

На правах рукописи



НИКУЛИН Олег Викторович

**ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ СИНХРОННЫЙ
ЭЛЕКТРОПРИВОД БУРОВОГО НАСОСА
(РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ)**

Специальность:

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа – 2012

Работа выполнена на кафедре электротехники и электрооборудования предприятий ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Шабанов Виталий Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Хайруллин Ирек Ханифович
кафедра электромеханики ФГБОУ ВПО
«Уфимский государственный авиационный
технический университет»

доктор технических наук, доцент
Баширов Мусса Гумерович
кафедра электрооборудования и автоматики
промышленных предприятий филиала
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет» в
г. Салавате

Ведущее предприятие ООО «УК «Татбурнефть», г. Альметьевск

Защита состоится «26» 12 2012 г. в 9⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.288.02 Уфимского государственного авиационного технического университета по адресу: 450000, г. Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12, актовй зал 1-го корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного авиационного технического университета.

Автореферат разослан «23» 11 2012.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



А.В. Месропян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Вопросы энергосбережения и повышения качества технологического процесса средствами электропривода (ЭП) в последнее время становятся все актуальнее и рассматриваются во всех областях промышленности. Энергосбережение средствами ЭП подразумевает применение регулируемого ЭП и позволяет достичь экономии электроэнергии до 50 %.

Повышение энергоемкости буровых установок (БУ), обусловленное значительным расширением задач при бурении нефтегазовых скважин (необходимость бурения в новых районах, увеличение глубин бурения, горизонтальное бурение), а также постоянный рост цен на энергоносители повышают требования к снижению расхода электроэнергии при бурении, с одновременным увеличением требований к производительности БУ, их экономичности и к оптимизации режимов управления. Такие повышенные требования может удовлетворить только регулируемый ЭП.

Основными потребителями электроэнергии на БУ являются главные механизмы: буровая лебедка для спуска и подъема колонны бурильных труб (КБТ), буровой ротор для вращения КБТ и буровые насосы (БН). При этом доля потребления электроэнергии на БН составляет более 50 % от полного потребления электроэнергии буровой установкой за весь цикл строительства скважины.

В настоящее время в бурении широко используются БУ с нерегулируемым ЭП. Для привода буровых лебедок, роторов и насосов на таких установках применяются нерегулируемые синхронные (СД) и асинхронные двигатели (АД) с фазным ротором. Вновь вводимые, новые БУ, в качестве приводов главных механизмов имеют электродвигатели (ЭД) постоянного тока и частотно-регулируемые АД. Вопросы, связанные с регулируемым ЭП главных механизмов БУ рассматривались, например, в работах Атакишиева Т.А., Белоусенко И.В., Блантера С.Г., Ершова М.С., Жеваго К.А., Меньшова Б.Г., Моцохейна Б.И., Парфенова Б.М., Суда И.И., Шабанова В.А., Шевырева Ю.В., Шпилевого В.А., Яризова А.Д. Однако в указанных работах рассматриваются либо нерегулируемый ЭП БУ, либо регулируемый на базе ЭД постоянного тока. Частотно-регулируемый ЭП, как направление совершенствования ЭП главных механизмов БУ, рассматривается на базе АД, а анализ частотно-регулируемого синхронного ЭП в них отсутствует. Поэтому, несмотря на большое количество работ, посвященных ЭП главных механизмов БУ, проблему создания регулируемого ЭП на основе СД нельзя считать решенной.

Одно из актуальных направлений внедрений частотно-регулируемого ЭП БН это установка преобразователей частоты (ПЧ) к имеющимся нерегулируемым электродвигателям. Это позволит на базе действующих нерегулируемых

получить частотно-регулируемый ЭП. Таким образом, разработка и исследование частотно-регулируемого синхронного ЭП БН, является актуальной научной задачей.

Цель работы и задачи исследований. Цель работы заключается в разработке и исследовании частотно-регулируемого синхронного ЭП БН для действующих БУ с нерегулируемыми СД.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие **основные задачи:**

1. Разработана структурная схема регулируемого ЭП БН для действующих БУ с СД, обеспечивающая автоматизацию процесса бурения.
2. Произведен анализ алгоритмов адаптивного и векторного частотного регулирования синхронного ЭП БН.
3. Разработана имитационная модель синхронного ЭП БН для визуализации процесса моделирования и исследования свойств синхронного электропривода при частотном регулировании.
4. Выполнена оценка технологической эффективности при внедрении синхронного частотно-регулируемого ЭП БН.

Методы исследований. Поставленные задачи решались методами математического анализа, теории электрических цепей, теории автоматического управления, математического моделирования с помощью специализированного программного обеспечения, численными методами решения с помощью электронно-вычислительных машин (ЭВМ), методом экспериментального подтверждения. При разработке модели электропривода был использован пакет прикладных программ «*MatLab*», а именно его расширение «*Simulink*».

На защиту выносятся:

1. Структурная схема регулируемого ЭП БН для действующих БУ с СД, обеспечивающая автоматизацию процесса бурения и повышение подачи насоса при достижении предельно допустимого давления, что улучшает очистку забоя и повышает скорость бурения.
2. Адаптивный алгоритм частотного регулирования СД, обеспечивающий регулирование частоты питающей сети в функции подачи БН по мере углубления скважины, регулирование напряжения в функции тока статора или постоянства перегрузочной способности СД и регулирование тока возбуждения в функции заданного коэффициента мощности, а так же алгоритм векторного управления моментом СД БН, основанный на использовании системы координат $p - t$, в которой ось p совпадает с вектором основного магнитного потока в воздушном зазоре и позволяющий выполнять частотное регулирование в режимах бурения с повышенными требованиями к динамическим свойствам ЭП.
3. Математическая модель синхронного частотно-регулируемого ЭП БН, позволяющая исследовать свойства СД при частотном регулировании.

Научная новизна:

1. Выполнен анализ частотно-регулируемого синхронного ЭП БН на примере разработанной структурной схемы для действующих БУ с СД, отличающейся от существующих наличием механизмов автоматизации процесса бурения, исключающие ручное задание скорости привода и контроль давления на выходе насоса.

2. Разработан адаптивный алгоритм частотного регулирования СД БН и его программная реализация (свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614168), обеспечивающий работу недогруженного СД с номинальным КПД.

3. Разработан алгоритм векторного управления моментом СД БН, основанный на использовании векторов тока и основного магнитного потока, с поддержанием коэффициента мощности, равным единице, исключающий необходимость дополнительного преобразования координат из системы $d - q$ в систему $p - \tau$.

4. Создана имитационная модель синхронного частотно-регулируемого ЭП БН, в которой реализованы механизмы адаптации и векторное регулирование.

Практическую значимость имеют:

1. Разработанная структурная схема синхронного частотно-регулируемого ЭП БН обеспечивает автоматизацию процесса бурения, исключает ручное задание скорости и контроль давления на выходе насоса оператором, повышение подачи насоса при достижении предельно допустимого давления, что улучшает очистку забоя и повышает скорость бурения.

2. Адаптивный алгоритм частотного регулирования СД БН существенно снижает потери в стали и на намагничивание в ЭД при работе с малыми нагрузками во вспомогательных режимах (восстановление циркуляции, промывка и т.п.).

3. Алгоритм векторного управления моментом СД БН, обеспечивающий требования быстродействия при бурении скважин в сложных геологических условиях.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов подтверждается корректным использованием математических методов, проверкой теоретических выводов методами математического моделирования и результатами экспериментальных исследований, проведенных на действующих БУ.

Реализация результатов работы подтверждается использованием теоретических положений и методик расчета в ОАО «Татнефть» при бурении разведочных и эксплуатационных скважин.

Результатами работы является внедрение в ОАО «Татнефть», ООО «УК «Татбурнефть»: частотно-регулируемого асинхронного ЭП БН; методики рас-

чета экономии электроэнергии при бурении скважин на нефть и газ при частотно-регулируемом ЭП БН; режима смены втулок и поршней при регулируемом ЭП БН; закон частотного регулирования ЭП БН; технического задания на изготовление высоковольтного синхронного частотно-регулируемого электропривода БН.

Апробация работы. Основные положения, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на тринадцати научных конференциях регионального, всероссийского и международного уровня:

59-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Уфа, 2008;

II Всероссийская научно-техническая конференция «Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий», Уфа, 2009;

VI Молодежная научно-практическая конференция ООО «УК «Татбурнефть» ОАО «Татнефть», г. Елабуга, 2009;

IX молодежная научно-практическая конференция, посвященная 50-летию НГДУ «Джалильнефть» ОАО «Татнефть», р.п. Джалиль, 2009;

14-я Международная научно-техническая конференция при 14-й специализированной выставке «Строительство. Коммунальное хозяйство. Энергосбережение» «Проблемы строительного комплекса России», г. Уфа, 2010;

Всероссийский научно-практический семинар «Энергоэффективность и энергобезопасность на предприятиях промышленности и жилищно-коммунального хозяйства», г. Салават, 2010;

5-я Международная молодежная конференция «Тинчуринские чтения», г. Казань, 2010;

Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодежи «Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения», г. Уфа, 2010;

Научно-практический семинар секции «Энергетика», г. Азнакаево, 2009;

Молодежная научно-практическая конференция ООО «УК «Татбурнефть», г.Елабуга, 2010;

III Всероссийская научно-техническая конференция (с международным участием) «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий», Уфа, 2011;

Международная научно-практическая конференция, посвященная 20-летию независимости Республики Казахстан «Нефтегазовый комплекс в условиях индустриально-инновационного развития Казахстана», г. Атырау, Казахстан, 2011.

VIII международная научно-практическая конференция «Перспективные разработки науки и техники – 2011», г. Przemysl, Польша, 2011.

Публикации по теме диссертации. Список публикаций включает 20 научных трудов, в том числе 15 статей, из которых 3 опубликованы в изданиях перечня ВАК.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 130 наименований, и 3 приложения. Общий объем диссертации 137 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту, отмечена их новизна и практическая значимость. Приведены сведения о внедрении результатов, апробации работы и публикациях.

В первой главе проведен обзор существующих решений в области регулируемого электропривода буровых насосов, определены требования к электроприводу БН. Выявлены достоинства и недостатки электропривода по системе тиристорный преобразователь – двигатель (ТП – Д) и преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ – АД). Рассмотрены математические модели электроприводов.

Из анализа научно-технической и патентной литературы сделан вывод о том, что регулируемый ЭП БН выполняется в основном на базе ЭД постоянного тока. Самые последние БУ стали оснащаться частотно-регулируемым ЭП по системе ПЧ – АД.

Имеется большое количество работ, посвященных математическому моделированию ЭП переменного тока. Однако большинство работ посвящено моделированию АД и СД с постоянными магнитами на роторе. Регулируемый синхронный ЭП с электромагнитным возбуждением рассматривается в основном в режиме вентильного двигателя. Это показывает актуальность разработки регулируемого синхронного ЭП в режиме частотного регулирования с воздействием по трем каналам управления: напряжение и частота питания двигателя и ток возбуждения.

Установлено, что отсутствуют структурные схемы частотно-регулируемого синхронного ЭП БН, позволяющие автоматизировать процесс бурения.

Отсутствуют математические модели регулируемого ЭП на основе СД, позволяющие исследовать процессы в СД.

Во второй главе разработана структурная схема частотно-регулируемого синхронного электропривода БН, в которую введены новые элементы, такие как задатчик давления (ЗД), задатчик минимальной подачи (ЗП), датчик давле-

ния (ДД), устройство контроля скорости (УКС) и блок формирования закона управления (БФЗУ) (рисунок 1).

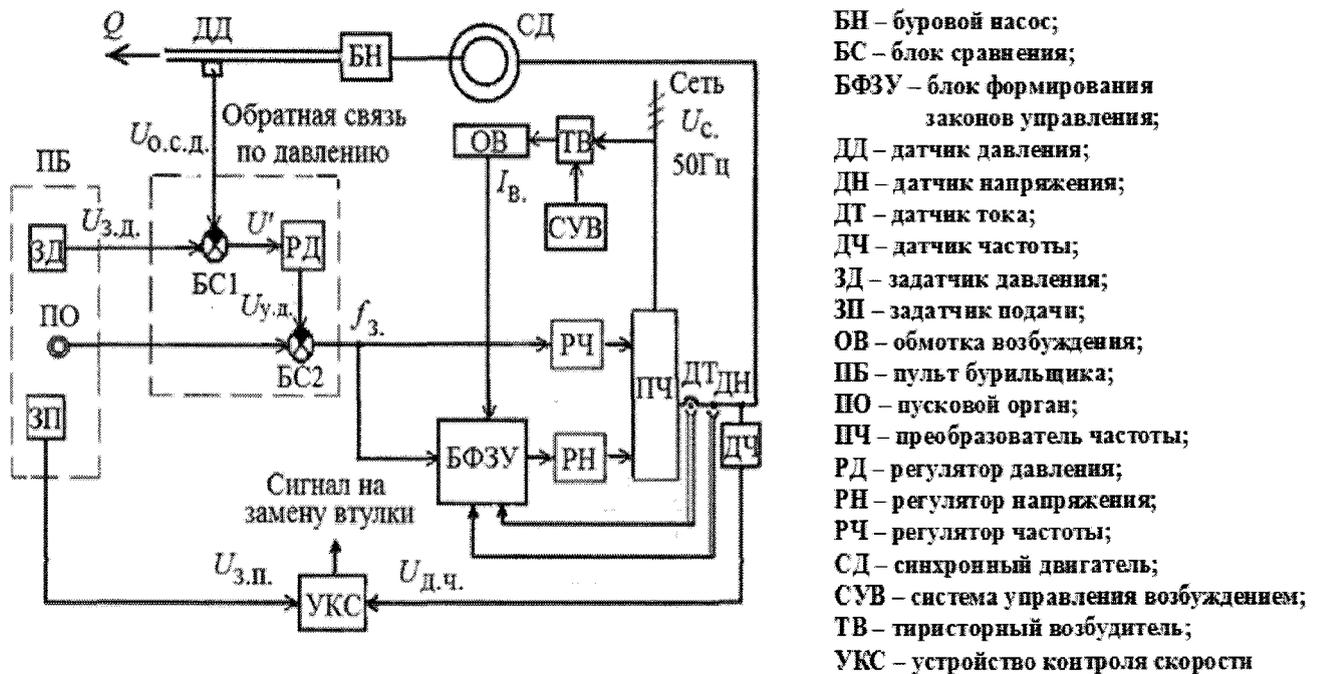


Рисунок 1 – Структурная схема частотно-регулируемого синхронного электропривода БН

Вследствие увеличения давления, развиваемого БН в процессе бурения при постоянной подаче, увеличивается нагрузка на валу ЭД. Поэтому по мере увеличения глубины скважины подачу БН необходимо ограничивать. При нерегулируемом ЭП для изменения подачи БН применяются сменные цилиндрические втулки. Вторая задача, решаемая сменой втулок, это повышение максимально допустимого давления, развиваемого БН.

Пуск электропривода пусковым органом ПО, а также задание максимального значения давления задатчиком давления ЗД и минимальной подачи Q задатчиком подачи ЗП производится на пульте бурильщика ПБ (рисунок 1).

Сигнал задания давления $U_{з.д.}$ в первом блоке сравнения БС1 сравнивается с сигналом от датчика давления $U_{о.с.д.}$. В начале процесса бурения давление на выходе насоса меньше допустимого для данной втулки, разность сигналов U' от задатчика давления и от датчика давления положительна, и на выходе первого блока сравнения сигнал не появляется. При этом преобразователь ПЧ управляется сигналом с выхода пускового органа, частота на выходе преобразователя равна 50 Гц, а подача определяется параметрами БН.

С увеличением глубины скважины давление растет, а, следовательно, увеличивается и сигнал от датчика давления. При достижении давления на выходе насоса заданного на пульте бурильщика, на выходе первого блока сравнения сигнал принимает отрицательное значение и на выходе регулятора давления формируется сигнал управления давлением $U_{у.д.}$, который поступает на

второй блок сравнения БС2. Сигнал задания частоты $f_{з.}$, на выходе второго блока сравнения, снижается и частота на выходе преобразователя становится меньше 50 Гц. Требуемый закон частотного регулирования формируется в БФЗУ.

Задающий сигнал минимальной подачи $U_{з.п.}$ в УКС сравнивается с сигналом датчика частоты $U_{д.ч.}$. При достижении равенства сигналов подается сигнал на пульт бурильщика, после чего бурильщик принимает решение о продолжении процесса бурения или о смене втулки.

Графики, характеризующие различные режимы работы насоса и его привода, показаны на рисунке 2. В целом при нерегулируемом ЭП изменение режимов будет происходить по ступенчатому графику: 1-2, 3-4, 5-6. Из графиков видно, что во всех режимах, кроме основных точек 2, 4 и 6, мощность насоса используется не полностью. При регулируемом ЭП можно приблизиться к кривой постоянства мощности путем снижения частоты вращения. Тогда процесс будет протекать по ступенчатой ломаной линии 1-2-3'-4-5'-6. Анализ графиков показывает, что в данном случае мощность насоса используется полнее, но все равно не полностью, поэтому требуется использовать разные законы регулирования, формируемые в БФЗУ в процессе бурения скважины, для чего необходимо выполнить анализ свойств частотно-регулируемого СД на разных режимах бурения.

Для анализа процессов в частотно-регулируемом синхронном ЭП получены новые аналитические зависимости СД в относительных единицах, в которых при номинальном режиме их параметры получаются равными единице, а не 0,9 о.е., как при других базисных значениях, что затрудняет распространение полученных результатов на аналогичные синхронные электродвигатели.

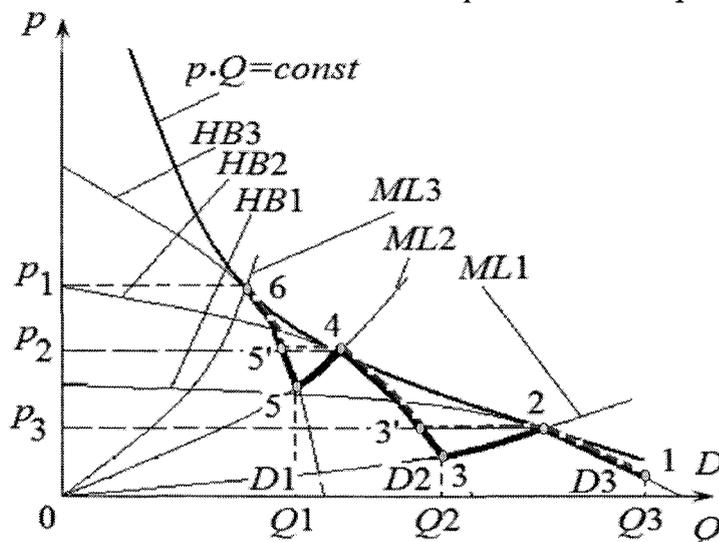


Рисунок 2 – Режим работы бурового насоса и его привода:
 HB1, HB2, HB3 – характеристики насоса при различных диаметрах втулок;
 ML1, ML2, ML3 – характеристики манифольда и скважины в зависимости
 от глубины скважины

Выражение электромагнитного момента получено в виде

$$\mu = \frac{\gamma \cdot i_f \cdot I_{f\text{ном.}} \cdot x_{ad}}{x_d \cdot \alpha \cdot I_{\text{ном.}} \cdot \cos\varphi_{\text{ном.}}} \cdot \sin\theta + \frac{\gamma^2}{2 \cdot \alpha^2 \cdot \cos\varphi_{\text{ном.}}} \cdot \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \sin 2\theta, \quad (1)$$

где

$$\frac{I_{f\text{ном.}}}{I_{\text{ном.}}} = \frac{\cos\theta + x_d \cdot \sin(\theta + \varphi)}{x_{ad}}, \quad (2)$$

ЭДС, наведенная потоком возбуждения

$$e_f = \gamma \cdot \cos\theta + x_d \cdot i_d, \quad (3)$$

составляющая тока статора по оси d

$$i_d = \frac{\gamma \cdot \cos\theta - i_f \cdot x_{ad} \cdot \alpha}{x_d \cdot \alpha}, \quad (4)$$

составляющая тока статора по оси q

$$i_q = \frac{\gamma \cdot \sin\theta}{x_q \cdot \alpha}, \quad (5)$$

угол нагрузки

$$\theta = \arctg \left(\frac{i \cdot \alpha \cdot x_q \cdot \cos\varphi}{U \pm i \cdot \alpha \cdot x_q \cdot \sin\varphi} \right), \quad (6)$$

предельный угол нагрузки:

$$\theta_{\text{пред.}} = \arccos \left(0,5 \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{e_f}{\gamma \cdot 2 \cdot (x_d/x_q - 1)} \right)^2 + 2} - \frac{e_f}{\gamma \cdot 2 \cdot (x_d/x_q - 1)} \right) \right), \quad (7)$$

максимальный момент

$$\begin{aligned} \mu_{\text{макс.}} &= \frac{\gamma \cdot i_f \cdot I_{f\text{ном.}} \cdot x_{ad}}{x_d \cdot \alpha \cdot I_{\text{ном.}} \cdot \cos\varphi_{\text{ном.}}} \cdot \sin\theta_{\text{пред.}} + \\ &+ \frac{\gamma^2}{2 \cdot \alpha^2 \cdot \cos\varphi_{\text{ном.}}} \cdot \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \sin 2\theta_{\text{пред.}} \end{aligned} \quad (8)$$

На основе полученных уравнений для выбора оптимальных законов управления, формируемых в БФЗУ, выполнены расчеты энергетических параметров СД при варьировании напряжения и частоты; получены и исследованы законы регулирования тока возбуждения при постоянстве угла нагрузки и перегрузочной способности при регулировании частоты и напряжения при постоянном отношении напряжения к частоте, равном единице.

Выведен закон регулирования тока возбуждения с постоянным углом нагрузки θ при частотном регулировании СД:

$$i_f = \frac{\left(\mu - \frac{1}{2 \cdot \cos\varphi} \cdot \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \sin 2\theta \right)}{\frac{I_{f\text{ном.}} \cdot x_{ad}}{x_d \cdot I_{\text{ном.}} \cdot \cos\varphi_{\text{ном.}}} \cdot \sin\theta}. \quad (9)$$

При постоянном угле θ , перегрузочная способность k_m при регулировании тока возбуждения по выражению (9) снижается при снижении момента нагрузки. Перегрузочную способность можно сохранить неизменной, если ток возбуждения регулировать по выражению

$$i_f = \frac{\left(\mu_{\text{макс.}} - \frac{1}{2 \cdot \cos\varphi} \cdot \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \sin 2\theta_{\text{пред.}} \right)}{\frac{I_{f\text{ном.}} \cdot x_{ad}}{x_d \cdot I_{\text{ном.}} \cdot \cos\varphi_{\text{ном.}}} \cdot \sin\theta_{\text{пред.}}} \quad (10)$$

Мощность насоса и его привода используется не полностью в начале процесса бурения – когда давление на выходе насоса не велико, а также во вспомогательных режимах – восстановление циркуляции, промывка и т.п. Поэтому для оптимального режима работы двигателя в этих условиях необходимо раздельное воздействие по трем каналам: напряжение, частота и ток возбуждения.

На основе структурной схемы (рисунок 1) и режимов работы БН и его привода (рисунок 2) разработан алгоритм раздельного регулирования напряжения, частоты и тока возбуждения и программа определения напряжения статора и тока возбуждения синхронного электродвигателя при фиксированном значении частоты для реализации частотного регулирования с номинальным током статора. Это позволяет снизить потери мощности при работе СД с малыми нагрузками. Так, при нерегулируемом электроприводе БН при бурении скважины № 29394 ООО «УК «Татбурнефть» средние потери мощности за цикл бурения составили 300 кВт. В случае частотного регулирования с использованием адаптивного алгоритма КПД СД равен номинальному значению. Таким образом, при регулировании напряжения в функции тока статора будут снижаться потери мощности и энергии.

Идея адаптивного алгоритма частотного регулирования СД заключается в следующем. Регулирование частоты питающей сети производится в функции необходимой подачи БН, и задается пусковым органом на пульте бурильщика (рисунок 1); регулирование напряжения блоком БФЗУ осуществляется в функции тока статора или постоянства перегрузочной способности; регулирование тока возбуждения, системой управления возбуждением СУВ, осуществляется в функции заданного коэффициента мощности.

Но такой закон нельзя поддерживать на протяжении всего процесса бурения. По статистическим данным буровой компании ООО «УК «Татбурнефть» в процессе бурения могут возникать резкие скачки давления, длительностью до 5-6 секунд, в следующих ситуациях: при бурении винтовым забойным двигателем – в случае увеличения осевой нагрузки; при бурении в сложных геологических условиях; при заклинивании долота в глинистых породах. В этих случаях скалярное управление моментом может не удовлетворять требованиям быстро-

действия. При этом целесообразно использовать векторное управление моментом.

Предложен алгоритм векторного управления моментом синхронного двигателя бурового насоса, основанный на использовании системы координат $\rho - \tau$, в которой ось ρ совпадает с вектором основного магнитного потока в воздушном зазоре (рисунок 3).

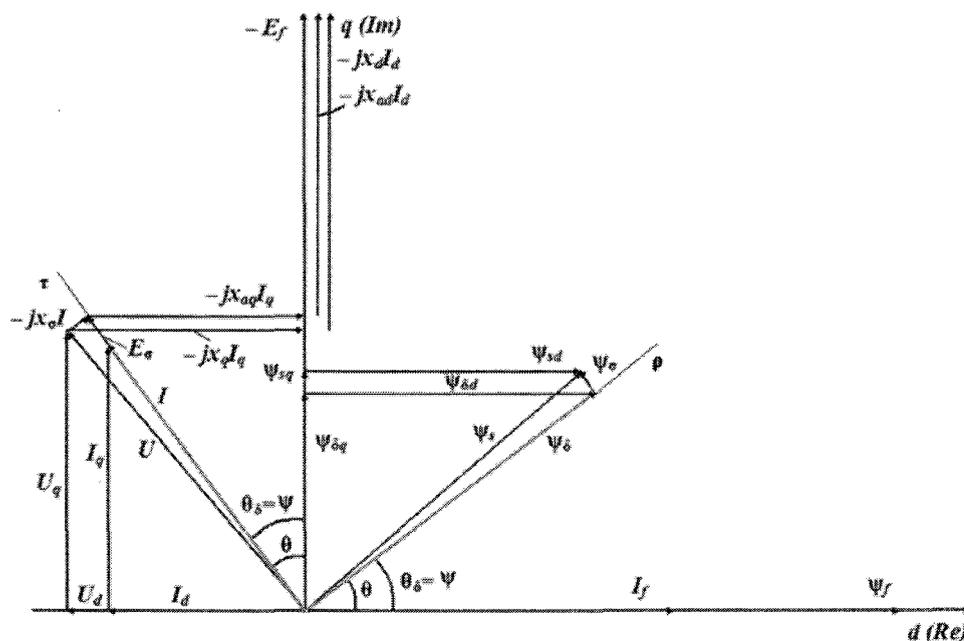


Рисунок 3 – Векторная диаграмма ЭДС и потокосцеплений СД при совпадении по фазе тока и ЭДС

Электромагнитный момент двигателя в системе координат $\rho - \tau$ является произведением тока I_τ и потокосцепления ψ_ρ . Векторное управление предложено выполнять при совпадении тока I и ЭДС статора E_s . Для этого ток возбуждения двигателя следует регулировать так, чтобы вектор тока статора совпадал бы по фазе с ЭДС в обмотке статора.

Тогда вектор тока статора будет перпендикулярен потокосцеплению основного магнитного потока. При этом проекция тока статора на ось τ будет равна полному току, а электромагнитный момент будет определяться произведением тока и потокосцепления основного магнитного потока. При этом при вычислении момента не требуется разложение тока статора по осям ρ и τ , а в процессе частотного управления изменением тока возбуждения поддерживать равным нулю угол между ЭДС и током в обмотке статора.

Исследована зависимость угла между напряжением и ЭДС, наибольшее значение которого имеет место при номинальной частоте. При снижении частоты значение этого угла снижается. Погрешность, вносимая несовпадением по фазе тока и ЭДС статора, оценена, по зависимости электромагнитного момента от синуса угла между векторами результирующего потокосцепления и тока ста-

тора. Максимальное значение угла составляет $96,5^\circ$, синус которого отличается от единицы менее, чем на 1%. Поэтому можно считать, что для совпадения по фазе тока статора и ЭДС достаточно так регулировать ток возбуждения, чтобы СД работал с коэффициентом мощности равным единице.

В третьей главе разработана математическая модель, учитывающая особенности технологического процесса бурения.

Математическая модель представлена как система управляемых ПЧ, СД и БН (рисунок 4).

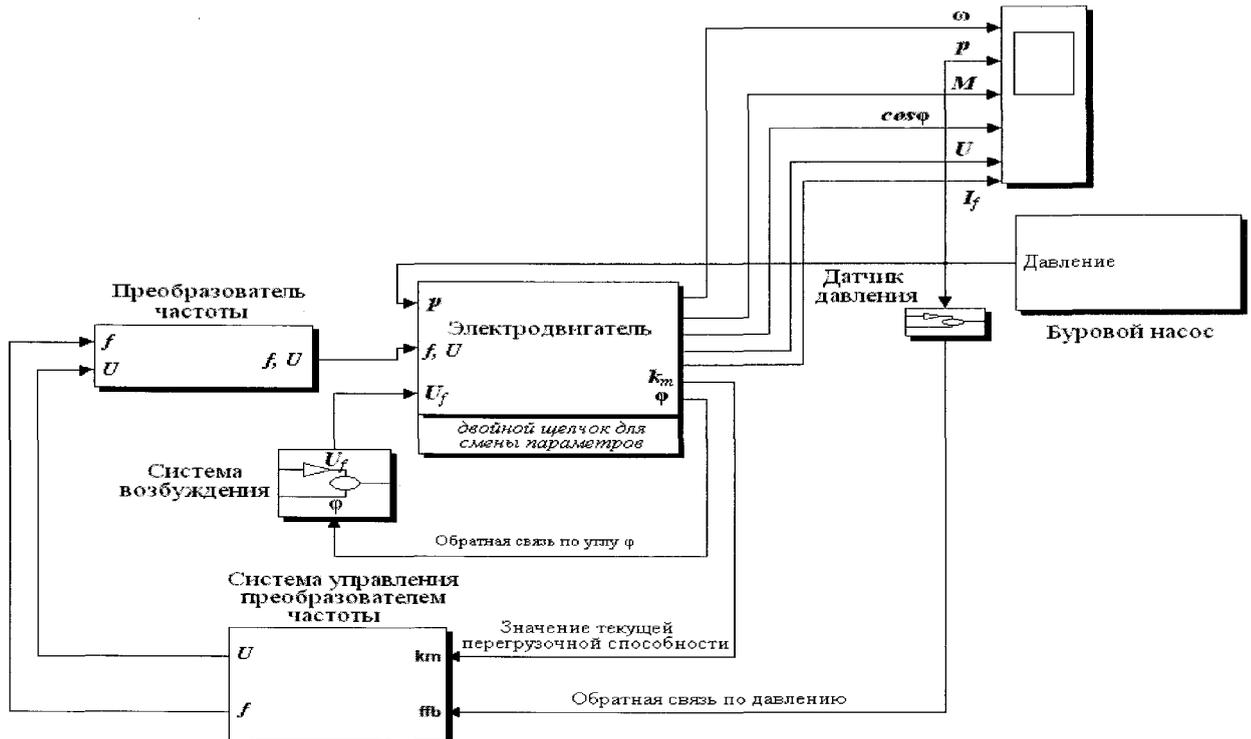


Рисунок 4 – Структурная схема системы управляемых преобразователя частоты, синхронного электродвигателя и бурового насоса

Структурная схема (рисунок 5) СД разработана на основе уравнений Парка-Горва:

$$\begin{aligned}
 U_d &= R_1 \cdot I_d - (x_q \cdot I_q + x_{aq} \cdot I_Q), \\
 U_q &= R_1 \cdot I_q + (x_d \cdot I_d + x_{ad} \cdot I_f + x_{ad} \cdot I_D), \\
 U_f &= R_f \cdot I_f + \left(x_{ad} \cdot \frac{dI_d}{dt} + x_f \cdot \frac{dI_f}{dt} + x_{ad} \cdot \frac{dI_D}{dt} \right), \\
 0 &= R_D \cdot I_D + \left(x_{ad} \cdot \frac{dI_d}{dt} + x_{ad} \cdot \frac{dI_f}{dt} + x_D \cdot \frac{dI_D}{dt} \right), \\
 0 &= R_Q \cdot I_Q + \left(x_{aq} \cdot \frac{dI_q}{dt} + x_Q \cdot \frac{dI_Q}{dt} \right), \\
 M &= U_d \cdot I_q - U_q \cdot I_d, \\
 M - M_c &= J \cdot \frac{d\omega}{dt}
 \end{aligned}$$

строена математическая модель, учитывающая новые элементы. С помощью данной модели смоделированы режимы бурения при недогруженном ЭП с использованием адаптивного алгоритма частотного регулирования и в режиме постоянства момента при векторном управлении (рисунок 5). Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенных алгоритмов.

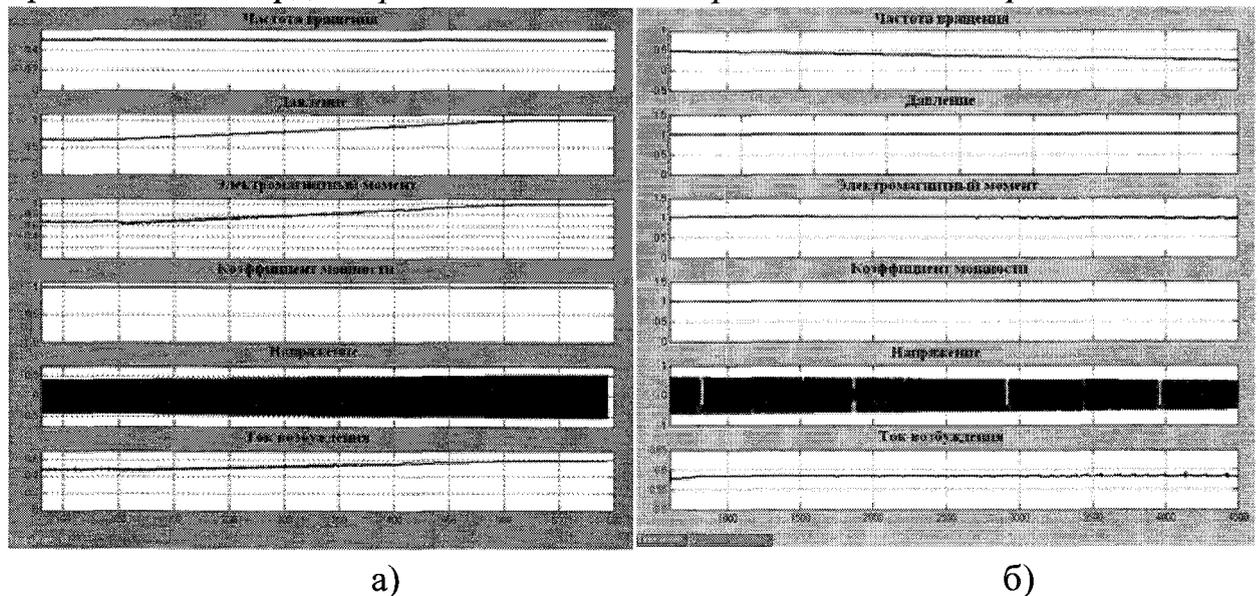


Рисунок 5 – Результаты исследований на модели:

а – при постоянной частоте вращения; *б* – при постоянном моменте

Четвертая глава посвящена результатам физических испытаний и эксплуатации. Показано, что при регулируемом ЭП вместо смены втулок достаточно изменять частоту вращения ЭД. При этом регулируемый ЭП БН позволяет сократить число используемых втулок и снизить время производства буровых работ за счет снижения числа их смены и оптимизации подачи БН.

Разработан метод построения гидравлических характеристик скважины на разных глубинах. Предложен режим смены втулок на определенных глубинах, при котором мощность приводного ЭД используется полнее.

По полученным результатам произведена экономическая оценка, для чего была разработана методика оценки экономической эффективности. Экономическая эффективность обусловлена снижением времени бурения, снижением потерь мощности и энергии в электродвигателе и снижением расхода электроэнергии на потери давления в манифольде, снижением расхода электроэнергии за счет использования одного бурового насоса вместо двух.

Выполненный анализ экономической эффективности показал, что для скважины № 16415г УК ООО «Татбурнефть» экономический эффект составил более 2 млн руб., а принимая, что в среднем в год одной буровой установкой пробуривается 8 скважин, годовой экономический эффект составляет 18 млн руб. Срок окупаемости составил 0,34 года.

В приложении приведены основные параметры электродвигателя СДБМ–99/42–8УХЛ2, результаты расчетов при исследовании влияния частоты,

напряжения и тока возбуждения на СД БН и акты о внедрении результатов диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработанная структурная схема частотно-регулируемого СД БН позволяет реализовать частотное управление в соответствии с особенностями технологического процесса бурения, обеспечивает автоматическое регулирование скорости привода и поддержание постоянства развиваемого давления.

2. Получены новые аналитические зависимости энергетических параметров СД в относительных единицах, на основе которых разработан адаптивный алгоритм частотного регулирования СД БН. В качестве критериев регулирования предложены: равенство тока статора номинальному значению; угол нагрузки не должен превышать предельно допустимого; коэффициент мощности поддерживается постоянным; ток возбуждения не должен превышать номинального значения.

Разработан алгоритм векторного управления моментом СД БН. Показано, что вместо разложения тока статора на составляющие по осям p и t достаточно с помощью регулирования тока возбуждения поддерживать значение коэффициента мощности двигателя, близким к единице.

3. Разработана имитационная модель синхронного частотно-регулируемого ЭП, в которой реализованы механизмы адаптации и векторное регулирование. Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенных алгоритмов, позволяющих снизить потери мощности и энергии в ЭД при работе с малыми нагрузками и производить векторное регулирование момента СД без разложения тока статора на составляющие по осям p и t .

4. Выполнена оценка технологической эффективности при внедрении синхронного частотно-регулируемого ЭП БН, которая показала, что в результате улучшается очистка забоя, повышается мощность, передаваемая долоту на 40 %, и увеличивается скорость разрушения породы, что приводит к снижению времени, снижается расход электроэнергии на 50 % за цикл бурения скважины.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Никулин О.В. Оптимизация смены втулок при установке преобразователей частоты для привода буровых насосов У8-6М // Бурение и нефть. 2009. № 6. С. 27–30.

2. Шабанов В.А., Никулин О.В. Векторное регулирование момента синхронного двигателя бурового насоса // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2011. № 9–10 С. 137–144.

3. Шабанов В.А., Никулин О.В. Анализ аналитических зависимостей частотно-регулируемого синхронного электродвигателя бурового насоса // Энергетика Татарстана. 2012. № 1. С. 44–48.

Свидетельство Российской Федерации о государственной регистрации программы для ЭВМ

4. Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614168. Программа определения напряжения статора и тока возбуждения синхронного электродвигателя для реализации частотного регулирования с номинальным током статора / Никулин О.В., Шабанов В.А. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 25.06.2010.

В других изданиях

5. Никулин О.В., Шабанов В.А. Оценка эффективности применения частотно-регулируемого электропривода буровых насосов в Азнакаевском УБР // Энергетика Татарстана. 2008. № 1(9). С. 74–81.

6. Никулин О.В., Шабанов В.А. Определение характеристик частотного регулирования синхронных двигателей на примере системы автоматического регулирования электропривода буровых насосов // Энергетика Татарстана. 2008. № 3(11). С. 48–52.

7. Никулин О.В., Шабанов В.А. Регулируемый электропривод буровых лебедок // Материалы 59-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Уфа, Изд-во УГНТУ. 2008 С. 274.

8. Никулин О.В., Шабанов В.А. Сокращение числа используемых втулок буровых насосов при регулируемом электроприводе // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. II Всеросс. науч.-техн. конф.: В 2 т. Т. 1. Уфа: УГНТУ, 2009. С. 20–24.

9. Никулин О.В., Шабанов В.А. Модель синхронного двигателя бурового насоса в среде Симулинк // Электротехнические комплексы и системы: межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2009. С.70–75.

10. Никулин О.В., Чумаков Д.И., Шабанов В.А. Экономический эффект от внедрения синхронного частотно-регулируемого электропривода бурового насоса // Академия энергетики. 2010. № 2. С. 92–94.

11. Никулин О.В., Шабанов В.А. Исследование режимов частотного регулирования синхронного электропривода бурового насоса // Проблемы строительного комплекса России: мат. 14-й междунар. науч.-техн. конф. при 14-й специализ. выставке «Строительство. Коммунальное хозяйство. Энергосбережение». 2010. С. 59–60.

12. Никулин О.В., Шабанов В.А. Энергосберегающий синхронный частотно-регулируемый электропривод бурового насоса // Энергоэффективность и энергобезопасность на предприятиях промышленности и жилищно-коммунального хозяйства: тр. Всеросс. науч.-прак. семинара в г. Салават. Уфа: Гилем, 2010. С. 213–217.

13. Кабаргина О.В., Никулин О.В., Шабанов В.А. О законах частотного регулирования угловой скорости синхронных электродвигателей // Тинчуринские чтения: мат. докл. 5-й Междунар. молодеж. конф. Казань: КГЭУ. 2010. С.63–64.

14. Никулин О.В., Шабанов В.А. Возможности скалярного частотного регулирования синхронных электроприводов буровых установок // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвуз. сб. науч. тр. Уфа: УГНТУ, 2010. С. 59–66.

15. Никулин О.В., Шабанов В.А. Алгоритм расчета режимных параметров синхронного электропривода бурового насоса при частотном регулировании // Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения: мат. всеросс. конф. Уфа: УГАТУ. 2010. С. 104–105.

16. Кабаргина О.В., Никулин О.В., Шабанов В.А. Возможности частотного регулирования угловой скорости синхронных электродвигателей // Электронные устройства и системы: межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 285–290.

17. Никулин О.В., Шабанов В.А. Моделирование управления током возбуждения частотно-регулируемого синхронного двигателя бурового насоса // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. III Всеросс. науч.-техн. конф. Уфа: ИД «Чурагул», 2011. С. 30–34.

18. Куангалиев З.А., Никулин О.В., Павлова З.Х., Шабанов В.А. Структурная схема частотного регулирования электропривода бурового насоса // Нефтегазовый комплекс в условиях индустриально-инновационного развития Казахстана: междунар. науч.-прак. конф. Атырау: АИНГ, 2011. С. 198–202.

19. Никулин О.В., Шабанов В.А. Математическая модель синхронного двигателя бурового насоса на основе упрощенных уравнений Парка-Горева // Перспективные разработки в науке и технике: мат. VII междунар. науч.-прак. конф. Пшемысл: Наука и исследования, 2011. С. 37–43.

20. Куангалиев З.А., Никулин О.В., Павлова З.Х., Шабанов В.А. Принципы оценки экономической эффективности частотно-регулируемого электропривода бурового насоса // Вестник Атырауского института нефти и газа. 2011. № 1(24) С. 21–26.

Диссертант



О.В. Никулин

НИКУЛИН Олег Викторович

ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ СИНХРОННЫЙ
ЭЛЕКТРОПРИВОД БУРОВОГО НАСОСА
(РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ)

Специальность:

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 19.11.2012. Бумага офисная. Формат 60x84 1/16
Гарнитура «Таймс». Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1
Тираж 100 экз. Заказ 146

Типография Уфимского государственного нефтяного технического университета

Адрес издательства и типографии:
450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1