

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизации и управления

Калашев Азамат Маратович

Исследование и разработка алгоритмов параметров цифрового регулятора с целью
оптимизации в промышленных автоматизированных системах

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7M07101 – Автоматизация и роботизация

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

УДК 681.518.5

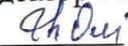
На правах рукописи

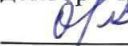
Калашев Азамат Маратович

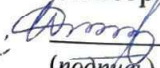
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации	Исследование и разработка алгоритмов параметров цифрового регулятора с целью оптимизации в промышленных автоматизированных системах
Направление подготовки	7М07101 – Автоматизация и роботизация

Научный руководитель
доктор PhD, ассоц. проф.
 Омирбекова Ж. Ж.
(подпись)
«18» июля 2025 г.

Рецензент
доктор PhD, ассоц. проф.
 Оракбаев Е. Ж.
(подпись)
«18» июля 2025 г.

Нормоконтроль
магистр техн. наук
 Манатов К. А.
(подпись)
«19» июля 2025 г.



Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий
Кафедра Автоматизации и управления

7М07101 – Автоматизация и роботизация



ЗАДАНИЕ
на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Калашеву А. М.

Тема Разработка алгоритмов настройки цифровых регуляторов для автоматизированных систем

Утверждена приказом Б. Жаутикова № 548-П/Ө от «04» декабря 2023 г.

Срок сдачи законченной работы «19» июня 2025 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: Grundfoss UPS-200: 230-240 В; 50 Гц; $\cos\varphi=0.6$.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- литературный обзор устройств управления насосными станциями;
- анализ электроприводных систем насосных станций;
- разработка математических моделей электроприводных систем;
- исследование и проектирование электроприводных систем;
- исследования электроприводных систем.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):
имитационная модель насосного агрегата с частотно-регулируемым электроприводом.

Рекомендуемая основная литература:

1 Матросов Ю.А. Теория автоматического управления. – М.: Наука, 2019. – 416 с.

2 Погорелов Н.А., Блинов А.Е. Электропривод и системы автоматизации насосных станций. – СПб.: Питер, 2018. – 368 с.

3 Кац Г.Я. Электропривод в системах водоснабжения. – М.: Энергия, 2020. – 272 с.

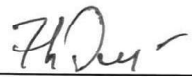
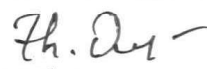
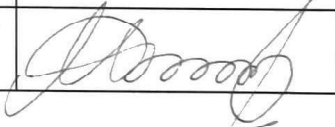
ГРАФИК

подготовки магистерской диссертации

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Аналитический раздел Обзор устройств управления насосными станциями	12 марта 2024 г.	
Технологический раздел Анализ электроприводных систем насосных станций	20 октября 2024 г.	
Расчетный раздел Разработка математических моделей электроприводных систем	10 февраля 2025 г.	
Расчетный раздел Исследования электроприводных систем	20 апреля 2025 г.	

Подписи

консультантов и нормоконтролёра на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

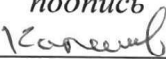
Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Аналитический раздел	Ж. Ж. Омирбекова канд. техн. наук	18.06.2025	
Технологический раздел	Ж. Ж. Омирбекова канд. техн. наук	18.06.2025	
Расчетный раздел	Ж. Ж. Омирбекова канд. техн. наук	18.06.2025	
Нормоконтролер	Қ. А. Манатов магистр техн. наук	19.06.25	

Научный руководитель


подпись

Омирбекова Ж. Ж.

Задание принял к исполнению обучающийся


подпись

Калашев А. М.

Дата

«20» 12 2023 г.

АНДАТПА

Диссертациялық жұмыс сорғы станцияларының электр жетек жүйелерінің (EPS NS) энергетикалық және динамикалық тиімділігін арттыруға арналған. MATLAB Simulink ортасында сорғы қондырғылары, жиілік түрлендіргіштері, қысым, жылдамдық және момент реттегіштері және құбыр желісінің элементтері бар модельдеу моделі жасалды.

Әр түрлі басқару конфигурацияларына талдау жасалды-сорғылар тобына бір түрлендіргіштен бастап әр қондырғыны жеке басқаруға дейін. Іске қосу, коммутация және бұзылу кезіндегі өтпелі кезеңдер модельденеді.

Нейрондық желіні болжау реттегіші (NN Predictive Controller) классикалық PI реттегішімен салыстырғанда тұрақты басқаруды қамтамасыз етеді, қысым ауытқулары мен қуат тұтынуды азайтады.

Өнімділіктің, реттеу сапасы мен энергия тиімділігінің нормаланған критерийлері негізінде құрылымдық-параметрлік оңтайландыру әдістемесі әзірленді. Нәтижелер сумен жабдықтау және су бұру жүйелерін жобалау және жаңарту кезінде қолданылады.

АННОТАЦИЯ

Диссертационная работа посвящена повышению энергетической и динамической эффективности электроприводных систем насосных станций (ЭПС НС). В среде Matlab Simulink разработана имитационная модель, включающая насосные агрегаты, частотные преобразователи, регуляторы давления, скорости и моментов, а также элементы трубопроводной сети.

Проведён анализ различных конфигураций управления – от одного преобразователя на группу насосов до индивидуального управления каждым агрегатом. Смоделированы переходные процессы при пусках, переключениях и возмущениях.

Предложен нейросетевой предсказательный регулятор (NN Predictive Controller), обеспечивающий более стабильное управление по сравнению с классическим ПИ-регулятором, снижая колебания давления и энергопотребление.

Разработана методика структурно-параметрической оптимизации на основе нормированных критериев производительности, качества регулирования и энергоэффективности. Результаты применимы при проектировании и модернизации систем водоснабжения и водоотведения.

ABSTRACT

The dissertation is devoted to improving the energy and dynamic efficiency of electric drive systems of pumping stations (EDS PS). A simulation model was developed in the Matlab Simulink environment, incorporating pump units, frequency converters, pressure, speed, and torque controllers, as well as elements of the pipeline network.

Various control configurations were analyzed – from a single frequency converter for a group of pumps to individual control of each unit. Transient processes during start-ups, switching operations, and disturbances were simulated.

A neural network predictive controller (NN Predictive Controller) is proposed, providing more stable control compared to the classical PI controller, reducing pressure fluctuations and energy consumption.

A method for structural and parametric optimization was developed based on normalized criteria for performance, control quality, and energy efficiency. The results can be applied in the design and modernization of water supply and wastewater systems.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Обзор устройств управления насосными станциями и методов улучшения их эффективности	9
1.1 Анализ основных схем построения электроприводных систем насосных станций	9
1.2 Методы регулирования параметров и технологического контроля в насосных системах	12
1.3 Оценка эффективности и подходы к совершенствованию электроприводных систем насосных станций	14
1.4 Оптимизация и проектные задачи при создании эффективных электроприводных систем насосных станций	19
2 Разработка математических моделей электроприводных систем с учётом конфигурации насосов и параметров водопроводной магистрали	21
2.1 Построение математических модели вакуумного насоса учётом динамики электроприводов и схем их подключения в составе насосных станций	21
2.2 Разработка модели в Matlab Simulink	25
2.3 Интеграция модели цифрового следящего электропривода в систему управления вакуумным насосом	26
3 Анализ электроприводных систем насосных станций	35
3.1 Исследование динамики насосного агрегата при работе с протяжённым магистральным трубопроводом	35
3.2 Анализ параллельной работы насосных агрегатов при использовании частотного регулирования параметров технологического процесса насосной станции	38
3.3 Анализ параллельной работы насосных агрегатов при смешанном регулировании параметров технологического процесса насосной станции	42
4 Исследование и проектирование электроприводных систем для повышения эффективности насосных станций	44
4.1 Цели синтеза и подходы к разработке электроприводных систем, обеспечивающих повышение эффективности работы насосных станций	44
4.2 Настройка регуляторов электроприводных систем насосных станций при их структурной перестройке в процессе работы	47
4.3 Общая концепция вариативной оптимизации электроприводных систем насосных станций	53
4.4 Структура критериев вариативной оптимизации электроприводных систем насосных станций	55
4.5 Подход и алгоритм вариативной оптимизации электроприводов	55
5 Исследования электроприводных систем	57
Заключение	64
Перечень сокращений	65
Список использованной литературы	66

ВВЕДЕНИЕ

Современные автоматизированные системы управления играют все более значимую роль в различных отраслях промышленности, включая производство, энергетику, химическую и пищевую промышленность.¹ Эффективность функционирования таких систем во многом определяется качеством управления технологическими процессами, где ключевой задачей является поддержание заданных параметров (температуры, давления, расхода, уровня и др.) с высокой точностью и надежностью. Для решения этих задач активно применяются цифровые регуляторы, обеспечивающие адаптивное и прецизионное управление. Насосные агрегаты, являющиеся неотъемлемой частью многих промышленных установок, требуют особого внимания к качеству регулирования, поскольку их работа напрямую влияет на стабильность технологических процессов, энергопотребление и долговечность оборудования.

Возрастающая сложность автоматизированных систем и ужесточение требований к их производительности, надежности и энергоэффективности обуславливают необходимость постоянного совершенствования методов управления. Цифровые регуляторы, благодаря своей гибкости, точности и возможности реализации сложных алгоритмов, являются ключевым совершенствованием для достижения этих требований. Однако, потенциал цифровых систем управления может быть полностью реализован только при условии корректной и оптимальной настройки регуляторов. Традиционные методы настройки часто не обеспечивают требуемого качества управления в условиях изменяющихся параметров объекта или при наличии существенных нелинейностей и возмущений. Это подчеркивает актуальность разработки и исследования усовершенствования алгоритмов настройки цифровых регуляторов, способных адаптироваться к специфике объекта управления и обеспечивать робастное и эффективное управление.

Цифровизация управления представляет собой не просто замену аналоговых компонентов на цифровые аналоги, а качественный переход, открывающий возможности для реализации принципиально новых подходов к оптимизации технологических процессов. Это особенно важно для энергоемких объектов, таких как насосные установки, где даже незначительное повышение эффективности управления способно привести к существенной экономии энергоресурсов в долгосрочной перспективе. Аналоговые регуляторы ограничены в сложности реализуемых законов управления и возможностях адаптации. В отличие от них, цифровые регуляторы, обладая значительной вычислительной мощностью, позволяют применять сложные алгоритмы, такие как прогнозирующее управление на основе модели или адаптивные методы, которые способны учитывать множество переменных, нелинейности объекта и действующие ограничения.

Это обеспечивает более точное и экономичное функционирование системы, что является критически важным для современных промышленных предприятий.

Целью исследования является разработка алгоритмов настройки цифровых регуляторов для автоматизированных систем управления вакуумным насосом. Вакуумный насос выступает в качестве объекта управления, требующего высокой точности регулирования давления в условиях изменения внешних факторов и характеристик нагрузки. Это особенно актуально в промышленных процессах, где стабилизация вакуума напрямую влияет на качество продукции и эффективность работы оборудования.

Основная задача состоит в создании методики настройки цифровых регуляторов, которая обеспечит оптимальное сочетание быстродействия, устойчивости и точности управления. Для этого необходимо учесть динамические характеристики вакуумного насоса, включая инерционность, нелинейность и возможные колебания давления при изменении условий работы. Также требуется обеспечить адаптивность регулятора для компенсации внешних возмущений и изменения параметров системы.

Для решения поставленной задачи планируется:

- разработать математическую модель вакуумного насоса, описывающую его динамические свойства.
- исследовать влияние различных методов настройки регуляторов (например, ПИД-регуляторов) на характеристики системы.
- создать алгоритмы автоматической или полуавтоматической настройки регуляторов с учетом текущих условий эксплуатации.
- провести имитационное моделирование работы системы с разработанными алгоритмами.
- оценить эффективность предложенных решений на примере типового промышленного процесса.
- результатом работы станет универсальная методика настройки цифровых регуляторов, применимая к вакуумным насосам в автоматизированных системах, обеспечивающая стабильность, энергоэффективность и надежность управления.

1 Обзор устройств управления насосными станциями и методов улучшения их эффективности

1.1 Анализ основных схем построения электроприводных систем насосных станций

Переход от аналоговых к цифровым системам управления ознаменовал собой революцию в промышленной автоматизации. Цифровые регуляторы стали неотъемлемой частью современных АСУ благодаря ряду неоспоримых преимуществ. К ним относятся высокая гибкость настройки, позволяющая адаптировать систему к изменяющимся условиям эксплуатации; повышенная точность регулирования, достигаемая за счет более точной обработки сигналов и реализации сложных алгоритмов; возможность имплементации продвинутых методов управления, таких как прогнозирующее или адаптивное управление; а также легкость интеграции с системами верхнего уровня, такими как SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) и MES (Manufacturing Execution Systems).

Области применения цифровых регуляторов чрезвычайно широки и охватывают практически все отрасли промышленности: от нефтегазовой и химической, где требуется точное поддержание параметров технологических процессов, до энергетики, пищевой промышленности, систем водоснабжения и водоотведения, где важны надежность и энергоэффективность.¹

Внедрение цифровых технологий в управление – это не просто замена аналоговых компонентов на их цифровые аналоги, а фундаментальный сдвиг, открывающий путь к реализации принципиально новых подходов к оптимизации. Это особенно критично для энергоемких установок, таких как насосные агрегаты, где даже небольшое улучшение эффективности управления может привести к значительной экономии энергоресурсов в долгосрочной перспективе. Аналоговые регуляторы по своей природе ограничены в сложности реализуемых законов управления и их адаптационных возможностях. Цифровые же системы, опираясь на мощные вычислительные ресурсы, позволяют применять сложные алгоритмы, включая МРС и адаптивное управление. Эти алгоритмы способны учитывать множество взаимосвязанных переменных, нелинейности объекта управления и существующие технологические ограничения, что в итоге обеспечивает более точное, стабильное и экономичное функционирование всей системы.

С учётом широкого применения насосного оборудования в различных отраслях и его высокой доли в общем потреблении электроэнергии, актуальным становится анализ направлений развития электроприводных систем многоагрегатных насосных станций. Также важно рассмотреть функции типовых приводных устройств, методы повышения эффективности электроприводных систем за счёт управления электромагнитными,

механическими и технологическими параметрами, а также оптимизации процессов управления при изменяющейся подаче жидкости в магистральных.

В современных насосных станциях используется параллельное, последовательное и комбинированное подключение насосных агрегатов. Конкретная гидравлическая схема определяется особенностями технологического процесса, техническими требованиями и условиями эксплуатации. Независимо от выбранной схемы, управление насосами осуществляется централизованно, с использованием средств ЭПС, при этом решаются ключевые задачи:

- анализ и минимизация энергозатрат;
- обеспечение стабильных рабочих параметров (давление и подача) при изменяющейся нагрузке;
- предотвращение негативных гидравлических эффектов, таких как кавитация и гидроудары, повышение надёжности оборудования;
- автоматическая оптимизация управления на основе текущих показателей эффективности работы насосов и всей станции.

В настоящее время наблюдается активное внедрение ЭПС и систем автоматизации в насосных станциях, включая алгоритмы самонастройки и автоматической оптимизации. Во вновь проектируемых станциях количество насосных агрегатов сокращается, но возрастает их мощность. Такие объекты обычно оснащаются резервными насосами и дублирующими источниками питания для обеспечения бесперебойной работы.

Для параллельной работы нескольких НА применяются различные схемы построения ЭПС:

- групповое управление с одним преобразователем частоты, к которому подключаются все электроприводы через коммутационные устройства.
- то же с добавлением устройств плавного пуска (УПП) – как групповых, так и индивидуальных для каждого привода.
- несколько частотных преобразователей (например, два или три), каждый из которых управляет своей группой насосов.
- индивидуальный частотных преобразователей для каждого электропривода, что обеспечивает наивысшую эффективность, но требует наибольших затрат.

Последний вариант, несмотря на высокую стоимость, позволяет достичь наилучших результатов с точки зрения управления технологическими процессами и энергопотребления.

В ситуациях, когда требуется создание высокого давления в трубопроводе при крутой нагрузочной характеристике внешней сети, применяют последовательное подключение двух или более насосных агрегатов, перекачивающих воду в один и тот же напорный трубопровод. Насосы при этом могут располагаться как рядом, так и на удалении друг от друга.

Однако при таком способе подключения могут возникать нежелательные явления, включая кавитацию и так называемые турбонагрузки, при которых передний насос передаёт вращательный момент следующему, вызывая самопроизвольное вращение его рабочего колеса. Это может привести к поломке оборудования. Для предотвращения таких эффектов при последовательной схеме подключения применяются индивидуальные преобразователи частоты для каждого насоса, а в случае остановки одного из них в систему включается обводной байпас.

В системах водоснабжения насосные станции, как правило, функционируют с параллельным включением насосных агрегатов (НА), что позволяет обеспечивать широкий диапазон расхода воды. Основной задачей таких систем является стабильная и надежная подача воды потребителям с требуемыми параметрами давления при минимальных энергетических затратах. При этом, как подчёркивается в большинстве научных источников, оценка эффективности насосных станций зачастую сводится к вопросам энергосбережения. Однако подобный подход считается неполным без учета анализа динамических процессов, происходящих при изменении конфигурации оборудования и структуры систем электропривода в условиях параллельной работы насосов.

Параллельное включение насосных агрегатов с индивидуальными частотными преобразователями либо с одним общим преобразователем требует грамотного распределения нагрузки и подачи между агрегатами. Особенности трудности возникают в тех случаях, когда один насос регулируется по частоте, а остальные напрямую подключены к сети. В таких схемах затруднено поддержание стабильного давления, особенно когда необходимая подача лишь немного превышает производительность одного насоса. Это типичная ситуация на практике. При использовании дросселирования в подобных условиях возникают значительные потери энергии. В результате часто устанавливают ЧП только на один насос, чтобы компенсировать недостающий объём подачи. Однако такой подход приводит к нештатной работе регулируемого насоса и увеличенной нагрузке на остальные агрегаты, что снижает общую эффективность и надёжность системы.

При наличии ЧП у каждого из насосов данная проблема может быть решена с помощью выравнивания нагрузок между агрегатами, что обеспечивает более устойчивую и экономичную работу.

Мировые производители электрооборудования предлагают специализированные решения для насосных систем, вентиляторов и компрессоров, включающие передовые технологические функции. Среди них – автоматическая адаптация тока двигателя к текущей нагрузке в режимах U/f и векторного управления без датчика скорости, возможность подключения ЧП к уже вращающемуся двигателю (перезапуск на ходу), каскадное включение до четырёх двигателей для регулировки давления при переменном расходе, а

также встроенные ПИД-регуляторы, позволяющие управлять скоростью в зависимости от давления, уровня и расхода.

Также реализуются функции переключения на сетевое питание (байпас) при достижении заданных параметров и управления вспомогательным оборудованием, таким как задвижки. Широкий выбор интерфейсов и соединений позволяет интегрировать такие решения в разнообразные задачи автоматизации насосных систем.

Таким образом, задача оптимизации электроприводов при параллельной работе насосов остаётся крайне актуальной, особенно с учётом необходимости точного и энергоэффективного управления.

1.2 Методы регулирования параметров и технологического контроля в насосных системах

Режим функционирования насосных станций в системах водоснабжения зависит от суточных, недельных и сезонных колебаний водопотребления. На эти изменения влияют различные факторы, включая погодные условия (температура воздуха, уровень осадков) и социальные аспекты, такие как численность населения и график работы предприятий. В связи с этим возникает необходимость регулировать основные технологические параметры насосных агрегатов – подачу и напор. Цель такого регулирования заключается в согласовании напорной характеристики насосной станции с характеристикой магистрального трубопровода, чтобы они пересекались в одной рабочей точке. Эта точка определяет оптимальные режимы работы каждого насосного агрегата, входящего в систему.

Одним из наиболее простых и широко применяемых способов регулирования параметров насосных агрегатов является дросселирование. Этот метод основан на использовании механических устройств (таких как задвижки, клапаны, диафрагмы), установленных на напорном трубопроводе. При частичном перекрытии потока увеличивается гидравлическое сопротивление, что снижает объём подачи.

Основным преимуществом дросселирования является его конструктивная простота и доступность. Однако значительным недостатком является снижение общего КПД насосной станции, особенно при значительном уменьшении подачи. Это связано с тем, что агрегаты создают избыточный напор, который не используется по назначению, а теряется в сопротивлении регулирующего устройства. Кроме того, при сильном дросселировании возрастает давление на выходе насоса, что может привести к утечкам через уплотнения и ускоренному износу арматуры.

Потери энергии при таком регулировании могут достигать 15–20% от потребляемой мощности. Применение дросселирования оправдано для насосов с высокой производительностью и пологой характеристикой напора,

однако энергетические потери не должны превышать 2% от общего расхода энергии на перекачивание.

Другой метод – байпасное регулирование – основан на установке параллельной линии (байпаса) с задвижкой, через которую часть перекачиваемой жидкости возвращается на вход насоса. Такой подход снижает КПД агрегата, поскольку создаётся непроизводительная циркуляция жидкости, особенно при существенном снижении подачи. Однако в случае насосов с резко падающими напорными характеристиками байпасирование оказывается более экономичным по сравнению с дросселированием.

Ступенчатое регулирование подачи достигается путём включения или отключения отдельных насосов или их групп без применения дополнительных средств управления. Этот способ прост в реализации, но неэффективен при переменном режиме водопотребления. Частые пуски и остановки электродвигателей ускоряют их износ, снижают эффективность и вызывают скачки давления, провоцируя гидравлические удары. Чтобы снизить амплитуду таких колебаний, может потребоваться строительство промежуточных резервуаров.

Наиболее прогрессивным и энергоэффективным методом регулирования является изменение частоты вращения рабочего колеса насоса, которое обеспечивает гибкое управление подачей и напором с минимальными потерями. Такой способ позволяет плавно запускать оборудование, синхронизировать работу параллельных агрегатов и избежать гидроударов. Регулировка может осуществляться с помощью гидравлических муфт или частотно-регулируемых электроприводов (ЧРЭП).

При использовании гидравлической муфты скорость вала насоса регулируется за счёт изменения объема масла в муфте, при этом частота вращения двигателя остаётся неизменной. На номинальных оборотах КПД муфты достигает 94%, но при снижении частоты ниже 80% эффективность резко падает, что ограничивает её применение узким диапазоном нагрузок.

Частотно-регулируемые электроприводы (ЧРЭП) являются современным, экономичным и гибким средством управления насосами. Основу ЧРЭП составляют частотный преобразователь, асинхронный двигатель и насос. Изменяя частоту и напряжение питания двигателя, можно регулировать скорость вращения и, соответственно, подачу. При этом КПД остаётся высоким, что позволяет значительно снизить энергопотребление за счёт устранения избыточного давления. Современные ЧП обеспечивают КПД на уровне 95-98 процентов, причём он почти не зависит от частоты вращения. Это делает ЧРЭП одним из наиболее эффективных методов регулирования в системах водоснабжения.

Эффективность каждого метода регулирования, как правило, определяется характеристиками магистральной трубопроводной сети и изменениями в режиме водопотребления. Наибольшую энергоэффективность частотно-регулируемые электроприводы (ЧРЭП) демонстрационные

станции регулируют при работе в сетях с низкой статической составляющей давления. В условиях высокого статического давления эффективность регулирования за счёт изменения частоты вращения насосов снижается.

На практике часто используется сочетание различных методов регулирования. Например, ступенчатое управление насосами может комбинироваться с частотным регулированием для достижения большей гибкости и энергетической эффективности. Учитывая возможности каждого метода, можно сформировать алгоритм управления насосной станцией, который позволит поддерживать требуемые технологические параметры с минимальными энергетическими затратами.

1.3 Оценка эффективности и подходы к совершенствованию электроприводных систем насосных станций

Насосные станции представляют собой одни из наиболее энергоёмких объектов в технологической инфраструктуре, потребляя свыше 25 процентов всей используемой электроэнергии. По результатам проведённых исследований установлено, что внедрение частотно-регулируемых электроприводов (ЧРЭП) в систему управления насосами позволяет достичь экономии электроэнергии в диапазоне от 10 до 30 процентов.

Рассмотрим три ключевых аспекта, определяющих эффективность работы насосных станций:

- 1) Снижение энергозатрат и выбор оптимальных режимов работы, направленных на минимизацию потребляемой электроэнергии.
- 2) Обеспечение стабильных значений давления — как в статических, так и в динамических режимах, при изменении расхода жидкости, с одновременным снижением вероятности возникновения нежелательных явлений, таких как кавитация и гидроудары.
- 3) Оптимизация управления и эксплуатационных процессов, включающая разработку эффективных систем автоматизации и использование показателей энергоэффективности электроприводов насосных агрегатов (НА) в процессе эксплуатации.

Снижение энергозатрат и выбор оптимальных режимов работы определяется по формулам

$$P_{\text{эл}} = \sum_{i=1}^m \frac{\rho g Q_i H_i}{\eta_{i\text{НА}}}, \quad (1.1)$$

$$\eta_{i\text{НА}} = \eta_{i\text{Н}} \eta_{i\text{Д}} \eta_{i\text{ПЧ}} \quad (1.2)$$

где $\eta_{i\text{НА}}$ — коэффициент полезного действия насосного агрегата;

η_{iH} – КПД насоса;
 $\eta_{iПЧ}$ – КПД преобразователя частоты;
 $\eta_{iД}$ – КПД асинхронного электродвигателя;
 ρ – плотность перекачиваемой жидкости;
 g – ускорение свободного падения, $\frac{м}{с^2}$;
 m – количество одновременно работающих насосных агрегатов, $м^3$;
 Q_i – подача i -го насосного агрегата;
 H_i – создаваемый им напор.

Предполагая, что каждый насосный агрегат создаёт одинаковое значение напора H_i , и принимая $Q = \sum(Q_i)$ общий расход воды как сумму подач всех агрегатов: энергозатраты насосной станции на перекачивание можно определить по следующей формуле

$$e = \frac{1}{367} \frac{H_i}{Q_i} \sum_{i=1}^m \frac{Q_i}{\eta_{iHA}} \quad (1.3)$$

Формула учитывает, что минимальное значение энергопотребления достигается при максимальных значениях КПД насосных агрегатов.

$$\eta_{HC} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Q_{iHA}}{\eta_{iHA}}}{\sum_{i=1}^n \frac{Q_{iHA}}{\eta_{iHA}}} \quad (1.4)$$

Минимальное энергопотребление насосной станции достигается при максимальном КПД каждого насосного агрегата (НА). Такое состояние наблюдается в определённой рабочей точке характеристики насоса $H(Q)$, которая определяется значениями подачи Q , напора H и частотой вращения рабочего колеса n .

Потери мощности и энергии в системах, состоящих из преобразователя частоты и асинхронного двигателя, а также зависимость их КПД при нагрузках, характерных для вентиляторного типа. Как правило, насосы имеют более низкий КПД из-за значительных гидравлических потерь. Однако с помощью частотного регулирования скорости вращения рабочего колеса можно добиться максимального КПД насоса в рабочем диапазоне подач.

На рисунке 1.1 представлены графики зависимости КПД насоса $\eta_H(Q)$ для:

- одного регулируемого НА,
- трёх насосов, из которых регулируется только один,
- трёх насосов с частотным регулированием всех агрегатов.

Наибольшие гидравлические потери наблюдаются в конфигурациях с двумя параллельно работающими насосами, когда один работает на полной производительности, а другой регулируется по частоте. При снижении скорости вращения регулируемого насоса его КПД падает, а потери резко возрастают – до 18% от общей мощности установки. В этом случае суммарные потери электроэнергии могут превышать 25% из-за снижения эффективности регулируемого насоса на низкой производительности.

При увеличении количества насосов до трёх или четырёх (из которых регулируется один) потери существенно снижаются. Наиболее эффективным признано соотношение регулируемых и нерегулируемых насосов как 1/2 или 1/3.

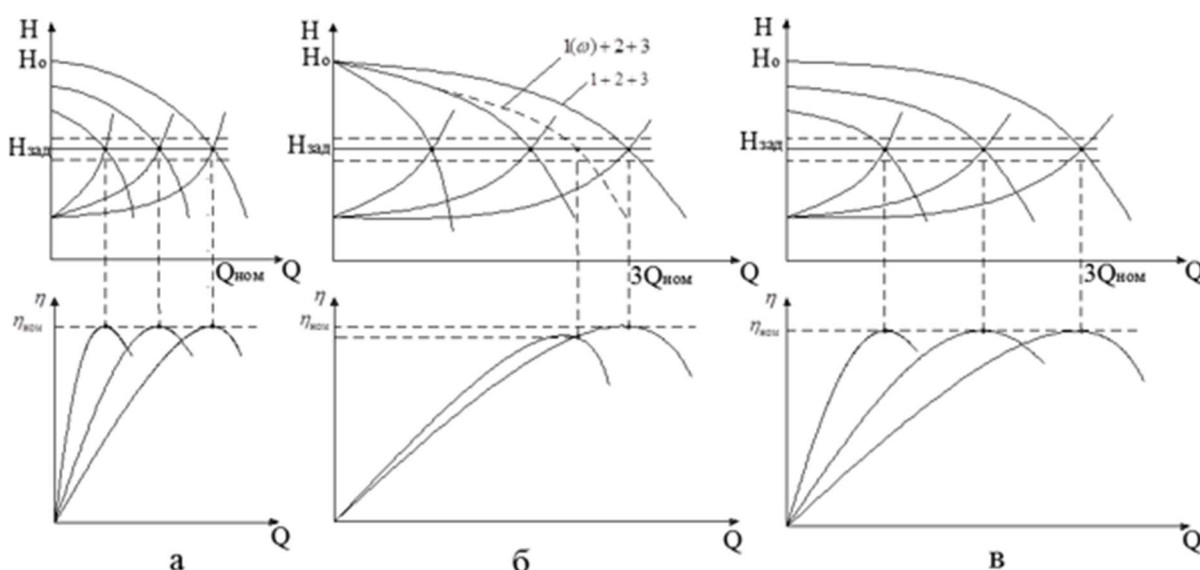


Рисунок 1.1 – Зависимость коэффициента полезного действия от расхода при различных схемах подключения насосных агрегатов

На эффективность насосных станций, оснащённых регулируемыми электроприводами, значительное влияние оказывает статическое давление магистральной сети. Как показано в исследовании, с увеличением доли статического давления снижается эффективность частотного регулирования насосов, поскольку возможности по регулированию подачи становятся ограниченными. В то же время, в системах, где насос подаёт воду непосредственно в сеть и статическая составляющая давления невелика, применение частотно-регулируемых электроприводов (ЧРЭП) на каждом насосном агрегате позволяет существенно повысить энергоэффективность всей системы.

Обеспечение стабильных параметров давления при переменном расходе и минимизация гидравлических нарушений.

Использование индивидуальных ЧРЭП, наряду с высоким уровнем автоматизации и цифрового управления, позволяет реализовать гибкое и

точное регулирование технологических параметров — таких как напор, подача и нагрузка. Это достигается путём управления электромагнитными и механическими переменными в электроприводных системах (ЭПС), что обеспечивает оптимальные рабочие режимы как для отдельных насосов, так и для всей станции:

- БУМ – блоки управления моментами,
- РС – регуляторы скорости,
- РД – регуляторы давления,
- РСМ – регуляторы соотношения моментов нагрузки электроприводов,
- ЗИ – задатчики интенсивности ускорения и торможения.

В процессе работы в ПЛК поступает информация о текущем расходе воды, давлении в магистрали, мощности и энергопотреблении насосов. Это позволяет в режиме реального времени выполнять автоматическую оптимизацию рабочих параметров, подстраивая управление в соответствии с изменяющимися условиями. При этом могут использоваться различные модификации регуляторов соотношения моментов (РСМ), адаптированных под особенности конкретной насосной системы.

Для управления переменными, включая давление в насосных агрегатах (НА), могут применяться различные типы регуляторов и алгоритмы управления. Среди них – традиционные ПИД-, ПИ- и И-регуляторы, модальные регуляторы, нечеткие алгоритмы и нейросетевые методы, а также их комбинированные решения.

Классический ПИД-регулятор является наиболее распространенным типом регулятора в промышленности благодаря своей простоте, эффективности и робастности. Управляющее воздействие $u(t)$ в непрерывном ПИД-регуляторе формируется на основе сигнала ошибки $e(t)=r(t)-y(t)$, где $r(t)$ – заданное значение (уставка), а $y(t)$ – текущее значение регулируемой величины

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (1.5)$$

где K_p – пропорциональный коэффициент;

K_i – интегральный коэффициент;

K_d – дифференциальный коэффициент.

Каждая из трех составляющих вносит свой вклад в формирование управляющего воздействия/

Пропорциональная (П) составляющая реагирует на текущее значение ошибки. Увеличение K_p повышает быстродействие системы, но может привести к увеличению перерегулирования и колебательности.

Интегральная (И) составляющая устраняет статическую ошибку, накапливая ошибку во времени. Однако чрезмерное интегральное воздействие может привести к насыщению интегратора (и увеличению перерегулирования).

Дифференциальная (Д) составляющая реагирует на скорость изменения ошибки, обеспечивая демпфирование и предсказывая будущее поведение ошибки. Это позволяет уменьшить перерегулирование и улучшить реакцию на быстрые возмущения. Однако Д-составляющая чувствительна к высокочастотным шумам в сигнале ошибки.

На практике наибольшее распространение получили традиционные регуляторы:

- ПИ-регуляторы — в электромагнитных цепях;
- П или ПИ — в системах управления скоростью;
- Или ПИ — для контуров, регулирующих давление.

Использование нечеткой логики и нейросетей более уместно не для прямого построения регуляторов, а для реализации блоков автоматической настройки, обеспечивающих адаптацию параметров традиционных регуляторов в процессе эксплуатации. Такие блоки могут функционировать в качестве регуляторов в системах самонастройки.

Нечеткие алгоритмы позволяют выполнять приблизительную (условную) оптимизацию сложных регулировочных контуров даже при отсутствии точной математической модели объекта. Нейронные сети, в свою очередь, обладают способностью обучаться в изменяющихся условиях, что даёт возможность использовать экспертные знания и данные эксплуатации для автоматической адаптации параметров регуляторов. Для этого применяются специальные методы обучения, включая алгоритмы интерполяции и подгонки параметров под исторические данные.

При этом стоит отметить, что отсутствие необходимости точного математического описания системы — не является существенным преимуществом таких подходов. В процессе настройки и эксплуатации системы — это знание всё равно формируется — явно или неявно.

Важно подчеркнуть, что для эффективного управления группой взаимосвязанных НА, с минимизацией кавитации и гидроударов, необходимо опираться на точные математические модели всей системы, включая:

- модель параллельно работающих насосов;
- модель выходного коллектора;
- модель напорной магистрали;
- модель электроприводов с векторным управлением (в том числе без датчиков скорости);
- модель внешних возмущений со стороны нагрузки.

Только при комплексном учёте всех этих факторов возможно обеспечение высокого качества управления и устойчивой работы насосной станции.

1.4 Оптимизация и проектные задачи при создании эффективных электроприводных систем насосных станций

Выбор наиболее эффективного варианта системы управления насосным агрегатом (НА) проводится в рамках общей методологии проектирования сложных систем управления (СУ) и включает следующие этапы:

- 1) Синтез структуры системы – определение архитектуры будущей системы управления.
- 2) Организация взаимодействия подсистем – согласование работы всех составляющих элементов системы управления электроприводами НА.
- 3) Учёт внешних возмущений – анализ и компенсация возможных внешних факторов, влияющих на работу системы.
- 4) Синтез оптимальных структур подсистем – выбор наиболее подходящих конфигураций и параметров для всех компонентов управления.
- 5) Выбор алгоритмов управления – разработка и внедрение наиболее эффективных алгоритмов работы системы в различных режимах.

Разработка системы управления электроприводами НА осуществляется с учётом целей и задач, стоящих перед системой в конкретной технологической цепочке – например, обеспечение надёжной подачи воды. Эффективность создаваемой системы оценивается по критериям качества, отражающим степень её соответствия этим целям (энергоэффективность, точность, устойчивость, надёжность и т.д.).

В общем виде задача выбора оптимального варианта электроприводной системы НА формулируется как многокритериальная задача принятия решений, в которой необходимо определить такой вариант системы, который наилучшим образом соответствует заданной совокупности требований и ограничений.

Задача выбора оптимального варианта электроприводной системы по совокупности критериев сводится к формализации процесса принятия решений. Для этого вводится отображение Q , которое связывает вектор критериев и вектор параметров варианта с числовым значением:

$$E = Q(A_j, Q_i), i = 1, n; j = 1, m \quad (1.6)$$

где E – это оценка предпочтительности конкретного решения.

A_j – варианты построения системы

Q_i – совокупность критериев

Q – представляет собой обобщённый критерий, который позволяет каждому возможному решению присвоить числовую характеристику.

Один из самых простых подходов к формированию обобщённого критерия заключается в выборе одного из критериев q_k в качестве основного

(целевого), в то время как остальные критерии рассматриваются как ограничения, задающие допустимую область решений или альтернатив.

$$Q = q_k \begin{cases} q_i \geq q_i^{(0)}, & i = \overline{1, l}; \\ q_i \leq q_i^{(0)}, & i = \overline{l+1, n}; i \neq k \end{cases} \quad (1.7)$$

Величины $q_i^{(0)}$ представляют собой допустимые значения по всем критериям, кроме выбранного основного критерия q_k

В тех случаях, когда невозможно выделить один критерий в качестве обобщённого, используется более сложный подход к построению обобщённого критерия – например, его представляют в виде взвешенной суммы

$$Q = \sum_{i=1}^n b_i q_i(a) \quad (1.8)$$

где $b_1, b_2, \dots, b_n$ – это весовые коэффициенты, отражающие относительную значимость каждого критерия в общей оценке.

Задачи структурной оптимизации электроприводной системы насосного агрегата (НА) решаются с применением методов системного анализа. При проектировании такой системы учитываются наиболее значимые частные критерии, среди которых важнейшими являются показатели энергоэффективности, динамической точности и другие. Остальные критерии включаются в расчёт в виде ограничений на допустимые параметры системы.

Для поиска оптимального решения используются следующие подходы:

- точные переборные методы, такие как метод ветвей и границ, динамическое программирование и их сочетания;
- приближённые алгоритмы с гарантированной погрешностью – как по целевой функции, так и по ограничениям;
- генетические алгоритмы (ГА) и другие многокритериальные эволюционные методы.

Использование одного из этих подходов позволяет спроектировать электроприводную систему НА, соответствующую заданным техническим и эксплуатационным требованиям.

2 Разработка математических моделей электроприводных систем с учётом конфигурации насосов и параметров водопроводной магистрали

2.1 Построение математических модели вакуумного насоса учётом динамики электроприводов и схем их подключения в составе насосных станций

В настоящее время на насосных станциях (НС) значительно возросло применение электроприводных систем (ЭПС) и средств автоматизации, которые в совокупности формируют интегрированные электроприводные системы (ИЭПС). Всё чаще во вновь проектируемых НС на всех насосных агрегатах (НА) внедряются частотно-регулируемые электроприводы. Применение современных ЭПС и автоматизированных систем управления обеспечивает повышение эффективности работы НС по трём основным направлениям:

- 1) Поддержание заданных значений давления (как статических, так и динамических) при любых изменениях расхода жидкости в трубопроводе;
- 2) Минимизация негативных гидродинамических явлений, таких как кавитация и гидравлические удары;
- 3) Энергосбережение и повышение общей экономичности за счёт оптимизации режимов работы и структуры управляющих комплексов.

В следующем разделе рассматривается формирование базы математических моделей, описывающих компоненты НА и НС, предназначенных для построения структурных блоков, применяемых при синтезе и оптимизации параметров систем управления. Компоненты насосных агрегатов включают насосы, электродвигатели, преобразователи частоты, а также измерительно-управляющие устройства. Компоненты насосных станций охватывают агрегаты, элементы, связывающие их с магистралью, и средства управления переменными и их взаимосвязями.

Все эти компоненты представлены в виде модулей и функциональных блоков, адаптированных под различные конфигурации НА и НС. Такая модульная структура обеспечивает гибкость и вариативность при проектировании электроприводных систем и позволяет выбирать наилучшие решения с учётом требований к эффективности. Математическое моделирование основано на динамическом представлении каждого компонента, которое абстрактно отражает его физические свойства и взаимодействие с окружающей средой.

Изменение частоты вращения рабочего колеса насоса приводит к изменению всех основных эксплуатационных параметров.

Для пересчёта характеристик насоса в зависимости от текущей частоты вращения ω_i применяются формулы подобия

$$P_i = k_p \omega_i^2, \quad (2.1)$$

$$Q_i = k_Q \omega_i, \quad (2.2)$$

$$M_i = k_M \omega_i^2, \quad (2.3)$$

$$P_i = k_p \omega_i^3 \quad (2.4)$$

где P_i – текущее давление, Па;
 Q_i – текущая подача, м³;
 M_i – текущий момент статического сопротивления, Ом;
 P – потребляемая мощность. Ватт;
 ω_i – текущая частота вращения рабочего колеса насоса, об/мин.

Для упрощения расчётов давление часто выражают через напор с использованием следующего соотношения

$$P_i = H_i \rho g \quad (2.5)$$

где H_i – напор, м;
 ρ – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³;
 $g = 9,8$ м/с².

Напорная характеристика насоса при переменной частоте вращения описывается квадратичной зависимостью

$$P_i = P_0 \left(\frac{\omega_i}{\omega_{\text{НОМ}}} \right)^2 - R_{\text{НАС}} \cdot Q_i^2 \quad (2.6)$$

где p_0 – давление при нулевой подаче на номинальной частоте, Па;
 $R_{\text{НАС}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления насоса;
 Q_i – текущая подача, м³.

Коэффициент сопротивления R насоса определяется по номинальным параметрам следующим образом

$$R_{\text{НАС}} = \frac{p_0 - p_{\text{НОМ}}}{Q_{\text{НОМ}}^2} \quad (2.7)$$

Для определения давления при нулевой подаче на любой частоте $\omega_{\text{ном}}$ используется масштабирование по закону подобия

$$P_{0i} = k_{p0} \omega_i^2 \quad (2.8)$$

Эти зависимости используются при моделировании насосных агрегатов, работающих в составе электроприводных систем с частотным регулированием.

Модели информационно-измерительных средств. Косвенное определение частоты вращения электропривода.

В системах векторного управления электроприводами насосных агрегатов (НА), где частотное регулирование осуществляется в ограниченном диапазоне, как правило, не применяются энкодеры. Вместо этого частота вращения оценивается косвенным методом с использованием следующего выражения

$$\omega = (\omega_{0\text{эл}} - \omega_p) \cdot p_{\text{п}} \quad (2.9)$$

Аналоговый сигнал – это электрический сигнал (напряжение или ток), который может непрерывно изменяться в некотором диапазоне, представляя текущее значение физической величины (например, температуры или давления). Амплитуда аналогового сигнала принимает любые значения внутри диапазона, то есть сигнал является непрерывным во времени и по величине. Иными словами, изменение параметра отображается плавным изменением уровня сигнала – без резких скачков.

Цифровой сигнал – это сигнал, который принимает лишь ограниченный набор дискретных значений. Чаще всего речь идет о двоичном сигнале, имеющем два состояния: включено/выключено (логический 1 или 0). Такой сигнал представлен двумя фиксированными уровнями (например, 0 В и 24 В постоянного напряжения для лог.0 и лог.1 и изменяется скачкообразно между этими уровнями. Цифровой сигнал, по сути, передает информацию в виде последовательности битов (двоичных состояний) и может изображаться как прямоугольная форма (импульсы) во времени

Аналоговый сигнал можно изобразить в виде плавной непрерывной волны, амплитуда которой изменяется со временем без ступенек. В отличие от этого, цифровой сигнал представлен ступенчатым графиком (прямоугольными импульсами), переключающимся между двумя уровнями (низким и высоким). Благодаря такой природе аналоговый сигнал обладает бесконечной градацией значений, тогда как цифровой сигнал может находиться лишь в одном из predetermined состояний. Этот фундаментальный принцип отличает способы передачи и обработки информации в аналоговой и цифровой форме.

Измерение давления, перепадов давления и расхода. Данные измерения осуществляются с помощью специализированных датчиков, преобразующих физические величины в электрические сигналы.

Датчики давления регистрируют как абсолютное давление, так и его перепады, преобразуя их в нормированный аналоговый сигнал (например, 0-10 В или 4-20 мА), либо в цифровой сигнал – по протоколу HART или интерфейсу RS-485 с протоколом Modbus RTU.

Расходомеры линейно преобразуют объёмный поток жидкости, проходящей по трубопроводу, в аналоговые или цифровые сигналы, аналогично датчикам давления.

В зависимости от типа выходного сигнала, расходомеры классифицируются на:

- датчики с линейным выходом по току, напряжению или частоте,
- датчики с цифровым выходом.

В рамках моделей управления, используемых в насосных станциях, такие датчики представляют собой динамические элементы, поведение которых может быть описано с помощью упрощённых инерционных звеньев и соответствующих передаточных функций.

$$W_{\text{ДД}}(p) = \frac{k_{\text{ДД}}}{T_{\text{ДД}}p + 1}, \quad (2.10)$$

$$W_{\text{Д.РД}}(p) = \frac{k_{\text{Д.РД}}}{T_{\text{Д.РД}}p + 1}, \quad (2.11)$$

$$W_{\text{ДП}}(p) = \frac{k_{\text{ДП}}}{T_{\text{ДП}}p + 1} \quad (2.12)$$

где $k_{\text{ДД}}$ – коэффициент датчиков давления;

$k_{\text{Д.РД}}$ – коэффициент датчиков разности давлений;

$k_{\text{ДП}}$ – коэффициент датчиков подачи.

2.2 Разработка модели в Matlab Simulink

На основе математического описания компонентов и возможных комбинаций модулей в составе единой системы была разработана имитационная модель насосного агрегата с частотно-регулируемым электроприводом в программной среде Matlab Simulink (рисунок 2.1). В состав модели входят следующие модули: частотно-регулируемый электропривод, насос, управляющее устройство, модель энергетических процессов, блок связи между напором и расходом в трубопроводе, а также задатчик интенсивности, обеспечивающий плавный запуск и разгон агрегата. Такая структура модели позволяет удобно исследовать работу системы автоматического управления насосом в рамках единого блока с заданными входными и выходными параметрами.

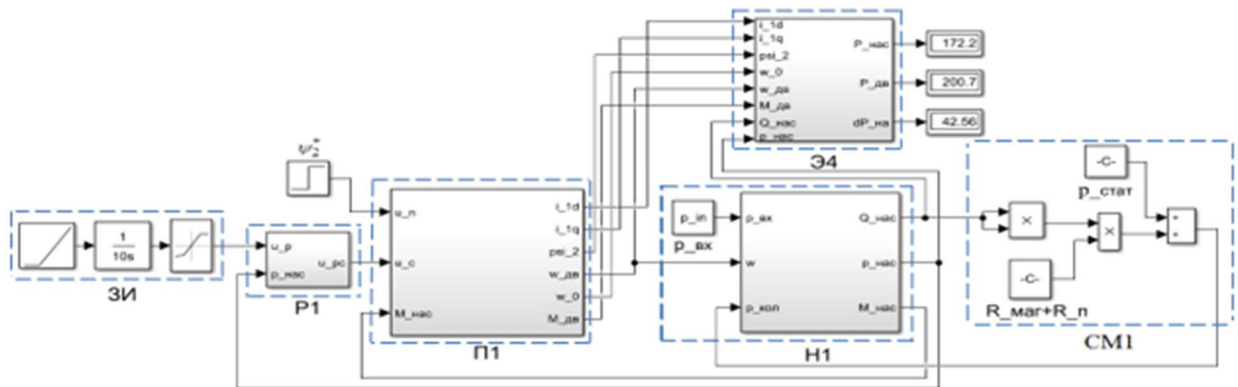


Рисунок 2.1 – Имитационная модель насосного агрегата с частотно-регулируемым электроприводом

При параллельной работе насосной агрегатной установки, её модель дополняется аналогичными отдельными блоками, которые гидравлически связаны с уже существующими блоками через выходной коллектор.

Таким образом, на основе представленных в таблице модулей можно строить алгоритмические структурные схемы блоков и комплексов, отражающие динамику и энергетические процессы в системах управления насосными агрегатами и насосными станциями. Комбинируя различные компоненты моделей, можно подобрать структуры с наилучшими характеристиками и, опираясь на них, определить оптимальный вариант системы управления насосной станцией в соответствии с общими и частными критериями оптимизации.

2.3 Интеграция модели цифрового следящего электропривода в систему управления вакуумным насосом

Для построения эффективной цифровой системы управления вакуумным насосом, включающего частотно-регулируемый электропривод, необходима математическая модель, учитывающая дискретный характер регулирования и особенности работы электромеханической системы. В данном разделе рассматривается возможность интеграции дискретной математической модели цифрового следящего электропривода, в систему управления вакуумным насосом Grundfos UPS-200.

На рисунке 2.2 представлена структурная схема быстродействующего следящего электропривода переменного тока. Подобный принцип построения может быть использован как с асинхронными, так и с синхронными исполнительными двигателями.

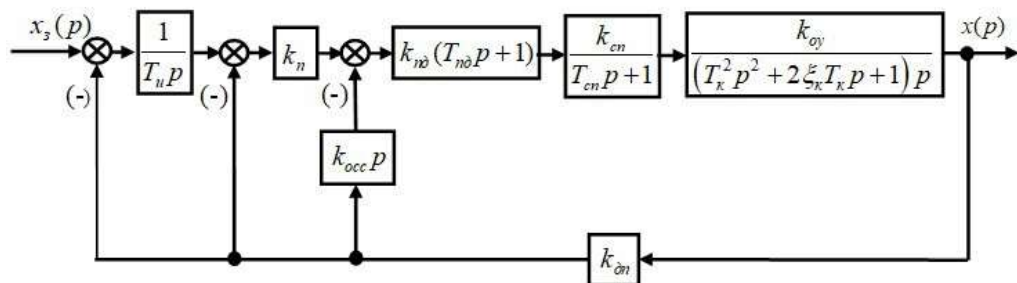


Рисунок 2.2 – Структурное представление высокоскоростного следящего электропривода переменного тока

Передаточная функция объекта управления представлена интегрально-колебательным звеном

$$W_{oy}(p) = \frac{k_{oy}}{(T_k^2 p^2 + \xi_k T_k p + 1)p} \quad (2.13)$$

где k_{oy} – коэффициент передачи объекта,
 T_k – постоянная времени колебательной составляющей,
 ξ_k – коэффициент демпфирования,
 p – оператор Лапласа.

$$W_{сн}(p) = \frac{k_{сн}}{T_{сн} p + 1} \quad (2.14)$$

где $k_{сн}$ – коэффициент передачи ЧП,
 $T_{сн}$ – постоянная времени ЧП.

Следящий электропривод имеет контур скорости и два контура положения. Для организации обратной связи по скорости выходной сигнал датчика положения дифференцируется с помощью звена с передаточной функцией

$$W_{\text{осс}}(p) = k_{\text{осс}}p \quad (2.15)$$

где $k_{\text{осс}}$ – коэффициент передачи ЧП.

$$W_{\text{пд}}(p) = k_{\text{пд}}(T_{\text{пд}}p + 1) \quad (2.16)$$

где $k_{\text{пд}}$ – коэффициент передачи ПД-регулятора;

$T_{\text{пд}}$ – постоянная времени ПД-регулятора.

Структурная схема, представленная на рисунке 2.3, соответствует следящему электроприводу с синхронным исполнительным двигателем. При этом все регуляторы, за исключением токовых, аналогичны регуляторам, применяемым в асинхронных следящих электроприводах с векторным управлением. Это позволяет применять существующие методики синтеза регуляторов. Характерной особенностью данной методики является возможность выбора параметров регуляторов таким образом, чтобы они могли быть реализованы с использованием цифровых средств, например, цифрового интегрального регулятора.

При скалярном управлении асинхронным двигателем можно использовать модулятор, а для синхронного двигателя с постоянными магнитами на роторе – устройство, формирующее трапецеидальное напряжение в зависимости от угла поворота ротора.

Структурная схема следящего электропривода переменного тока в дискретном представлении изображена на рисунке 2.3. В ней обозначена дискретная передаточная функция $W_0(z)$ соответствующая непрерывной части системы с учётом нулевого порядка экстраполяции. К непрерывной части относятся силовой преобразователь, электродвигатель и исполнительный механизм. При этом силовой преобразователь выполняет также функции экстраполятора и хранения цифрового значения сигнала от пропорционально-дифференциального регулятора в течение одного дискретного периода T .

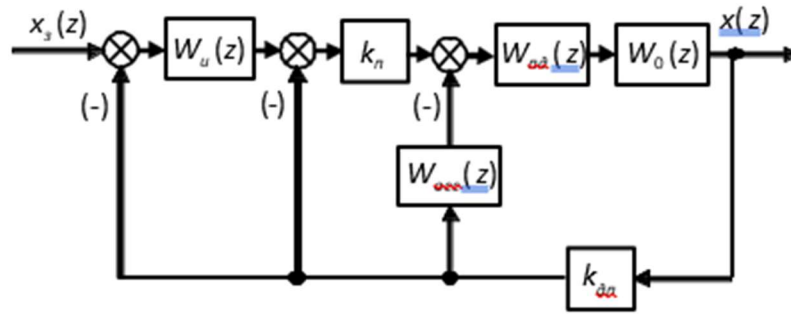


Рисунок 2.3 – Структурная схема проектируемого цифрового следящего электропривода переменного тока в дискретном представлении с использованием дискретных передаточных функций

Дискретная передаточная функция непрерывной части с учетом экстраполятора нулевого порядка

$$W_o(z) = k_{\text{сп}} k_{\text{оу}} \frac{z-1}{z} Z \frac{1}{(T_k^2 p^2 + 2\xi_k T_k p + 1)p^2} \quad (2.17)$$

где $z=e^{pT}$ – комплексная переменная;

T – период дискретизации по времени, причем $T=T_{\text{сп}}$.

Так, как непрерывная часть представляет собой интегрально-колебательное звено, то дискретная передаточная функция будет иметь следующий вид

$$W_o(z) = k_{\text{сп}} k_{\text{оу}} \frac{az^2 + bz + c}{(z-1)(z^2 - 2zdcosT + 1d^2)} \quad (2.18)$$

Дискретная передаточная функция внутреннего контура

$$W_1(z) = \frac{W_{\text{пд}}(z)W_0(z)}{1 + W_{\text{пд}}(z)W_0(z)W_{\text{оц}}(z)k_{\text{дп}}} \quad (2.19)$$

Тогда дискретная передаточная функция второго контура имеет вид

$$W_2(z) = \frac{k_{\text{п}}W_1(z)}{1 + k_{\text{п}}W_1(z)k_{\text{дп}}} \quad (2.20)$$

Дискретная передаточная функция замкнутой системы следящего электропривода, учитывающая различные периоды дискретизации отдельных компонентов закона регулирования, может быть представлена в следующем виде

$$W_3(z) = \frac{W_u(z)W_2(z)}{1 + W_u(z)W_2(z)k_{дп}} \quad (2.21)$$

Анализ передаточной функции (2.21) показывает, что разработанный цифровой следящий электропривод переменного тока обладает характеристическим полиномом, порядок которого определяется значениями параметров $m1m_1$ и $m2m_2$.

Модель, реализованная в среде Matlab Simulink на основе формулы, позволяет сформировать график переходного процесса по управляющему воздействию в разработанном цифровом следящем электроприводе переменного тока. При этом в модели учтена реализация регуляторов на программируемой логике с разными периодами дискретизации (рисунок 2.4). Согласно полученному графику, время переходного процесса – то есть время достижения двухпроцентной зоны отклонения от установившегося значения – составляет $t_{пп}=0,0387t$

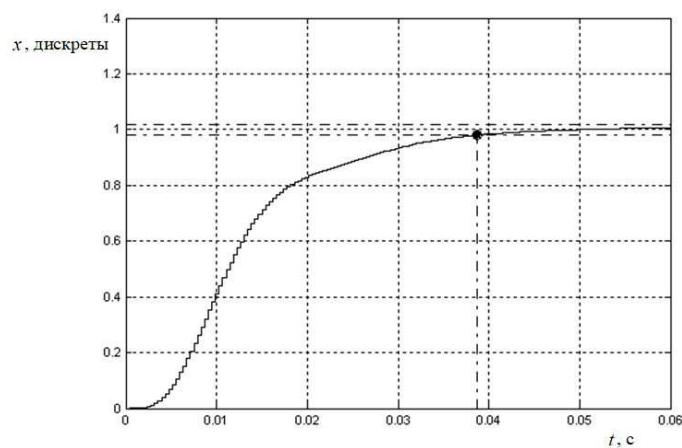


Рисунок 2.4 – График переходного процесса, построенный по дискретной передаточной функции

Для оценки адекватности расчетной модели сравним полученное значение времени переходного процесса, рассчитанное по передаточной функции, с результатами моделирования полной структуры следящего электропривода в Matlab Simulink.

В состав этой структуры входят цифровые регуляторы, непрерывная часть (силовой преобразователь, электродвигатель, исполнительный механизм), экстраполятор и датчик положения с соответствующими связями. Структурная схема данной расчетной модели представлена на рисунке 2.5.

В передаточной функции, характеризующая объединённую динамику электродвигателя и исполнительного механизма, входящих в состав непрерывной части электропривода, имеет следующий вид.

$$W_{oy}(p) = \frac{1540}{9.7 * 10^{-5} p^3 + 9.5 * 10^{-3} p^2 + p} \quad (2.22)$$

Силовой преобразователь в данной системе представлен в виде безынерционного звена с коэффициентом передачи $k_{сп}=0,0067$ с, а также экстраполятором нулевого порядка.

Используя расчётную модель, изображённую на рисунке 2.5, был построен график переходного процесса по управляющему воздействию в следящем электроприводе переменного тока с синхронным исполнительным двигателем (рисунок 2.6). Время переходного процесса составило $t_{ин}=0,0403$ с. Отклонение от результата, полученного на основе передаточной функции (14), составляет менее 4 %, что позволяет считать, что разработанная математическая модель цифрового следящего электропривода переменного тока, выраженная через дискретные передаточные функции с учётом различий в периодах дискретизации регуляторов, достоверно отражает реальные процессы в системе.

Дополнительное подтверждение этому даёт моделирование непрерывного прототипа следящего электропривода (рисунок 2.7). График переходного процесса (рисунок 2.8) показывает, что время перехода в непрерывной модели составляет $t_{ин}=0,0391$ с, что даже ближе к результату, полученному по передаточной функции.

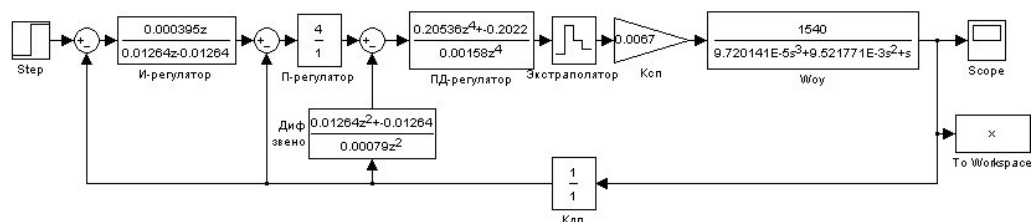


Рисунок 2.5 – Разработанная модель следящего электропривода представлена в виде совокупности дискретных передаточных функций регуляторов и непрерывной части, дополненной экстраполятором, с учётом различающихся периодов дискретизации отдельных элементов системы

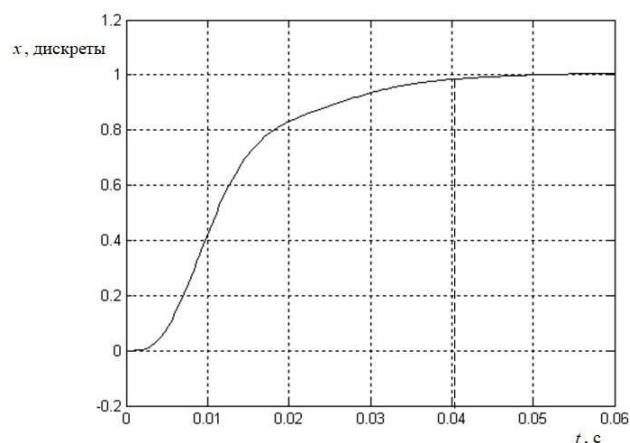


Рисунок 2.6 – График переходного процесса, полученный на основе расчетной модели, показанной на рисунке 2.4

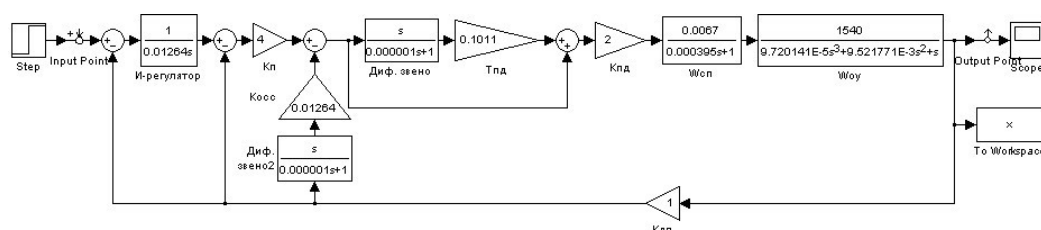


Рисунок 2.7 – Модель непрерывного прототипа следящего электропривода переменного тока, используемая для расчетов

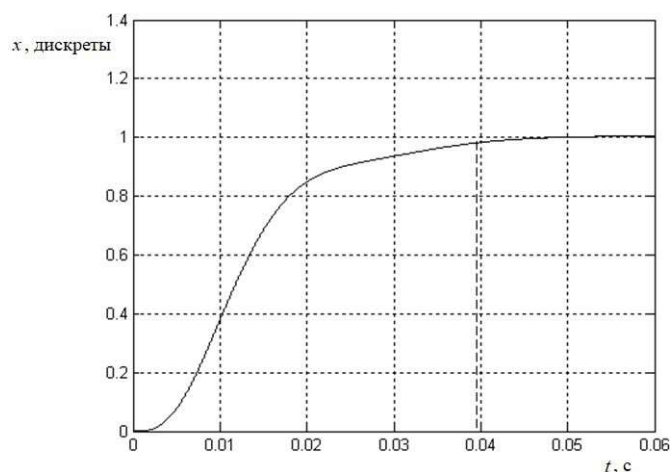


Рисунок 2.8 – График переходного процесса, полученный на основе расчетной модели непрерывного прототипа следящего электропривода переменного тока

Работоспособность разработанного следящего электропривода переменного тока, использующего различные периоды дискретизации для отдельных компонентов закона регулирования, была подтверждена в ходе натурного эксперимента.

Эксперимент проводился на стенде, построенном на базе частотного преобразователя Simovet Masterdrives Motion Control, который обеспечивает реализацию следящего электропривода переменного тока с композицией регуляторов, представленной на рисунке 2.2. Формирование регуляторов и связей между ними осуществляется с использованием свободных функциональных блоков и технологии программирования ВІСО.

Данная система позволяет задавать различные периоды дискретизации для свободных функциональных блоков преобразователя частоты, кратные периоду коммутации силовых транзисторов. Возможные значения периода дискретизации включают: 0,0004 с, 0,0008 с, 0,0016 с, 0,0032 с и др. Это предоставляет возможность построения электропривода с различными частотами дискретизации отдельных элементов регулирования, а также регистрации переходных процессов и их сравнения с результатами компьютерного моделирования.

Следует отметить, что параметры регуляторов, рассмотренные выше, были рассчитаны с учётом данной экспериментальной установки. Единственным отличием является то, что при расчётах был использован период дискретизации 0,000395 с, более удобный для реализации пропорционально-дифференциального регулятора на программируемой логике. Однако минимальный период, допустимый в экспериментальной системе, составляет 0,0004 с, что определяется особенностями применяемых функциональных блоков и стандартных регуляторов системы векторного управления.

В соответствии с этим, в ходе эксперимента были приняты значения параметров:

- $m1=2m_1 = 2$,
- $m2=1m_2 = 1$.

Что означает: выходной сигнал пропорционально-дифференциального регулятора формировался с периодом 0,0016 с, а сигнал интегрального регулятора и дифференцирующего звена во внутреннем контуре обратной связи — с периодом 0,0008 с.

Переходный процесс в электроприводе фиксировался с помощью цифрового осциллографа (рисунок 2.9). Время переходного процесса, полученное экспериментально, составило 0,061 с.

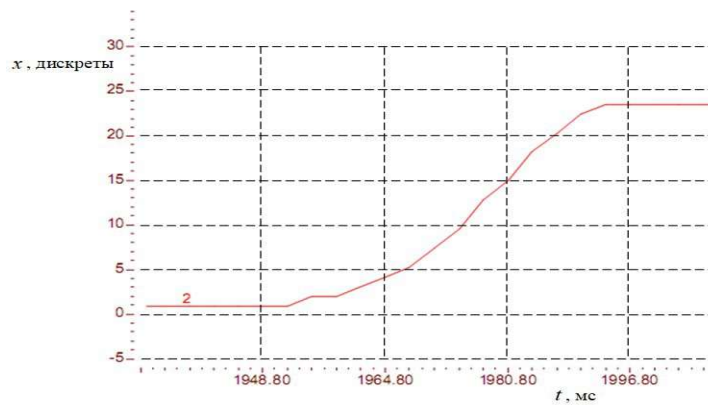


Рисунок 2.9 – Экспериментальный переходной процесс, зафиксированный в следящем электроприводе переменного тока

В процессе моделирования отклика электропривода на управляющее воздействие с использованием передаточной функции было получено время переходного процесса, равное 0,0395 с (рисунок 2.10).

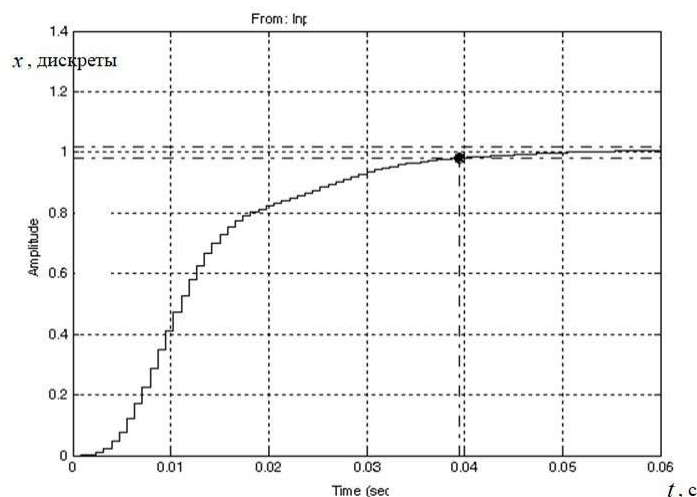


Рисунок 2.10 – График переходного процесса, построенный на основе дискретной передаточной функции

Разница во времени переходного процесса обусловлена тем, что в экспериментальной установке задатчик не позволяет мгновенно изменить входной сигнал на 23 дискретных уровня. В ходе моделирования электропривода, представленного в виде дискретной передаточной функции, в среде Matlab Simulink при задающем воздействии, постепенно изменяющемся от 0 до 23 дискрет, было установлено, что выходной параметр достигает диапазона ± 1 дискрета от заданного значения за 0,06 секунды.

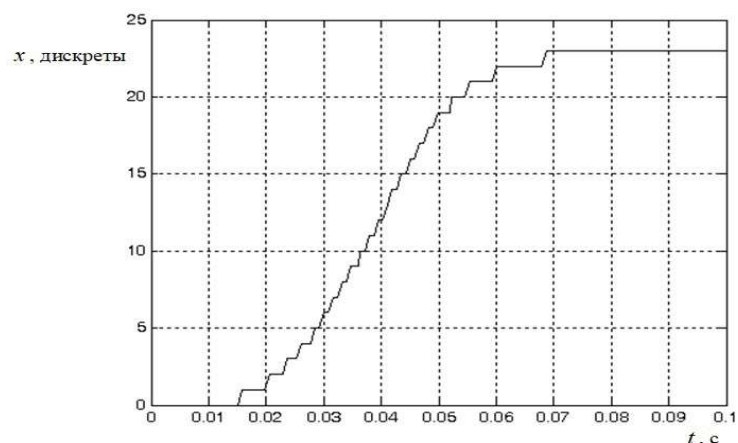


Рисунок 2.11 – Результаты компьютерного моделирования электропривода, представленного в виде дискретной передаточной функции (18), при временно изменяющемся задающем воздействии

Поскольку расхождение между результатами компьютерного моделирования и данными натурного эксперимента составляет не более 1,64 %, это позволяет сделать вывод о том, что разработанная математическая модель следящего электропривода переменного тока, учитывающая различные периоды дискретизации отдельных компонентов закона регулирования, достоверно отражает реальные процессы, происходящие в системе электропривода.

3 Анализ электроприводных систем насосных станций

3.1 Исследование динамики насосного агрегата при работе с протяжённым магистральным трубопроводом

Изменения в режиме перекачки жидкости, такие как запуск или остановка насосных агрегатов, изменение давления и расхода, подключение или отключение обходных линий или вспомогательной подпитки, приводят к неустановившимся процессам в трубопроводной системе. Эти процессы сопровождаются распространением волн давления – как повышенного, так и пониженного – от точки возмущения по всей магистрали.

Одним из эффективных методов снижения негативных последствий подобных переходных процессов является организация системы автоматического регулирования, в которой используется модель гидравлической сети. Такая модель позволяет определять значения давления и расхода в заданной точке системы и, исходя из них, корректировать режим работы насосов. Ключевая задача здесь – создание такой модели трубопровода, которая будет одновременно:

- достаточно точной для корректного управления,
- простой в реализации,
- удобной для программной реализации,
- не требующей больших вычислительных ресурсов,
- подходящей для реального времени управления.

Для описания переходных процессов и неустановившегося движения жидкости в протяжённых магистральных трубопроводах применяется система линеаризованных дифференциальных уравнений, предложенная И.А. Чарным.

$$-\frac{d}{dx}P(x,t) = \frac{d}{dt}p \cdot w(x,t) + 2a \cdot p \cdot w(x,t), \quad (3.1)$$

$$-\frac{d}{dx}P(x,t) = c^2 \cdot p \frac{d}{dx} \cdot w(x,t), \quad (3.2)$$

$$2a = \frac{\lambda \cdot w}{2 \cdot d_{\text{вн}}} \quad (3.3)$$

где $P(x,t)$ – давление, Па;

$w(x,t)$ – скорость потока жидкости, м/с;

p – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³;

c – скорость распространения звуковых волн в данной среде, м;

a – линеаризованный коэффициент гидравлического сопротивления;

λ – коэффициент сопротивления при турбулентном режиме потока;

d – внутренний диаметр трубы, м.

Эти параметры используются для описания неустановившегося потока жидкости в трубопроводах и учитывают как инерционные, так и диссипативные свойства потока.

В инженерной практике при расчётах систем автоматического управления наибольшее распространение получили частотные методы, благодаря их высокой наглядности и удобству анализа. Поэтому для исследования характера неустановившегося течения жидкости целесообразно использовать метод интегрального преобразования Лапласа. Применяя преобразование Лапласа по времени t к исходным уравнениям, можно получить их представление в преобразованной области в следующем виде

$$\frac{d}{dx}P(x, s) + \frac{\rho}{S}(sQ(x, s) - Q(x, 0)) + \frac{\rho}{S} \cdot 2a \cdot Q(x, s) = 0, \quad (3.4)$$

$$sP(x, s) - P(x, 0) + c^2 \cdot \frac{\rho}{S} \cdot \frac{d}{dx}Q(x, s) = 0 \quad (3.5)$$

Предположим, что до момента времени $t < 0$ поток жидкости в магистральном трубопроводе находился в установившемся режиме, тогда начальные условия будут следующими: $P(x, 0) = 0$ и $Q(x, 0) = 0$.

Данная система представляет собой набор обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, решение которых может быть получено с помощью преобразования Лапласа по переменной x , при условии задания граничных условий.

Это означает, что значения оригиналов функций на концах трубопроводной линии известны и соответствуют заданным граничным условиям. Обозначив оператор преобразования Лапласа по переменной x через y , получаем систему алгебраических уравнений.

$$yP(y, s) - P(0, s) + \frac{\rho}{S} \cdot sQ(y, s) + \frac{\rho}{S} \cdot 2a \cdot Q(y, s) = 0, \quad (3.6)$$

$$\frac{s}{c^2} \cdot P(y, s) + \frac{\rho}{S}(yQ(y, s) - Q(0, s)) = 0 \quad (3.7)$$

Система уравнения относительно давления

$$P(y, s) = \frac{yP(0, s) - \frac{\rho}{S} \cdot (s + 2a)Q(0, s)}{y^2 - h^2} \quad (3.8)$$

Система уравнения относительно расхода

$$Q(y, s) = \frac{yQ(0, s) - \frac{\rho}{S} \cdot \frac{s}{c} \cdot P(0, s)}{y^2 - h^2} \quad (3.9)$$

где h – постоянная распространения волны.

Переходя от образов, полученных с помощью оператора y , к оригинальным функциям, зависящим от переменной x , мы приходим к уравнениям гидравлического четырехполюсника. Эти уравнения устанавливают взаимосвязь между давлением и расходом на входной границе $x=0$ и в произвольном сечении x трубопроводной линии.

$$P(x, s) = P(0, s)ch[h \cdot x] - \frac{\rho}{S} \cdot c \sqrt{\frac{s + 2a}{s}} sh[h \cdot x]Q(0, s), \quad (3.10)$$

$$Q(x, s) = Q(0, s)ch[h \cdot x] - \frac{S}{\rho} \cdot \frac{1}{c} \sqrt{\frac{s}{s + 2a}} sh[h \cdot x]P(0, s) \quad (3.11)$$

Проведя преобразование и разложив степенной ряд, получим передаточную функцию колебательного звена второго порядка. Данная передаточная функция характеризует отношение давлений входа/выхода трубопровода

$$W(s) = \frac{1 + \frac{\left(\frac{x}{c} \sqrt{(s + 2a)s}\right)^2}{2!}}{1 + \frac{\left(\frac{l}{c} \sqrt{(s + 2a)s}\right)^2}{2!}} = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{x}{c}\right)^2 s^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{c}\right)^2 2ac + 1}{\frac{1}{2} \left(\frac{l}{c}\right)^2 s^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{l}{c}\right)^2 2ac + 1} \quad (3.12)$$

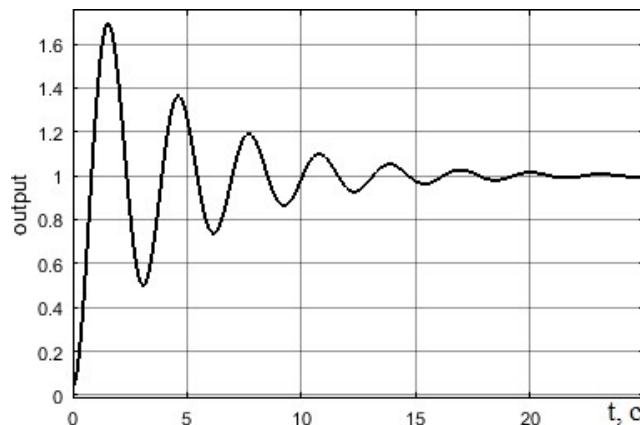


Рисунок 3.1 – Переходная характеристика трубопровода

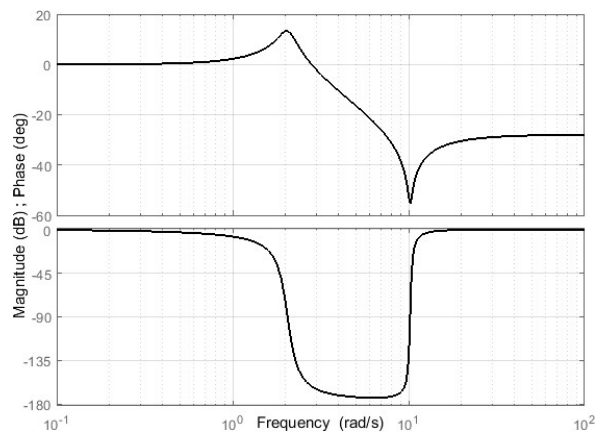


Рисунок 3.2 – Частотная характеристика

3.2 Анализ параллельной работы насосных агрегатов при использовании частотного регулирования параметров технологического процесса насосной станции

Цель данного подраздела – выполнить моделирование пуска и разгона насосов, работающих в параллельной конфигурации с различными схемами подключения, чтобы проверить устойчивость системы на основе математических моделей, разработанных в главе 2.

Пуск параллельно работающих НА представляет собой один из наиболее важных и одновременно сложных динамических процессов. Он оказывает значительное динамическое воздействие на электродвигатель, насос, напорную задвижку и соединительные элементы трубопровода. Варианты пуска могут реализовываться при открытой, закрытой или постепенно открывающейся задвижке. В дальнейшем рассматривается сценарий пуска при закрытой задвижке.

В программной среде Matlab Simulink была реализована имитационная модель параллельной работы насосных агрегатов с частотно-регулируемыми электроприводами, не содержащая контуров регулирования технологических параметров. Эта модель (рисунок 3.3) включает:

- асинхронные электродвигатели с частотными преобразователями,
- насосы;
- блок задания интенсивности пуска (обеспечивает плавный разгон);
- модель трубопроводной магистрали (без учета инерционности водного потока).

Дополнительно на рисунках 3.4 и 3.5 представлены модели частотного преобразователя-АД и насосного агрегата.

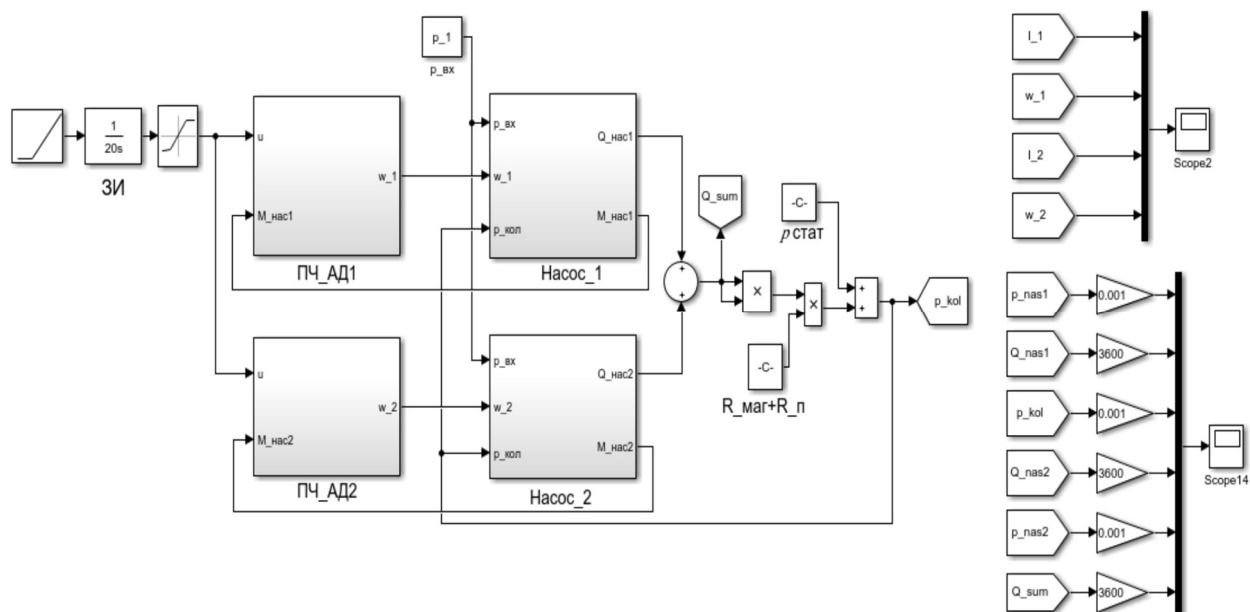


Рисунок 3.3 – Модель параллельной работы насосных агрегатов при частотном регулировании параметров технологического процесса

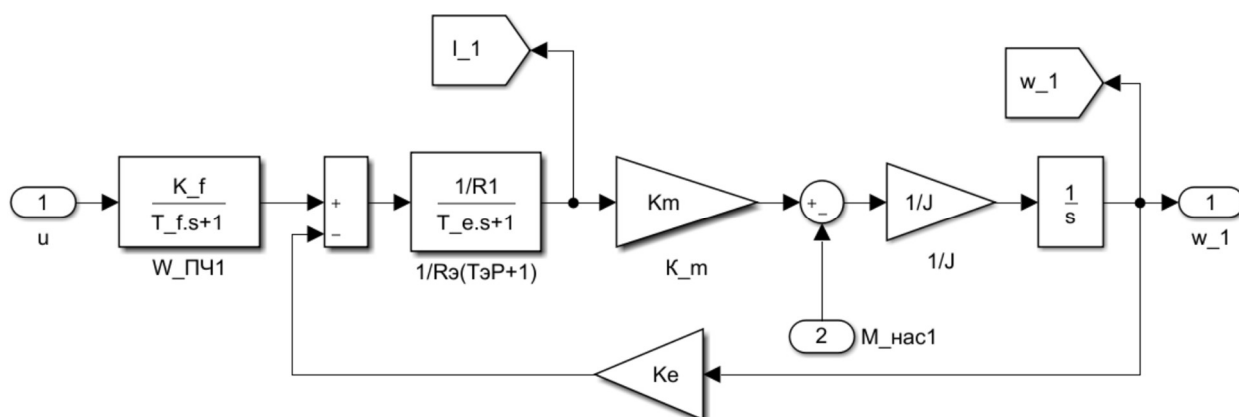


Рисунок 3.4 – Модель частотно-регулируемого асинхронного двигателя без контуров регулирования переменных

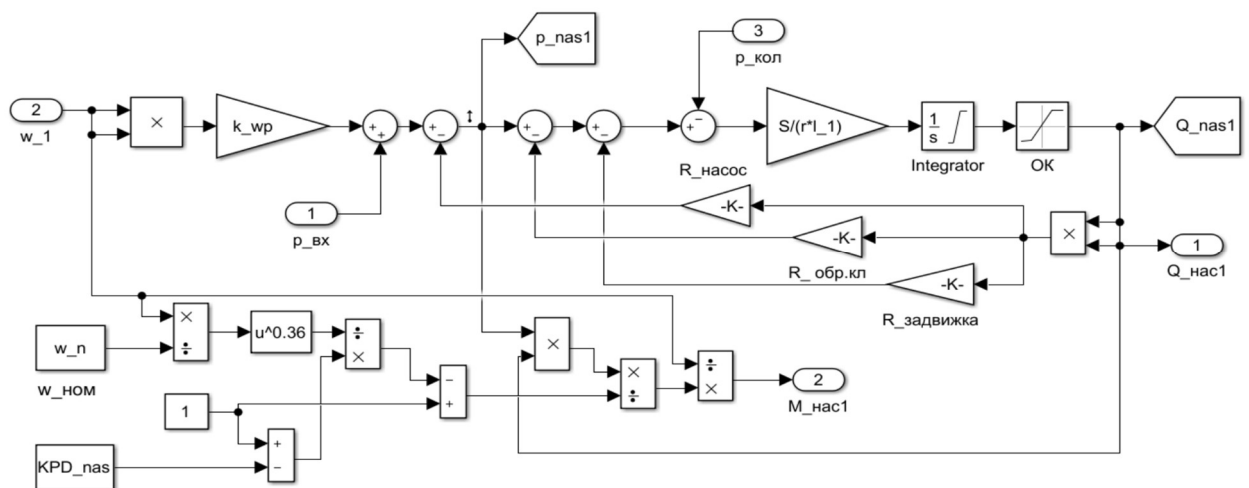


Рисунок 3.5 – Модель насоса

Пуск насосных агрегатов (НА), оснащённых индивидуальными частотно-регулируемыми электроприводами (ЧРЭП), при закрытой напорной задвижке осуществляется следующим образом.

Сначала запускается первый насосный агрегат, который плавно разгоняется до номинальной частоты вращения в течение 3.2 секунд, достигая тем самым давления холостого хода. После этого открывается задвижка на выходе его напорного трубопровода.

Затем включается второй НА, также проходит плавный разгон до номинальной скорости за то же самое время. После его выхода на рабочий режим открывается задвижка на выходе второго насоса.

После открытия обеих задвижек происходит выравнивание давлений и подач насосов, и стабилизируется давление на выходе общего коллектора. Время открытия каждой задвижки составляет 1.8 секунды.

Графическое отображение переходных процессов можно увидеть на рисунке 3.6.

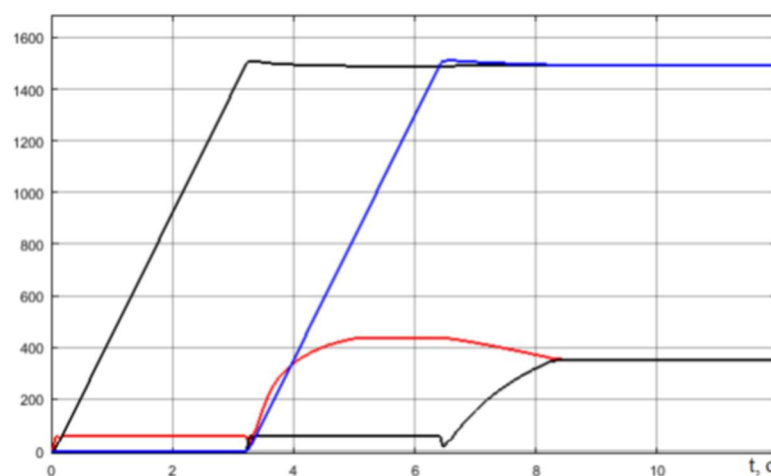


Рисунок 3.6 – Графики скоростей и токов

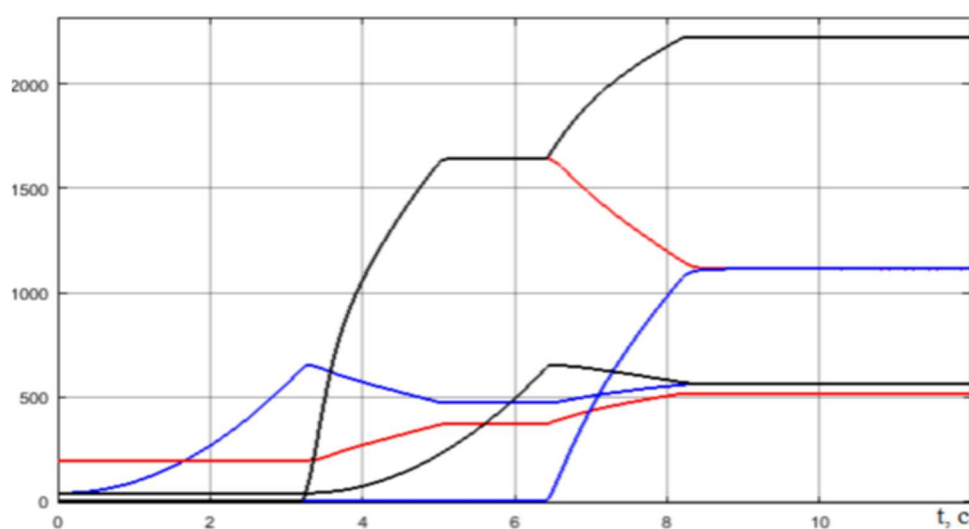


Рисунок 3.7 – Графики давлений, подач НА и давления выходного коллектора

На рисунках 3.6 и 3.7 представлены графики переходных процессов при пуске насосных агрегатов (НА), работающих параллельно с применением индивидуальных частотно-регулируемых электроприводов (ЧРЭП). Использованы следующие обозначения:

- p_1, p_2 – давления на выходе каждого НА;
- Q_1, Q_2 – подачи насосов;
- n_1, n_2 – частоты вращения насосов;
- I_1, I_2 – токи электродвигателей;
- $p_{\text{кол}}$ – давление в общем напорном коллекторе.

Анализ графиков показывает, что применение индивидуальных ЧРЭП позволяет избежать появления пусковых токов и гидравлических ударов в переходных режимах. Это, в свою очередь, повышает надёжность работы оборудования насосной станции.

Разработанная модель адекватно описывает процессы запуска насосных агрегатов с частотным регулированием при параллельной работе на общий трубопровод. Она может быть эффективно использована для синтеза и настройки регуляторов, а также для анализа энергетических характеристик и оценки устойчивости систем.

3.3 Анализ параллельной работы насосных агрегатов при смешанном регулировании параметров технологического процесса насосной станции

Переходные процессы при запуске насосных агрегатов (НА) в условиях параллельной работы с применением смешанной схемы подключения (один агрегат управляется частотно-регулируемым электроприводом, второй – запускается напрямую) имеют некоторые отличия от запуска насосов, оснащённых только ЧРЭП. Во время запуска нерегулируемого агрегата наблюдается резкое — до семикратного — увеличение пускового тока, что вызывает нестационарные процессы как в питающей электросети, так и в напорном трубопроводе. Структурная схема модели электроприводов насосных агрегатов при параллельной работе по смешанной схеме представлена на рисунке 3.8.

Процесс пуска осуществляется в следующей последовательности: сначала включается насосный агрегат с прямым пуском, после чего его напорная задвижка приоткрывается до определённого уровня, чтобы ограничить ток электродвигателя. Затем запускается насос с частотно-регулируемым приводом, который плавно разгоняется до номинальной скорости. После достижения нужной частоты вращения открывается задвижка этого агрегата, в результате чего давления и подачи обоих насосов выравниваются, а давление на выходе коллектора стабилизируется. Время, необходимое для стабилизации переменных, зависит от длительности открытия задвижки. В рассматриваемой модели это время составляет 1.8 секунды.

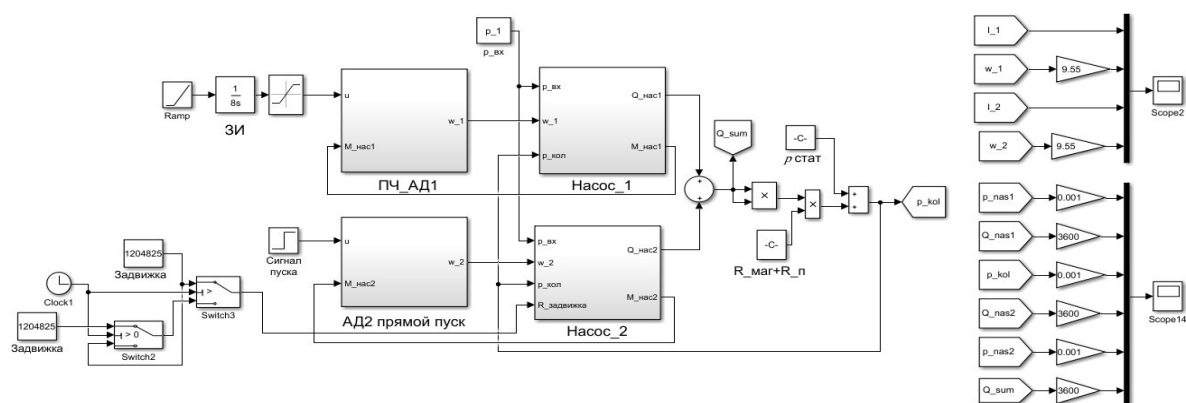


Рисунок 3.8 – Модель параллельной работы насосов при смешанном регулировании

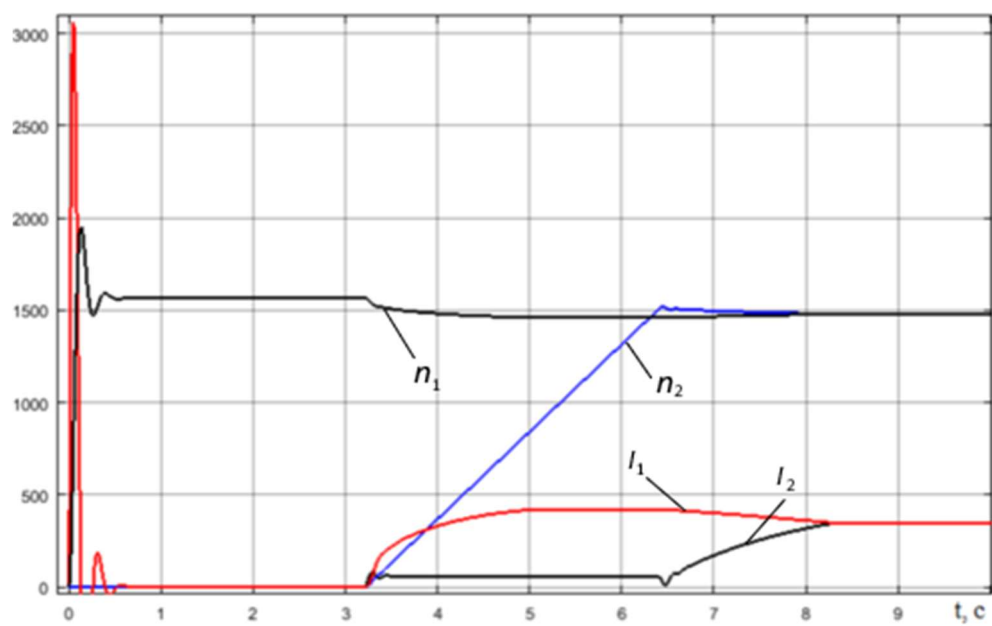


Рисунок 3.9 – График скоростей и токов

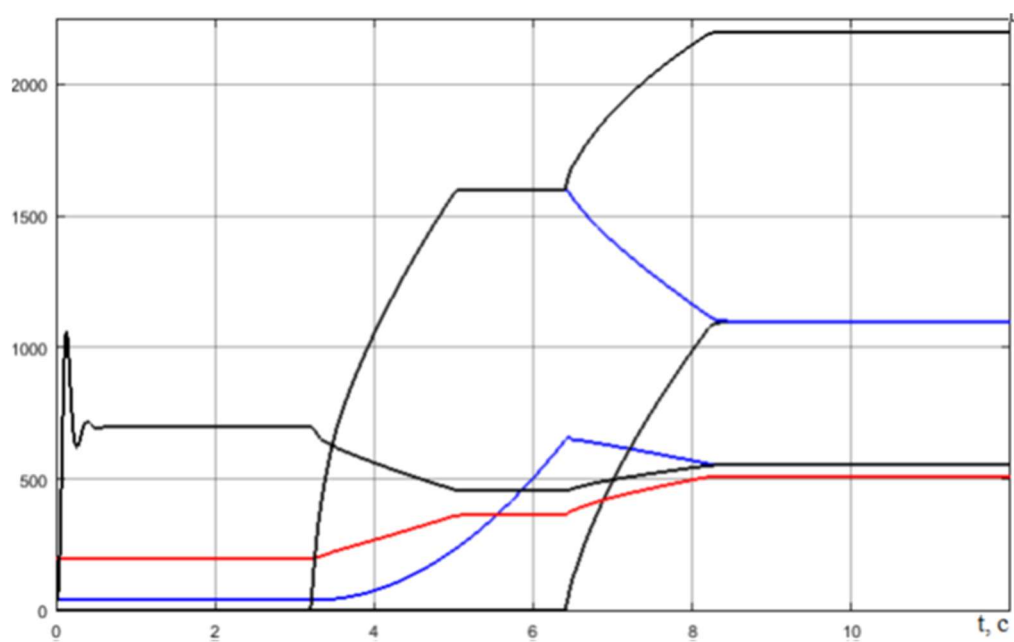


Рисунок 3.10 – График давлений, подач насосного агрегата и давления выходного коллектора насосной станции

4 Исследование и проектирование электроприводных систем для повышения эффективности насосных станций

4.1 Цели синтеза и подходы к разработке электроприводных систем, обеспечивающих повышение эффективности работы насосных станций

Задачи синтеза и методы разработки электроприводных систем насосных агрегатов, направленные на повышение эффективности насосных станций, сводятся к следующему: применяются оптимизационные подходы для определения наилучших параметров регуляторов в системе управления электроприводами НА, обеспечивающих требуемые динамические характеристики всей электроприводной системы. При этом синтез охватывает также механическую и электромагнитную подсистемы управления [9].

Рассматриваемая система управления имеет трёхконтурную структуру, схема которой показана на рисунке 4.1. Она включает в себя основной контур регулирования давления, а также вложенные контуры регулирования скорости и тока электродвигателя, подчинённые основному. При синтезе системы управления возмущающие воздействия не учитываются (принимаются равными нулю).

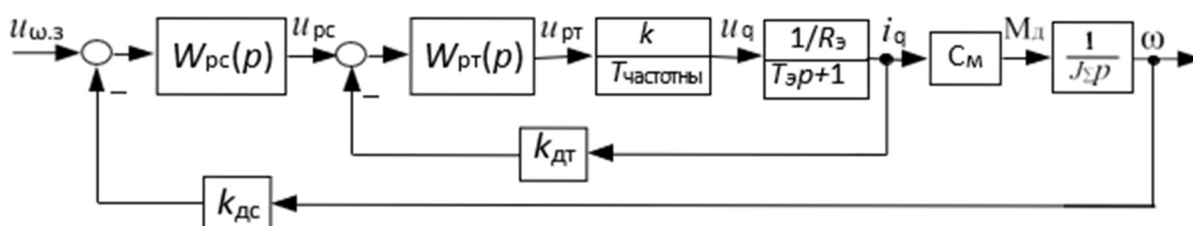


Рисунок 4.1 – Структурная схема контура регулирования

Для обеспечения высокого быстродействия и минимального перерегулирования контур тока, как правило, настраивается по критерию оптимума по модулю.

В данном контуре объектом регулирования выступает электромагнитная цепь асинхронного двигателя, которая моделируется как апериодическое звено с большой постоянной времени T_{Σ} . Передаточная функция этой цепи имеет вид

$$W_{\Sigma}(p) = \frac{i_q}{u_q} = \frac{1/R_{\Sigma}}{T_{\Sigma}p + 1} \quad (4.1)$$

Преобразователь частоты в данной системе моделируется как апериодическое звено с небольшой неизбежной (некомпенсированной) постоянной времени.

Его поведение описывается передаточной функцией следующего вида

$$W_{\text{ПЧ}}(p) = \frac{u_q}{u_{\text{РТ}}} = \frac{k_{\text{ПЧ}}}{T_{\text{ПЧ}}p + 1} \quad (4.2)$$

ПФ разомкнутого контура тока

$$W_{\text{КТ}}^p(p) = W_{\text{РТ}}(p) \frac{k_{\text{ПЧ}}}{(T_{\text{ПЧ}}p + 1)} \frac{k_{\text{ДТ}}}{R_{\text{Э}}(T_{\text{Э}}p + 1)} \quad (4.3)$$

Так как объект регулирования в контуре тока является апериодическим звеном с большой постоянной времени $T_{\text{Э}}$, для обеспечения необходимой динамики системы рекомендуется использовать ПИ-регулятор, передаточная функция которого имеет следующий вид

$$W_{\text{РТ}}(p) = \beta_{\text{РТ}} \frac{\tau_{\text{РТ}}p + 1}{\tau_{\text{РТ}}p} \quad (4.4)$$

где $R_{\text{Э}}, T_{\text{Э}}$ – эквивалентное сопротивление и постоянная времени электромагнитной цепи двигателя;

$k_{\text{ПЧ}}$ – коэффициент передачи частотного преобразователя;

$k_{\text{ДТ}}$ – коэффициент датчика тока;

$\beta_{\text{РТ}}$ – коэффициент усиления регулятора тока;

$T_{\text{ПЧ}}$ – постоянная времени частотного преобразователя.

Разомкнутый контур тока, настроенный по критерию оптимума по модулю (МО), должен обладать следующей заданной передаточной функцией

$$W_{\text{жел}}^{p(\text{МО})}(p) = \frac{1}{2T_{\mu i}p(T_{\mu i}p + 1)} \quad (4.5)$$

ПФ разомкнутого контура, оптимизированного на МО

$$W_{\text{КТ}}^{p(\text{МО})}(p) = \beta_{\text{РТ}} \frac{\tau_{\text{РТ}}p + 1}{\tau_{\text{РТ}}p} \frac{k_{\text{ПЧ}}}{(T_{\text{ПЧ}}p + 1)} \frac{k_{\text{ДТ}}}{R_{\text{Э}}(T_{\text{Э}}p + 1)} = \frac{1}{2T_{\mu i}p(T_{\mu i}p + 1)} \quad (4.6)$$

Примем, что $\tau_{\text{РТ}} = T_{\text{Э}}$ характеризует высокую инерционность контура, а $T_{\mu} = T_{\text{ПЧ}} = 0.1$ – малая инерционность, отражающая некомпенсированные стационарную постоянную времени, определяющую уровень помехозащищенности системы.

На основе этих значений можно определить коэффициент усиления ПИ-регулятора тока.

Коэффициент усиления регулятора тока

$$\beta_{PT} = \frac{T_{\Sigma} R_{\Sigma}}{2T_{\mu i} k_{ПЧ} k_{ДТ}} \quad (4.7)$$

ПФ замкнутого оптимизирующего контура

$$W_{КТ}^3(p) = \frac{1/k_{ДТ}}{2T_{\mu i}^2 p^2 + 2T_{\mu i} p + 1} \quad (4.8)$$

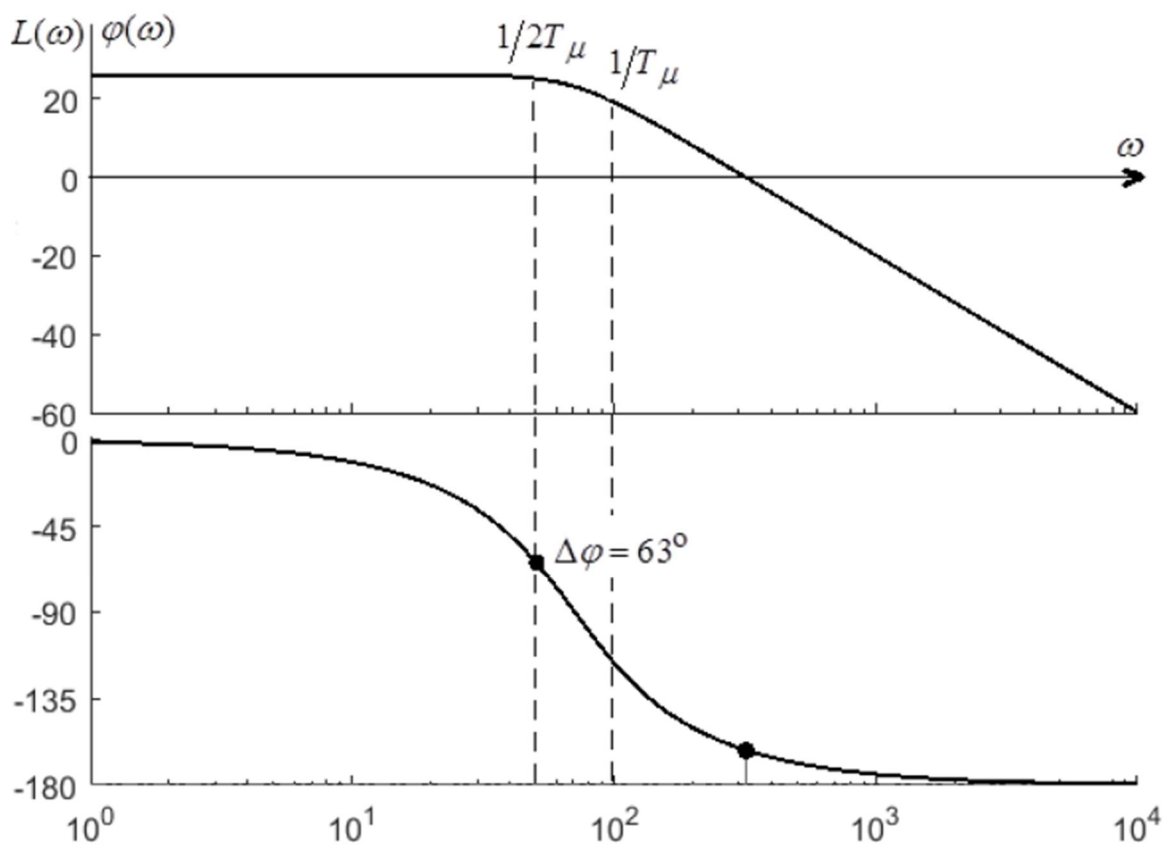


Рисунок 4.2 – Переходной процесс замкнутого контура тока

Время нарастания: $3T$.

Время первого максимума $t_{\max} = 6.3T$.

Время переходного процесса $t_{\text{ПП}} = 8.3T$.

Перерегулирование 3,3%.

Число колебаний $n_K = 1$.

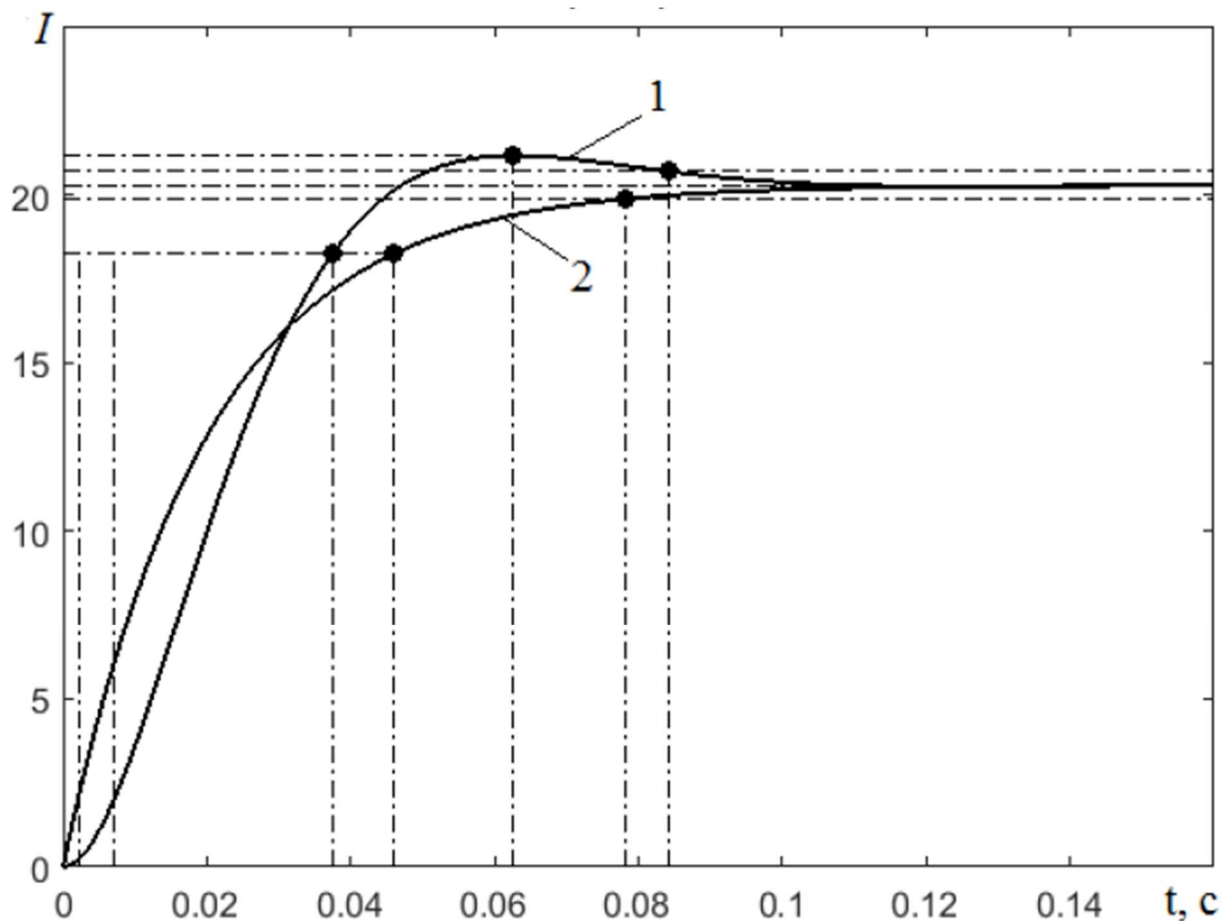


Рисунок 4.3 – ЛАЧХ, ЛФЧХ замкнутого контура тока

4.2 Настройка регуляторов электроприводных систем насосных станций при их структурной перестройке в процессе работы

Для управления и оптимизации электроприводных систем насосных агрегатов в условиях структурных изменений и динамики технологического процесса разработан нейросетевой регулятор. Управление насосами, учитывающее упругость магистрального трубопровода, сопряжено с выраженной нелинейностью и сложными динамическими свойствами, что затрудняет моделирование. Кроме того, в системе возникают неустойчивые процессы, вызванные изменениями гидравлического режима подачи воды, что ограничивает эффективность традиционных методов регулирования.

В существующих системах управления ЭПС НА, как правило, применяются классические методы настройки регуляторов. Однако при резких изменениях расхода воды в системе, внезапных изменениях гидравлического сопротивления или при быстром открытии/закрытии

завдвижек возникают значительные колебания давления и гидроудары в трубопроводе.

Такие явления сложно компенсировать с помощью традиционных регуляторов, поскольку увеличение быстродействия классической схемы управления часто приводит к росту перерегулирования. В связи с этим предпочтение отдаётся интеллектуальным методам управления, в частности – нейросетевым регуляторам.

Синтез нейросетевой системы управления выполняется с использованием пакета Neural Network Toolbox в среде Matlab. Далее в работе приводится описание возможностей пакета и алгоритм создания нейросетевого контроллера, а также представлены результаты его моделирования при управлении насосным агрегатом.

Исследования показали, что наиболее подходящим для решения поставленной задачи является NN Predictive Controller. Этот регулятор использует нейросетевую модель объекта для прогнозирования его будущего поведения и расчёта управляющего сигнала, который оптимизирует траекторию работы системы на заданном временном интервале. Таким образом, процесс проектирования нейросетевого регулятора включает два основных этапа:

- Идентификация объекта управления – построение нейросетевой модели, которая адекватно описывает динамику системы;
- Синтез управляющего алгоритма – использование нейромодели для расчёта управляющих воздействий.

Основу метода составляет принцип управления с предсказанием (predictive control). Его суть заключается в том, что модель управляемого объекта предсказывает его поведение на определённом временном горизонте, а численный оптимизационный алгоритм рассчитывает управляющий сигнал, минимизирующий заданный критерий качества управления.

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} (y_r(t+j) - y_m(t+j))^2 + \rho \sum_{j=1}^{N_u} (u'(t+j-1) - (u'(t+j-2)))^2 \quad (4.9)$$

Константы N_1 , N_2 и N_u задают границы временного интервала, в пределах которого производится оценка ошибки слежения и формируется управляющее воздействие. Переменная u' представляет собой пробный управляющий сигнал, y_r — заданная (желаемая) траектория системы, y_m — фактический отклик модели управляемого объекта. Параметр ρ является весовым коэффициентом, отражающим степень влияния управляющего воздействия на общий критерий качества регулирования.

Структурная схема, представленная на рисунке 4.4, демонстрирует принцип работы системы управления с предсказанием. Регулятор включает нейросетевую модель управляемого объекта и оптимизационный блок. Последний вычисляет значения u' , минимизирующие выбранный критерий качества, и на их основе формирует управляющий сигнал, подаваемый на объект управления.

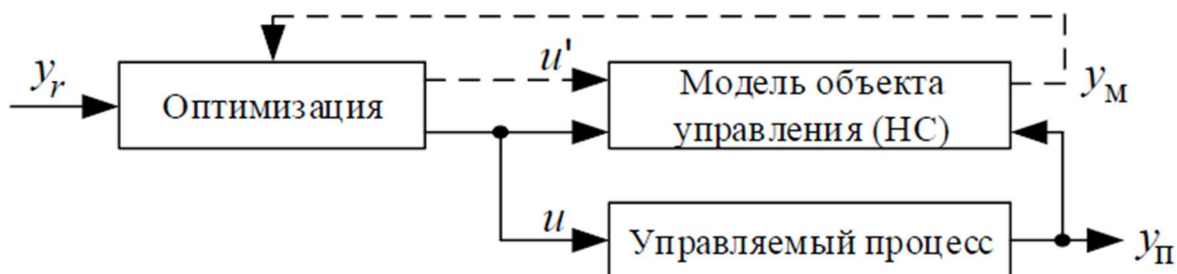


Рисунок 4.4 – Процесс управления с предсказанием

На рисунке 4.5 представлена структурная схема нейросетевой системы управления насосным агрегатом (НА), реализованная в среде Matlab Simulink. Данная схема состоит из следующих основных компонентов: Блок управляемого объекта, моделирующий динамику работы насосного агрегата; Контроллер NN Prediction Controller, выполняющий функции предсказания поведения объекта и формирования управляющего воздействия; Блок ступенчатого сигнала, задающий входные воздействия для анализа реакции системы; Блок визуализации, предназначенный для построения графиков и отображения результатов моделирования.

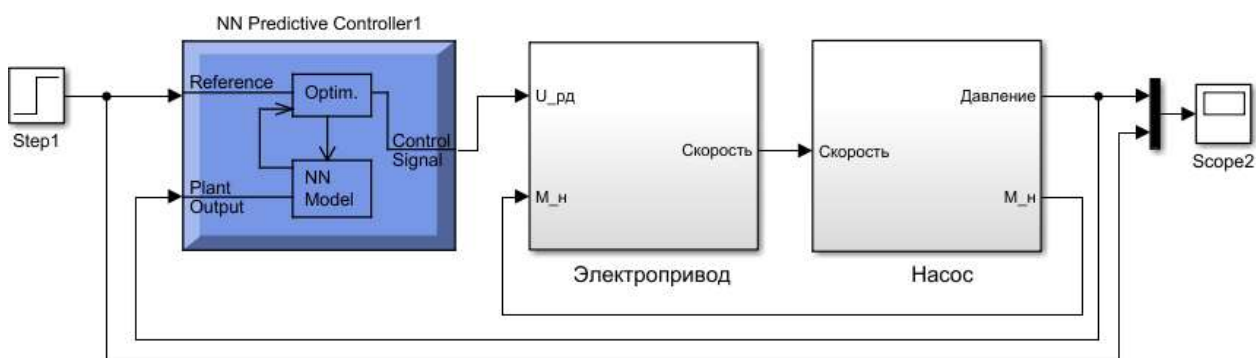


Рисунок 4.5 – Модель системы управления с нейросетевым регулятором

Для определения оптимальных параметров нейросетевого регулятора с предсказанием было рассмотрено несколько вариантов его синтеза. Прежде чем приступить к настройке регулятора, необходимо построить модель управляемого объекта. Для этого выполняется процедура идентификации объекта управления с помощью инструмента Plant Identification, позволяющего сформировать нейросетевую модель объекта.

На этапе идентификации задаются следующие основные параметры:

- размер скрытого слоя (N_n) определяется числом нейронов, участвующих в формировании скрытого слоя сети;
- шаг дискретизации (Δt) задаёт интервал между последовательными отсчётами входных и выходных данных;
- длина обучающей выборки (N_B) определяет объём данных, используемых для обучения сети.

После идентификации настраиваются параметры оптимизации:

- верхний предел суммирования по критерию качества (N_2);
- верхний предел оценки мощности управления (N_u);
- весовой коэффициент влияния управляющего воздействия (ρ);
- параметр одномерного поиска (α).

В качестве метода обучения нейросети была выбрана процедура `csrchbas`.

Результаты многочисленных экспериментов показали, что параметры N_u , ρ и α оказывают незначительное влияние на поведение регулятора, в то время как значение N_2 существенно влияет на его эффективность. Также было установлено, что число итераций на один шаг дискретизации (в данной работе принято $\gamma = 2$) почти не влияет на результат. Оптимальный диапазон для N_2 в рассматриваемом случае составляет от 4 до 12.

Идентификация управляемого объекта также тесно связана с выбором числа нейронов скрытого слоя N_n и архитектуры нейросети. Если задать слишком большое число нейронов, возникает эффект переобучения, что увеличивает время обучения. Если нейронов слишком мало – сеть не сможет адекватно моделировать объект. В данной задаче оптимальным оказался диапазон $N_n = 2 \dots 5$.

Процесс обучения в значительной степени зависит от длины обучающей выборки N_B и шага дискретизации Δt . Было установлено, что при $\Delta t > 1$ снижается точность расчетов и сокращается время обучения, а при $\Delta t < 1$ – наоборот, точность возрастает, но увеличивается время обучения. Таким образом, шаг дискретизации оказывает заметное влияние на среднеквадратичную ошибку и качество обучения сети.

Оптимальные параметры для рассматриваемой задачи:

- длина обучающей выборки N_B : 800...1200;
- шаг дискретизации Δt : 0.1;
- функция обучения: `trainlm` (обозначенная в тексте как `lrainlm`, вероятно, опечатка).

В ходе проведённых исследований были определены оптимальные параметры нейросетевого регулятора, представленным в таблице 4.1.

Графики переходных процессов системы управления насосным агрегатом при резких изменениях возмущающих воздействий, без учёта динамики трубопровода, приведены на рисунке 4.6. Они соответствуют вариантам а-в, представленным в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Оптимальные параметры нейросетевого регулятора

№	Параметры нейроконтроллер (NN Prediction Controller)	Обозначение	Варианты		
			а	б	в
1	Size of Hidden Layer	N	2	3	5
2	Sampling Interval	t	0,1	0,1	0,1
3	No. Delayed Plant Inputs	N_i	2	2	2
4	No. Delayed Plant Outputs	N_j	2	2	2
5	Training Epochs	-	200	200	200
6	Training samples	N_B	800	1200	1000
7	Maximum Plant Input	max	10	10	10
8	Minimum Plant Input	min	0	0	0
9	Maximum Interval Value	$t_{\max}$	20	50	10
10	Minimum Interval Value	$t_{\min}$	5	0,5	1
11	Cost Horizon	N_2	8	20	10
12	Control Horizon	N_u	6	5	3
13	Control Weighting Factor	ρ	0,05	0,05	0,05
14	Search parameter	α	0,001	0,001	0,001

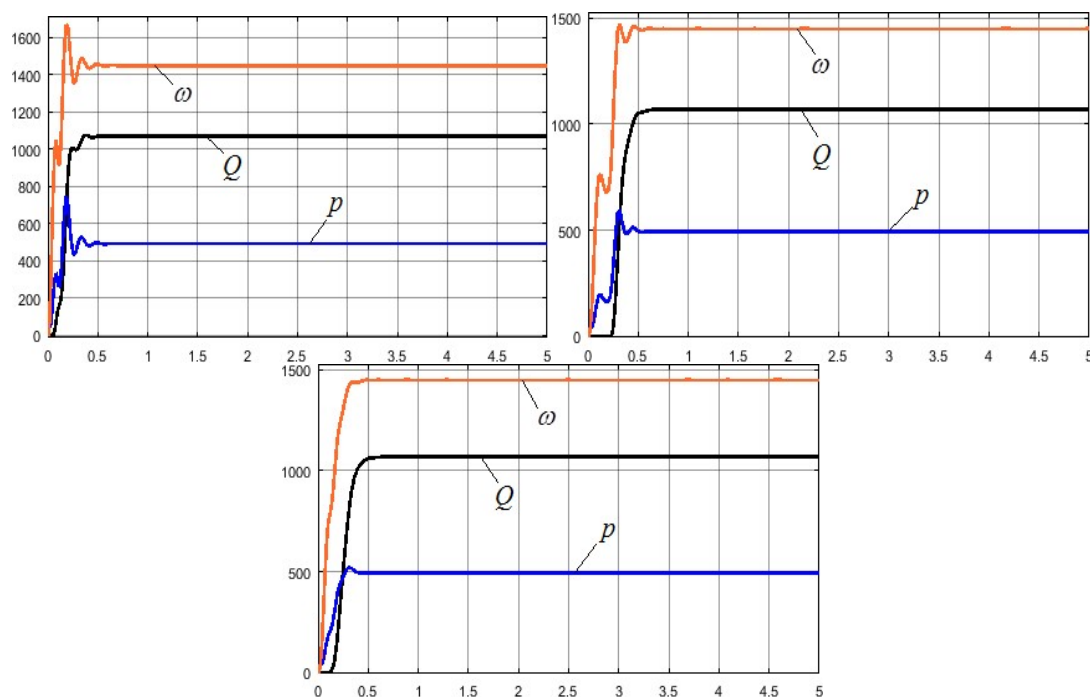


Рисунок 4.6 – Графики подачи, давления и скорости вращения насосного агрегата

Для исследования динамических процессов применялась модель трубопровода в виде передаточной функции, описывающей изменение давления в заданной точке трубопроводной системы. Графики переходных процессов регулирования давления насосного агрегата с использованием нейросетевого и ПИ-регуляторов при резких возмущающих воздействиях, с учётом распределённых свойств магистрали, представлены на рисунках 4.7, 4.8.

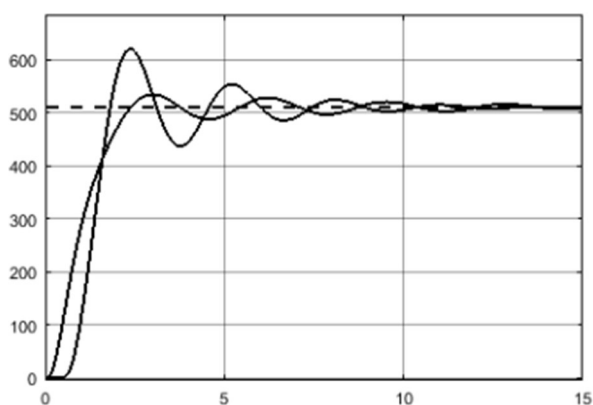


Рисунок 4.7 – с ПИ-регулятором

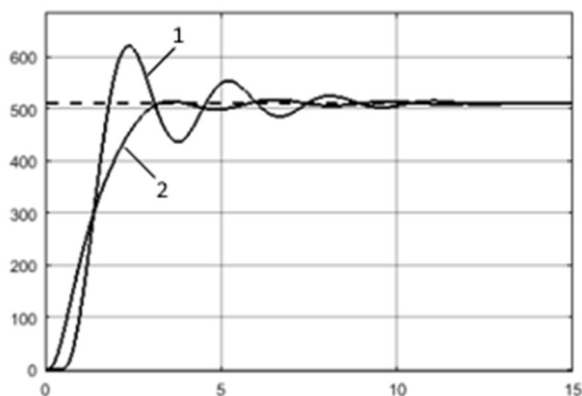


Рисунок 4.8 – с нейрорегулятором

4.3 Общая концепция вариативной оптимизации электроприводных систем насосных станций

Эффективность насосных агрегатов и насосных станций, оснащённых современными электроприводами и средствами автоматизации, определяется по трём ключевым направлениям:

- 1) Обеспечение требуемых статических и динамических уровней давления при изменяющемся расходе жидкости;
- 2) Минимизация негативных явлений, таких как кавитация и гидравлические удары;
- 3) Снижение энергопотребления и повышение эффективности управления в процессе эксплуатации.

В системах с одним насосом и частотно-регулируемым электроприводом (ЧРЭП) снижение энергозатрат достигается за счёт применения U/f -характеристики преобразователя частоты (ПЧ), соответствующей нагрузке вентиляционного типа. Такие режимы управления доступны в программном обеспечении ПЧ и называются энергосберегающими. Они эффективны при широком диапазоне регулирования подачи и частоты вращения, однако при этом возрастают гидравлические потери и общие потери энергии, поэтому такие системы целесообразны лишь для малых мощностей и ограниченного диапазона подачи.

При средних и высоких мощностях используются многоагрегатные насосные станции с параллельной работой НА. Гидравлическая схема подбирается с учётом технологических требований и условий эксплуатации. Независимо от конфигурации, применяется групповое управление электроприводами, нацеленное на достижение максимальной эффективности по трём основным критериям.

Основные варианты построения ЭПС для многоагрегатных НС:

— ЭПС1: Один ПЧ на группу электроприводов с коммутацией между ПЧ и сетью питания, наименее затратный.

— ЭПС2: Один ПЧ + устройства плавного пуска (УПП), которые могут быть как групповыми, так и индивидуальными.

— ЭПС3: Индивидуальные ПЧ для каждого электродвигателя НА с возможностью гибкого подключения и отключения агрегатов в зависимости от требуемой подачи, наиболее дорогостоящий, но обеспечивает максимальную эффективность управления, повышенная отказоустойчивость, эффективное устранение кавитации и гидроударов.

Также возможны комбинированные схемы, например, с двумя или тремя ПЧ, каждый из которых управляет своей группой насосов, подключённых по схеме ЭПС1 или ЭПС2.

Могут использоваться индивидуальные инверторы с общим выпрямителем, рециркулирующим энергию торможения, а также различные алгоритмы управления: с контуром скорости, скалярным или векторным методом.

Основные задачи при параллельной работе насосов на общую магистраль:

- 1) Включение/отключение дополнительных НА;
- 2) Распределение нагрузки между агрегатами;
- 3) Управление очередностью включения агрегатов для равномерного износа и продления ресурса.

Способы управления включением дополнительных насосов:

- по отклонению регулируемой переменной (давление, разность давлений, частота вращения и др.);
- по нагрузке основного электродвигателя (ток, момент, мощность);
- по критерию минимизации текущего энергопотребления;
- комбинированные подходы с управлением задвижками.

Пример алгоритма для ЭПС1:

- основной насос регулирует технологический параметр до своего предела;
- при превышении расхода насос переключается на сеть, а ПЧ — на следующий насос;
- последовательно подключаются дополнительные агрегаты по мере роста расхода;
- при снижении нагрузки выполняется обратная последовательность.

Алгоритм для ЭПС3:

- основной насос стабилизирует параметр до достижения номинала;
- при росте нагрузки подключается следующий насос и выравнивается нагрузка;
- по мере необходимости подключаются дополнительные агрегаты;
- при снижении расхода отключение происходит в обратном порядке;

— управление осуществляется по частоте вращения или по току нагрузки, с учётом гистерезиса для предотвращения частых переключений.

Таким образом, каждая конфигурация ЭПС имеет свои особенности, достоинства и ограничения, а выбор варианта зависит от мощности станции, характеристик насосов, требований к технологическим параметрам и задач по энергосбережению.

4.4 Структура критериев вариативной оптимизации электроприводных систем насосных станций

Определение оптимального варианта электроприводной системы для параллельно работающих насосных агрегатов осуществляется на основе комплексного подхода. Такой подход предполагает использование как микромоделей, так и макромоделей системы, включающих математические описания и энергодинамические структурные схемы различных конфигураций ЭПС. Моделируются типовые режимы работы насосных агрегатов и насосной станции, а также различные временные графики изменения расхода жидкости в трубопроводе.

В зависимости от продолжительности анализа используются расходные графики с разной временной детализацией: минутной, часовой, суточной, месячной и т.д. Общая структура процесса принятия решений включает три основных блока:

- БМВС – блок моделей вариантов систем;
- БОПЭ – блок оценки показателей эффективности;
- БАПР – блок анализа и принятия решения.

4.5 Подход и алгоритм вариативной оптимизации электроприводов

Для выбора оптимального варианта электроприводной системы (ЭПС) насосных агрегатов (НА) среди множества возможных решений рекомендуется использовать следующую поэтапную методику:

1) Формирование набора из h вариантов реализации системы, включающего различные комбинации компонентов электротехнической, механической и гидравлической подсистем. На этом этапе проводится предварительный отбор структур системы и оборудования. Для удобства рекомендуется использовать таблицу модулей, сформированную на основе классификации компонентов систем управления насосными системами.

2) Определение частных и обобщённого критериев оптимизации. Из множества показателей выделяются три ключевых: производительность, технологическое качество и энергопотребление. Остальные критерии рассматриваются как ограничения. Обобщённый критерий формируется в

виде стоимости с учётом положительных весовых коэффициентов, отражающих вклад каждого частного критерия.

3) Построение упрощённых линеаризованных моделей (макромоделей) для каждого варианта. Эти модели формируются из модулей и блоков, представленных в таблице модулей, и содержат переменные, необходимые для оценки как динамических характеристик, так и технологических и энергетических показателей. Все переменные нормируются относительно базовых значений, указанных в техзадании или в характеристиках современных промышленных решений.

4) Выполнение компьютерного моделирования всех h систем с учётом возмущений и управляющих воздействий, соответствующих условиям конкретной схемы водоснабжения. Исследуются режимы работы насосных агрегатов на основе типовых графиков изменения расхода жидкости.

5) Получение нормированных оценок производительности, качества технологии и энергопотребления по результатам моделирования. Из h вариантов отбираются k наиболее подходящих, удовлетворяющих нормированным требованиям. Отбор осуществляется на основе матрицы блоков, где каждая ось соответствует одной из трёх оценок. В простейшем случае матрица имеет размер $3 \times 3 \times 3$, а оценки классифицируются как: «ниже нормы» (0,7–0,9), «норма» (0,9–1,1) и «выше нормы» (1,1–1,3).

6) Выбор весовых коэффициентов для нормированных частных критериев и проведение оптимизации по обобщённому критерию. Обобщённый показатель рассчитывается в виде относительной стоимости варианта. В качестве базовой цены используется усреднённая рыночная стоимость электрооборудования, а в качестве переменных для оптимизации — нормированные оценки типовых приводных параметров.

7) Принятие окончательного решения о выборе базового варианта ЭПС, который будет использоваться для дальнейшего проектирования. Уточняется состав оборудования и окончательная конфигурация системы.

8) Моделирование базового варианта по подробным (микро)моделям всех подсистем, что позволяет получить уточнённые оценки по обобщённому и частным критериям.

Выбор формы математического описания ЭПС зависит от программной среды, используемой для моделирования. При работе в среде MATLAB-Simulink модели могут быть представлены в виде энергодинамических структурных схем, отражающих нелинейные дифференциальные уравнения системы. Особое внимание при этом следует уделить точности математического описания гидравлической части, включающей параллельно работающие насосные агрегаты, объединённые через общие входные и выходные коллекторы и магистральные трубопроводы.

5 Исследования электроприводных систем

В данном разделе рассматриваются результаты практических исследований. Была выполнена описание, расчёты и моделирование в среде Matlab Simulink электроприводных систем, с последующей оценкой их динамической и энергетической эффективности. Энергодинамические структурные схемы для вариантов ЭПС1 и ЭПС2 с двумя параллельно работающими насосными агрегатами (НА) представлены на рисунках 5.1 и 5.2. При необходимости увеличения количества параллельных НА схема расширялась за счёт добавления аналогичных блоков, гидравлически связанных с существующими через общий выходной коллектор.

Система управления включает в себя следующие элементы: регулятор скорости, регулятор давления, регулятор соотношения моментов нагрузок приводов, замкнутые контуры регулирования токов, а также задатчики интенсивности для управления разгоном и торможением электроприводов. За включение и отключение дополнительных насосных агрегатов отвечает блок переключения структур.

Для детализированных исследований на микроуровне структура модели дополнялась механизмами векторного управления активными токами и потокосцеплениями приводов. При проведении макроуровневого анализа схема упрощалась до описания регулирования гидравлических параметров и оценки энергетических характеристик, с масштабированием динамических процессов вплоть до приближения к установившимся (статическим) режимам работы.

Динамические и энергетические процессы в системе управления давлениями двух НА описываются следующей системой уравнений

$$p\omega_i = J \sum_i^{-1} (M_{Di} - M_{Hi} - M_{Ci}), \quad (5.1)$$

$$M_{Di} = (3/2)p_{\Pi}k_2\psi_2i_{1q}, \quad (5.2)$$

$$T_{\Sigma i}pi_i + i_i = R_i^{-1}(u_{qi} - c'_{ei}\omega_i), \quad (5.3)$$

$$u_{qi} = [W_{PTi}(p)k_{\Pi i}u_{PTi}(t - \tau_i)](u_{PCi} - k_{DTi}i_i) \quad (5.4)$$

На структурной схеме контур тока моделируется в виде эквивалентного апериодического звена с постоянной времени $T_{\Sigma i}$.

Гидравлические процессы, происходящие в насосах, описываются следующим уравнением

$$pQ_i = \frac{s}{\rho L} [p_1 + p_0 - p_c - (R_{\Sigma} Q_i^2)] \quad (5.5)$$

Обратный клапан пропускает жидкость только в одном направлении, поэтому расход через него может иметь исключительно положительное значение.

Синтез параметров регуляторов в каскадной системе управления, охватывающей электромагнитные, механические и гидравлические переменные, осуществляется с применением как классических методов, так и современных оптимизационных подходов из библиотеки Matlab Simulink. Динамика и энергетика процессов в насосных агрегатах (НА) при резких изменениях управляющих и возмущающих воздействий проанализированы на основе графиков.

Хотя все расчёты выполнялись в системе СИ (рад/с, Па, м³/с), для удобства визуализации переменные на графиках отображаются в более привычных единицах: об/мин, кПа, м³/ч. Чтобы обеспечить изменение расхода от минимального до максимального значения (примерно в 10 раз), требуется снижение общего гидравлического сопротивления ($R_{\text{маг}} + R_{\text{потр}}$) в 10 раз — с $8,41 \times 10^6$ до $8,41 \times 10^5 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$. Поэтому на графиках значения сопротивления масштабированы по формуле: $R_{\text{маг}} + R_{\text{потр}} \times 15 \times 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$.

Алгоритм работы системы управления, следующий: при увеличении расхода жидкости в трубопроводе снижается сопротивление у потребителя за пределами магистрали. В ответ на это электропривод увеличивает частоту вращения основного НА, стабилизируя давление в выходном коллекторе в пределах допустимой нагрузки одного агрегата. При дальнейшем росте расхода, когда основной насос достигает максимальной производительности, его электродвигатель переключается на прямое питание от сети, а ПЧ начинает управлять дополнительным насосом, который теперь становится основным.

Отключение дополнительного насоса происходит при снижении расхода: частота вращения уменьшается, и нагрузка на основной агрегат становится меньше его номинальной мощности.

На рисунке 5.3 представлены графики изменений электрических, механических и гидравлических параметров при работе двух насосных агрегатов с одним преобразователем частоты и реализованной системой переключения, созданной в среде Matlab Simulink.

На графиках обозначены следующие переменные:

- Q_1, Q_2 – подача первого и второго НА;
- $p_{на1}, p_{на2}$ – давление на выходе каждого НА;
- n_1, n_2 – частота вращения (об/мин) насосов;
- P_1, P_2 – мощность электродвигателей;
- I_1, I_2 – токи двигателей;
- Q_{Σ} – суммарная подача;
- $p_{кол}$ – давление в выходном коллекторе;
- $R_{маг} + R_{п}$ – общее гидравлическое сопротивление магистральной

сети.

Алгоритм функционирования рассматриваемой системы управления, следующий: при увеличении расхода жидкости в магистрали снижается сопротивление у потребителя, расположенного за пределами магистрального трубопровода. В ответ на это электропривод увеличивает частоту вращения основного насосного агрегата (НА), обеспечивая стабилизацию давления в выходном коллекторе в пределах допустимой нагрузки одного насоса.

При дальнейшем росте расхода, когда основной насос достигает предельной производительности, его электродвигатель переключается на питание от сети, а преобразователь частоты (ПЧ) начинает управлять дополнительным насосом, который переходит в роль основного.

Отключение дополнительного НА происходит при снижении расхода: когда его частота вращения уменьшается, а нагрузка на основной агрегат становится ниже номинального уровня, дополнительный насос выводится из работы.

На рисунке 5.4 представлены графики изменения электрических, механических и гидравлических параметров при работе двух насосов, управляемых одним ПЧ с реализованной системой переключения в среде Matlab Simulink.

Обозначения на графиках:

- Q_1, Q_2 — подача первого и второго насосов соответственно;
- $p_{на1}, p_{на2}$ — давление на выходе каждого НА;
- n_1, n_2 — частота вращения насосов;
- P_1, P_2 — мощность электродвигателей;
- I_1, I_2 — токи электродвигателей;
- Q_{Σ} — суммарная подача насосов;
- $p_{кол}$ — давление в выходном коллекторе насосной станции;
- $R_{маг} + R_{п}$ — суммарное сопротивление магистральной сети.

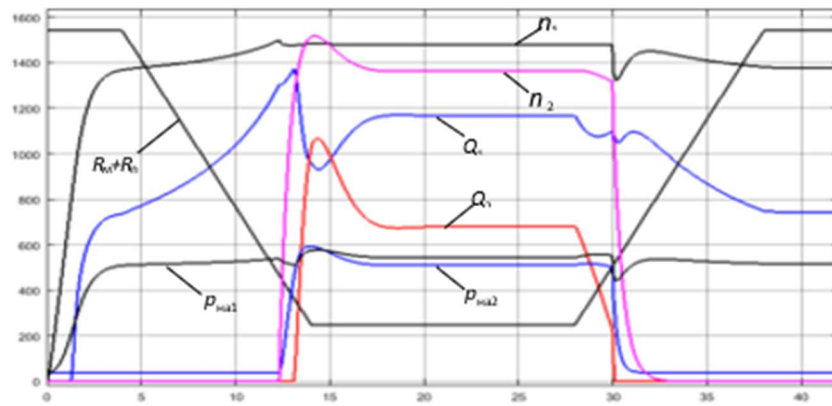


Рисунок 5.1 – График подач давлений, скоростей НА и сопротивления магистральной сети

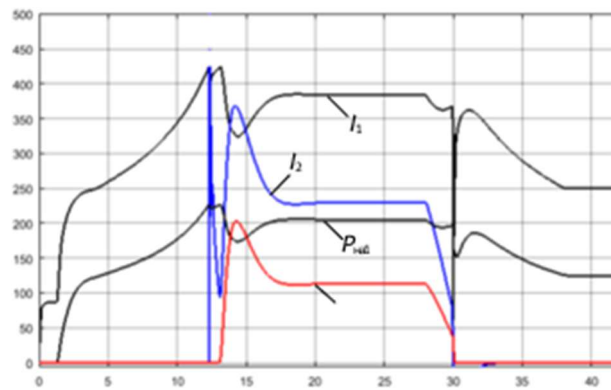


Рисунок 5.2 – Графики токов электродвигателей и мощностей НА

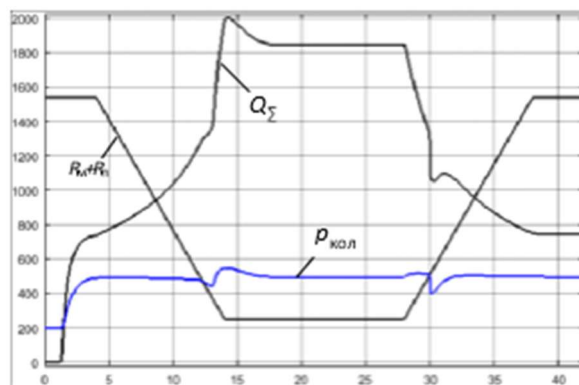


Рисунок 5.3 – Графики суммарной подачи НА и давления выходного коллектора

В первом варианте системы управления насосными агрегатами (НА), где один из них регулируется с помощью преобразователя частоты (ПЧ), возможно длительное функционирование регулируемого насоса за пределами его паспортной рабочей зоны. В то же время, нерегулируемый насос работает с постоянной скоростью и номинальной подачей.

Поскольку оба агрегата подключены к общему выходному коллектору, нерегулируемый насос оказывает противодействие агрегату с меньшей производительностью. Это приводит к неэффективной работе регулируемого НА, несмотря на то что технологические параметры в магистральной сети продолжают поддерживаться.

При снижении частоты вращения регулируемого НА примерно до 40% от номинального значения наблюдается увеличение дополнительных потерь мощности. Эти потери определяются как разность между гидравлической мощностью (полезной) регулируемого и нерегулируемого насосов. Данная разность обусловлена отклонениями электрических, механических и гидравлических параметров от номинальных значений, а также различиями в сопротивлениях трубопроводов и арматуры между входным и выходным коллекторами.

Следует отметить, что система с двумя НА и одним ПЧ не позволяет устранить неэффективные режимы работы насосов при значительном диапазоне изменения расхода в системе, что снижает общий КПД. Кроме того, при переключении ПЧ на дополнительный НА могут возникать броски тока и давления, что отрицательно сказывается на динамике работы привода и насоса, создавая риск гидродинамических ударов в коллекторе и трубопроводе.

Вариант с индивидуальными ПЧ для каждого НА лишён этих недостатков и обеспечивает значительно более высокие показатели по динамике и энергетической эффективности. Поэтому при параллельной работе двух насосов целесообразно использовать индивидуальное регулирование каждого из них.

Алгоритм работы системы с отдельными ПЧ, следующий: при увеличении расхода жидкости снижается сопротивление со стороны потребителя, и электропривод основного НА увеличивает частоту вращения, поддерживая стабильное давление в выходном коллекторе в допустимом диапазоне нагрузки для одного агрегата. С дальнейшим ростом расхода подключается дополнительный НА, и система выравнивает нагрузку между обоими приводами. При этом частоты вращения рабочих колес и двигателей обоих насосов возрастают до номинального уровня. При снижении расхода дополнительный насос отключается, когда частоты вращения обоих агрегатов уменьшаются, и нагрузка на основной НА становится ниже его номинальной.

Включение и отключение насосов осуществляется на основе анализа частоты вращения двигателей и значения давления в системе.

При параллельной работе насосных агрегатов (НА) возникают гидравлические потери, вызванные различиями в сопротивлениях трубопроводов и запорной арматуры между входным и выходным коллекторами, а также неоднородностью характеристик самих агрегатов. Эти потери могут привести к неравномерному распределению нагрузки и, соответственно, различной подаче между насосами.

В ходе исследования было установлено, что привод насосного агрегата, подключённого к трубопроводу с меньшим гидравлическим сопротивлением, принимает на себя большую часть нагрузки. Это приводит к дисбалансу в работе системы.

На рисунке 5.4 представлены графики подач, токов и частот вращения двигателей НА в условиях отсутствия выравнивания нагрузок, также показаны те же параметры при активированном механизме выравнивания нагрузок между насосами.

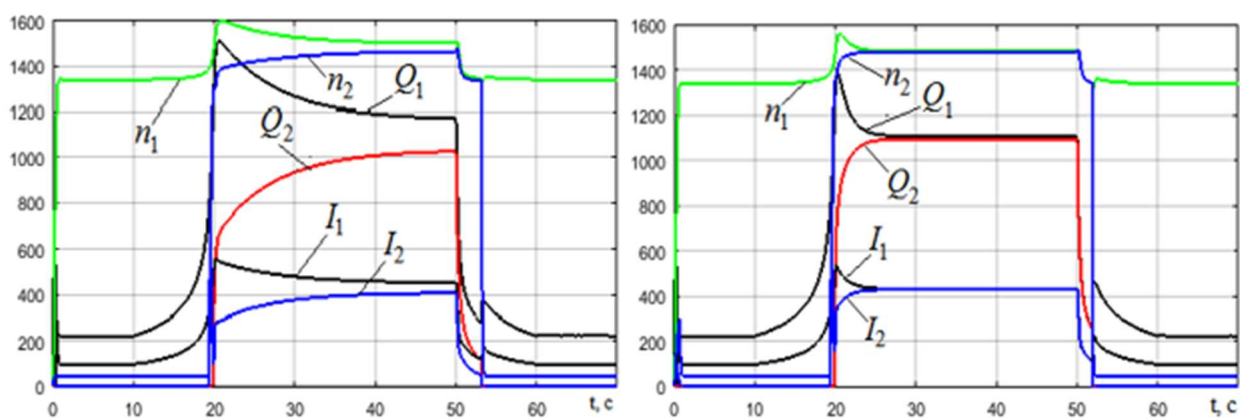


Рисунок 5.4 – Графики, электрических, механических и гидравлических переменных параллельно работающих НА

Выравнивание моментов нагрузок между параллельно работающими насосными агрегатами (НА) достигается за счёт введения в систему управления регулятора соотношения моментов (PCM), как показано на рисунке 5.4. Этот регулятор позволяет корректировать частоты вращения двигателей или управляющие сигналы индивидуальных преобразователей частоты (ПЧ), обеспечивая необходимое соотношение моментов, включая возможность их равенства. Настройка выполняется с использованием коэффициентов $k_{смj}$, рассчитанных на основе момента ведущего привода. Такой подход позволяет исключить режимы с повышенными энергозатратами. В результате внедрения PCM снижаются дополнительные энергетические потери, что способствует увеличению общей энергоэффективности системы.

В качестве примера расчёта, моделирования и анализа были рассмотрены два варианта исполнения электроприводной системы (ЭПС), включающей два параллельно работающих НА. Комплекс состоит из следующих компонентов:

- насосы: расход $Q = 1100 \text{ м}^3/\text{ч}$, напор $H = 52,5 \text{ м}$, КПД насоса $\eta_n = 0,86$;
- электродвигатели: номинальная мощность $P_{ном} = 250 \text{ кВт}$, номинальная частота вращения $n_{ном} = 1480 \text{ об/мин}$, КПД $\eta_{ном} = 0,945$;
- преобразователи частоты: номинальная мощность $P_{ном} = 250 \text{ кВт}$, ток $I_{ном} = 443 \text{ А}$, КПД 98%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной диссертационной работе решена актуальная задача повышения энергетической и динамической эффективности электроприводных систем насосных станций за счёт совершенствования архитектуры управления, внедрения частотно-регулируемых электроприводов, интеллектуальных алгоритмов регулирования и комплексного подхода к вариативной оптимизации.

В ходе исследования разработана модульная имитационная модель ЭПС НС, реализованная в программной среде Matlab Simulink. Структура модели включает в себя все ключевые элементы: насосные агрегаты, преобразователи частоты, системы управления, блоки моделирования энергетических процессов, а также связи с трубопроводной магистралью.

Особое внимание уделено анализу работы насосных агрегатов при параллельном подключении в различных конфигурациях: с одним ПЧ на группу агрегатов и с индивидуальными ПЧ. Установлено, что при значительном изменении расхода в магистрали эффективность системы с одним ПЧ снижается вследствие перераспределения нагрузок, что может приводить к неравномерной работе агрегатов и увеличению потерь. Применение индивидуальных ПЧ для каждого агрегата позволяет не только устранить данные недостатки, но и обеспечить более гибкое управление технологическими параметрами.

Разработан и исследован нейросетевой регулятор с предсказанием, основанный на модели управляемого объекта в виде искусственной нейронной сети. Показано, что такой регулятор обладает высокой адаптивностью к нелинейностям системы и обеспечивает устойчивую работу ЭПС при возмущениях и изменениях нагрузки. В результате моделирования доказано, что применение нейросетевых методов управления позволяет значительно снизить колебания давления, сократить пиковые токи и повысить общее качество регулирования по сравнению с классическими ПИ-регуляторами.

Также в работе предложена методика вариативной оптимизации ЭПС, учитывающая совокупность технических и экономических критериев. Построены макромоделли системы, рассчитаны относительные показатели эффективности различных вариантов реализации ЭПС, проведено ранжирование по обобщённому критерию. На основе полученных результатов сформулированы рекомендации по выбору оптимального варианта конфигурации электропривода с учётом типа насосной станции, характерных графиков расхода и заданных технологических ограничений.

Выполненное исследование подтвердило эффективность предложенных подходов к синтезу, управлению и оптимизации ЭПС НС. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых насосных станций, а также при модернизации существующих объектов водоснабжения и водоотведения.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

Полное наименование	Сокращение
Насосный агрегат	НА
Насосная станция	НС
Электроприводная система	ЭПС
Частотно-регулируемый электропривод	ЧРЭП
Преобразователь частоты	ПЧ
Устройство плавного пуска	УПП
Система управления	СУ
Регулятор скорости	РС
Регулятор давления	РД
Регулятор соотношения моментов	РСМ
Задатчик интенсивности	ЗИ
Коэффициент полезного действия	КПД
Neural Network (нейронная сеть)	NN
Neural Network Predictive Controller (предсказательный регулятор)	NNPC

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Матросов Ю.А. Теория автоматического управления. – М.: Наука, 2019. – 416 с.
- 2 Погорелов Н.А., Блинов А.Е. Электропривод и системы автоматизации насосных станций. – СПб.: Питер, 2018. – 368 с.
- 3 Кац Г.Я. Электропривод в системах водоснабжения. – М.: Энергия, 2020. – 272 с.
- 4 Dorf R.C., Bishop R.H. Modern Control Systems. – 14th ed. – Boston: Pearson, 2021. – 1104 p.
- 5 MATLAB and Simulink User's Guide. – Natick, MA: The MathWorks Inc., 2023. – <https://www.mathworks.com/help/simulink/>
- 6 Isermann R. Digital Control Systems. – Berlin: Springer, 2017. – 722 p.
- 7 Bequette B.W. Process Control: Modeling, Design and Simulation. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2020. – 768 p.
- 8 ГОСТ 28352–89. Насосы динамические. Термины и определения. – Введ. 01.01.1990. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 18 с.
- 9 Зиглер Дж.Г., Николс Н.Б. Настройка и контроль промышленных процессов // Журнал автоматизации. – 1942. – № 3. – С. 25–33.
- 10 Cao X., Dai J., Liu Y. Optimization in Energy Systems: A Review on MPC Applications // Journal of Building Performance. – 2020. – Vol. 12, No. 1. – P. 1–10.
- 11 Baksh A., Kumar R., Singh S. MPC for Indoor Climate Management // Smart Systems and Applications. – 2019. – Vol. 9, No. 2. – P. 14–25.
- 12 Perez J., Fernandez R., Martinez C. HVAC Optimization Algorithms with MPC // Energy Procedia. – 2021. – Vol. 157. – P. 231–240.
- 13 Kumar P., Sharma R., Verma D. AI and MPC in Climate Control Systems // Journal of Engineering Applications. – 2022. – Vol. 30, No. 7. – P. 87–93.
- 14 Smith R. Machine Learning in Smart Thermostats Using MPC // IoT Journal. – 2020. – Vol. 18, No. 4. – P. 45–50.
- 15 Wilson P. MPC-based Energy Monitoring Systems // Journal of IoT Research. – 2019. – Vol. 20, No. 5. – P. 12–18.
- 16 Johnson L. Emerging Trends in Smart Heating Systems with MPC // IoT World. – 2022. – Vol. 9, No. 2. – P. 18–26.
- 17 Clarke D. Privacy and MPC in Building Automation // Data Security. – 2021. – Vol. 7, No. 1. – P. 56–62.
- 18 Смирнов А.А. Применение цифровых регуляторов в промышленных системах // Молодой ученый. – 2020. – № 5. – С. 432–436.
- 19 Петров И.И. Интеграция MPC в управление технологическими процессами // Вестник автоматизации. – 2021. – № 3. – С. 112–117.
- 20 Крылов И.П., Маликов Е.В. Использование методов машинного обучения в настройке ПИД-регуляторов // Информатика и управление. – 2022. – № 7. – С. 34–40.

21 Никифоров А.Р. Настройка предсказательного управления для промышленных систем // Журнал инженерных исследований. – 2021. – № 4. – С. 78–85.

22 Григорьев С.М. Преимущества цифровых регуляторов в автоматизации // Инженерные технологии. – 2020. – № 8. – С. 55–62.

23 Иванов П.П., Сидоров А.В. Цифровые технологии в управлении вакуумными насосами // Автоматизация и контроль. – 2021. – № 6. – С. 23–29.

РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию

Калашев Азамат Маратович

7M07101 – Автоматизация и роботизация

На тему: Исследование и разработка алгоритмов параметров цифрового регулятора с целью оптимизации в промышленных автоматизированных системах

Выполнено:

а) презентация на 20 слайдах

б) пояснительная записка на 71 страницах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Магистерская диссертация посвящена актуальной и практически значимой задаче — созданию методологии настройки цифровых регуляторов для промышленного применения, на примере системы управления вакуумным насосом. Работа состоит из введения, заключения и пяти логически выстроенных разделов, содержит обоснование, математическое моделирование, синтез, исследование и оптимизацию регуляторов.

В первом разделе выполнен подробный обзор современных систем автоматизации насосных станций, представлена классификация методов регулирования параметров, рассмотрены архитектурные решения на базе частотно-регулируемых электроприводов. Дано сравнение аналоговых и цифровых регуляторов, подчеркнуты преимущества цифрового подхода в условиях изменяющихся технологических параметров.

Во втором разделе разработана математическая модель вакуумного насоса на основе технических характеристик оборудования Grundfos UPS-200. Представлены уравнения динамики, описывающие электромеханические и гидравлические процессы, а также сформирована структурная модель в среде MATLAB Simulink.

Третий раздел посвящён исследованию режимов работы насосного агрегата с протяжённым трубопроводом, анализу переходных процессов и выявлению влияния параметров управления на устойчивость и точность регулирования. Проведены сравнительные расчёты и графический анализ.

Особое внимание уделено четвёртому разделу, в котором представлен синтез цифрового регулятора. В работе интегрированы модели с разными периодами дискретизации, основанные на подходах, Выполнено Z-преобразование уравнений регуляторов, реализованы структуры с ПИД-, И- и прогнозирующими регуляторами. Разработана методика их настройки на основе критериев быстродействия, устойчивости и энергоэффективности. Обоснована эффективность предложенной архитектуры при минимальных вычислительных затратах.

Пятый раздел содержит результаты моделирования в Simulink, подтверждающие высокую точность и надёжность работы регулятора. Полученные результаты сопоставлены с эталонными характеристиками и натурными данными. Погрешность моделирования составила менее 2 %, что свидетельствует об адекватности построенной математической модели и корректности синтеза алгоритма управления.

Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне. Материал изложен грамотно, структура логична, расчёты корректны, оформление соответствует требованиям ГОСТ. Диссертация демонстрирует высокий уровень теоретической подготовки и практических навыков магистранта.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
СӨТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Графический и текстовый материал оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ, предъявляемыми к оформлению учебных работ.

Данная магистерская диссертация отличается проработанностью, научно-исследовательский подход и полноту изложенного теоретического материала. Приведённые исследования доказывают отличную теоретическую подготовку магистранта.

Оценка работы

Учитывая вышеизложенное, считаю, что магистерская диссертация заслуживает оценки « 70 » (_____), а магистрант Калашев Азамат Маратович присвоения академической степени магистра технических наук по специальности 7М07101 – Автоматизация и роботизация.

Рецензент

Доктор Р.Н.О., доцент
Кафедры «Автоматизация и управления»
Алматынского университета энергетики и связи
_____ Оракбаев Е.Ж.

« 21 » июня 2025 г.

**ОТЗЫВ
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

на магистерскую диссертацию
Калашев Азамат Маратович
7M07101 – Автоматизация и роботизация

Тема: «Исследование и разработка алгоритмов параметров цифрового регулятора с целью оптимизации в промышленных автоматизированных системах»

Магистерская диссертация посвящена актуальной и практически значимой задаче — созданию методологии настройки цифровых регуляторов для промышленного применения, на примере системы управления вакуумным насосом. Работа состоит из введения, заключения и пяти логически выстроенных разделов, содержит обоснование, математическое моделирование, синтез, исследование и оптимизацию регуляторов.

В первом разделе выполнен подробный обзор современных систем автоматизации насосных станций, представлена классификация методов регулирования параметров, рассмотрены архитектурные решения на базе частотно-регулируемых электроприводов. Дано сравнение аналоговых и цифровых регуляторов, подчеркнуты преимущества цифрового подхода в условиях изменяющихся технологических параметров.

Во втором разделе разработана математическая модель вакуумного насоса на основе технических характеристик оборудования Grundfos UPS-200. Представлены уравнения динамики, описывающие электромеханические и гидравлические процессы, а также сформирована структурная модель в среде MATLAB Simulink.

Третий раздел посвящён исследованию режимов работы насосного агрегата с протяжённым трубопроводом, анализу переходных процессов и выявлению влияния параметров управления на устойчивость и точность регулирования. Проведены сравнительные расчёты и графический анализ.

Особое внимание уделено четвёртому разделу, в котором представлен синтез цифрового регулятора. В работе интегрированы модели с разными периодами дискретизации, основанные на подходах, Выполнено Z-преобразование уравнений регуляторов, реализованы структуры с ПИД-, П- и прогнозирующими регуляторами. Разработана методика их настройки на основе критериев быстродействия, устойчивости и энергоэффективности.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Обоснована эффективность предложенной архитектуры при минимальных вычислительных затратах.

Пятый раздел содержит результаты моделирования в Simulink, подтверждающие высокую точность и надёжность работы регулятора. Полученные результаты сопоставлены с эталонными характеристиками и натурными данными. Погрешность моделирования составила менее 2 %, что свидетельствует об адекватности построенной математической модели и корректности синтеза алгоритма управления.

Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне. Материал изложен грамотно, структура логична, расчёты корректны, оформление соответствует требованиям ГОСТ. Диссертация демонстрирует высокий уровень теоретической подготовки и практических навыков магистранта.

Научный руководитель
ассоциированный профессор, доктор Ph.D

 Омирбекова Ж.Ж.

« 19 » июля 2025 г.

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Калашев Азамат Маратович

Тақырыбы: Исследование и разработка алгоритмов параметров цифрового регулятора с целью оптимизации в промышленных автоматизированных системах

Жетекшісі: Жанар Омирбекова

1-ұқсастық коэффициенті (30): 0.2

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0

Дәйексөз (35): 0.1

Әріптерді ауыстыру: 159

Аралықтар: 20

Шағын кеңістіктер: 5

Ақ белгілер: 1

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

☒ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

Күні



Кафедра меңгерушісі

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Калашев Азамат Маратович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Исследование и разработка алгоритмов параметров цифрового регулятора с целью оптимизации в промышленных автоматизированных системах

Научный руководитель: Жанар Омирбекова

Коэффициент Подобия 1: 0.2

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 5

Знаки из здругих алфавитов: 159

Интервалы: 20

Белые Знаки: 1

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превыщено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата



Заведующий кафедрой

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Калашев Азамат Маратович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Исследование и разработка алгоритмов параметров цифрового регулятора с целью оптимизации в промышленных автоматизированных системах

Научный руководитель: Жанар Омирбекова

Коэффициент Подобия 1: 0.2

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 5

Знаки из других алфавитов: 159

Интервалы: 20

Белые Знаки: 1

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- ☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- ☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- ☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- ☐ Обоснование:

Дата

19.06.25

проверяющий эксперт

СЕРТИФИКАТ

Настоящий сертификат подтверждает публикацию статьи
в международном научном журнале АКАДЕМИК

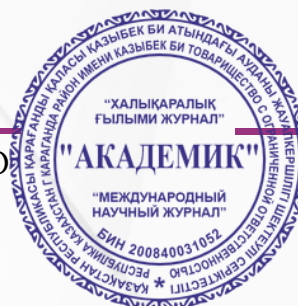
КАЛАШЕВ АЗАМАТ МАРАТОВИЧ

Научный руководитель: Омирбекова Жанар Жумаханкызы

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЦИФРОВАЯ РЕГУЛЯЦИЯ
ВАКУУМНОГО НАСОСА

Б.А. ТЕМИРБЕКОВ

Генеральный директор ТОО
Международный научный
журнал "АКАДЕМИК"



12.06.2025 г.

Республика Казахстан, г. Астана
www.journal-academic.com

СПРАВКА

Уважаемые Жанар Жумаханкызы, Азамат Маратович!

От имени международного научного журнала АКАДЕМИК позвольте выразить Вам наше глубокое почтение.

Рады сообщить Вам, что в рамках своей деятельности Ваша статья «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЦИФРОВАЯ РЕГУЛЯЦИЯ ВАКУУМНОГО НАСОСА» принята к публикации

Дата публикации: 12 июня 2025 г.

В приложении к данной справке отправляем Вам сертификат о публикации статьи.

Все поступающие в журнал статьи проходят обязательную проверку редакционной коллегией. На этом этапе оценивается соответствие материала тематике журнала, научная новизна, актуальность, оригинальность и соблюдение требований к оформлению.

Надеемся, что Ваша научная статья будет полезна и способствует дальнейшему развитию науки.

С наилучшими пожеланиями,
Международный научный журнал АКАДЕМИК.

Б.А. ТЕМИРБЕКОВ

Генеральный директор ТОО
Международный научный
журнал "АКАДЕМИК"




12.06.2025 г.

ЕҢБЕКТЕР ЖИНАҒЫ

**Халықаралық ғылыми-тәжірибелік конференциясының
«ТАУ-КЕН МЕТАЛЛУРГИЯ САЛАСЫНДАҒЫ ТҰРАҚТЫ ДАМУ
ЖӘНЕ ЗАМАНАУИ КЕШЕНДІ, РЕСУРСТАРДЫ ҮНЕМДЕЙТІН
ЖӘНЕ ЭНЕРГИЯ СЫЙЫМДЫЛЫҚТЫ ТЕХНОЛОГИЯЛАР»**

22 қараша 2024 жылғы, Алматы

СБОРНИК ТРУДОВ

**Международной научно-практической конференции
«УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ КОМПЛЕКСНЫЕ,
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ И ЭНЕРГОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ»**

22 ноября 2024 года, Алматы

PROCEEDINGS

**International Scientific and Practical Conference
« SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND MODERN INTEGRATED,
RESOURCE-SAVING AND ENERGY-INTENSIVE TECHNOLOGIES
IN THE MINING AND METALLURGICAL INDUSTRY »**

November 22, 2024, Almaty

Дүзбай Н.Б., Муханов Б.К. ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДА ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ ХРОМОВОЙ РУДЫ.....	288
Кутняков Д.И., Ширяева О.И. РАЗРАБОТКА СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОТЛОАГРЕГАТАМИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЬНО ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ (МРС).....	291
Жандин С.В., Ширяева О.И. РАЗРАБОТКА СИСТЕМ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ (АДС) ПРОЦЕССАМИ НА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОМ ПРЕДПРИЯТИИ.....	295
Кайрат А.А., Ширяева О.И. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ СЛОЖНЫХ (ММО) СИСТЕМ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ.....	300
Свичкарь А.С., Ширяева О.И. РАЗРАБОТКА МНОГОМЕРНОЙ И МНОГОСВЯЗНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТИ.....	303
Шукенов Ж.Е., Омирбекова Ж.Ж. ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ В УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОСЕТАМИ КАЗАХСТАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РС КОНТРОЛЛЕРОВ.....	308
Калашев А.М., Омирбекова Ж.Ж. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ НАСТРОЙКИ ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ.....	311
Kereibekkyzy A., Omirbekova Z.Z. DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A PREDICTIVE DIAGNOSTIC SYSTEM FOR OPTIMIZING THE MANAGEMENT OF KAZAKHSTAN'S COMBINED HEAT AND POWER PLANTS.....	314
Жанғали Б.Д., Жусупбеков С.С. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ ШАХТ.....	317
Хожамбергенова Ж.О., Жусупбеков С.С. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОЧИСТКИ ГАЗОВ.....	323
Кумаргалиева А.А. РАЗРАБОТКА САУ РЕАКТОРНОГО ПРОЦЕССА.....	327
Орынбасаров Н.О., Абжапаров К.А. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА 6-СТЕПЕННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОГО СИМУЛЯТОРА ВЕЛОСИПЕДА.....	330
Ханкелдиева Г.Э., Абжапаров К.А. МОБИЛЬДІ РОБОТТЫҢ ҚОЗҒАЛЫСЫН БАҒДАРЛАУ ЖҮЙЕСІ.....	334
Тукенов И.Е., Муратбеков М.М. ОБЗОР И СРАВНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНСТРУМЕНТОВ АНАЛИЗА СЕТЕВОГО ТРАФИКА.....	339
Женисулы И.Ж., Абжанова Л.К. МЕТАЛЛУРГИЯ ӨНДІРІСІНДЕГІ ГАЗДАРДЫ ІРІКТЕУ ПРОЦЕСТЕРІН БАСҚАРУ.....	344

на вход подаются измерения за предыдущий день, а на выходе формируется прогноз на следующий.

Процесс построения модели включает валидацию и тестирование на данных, которые не использовались при обучении. Основной метрикой оценки точности выступает средний абсолютный процент ошибки (MAPE).

Пример прикладного применения. Прогнозирование потребления электроэнергии позволяет энергетическим компаниям заранее планировать закупку электроэнергии, избегая переплат за избыточные объёмы или штрафов за дефицит. Модель, развернутая на РС-контроллере, подключается к SCADA-системе для получения реальных данных, анализирует их и в реальном времени передает результаты в систему управления.

Заключение.

Внедрение РС-контроллеров и интеллектуальных технологий в энергосети Казахстана открывает возможности для значительных улучшений в управлении электросетями. Ключевые преимущества включают снижение затрат за счёт оптимизации энергопотребления, повышение надёжности работы сети, улучшение её устойчивости к авариям, а также сокращение негативного воздействия на окружающую среду. Основными ограничениями являются зависимость точности прогнозов от качества исходных данных и высокие требования к инфраструктуре для их хранения и обработки.

Применение интеллектуальных технологий, включая краткосрочное прогнозирование и предиктивную диагностику, с использованием РС-контроллеров позволяет решать задачи устойчивого развития, способствуя повышению энергоэффективности и надёжности работы электросетей Казахстана.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Национальный отчет Республики Казахстан о состоянии и развитии электроэнергетики за 2022 год // Министерство энергетики Республики Казахстан. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://energo.gov.kz>.
- 2 Георгиевский А. В., Иванов П. Н. Цифровизация в энергетике: концепции, технологии, перспективы // Энергетическая политика. – 2020. – №3. – С. 35-42.
- 3 Мартыненко С. Н., Беляев В. И. Применение интеллектуальных технологий в управлении энергосистемами // Электротехника и электроэнергетика. – 2019. – Т. 66. – №8. – С. 15-22.
- 4 Шелков А. П., Юдин В. И. Прогнозирование аварийных ситуаций в электроэнергетике на основе предиктивной диагностики // Энергетика: экономика, технологии, экология. – 2021. – №4. – С. 25-31.
- 5 Khan, M. T., & Yang, J. Integration of predictive maintenance in smart grids: Challenges and opportunities // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2020. – Vol. 11, No. 5. – P. 4004-4012.
- 6 Болашакова К. Р. Автоматизация и цифровизация электросетей Казахстана: опыт и перспективы // Инженерные науки в Казахстане. – 2022. – №5. – С. 19-27.
- 7 Плотников А. Е., Иванова Л. В. Ресурсосберегающие технологии в энергетике: современные подходы и решения // Вестник энергетики и экологии. – 2020. – №6. – С. 41-50.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ НАСТРОЙКИ ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

А.М. Калашев , Ж.Ж. Омирбекова