

*На правах рукописи*



ЖЕРЕБЦОВ Андрей Леонидович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИНХРОННОГО  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЙ  
В ПОСТФОРСИРОВОЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново – 2019

Работа выполнена на кафедре «Электрические системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, доцент **Шульпин Андрей Александрович**

**Официальные оппоненты:**

**Титов Владимир Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», заместитель заведующего кафедрой «Электрооборудование, электропривод и автоматика» по научной работе;

**Крюков Олег Викторович**, доктор технических наук, доцент, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», главный научный сотрудник Корпоративного научно-технического центра коррозионного мониторинга и защиты от коррозии.

**Ведущая организация:**

ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», г. Москва.

Защита состоится «6» декабря 2019 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 212.064.02, при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

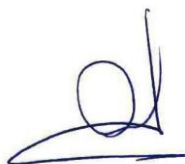
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен [http://ispu.ru/files/DISSERTACIYa\\_Zherebcova\\_A.L.pdf](http://ispu.ru/files/DISSERTACIYa_Zherebcova_A.L.pdf).

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ [www.ispu.ru](http://www.ispu.ru).

Автореферат разослан «   » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.064.02



Сидоров  
Сергей Георгиевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время газовая промышленность России является одной из ведущих и интенсивно развивающихся отечественных отраслей с непрерывным ростом производственных мощностей. Это накладывает особые условия на эксплуатирующееся в отрасли оборудование в плане повышения его надежности, энергетической эффективности и экологической безопасности. Благодаря своим высоким энергетическим показателям и конструктивным особенностям мощные синхронные двигатели (СД) нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Очень хорошо СД зарекомендовали себя в составе технологического оборудования, работающего в продолжительном режиме и не требующего глубокого регулирования скорости, например, на компрессорных станциях (КС) газотранспортной системы.

В Единой газотранспортной системе России эксплуатируются компрессорные установки газоперекачивающих агрегатов (ГПА) с мощными СД применяемыми в составе электропривода, на долю которых приходится около 16 % от общего количества эксплуатируемых ГПА. Суммарная установленная мощность СД в магистральном транспорте газа составляет свыше 6000 МВт, это более 15 % от общей установленной мощности ГПА. Эксплуатируемые СД зарекомендовали себя как надежный элемент электропривода для нагнетателей ГПА КС. В то же время в процессе эксплуатации СД возникают разнообразные внешние воздействия, которые не позволяют обеспечить их устойчивую работу даже при современных схмотехнических и алгоритмических решениях.

Проведенный анализ нарушений работы мощных синхронных электроприводов компрессорных установок в рамках газотранспортного предприятия ООО «Газпром трансгаз Сургут» показал, что согласно статистическим данным, за последние 8 лет зафиксировано 77 случаев воздействия возмущающих факторов, приведших к 117 аварийным остановкам (АО) СД в составе электроприводных ГПА. Основными причинами зафиксированных АО являются:

- провалы напряжения в системе внешнего электроснабжения;
- случаи сброса и ударного увеличения нагрузки на валу ротора СД, вызванные режимными моментами транспорта газа;
- провалы напряжения в узлах нагрузки с работающим СД в момент пуска «соседнего» СД подключенного к одной секции шин;
- нарушения в работе вспомогательного оборудования и оборудования электроснабжения ГПА (электродвигатели насосов, системы возбуждения, комплектные трансформаторные подстанции компрессорного цеха (КЦ) и др.).

Особая роль в обеспечении устойчивости работы узлов нагрузки с мощными СД отводится автоматической системе возбуждения (АРВ). Значительный объем трудов и исследований по указанной теме, подчеркивает значимость исследования данного вопроса и ее актуальность.

Нарушения в работе синхронных электроприводов компрессорных установок приводят к снижению эффективности их использования: возникновению рисков неисполнения договорных обязательств перед потребителями, потерям газа на стравливание, повреждению дорогостоящего оборудования, нарушению технологического процесса транспорта газа, опасности для здоровья и жизни людей.

Таким образом, повышение эффективности синхронного электропривода газоперекачивающих станций в настоящее время является актуальным.

**Степень разработанности темы исследования.** В развитие теории и практики синхронных машин, а также в решение вопросов АРВ СД значительный вклад внесли отечественные и зарубежные ученые и инженеры: М.М. Ботвинник, А.А. Горев, П.С. Жданов, А.И. Важнов, В.А. Веников, А.И. Вольдек, И.А. Сыромятников, А.И. Глебов, А.А. Юрганов, Г.Р. Герценберг, И.А. Груздев, М.Л. Левинштейн, С.А. Совалов, Н.И. Соколов, О.В. Щербачев, Я.Б. Данилевич, А.В. Иванов-Смоленский, И.Е. Овчинников, Е.Я. Казовский, И.П. Копылов,

М.П. Костенко, М.Г. Чиликин, Р.А. Лютер, Г.А. Сипайлов, И. М. Постников, Г.М. Хуторецкий, В. В. Хрущев, Ф.М. Юферов, Л.Дрейфус, Р.Парк, Ч. Конкордий, Р. Ранкин, М. Лившиц и др.

Необходимо отметить, что теория устойчивости синхронных машин рассматривается, в основном, применительно к мощным синхронным генераторам, в то время как относительно высоковольтных СД указанная тема менее проработана. Преимущества СД, достигнутый уровень его автоматизации и расширение области применения, обуславливают возрастающий интерес исследователей к вопросам повышения устойчивости его работы.

Проведенные, в рамках выполнения диссертационной работы, исследования публикаций и патентов по указанной теме обозначили значительное количество опубликованных материалов. При этом основное внимание уделяется вопросам устойчивости СД при кратковременных перерывах электроснабжения, быстродействующим защитах, системам автоматизации нефтегазоперекачивающих агрегатов, схемотехническим решениям. Практический опыт эксплуатации мощных СД и анализ опубликованных работ показывают, что вопрос обеспечения устойчивости СД в постфорсировочных режимах работы исследован недостаточно.

*Под термином постфорсировочный режим работы СД будет пониматься режим работы системы АРВ СД, который характеризуется окончанием режима форсировки тока возбуждения и временем восстановления технологического режима работы СД.*

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности электропривода с мощными СД газоперекачивающих станций в постфорсировочных режимах работы за счет разработки и применения способа управления током возбуждения и алгоритма АРВ СД, позволяющих повысить устойчивость работы СД при выходе из режима форсировки, исключающих режим перерегулирования и предотвращающих выход СД из синхронизма.

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

1) анализ опубликованных результатов исследований, технических решений, обеспечивающих эффективную работу электротехнических систем с мощными СД и оптимальную работу АРВ СД в постфорсировочных режимах работы;

2) анализ работы мощных СД на основе результатов экспериментальных данных, полученных в условиях действующих КЦ;

3) разработка математической модели электротехнической системы КЦ с мощными синхронными электроприводами на базе СД для исследования постфорсировочных режимов работы;

4) разработка способа управления током возбуждения системы АРВ, обеспечивающего устойчивость работы СД в постфорсировочных режимах работы;

5) разработка алгоритма эффективного управления АРВ СД в постфорсировочных режимах работы, исключающего режим перерегулирования и предотвращающего выход СД из синхронизма;

6) проведение экспериментальных исследований разработанного способа управления возбуждением и алгоритма АРВ СД в условиях действующего КЦ;

7) внедрение разработанного способа управления возбуждением и алгоритма АРВ СД на действующих КС ПАО «Газпром».

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.** Диссертационная работа соответствует паспорту специальности в части:

**формулы специальности** – «Научная специальность, объединяющая исследования по общим закономерностям преобразования, накопления, передачи и использования электрической энергии и электротехнической информации, а также принципы и средства управления объектами, определяющие функциональные свойства действующих или создаваемых электротехнических комплексов и систем промышленного, транспортного, бытового и специального назначения» - в диссертационной работе исследованы принципы и

средства управления мощными электроприводами с СД электротехнической системы КЦ в постфорсировочных режимах работы;

**области исследования, пункт 1** – «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем» - в диссертационной работе разработана математическая модель электротехнической системы КЦ с мощными СД для исследования постфорсировочных режимов работы;

**области исследования, пункт 3** – «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления» - в диссертационной работе разработан алгоритм эффективного управления АРВ СД при выходе из режима форсировки, исключая режим перерегулирования и предотвращающий выход СД из синхронизма;

**области исследования, пункт 4** – «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях» - в диссертационной работе исследованы работоспособность и качество функционирования электротехнического комплекса с мощными СД. Для повышения эффективности его функционирования в постфорсировочных режимах работы, разработан способ и алгоритм управления током возбуждения.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

- разработана математическая модель электротехнической системы КЦ с мощными электроприводами на базе СД в программном комплексе MatLab, позволяющая проводить количественный анализ результатов расчета режимов с воспроизведением постфорсировочных режимов работы;

- разработан способ управления током возбуждения системы АРВ СД, позволяющий повысить устойчивость работы СД в постфорсировочных режимах работы и исключаящий нарушение технологического режима работы КЦ;

- разработан алгоритм эффективного управления АРВ, позволяющий исключить эффект «перерегулирования» тока возбуждения системы АРВ СД при выходе из режима форсировки и предотвращающий выход СД из синхронизма.

**Практическая значимость работы.**

1. Практически полное устранение нарушений технологического процесса газотранспортного предприятия за счет внедрения разработанного способа управления током возбуждения системы АРВ СД и алгоритма эффективного управления АРВ СД в постфорсировочных режимах работы (за период 2011-2016 гг. произошло 79 аварийных остановов по причине провала напряжения в системе внешнего электроснабжения, изменения режима работы КЦ, пуска электроприводных ГПА, при работающем в режиме превышения номинального значения мощности синхронном электроприводе). После внедрения в 2016-2017 гг. разработанного алгоритма и способа управления АРВ СД аварийные остановки по указанным причинам не зафиксированы.

2. Повышение устойчивости работы мощных СД в постфорсировочных режимах работы (в течение 2017-2018гг. отсутствуют факты выхода СД из синхронизма в постфорсировочных режимах).

3. Минимизация потерь мощности и энергии в СД и внешней системе электроснабжения с использованием системы АРВ СД путем поддержания коэффициента мощности равным 1.

4. Повышение экологической безопасности за счет снижения до 18 тыс. м<sup>3</sup> в год потерь от stravливания в атмосферу природного газа при нарушениях технологического процесса.

5. Использование результатов работы для повышения эффективности электротехнических систем КС и других промышленных объектов с мощными СД.

**Методология и методы исследования.**

В процессе теоретических исследований использовались: основы теории электрических цепей, теория электрических машин переменного тока, теория электропривода, теории автоматического управления и регулирования.

Исследования статических и динамических режимов проводились методом математического моделирования с использованием программно-технического комплекса MatLab (Simulink). Практические эксперименты проводились на электроприводном ГПА с СД типа СТД-12500 действующего КЦ с применением интегрированных в цифровое тиристорное возбуждающее устройство современных устройств фиксации процессов и параметров проводимого экспериментального исследования.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель электротехнической системы КЦ с мощными СД для исследования постфорсировочных режимов работы СД.
2. Способ управления током возбуждения системы АРВ, позволяющий повысить устойчивость работы СД в постфорсировочных режимах работы.
3. Алгоритм эффективного управления АРВ СД, позволяющий исключить эффект «перерегулирования» тока возбуждения при выходе из режима форсировки и предотвращающий выход СД из синхронизма.

**Достоверность результатов работы** обеспечивается применением теорий электрических цепей, машин переменного тока, автоматического управления и регулирования, обоснованностью выбора физических и математических моделей, применением результатов эксплуатационных испытаний, литературными и полученными в работе экспериментальными данными, адекватностью расчетных и экспериментальных результатов, внедрением результатов по теме исследования на действующих производственных объектах и достижением положительных итогов.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на XXIV Международной научно-технической конференции «Информационная среда вуза» (г. Иваново, 2017 г.), на III Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы энергетики» (г. Нижний Новгород, 2017 г.), на научно-техническом совете секции «Энергетика» ПАО «Газпром» (г. Калининград, 2017 г.).

**Публикации.** Результаты исследований, проведенных автором, отражены в 8 публикациях, из них 4 – в научных журналах, входящих в перечень рекомендованных изданий ВАК РФ и 3 – в материалах международных, всероссийских научно-технических конференций и отраслевых научно-технических советов. Федеральной службой по интеллектуальной собственности выдан 1 патент на изобретение.

**Личный вклад автора.** Постановка цели и задач диссертационной работы, разработка математической модели электротехнической системы КЦ с мощными электроприводами на базе СД типа СТД-12500, разработка способа управления тока возбуждения системы АРВ и алгоритма эффективного управления АРВ СД, позволяющего повысить устойчивость работы СД в постфорсировочных режимах работы, проведение исследований с применением математического моделирования и натурных экспериментов. Обработка, проведение анализа и обобщение полученных результатов, в том числе в качестве изобретения. Проведение апробации и внедрение на производственных объектах, подготовка публикаций по результатам проведенной работы.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 152 страницы, содержит 54 рисунка, 9 таблиц и 5 приложений. Список литературы состоит из 122 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, обозначена научная новизна работы, обоснована ее теоретическая и практическая значимость, а также степень достоверности и апробации работы.

**В первой главе** рассмотрены особенности электротехнической системы КЦ КС с мощными СД, обозначены их характеристики, проведен анализ технологической нагрузки

синхронного электропривода, применяемых систем возбуждения, систем управления и законов регулирования, реализованных в статических системах возбуждения с проведением анализа существующих работ.

Учитывая, что мощные СД в силу ряда технико-экономических преимуществ применяются с нагнетателями электроприводных ГПА, питание узлов нагрузки промышленных предприятий осуществляется, как правило, от главных понизительных подстанций с первичным напряжением 220 (110) кВ (рис. 1). Электроснабжение осуществляется по первой категории надежности и бесперебойности электроснабжения от двух независимых взаиморезервирующих источников питания со схемой автоматического включения резерва.

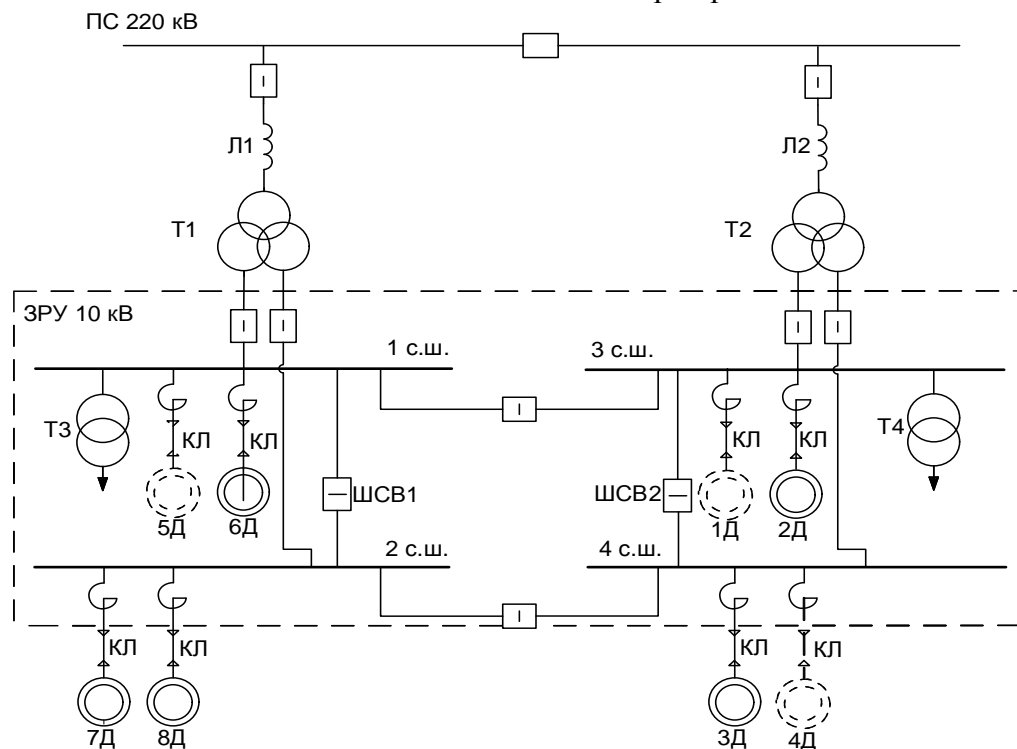


Рисунок 1 – Электротехническая система компрессорного цеха с мощными СД

При эксплуатации СД существуют риски перехода синхронной машины в асинхронный режим работы вследствие нарушения динамической устойчивости. Основными причинами нарушения динамической устойчивости являются провалы напряжения и ударные увеличения нагрузки на валу ротора СД.

Необходимо отметить, что на КС используются как полнонапорные, так и неполнонапорные центробежные нагнетатели. Особенностью неполнонапорных нагнетателей является необходимость их последовательного включения (формирование группы) для обеспечения требуемой степени компримирования природного газа. Работа СД в группе несет определенные риски, а именно, при возмущающих воздействиях (провалы напряжения, резкий перепад давления и т. п.) один из СД группы негативно влияет на устойчивость работы другого.

При определенных ситуациях наличие любого из возмущающих воздействий приводит к взаимному раскачиванию СД с возможным выходом из режима синхронизма и их аварийному останову (рис. 2).

При необходимости регулирования нагрузки на КС с СД наибольшее применение нашел способ изменения количества работающих ГПА, а также байпасирование потока газа (регулирование нагрузки путем перепуска части сжатого газа с выхода нагнетателя на вход).

Важную роль в сохранении устойчивости узла нагрузки с мощным синхронным электроприводом играет система АВР СД. Основными требованиями к системам возбуждения СД являются обеспечение быстродействия регулирования возбуждения с высокими кратностями форсирования в аварийных режимах, обеспечение надежного питания обмотки ротора СД в нормальных и аварийных режимах, регулирование напряжения возбуждения в достаточных пределах.

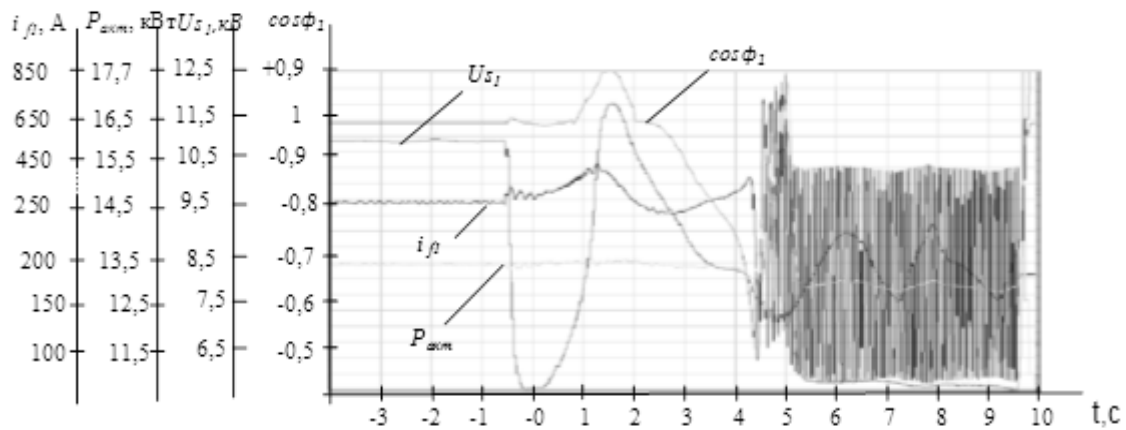


Рисунок 2 - Экспериментальные осциллограммы нарушения синхронного режима СТД-12500

Тиристорные системы возбуждения обладают более высокими технико-экономическими показателями по сравнению с другими системами возбуждения.

Реальные условия работы СД зачастую характеризуются как непостоянством нагрузки на валу двигателя, так и провалами напряжения в системе электроснабжения.

Наиболее оптимальными являются способы управления возбуждением СД, предусматривающие управление током возбуждения, как по отклонению напряжения статора, так и по величине реактивной составляющей тока статора.

Одним из требований в отношении динамических характеристик систем автоматического регулирования возбуждения является требование к качеству переходного процесса, которое характеризуется степенью перерегулирования.

Из опыта эксплуатации подтверждается факт неустойчивой работы мощных СД при наличии перерегулирования. Указанный фактор явно прослеживается в постфорсировочном режиме, т.е. после окончания режима форсировки (рис. 3).

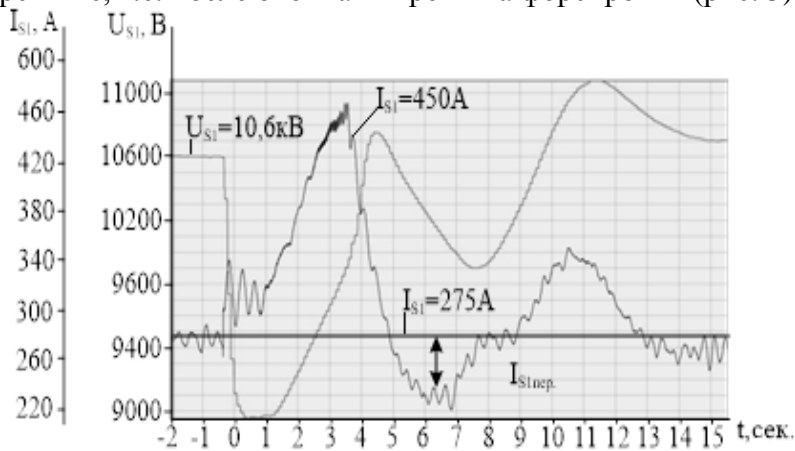


Рисунок 3 - Осциллограммы с отражением перерегулирования тока возбуждения  $I_{s1пер}$ .

Причиной перерегулирования является выдача задания ПИ-регулятору от контура регулирования по коэффициенту мощности максимально быстро привести значение коэффициента мощности к заданной уставке  $\cos \phi$ .

В постфорсировочных режимах работы возможно нахождение СД в зоне неустойчивой работы, а возврат в зону устойчивой работы обеспечивается воздействием на ток возбуждения контуром управления по углу нагрузки машины. Превышение угла нагрузки обычно

имеет кратковременный характер, но при загруженной машине может привести к выходу СД из синхронизма. При этом выход из синхронизма мощных СД зависит не только от величины (значения) и характера (провал напряжения, сброс, или ударное увеличение нагрузки на валу ротора СД) возмущающих воздействий, величины нагрузки, но и от технологической схемы работы СД (работа с полнонапорными или неполнонапорными нагнетателями).

На основании проведенного анализа патентов, публикаций, диссертационных работ установлено, что вопрос обеспечения устойчивости работы мощных СД в постфорсировочных режимах работы недостаточно исследован.

**Во второй главе** приведена разработанная математическая модель электротехнической системы электроприводного КЦ с СД СТД-12500. Моделирование переходных процессов электромеханических систем с синхронными машинами решается на практике в программных комплексах, например, Mustang, DAKAR, АНАРЭС-2000, EUROSTAG, RastrWin и др.



Установлено, что встроенные модели систем возбуждения могут решать задачи управления током возбуждения синхронных генераторов, при этом использование их для СД затруднительно. В близких по теме исследования работ, математические модели созданы в среде Simulink (MatLab) и предусматривают работу одного СД, включенного на секцию шин узла нагрузки. Соответственно не учитываются особенности процессов и параметры взаимного влияния при работе двух СД, подключенных к одной секции шин узла нагрузки. Разработка математической модели в среде MatLab обусловлена следующими факторами:

- расчеты схемы замещения электротехнической системы КЦ с мощными СД в Simulink требуют значительных затрат времени на обработку данных;
- использование типовых блоков Simulink не позволяет объективно учесть и отобразить протекающие процессы исследуемой схемы при различных режимах работы мощных СД, подключенных к одной секции шин узла нагрузки;
- не учитывается изменение напряжения питания возбудителя, отсутствуют контуры регулирования по коэффициенту мощности.

Принято решение о реализации математической модели электротехнической системы КЦ в среде MatLab учетом взаимного влияния работы двух СД и влияния их на устойчивость электротехнической системы в постфорсировочных режимах работы и схемах их включения.

В процессе разработки математической модели принят ряд допущений при моделировании системы внешнего электроснабжения, трансформатора и СД.

Основные допущения используют при математическом описании математической модели для упрощения вычислительных операций и наглядности, отражающих сущность процессов.

Для исследования функционирования взаимного влияния СД проведены следующие вычислительные эксперименты:

1) СД1 работает в режиме статической нагрузки с параметрами возбуждения, соответствующими технологическому режиму (исходный статический режим);

2) СД1 и СД2, включенные в разные секции шин, работают в режимах статических нагрузок с параметрами возбуждения, соответствующими технологическому режиму (нормальный режим эксплуатации);

3) СД1 работает в режиме статической нагрузки с параметрами возбуждения, соответствующими технологическому режиму и выполняется асинхронный пуск СД2 (СД1 и СД2 включены в разные секции шин);

4) СД1 работает в режиме статической нагрузки с параметрами возбуждения, соответствующими технологическому режиму и выполняется асинхронный пуск СД2 (СД1 и СД2 включены в одну секцию шин).

В модели трансформатора исходные уравнения электрического равновесия трехфазной обмотки высокого напряжения трансформатора имеют вид:

$$U_1 = W_1 S_\mu \frac{d}{dt} B_\mu + L_{1\sigma} \frac{d}{dt} I_1 + L_{1.21\sigma} \frac{d}{dt} I_{21} + L_{1.22\sigma} \frac{d}{dt} I_{p22} + R_1 I_1; \quad (1)$$

двух обмоток низкого напряжения

$$U_{22} = W_{22} S_\mu \frac{d}{dt} B_\mu + L_{1.22\sigma} \frac{d}{dt} I_1 + L_{21.22\sigma} \frac{d}{dt} I_{21} + L_{22\sigma} \frac{d}{dt} I_{22} + R_{22} I_{22}, \quad (2)$$

$$U_{21} = W_{21} S_\mu \frac{d}{dt} B_\mu + L_{1.21\sigma} \frac{d}{dt} I_1 + L_{21\sigma} \frac{d}{dt} I_{21} + L_{21.22\sigma} \frac{d}{dt} I_{22} + R_{21} I_{21}, \quad (3)$$

где  $B_\mu$ ,  $S_\mu$ - вектор индукций и диагональная матрица площадей поперечных сечений стержней;  $L_{1.21\sigma}$ ,  $L_{1\sigma}$ ,  $L_{1.22\sigma}$ ,  $L_{21.22\sigma}$ ,  $L_{22\sigma}$ ,  $R_1$ ,  $R_{21}$ ,  $R_{22}$  – диагональные матрицы индуктивностей и взаимоиндуктивностей рассеяния контуров и активных сопротивлений обмоток;  $W_1$ ,  $W_{22}$ ,  $W_{21}$ - диагональные матрицы чисел витков первичной и двух секций вторичной обмотки трансформатора;  $I_1$ ,  $I_{21}$ ,  $I_{22}$  - вектора токов первичной и секций вторичной обмотки трансформатора.

Уравнение намагничивающих сил стержней по закону полного тока имеет вид:

$$L_\mu H_\mu = W_1 I_1 + W_{21} I_{21} + W_{22} I_{22}, \quad (4)$$

где  $H_\mu$  - вектор напряженностей и диагональная матрица стержней длин средних силовых линий стержней.

Пренебрегаем намагничиванием ( $H_\mu=0$ ) и получаем выражение токов первичной обмотки через токи вторичной обмотки

$$I_1 = -k_{1.21} I_{21} - k_{1.22} I_{22} \quad (5)$$



Известно, что использование координатных преобразований обеспечивает представление трехфазных цепей статоров из трехфазных в двухфазные (в осях  $d, q$ ). Потребляемые токи  $I_{s1}, I_{s2}$  становятся зависимыми переменными, которые не могут быть включены непосредственно в уравнения электрических цепей внешних для статоров двигателей. Введение цепей из емкостей и сопротивлений (рис. 5) добавляет в схему узлы, разрешение баланса токов которых позволяет решить данную задачу. Таким образом, эти, искусственно введенные цепочки, играют роль подсхем связи. Соответствующая схеме замещения (рис. 5) математическая модель состоит из системы уравнений (8).

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{hpb} &= \mathbf{L}_{hpb}^{-1} (\mathbf{E}_{hpb} - \mathbf{U}_{chpb} - \mathbf{R}_{hpb} \mathbf{I}_{hpb}), \\ \frac{d}{dt} \mathbf{U}_{c1} &= c_1^{-1} \mathbf{I}_{c1}, \\ \frac{d}{dt} \mathbf{U}_{c2} &= c_2^{-1} \mathbf{I}_{c2}, \\ \frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi}_{dq1} &= \mathbf{E}_{dqz1} - \omega_{r1} \mathbf{B} \boldsymbol{\Psi}_{dq1} - r_1 \mathbf{I}_{dq1}, \\ \frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi}_{f1} &= e_{f1} - r_{f1} i_{f1}, \\ \frac{d}{dt} \omega_{r1} &= j_{pr1}^{-1} (h_{em1} - h_{c1}), \\ \frac{d}{dt} \theta_{r1} &= \omega_{r1}, \\ \frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi}_{dq2} &= \mathbf{E}_{dqz2} - \omega_{r2} \mathbf{B} \boldsymbol{\Psi}_{dq2} - r_{s2} \mathbf{I}_{dq2}, \\ \frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi}_{42} &= -\beta_{r2} \mathbf{B} \boldsymbol{\Psi}_{42} - r_{42} \mathbf{I}_{42}, \\ \frac{d}{dt} \omega_{r2} &= j_{pr2}^{-1} (h_{em2} - h_{c2}), \\ \frac{d}{dt} \theta_{r2} &= \omega_{r2}, \end{aligned} \right\} (8)$$

Двигатель М1 до момента пуска двигателя М2 работает в статическом режиме.

Электромагнитный момент второго двигателя М2, развиваемый под действием токов пусковой обмотки, вычисляется по формуле:

$$h_{em2} = l_{m2} (i_{q2} i_{d42} - i_{d2} i_{q42}). \quad (9)$$

Преобразования токов, напряжений и потокосцеплений статора, пускаемого двигателя М2, выполняются в системе координат, связанной с угловой частотой  $\omega_1$  вращающегося магнитного поля статора:

$$\mathbf{A}_{dq1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sin(\theta_1 + \frac{\pi}{3}) & \sin(\theta_1) \\ \cos(\theta_1 + \frac{\pi}{3}) & \cos(\theta_1) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где  $\theta_1 = \omega_1 t$ .

Координатные преобразования физических переменных ротора выполняются на основе принципа скольжения, как в случае асинхронных двигателей:

$$\mathbf{A}_{dq2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sin(\Delta\theta_r + \frac{\pi}{3}) & \sin(\Delta\theta_r) \\ \cos(\Delta\theta_r + \frac{\pi}{3}) & \cos(\Delta\theta_r) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\Delta\theta_r = \omega_1 t - \theta_r$$

где  $\mathbf{E}_{hpb}$  - ЭДС контуров подсхемы питания и шинопроводов;  $\mathbf{U}_{chpb}$  - вектор напряжений емкостей цепи связи секции трансформатора;  $\mathbf{U}_{c1}, \mathbf{U}_{c2}$  - напряжения конденсаторов ветвей цепи связи подсхемы статоров СД1, СД2;  $c_1, c_2$  - емкости конденсаторов ветвей цепи связи подсхемы статоров СД1, СД2;  $\mathbf{I}_{c1}, \mathbf{I}_{c2}$  - токи ветвей цепей связи подсхемы статоров СД1, СД2;  $\boldsymbol{\Psi}_{dq1}, \boldsymbol{\Psi}_{dq2}, \mathbf{I}_{dq1}, \mathbf{I}_{dq2}$  - вектора преобразованных потокосцеплений и токов по продольному и поперечному контурам двигателей СД1, СД2;  $\boldsymbol{\Psi}_{42}, \mathbf{I}_{dq42}$  - потокосцепления и токи по продольной и поперечной осям пусковой обмотки СД2;  $\mathbf{E}_{dq1}$  - преобразованные фазные ЭДС, формируемые на зажимах статора;  $\mathbf{B}$  - вещественная матрица;  $r_{s1}, r_{s2}$  - активное сопротивление статора СД1, СД2;  $\psi_{f1}, \psi_{f2}, e_{f1}, e_{f2}, r_{f1}, r_{f2}, i_{f1}, i_{f2}$  - потокосцепления, ЭДС на зажимах, активные сопротивления и токи обмоток возбуждения СД1, СД2;  $r_{42}$  - активное сопротивление пусковой обмотки СД2;  $\beta_{r2}$  - скольжение ротора СД2;  $j_{pr1}, j_{pr2}$  - момент инерции роторов СД1, СД2;  $h_{em1}, h_{em2}$  - электромагнитный момент СД1, СД2;  $h_{c1}, h_{c2}$  - момент сопротивления на валу роторов СД1, СД2;  $\theta_{r1}, \theta_{r2}$  - углы поворота роторов СД1 и СД2;  $\omega_{r1}, \omega_{r2}$  - угловая частота вращения роторов СД1, СД2.

Полученная математическая модель позволяет учесть провалы напряжения на шинах и анализировать параметры провала напряжения в узле нагрузки по степени опасности нарушения работоспособности СД, находить возможности воздействия со стороны системы возбуждения, исследовать работу в статических и переходных процессах для разработки технических и алгоритмических решений повышения эффективности работы синхронного электропривода, оценить взаимное влияние СД в постфорсировочных режимах их работы.

Двухконтурная схема АРВ СД с ПИ-регулятором (рис. 6) обеспечивает поддержание заданного значения коэффициента мощности.

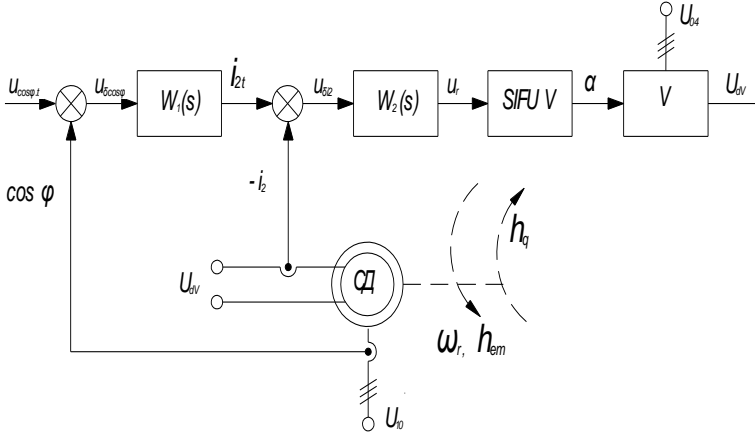


Рисунок 6 - Схема АРВ СД с ПИ-регулятором источника питания возбуждения;  $i_2$  – сигнал датчика тока возбуждения;  $SIFU\_V$  – блок формирования импульсов управления вентилями преобразователя;  $\alpha$  – величина угла управления, синхронизированного с напряжением  $U_{04}$ ;  $U_{04}$  – трехфазное напряжение сети 0,4 кВ;  $U_{dv}$  – напряжение источника питания цепи возбуждения;  $\cos \varphi$  – сигнал коэффициента мощности цепи статора;  $U_{10}$  – трехфазное напряжение сети 10 кВ;  $\omega_r$  – угловая частота вращения ротора синхронного двигателя СД;  $h_{em}, h_q$  – электромагнитный момент двигателя и момент сопротивления на валу ротора.

Коэффициент мощности вычисляется в модели в конце каждого периода на основе применения разложения кривых мгновенных значений токов и напряжений статора в ряд Фурье на периоде. Так как интервал по времени невелик, влияние аperiodической составляющей незначительно и соответственно незначительная задержка коэффициента мощности.

Изображения сигналов системы с ПИ-регуляторами:

$$\begin{aligned} i_{2t}(s) &= \left(k_{p1} + \frac{1}{T_{i1}s}\right) u_{\delta \cdot \cos}(s), \\ u_r(s) &= \left(k_{p2} + \frac{1}{T_{i2}s}\right) u_{\delta \cdot i2}(s), \end{aligned} \quad (12)$$

где  $i_{2t}$  – сигнал задания по току;  $u_r$  – сигнал управления каналами СИФУ;  $u_{\delta \cdot \cos \varphi}$ ,  $u_{\delta \cdot i2}$  – сигналы рассогласований контуров коэффициента мощности и тока;  $k_{p1}$ ,  $k_{p2}$  – коэффициенты усиления пропорциональной части;  $T_{i1}$ ,  $T_{i2}$  – постоянные времени интегральной части регуляторов. Величина рассогласования по коэффициенту мощности считается постоянной на шаге интегрирования, в том числе на шаге  $2\pi$ .

Нужно учитывать, что функция коэффициента мощности четная. При отстающем фазовом угле тока по отношению к напряжению ( $\varphi = \varphi_u - \varphi_i > 0$ ), чтобы сократить положительную разницу  $u_{\delta \cdot \cos \varphi}$ , следует увеличивать ток возбуждения, а при опережающем ( $\varphi = \varphi_u - \varphi_i < 0$ ) ток возбуждения следует уменьшать.

Соотношение (12) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} s(T_{i1}i_{2t}(s) - T_{i1}k_{p1}u_{\delta \cdot \cos}(s)) &= u_{\delta \cdot \cos}(s), \\ s(T_{i2}u_r(s) - T_{i2}k_{p2}u_{\delta \cdot i2}(s)) &= u_{\delta \cdot i2}(s). \end{aligned} \quad (13)$$

Если ввести вспомогательные переменные

$$\begin{aligned} y_{r1} &= T_{i1}i_{2t} - T_{i1}k_{p1}u_{\delta \cdot \cos \varphi}, \\ y_{r2} &= T_{i2}u_r - T_{i2}k_{p2}u_{\delta \cdot i2}, \\ i_{2t} &= \frac{1}{T_{i1}}y_{r1} + k_{p1}u_{\delta \cdot \cos \varphi} \text{sign}(\varphi), \\ u_r &= \frac{1}{T_{i2}}y_{r2} + k_{p2}u_{\delta \cdot i2}, \end{aligned} \quad (14)$$

и перейти от изображений к оригиналам, то получаются дифференциальные уравнения, отображающие изменения сигналов регуляторов:

$$\begin{aligned}\frac{dy_{r1}}{dt} &= u_{\delta} \cdot \cos\varphi, \\ \frac{dy_{r2}}{dt} &= u_{\delta} \cdot i_2.\end{aligned}\quad (15)$$

Эти уравнения добавляются к общей системе уравнений состояния силовой части и совместно с ней интегрируются. Получаемые в ходе интегрирования переменные  $y_{r1}$  и  $y_{r2}$  позволяют вычислить величину сигнала управления системы импульсно-фазового управления (СИФУ) преобразователя, по которому находится угол управления тиристорами  $\alpha$ .

Обратная связь по току возбуждения реализуется микропроцессорной системой управления возбудителя. В начальный момент все величины системы управления используются в относительных единицах и предполагается, что цифровой регулятор тока идеально управляет тиристорным преобразователем по пропорциональному закону:

$$u_{c2} = k_{r2}(u_{c1} - u_{i2}), \quad (16)$$

где  $u_{c2}$  – сигнал управления блоком формирования импульсов управления по принципу, аналогичному вертикальному, при котором угловая характеристика СИФУ принимается линейной, так что угол управления оказывается равным:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{u_{ci2}}{10} \right). \quad (17)$$

При  $u_{c2}=3.33$  угол управления оказывается равен  $\pi/3$ , что даёт напряжение на зажимах обмотки возбуждения, соответствующее номинальному значению при регулировочной характеристике преобразователя, выражаемой формулой:

$$U_{dv} = U_{d0} \cos \alpha, \quad (18)$$

где  $U_{d0}$  – максимальное напряжение на выходе преобразователя.

При таких параметрах обеспечивается двойная форсировка тока возбуждения в переходных режимах.

Применение последовательного определения ЭДС по выражениям (16) – (18) имитирует функционирование трёх основных блоков контура управления.

**В третьей главе** приводится разработанный способ управления тока возбуждения системы АРВ СД и алгоритм эффективного управления АРВ СД в постфорсировочных режимах работы.

В постфорсировочных режимах работы возможно нахождение СД в зоне неустойчивой работы, а возврат в зону устойчивой работы обеспечивается воздействием на ток возбуждения контуром управления по углу нагрузки машины. Данное превышение угла нагрузки обычно имеет кратковременный характер, но при загруженной машине может привести к выходу СД из синхронизма.

Для предотвращения перехода работы СД в асинхронный режим необходимо с оптимальной скоростью снижать ток возбуждения при выходе из форсировочного режима. В классических схемах АРВ при снижении тока возбуждения ПИ-регулятором после режима форсировки происходит перерегулирование, при котором коэффициент мощности  $\cos\varphi$  смещается в индуктивную зону, что негативно отражается на устойчивости работы синхронного электропривода, а при дополнительном возмущающем воздействии может привести к аварийному останову СД. Для устранения аварийных ситуаций, связанных с эффектом перерегулирования, разработан способ управлением тока возбуждения СД с регулируемой скоростью развозбуждения.

Разработанный и реализованный на производственных объектах способ управления тока возбуждения обеспечивает повышение устойчивости работы СД в постфорсировочных режимах работы.

Отличительной особенностью является то, что в постфорсировочных режимах работы управление током возбуждения производится не ПИ-регулятором. Воздействие на ток возбуждения производит разработанный контур плавного снижения тока возбуждения, включающий блоки 22, 23, 24, 26, 27 (рис. 7). Снижение тока возбуждения осуществляется с оптимальной скоростью, которая определяется задатчиком плавного снижения тока возбуждения. Ток возбуждения уменьшается со значения тока форсировки до момента, пока коэффициент мощности  $\cos\varphi$  двигателя не войдет в заданный диапазон ( $\cos\varphi/\text{зад} \pm \Delta$ ), а

значение тока возбуждения в заданный диапазон ( $I_{fmax}$ ,  $I_{fmin}$ ), при этом воздействие на ток возбуждения производится изменением уставки напряжения статорной цепи на входе регулятора напряжения, реализуя соподчиненный принцип регулирования. После входа параметров  $\cos\phi$  и тока возбуждения в границы вышеуказанных диапазонов, дальнейшее управление током возбуждения производится по известному способу.

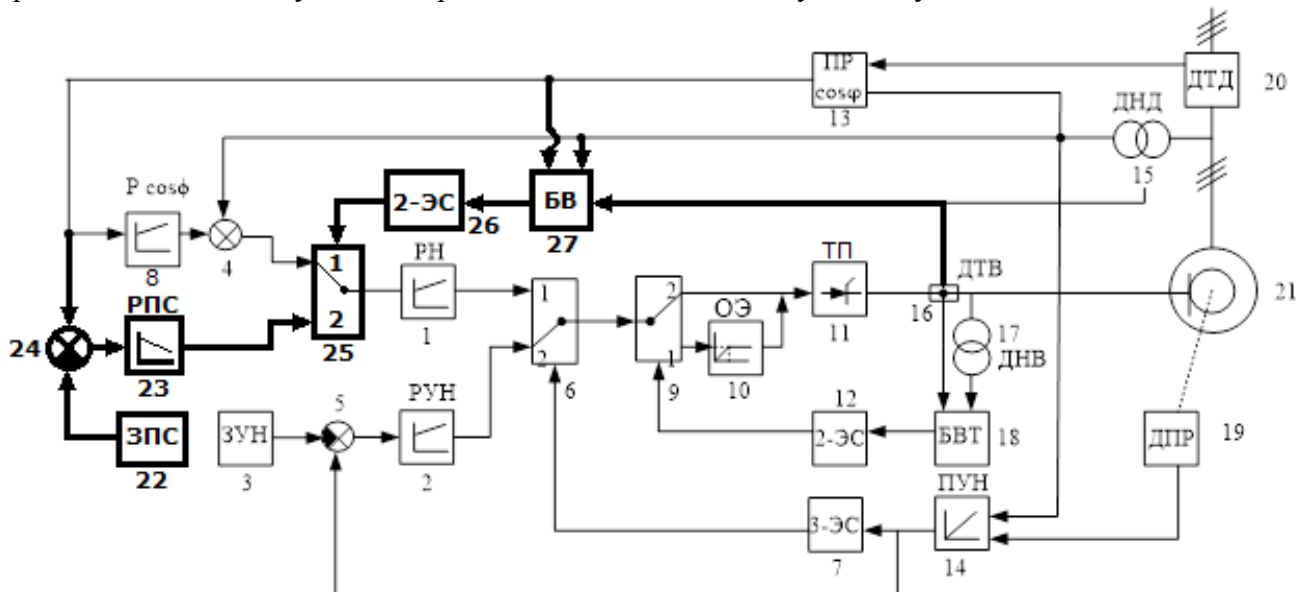


Рисунок 7 – Функциональная схема устройства, реализующего способ управления током возбуждения с регулируемой скоростью развозбуждения и контролем диапазона угла нагрузки СД

где 1 – регулятор контура управления током возбуждения по отклонению напряжения статора (РН); 2 – регулятор угла нагрузки двигателя (РУН); 3 – задатчик угла нагрузки (ЗУН); 4 – вычитающий элемент; 5 – вычитающий элемент; 6 – переключающий элемент; 7 – трехпозиционный элемент сравнения (3-ЭС); 8 – регулятор изменения  $\cos\phi$  (P  $\cos\phi$ ); 9 – переключающий элемент; 10 – ограничивающий элемент (ОЭ); 11 – тиристорный возбудитель (ТП); 12 – элемент сравнения (2-ЭС); 13 – преобразователь  $\cos$  двигателя (ПР  $\cos\phi$ ); 14 – преобразователь угла нагрузки (ПУН); 15 – датчик напряжения статора (ДНД); 16 – датчик тока возбуждения  $I_f$  (ДТВ); 17 – датчик напряжения возбуждения  $U_f$  (ДНВ); 18 – вычислительный блок расчета текущего значения температуры обмотки ротора (БВТ); 19 – датчик положения вектора магнитного момента ротора (ДПР); 20 – датчик тока цепи статора (ДТД); 21 – синхронный двигатель; 22 – задатчик плавного снижения тока возбуждения (ЗПС); 23 – регулятор плавного снижения тока возбуждения (РПС); 24 – вычитающий элемент; 25 – переключающий элемент; 26 – элемент сравнения (2-ЭС); 27 – блок вычисления снижения тока возбуждения (БВ).

Управление передается ПИ-регулятору и воздействие осуществляется контуром по напряжению с контролем отклонения напряжения статорной цепи, при этом уставкой регулятора напряжения статора управляет третий, вспомогательный регулятор по коэффициенту мощности, который, удерживает величину коэффициента мощности  $\cos \phi$  двигателя вблизи единицы и обеспечивает минимизацию потерь в статорной цепи СД.

Таким образом, в каждый момент управление возбуждением осуществляется одним из двух конкурирующих контуров – контуром управления по напряжению статора или контуром управления по углу нагрузки – в зависимости от величины этого угла.

Особенностью нового способа является то, что контур управления по напряжению статора содержит четвертый, вновь разработанный вспомогательный контур плавного снижения тока возбуждения, который через регулятор плавного снижения формирует уставку напряжения для регулятора напряжения только в постфорсировочных режимах работы. Соподчиненное построение данного регулятора с регулятором напряжения обеспечивает безударный переход управления между третьим и четвертым вспомогательными регуляторами.

Диапазон уставки величины коэффициента мощности  $\cos \phi$ , обеспечивающий условие устойчивой синхронизации СД составляет 0,99 плюс минус 0,01 (рис. 8).

Одним из основных элементов, определяющих наличие либо отсутствие условий

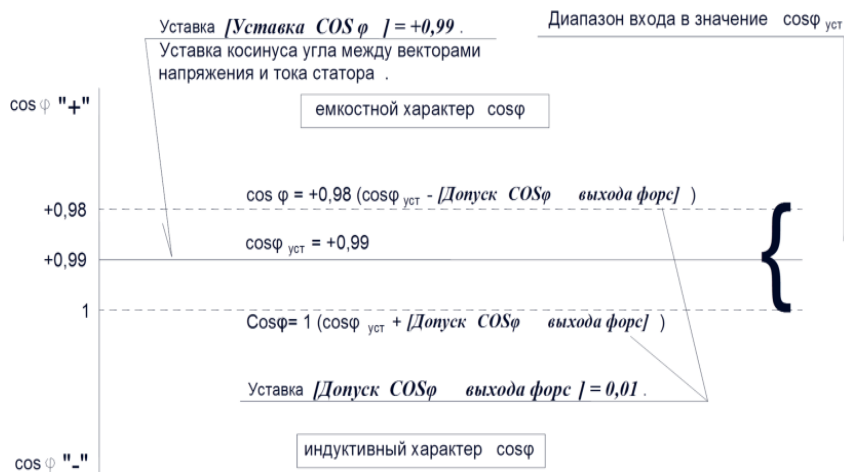


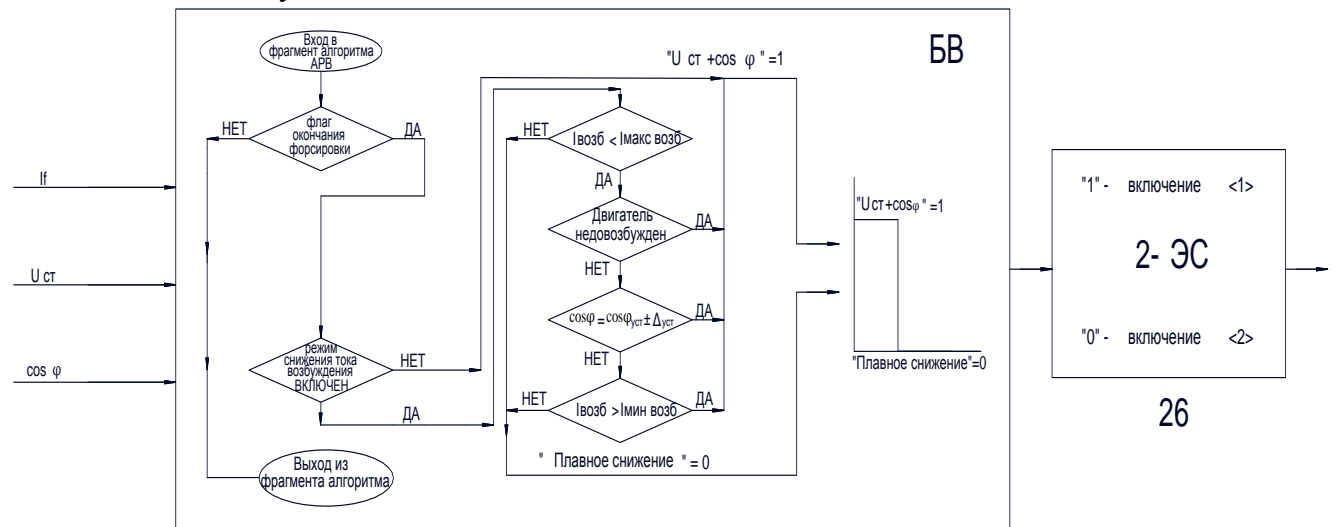
Рисунок 8 - Уставка диапазона входа в значение  $\cos \varphi$  «Допуск  $\cos \varphi$  выхода форс»

включения регулятора плавного снижения тока возбуждения, является блок вычисления снижения тока возбуждения (рис. 9), работающий по условиям разработанного алгоритма и предотвращающий режим перерегулирования в постфорсировочных периодах работы. В свою очередь регулятор плавного снижения тока возбуждения формирует уставку напряжения для регулятора напряжения только в постфорсировочных режимах работы после создания

соответствующих условий, переключая управление током возбуждения на контур плавного снижения тока возбуждения.

Блок 27 вычисления снижения тока возбуждения определяет момент возникновения и окончания условий для плавного снижения тока возбуждения.

На рис. 9 приведена блок-схема разработанного алгоритма работы блока 27 вычисления снижения тока возбуждения.



27

Рисунок 9 - Блок-схема алгоритма работы блока вычисления снижения тока возбуждения

После окончания режима форсировки воздействие на ток возбуждения происходит на снижение с постоянной скоростью, определяемой, в том числе уставкой «Delta cos форсировка», регулятор 23 плавного снижения тока возбуждения (рис. 7) уменьшает ток возбуждения по условиям разработанного алгоритма, при этом, если:

- СД недовозбужден ( $\cos \varphi < 0$ ), регулятор 23 снижает ток возбуждения до значения уставки «Макс. ток возбуждения»;
- СД перевозбужден ( $\cos \varphi > 0$ ), регулятор 23 снижает ток возбуждения в сторону значения уставки «Мин. ток возбуждения»;
- измеренное значение  $\cos \varphi$  равно уставке «Уставка  $\cos \varphi$ » с допуском, определяемым уставкой «Допуск  $\cos \varphi$  выхода форс» и значение тока возбуждения выше значения уставки «Макс. ток возбуждения», регулятор 23 снижает ток до значения уставки «Макс. ток возбуждения».

Если значение тока возбуждения ниже значения уставки «Макс. ток возбуждения» и измеренное значение  $\cos\phi$  равно уставке «Уставка  $\cos\phi$ » с допуском, определяемым уставкой «Допуск  $\cos\phi$  выхода форс» (рис. 8), управление сразу переходит в режим регулирования по закону «Уст +  $\cos\phi$ » – регулятор 1 контура управления током возбуждения по отклонению напряжения статора и регулятор 8 изменения  $\cos\phi$ . После выполнения вышеописанных условий управление переходит в режим регулирования по закону «Уст +  $\cos\phi$ » – регулятор 1 и регулятор 8 (рис. 7).

Разработанный алгоритм АРВ исключает режим перерегулирования тока возбуждения и предотвращает выход СД из синхронизма в постфорсировочных режимах работы.

Экспериментально доказана эффективность применения разработанного способа управления током возбуждения и алгоритма АРВСД в постфорсировочных режимах работы, что подтверждается результатами экспериментальных исследований (рис. 10).

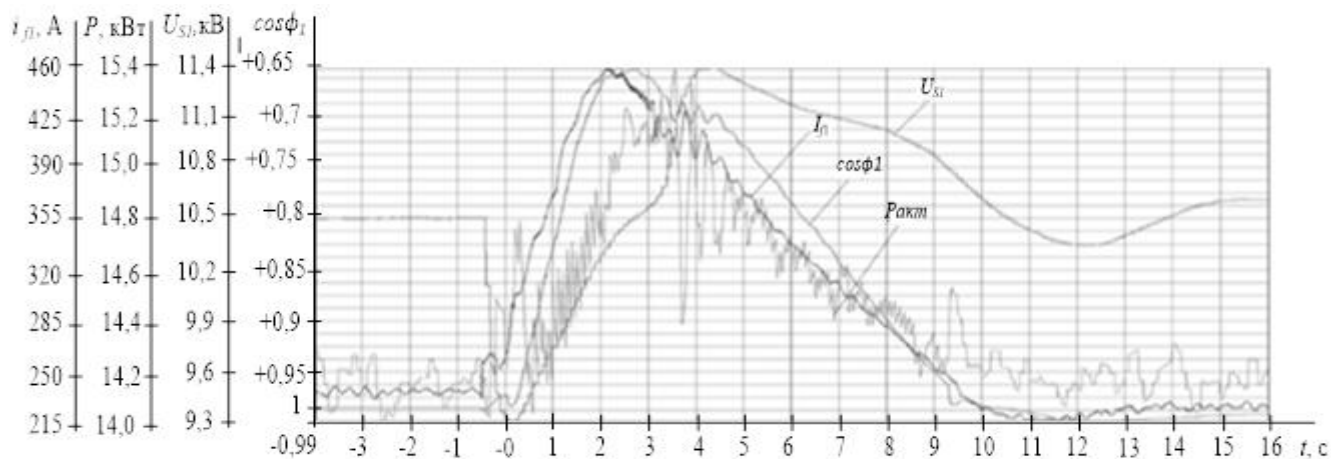


Рисунок 10 - Экспериментальные осциллограммы параметров после изменения способа управления током возбуждения АРВ СД

При технологической нагрузке на СД равной величине активной мощности более 14 МВт и воздействии возмущающего фактора (провал напряжения) в постфорсировочном режиме работы двигатель не теряет синхронизма.

После изменения способа управления током возбуждения АРВ СД и алгоритма АРВ СД в постфорсировочных режимах работы, при рассогласовании тока возбуждения в 200 А, перерегулирование отсутствует, величина коэффициента мощности  $\cos\phi$  составила 1, что соответствует работе СД в зоне устойчивой синхронизации.

Необходимо отметить, что практически аналогичный режим работы СД без изменения способа и алгоритма работы АРВ (рис. 2) не предотвращает наличие перерегулирования и асинхронный режим его работы.

Таким образом, разработанные алгоритм эффективного управления АРВ СД и способ управления током возбуждения системы АРВ в постфорсировочных режимах работы обеспечивают синхронный режим его работы и повышают эффективность синхронного электропривода.

**В четвертой главе приведены** результаты расчетных и экспериментальных исследований статических и динамических режимов СД. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных осциллограмм после изменения способа управления током возбуждения и алгоритма АРВ в постфорсировочных режимах работы. В результате проведенного моделирования показана возможность применения разработанной модели для исследования показателей работы СД в статических и переходных (динамических) процессах.

На рис. 11 представлены полученные на математической модели осциллограммы токов и напряжений статора СТД-12500 в рабочем режиме при коэффициенте мощности 0,99 и опережающем фазовом угле тока по отношению к напряжению.



При провале напряжения до граничного уровня, СД переходит в режим с отстающим по фазе углом тока по отношению к напряжению (рис. 12). Полученные результаты полностью соответствуют теоретическим исследованиям. Проведение практических исследований статических режимов в условиях действующего КЦ затруднительно.

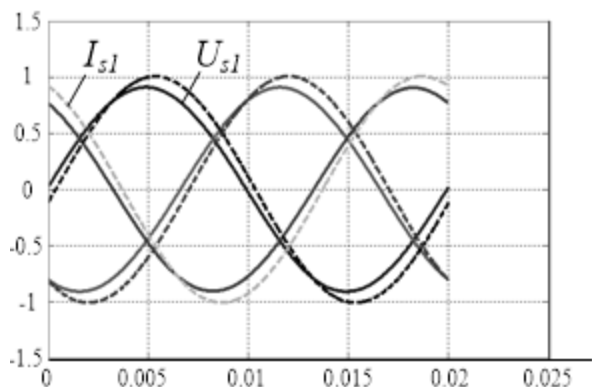


Рисунок 11 - Расчетные осциллограммы токов и напряжений статора СД в рабочем режиме в ОЕ при коэффициенте мощности 0,99 и опережающем фазовом угле тока по отношению к напряжению

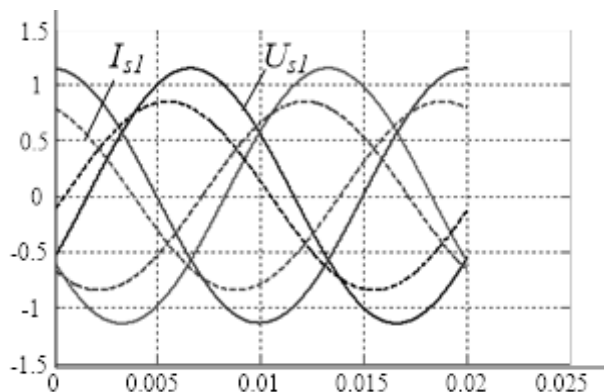


Рисунок 12 - Расчетные осциллограммы напряжений и токов статора СД при пуске второго СД, включенного на одну секцию шин узла нагрузки

Воспроизведение процесса взаимного влияния СД при включении на разные секции шин узла нагрузки с помощью математической модели показало, что снижение напряжения на статоре двигателя М1 во время пуска двигателя М2 на другой секции шин вторичной обмотки трансформатора составляет не более 3–4 %. В то же время провал напряжения на секции шин пускаемого двигателя в переходном процессе достигает 10 % и более.

Математическая модель позволяет также подтвердить наличие нарушения синхронного режима работы мощного СД и при использовании режима форсировки, если развозбуждение проводится без учета ряда особенностей СД. При ранее использовавшемся алгоритме, после отключения форсировки ток возбуждения снижался максимально быстро под действием регулятора тока возбуждения. Однако, как показал опыт применения систем возбуждения с такой схемой управления, в указанном случае происходит процесс перерегулирования и ток возбуждения проваливается намного ниже (рис. 3).

Проведенный анализ осциллограмм и параметров, полученных при моделировании и по имеющимся данным эксплуатации, подтверждает сходимость процессов изменения параметров (рис. 13 - 16).

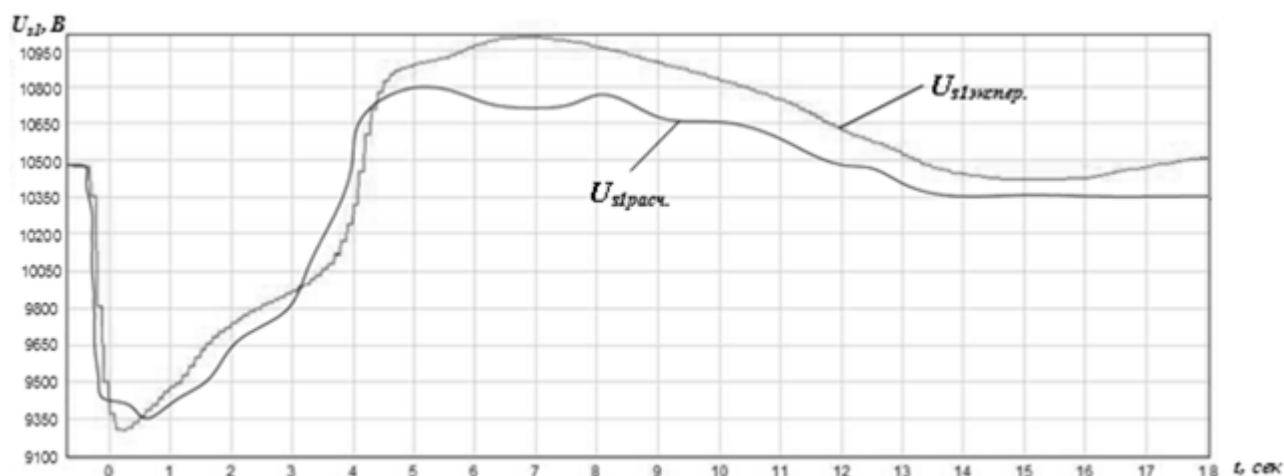


Рисунок 13 - Экспериментальная и расчетная осциллограммы напряжений статора СД 1 при пуске СД 2

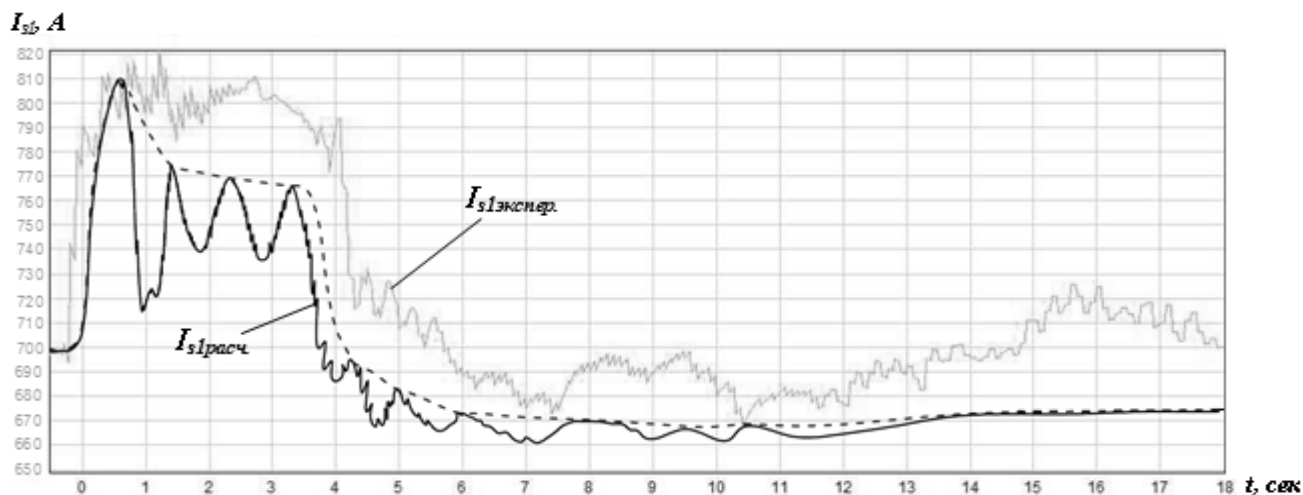


Рисунок 14 - Экспериментальная и расчетная осциллограммы токов статора СД1 при пуске СД2

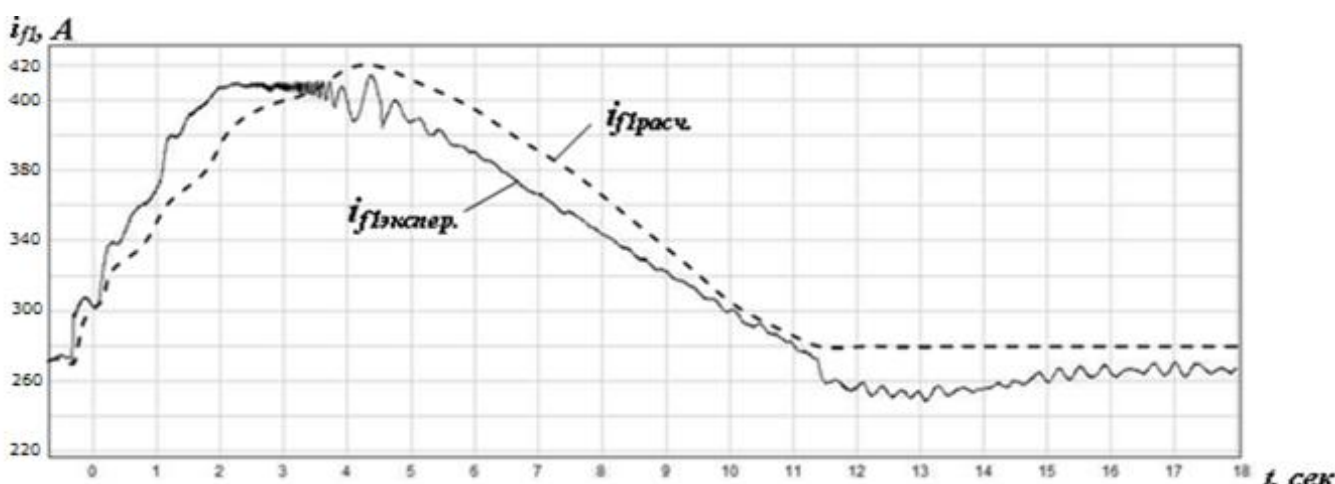


Рисунок 15 - Экспериментальная и расчетная осциллограммы токов возбуждения СД1 при пуске СД2

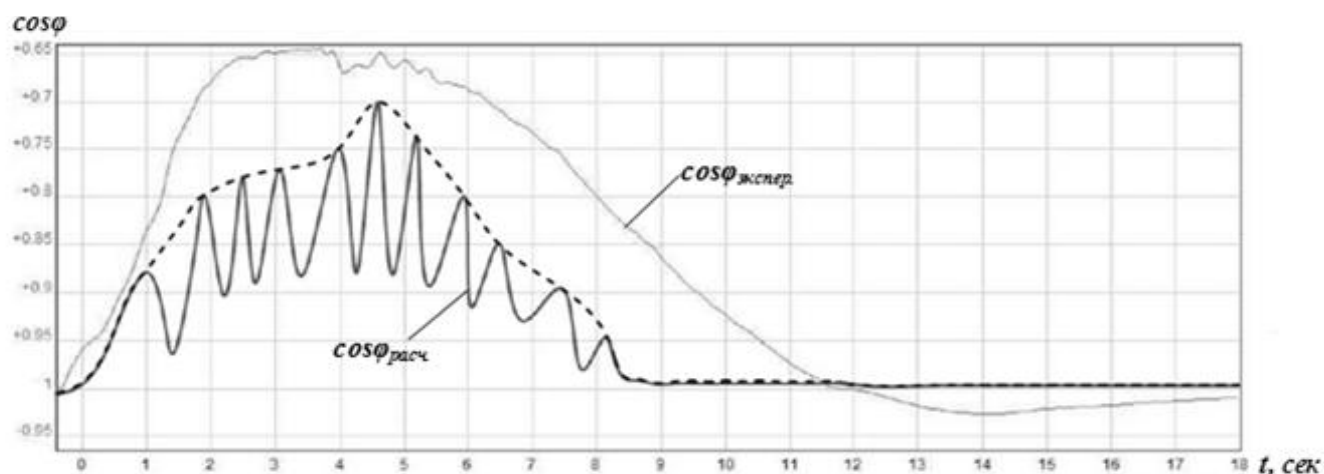


Рисунок 16 - Экспериментальная и расчетная осциллограммы cos φ СД1 при пуске СД2

Вычислительные эксперименты, выполненные с воспроизведением измененного способа управления током возбуждения и алгоритма АРВ двигателя в постфорсировочных режимах работы, а также экспериментальные результаты показали, что процесс перехода к заданному статическому режиму в этом случае проходит с исключением вероятности нарушения устойчивости работы синхронного электропривода.

Полученные результаты подтверждают достижение цели в части повышения эффективности синхронного электропривода и обеспечение синхронного режима его работы в постфорсировочных процессах работы.

## Заключение

1. В среде MatLab разработана математическая модель электротехнической системы КЦ с мощными электроприводами на основе СД типа СТД-12500, позволяющая проводить количественный анализ результатов расчета режимов с воспроизведением постфорсировочных режимов работы.

2. Анализ экспериментальных данных показал, что основной причиной, влияющей на выпадение из синхронизма СД при выходе из режима форсировки, является наличие перерегулирования тока возбуждения системы АРВ в процессе его снижения.

3. Разработан алгоритм эффективного управления АРВ СД при выходе из режима форсировки, исключающий режим перерегулирования и предотвращающий выход СД из синхронизма.

4. Разработан способ управления током возбуждения системы АРВ, позволяющий повысить устойчивость работы СД в постфорсировочных режимах работы.

5. Проведены экспериментальные исследования эффективности использования разработанного алгоритма и способа управления током возбуждения АРВ СД в условиях действующего КЦ, подтвердившие предотвращение выхода СД из синхронизма в постфорсировочных режимах работы.

6. Практическая реализация результатов диссертационной работы с внедрением на компрессорных станциях газотранспортных предприятий разработанного алгоритма и способа управления током возбуждения АРВ СД позволила: практически полностью устранить нарушения технологического процесса газотранспортного предприятия в постфорсировочных режимах работы синхронных электроприводов; минимизировать потери мощности и энергии в СД и внешней системе электроснабжения путем поддержания коэффициента мощности равным 1; повысить устойчивость работы мощных СД в постфорсировочных режимах работы; повысить экологическую безопасность за счет снижения потерь от стравливания природного газа до 18 тыс.м<sup>3</sup>/год при нарушениях технологического процесса.

7. Использование результатов работы в других отраслях промышленности с синхронными электроприводами большой мощности позволит повысить эффективность работы электротехнических систем промышленных предприятий.

8. На новый способ управления током возбуждения СД в постфорсировочных режимах работы Федеральной службой по интеллектуальной собственности выдан патент на изобретение.

Таким образом, цель диссертационной работы, заключающаяся в повышении эффективности электропривода с мощными СД газоперекачивающих станций в постфорсировочных режимах работы за счет разработки и применения способа управления током возбуждения и алгоритма АРВ СД, позволяющих повысить устойчивость работы СД при выходе из режима форсировки, исключающих режим перерегулирования и предотвращающих выход СД из режима синхронизма, достигнута.

### Основное содержание диссертации изложено в следующих работах

#### Статьи в изданиях по перечню ВАК РФ

1. **Жеребцов А.Л.** Необходимость внедрения системы мониторинга качества электрической энергии на компрессорных станциях магистрального газопровода / А.Л. Жеребцов, В.Ю. Чуйков, П.А. Шомов // Вестник ИГЭУ Вып. 3. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2015. – С. 28-33.

2. **Жеребцов А.Л.** Применение математического моделирования для анализа эффективности управления возбудителем синхронного двигателя газоперекачивающего агрегата / А.Л. Жеребцов, А.И. Байков, А.Д. Захаров, Д.В. Ковалев //Сборник научных трудов

НГТУ им. Р.Е. Алексеева Вып. 4. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – С. 55-66.

3. **Жеребцов А.Л.** Разработка математической модели синхронного двигателя СТД2-12500 в программной среде МАТЛАБ Simulink для исследования режимов его работы. / А. Л. Жеребцов, А.И. Байков, В.Ю. Чуйков // Промышленная энергетика. № 2. – Москва. – 2018. – С. 7-12.

4. **Жеребцов А.Л.** Способ управления током возбуждения, как средство обеспечения устойчивости работы синхронного двигателя / А.Л. Жеребцов, В.Ю. Чуйков, А.А. Шульпин // Вестник ИГЭУ Вып. 2. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2018. – С. 21-30.

#### **Другие публикации по теме диссертации**

1. **Жеребцов А.Л.** Применение программного комплекса электродвигателя МАТЛАБ-SIMULINK для исследования работы синхронного электродвигателя в составе ЭГПА / А.Л. Жеребцов, С.М. Кулагин // Информационная среда вуза. Материалы XXIV Международной научно-технической конференции. 22-23 ноября 2017 г., Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет». – 2017. – С. 329–332.

2. **Жеребцов А.Л.** Математическая модель мощного синхронного двигателя с учетом параметров системы электроснабжения / А.И. Байков, А.Л. Жеребцов, Д.С. Ковалев, Д.М. Кочеганов // Сборник трудов конференции «Актуальные проблемы энергетики», 22 декабря 2017 г., Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева – 2017– С. 104–110.

3. **Жеребцов А.Л.** Повышение устойчивости синхронного двигателя 6(10) кВ ГПА изменением способа управления тока возбуждения в послеаварийных режимах / А.Л. Жеребцов // Материалы заседания секции «Энергетика» НТС ПАО «Газпром», (г. Калининград, 9-13 октября 2017 г.): в 2 ч.– М.: ООО «НИИгазэкономика», 2018. Ч. 2. – С. 27-32.

#### **Патент на изобретение**

1. Патент на изобретение от 22.06.2018г. № 2658741 «Способ управлением током возбуждения синхронного электродвигателя в послеаварийных процессах энергосистемы». Авторы: Ефремов М.М., Ковалев Д.С., Захаров А.Г., Куликов В.Г., Жеребцов А.Л.

### **Жеребцов Андрей Леонидович Повышение эффективности синхронного электропривода газоперекачивающих станций в постфорсировочных режимах работы**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать. 01.10.2019г. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Печать плоская. Усл. печ. л. 1.05 Тираж 100 экз. Заказ № 21.  
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет  
имени В.И. Ленина»  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

Отпечатано в УИУНЦ ИГЭУ