

На правах рукописи

ТАБАЧНИКОВА ТАТЬЯНА ВЛАДИМИРОВНА

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО  
КОМПЛЕКСА ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2006

Работа выполнена в ООО «Научно-производственная фирма ОЛТА»  
г. Санкт-Петербург

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор	Нурбосынов Дуйсен Нурмухамедович
Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор	Смоловик Сергей Владимирович
кандидат технических наук, доцент	Чернявская Ирина Анатольевна
Ведущая организация	ОАО «Сетевая компания», г. Казань

Защита состоится "13" апреля 2006г. в 16<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.20 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, главный корпус ауд. № 151.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук,  
доцент

Курмашев А.Д.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В нефтегазодобывающей отрасли одной из важнейших является проблема по снижению потерь электроэнергии при добыче, транспортировке и подготовке углеводородного сырья. Данная проблема может быть решена путём оптимизации режимов напряжения и электропотребления.

Известно, что нефтегазодобывающие комплексы (НГДК) являются крупными и ответственными потребителями электрической энергии, и сумма расходов на электроэнергию в них достигает 50% от общей суммы затрат. В масштабе отрасли эти расходы составляют десятки миллиардов рублей, что делает вышеозначенную проблему весьма актуальной. Снижение потерь электроэнергии в НГДК путём оптимизации режимов напряжения и электропотребления, даже на единицы процентов, экономит огромные финансовые средства.

В данной работе основное внимание уделено следующим аспектам:

- анализу режимов работы действующих электротехнических комплексов добычных скважин (ЭКДС), вспомогательного оборудования (ЭКВО) и электротехнического комплекса предприятия (ЭКП) в целом;
- оптимизации структур систем электроснабжения перечисленных электротехнических комплексов;
- техническому обеспечению автоматической стабилизации рациональных уровней напряжения в основных элементах ЭКП.

Диссертационная работа базируется на известных апробированных результатах исследований выполненных в Санкт-Петербургском государственном горном институте, Московском государственном техническом университете нефти и газа, Альметьевском государственном нефтяном институте и в ООО НПФ «ОЛТА». На их основе получили дальнейшее развитие научные исследования по оптимальному использованию установок продольной и поперечной компенсации при автоматической стабилизации уровня напряжения в центре питания.

Следует отметить, что при внедрении новой техники и технологий процесса добычи нефти и газа с целью снижения потерь в ЭКДС, ЭКВО и ЭКП, режимы работы этих комплексов не согласовываются. Применение результатов научных исследований по оптимальному использованию компенсирующих установок (КУ) при автоматической стабилизации уровня напряжения также не согласовывается с технологией производства.

Проведенные в последнее время исследования в НГДК показывают следующее:

1. На завершающей стадии эксплуатации месторождений, что характерно для Приволжского региона, резко возрастает обводненность скважин, снижается температурный градиент земли, увеличивается число скважин с вязкой, высоковязкой нефтью, а также скважин с естественно пониженным пластовым давлением.

2. При внедрении новой техники и технологии не производится согласование автоматизации управления различных структур, что приводит к разрыву связей между элементами ЭКП и затрудняет централизованное автоматическое управление режимами напряжения и электропотребления.

3. НГДК характеризуются все более хаотично возрастающей территориальной рассредоточенностью при недостаточном уровне информационного взаимодействия технологических объектов различного уровня и пунктов диспетчерского управления, поэтому ожидать улучшения ситуации за счет развития системы иерархического управления энергоснабжением, основанной на переработке большого количества управляющей информации, в настоящее время не приходится.

4. Внедрение новых узлов электрооборудования и элементов системы электроснабжения, как правило, не приносит ожидаемого экономического эффекта, что связано, прежде всего, с отсутствием систематизированного внедрения новых разработок. Система электроснабжения и электротехнические комплексы являются основными элементами процесса добычи в НГДК. При замене отдельных элементов комплекса на более совершенные без

перенастройки ЭКП в целом, наблюдается недоиспользование возможностей новых элементов.

Объективное существование в такой сложной системе как НГДК неформализуемых аналитически связей приводит к тому, что разработанные математические модели отдельных элементов систем и процессов в них сложно строго оптимизировать математически. Поэтому в основу исследований, представленных в данной работе, было положено решение следующей задачи - сформировать перечень технико-технологических задач, последовательность решения которых обеспечила бы решение проблемы энергосбережения в целом.

**Основным направлением** настоящего исследования, определяющей его **научную значимость и новизну**, является комплексное решение задач по оптимизации режима работы ЭКП, с целью снижения потерь электрической энергии в нефтегазодобывающей промышленности.

Диссертационная работа направлена на изучение установившихся и переходных процессов, определение оптимальных и рациональных уровней напряжения, обеспечивающих снижение потерь электрической энергии, а также на уточнение принципов и определение средств управления объектами, определяющими функциональные свойства создаваемых и действующих электротехнических комплексов и систем в нефтегазодобывающей промышленности.

**Цель исследования:** изучение установившихся и переходных процессов в элементах ЭКП, разработка математической и имитационной моделей этого комплекса и определение энергетических параметров.

**Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:**

- разработка математических моделей электротехнических комплексов добычных скважин, вспомогательного оборудования и дополнение метода расчета рабочих, механических характеристик и энергетических параметров этих комплексов новыми аналитическими зависимостями;
- разработка математической модели электротехнического комплекса

отходящей линии (ЭКОЛ) и дополнение метода расчета эквивалентных параметров режима напряжения и электропотребления новыми аналитическими зависимостями;

– разработка математической модели ЭКП и дополнение метода расчета энергетических параметров режима напряжения и электропотребления новыми аналитическими зависимостями;

– разработка и обоснование организационно-технических мероприятий по оптимизации режима работы ЭКП.

**Методологической основой исследований** являются: теоретические основы электротехники; методы теории электрических цепей; методы теории управления и оптимизации технических систем; методы физического, математического и компьютерного моделирования; теория системного подхода к решению вопросов о системе, структуре, функциях и системообразующих связях.

**Объектом исследования** являются элементы ЭКП, к которым относятся:

1. Электротехнические комплексы добычных скважин (ЭКДС), которые включают в себя штанговые скважинные насосные установки (ШСНУ), установки электроцентробежных насосов (УЭЦН), винтовые насосные установки (ВНУ) с погружными и с наземными электроприводами, а также местные компенсирующие установки (КУ) и скважинный нагреватель (СН).

2. Электротехнические комплексы вспомогательного оборудования (ЭКВО), которые включают в себя дожимные насосные станции (ДНС), кустовые насосные станции (КНС), буровые установки (БУ), газозамерные установки (ГЗНУ).

3. Электротехнические комплексы отходящих линий (ЭКОЛ), которые включают в себя ЭКДС, ЭКВО и комплексы сельского хозяйства.

**Область исследования:** физическое, математическое и компьютерное моделирование электротехнических комплексов предприятия; изучение системных связей ЭКДС с ЭКОЛ и ЭКП; обоснование совокупности технических, технологических и экономических критериев оценки

принимаемых решений в области проектирования этих комплексов. Создание, эксплуатация и оптимизация режимов работы ЭКП в общей системе электроснабжения. Исследование работоспособности и качества функционирования ЭКП при различных внешних и внутренних возмущениях.

**Научная новизна и теоретическая значимость** исследований заключается:

- в разработке математических моделей электротехнического комплекса предприятия в целом и его основных элементов, которые позволят определить рациональные энергетические параметры режима напряжения и электропотребления при эксплуатации этих комплексов;
- в дополнении аналитическими зависимостями методов расчета энергетических параметров электротехнического комплекса предприятия и его основных элементов при различных внешних и внутренних возмущениях, что позволит обосновать и оценить принимаемые решения в области проектирования, создания и эксплуатации этих комплексов.

**Основные результаты настоящего исследования:**

1. Сформулированы требования к питающей и распределительной электрической сети, обусловленные спецификой режима работы ЭКП нефтегазодобывающей промышленности.

2. Разработаны научно обоснованные организационно-технические мероприятия по регулированию режима напряжения и электропотребления ЭКП с целью снижения потерь электрической энергии.

3. Выполнены исследования режима работы ЭКДС в установившихся и переходных процессах, и определены рациональные уровни напряжения и параметры КУ.

**Практическая ценность** диссертационной работы:

- произведён выбор оптимальных параметров и мест подключения технических средств компенсации реактивной мощности и потерь напряжения, обеспечивающих местное и централизованное автоматическое управление и регулирование режима напряжения и электропотребления;

– определены рациональные уровни напряжения и оптимальный диапазон отклонения напряжения, отвечающие требованиям технического ограничения привода регулятора напряжения под нагрузкой (РПН) силового трансформатора (количество переключений), что позволяет повысить степень автоматизации системы электроснабжения НГДК, уменьшить прямые и косвенные затраты на электроэнергию, улучшить режим работы всего электрооборудования, сетевой автоматики и релейной защиты.

**Апробация исследования.** Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались: на XII Туполевском чтении, научная конференция (Казань, 2004); на Всероссийской научно-технической конференции «Нефть и газ Западной Сибири», Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2005; на семинаре секции «Электромеханические системы и средства управления ими» Международной энергетической академии (Санкт-Петербург, 2005); на расширенном научно-практическом семинаре ООО НПФ «ОЛТА» и кафедры «Электроэнергетика» Альметьевского нефтяного государственного института (АГНИ), 2005; на заседании кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, 2006.

**Публикации.** Общее количество публикаций по теме диссертации – 9 печатные работы. Результаты научных исследований отражены в 1 отчете, прошедшем государственную регистрацию, и в 4 методических разработках для студентов АГНИ.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Обоснование рационального диапазона изменения напряжения питающей электрической сети, продиктованного технологией добычи нефти и применением специфического электрооборудования в нефтегазодобывающей промышленности.

2. Математические модели ЭКП и его основных элементов, учитывающие новые элементы, представленные аналитическими соотношениями, дополняющими методы расчета режима напряжения и электропотребления



этих комплексов.

3. Закономерности энергетических параметров ЭКП при автоматической стабилизации рационального уровня напряжения с одновременной компенсацией реактивной мощности и потерь напряжения, на основе полученных результатов математического и экономического моделирования режима работы этого комплекса при внешних и внутренних возмущениях в электрической сети.

**Структура и содержание** работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и содержит 50 рисунков, 29 таблиц, библиографический список из 95 наименований и 4 приложения, изложенных на 135 страницах машинописного текста.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснован выбор темы диссертации, ее актуальность, определены цель, задачи, предмет и объем исследований, представлена методология исследования, сформулированы новизна, теоретическая и практическая значимость результатов данной работы и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен анализ и определены особенности существующих электрических сетей и ЭКП нефтегазодобывающей промышленности. Электрические сети имеют радиально-магистральную и радиальную схемы соединения с последовательными многоступенчатыми трансформациями.

Распределительные сети нефтегазодобывающей промышленности обладают рядом специфических условий:

- электроснабжение нефтегазодобывающих и буровых установок осуществляется от общих воздушных магистральных ЛЭП. БУ может быть подключена в любой её точке в зависимости от геологических условий;
- механизированная добыча нефти производится ЭКДС, которые разделены на две группы: УЭЦН и ВНУ с погружным электроприводом (рис.1); ШСНУ и ВНУ с наземным электроприводом (рис.2);

- большая часть ЭКП оснащена силовыми трансформаторами с РПН;
- индивидуальные трансформаторы ЭКДС имеют отпайки, которые позволяют ступенчато регулировать напряжения на вводе в скважину при заданном уровне напряжения в узле отходящей линии. По причине отсутствия в условиях эксплуатации согласованного регулирования напряжения в начале линии и в узлах, где подключены ЭКДС, ступенчатое регулирование напряжения на вводе в скважину практически невозможно, что приводит к значительным отклонениям напряжения на зажимах приводов ЭКДС от значений требуемых ГОСТ 13109-97.

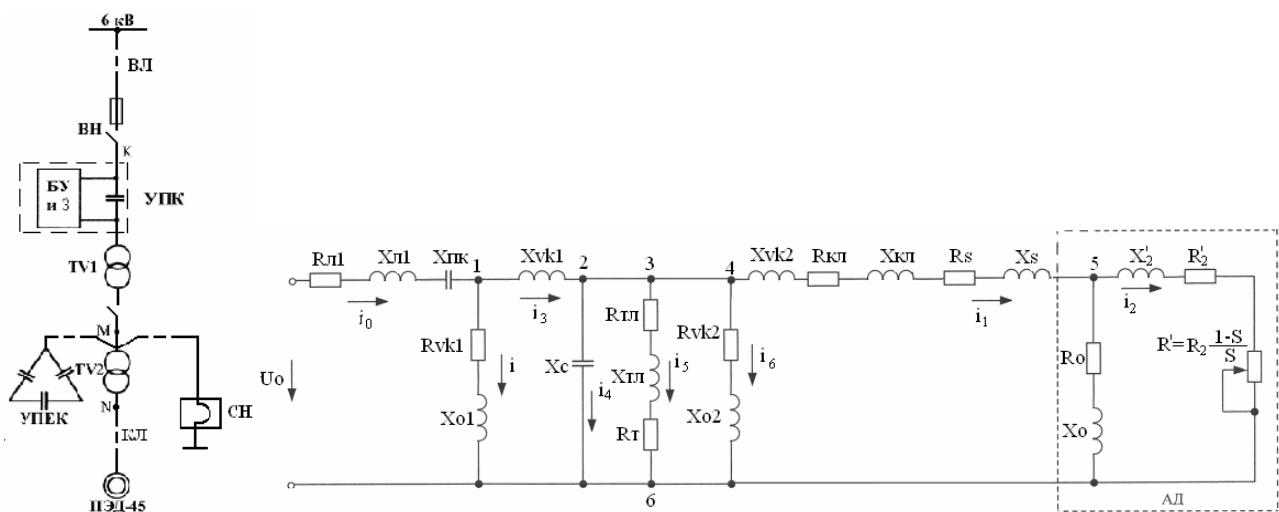


Рис.1. Принципиальная однолинейная схема электроснабжения и схема замещения ЭКДС с погружным электроприводом.

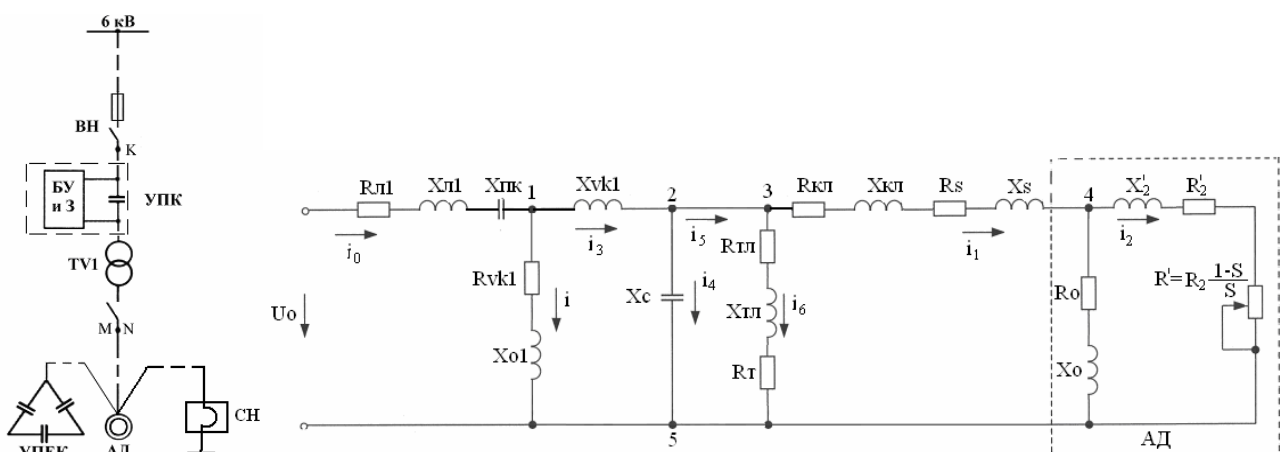


Рис.2. Принципиальная однолинейная схема электроснабжения и схема замещения ЭКДС с наземным электроприводом.

Выполнен анализ существующих энергетических параметров и режима напряжения в ЭКП. Результаты анализа показали, что отклонения и колебания

напряжения не соответствуют требуемым значениям ГОСТ 13109-97, и обуславливаются как колебаниями напряжения в энергосистеме, так и пуском главных приводов буровых, дожимных и кустовых установок.

Определено, что обеспечение требуемого режима напряжения в современных электрических сетях НГДК практически невозможно без применения компенсирующих установок и устройств автоматической стабилизации уровня напряжения.

Произведён анализ существующих мероприятий по регулированию напряжения в электрических сетях. В результате анализа установлено:

- отсутствие автоматической стабилизации напряжения в ЭКП;
- недостаточно эффективное использование регулирующих и компенсирующих установок в электрических сетях;
- отсутствие четкой регламентации правовых и экономических отношений между энергоснабжающей организацией и потребителем электрической энергии.

Из перечисленного следует, что выполненные исследования влияния статических конденсаторов на характер режима работы асинхронных электродвигателей при возмущениях входного напряжения представляет теоретический и практический интерес.

В технологии добычи нефти при борьбе с отложениями парафинов и смолоасфальтенов рассмотрен тепловой метод воздействия на скважину, основанный на использовании электрической энергии, что также накладывает специфические требования к режиму напряжения и электропотребления. Поэтому для анализа переходных процессов рассматриваемой системы были использованы специальные математические методы и приемы исследования.

В данной главе сформулированы следующие актуальные научные задачи, направленные на повышение эффективности работы ЭКП, снижение непроизводительных затрат электрической энергии и продление ресурсов основных установок и механизмов при сохранении производительности на заданном уровне:

- разработка математических моделей ЭКДС, ЭКВО и дополнение аналитическими зависимостями метода расчета рабочих, механических характеристик и энергетических параметров этих комплексов;
- разработка математической модели ЭКОЛ и дополнение аналитическими зависимостями метода расчета эквивалентных параметров режима напряжения и электропотребления;
- разработка математической и экономической моделей ЭКП, дополнение аналитическими зависимостями метода расчета режима напряжения и электропотребления;
- разработка математической модели переходных процессов в электроприводах ЭКДС и дополнение метода расчета аналитическими зависимостями, описывающих параметры индивидуальных трансформаторов и скважинного нагревателя, входящих в состав ЭКДС;
- разработка организационно-технических мероприятий по оптимальному управлению централизованными и местными техническими средствами автоматического регулирования напряжения.

**Во второй главе** произведена компоновка структурных схем ЭКДС. Выявлены особенности комплектации различных вариантов добычного оборудования, и выделены две группы по комплектации электропривода: ЭКДС с погружным электроприводом (рис.1) и ЭКДС с наземным электроприводом (рис.2).

Погружные и наземные электроприводы, существенно различаются по конструктивному исполнению и техническим характеристикам. Из-за этих особенностей исследования установившихся и переходных процессов в асинхронном электродвигателе производились отдельно.

Разработана математическая модель ЭКДС и дополнен аналитическими зависимостями метод расчета рабочих, механических характеристик и энергетических параметров в установившихся процессах, что позволяет оценить составляющие потерь в комплексах добычных скважин и исследовать зависимость этих потерь от режимов работы электрооборудования.

Дополненный метод расчета отличается от известных тем, что в нём учтены параметры индивидуальных трансформаторов и разработанного скважинного нагревателя, а также он позволяет производить расчет режимов работы при восьми вариантах компоновки ЭКДС. Разработаны конструктивные особенности скважинного нагревателя, рассчитаны энергетические и массогабаритные параметры с учетом параметров скважины, насосно-компрессорной трубы и свойств добываемой эмульсии.

Математическое моделирование энергетических параметров производилось при варьировании уровня напряжения на зажимах АД в пределах от 0,8...1,1 о.е. от номинального уровня напряжения. В результате моделирования получены графики нелинейных зависимостей активной, реактивной и полной мощности, потерь активной мощности в ЭКДС, ЭКВО и в линиях электропередачи, потерь напряжения, коэффициента мощности и КПД в функции напряжения в центре питания (ЦП) с учётом и без учёта работы КУ. Получены графики зависимостей уровней напряжения ЦП в функции задаваемых уровней напряжения в конце линии. Эти нелинейные зависимости являются исходными данными для математической модели ЭКОЛ.

**В третьей главе** определены технологические особенности электроснабжения НГДК, к ним относятся:

- количество переключений привода РПН технически ограничено до 25 переключений в сутки, что существенно сказывается при определении рациональных уровней напряжения и потерь напряжения;
- радиально-магистральная схема распределительной электрической сети с приблизительно одинаковой длиной линий (6 км) допускает только один закон автоматического регулирования напряжения – это автоматическая стабилизация напряжения в ЦП;
- реальная нагрузка АД добычных установок находится в пределах  $0,7 * P_{ном.}$

Разработана структурная схема алгоритма расчета режима напряжения и электропотребления ЭКОЛ (рис.3), содержащая десять узлов, в которых подключена реальная электрическая нагрузка.

Разработана математическая модель ЭКОЛ, отличающаяся от известных моделей представлением электрической нагрузки в узлах в виде нелинейных зависимостей в функции напряжения, в то время как известные модели отходящих линий представляют электрическую нагрузку номинальными параметрами применяемого электрооборудования с учетом коэффициента загрузки и аппроксимирующих коэффициентов полинома второй степени. Известный метод расчета параметров режима напряжения и электропотребления дополнен аналитическими зависимостями эквивалентной электрической нагрузки узла, что позволяет оценить составляющие суммарных потерь в линиях и исследовать их зависимость от режимов работы электрооборудования.

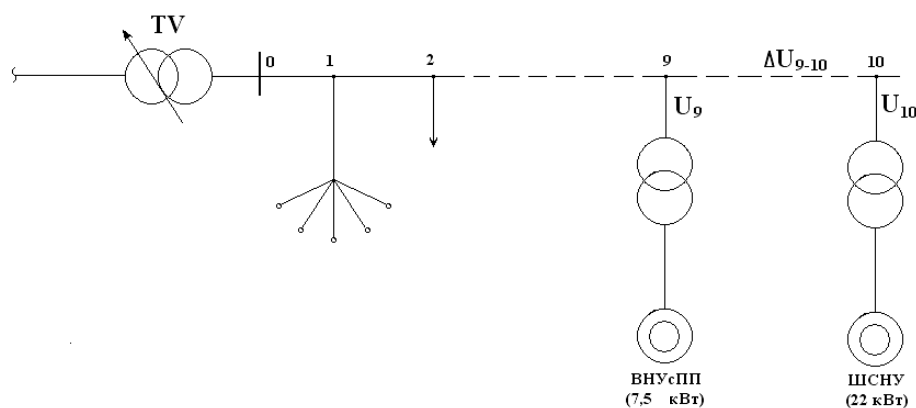


Рис.3. Общая структурная схема алгоритма расчета режима напряжения и электропотребления ЭКОЛ.

Математическая модель позволяет легко тиражировать количество узлов, т.е. при разветвлении отходящей линии или при увеличении количества узлов, расчеты производятся по той же схеме, принимая в качестве электрической нагрузки узла эквивалентные параметры добавляющегося ответвления, достоверность которых является достаточной для проведения исследований (погрешность не более 1%).

Учитывая выявленные особенности электроснабжения НГДК, при расчетах энергетических параметров режима работы ЭКОЛ уровень напряжения  $U_k$  варьировался в конце линии (рис.3). Расчёт производился от конца линии к началу.

При подключении к узлу "n" электроприемников эквивалентные

параметры определяются следующими зависимостями:

$$P_i = \sum_{m=1}^n P_{mi}; \quad Q_i = \sum_{m=1}^n Q_{mi}; \quad Q_{ci} = Q_{chl} \left( \frac{U_i}{U_H} \right)^2; \quad (1)$$

$$P'_i = P_i + P_{i-1} + \Delta P_{i,i-1} + Q_{ci} \operatorname{tg} \delta; \quad (2); \quad Q'_i = Q_i + Q_{i-1} + \Delta Q_{i,i-1} - \Delta Q_{ci}; \quad (3)$$

$$U_{i+1} = U_i + \frac{P'_i R_{i+1,i} + Q'_i X_{i+1,i}}{U_i}, \quad (4)$$

где:  $n$  – количество электроприемников, подключенных к  $i$ -му узлу.  $P_{mi}$ ,  $Q_{mi}$  – значения активной и реактивной мощности в электроприемнике "m", подключенном к  $i$ -му узлу ( $1 \leq m \leq n$ );  $P'_i$ ,  $Q'_i$  – эквивалентные значения активной и реактивной мощности  $i$ -того узла;  $U_{i+1}$  – уровень напряжения узла  $i+1$ ;  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла потерь в конденсаторах установки поперечной компенсации.

В результате моделирования получены нелинейные энергетические параметры ЭКОЛ, которые рассматривались как входные параметры для математической модели ЭКП.

Результаты математического моделирования отличаются от результатов базовой модели в о.е. третьим или пятым знаком после запятой, что подтверждает хорошую сходимость рассматриваемых математических моделей, т.е. погрешность меньше 1%. С учетом требований энергосистемы к режиму электропотребления были определены оптимальные и рациональные уровни напряжения и энергетические параметры режима работы ЭКОЛ. Оптимальные уровни напряжения в зависимости от характера нагрузки линии и места подключения электроприемников находятся в диапазоне 0,93...0,95 о.е. Подтверждено, что эффективным средством снижения потерь активной мощности в ЭКОЛ является автоматическая стабилизация рационального уровня напряжения при одновременной компенсации реактивной мощности и потерь напряжения.

**В четвертой главе** разработаны математическая модель ЭКП и метод

расчета режима напряжения и электропотребления этого комплекса, который дополнен аналитическими зависимостями эквивалентных энергетических параметров ЭКОЛ. Разработана экономическая модель ЭКП, которая позволила оценить выбираемый рациональный уровень напряжения по результатам моделирования режима работы ЭКП с различными нагрузками в совокупности с тарифами на электроэнергию и нормативными коэффициентами по отрасли.

Разработана имитационная модель ЭКП, которая объединила модели ЭКДС, ЭКВО и ЭКОЛ (гл. 2, 3) и экономическую модель ЭКП в единую систему в следующем порядке: первая модель – это математическая модель ЭКДС и ЭКВО (моделирование производилось как по индивидуальной нагрузке, так и по всему количеству различных электрических нагрузок узла; результаты данного моделирования представлены в табличной форме и в виде нелинейных графиков зависимостей; дальнейшее эквивалентирование параметров всех объектов узла проводилось методом поординатного суммирования при одном и том же уровне напряжения данного узла, эти эквивалентные параметры являлись исходной информацией для следующей модели); вторая модель – это математическая модель ЭКОЛ (несколько ЭКОЛ представляют в свою очередь эквивалентную электрическую нагрузку ЭКП); третья модель – математическая модель ЭКП; четвертая модель – экономическая модель ЭКП. В результате имитационного моделирования режима работы ЭКП получены графики зависимостей активной, реактивной и полной мощности в функции напряжения в ЦП с учетом и без учета работы КУ. Определены значения оптимальных и рациональных уровней напряжения. Произведена экономическая оценка, получен суммарный ожидаемый годовой экономический эффект, который составляет более 7 млн. руб/год (таблица 1).

В данной главе поставлена и комплексно решена задача автоматического управления КУ при одновременной автоматической стабилизации рационального уровня напряжения в ЦП. Разработаны и обоснованы организационно-технические мероприятия по оптимизации режима работы ЭКП, обеспечивающие снижение потерь электроэнергии при внедрении



Таблица 1.

## Суммарный ожидаемый годовой экономический эффект (ОГЭЭ), ΣЭг (по состоянию на 01.01.2006г.).

№ п/п	Наименование процесса	Рациональный уровень напряжения, автоматически стабилизируемый в центре питания	ОГЭЭ при добыче нефти, совмещ-й с работой вспомогат. оборудов-я, Эг.	Число часов работы в год, Т	ОГЭЭ за час	Кол-во рабочих дней ЭКП в году, п.	Число рабочих часов в день, t.	Составные части суммарного ОГЭЭ.	ОГЭЭ при добыче нефти	ОГЭЭ при работе двух насосов ДНС.	ОГЭЭ при работе КНС.	ОГЭЭ при работе БУ с разделиг-м трансф-ром в конце отходящей линии.
1.	Процесс добычи нефти	0,999		8 760	506,4	60	12	364 607	4 436 048			
2.	Процесс добычи нефти совмещаемый с режимом работы дожимной насосной станции.	0,999	12 131 236	8 760	1384,8	60	12	997 088		632 481		
3.	Процесс добычи нефти совмещаемый с режимом работы кустовой насосной станции.	1,0717	5 688 520	8 760	649,37	60	12	467 550			102 943	
4.	Процесс добычи нефти совмещаемый с режимом работы буровой установки.	1,029	8 020 336	8 760	915,56	270	18	4 449 639				1 988 543
5.	<b>Всего, ΣЭг</b>											<b>7 160 016</b>

полученных рекомендаций с сохранением производительности нефтедобывающего оборудования на заданном уровне.

**В пятой главе** разработаны математическая модель и аналитические зависимости переходных процессов в ЭКДС. Известный метод расчета переходных процессов асинхронного электропривода ЭКДС дополнен аналитическими зависимостями, описывающими новые элементы, влияющие на процесс пуска и самозапуска электропривода при различных внешних и внутренних возмущениях. Одним из элементов, влияющих на переходные процессы в ЭКДС, является скважинный нагреватель, применение которого обусловлено отложением парафина и смолоасфальтенов при добыче нефти на внутренней стенке насосно-компрессорной трубы (НКТ), увеличивающих момент сопротивления на валу электропривода ЭКДС.

Разработанный скважинный нагреватель, номинальной мощностью 3,3 кВт, устанавливается в скважине снаружи НКТ, на глубине, определяемой моментом фазового перехода парафина из аморфного состояния в кристаллическое. Разработана схема включения скважинного нагревателя в электрическую сеть ЭКДС рис.4.

Изучен вопрос влияния КУ и чисто активного сопротивления на характер переходного процесса при больших внешних возмущениях (отклонение напряжения до 40%), который представляет как теоретический, так и практический интерес. Скомпонована принципиальная однолинейная схема ЭКДС рис.5, которая дополнена новыми элементами - индивидуальными трансформаторами и скважинным нагревателем с питающим кабелем. В рассматриваемой схеме параметры предлагаемого скважинного нагревателя представлены дополнительной параллельной ветвью. Эта ветвь содержит последовательно соединенные активно-индуктивное сопротивление питающего кабеля и активное сопротивление скважинного нагревателя.

Ранее известные методы расчета и математические модели переходных процессов в ЭКДС рассматривались с Т-образным включением КУ. Предлагаемая схема (рис.5) имеет Г-образную схему включения КУ,

развернутую на 180°.

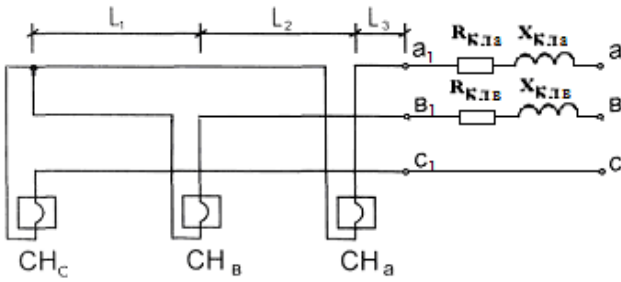


Рис.4. Схема включения скважинного нагревателя (CH)  
( $L_1, L_2, L_3$  – глубина установки CH).

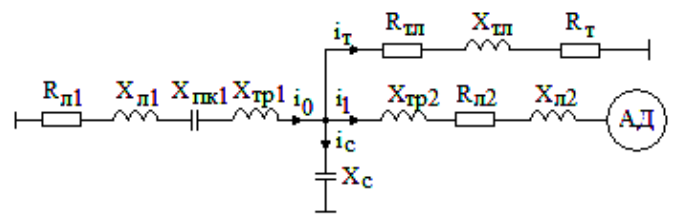


Рис.5. Принципиальная однолинейная схема замещения ЭКДС.

Автором предложены аналитические зависимости и алгоритм расчета режима напряжения и электромагнитной устойчивости АД. Проверка адекватности полученных результатов по предлагаемой математической модели в сравнении с результатами базовой модели, произведена на примере часто применяемого погружного электродвигателя (ПЭД) с номинальной мощностью 45 кВт.

По параметрам схемы замещения ЭКДС получена система дифференциальных уравнений, которые записаны в системе координат  $x$  и  $y$ , вращающейся с синхронной частотой.

$$U_0 = R_{л1}i_0 + X_{л1}(p + j)i_0 + U_{пк1} + U_c; \quad (5)$$

$$i_0 = \frac{1}{X_{пк1}}(p + j)U_{пк1}; \quad (6)$$

$$i_0 = i_1 + i_c + i_т = i_1 + \frac{1}{X_c}(p + j)U_c + \frac{R_1i_1 + (p + j)\psi_1}{Z_т}; \quad (7)$$

$$U_c = R_1i_1 + (p + j)\psi_1; \quad (8)$$

$$i_1 = \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + X_1^2}}(p + j)U_c = \frac{(p + j)U_c}{Z_1}; \quad (9)$$

$$0 = R_2i_2 + (p + js)\psi_2, \quad (10)$$

где:  $p$  – символ дифференцирования  $\frac{d}{dt}$ ;  $j$  – символ мнимой части комплексного числа;  $U_0$  – напряжение питающей линии;  $U_{пк1}$  – напряжения на зажимах установки продольной компенсации;  $U_c$  – напряжение на зажимах установки поперечной компенсации;  $\psi_1, \psi_2$  – потокосцепления статора и

ротора погружного электродвигателя;  $i_2$ ,  $i_2$  – ток ротора и статора погружного электродвигателя;  $i_T$  – ток скважинного нагревателя;  $X_{ПК}$ ,  $X_C$  – индуктивные сопротивления УПК и УПЕК;  $R_{л1}$ ,  $X_{л1}$  – активное и индуктивное сопротивления питающей линии и силового трансформатора;  $Z_T$  – модуль полного сопротивления ветви со скважинным нагревателем;  $Z_1$  – модуль полного сопротивления ветви АД;  $R_2$  – активное сопротивление ротора.

Эти уравнения приведены к канонической форме (форме Коши) и дополнены уравнениями движения асинхронного двигателя и момента сопротивления. Входное напряжение представлено в виде ступенчатой функции, которая характеризует степень снижения напряжения и заданную продолжительность. В методе расчета сделаны общепринятые допущения, а результаты математического моделирования представлены в общепринятой системе относительных единиц.

Результаты моделирования приведены в диссертации в виде графиков зависимостей электромагнитного момента  $M(t)$ , скольжения  $s(t)$ , напряжения на зажимах электродвигателя  $U_d(t)$  и тока статора  $I_s(t)$ .

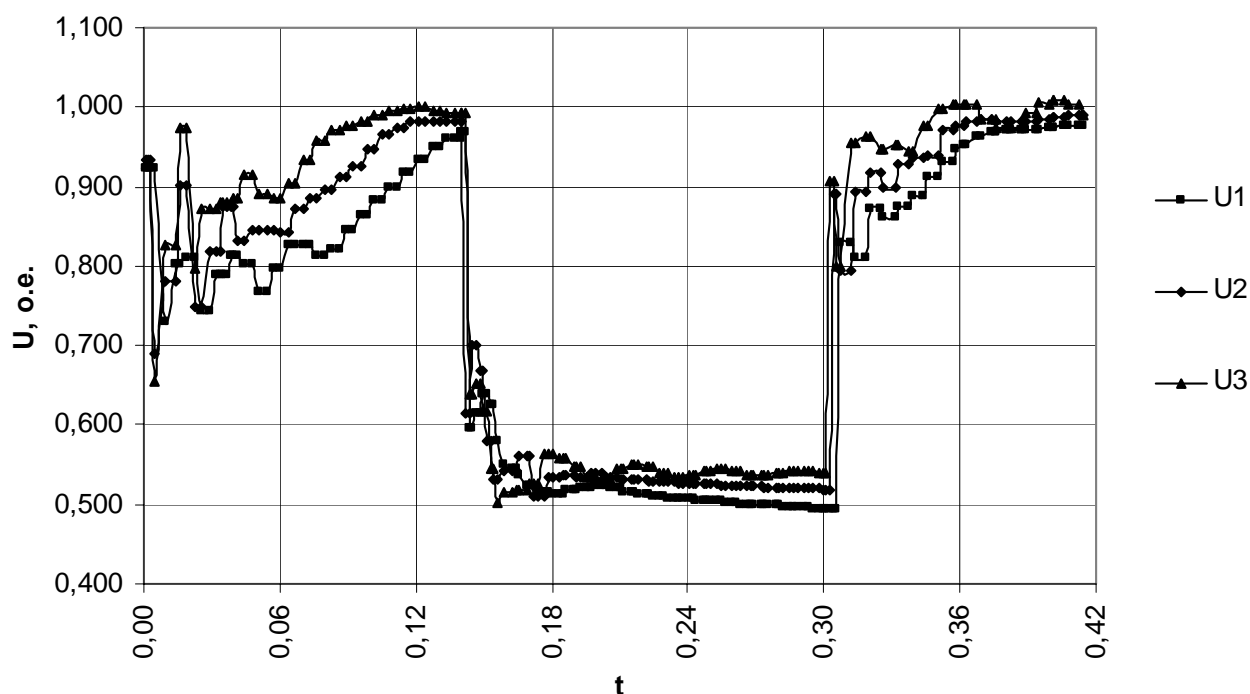


Рис.6. Графики зависимостей напряжения  $U$  в функции времени ( $t$ ) при пуске погружного электродвигателя, где  $U_1$  – напряжение на зажимах ПЭД без работы КУ.  $U_2$  – напряжение на зажимах ПЭД при компенсации реактивной мощности и потерь напряжения ( $X_{УПК1} = X_{ЭКДС}$ ).

$U_3$  – напряжение на зажимах ПЭД при компенсации реактивной мощности и потерь напряжения ( $X_{УПК2} = 2 * X_{ЭКДС}$ ).

Из результатов анализа зависимостей, приведенных на рис.6, видно, что напряжение на зажимах двигателя, до провала напряжения, при отсутствии КУ достигает установившегося значения напряжения, равного 0,95о.е., за 0,14с., при включении первой ступени компенсации потерь напряжения (УПК1) и УПЕК, установившееся значение напряжения достигается за 0,105с., а при добавлении второй ступени компенсации потерь напряжения (УПК2) – за 0,076с.

После провала напряжения, при отсутствии КУ установившийся режим работы ПЭД наступает по истечении 0,36с., при включении первой ступени компенсации потерь напряжения (УПК1) и УПЕК – 0,35с., а при добавлении второй ступени компенсации потерь напряжения (УПК2) – 0,34с.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработаны научно обоснованные организационно-технические мероприятия по регулированию режима напряжения и электропотребления ЭКП с целью снижения потерь электрической энергии.

Разработаны математические модели электротехнического комплекса предприятия и его основных элементов, которые позволили определить рациональные энергетические параметры режима напряжения и электропотребления при эксплуатации этих комплексов.

Дополнены аналитическими зависимостями методы расчетов энергетических параметров электротехнического комплекса предприятия и его основных элементов при различных внешних и внутренних возмущениях, что позволило обосновать и оценить принимаемые решения в области проектирования, создания и эксплуатации этих комплексов.

С учётом технологии добычи нефти и применяемого специфического электрооборудования (ПЭД), определен рациональный уровень напряжения и обоснован диапазон изменения напряжения питающей электрической сети, соответствующие требованиям ГОСТ 13109-97 и техническим ограничениям работы привода РПН. В результате чего удалось повысить степень автоматизации системы электроснабжения НГДК, уменьшить прямые и

косвенные затраты на электроэнергию, улучшить режим работы всего электрооборудования, сетевой автоматики и релейной защиты.

Доказана техническая и экономическая целесообразность автоматической стабилизации предложенного рационального уровня напряжения с одновременной компенсацией реактивной мощности и потерь напряжения.

Выполнены исследования переходных процессов в ЭКДС, определены рациональные параметры КУ, обеспечивающие гарантированный пуск и самозапуск электропривода ЭКДС.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Научно-технические статьи**

1. Д.Н. Нурбосынов, Т.В. Табачникова. Методика определения оптимальных и рациональных уровней напряжения электротехнического комплекса предприятия нефтегазодобывающей промышленности. // Нефть и газ Западной Сибири. Материалы международной научно-технической конференции. Тюмень: "Феликс", 2005.- Т.2. - С.157-158.
2. Т.В. Табачникова. Разработка математической модели электротехнического комплекса добычной скважины (ЭКДС) со скважинным нагревателем (СН). // Ученые записки АГНИ. - Альметьевск, 2005. - Т.3. - С.19.
3. Д.Н. Нурбосынов, Т.В. Табачникова, А.Т. Ткач. Имитационная модель электротехнического комплекса предприятия. // Проблемы машиноведения и машиностроения. - Межвуз. сб., вып.35. – СПб: СЗТУ, 2006.-С.22.
4. Д.Н. Нурбосынов, Т.В. Табачникова, А.Т. Ткач. Математическое моделирование переходных процессов погружных асинхронных двигателей. // Ученые записки АГНИ.-Альметьевск, 2006.-Т.2.-С.87.
5. Д.Н. Нурбосынов, Т.В. Табачникова, А.Т. Ткач, Э.М. Шакирьянова. Оптимизация режимов работы трансформатора собственных нужд электротехнического комплекса предприятия. // Ученые записки АГНИ. - Альметьевск, 2006.-Т.2.-С.91.

### **Тезисы докладов на научных конференциях**

6. Т.В. Табачникова. Совершенствование режима работы электротехнического

комплекса добычной скважины. // XII Туполевские чтения. / Международная молодежная научная конференция (10-11 ноября 2004г). – Казань: Изд-во Казан.гос.техн.ун-та, 2004. – С.162-163. – ISBN 5 5-7579-07509.

7. Т.В. Табачникова. Оптимизация параметров скважинных нагревателей при добыче нефти на месторождениях поздней стадии функционирования. // XII Туполевские чтения. / Международная молодежная научная конференция (10-11 ноября 2004г). – Казань: Изд-во Казан.гос.техн.ун-та, 2004. – С.163-164. – ISBN 5 5-7579-07509.
8. Д.Н. Нурбосынов, Т.В. Табачникова, А.Т. Ткач. Имитационная модель системы электроснабжения предприятия. // Материалы научной сессии по итогам 2004 года. - Альметьевск, 2005. – С.107.
9. Д.Н. Нурбосынов, Т.В. Табачникова. Совершенствование скважинного нагревателя электротехнического комплекса добычной установки. // Материалы научной сессии по итогам 2004 года. - Альметьевск, 2005. – С.108.

**Диссертанту принадлежат** в вышеперечисленных публикациях разработка концепции, выбор исходных данных для моделирования, анализ идеи разработок, а также постановка задач. Доля автора составляет: в публикации 2, 6, 7 – 100%; в публикациях 1, 8 – 50%; в публикациях 3, 4, 9 – 40%; в публикации 5 – 25%.