

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук

Мошкина Владимира Ивановича на диссертационную работу Чиркова Дмитрия Андреевича «**Повышение тягового усилия цилиндрического линейного вентильного двигателя**», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертационные исследования Чиркова Д.А. направлены на совершенствование электропривода погружных бесштанговых насосных агрегатов (ПБНА) для добычи нефти из мало- и среднедебитных скважин глубиной более 2000 м. Основным направлением по созданию ПБНА была разработка цилиндрического линейного вентильного двигателя (ЦЛВД) для привода ПБНА.

### **Актуальность темы**

Добыча нефти и газа для России по-прежнему остается основным источником дохода. Несмотря на пессимистические прогнозы об ограниченности углеводородов, эта отрасль будет устойчиво развиваться еще в течение нескольких десятков лет. Соответственно вся инфраструктура, которая обеспечивает это производство, должна модернизироваться и совершенствоваться. Существующие приводы ПНБА не позволяли добывать нефть из скважин глубиной более 2000 метров.

Диссертация Чиркова Д.А. посвящена повышению тягового усилия таких ЦЛВД, что позволит использовать их в качестве электропривода ПБНА для скважин глубиной более 2000 метров. В связи с появлением высококоэрцитивных отечественных постоянных магнитов стало возможным создание ЦЛВД для привода ПБНА с использованием, в частности, трехжильного кабеля вместо шестижильного, что обеспечивает более высокую надежность, меньшие габариты и энергетические потери.

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, библиографического списка используемых источников и приложений общим объемом 113 страниц. Основной текст изложен на 128 страницах машинописного текста, иллюстрирован 58 рисунками, 14 таблицами. Библиографический список включает 80 наименований.

**В первой главе** соискатель описывает современное состояние нефтедобывающих агрегатов РФ и достижения ПНИПУ, г. Пермь, по разработке ЦЛВД для ПБНА.

Проблема добычи нефти на средне- и малодебитных скважинах глубиной от 2000 метров и более имеет на данный момент только одно практическое решение – погружной бесштанговый насосный агрегат на основе ЦЛВД. Агрегаты ПБНА сочетают в себе преимущества установок электроцентробежных

насосов (УЭЦН) и установок штанговых глубинных насосов (УШГН), а именно: малую металлоемкость, возможность добычи на глубине более двух километров, возможность добычи в наклонно-направленных скважинах, относительно высокий КПД при низком или среднем дебите.

**Во второй главе** для поиска путей повышения тягового усилия ЦЛВД приводится его электромагнитный расчёт методом конечных элементов с учетом насыщения магнитной системы. Автором разработана собственная методика, учитывающая реальную геометрию двигателя на основе ANSYS Maxwell и расчетная модель ЦЛВД в воздушной среде. На основе предложенной расчетной модели и основных допущений получены рабочие характеристики двигателя для продолжительного режима работы с заданным током статора, из которых можно выбрать условия для повышения силовых и энергетических показателей.

**В третьей** главе исследуется математическая модель ЦЛВД, основанная на теории электрических и магнитных цепей. Разработана схема замещения магнитной цепи ЦЛВД на одно полюсное деление и определены магнитные сопротивления участков, магнитный поток и ЭДС холостого хода, с помощью которых рассчитаны тяговые усилия двигателя в зависимости от фазного тока. Расчеты проведены пятью различными методами, из которых наиболее близкий к эксперименту результат показывает расчёт методом конечных элементов в ANSYS Maxwell magnetostatic. Сравнение рабочих характеристик, рассчитанных по методу электрических и магнитных цепей, с характеристиками, полученными в программном пакете ANSYS Maxwell, выявило расхождение при номинальных токах в 30 А менее 2%. Это подтверждает точность и адекватность расчётной модели по методу электрических и магнитных цепей.

**В четвертой** главе путем многовариантных расчётов исследуются способы повышения силовых и энергетических характеристик ЦЛВД с целью получения зависимости максимального усилия, развиваемого двигателем, от следующих параметров: ширины, диаметра и материала магнитов, коэффициента полюсного деления, величины открытия паза и диаметра вторичного элемента.

Результаты расчёта ЦЛВД, проведённого в программе Maxwell с существующими редкоземельными постоянными магнитами от разных производителей, выявили, что наибольшее тяговое усилие двигатель имеет с магнитами, имеющими наибольшие значения коэрцитивной силы  $H_c$  и остаточной индукции  $B_r$ .

Используя все полученные данные, была создана и рассчитана новая рационализированная конструкция двигателя с открытым пазом, зубцами из шихтованной электротехнической стали и магнитами трёх разных марок.

Реальное рабочее удельное тяговое усилие ЦЛВД, управляемого преобразователем частоты, при номинальном токе в 30 А, рассчитанное с помощью ANSYS Maxwell transient, составляет 6350 Н/м.

На основе предложенной конструкции можно создать двигатель длиной 8 метров, который будет вести добычу на глубине более 4000 метров. При этом себестоимость двигателя на пару полюсов вырастет в 2 раза. При нынешней рабочей частоте двигателя в 7 Гц разница стоимости окупится затратами на электроэнергию за счёт повышенного КПД в течение 243 суток. Благодаря шихтованному магнитопроводу данная конструкция двигателя может работать на более высоких частотах, с более высоким КПД. Соответственно разница стоимости окупится гораздо быстрее.

**В заключении** содержатся выводы, сделанные по результатам всей работы, определяются направления дальнейших исследований.

### **Научная новизна**

Применение ЦЛВД с высококоэрцитивными магнитами в приводе ПБНА является инновационным решением. К новизне следует отнести разработанную соискателем математическую модель ЦЛВД, на основе которой создана новая методика расчёта, учитывающая насыщение магнитной цепи, что позволяет рассчитывать рабочие характеристики ЦЛВД и величину напряжения питания двигателя, необходимую для достижения заданных скорости вторичного элемента и тягового усилия. Впервые получены характеристики ЦЛВД, с помощью которых удалось рационализировать конструкцию ЦЛВД с целью получения большего тягового усилия и КПД и найти наиболее энергоэффективные алгоритм управления и способ питания двигателя. В результате исследований определены основные закономерности зависимости тягового усилия от конструкции и основных параметров двигателя. Это позволило определить конструкцию ЦЛВД, обладающую максимальным тяговым усилием и лучшими энергетическими характеристиками.

Таким образом, можно заключить, что работа имеет явно выраженную научную новизну теоретических исследований и полученных практических результатов.

**Теоретическая и практическая значимость результатов работы** заключается в развитии теории расчёта и проектирования цилиндрических линейных вентильных двигателей с постоянными магнитами.

В результате исследования были:

1) выявлены основные зависимости энергетических характеристик ЦЛВД от частоты питающего напряжения, что позволит рационализировать алгоритм работы установки и повысить её энергоэффективность;

2) разработаны рекомендации для проектирования ЦЛВД, обладающего наибольшими значениями тягового усилия и КПД;

3) определена конструкция ЦЛВД с удельным тяговым усилием на единицу длины статора, равным 6350 Н/м, что позволяет создать погружной двигатель длиной 8 метров для добычи нефти из сверхглубоких скважин.

Проведенные исследования изначально являлись частью научно-исследовательских и проектных работ, которые проводились в ФГБОУ ВПО «ПНИПУ» по заказу ОАО «Мотовилихинские заводы» (г. Пермь) при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор №02.G25.31.0068 от 23.05.2013 г. в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218). Также исследования выполнялись при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по государственному заданию FSNM-2020-0028. Результаты исследований реализованы при проектировании и расчетах цилиндрического линейного вентильного электродвигателя в качестве электропривода нового поколения для ПБНА в ООО «Ойл Автоматика» г. Уфа.

Основные теоретические результаты работы Чиркова Д.А. могут быть внедрены в учебный процесс для подготовки студентов старших курсов бакалавриата направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника»

**Достоверность результатов работы** обеспечивается корректной постановкой исследовательских задач и их физической обоснованностью, использованием современного программного обеспечения и комплексным подходом к проведению исследований; сходимостью теоретических и экспериментально полученных результатов; непротиворечивостью результатам подобных исследований других авторов и основным положениям науки; использованием сертифицированных и поверенных образцов и контрольно-измерительной аппаратуры, а также применением математического анализа при обработке полученных результатов с использованием современных средств вычислительной техники.

#### **Апробация диссертации и публикации автора**

Участие соискателя в 6 международных и региональных научных конференциях с 2016 по 2020 гг. подтверждает тот факт, что данные научные исследования были представлены научному сообществу для анализа и обсуждения. Основные разделы научной работы опубликованы в 10 научных работах, из которых 4 публикации в рецензируемых научных журналах и одном сборнике трудов, определённых ВАК, и 2 в журналах, индексируемых в базах SCOPUS, что говорит о достаточно высоком уровне полученных результатов.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты. Полученные в работе научные результаты соответствуют п. 2 «Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов», п. 3 «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии», п. 5 «Разра-

ботка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов» паспорта специальности.

**Автореферат** отражает основное содержание диссертации, выполнен в соответствии со всеми предъявляемыми к нему требованиями.

**Вопросы и замечания по работе.** По представленной к защите работе имеются следующие вопросы и замечания.

1. Из каких соображений в первой главе диссертации рассмотрены только установки электроцентробежных насосов (УЭЦН) и штанговых глубинных насосов (УШГН) как альтернативы для погружных бесштанговых насосных агрегатов (ПБНА), тогда как способов добычи нефти явно больше?

2. Почему в рассмотренной конструкции ЦЛВД не поднимается вопрос о защите обмоток от скважинной жидкости?

3. Поясните, почему в тексте автореферата и диссертации принят номинальный ток двигателя 30 А, однако тепловой расчет двигателя или ссылки на него не приводятся.

4. Из автореферата и текста диссертации не ясно, как высокие температуры в скважине влияют на магнитную систему на основе неодимовых магнитов.

5. Почему одни и те же неодимовые магниты рассчитаны на разные температуры или это условия завода-изготовителя?

6. Из автореферата и текста диссертации не ясно, почему длина двигателя не должна превышать 8 метров.

7. В работе нет информации об источнике питания и системе управления двигателем. От выбора этой аппаратуры могут существенно зависеть выходные параметры двигателя, его статические и динамические характеристики.

8. В обзоре мало внимания уделено зарубежным научным работам.

9. Текст автореферата и диссертации изложен хорошим техническим языком, однако имеются некоторые грамматические погрешности.

Данные замечания носят дискуссионный характер и не снижают положительного впечатления от работы.

### **Заключение по диссертации**

Диссертационная работа на тему «Повышение тягового усилия цилиндрического линейного вентильного двигателя» выполнена на высоком уровне с использованием современных методов исследований и представляет собой законченную научно-квалификационную работу.

Диссертационная работа полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, содержит актуальные научно обоснованные техниче-

ские решения для электротехнической отрасли. Диссертация соответствует профилю специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты» (технические науки), а ее автор – **Чирков Дмитрий Андреевич** – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты»

Официальный оппонент, доктор технических наук (05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты), доцент, заведующий кафедрой «Энергетика и технология металлов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Курганский государственный университет»



**Мошкин Владимир Иванович**

25.02.2021

640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4,

Тел.: +7(3522) 65-49-99

E-mail: wimosh@mail.ru,

Я, Мошкин Владимир Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись Мошкина В.И. заверяю:

