установках «М-1345» и «УТЕС». Результаты этих работ легли в основу первых систем контроля и управления установками.

Следующим этапом стали исследования, проводимые сотрудниками Томского политехнического университета: Ливенцовым С. Н., Волынским Ю.Б., Лысенком А. А., Горюновым А. Г., и другими. Исследования были направлены на разработку систем автоматизированного управления технологическими процессами экстракционного каскада, включающими систему стабилизации расхода органической фазы. Эти исследования показали, что решение задачи обеспечения заданной производительности экстракционных каскадов, а также

увеличение этой производительности, невозможно без решения задачи стабилизации потока органической фазы по всему каскаду экстракционных колонн. Основной идеей данных исследований было автоматизированное регулирования уровня в буферных ёмкостях каскада так, чтобы происходило сглаживание колебаний расхода органической фазы на входе колонн, допуская изменение уровня в ёмкостях в безопасных пределах.

Новым в настоящей работе является необходимость создания двухканальной системы стабилизации расхода органической фазы с частотным приводом и исполнительным механизмом постоянной скорости. Это связано с ограничениями, накладываемыми на работу системы управления экстракционным каскадом с погружными насосами при малых оборотах. Данные особенности потребовали создания адаптивной двухконтурной системы с двумя каналами: частотным управлением привода насоса и управлением напором с помощью регулирующего вентиля с исполнительным механизмом постоянной скорости.

При анализе существующего опыта использования многоканальных адаптивных систем управления было установлено, что они используются совместно со сложными математическими моделями объекта управления и не менее сложными алгоритмами идентификации и адаптации. В последнее время следует отметить большое количество работ с применением численных методов и нечёткой логики, что приводит к необходимости использования больших вычислительных мощностей и сложного программного обеспечения. Следует отметить таких авторов как: Петров Б.Н., Цыпкин Я.З., Поляк Б.Т., Щербаков П.С., Райбман С.Р., Александров А.Г., Лотоцкий В.А. и др., Arsene, С.Т.С.; Al-Dabass D.; Hartley J. A; Gambier A.; Badreddin E.; Miksch T.; Badreddin E. И др.

Целью диссертационной работы является стабилизация потока органической фазы средствами системы автоматизированного управления, обеспечивающей повышение производительности и надёжности работы каскада экстракционных колонн.

Данная цель достигалась решением **следующих задач**:

- исследованием каскада экстракционных колонн как объекта управления;
- созданием математической модели каскада экстракционных колонн для решения задач синтеза и анализа систем управления;
- разработкой алгоритма системы стабилизации потока органической фазы в каскаде экстракционных колонн;
- внедрением предложенной системы стабилизации потока органической фазы на действующем производстве.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель каскада экстракционных колонн, описывающая динамику прохождения органической фазы, позволяющая синтезировать и испытывать алгоритмы управления действующими аппаратами. Модель основана на использовании нейронечёткой логики,

позволившей существенно увеличить ее точность в условиях ограниченного количества экспериментальных данных в сравнении с традиционными методами (полиномиальными, сплайн и т.д.);

2. Разработан алгоритм управления системы стабилизации потока органической фазы в каскаде экстракционных колонн, отличающийся одновременным управлением частотами вращения валов двигателей насосов и напором, что позволило снизить высокочастотные и низкочастотные колебания расхода органической фазы по каскаду колонн и в целом повысить производительность и надёжность работы каскада экстракционных колонн.
3. Разработан алгоритм, отличающийся применением нейронечеткой логики в математической модели каналов управления для решения задачи адаптации системы стабилизации потока органической фазы в каскаде экстракционных колонн, что позволило повысить производительность и надёжность работы каскада экстракционных колонн.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в использовании аппарата нейронечеткой логики в синтезе систем стабилизации расходов различных сред в промышленности с обеспечением увеличения точности модели объекта управления в условиях ограниченного количества экспериментальных данных.

Практическая значимость работы заключается в том, что основная часть полученных результатов исследований внедрена на производстве, что подтверждено актом внедрения результатов диссертационных исследований №70-1445 от 22.05.2017. Разработанные алгоритмы, вошедшие в состав САУ экстракционного каскада, приняты в промышленную эксплуатацию приказом по РХЗ АО «СХК» от 19.05.2014. Внедрение модернизированной САУ стабилизацией расхода органической фазы (ОФ) на РХЗ АО «СХК» позволило повысить качество управления каскадом экстракционных колонн, сократить количество внеплановых остановок технологического оборудования, а также увеличить межремонтные сроки погружных насосов.

Методология и методы исследования. Достижение поставленной цели решалось с помощью методов математического моделирования, теории адаптивных систем управления, теории автоматического управления и натурных испытаний на производстве. При проектировании алгоритма работы АСУ ТП было использовано программное обеспечение, полученное в процессе диссертационной работы с применением пакета Matlab.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

- Научно-практическая конференция «Перспективные направления развития атомной отрасли», г. Томск, 5-6 октября 2011 г.
- Международная заочная научно-практическая конференция «Наука и образование в XXI веке», г. Тамбов, 31 мая 2012 г.

- Российская научно-практическая конференция «Обращение с отработанным ядерным топливом в России», г. Железногорск, 24–25 октября 2012 г.
- Всероссийская научно-практическая конференция, г. Томск, 1 – 3 октября 2014 г.
- VI Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности», г. Томск, 2014 г.
- Научно-практическая конференция молодых специалистов и аспирантов "Молодежь ЯТЦ", г. Железногорск, 21-24 октября 2015 г.
- XX Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 14–18 апреля 2014 г.
- VII научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов атомной отрасли "Команда", г. Санкт-Петербург, 5-9 июня 2017 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе: 3 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК; 1 статья в зарубежном издании; 8 тезисов докладов на Российских и Международных конференциях.

Реализация результатов работы. Внедрение результатов работы подтверждено актом №70/1445 от 22.05.2017.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель каскада экстракционных колонн, описывающая динамику прохождения органической фазы и позволяющая синтезировать и испытать алгоритмы управления действующими аппаратами. Главным отличием модели от существующих является использование нейронечёткой логики, позволившей существенно увеличить точность модели в условиях ограниченного количества экспериментальных данных в сравнении с другими методами (полиномиальными, сплайн и т.д.).
2. Алгоритм управления системы стабилизации потока органической фазы в каскаде экстракционных колонн, отличающийся одновременным управлением частотами вращения вала двигателей насосов и напором, что обеспечивает существенное демпфирование расхода органической фазы в каскаде экстракционных колонн.
3. Алгоритм адаптации системы стабилизации потока органической фазы в каскаде экстракционных колонн с применением нейронечёткой логики, позволяющий существенно снизить низкочастотные колебания расхода потока органической фазы, а также повысить производительность и надёжность работы каскада экстракционных колонн.

Структура и объем диссертации. В состав диссертационной работы входят: введение, четыре основные главы (содержащих результаты и выводы), заключение, список литературы, а также приложения. Работа содержит 22

таблицы и 53 рисунка. Основной материал изложен на 126 страницах машинописного текста и 7-страничном приложении. Список литературы состоит из 82 пунктов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, обозначается проблематика, ставятся цели и задачи работы.

В первой главе раскрыта тема объекта исследования. Проводится анализ состояния отрасли, исследуются технологии, применяемые на РХЗ. Дается структурный анализ установки по переработке оксидов урана (каскад экстракционных колонн) как объекта управления. Результатом анализа является определение связи потока ОФ с основными показателями качества протекания технологического процесса.

Установка экстракционной очистки урана включает: 4 экстракционные тарельчатые пульсационные колонны (ЭК-1,2,3,4); 3 буферные ёмкости (БЕ-1,2,3); бак сборник (БС); 4 ресивера сжатого воздуха (Р-1,2,3,4); 4 выносных центробежных насоса (ВН-1,2,3,4). Технологическая схема каскада экстракционных колонн представлена на рисунке 1.

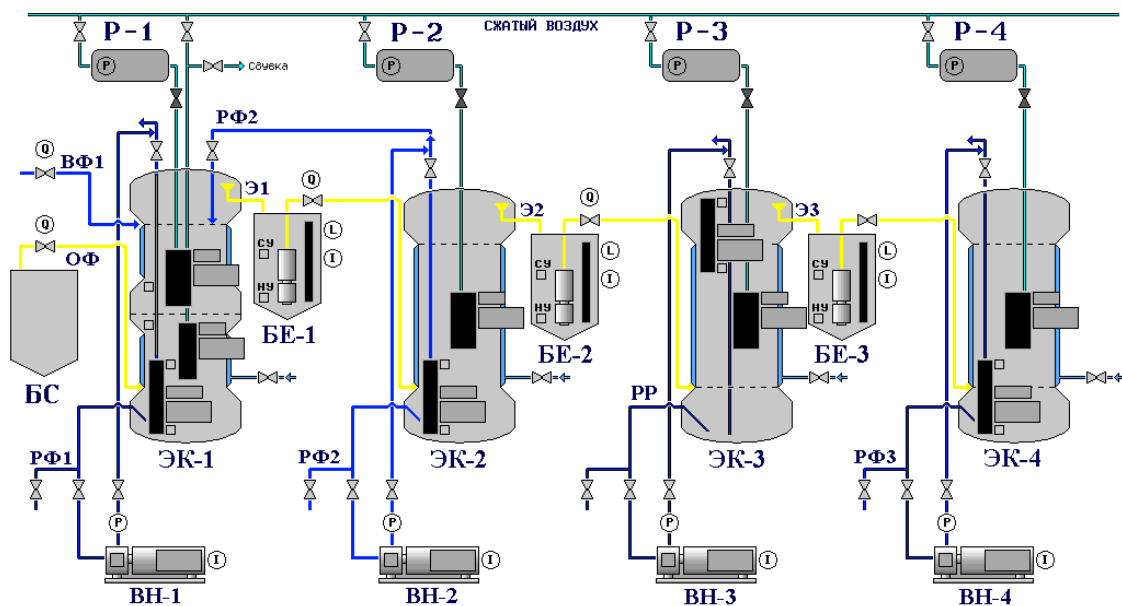


Рисунок 1 – Технологическая схема каскада экстракционных колонн

Основными управляемыми переменными, характеризующими технологический процесс количественно, являются концентрация урана в реэкстракте и рафинате. Концентрация урана в реэкстракте характеризует количество извлеченного урана, а концентрация в рафинате – остаток. Технологическими переменными, описывающими динамику системы, являются: во-первых, расходы поступающих в систему реагентов, которые вступают во взаимодействие с экстрагентом, а также непосредственно расход самого экстрагента; во-вторых, текущие значения уровней в аппаратах. Основные переменные каскада экстракционных колонн представлены в таблице 1.

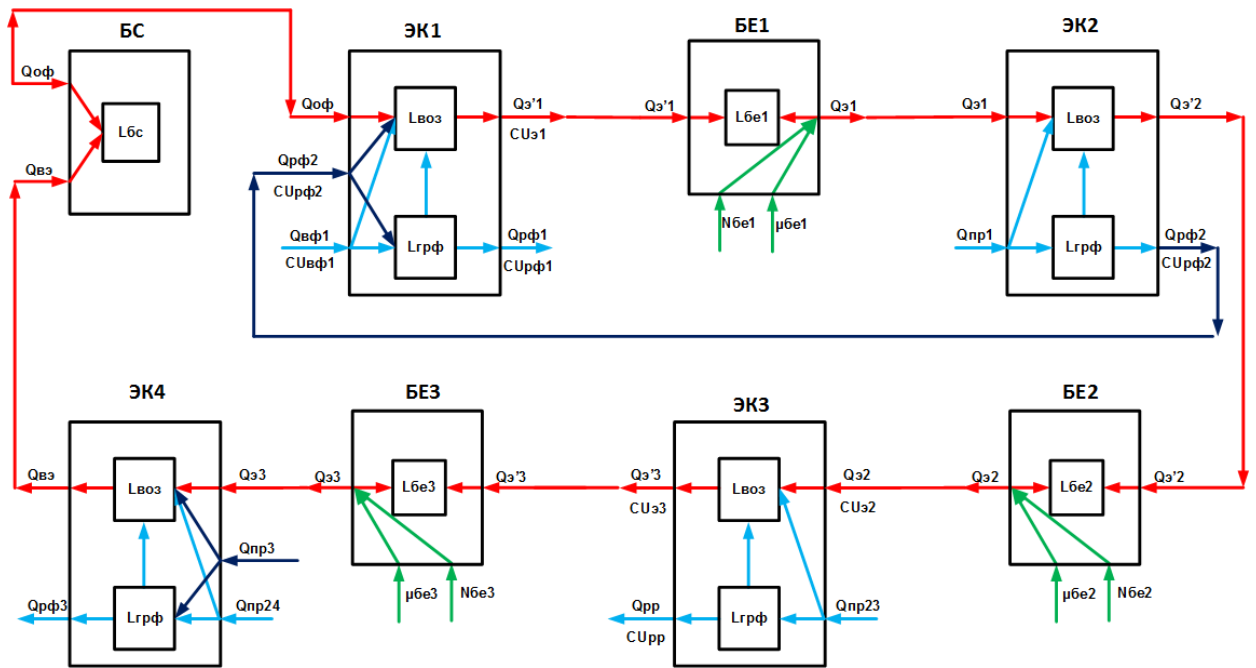


Рисунок 2 – Структура взаимосвязи технологических переменных каскада экстракционных колонн

Таблица 1 – Основные переменные каскада экстракционных колонн

Параметр	Наименование параметра	Примечание
$Q_{рф1}$	Расход рафината	Стабилизируются локальным регулятором
$Q_{рф2}$	Расход азотнокислого раствора от промывки насыщенного экстракта	Стабилизируются локальным регулятором
$Q_{рф3}$	Расход раствора после промывки органической фазы	Стабилизируются локальным регулятором
$Q_{рп}$	Расход реэкстракта урана	
$Q_{вф1}$	Расход исходного продукта – азотнокислого раствора урана	Стабилизируются локальным регулятором
$Q_{нр1}, Q_{нр23}, Q_{нр24}, Q_{нр3}$	Расход промывного раствора	
$Q_{оф}$	Расход органической фазы	Задаётся исходя из режима работы
$Q_{э'1}, Q_{э'2}, Q_{э'3}$	Расход органической фазы после ЭК-1,2,3	Зависит от $L_{воэ}$
$Q_{э1}, Q_{э2}, Q_{э3}$	Расход органической фазы после БЕ-1,2,3	
$CU_{вф1}, CU_{рф1}, CU_{рф2}, CU_{э1}, CU_{э3}, CU_{рп}$	Концентрация урана в продуктах ВФ, РФ1, РФ2, Э1, Э3 и РР	Основные показатели качества
$L_{воэ1}, L_{воэ2}, L_{воэ3}, L_{воэ4}$	Уровень в верхней отстойной зоне	
$L_{грф1}, L_{грф2}, L_{грф3}, L_{грф4}$	Уровень границы раздела фаз	Стабилизируются локальным регулятором
$L_{бе1}, L_{бе2}, L_{бе3}, L_{бс}$	Уровень в буферной ёмкости	Стабилизируются локальным регулятором
$\mu_{бе1}, \mu_{бе2}, \mu_{бе3}$	Степень открытия регулирующего вентиля	
$N_{бе1}, N_{бе2}, N_{бе3}$	Частота оборотов двигателя насоса	

Одной из базовых технологических переменных является расход потока ОФ по всему каскаду, таблица 1. Наибольшее влияние на расход потока ОФ оказывают процессы, протекающие в головной и реэкстракционной колоннах (ЭК-1,3). Для головной колонны значения концентрации урана в экстракте и рафинате являются основными переменными, определяющими режим её работы. Для реэкстракционной колонны – это концентрации урана в экстрагенте и реэкстракте. Невыполнение технологического регламента по главным показателям процесса приводит к дополнительным затратам на повторную переработку экстракта и рафинада. Таким образом, существует прямая зависимость между стабильностью расхода потока ОФ в каскаде экстракционных колонн и качеством технологического процесса.

Во второй главе раскрывается процесс моделирования прохождения потока органической фазы по каскаду колонн. Она начинается с выбора типа модели исходя из предпосылок. После выбора типа модели уточняются ограничения и допущения, принятые при её создании. Далее рассматриваются этапы создания имитационной модели каскада экстракционных колонн: создание модели буферной ёмкости, создание модели экстракционной колонны и, как завершающий этап, создание обобщённой модели, описывающей прохождение органической фазы по каскаду экстракционных колонн. Каждая созданная модель проверяется на адекватность. Имитационные модели реализованы в виде компьютерных моделей – пользовательских библиотек программного пакета «Matlab». Результатом данной главы является создание адекватной имитационной модели, описывающей изменение расхода органической фазы по каскаду экстракционных колонн в динамике, построенной на основе моделей буферной ёмкости и экстракционной колонны.

Были рассмотрены различные методы моделирования, в том числе гидравлический и др. Рассмотрены работы, направленные на моделирование экстракционной колонны как объекта управления. Для решения данной задачи сотрудниками Томского политехнического университета разработана ячеечная модель экстракционной колонны, учитывающая пространственное распределение компонентов по высоте колонны в динамике. Однако, из-за ограниченного диапазона применения существующих моделей, наиболее приемлемым способом для создания модели экстракционной колонны как объекта управления в настоящей работе является имитационный метод.

В процессе разработки математической модели экстракционных колонн нами были приняты следующие допущения:

1. Для органической фазы используется модель идеального вытеснения.
2. Температура органической и водной фаз в колонне постоянна.
3. Не учитывается влияние плотности органической фазы на расход потока органической фазы через сливную воронку экстракционной колонны.

Процесс моделирования начали с модели буферной ёмкости. Из-за особенности ведения технологического процесса, снятие экспериментальной зависимости расхода жидкости от числа оборотов насоса при постоянном положении вентиля, или расхода от степени открытия вентиля при стабильном числе оборотов, было невозможно. К тому же, зависимость расхода жидкости от числа оборотов насоса и положения вентиля нелинейная, а реальная работа буферной ёмкости проходит на конечном количестве положений запорной арматуры. Поэтому данные, полученные в результате эксперимента, имеют вид разреженной матрицы состояний, где зависимость расхода органической фазы от числа оборотов насоса и положения вентиля распределены неравномерно. Результаты эксперимента, проведённого на каскаде экстракционных колонн, имеют вид разрежённой матрицы, представленной на рисунке 3.

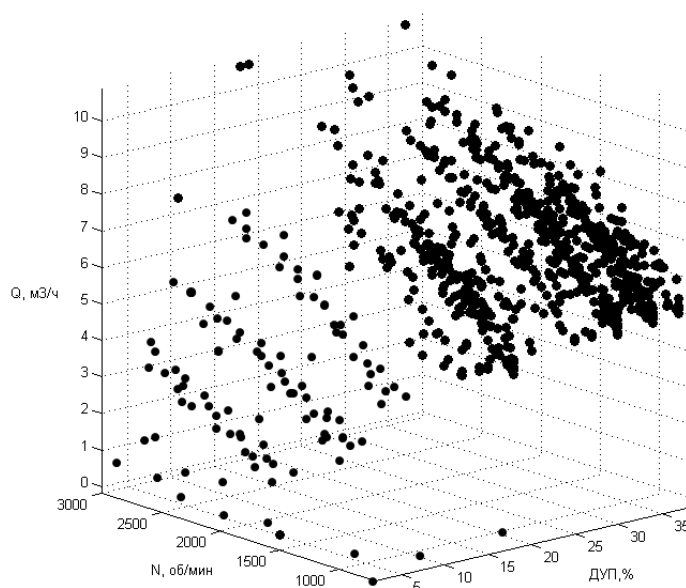


Рисунок 3 – Влияние управляющих переменных на поток ОФ

Реализация модели буферной ёмкости «классическими» способами представляется весьма трудоёмкой задачей. В нашей работе мы рассмотрели несколько методов аппроксимации: полиномиальная аппроксимация, кривые Безье, спектральный метод, статистические методы, сплайновая аппроксимация и аппроксимация с помощью нечёткой нейронной сети. При учёте наших ограничений наиболее подходящим методом аппроксимации является аппроксимация с помощью нечёткой нейронной сети.

Создание нечёткой нейронной сети успешно разрешается с помощью пакета Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS, адаптивные системы нейро-нечеткого вывода), входящего в приложение Matlab. В отличие от других методов (полиномы, сплайны, и др.), благодаря нечеткой нейронной сети стало возможным решение задачи аппроксимации полученных данных, представляющих разреженные матрицы.

Процесс синтеза нечеткой нейронной сети проходил в несколько этапов. Этап 1: подготовили данные для обучения. Этап 2: сгенерировали структуру системы нечеткого вывода FIS. Этап 3: обучение гибридной сети.

Воспользовались гибридным методом с уровнем допустимой ошибки обучения 0 и количеством эпох 300. В результате получили систему с набором правил и функций принадлежности. Уровень ошибки обучения составил 0,199.

Проверку на адекватность полученной модели провели по данным среднеквадратичного отклонения модельных значений относительно данных, полученных на реальной установке. Среднеквадратичное отклонение между модельными значениями и данными с реальной установки, приведённая к шкале расходомера ОФ, представлена на рисунке 4 и в таблице 2. Для сравнения использовали аппроксимацию с помощью нечеткой нейронной сети и сплайн метод. Как видно из представленных данных, метод аппроксимации с помощью нечеткой нейронной сети предпочтительнее, т.к. обеспечивает необходимую точность аппроксимации для сознания адекватной модели буферной ёмкости (БЕ), в то время как качество аппроксимации сплайн методом ухудшается с ростом неопределённости, что видно из среднеквадратичной ошибки отклонения сплайн метода при степени открытия вентиля 3,7 %.

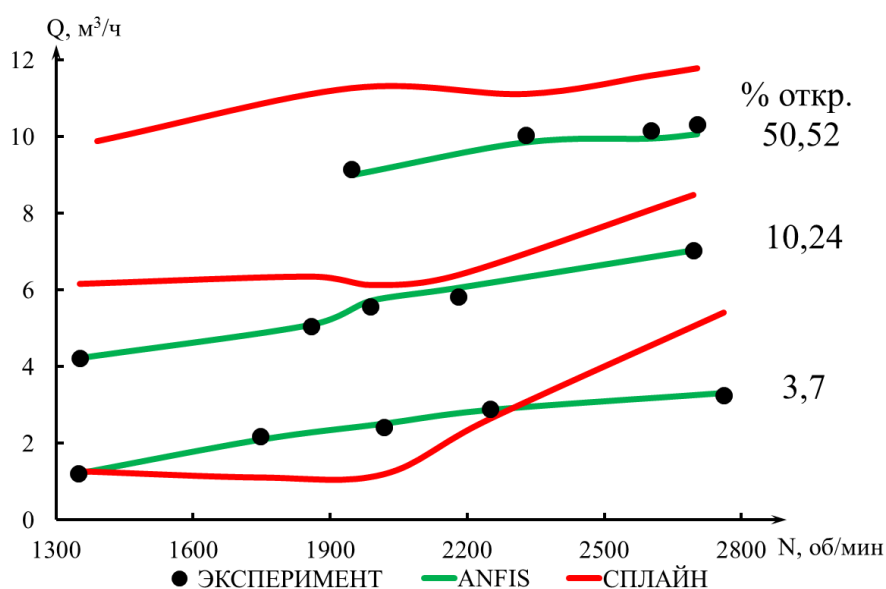


Рисунок 4 – Сопоставление модели и эксперимента

Таблица 2 – Сравнение модели и эксперимента

Степень открытия вентиля, %	50,52	10,24	3,7
Среднеквадратичное отклонение значений ННС, % шкалы	1,2	1,9	0,6
Среднеквадратичное отклонение сплайн метода, % шкалы	12,8	18,3	51,5

В результате проделанной работы была получена имитационная модель буферной ёмкости. Удалось снять описанные выше ограничения на аппроксимацию классическими методами, благодаря системе нечеткого вывода. Сравнение модели с рабочей системой подтвердило адекватность предложенной модели. Ошибка аппроксимации экспериментальных зависимостей не превышает 2% шкалы прибора.

Для решения задач создания систем управления достаточным является уровень приведённой погрешности моделирования порядка 5%. Предложенную модель можно использовать для дальнейших исследований.

В процессе снятия данных с реальной установки обнаружено, что при малых оборотах вала насоса резко возрастал ток, при котором дальнейшая эксплуатация насоса невозможна. Резкое увеличение тока в двигателе насоса происходило при оборотах <600 об/мин. Также в рекомендациях производителя частотного преобразователя (ЧП) установлены требования на ограничения минимальных оборотов, связанных с использованием ЧП совместно с погружными насосами.

Для исследования режимов работы насоса с частотным управлением был разработан и изготовлен лабораторный стенд.

В результате испытаний на стенде было установлено:

1. При любом рабочем давлении, ток в обмотках электродвигателя резко возрастает в 2 раза при частоте вращения вала электродвигателя 500 об/мин. Для исключения данной проблемы при старте насоса, необходимо разгонять обороты двигателя насоса до отметки более 1600 об/мин за фиксированное время 3÷5 с.
2. При уменьшении рабочего давления (работа на открытую задвижку) ток и температура обмоток увеличиваются. Поэтому нежелательна работа при полностью открытом вентиле, диапазон работы от 0÷70% открытия вентиле.

Следующим структурным элементом для моделирования является экстракционная колонна (ЭК).

Для создания модели колонны выполнили математическое описание поведение расхода органической фазы на выходе из верхней отстойной зоны. В 1998 году сотрудниками кафедры ЭАФУ были проведены исследования экстракционного каскада, в результате чего была получена зависимость расхода от уровня $Q(H)$. Воспользовавшись этими данными, аппроксимировали зависимость расхода органической фазы на выходе из верхней отстойной зоны. Для аппроксимации воспользовались полиномом 3 степени. Результат имеет вид (1).

$$y = 28479x^3 - 8655,9x^2 + 1052,1x + 1,4392 \quad (1)$$

Проверку на адекватность полученной модели экстракционной колонны оценили по коэффициенту детерминации $\eta^2 = 0,9943$.

Если коэффициент детерминации находится в интервале 0,9 — 0,99, такую регрессионную модель можно использовать для прогноза.

Заключительным этапом создания имитационной модели объекта управления являлось создание модели каскада экстракционных колонн.

В результате проделанной работы по созданию имитационных моделей создали модель процесса движения потока ОФ в каскаде экстракционных колонн.

Для оценки адекватности полученной модели проведём сравнение графика расхода ОФ, полученного на реальной установке, с графиком, полученным при моделировании технологического процесса на имитационной модели каскада экстракционных колонн. Процесс моделирования проходил в течение 12 часов модельного времени при параметрах модели: **конечное время** – 43200 с; **тип шага** – переменный; **максимальный размер шага** – 0,1; **решатель** – ode23tb (stiff/TR-BDF2); **погрешность приближения** – $1e-3$. Полученные данные моделирования использовали для сравнения с реальными данными. Полученный результат представлен на рисунке 5.

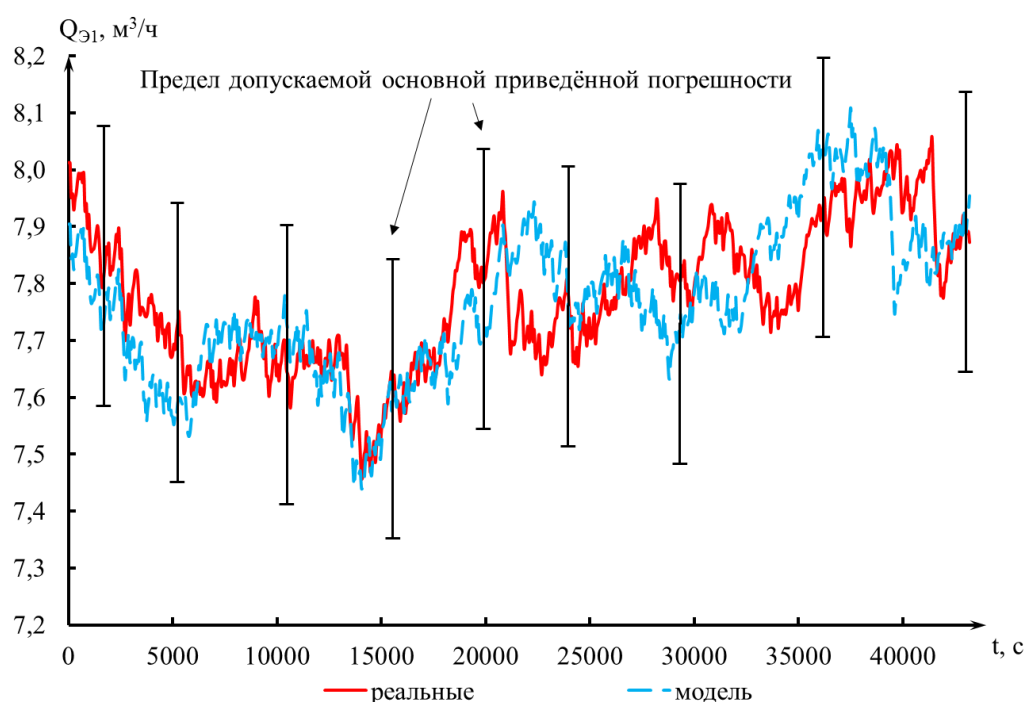


Рисунок 5 – Сравнение модели с реальными данными

Среднеквадратичное отклонение между модельными значениями и реальной установкой, приведенное к шкале расходомера ОФ, составляет 3%, что не превышает погрешность прибора измерения расхода. Это говорит о том, что данную модель можно использовать для дальнейших исследований.

Математические модели каскада экстракционных колонн, буферной ёмкости и экстракционной колонны реализованы в виде компьютерной модели в программном пакете Matlab (Simulink). Данные модели позволили провести исследования различных режимов работы каскада колонн, которые затруднительны на реальной установке.

В третьей главе описывается процесс синтеза САУ расходом в каскаде экстракционных колонн. Рассматриваются предпосылки создания САУ, её особенности. Используя модель буферной ёмкости с погружным центробежным насосом (ПЦН), разработана и исследована система стабилизации расхода ОФ.

Исходная система осуществляет управление уровнем жидкости в буферной ёмкости, рисунок 6, и настроена как система, демпфирующая входной расход органической фазы с коррекцией уровня.

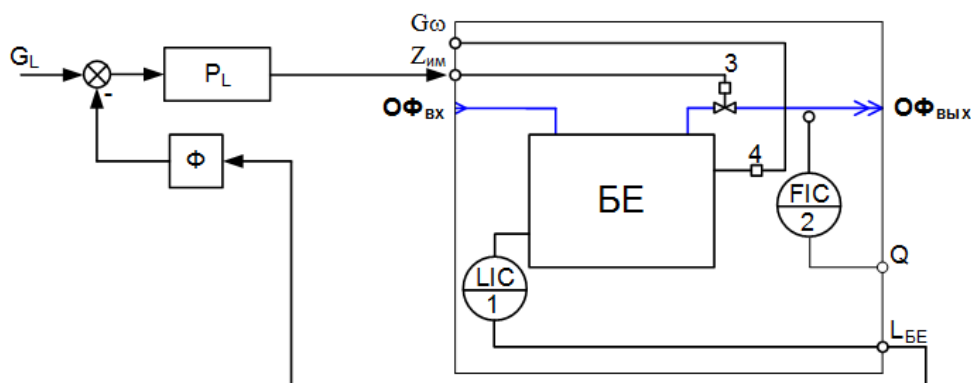


Рисунок 6 – Исходная система стабилизации расхода ОФ в БЕ

где $ОФ_{вх}$, $ОФ_{вых}$ – входное и выходное значения органической фазы в буферной ёмкости, L – значение уровня жидкости в буферной ёмкости, Φ – фильтр значения уровня L , P_L – регулятор уровня L , $Z_{им}$ – импульсы ШИМ управления ИМ запорной арматуры.

Регулятор уровня P_L представляет собой ПДД²-регулятор, который совместно с широтно-импульсным модулятором (ШИМ) и ИМ формирует ПИД-закон регулирования (далее по тексту ПДД²-ШИМ). Из результатов моделирования следует, что нелинейности стандартного ПДД²-ШИМ-регулятора существенно ухудшают показатели качества регулирования. Попытки улучшить качество регулирования за счет оптимизации параметров настройки регулятора не дают положительного результата. Кроме этого, контур управления с ИМ может не обеспечивать требуемой точности и качества управления в результате существенного выбега вала ИМ.

Также следует отметить, что управление потоком органической фазы организовано с помощью дроссельной заслонки, а электродвигатель насоса постоянно работает с номинальной частотой. Поэтому вся система работает с меньшим КПД, в результате чего, уменьшаются сроки текущего и капитального ремонтов.

ССР ОФ должна стабилизировать уровень жидкости в границах от 20% до 70%. Демпфирование расхода жидкости на выходе БЕ должно составлять не менее 200 с при колебаниях уровня в заданных границах.

Для решения этой задачи была предложена схема управления расходом за счёт управления частотой вращения двигателя погружного насоса, рисунок 7.

Во-первых, это должно решить задачу стабилизации расхода ОФ в каскаде экстракционных колонн. Во-вторых, позволит уменьшить потери электроэнергии и продлить ресурс работы насосов.

где $T_{ж} = 60$ с – желаемая постоянная времени контура расхода $ОФ_{ВЫХ}$, $W_Q(s)$ – замкнутая передаточная функция контура расхода $ОФ_{ВЫХ}$. Параметры настройки ПИ-регулятора, полученные из выражения (2):

$$\begin{cases} k_n = \frac{T_n}{K_\omega K_Q T_{ж}} = 0,4, \\ T_n = T_{ж} = 60 \text{ с} \end{cases}, \quad (3)$$

Как уже отмечалось выше, преимуществом новой системы является то, что при небольших возмущениях по входному расходу $Q_{ВХ}$ регулятор уровня подстраивается как фильтр нижних частот:

$$\frac{G_Q}{Q_{ВХ}} = \frac{1}{T_{жФ}s + 1}, \quad (4)$$

Передаточная функция для внешнего контура уровня $W_{RL}(s)$:

$$W_{RL}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{(T_d s + 1)} + \frac{1}{(sT_{жФ} + 1)}, \quad (5)$$

При малых отклонениях уровня дифференциальной составляющей можно пренебречь. Интегральная составляющая ПИ-регулятора практически отключается путем установки большой постоянной времени интегрирования, порядка 2000 с, это связано с особенностями промышленного контроллера. Тогда, $T_{жФ} = 35$ с – желаемая постоянная времени фильтра, $W_{RL}(s)$ – замкнутая передаточная функция контура стабилизации уровня $L_{БЕ}$. Параметры настройки П-регулятора с постоянной времени фильтра T_Φ , полученные из выражения (5):

$$\begin{cases} K_p = \frac{T_{БЕ}}{K_L K_y T_{жФ}} = -0,4, \\ T_\Phi = T_{жФ} = 35 \text{ с} \end{cases}, \quad (6)$$

При больших возмущениях по входному расходу $Q_{ВХ}$ регулятор уровня подстраивается как контур стабилизации уровня органической фазы в буферной ёмкости. Регулятор расхода $W_{RL}(s)$ может быть настроен в этом случае методом оптимального модуля с коэффициентом передачи $k_{П} = -1,2$ и постоянной времени интегрирования $T_{И} = 300$ с.

Расчет параметров настройки ПИ-регулятора внешнего контура уровня реализуется следующим образом:

$$\begin{cases} T_{и} = 300 \text{ с}, |\varepsilon| \geq 30\% \\ T_{и} = 2000 \text{ с}, |\varepsilon| < 10\% \\ T_{и} = T_{и}(t - T_{ц}), 10 < |\varepsilon| < 30 \\ k_{п} = -0,0005\varepsilon^2 \\ k_{п} = -0,4, k_p > -0,4 \\ k_{п} = -1,2, k_p < -1,2 \end{cases}, \quad (7)$$

где $T_{ц}$ – время цикла регулятора расхода.

Для адаптера, описываемого системой уравнений (7), малыми отклонениями уровня являются отклонения менее 10%, большие – более 30%. При малых

отклонениях интегральная составляющая ПИ-регулятора практически отключается путем установки большой постоянной времени интегрирования.

Как было показано в главе 2, при работе системы стабилизации расхода ОФ в БЕ при оборотах вала насоса < 600 об/мин резко возрастал ток, при котором дальнейшая эксплуатация насоса невозможна. В результате предложенная САУ оказалась не работоспособной при малых регламентных значениях расхода жидкости Q в потоке ОФ_{вых}.

Для решения указанной проблемы было предложено доработать систему стабилизации расхода ОФ в БЕ введением дополнительного канала управления вентилем, рисунок 9.

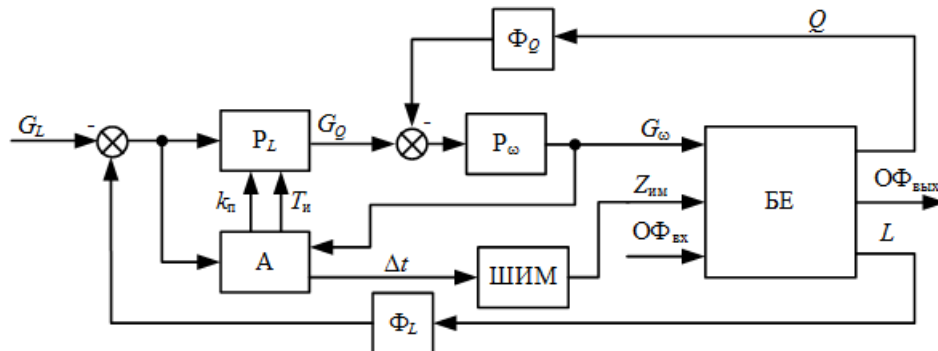


Рисунок 9 – Двухканальная адаптивная системы стабилизации расхода ОФ

где G_{ω}^n , $G_{\omega}^{\min}$, $G_{\omega}^{\max}$ – номинальное, минимальное и максимальные значения оборотов двигателя насоса, Δt_{i-1} , Δt_i – предыдущее и текущее значения импульсов, поступающих на вентиль, ΔG_{ω} – разность оборотов двигателя в результате воздействия на ИМ импульса ШИМ, $\Delta t_{\min}$, $\Delta t_{\max}$ – минимальная и максимальная длительности импульсов ШИМ.

В предложенной на рисунке 9 САУ БЕ адаптер дополнительно формирует длительность Δt импульсов ШИМ согласно условию (8).

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta t_i = \Delta t_{i-1} \frac{|G_{\omega}^n - G_{\omega}|}{\Delta G_{\omega}}, \text{ при } G_{\omega} = G_{\omega}^{\max} \text{ или } G_{\omega} = G_{\omega}^{\min} \\ \Delta t_i = \Delta t_{\min}, \text{ при } \Delta t_i < \Delta t_{\min} \\ \Delta t_i = \Delta t_{\max}, \text{ при } \Delta t_i > \Delta t_{\max} \\ \Delta t = \Delta t_i, \text{ при } G_{\omega} = G_{\omega}^{\max} \\ \Delta t = -\Delta t_i, \text{ при } G_{\omega} = G_{\omega}^{\min} \end{array} \right., \quad (8)$$

С целью экономии электроэнергии, потребляемой насосом, формируются импульсы ШИМ в соответствии с выражением:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta t_i = \Delta t_{i-1} \frac{|G_{\omega}^n - G_{\omega}|}{\Delta G_{\omega}}, \text{ при } G_{\omega} > G_{\omega}^n, |\varepsilon| < 10, \left| \frac{dG_{\omega}}{dt} \right| < 1 \\ \Delta t = 0, \text{ при } \Delta t_i < \Delta t_{\min} \\ \Delta t = \Delta t_{\min}, \text{ при } \Delta t_i > \Delta t_{\min} \end{array} \right., \quad (9)$$

Для исследования переходных процессов в рассмотренных САУ использовалась компьютерная модель, представленная во второй главе, учитывающая нелинейные характеристики ИМ, запорной арматуры и насоса

ЗНП-10-60. При моделировании предложенной САУ (см. рисунок 9) использовался адаптер, описываемый выражением (7). Кроме этого, были применены параметры настройки $G_{\omega}^{\max} = 2910$ об/мин, $G_{\omega}^{\min} = 1810$ об/мин, период следования импульсов, рассчитанных по выражению (8) составлял 100 с, а по выражению (9) – 300 с. Параметры ПИД-закона, реализуемого с помощью ПДД²-ШИМ: коэффициент передачи – 0,25; время интегрирования – 200 с; минимальная длительность импульсов ШИМ – 0,1 с; время цикла регулятора – 5 с.

На рисунке 10 приведены переходные процессы в рассмотренных ССР ОФ для БЕ-1 при ступенчатом возмущении по расходу жидкости на входе БЕ-1 с 7,4 м³/ч до 8 м³/ч. При этом выбег вала ИМ составлял 2%. Наилучшее демпфирование в 200 с обеспечила предложенная двухканальная адаптивная САУ с адаптивным регулятором (далее по тексту «2-х канальная»). Наихудшее демпфирование обеспечила «исходная» система (менее 100 с). Число включений ИМ за 1 час работы с момента запуска для «исходной» и «2-х канальной» составило: 14 и 5. Адаптивный регулятор обеспечил наименьшее включение ИМ.

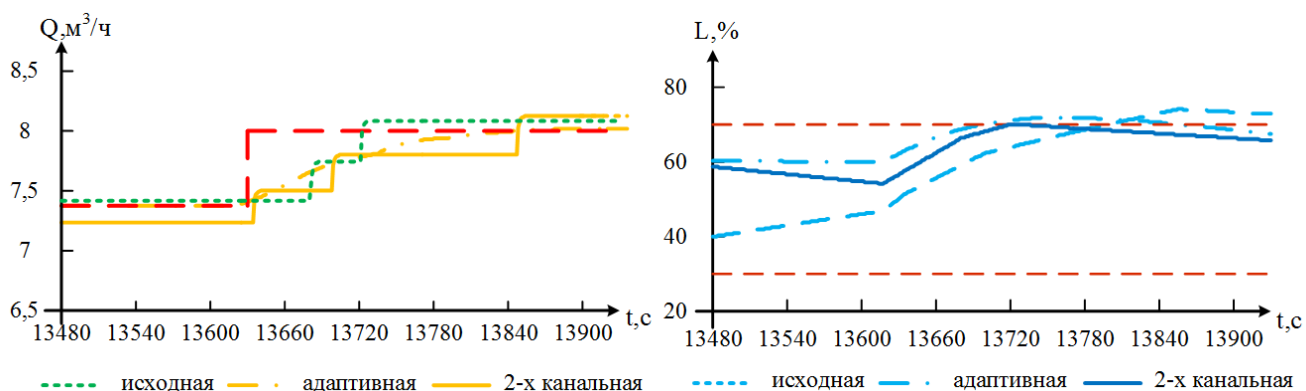


Рисунок 10 – Переходные процессы расхода ОФ и уровня в БЕ-1 при ступенчатом возмущении входного расхода

Увеличение ступенчатого возмущения по расходу жидкости на входе в БЕ-1 с 0,6 м³/ч до 2 м³/ч в «исходной» САУ приводит к выходу уровня жидкости в БЕ-1 за установленные пределы. Компенсация выбега вала с 2% до 0,2% позволяет в «исходной» САУ увеличить демпфирование до требуемых 200 с, однако уровень жидкости в БН выходит за установленные пределы. С другой стороны, выбег вала ИМ не оказывает существенного влияния в «2-х канальной» САУ с адаптивным регулятором, что обусловлено адаптацией длительностей импульсов по выражению (8).

В таблице 3 приведены показатели качества управления САУ БЕ-1 (число включений ИМ и отношения дисперсий расхода ОФ на выходе БЕ-1 к расходу жидкости на входе БЕ-1) за 3 часа работы при непрерывных возмущениях по расходу ОФ на входе БЕ-1 согласно выражению:

$$\begin{cases} Q_{\text{вх}}(t) = 0,6 \sin(0,19t) + 7,4 & \text{при } t < 3600 \\ Q_{\text{вх}}(t) = 0,6 \sin(0,19t) + 9,4 & \text{при } t \geq 3600 \end{cases} \quad (10)$$

Таблица 3 – Показатели качества управления БЕ

Регулятор	Выбег вала ИМ 2%		Выбег вала ИМ 0,2%	
	Число включений ИМ	Отношение дисперсий $Q_{\text{вых}}/Q_{\text{вх}}$	Число включений ИМ	Отношение дисперсий $Q_{\text{вых}}/Q_{\text{вх}}$
«Исходная»	472	0,48	52	0,13
«Адаптивная»	-	0,34	-	0,57
«2-х канальная»	8	0,06	11	0,06

Анализ таблицы 3 показывает, что ССР ОФ в БЕ-1 на основе предложенного двухканального адаптивного регулятора обеспечивает в 2÷8 раз лучшее демпфирование расхода ОФ и наименьшее число включений ИМ по сравнению с исходной системой и не требует применения компенсации выбега вала ИМ. При этом средняя частота вращения вала электродвигателя насоса составила 2200 об/мин по сравнению с 2930 об/мин у исходной системы. Кроме этого, из таблицы 3 видно, что выбег вала ИМ существенно влияет на демпфирование расхода ОФ в исходной системе и практически не влияет в САУ с адаптивным регулятором.

В четвертой главе описывается процесс апробации модернизированной системы стабилизации расхода ОФ, который проводился на РХЗ АО «СХК». В результате проведенной работы введены в эксплуатацию алгоритмы локальных САУ с ЧП и цифровым регулятором в количестве 37 контуров. Основная часть предложенных алгоритмов управления установкой реализована в виде алгоблочных процедур задачи «RsProg» программно-технического комплекса «УМИКОН», функционирующей под управлением ядра реального времени «mlb» и операционной системы Linux.

На рисунке 11 представлены временные диаграммы расхода и уровня САУ для исходной и предложенной систем.

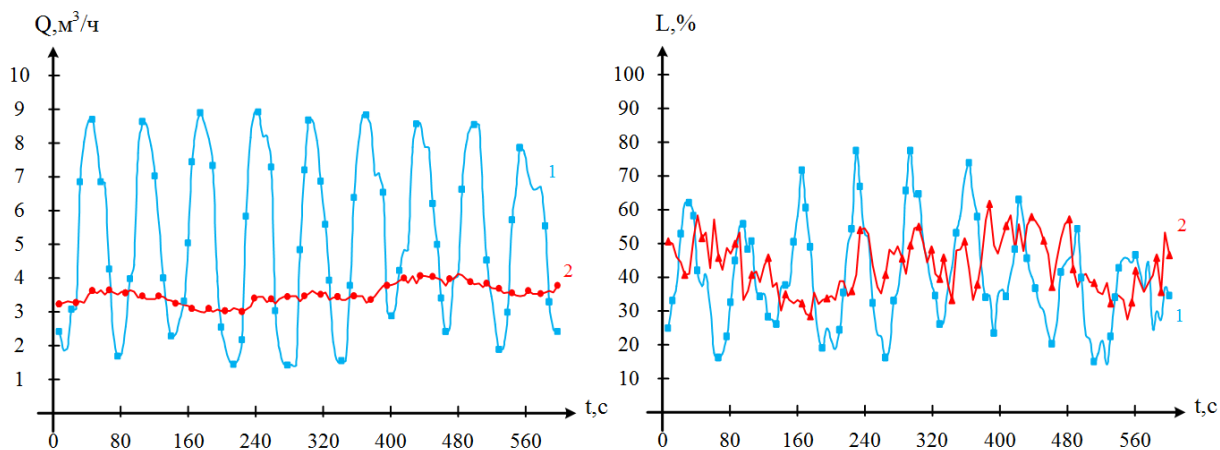


Рисунок 11 – Временные диаграммы выходного расхода и уровня жидкости в БЕ-1: 1 – в исходной системе; 2 – в предлагаемой системе.

В общем случае критерием управления может служить оценка среднеквадратичного отклонения мгновенного значения потока органической фазы от заданного среднего значения расхода органической фазы. При этом целью управления является минимизация критерия управления, а именно

снижение значения среднеквадратичного отклонения мгновенного значения суммарного расхода органической фазы с выхода первой и второй буферных ёмкостей.

Таблица 4 – Результаты анализа проведённых испытаний

Физическая величина	Исходная САУ	Предлагаемая САУ	Δ
СКО $Q_{\text{вых}}$, %	30	3	10
СКО $L_{\text{БН}}$, %	14	7	2
Частота вращения N , об/мин	2944	900	3,3
Ток насоса I , А	9,5	6,3	1,5
Мощность W , Вт	5,5	0,6	9,8

Анализ полученных результатов исследований показал, что предлагаемая САУ БЕ соответствует требованиям, предъявляемым к качеству управления САУ БЕ.

Применение предлагаемой САУ БЕ в составе САУ ОФ позволило в 10 раз сократить среднеквадратичное отклонение мгновенного значения суммарного расхода органической фазы с выхода буферных ёмкостей.

После окончания этапа опытной эксплуатации разработанное программное обеспечение вошло в состав АСУ ТП, и принято в промышленную эксплуатацию на радиохимическом заводе АО «СХК», о чём свидетельствует акт внедрения. Предложенная система, за счёт эффективного демпфирования расхода, обеспечивает техническую возможность увеличения расхода, что является необходимым, но не достаточным условием (также необходимы изменения в технологии) для увеличения производственной программы.

Исходя из итогов производственной деятельности завода за 2009 и 2016 годы, производственная, программа выросла более чем в 1,5 раза.

В приложении диссертации приведены акты внедрения результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В рамках диссертационной работы проведён анализ технологического объекта управления и разработана математическая модель каскада экстракционных колонн, описывающая динамику прохождения органической фазы. Модель позволяет синтезировать и испытывать алгоритмы управления действующими аппаратами, в основе модели лежит использование нейронечёткой логики, позволившей существенно увеличить ее точность в условиях ограниченного количества экспериментальных данных в сравнении с традиционными методами (полиномиальными, сплайн и т.д.).
2. Разработан алгоритм управления системы стабилизации расхода потока органической фазы в каскаде экстракционных колонн, отличающийся одновременным управлением частотами вращения валов двигателей насосов и

напором, что позволило повысить производительность и надёжность работы каскада экстракционных колонн.

3. Разработан алгоритм адаптации системы стабилизации потока органической фазы в каскаде экстракционных колонн с применением нейронечеткой логики, позволивший десятикратно снизить низкочастотные колебания расхода потока органической фазы, а также повысить производительность с 7,4 м³/ч до 10 м³/ч и надёжность работы каскада экстракционных колонн.
4. Результаты диссертационной работы внедрены и используются на радиохимическом заводе АО «СХК». Предложенная система, за счёт эффективного демпфирования расхода, обеспечивает техническую возможность увеличения расхода ОФ, что является необходимым условием для увеличения производственной программы.

Решена научная задача обеспечения повышения эффективности аффинажа урана, путём стабилизации потока органической фазы, за счёт средств системы автоматизированного управления. Экономический эффект от внедрения разработок составил 1,5 млн. руб., что подтверждено актом внедрения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК:

1. Горюнов А.Г., Иванов К.А. Система стабилизации потока органической фазы каскада колонн с частотным управлением насосами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2011. – № 6. – с. 47-52.
2. Горюнов А.Г., Иванов К.А., Двухканальная адаптивная система автоматического управления буферной ёмкостью с использованием частотного управления // Промышленные АСУ и контроллеры, 2013. – №9. – С. 3–7.
3. Горюнов А.Г., Иванов К.А., Шенцов Э.Ю., Биянов А.В. Система стабилизации потока органической фазы каскада экстракционных колонн с применением частотного управления погружными центробежными насосами // Известия высших учебных заведений. Физика, 2010. Т.53. – №11. – С. 206–210.

В других изданиях

1. Ivanov K.A., Goryunov A.G. Capacity pump control by dual-channel adaptive system with throttle and frequency Control // Advanced Materials Research Vol. 1084, 2015, P. 630-635.
2. Иванов К.А., Горюнов А.Г. Разработка системы автоматического управления, обеспечивающей демпфирование потока органической фазы каскада экстракционных колонн // Перспективные направления развития атомной отрасли: сборник тезисов Школы-конференции молодых атомщиков

Сибири, г. Томск, 5-6 октября 2011. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С. 57-58.

3. Горюнов А.Г., Иванов К.А. Система стабилизации потока органической фазы каскада колонн с частотным управлением насосами // Наука и образование в XXI веке: Сборник трудов международной заочной научно-практической конференции. В 5 ч. – Тамбов, 31 мая 2012. – Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2012. – Ч.2. – С. 42-45.

4. Горюнов А.Г., Иванов К.А. Система адаптивного управления потоком органической фазы каскада колонн с частотным управлением насосами // Обращение с отработанным ядерным топливом в России: Сборник трудов Российской научно-практической конференции. – Железногорск, 24–25 октября 2012.

5. Иванов К.А., Горюнов А.Г., Рогозный Д.Г. Нечёткая модель буферной ёмкости в адаптивной системе управления с использованием частотного привода // Сборник тезисов научно-практической конференции молодых специалистов и аспирантов "Молодежь ЯТЦ", 2015 – с. 134-137.

6. Иванов К.А., Шенцов Э.Ю., Рогозный Д.Г. Адаптивная система стабилизации потока органической фазы в экстракционном каскаде // Сборник тезисов VII научно-практической конференции молодых учёных и специалистов атомной отрасли "Команда", 2017 – с. 13-15.

7. Ivnov K., Goryunov A. The capacity pump control by dual-channel adaptive system with throttle and frequency control // VI Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности» Секция 1. Информационные технологии, автоматизация, системы управления. – Томск, 2014. – С. 14

8. Иванов К.А., Горюнов А.Г. Система стабилизации потока органической фазы каскада колонн с частотным управлением насосами // Всероссийская научно-практическая конференция, приуроченная к 105-летию со дня рождения Б.В. Громова (Томск, 1 – 3 октября 2014 г.). / Томский политехнический университет; Под ред. О.Б. Громов. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2014. – С. 20–21.

9. Иванов К.А. Двухканальная система стабилизации потока органической фазы каскада колонн с частотным управлением насосами // Современные техника и технологии: Сборник докладов XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Российской научно-практической конференции. – Томск, 14–18 апреля 2014 – с. 177-178.