

На правах рукописи



Кахоров Рустам Асалиевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В
ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ СИСТЕМАХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертационного соискания ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» на кафедре робототехники и автоматизации производственных систем

Научный руководитель: Белов Михаил Петрович
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой робототехники и автоматизации производственных систем ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Официальные оппоненты: Саушев Александр Васильевич
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривода и электрооборудования береговых установок» ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», г. Санкт-Петербург.

Рассудов Лев Николаевич
кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированного электропривода» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», г. Санкт-Петербург.


Защита состоится «26» июня 2019 года в 17-30 часов на заседании диссертационного совета Д212.238.05 на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета www.etu.ru в разделе «Подготовки кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах»

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан «25» апреля 2019 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.05
кандидат технических наук, доцент



А. Д. Стоцкая

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Насосные станции, оснащенные группой насосных агрегатов, работающих параллельно, являются энергоёмкими технологическими установками, на них приходится более 25% от суммарной вырабатываемой электроэнергии, они содержат в себе большие резервы энергосбережения. Основная часть затрачиваемой электроэнергии расходуется на подъем и перекачивание воды насосными станциями систем водоснабжения и водоотведения. Эффективность таких систем определяется режимами работы параллельно работающих насосных агрегатов, зависящих от многих факторов производственного или временного характера. Вопросы эффективной работы насосных станций становятся все более актуальными в связи с ежегодным ростом тарифов на электроэнергию, расходы на которую в общей структуре затрат могут быть очень значительными.

Одним из основных направлений повышения энергоэффективности является внедрение в системах водоснабжения современных энергосберегающих технологий на основе частотно-регулируемых электроприводных систем, позволяющих оптимизировать режимы работы насосных станций в широком диапазоне изменения нагрузки.

Применение частотно – регулируемого электропривода (ЧРЭП), несомненно, позволяет с минимальными капитальными затратами экономить до 30-40% электроэнергии. Экономическая эффективность регулируемых электроприводов определяется не только непосредственно их высокими энергетическими показателями, но и их регулировочными возможностями, что позволяет насосным станциям производить работу, необходимую по технологическим условиям с наименьшими энергетическими затратами.

Используемые в настоящее время типовые структуры систем управления с установкой ЧРЭП на одном или группе насосных агрегатов усложняют работу станции и приводят к неустойчивости всей системы управления. В связи с этим возникает необходимость исследований электроприводных систем насосных станций (ЭПС НС) с учетом динамических режимов и энергетических показателей, а также разработки нового алгоритма управления.

Степень разработанности темы исследования. Вопросы исследования и разработки электроприводных систем насосных агрегатов изложены в работах Костышина В.С., Копырина В.С., Лезнова Б.С., Николаева В.Г., Онищенко Г.Б., Прокопова А.А., Усачева А.П., и др. Оценка энергетической эффективности использования ЧРЭП в насосных станциях и других промышленных объектах освещены в работах таких ученых, как Андронов А.Л., Браславский И.Я., Бородацкий Е.Г., Ветлицын Ю.А., Зайцев А.И., Ильинский Н.Ф., Лазарев Г.И., Новиков В.А. и др. В данных работах доказано получение эффекта от использования ЧРЭП в насосных агрегатах, снижение энергозатрат могут достигать более 30%. Однако в них недостаточно рассмотрено исследование эффективности в динамических режимах при структурном изменении электроприводных систем параллельно работающих насосных агрегатов.

Объектом исследования являются электроприводные системы насосных станций предназначенных для работы в системах водоснабжения.

Предметом исследования является система автоматического управления электроприводами насосных станций.

Целью диссертационной работы является исследование и обоснование режимов работы электроприводных систем насосных станций и повышение их эффективности.

Для достижения цели поставлены следующие основные задачи:

1. Разработать математические модели насосных агрегатов, учитывающие динамические и энергетические процессы в электроприводных системах насосных станций и различных вариантов их подключения.

2. Провести анализ динамики параллельной работы насосных агрегатов при изменении состава технологического оборудования насосной станции и структурном изменении электроприводных систем.

3. Провести анализ показателей энергоэффективности параллельно работающих насосных агрегатов с целью выявления наиболее выгодного режима работы с точки зрения минимума энергозатрат.

4. Разработать алгоритм работы системы управления насосной станции для структурной перестройки системы.

5. Выполнить синтез и исследование систем управления электропривода насосного агрегата с традиционным и нейрорегулятором, работающим на распределенную магистраль.

6. Разработать методики вариативной оптимизации электроприводных систем насосных станций.

7. Выполнить оптимизацию режимов работы электроприводных систем насосных станций по критерию электропотребления.

Методы исследования. При проведении исследований и решении поставленных задач применяется комплексный подход, включающий классические методы анализа систем автоматического регулирования, теорию электрических машин, теорию электропривода, математическое описание режимов работы системы «Насосный агрегат – магистральный трубопровод», математическое моделирование в программной среде Matlab Simulink.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель электроприводной системы насосной станции на основе программной среды Matlab Simulink, позволяющая исследовать динамические и энергетические процессы, отличающаяся в том, что в ней учитываются различные варианты включения насосных агрегатов.

2. Разработан алгоритм работы системы управления насосной станции для структурной перестройки системы с целью повышения ее эффективности, надежности и качества выполнения технологии водоснабжения.

3. Структура системы управления насосного агрегата, состоящая из традиционных регуляторов для регулирования переменных электропривода и нейрорегулятора для регулирования давления насосного агрегата, работающего на распределённую магистраль.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математические модели электроприводных систем насосных станций, отражающие динамические и энергетические процессы с целью оценки показателей эффективности систем, содержащие различные варианты включения насосных агрегатов.

2. Алгоритм работы системы управления насосной станции для структурной перестройки системы.

3. Структура системы управления электропривода насосного агрегата магистрального трубопровода с учетом динамики движения жидкости.

4. Результаты оценки эффективности оптимизации режимов работы электроприводных систем насосных станций по критерию электропотребления.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Разработаны базы математических моделей и программы на основе прикладного пакета Matlab Simulink электроприводных систем насосных станций, которые дают возможность исследовать разные режимы работы, характерные для систем водоснабжения и оценить варианты систем управления насосных агрегатов для принятия технически обоснованного решения.

2. Выполнены расчетно-модельные исследования с целью выбора оптимальных вариантов электроприводных систем насосных станций.

Апробация результатов работы.

Основные результаты диссертационной работы были представлены в виде статей, докладов и обсуждались на конференциях:

– Научно - техническая конференция профессорско- преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 2016, 2017, 2018, 2019г.

– XXI международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2018), Россия, Санкт – Петербург, 23-25 мая 2018.

– Международная научно-практическая конференция «Развитие гидроэнергетики – развитие Таджикистан», Республика Таджикистан, Хатлонская область, район Кушониён, 20 декабря 2018.

Публикации по работе. По теме диссертации опубликовано 6 работ, в числе которых 3 статьи опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 2 работы в материалах международных научно – технических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 99 наименований. Общий объем диссертации 136 страниц текста, включая 46 рисунков и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, представлена ее научная новизна и практическая значимость, отражены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор методов регулирования и управления насосными станциями (НС). Среди методов регулирования, наиболее экономичным и перспективным является частотное регулирование, эффективность которого проявляется при широком диапазоне регулирования скорости и подач насосных агрегатов (НА). Проведен обзор типовых структурных построений электроприводных систем НС. Для многоагрегатных НС с параллельным включением НА применяются следующие варианты построения электроприводных систем (ЭПС):

1. Управление группой электроприводов НА с использованием одного преобразователя частоты (ПЧ) и коммутационных устройств подключения электроприводов на питающую сеть.

2. Тоже, но с применением устройств плавного пуска (УПП). Применяют варианты с групповыми УПП и коммутационными устройствами подключения электроприводов и с индивидуальными УПП для каждого электропривода.

1. Применение двух, трех ПЧ, каждый из которых обеспечивает управление двумя, тремя группами НА. Внутри группы два электропривода подключаются по варианту 1 или 2.

2. Применение ПЧ для каждого электропривода НА.

Показано, что с точки зрения гидравлических потерь наиболее энергозатратным вариантом являются ЭПС с двумя параллельно работающими насосами, один из которых работает с

максимальной производительностью, а другой является регулируемым. При этом гидравлические потери резко возрастают с уменьшением частоты вращения рабочего колеса регулируемого насоса.

При параллельной работе групп НА возникает необходимость оптимального распределения подачи и нагрузок между насосными агрегатами. Выяснено, что в случаях параллельной работы НА, из которых только один является частотно-регулируемым, а дополнительные НА подключены к питающей сети, возникают трудности при распределении нагрузки между агрегатами и сложность реализации технологической задачи по автоматической стабилизации давления.

При управлении НА от индивидуальных ПЧ проблема решается путем выравнивания нагрузок НА. На рисунке1 показана функциональная схема одного из вариантов системы управления тремя взаимосвязанными НА, включающая в себя: блоки управления моментами (БУМ); регуляторы скорости (РС), давления (РД), соотношения моментов нагрузки приводов (РСМ); задатчики интенсивности (ЗИ) разгона и торможения электроприводов, электродвигатели (М) и насосы (Н). По информации поступающей в ПЛК о расходе, давлении в напорной магистрали, а также о потребляемой НА электроэнергии и мощности происходит автоматическая оптимизация процесса с коррекцией заданий на регулируемые переменные. Для регулирования переменных, в том числе и давления в НА возможно применение различных алгоритмов и видов регуляторов: традиционных ПИД-, ПИ-, И-регуляторов; модальных; нечетких; нейронных; комбинаций названных регуляторов. В большинстве практических случаев применяются традиционные регуляторы: ПИ - в электромагнитных контурах, П или ПИ - в контурах управления скоростью, И или ПИ - в контурах управления давлением.

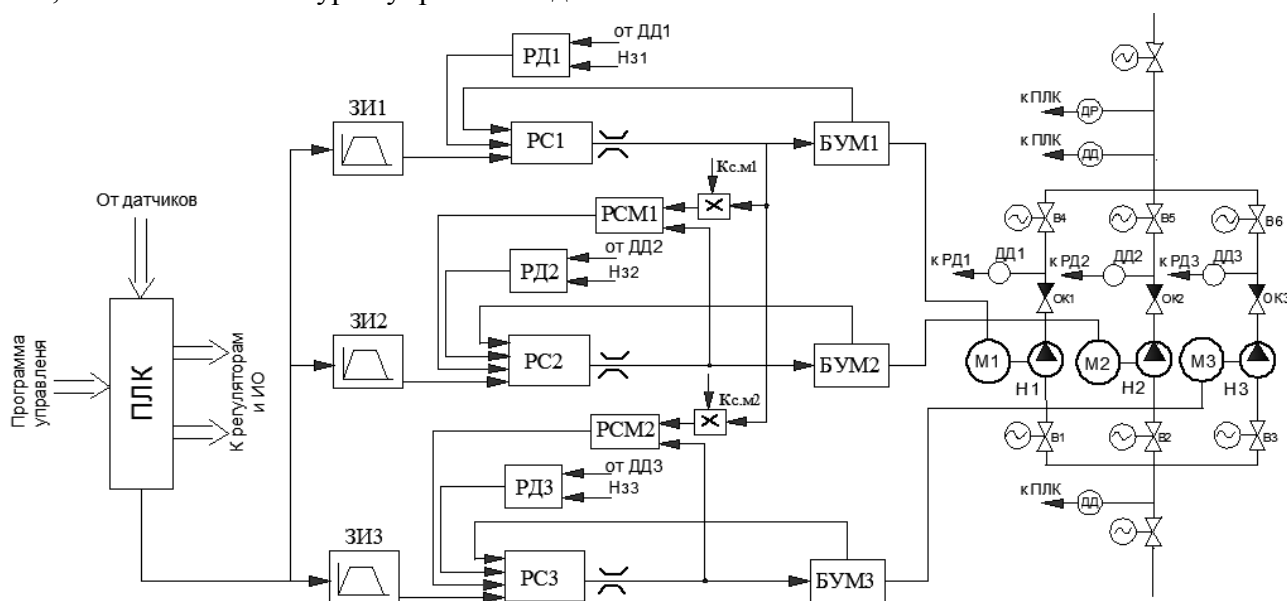


Рисунок 1– Функциональная схема системы управления тремя взаимосвязанными НА

Применение индивидуальных частотно-регулируемых электроприводов НА, повышение уровня информатизации и автоматизации НС дают возможность обеспечить качественное регулирование технологических переменных через регулирование механических и электромагнитных переменных ЭПС и обеспечить оптимальные режимы управления НА и НС.

Во второй главе представлены разработанные базы математических моделей компонентов НА и НС с целью оценки показателей эффективности систем, содержащие различные варианты включения НА, используемых при структурно-параметрическом синтезе и вариативной

оптимизации систем управления агрегатами и станциями. Компонентами НА являются: насосы, электродвигатели, преобразователи частоты, информационно-измерительные и управляющие средства. Компонентами НС являются: НА, технологические компоненты связи агрегатов с магистралью, компоненты управления переменными и соотношением переменных агрегатов НА. Разновидности компонентов представлены в виде модулей и блоков, охватывающих разные решения, адаптированные к НА и НС и представляющие собой вариативную базу для принятия оптимального решения при проектировании электроприводных систем НА и НС.

Базу математических моделей компонентов НА и НС целесообразно формировать в соответствии со следующей классификацией: 1. **База математических моделей компонентов НА:** Н1, Н2- Насосы; П1, П2, П3, П4- Частотно-регулируемые электроприводы; Э1, Э2, Э3, Э4, Э5 – Модели энергетических процессов; И, Р1, Р2 - Информационно-измерительные и управляющие средства; 2. **База математических моделей компонентов НС:** СМ1, СМ2 - Компоненты связи агрегатов с магистралью; СП1, СП2- Компоненты управления переменными и соотношением переменных агрегатов НА.

Насосы - (модули Н1, Н2). При описании динамических процессов движения жидкости в гидравлической части насоса рассматривают ее как несжимаемое тело плотностью ρ занимающую объем в некотором фиктивном трубопроводе с постоянным сечением s и длиной L . В этом случае увеличение или снижение подачи будет характеризоваться увеличением или уменьшением скорости движения жидкости под действием сил, определяемых действующими давлениями и гидравлическим сопротивлением гидравлической части насосного агрегата.

$$\frac{dQ_i}{dt} = \frac{S}{\rho L} \left[p_1 + p_0 - p_c - (R_{\Sigma} Q_i^2) \right], \quad (1)$$

где p_1 - давление во всасывающем трубопроводе насоса, $R_{\Sigma} = R_H + R_{Тр} + R_3$ - суммарное гидравлическое сопротивление насоса с частью напорного трубопровода и задвижки при открытом состоянии, $Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2$ - суммарная подача в выходном коллекторе, равная сумме подачи каждого НА.

По давлению нулевой подачи p_0 при номинальной скорости $\omega_{НОМ}$ находится давление нулевой подачи для любой скорости вращения вала:

$$p_{0i} = \frac{p_0}{\omega_{НОМ}^2} \omega_i^2, \text{ или } p_{0i} = k_{p0} \omega_i^2.$$

Характеристика сети (магистральной) при наличии противодействия определяется по формуле:

$$p_c = p_{\Pi} + R_c \cdot Q_c^2, \quad (2)$$

где p_c – текущее давление в сети; Q_c – текущий расход жидкости в сети; p_{Π} – противодействие, обусловленное разностью геодезических отметок наивысшей точки подачи жидкости и места установки насоса; R_c – гидравлическое сопротивление сети, определяемое по формуле:

$$R_c = \frac{p_{НОМ} - p_{\Pi}}{Q_{НОМ}^2}.$$

Аналогично составлено математическое описание и алгоритмическая структурная схема для насоса Н2 без учета динамических процессов жидкости.

Частотно-регулируемые электроприводы (модули П1 - П4). Рассмотрим основные динамические модели электроприводов переменного тока при частотном регулировании частоты вращения.

Система преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ–АД) с векторным управлением. Без учета магнитного насыщения динамическая модель электропривода с векторным управлением формируется при рассмотрении переменных в системе координат $d-q$ и ориентации оси d по вектору потокосцепления ротора. Используются уравнения для составляющих тока статора i_{1d} и i_{1q} , потокосцепления ротора ψ_2 и частоты роторной ЭДС ω_p :

$$i_{1d} = \frac{1/R_1}{\sigma T_1 p} (u_{1d} - R_1 i_{1d} + \omega_{0\text{эл}} \sigma T R_1 i_{1q} - k_2 p \psi_2);$$

$$i_{1q} = \frac{1/R_1}{\sigma T_1 p} (u_{1q} - R_1 i_{1q} + \omega_{0\text{эл}} \sigma T R_1 i_{1d} - k_2 \omega_{0\text{эл}} \psi_2);$$

$$\psi_2 = \frac{1}{T_2 p} (L_m i_{1d} - \psi_2); \quad \omega_p = \frac{k_2 R_2 i_{1q}}{\psi_2}.$$

Формула электромагнитного момента и равенство частот вращения: $M_d = \frac{3}{2} p_n k_2 \psi_2 i_{1q}$;

$\omega_{0\text{эл}} = \omega_{pн} + \omega_p$. Основное уравнение механики: $p\omega = \frac{M_d - M_n - M_c}{J}$, где M_n - момент нагрузки; M_c - момент сопротивления двигателя; J - момент инерции привода НА.

Также составлено математическое описание и алгоритмические структурные схемы для систем: ПЧ–АД с векторным управлением без учета перекрестных взаимосвязей контуров регулирования активных и реактивных токов, ПЧ – АД с векторным управлением при постоянстве ψ_2 и ПЧ–АД со скалярным управлением.

На основе математического описания компонентов и комбинации разных вариантов модулей в составе единого комплекса разработана имитационная модель с частотно-регулируемым электроприводом НА в программной среде Matlab Simulink (Рисунок 2).

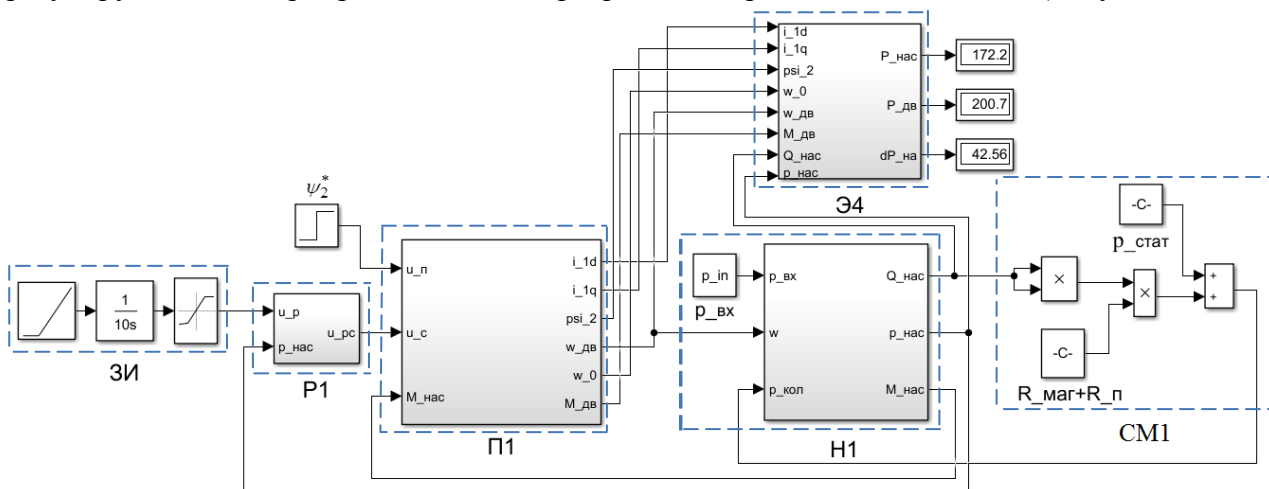


Рисунок 2 – Модель системы автоматического управления НА

Модель включает в себя: частотно-регулируемый электропривод (модуль П1), насос (модуль Н1), управляющая средства (модуль Р1), модель энергетических процессов (модуль Э4), связи переменных НС с расходом в магистрали (модуль СМ1) и задатчик интенсивности ЗИ

обеспечивающий плавный пуск и разгон. При параллельной работе НА данная модель наращивается аналогичными сепаратными блоками, имеющими гидравлические взаимосвязи с имеющимися блоками через выходной коллектор. Таким образом, из модулей компонентов приведенных в диссертационной работе можно формировать модели блоков и комплексов, отображающих динамические и энергетические процессы в системах управления НА и НС. Выбирая различные сочетания компонентов моделей можно находить модели с лучшими характеристиками и на основании этих моделей находить оптимальный вариант системы управления насосной станцией, отвечающей обобщенным и частным критериям оптимизации.

Третья глава посвящена анализу динамики параллельной работы насосных агрегатов (НА) при изменении состава технологического оборудования насосной станции (НС) и структурном изменении электроприводных систем (ЭПС). Разработан алгоритм работы системы управления насосной станцией для структурной перестройки системы. Для блоков условий переключения алгоритма управления, в работе предложен критерий включения и отключения дополнительных насосных агрегатов с целью повышения ее эффективности, надежности и качества выполнения технологии водоснабжения.

На рисунке 3, а, б показаны критерии включения и отключения дополнительного НА и которые поясняются следующим образом: дополнительный НА включается, если ведущий НА работает на частоте и соответственно скорости, близкой к максимальной и ПИ-регулятор ведущего НА не может поддерживать выходное давление $p_{\text{кол}}$ в установленной зоне вокруг заданного давления p_3 . Если ведущий и дополнительный НА работают ниже установленного предела минимальной частоты и соответственно скорости и выходное давление достигает верхнего предела зоны, то осуществляется отключение дополнительного НА. Ширина зоны определяется процентом от заданного давления ПИ-регулятора. Например, заданное давление равно 500 кПа, ширина зоны 5 %. Пока выходная давления $p_{\text{кол}}$ остается в диапазоне 475 ... 525 кПа, включение или отключение дополнительного НА не происходит.

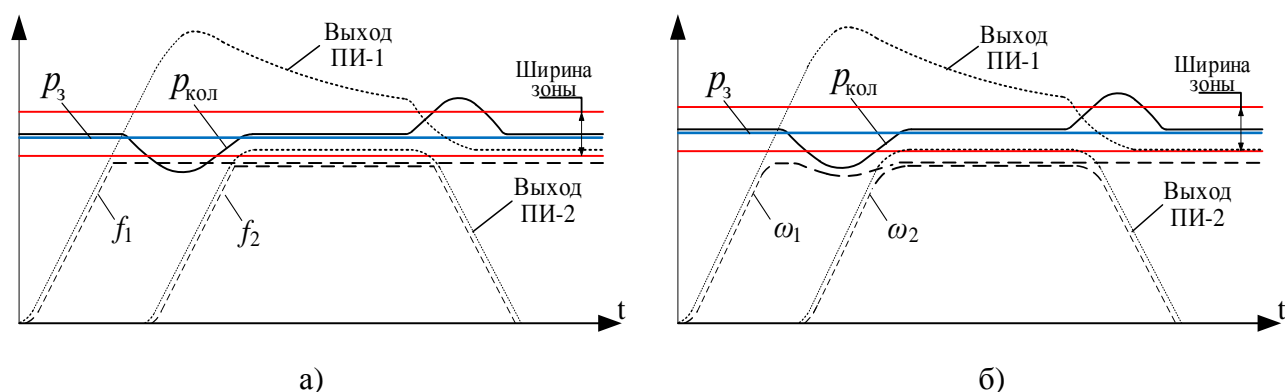


Рисунок 3– Критерий включения и отключения дополнительного НА: а) – по частоте и давлению; б) – по скорости и давлению

С целью оценки показателей энергоэффективности вариантов структур ЭПС НС проведен анализ параллельной работы НА при частотном регулировании и при смешанном регулировании параметров технологического процесса.

Одним из параметров, характеризующим энергетический показатель НА является потребляемая мощность. Значение потребляемой мощности $P_{\text{на}}$ группы НА определяется следующим образом:

$$P_{\text{на}} = \sum_{i=1}^m \frac{p_i Q_i}{\eta_{\text{на}}}; \quad (3)$$

$$\eta_{\text{на}} = \eta_{\text{иН}} \eta_{\text{иПЧ}}$$

где: $\eta_{\text{на}}$ - КПД НА, $\eta_{\text{иН}}$ - КПД насоса, $\eta_{\text{иПЧ}}$ - КПД преобразователя частоты, $\eta_{\text{иД}}$ - КПД асинхронного электродвигателя, m - количество работающих НА, Q_i - подача НА, p_i - давление НА.

На рисунке 4 показаны графики суммарной потребляемой мощности НА при разных заданных значениях давления для первого варианта с одним ПЧ и для второго варианта, в котором каждый НА имеет свой ПЧ.

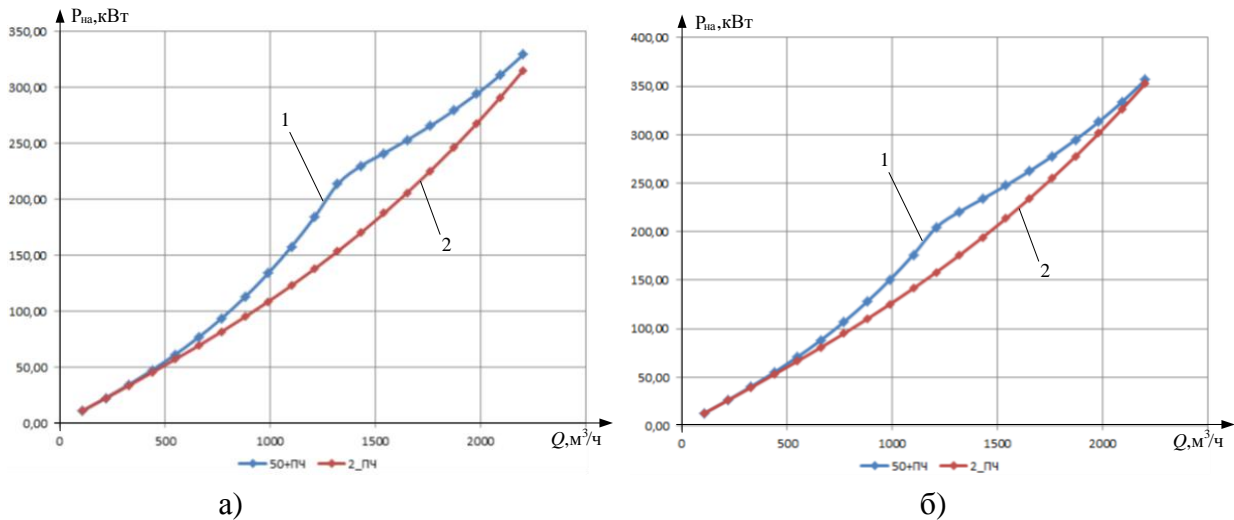


Рисунок 4 – Графики суммарной потребляемой мощности параллельно работающих НА: а) – при $p_i = 343$ кПа; б) – при $p_i = 392$ кПа. 1 – вариант системы с одним ПЧ, 2 – вариант системы с двумя ПЧ

Как видно из графиков (рисунок 5, а, б) в обоих вариантах наиболее энергозатратными являются установки с двумя параллельно работающими НА, один из которых работает с максимальной подачей, а другой с регулируемой подачей. Оснащение только одного агрегата регулируемым приводом не позволяет реализовать все требуемые режимы работы насосной станции, и только установка отдельных ЧРЭП способна обеспечить энергоэффективное управление НА во всем возможном диапазоне изменения расхода воды в магистральной сети.

Четвертая глава посвящена синтезу и исследованию электроприводных систем насосных станций классическим методом, проведен анализ устойчивости системы, построены переходные процессы и определены показатели качества полученной системой автоматического управления (САУ). В параграфе 4.3 диссертации исследуется НА с нейрорегулятором работающим на распределённую магистраль с целью повышения качества регулирования давления и сведению к минимуму аномальных явлений в виде гидравлических ударов.

Регулирование давления осуществляется трёхконтурной САУ, внешний контур обеспечивает поддержание давления $P_{\text{КОЛ}}$ в выходном коллекторе станций в условиях случайных возмущений (изменение расхода воды в магистральной сети), внутренние контура – управление скоростью вращения и тока электропривода. При синтезе внешнего контура давления структурная схема, которой показана на рисунке 5, замкнутый контур скорости электропривода заменяется эквивалентным апериодическим звеном первого порядка:

$$W_{\omega i}(p) = \frac{\omega}{u_{рд}} = \frac{1/k_{дс}}{2T_{\mu\omega}p + 1},$$

где $k_{дс} = u_{з\omega} / \omega_{дв}$ - коэффициент датчика скорости.

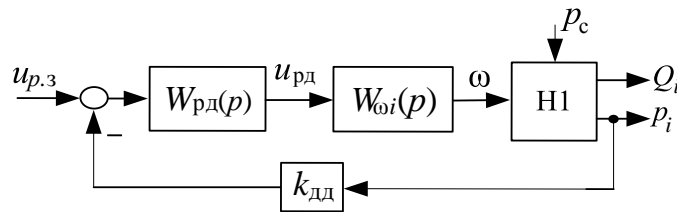


Рисунок 5– Контур регулирования давления.

В контуре регулирования давления объектом управления является насос Н1, ее структурная схема преобразована в виде передаточной функций для синтеза и настройки регулятора давления $W_{рд}$:

$$W_{н}(p) = \frac{\Delta Q_i}{\Delta p_{н}} = \frac{k_{гид}}{T_{гид}p + 1}, \quad (4)$$

$$\text{где } k_{гид} = \frac{1}{(R_{н} + R_{тр} + R_{маг} + R_{п}) \cdot 2Q_i^0}; T_{гид} = \frac{\rho \cdot L}{S \cdot (R_{н} + R_{тр} + R_{маг} + R_{п}) \cdot 2Q_i^0};$$

$k_{p\omega} = p_{н0} / 2 \cdot \omega_{ном}$ - коэффициент передачи насоса;

$k_{Qp} = (R_{маг} + R_{п}) \cdot 2Q_i^0$ - коэффициент динамической составляющей сопротивления магистрали.

При настройке контура давления на оптимум по модулю большая постоянная времени $T_{гид}$ компенсируется, а малая $aT_{\mu\omega}$ остается некомпенсированной. Полагая некомпенсированную постоянную времени контура давления $T_{\mu p} = 2T_{\mu\omega}$ получим передаточную функцию регулятора давления:

$$W_{рд}(p) = \frac{k_{дс} \cdot T_{гид}}{2T_{\mu p} k_{p\omega} k_{гид} k_{дд} k_{Qp}} + \frac{k_{дс}}{2T_{\mu p} p k_{p\omega} k_{гид} k_{дд} k_{Qp}} = \beta_{рд} + \frac{1}{T_{иp}}. \quad (5)$$

На рисунке 6 представлены графики переходных процессов реакции системы управления на задающее и ступенчатое воздействие. Полученные реакции системы $p(t)$, $Q(t)$ и $n(t)$ на ступенчатое 50% уменьшение гидравлического сопротивления магистральной сети показали, что исследуемая САУ обеспечивает режим стабилизации давления.

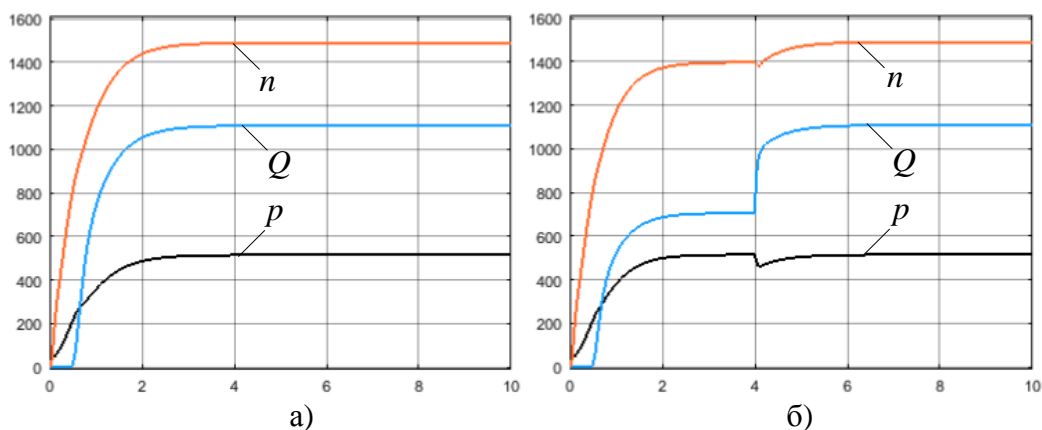


Рисунок 6 – Переходные процессы в системе управления: а) -при изменении задание; б) - при изменении возмущение.

Для повышения качества управления давлением НА с учетом динамики магистрального трубопровода используется нейрорегулятор с предсказанием. На рисунке 7 показана модель нейросетевой системы управления НА, разработанная в среде Matlab Simulink. Модель включает в себя блок регулятора NN Predictive Controller, блок управляемого объекта (электропривод и насос), а также блок ступенчатого сигнала и блок построения графиков.

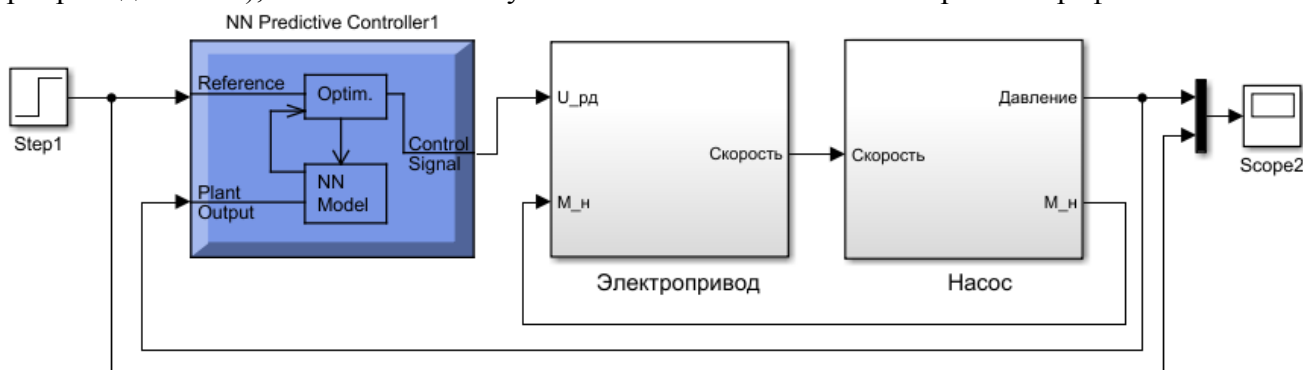


Рисунок 7– Модель нейросетевой системы управления НА.

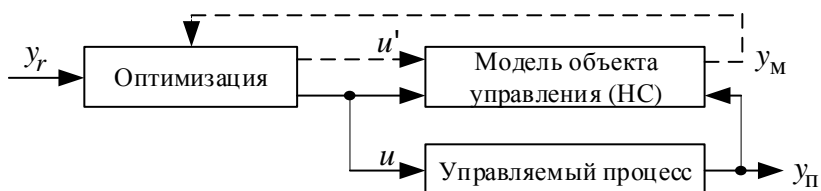


Рисунок 8 – Процесс управления с предсказанием

Нейрорегулятор (рисунок 8) состоит из нейросетевой модели управляемого процесса, имеющий два слоя нейронов с использованием линия задержки и блока оптимизации. Блок оптимизации определяет значения пробных управляющих сигналов u' , которые минимизируют критерий качества управления, а соответствующий управляющий сигнал u управляет процессом.

Процесс предсказания в нейрорегуляторе использует численную оптимизацию для того, чтобы вычислить управляющий сигнал, который минимизирует следующий критерий качества управления:

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} (y_r(t+j) - y_m(t+j))^2 + \rho \sum_{j=1}^{N_u} (u'(t+j-1) - u'(t+j-2))^2, \quad (7)$$

где константы N_1, N_2 и N_u задают пределы, внутри которых вычисляются ошибка слежения и величина управляющего сигнала. Переменная u' описывает пробный управляющий сигнал, y_r – желаемую реакцию, y_m – истинную реакцию модели объекта управления. Величина ρ – весовой коэффициент, характеризующий вклад, который вносит управление в критерий качества.

Для установления оптимальных параметров нейрорегулятора с предсказанием были рассмотрены несколько вариантов синтеза, определены параметры, влияющие на работу нейрорегулятора.

Таким образом, варьируя параметры настройки регулятора (функции обучения нейронной сети, размера слоя и т.д.), можно подобрать наиболее оптимальные варианты параметров для системы управления, что приведет к наиболее качественному управлению НА. Графики пере-

ходных процессов системы управления по давлению насосного агрегата при быстрых изменениях возмущающего воздействия представлены на рисунке 9.

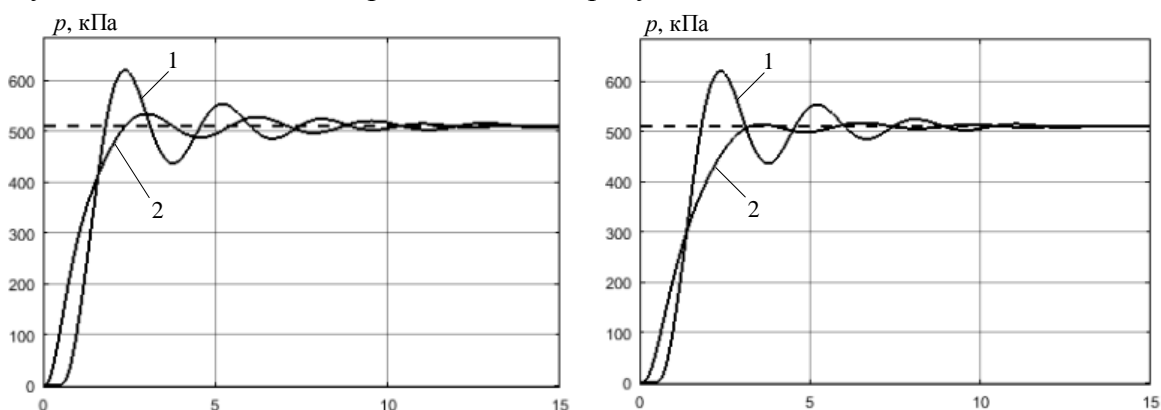


Рисунок 9 – Графики переходных процессов: 1 – с ПИ-регулятором; 2 - с нейрорегулятором

Из результатов исследования можно сделать вывод, что для достижения требуемого качества управления НАс учетом распределенной магистрали применение нейрорегулятора является целесообразным.

В пятой главе приведены результаты экспериментального исследования. Рассмотрено прикладное решение конкретной задачи исследования и оптимизации динамических процессов и повышения эффективности ЭПС насосных станций для технологии водоснабжения на основе разработанного компьютерного макета выполненного с применением современного инструментального средства Matlab Simulink.

Для исследования рассматриваются следующие варианты электроприводных систем НС с параллельной работой:

ЭПС1. Управление группой электроприводов НАс использованием одного преобразователя частоты (ПЧ) и коммутационных устройств подключения электроприводов на питающую сеть.

ЭПС2. Применение ПЧ для каждого электропривода НА.

Для расчета, моделирования и исследования двух вариантов выполнения ЭПС рассмотрен комплекс, включающий в себе два параллельно работающих НА. Состав комплекса: насосы ($Q = 1100 \text{ м}^3/\text{ч}$, $H = 52,5 \text{ м}$, $\eta_{\text{н}} = 0,86$), электродвигатели ($P_{\text{ном}} = 250 \text{ кВт}$, $n_{\text{ном}} = 1480 \text{ мин}^{-1}$, $\eta_{\text{ном}} = 0,945$), преобразователи частоты ($P_{\text{ном}} = 250 \text{ кВт}$, $I_{\text{ном}} = 443 \text{ А}$, КПД = 98%). Для рассматриваемых вариантов ЭПС выполнены математические описания, расчеты и модельные исследования в среде Matlab Simulink с оценками их динамической и энергетической эффективности. Вариант энергодинамической структурной схемы ЭПС2 для двух параллельно работающих НА показан на рисунке 10. Система включает в себя регуляторы скорости РС, давления РД, соотношения моментов нагрузки приводов РСМ, замкнутые контуры регулирования токов, задатчики интенсивности ЗИ для разгона и торможения электроприводов. Процесс включения и отключения дополнительного НА выполняется блоком переключения структур БПС.

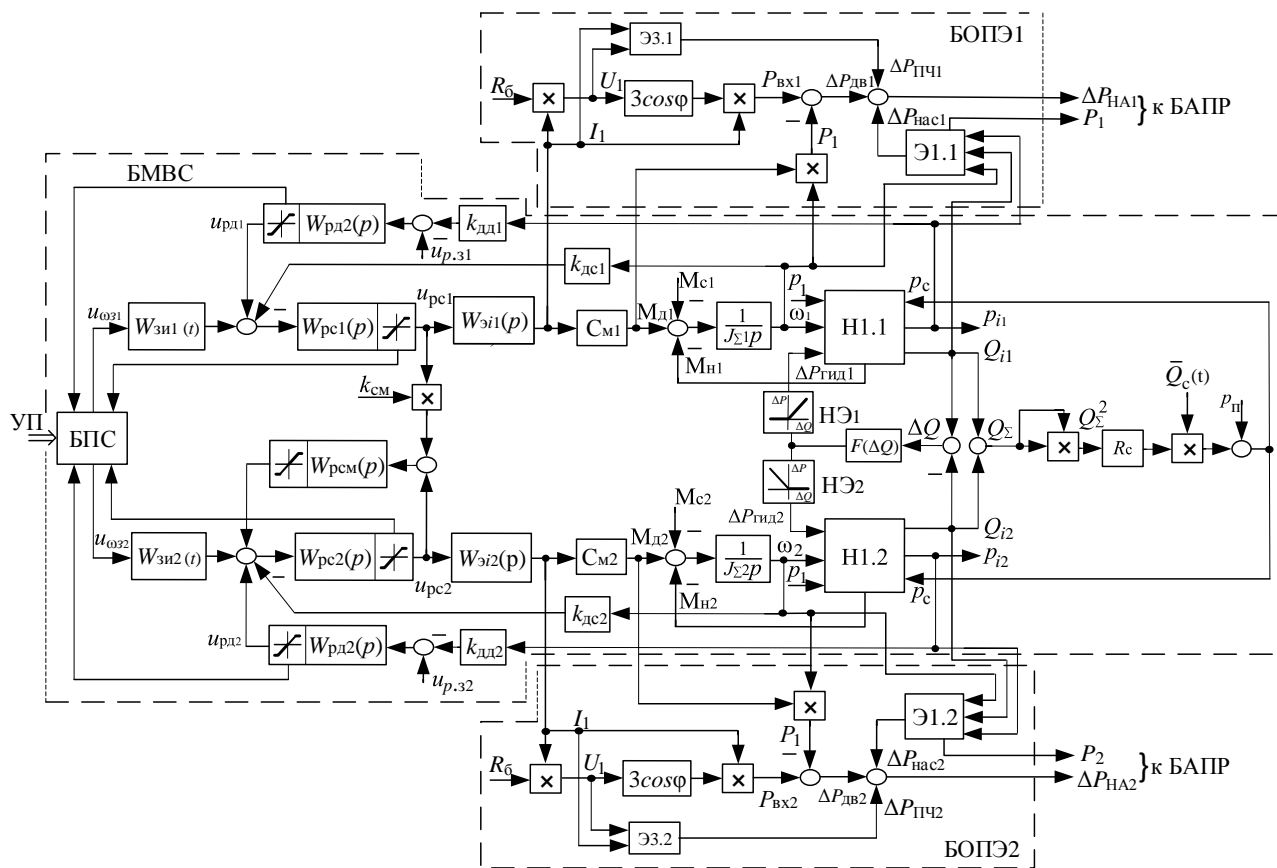


Рисунок 10– Алгоритмическая структурная схема системы управления НС с двумя параллельно работающими НА

На рисунке 11 показаны графики переходных процессов при работе двух НА с одним ПЧ и коммутацией (рисунок 11, а) и с индивидуальными ПЧ (рисунок 11, б). На графиках введены следующие обозначения: Q_1, Q_2, n_1, n_2 – подача и скорость первого и второго НА, $p_{кол}$ – давление выходного коллектора; $R_M + R_{П}$ - гидравлическое сопротивление магистральной сети.

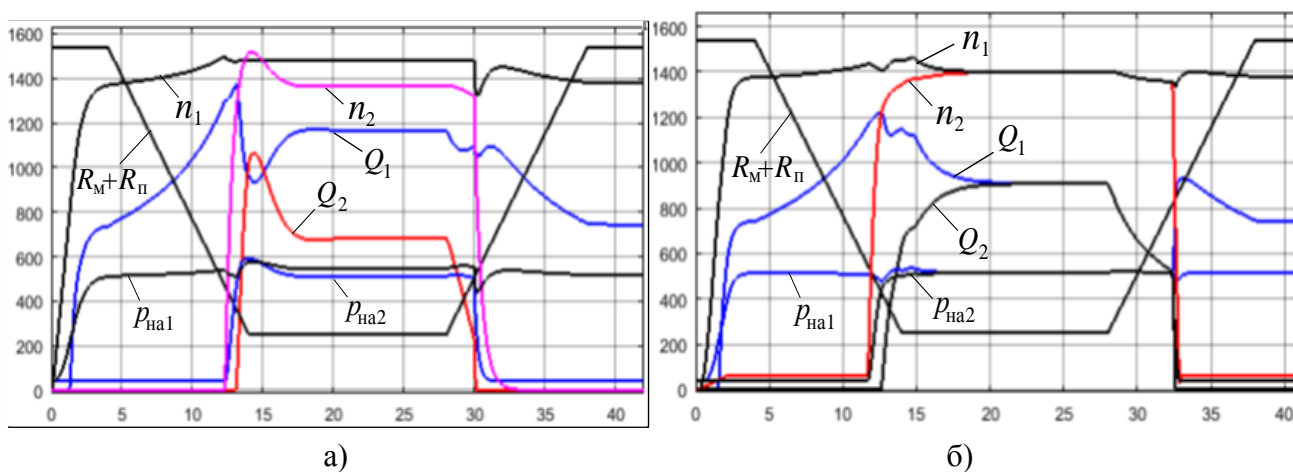


Рисунок 11– Графики переходных процессов двух параллельно работающих НА: а) – с одним ПЧи коммутацией; б) - с двумя ПЧ

Ниже приведена таблица 1 с оценками относительных показателей эффективности систем управления НА. При расчете относительных показателей эффективности базовыми оценками принимались оценки показателей ЭПС1.

Таблица 1. Оценка показателей эффективности вариантов систем

Относительные показатели эффективности ЭПС		ЭПС1	ЭПС2
При разработке и вводе в эксплуатацию	Цена проекта	1	1,4
	Цена электрооборудования	1	1,46
	Цена монтажных и пусконаладочных работ	1	1,1
	Общая цена разработки и ввода в эксплуатацию	1	1,9
При эксплуатации систем	Срок окупаемости	1	1,73
	Удельный расход электроэнергии (кВт*ч /м ³)	1	0,84
	Средневзвешенный КПД	1	1,1
	Средневзвешенный годовой расход электроэнергии при сроке эксплуатации 7 лет	1	0,83
	Тоже при сроке эксплуатации 10 лет	1	0,81
Итог	Чистый доход	1	1,12

Таким образом, на основании методики вариативной оптимизации и выполненных расчетно-модельных исследований вариантов ЭПС НА получены оценки относительных показателей их эффективности на основных этапах жизненного цикла. Большой срок окупаемости варианта ЭПС2, покрывается меньшим удельным расходом электроэнергии и при оценках показателей эффективности на сроке эксплуатации 7 лет оба варианта ЭПС дают примерно одинаковые результаты. При большем сроке эксплуатации, например, 10 лет ЭПС2 будет иметь более высокие показатели. Можно уверенно утверждать, что при использовании варианта ЭПС2 аварийные разрывы трубопроводов из-за гидравлических ударов могут быть сведены к минимуму, а также исключены гидравлические потери возникающих из-за различий сопротивления в трубопроводах и запорной арматуре между входным и выходным коллектором и характеристик агрегатов. И это ещё один весомый аргумент за применение систем с использованием преобразователей частоты для каждого электропривода насосных агрегатов при их параллельной работе.

Заключение

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача повышения эффективности работы электроприводных систем насосных станций. В результате выполнения работы были получены новые научные результаты:

1. Разработаны математические модели насосных агрегатов, учитывающие динамические и энергетические процессы в ЭПС НС и различные варианты их подключения и позволяющие оценить электрические, механические и гидравлические переменные.

2. С целью оценки показателей эффективности работы НА проведен анализ параллельной работы ЭПС НС. Выявлено, что применение ЧРЭП для каждого НА способно обеспечить энергоэффективное управление во всем возможном диапазоне изменения расхода воды в магистральной сети.

3. Разработан алгоритм работы системы управления ЭПС насосной станции для структурной перестройки системы.

4. Проведено исследование динамических процессов в ЭПС НА при регулировании давления с учетом динамики трубопровода. Показано, что нейросетевые методы управления по-

зволяют обеспечивать регулирование давления без колебательных процессов в распределенной магистрали.

5. Выполнено расчетно-модельное исследование на основе разработанных компьютерных моделей. Компьютерное моделирование позволило провести исследования, позволяющие оценить достоверность разработанных моделей и определить оптимальный вариант ЭПС НС.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК.

1. Белов М. П., Кахоров Р. А., Новиков В. А., Прокопов А. А., Развитие энергосберегающих электроприводных систем и способов повышение их эффективности в технологиях// Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» №5/2016. – С. 78-89.

2. Прокопов А. А., Кахоров Р. А., Новиков В. А., Белов М. П., Математические модели электроприводных систем насосных агрегатов и станций // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» №10/2017. – С. 44-54

3. Прокопов А. А., Кахоров Р. А., Новиков В. А., Беляев Т.Е., Вариативная оптимизация электроприводных систем насосных агрегатов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» №6/2018. – С. 33-42.

Другие научные публикации по теме диссертации.

4. Кахоров Р. А., Новиков В. А., Прокопов А. А., Белов А.М. Вариативная оптимизация электроприводных систем насосных станций// SCM Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям, СПб, 23-25 Мая, 2018. С. 477-480

5. Кахоров Р. А., Белов М.П., Прокопов А. А. Анализ энергетической эффективности системы управления с параллельной работой насосных агрегатов// Международная научно-практическая конференция «Развитие гидроэнергетики – развитие Таджикистан», Республика Таджикистан, Хатлонская область, район Кушониён, 20 декабря 2018. С.51

Авторские свидетельства

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018664170. Российская федерация. Программа синтеза классических регуляторов для системы управления электроприводами насосных агрегатов / Р.А. Кахоров, М.П. Белов; правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)». -№2018661332; заяв. 17.10.2018; зарегистр. 12.11.2018

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается в следующем:

[2, 6]-разработка программного обеспечения и компьютерных моделей, проведение вычислительных экспериментов, общий анализ;

[3, 5]-проектирование технических решений, обработка результатов;

[1, 3]-разработка основных теоретических положений, выполнение расчетов.

Подписано в печать 24. 04. 2019. Формат 60×84 1/16.
Бумага офестная. Печать цифравя. Печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ 1.

Отпечатано с готового аргинал-макета в
типографии Издательства СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5