

На правах рукописи



Носиков Николай Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ОСНОВНОГО  
НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ  
МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2026

Работа выполнена на кафедре «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Макаричев Юрий Александрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Ганджа Сергей Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика», г. Челябинск

**Доманов Виктор Иванович**, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (УлГТУ), заведующий кафедрой "Электропривод и автоматизация промышленных установок"

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа.

Защита диссертации состоится «06» октября 2026 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, ауд. №200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета (ул. Первомайская, 18), и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» <http://24237706.samgtu.ru/>

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.06; факс:(846)278-44-00, e-mail: [a-ezhova@yandex.ru](mailto:a-ezhova@yandex.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.377.06

кандидат технических наук, доцент



Е.В. Стрижакова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Трубопроводный транспорт является одним из наиболее эффективных способов доставки нефти и нефтепродуктов потребителям. Этим способом по разным оценкам транспортируется от 91 до 99% добываемой нефти. Себестоимость перекачки нефти по трубопроводам в 3 раза ниже, чем по железной дороге и в 1,5-2 раза ниже, чем водным транспортом. Затраты на электроэнергию, потребляемую электротехническими комплексами насосных станций, составляют свыше 60% от всех эксплуатационных затрат. Поэтому вопросы повышения энергоэффективности основного электромеханического оборудования является актуальной задачей.

Суммарная установленная мощность электроприводов только одной насосной станции может составлять десятки мегаватт, что определяет годовое потребление электроэнергии в сотни миллионов кВт час. Однако только часть этой энергии является полезно используемой. Анализ работы магистральных нефтепроводов показывает, что основными причинами, приводящими к перерасходу электроэнергии, является нерациональный выбор режимов работы насосных агрегатов, использование устаревшего малоэффективного оборудования и нерегулируемых электроприводов.

Поэтому анализ и исследование энергетических аспектов режимов перекачки нефти на существующем и перспективном оборудовании, обладающем высокими удельными показателями энергоэффективности и технологичности, является весьма актуальной задачей для научных и практических целей.

### **Степень разработанности темы.**

Совершенствованию технологических режимов электроприводов агрегатов насосных станций посвящены научные исследования российских и зарубежных ученых. Большая часть этих работ описывает теорию и практическое применение нерегулируемых и регулируемых электромеханических систем транспорта нефти. Анализ и сравнению различных способов управления производительностью и напором комплекса насосных агрегатов посвятили свои работы отечественные и зарубежные ученые Беккер, Л.М., Богданов Р.М., Вязунов Е.В., Гольянов А.И., Гумеров А.Г., Лосенков А.С., Ревель-Муроз П.А., Шабанов В.А., Шалай В.В., Paulini R.M., Wheeler A.R., и др. Большой вклад в развитие теории перекачки нефти и энергоэффективности этого процесса внесли Васильев Г.Г., Дунаев В.Ф., Зайцев Л.А., Колпаков Л.Г., Коршак А.А., Краус Ю.А., Лурьев М.В., Нечваль А.М., Тугунов П.И., Шипило В.П.

Тем не менее, по данной тематике остается целый ряд недостаточно изученных аспектов, которые до сих пор остаются вне поля зрения как отечественных, так и зарубежных исследователей. Прежде всего, нет детально разработанной методики формирования математической модели энергопотребления основного технологического оборудования насосных станций, основанной на актуальных статистических методах анализа. Далее, разработка новых и совершенствование действующих режимов транспортировки нефти осуществляются без четких методик и алгоритмов оптимизации рабочих режимов участков магистральных нефтепроводов исходя из минимизации показателя удельного расхода электроэнергии. Наконец, не сформированы инструменты структурного и параметрического синтеза комплекса

насосного электрооборудования НПС совместно с оптимальным управлением гибридными системами регулируемого и нерегулируемого электропривода, направленного на снижение общего уровня энергопотребления.

В связи с этим повышение энергоэффективности электротехнического комплекса насосного оборудования магистрального нефтепровода остается актуальной научно-технической задачей.

**Объект исследования** – электротехнический комплекс основного нефтеперекачивающего оборудования участка магистрального нефтепровода.

**Предмет исследования** – структура электропотребления нефтеперекачивающей станции, методика компоновки комплекса насосного электрооборудования и оптимизация алгоритмов управления режимами его работы.

**Цель работы** – повышение эффективности использования электроэнергии при транспортировке нефти в системе магистрального нефтепровода.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие **научно-практические задачи**:

1. Выполнить исследование структуры энергопотребления при перекачке нефти по трубопроводам и определить направления повышения энергоэффективности на основе разработанной функциональной модели наиболее критических потребителей.

2. Определить основные факторы, влияющие на потребление электроэнергии, разработать алгоритм и методику оптимизации режимов работы участка магистрального нефтепровода по критерию минимума удельного потребления электроэнергии.

3. Выполнить структурный и параметрический синтез комплекса насосного электрооборудования нефтеперекачивающей станции, разработать методику оптимального управления для комбинированной системы регулируемых и нерегулируемых электроприводов с целью снижения ими потребления электроэнергии.

4. Оценить эффективность предложенных методов снижения удельного электропотребления на примере модернизации оборудования и оптимизации режимов перекачки типовой нефтеперекачивающей станции.

5. Апробация и использование полученных результатов в производственной практике.

**Научная новизна работы:**

1. Разработана на основе обработки статистических данных математическая модель энергопотребления нефтеперекачивающей станции в функции объема перекачиваемой нефти и перепада давления в МНП, отличающаяся от используемых в настоящее время на практике методик расчета более точным определением суммарного количества потребляемой электроэнергии и ее удельного значения на единицу транспортируемой продукции.

2. Предложена методика оптимизации режима работы нефтепровода по критерию минимальных затрат электроэнергии на заданный период, отличающаяся от известных возможностью минимизации для планового объема перекачки количества необходимых переключений.

3. Разработан алгоритм оптимизации параметров комбинированной схемы управления с регулируемыми и нерегулируемыми приводами, отличающийся возможностью определения минимума целевой функции - суммарной потребляемой насосным оборудованием станции мощности, для заданной производительности.

## **Теоретическая значимость**

Полученные научные результаты расширяют теоретическую базу в области эксплуатации электротехнических комплексов основного электромеханического оборудования насосных станций магистральных нефтепроводов. Новые аналитические зависимости уточняют и совершенствуют методы расчета режимов энергоэффективности этого оборудования. Разработанные методики оптимизации режимов работы находящегося в эксплуатации оборудования, и оборудования, планируемого к введению, по критерию минимума расхода электроэнергии на единицу перекачиваемого продукта позволяют добиться снижения эксплуатационных расходов на перекачку нефти.

## **Практическая значимость:**

1. Методику расчета оптимизированных режимов перекачки рекомендуется использовать при составлении месячных планов работы магистрального нефтепровода и прогнозировании величины потребления электроэнергии для выполнения этих планов.

2. Предложенные мероприятия по модернизации основного электромеханического оборудования нефтеперекачивающей станции «Б. Черниговка» магистрального нефтепровода «Узень-Гурьев-Куйбышев» и режимов его эксплуатации обеспечивают плановую экономию электроэнергии не менее 4,4 млн. кВт\*ч. в год, что в денежном выражении, в ценах 2025 г. составляет 18,5 млн. рублей.

3. Математическая модель представляющая зависимость электропотребления от объема перекачиваемой нефти и перепада давления в МНП используется в учебном процессе электротехнического факультета ФГБОУ ВО «СамГТУ» в курсах «Электропривод трубопроводного транспорта» и «Эксплуатация нефтепромыслового электрооборудования».

**Результаты диссертации внедрены** в виде алгоритма и методики оптимизации комплекса электротехнического оборудования нефтеперекачивающих станций АО «Транснефть-Приволга» и ООО «РИТЭК» для комбинированных схем управления насосными агрегатами с частотным регулированием скорости электродвигателей. Данные мероприятия позволили сократить затраты на модернизацию основного механоэнергетического оборудования. Разработанный алгоритм применялся для проведения технико-экономических расчетов в процессе модернизации и реконструкционных работ на объектах магистральных нефтепроводов.

## **Методы исследований.**

При решении поставленных задач использовались теория электромеханического преобразования энергии, электрических цепей с сосредоточенными параметрами, уравнения гидродинамики и теории подобия. Для решения задач математического моделирования применялись методы матричного анализа и математической статистики. Задачи минимизации удельного электропотребления решались методами параметрической оптимизации.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Математическая модель, полученная на основе обработки статистических данных по эксплуатации нефтепровода, представляющая зависимость электропотребления от объема перекачиваемой нефти и перепада давления в МНП, позволяющая более точно определить суммарное количество потребляемой электроэнергии и ее удельное значение на единицу транспортируемой продукции.

2. Методика оптимизации режима работы нефтепровода по критерию минимальных затрат электроэнергии на заданный период, предназначенная для расчета графика перекачки планового объема нефти и минимизации количества необходимых переключений.

3. Алгоритм оптимизации параметров комбинированной схемы управления, включающей регулируемые и нерегулируемые приводы, позволяющий определить экстремум (минимум) целевой функции – суммарной потребляемой мощности насосным оборудованием станции, для заданной производительности.

4. Рекомендации по модернизации основного электромеханического оборудования нефтеперекачивающей станции «Б. Черниговка» магистрального нефтепровода «Узень-Гурьев-Куйбышев» и режимов его эксплуатации обеспечивающие плановую экономию электроэнергии.

**Научная квалификационная работа на соискание степени кандидата технических наук** выполнена в соответствии с паспортом специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы» и соответствует направлениям исследований: п.2. «Разработка научных основ ... эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов»; п.3. «... структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления».

**Достоверность** обеспечена корректным использованием математического аппарата, соответствием результатов теоретического анализа и вычислительных экспериментов, обсуждением положений и выводов работы со специалистами в ходе конференций и научных мероприятий, подтверждается удовлетворительной сходимостью теоретических положений и данных, полученных на объектах эксплуатации исследуемых электротехнических комплексов.

#### **Апробация работы.**

Основные положения и результаты исследования диссертационной работы докладывались и обсуждались на XXII Международной научно-практической конференции «Цифровое общество: Научные инициативы и новые вызовы». Москва, LXXVI Международной научно-практической конференции «EurasiaScience». Москва, Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Электрические системы и сети». Самара. 2026, а также на научных семинарах кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» ФГБОУ ВО «СамГТУ»

**По материалам диссертации опубликованы** 8 работ, из них: 8 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Общий объем опубликованных работ 4,185 п.л. с авторским вкладом 2,395 п.л.

#### **Личный вклад автора в диссертационное исследование.**

Постановка задач осуществлялась совместно с научным руководителем. Теоретические и практические исследования автором выполнены самостоятельно.

Автором разработаны: математическая модель потребления электроэнергии насосным оборудованием НПС, методика оптимизации режима работы нефтепровода по критерию минимальных затрат электроэнергии на заданный период, алгоритм оптимизации параметров комбинированной схемы управления, включающей регулируемые и нерегулируемые приводы, позволяющий определить экстремум

(минимум) целевой функции – суммарной потребляемой мощности насосным оборудованием станции, для заданной производительности.

### **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и 7 приложений, библиографического списка. Основная часть изложена на 125 страницах, содержит 37 рисунков, 10 таблиц. Библиографический список содержит 114 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** был проведен анализ актуальности проведенных исследований, определена проблема эффективности использования энергии при транспортировке нефти по системе магистральных нефтепроводов. Сформулированы ключевые критерии к электрооборудованию и его составляющим элементам для достижения заданной цели. Проведенный анализ литературных источников показал, что в настоящее время ряд вопросов в проблеме повышения энергоэффективности транспорта нефти по магистральным нефтепроводам остаются открытыми:

- отсутствует функциональная математическая модель потребления электроэнергии электротехническим комплексом НПС, базирующаяся на физических основах процесса перекачки нефти, которая могла бы быть базисом для оптимизации режимов перекачки;

- не решена задача оптимизации режимов работы участка магистрального нефтепровода по минимизации потребления электроэнергии при заданных планах и графиках перекачки нефти;

- нет научно обоснованной методики структурного и параметрического синтеза электротехнического комплекса типовой НПС, учитывающей, в частности, возможность комбинированного использования регулируемых и нерегулируемых электроприводов насосных агрегатов. Проблема совершенствования алгоритмов совместного управления подобными системами недостаточно полно раскрыта в анализируемых материалах.

Исходя из этого, была определена основная цель исследования и поставлены ключевые задачи, которые изложены во Введении.

**Во второй главе** диссертации представлена разработанная автором математическая модель потребления электроэнергии на НПС.

Разработанная математическая модель, описывающая зависимости электропотребления станцией от объемов перекачиваемой нефти, значения входного и выходного напора в трубопроводе, физических свойств перекачиваемого продукта, а также от режима работы вспомогательных комплексов электрооборудования, позволяет рассчитывать как суммарное потребление электроэнергии НПС, так и ее удельные, на единицу продукции, значения.

Из-за сложности и неоднозначности соотношения величины потребляемой электроэнергии и множества факторов, которые меняются не только от технологических параметров, но и даже от геополитической обстановки, получить прямую детермини-

рованную зависимость не представляется возможным. Поэтому разработанная математическая модель построена на основе регрессионного анализа статистического материала по одной из типовых НПС АО «Транснефть-Приволга». Причем, для общности материала выбраны два характерных периода работы трубопровода: первый, когда НПС работала практически с полной загрузкой (2004 - 2006гг), второй - когда загрузка станции была снижена более чем на 30% (2021 - 2023гг).

Для проведения регрессионного анализа и построения математической модели были обработаны данные по общему потреблению электроэнергии (на примере НПС «Б. Черниговка» Самарского РНУ АО «Транснефть-Приволга») по основным статьям технического учета на основании архивных данных автоматизированной системы учета электроэнергии. Как следует из приведенных данных, наибольший удельный вес имеет потребление электроэнергии основным оборудованием на транспорт нефти. В 2004 г. на транспорт нефти приходилось 97,03% от общего потребления, в 2005 г. - 97,16%, в 2006 г. - 97,17%, 2021 г. – 94,12%, в 2022 г. - 92,57%, в 2023 г. - 94,16%. Удельный вес этой составляющей остается достаточно стабильным – изменение составляет немногим более 3% и зависит в большей мере от загрузки магистрального нефтепровода.

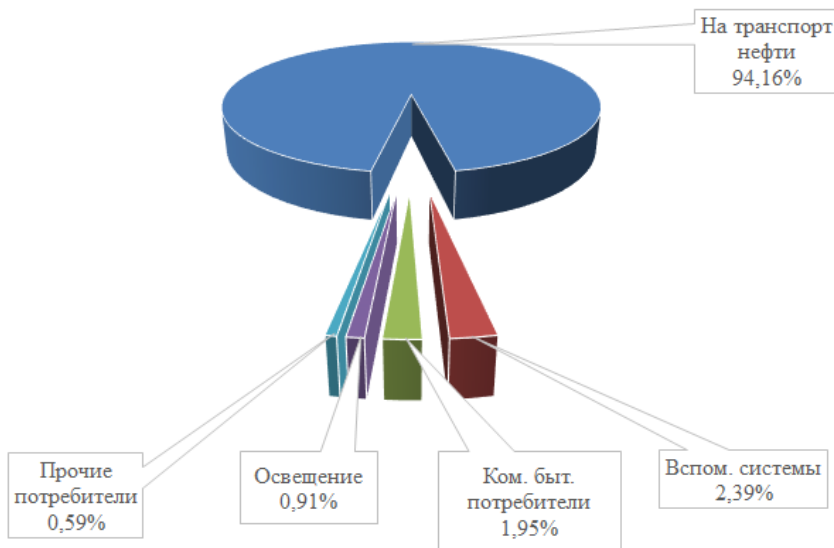


Рисунок 1 – Структура потребления электроэнергии типовой НПС в 2023 г

Затраты электроэнергии на транспорт нефти определяются количеством и временем работы подпорных насосных агрегатов (ПНА) и магистральных насосных агрегатов (МНА), а также степенью загрузки электродвигателей, которая зависит от производительности насосов. Практически коэффициент загрузки единичного электродвигателя при его питании напрямую от сети (без частотного преобразователя) в процессе работы, как правило, остаётся неизменным.

Анализ расходов на электроэнергию по НПС «Б. Черниговка» Самарского РНУ

АО «Транснефть-Приволга» показал, что наиболее значимыми переменными, влияющими на расход электроэнергии, являются количество перекачиваемой нефти и перепад давления, создаваемый центробежным насосом. В меньшей степени – температура нефти. Оказалось, что такие параметры как плотность и вязкость перекачиваемого продукта в рассматриваемой математической модели можно из анализа исключить, так как, несмотря на их существенное влияние на расход электроэнергии, для определенного МНП реологические характеристики нефти в плановый период времени, остаются постоянными. Это обусловлено тем, что свойства перекачиваемой нефти должны отвечать требованиям, заданным для определенного сорта. Разные товарные марки нефти перекачивают по разным нефтепроводам. Поэтому в предлагаемой математической модели в качестве независимых факторов были использованы три:  $\Delta P$ , кг/см<sup>2</sup> (перепад давления, создаваемый центробежным насосом),  $Q$ , т (количество перекачиваемой нефти) и  $T$ , К (температура нефти).

В качестве функции регрессии предложен полный полином второго порядка, учитывающий как линейные члены  $k_1\Delta P$ ,  $k_2Q$ ,  $k_3T$ , так и нелинейные элементы тройного  $k_{123}\Delta PQT$  взаимодействия, а также квадратичные члены  $k_{11}\Delta P^2$ ,  $k_{22}Q^2$ ,  $k_{33}T^2$ :

$$\mathcal{E}_{расч} = k_1\Delta P + k_2Q + k_3T + k_{123}\Delta PQT + k_{11}\Delta P^2 + k_{22}Q^2 + k_{33}T^2 \quad (1)$$

Коэффициенты весомости  $K$  модели вычислены методом наименьших квадратов матричным способом.

$$K = (X^T * X)^{-1} * X^T * Y \quad (2)$$

где

$$X = \begin{bmatrix} \Delta P_1 & Q_1 & T_1 & \Delta P_1 Q_1 T_1 & \Delta P_1^2 & Q_1^2 & T_1^2 \\ \Delta P_2 & Q_2 & T_2 & \Delta P_2 Q_2 T_2 & \Delta P_2^2 & Q_2^2 & T_2^2 \\ \Delta P_3 & Q_3 & T_3 & \Delta P_3 Q_3 T_3 & \Delta P_3^2 & Q_3^2 & T_3^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta P_n & Q_n & T_n & \Delta P_n Q_n T_n & \Delta P_n^2 & Q_n^2 & T_n^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Y = \begin{bmatrix} E_{1,опыт} \\ E_{2,опыт} \\ E_{3,опыт} \\ \dots \\ E_{n,опыт} \end{bmatrix} \quad (4)$$

где  $X$  – исходная система уравнений;

$Y$  – матрица столбец потребления электроэнергии полученная по результатам обработки статистических данных, полученных из мониторинга электропотребления МН (кВт\*час). Данные определялись для фиксированных промежутков времени с постоянными технологическими параметрами перекачки нефти.

Коэффициенты весомости при независимых факторах и их квадратичных функциях определялись в виде матрицы вектор-столбца:

$$K = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_{123} \\ k_{11} \\ k_{22} \\ k_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

В качестве примера были рассчитаны коэффициенты весомости матрицы математической модели для НПС «Б. Черниговка». Расчет выполнен по архивным значениям работы МНП. Опытные значения выбирались по результатам обработки статистических данных, полученных из мониторинга электропотребления МНП. Данные определялись для фиксированных промежутков времени с постоянными (установившимися) технологическими параметрами перекачки нефти при работе МНП в выбранный промежуток времени.

Средняя погрешность полученной модели рассчитывалась по выражению (6)

$$\delta = \frac{\sum_1^N \Delta \mathcal{E}}{N * E_{опыт.ср.}} \quad (6)$$

$$\delta = 0,25\%.$$

где

$$\Delta \mathcal{E} = E - \mathcal{E} \quad (7)$$

$\mathcal{E}$  – расчетные значения,  $E$  – опытные значения.

Кроме того, данная математическая модель была оценена с помощью среднеквадратичной погрешности:

$$\zeta = \frac{\sqrt{\sum_1^N \Delta \mathcal{E}^2}}{N * E_{опыт.ср.}} \quad (8)$$

$$\zeta = 0,69\%.$$

Анализ результатов расчета показал отсутствие значимого влияния температуры нефти на точность расчетов по математической модели величины потребленной электроэнергии при фиксированном технологическом графике работы. Поэтому такие факторы, такие как температура выходящей со станции нефти, как и ее реологические свойства для заданной товарной марки нефти, в математической модели электропотребления НПС допустимо принять в качестве постоянных при условии, что в рассматриваемый период эти свойства не изменяются.

Разработанная математическая модель прогнозирования потребления электроэнергии позволяет более оперативно и с допустимой погрешностью по сравнению с существующими методиками определять расход электроэнергии на эксплуатируемых НПС и оценить потребность в количестве электроэнергии для проектируемых объектов и ее удельное значение на единицу транспортируемой продукции, что является существенным фактором при прогнозировании коммерческого электропотребления и разработки перспективных планов модернизации НПС.

Математическая модель показала свою универсальность и адекватность для двух периодов эксплуатации НПС, существенно отличающихся по технологической нагрузке: когда станция работала на практически полную проектную мощность и при нагрузке станции не более 70%.

**В третьей главе** сформулирована и решена задача параметрической оптимизации режимов работы участка магистрального нефтепровода по потреблению электроэнергии. Алгоритм и программа оптимизации построены по гибкой схеме, позволяющей изменять параметры и критерии оптимальности в зависимости от постановки цели исследования. В качестве основного критерия оптимальности режимов переключения насосных агрегатов был выбран минимум расхода электроэнергии на единицу перекачиваемой продукции  $q$ , кВт\*час/т. Дополнительным критерием выступал минимум количества переключений насосных агрегатов, обеспечивающий программу перекачки.

Для решения задачи оптимизации режимов переключения насосных агрегатов участка магистрального нефтепровода были приняты следующие допущения:

- период исследования - один месяц (30/31 сутки)<sup>1</sup>;
- период дискретизации - одни сутки;
- реологические свойства перекачиваемой нефти в течении исследуемого периода неизменны;
- мощность агрегатов за период дискретизации не изменяется; за расчетную мощность принята средняя мощность за сутки;
- в расчетах учитывается только мощность основного электрооборудования по перекачке товарного продукта.

При решении любой оптимизационной задачи возникают различного рода ограничения, которые сужают область допустимых значений варьируемых переменных (факторов). Ограничения могут накладываться как по технологическим, так и по экономическим соображениям. Эти ограничения выражаются совокупностью неравенств типа:

$$Hi(x_1, x_2, \dots, x_n) <> 0, \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad (9)$$

где функция  $Hi$ , - зависит от факторов  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , и устанавливает пределы допустимых значений этих переменных, такие как не отрицательность или цело численность вследствие физической природы рассматриваемых величин. Условия вида (9), допускающие также случаи равенства, могут графически отображаться не только в виде поверхностей в  $n$ -мерном пространстве, но и представлять собой линии либо отдельные точки на графике целевой функции

Первое ограничение определяется равенством (10)

$$t_1 + t_2 + \dots + t_n = T, \quad (10)$$

$t_1, t_2, \dots, t_n$ , – время работы для 1, 2, ...  $n$ -го режима, соответственно, сутки;

$T$  – отчетный период времени работы нефтепровода в сутках.

Второе ограничение определяется месячной программой объема перекачки нефти

$$q_1 t_1 + q_2 t_2 + \dots + q_n t_n = Q, \quad (11)$$

<sup>1</sup> В течении месяца, как правило, выделяются 1 или 2 суток полного останова перекачки для плановых ремонтов и профилактики оборудования. Поэтому расчетный рабочий период в исследуемом месяце года составил 29 суток.

$q_1, q_2, \dots, q_n$ , – расход 1, 2, ...  $n$ -го периодов соответственно, тыс. т/сутки;

$Q$  – требуемый объем перекачки за отчетный период времени, тыс.т.

Следующее ограничение связано с максимально допустимой мощностью установленного оборудования  $p_{max}$  для данного участка МН. Средняя мощность для каждого режима  $p_i$  не должна превышать значения максимальной установленной мощности

$$p_i \leq p_{max} \quad (12)$$

Существует ограничение, связанное с максимальным количеством «горячих» и «холодных» пусков двигателей насосов под нагрузкой в единицу времени, определенное инструкцией по эксплуатации электродвигателя.

Следующим этапом постановки оптимизационной задачи является определение параметра и критерия оптимальности.

Цель представленной работы заключается в повышении эффективности использования электроэнергии основными технологическими установками магистральных нефтепроводов на основе оптимизации режимов работы НПС. Главным параметром, характеризующим эту цель количественно, является расход электроэнергии на единицу товарной продукции.

*Критерием оптимальности*, соответственно, будет минимум расхода электроэнергии на единицу объема перекачиваемой нефти.

$$p_1 t_1 / q_1 + p_2 t_2 / q_2 + \dots + p_n t_n / q_n = \mathcal{E}_{расч.} / Q \rightarrow \min, \quad (13)$$

где  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , – мощность 1, 2, ...  $n$ -го режима соответственно, кВт;

$\mathcal{E}_{расч.}$  – расчетный расход электроэнергии, кВт\*час.

В качестве варьируемых переменных в исследовании были выбраны: время работы на  $i$ -тых режимах  $t_i$  (сут) и производительность этих режимов  $q_i$ , т/сут. Количество технологических режимов и их параметры фиксируются картой технологических режимов, составленной в соответствии с планом перекачки и комплексом насосного оборудования НПС.

В поставленной задаче варьируемые переменные  $t_1, t_2, \dots, t_5$  могут принимать целочисленные значения от 0 до 29. Количество возможных сочетаний определяется выражением

$$N = p^k = 30^5 = 24,3 \cdot 10^6, \quad (14)$$

Такое количество вариантов исследовать весьма проблематично. Но, учитывая ограничение (11), это число значительно сокращается. Если равенство (11) задать абсолютно строгим, то множество (13) может оказаться вообще пустым. Поэтому вместо строгого равенства (11) было предложено условие, которое заключалось в том, что отклонение расчетного объема перекачиваемой нефти от заданного контрактом  $Q_k$  не должно превышать наперед заданной величины  $e\%$

$$\Delta Q\% \leq e\%$$

где

$$\Delta Q\% = \frac{(q_1 \cdot t_1 + q_2 \cdot t_2 + q_3 \cdot t_3 + q_4 \cdot t_4 + q_5 \cdot t_5 - Q_k) \cdot 100}{Q_k}, \quad (15)$$

Алгоритм отбора всех удовлетворяющих условиям постановки задачи режимов представлен на рис.2.

Задача оптимизации в общем виде ставилась как задача выбора из множества допустимых альтернативных вариантов подмножества оптимальных решений, среди

которых в дальнейшем определялся окончательный оптимальный режим переключений агрегатов, обеспечивающий минимум потребления электроэнергии на единицу объёма перекачанной нефти.

Подмножество всех вариантов сочетаний режимов экспортировалось из программы MatchCad в Excel в виде неупорядоченного массива данных, в которые входили:

- количество суток работы для каждого режима  $t_1, t_2, \dots, t_5$ ;
- расчетная производительность за месяц,  $Q, T$ ;
- отклонение расчетной месячной производительности от заданной,  $\Delta Q\%$ ;
- затраты электроэнергии для каждого варианта режимов,  $\mathcal{E}, \text{кВт}\cdot\text{час}$ ;
- значение экономии электроэнергии в сравнении фактическим за исследуемый месяц,  $\Delta \mathcal{E}$ , в  $\text{кВт}\cdot\text{час}$  и  $\%$ .

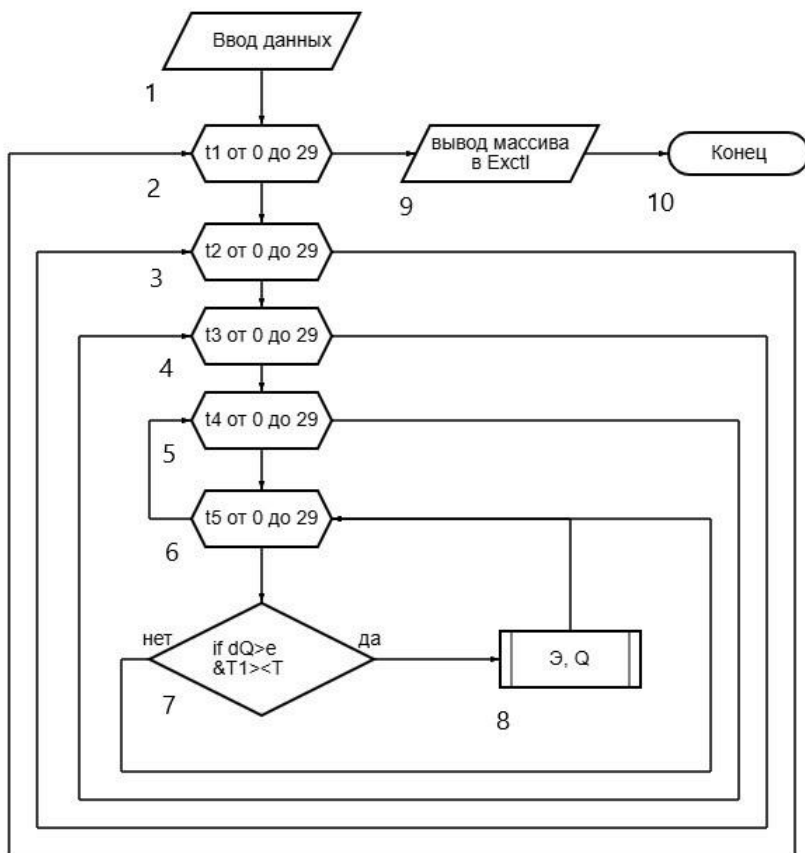


Рисунок 2 - Алгоритм метода упорядоченного перебора вариантов режимов перекачки

На блок-схеме обозначены:

1 - блок ввода исходных данных и констант;

2...6 - вложенные циклы перебора всех возможных сочетаний периодов работы

каждого технологического цикла;

7 - проверка ограничения по отклонению суммарной производительности от заданного значения и проверка условия (15); в случае нарушения одного из этих ограничений вариант отклоняется и расчет переходит к следующему варианту;

8 - подпрограмма расчета потребного месячного энергопотребления,  $\mathcal{E}$ , кВт\*час;

9 - вывод массива расчетных данных в Excel для дальнейшей обработки.

Статистические данные были выбраны за один из типичных месяцев исследуемого периода, когда трубопровод работал на 47% от проектной мощности. Оптимизационный расчет проводился для этого коэффициента загрузки МН.

Критерием оптимальности будет минимум расхода электроэнергии на единицу объема перекачиваемой нефти.

$$24 \left( \frac{p_1 t_1}{q_1} + \frac{p_2 t_2}{q_2} + \dots + \frac{p_n t_n}{q_n} \right) = \frac{\mathcal{E}_{расч.}}{Q} \rightarrow \min, \quad (16)$$

где  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , – мощность 1, 2, ...  $n$ -го режима соответственно, кВт;

$\mathcal{E}_{расч.}$  – расчетный расход электроэнергии, кВт\*час.

При этом должны соблюдаться ограничения:

полный период работы, сут.

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5;$$

$T \leq 29$  (календарный месяц с учетом останова на одни сутки для планового ремонта и профилактики оборудования);

$$t_i \geq 0;$$

Мощность  $i$ -го режима не более максимально допустимой для режима

$$p_i \leq p_{max.};$$

число режимов  $n=5$ .

Задачей оптимизации было найти такое соотношение режимов работы из пяти, допустимых картой технических режимов, при котором расчетное потребление электроэнергии будет меньше  $\mathcal{E}_{факт.}$ , а в общем случае будет минимальным.

Задача была решена для фиксированной плановой месячной производительности и принятых ранее допущениях и ограничениях. В табл.1 приведены значения параметров для 12-ти лучших по экономии электроэнергии вариантов оптимизированных режимов.

Таблица 1 Расход электроэнергии по отдельным режимам перекачки для 12-ти лучших вариантов

№ вар	$\mathcal{E}_1$ , кВт*час	$\mathcal{E}_2$ , кВт*час	$\mathcal{E}_3$ , кВт*час	$\mathcal{E}_4$ , кВт*час	$\mathcal{E}_5$ , кВт*час	$\mathcal{E}$ , кВт*час	$\Delta\mathcal{E}$ , кВт*час	$-\Delta\mathcal{E}$ , %	Кол-во вкл-й
1.	0	0	1784640	0	175056	1959696	-44782	2,23	2
2.	0	98064	1622400	65040	175056	1960560	-43918	2,19	4
3.	0	0	1622400	195120	150048	1967568	-36910	1,84	3
4.	0	392256	1379040	0	200064	1971360	-33118	1,65	3
5.	0	98064	1703520	0	175056	1976640	-27838	1,39	3
6.	0	0	1703520	130080	150048	1983648	-20830	1,04	3
7.	0	490320	1297920	0	200064	1988304	-16174	0,81	3

Продолжение таблицы 1

№ вар	Э1, кВт*час	Э2, кВт*час	Э3, кВт*час	Э4, кВт*час	Э5, кВт*час	Э, кВт*час	ΔЭ, кВт*час	-ΔЭ, %	Кол-во вкл-й
8.	110040	0	1703520	0	175056	1988616	-15862	0,79	3
9.	110040	98064	1541280	65040	175056	1989480	-14998	0,75	5
10.	0	196128	1622400	0	175056	1993584	-10894	0,54	3
11.	0	294192	1460160	65040	175056	1994448	-10030	0,50	4
12.	0	392256	1297920	130080	175056	1995312	-9166	0,46	4

В результате оптимизации режимов перекачки для заданных условий, соответствующих заданию по типовой НПС ПАО «Транснефть» был получен вариант управления режимами, позволяющий сэкономить 44782 кВт\*час электроэнергии, расходуемой на основной технологический процесс. По сравнению с фактическим расходом электроэнергии, экономия составляет 2,23%. Кроме этого, полученный расчетный вариант требует в идеале только 2 переключения режимов перекачки, что значительно снижает динамические нагрузки на питающую сеть и сами электродвигатели магистральных насосов, повышая их ресурс и надежность.

По удельному показателю расхода электроэнергии на тонну перекаченного продукта оптимальный вариант позволяет снизить расход электроэнергии с  $q_{\text{факт}} = 1,95$  кВт\*час/т до  $q_{\text{опт}} = 1,906$  кВт\*час/т (-2,22%).

**В четвертой главе** на примере конкретной нефтеперекачивающей станции проведено анализ результативности модернизации комплекса насосного оборудования и применения системы частотно-регулируемого привода магистральных насосов. Предложенная методика компоновки комплекса насосного оборудования станции по комбинированной схеме позволяет рассчитать зоны малых подач насосов и избежать негативных последствий, вызванных этими режимами. Разработанный алгоритм оптимизации параметров комбинированной схемы управления, включающей регулируемые и нерегулируемые приводы, позволяет определить экстремум (минимум) целевой функции - суммарной потребляемой мощности насосным оборудованием станции, для заданной производительности. На примере комплекса из двух регулируемых и двух нерегулируемых агрегатов получено для оптимальной схемы значение экономии электроэнергии в зависимости от требуемой производительности.

При комбинированном управлении кроме подключенных нерегулируемых агрегатов, для обеспечения требуемой производительности согласно технологическому режиму, подключаются насосные агрегаты с ЧРП. Электродвигатели частотной группы работают с одинаковой скоростью во избежание перетоков нефти между насосами, и увеличивают производительность станции на величину, пропорциональную их относительному количеству  $\alpha$  и относительной скорости  $v$

$$Q_{fc}^* = \alpha v, \quad (17)$$

Мощность, потребляемая регулируемой группой, пропорциональна кубу относительной скорости (о.е.)

$$P_{fc}^* = \alpha v^3. \quad (18)$$

Производительность дискретно-регулируемой группы, в о.е.

$$Q_{dc}^* = \beta_c, \quad 0 \leq \beta_c \leq (1 - \alpha) \quad (19)$$

где  $\beta_c = d_c/N$  - относительное количество включенных двигателей дискретно-регулируемой группы.

Полная производительность станции при комбинированном управлении, с учетом (17) и (19), о.е.

$$Q_c^* = \beta_c + \alpha v.$$

Потребляемая мощность при этом в о.е.

$$P_c^*(Q_c^*, \beta_c) = \beta_c + \alpha v^3. \quad (20)$$

Оптимизационная задача решалась для критерия минимума потребляемой мощности всеми насосными агрегатами при комбинированном управлении производительностью станции.

На первом интервале оптимального управления необходимая производительность обеспечивалась изменением частоты группы насосов с ЧРП. Производительность на этом интервале нарастает от 0 до значения  $Q_0^*$  при которой потребляемая мощность  $P_{fc}^*$  по (18) не превышает мощность, рассчитанную по (20). В конце первого интервала скорость и мощность, в о.е., будут

$$v_o = \frac{1}{\alpha} Q_0^*,$$

$$P_{fc}^*(Q_0^*) = \alpha v_o^3. \quad (21)$$

Подключение насоса дискретно-регулируемой группы увеличивает производительность станции на  $Q_{d1}^*$  и потребляемую мощность на  $P_{d1}^*$ . Тогда производительность частотной группы можно снизить на ту же величину  $Q_{d1}^*$ . При этом скорость и мощность частотной группы снизятся до значений:

$$v_{o1} = \frac{1}{\alpha} (Q_0^* - Q_{d1}^*), \quad (22)$$

$$P_{f1}^*(Q_0^* - Q_{d1}^*) = \alpha v_{o1}^3. \quad (23)$$

Для нахождения экстремума (минимума) критерия оптимизации необходимо выразить в явном виде функцию цели и приравнять ее первую производную к нулю:

$$P_f^*(Q_0^*) = P_{f1}^*(Q_0^* - Q_{d1}^*) + P_{d1}^*.$$

Подставив в последнее уравнение значения, входящих в него величин из (21), (22) и (23) и приравняв его первую производную к нулю, получим квадратное уравнение

$$3Q_0^{*2} - 3Q_{d1}^*Q_0^* + Q_{d1}^{*2} - \alpha^2 = 0.$$

Корни этого уравнения дадут искомое значение производительности, при котором следует включать первый насос дискретно-регулируемой группы. Этому значению будет соответствовать минимум потребляемой мощности.

$$Q_0^* = \frac{3Q_{d1}^* \pm \sqrt{(3Q_{d1}^*)^2 - 12(Q_{d1}^{*2} - \alpha^2)}}{6} \quad (24)$$

Отрицательный корень - посторонний, должен быть отброшен.

Подключение первого нерегулируемого агрегата должно быть при производительности  $Q_0^*=0,405$  о.е., второго - при  $Q_0^*=0,63$  о.е.

На последующих интервалах регулирования включаются нерегулируемые насосы, сдвигая правую границу на величину  $Q_{d1}^*$ . На последнем этапе при всех включенных нерегулируемых насосах, корректировка производительности производится группой насосов с ЧРП.

Иллюстрация предложенного алгоритма представлена на рис.3. В качестве примера выбрана насосная станция с четырьмя насосными агрегатами, два из которых не регулируемые, а два - с ЧРП.

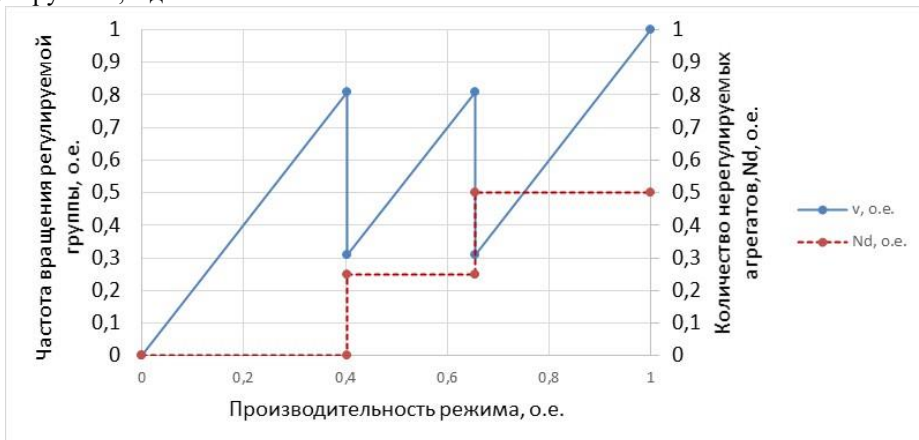


Рисунок 3 - Оптимизированный по минимуму потребляемой мощности режим для комбинированной схемы управления режимом.

На диаграмме рис.4, представлены расчетные зависимости мощностей при дискретном и комбинированном управлении режимами с учетом КПД ЧРП и снижения КПД насосных агрегатов при дросселировании.

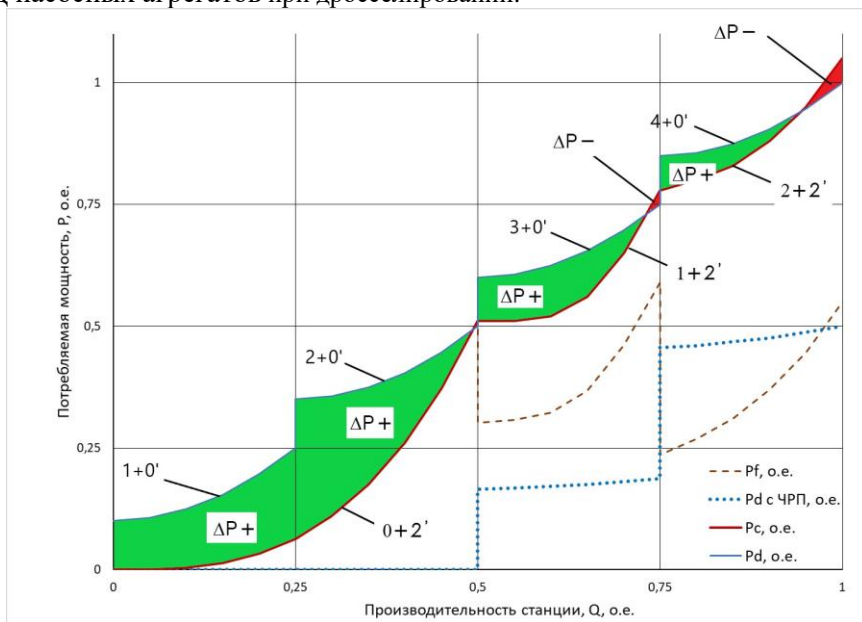


Рисунок 4 – Диаграмма мощностей при дискретном и комбинированном управлении режимами с учетом КПД ЧРП и снижения КПД насосных агрегатов при дросселировании

Приняты следующие обозначения:  $P_d$  - мощность, потребляемая дискретно-регулируемой группой насосов при комбинированной схеме управления;  $P_f$  - мощность регулируемой группы насосов;  $P_c$  - суммарная мощность станции при комбинированной схеме;  $P_{cd}$  - суммарная мощность насосов при исключительно дискретном регулировании и дросселировании. Все величины выражены в относительных величинах (о.е.). За базовый принят режим номинальной мощности станции для данного технологического режима и его параметры.

$$N_f = N_d = 2, \alpha = 0,5, 0 \leq \beta_c \leq 0,5.$$

Залитые зеленым области показывают снижение потребляемой мощности ( $\Delta P+$ ) при комбинированной схеме управления насосными агрегатами станции по сравнению с дискретным регулированием дросселированием. Значения экономии мощности, в зависимости от режима составляют от 10,2% до 15,1%. Отметим, что в режимах, когда частота ЧРП равна или близка к частоте сети, снижения потребления мощности не будет из-за дополнительных потерь в ЧРП. Эти области залиты красным ( $\Delta P-$ ).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном диссертационном исследовании предложено решение актуальной научно-технической задачи повышения эффективности использования электроэнергии при транспортировке нефти в системе магистрального нефтепровода. При этом были получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработана математическая модель, представляющая зависимость электропотребления от объема перекачиваемой нефти и перепада давления в МНП, отличающаяся от используемых в настоящее время на практике методик расчета более точным определением суммарного количества потребляемой электроэнергии и ее удельного значения на единицу транспортируемой продукции. Модель показала свою универсальность и адекватность для двух периодов эксплуатации НПС, существенно отличающихся по технологической загрузке: с 2004 по 2006 год, когда станция работала на практически полную проектную мощность и с 2022 по 2024 год, при загрузке станции не более 70%. Математическая модель была использована в практике АО «Транснефть-Приволга» при прогнозировании величины потребления электроэнергии в коммерческих расчетах при разработке перспективных планов развития и реконструкции НПС (Справка об использовании результатов Приложение Г диссертации).

2. Решена задача выбора оптимального режима работы НПС по основному критерию – минимальному расходу электроэнергии на единицу перекачиваемой продукции и дополнительному критерию – минимальному количеству переключений насосных агрегатов, обеспечивающих требуемый объем перекачки. Предложенная методика позволила выбрать требуемый режим работы с минимальными затратами электроэнергии. Для оптимального варианта удельный расход электроэнергии на единицу перекачиваемого продукта составил 1,906 кВт\*час/т, что на 2,22% меньше, чем удельный фактический расход за исследуемый период. Методика рекомендуется для использования при составлении месячных планов работы магистрального нефтепровода и прогнозировании величины потребления электроэнергии для выполнения этих планов.

3. Проведен структурный и параметрический синтез комплекса насосного электрооборудования НПС по обоснованию замены устаревших насосных агрегатов на

современные насосы. Благодаря повышенной эффективности и увеличенной производительности обновленного оборудования, расход энергии на транспортировку одной тонны продукции на один километр сокращается до 4.5 кВт\*час (экономия составляет 20.4%), когда применяется технологический режим №1, и до 5.2 кВт\*час (снижение затрат — 25.5%) при работе в режиме №2.

4. Разработанный алгоритм оптимизации параметров комбинированной схемы компоновки НПС, включающей регулируемые и нерегулируемые приводы, позволяет определить экстремум (минимум) целевой функции - суммарной потребляемой мощности насосным оборудованием станции, для заданной производительности. На примере комплекса из двух регулируемых и двух нерегулируемых агрегатов получено для оптимального режима значение экономии электроэнергии в зависимости от требуемой производительности в пределах 10,2%-15,1%, по сравнению с дискретным регулированием путем включения/отключения насосов.

5. Комплекс предложенных в диссертации мероприятий, с учетом того, что в настоящее время перекачка по МН «Гурьев-Куйбышев» не превышает 60% проектной производительности нефтепровода, дает возможность годовой экономии электроэнергии в объеме не менее 4,4 млн. кВт\*час., что в денежном выражении, в ценах 2025 г. составляет 18,5 млн. рублей.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Носиков, Н.А. Анализ энергозатрат на перекачку нефти по магистральному нефтепроводу / **Н.А. Носиков** // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2005. – № 37. – С. 113-117. – EDN JWUYFT.
2. Носиков, Н.А. Методика расчета энергопотребления и оптимизация режима работы нефтепровода / **Н.А. Носиков**, Н.Н. Василькин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2007. – № 1(19). – С. 141-145. – EDN JXKOOJ.
3. Абакумов, А.М. Модернизация электромеханического оборудования линейно-производственной диспетчерской станции "Большая Черниговка" / А.М. Абакумов, Н.Н. Василькин, **Н.А. Носиков** // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2007. – № 6. – С. 89-92. – EDN KGCWVD.
4. Макаричев, Ю.А. Математическая модель потребления электроэнергии на НПС / Ю.А. Макаричев, **Н.А. Носиков** // Вестник СамГТУ. Серия: Технические науки. – 2024. – Т. 32. – №4. – С. 106 – 117. DOI: 10.14498/TECH.2024.4.8. EDN: JMVDFB.
5. Носиков, Н.А. Оптимизация энергосбережения режима перекачки магистрального нефтепровода / **Н.А. Носиков**, Ю.А. Макаричев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2025. – Т. 33, № 1(85). – С. 76-88. – DOI 10.14498/tech.2025.1.6. – EDN RFKCCN.
6. Носиков, Н.А. Оптимизация режимов работы участка магистрального нефтепровода по потреблению электроэнергии / **Н.А. Носиков** // Вопросы электротехнологии. – 2025. – № 2(47). – С. 56-61. – EDN PZJBBO.

7. Макаричев, Ю. А. Повышение энергоэффективности электротехнического комплекса насосных агрегатов с частотным регулированием / Ю. А. Макаричев, **Н. А. Носиков** // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2026. – № 2(95). – С. 68-76. – DOI 10.65209/2218-3116-2026-2-95-68-76. – EDN YQZJBL.
  8. Носиков, Н.А. Структурный и параметрический синтез комплекса электрооборудования нефтеперекачивающей станции / **Н.А. Носиков**, Ю.А. Макаричев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2026. – Т. 34, № 1. – С. 164-177. – DOI 10.14498/tech.2026.1.9. – EDN IUQGPV.
- Публикации в других изданиях**
9. Носиков, Н.А. Комбинированная схема комплекса насосных агрегатов с частотным регулированием на НПС / **Н.А. Носиков** // Цифровое общество: научные инициативы и новые вызовы: Сборник научных трудов по материалам XXII Международной научно-практической конференции, Москва, 17 марта 2026 года. – Москва: Издательство АНО ДПО «Университет ИТБО», 2026. – С. 151-157. – DOI 10.34755/IROK.2026.54.40.003.
  10. Носиков, Н.А. Методика структурной компоновки комбинированной схемы комплекса насосных агрегатов с частотным регулированием / Н.А. Носиков // EurasiaScience: Сборник статей LXXVI международной научно-практической конференции, Москва, 31 марта 2026 года. – Москва: Научно-издательский центр "Актуальность.РФ", 2026. – С. 84-87. – eLIBRARY ID: 89272257. – EDN: XOTQUJ.
  11. Носиков, Н.А. Прогнозирование потребления электроэнергии на НПС // **Н.А. Носиков**, Ю.А. Макаричев // Сборник статей Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Электрические системы и сети», Самара, 28 апреля 2026. – Самара: 2026. – с. 291-294.

В работах 2...5, написанных в соавторстве, автору диссертации принадлежат анализ энергозатрат НПС, сбор и обработка статистического материала, разработка математических моделей, алгоритмов и программ оптимизации, методология структурной модернизации электрооборудования НПС. В работе 7 – алгоритм и программа оптимизации энергопотребления на станциях с ЧПП электроприводами. В работе 8 – расчет режимов работы электроприводов МН. Всего вклад автора в указанных работах более 65%. Работы 1 и 6 выполнены автором единолично.

Перспективы дальнейшего развития темы связаны с оптимизацией работы вспомогательного электротехнического комплекса НПС.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.06 ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
(протокол №10 от 01.07.2026 г.)

Заказ №140. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной полиграфии

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.