

На правах рукописи



Воеков Владимир Николаевич

ЧАСТОТНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ СИНХРОННОГО
ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ С РЕЛЕЙНЫМ
УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ НАСОСОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Липецк – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Мещеряков Виктор Николаевич.

Официальные оппоненты:

Григорьев Максим Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированный электропривод» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (ФГАОУ ВО ЮУрГУ);

Серебряков Артем Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ);

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина».

Защита диссертации состоится «06» марта 2020 года в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 212.108.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет» по адресу: 398055, г. Липецк, ул. Московская 30, первый корпус, ауд. 601.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.stu.lipetsk.ru при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Автореферат разослан « » декабря 2019 г

Ученый секретарь

диссертационного совета



В.В. Телегин

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В последние два десятилетия наметилась устойчивая тенденция замены нерегулируемого электропривода (ЭП) переменного тока на частотно-регулируемый асинхронный и синхронный электропривод в таких отраслях народного хозяйства, как нефтегазовая промышленность, энергетика, машиностроение и металлургия. Это стало возможным благодаря стремительному развитию микропроцессорной техники и силовой полупроводниковой электроники, что позволило реализовать новые алгоритмы управления, топологии преобразователей частоты (ПЧ), а также существенно повысить их мощность.

На производстве электрические приводы потребляют значительное количество электроэнергии, поэтому как никогда актуальным является управление и адаптация их к меняющимся условиям нагрузок и регулирование скорости в соответствии с технологическими требованиями, что позволяет в реальных условиях сокращать энергопотребление на 10-70% по сравнению с применением нерегулируемого электропривода. В последние годы наблюдается увеличение процентного соотношения частотного вентильного электропривода с синхронным двигателем с постоянными магнитами (СДПМ) по сравнению с остальными электроприводами переменного тока. В вентильном электроприводе с векторным управлением, обеспечивающим постоянство электромагнитного момента и управление положением ротора в пространстве, достигнуто существенное снижение потерь энергии за счет того, что ПЧ обеспечивает синусоидальную форму тока, что особенно важно для применения в нефтяной промышленности на буровых установках и центробежных нефтяных насосных установках, в которых электроснабжение осуществляется с помощью протяженных кабельных линий. Вклад в разработку и модернизацию СДПМ и вентильных электроприводов на их основе внесли российские и зарубежные ученые А.К. Аракелян, И.Е. Овчинников, В.В. Панкратов, А.А. Дубенский, М.А. Rahman, М.Ф. Rahman, S. Morimoto, а также многие другие. Наиболее часто используемым методом формирования токов в фазах в современных преобразователях частоты является широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Алгоритм разработан для условия постоянства выпрямленного напряжения на входе автономного инвертора напряжения (АИН), при изменении этого напряжения он будет более сложен в реализации и потребует добавочных вычислительных мощностей. В связи с этим актуальными являются разработки электропривода с упрощенными алгоритмами управления, такими, как релейное управление транзисторными ключами АИН, с обеспечением регулирования мощности и напряжения, подаваемого на вход инвертора в преобразователе частоты при помощи дополнительного коммутатора в звене постоянного тока, что позволяет улучшить качество напряжения питания статора двигателя при сохранении стандартной частоты коммутации ключевых элементов АИН.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование вентильного электропривода на основе СДПМ с векторным управлением с до-

полнительными импульсными преобразователями напряжения в выпрямленной цепи преобразователя частоты и релейным принципом формирования мгновенных значений тока на входе и выходе автономного инвертора напряжения с обеспечением улучшенной электромагнитной совместимости с питающей сетью.

Идея работы заключается в достижении улучшенной электромагнитной совместимости преобразователя частоты с питающей сетью в системе вентильного электропривода за счет введения в силовую часть преобразователя частоты дополнительного импульсного преобразователя напряжения, реализации релейного принципа формирования токов в выпрямленной цепи и в обмотках статора двигателя и векторного управления переменными электропривода.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие **задачи**:

1. Рассмотреть известные способы управления двигателями переменного тока, в частности синхронным двигателем с возбуждением от постоянных магнитов и предложить структуру вентильного электропривода с наиболее эффективной и в то же время простой в реализации системой управления.
2. Разработать систему вентильного электропривода с преобразователем частоты на основе АИН с дополнительным транзисторным коммутатором в звене постоянного тока, понижающим напряжение на входе инвертора, и системой релейного регулирования токов статора и выпрямленного тока, построить его математическую модель и провести исследование свойств электропривода.
3. Разработать систему вентильного электропривода с преобразователем частоты на основе АИН с дополнительным транзисторным коммутатором в звене постоянного тока, повышающим напряжение на входе и выходе инвертора, и системой релейного регулирования токов статора и выпрямленного тока, построить его математическую модель и провести исследование свойств электропривода.
4. Разработать алгоритм совместного управления коммутацией ключей АИН и импульсным преобразователем напряжения в звене постоянного тока, обеспечивающий улучшенную электромагнитную совместимость электропривода с питающей сетью и наилучшее качество питающего статор напряжения.
5. Провести анализ влияния включения импульсного повышающего и понижающего преобразователя напряжения в звено постоянного тока на гармонический состав токов на входе и выходе преобразователя частоты.
6. Экспериментально исследовать свойства разработанного вентильного электропривода на испытательном стенде.

Объектом исследования является частотный векторный вентильный электропривод с релейным регулированием тока и дополнительными импульсными преобразователями напряжения в выпрямленной цепи преобразователя частоты.

Предметом исследования являются алгоритмы векторного релейного управления силовыми транзисторными ключами инвертора и импульсного

преобразователя напряжения, обеспечивающие стабильную и надежную работу вентильного электропривода.

Методы исследования. Поставленные задачи решались с применением теории электропривода, методов современной теории автоматического управления. Аналитические расчеты основаны на применении передаточных функций замкнутых систем управления и дифференциальных уравнений, описывающих исследуемые системы. Работоспособность созданных алгоритмов проверялась в среде цифрового моделирования Matlab Simulink, а также в ходе экспериментов на испытательном стенде.

Достоверность полученных результатов и сделанных в ходе исследований выводов подтверждается соответствием аналитических расчетов и характеристик, снятых в ходе моделирования в среде Matlab Simulink результатам стендовых экспериментов.

Научная новизна:

1. Разработан алгоритм релейного управления ключевыми элементами инвертора напряжения, отличающийся формированием сигналов задания на коммутацию ключевых элементов на основе векторного анализа состояния переменных системы вентильного электропривода во вращающейся системе координат.
2. Разработаны автоматическая система и алгоритм управления преобразователем частоты с релейными регуляторами фазных токов инвертора, отличающийся релейным регулированием напряжения на входе инвертора с помощью дополнительного понижающего импульсного преобразователя напряжения в выпрямленной цепи, с обеспечением стабилизации входного напряжения инвертора на требуемом уровне и улучшения гармонического состава напряжения в обмотках двигателя.
3. Разработан алгоритм управления преобразователем частоты с релейными регуляторами фазных токов инвертора, отличающийся формированием сигнала управления дополнительным повышающим импульсным преобразователем напряжения в выпрямленной цепи с помощью релейного регулятора тока на основе использования принципа баланса мощности на входе и выходе преобразователя напряжения, с достижением улучшенной электромагнитной совместимости электропривода с питающей сетью и поддержанием требуемого значения напряжения на обмотке статора двигателя, питающегося через протяженные кабельные линии системы электроснабжения.
4. Разработан алгоритм управления преобразователем частоты с релейными регуляторами фазных токов инвертора, отличающийся поддержанием заданных значений тока в выпрямленной цепи и напряжения на выходе инвертора с помощью дополнительного повышающего импульсного преобразователя напряжения с релейным регулятором тока, получающего сигнал управления в результате сравнения сигнала задания на ток с измеренным значением тока.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Улучшен гармонический состав тока, потребляемого из сети преобразователем частоты, за счет введения в конструкцию преобразователя частоты дополнительного импульсного преобразователя напряжения, разработаны алго-

ритмы совместного релейного управления ключевыми элементами преобразователя частоты с использованием векторного принципа управления переменными электропривода. Предложенные технические решения по построению вентильного электропривода для погружных нефтяных насосов на базе СДПМ позволят существенно повысить работоспособность насосных установок за счет увеличения межремонтного периода, а также обеспечить улучшенную электромагнитную совместимость с питающей сетью. Применение вентильных электроприводов с векторным управлением и релейным регулированием тока статора оправдано в полевых условиях на скважинах, поскольку они практически мгновенно реагируют на броски момента, нередко возникающие в глубинных пластах, и позволяют обеспечить бесперебойную работу насосной установки. Алгоритмы релейного управления возможно внедрить в уже разработанные станции управления центробежными насосами без значительных экономических затрат, что является важным шагом на пути к массовому применению таких частотно-регулируемых электроприводов.

Реализация результатов работы. В производственной деятельности компании ООО «Борец-НЭО» (г. Москва) использованы результаты, полученные в диссертационной работе. При схемной реализации станции управления использованы силовые схемы вентильного электропривода с блоком релейного управления и математические модели, что подтверждено актом о внедрении результатов исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Система частотно-регулируемого вентильного электропривода на базе АИН, позволяющая формировать на выходе синусоидальную форму токов, алгоритмы управления электроприводом.
2. Система частотно-регулируемого вентильного электропривода и алгоритмы совместного управления коммутацией ключей АИН и импульсным преобразователем напряжения, позволяющая производить регулирование токов и напряжений на входе и выходе преобразователя частоты.
3. Математические модели вентильного электропривода с импульсным повышающим и понижающим преобразователями частоты, их компьютерная реализация в среде Matlab Simulink.
4. Результаты исследования динамических свойств вентильного электропривода, а также показателей электромагнитной совместимости преобразователя частоты с двигателем и питающей сетью.
5. Результаты экспериментального исследования на стенде-скважине.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XVII международной конференции по силовой электронике и управлению движением IEEE-PEMC 2016 (г. Варна, Болгария, 2016 г.); международной научно-практической конференции «Современная металлургия нового тысячелетия», (г. Липецк, 2016 г.); 10 Всероссийской мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2017, г. Геленджик, 2017 г.); XII международной научно-практической конференции «Современные сложные системы управления» (г. Липецк, 2017 г.); XVII международной научно-

технической конференции «Электроприводы переменного тока» - ЭПТТ 2018 (АСЕД-2018, г. Екатеринбург, 2018 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ, 3 из которых – в центральных журналах, рекомендованных списком ВАК РФ, 2 – в трудах научных конференций, индексируемых в наукометрических базах Scopus, IEEE, 1 патент РФ на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 97 наименований и 4 приложений. Общий объем диссертации – 161 страница, в том числе 153 страницы основного текста, 138 рисунков, 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность диссертационной работы, определен объект исследований, изложена цель и идея работы, поставлены задачи для ее достижения, показана научная новизна и практическая значимость работы, выделены основные выносимые на защиту положения, а также результаты апробации и реализации работы.

Первая глава содержит анализ развития вентильного электропривода на базе СДПМ. Рассмотрены стадии разработки современных магнитных материалов для синхронных двигателей с магнитостатическим возбуждением, а также этапы развития устройств силовой электроники, в ходе которых они становились дешевле и упрощалась технология их производства. Рассмотрены принципы построения вентильного электропривода (ЭП), основными частями которого являются преобразователь частоты (ПЧ) с промежуточным звеном постоянного тока и инвертором, а также датчик скорости и положения ротора двигателя (ДПР). В управляемых ПЧ сегодня в большинстве применяются ШИМ-алгоритмы, которые позволяют получить близкую к синусоидальной форму тока. В нефтедобывающей отрасли исполнительными механизмами являются достаточно специфические установки – станки-качалки для штанговых насосов, буровые машины, глубинные установки для нефтедобычи, куда входят электроцентробежные (ЭЦН) и электровинтовые (ЭВН) насосы. Насосные установки с ЭЦН и ЭВН часто эксплуатируются в очень жестких условиях: высокая температура и давление наряду с агрессивными свойствами перекачиваемой пластовой жидкости, которая является естественным абразивом, возможность прохождения через газовые карманы.

Сформулированы требования к электроприводу погружных насосных установок:

- обеспечение максимального крутящего момента при пуске насоса;
- обеспечение плавности разгона и торможения по заданным параметрам;
- обеспечение режима «тяжелого» пуска двигателя, в том числе толчкового режима и реверса;
- обеспечение устойчивой работы двигателя при номинальных оборотах насоса при резком набросе момента;
- обеспечение автоматического поддержания заданного тока;
- обеспечение выхода на требуемую скорость по заданному алгоритму.

Проведен анализ исследований российских и зарубежных ученых, способствовавших созданию современного вентильного электропривода. Наличие или отсутствие датчика положения ротора является принципиальным при выборе и построении системы управления ПЧ. Известно несколько типов систем управления, таких как векторное управление, системы с использованием нечеткой логики и нейронных сетей. Показано, что для реализации предъявляемых к ЭП погружных насосных установок требований наиболее оптимальным является применение ПЧ с векторным управлением.

Вторая глава посвящена анализу существующих преобразователей частоты и исследованию систем управления вентильным электроприводом математическими методами. Математическая модель СДПМ базируется на методике обобщенной электрической машины и при векторном управлении регулирование осуществляется в системе координат, вращающейся синхронно с векторами состояний двигателя (d, q).

Выражение (1) описывает электромагнитный момент двигателя, на который при постоянном магнитном потоке влияет составляющая тока статора по q-оси.

$$M = \frac{3}{2} p_n I_{sq} \Psi_f. \quad (1)$$

Были рассмотрены виды ПЧ, применяемых в ЭП переменного тока. В связи со спецификой нефтегазовой отрасли двигатель и механизм могут располагаться на значительном удалении от станции управления и связаны с ней протяженной кабельной линией. Исходя из этого, наиболее оптимальным для применения в ЭП погружных насосов является ПЧ с АИН поскольку его векторная система управления, основанная на методе подчиненного регулирования, позволяет обеспечивать поддержание требуемого качества и уровня напряжения.

Векторная диаграмма СДПМ в осях (d, q) показана на рисунке 1. Для проведения имитационного моделирования была разработана функциональная схема одноконтурного вентильного электропривода, показанная на рисунке 2. ДПР реализуется на основе элементов Холла, а коммутатор управляется путем декодирования сигналов, получаемых с ДПР, и преобразования их в управляющие импульсы на силовые ключи АИН.

Скорость двигателя регулируется, путем изменения напряжения в цепи постоянного тока в зависимости от изменения задания на управляемом выпрямителе (УВ). В качестве регулятора скорости используется стандартный ПИ-регулятор.

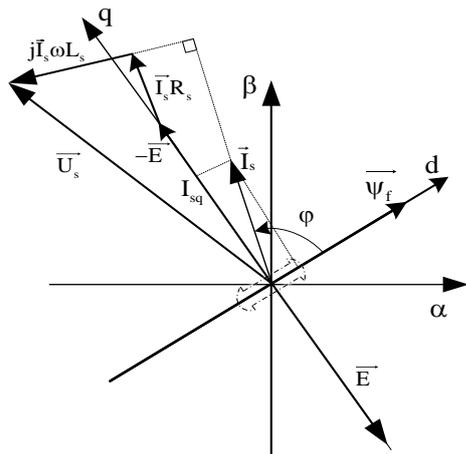


Рисунок 1 – Векторная диаграмма СДПМ в осях (d, q)

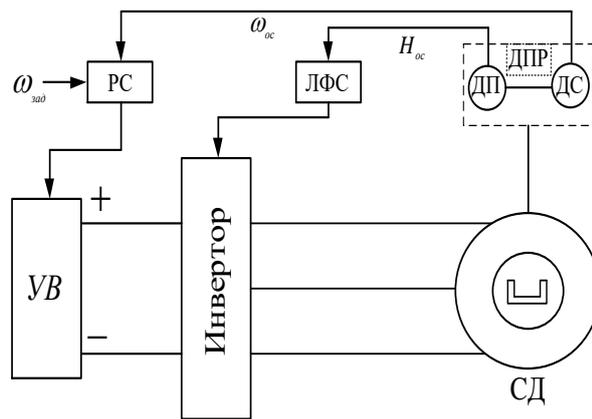
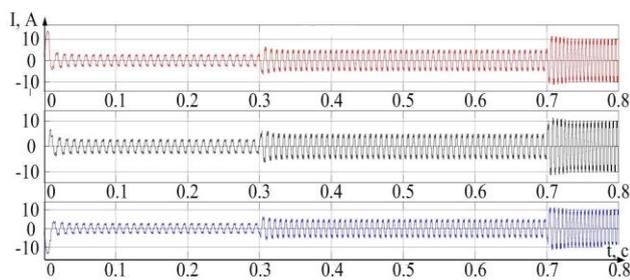
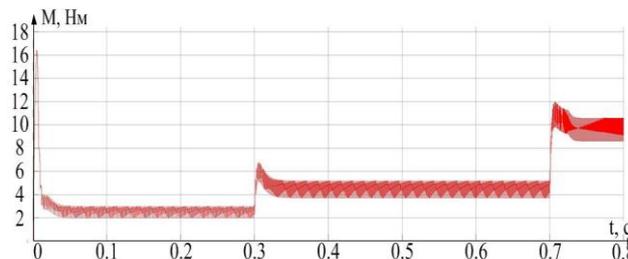


Рисунок 2 – Функциональная схема вентильного электропривода

На основе функциональной схемы в среде Matlab Simulink была разработана компьютерная имитационная модель вентильного электропривода. В качестве нагрузки для двигателя применяется блок, разработанный для симуляции момента, создаваемого центробежным насосом. В результате проведенных исследований модели были получены графики изменения токов, электромагнитного момента, показанные на рисунке 3, а и 3, б, соответственно.



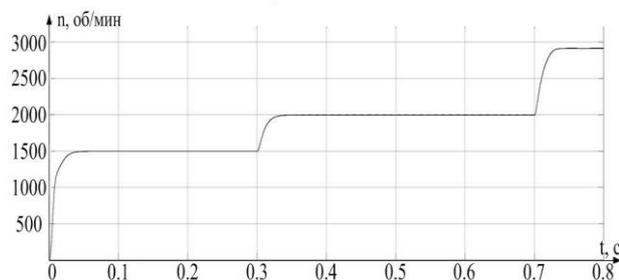
а



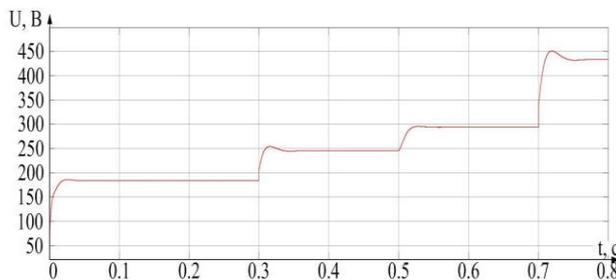
б

Рисунок 3 – Графики изменения тока фазах статора и электромагнитного момента СДПМ

На рисунке 4, а и 4, б показаны графики скорости и напряжения двигателя, соответственно. Они подтверждают аналитические расчеты.



а



б

Рисунок 4 – Графики изменения напряжения и скорости СДПМ

В третьей главе синтезирована двухконтурная система векторного управления вентильным электроприводом с релейным регулированием токов

статора, которая строится в соответствии с векторной диаграммой СДПМ. На рисунке 5 приведена функциональная схема системы векторного управления с датчиком положения ротора, которая содержит следующие основные элементы: ЗС – задатчик скорости; ЗИ – задатчик интенсивности и БОМ – блок ограничения момента, которые входят в состав блока регулятора скорости РС; БВ1, БВ2, БВ3 – блоки вычисления, которые преобразуют переменные в соответствии с заданными формулами; РРТ – блок, содержащий релейные регуляторы, входит в состав УРИ – устройства раздачи импульсов для управления транзисторами инвертора; БОД – блок обработки данных с ДПР, который формирует информацию о положении ротора.

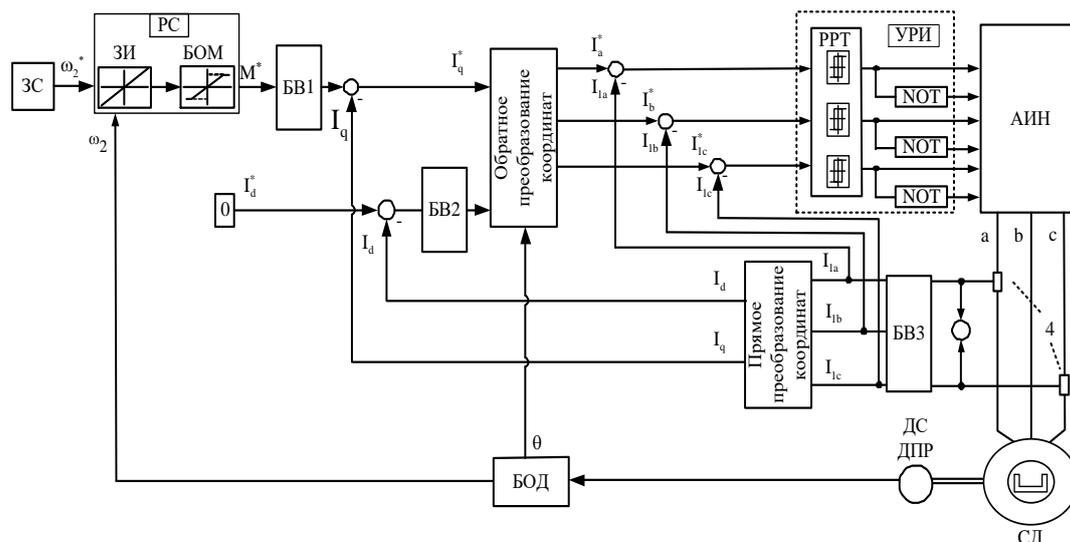


Рисунок 5 – Функциональная схема системы векторного управления

Отличительной особенностью разрабатываемой системы управления является то, что управление коммутацией ключей инвертора осуществляется с использованием алгоритма релейного регулирования. При таком способе управления, внутренний контур тока содержит три независимых релейных регулятора для каждой из фаз статора. Пороговые значения $h/2$ и $-h/2$, дают диапазон регулятора h (модуль гистерезиса), который должен быть одинаков для каждой из трех фаз, для их симметричной работы. Релейные регуляторы работают в соответствии со следующими выражениями:

$$L \frac{di_a^+}{dt} = 0.5U_{DC}, \quad (2)$$

$$L \frac{di_a^-}{dt} = -0.5U_{DC}, \quad (3)$$

$$\frac{di_a^+}{dt} + \frac{di_a^-}{dt} = 0, \quad (4)$$

где L – фазная индуктивность, i_a^+ , i_a^- – соответствующие отрезки нарастания и спада тока.

$$\frac{di_a^+}{dt} t_1 - \frac{di_a^-}{dt} t_1 = h, \quad (5)$$

$$\frac{di_a^-}{dt} t_2 - \frac{di_a^*}{dt} t_2 = -h, \quad (6)$$

где t_1 и t_2 – соответствующие интервалы времени переключения транзисторов, T_μ – постоянная времени передаточной функции регулятора тока, обратно пропорциональная средней частоте операций сравнения в релейном регуляторе.

$$t_1 + t_2 = T_\mu = \frac{1}{f_c}, \quad (7)$$

где f_c – средняя частота операций сравнения релейного регулятора. Она зависит от модуля гистерезиса релейного регулятора h и задается в зависимости от требований точности поддержания тока, рассчитывается по формуле:

$$h = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{SN}}{100}, \quad (8)$$

где I_{SN} – действующее значение номинального тока статора.

Проводилось исследование возможности включения управляемого транзисторного коммутатора в составе импульсного преобразователя напряжения в звено постоянного тока ПЧ для выполнения преобразования постоянного напряжения на входе в постоянное напряжение на выходе, как повышенное, так и пониженное. На рисунках 6, а и 6, б представлены силовые схемы вентильного электропривода с понижающим и повышающим импульсными преобразователями напряжения в звене постоянного тока.

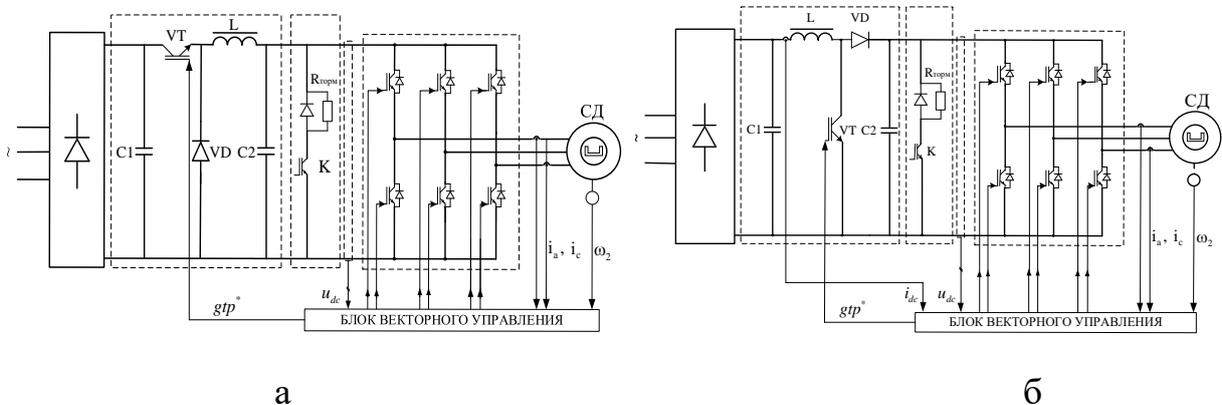


Рисунок 6 – Силовые схемы вентильного электропривода с импульсным преобразователем напряжения:

а – понижающий преобразователь; б – повышающий преобразователь

Для управления такими преобразователями предлагается использовать тот же алгоритм релейного управления, что и для управления транзисторами АИН, что отличает его от широко применяемых способов управления.

При этом для обеспечения улучшенной электромагнитной совместимости в системе векторного управления были построены модули для реализации совместного управления ключами АИН и импульсным преобразователем напряжения.

Для исследования системы совместного управления в среде Matlab Simulink были реализованы модели вентильного электропривода с повышающим и понижающим преобразователями с нагрузкой, создаваемой симулятором центробежного насоса. Разработанная система вентильного электропривода с понижающим импульсным преобразователем в звене постоянного тока защищена патентом на полезную модель №166655. В ходе моделирования проводилось исследование нескольких типов управления повышающим и понижающим преобразователем напряжения. Наилучшие результаты получены при управлении преобразователем в режиме поддержания баланса мощностей на входе и выходе преобразователя, поскольку в этом случае он является источником напряжения с возможностью поддержания повышенного напряжения на зажимах статора, что особенно важно в условиях протяженных кабельных линий. Модель вентильного электропривода с повышающим преобразователем напряжения и управлением с поддержанием баланса мощности показана на рисунке 7.

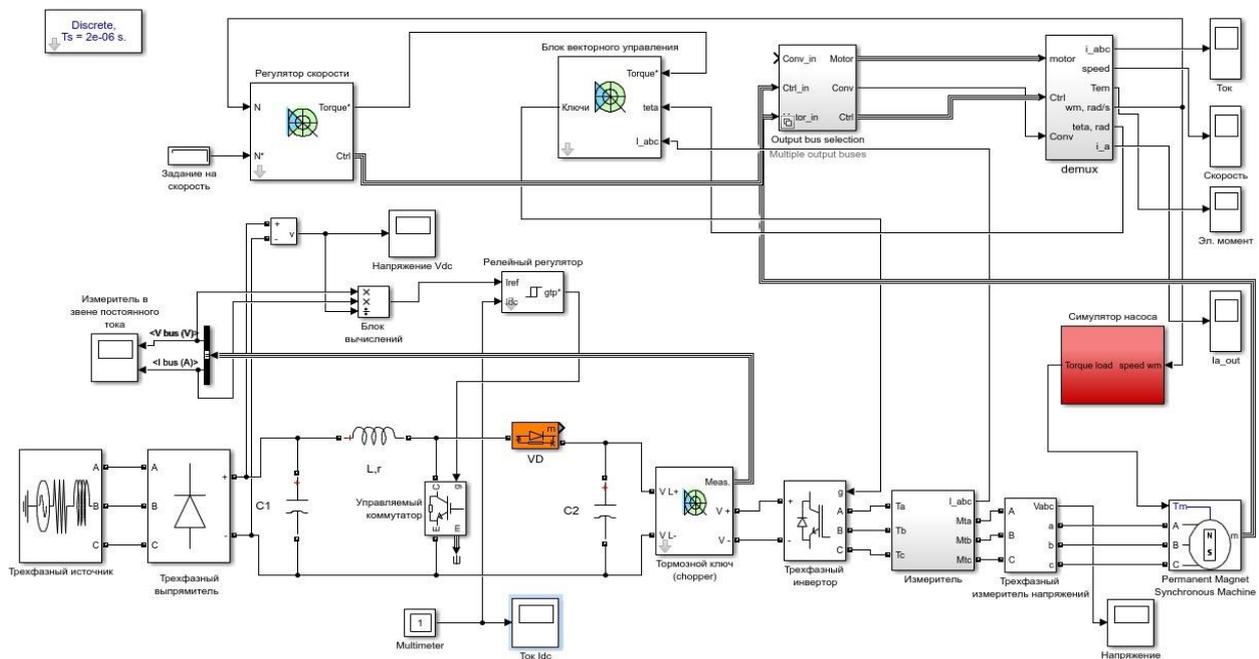


Рисунок 7 – Модель для исследования вентильного электропривода с повышающим преобразователем напряжения в среде Matlab Simulink

Полученные в результате математического моделирования графики демонстрируют синусоидальную форму токов статора, формируемую релейными регуляторами фаз (рисунок 8). Получены также график электромагнитного момента, развиваемого двигателем (рисунок 9, а), и график изменения скорости двигателя (рисунок 9, б).

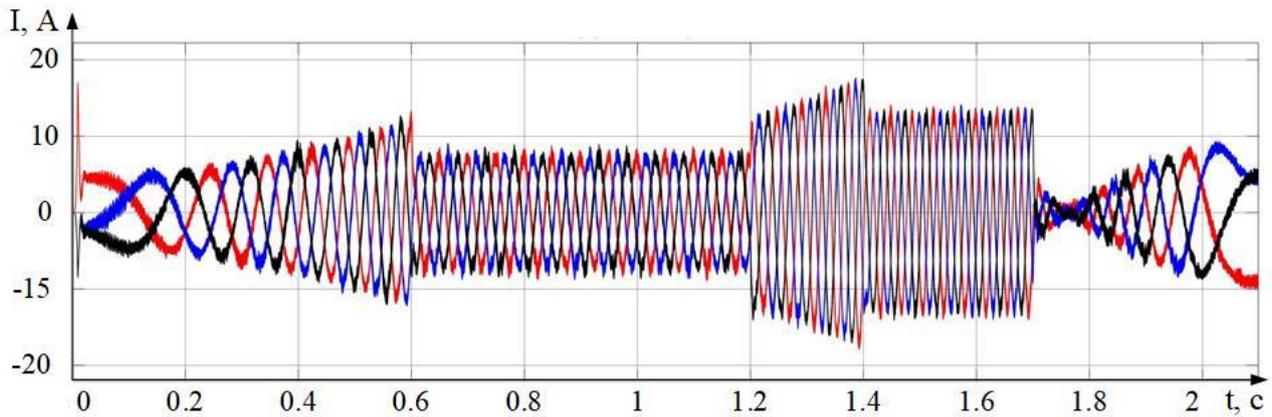


Рисунок 8 – График токов статора СДПМ

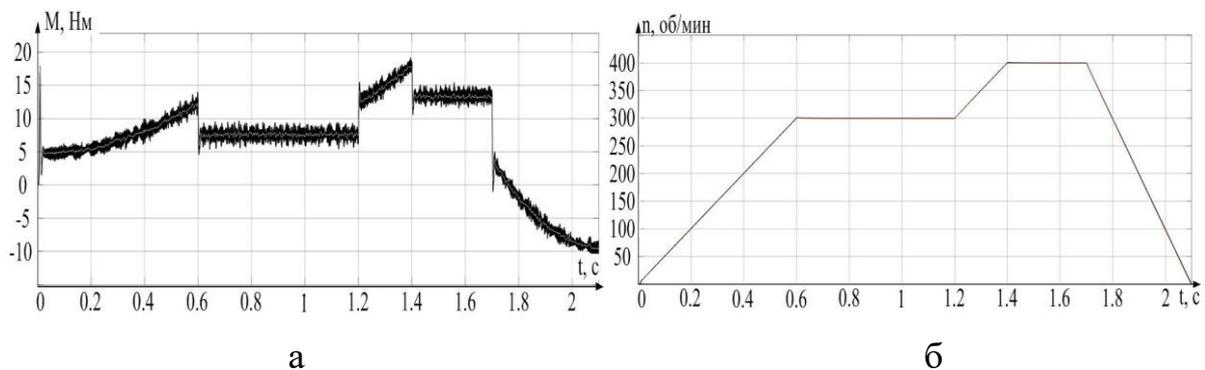


Рисунок 9 – Графики электромагнитного момента и скорости СДПМ

Производилась оценка влияния включения импульсного преобразователя напряжения в звено постоянного тока ПЧ на качество тока статора двигателя и питающей сети с использованием встроенных инструментов Matlab. Следует отметить, что в случае включения импульсного повышающего преобразователя напряжения значительно улучшается форма тока в питающей сети, уменьшается коэффициент гармонических искажений (ТНД) с 33.20 % до 18.08 %. Выявлено, что возможно получить ТНД менее 6 % за счет применения дополнительного фильтрующего дросселя на входе ПЧ вместе с повышающим преобразователем напряжения, однако это ведет к удорожанию системы электропривода. Кроме того, применение управляемого коммутатора в составе преобразователя напряжения несколько улучшает гармонический состав тока статора СДПМ: при его включении ТНД уменьшается с 48.27 % до 31.62 %. На рисунке 10, а показан гармонический состав тока сети при включении понижающего преобразователя напряжения, на рисунке 10, б – при включении повышающего преобразователя за период исследуемого сигнала.

Результаты исследования гармонического состава тока питающей сети без импульсного преобразователя приведены на рисунке 11, а. Эффект от включения фильтрующего дросселя показан на рисунке 11, б.

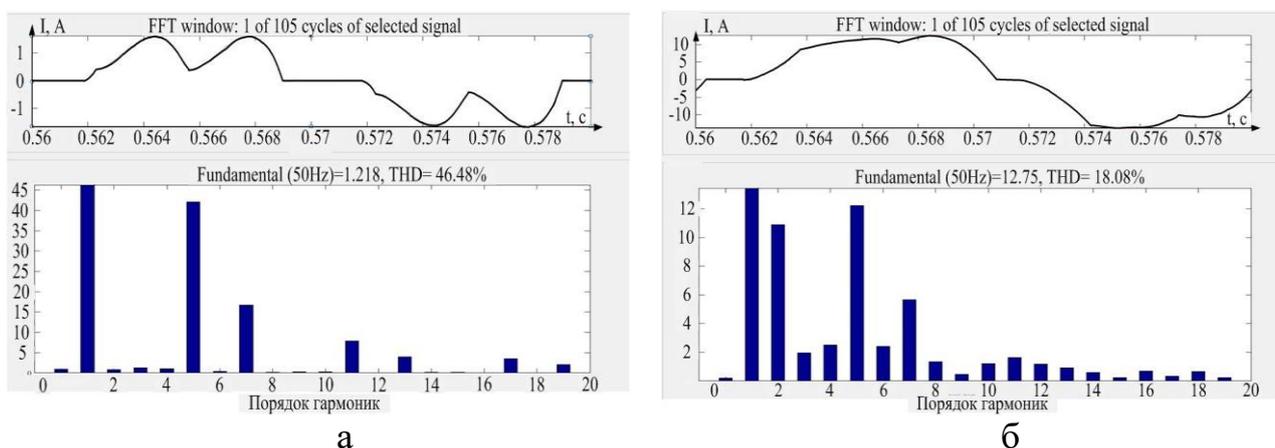


Рисунок 10 – Гармонический состав питающей сети при включении импульсных преобразователей напряжения

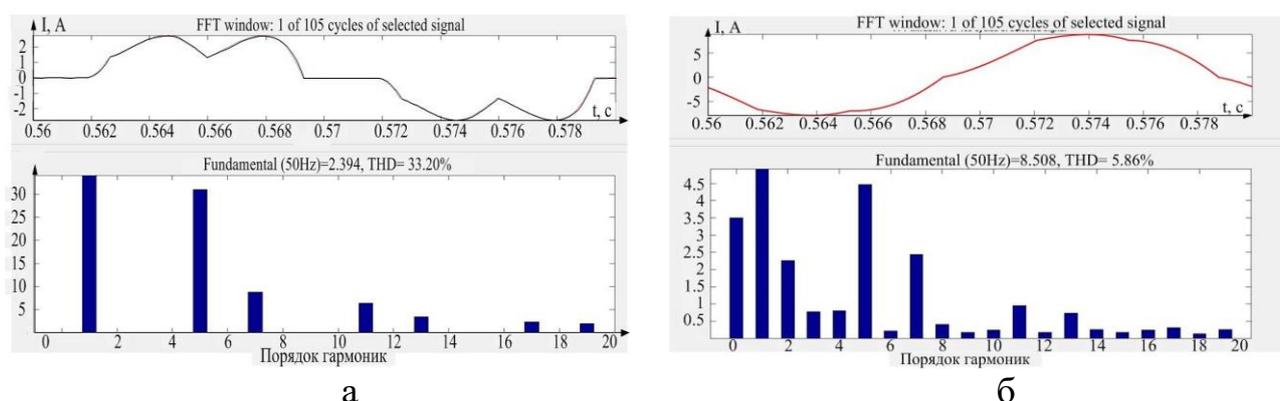


Рисунок 11 – Гармонический состав питающей сети без импульсного преобразователя и с фильтрующим дросселем

В четвертой главе было предложено адаптировать разработанную векторную систему управления вентиляльным электроприводом к существующим станциям управления погружными электродвигателями винтовых и центробежных насосов компании ООО «Борец» (г. Москва). Поскольку на большинстве скважин до сих пор применялись АД, внедрение вентиляльного электропривода позволит добиться существенных преимуществ, поскольку СДПМ превосходят АД по ряду энергетических и массогабаритных характеристик (таблица 1). В исследовании была проанализирована существующая система управления ЭЦН и сделан вывод, что не потребуются внесения значительных изменений в существующую структуру автоматического управления станции управления ООО «Борец». На базе оборудования компании «Борец» был собраны испытательный стенд для проведения двух экспериментов (рисунок 12).



Рисунок 12 – Схема испытательного стенда для экспериментов

Таблица 1 – Сравнение характеристик АД и СДПМ для погружных центробежных нефтяных насосов

Характеристики	Погружной ЭД (P=20 кВт)	
	АД ЭДБ-103	СДПМ 11ВЭДБТ- 103/3М1
Номинальная мощность ($P_{ном}$), кВт	20	20
Номинальная частота вращения ($n_{ном}$), об/мин	2910	3000
Номинальное линейное напряжение $U_{л}$, В	650	645
Номинальная рабочая частота тока f , Гц	50	50
Номинальный потребляемый ток, А	29	25,8
КПД при номинальной мощности на валу, %	79,5	88
Коэффициент мощности, $\cos\varphi$	0,83	0,94
Скорость охлажд. жидкости (не менее), м/с	0,15	0,04
Длина корпуса, мм	3712	2460
Масса (не более), кг	205	147

Трансформатор маслonaполненный (ТМПН) является необходимым элементом схемы, поскольку компания «Борец» выпускает двигатели различных номиналов напряжений питания. На испытательных стендах (рисунок 13) исследовался синхронный двигатель ВЭДБТ 7-117 (7 кВт, 430 В, 14 А, 500 об/мин).

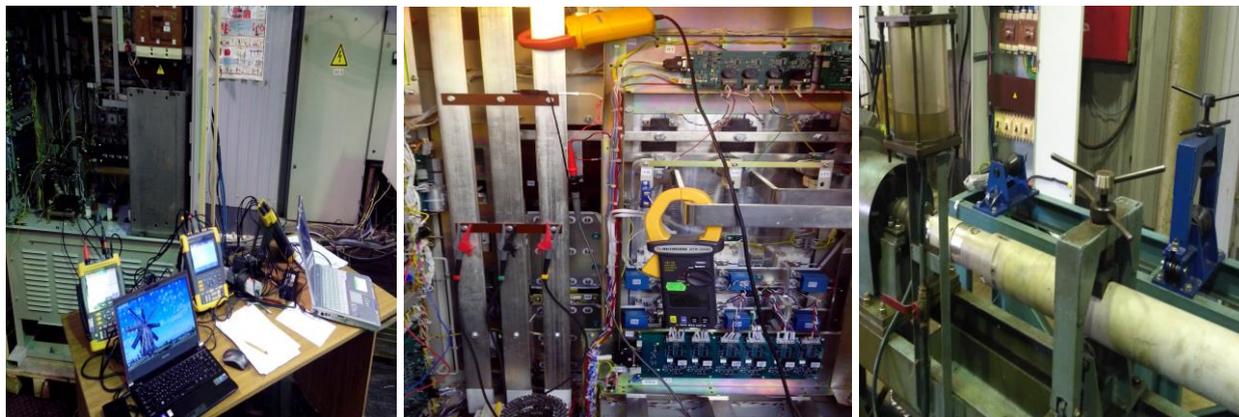
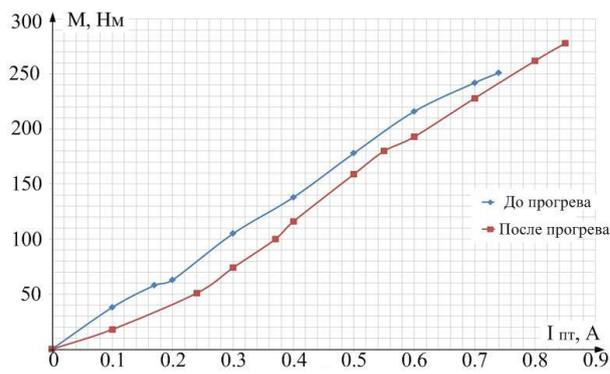
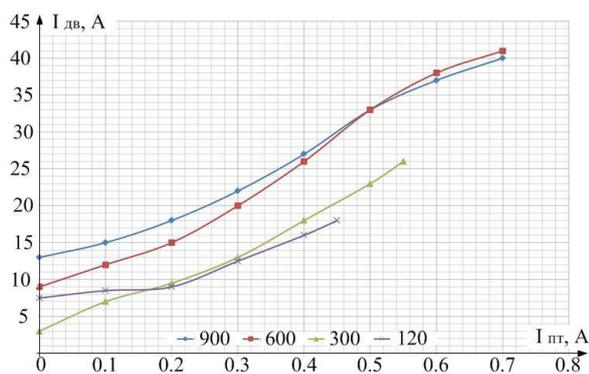


Рисунок 13 – Общий вид испытательных стендов

В ходе эксперимента №1 нагрузка на СДПМ создавалась с помощью порошкового тормоза (ПТ), когда на фиксированных частотах вращения двигателя (900 об/мин, 600 об/мин, 300 об/мин, 120 об/мин) дискретно увеличивался момент ПТ и снимались параметры двигателя. Причем перед началом опытов была произведена калибровка момента, создаваемого ПТ.

В результате эксперимента получены кривые зависимостей тока двигателя от нагрузки (рисунок 14, а), а также зависимость момента, создаваемого ПТ, от тока ПТ (рисунок 14, б).

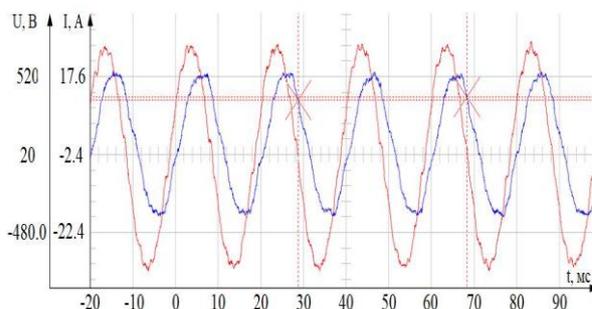
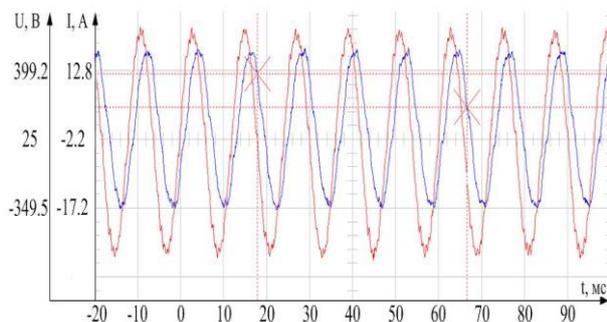


а

б

Рисунок 14 – Кривые зависимостей, полученные в эксперименте №1

При проведении эксперимента №2 реальный насос раскручивался до заданного числа оборотов, производилось снятие осциллограмм при полностью открытой задвижке (рисунок 15, а), то есть с минимальной нагрузкой, а затем с максимальной нагрузкой при закрытой задвижке (рисунок 15, б). Экспериментальные данные подтверждают данные, полученные в ходе математического моделирования.



а

б

Рисунок 15 – Осциллограммы токов и напряжения СДПМ, полученные в эксперименте №2

Кроме того, был сделан прогноз экономического эффекта, который возможно будет получить при внедрении вентиляного электропривода. Прогноз осуществлялся на основании расчета снижения затрат на электроэнергию, ремонтные работы и производственное обслуживание установок. Экономия электроэнергии составит примерно 17% в год, сократятся на 16.7% в год затраты на замену изношенных насосных систем, а также уменьшатся складские и транспортные расходы, что является довольно существенным в условиях действующего производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертации, позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Рассмотрены и проанализированы существующие способы управления синхронными двигателями с постоянными магнитами, являющимися основой вентильного электропривода. Предложена векторная система управления вентильным электроприводом на базе автономного инвертора напряжения с релейным регулированием токов статора, как наиболее простая в реализации и эффективная для применения в нефтегазовой отрасли.

2. Разработана система вентильного электропривода с преобразователем частоты на основе АИН с дополнительным транзисторным коммутатором в звене постоянного тока, стабилизирующим входное напряжение инвертора на заданном уровне, и системой релейного регулирования токов статора и выпрямленного тока, построена его математическая модель и проведены исследования свойств электропривода.

3. Разработана система вентильного электропривода с преобразователем частоты на основе АИН с дополнительным транзисторным коммутатором в звене постоянного тока, повышающим напряжение на входе и выходе инвертора на 20 %, и системой релейного регулирования токов статора и выпрямленного тока, построена его математическая модель и проведены исследования свойств электропривода.

4. Разработан алгоритм совместного управления коммутацией ключей АИН и импульсным преобразователем напряжения в звене постоянного тока, обеспечивающий улучшенную электромагнитную совместимость электропривода с питающей сетью и наилучшее качество питающего статор напряжения, при котором коэффициент гармонических искажений (THD) с 48.2% уменьшился до значения 31%.

5. Проведен анализ влияния включения импульсного повышающего и понижающего преобразователя напряжения в звено постоянного тока на гармонический состав токов на входе и выходе преобразователя частоты, в результате которого установлено, что при включении повышающего преобразователя напряжения в звено постоянного тока наблюдается значительное улучшение гармонического состава токов на входе (THD = 18.1 %) по сравнению с понижающим преобразователем напряжения или вообще без него, в сочетании с применением фильтрующего дросселя можно добиться наилучших результатов (THD < 6%).

6. Проведены экспериментальные исследования разработанного вентильного электропривода, показавшие его работоспособность и возможность использования на погружных глубинных нефтяных насосах, экспериментально подтверждены аналитические расчеты и результаты математического моделирования.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Voekov V.N. Developing a system of controlling instantaneous stator current values in an AC electric drive / V.N. Meshcheryakov, V.N. Voekov // Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering". – 2014. – Vol. 14, no. 2. – p. 44-48.

2. Voekov V.N. Developing a system of variable-frequency vector control based on a self-commutated current inverter in an AC electric drive / V.N. Meshcheryakov, V.N. Voekov // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2015. – № 1(39). – С. 6-13.

3. Воеков В.Н. Векторная система управления вентиляльным электроприводом на базе автономного инвертора напряжения с релейным регулированием входного тока инвертора и фазных токов статора / В.Н. Мещеряков, В.Н. Воеков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т.17 – №2. – С. 48-57.

Статьи в журналах и материалы конференций, входящих в международные наукометрические базы SCOPUS, IEEE Xplore:

4. Voekov V.N. Vector control system of PMSM based on self-commutated voltage inverter with relay controlled IGBT switch in DC link / V.N. Meshcheryakov, V.N. Voekov, I.V. Golovachev // В сборнике: Proceedings - 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC). – 2016. – С. 680-685.

5. Victor Mesheryakov, Vladimir Voekov, Vladimir Ivashkin, Stanimir Valtchev. Designing the universal vector control system with relay current regulator principle for general purpose industrial AC motor drive control // В сборнике: Proceedings – 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED 2018). – 2018. – С. 1-4.

Статьи в других изданиях:

6. Воеков В.Н. Релейное регулирование в преобразователе частоты с автономным инвертором тока / В.Н. Мещеряков, В.Н. Воеков // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Том №2. С. 30-34.

7. Voekov V.N. Vector control based on self-commutated current inverter with relay voltage regulation in rectifier drive / V.N. Meshcheryakov, V.N. Voekov // Вести вузов Черноземья. – 2016. – № 4. – С. 28–36.

8. Воеков В.Н. Автоматизированный электропривод с релейным регулированием входного тока инвертора и фазных токов статора / В.Н. Мещеряков, В.Н. Воеков, О.В. Крюков, Д.В. Ласточкин // Автоматизация в энергетике. – 2019. – №6 (119). – С. 4-8.

Публикации в трудах конференций:

9. Воеков В.Н. Система управления двигателем переменного тока на базе автономного инвертора с релейным регулятором тока / «Современная металлургия нового тысячелетия» сборник научных трудов II международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 194-199.

10. Воеков В.Н. Вентильный электропривод для робототехнических систем с релейным регулированием входного тока инвертора и фазных токов статора / В.Н. Мещеряков, В.Н. Воеков, О.В. Мещерякова // Материалы 10-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2017). Том №1. – Дивноморское. – 2017. – С. 167-171.

11. Воеков В.Н. Совершенствование системы управления вентильным электроприводом / В.Н. Воеков, И.В. Головачев, М.С. Пантелеев // Материалы XII международной научно-практической конференции «Современные сложные системы управления», г. Липецк, 25-27 октября 2017 г. № 2. С. 108-113.

12. Патент на полезную модель РФ. № 166655. Устройство для управления электроприводом переменного тока / Мещеряков В.Н., Воеков В.Н. // Опубликовано 10.12.2016. Бюл. №34.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [1,2,6] – разработал системы вентильного электропривода с релейным принципом формирования мгновенных значений токов на выходе преобразователя частоты; [3,4,5] – разработал математические модели вентильного электропривода в среде Matlab Simulink и провел их исследование, в результате чего выявлено, что при релейном регулировании обеспечивается синусоидальная форма токов на зажимах статора двигателя; [7,8,10,11,12] – разработал систему вентильного электропривода с управляемым коммутатором в звене постоянного тока, провел анализ результатов моделирования разработанной системы, установил, что в этом случае возможно регулирование напряжения, на входе и выходе инвертора.