

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени В.И. ЛЕНИНА»

На правах рукописи



ЖЕРЕБЦОВ Андрей Леонидович

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

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
к.т.н., доцент Шульпин А. А.

Иваново - 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	4
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	5
Введение	6
Глава 1 Особенности электротехнических систем компрессорных станций с мощными синхронными двигателями.....	16
1.1 Особенности систем электроснабжения мощных синхронных двигателей...16	16
1.2 Анализ технологического оборудования компрессорного цеха.....18	18
1.3 Анализ применяемых систем возбуждения синхронных двигателей.....21	21
1.4 Анализ законов автоматического регулирования возбуждения, реализованных в статических системах возбуждения.....23	23
1.5 Анализ научно-технических публикаций, патентов в области темы исследований.....30	30
Выводы	32
Глава 2 Разработка математической модели электротехнической системы компрессорного цеха с мощными синхронными двигателями.....35	35
2.1 Предпосылки разработки математической модели.....35	35
2.2 Расчетная схема электроснабжения компрессорного цеха с мощными синхронными двигателями.....37	37
2.3 Допущения, принятые при разработке математической модели.....40	40
2.4 Математическая модель трансформатора	43
2.5 Математическая модель участка компрессорного цеха с мощным синхронным двигателем	49
2.6 Математическая модель участка компрессорного цеха с двумя мощными синхронными двигателями, работающими в статическом режиме и подключенными к разным секциям шин трансформатора.....58	58
2.7 Математическая модель участка компрессорного цеха с двумя мощными синхронными двигателями, подключенными к разным секциям шин трансформатора с пуском одного из двигателей.....64	64
2.8 Математическая модель участка компрессорного цеха с двумя мощными синхронными двигателями, подключенными к одной секции шин трансформатора с пуском одного из двигателей.....68	68

2.9 Математическая модель системы возбуждения.....	70
Выводы.....	79
Глава 3 Разработка способа управления током возбуждения и алгоритма автоматического регулирования возбуждения мощного синхронного двигателя в постфорсировочных режимах работы.....	81
3.1 Структурно - функциональная схема управления током возбуждения мощного синхронного двигателя.....	81
3.2 Разработка способа управления током возбуждения и алгоритма системы автоматического регулирования возбуждения мощного синхронного двигателя с регулируемой скоростью развозбуждения в постфорсировочных режимах работы.....	86
Выводы.....	91
Глава 4 Результаты исследований статических и динамических режимов мощных синхронных двигателей. Верификация разработанной математической модели.....	93
4.1 Выполнение вычислительных экспериментов, моделирование статических режимов мощных синхронных двигателей.....	93
4.2 Анализ динамической устойчивости мощных синхронных двигателей.....	97
4.3 Моделирование алгоритма форсировки тока возбуждения и постфорсировочного режима работы мощного синхронного двигателя.....	103
4.4 Основные результаты выполнения вычислительных и экспериментальных исследований.....	109
4.5 Практические результаты работы.....	119
Выводы	124
Заключение	126
Список литературы.....	128
Приложения:	
Приложение А	143
Приложение Б	145
Приложение В	148
Приложение Г	150
Приложение Д	152

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АД - асинхронный двигатель

АРВ - автоматический регулятор возбуждения

ВЛ - воздушная линия электропередачи

ГПА - газоперекачивающий агрегат

КЗ – короткое замыкание

КПД - коэффициент полезного действия

КС - компрессорная станция

КЦ – компрессорный цех

ОЕ – относительная единица

ПИ – пропорционально-интегральный

ПИД - пропорционально-интегрально-дифференциальный

ПУЭ - правила устройства электроустановок

РЗА - релейная защита и автоматика

САР - система автоматического регулирования

САУ - система автоматического управления

СД - синхронный двигатель

СПЧ – сменная проточная часть

ЭГПА - электроприводной газоперекачивающий агрегат

ЭДС – электродвижущая сила

ЭП – электропривод

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

провал напряжения: Временное уменьшение напряжения в конкретной точке электрической системы ниже установленного порогового значения.

синхронная машина: бесколлекторная машина переменного тока, у которой в установившемся режиме отношение частоты вращения ротора к частоте тока в цепи, подключенной к обмотке якоря, не зависит от нагрузки в области допустимых нагрузок.

синхронизм синхронной машины: устойчивая параллельная работа синхронной машины с питающей сетью или с другой синхронной машиной при синхронной частоте вращения.

выпадение из синхронизма синхронной машины: нарушение устойчивости параллельной работы синхронной машины с питающей сетью при синхронной частоте вращения, в результате которого она начинает вращаться с асинхронной частотой.

статическая устойчивость синхронной машины: способность синхронной машины сохранять устойчивую параллельную работу с питающей сетью с синхронной частотой вращения при плавном нарушении ее установившегося состояния.

динамическая устойчивость синхронной машины: способность синхронной машины сохранять устойчивую параллельную работу с питающей сетью с синхронной частотой вращения после колебаний этой частоты, вызванных внезапным нарушением установившегося состояния машины.

постфорсировочный режим работы: режим работы системы автоматического регулирования возбуждения синхронного двигателя, который характеризуется окончанием режима форсировки тока возбуждения и временем восстановления технологического режима работы синхронного двигателя.

Введение

Актуальность темы исследования. Газовая промышленность России является одной из ведущих и интенсивно развивающихся отечественных отраслей с непрерывным ростом производственных мощностей. Основу ее составляет газотранспортная система, связывающая месторождения Крайнего Севера с промышленными районами Урала, Центральной России и Европы.

Особая роль газа в экономике России обусловила разработку стратегии развития газовой промышленности как средства решения многих промышленных и хозяйственных вопросов.

Транспорт природного газа на большие расстояния по магистральным газопроводам определяет потребность в сооружении вдоль трассы компрессорных станций (КС) через каждые 100-150 км, задачей которых является поддержание требуемого давления в магистрали с помощью газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Благодаря конструктивным особенностям синхронной электрической машины и экономическим показателям, синхронные двигатели (СД) широко применяются в составе электропривода газоперекачивающих агрегатов. В Единой газотранспортной системе России эксплуатируются более 650 ГПА с мощными СД, на долю которых приходится около 16 % от общего количества эксплуатируемых ГПА [1,6, 8, 12, 109]. Суммарная установленная мощность СД в магистральном транспорте газа имеет величину более 6000 МВт или свыше 15% от эксплуатируемой мощности газоперекачивающего оборудования Единой газотранспортной системы России.

К наиболее важным преимуществам синхронных двигателей относятся:

- высокий КПД;
- высокая перегрузочная способность (сохранение работоспособности при больших перегрузках);
- меньшая зависимость вращающего момента синхронной электрической машины от подводимого напряжения по сравнению с асинхронными электродвигателями аналогичной мощности;

- более высокие показатели статической и динамической устойчивости в работе при понижении величины напряжения и частоты питающей сети;

- способность регулируемого изменения реактивной мощности в узлах нагрузки.

Эксплуатируемые СД зарекомендовали себя как надежный элемент электропривода для нагнетателей 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. К внешним воздействиям следует отнести:

- провалы напряжения системы внешнего электроснабжения вследствие различного рода нарушений в работе оборудования электросетевого хозяйства;

- провалы напряжения в узлах нагрузки вследствие пуска СД;

- случаи сброса и ударного увеличения нагрузки на валу ротора, вызванные технологическим режимом транспорта газа, например, пуск ГПА на высокое входное давление, открытие/закрытие кранов при изменении схемы работы компрессорного цеха (КЦ), срабатывание противопомпажной защиты и ряда других факторов.

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

- провалы напряжения в системе внешнего электроснабжения;

- нарушения в работе вспомогательного оборудования и оборудования электроснабжения ГПА (электродвигатели насосов, системы возбуждения, комплектные трансформаторные подстанции КЦ и др.);

- нарушения, связанные с режимом работы КЦ, в том числе нарушение устойчивости находящегося в работе СД при пуске второго двигателя, подключенных к одной секции шин узла нагрузки;

- случаи сброса и ударного увеличения нагрузки на валу ротора обусловленные режимными моментами транспорта газа.

Нарушения в работе синхронных электроприводов компрессорных установок приводят к значительным ущербам предприятия, влекут за собой дополнительные потери газа на стравливание, повреждения дорогостоящего оборудования, нарушения сложного технологического процесса транспорта газа, опасности для здоровья и жизни людей, а в рамках Единой газотранспортной системы возникают риски неисполнения договорных обязательств перед потребителями.

Надежность работы КЦ зависит от устойчивости работы мощных СД в совокупности с системой возбуждения. Однако большинство СД в составе действующих КС выработали нормативный срок эксплуатации. В связи с этим для обеспечения надежного транспорта природного газа одним из важных вопросов является продление срока их службы, а также их модернизация с учетом передовых технических решений, проводимых как на аппаратном, так и алгоритмическом уровнях. Это применение современной элементной базы на уровне аппаратных средств, а также совершенствование способов и законов регулирования возбуждения СД.

Повышение эффективности и надежности работы СД ГПА достигается при решении следующих задач:

- обеспечение динамической устойчивости СД и увеличение перегрузочной способности при резких изменениях нагрузки или снижении напряжения в сети;
- эффективное демпфирование механических колебаний ротора;
- достижение минимальных потерь в СД и питающей сети;
- минимизация изменения величин активной, реактивной мощности и напряжения в системе электроснабжения.

Особая роль в обеспечении устойчивости работы СД отводится автоматической системе возбуждения. Необходимо отметить, что вопросам автоматического регулирования промышленных СД и их режимам работы посвящено значительное количество литературы [18, 117, 43, 95, 104, 19, 81, 94, 110, 53, 96, 41]. Значительный объем трудов и исследований по указанной теме

подчеркивает значимость исследования данного вопроса и ее актуальность. Наиболее остро стоит вопрос корректности работы системы возбуждения при эксплуатации опасных производственных объектов, к которым относятся, в том числе, компрессорные станции магистральных газопроводов.

Значительный вклад в решение вопросов оптимизации и повышения устойчивости работы АРВ СД внесли ученые И.А. Глебов, А.А. Юрганов, В.А. Веников, Г.Р. Герценберг, И.А. Груздев, М.Л. Левинштейн, И.В. Литкенс, С.А. Совалов, Н.И. Соколов, О.В. Щербачев, И.Л. Осипов, Ю.Г. Шакарян, А.А. Воронов, И.А. Сыромятников, Д.П. Петелин, С.А. Ковчин, Б.Н. Абрамович, М.Г. Чиликин, В.В. Денисенко, О.В. Слежановский и др.

Существенную лепту в развитие данного направления внесли отечественные научные школы и организации: МЭИ, УПИ им С.М. Кирова, НИИ ХЭМЗ, ВНИИЭ, ВНИИпреобразователь. Значимых результатов достигли: ОАО «Нипом» (г. Дзержинск), ООО НПО «Цифровые регуляторы» (г. Новосибирск), НПП «Русэлпром-Электромаш» (г. Екатеринбург), ООО «Алгоритм» г. Санкт-Петербург», ГК «Сибэлектротехник» (г. Новосибирск), ЗАО «ПАЭР» (г. Санкт-Петербург) и др.

Среди многочисленных зарубежных фирм выделяются MOPICO, Rockwell Automation, Siemens, GE и ряд других.

Поставленные задачи повышения надежности, экологической безопасности, энергоэффективности в работе ГПА с мощными СД в составе электропривода, обуславливают возрастающие требования к синхронному электроприводу, а также системам возбуждения СД, способствуют поиску новых решений и подходов по повышению эффективности синхронного электропривода промышленных предприятий.

Учитывая вышеуказанное, можно констатировать, что поиск новых решений повышения эффективности электропривода с мощными СД в настоящее время является актуальным.

Степень разработанности темы исследования

Появившийся практический опыт требовал анализа, систематизации и разработки теоретической базы для последующего освещения путей развития

применения СД в технологических процессах. В 1925 году выходит первый систематизированный труд С.А. Ринкевича «Электрическое распространение механической энергии». Дальнейшее развитие теории применения электродвигателя в промышленности получило в трудах В.К. Попова, А.Т. Голована, Д.П. Морозова и других ученых [30].

Путем использования метода двух реакций, Р. Парк в 1929г. выработал дифференциальные уравнения синхронной машины. Дальнейшее развитие идеи Р. Парка применительно к расчету токов короткого замыкания и устойчивости параллельной работы машин отражено в трудах А.А. Горева [21, 22].

Период 1940-1945 гг. ознаменован разработкой новых принципов построения систем автоматического управления электродвигателями, основанных на применении замкнутых цепей с обратными связями и, в дальнейшем, магнитных усилителей.

Революционизирующее влияние на развитие систем управления СД оказали разработка и производство полупроводниковых приборов - транзисторов, тиристоров, которые благодаря своим преимуществам стали вытеснять ранее применявшиеся в системе управления СД устройства с электронными лампами и ионными приборами. Наряду с системой генератор-двигатель (Г-Д) все шире используется более быстродействующая система: тиристорный преобразователь - двигатель (ТП-Д).

На данный момент сформирована глубоко изученная и четко отработанная теория синхронных машин, разработаны требования к их проектированию. Значительный вклад в развитие теории и практики синхронных электрических машин внесли советские ученые и инженеры: М. М. Ботвинник, А. И. Важнов, А. И. Вольдек, А. А. Горев, А. И. Глебов, Я. Б. Данилевич, А. В. Иванов-Смоленский, И. Е. Овчинников, Е. Я. Казовский, И. П. Копылов, М. П. Костенко, Р. А. Лютер, Г. А. Сипайлов, И. М. Постников, Г. М. Хуторецкий, В. В. Хрущев, Ф. М. Юферов и др.

Значимые работы в области синхронных электрических машин за рубежом выполнены Ч. Конкордия, Р. Парком, Р. Ранкиным, Л. Дрейфусом, М. Лившицем

и др. Следует отметить, что по теме исследования за последние годы опубликовано малое количество литературы.

Теория устойчивости синхронных машин рассматривается в основном применительно к мощным синхронным генераторам, в то время как относительно высоковольтных СД указанная тема менее проработана. Преимущества синхронного двигателя, 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 статей, отчетов, патентов в данном направлении. При этом основное внимание уделяется вопросам устойчивости СД, связанным с кратковременным перерывом электроснабжения, быстродействующим защитами, системам автоматизации нефтегазоперекачивающих агрегатов, схемотехническим решениям. Практический опыт эксплуатации 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 автоматического регулирования возбуждения (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, исключая режим перерегулирования тока возбуждения и предотвращающих выход СД из режима синхронизма.

Для достижения поставленной цели сформулированы и выполнены 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 действующего 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, 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 компрессорных станциях 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» - 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 синхронного двигателя при выходе из режима форсировки, исключающего 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 исключающий 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 (Приложение Д).

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

3. Минимизация потерь мощности и энергии в СД и системе внешнего электроснабжения с использованием системы АРВ СД путем поддержания коэффициента мощности равным 1 (рисунки 3.6, 4.31, 4.32, 4.36).

4. Повышение экологической безопасности за счет снижения потерь от срабливания природного газа до 18 тыс. м³ в год при нарушениях технологического процесса.

5. Использование результатов работы для повышения эффективности электротехнических систем компрессорных станций 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 программного комплекса MatLab (Simulink).

Практические эксперименты проводились на электроприводе с СД типа СТД-12500 ГПА КЦ с применением интегрированных в цифровое тиристорное возбудительное устройство современных приборов 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 теории электрических цепей, теории машин переменного тока, теории 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. Значимые положения диссертационной работы были доложены и обсуждены 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, проведенные автором, отражены в 8 публикациях, из них 4 - в научных журналах, входящих в перечень рекомендованных изданий ВАК РФ, и 3 – в материалах всероссийских научно-технических, международных конференций и отраслевых научно-технических советов. Федеральной службой по интеллектуальной собственности выдан 1 патент на изобретение.

Глава 1 Особенности электротехнических систем компрессорных станций с мощными синхронными двигателями

1.1 Особенности систем электроснабжения мощных синхронных двигателей

В состав системы электроснабжения КЦ входят трансформаторы, распределительные устройства 6 (10) кВ, реакторы, СД и др. Электроснабжение КЦ на КС осуществляется от главных понизительных подстанций с первичным напряжением 220 (110) кВ. Мощность синхронных электродвигателей, используемых в газовой промышленности в качестве электропривода ГПА, достигает десятков мегаватт. Синхронные двигатели, применяемые в качестве электропривода ГПА, выполняются на напряжение 6-10 кВ.

Мощные СД, применяемые в качестве электропривода ГПА, относятся к ответственным механизмам и являются потребителями первой категории, аварийный останов которых может привести к нарушению сложного технологического процесса транспорта газа, большим материальным потерям, опасности для здоровья и жизни людей. При эксплуатации СД, в случаях возмущающих воздействий, возможен переход синхронного электропривода в асинхронный режим, обусловленный нарушением статической или динамической устойчивости его работы. Наиболее распространенными причинами нарушения устойчивости находящегося в работе СД являются резкое увеличение нагрузки на валу и провалы напряжения в системе электроснабжения. Нарушение статической устойчивости синхронного двигателя наступает при превышении предельного значения отклонения угла ротора, в результате чего СД переходит в асинхронный режим. Условием обеспечения статической устойчивости СД является

соблюдение равенства электромагнитного и нагрузочного момента, а также исключение «сползания» и самораскачивания.

Учитывая, что газоперекачивающие КС относятся к опасным производственным объектам, в соответствии с [85] электроснабжение потребителей осуществляется по первой категории надежности и бесперебойности электроснабжения от двух независимых взаимно резервирующих источников питания со схемой автоматического включения резерва.

В соответствии с положениями [54], схемы электроснабжения газотранспортных предприятий разрабатывают, учитывая следующие принципиальные требования:

- расположение источников электроснабжения максимально близко к потребителям электрической энергии;
- минимизация числа ступеней трансформации и распределения электрической энергии на каждом напряжении;
- обеспечение требуемой надежности электроснабжения и уровня резервирования схемы электроснабжения и электрических соединений питающих подстанций;
- применение магистральных схем электроснабжения распределения электроэнергии;
- применение блочного принципа схемы электроснабжения с учетом технологической схемы предприятия. Электроснабжение приемников электрической энергии параллельных технологических линий необходимо выполнять от разных секций шин подстанций;
- элементы электрической системы должны находиться под нагрузкой.

В качестве объекта исследования была выбрана газоперекачивающая КС «Южно-Балыкская» в составе магистрального газопровода ООО «Газпром трансгаз Сургут». Схема электроснабжения узла нагрузки этой КС с мощными электроприводами на базе СД типа СТД-12500 приведена на рисунке 1.1.

Схема электроснабжения выбранной КС с мощными электроприводами является типовой, поэтому результаты исследований на данной компрессорной станции могут быть использованы на других аналогичных объектах.

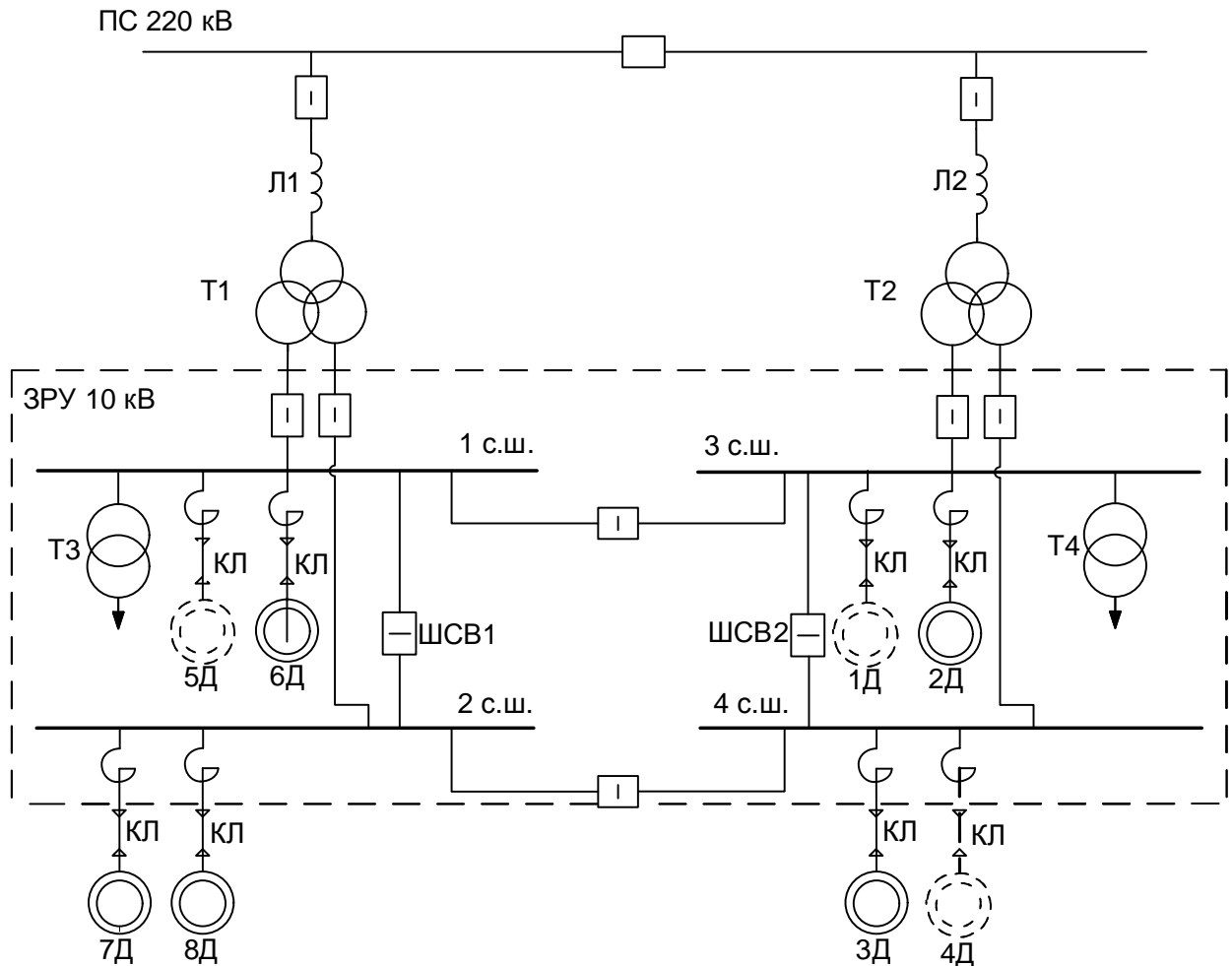


Рисунок 1.1 - Схема электроснабжения КС «Южно-Балыкская» с мощными СД

1.2 Анализ технологического оборудования компрессорного цеха

Основной технологической операцией на КС является процесс компримирования природного газа центробежными нагнетателями. За счет указанного процесса обеспечивается заданный объем транспорта газа по магистральному газопроводу [10]. Основная величина давления, на которое в России строятся линейные газопроводы, составляет 5,5 и 7,5 МПа [48].

Обычно число КЦ на КС соответствует числу ниток магистрального газопровода, подходящих к компрессорной станции. Электроприводные КС с мощными СД, как правило, состоят из нескольких КЦ с установкой в каждом цехе

до 8 газоперекачивающих агрегатов. Тип и мощность ГПА определяются в зависимости от требуемой пропускной способности магистральных газопроводов.

Для компримирования природного газа на КС применяются неполнонапорные и полнонапорные центробежные нагнетатели. Особенностью полнонапорного нагнетателя является возможность обеспечения требуемой степени сжатия природного газа, тогда как неполнонапорный нагнетатель осуществляет только его частичное сжатие. Требуемая производительность КС достигается путем параллельного включения нескольких единиц полнонапорных нагнетателей или организацией работы параллельных групп из последовательно включенных неполнонапорных нагнетателей (как правило, в две ступени сжатия). Технологические схемы обвязки неполнонапорных нагнетателей КЦ приведены на рисунке 1.2. В целях достижения требуемой степени сжатия при перечисленных схемах газ с выхода одного нагнетателя поступает на вход другого (см. рис.1.2а) или на общий коллектор (см. рис.1.2б).

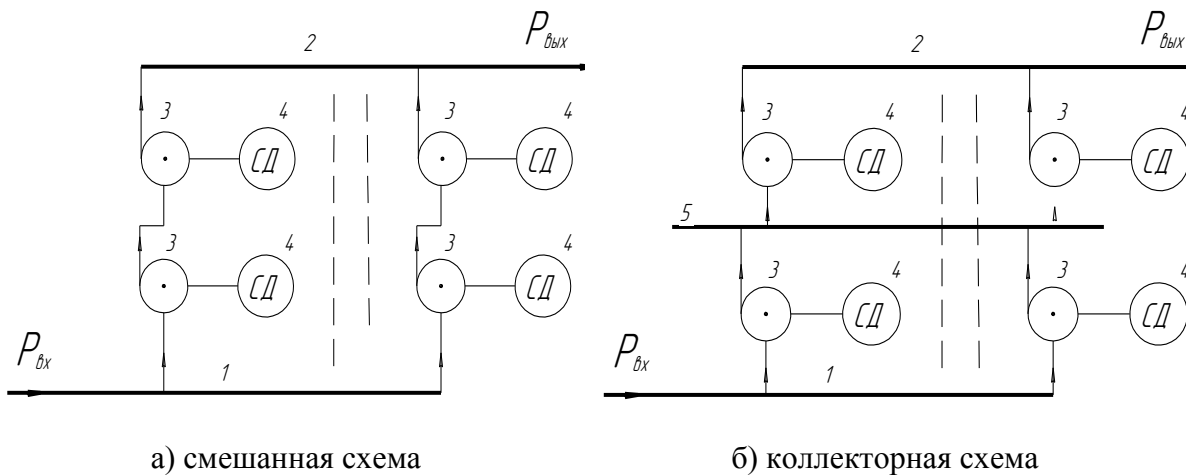


Рисунок 1.2 - Схемы работы КС с неполнонапорными нагнетателями

1 - входной газопровод, 2 - выходной газопровод, 3 - неполнонапорный нагнетатель, 4 - синхронный электропривод с СД типа СТД-12500, 5 – общий коллектор

Достижение компримирования природного газа на КС при смешанной схеме обеспечивается условием параллельной работы нескольких групп ГПА. При аварийной или плановой остановке в группе одного из ГПА при работе по схеме с неполнонапорными нагнетателями, необходим вывод в режим «кольцо» и второго ГПА.

При коллекторной схеме соединения, в отличие от смешанной схемы, нагнетатели разбиваются по ступеням сжатия. При такой схеме соединения нарушение в работе одного или нескольких синхронных электроприводов ГПА, работающих в первой или второй ступени сжатия, влечет снижение производительности компрессорного цеха. Давление природного газа, компримируемого нагнетателем данной ступени, снижается, что создает риск наступления режима помпажа, т.е. режима работы нагнетателя, который характеризуется резкими изменениями давления и расхода перекачиваемой среды.

Работа мощных СД в группе несет определенные риски, а именно, при возникновении возмущающих воздействий (провал напряжения в системе электроснабжения, резкое изменение давления природного газа и др.) один из синхронных электроприводов группы (схема с неполнонапорными нагнетателями) оказывает влияние на устойчивость работы другого. При этом любое из возмущающих воздействий вызывает взаимное раскачивание СД с возможным переходом в асинхронный режим и аварийный останов. Кроме того, причиной нарушения устойчивости работы СД может стать некорректный выбор закона регулирования возбуждения или коэффициентов усиления по отдельным каналам регулирования [24].

Работа газоперекачивающих агрегатов с мощными СД и центробежными нагнетателями описана в [33], важным требованием при этом является согласование газодинамических характеристик нагнетателей и газопровода.

Характеристика газопровода изменяется с учетом потребности газа со стороны потребителей, а также зависит от давления природного газа на входе КС. В случае увеличения расхода газа со стороны потребителя в работу дополнительно вводят ГПА, а при сокращении исключают часть ГПА из работы.

На КС с мощными СД регулирование нагрузки осуществляется следующими способами:

- изменением проточной части нагнетателя;
- дросселированием газа на входе в нагнетатель;

- установкой входного поворотного направляющего аппарата перед колесом нагнетателя, чем достигается регулировка потока газа;
- выводением потока газа на байпас;
- замены пары колеса и шестерни, за счет чего изменяется передаточное число в редукторе;
- установкой гидромуфты;
- установкой частотного преобразователя для изменения частоты вращения ротора СД;
- изменением конфигурации схемы работы ГПА через их количество.

Из всех вышеперечисленных способов регулирования нагрузки, наибольшее применение нашли способ изменения количества работающих ГПА, а также байпасирование потока газа (регулирование нагрузки на валу электропривода через перепускание части сжатого природного газа с выхода нагнетателя на его вход).

Использование байпасирования потока газа применяется при пуске или остановке ГПА либо КЦ, а также для исключения аварийной ситуации в момент приближения рабочей точки нагнетателя к зоне помпажа. Байпасирование, как способ регулирования, в режиме работы КЦ является кратковременным.

На исследуемой КС «Южно-Балыкская» используются двухступенчатые (с неполнонапорными нагнетателями) схемы компримирования газа и в качестве основного способа регулирования нагрузки применяется способ изменения количества работающих ГПА.

1.3 Анализ применяемых систем возбуждения синхронных двигателей

Значительную роль в обеспечении устойчивости мощных СД имеет высокая скорость работы релейной защиты и систем АРВ, особенно систем регулирования сильного действия с применением форсировки возбуждения.

В связи с этим к системам АРВ предъявляются высокие требования по обеспечению устойчивой работы синхронного электропривода при возмущающих

воздействиях. 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.

На системы АРВ СД возлагается ряд функций, основными из которых являются:

1) повышение статической и динамической устойчивости системы электроснабжения с мощными СД при резких изменениях нагрузки на валу и провалах напряжения;

2) повышение экономичности режимов работы самих СД и других потребителей, присоединенных к шинам с СД, за счет снижения активных потерь в СД и поддержания напряжения в допустимых пределах.

Различные принципиальные схемы систем возбуждения в основном разделяются по конструктивному исполнению (электромашинные и статические) и по виду (с самовозбуждением или независимым возбуждением). В последнее время также нашли применение бесщёточные системы возбуждения двигателей, имеющие повышенную надежность. Они представляют собой трехфазный синхронный обращенный генератор с вращающимся мостовым выпрямителем.

В настоящий момент схемы с электромашинными системами возбуждения практически не применяются. Более высокими технико-экономическими показателями обладают тиристорные системы возбуждения (статические системы возбуждения). К ним относятся аналоговые системы возбуждения следующих типов ТВ-630, КТУ-1000 ВС, ТЕ8-320, ТВУ-320, ТВ-400, а также системы возбуждения с цифровым управлением типа ВТ-РЭМ («РУСЭЛПРОМ-Электромаш»), ЦРВД («АНИКРОН»), ВТЦ-СД-Щ («НИПОМ») и др.

Цифровые системы возбуждения применяются вместо статических с аналоговым управлением серий ТВ, ТВ2, ТЕ8, ТПЕ, ТПЕ10, ВТЕ, БВУ, а также при модернизации СД с электромашинными системами возбуждения.

Статические системы возбуждения, производимые в настоящее время, это тиристорные преобразователи, запитанные от согласующего трансформатора, подключенного к электрической сети напряжением 0,4 кВ. Постоянный ток от тиристорного преобразователя подается непосредственно на обмотку возбуждения. Алгоритмы работы и законы регулирования систем возбуждения с цифровым управлением реализованы программным способом.

Тиристорные системы возбуждения с цифровыми системами управления и АРВ обеспечивают возбуждение СД во всех нормальных режимах работы, ручное и автоматическое регулирование тока возбуждения, подачу возбуждения при пуске двигателя, гашение поля при отключении СД переводом в инверторный режим, форсировку возбуждения. Они позволяют осуществлять прямой, автотрансформаторный и реакторные пуски мощных СД. Основным недостатком статических систем является зависимость тока возбуждения от напряжения питающей сети.

На электроприводных КС газотранспортной системы России эксплуатируется значительное количество устройств АРВ типа ВТЦ-СД-Щ производства ОАО «НИПОМ». Принцип реализации совместной работы двух контуров, таких как контур обеспечения динамической устойчивости двигателя по изменению напряжения статора и контур регулирования по коэффициенту мощности, а также режим стабилизации тока возбуждения являются базовыми в режиме регулирования возбудителей ВТЦ-СД-Щ.

При эксплуатации систем возбуждения мощных СД, используемых на газоперекачивающих станциях, необходимо учитывать особенности неполнонапорных нагнетателей КЦ для исключения нарушения режима транспорта газа.

1.4 Анализ законов автоматического регулирования возбуждения, реализованных в статических системах возбуждения

Статические системы возбуждения с цифровыми АРВ построены на реализации принципов ПИ, ПИД, ПД регулирования, что является комбинацией

пропорционального, интегрального и дифференциального компонентов в зависимости от требований к условиям решаемых задач.

При нагрузках, характерных для КС с мощными синхронными электроприводами, применяются статические АРВ с реализацией принципов ПИ и ПИД регулирования. Работа системы с вышеуказанными принципами регулирования подробно разъяснена в [25] с приведением схемы автоматического регулирования с обратной связью.

Для различных схем узла нагрузки, конфигурации и режима работы синхронных электроприводов, регулирование тока возбуждения СД осуществляется в зависимости от следующих факторов [32]:

- 1) изменение величины напряжения в узле нагрузки ($U_{ш} = \text{const}$);
- 2) изменение внутреннего угла и величины тока статора;
- 3) изменение параметров при селективном по времени или одновременном воздействии сигналов управления на обмотку возбуждения СД;
- 4) изменение отдаваемой реактивной мощности СД с поддержанием постоянства ее отдачи;
- 5) изменение коэффициента мощности.

В ряде случаев наиболее целесообразно обеспечивать регулирование тока возбуждения по сложным законам, включающим в управление два и более параметра режима.

Характер нагрузки двигателя и качественные показатели системы внешнего электроснабжения непосредственно влияют на выбор способа управления. В случае неизменной нагрузки при периодических снижениях мощности или напряжения в питающей сети управление осуществляется по отклонению напряжения на статоре. В случае переменной нагрузки с величиной близкой к номинальному значению мощности СД управление производится по углу нагрузки, регулирование по отклонению коэффициента мощности СД от единицы производится при недогруженном СД.

Фактические условия работы СД характеризуются как изменениями нагрузки на валу ротора СД, так и провалами напряжения в системе внешнего

электроснабжения и в узле нагрузки. Наиболее приемлемыми фактическими условиями эксплуатации являются способы управления тока возбуждения СД по отклонению значения напряжения статора и по величине реактивной составляющей тока статора синхронного электропривода.

При работе мощных электроприводов в системе внешнего электроснабжения необходимо одновременно обеспечивать соответствие нескольким показателям. Необходимо отметить совместимость лишь некоторых из них, например, обеспечение устойчивости узла нагрузки и генерация реактивной мощности в значительной степени зависят от стабилизации напряжения.

Не представляется возможным повысить устойчивость узла нагрузки и минимизировать потери. Это обусловлено тем, что для минимизации потерь необходимо снижать возбуждение, а для повышения устойчивости СД необходимо повышать его величину. В целях эффективного демпфирования колебаний ротора ток возбуждения СД должен снижаться раньше, чем будет достигнут максимальный угол, что приведет к увеличению колебаний напряжения и снижению динамической устойчивости синхронного электропривода [15].

В случаях изменения нагрузки на валу ротора СД в пределах статической устойчивости, при углах δ меньших $70-90^\circ$, параметры считаются эквивалентными для регулирования. В случаях, если нагрузки превышают пределы статической устойчивости СД, то активный ток будет уменьшаться, при этом необходимо увеличивать ток возбуждения. При пониженном возбуждении более эффективным является регулирование по углу нагрузки.

С учетом вышеуказанного можно констатировать необходимость наличия в автоматическом регуляторе возбуждения обратной связи по напряжению статора, обратной связи по току возбуждения, связи по реактивному току смежных электроприемников и связи по углу δ (или активному току) [15].

Для удержания СД в синхронизме, в случаях провала напряжения, в системе возбуждения реализован режим форсировки, который обеспечивает мгновенное увеличение величины тока ротора выше номинального значения. Условием

срабатывания указанного режима является снижение напряжения питающей сети ниже величины уставки $U_{уст.min}$, а условием прекращения данного режима является увеличение напряжения выше величины уставки $U_{уст} \geq (0,95-0,97) \cdot U_{ном}$, либо по истечении заданного времени ($T_{уст.} = 8-60$ сек). Длительность форсировки определяется, в основном, длительностью провала напряжения на статоре $U_{ст}$ при пусках соседних мощных СД. Ограничение по времени необходимо для того, чтобы защитить ротор от перегрева и предотвратить выход его из строя.

После окончания процесса форсировки СД переходит в постфорсировочный режим работы.

В соответствии с требованиями ГОСТ 24688-81 [23] возбудительные устройства при пониженном напряжении питающей сети возбудителя (до 0,8 от номинального значения), должны предусматривать обеспечение форсировки возбуждения с кратностью не менее 1,4 номинального тока возбуждения, а при номинальном напряжении сети, не менее 1,75.

При провале напряжения в узле нагрузки происходит мгновенный рост значения тока статора, при этом угол между током и напряжением статора изменяется и становится не равным нулю. В указанном случае СД находится в зоне недовозбуждения с вероятностью выхода его из синхронизма. В связи с высокой скоростью протекания процессов, ПИ-регулятор не всегда с необходимой скоростью может отреагировать на протекание указанного процесса. В таких случаях единственным способом сохранить устойчивость и исключить асинхронный режим работы СД является форсировка.

Также необходимым условием использования форсировки тока возбуждения является перегрузка на валу ротора СД, обусловленная сбросом технологической нагрузки с последующим ударным ее увеличением. В таких случаях при исчезновении нагрузки система возбуждения снижает ток возбуждения до минимального значения, а после резкого появления нагрузки ПИ-регулятор начинает вновь повышать ток возбуждения. В некоторых случаях скорость нарастания нагрузки превышает скорость нарастания тока ротора

регулятором. СД оказывается существенно недо возбужденным и наступает условие перехода СД в асинхронный режим.

Изменение величины тока возбуждения в послефорсировочном режиме отстает от изменения значения напряжения, приложенного к обмотке ротора СД. В связи с этим быстрая расфорсировка в постфорсировочный период может привести к ситуации, когда угол нагрузки по инерции еще продолжает увеличиваться, при этом ток возбуждения не успевает достаточно увеличиться, и форсировочная способность возбуждения СД после КЗ фактически не будет использована полностью [24].

Для эффективного управления током возбуждения в программное обеспечение закладывается математическая функция, которая описывает работу ПИД-регулятора. В зависимости от того, насколько правильно и точно разработано математическое описание этой функции, настолько качественно и устойчиво работает система возбуждения в целом.

В общем случае уравнение напряжения выходного сигнала ПИД-регулятора выглядит следующим образом:

$$U(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}, \quad (1.1)$$

где t – время;

K_p , T_i , T_d – соответственно, пропорциональный коэффициент (безразмерный), постоянная интегрирования (размерность времени) и постоянная дифференцирования (размерность времени) регулятора;

e – сигнал рассогласования или ошибки.

Определением значений коэффициентов K_p , T_i , T_d , оптимизируется качество работы регулятора: уменьшается время выхода на задание, снижается влияние внешних возмущений, уменьшается отклонение от задания. При задании большой величины T_i , регулятор медленно выводит объект на выполнение задания. Задание малого значения T_i приводит к перерегулированию.

Важным требованием в отношении динамических характеристик систем автоматического регулирования выступает требование к качеству переходного

процесса. Непосредственными показателями качества переходного процесса являются: время регулирования параметров, перерегулирование изменяемого параметра, колебательность процесса, установившаяся ошибка, характер затухания переходного процесса.

Перерегулирование равно отношению первого максимального отклонения регулируемой переменной $I_{\text{возб.}}$ от ее установившегося значения к этому установившемуся значению $I_{\text{возб.уст.}}$ [103; 107].

Чем больше перерегулирование σ , тем больше склонность системы к колебаниям [98]. Качество регулирования считается удовлетворительным, если перерегулирование не превышает пределов 30 - 40 %.

Из опыта эксплуатации подтверждается неустойчивая работа мощных СД в постфорсировочном режиме при наличии перерегулирования (рисунок 1.3).

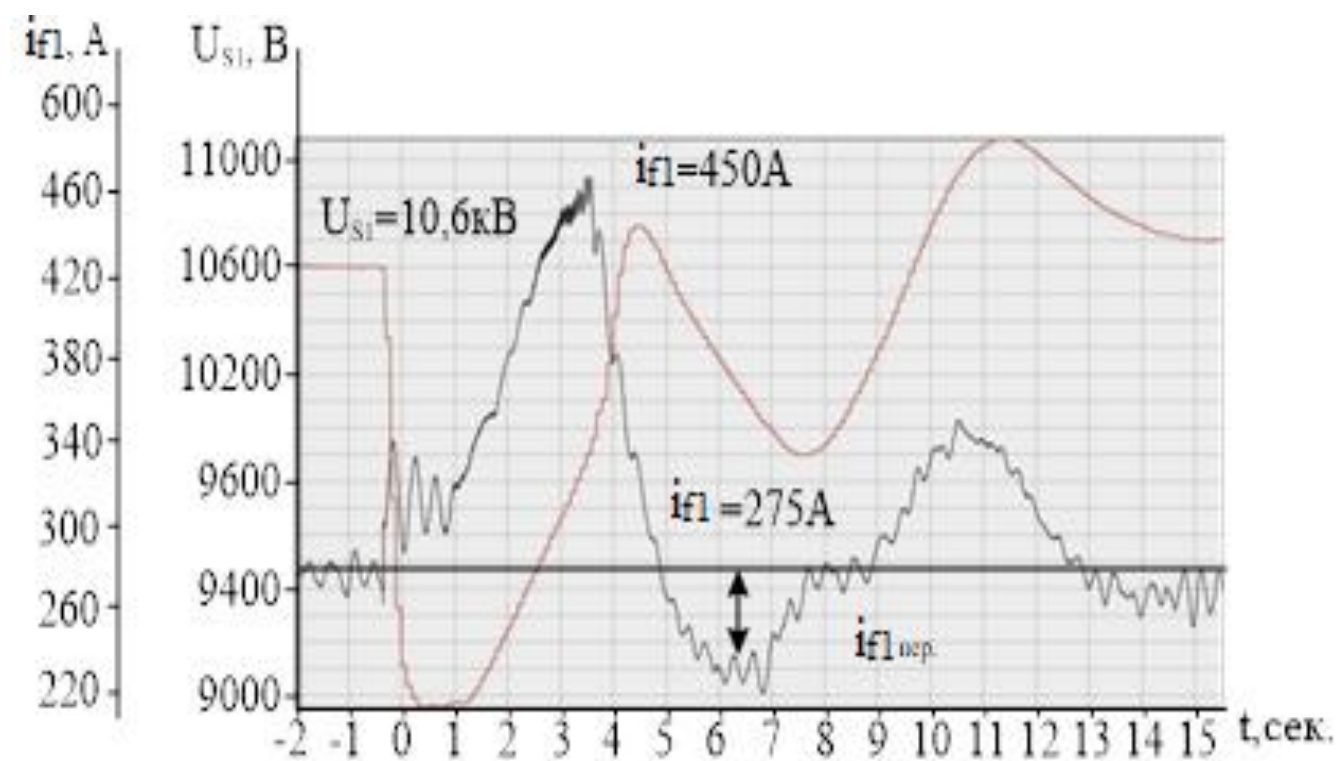


Рисунок 1.3 – Экспериментальные осциллограммы с отражением перерегулирования тока возбуждения $i_{f1 \text{ пер.}}$

В постфорсировочных режимах работы возможно нахождение СД в режиме неустойчивой синхронизации, возврат в режим устойчивой работы обеспечивается воздействием на ток возбуждения СД со стороны контура управления по углу нагрузки СД. Превышение угла нагрузки, как правило, имеет

непродолжительный период времени, но при определенных условиях может привести к переходу СД в асинхронный режим. Для системы АРВ аварийный режим характеризуется фактом срабатывания функции «форсировка», а постфорсировочный характеризуется окончанием режима форсировки и периодом устранения величины рассогласования между максимальным значением тока возбуждения, достигнутым во время форсировки, и необходимым значением тока возбуждения после форсировки, при котором $\cos \varphi$ (коэффициент мощности) будет соответствовать заданной уставке (+0,99; 1,00).

Причиной перерегулирования является выдача задания ПИ-регулятору от контура регулирования по коэффициенту мощности максимально быстро привести значение коэффициента мощности к заданной уставке (+0,99; 1,00). Учитывая большое рассогласование регулятора и индуктивность ротора, высокая скорость снижения напряжения возбуждения приводит к «провалу» отстающего за ним тока возбуждения.

Необходимо отметить прямую зависимость выхода из синхронизма мощных СД не только от величины и характера (провал напряжения, сброс или ударное увеличение нагрузки на валу ротора СД) возмущающих воздействий [104], величины нагрузки, но и от технологической схемы работы СД (работа с полнонапорными или неполнонапорными нагнетателями). Для предотвращения перехода режима работы СД в асинхронный режим, необходимо плавно снижать ток возбуждения при выходе из форсировочного режима.

Для реализации данной задачи можно использовать несколько способов:

- в систему АРВ ввести новый параметр – скорость закрытия тиристорov гр.элек./сек до значения, при котором $\cos\varphi=1$ и включением ПИ-регулятора;
- запомнить значение угла открытия тиристорov возбуждательного устройства, при котором в последний раз $\cos\varphi=1$, а по окончании режима форсировки подать команду на открытие тиристорov именно на этот угол;
- увеличить значение уставки «напряжение 10 кВ отключение форсировки» с 9,8 кВ до 10 кВ или 10,2 кВ, что увеличит время режима форсировки, а значит увеличит время на стабилизацию параметров СД;

- увеличить уставку «напряжение 10 кВ отключение форсировки» с 9,8 кВ до 10,9-11,0 кВ, что позволит отключить уставку по напряжению выхода из режима форсировки, при этом режим форсировки будет заканчиваться через запрограммированные 8 с;

- изменить параметры ПИ-регулятора.

Внесение изменений в параметры существующих настроек для предотвращения асинхронного режима работы СД возможно, однако имеется вероятность возникновения аварийной ситуации при текущих безаварийных режимах. Выполнение ПИ-регулятора более динамичным в целях быстрого увеличения тока возбуждения и его снижения может привести к неустойчивой работе и «раскачиванию» в других режимах. Если сделать «медленнее», то ПИ-регулятор может не справиться с мгновенными изменениями величины нагрузки на валу ротора СД, что встречается довольно часто при загрузке ГПА с синхронным электроприводом.

Для предотвращения асинхронного режима работы СД необходимо воспроизвести параметры существующих настроек АРВ на математической модели и провести численные эксперименты.

Несмотря на реализацию в статических системах возбуждения с АРВ допустимых величин перерегулирования, вопрос обеспечения устойчивости СД в постфорсировочных режимах работы при соблюдении остальных условий до настоящего времени не решен.

1.5 Анализ научно-технических публикаций, патентов в области темы исследований

В процессе проведения исследований по теме диссертации были рассмотрены публикации, патенты, связанные с обеспечением статической и динамической устойчивости электротехнических систем с мощными СД.

В публикациях [92, 55, 56, 93, 58, 57, 108] предлагаются методы повышения энергоэффективности КС и надежности работы СД ГПА за счет применения

оптимального регулятора возбуждения, модернизации и реконструкции энергетического оборудования. Однако предлагаемые методы рассматривают только статические и аварийные режимы, постфорсировочные не рассматриваются.

В статьях [84, 91] приведены методические указания по регулировке устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), а также предлагаются пути решения повышения устойчивости работы узлов нагрузки с мощными синхронными электроприводами в аварийных режимах путем изменения настроек РЗА за счет ввода алгоритма контроля устойчивости СД с учетом схемы узлов нагрузки. Вопрос повышения устойчивости узлов нагрузки с мощными СД в постфорсировочных режимах работы в указанных публикациях также не отражается.

В работе [26] описана методика определения границ динамической устойчивости электромеханических комплексов с СД. Обоснована зависимость времени потери питания от увеличения механической постоянной времени, величины остаточного напряжения на СД и снижении коэффициента загрузки. В публикациях [3, 106, 46, 50] предложены подходы к созданию моделей СД, силовых трансформаторов, линий и автоматических регуляторов возбуждения для расчета параметров электромеханических переходных процессов и определения устойчивости в энергосистемах.

В публикациях, наиболее близких к теме исследования, [41, 37, 39, 38, 36, 40, 99, 38] приводятся инновационные подходы к формированию алгоритмов регулирования возбуждения СД для обеспечения статической и динамической устойчивости, кроме того рассмотрен вопрос определения угла нагрузки синхронных машин путем ввода в схему системы возбуждения микропроцессорного идентификатора угла нагрузки. Предлагается использование идентификатора угла нагрузки СД для вычисления угла нагрузки в статических и динамических режимах работы СД, благодаря чему становится возможным обеспечение своевременной форсировки возбуждения в аварийных режимах, предотвращающий переход двигателя в асинхронный режим.

В публикациях [20, 44, 112] предлагаются подходы к моделированию элементов узлов нагрузки и пусковых режимов мощных СД. Однако в предлагаемых моделях не учитываются процессы, характерные для элементов схемы электроснабжения узлов нагрузки с мощными СД, подключенными к одной секции шин, что является важным моментом при работе СД в составе КС.

Заслуживают внимания патенты, относящиеся к тематике проводимых исследований и направленные на решение важных вопросов в управлении работой СД:

- способов управления током возбуждения в целях повышения статической и динамической устойчивости узла нагрузки с мощными СД [62, 68, 72, 73, 67, 69, 75, 65];

- определения предпосылок асинхронного хода СД в целях повышения устойчивости работы СД [77];

- повышения устойчивости работы СД путем смещения статора относительно магнитного потока ротора [70];

- разработки устройств защит от асинхронного хода [66, 59];

- способов поддержания динамической устойчивости узла нагрузки [61, 86, 97, 63];

- способов и устройства защиты от потери питания [60, 76, 71, 74].

Необходимо отметить, что указанные публикации и работы направлены на обеспечение устойчивости работы СД только в статических и аварийных режимах. При этом область процессов, негативно влияющих на обеспечение синхронного режима работы мощных СД в постфорсировочных режимах работы, не рассматривалась.

Выводы

1. Основным способом регулирования нагрузки на КС с мощными СД является изменение количества работающих ГПА, что подразумевает частое включение/отключение СД.

2. Воздействие возмущающих факторов (провалы напряжения, резкий перепад давления и т. п.) на работающие в группе СД может привести к нарушению их устойчивости в связи с влиянием одного из СД группы на устойчивость работы другого.

3. Выход из синхронизма мощных СД зависит не только от характера (провал напряжения, сброс, или резкое увеличение нагрузки на валу ротора) и величины возмущающих воздействий, величины нагрузки, но и от технологической схемы работы СД (работа двух, или одного мощных СД на одной секции шин узла нагрузки).

4. В постфорсировочных режимах работы, при снижении тока возбуждения ПИ-регулятором происходит перерегулирование, которое, в том числе при наличии дополнительного возмущающего воздействия (например, наброс нагрузки, провал напряжения), может привести к аварийному останову СД. Вопрос обеспечения устойчивости работы мощных электроприводов с СД, связанный с процессом перерегулирования тока возбуждения, недостаточно исследован и требует поиска новых решений.

5. Анализ публикаций подтверждает важность тематики повышения устойчивости работы мощных синхронных электроприводов, применяемых на промышленных предприятиях, и показывает, что вопрос обеспечения устойчивости работы СД в постфорсировочных режимах работы недостаточно исследован.

6. Проблема исключения риска нарушения синхронного режима работы СД в постфорсировочных режимах в настоящее время не решена, несмотря на реализацию в статических возбудителях с АРВ допустимых величин перерегулирования.

7. Для предотвращения перехода СД в асинхронный режим работы путем плавного уменьшения величины тока возбуждения при выходе из режима форсировки возможно использовать следующие способы:

а) в систему АРВ ввести новый параметр – скорость закрытия тиристоров гр. элек./сек до значения, при котором $\cos\varphi = 1$ и включением ПИ-регулятора;

б) запомнить значение угла открытия тиристорov возбуждательного устройства, при котором в последний раз $\cos\varphi = 1$, а по окончании режима форсировки подать команду на открытие тиристорov именно на этот угол;

в) увеличить значение уставки «напряжение 10 кВ отключение форсировки» с 9,8 кВ до 10 кВ или 10,2 кВ, что увеличит время режима форсировки, а значит увеличит время на стабилизацию параметров СД;

г) изменить параметры ПИ-регулятора.

8. Изменение существующих алгоритмов для предотвращения перехода СД в асинхронный режим может привести к возникновению аварийных ситуаций при существующих безаварийных режимах.

9. Для исключения нарушений технологического процесса КЦ из-за нарушения устойчивости работы мощных СД при различных режимах работы газотранспортной системы необходимо:

а) разработать математическую модель электротехнической системы КЦ в составе ГПА с электроприводом типа СТД-12500 и неполнонапорными нагнетателями;

б) провести численные эксперименты на математической модели с проработкой технических решений, обеспечивающих оптимальное управление СД и его динамическую устойчивость в постфорсировочных режимах работы;

в) разработать способ и алгоритм оптимального управления током возбуждения, обеспечивающий устойчивость работы мощных электроприводов с СД в постфорсировочных режимах работы;

г) провести эксплуатационные эксперименты для проверки полученных результатов расчетов.

10. Для исследований выбрана схема электроснабжения КС «Южно-Балыкская», которая является типовой для КС, имеющих в узлах нагрузки мощные синхронные электроприводы типа СТД-12500.

11. Для исследований принято устройство АРВ с цифровым управлением типа ВТЦ-СД, так как на КС магистральных газопроводов установлено значительное количество возбуждательных устройств данного типа.

Глава 2 Разработка математической модели электротехнической системы компрессорного цеха с мощными синхронными двигателями

2.1 Предпосылки разработки математической модели

В настоящее время известно несколько основных программных комплексов для решения задач по расчету динамической устойчивости и моделированию системной автоматики, например, Mustang, DAKAR, АНАРЭС-2000, EUROSTAG, RastrWin и др.

При анализе возможностей этих программных средств выявлено, что встроенные модели систем возбуждения могут решать задачи управления током возбуждения синхронных генераторов, но они не имеют возможности моделирования ПИ-регулятора в контуре напряжения статора и тока возбуждения.

В связи с возникающими затруднениями при применении встроенных моделей систем возбуждения генераторов в целях моделирования систем возбуждения СД в указанных программных комплексах, применение их для исследования взаимного влияния СД в постфорсировочных режимах работы не представляется возможным.

В близких по теме исследования работах математические модели предусматривают работу одного СД, подключенного к одной секции шин, при этом не исследуются схемы с двумя СД, подключенных к одной секции шин узла нагрузки [100, 47]. Соответственно не учитываются особенности процессов и параметры взаимного влияния в постфорсировочных режимах работы двух СД, подключенных к одной секции шин узла нагрузки. Кроме того, в указанных работах не учитываются особенности процессов и параметры взаимного влияния от схем подключения мощных СД к секциям шин низкого напряжения силового

трансформатора и от работы мощных СД в постфорсировочных режимах работы с учетом конфигурации схем питания и режима работы СД.

Расчеты схемы замещения электротехнической системы КЦ с мощными СД в среде Simulink требуют значительных затрат времени на обработку данных. Использование типовых блоков в среде Simulink не позволяет объективно учесть и отобразить протекающие процессы исследуемой схемы при различных режимах работы мощных СД подключенных к одной секции шин узла нагрузки.

При анализе встроенных моделей систем возбуждения в среде Simulink для использования в качестве АРВ СД выявлено, что:

- не учитывается изменение напряжения питания возбудителя;
- отсутствуют контуры регулирования по коэффициенту мощности.

Характерной особенностью разрабатываемой математической модели является введение в схему замещения электротехнической системы КЦ дополнительных цепей, подсхем связи, состоящих из емкостей и сопротивлений, позволяющих существенно снизить время процесса обработки данных и учесть взаимное влияние СД в постфорсировочных режимах работы, а также учесть совместное функционирование подсхем с разнородными математическими представлениями [89, 49, 45]. Также, в отличие от ранее разработанных математических моделей, в предлагаемой модели рассматривается взаимное влияние двух мощных СД с разными режимами работы каждого из них, в том числе при различных схемах включения к вторичным обмоткам силового трансформатора. С целью учета особенностей исследуемой электротехнической системы КЦ с мощными синхронными электроприводами, принято решение о реализации математической модели в программном комплексе MatLab.

Для исследования функционирования взаимного влияния СД предполагается провести 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).

Проверка корректности работы математической модели приведена в главе 4.

2.2 Расчетная схема электроснабжения компрессорного цеха с мощными синхронными двигателями

Расчетная схема электроснабжения КЦ приведена на рисунке 2.1. Она представляет одну из групп компрессорного оборудования, получающей питание от внешней системы электроснабжения напряжением 220 кВ.

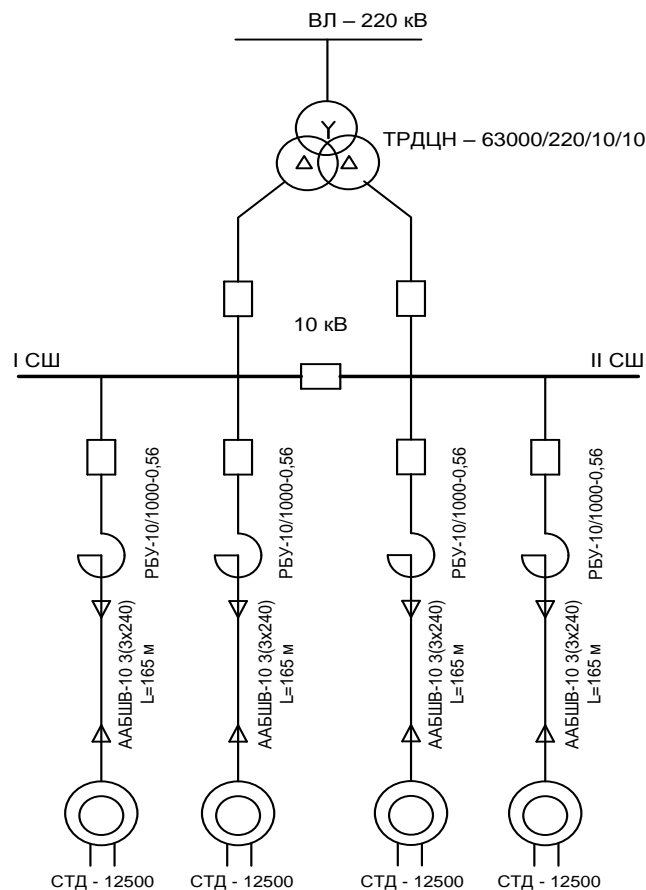


Рисунок 2.1 – Расчетная схема электроснабжения КЦ

Для анализа этой схемы сначала имеет смысл определить параметры цепей питания статоров, чтобы можно было предметно сопоставлять их с параметрами других элементов силового оборудования, что необходимо для обеспечения количественного анализа.

а) Трансформатор ТРДЦН 63000/220/10/10

- индуктивное сопротивление (220 кВ)

$$X_B = \frac{\left(U_{кВН} \cdot U_{ср.ном}^2 \cdot \left(1 - \frac{K_p}{4} \right) \right)}{100 \cdot S_{ном.т}} \quad (2.1)$$

$$K_p = 4 \cdot \left(\frac{U_{кВН1}}{U_{кВН}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

- индуктивное сопротивление (10 кВ)

$$X_{H1} = X_{H2} = \frac{U_{кВН} \cdot U_{ср.ном}^2 \cdot K_p}{100 \cdot S_{ном.т} \cdot 2} \quad (2.3)$$

- активное сопротивление (220 кВ)

$$R_B = \frac{\Delta P_{кВН} \cdot U_{ср.ном}^2}{2 \cdot S_{ср.ном}^2} \quad (2.4)$$

- активное сопротивление (10 кВ)

$$R_{H1} = R_{H2} = 2 \cdot R_B \quad (2.5)$$

где $U_{кВН}$ – напряжение к.з. для обмоток ВН-НН (11,5%);

$U_{ср.ном}$ – среднее номинальное напряжение трансформатора (10,5 кВ);

K_p – коэффициент расщепления;

$S_{ном.т}$ – номинальная мощность трансформатора (63 МВА);

$U_{кВН1}$ – напряжение короткого замыкания для обмоток ВН-НН1 (21%);

$\Delta P_{кВН}$ – потери короткого замыкания трансформатора (265 кВт).

б) Реактор P1

- индуктивное сопротивление реактора $X_L = X_{ном}$ (2.6)

- активное сопротивление реактора $R_L = \frac{\Delta P_{ном}}{I_{ном}^2}$ (2.7)

где $X_{ном}$ – номинальное индуктивное сопротивление реактора (0,56 Ом);

$\Delta P_{ном}$ – номинальные потери мощности в реакторе (8700 Вт);

$I_{ном}$ – номинальный ток реактора (1000 А).

с) Кабельная линия 10 кВ – 3*ААБШв (3*240)

$$- \text{индуктивное сопротивление } X_{\text{кл}} = X_0 \cdot L/N \quad (2.8)$$

$$- \text{активное сопротивление } R_{\text{кл}} = R_0 \cdot L/N \quad (2.9)$$

где X_0 – удельное индуктивное сопротивление кабеля (0,075 Ом/км);

R_0 – удельное активное сопротивление кабеля (0,125 Ом/км);

L – длина кабеля (0,165 км);

N – число параллельно проложенных кабелей ($N=3$).

В результате расчетов получены следующие значения:

$$X_B = 0,035 \text{ Ом}; X_{H1} = X_{H2} = 0,332 \text{ Ом}; R_B = 0,0037 \text{ Ом}; R_{H1} = R_{H2} = 0,0074 \text{ Ом};$$

$$X_L = 0,56 \text{ Ом}; R_L = 0,0087 \text{ Ом}; X_{\text{кл}} = 0,0041 \text{ Ом}; R_{\text{кл}} = 0,0069 \text{ Ом}.$$

Токи трехфазного короткого замыкания на шинах 10 кВ:

$$I_{\text{кз.макс}} = 14943 \text{ А}; I_{\text{кз.мин}} = 13958 \text{ А}.$$

Суммарное сопротивление ($X_{\text{сум}}$) от шин системы до шин 10 кВ равно:

$$X_{\text{сум}} = X_c + X_{\text{вл}} + X_{\text{тр}} + X_{\text{нн}}, \quad (2.10)$$

где X_c – индуктивное сопротивление системы;

$X_{\text{вл}}$ – индуктивное сопротивление воздушной линии 220 кВ;

$X_{\text{тр}}$ – индуктивное сопротивление трансформатора (220 кВ);

$X_{\text{нн}}$ – индуктивное сопротивление трансформатора (10 кВ).

Ток КЗ рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{кз}} = E/X_{\text{сум}} \quad (2.11)$$

где E – ЭДС системы, приведенная к стороне 10 кВ (10,5/1,73 кВ).

В соответствии с известным током КЗ рассчитаем $X_{\text{сум}}$:

$$X_{\text{сум}} = 10,5/(1,73 \cdot 14,943) = 0,406 \text{ Ом}.$$

Сопротивление трансформатора:

$$X_{\text{тр}} = X_B + X_{H1} = 0,035 + 0,332 = 0,367 \text{ Ом}.$$

Рассчитаем суммарное сопротивление системы и воздушной линии 220 кВ:

$$X_c + X_{\text{вл}} = X_{\text{сум}} - X_{\text{тр}} = 0,406 - 0,367 = 0,039 \text{ Ом}.$$

Сопротивление системы и воздушной линии 220 кВ принимается равным нулю, а ее мощность равной бесконечности при условии, когда точка короткого

замыкания удалена от источника на значительное расстояние и результирующее сопротивление цепи короткого замыкания значительно (в 5-10 раз) превышает сопротивление системы и воздушной линии 220 кВ.

Определим отношение суммарного сопротивления цепи КЗ к сопротивлению системы и линии 220 кВ:

$$X_{\text{сум}}/(X_{\text{с}} + X_{\text{вл}}) = 0,406/0,039 = 10,4 \text{ Ом}$$

С учетом полученного результата принимаем рассматриваемую систему, как систему бесконечной мощности, в дальнейших расчетах не учитываем сопротивление линии 220 кВ и сопротивление системы.

2.3 Допущения, принятые при разработке математической модели

В процессе разработки математической модели приняты следующие допущения [80, 13, 42, 100]:

1. Система внешнего электроснабжения

1.1. Шины подстанции КС «Южно-Балыкская» считаются шинами, питающимися от источника бесконечной мощности. Сопротивление системы и воздушной линии 220 кВ принимаются равными нулю в соответствии с проведенными выше расчетами.

1.2. Токи утечки линии электропередачи не учитываются ввиду их малости по сравнению с токами, обусловленными трехфазным КЗ на шинах 10кВ.

2. Трансформатор

2.1. Насыщение стали трансформатора 220/10 кВ не учитывается.

Схема замещения трехобмоточного трансформатора в отличие от схемы замещения двухобмоточного трансформатора будет иметь две вторичные цепи. У мощных трехобмоточных трансформаторов намагничивающий ток мал и им можно пренебречь [16]. Учет насыщения существенно усложнит предложенную модель. Это может стать целью дальнейших разработок и исследований.

2.2. Трансформатор имеет симметрию по фазам и по секциям.

При симметричной нагрузке трехфазных трансформаторов электромагнитные процессы протекают во всех фазах одинаково, соответствующие электромагнитные величины в каждой фазе также одинаковы и сдвинуты по фазе на 120° . Некоторая несимметрия магнитной цепи трансформатора, а также появление в ряде случаев третьих гармоник потока не оказывает значительного влияния на работу трансформатора под нагрузкой [16].

3. Синхронный двигатель

Магнитное поле в машине переменного тока, возбуждаемое токами обмоток, весьма неоднородно из-за сложной конфигурации магнитной системы машины, своеобразного расположения обмоток и нелинейности магнитной характеристики магнитопровода. Поэтому точное определение магнитного поля представляет собой сложную задачу. В практических расчетах электромагнитных переходных процессов при составлении, анализе и решении дифференциальных уравнений машины допускается частичная идеализация (за счет допущений) в описании магнитного поля. Это позволяет получить достаточно простые электромагнитные связи при сохранении основных характеристик электромагнитного процесса в машине. Используемая идеализация сводится к следующему [79, 18].

3.1. Магнитная проницаемость сердечника машины принимается бесконечной, что соответствует отсутствию насыщения.

Магнитные линии основной гармоники поля пересекают воздушный зазор и замыкаются через сердечники статора и ротора. Магнитная проницаемость стали сердечников принимается равной бесконечности. Однако эти поля, а также высшие гармоники поля зазора в нормальных режимах работы малы по сравнению с основной гармоникой поля зазора и степень насыщения сердечников статора и ротора определяется практически магнитным потоком этой основной гармоники [16].

3.2. Распределение полей самоиндукции трехфазных обмоток, взаимной индукции обмоток статора и ротора вдоль окружности синхронного двигателя можно считать синусоидальными, искажение поля отсутствует.

При отсутствии зубчатости якоря (неявнополюсный ротор, который рассматривается в диссертационной работе) и насыщения, пазов на поверхности статора и ротора нет, воздушный зазор является равномерным по всей окружности и, следовательно, искажение влияния пазов и насыщения магнитной цепи на распределение поля в зазоре отсутствует [16]. Это соответствует известным исходным допущениям, принятым в модели Парка-Горева, которая используется в работе.

3.3. Магнитная ось обмотки возбуждения совпадает с продольной осью машины.

Это объясняется тем, что для исследования и расчета симметричных переходных процессов в синхронных машинах целесообразно применять систему осей d и q , жестко связанную с вращающимся ротором, причем ось d совмещена с продольной осью ротора. Переход от осей A, B, C к осям d и q является основным и наиболее удобным, поскольку позволяет преобразовать исходные дифференциальные уравнения синхронного двигателя с периодическими коэффициентами в уравнения с постоянными коэффициентами. Это также объясняется тем, что в системе координат d и q неявнополюсную машину в магнитном отношении можно рассматривать как симметричную независимо от положения ротора в пространстве [16].

4. Система возбуждения.

4.1. Допускается, что угол управления подчиняется линейному закону и меняется в пределах $0 - \pi/2$.

При активно-индуктивной нагрузке и углах $\alpha > \pi/3$ могут появляться зоны прерывистых токов. При $\alpha = \pi/2$ среднее значение выпрямленного напряжения становится равным нулю, что соответствует равенству площадей положительного и отрицательного участков кривой выпрямленного напряжения, что указывает на отсутствие в нем постоянной составляющей [89].

4.2. Цифровой регулятор тока идеально управляет тиристорным преобразователем по пропорционально-интегральному закону.

Построение цифровых регуляторов на микропроцессорных элементах обеспечивает высокую скорость и точность вычислений и обработки параметров, а также высокую скорость приема передачи управляющих сигналов в сравнении с аналогичными устройствами, построенными на релейных и аналоговых элементах.

С учетом сделанных допущений в программном комплексе MatLab разработана математическая модель электротехнической системы КЦ с мощными синхронными электроприводами, позволяющая проводить количественный анализ результатов расчета в постфорсировочных режимах работы с воспроизведением постфорсировочных ситуаций. Все упрощения заключаются в выделении главного, практически существенного для решения поставленных задач. Нелинейность параметров системы обычно не учитывается, при этом система называется линеаризованной [42], указанный подход характерен для разработанной математической модели.

2.4 Математическая модель трансформатора

Расчетная схема участка компрессорного цеха (рисунок 2.2) включает трехфазный трансформатор с расщепленной обмоткой ТРДЦН – 63000/220/10-10 со схемой соединения обмоток $Y/\Delta - \Delta$ и присоединенные к его вторичным обмоткам статоры синхронных двигателей СТД-12500.

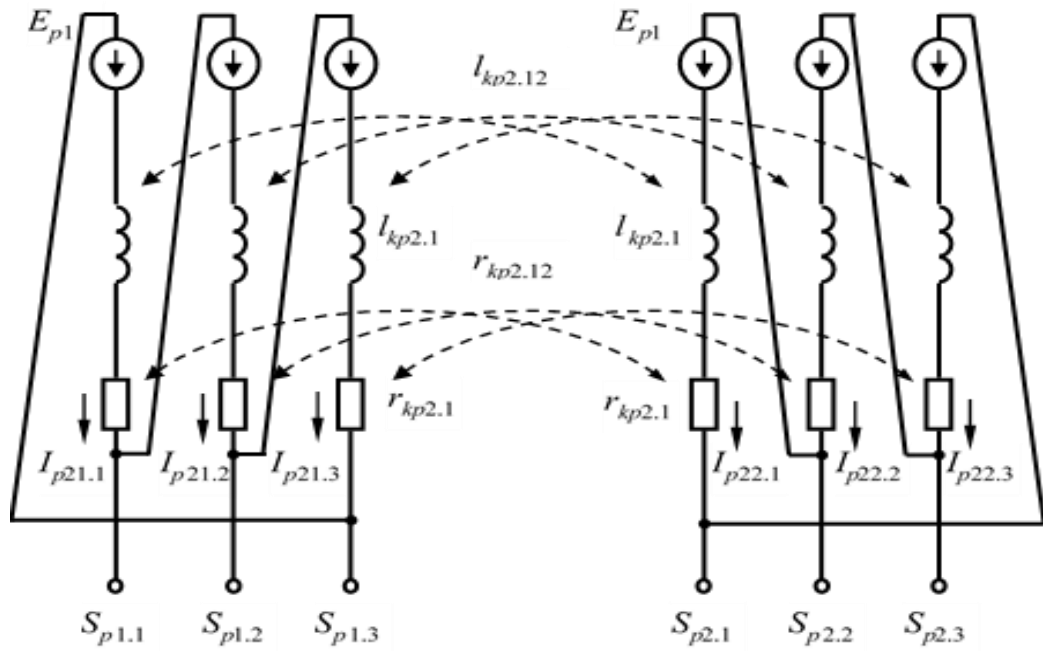


Рисунок 2.2 – Схема замещения трансформатора ТРДЦН-63000/220/10-10

Исходные уравнения электрического равновесия трехфазной обмотки высокого напряжения:

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{W}_1 \mathbf{S}_\mu \frac{d}{dt} \mathbf{B}_\mu + \mathbf{L}_{1\sigma} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_1 + \mathbf{L}_{1.21\sigma} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{21} + \mathbf{L}_{1.22\sigma} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{22} + \mathbf{R}_1 \mathbf{I}_1 \quad (2.12)$$

двух секций обмотки низкого напряжения:

$$\mathbf{U}_{21} = \mathbf{W}_{21} \mathbf{S}_\mu \frac{d}{dt} \mathbf{B}_\mu + \mathbf{L}_{1.21\sigma} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_1 + \mathbf{L}_{21\sigma} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{21} + \mathbf{L}_{21.22\sigma} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{22} + \mathbf{R}_{21} \mathbf{I}_{21} \quad (2.13)$$

$$\mathbf{U}_{22} = \mathbf{W}_{22} \mathbf{S}_\mu \frac{d}{dt} \mathbf{B}_\mu + \mathbf{L}_{1.22\sigma} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_1 + \mathbf{L}_{21.22\sigma} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{21} + \mathbf{L}_{22\sigma} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{22} + \mathbf{R}_{22} \mathbf{I}_{22} \quad (2.14)$$

где \mathbf{B}_μ , \mathbf{S}_μ - вектор индукций и диагональная матрица площадей поперечных сечений стержней;

$\mathbf{L}_{1.21\sigma}, \mathbf{L}_{1\sigma}, \mathbf{L}_{1.22\sigma}, \mathbf{L}_{21.22\sigma}, \mathbf{L}_{22\sigma}, \mathbf{R}_1, \mathbf{R}_{21}, \mathbf{R}_{22}$, - диагональные матрицы индуктивностей и взаимоиндуктивностей рассеяния контуров и активных сопротивлений обмоток;

$\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_{22}, \mathbf{W}_{21}$ - 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 равновесия намагничивающих сил стержней трансформатора по закону полного тока имеет вид:

$$\mathbf{L}_\mu \mathbf{H}_\mu = \mathbf{W}_1 \mathbf{I}_1 + \mathbf{W}_{21} \mathbf{I}_{21} + \mathbf{W}_{22} \mathbf{I}_{22}, \quad (2.15)$$

где $\mathbf{H}_\mu, \mathbf{L}_\mu$ - вектор напряженностей и диагональная матрица длин средних силовых линий стержней.

В случае пофазной симметрии конструкции магнитопровода и обмоток трансформатора вместо диагональных матриц параметров можно использовать скалярные величины, изображаемые соответствующими строчными символами, что и применяется для упрощения последующего вывода.

Введены коэффициенты трансформации[^]

$$w_1^{-1} w_{21} = k_{1.21}, \quad w_1^{-1} w_{22} = k_{1.22}, \quad k_{21.22} = w_{21}^{-1} w_{22}, \quad k_{22.21} = w_{22}^{-1} w_{21}. \quad (2.16)$$

Умножается уравнение (2.12) на $k_{1.21}$ и $k_{1.22}$ и суммируется с уравнениями (2.13) и (2.14):

$$\begin{aligned} U_{21} - k_{1.21} U_1 &= (\mathbf{L}_{1.21\sigma} - k_{1.21} \mathbf{L}_{1\sigma}) \frac{d}{dt} \mathbf{I}_1 + (\mathbf{L}_{21\sigma} - k_{1.21} \mathbf{L}_{1.21\sigma}) \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{21} + \\ &+ (\mathbf{L}_{21.22\sigma} - k_{1.21} \mathbf{L}_{1.22\sigma}) \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{p22} + r_{21} \mathbf{I}_{21} - k_{1.21} r_1 \mathbf{I}_1, \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} U_{22} - k_{1.22} U_1 &= (\mathbf{L}_{1.22\sigma} - k_{1.22} \mathbf{L}_{1\sigma}) \frac{d}{dt} \mathbf{I}_1 + (\mathbf{L}_{21.22\sigma} - k_{1.22} \mathbf{L}_{1.21\sigma}) \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{21} + \\ &+ (\mathbf{L}_{22\sigma} - k_{1.22} \mathbf{L}_{1.22\sigma}) \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{p22} + r_{22} \mathbf{I}_{22} - k_{1.22} r_1 \mathbf{I}_1. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Из (2.15) получается выражение токов первичной обмотки через токи вторичной обмотки с допущением, что намагничивание равно 0 ($\mathbf{H}_\mu=0$)

$$\mathbf{I}_1 = -k_{1.21} \mathbf{I}_{21} - k_{1.22} \mathbf{I}_{22}. \quad (2.19)$$

При подстановке уравнения (2.19) в (2.17) и (2.18) после группировки находится выражение для фазных напряжений первой секции вторичной обмотки трансформатора через токи секций вторичной обмотки и фазные напряжения на зажимах первичной обмотки трансформатора.

$$\begin{aligned} U_{21} = & k_{1.21}U_1 + \left(l_{21\sigma} - 2k_{1.21}l_{1.21\sigma} + k_{1.21}^2l_{1\sigma} \right) \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{21} + \\ & + \left(l_{21.22\sigma} - k_{1.21}l_{1.22\sigma} - k_{1.22}l_{1.21\sigma} + k_{1.21}k_{1.22}l_{1\sigma} \right) \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{22} + \\ & + r_{21}\mathbf{I}_{21} + k_{1.21}^2r_1\mathbf{I}_{21} + k_{1.21}k_{1.22}r_1\mathbf{I}_{22}. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Аналогично для второй секции вторичной обмотки

$$\begin{aligned} U_{22} = & k_{1.22}U_1 + \left(l_{22\sigma} - 2k_{1.22}l_{1.22\sigma} + k_{1.22}^2l_{1\sigma} \right) \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{22} + \\ & + \left(l_{21.22\sigma} - k_{1.22}l_{1.21\sigma} - k_{1.21}l_{1.22\sigma} + k_{1.21}k_{1.22}l_{1\sigma} \right) \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{21} + \\ & + r_{22}\mathbf{I}_{22} + k_{1.22}^2r_1\mathbf{I}_{22} + k_{1.21}k_{1.22}r_1\mathbf{I}_{21}, \end{aligned} \quad (2.21)$$

где $l_{1\sigma}$, $l_{21\sigma}$, $l_{22\sigma}$ – собственные индуктивности рассеяния первичной и секций вторичной обмотки,

$l_{1.21\sigma}$, $l_{1.22\sigma}$, $l_{21.22\sigma}$ – взаимоиנדуктивности рассеяния между этими обмотками;

r_1 , r_{21} , r_{22} – активные сопротивления первичной и секций вторичной обмотки.

Учитывая, что мощность центра питания 220 кВ принимается бесконечной, величины $k_{1.21}U_1$ и $k_{1.22}U_1$ в (2.20) и (2.21) можно интерпретировать, как вектора трехфазных систем ЭДС, подключенных к зажимам секций вторичной обмотки.

Произведения индуктивностей и взаимоиנדуктивностей рассеяния в разных сочетаниях в (2.20) и (2.21), умножаемые на производные токов секций вторичной обмотки, имеют смысл ЭДС индукций от соответствующих полей рассеяния. Их главные составляющие учитывают падения напряжения, обусловленные протеканием токов в собственной секции, а взаимные – от протекания токов в соседней секции. Следует отметить, что эквивалентные индуктивности рассеяния, определяющие главные составляющие, соответствуют индуктивностям опытов

коротких замыканий первичной обмотки при питании со стороны соответствующих секций:

$$\begin{aligned} l_{21\sigma} - 2k_{1.21}l_{1.21\sigma} + k_{1.21}^2l_{1\sigma} &= l_{kp2.1}, \\ l_{22\sigma} - 2k_{1.22}l_{1.22\sigma} + k_{1.22}^2l_{1\sigma} &= l_{kp2.2}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

При соблюдении идентичности секций вторичной обмотки:

$$k_{1.21} = k_{1.22}. \quad (2.23)$$

Тогда значение $l_{kp2.1} = l_{kp2.2}$ в абсолютных единицах можно получить из расчета (2.1), (2.3), как $\frac{X_B + X_{H1}}{2\pi 50}$.

Аналогично, в случае идентичности секций, можно учесть падение напряжения от собственного тока секции в активных сопротивлениях:

$$r_{21} + k_{1.21}^2r_1 = r_{22} + k_{1.22}^2r_1 = r_{kp2.1}. \quad (2.24)$$

В первом приближении значение этого параметра в абсолютных единицах вычисляется на основе (2.4) и (2.5), как $(R_B + R_{H1})$.

Влияние падения напряжения в первичной обмотке и от взаимондуктивности по потоку рассеяния на процессы в первой секции от протекания тока во второй секции отражается параметром

$$l_{21.22\sigma} - k_{1.21}l_{1.22\sigma} - k_{1.22}l_{1.21\sigma} + k_{1.21}k_{1.22}l_{1\sigma} = l_{kp2.12} \quad (2.25)$$

В первом приближении значение этого параметра в абсолютных единицах вычисляется на основе (2.1) как $\frac{X_B}{2\pi 50}$.

Определяется активное сопротивление вторичных обмоток с учетом потерь в стали:

$$k_{1.21}k_{1.22}r_1 = r_{kp2.12}, \quad (2.26)$$

В первом приближении значение в абсолютных единицах может соответствовать R_B из выражения (2.4).

С учетом (2.23) получаются следующие уравнения электрического равновесия секций вторичной обмотки трансформатора:

$$\begin{aligned} U_{p21} &= E_{p1} + l_{kp2.1} \frac{d}{dt} I_{p21} + l_{kp2.12} \frac{d}{dt} I_{p22} + r_{kp2.1} I_{p21} + r_{kp2.12} I_{p22}, \\ U_{p22} &= E_{p1} + l_{kp2.12} \frac{d}{dt} I_{p21} + l_{kp2.1} \frac{d}{dt} I_{p22} + r_{kp2.12} I_{p21} + r_{kp2.1} I_{p22}. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Указанные уравнения используются в разработке математической модели при расчетах параметров подсхем питания, шинопроводов и СД.

Этим уравнениям соответствует схема замещения трансформатора без первичной обмотки с синусоидальными трехфазными ЭДС бесконечно большой мощности E_{p1} с взаимными индуктивностями $l_{kp2.12}$, активными сопротивлениями $r_{kp2.1}$ (2.24) вторичных обмоток трансформатора и $r_{kp2.12}$ из выражения (2.26) - активное сопротивление вторичных обмоток с учетом потерь в стали (рисунок 2.2).

В Приложении А приведены значения параметров этого трансформатора. Численные значения параметров схемы замещения (рисунок 2.2) в относительных единицах представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры схемы замещения трансформатора

Название параметра	Обозначение	Значение в о.е.
Индуктивность обмотки схемы замещения трансформатора	$l_{kp2.1}$	0,0991
Взаимная индуктивность обмотки схемы замещения трансформатора	$l_{kp2.12}$	0,0660
Активное сопротивление обмотки схемы замещения трансформатора	$r_{kp2.1}$	0,0008
Активное сопротивление вторичных обмоток с учетом потерь в стали	$r_{kp2.12}$	0,0037

2.5 Математическая модель участка компрессорного цеха с мощным синхронным двигателем

Газоперекачивающий агрегат представляется структурной схемой, приведенной на рисунке 2.3.

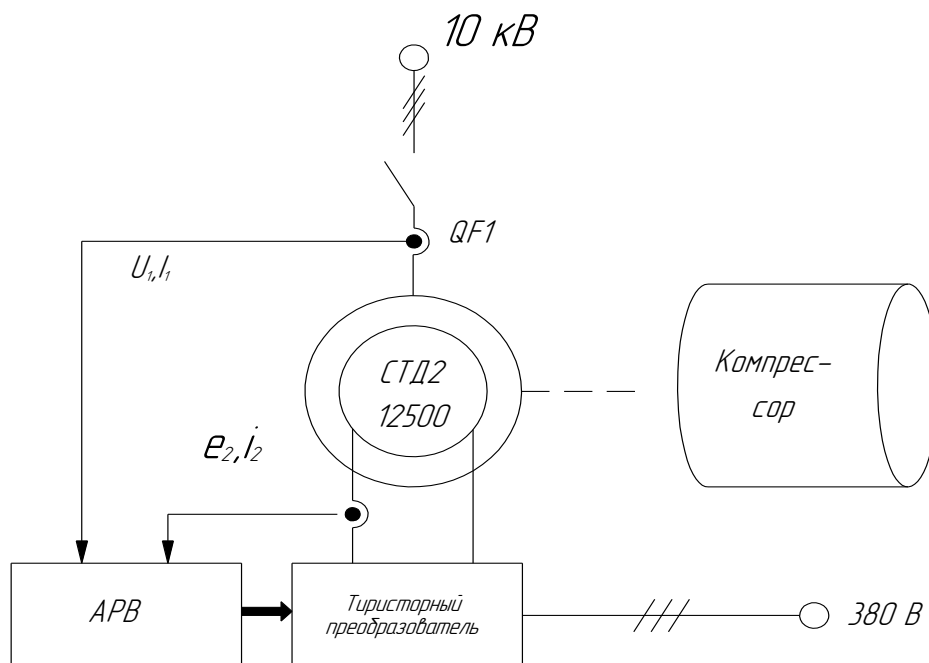


Рисунок 2.3 – Структурная схема газоперекачивающего агрегата

Основным узлом системы является СД, выполняющий функцию электропривода [28, 30]. В задачах, стоящих перед его математическим моделированием, требуется применение достаточно сложного математического представления, обеспечивающего учет динамических процессов даже для тех случаев, где идет речь об анализе статических режимов. С другой стороны, нет достаточных оснований для углубленного представления функционирования синхронного электродвигателя на основе анализа электромагнитного поля. Достаточным является описание процессов функционирования СД на уровне применения схем замещения электрических и магнитных цепей. Теоретическая основа такого представления СД разработана в трудах отечественных и зарубежных ученых [22, 82, 9, 31].

Для получения представления об имеющихся вариациях математического описания синхронного двигателя имеет смысл проанализировать основные математические модели, известные из литературы [22, 31, 34]. Во всех математических моделях, нашедших практическое применение, используется координатное преобразование физических переменных – токов, напряжений, потокосцеплений, что, в свою очередь, обеспечивает постоянство значений индуктивностей и взаимоиндуктивностей как неподвижных, так и подвижных частей СД. Указанный фактор значительно упрощает задачу формирования и решения дифференциальных уравнений, отражающих процессы электромагнитного и электромеханического преобразования энергии. Математические модели имеют различия в части набора физических переменных, выбираемых в качестве независимых величин или переменных состояния.

Модель Ψ_{dq} можно считать основной и исходной. В простейшем случае обмоток с незаземленными нейтральными и при питании от источника бесконечной мощности с известной ЭДС формируется на основе применения преобразования координат Парка-Горева [22] относительно потокосцеплений Ψ_{dq} эквивалентной машины в осях d и q .

На рисунке 2.4 приведена схема замещения участка электроснабжения КЦ с одним СД. Этот вариант схемы предназначен для анализа статических режимов работы СД при задаваемых параметрах сети электроснабжения. Это позволяет определить границы статической устойчивости.

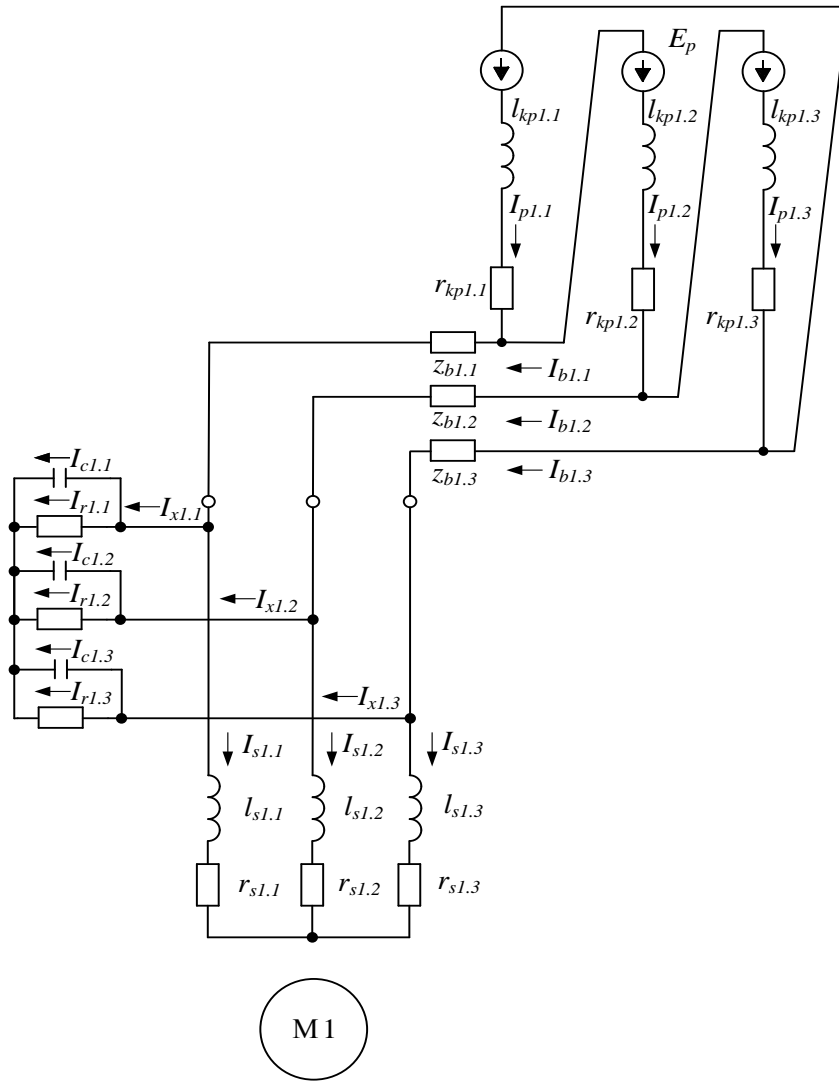


Рисунок 2.4 – Схема замещения участка электроснабжения КЦ с одним СД

В схему в качестве узла связи цепей искусственно введены не просто активные сопротивления r_x , но и параллельно с ними емкости c_x . Т.к. емкости c_x не замыкаются сами на себя, их напряжения являются независимыми переменными, или переменными состояния электрической схемы.

Они определяют линейные напряжения U_x на зажимах шин 10 кВ

$$U_{cx} = U_x, \quad (2.28)$$

поэтому вычисление внешних напряжений силовых цепей существенно упрощается.

Существенным преимуществом цепи связи, включающей емкость, является приближение постоянных времени контуров связи к постоянному времени силовых контуров. Это благоприятно сказывается на времени и точности интегрирования уравнений состояния, особенно при отображении

функционирования объектов с большой механической и электромагнитной инерцией. В частности, исключается генерация высших гармонических в цепи связи с большими активными сопротивлениями.

В данной схеме принимаются следующие абсолютные значения активных сопротивлений и емкостей связи:

$$R_x = 1000 \text{ Ом}, \quad C_x = 0,1 \text{ мкФ}, \quad T_x = R_x C_x = 10^{-4} \text{ с}$$

При таких параметрах эта цепь не оказывает заметного влияния на рабочие токи и напряжения.

Сумма токов параллельных ветвей цепей связи вычисляется через токи I_{hb1} , I_l независимых контуров с индуктивностями, т.е. через переменные состояния

$$\mathbf{I}_x = \mathbf{I}_{rx} + \mathbf{I}_{cx} = \mathbf{I}_{hb1} - \mathbf{I}_{s1}. \quad (2.29)$$

Совместная система дифференциальных уравнений электрического равновесия контуров подсхем питания, связи и электромеханического преобразователя – синхронного двигателя с нагрузкой:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{I}_{hpb} = \mathbf{L}_{hp}^{-1} (\mathbf{E}_{hpb} - \mathbf{U}_{chpb} - \mathbf{R}_{hpb} \mathbf{I}_{hpb}),$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{U}_{c1} = \mathbf{c}_1^{-1} \mathbf{I}_{c1},$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{dq1} = \mathbf{E}_{dq1} - \omega_{r1} \mathbf{B} \Psi_{dq1} - r_{s1} \mathbf{I}_{dq1},$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{f1} = e_{f1} - r_{f1} i_{f1}$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{dq3.1} = -\omega_{r1} \mathbf{B} \Psi_{dq3.1} - r_{3.1} \mathbf{I}_{dq3.1}, \quad (2.30)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_{r1} = j_{pr1}^{-1} (h_{em1} - h_{c1}),$$

$$\frac{d}{dt}\theta_{r1} = \omega_{r1},$$

где \mathbf{L}_{hpb} , \mathbf{R}_{hpb} - матрицы контурных индуктивностей и активных сопротивлений подсхемы питания и шинопроводов;

\mathbf{E}_{hpb} - ЭДС контуров подсхемы питания и шинопроводов;

\mathbf{U}_{chpb} - вектор контурных напряжений емкостей цепи связи;

\mathbf{I}_{hpb} - вектор контурного тока подсхемы питания и шинопроводов;

\mathbf{U}_{c1} - вектор напряжений конденсаторов ветвей цепи связи подсхемы статора СД1;

c_1^{-1} - емкость конденсаторов ветвей цепи связи подсхемы статора СД1;

\mathbf{I}_{c1} - ток ветвей цепи связи подсхемы статора СД1;

Ψ_{dq1} , \mathbf{I}_{dq1} - вектора преобразованных потокосцеплений и токов по продольному и поперечному контурам двигателя СД1;

\mathbf{E}_{dq1} - преобразованные фазные ЭДС, формируемые на зажимах статора;

ω_{r1} - угловая частота вращения ротора СД1;

\mathbf{B} - вещественная топологическая матрица

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.31)$$

где r_{s1} - активное сопротивление статора;

Ψ_{f1} , e_{f1} , r_{f1i} , i_{f1i} - потокосцепление, ЭДС на зажимах, активное сопротивление и ток обмотки возбуждения СД1;

$\Psi_{dq3.1}$, $\mathbf{I}_{dq3.1}$ - вектора преобразованных потокосцеплений и токов компенсационных обмоток СД1;

$r_{3.1}$ - активное сопротивление компенсационной обмотки СД1;

j_{pr1} - момент инерции ротора СД1;

h_{em1} - электромагнитный момент СД1;

h_{c1} - момент сопротивления на валу ротора СД1;

θ_{r1} - угол поворота ротора СД1.

Параметры и физические переменные подсхемы питания, включающей трансформатор и шинопроводы, формируются на основе использования \mathbf{H}_{pb1} -матрицы независимых контуров.

$$\mathbf{H}_{p1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_{b1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_{pb1} = [\mathbf{H}_{p1} \quad \mathbf{H}_{b1}], \quad (2.32)$$

$$\mathbf{I}_{p1} = [\mathbf{I}_p], \quad \mathbf{I}_{p1} = \mathbf{H}'_{pb1} \mathbf{I}_{hpb1} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{p1} \\ \mathbf{I}_{b1} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{U}_{chpb1} = \mathbf{H}_{p1} \mathbf{U}_{c1}, \quad \mathbf{I}_{cx1} = \mathbf{I}_{b1} - \mathbf{I}_{s1} - r_{x1}^{-1} \mathbf{U}_{c1}, \quad (2.33)$$

$$\mathbf{L}_{hpb1} = \mathbf{H}_{pb1} \mathbf{L}_{pb1} \mathbf{H}'_{pb1}, \quad \mathbf{R}_{hpb1} = \mathbf{H}_{pb1} \mathbf{R}_{pb1} \mathbf{H}'_{pb1},$$

$$\mathbf{L}_{pb1} = \text{diag}[l_{kp} l_{kp} l_{kp} l_{b1} l_{b1} l_{b1}], \quad \mathbf{R}_{pb1} = \text{diag}[r_{kp} r_{kp} r_{kp} r_{b1} r_{b1} r_{b1}],$$

где $\mathbf{I}_{p1}, \mathbf{L}_{hpb1}$ - вектор токов и матрица индуктивностей подсхемы питания СД1;

\mathbf{I}_{x1} - вектор токов цепи связи;

\mathbf{I}_{b1} - вектор токов цепей замещения шинопроводов;

\mathbf{I}_{s1} - вектор токов статора СД1;

$\mathbf{L}_{pb1}, \mathbf{R}_{pb1}$ – диагональные матрицы подсхем замещения трансформаторов и шинопроводов, сформированные из индуктивностей и активных сопротивлений.

Учитывается, что подсхема замещения трансформатора содержит только одну секцию, для которой верно:

$$\begin{aligned} l_{kp} &= l_{kp1.21} \\ \Gamma_{kp} &= \Gamma_{kp1.21} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Математическая модель СД строится на основе применения координатных преобразований [22], которое удобно выполнять относительно частоты вращения ротора ω_{r1} . Матрица преобразования представлена выражением (2.35).

$$\mathbf{A}_{dq1} = 2/\sqrt{3} \begin{bmatrix} \sin(\theta_{r1} + \pi/3) \sin(\theta_{r1}) \\ \cos(\theta_{r1} + \pi/3) \cos(\theta_{r1}) \end{bmatrix}, \quad (2.35)$$

где θ_{r1} – угол поворота ротора двигателя СД1.

Токи и потокосцепления контуров статора $\mathbf{I}_{dq1}, \Psi_{dq1}$ ее возбуждения i_{f1}, ψ_{f1} и компенсационных $\mathbf{I}_{dq3.1}, \Psi_{dq3.1}$

$$\mathbf{I}_{dqf1} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{dq1} \\ i_{f1} \\ \mathbf{I}_{dq3.1} \end{bmatrix}, \quad \Psi_{dqf1} = \begin{bmatrix} \Psi_{dq1} \\ \psi_{f1} \\ \Psi_{dq3.1} \end{bmatrix}$$

связаны через матрицу индуктивностей $\mathbf{L}_{dqf3.1}$

$$\mathbf{I}_{dqf3.1} = \mathbf{L}_{dqf3.1}^{-1} \Psi_{dqf3.1}, \quad (2.36)$$

$$\mathbf{L}_{dqf3.1} = \begin{bmatrix} l_{d1} & 0 & l_{m1} & l_{m1} & 0 \\ 0 & l_{q1} & 0 & 0 & l_{m1} \\ l_{m1} & 0 & l_{f1} & l_{m1} & 0 \\ l_{m1} & 0 & 0 & l_{d31} & 0 \\ 0 & l_{m1} & 0 & 0 & l_{q31} \end{bmatrix},$$

где $l_{d1}, l_{q1}, l_{d31}, l_{q31}$ – индуктивности контуров обмоток статора и компенсационной по продольной и поперечной осям двигателя СД1,

l_{m1} – индуктивность по основному контуру намагничивания двигателя СД1.

Преобразованные ЭДС E_{dq1} определяются как преобразованные напряжения емкостей цепей связи U_{c1} , подключенных к зажимам статора:

$$\mathbf{E}_{dq1} = \mathbf{A}_{dq1} \begin{bmatrix} U_{c1.1} \\ U_{c1.2} \end{bmatrix}. \quad (2.37)$$

Токи статора вычисляются через преобразованные токи:

$$\mathbf{I}_{s1} = \mathbf{H}'_s \mathbf{A}_{dq1}^{-1} \mathbf{I}_{dq1} \quad (2.38)$$

где $\mathbf{H}'_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$ – топологическая матрица.

Движение СД М1 с нагрузкой, с моментом инерции j_{pr1} и моментом сопротивления на валу h_{c1} описывается двумя последними уравнениями (2.30).

Электромагнитный момент СД М1 вычисляется по формуле

$$h_{em1} = l_{m1} i_{q1} i_{f1} . \quad (2.39)$$

Индуктивности обмоток статора СД1 по продольной и поперечной осям l_{d1} и l_{q1} , возбуждения l_{f1} и компенсационных $l_{d3.1}, l_{q3.1}$, так же как одноименные активные, определяются по каталожным данным в относительных единицах.

Ввиду недоступности заводских данных на конкретный двигатель, его некоторые параметры и характеристики находятся по приближенным оценкам, и не удастся получить однозначное соответствие расчетных параметров с данными из каталогов и протоколами испытаний реальных двигателей. Поэтому все исходные данные по двигателям и другим элементам силового оборудования необходимо проверять на соответствие имеющимся паспортным характеристикам и соответствие этих параметров по преобразованию энергии. В этой связи можно взять за основу соотношение, определяющее наличие полей рассеяния в контурах электрического двигателя, согласно формулам (10.9) и (10.11) из [22]:

$$\mu = \frac{3}{2} \frac{l_m^2}{l_d l_f} < 1 , \quad (2.40)$$

$$\sigma = 1 - \mu = 1 - \frac{3}{2} \frac{l_m^2}{l_d l_f} , \quad (2.41)$$

где μ – продольный коэффициент магнитной связи, а σ – продольный коэффициент рассеяния системы контуров.

Отсюда, исходя из полученных ранее параметров в относительных единицах для контуров статора и главного намагничивающего контура по продольной оси $l_m = 2,09$; $l_d = 2,24$ принимая $\sigma = 0,02$, а $\mu = 0,98$, получается значение индуктивности контура возбуждения в относительных единицах,

согласующееся с параметрами контуров статора и приведенное к этой цепи:

$$l_f = 0,98 \cdot \frac{3 l_m^2}{2 l_d} = 0,98 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{2,09^2}{2,24} = 2,87 \quad (2.42)$$

В каталожных данных на мощные СД приведено значение постоянной времени цепи возбуждения при разомкнутой обмотке статора, находящиеся в диапазоне 3 – 10 с. Для двигателя СТД 12500 это значение составляет $T_f = 6,72$ с .

Исходя из этого, находится значение активного сопротивления обмотки возбуждения в относительных единицах, согласующееся со справочными данными и приведенное к параметрам цепи статора

$$r_f = \frac{l_f}{T_f / T_B} = \frac{2,87}{6,72 / 0,00318} = 0,0014 . \quad (2.43)$$

В номинальном режиме, при опережающей фазе тока по отношению к напряжению статора и номинальном моменте нагрузки относительное значение тока возбуждения равно 1. Тогда номинальные значения тока и ЭДС возбуждения определяются, как базисные:

$$I_{fB} = 282 \text{ А}, \quad E_{fB} = 220 \text{ В} . \quad (2.44)$$

Таким образом, параметры контуров синхронного двигателя СТД2 12500 и моменты инерции принимают значения, приведенные в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Параметры математической модели синхронного двигателя СТД-12500

Название параметра	Обозначение	Значение в о.е.
Индуктивность рассеяния статора	$l_{\sigma 1}$	0,095
Индуктивность рассеяния обмотки ротора, приведенная к статору	$l_{\sigma 2}$	0,58
Взаимоиндуктивность между контурами, приведённая к статору	l_m	2,09
Индуктивность статора по продольной оси	l_d	2,185
Индуктивность статора по поперечной оси	l_q	2,185
Индуктивность демпферной обмотки по продольной оси	l_{3d}	2,185
Индуктивность демпферной обмотки по поперечной оси	l_{3q}	2,185
Собственная индуктивность ротора, приведенная к обмотке статора	l_f	2,67
Активное сопротивление обмотки статора	r_1	0,0049
Активное сопротивление обмотки ротора	r_2	0,0082
Активное сопротивление демпферной обмотки по продольной оси	r_{3d}	0,0039
Активное сопротивление демпферной обмотки по поперечной оси	r_{3q}	0,0039
Момент инерции электропривода компрессора	j_{pr}	1200

Данные, необходимые для вычисления параметров схемы замещения СД приведены в Приложении А.

2.6 Математическая модель участка компрессорного цеха с двумя мощными синхронными двигателями, работающими в статическом режиме и подключенными к разным секциям шин трансформатора

Общая схема замещения участка КЦ, показанная на рисунке 2.2, содержит цепь электроснабжения на основе схемы замещения трехобмоточного трансформатора ТРДЦН -63000/220/10 и подключенные к его секциям цепи СД типа СТД-12500 (рисунок 2.5).

Через цепи z_b , замещающие шинопроводы с реакторами, может быть подключено до четырех СД, составляющих две группы.

Подсхемы шинопроводов и статоров разделяются узлами, образуемыми подключением r -с цепей связи.

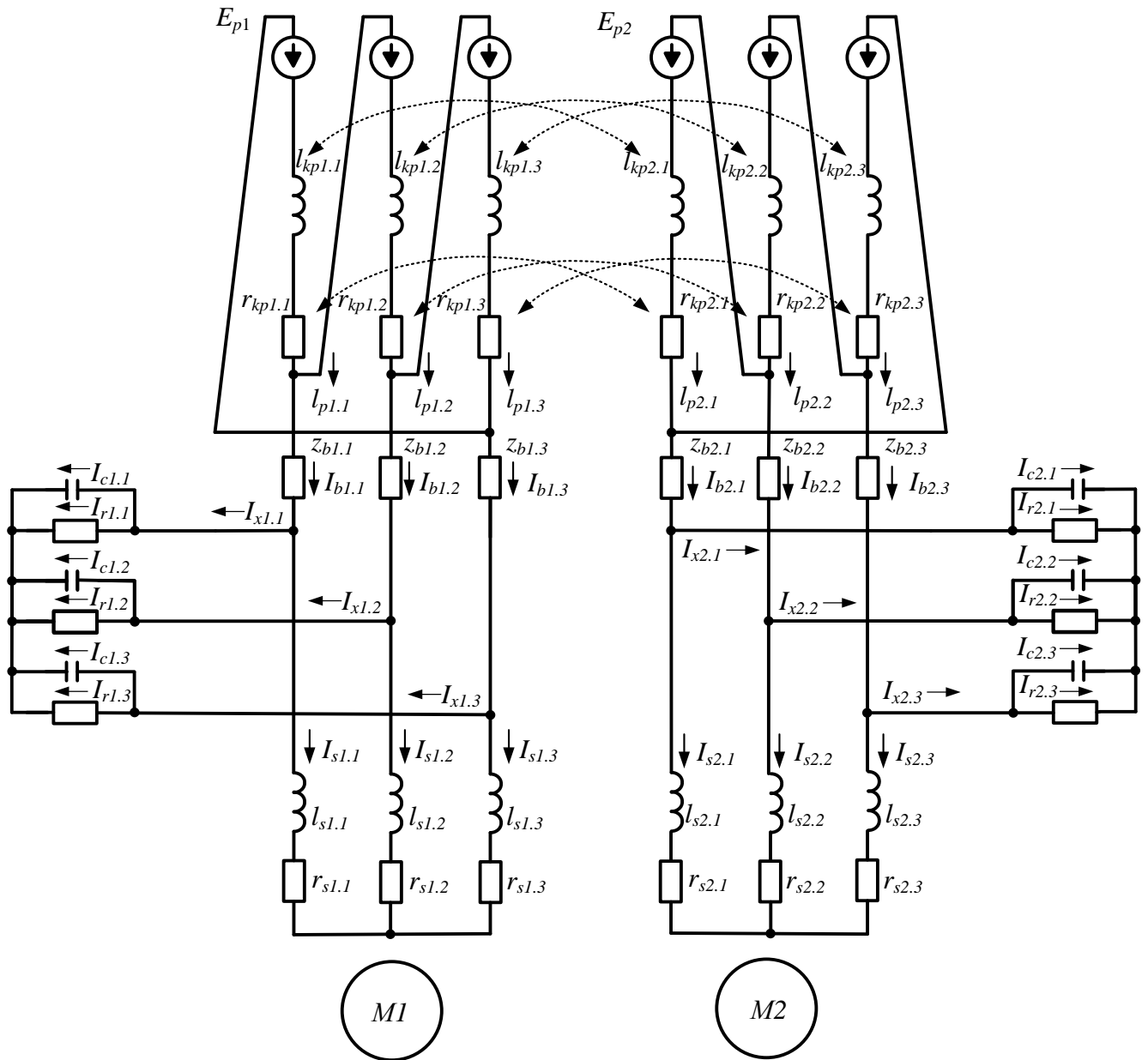


Рисунок 2.5 – Схема замещения участка электроснабжения КЦ для двух СД, включенных на разные секции шин

Конфигурация подсхемы трансформаторов и шинопроводов учитывается матрицей независимых контуров:

$$\mathbf{H}_{pb} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{p1} & 0 & \mathbf{H}_{b1} & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_{p1} & 0 & \mathbf{H}_{b1} \end{bmatrix}. \quad (2.45)$$

Уравнения состояния рассматриваемой схемы (2.46) включают уравнения двух подсхем замещения секций трансформатора, шинопроводов и двух СД. Принято допущение об отсутствии компенсационных обмоток:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{I}_{hpb} = \mathbf{L}_{hpb}^{-1} (\mathbf{E}_{hpb} - \mathbf{R}_{hpb} \mathbf{I}_{hpb} - \mathbf{U}_{chpb}),$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{U}_{c1} = \mathbf{c}_1^{-1} \mathbf{I}_{c1},$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{dq1} = \mathbf{E}_{dq1} - \omega_{r1} B \Psi_{dq1} - r_{s1} \mathbf{I}_{dq1}$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{f1} = e_{f1} - r_{f1} i_{f1},$$

$$\frac{d}{dt} \omega_{r1} = j_{pr1}^{-1} (h_{em1} - h_{c1}),$$

$$\frac{d}{dt} \theta_{r1} = \omega_{r1},$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{U}_{c2} = \mathbf{c}_2^{-1} \mathbf{I}_{c2},$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{dq2} = \mathbf{E}_{dq2} - \omega_{r2} B \Psi_{dq2} - r_{s2} \mathbf{I}_{dq2}, \quad (2.46)$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{f2} = e_{f2} - r_{f2} i_{f2},$$

$$\frac{d}{dt} \omega_{r2} = j_{pr2}^{-1} (h_{em2} - h_{c2}),$$

$$\frac{d}{dt} \theta_{r2} = \omega_{r2},$$

где $\mathbf{L}_{hpb} = \mathbf{H}_{pb} \mathbf{L}_{pb} \mathbf{H}'_{pb}$, $\mathbf{R}_{hpb} = \mathbf{H}_{pb} \mathbf{R}_{pb} \mathbf{H}'_{pb}$ - матрицы контурных индуктивностей и активных сопротивлений подсхемы питания и шинопроводов, получаемые на основе матриц параметров (2.47):

$$\mathbf{L}_{pb} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_p & 0 \\ 0 & \mathbf{L}_b \end{bmatrix}, \mathbf{L}_p = \begin{bmatrix} l_{kp1} & 0 & 0 & l_{kp12} & 0 & 0 \\ 0 & l_{kp1} & 0 & 0 & l_{kp12} & 0 \\ 0 & 0 & l_{kp1} & 0 & 0 & l_{kp12} \\ l_{kp12} & 0 & 0 & l_{kp2} & 0 & 0 \\ 0 & l_{kp12} & 0 & 0 & l_{kp2} & 0 \\ 0 & 0 & l_{kp12} & 0 & 0 & l_{kp2} \end{bmatrix}, \mathbf{L}_b = \text{diag}(l_{b1}, l_{b1}, l_{b1}, l_{b2}, l_{b2}, l_{b2}),$$

$$\mathbf{R}_{pb} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_p & 0 \\ 0 & \mathbf{R}_b \end{bmatrix}, \mathbf{R}_p = \begin{bmatrix} r_{kp1} & 0 & 0 & r_{kp12} & 0 & 0 \\ 0 & r_{kp1} & 0 & 0 & r_{kp12} & 0 \\ 0 & 0 & r_{p1} & 0 & 0 & r_{kp12} \\ r_{kp12} & 0 & 0 & r_{kp2} & 0 & 0 \\ 0 & r_{kp12} & 0 & 0 & r_{kp2} & 0 \\ 0 & 0 & r_{kp12} & 0 & 0 & r_{kp2} \end{bmatrix}, \mathbf{R}_b = \text{diag}(r_{b1}, r_{b1}, r_{b1}, r_{b2}, r_{b2}, r_{b2}).$$

где \mathbf{E}_{hpb} - ЭДС контуров подсхемы питания и шинопроводов;

\mathbf{U}_{chpb} - вектор напряжений емкостей цепи связи секции трансформатора;

$\mathbf{U}_{c1}, \mathbf{U}_{c2}$ - вектор с напряжений 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;

$\Psi_{dq1}, \Psi_{dq2}, \mathbf{I}_{dq1}, \mathbf{I}_{dq2}$ - вектора преобразованных потокосцеплений и токов по продольному и поперечному контурам двигателей СД1, СД2;

\mathbf{E}_{dq1} - преобразованные фазные ЭДС, формируемые на зажимах статора;

ω_{r1}, ω_{r2} - угловая частота вращения роторов СД1, СД2;

\mathbf{B} - вещественная матрица (2.31);

Γ_{s1}, Γ_{s2} - активное сопротивление статора СД1, СД2;

$\psi_{f1}, \Psi_{f2}, e_{f1}, e_{f2}, r_{f1i}, i_{f2}, i_{f1i}, i_{f2}$ - потокосцепления, ЭДС на зажимах, активные сопротивления и токи обмоток возбуждения СД1, 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;

θ_{r1}, θ_{r2} - углы поворота роторов СД1 и СД2.

Вектора контурных токов и ЭДС состоят из двух частей, соответствующих секциям трансформатора:

$$\mathbf{I}_{hpb} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{hpb1} \\ \mathbf{I}_{hpb2} \end{bmatrix} \mathbf{E}_{hpb} = \mathbf{H}_{pb} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{p1} \\ \mathbf{E}_{p2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.48)$$

ЭДС питающей сети для обеих подсхем замещения трансформатора одинаковы $\mathbf{E}_{p1} = \mathbf{E}_{p2} = \mathbf{E}_p$ и вычисляются из выражения:

$$\mathbf{E}_p = E_{p.max} \left[\sin \left(\omega_1 t - \frac{\pi}{3} \right) \sin \left(\omega_1 t - \frac{\pi}{3} - \frac{2\pi}{3} \right) \sin \left(\omega_1 t - \frac{\pi}{3} + \frac{2\pi}{3} \right) \right]. \quad (2.49)$$

Напряжения на зажимах статоров, на которые замыкается подсистема питания, определяются напряжениями емкостей цепей связи:

$$\mathbf{U}_{chpb} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_x \mathbf{U}_{c1} \\ \mathbf{H}_x \mathbf{U}_{c2} \end{bmatrix}, \mathbf{H}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.50)$$

Токи ветвей подсистем питания находятся по соотношению:

$$\mathbf{I}_{pb} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{p1} \\ \mathbf{I}_{p2} \\ \mathbf{I}_{b1} \\ \mathbf{I}_{b2} \end{bmatrix} = \mathbf{H}_{pb}^{-1} \mathbf{I}_{hpb} \quad (2.51)$$

Вычисление преобразованных токов обмоток СД производится через преобразованные потокосцепления:

$$\Psi_{dq1} = \begin{bmatrix} \psi_{d1} \\ \psi_{q1} \end{bmatrix}, \Psi_{dq2} = \begin{bmatrix} \psi_{d2} \\ \psi_{q2} \end{bmatrix}$$

с использованием матриц индуктивностей контуров \mathbf{L}_{dqf1} , \mathbf{L}_{dqf2}

$$\mathbf{I}_{dqf1} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{dq1} \\ i_{f1} \end{bmatrix} = \mathbf{L}_{dqf1}^{-1} \begin{bmatrix} \Psi_{dq1} \\ \psi_{f1} \end{bmatrix}, \mathbf{I}_{dq1} = \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix}, \quad (2.52)$$

$$\mathbf{I}_{dqf2} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{dq2} \\ i_{f2} \end{bmatrix} = \mathbf{L}_{dqf2}^{-1} \begin{bmatrix} \Psi_{dq2} \\ \psi_{f2} \end{bmatrix}, \mathbf{I}_{dq2} = \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix}.$$

$$\mathbf{L}_{dqf1} = \begin{bmatrix} l_{d1} & 0 & l_{m1} \\ 0 & l_{q1} & 0 \\ l_{m1} & 0 & l_{f1} \end{bmatrix}, \mathbf{L}_{dqf2} = \begin{bmatrix} l_{d2} & 0 & l_{m1} \\ 0 & l_{q2} & 0 \\ l_{m1} & 0 & l_{f2} \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

С помощью матриц координатных преобразований, аналогичных (2.35)

$$\mathbf{A}_{dq1} = 2/\sqrt{3} \begin{bmatrix} \sin(\theta_{r1} + \pi/3) & \sin(\theta_{r1}) \\ \cos(\theta_{r1} + \pi/3) & \cos(\theta_{r1}) \end{bmatrix}, \quad (2.54)$$

$$\mathbf{A}_{dq2} = 2/\sqrt{3} \begin{bmatrix} \sin(\theta_{r2} + \pi/3) & \sin(\theta_{r2}) \\ \cos(\theta_{r2} + \pi/3) & \cos(\theta_{r2}) \end{bmatrix},$$

вычисляются непреобразованные токи фаз обмоток статоров

$$\mathbf{I}_{s1} = \mathbf{H}'_s \mathbf{A}_{dq1}^{-1} \mathbf{I}_{dq1}, \mathbf{I}_{s2} = \mathbf{A}_{dq2}^{-1} \mathbf{I}_{dq2} \quad (2.55)$$

и преобразованные напряжения на зажимах статора,

$$\mathbf{E}_{dq1} = \mathbf{A}_{dq1} \begin{bmatrix} U_{c1.1} \\ U_{c1.2} \end{bmatrix}, \mathbf{E}_{dq2} = \mathbf{A}_{dq2} \begin{bmatrix} U_{c2.1} \\ U_{c2.2} \end{bmatrix}, \quad (2.56)$$

обозначенные как преобразованные ЭДС.

Несмотря на то, что вращение систем координат двигателей СД1 и СД2 даже в статическом режиме происходит с частотой очень близкой к синхронной, углы θ_{r1} и θ_{r2} оказываются разными, зависящими от параметров схем замещения, управления возбудителем и приложенных нагрузок.

Токи цепей связи находятся в соответствии с первым законом Кирхгофа по токам шинопроводов, подходящих к узлам, связанным с зажимами статоров, и токам статоров, отходящих от этих узлов:

$$\mathbf{I}_{x1} = \mathbf{I}_{b1} - \mathbf{I}_{s1}, \mathbf{I}_{x2} = \mathbf{I}_{b2} - \mathbf{I}_{s2} . \quad (2.57)$$

Электромагнитные моменты вычисляются по формулам:

$$h_{em1} = l_{m1} i_{f1} i_{q1}, h_{em2} = l_{m2} i_{f2} i_{q2} . \quad (2.58)$$

2.7 Математическая модель участка компрессорного цеха с двумя мощными синхронными двигателями, подключенными к разным секциям шин трансформатора с пуском одного из двигателей

Схема замещения участка электроснабжения компрессорного цеха при двух синхронных двигателях, включенных на разные секции шин, приведена на рисунке 2.5.

Математическая модель, предназначенная для исследования режима асинхронного пуска одного из СД при работе второго СД в режиме статической нагрузки со своей настройкой возбуждения, состоит из системы (2.59), включающей следующие уравнения:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{I}_{hpb} = \mathbf{L}_{hpb}^{-1} (\mathbf{E}_{hpb} - \mathbf{U}_{hpb} - \mathbf{R}_{hpb} \mathbf{I}_{hpb}),$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{U}_{c1} = \mathbf{c}_1^{-1} \mathbf{I}_{c1},$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{U}_{c2} = \mathbf{c}_2^{-1} \mathbf{I}_{c2},$$

$$\frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi}_{dq1} = \mathbf{E}_{dq1} - \omega_{r1} \mathbf{B} \boldsymbol{\Psi}_{dq1} - r_{s1} \mathbf{I}_{dq1}, \quad (2.59)$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{f1} = e_{f1} - r_{f1} i_{f1},$$

$$\frac{d}{dt} \omega_{r1} = j_{pr1}^{-1} (h_{em1} - h_{c1}),$$

$$\frac{d}{dt} \theta_{r1} = \omega_{r1},$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{dq2} = \mathbf{E}_{dq2} - \omega_{r2} \mathbf{B} \Psi_{dq4.2} - r_{s2} \mathbf{I}_{dq2},$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{42} = -(\omega_1 - \omega_{r2}) \mathbf{B} \Psi_{42} - r_{42} \mathbf{I}_{42},$$

$$\frac{d}{dt} \omega_{r2} = j_{pr2}^{-1} (h_{em2} - h_{c2}),$$

$$\frac{d}{dt} \theta_{r2} = \omega_{r2}$$

где $\mathbf{L}_{hpb} = \mathbf{H}_{pbb} \mathbf{L}_{pbb} \mathbf{H}'_{pbb}$, $\mathbf{R}_{hpb} = \mathbf{H}_{pbb} \mathbf{R}_{pbb} \mathbf{H}'_{pbb}$ - матрицы контурных индуктивностей и активных сопротивлений подсхемы питания и шинопроводов, получаемые на основе матриц параметров по (2.47);

\mathbf{E}_{hpb} - ЭДС контуров подсхемы питания и шинопроводов;

\mathbf{U}_{hpb} - 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;

$\Psi_{dq1}, \Psi_{dq2}, \mathbf{I}_{dq1}, \mathbf{I}_{dq2}$ - вектора преобразованных потокосцеплений и токов по продольному и поперечному контурам двигателей СД1, СД2;

$\Psi_{42}; \mathbf{I}_{dq42}$ - потокосцепления и токи по продольной и поперечной осям пусковой обмотки СД2;

\mathbf{E}_{dq1} - преобразованные фазные ЭДС, формируемые на зажимах статора;

ω_{r1}, ω_{r2} - угловая частота вращения роторов СД1, СД2;

\mathbf{B} – вещественная матрица (2.31);

r_{s1}, r_{s2} - активное сопротивление статора СД1, СД2;

$\psi_{f1}, \Psi_{f2}, e_{f1}, e_{f2}, r_{f1i}, i_{f2}, i_{f1i}, i_{f2}$, - потокосцепления, ЭДС на зажимах, активные сопротивления и токи обмоток возбуждения СД1, СД2;

r_{42} – активное сопротивление пусковой обмотки 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;

θ_{r1}, θ_{r2} - углы поворота роторов СД1 и СД2.

Координатные преобразования токов, напряжений и потокосцеплений статора двигателя СД1 выполняются по (2.35), а для двигателя СД2, работающего в режиме пуска применяется система координат, связанная с угловой частотой ω_1 вращающегося магнитного поля статора:

$$\mathbf{A}_{dq1} = 2/\sqrt{3} \begin{bmatrix} \sin(\theta_1 + \pi/3) & \sin(\theta_1) \\ \cos(\theta_1 + \pi/3) & \cos(\theta_1) \end{bmatrix}, \text{ где } \theta_1 = \omega_1 t, \quad (2.60)$$

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

$$\mathbf{A}_{dq2} = 2/\sqrt{3} \begin{bmatrix} \sin(\Delta\theta_r + \pi/3) & \sin(\Delta\theta_r) \\ \cos(\Delta\theta_r + \pi/3) & \cos(\Delta\theta_r) \end{bmatrix}, \text{ где } \Delta\theta_r = \omega_1 t - \theta_r. \quad (2.61)$$

Потокосцепления и токи двигателя СД1 связаны соотношениями, представленными в (2.52) и (2.53) при рассмотрении схемы в разделе 2.5. Для двигателя СД2 применяются соотношения асинхронной машины:

$$\Psi_{dq42} = \begin{bmatrix} \Psi_{dq42} \\ \Psi_{42} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{d2} \\ \psi_{q2} \\ \psi_{d42} \\ \psi_{q42} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_{dq42} = \mathbf{L}_{dq42}^{-1} \Psi_{dq42} = \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \\ i_{d42} \\ i_{q42} \end{bmatrix}, \quad (2.62)$$

$$\mathbf{L}_{dq42} = \begin{bmatrix} l_{d2} & 0 & l_{m2} \\ 0 & l_{q2} & 0 \\ l_{m2} & 0 & l_{d42} \\ 0 & l_{m2} & l_{q42} \end{bmatrix},$$

где l_{d42} , l_{q42} – индуктивности продольного и поперечного контуров пусковой обмотки ротора двигателя СД2.

Электромагнитный момент второго электродвигателя СД2, развиваемый под действием токов пусковой обмотки, рассчитывается по формуле:

$$h_{em2} = l_{m2}(i_{q2}i_{d42} - i_{d2}i_{q42}). \quad (2.63)$$

При условии статического равновесия по уравнениям для двигателя СД2 из (2.59) выводится алгебраическое уравнение

$$\mathbf{I}_{dq42} = \begin{bmatrix} \omega_{r2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} & 0 \\ 0 & (\omega_1 - \omega_{r2}) \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \mathbf{L}_{dq42} + \text{diag}(r_{s2}, r_{s2}, r_{42}, r_{42}) \begin{bmatrix} E_{dq2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.64)$$

решением которого при заданном значении частоты вращения ротора ω_{r2} , являются токи статора и пусковой обмотки.

По этим токам для данной частоты рассчитывается по (2.63) электромагнитный момент, т.е. находится точка механической характеристики. При больших габаритах двигателя сечения проводников обмоток оказываются также большими, ввиду чего в начальный период пуска существенно проявляется поверхностный эффект, вызывающий вытеснение токов в проводниках к поверхности и увеличение сопротивления. Благодаря повышению пускового сопротивления увеличивается пусковой момент. Приближенный учет этого

явления осуществляется вычислением сопротивлений пусковой обмотки по формуле:

$$r_{42} = r_{42.0} \left(1 + \gamma (\omega_1 - \omega_r)^\beta \right), \quad (2.65)$$

где $r_{42.0}$ – сопротивление пусковой обмотки двигателя СД2 на подсинхронной частоте вращения;

γ и β – коэффициенты.

Подбор этих коэффициентов $\gamma=18$ и $\beta=1$ при $r_{4.0}=0.008$ обеспечил удовлетворительное соответствие расчетной механической характеристики (рисунок 2.6) паспортным пусковым параметрам.

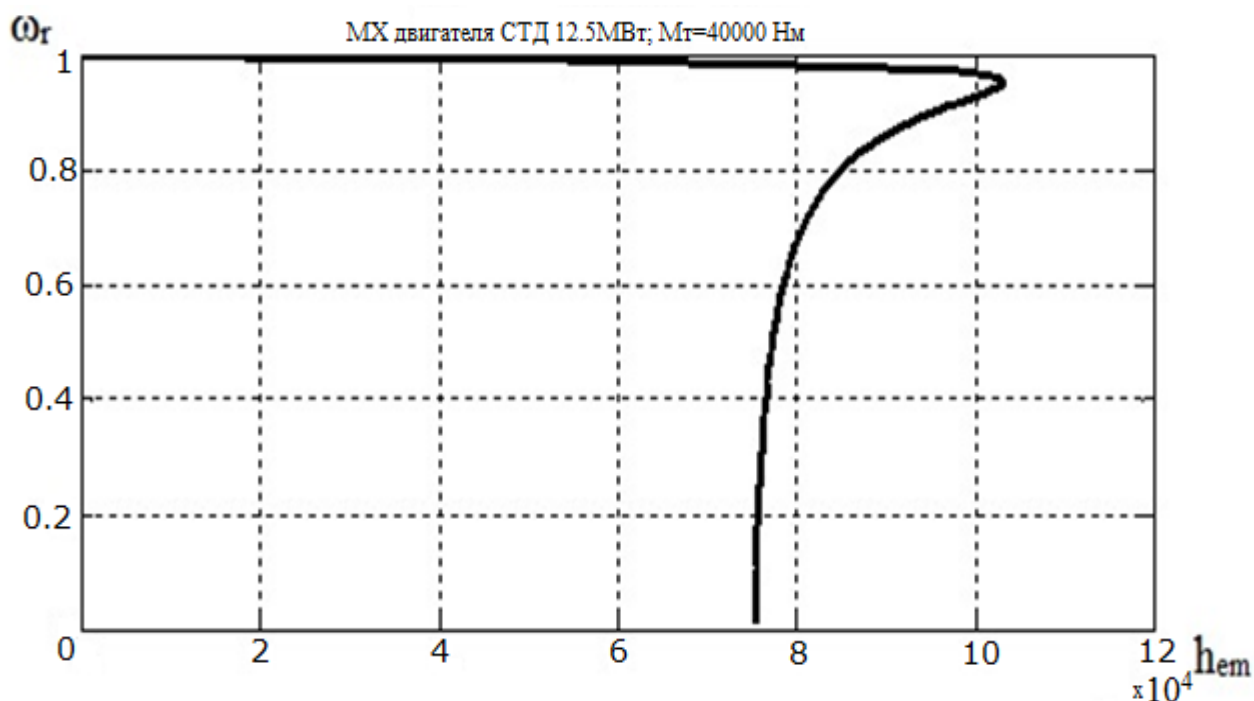


Рисунок 2.6 – Механическая характеристика двигателя СТД-12500 (зависимость момента от частоты вращения ротора)

2.8 Математическая модель участка компрессорного цеха с двумя мощными синхронными двигателями, подключенными к одной секции шин трансформатора с пуском одного из двигателей

Схема замещения участка электроснабжения КЦ для двух СД, подключенных к одной секции шин, приведена на рисунке 2.7.

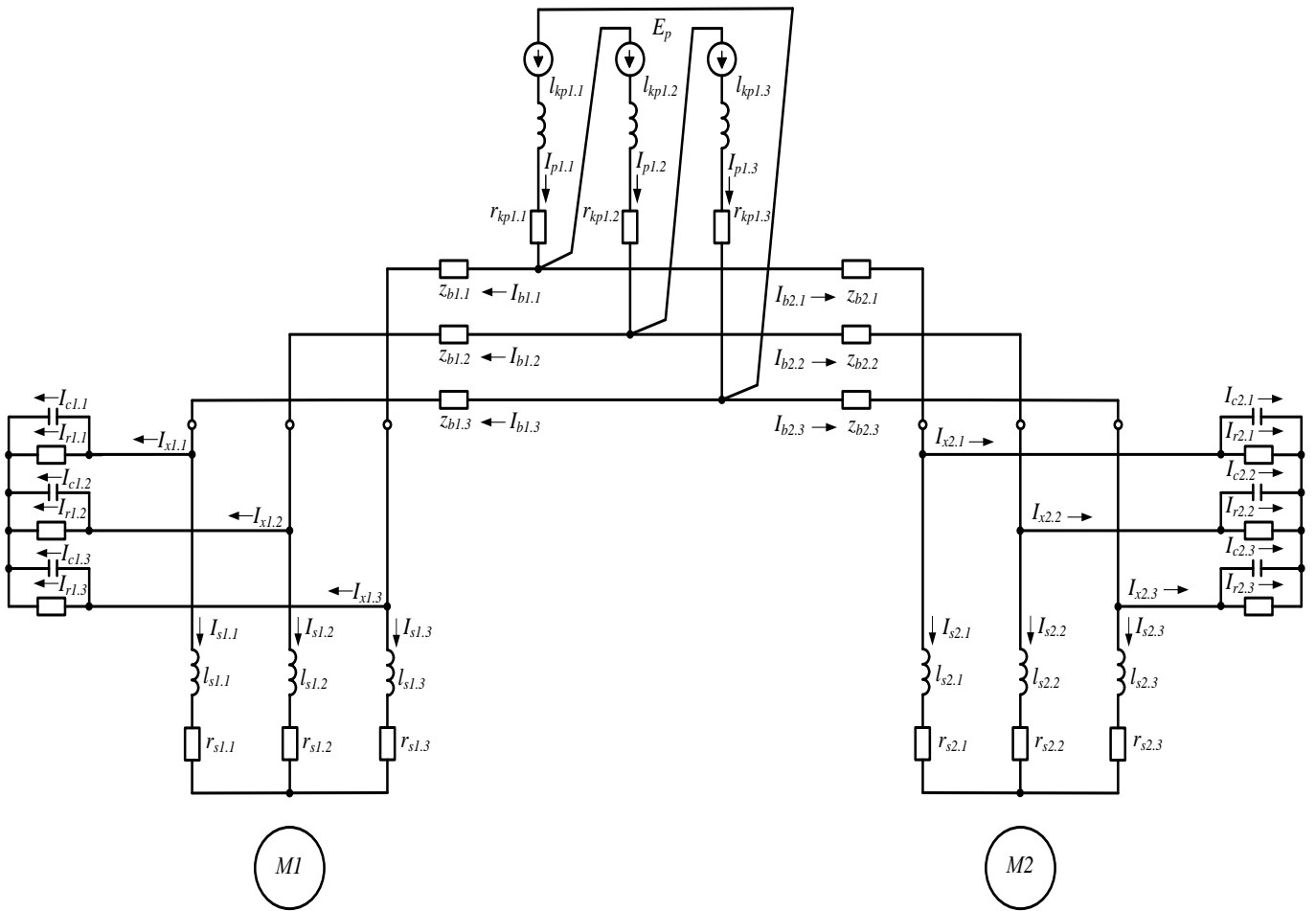


Рисунок 2.7—Схема замещения участка электроснабжения КЦ для двух СД, подключенных к одной секции шин

Математическая модель, предназначенная для исследования режима асинхронного пуска одного из СД при работе второго СД в режиме статической нагрузки со своей настройкой возбуждения, представлена, как и в случае пуска двигателя, подключенного ко второй секции трансформатора, системой уравнений (2.59).

Отличие проявляется в других значениях матриц параметров цепи питания: вместо \mathbf{L}_{pb} и \mathbf{R}_{pb} в (2.47) следует брать \mathbf{L}_{pb1} и \mathbf{R}_{pb1} .

$$\mathbf{L}_{pb1} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{p1} & 0 \\ 0 & \mathbf{L}_{b1} \end{bmatrix}, \mathbf{L}_{p1} = \begin{bmatrix} l_{kp1} & 0 & 0 \\ 0 & l_{kp1} & 0 \\ 0 & 0 & l_{kp1} \end{bmatrix}, \mathbf{L}_b = \text{diag}(l_{b1}, l_{b1}, l_{b1}, l_{b2}, l_{b2}, l_{b2}),$$

$$\mathbf{R}_{pb1} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{p1} & 0 \\ 0 & \mathbf{R}_{b1} \end{bmatrix}, \mathbf{R}_{p1} = \begin{bmatrix} r_{kp1} & 0 & 0 \\ 0 & r_{kp1} & 0 \\ 0 & 0 & r_{p1} \end{bmatrix}, \mathbf{R}_b = \text{diag}(r_{b1}, r_{b1}, r_{b1}, r_{b2}, r_{b2}, r_{b2}).$$
(2.66)

Ввиду изменения конфигурации подсхемы питания, следует вместо матрицы независимых контуров \mathbf{H}_{pb} применять матрицу \mathbf{H}_{pb1} :

$$\mathbf{H}_{pb1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}.$$
(2.67)

Остальные векторы, матрицы, переменные и соотношения остаются такими же, как они были применены в разделе 2.6.

2.9 Математическая модель системы возбуждения

Двухконтурная система АРВ (рисунок 2.8) обеспечивает поддержание заданной величины коэффициента мощности путем управления внутренним контуром тока возбуждения. Взаимосвязь модели АРВ и СД определяется через величины e_{f1} , i_{f1} , ω_r , U_{c1} .

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

Изображения сигналов системы с ПИ-регуляторами представлены выражениями (2.68):

$$i_{2t}(s) = \left(k_{p1} + \frac{1}{T_{i1}s} \right) u_{\delta.\cos}(s),$$

$$u_r(s) = \left(k_{p2} + \frac{1}{T_{i2}s} \right) u_{\delta.i2}(s),$$
(2.68)

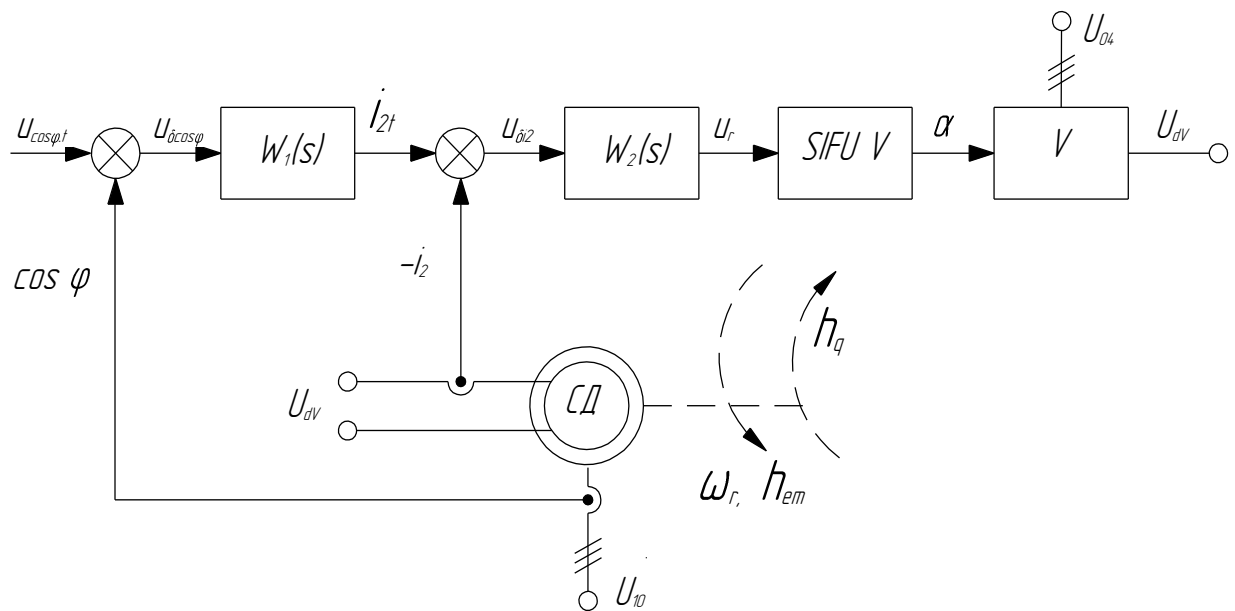
где i_{2t} – сигнал задания по току возбуждения;

u_r – сигнал управления каналами СИФУ;

$u_{\delta.\cos\varphi}$, $u_{\delta.i2}$ – сигналы рассогласований контуров коэффициента мощности и тока;

k_{p1} , k_{p2} – коэффициенты усиления пропорциональной части;

T_{i1} , T_{i2} – постоянные времени интегральной части регуляторов.



На схеме обозначены:

$u_{\cos\varphi,t}$ – сигнал задания значения коэффициента мощности;

$u_{\delta\cos\varphi}$ – рассогласование по каналу регулирования коэффициента мощности;

$W_1(s)$ – регулятор канала коэффициента мощности;

i_{2t} – сигнал задания значения по току возбуждения;

$u_{\delta i2}$ – рассогласование по каналу регулирования тока контура возбуждения;

$W_2(s)$ – регулятор канала тока возбуждения;

u_r – сигнал управления преобразователем источника питания возбуждения;

i_2 – сигнал датчика тока возбуждения;

$SIFU_V$ – блок формирования импульсов управления вентилями преобразователя;

α – 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;

ω_r – угловая частота вращения ротора синхронного двигателя СД;

h_{em} , h_q – электромагнитный момент двигателя и момент сопротивления на валу ротора.

Рисунок 2.8 – Система АРВ СД с ПИ-регулятором

Величина рассогласования по коэффициенту мощности находится постоянной на шаге интегрирования.

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

Соотношение (2.68) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} s(T_{i1}i_{2t}(s) - T_{i1}k_{p1}u_{\delta.\cos}(s)) &= u_{\delta.\cos}(s), \\ s(T_{i2}u_r(s) - T_{i2}k_{p2}u_{\delta.i2}(s)) &= u_{\delta.i2}(s), \end{aligned} \quad (2.69)$$

ввести вспомогательные переменные

$$\begin{aligned} y_{r1} &= T_{i1}i_{2t} - T_{i1}k_{p1}u_{\delta.\cos\varphi}, \\ y_{r2} &= T_{i2}u_r - T_{i2}k_{p2}u_{\delta.i2}, \\ i_{2t} &= \frac{1}{T_{i1}} y_{r1} + k_{p1}u_{\delta.\cos\varphi} \operatorname{sign}(\varphi), \\ u_r &= \frac{1}{T_{i2}} y_{r2} + k_{p2}u_{\delta.i2}, \end{aligned} \quad (2.70)$$

и перейти от изображений к оригиналам. Получаются дифференциальные уравнения, отображающие изменения сигналов регуляторов:

$$\begin{aligned} \frac{dy_{r1}}{dt} &= u_{\delta.\cos\varphi}, \\ \frac{dy_{r2}}{dt} &= u_{\delta.i2}. \end{aligned} \quad (2.71)$$

Указанные уравнения интегрируются с общей системой уравнений состояния силовой части. Получаемые в ходе интегрирования переменные y_{r1} и y_{r2} позволяют определить величину сигнала управления СИФУ преобразователя, по которому находится угол управления тиристорами α возбуждательного устройства.

Без учета деталей реализации указанной функции в микропроцессорной схеме, можно допустить, что угол управления меняется в пределах $0 - \pi/2$ и подчиняется линейному закону:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{U_{r.\max}} u_r \quad (2.72)$$

Принимая зависимость ЭДС e_2 на выходе преобразователя от угла управления:

$$e_2 = E_{2\max} \cos \alpha, \quad (2.73)$$

где $E_{2\max}$ – максимальное значение ЭДС при нулевом угле управления.

Внешний контур управления по микропроцессорной реализации ближе к интегральному с заданным периодом дискретизации. При периоде опроса микропроцессорной системы близкой к 0,02 с, имеет место совпадение. Функционирование такого регулятора можно представить формулой:

$$i_{2task}(n+1) = i_{2task}(n) + k_{p1} u_{\delta \cos}(n+1), \quad (2.74)$$

где значение сигнала задания по току в конце очередного n -го периода дискретизации определяется прибавлением к значению этой величины, сложившемуся к моменту начала периода дискретизации и контролируемой условиями добавки-рассогласования.

Внутренний контур управления реализуется как непрерывный, т.е. отображения изменения его выходного сигнала путем интегрирования дифференциального уравнения:

$$\frac{dy_{r2}}{dt} = u_{\delta.i2} = i_{2task} - i_2. \quad (2.75)$$

Результирующее значение вспомогательной переменной определяет непрерывно изменяющуюся величину напряжения управления СИФУ:

$$u_r = \frac{1}{T_{i2}} y_{r2} + k_{p2} u_{\delta.i2}, \quad (2.76)$$

Эти вычисления отображают функционирование ПИ-регулятора тока с передаточной функцией, значения параметров которой приведены в таблице 2.3:

$$u_r(s) = \left(k_{p2} + \frac{1}{T_{i2}s} \right) u_{\delta i2}(s) \quad (2.77)$$

Таблица 2.3 – Параметры контуров регулирования

Параметры регуляторов	Идентиф.	Значение	Ед. изм.
Период дискретизации совпадает с периодом электрической сети		0.02	с
Коэффициент усиления дискретного ПИ-регулятора внешнего контура управления	k_{p1}	0.01	о.е.
Постоянная времени передаточной функции контура тока	T_{i2}	45	о.е.
Коэффициент усиления передаточной функции контура тока	k_{p2}	90	о.е.

Обратная связь по току возбуждения выполняется микропроцессорной системой управления системы возбуждения ВТЦ-СД-Щ. Все величины системы управления отражаются в относительных единицах и допускается идеальное управление тиристорным преобразователем по пропорциональному закону цифровым регулятором тока:

$$u_r = k_{p2} (i_{2t} - i_2), \quad (2.78)$$

где u_r – сигнал управления блоком формирования импульсов управления по принципу, аналогичному вертикальному, при котором угловая характеристика СИФУ принимается линейной (рисунок 2.9), так что угол управления оказывается равным:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{i_2}{10} \right). \quad (2.79)$$

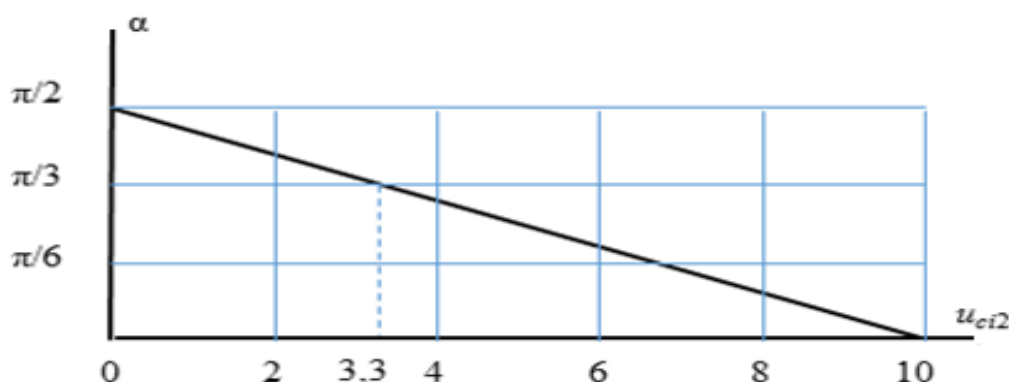


Рисунок 2.9– Угловая характеристика СИФУ

При значении $u_r = 3.33$ угол управления оказывается равен $\pi/3$, что обеспечивает величину напряжения на зажимах обмотки возбуждения соответствующего номинальному при регулировочной характеристике преобразователя, выражаемой формулой:

$$U_{dV} = U_{d0} \cos \alpha, \quad (2.80)$$

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

Величина сигнала статической ошибки Δu_r (2.78) зависит непосредственно от величины коэффициента усиления регулятора k_{p2} . При значении этого параметра равным 100 в номинальном режиме, рассогласование по сигналу тока возбуждения получается равным:

$$i_{2t} - i_2 = \frac{\Delta u_r}{k_{p2}} = \frac{3,33}{100} = 0,0333 \text{ ое} . \quad (2.81)$$

Использование последовательного определения ЭДС по (2.78) – (2.80) имитирует работу трёх основных блоков контура управления. Допускается, что в дальнейшем вместо указанных соотношений, при необходимости детализации процессов преобразования сигналов, в действительной системе будут использоваться соответствующие моделирующие модули.

Опорный сигнал задания по току i_{2t} вырабатывается по достаточно сложному алгоритму с определением параметров активного тока и мощности СД.

Степень воздействия обратной связи по току на режим работы СД выражается в уменьшении или увеличении угла управления α при изменении величины U_{d0}

$$U_{d0} = (1 \pm \alpha) U_{d0n} , \quad (2.82)$$

где U_{d0n} – максимальное напряжение выпрямителя в о.е. при номинальном значении напряжения согласующего трансформатора возбуждательного устройства.

На рисунке 2.10 представлена блок схема математической модели с алгоритмом форсировки тока возбуждения.

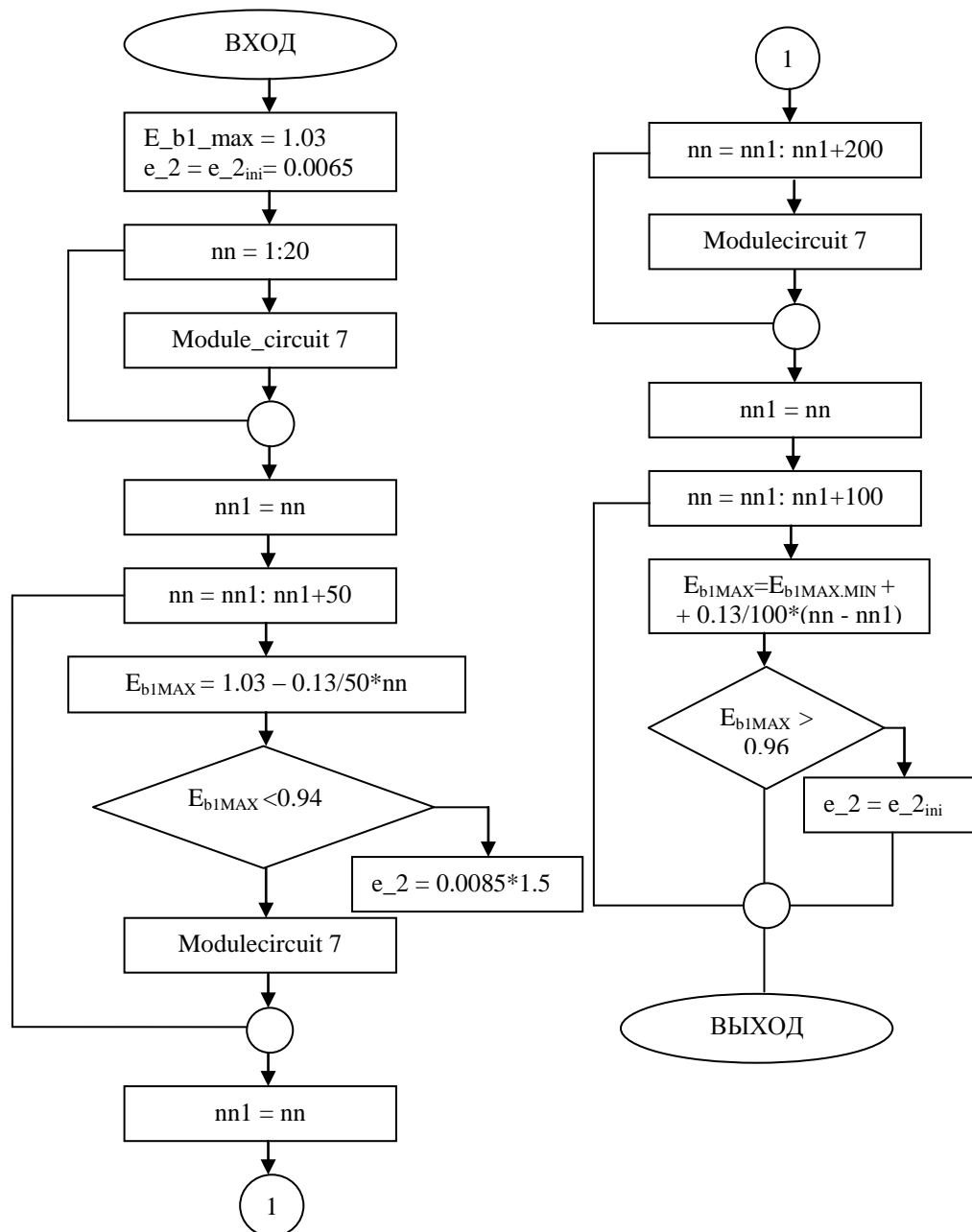


Рисунок 2.10 – Алгоритм форсировки тока возбуждения

В постфорсировочных режимах работы, т.е. после окончания режима форсировки, двигатель может находиться в зоне неустойчивой работы из-за наличия перерегулирования тока возбуждения. Это, как правило, приводит к нарушению синхронного режима работы двигателя.

Для анализа статических режимов на рисунке 2.11 представлена блок-диаграмма разработанной математической модели двигателя СТД-12500

выполненная в среде Simulink. На разработанной математической модели проведен вычислительный эксперимент по оценке устойчивости работы СД в постфорсировочных режимах работы.

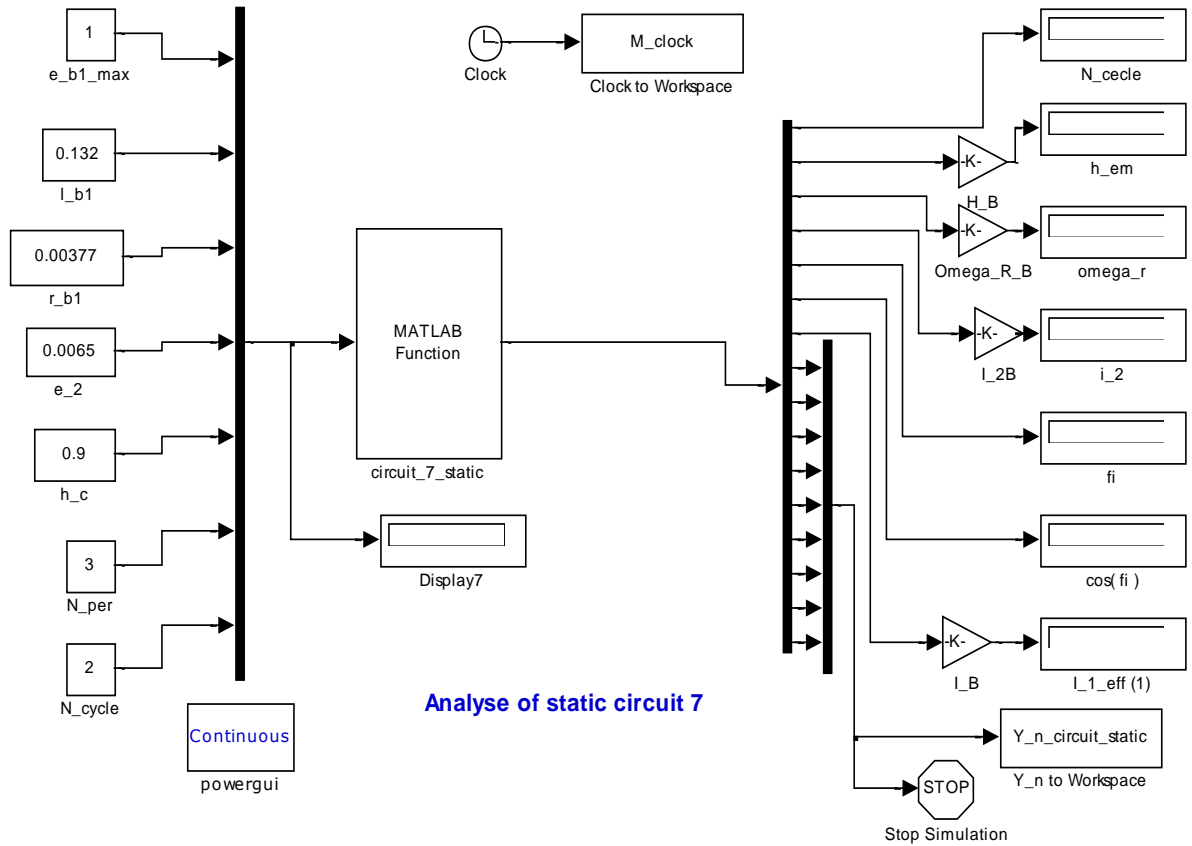


Рисунок 2.11 – Блок-диаграмма математической модели двигателя STD-12500 для анализа статических режимов в среде Simulink

Исходное состояние схемы электроснабжения КЦ:

- электроснабжение осуществляется от системы внешнего электроснабжения по двум вводам 220 кВ через понижающий трансформатор 220/10/10кВ с расщепленной вторичной обмоткой;
- к узлу нагрузки (секции шин 10кВ ЗРУ) подключен находящийся в работе мощный СД, являющийся электроприводом ГПА;
- значение напряжения в узле нагрузки равно 10 кВ.

Условием указанного вычислительного эксперимента является воздействие возмущающего фактора на СД, находящийся в работе, обусловленный, например, провалом напряжения в узле нагрузки при провале напряжения в системе внешнего электроснабжения или при пуске СД, подключенного к секции шин узла нагрузки с работающим СД. В соответствии с алгоритмом системы

возбуждения, при провале напряжения до уровня 9,4 кВ включается режим форсировки тока возбуждения. При этом ЭДС питания обмотки возбуждения СД резко увеличивается до полуторакратного рабочего уровня. При достижении значения напряжения 9,6 кВ происходит отключение режима форсировки тока возбуждения.

На рисунке 2.12 приведена расчетная осциллограмма постфорсировочного режима с перерегулированием тока возбуждения, полученная на разработанной модели.

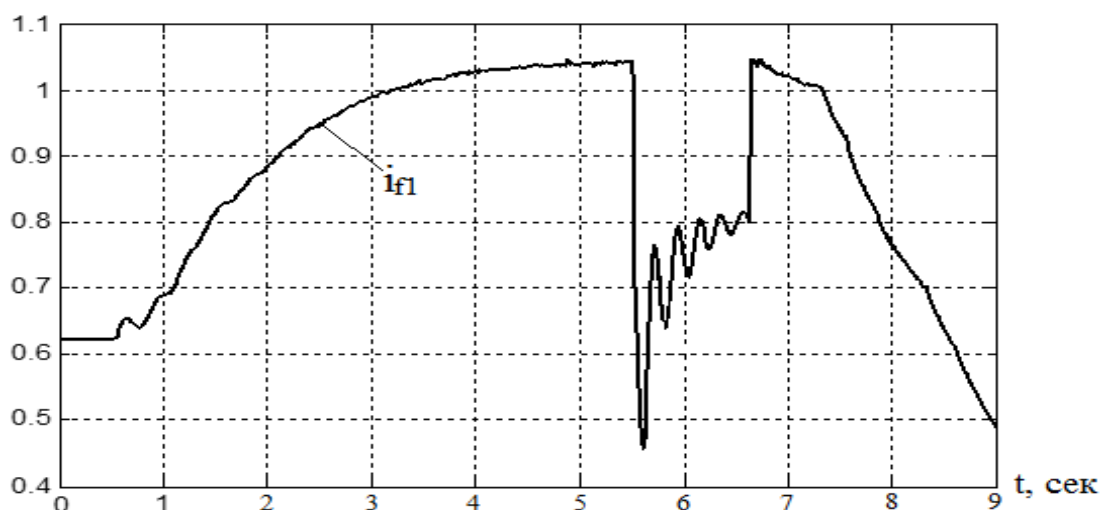


Рисунок 2.12 – Расчетная осциллограмма постфорсировочного режима с перерегулированием тока возбуждения и нарушением синхронного режима работы СД

Анализ результатов проведенного вычислительного эксперимента показал, что при достижении заданного условия прекращения режима форсировки тока возбуждения, снижение тока возбуждения производится с высокой скоростью. Высокая скорость снижения тока возбуждения приводит к его перерегулированию и работе СД в индуктивном режиме с коэффициентом мощности меньше единицы. Дальнейшее повышение значения тока возбуждения не позволяет обеспечить синхронный режим СД и он переходит в асинхронный режим работы с последующим аварийным остановом.

Выводы

1. Анализ существующих математических моделей показал, что их функциональных возможностей недостаточно для решения задач по исследуемой теме, а именно:

- расчеты схемы замещения электротехнической системы КЦ с мощными СД в среде Simulink требуют значительных затрат времени на обработку данных;

- затруднено использование уравнений схем замещения двигателей, составленных для преобразованных физических величин, к разветвленным схемам замещения цепей электроснабжения при использовании стандартных элементов в среде Simulink и его библиотек;

- ранее разработанные математические модели предусматривают работу одного СД, подключенного к одной секции шин узла нагрузки, и не учитывают особенности процессов и параметры взаимного влияния при подключении двух СД к одной секции шин.

2. Разработана математическая модель в программном комплексе MatLab, в которой применены все возможности применяемых математических соотношений, с необходимой степенью детализации учтены параметры элементов модели и возмущающих воздействий. Для воспроизведения результатов численных экспериментов использовано приложение Simulink.

3. Разработаны математические модели электротехнической системы КЦ с мощными СД с различной конфигурацией включения двигателей.

4. Разработанные математические модели позволяют воспроизвести работу КЦ с двумя мощными электроприводами на базе СД, присоединенными к одной или двум секциям шин вторичной обмотки трансформатора ТРДЦН-63000.

5. Для математических моделей разработаны действующие программы воспроизведения различных режимов работы электропривода с мощными СД ГПА.

6. Разработанная математическая модель позволяет:

- воспроизвести провалы напряжения на шинах узла нагрузки и анализировать величину провала напряжения по степени опасности нарушения синхронного режима СД;
- определять возможности воздействия со стороны системы возбуждения;
- исследовать работу в установившихся и переходных (постфорсировочных) процессах;
- оценить взаимное влияние мощных электроприводов на базе СД в различных режимах их работы.

Глава 3 Разработка способа управления тока возбуждения и алгоритма автоматического регулирования возбуждения мощного синхронного двигателя в постфорсировочных режимах работы

3.1 Структурно – функциональная схема управления током возбуждения мощного синхронного двигателя

Разработанные способы управления током возбуждения СД обеспечивают регулирование в каждый момент контуром управления по напряжению статора, или контуром управления по углу нагрузки СД, учитывая величину указанного угла [67].

При увеличении температуры обмотки СД выше допустимого заданного верхнего значения вводится ограничение значения выходных сигналов контуров АРВ до величины тока возбуждения в пределах 0,95 - 1,0 от его номинального значения, до снижения температуры, равной рабочей температуре обмотки СД.

В случае изменения значения угла нагрузки из заданного диапазона воздействие на ток возбуждения по величине отклонения напряжения прекращается, управление током возбуждения производится по величине отклонения угла нагрузки от заданного значения до момента, пока величина отклонения не изменит знак. В дальнейшем воздействие на ток возбуждения осуществляется по значению отклонения напряжения статорной цепи СД.

Выбор способа управления током возбуждения обуславливается не только характером нагрузки СД, но и значением параметров системы электроснабжения. Способ управления током возбуждения по величине отклонения напряжения на шинах статора применяется в случае равномерной нагрузки СД, а также при изменениях напряжения или мощности питающей сети. Регулирование по углу нагрузки применяется при переменной ее величине и значению близкому к

(РН)1, который через выход переключателя 6 подключается ко входу ТП. Вычитающий элемент 4 формирует сигнал отклонения напряжения статора на входе РН, при этом на вычитаемый вход элемента 4 поступает сигнал с датчика 15 напряжения статора двигателя (ДНД), а на вычитающий вход поступает сигнал уставки по напряжению, который вырабатывается регулятором 8 коэффициента мощности СД.

Необходимо отметить, что на вход регулятора 8 текущее значение коэффициента мощности поступает с выхода преобразователя 13, который формируется по сигналам с ДНД и 20 тока статорной цепи двигателя (ДТД), поступающим на его входы. Стабилизация коэффициента мощности СД на уровне единицы по ПИ-закону производится регулятором 8 изменением уставки РН, реагируя на все возмущения, возникающие в режиме работы СД, которые приводят к изменению потребляемой им реактивной мощности и обеспечивает за счет этого минимизацию потерь в статорной цепи. С учетом реализации в РН ПИ-регулирующего, удастся обеспечить увеличение динамической устойчивости в работе СД за счет эффективного демпфирования быстропеременных возмущений.

При нахождении угла нагрузки СД в диапазоне $\Theta_{\text{мин}}$, $\Theta_{\text{макс}}$, РН осуществляет эффективное управление током возбуждения. В случае выхода угла нагрузки из указанного диапазона, по команде трехпозиционного элемента сравнения 7, переключатель 6 устанавливается в положение 2, при котором к управляющему входу ТП, через переключающий элемент 9, подключается выход регулятора 2 угла нагрузки двигателя (РУН). Текущее значение угла нагрузки на входе элемента сравнения формируется преобразователем угла нагрузки (ПУН)14 по поступающим на его измерительные входы сигналам напряжения статора СД с ДНД и положения вектора магнитного момента ротора с датчика 19. В случае отклонения угла нагрузки от заданного значения, сигнал с выхода вычитающего элемента 5 поступает на вход РУН с последующей обработкой по ПИ-закону отклонения угла.

При изменении знака величины отклонения, на выходе элемента сравнения 7 вырабатывается сигнал для переключателя 6 с переходом его из состояния 2 в

состояние 1, после чего управление током возбуждения передается РН. В случае увеличения угла нагрузки до значения Θ_{\max} , передача управления от РН к РУН предотвращает выход двигателя из области устойчивого синхронного хода, а аналогичным переходом управления током возбуждения при понижении до значения Θ_{\min} обеспечивается оптимальное соотношение количества потребляемой электроэнергии к величине нагрузки на валу СД.

Для своевременного включения режима ограничения величины тока возбуждения по условию недопущения перегрева ротора СД, осуществляется непрерывный контроль температуры обмотки ротора путем косвенного измерения активного сопротивления обмотки. Расчет текущего значения температуры T обмотки выполняется вычислительным блоком 18, на информационные входы которого поступают сигналы с датчика тока возбуждения (ДТВ) I_f и датчика напряжения возбуждения (ДНВ) U_f . Выход блока 18 подключен ко входу двухпозиционного элемента сравнения 12. На выходе блока 18 формируется сигнал, пропорциональный значению температуры T обмотки ротора, определяемому из системы уравнений:

$$R_T = \frac{U_f - L \cdot dI_f / dt - \Delta U_{щ}}{I_f} \quad (3.1)$$

$$T = \frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{R_T}{R_0} - 1 \right) + T_0 \quad (3.2)$$

где R_T - значение активного сопротивления обмотки ротора СД;

L - индуктивность обмотки ротора СД;

$U_{щ}$ - падение напряжения на щетках СД;

I_f - ток возбуждения;

U_f - напряжение возбуждения;

R_0 - активное сопротивление ротора при заданной температуре T_0 , при $T_0=15^\circ\text{C}$.

При значении температуры T ниже величины верхнего допустимого значения T_{\max} , действует командный сигнал удерживающий переключатель 9 в положении 2, при указанном положении сигналы управления с РН или РУН на выходе переключателя 6 проходят через переключатель 9 непосредственно на

вход ТП. В случае повышения температуры T до значения $T_{\text{макс}}$ на выходе элемента сравнения 12 устанавливается сигнал, переводящий переключатель 9 в положение 1, при котором управляющие сигналы с РН и РУН поступают на вход ТП через ограничивающий элемент 10, характеристика которого изображена на рисунке 3.2.

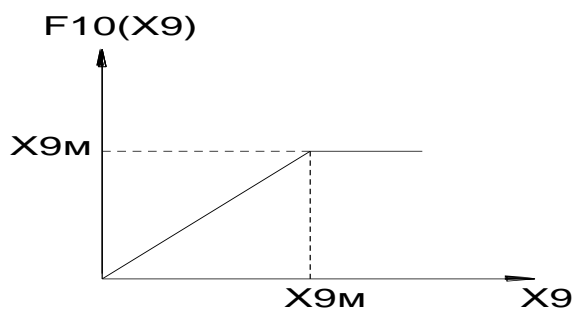


Рисунок 3.2 – Характеристика ограничивающего элемента

В случае значения сигнала $X9$ на входе элемента 10, меньше заданного максимального значения $X9_{\text{макс}}$, сигнал на его выходе равен по величине входному сигналу. В случае значения сигнала на входе, превышающего величину $X9_{\text{макс}}$, выходной сигнал элемента 10 ограничивается величиной $X9_{\text{макс}}$, соответствующей значению тока возбуждения на выходе ТП в заданном диапазоне 0,95-1,0 номинальной величины тока возбуждения. Таким образом, после перехода переключателя 9 в положение 1, вызванного повышением температуры обмотки ротора СД до допустимого верхнего значения, величина тока возбуждения на выходе тиристорного преобразователя всегда меньше или равна своему номинальному значению. После снижения температуры обмотки ротора СД до номинального значения температуры $T_{\text{ном}}$ на выходе элемента сравнения 12 устанавливается командный сигнал, возвращающий переключатель 9 в положение 2.

Следовательно, существующий способ управления током возбуждения СД обеспечивает минимизацию потерь энергии в СД, обеспечивает динамическую и статическую устойчивость синхронного режима его работы, и точность ограничения максимального тока возбуждения для исключения перегрева ротора СД. При этом остался не решенным вопрос максимального снижения величины перерегулирования тока возбуждения в постфорсировочных режимах работы СД.

3.2 Разработка способа управления током возбуждения и алгоритма системы автоматического регулирования возбуждения мощного синхронного двигателя с регулируемой скоростью развозбуждения в постфорсировочных режимах работы

В постфорсировочных процессах двигатель может находиться в зоне неустойчивой работы, возврат его в область устойчивой работы обеспечивается контуром управления по углу нагрузки машины путем воздействия на ток возбуждения. Даже кратковременное превышение угла нагрузки сверх максимального значения при загруженной машине может привести к нарушению синхронизации двигателя [97, 83, 78].

В предлагаемом способе управления током возбуждения СД устранены указанные выше недостатки.

Новизна решения заключается в том, что при выходе из режима форсирования возбуждения двигателя в постфорсировочных режимах работы, управление током возбуждения производится не ПИ-регулятором, а воздействие на ток возбуждения производит разработанный контур плавного снижения тока возбуждения, включающий блоки 22, 23, 24, 26, 27, отраженные на рисунке 3.4.

Снижение тока возбуждения осуществляется с заданной скоростью, которая определяется задатчиком плавного снижения тока. Ток возбуждения СД снижается от величины тока форсировки до момента, пока $\cos\varphi$ СД не достигнет заданного диапазона ($\cos\varphi_{\text{зад}} \pm \Delta$), а также величина тока возбуждения не достигнет заданного диапазона ($I_{\text{fmax}}, I_{\text{fmin}}$). Необходимо отметить, что воздействие на ток возбуждения СД осуществляется путем изменения величины уставки напряжения статорной цепи на входе регулятора напряжения, реализуя соподчиненный принцип регулирования. Графически уставка диапазона входа $\cos\varphi$ в заданный диапазон представлена на рисунке 3.3.

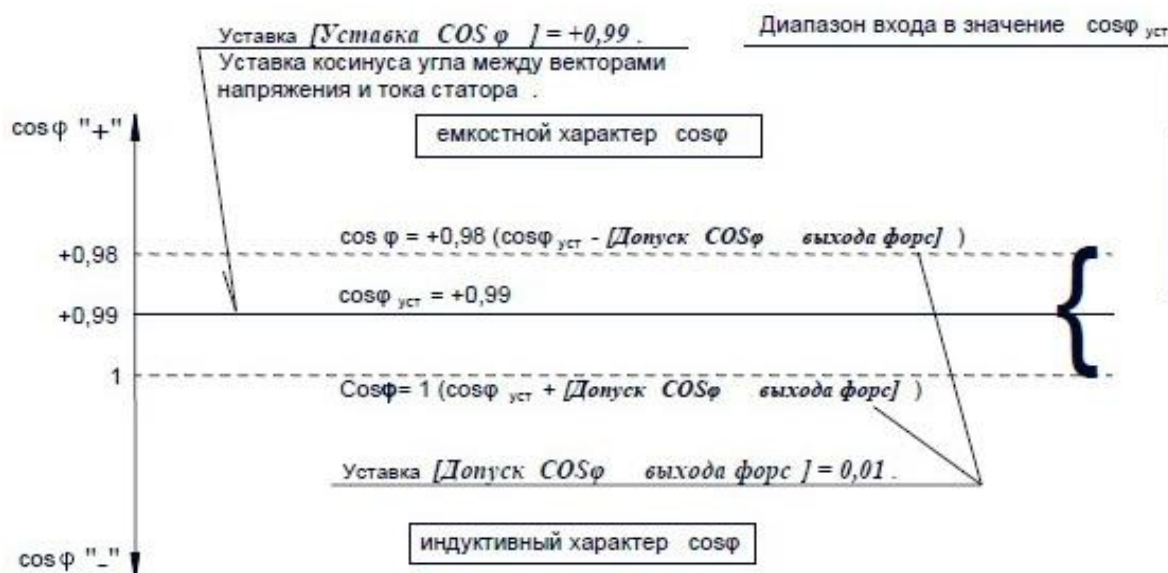


Рисунок 3.3 – Уставка диапазона входа в значение $\cos \varphi$ «Допуск $\text{COS} \varphi$ выхода форс»

Уставка значения коэффициента плавного снижения тока возбуждения «Delta COS форсировка» задается в о.е. от 1 до 50. Соответственно «1» соответствует минимальной величине, а значит время снижения тока возбуждения максимальное. Рекомендуется принимать значение, установленное экспериментальным путем в пределах «15-20».

Уставка диапазона входа в значение $\cos \varphi$ «Допуск $\text{COS} \varphi$ выхода форс» задается в о.е. в диапазоне $\pm (0,01 - 0,1)$.

После входа в границы вышеуказанных диапазонов значений параметров тока возбуждения, $\cos \varphi$ и при выполнении условия нахождения значения угла нагрузки в диапазоне заданных минимальных и максимальных значений, воздействие на ток возбуждения производится по существующим принципам, а именно, передается ПИ-регулятору и производится контуром напряжения по отклонению значения напряжения статорной цепи. Необходимо отметить, что изменением уставки регулятора напряжения статора управляет третий, вспомогательный регулятор по коэффициенту мощности, который удерживая значение $\cos \varphi$ СД равной 0,99 с допуском $\pm 0,01$, обеспечивает минимизацию потерь в статорной цепи. Следовательно, управление возбуждением производится одним из двух конкурирующих контуров, либо контуром управления по

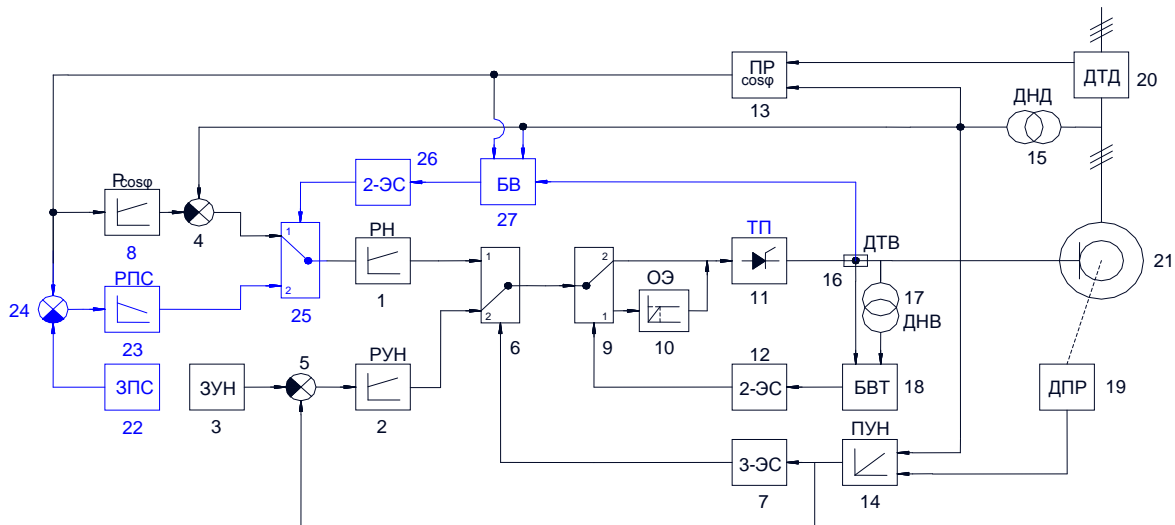
напряжению статора, либо контуром управления по углу нагрузки СД в зависимости от значения этого угла.

Особенностью нового способа является тот момент, что контур управления по напряжению статора имеет четвертый, вспомогательный регулятор плавного снижения тока возбуждения. Задачей контура плавного снижения является формирование уставки напряжения для регулятора напряжения исключительно в постфорсировочном режиме работы СД. Соподчиненное условие указанного регулятора по отношению к регулятору напряжения обуславливает безударные переходы управления между третьим и четвертым вспомогательными регуляторами.

На рисунке 3.4 приведена функциональная схема устройства, реализующая предлагаемый способ управления током возбуждения СД.

Схема включает элементы, отраженные при пояснении рисунка 3.1, и вновь разработанные. Это задатчик плавного снижения тока возбуждения (ЗПС), регулятор плавного снижения тока возбуждения СД (РПС), третий вычитающий элемент 24, третий переключающий элемент 25, четырехпозиционный элемент сравнения 2-ЭС. Указанные элементы включены следующим образом, сигнал на вход РПС подается от подключенного к выходу третьего вычитающего элемента 24, при этом на вычитаемый вход которого в свою очередь поступает сигнал от подключенного к выходу преобразователя $13 \cos \varphi$ СД, а сигнал с выхода ЗПС на вычитающий вход элемента 24. Сигнал с выхода РПС поступает к подключенному ко второму переключаемому входу третьего переключающего элемента 25, к первому переключаемому входу которого подключен выход первого вычитающего элемента 4. Переключающий элемент 25 подключен своим управляющим входом к выходу четырехпозиционного элемента сравнения 26. С переключающего элемента 25 сигнал поступает на выход регулятора 1 напряжения статорной цепи СД в постфорсировочном режиме работы. В свою очередь сигналы с выходов датчиков 15 и 16 напряжения статорной цепи двигателя и тока возбуждения роторной цепи двигателя и выхода преобразователя $13 \cos \varphi$ двигателя 21 поступают на подключенные к информационным входам

блока 27 вычисления снижения тока возбуждения, выход которого подключен к управляющему входу двухпозиционного элемента сравнения 26.



1- регулятор контура управления током возбуждения по отклонению напряжения статора (РН); 2- регулятор угла нагрузки двигателя (РУН); 3- задачник угла нагрузки (ЗУН); 4- вычитающий элемент; 5- вычитающего элемент; 6- переключающий элемент; 7- трехпозиционный элемент сравнения (3-ЭС); 8- регулятор изменения $\cos\varphi$ (Р $\cos\varphi$); 9- переключающий элемент; 10- ограничивающий элемент (ОЭ); 11- тиристорный возбудитель (ТП); 12- элемент сравнения (2-ЭС); 13- преобразователь \cos двигателя (ПР $\cos\varphi$); 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- задачник 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).

Рисунок 3.4 – Схема с регулируемой скоростью развозбуждения и контролем диапазона угла нагрузки СД

В постфорсировочных режимах работы, т.е. после окончания режима форсировки, управление током возбуждения производится путем его снижения со скоростью, определяемой уставкой «Delta COS форсировка». РПС уменьшает ток возбуждения, при этом БС контролирует условия разработанного алгоритма.

Если:

- СД перевозбужден, т.е. $\cos\varphi > 0$, РПС снижает ток возбуждения до значения уставки «Мин. ток возбуждения»;
- СД недо возбужден, т.е. $\cos\varphi < 0$, РПС снижает ток возбуждения до значения уставки «Макс. ток возбуждения»;

- измеренное значение коэффициента мощности $\cos\varphi$ соответствует значению уставки с допуском «Уставка COS φ » и значение тока возбуждения выше значения уставки «Макс. Ток возбуждения», РПС снижает ток до значения уставки «Макс. Ток возбуждения».

При условии соблюдения указанных требований управление током возбуждения переходит в режим регулирования по закону «Uст+ $\cos\varphi$ ».

В случае, если значение тока возбуждения меньше значения уставки «Макс. ток возбуждения» и измеренное значение коэффициента мощности соответствует уставке с допуском «Уставка COS φ », управление переходит в режим регулирования по закону «Uст+ $\cos\varphi$ ».

На рисунке 3.5 приведена блок-схема разработанного алгоритма системы автоматического регулирования возбуждения СД с регулируемой скоростью развозбуждения в постфорсировочных процессах, реализованного в блоке 27 вычисления снижения тока возбуждения.

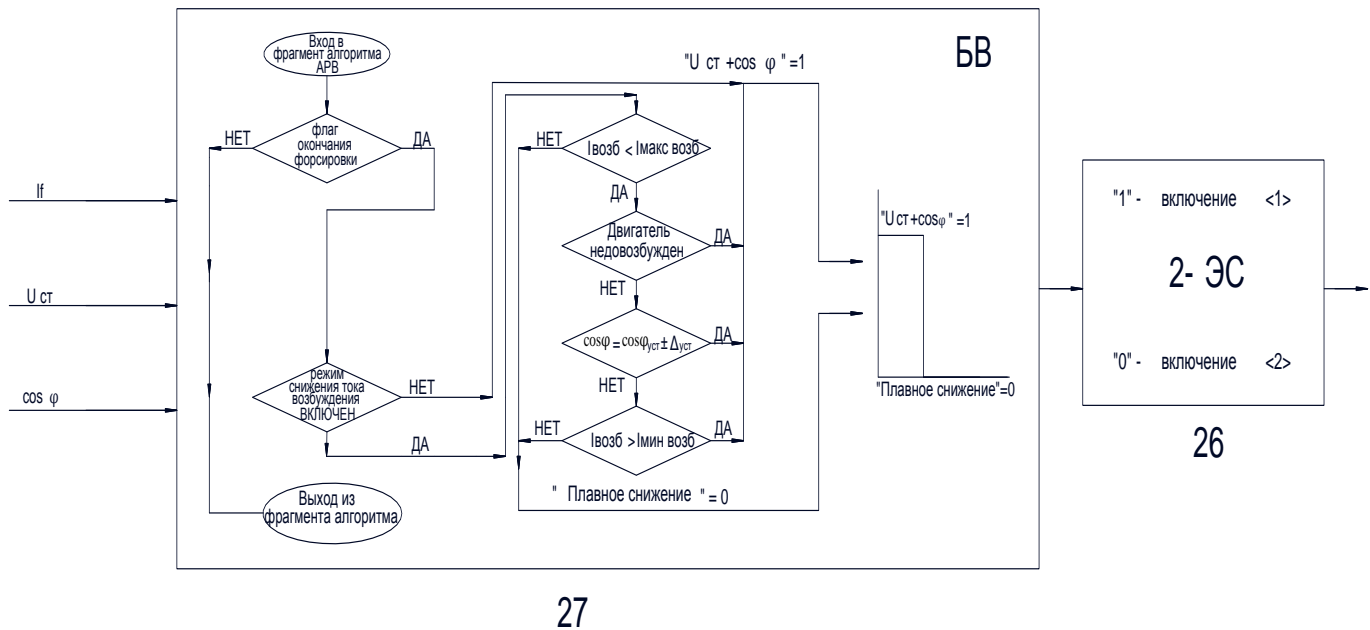


Рисунок 3.5 –Блок-схема алгоритма работы блока 27 вычисления снижения тока возбуждения

Экспериментально доказана эффективность разработанного способа управления током возбуждения АРВ в постфорсировочных режимах работы, при котором исключается нарушение синхронного режима работы двигателя (рисунок 3.6). Осциллограммы получены на действующем оборудовании ГПА №

28 КС-5 «Южно- Балыкская», работающем в заданном технологическом режиме транспорта газа.

Таким образом, разработанный способ управления током возбуждения с алгоритмом АРВ возбуждения СД в постфорсировочных режимах работы для цифрового тиристорного возбудителя, обеспечивает повышение динамической устойчивости синхронного режима его работы.

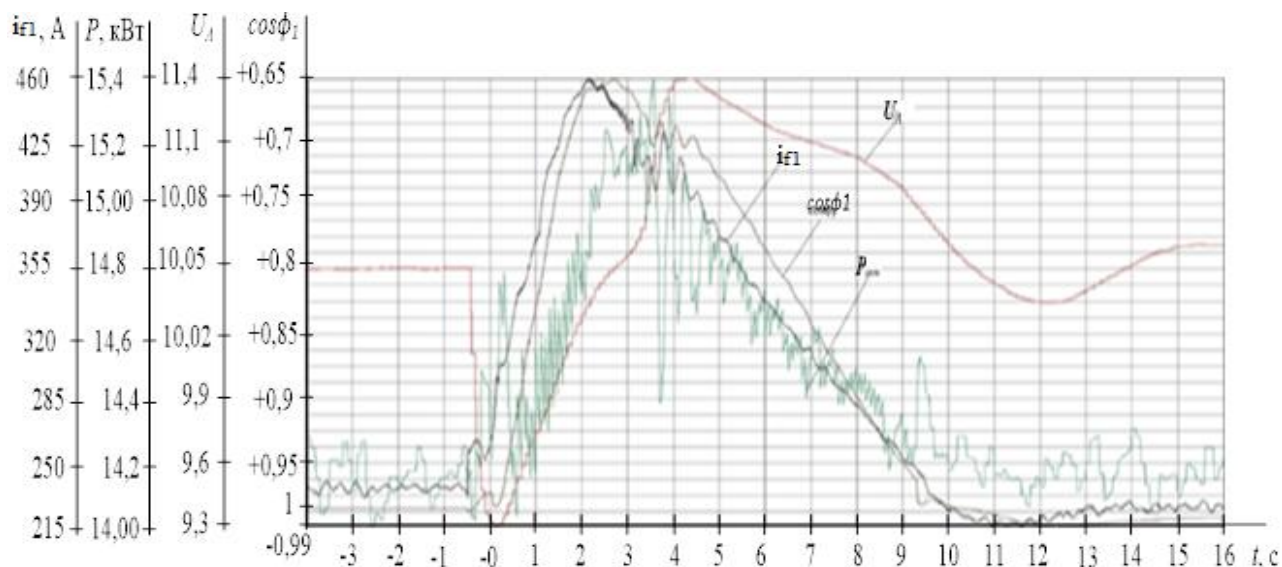


Рисунок 3.6 – Экспериментальные осциллограммы параметров СД после изменения способа управления током возбуждения

Выводы

1. Установлено, что в постфорсировочном процессе наиболее оптимальным способом возврата СД зону устойчивой работы является воздействие контуром управления по углу нагрузки машины на ток возбуждения.

2. Увеличение угла нагрузки выше допустимого значения для возврата СД в зону устойчивой работы в постфорсировочных процессах, несмотря на кратковременный характер, может привести при загруженной машине к асинхронному режиму работы.

3. Определены оптимальные способы повышения устойчивости работы мощных СД в постфорсировочных режимах работы, предусматривающие

управление током возбуждения, как по отклонению напряжения, так и по величине реактивной составляющей тока статора.

4. Установлено, что для предотвращения перехода СД в асинхронный режим, из-за эффекта перерегулирования, необходимо плавное уменьшение тока возбуждения при окончании режима форсировки.

5. Определена оптимальная величина уставки для коэффициента «Delta COS форсировка» плавного снижения тока возбуждения.

6. Для устранения аварийных ситуаций, связанных с эффектом перерегулирования, разработан способ управлением тока возбуждения СД с регулируемой скоростью развозбуждения в постфорсировочных процессах и алгоритм, исключающий режим перерегулирования и предотвращающий работу двигателя на границе устойчивости.

7. Разработанный и реализованный способ и алгоритм управления током возбуждения в постфорсировочных режимах работы обеспечивает повышение динамической устойчивости синхронного режима его работы.

Глава 4 Результаты исследований статических и динамических режимов мощных синхронных двигателей. Верификация разработанной математической модели

4.1 Выполнение вычислительных экспериментов, моделирование статических режимов мощных синхронных двигателей

В целях проверки корректности результатов вычислительных исследований, полученных на математической модели, необходимо провести сравнительный анализ с экспериментальными результатами производственной эксплуатации или на соответствие данным, указанным в технической литературе.

Порядок проведения вычислительных экспериментов в графическом виде с применением математической модели отражен на структурной схеме (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Порядок проведения вычислительных экспериментов

Начальным режимом называется установившийся (статический) режим, предшествующий анализируемому переходному процессу. Исходные данные начального режима состоят из двух частей. Во-первых, параметры схем замещения, которые определяются в выполненных ранее процедурах идентификации (путем сопоставления результатов воспроизведения механических характеристик и известных из каталога режимов). Во-вторых, это параметры внешних воздействий, определяющие нагрузки и характерные особенности предшествующего режима (момент нагрузки, ЭДС возбуждения, напряжение питания и др.).

Целью проведения вычислительных экспериментов является определение показателей и характеристик как количественных, так и качественных, по результатам которых могут приниматься технические решения. Это реализуется для различных вариантов сочетаний параметров агрегата, сети электроснабжения и внешних воздействий, включая управление возбуждением.

На рисунке 4.2 представлены расчетные осциллограммы токов и напряжений статора СТД-12500 в номинальном режиме при коэффициенте мощности 0,9 при опережающем фазовом угле тока по отношению к напряжению.

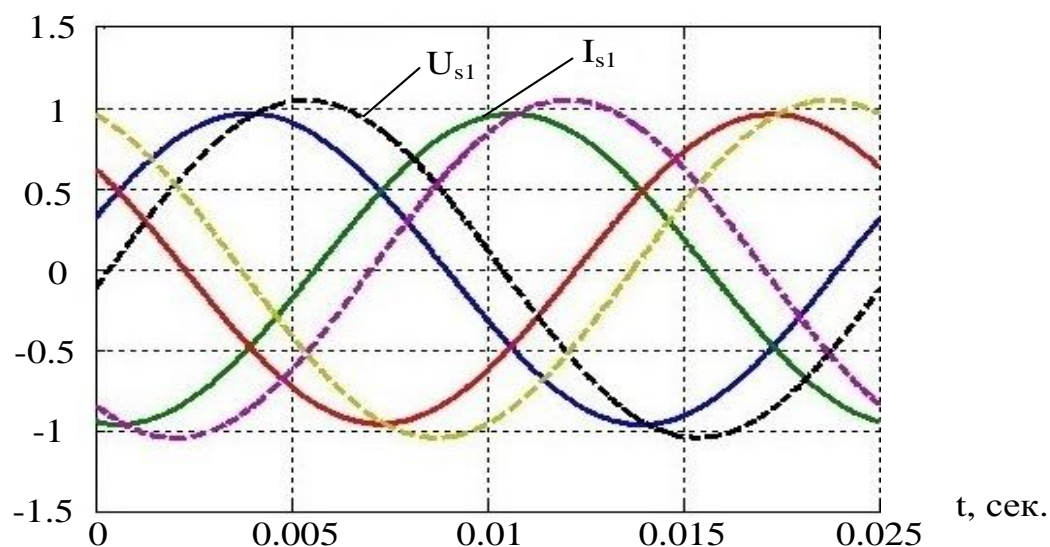


Рисунок 4.2 – Расчетные осциллограммы токов (I_{s1}) и напряжений (U_{s1}) статора СТД-12500 в номинальном режиме в о.е. при коэффициенте мощности 0,9 и опережающем фазовом угле тока по отношению к напряжению

Получен набор значений переменных состояния в относительных единицах (таблица 4.1) для анализа режимов, которые начинаются при изменении параметров этого режима, имитирующих соответствующие внешние воздействия.

Таблица 4.1 – Начальные условия номинального режима в о.е.

I_{b1}	I_{b2}	Ψ_d	Ψ_q	Ψ_{d3}	Ψ_{q3}	Ψ_2	ω_r	θ_r	U_{cx1}	U_{cx2}
0,31	-0,96	0,75	0,72	0,85	0,69	2,42	1,00	14,82	-1,08	-1,80

Для режима с номинальным моментом при номинальном напряжении на шинах 10 кВ и коэффициенте мощности 0,9 при опережающем фазовом угле тока статора по отношению к напряжению определены следующие параметры:

- I_{b1} , I_{b2} - вектора токов цепей замещения шинопроводов первой и второй секции;
- Ψ_d , Ψ_q – вектора потокосцеплений по осям d и q ;
- Ψ_{q3} , Ψ_{d3} – вектора потокосцеплений компенсационных обмоток по осям d и q ;
- Ψ_2 — потокосцепление;
- ω_r – угловая частота вращения ротора;
- θ_r – угол поворота ротора;
- U_{cx1} , U_{cx2} – мгновенные значения фазных напряжений статора, совпадающие с напряжениями на емкостях связи.

Для тех же условий получены численные значения основных физических величин, приведенные в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Основные идентифицируемые показатели номинального режима

Название	Идентификатор	Значения, полученные моделированием в о.е.	Значения		Примечание
			по каталогу	ед. изм.	
Эффективное значение линейного напряжения статора	U_1eff	1,227	10000	В	
Эффективное значение тока статора	I_1_eff	0,707	820	А	
Напряжение питания обмотки возбуждения	e_2	0,0085	220	В	
Ток обмотки возбуждения	i_2	1,31	295	А	$I_{2B}=226$ А
Фазовый угол тока статора по отношению к напряжению	fi_1_gr	-25	-25	Эл. град	
Коэффициент мощности	cos_fi	0,9031	0,9		

Характерным идентифицирующим объектом математической модели является матрица индуктивного взаимодействия обмоток СД:

$$L_{dqf} = \begin{bmatrix} 2,2079 & 0 & 2,09 & 0 & 2,09 \\ 0 & 2,2079 & 0 & 2,09 & 0 \\ 2,09 & 0 & 2,2079 & 0 & 2,09 \\ 0 & 2,09 & 0 & 2,2079 & 0 \\ 2,09 & 0 & 2,09 & 0 & 3,2855 \end{bmatrix}$$

Значения в о.е., приведенные к обмотке статора, дают приемлемый коэффициент индуктивного взаимодействия обмоток статора и возбуждения, хорошо сочетающийся со статистическими данными [22, 82].

$$\mu = \frac{3 l_{12m}^2}{2 l_s l_2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{2,09^2}{2,2079 \cdot 3,2855} = 0,9032 \quad (4.1)$$

Для анализа статических режимов использовалась математическая модель СД СТД-12500 выполненная в среде Simulink (см. рисунок 2.12).

Перечень значений исходных данных соответствует рассмотренному номинальному режиму (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Начальные условия рабочего режима (в о.е.)

I_{b1}	I_{b2}	Ψ_d	Ψ_q	Ψ_{d3}	Ψ_{q3}	Ψ_2	ω_r	θ_r	U_{cx1}	U_{cx2}
0,014	-0,81	0,54	0,84	0,64	0,80	2,00	1,00	6706	-1,04	-1,73

На рисунке 4.3 представлены полученные на модели осциллограммы токов и напряжений статора СТД-12500 при опережающем фазовом угле тока по отношению к напряжению в рабочем режиме при коэффициенте мощности 0,99.

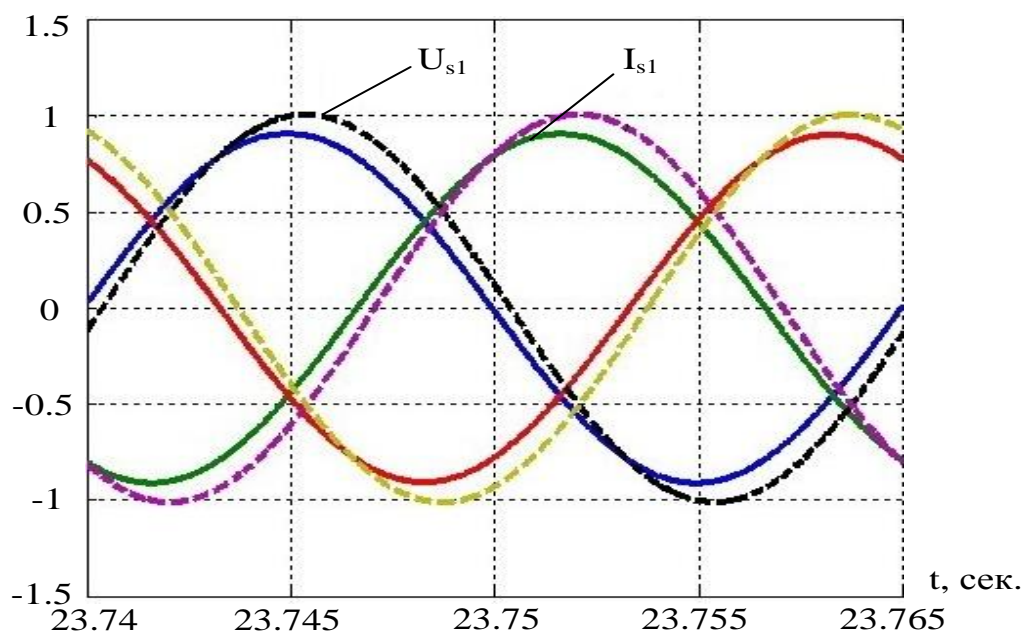


Рисунок 4.3 – Расчетные осциллограммы токов (I_{s1}) и напряжений (U_{s1}) статора СТД-12500 в рабочем режиме в о.е. при коэффициенте мощности 0,99 при опережающем фазовом угле тока по отношению к напряжению

Проведено сравнение данных, полученных в результате вычислительных экспериментов, с данными теоретических исследований. Полученные результаты качественных и количественных показателей и характеристик соответствуют теоретическим исследованиям и подтверждают корректность работы математической модели. Проведение экспериментальных исследований статических режимов работы СД в условиях действующего КЦ с фиксацией осциллограмм токов и напряжений по трем фазам не представляется возможным, в связи с отсутствием технической возможности и рисками нарушения заданного технологического режима работы ГПА.

4.2 Анализ динамической устойчивости мощных синхронных двигателей

В процессе эксплуатации КС, а также при определении мероприятий по повышению показателей эффективности, значимая роль отводится повышению устойчивости мощного синхронного электропривода.

Существуют критерии, выполнение которых гарантирует статическую или динамическую устойчивость рассматриваемой системы. Эти критерии

определяются на основе анализа того дифференциального уравнения, которое описывает рассматриваемую систему без его решения. Выбор критерия зависит от поставленной задачи и решения исследователя. Этими критериями могут быть: критерий Раусса-Гурвица, критерий Михайлова, критерий Найквиста, метод функций Ляпунова, метод D – разбиения и др.

Практическим критерием динамической устойчивости синхронных машин является правило (способ) площадей. Правило площадей предоставляет возможность определить вероятность работы электрической машины в синхронном режиме. Синхронный режим работы СД сохраняется при условии, если площадь ускорения меньше площади замедления. Электрическая машина переходит в асинхронный режим в случае, если площадь торможения будет меньше площади ускорения. Устойчивость сохраняется в случае, если энергия возможного торможения больше энергии ускорения [42].

На основе разработанной математической модели имеется возможность получения количественных данных по нахождению границ нарушения синхронного режима работы СД путем определения граничных параметров (угловой частоты ротора, напряжения, тока возбуждения и т.д.), при которых наступает момент неустойчивой синхронизации с переходом СД в асинхронный режим работы. Данный фактор объясняется снижением потокосцепления электромагнитного поля статора с электромагнитным полем ротора с проскальзыванием последнего в поле статора.

Результаты вычислительных экспериментов приведены для математической модели с типовой схемой АРВ и одним СД. При этом считается заранее известной величина напряжения на зажимах статора. Впоследствии она будет воспроизводиться с учетом параллельно работающих СД, включаемых в одну или разные секции вторичной обмотки трансформатора.

На рисунке 4.4 показана расчётная осциллограмма тока возбуждения в переходном процессе, вызванном провалом напряжения на шинах 10 кВ до величины равной 7,725 кВ. На второй секунде происходит выпадение СД из синхронизма.

Характерная для указанного момента расчетная осциллограмма с падением величины частоты вращения ротора СД и электромагнитного момента показана на рисунке 4.5. Необходимо отметить, что в данном вычислительном эксперименте не происходит изменения и остается на исходном уровне ЭДС питания возбуждения.

Из приведенных ниже результатов вычислительных экспериментов (рисунки 4.4–4.7) прослеживается прямая зависимость времени нарушения синхронного режима работы от величины провала напряжения [106].

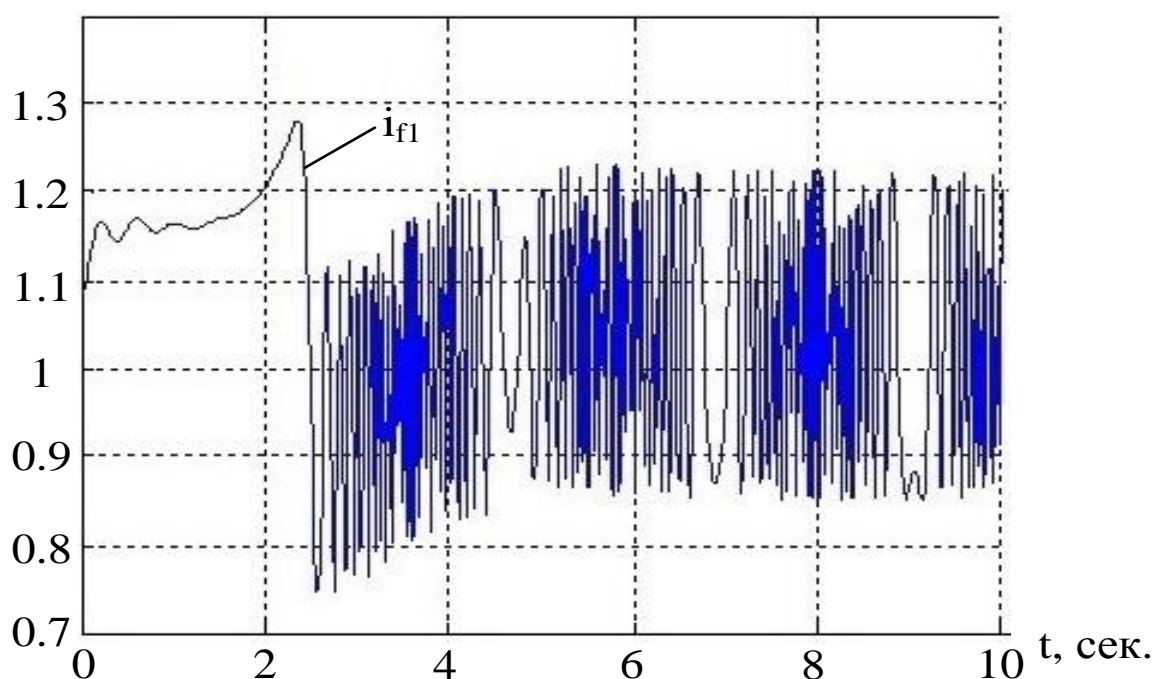


Рисунок 4.4 – Расчетная осциллограмма тока возбуждения i_{f1} (о.е.) при провале напряжения питания статора до величины равной 7,725 кВ

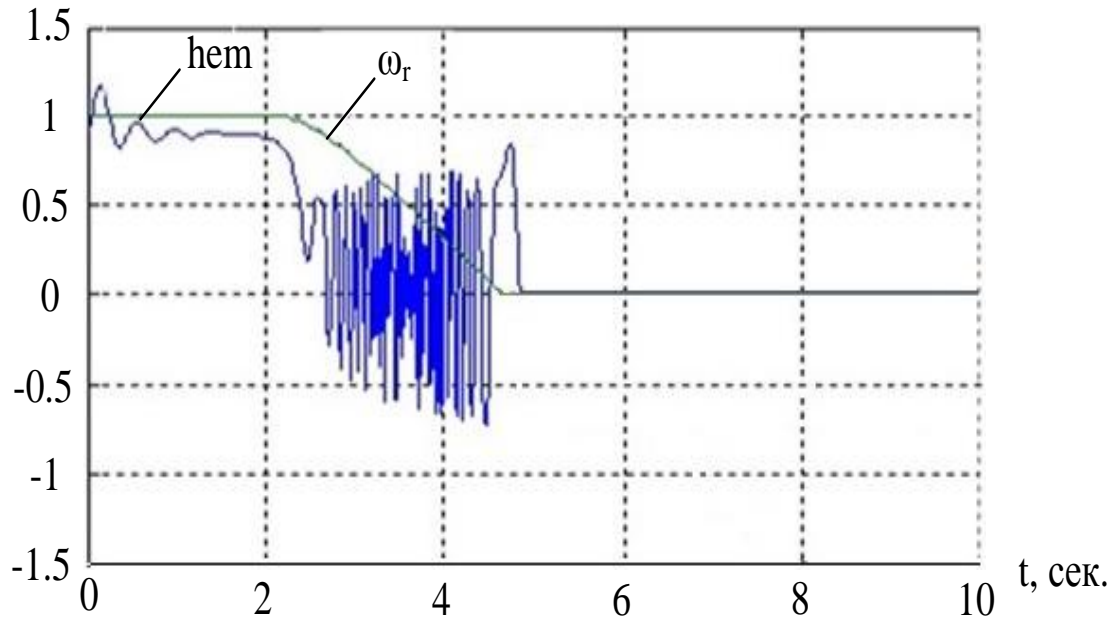


Рисунок 4.5 – Расчетные осциллограммы электромагнитного момента (h_{em}) и угловой частоты (ω_r) ротора (о.е.) при провале напряжения питания статора до величины равной 7,725 кВ

При провале напряжения на питающих шинах до величины равной 8,755 кВ, уже через 6 секунд процесс сопровождается нарушением синхронного режима работы СД (рисунок 4.6).

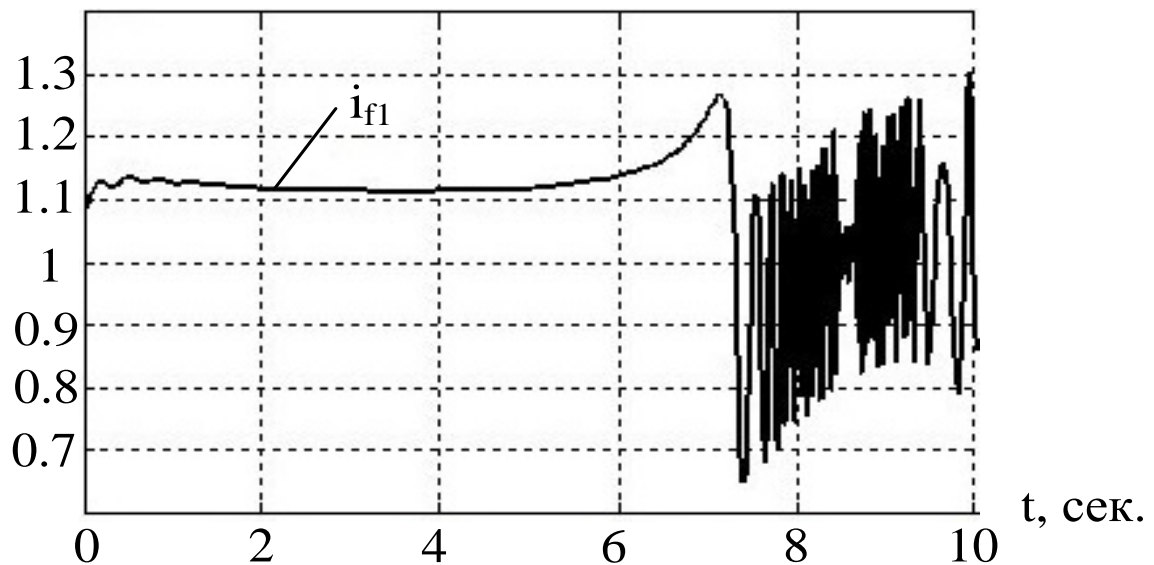


Рисунок 4.6 – Расчетная осциллограмма тока возбуждения i_{f1} (о.е.) при провале напряжения питания статора до величины равной 8,755 кВ

Результат воспроизведения переходного процесса, вызванного провалом напряжения питания до граничного уровня, представлен на рисунке 4.7. Процесс

сопровождается снижением тока возбуждения с последующим увеличением его до уровня обеспечения устойчивого статического режима работы СД с синхронной частотой вращения.

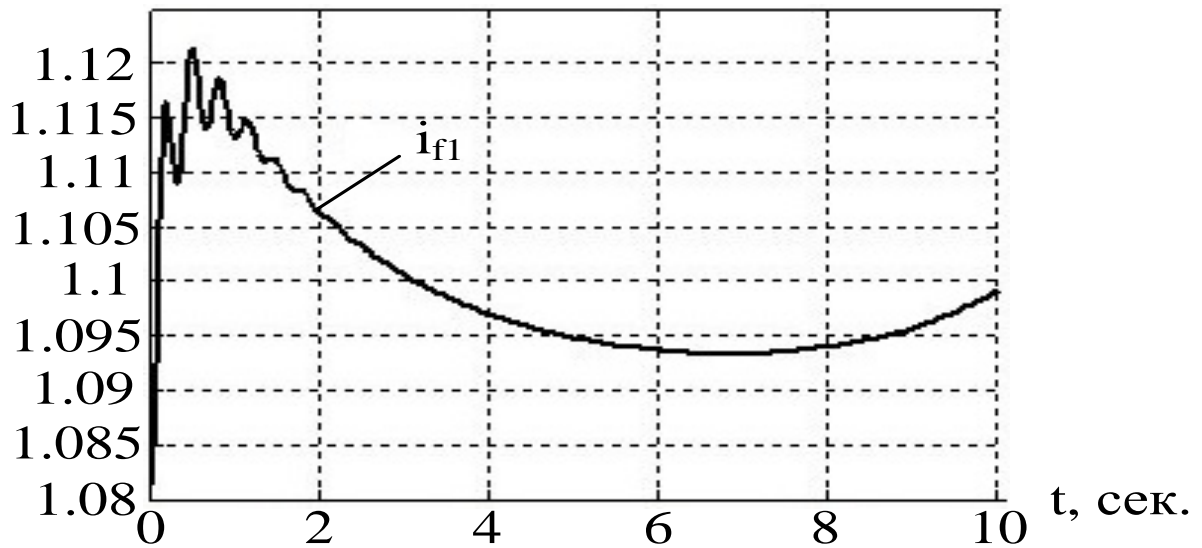


Рисунок 4.7 – Расчетная осциллограмма тока возбуждения \dot{i}_{f1} (о.е.) при провале напряжения питания статора в граничном случае до величины равной 9,166 кВ

В полученных на рисунке 4.8 расчетных осциллограммах для указанного режима прослеживается увеличение тока статора и изменение его фазы по отношению к напряжению с переходом СД в режим с отстающим коэффициентом мощности.

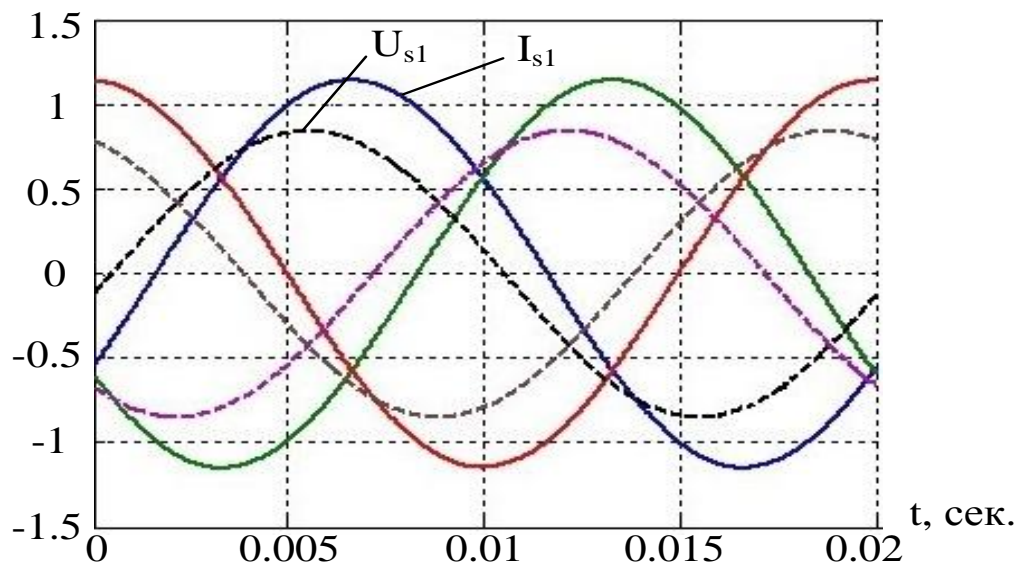


Рисунок 4.8 – Расчетные осциллограммы мгновенных значений токов (I_{s1}) и напряжений (U_{s1}) статора (о.е.) при провале напряжения питания статора до величины равной 9,166 кВ

На рисунке 4.9 приведен результат расчетного эксперимента переходного процесса с глубоким провалом напряжения питания статора до уровня 7,21 кВ и с одновременным двойным повышением тока возбуждения. На приведенной осциллограмме прослеживается динамичное нарастание тока возбуждения, которое позволяет исключить асинхронный режим СД. На рисунке 4.10 видно, что уже через 4 сек. обеспечивается устойчивый статический режим работы СД с сохранением синхронной частоты вращения ротора.

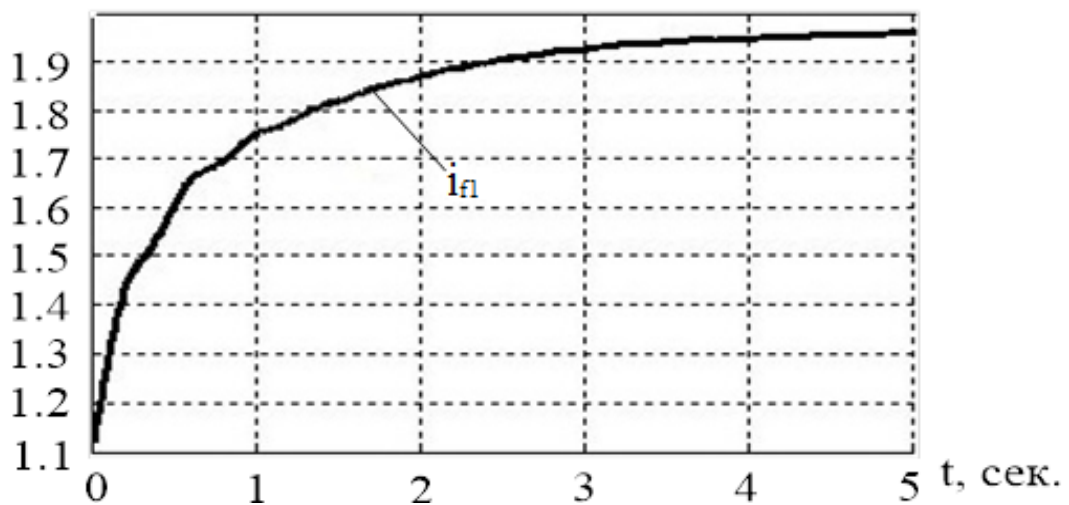


Рисунок 4.9 – Осциллограмма тока возбуждения i_{f1} (о.е.) при провале напряжения питания статора до величины равной 7,21 кВ

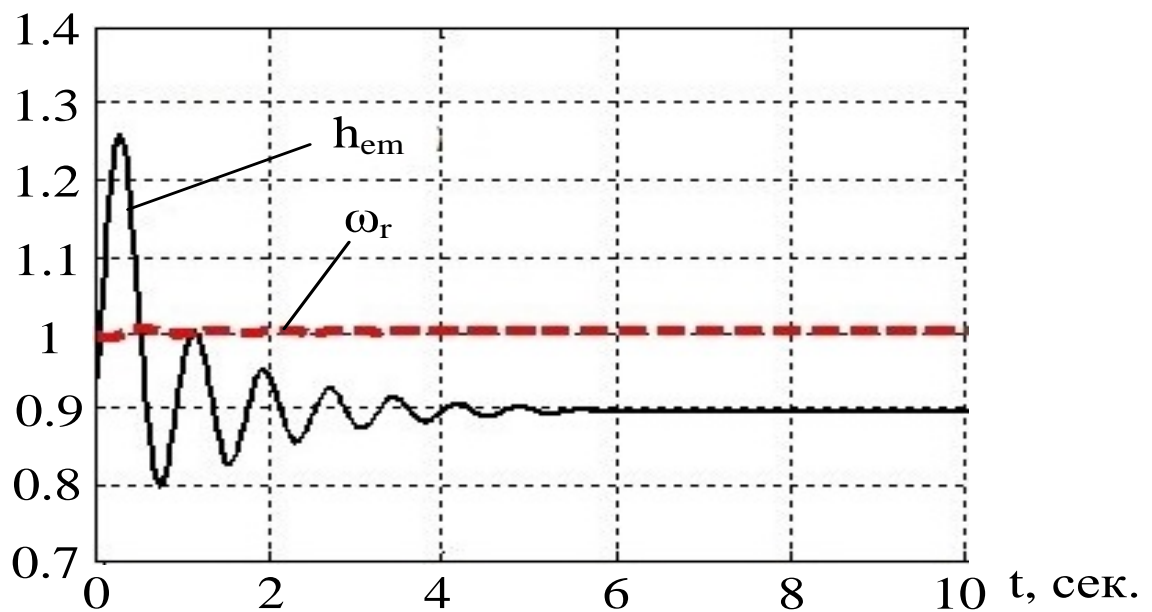


Рисунок 4.10 – Осциллограммы электромагнитного момента (h_{em}) и угловой частоты (ω_r) (о.е.) при провале напряжения питания статора до величины равной 7,21 кВ

Проведенные вычислительные эксперименты подтвердили зависимость времени нарушения синхронного режима СД в динамическом режиме от величины провала напряжения. Также определена кратность тока форсировки, при которой даже при критичном провале напряжения возможно обеспечить синхронный режим работы СД.

Расчётные осциллограммы качественно согласуются с физическими представлениями.

4.3 Моделирование алгоритма форсировки тока возбуждения и постфорсировочного режима мощного синхронного двигателя

Сохранение устойчивой работы СД в динамическом режиме при провалах напряжения питания в узлах нагрузки обеспечивается увеличением величины тока возбуждения в определенных пределах, что выполняется системой возбуждения в автоматическом режиме. Проведено моделирование одного из характерных случаев функционирования мощного СД в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 2.10.

В одном из программных модулей реализуется последовательность функционирования системы возбуждения в режиме форсировки, состоящая из четырех основных фрагментов.

1. При номинальной нагрузке и значении напряжения в узле нагрузки 10,3 кВ с коэффициентом мощности 0,99 воспроизводится 20 циклов исходного режима.

2. При снижении напряжения в узле нагрузки от 10,3 кВ до 9 кВ с воспроизведением 50 циклов. Условием указанного расчетного эксперимента является включение режима форсировки тока возбуждения на уровне 9,4 кВ, при этом ЭДС питания обмотки возбуждения СД резко увеличивается до полуторакратного рабочего уровня.

3. При напряжении в узле нагрузки 9,0 кВ и максимальной величине напряжения питания возбуждения воспроизводятся 200 циклов работы СД.

4. Воспроизведение процесса восстановления напряжения питания статора от 9 до 10,3 кВ осуществляется за 100 циклов. На уровне напряжения 9,6 кВ происходит отключение форсировки тока возбуждения, напряжение питания обмотки возбуждения.

Результаты 1 этапа процесса функционирования системы возбуждения в режиме форсировки фактически те же, что и в разделе 4.1.

На втором этапе при провале напряжения в узле нагрузки до величины 9,6 кВ на обмотку возбуждения СД подается максимальное значение напряжение питания.

Осциллограмма нарастания тока возбуждения на рисунке 4.11 показана с 0,5 секунды процесса. Осциллограмма приведена в относительных единицах. Учитывая значение базисного тока ротора 226 А (таблица 4.2), величина тока составит 400 – 430 А.

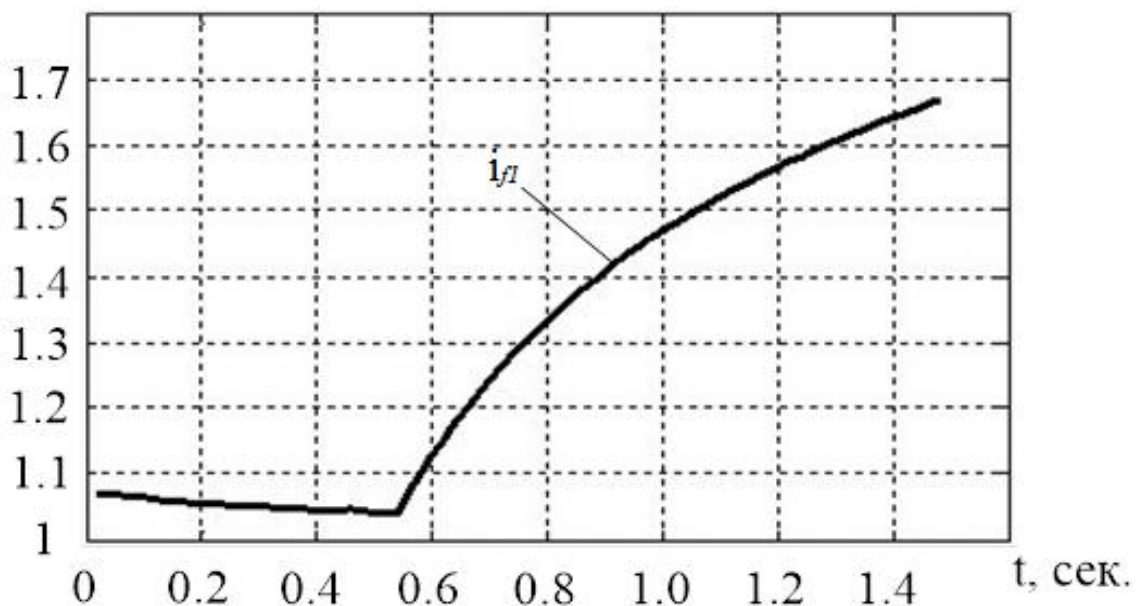


Рисунок 4.11 – Расчетная осциллограмма нарастания тока возбуждения \dot{i}_{fi} (о.е.) при включении форсировки

На втором этапе происходит увеличение тока статора с одновременным уменьшением коэффициента мощности (рисунок 4.12).

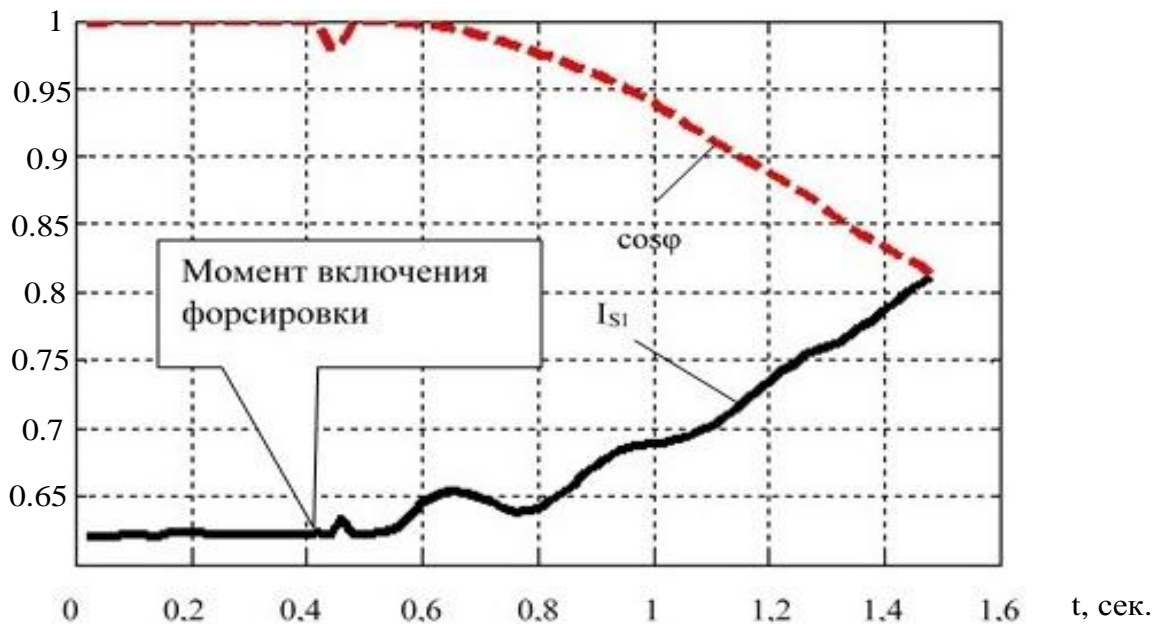


Рисунок 4.12 – Расчетные осциллограммы изменения тока статора (I_{s1}) и коэффициента мощности ($\cos\varphi$) в начале режима форсировки (о.е.)

Осциллограмма изменения электромагнитного момента и частоты вращения ротора показана на рисунке 4.13 после включения режима форсировки при работе СД на пониженном напряжении в узле нагрузки. При этом наблюдается устойчивый режим с синхронной частотой вращения.

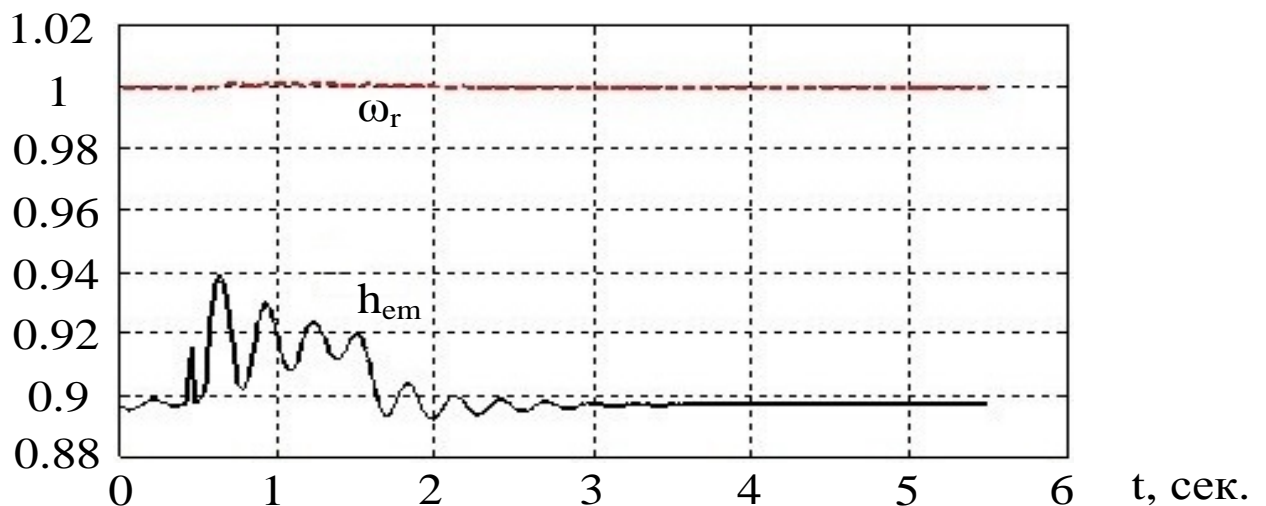


Рисунок 4.13 – Расчетные осциллограммы электромагнитного момента (h_{em}) и угловой частоты (ω_r) в режиме форсировки при пониженном напряжении статора (о.е.)

Увеличение тока статора и отставание его по фазе от напряжения наблюдается на этапе работы СД с пониженным напряжением в узле нагрузки и режимом форсировки (рисунок 4.14).

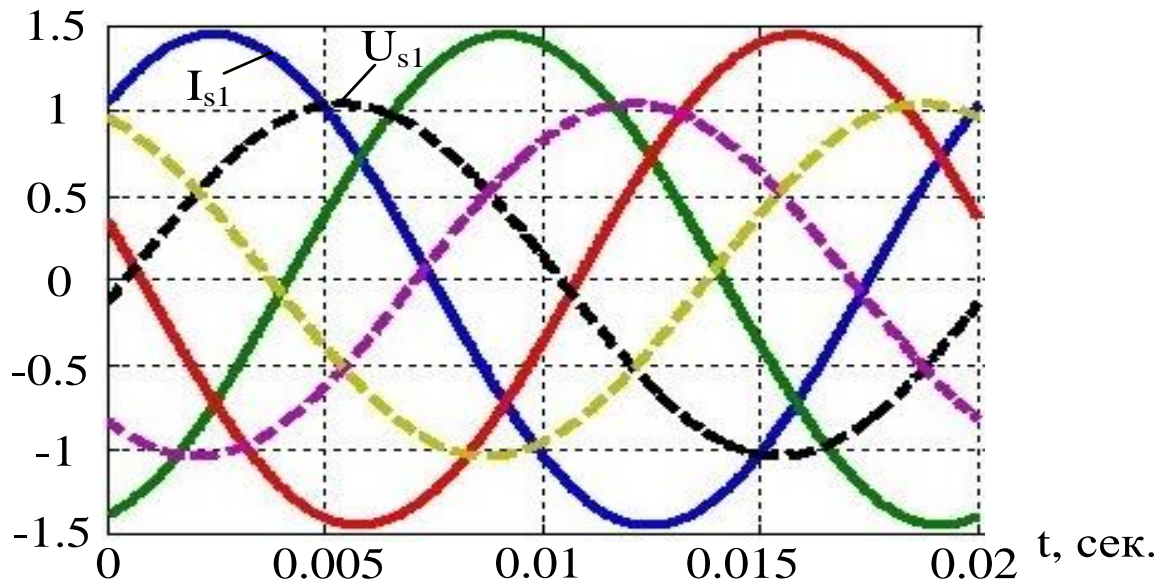


Рисунок 4.14 – Расчетные осциллограммы токов (I_{s1}) и напряжений (U_{s1}) статора при пониженном напряжении в узле нагрузки 10 кВ

Воспроизведение процесса восстановления напряжения в узле нагрузки с величины 9,0 кВ до 10,3 кВ показало, что при отключении форсировки на уровне 9,8 кВ происходит скачкообразное уменьшение тока возбуждения с последующим восстановлением и дальнейшим его снижением.

В электромагнитной системе СД сложные переходные процессы возникают также в случаях провала тока возбуждения и являются возмущающим воздействием, способным привести к потере синхронизма СД (рисунки 4.15 и 4.16). При восстановлении напряжения в узле нагрузки 10 кВ не во всех случаях обеспечивается возврат к рабочему режиму.

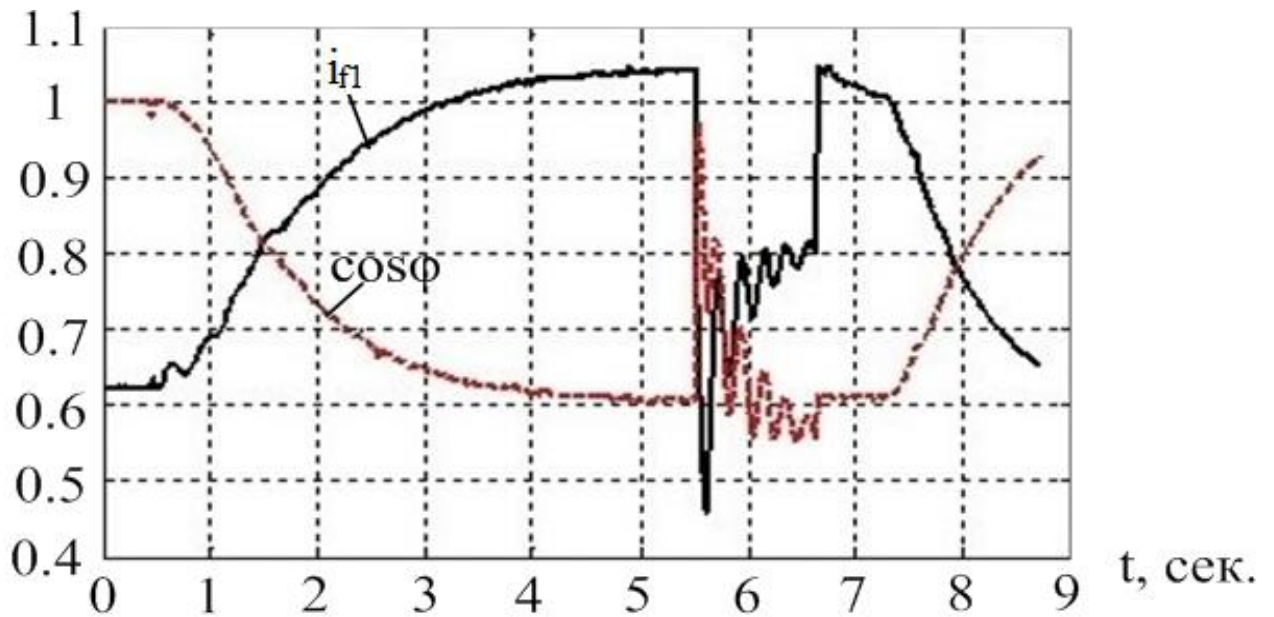


Рисунок 4.15 – Изменение тока возбуждения (\dot{I}_{f1}) и коэффициента мощности ($\cos\varphi$) (о.е.) при скачкообразном снижении тока ротора (при отключении форсировки)

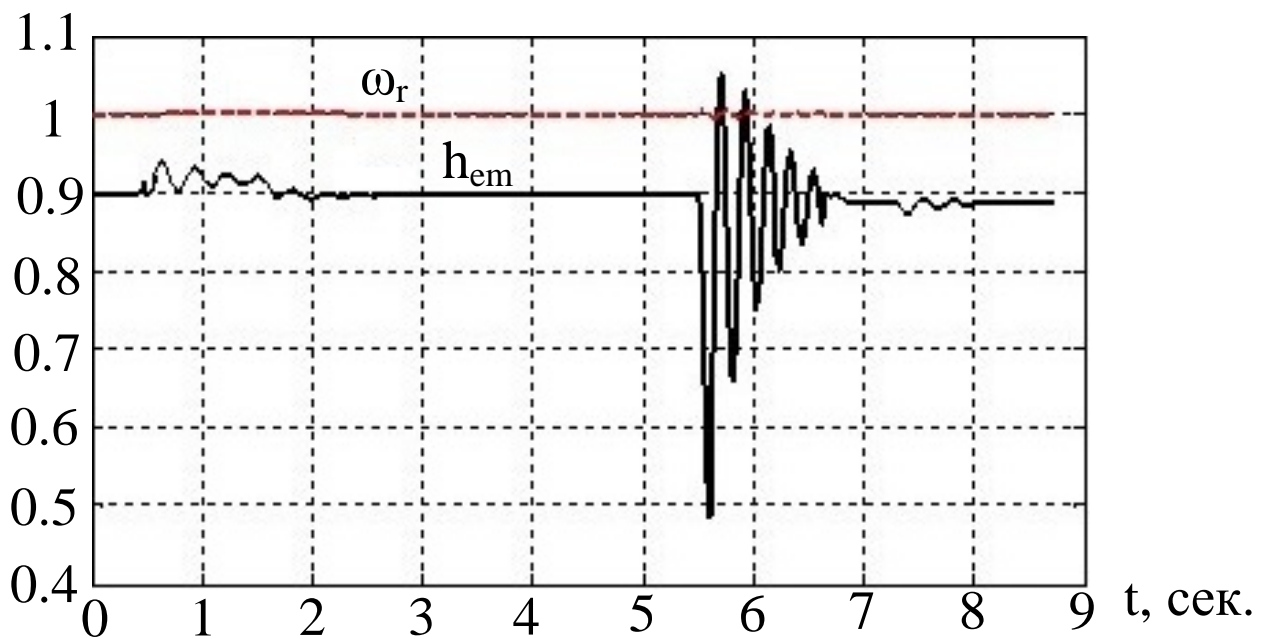


Рисунок 4.16 – Возникновение колебаний электромагнитного момента (h_{em}) при скачкообразном снижении тока ротора (при отключении форсировки) в о.е.

В связи с трудностями при определении соответствующих микропроцессорному исполнению параметров контура обратной связи возбудителя ВТЦ-СД-Щ, выполнен подбор указанных ($k_p = 0.001$, $T_i = 62.8$ о.е.) параметров.

Указанным выбором обеспечено допустимое протекание процесса перехода режима от номинального (рисунок 4.2) к рабочему (рисунок 4.3) в автоматическом режиме. Переход к начальным условиям рабочего режима (таблица 4.4) был выполнен от начальных условий номинального режима (таблица 4.1). Они согласуются с данными таблицы 4.3.

В таблице 4.4 представлены начальные условия полученного рабочего режима.

Таблица 4.4 – Начальные условия полученного рабочего режима (о.е.)

i_{b1}	I_{b2}	Ψ_d	Ψ_q	Ψ_{d3}	Ψ_{q3}	Ψ_2	ω_r	θ_r	U_{cx1}	U_{cx2}	e_2
0,21	-0,91	0,70	0,76	0,80	0,71	2,24	0,9997	2917	-1,1	-1,8	0,00730

Большое значение для обеспечения достоверности и адекватности моделирования такого сложного переходного процесса, как пуск с включением форсировки, имеет детальное воспроизведение особенностей микропроцессорного управления. На рисунке 4.17 приведен график диапазона уставки величины $\cos\varphi$, обеспечивающий условие устойчивой синхронизации СД.

Если значение тока возбуждения ниже значения уставки «Макс. ток возбуждения» и измеренное значение (вычисленного алгоритмом ЦОС БПФ) $\cos\varphi$ равно уставке «Уставка COS_FI» с допуском, определяемым уставкой «Допуск COS_FI выхода форс» регулятор сразу переходит в режим регулирования по закону «Уст+ $\cos\varphi$ ».

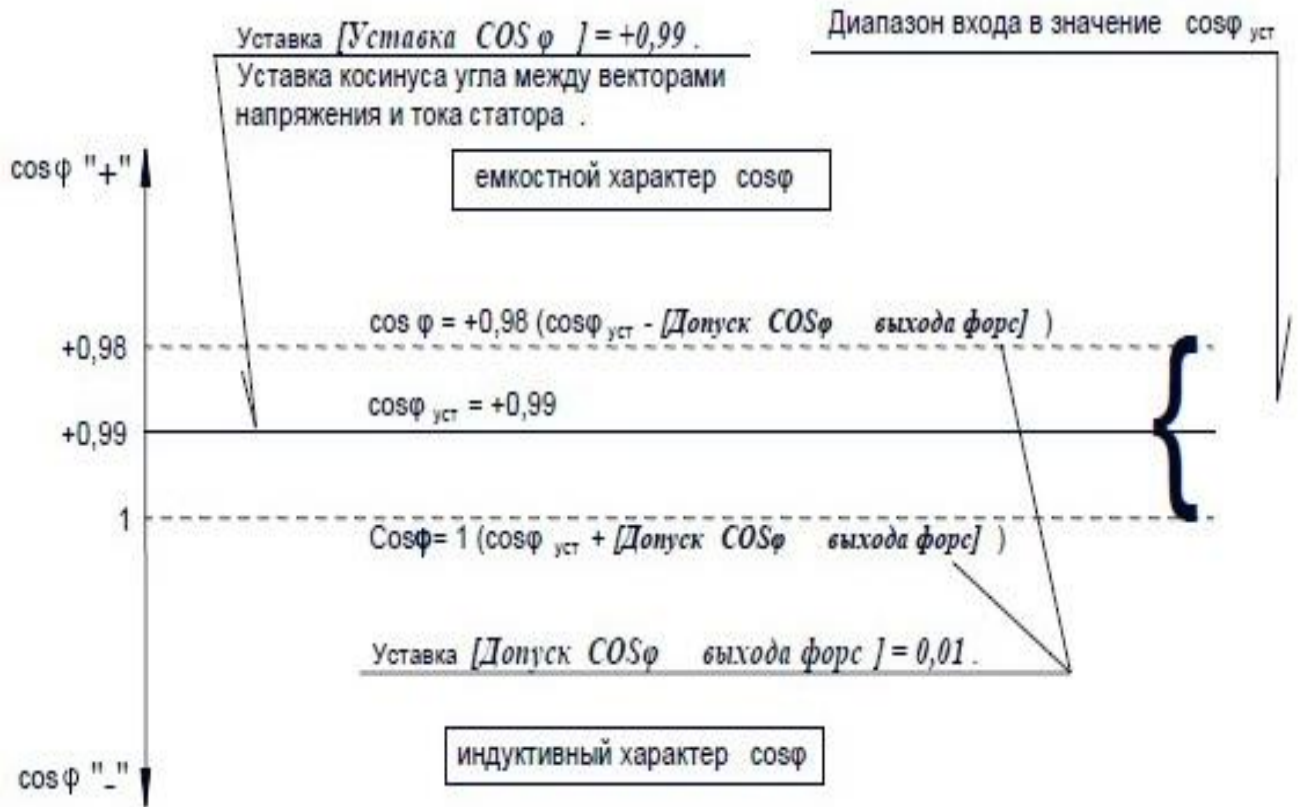


Рисунок 4.17 – Графическое пояснение к уставке «Допуск COS_FI выхода форс»

4.4 Основные результаты выполнения вычислительных и экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились на СД ГПА в условиях действующего КЦ КС. Результаты экспериментальных исследований фиксировались интегрированными в цифровое возбуждательное устройство современными программно-аппаратными средствами фиксации процессов и параметров проводимого экспериментального исследования с сохранением в журнале событий.

Программно-аппаратные средства возбуждательного устройства обеспечивают автоматический контроль основных параметров работы двигателя и возбуждательного устройства:

- тока статора $I_{ст}$, напряжения статора $U_{ст}$ - с погрешностью не более 0,5 %;

- тока возбуждения I_v , напряжения возбуждения U_v – с погрешностью не более 0,5 %;

- тока в цепи питания тиристорного преобразователя (фаза А, фаза С) – с погрешностью не более 1,0 %;

- тока в цепи пусковых сопротивлений – с погрешностью не более 1,0 %.

Система возбуждения СД имеет следующие основные параметры:

- время нарастания напряжения до форсировочного значения на выходе регулятора при форсировке – не более 0,2 с;

- в режиме форсировки обеспечивается стабильность тока возбуждения форсировки с точностью 1% относительно заданной уставки;

- $I_{\text{мин. возб.}} = 180\text{А}$, $I_{\text{мах. возб.}} = 350\text{А}$, $I_{\text{форсир.}} = (1,4-1,8) I_{\text{ном.}} = 450\text{А}$, $U_{\text{ст. форсир.}} = 9,4\text{кВ}$, $U_{\text{ст. форсир. вых.}} = 9,8\text{кВ}$, число проворотов асинхронного хода = 7, $\cos\phi$ форсировки перегрузки = -0,95.

В ходе разработки математических соотношений, программирования модулей в программном комплексе MatLab и реализации их в среде Simulink выполнено большое количество вычислительных экспериментов, которые позволяют сделать ряд выводов.

Разработанные модели обеспечивают необходимый уровень точности и достоверности, что подтверждается сопоставлением расчетных и экспериментальных осциллограмм, сравнением полученных интегральных характеристик с данными эксплуатации. Для обеспечения соответствия расчетных и экспериментальных данных важно не только детальное изучение справочных параметров и уточнения их по заводским данным, но и корректная постановка вычислительных экспериментов.

Фактически, воспроизведение каждого процесса, внешнего и управляющего воздействий требуется производить с предварительным воспроизведением предшествующих процессов и режимов, обоснованно обеспечивающим формирование начальных условий именно того процесса, который исследуется далее.

Выполнена специальная серия вычислительных экспериментов, устанавливающих количественные показатели ключевых параметров и факторов, влияющих на устойчивость работы СД ГПА. Перечень анализируемых процессов приведен в приложении Б.

Установлено количественно, что влияние падения напряжения на секции шин вторичной обмотки трансформатора от пускового тока, протекающего в другой секции, незначительно. Воспроизведение этого процесса с помощью модели показало, что падение 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 падение напряжения на секции шин пускаемого двигателя в переходном процессе достигает 10 %. Этим подтверждается вывод, сделанный в практике эксплуатации ГПА, что наибольшее значение для анализа устойчивости СД компрессоров имеет случай пуска двигателя на той же секции шин, где работает анализируемый двигатель.

Установлено, что при пуске второго двигателя М2, включенного в одну секцию шин узла нагрузки с работающим двигателем М1, при классической системе АВР СД, из-за провала напряжения на статоре до уровня 9-9,1 кВ практически всегда происходит нарушение синхронизма М1, если у него момент нагрузки близок к номинальному или выше номинального. На рисунке 4.18 показана расчетная осциллограмма тока возбуждения, который меняется после провала напряжения до 9,1 кВ. Из рисунка 4.18 видно, что происходит выпадение двигателя из синхронизма, т.к. он не может обеспечить формирование требуемого электромагнитного момента при уменьшенном потокосцеплении контура статора.

В процессе экспериментального исследования на действующем оборудовании также подтверждается нарушение синхронного режима работы СД при провале напряжения на секции шин узла нагрузки до величины 9,1 кВ при классической схеме АВР СД (рисунок 4.19).

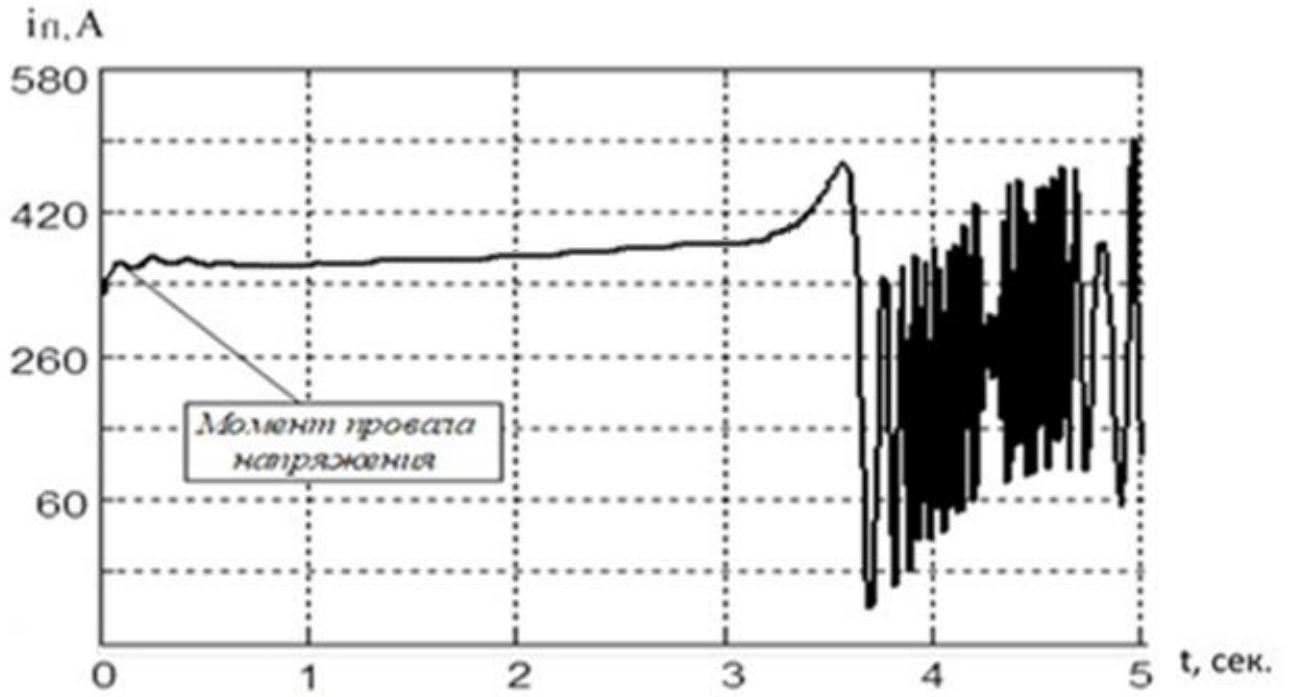


Рисунок 4.18 – Расчетная осциллограмма тока возбуждения двигателя при провале напряжения до 9,1 кВ

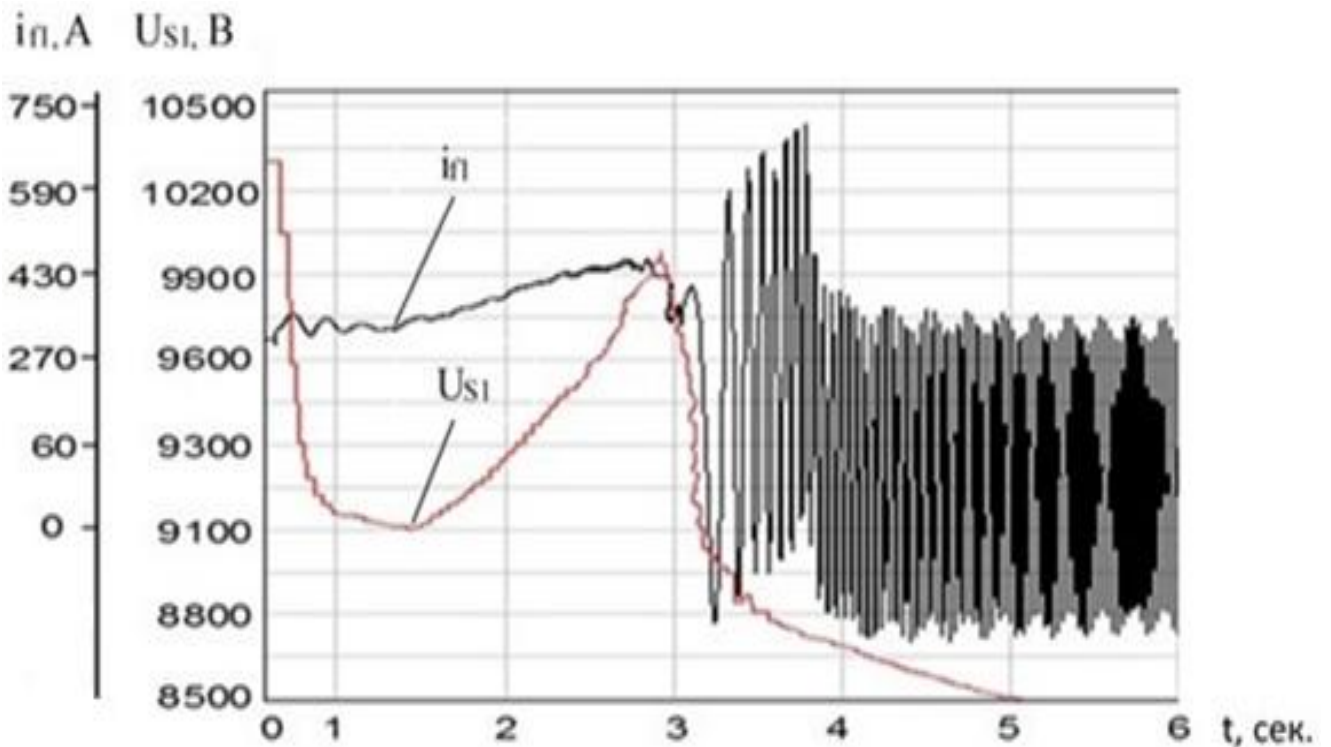


Рисунок 4.19 – Экспериментальная осциллограмма тока возбуждения двигателя при провале напряжения до 9,1 кВ

Применение форсировки, предусматривающей повышение напряжения преобразователя до уровня, обеспечивающего ток возбуждения 450-470 А, является эффективным средством обеспечения динамической устойчивости

двигателя при провалах напряжения на статоре вызванные различными факторами. Наиболее опасным является режим параллельного включения двигателей в одну секцию.

При ранее использовавшемся (первом) алгоритме отключения форсировки напряжение возбuditеля снижалось скачком под действием регулятора тока возбуждения. Если упрощенно представить этот этап работы схемы управления, то можно считать, что ЭДС на зажимах обмотки возбуждения примерно за период снижается до уровня обеспечения коэффициента мощности в диапазоне 1,0 – 0,98. Однако, как показал опыт применения систем возбуждения с такой схемой управления, в зависимости от величины нагрузки происходит процесс перерегулирования и ток возбуждения проваливается намного ниже. После этого под действием регулятора его значение поднимается до вычисленного значения в указанном диапазоне. На рисунках 4.20 и 4.21 приведены экспериментальные осциллограммы зависимости величины перерегулирования от нагрузки СД.

На рисунке 4.20 видно, что при провале напряжения отрабатывает режим форсировки тока возбуждения и при наступлении условия прекращения форсировки снижает ток возбуждения по алгоритму ПИ-регулятора. Прослеживается незначительное перерегулирование тока возбуждения (20А), при нагрузке СД ниже номинальной, что не приводит к нарушению синхронного режима работы двигателя.

При этом, в случае провала напряжения и нагрузке СД, равной либо превышающей номинальную мощность двигателя, приводит к потере синхронного режима его работы (рисунок 4.21).

Величина перерегулирования в данном случае достигает 60 А. Прослеживается прямая зависимость величины перерегулирования от величины нагрузки СД.

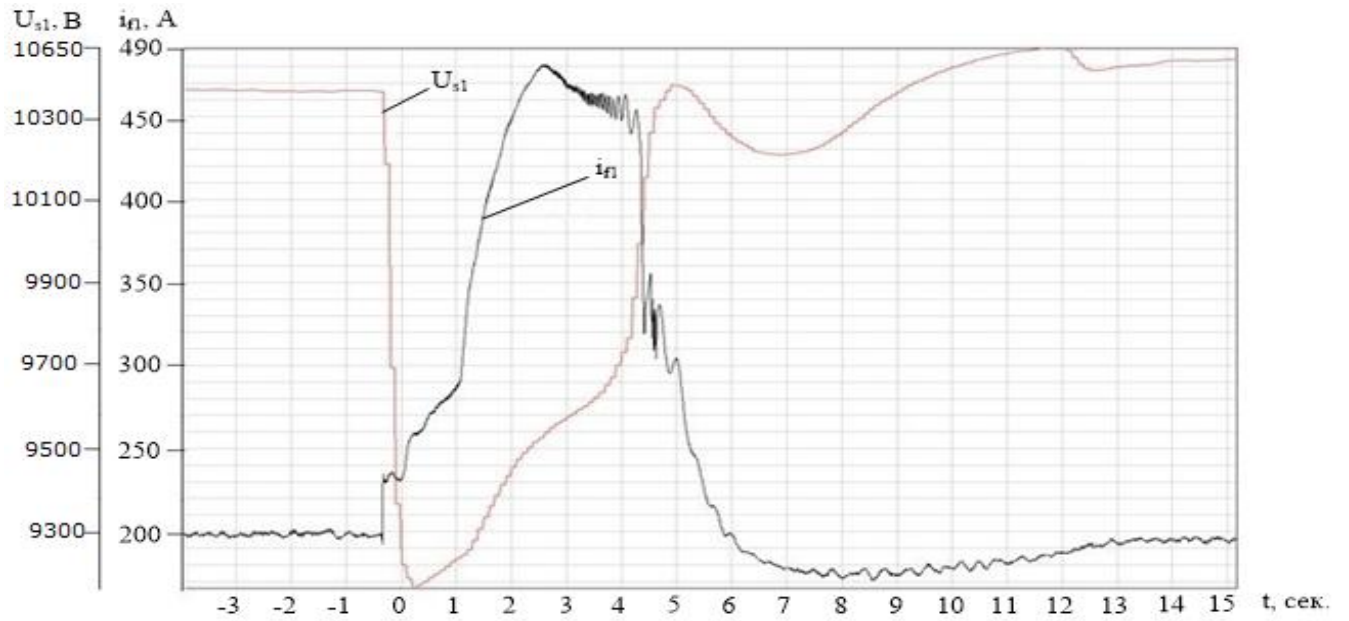


Рисунок 4.20 - Экспериментальные осциллограммы напряжения статора и тока возбуждения с перерегулированием тока возбуждения в 20 А от заданной величины

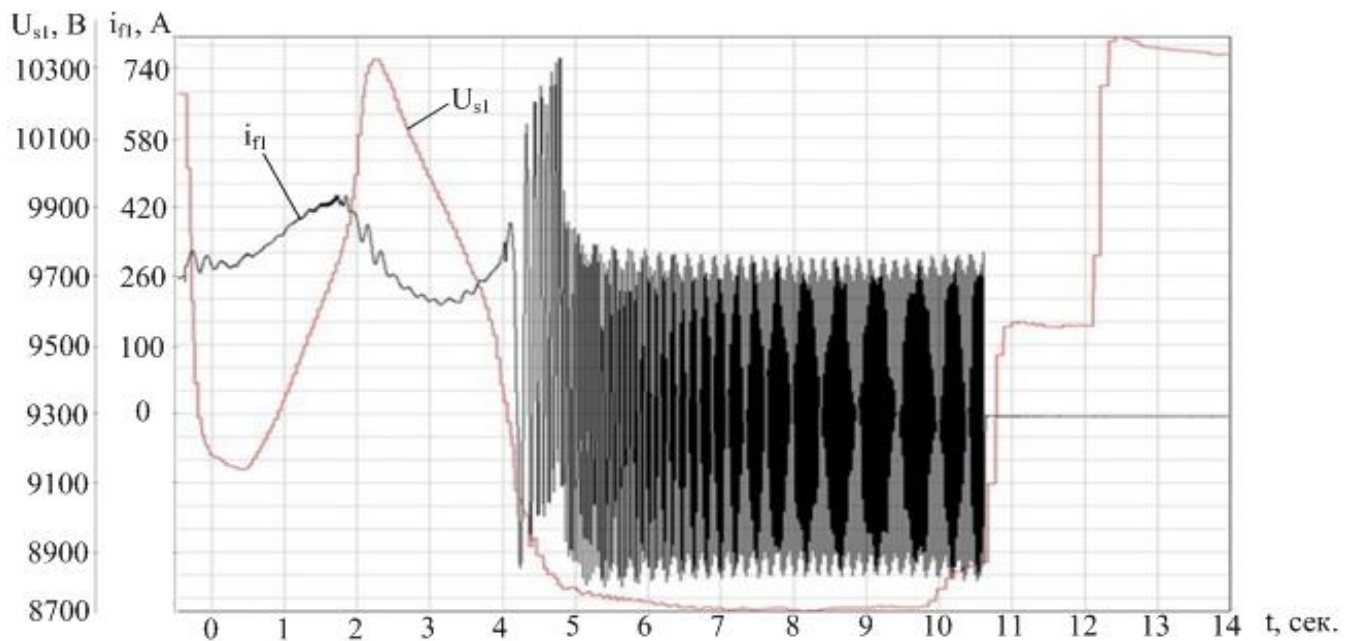


Рисунок 4.21 – Экспериментальные осциллограммы напряжения статора и тока возбуждения с перерегулированием тока возбуждения в 60 А от заданной величины

В зависимости от величины нагрузки и замедлении выхода ЭДС на требуемый уровень, энергии контуров оказывается недостаточно для поддержания электромагнитного момента на уровне, требуемом нагрузкой, и происходит выпадение двигателя из синхронизма.

Изменение алгоритма выхода из форсировки (применение разработанного способа и алгоритма) заключается в размыкании контура регулирования тока

возбуждения и обеспечении постепенного снижения ЭДС возбуждения от уровня форсировки до уровня рабочего диапазона с заданной скоростью. Вычислительные эксперименты, выполненные с воспроизведением такого алгоритма, показали, что процесс перехода к заданному статическому режиму в этом случае проходит с исключением вероятности нарушения устойчивости. На рисунках 4.22-4.33 представлены расчетные и экспериментальные осциллограммы такого процесса, в режиме работы двух СД на одной секции шин узла нагрузки. При этом когда СД1 работает в технологическом режиме, производится пуск СД2. Номинальное напряжение на статоре 10,5 кВ, ток статора 700 А.

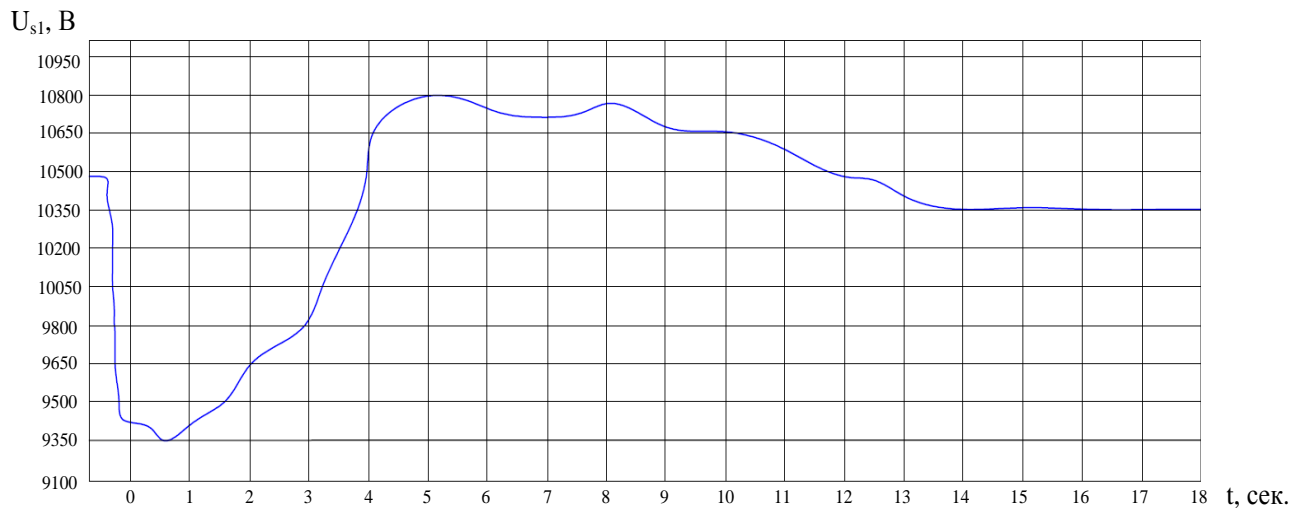


Рисунок 4.22 – Расчетная осциллограмма напряжения статора СД1 при пуске СД2

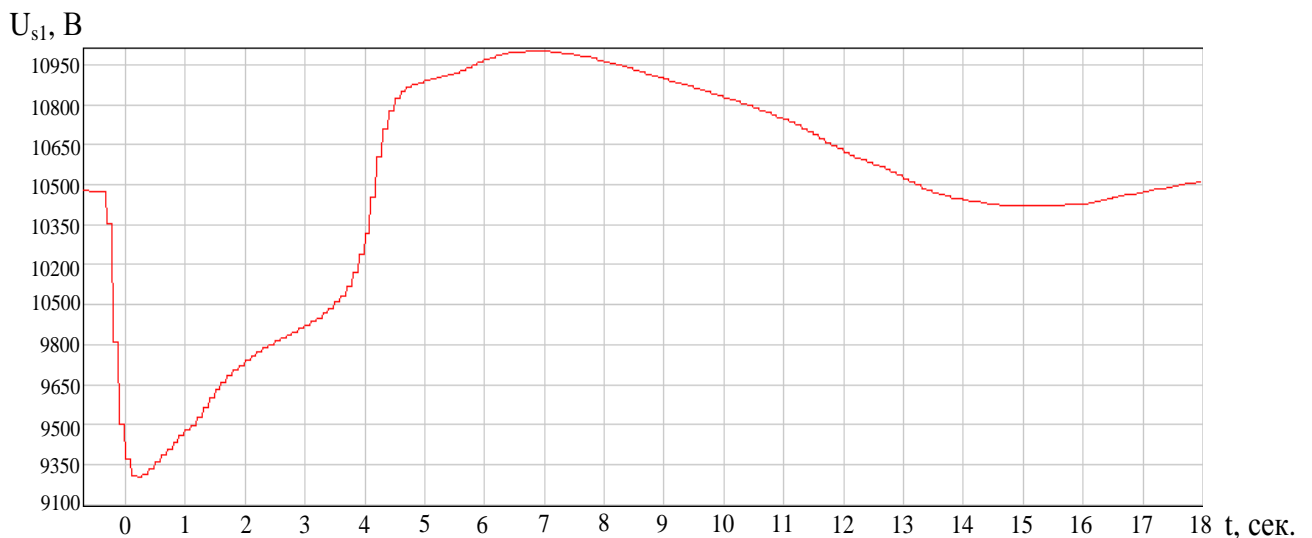


Рисунок 4.23 – Экспериментальная осциллограмма напряжения статора СД1 при пуске СД2

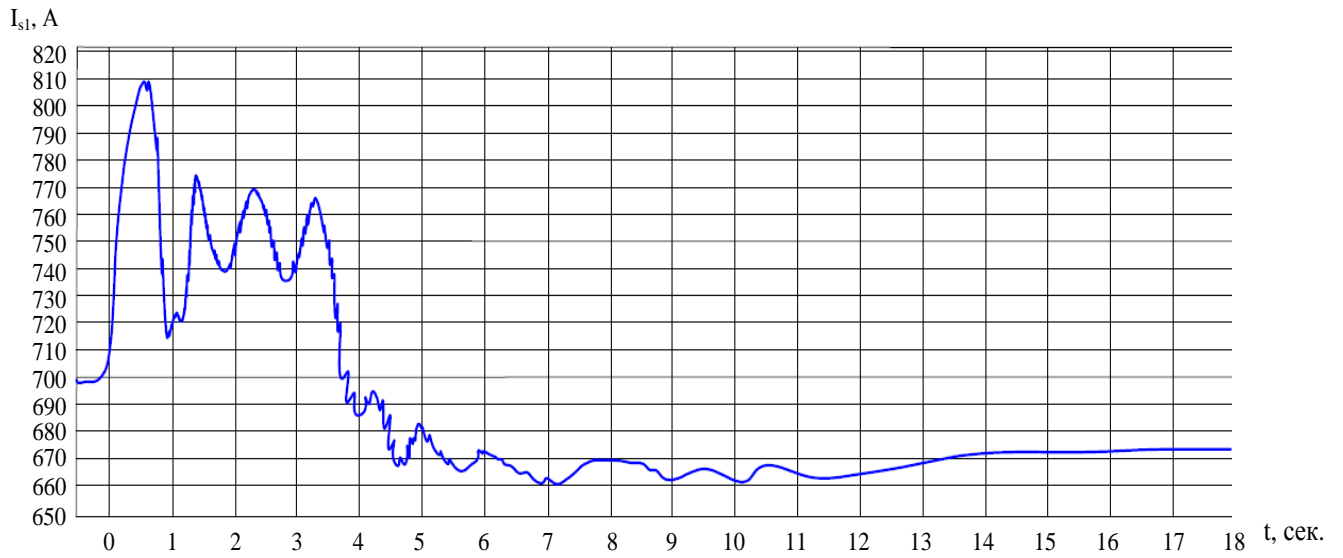


Рисунок 4.24 – Расчетная осциллограмма тока статора СД1 при пуске СД2



Рисунок 4.25 – Экспериментальная осциллограмма тока статора СД1 при пуске СД2

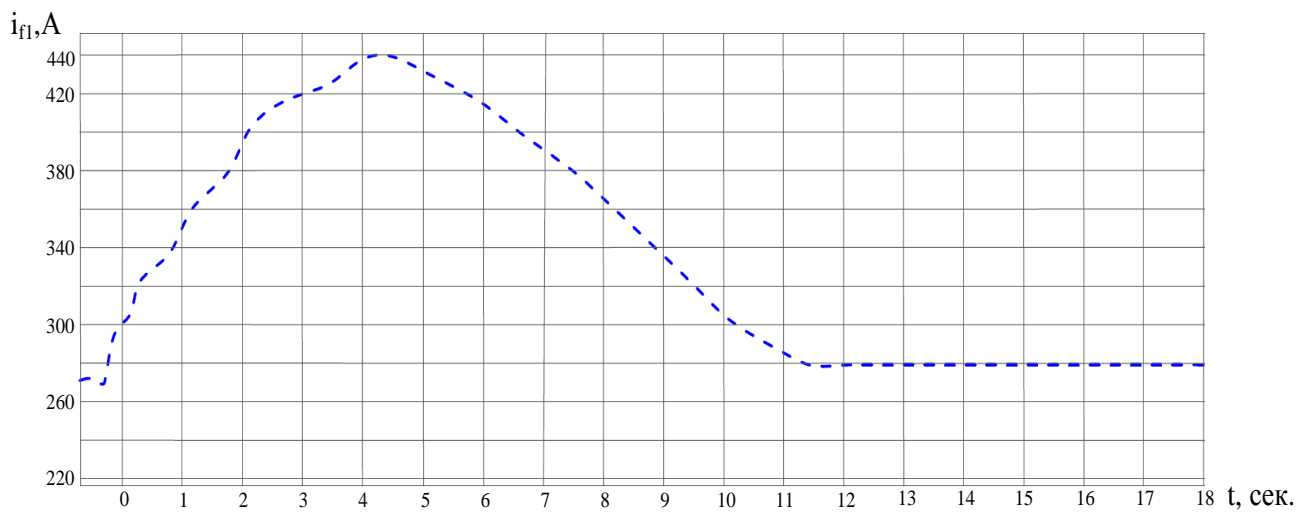


Рисунок 4.26 – Расчетная осциллограмма тока возбуждения СД1 при пуске СД2

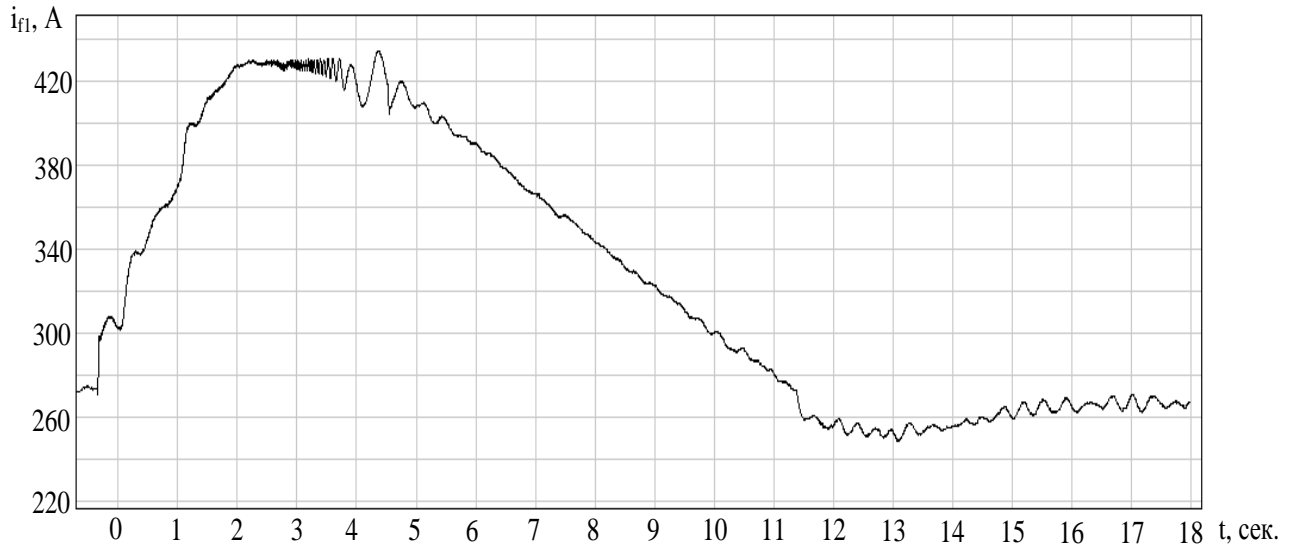


Рисунок 4.27 – Экспериментальная осциллограмма тока возбуждения СД1 при пуске СД2

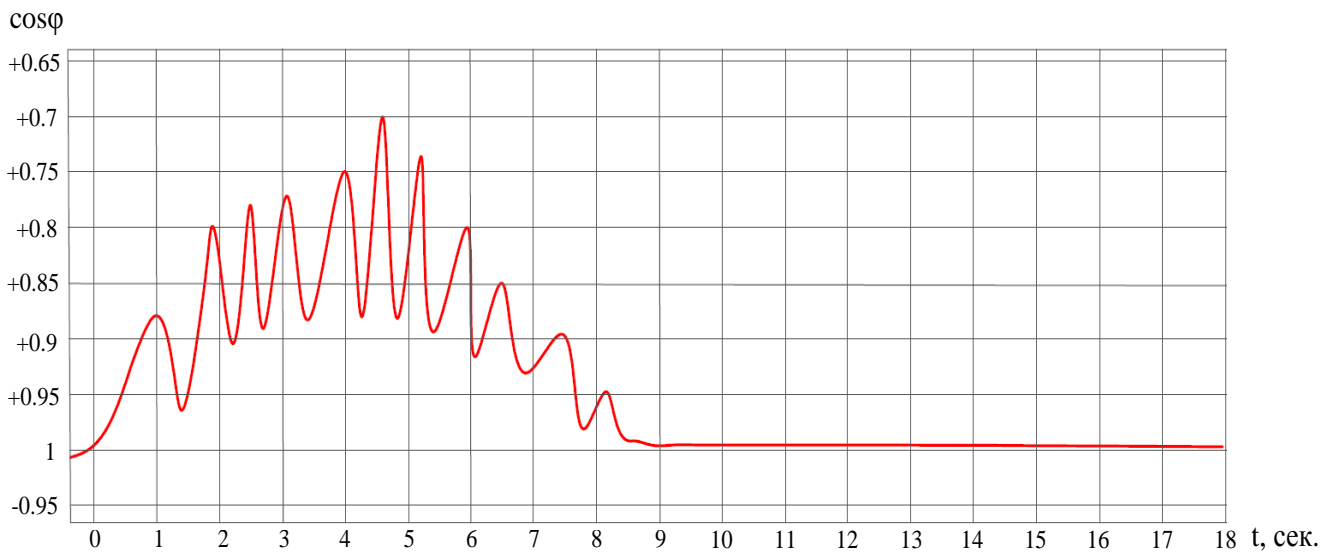


Рисунок 4.28 – Расчетная осциллограмма $\cos\varphi$ статора СД1 при пуске СД2

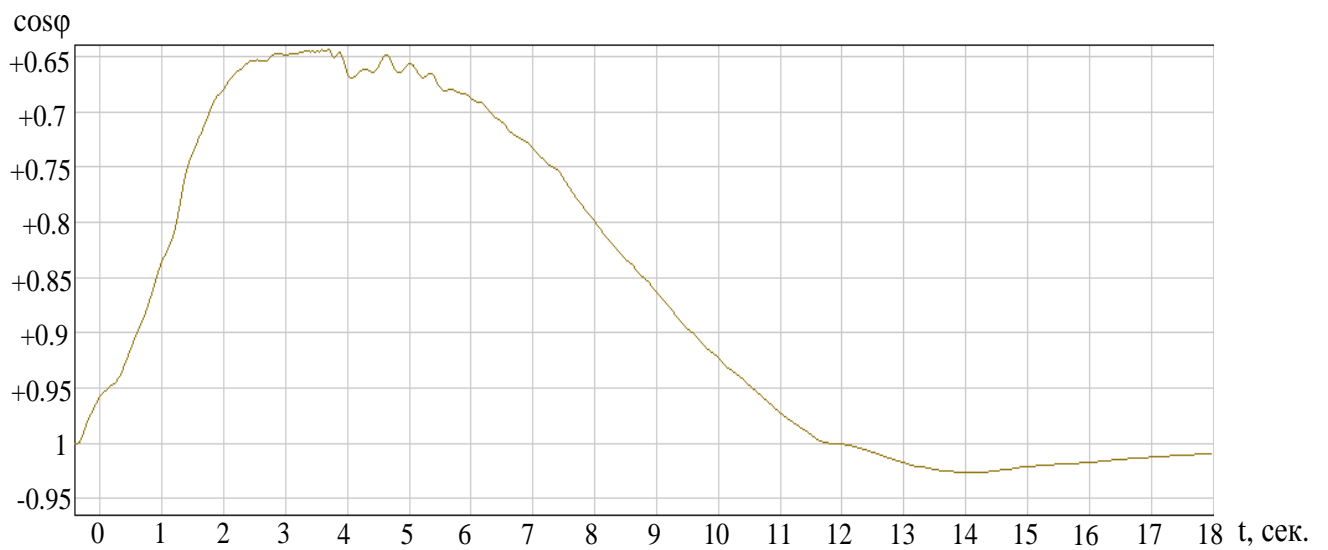


Рисунок 4.29 – Экспериментальная осциллограмма $\cos\varphi$ статора СД1 при пуске СД2

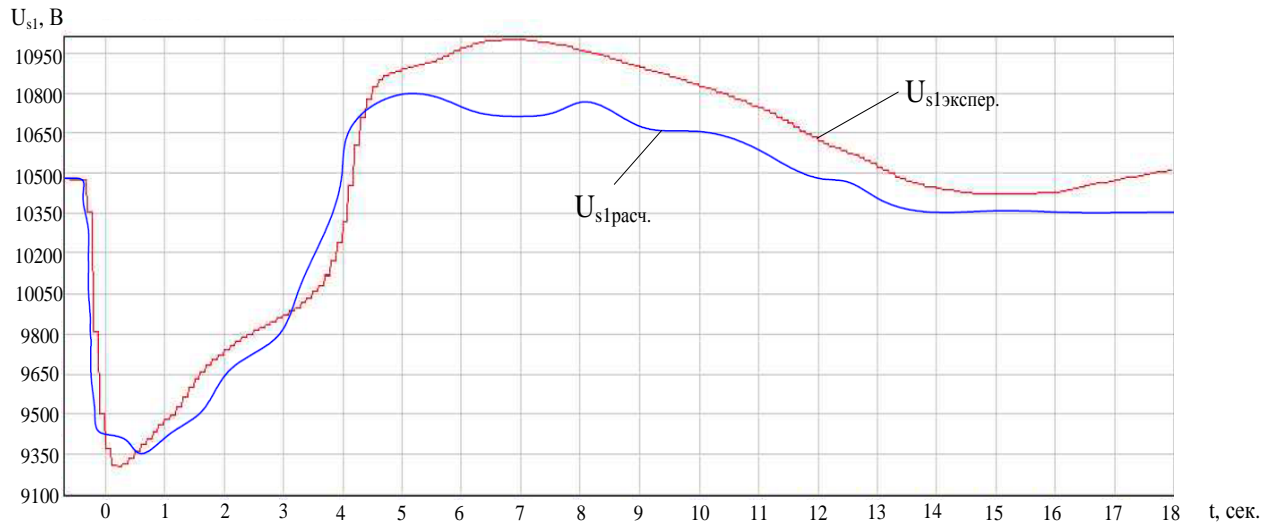


Рисунок 4.30 – Экспериментальная и расчетная осциллограммы напряжений статора СД1 при пуске СД2

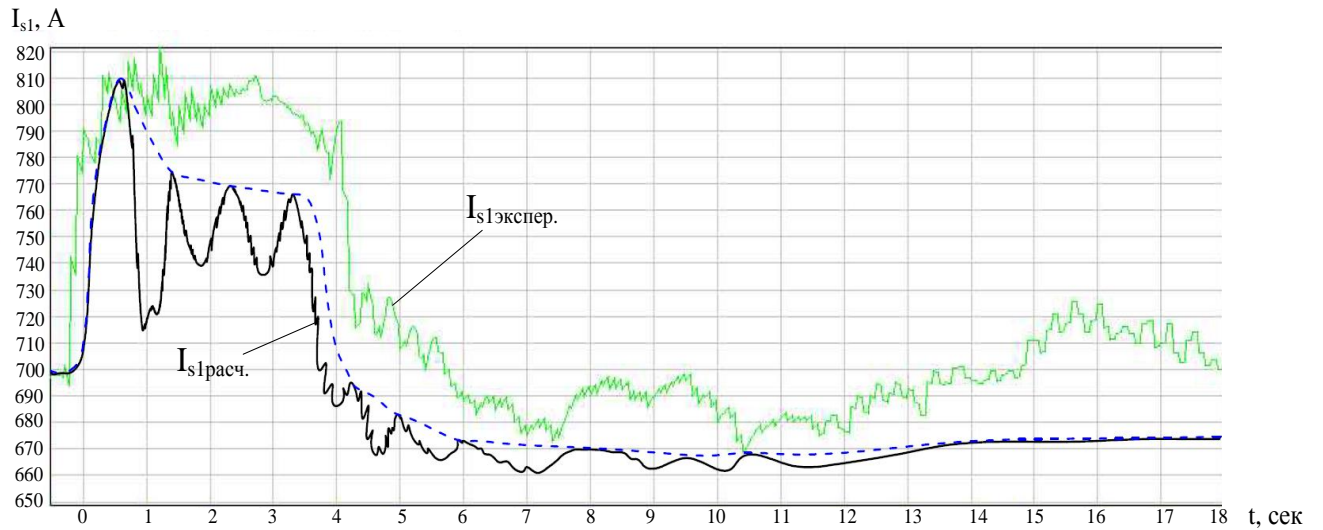


Рисунок 4.31 – Экспериментальная и расчетная осциллограммы токов статора СД1 при пуске СД2

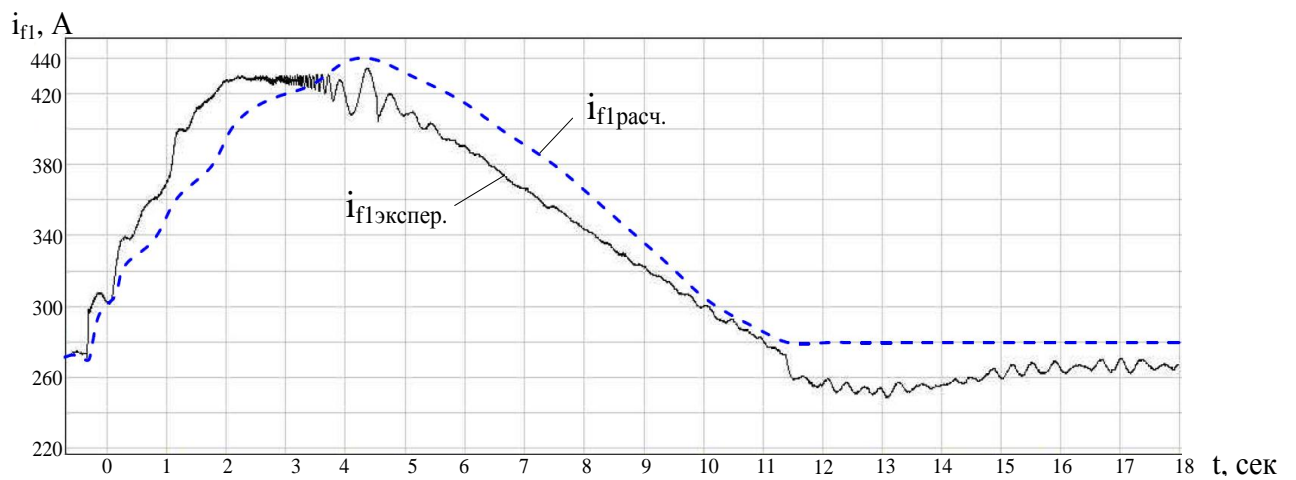


Рисунок 4.32 – Экспериментальная и расчетная осциллограммы токов возбуждения СД1 при пуске СД2

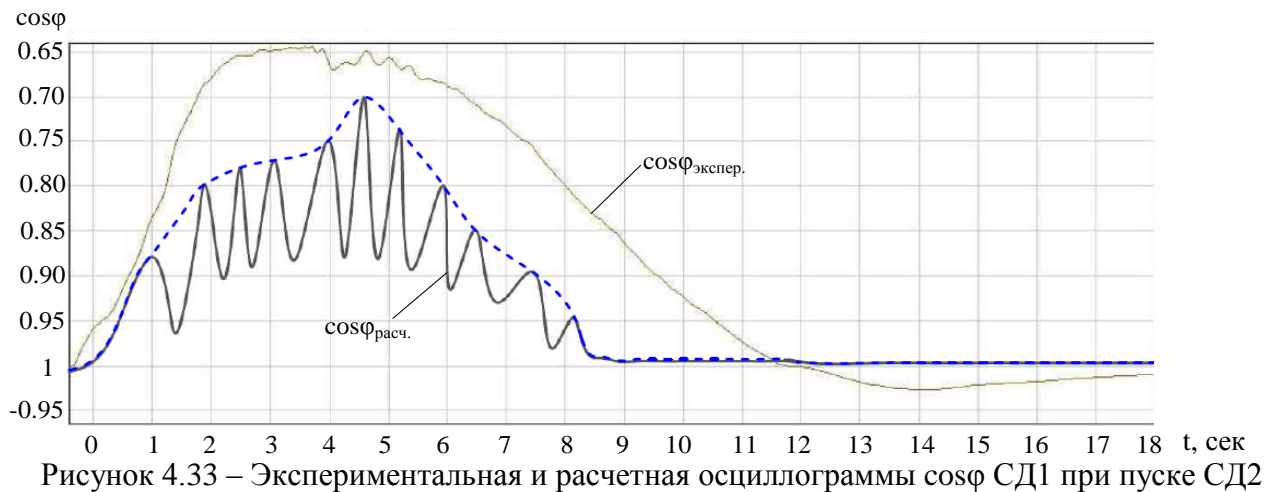


Рисунок 4.33 – Экспериментальная и расчетная осциллограммы $\cos\varphi$ СД1 при пуске СД2

Вычислительные эксперименты, выполненные с воспроизведением такого алгоритма, а также экспериментальные результаты показали, что процесс перехода к заданному статическому режиму в указанном случае проходит с исключением вероятности нарушения устойчивости работы СД. Сравнительный анализ результатов вычислительных и экспериментальных исследований подтверждает сходимость процессов. Относительная погрешность результатов вычислительных экспериментов составила для $U_{s1} \Delta\sigma = 2.1\%$ (рисунок 4.30), $I_{s1} \Delta\sigma = 4.9\%$ (рисунок 4.31), $i_{f1} \Delta\sigma = 12\%$ (рисунок 4.32), $\cos\varphi \Delta\sigma = 15\%$ (рисунок 4.33). Исходя из значений относительных погрешностей, можно считать, что расчетные осциллограммы совпадают с экспериментальными осциллограммами в указанном диапазоне.

Полученные результаты подтверждают достижение цели в части повышения эффективности работы мощного СД при обеспечении минимальных потерь в статоре за счет обеспечения в автоматическом режиме величины коэффициента мощности равной 1 (рисунок 4.28, 4.29, 4.33) и предотвращение работы двигателя на границе устойчивости в постфорсировочных процессах.

4.5. Практические результаты работы

За счет реализации на производственных объектах газотранспортного предприятия результатов проведенной работы, в постфорсировочных режимах

работы мощного синхронного электропривода повысилась надежность технологического процесса транспорта газа, устойчивость работы мощных электроприводов с СД ГПА, достигнута энергоэффективность путем минимизации потерь мощности и энергии СД и природного газа, повышена экологическая безопасность за счет снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Достигнутые результаты в части повышения надежности, устойчивости, энергоэффективности, экологической безопасности привели к повышению эффективности синхронного электропривода в целом.

Под надежностью понимается свойство устройства или системы выполнять требуемые функции в определенных условиях эксплуатации. Применительно к проведенной работе указанный термин характерен как в целом для технологического процесса транспорта газа, так и к элементам электротехнической системы, обеспечивающей указанный процесс. Надежность является комплексным свойством, обусловленным сочетанием свойств безотказности, ремонтпригодности, долговечности и сохраняемости.

При этом показатель надежности – безотказность, в указанной работе использовался для отражения достигнутого результата с учетом статистической информации (Приложение Д). Основными критериями надежности являются интенсивность отказов, средняя наработка до отказа и вероятность безотказной работы [115].

Внедрение результатов проведенной работы повысили надежность в работе мощного синхронного электропривода ГПА в части безотказности его работы в постфорсировочных режимах работы до 100%, исключены потери от стравливания природного газа в атмосферу из-за нарушения технологического режима.

Под устойчивостью электропривода понимают его способность возвращаться в состояние устойчивого равновесия после выведения его из этого состояния каким-либо возмущающим воздействием. Устойчивая работа электромеханической системы обеспечивается подбором соответствующих

параметров и характеристик электродвигателя, исполнительного механизма и системы управления.

В результате проведенных исследований разработано решение, обеспечивающее возвращение синхронного электропривода в состояние устойчивого равновесия после окончания режима форсировки. После внедрения указанного решения факты выхода мощных СД из синхронизма в послефорсировочном режиме не зафиксированы.

Свойство оборудования, производства или технологии характеризующее меру использования энергии на единицу конечного продукта называется энергоэффективностью. Оценка величины энергоэффективности производится при помощи показателей как качественно (низкая, высокая), так и количественно (кВт·ч, т. у. т., кДж на единицу конечного продукта) [52].

Энергетическую эффективность технологического процесса разделяют с учетом непосредственно осуществляемого электроприводной машиной, так и эффективность непосредственно электропривода, характеризующую его коэффициентом полезного действия (КПД), который представляет собой отношение выходной мощности данного устройства к входной мощности и коэффициентом мощности. Коэффициент полезного действия определяется отношением полезной мощности (или энергии) к затраченной. В процессе работы определено одно из условий обеспечения эффективности работы синхронного электропривода в постфорсировочном режиме работы. В части одного из критерия окончания плавного снижения тока возбуждения и передача управления током возбуждения ПИ-регулятору является обеспечение коэффициента мощности равным 1. При указанной величине коэффициента мощности отсутствуют потери на реактивную составляющую, и обеспечивается работа мощного СД с паспортной величиной КПД.

Состояние защищенности жизненно важных интересов человека и природной среды от возможного негативного воздействия различных видов деятельности, а также чрезвычайных ситуаций техногенного, природного характера, их последствий называется экологической безопасностью. Будучи

одним из элементов национальной безопасности, экологическая безопасность в своей базовой основе закреплена в Стратегии национальной безопасности Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 12 мая 2009 г. №537.

Одним из критериев стратегических целей является сохранение окружающей природной среды и обеспечение ее защиты [116]. В результате проведенных исследований в рамках диссертационной работы и внедрения ее результатов на предприятии, обеспечено повышение экологической безопасности за счет снижения потерь от стравливания природного газа при нарушениях технологического процесса. Указанный фактор является следствием разработанных в рамках исследований решений.

Исходя из анализа статистических данных аварийных остановов электроприводных ГПА (Приложение Д), в рамках только одного газотранспортного предприятия за 6 лет, анализируемый период до внедрения разработанного способа управления током возбуждения и алгоритма АРВ СД в постфорсировочных режимах работы, из-за нарушения синхронного режима работы мощных электроприводов в атмосферу стравлено 109,319 тыс. м³ природного газа. В среднем 18,219 тыс.м³ в год.

Расчет стравленного газа и расчет газа на запуск электроприводных ГПА проведен в соответствии со стандартом организации СТО Газпром 3.3-2-044-2016.

Учет расхода газа на запуск электроприводного ГПА обусловлен необходимостью запуска ГПА для обеспечения режима транспорта газа в случае его аварийного останова.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Исходные данные для расчета потерь при стравливании газа

Показатели	Ед. изм.	Условные обозначения	Значение
Геометрический объём участка	м ³	V _Г	15
Давление газа в трубопроводе до стравливания газа (абс.)	МПа	P _н	6,26
Температура в трубопроводе до стравливания газа	°К (°С+273,15)	T _н	293

Состав природного газа приведен в таблице 4.6. При расчете коэффициента сжимаемости учитывается мольная доля элементов состава природного газа.

Таблица 4.6 – Состав природного газа

Состав газа	Метан	Этан	Пропан	Бутан	И-бутан
Мольная доля	0,957651	0,018200	0,005000	0,000870	0,000830
Состав газа	Пентан	И-пентан	Гексан	Диоксид углерода	Гелий
Мольная доля	0,000158	0,000216	0,000133	0,002950	0,000181

Расчет стравленного газа и расчет газа на запуск электроприводных ГПА

1. Коэффициент сжимаемости газа до стравливания газа согласно модулю расчёта, основанного на ГОСТ 30319.3-2015:

$$Z_H = 0,8836$$

2. Количество газа на опорожнение коммуникаций:

$$Q_{оп} = T_c / P_c * V_{г} * P_H / (Z_H * T_H) * 10^{-3}$$

где T_c – стандартное условие к которому приводят объем газа при температуре 20⁰С;

P_c – стандартное атмосферное давление равно 101,325 Па;

$V_{г}$ – геометрический участок стравливаемого газа;

P_H – давление газа в трубопроводе до стравливания газа (абсолютное);

T_H – температура в трубопроводе до стравливания газа в ⁰К;

$$T_c = 273,15 + 20 = 293,15 \text{ К}$$

$$Q_{оп} = 293,15 / 0,101325 * 10^{-3} * 15 * 6,26 / (0,8836 * 293) = 1,050 \text{ тыс. м}^3$$

3. Количество газа на продувку перед пуском ГПА:

$$Q_{пр} = 3 * V_{г} * 10^{-3}$$

$$Q_{пр} = 3 * 15 * 10^{-3} = 0,045 \text{ тыс. м}^3$$

4. Количество стравленного газа:

$$Q = Q_{оп} + Q_{пр}$$

$$Q = 1,050 + 0,045 = 1,095 \text{ тыс. м}^3$$

5. Окончательный расчет расхода газа с учетом расхода газа на перестановку запорно-регулирующей арматуры (ЗРА):

$$Q_{пр} + ЗРА = 0,045 + 0,016 = 0,061 \text{ тыс. м}^3$$

$$Q_{оп} + ЗРА = 1,05 + 0,016 = 1,066 \text{ тыс. м}^3$$

6. Объем стравленного газа в атмосферу за 6 лет (период с 2011– 2016гг.) в

постфорсировочных режимах работы электроприводов с мощными СД составил:
 $0,061 + 1,066 * 97 = 109,319$ тыс. м³

Эффективность использования электрического привода технологических установок, как и любой другой технической разработки, содержит три вида составляющих [115]:

1) социальная эффективность, связанная с улучшением и оздоровлением условий труда;

2) экологическая эффективность, связанная с уменьшением загрязнения окружающей среды;

3) экономическая эффективность, связанная с экономией хозяйственных затрат и получением максимальной прибыли.

В рамках диссертационной работы вторая и третья составляющие эффективности нашли отражение в части разработанных решений. Необходимо отметить, что составляющие эффективности включают в себя все вышеперечисленные практические результаты диссертационной работы.

Выводы

1. Корректность подходов к разработке математической модели доказана сходимостью результатов вычислительных экспериментов с экспериментальными данными, полученными на производственном объекте.

2. Выполнен количественный анализ характерных статических и переходных (динамических) режимов функционирования СД СТД-12500 с тиристорным возбудителем ВТЦ-СД с использованием разработанных математических моделей.

3. Установлено, что снижение напряжения на секции шин пускаемого СД в переходном процессе достигает 10 %.

4. Проведено исследование взаимного влияния СД, работающих в различных режимах, а также подключенных к одной и разным секциям шин вторичной обмотки силового трансформатора.

5. Установлено, что при включении двух СД (СД1-СД2) на разные секции шин вторичной обмотки силового трансформатора взаимное влияние двигателей проявляется незначительно: снижение напряжения на статоре двигателя СД1 во время пуска двигателя СД2 на другой секции шин вторичной обмотки трансформатора составляет не более 3-4 %.

6. Исследование эффективности существующего алгоритма выхода из форсировки по обеспечению устойчивости СД, работающего в статическом режиме, при запуске второго СД на той же секции шин вторичной обмотки силового трансформатора показало, что при включении СД1-СД2 на одну секцию шин в большинстве ситуаций приводит к выпадению из синхронизма двигателя СД1 при пуске двигателя СД2.

7. С помощью математического моделирования подтверждено, что применение разработанного способа управления током возбуждения и алгоритма выхода из форсировки, путем плавного, с заданной скоростью и дискретностью, снижения тока возбуждения, предотвращает потерю устойчивости работы СД в постфорсировочных режимах работы.

8. Разработанная математическая модель обеспечивает необходимый уровень достоверности, что подтверждается совпадением расчетных и экспериментальных осциллограмм, совпадением полученных характеристик с данными эксплуатации.

9. Расчетные осциллограммы совпадают с экспериментальными осциллограммами в указанном диапазоне, значения погрешности обусловлены сложностью учета при вычислительных экспериментах всех моментов переходного процесса.

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. м³/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.

Список литературы

1. Абакумов А.М., Высоцкий В.Е., Шварц Г.Р. Совершенствование электромеханических систем транспорта газа на базе мощных синхронных двигателей // Электротехника, 2000, № 8. – С.4–6.
2. Автоматизированные электроприводы / Под ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова. – М.: Энергоатомиздат. 1990. – 544 с.
3. Адаптируемая математическая модель систем возбуждения синхронных машин/ А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый // Известия Томского политехнического университета. – №7. 2005. – С. 211 – 215
4. Необходимость внедрения системы мониторинга качества электрической энергии на компрессорных станциях магистральных газопроводов / 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.
5. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. – М. – Л.: Госэнергоиздат. 1963. – 722 с.
6. Аникин Д.А., Рубцова И.Е., Крюков О.В. и др. Опыт проектирования систем управления электроприводными газоперекачивающими агрегатами // Газовая промышленность, 2008, №10. – С.84–87.
7. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с., ил.
8. Белоусенко И.В., Шварц Г.Р., Великий С.Н. и др. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике газовой промышленности / И.В. Белоусенко, Г.Р. Шварц, С.Н. Великий и др. – М. Энергия, 2002. – 300 с.
9. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Л.: Энергия, 1980. –256 с.

10. Вахнина В.В., Кузнецов В.Н., Самолина О.В. Моделирование магнитного поля силового трансформатора // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2 – 1.;
11. Вейнгер А.М. Регулируемый синхронный электропривод. – М.: Энергоатомиздат. 1985. – 224 с.
12. Великий С.Н. Применение регулируемого электропривода на основном и вспомогательном оборудовании в ОАО «Газпром» / Материалы конференции ОАО «Газпром» «Применение современных электроприводных ГПА и регулируемого электропривода на технологическом оборудовании» – Лысьва, Газпромэнергоинформ. 2006. С. 3 – 6.
13. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985.– 536 с.
14. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.
15. Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей / Б. Н. Абрамович, А. А. Круглый. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 128 с.
16. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. 3 – изд., перераб. – Л.; Энергия, 1978. – 823 с., ил.
17. Гамазин С.И, Ставцев В.А., Цырук С. А. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой. – М.: Издательство МЭИ, 1997. – 424 с.
18. Глебов И.А. Электромагнитные процессы систем возбуждения синхронных машин. – Л: Наука 1987. – 344 с.
19. Глебов И.А., Логинов С.И. Системы возбуждения и регулирования синхронных двигателей. – Л.: Энергия, 1972. – 113 с.
20. Голубовский А.В. Синтез оптимального регулятора возбуждения синхронного двигателя газоперекачивающего агрегата / Ф.Н. Рассказов, С.А. Сенин, А.В. Голубовский // Математическое моделирование и

- краевые задачи: тр. второй Всеросс. научной конференции. – Самара. 2005. – С. 215-217
21. Горев А.А. Избранные труды по вопросам устойчивости электрических систем/Государственное энергетическое издательство. 1960. – 260 с.
 22. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины/ – М., Л.: Государственное энергетическое издательство, 1950. – 552 с.
 23. ГОСТ 24688-81 Возбудители статические полупроводниковые для трехфазных синхронных двигателей. Общие технические требования (с Изменениями №1,2,3).
 24. Гуревич Ю. Е. Устойчивость нагрузки электрических систем. – М.: Энергоатомиздат. 1981. – 208 с.
 25. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с, ил.
 26. Динамическая устойчивость электромеханических комплексов с синхронными и асинхронными двигателями на предприятиях нефтедобычи/ Б.Н. Абрамович, Д.А. Устинов, Ю.А. Сычев, И.Г. Плотников // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – №3. 2011. – С. 17 – 25.
 27. Дьяконов В.П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. М.: ДМК – Пресс. 2011.
 28. Кислицын А.Л. Синхронные машины: Учебное пособие по курсу «Электромеханика». – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 108 с.
 29. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат. 2001. – 704с.
 30. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – 2-е изд. Перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат. 2001. – 704 с.: ил.
 31. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. М.- Л.: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
 32. Ковчин С.А., Сабинин Ю. А. Теория электропривода: Учебник для вузов – Пб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 1994. – 496 с.

33. Компрессорные станции: учебник для вузов / А. Г. Сафиуллин, М. Б. Хадиев, А. В. Палладий и др.— Казань: Изд-во «Слово», 2010. —311 с.
34. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа. 1994. – 318 с.
35. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат. 1986. – 360 с.: ил.
36. Крюков О.В. Виртуальный датчик нагрузки синхронных машин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. № 3. С. 45-51
37. Крюков О.В. Микропроцессорный идентификатор угла нагрузки электроприводных турбокомпрессоров // V научная конференция «Управление в технических системах» УТС-2012 (в рамках 5-ей Мультиконференции по проблемам управления МКПУ-2012). ОАО «Концерн ЦНИИ Электроприбор» и Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. – СПб, 9–11 октября 2012. С. 152–154
38. Крюков О.В., Рубцова И.Е., Титов В.Г. Опыт проектирования и реализации электроприводов ГТС // Труды XV МНТК «Электроприводы переменного тока» ЭППТ–2012. УрФУ. – Екатеринбург. 12–16 марта 2012 г. С. 239-242
39. Крюков О.В., Степанов С.Е. Микроконтроллерный идентификатор угла нагрузки синхронных машин// Материалы XVIII МНТК «Информационные системы и технологии» ИСТ-12. – Нижний Новгород, НГТУ, 20 апреля 2012 г. С. 187-188
40. Крюков О.В., Степанов С.Е. Микропроцессорный идентификатор угла нагрузки приводных электродвигателей магистральных газоперекачивающих агрегатов // Труды X Международного симпозиума «Интеллектуальные системы» INTELS '2012. – Вологда, ВоГТУ, 25–29 июня 2012 г. С. 536–540
41. Крюков О.В., Титов В.Г. Моделирование пусковых режимов электроприводных ГПА // Изв. ВУЗов. Электромеханика. – № 3. 2012. С. – 29-35

42. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учеб. пособие. – М.: Издательство «Омега-Л», 2013. – 384 с.: ил. табл. – (Высшее техническое образование).
43. Лищенко А.И. Синхронные двигатели с автоматическим регулированием возбуждения. – Киев: Техника, 1969г. – 192 с.
44. Лоханин Е.К. Математические модели современных регуляторов возбуждения синхронных машин для расчета и анализа электромеханических переходных процессов и устойчивости энергосистем/ Е.К. Лоханин, В.А. Глаголев, А.И. Скрыпник, Т.О. Товстяк, А.А. Юрганов // Сборник докладов III международной научно-практической конференции «Энергосистема: управление, конференция, образование». – Екатеринбург. 2008. – С. 257 – 262
45. 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.
46. Математические модели современных регуляторов возбуждения синхронных машин для расчета и анализа электромеханических переходных процессов и устойчивости энергосистем/ Е.К. Лоханин, В.А. Глаголев, А.И.Скрыпник, Т.О. Товстяк, А.А. Юрганов //Сборник докладов III международной научно-практической конференции «Энергосистема: управление, конференция, образование». – Екатеринбург, 2008. – С. 257 – 262
47. Михалев С.В. Система поддержания устойчивости работы синхронных электродвигателей 6 – 10кВ: диссертация кандидата технических наук: 05.09.03 / Михалев С. В.; [Место защиты: Санкт – Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)]. – Санкт-Петербург. 2014. – 121 с.2012. – 18 с.
48. Мичков В.И., Арнополин А.Г. Электрооборудование насосных и

- компрессорных станций: – М.: Недра, 1991. –157 с.
49. Применение программного комплекса MATLAB– 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. – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет». – 2017. – С. 329 – 332.
 50. Моделирование синхронных машин/ Е.К. Лоханин, В.А. Глаголев, А.И. Скрыпник // Сборник докладов III международной научно-практической конференции «Энергосистема: управление, конференция, образование». – Екатеринбург, 2008. – С. 240 – 244.
 51. Москаленко В.В. Системы автоматизированного управления электропривода: Учебник – М.: ИНФРА-М, 2004. – 208 с.
 52. Методы и средства энергосбережения на промышленных предприятиях: учебное пособие / И.Ю. Краснов. – Томск: Изд – во Томский политехнический университет. 2012. – 186 с.
 53. Невраев В.Ю., Петелин Д. П. Системы автоматизированного электропривода переменного тока. – М. Л., Издательство «Энергия»,1964. – 104 с.
 54. Нормы технологического проектирования промышленных предприятий. Электроснабжение. – М.: Тяжпромэлектропроект, 1994. - 67 с.
 55. Оптимизация систем управления электроприводами газоперекачивающих агрегатов / Г.Р. Шварц, А.В. Голубовский, Л.А. Мигачёва, Ф.Н. Рассказов, П.К. Кузнецов // Вестник Самарского государственного технического университета, Технические науки. 2005. № 37 – С. 171–176.
 56. Оптимизация систем управления электроприводами при случайных изменениях нагрузки / Ф.Н. Рассказов, М.В. Божьев, А.В. Голубовский // Проблемы электротехники, электроэнергетики, электротехнологии: тр. Всеросс. научно-технической конф. Тольятти, 2004. – С. 73-75.
 57. Опыт эксплуатации цифровой системы возбуждения ВТЦ-320/230 для

- синхронного двигателя СТД-12500-2 / А.В. Голубовский // Материалы научно-технического совета ОАО «Газпром». – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2002. – Т.1. – С. 49-55.
58. Опыт эксплуатации, разработка организационных и технических мероприятий, модернизация и реконструкция энергетического оборудования в ООО «Волготрансгаз» / А.В. Голубовский // Материалы научно-технического совета ОАО «Газпром». – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2007. – С. 32-39.
59. Патент 2006125 Российская федерация, МПК H02H7/08. Устройство для защиты синхронного электродвигателя от асинхронного режима. Федоров Э.К.; патентообладатель ВНИИР. № 5028467/07 заявл. 24.02.1992. опубл. 15.01.1994.
60. Патент 2035110 Российская федерация, МПК H02J9/06. Устройство защиты от потери питания потребителей для подстанций с двигательной нагрузкой. Федоров Э.К.; патентообладатель ВНИИР. № 5061077/07 заявл. 01.09.1992. опубл. 10.05.1995.
61. Патент 2072603 Российская федерация, МПК H02H3/24, H01H83/12. Способ защиты узла электрической нагрузки при нарушении питания и устройство для его осуществления. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Егоров А.В., Алексеев В.В.; патентообладатель Государственная академия нефти и газа им. И.М. Губкина. № 94007368/07 заявл. 04.03.1994. опубл. 27.01.1997.
62. Патент 2074499 Российская федерация, МКП H021P1/50. Регулятор возбуждения синхронного двигателя. Бурак К.Ю., Каргалов Н.И., Соловьев В.А., Щербаков А.Н., Лебедева Н.П.; патентообладатель Петербургский государственный университет путей сообщения, дистанция сигнализации и связи Ленинград–сортировочной Московской области. Подача заявки:1994 – 08 – 29 публикация патента: 27.02.1997.
63. Патент 2076421 Российская федерация, МПК H02J3/24. Способ управления мощностью синхронной нагрузки. Невельский В.Л., Эдлин

- М.А., Васильев В.А., Сурин Ю.П.; патентообладатель ОАО «Тюменьэнерго». № 5050577/07 заявл. 30.06.1992. опубл. 27.03.1997.
64. Патент 2097899 Российская федерация, МПК H02J9/06, H02J9/08. Способ автоматического управления системой гарантированного питания. Виксман А.С., Радченко В.А., Левин Г.Х., Егоров С.С., Кононов Б.Т., Планкин А.В.; патентообладатель ОАО «Звезда». № 96112822/07 заявл. 27.06.1996. опубл. 27.11.1997.
65. Патент 2122277 Российская федерация, МКП H02P007/36. Устройство для управления возбуждением синхронного двигателя. Патентообладатель Малафеев С.И, Мамай В.С, Серебренников Н.А. подача заявки: 1997 – 07 – 30 публикация патента: 20.11.1998.
66. Патент 2156019 Российская федерация, МПК H02H7/08. Устройство для защиты синхронного двигателя от асинхронного режима; Чаронов В.Я., Борисов Л.Ф., Васинеж В.И., Рукавишников А.П.; патентообладатель ВНИИР № 98120744/09 заявл. 12.11.1998. опубл. 10.09.2000.
67. Патент 2239936 Российская федерация, МКП H02P1/46, H02P9/14. Способ управления током возбуждения синхронного двигателя. Абрамович Б. Н., Круглый А. А., Устинов Д. А.; патентообладатель Абрамович Б. Н., Круглый А. А., Устинов Д. А. Подача заявки: 2008 – 11 – 21 публикация патента: 27.03.2010.
68. Патент 2239936 Российская федерация, МКП H02P1/46. Способ управления током возбуждения синхронного электродвигателя. Патентообладатель Открытое акционерное общество «Научно-исследовательское предприятие общего машиностроения»; Голубовский А.В., Кислов Е.А., Левичев Ю.Д., Леонтьев И.В. подача заявки: 11.11.2002 публикация патента: 10.11.2004.
69. Патент 2289196 Российская федерация, МКП H02P21/06, H02P21/14. Устройство регулирования возбуждения синхронного двигателя. Патентообладатель Конструкторско–технологический институт вычислительной техники – научно–исследовательское учреждение

- Сибирского отделения Российской академии наук (статус государственного учреждения); Абрамов А. И., Белоконь С. А., Золотухин Ю. Н., Колодей В. В., Михальцов Э. Г., Нестеров А. А., Собстель Г. М., Терентьев С. А.: подача заявки: 24.05.2005 публикация патента: 10.12.2006.
70. Патент 2295817 Российская федерация, МКП H02P9/10. Способ повышения динамической устойчивости синхронных электрических машин. Новосибирский государственный технический университет; Чебан В. М. подача заявки: 2005 – 05 – 13 публикация патента: 20.03.2007.
71. Патент 2342755 Российская федерация, МПК H02H3/24. Устройство защиты от потери питания. Алексеев В.Ю., Шабанов В.А.; патентообладатель Уфимский государственный нефтяной технический университет. № 2007140001/09 заявл. 29.10.2007. опубл. 27.12.2008.
72. Патент 2385528 Российская федерация, МКП H02P9/14. Способ автоматического регулирования возбуждения машин переменного тока. Герих В.П., Логинов Н.П., Окин А.А. Патентообладатель Акционерное общество Центральное диспетчерское управление Единой Энергетической Системы России; подача заявки: 1999 – 02 – 18 публикация патента: 20.02.2000
73. Патент 2433521 Российская федерация, МКП H02P7/34, H02P9/30, E02F9. Способ автоматического регулирования возбуждения синхронного приводного двигателя многомашинного агрегата экскаватора. Патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью Компания «Объединенная Энергия»; Малафеев С. И., Серебренников Н. А.: подача заявки: 2010 – 05 – 04 публикация патента: 10.11.2011.
74. Патент 2450404 Российская федерация, МПК H02J3/24. Устройство защиты от потери питания. Алексеев В.Ю., Шабанов В.А.; патентообладатель Уфимский государственный нефтяной технический университет. № 2010152628/07 заявл. 22.12.2010. опубл. 10.05.2012.
75. Патент 2457611 Российская федерация, МКП H02P7/06, H02P7/10,

- H02P7/28. Способ управления потоком управления возбуждения электродвигателя постоянного тока в системе двухзонного регулирования скорости. Патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "«агнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова"» Карандаев А. С., Храмшин В. Р., Храмшин Р. Р., Лукин А. А., Журавлев Ю. П., Шиляев П. В., Головин В. В.: подача заявки: 2011 – 05 – 05 публикация патента: 27.07.2012.
76. Патент 2460198 Российская федерация, МПК H02J9/06. Устройство защиты от потери питания. Шабанов В.А., Кабаргина О.В., Леонтьева Н.А.; патентообладатель Уфимский государственный нефтяной технический университет. № 2011127413/07 заявл. 04.07.2011. опубл. 27.08.2012.
77. Патент 2498495 Российская федерация, МКП H02/P9, H02P9/14.Способ настройки параметров регулятора возбуждения синхронного электрического генератора. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана"» (МГТУ им. Н.Э. Баумана); Бумагин А. В., Гондарь А. В., Борзов А. Б., Лихоеденко К. П., Цыганков В. Ю.: подача заявки: 2012 – 07 – 20 публикация патента: 10.11.2013.
78. Патент на изобретение от 22.06.2018г. № 2658741 «Способ управления током возбуждения синхронного электродвигателя в послеаварийных процессах энергосистемы». Авторы: Ефремов М.М., Ковалев Д.С., Захаров А.Г., Куликов В.Г., Жеребцов А.Л.
79. Переходные процессы в системах электроснабжения: Учебник для вузов. 3 – изд., перераб. и доп./ Г.Г. Пивняк, В.Н. Винославский, А.Я. Рыбалко, Л.И. Несен; Под редакцией акад. НАН Украины Г.Г. Пивняка. – Москва: Энергоатомиздат; Днепропетровский Национальный горный университет, 2003. – 548 с.: ил.

80. Переходные процессы в системах электроснабжения: Учебник/ В.Н. Винославский, Г.Г. Пивняк, Л.И. Несен и др; Под ред. В.Н. Винославского. – К.: Высшая школа. Головное издательство, 1989. – 422 с.
81. Петелин Д.П. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных двигателей. – М. Л., Госэнергоиздат, 1961. – 104 с.
82. Петров Г. Н. Электрические машины. Ч. 2. Асинхронные и синхронные машины; Л. — М: Госэнергоиздат, 1963; 416 с.
83. Повышение устойчивости работы синхронных двигателей 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.
84. Повышение устойчивости синхронных двигателей при кратковременной потере питания / Н.Д. Поляхов, С.В. Михалев // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – №10. 2012. – С. 62 – 68.
85. Правила устройства электроустановок. Седьмое издание. – СПб.: ДЕАН, 2003. 176 с.
86. 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.
87. Проектирование и эксплуатация насосных и компрессорных станций: Учебник для вузов/ А.М. Шаммазов, В.Н. Александров, А.И. Гольянов и др. – М.: ООО «Недра – Бизнесцентр», 2003. – 404 с.
88. Противоаварийная автоматика управления в узлах нагрузки с синхронными электродвигателями большой мощности. Беляев А.В. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2004. – 80 с.
89. 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 Вып.2. – Москва. – 2018. – С. 7 – 12.
90. Розанов Ю.К. Основы силовой электроники. – М.: Энергоатомиздат. 1992. – 296с.: ил.
91. Релейная защита электродвигателей напряжением 6-10 кВ терминалами БМРЗ. Методика расчета/ С.А. Гондуров, С.В. Михалев, М.Г. Пирогов, А.Л. Соловьёв. – Санкт-Петербург: ПЭИПК, 2013.
92. Синтез гарантирующих систем регулирования возбуждения синхронных двигателей газоперекачивающих агрегатов / Ф.Н. Рассказов, Г.Р. Шварц, Л.А. Мигачёва, А.В. Голубовский // Вестник Самарского государственного технического университета, Технические науки. 2004. № 20. – С. 144–151.
93. Синтез оптимального регулятора возбуждения синхронного двигателя газоперекачивающего агрегата / Ф.Н. Рассказов, С.А. Сенин, А.В. Голубовский // Математическое моделирование и краевые задачи: тр. второй Всеросс. научной конференции. Самара, 2005. – С. 215-217.
94. Синхронные приводы. Кори́тин А.М., Бербе́нец И.И., Давиденко И.Х., Евдохин А.И., Зимченко В.Г., Кротенко А.М. – М., «Энергия» 1967. – 80 с.
95. Сиротин А.А. Автоматическое управление электроприводами. – М.: Энергия, 1969. – 560 с.
96. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
97. 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.
98. Справочник по проектированию электрических сетей. Карапетян И.Г.,

- Файбисович Д.Л., Шапиро И.М., М. – НЦ ЭНАС. 2012. – 376 с.
99. Степанов С.Е., Крюков О.В. Повышение устойчивости работы электроприводов центробежных нагнетателей на компрессорных станциях ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. – № 8(710). 2014. С. 50-56
100. Степанов, С Е. Система возбуждения синхронных двигателей турбокомпрессоров с идентификатором угла нагрузки: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.09.03 / Степанов С. Е.; [Место защиты: Нижегород. гос. техн. ун – т им Р.Е. Алексеева]. – Нижний Новгород.
101. Схемы и подстанции электроснабжения. Ополева Г.Н. Справочник. М.: ИД ФОРУМ. 2009. – 480 с.
102. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронного и синхронного двигателей / Под редакцией Л.Г. Мамиконянца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат. 1984. – 240 с., ил.
103. Теория автоматического управления: Учебник для вузов по специальности «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. II. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления. / А.А. Воронов, Д.П. Ким, В.М. Лохин и др.; Под ред. А.А. Воронова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 504 с., ил.
104. Терехов В.М. Системы управления электроприводов. – Академия, 2005. – 300 с.
105. Труды X Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO 15 – Москва 26 – 29 января 2015 г., С. 348 – 366.
106. Универсальная математическая модель силовых трансформаторов и автотрансформаторов/ А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый // ИзвестияТомского политехнического университета. – №7. 2005. – С. 206 – 210.
107. Цифровое возбудительное устройство синхронных двигателей ВТЦСД-Щ. Инструкция по наладке параметров автоматического регулятора 1500-00-00-000 И. ОАО «Научно-исследовательское предприятие общего машиностроения» 18 с.

108. Цифровые возбудители синхронных двигателей ЭГПА / А.В. Голубовский, И.В. Леонтьев // НефтегазЭкспо. – №4. 2005. – С. 88-89.
109. Челазнов А.А., Даки Н.В., Великий С.Н. Тенденции развития и реконструкции систем электроснабжения объектов транспорта газа // Газовая промышленность. №11. 2005.– С.31–33.
110. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. – 6-е изд., доп. и перераб. — М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с, ил.
111. Шабад В.К. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах: учеб. пособие для студентов учреждений высш. проф. образования/В.К. Шабад. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 192 с.
112. Шестаков А.В. Моделирование пуска синхронного двигателя с учетом насыщения и угла магнитного запаздывания // Электротехника, – №4. 2001
113. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000 654 с.
114. Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов. Козаченко А.Н., М. – Нефть и газ. 1999. – 463 с.
115. Электрический привод: Основы электропривода: Учебное пособие. – Изд. 2 – е, доп. и перераб. / Л.П. Шичков. Рос. гос. аграр. заочн. ун – т. М., 2007. – 132 с.
116. Экологическая безопасность и экономика. Ежов Ю.А. // Современные гуманитарные исследования. №2. 2013. С. 30 – 31.
117. Юрганов А.А., Кожевников В.А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов. – Спб.: Наука, 1996. – 138 с.
118. 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.

119. Babescu, M. Considerations Above Synchronous Machine Stability Analysis By
120. Kim H., Huh K.K. Initial rotor position estimation for an integrated started alternator IPM synchronous machine. Proc. of IEEE, IAS, 2002.
121. Using Phase Portraits/ Marius Babescu, Octavian Prostean, Gabriela Prostean, Iosif Szeidert, Cristian Vasar // 6th International Conference on Electromechanical and Power Systems, 2007.
122. Yong T., Lasseter R.H. Coordination of excitation and governing control based on fuzzy logic. PSERC, 1999.

Приложение А

Технические данные электрооборудования

Таблица А.1 - Исходные данные трансформатора ТРДЦН - 630000/220/10

Наименование	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Номинальная мощность трансформатора	$S_{Тном}$	63	МВА
Линейное напряжение обмотки высокого напряжения	$U_{вн}$	220	кВ
Линейное напряжение обмотки низкого напряжения	$U_{нн}$	10,5	кВ
Ток вторичной обмотки номинальный	I_l	1732	А
Напряжение короткого замыкания для обмоток ВН-НН	$u_{к\text{ вн-нн1}}$	11,5	%
Напряжение короткого замыкания для обмоток НН1-НН2	$u_{к\text{ нн1-нн2}}$	21	%
Потери короткого замыкания	ΔP_k	265	кВт

Таблица А.2 - Исходные данные синхронного двигателя СТД 12500

Наименование	Обозначение	Значение	Ед. изм.	Примечание
Номинальная мощность	P_n	12 500	кВт	
Полная мощность	S_n	14200	кВА	
Номинальное линейное напряжение	U_n	10	кВ	
Номинальный ток статора	I_{sn}	820	А	
Номинальный коэффициент мощности (опережающий)	$\cos\varphi_n$	0,9	о.е.	
Частота вращения	n_0	3000	об/мин	
К.П.Д	η_n	97,8	%	
Частота питающей сети	f_1	50	Гц	
Напряжение возбуждения	U_{fn}	212	В	
Ток возбуждения	I_{fn}	295	А	
Постоянная времени цепи возбуждения	T_f	6,72	с	(3÷10)
Индуктивность статора по продольной оси	l_d	2,4	отн. ед	(1÷2,5)
Индуктивность по основному контуру намагничивания	l_m	2,09	отн. ед	(1÷2,4)
Маховой момент ротора	GD^2	1,1	т·м ²	

Таблица А.3 - Базисные величины синхронного двигателя СТД 12500

Базисная величина	Обозначение	Формула	Значение	Ед. изм.
Базисное напряжение	U_B	$\sqrt{2}U_n / \sqrt{3}$	8573	В
Базисный ток	I_B	$\sqrt{2}I_n$	1160	А
Базисная частота	ω_B	$2 \cdot \pi \cdot f_1$	314,1593	1/с
Базисный угол поворота	θ_B	1	1	рад

Таблица А.4 - Производные базисные величины цепи статора двигателя СТД 12500

Производная базисная величина	Формула	Значение	Ед. изм.
Базисное время	$T_B = \theta_B / \omega_B$	0,00318	с
Базисное потокосцепление	$\Psi_B = U_B T_B$	27,30	В·с
Базисное сопротивление	$R_B = X_B = Z_B = U_B / I_B$	7,38	Ом
Базисная индуктивность	$L_B = X_B / \omega_B$	0,0235	Гн
Базисная мощность	$P_B = 3U_B I_B / 2$	14913000	Вт
Базисный момент	$H_B = P_B p_z / \omega_B$	47469	Н·м
Базисная энергия	$W_B = P_B T_B$	47469	Дж
Базисный момент инерции	$J_B = W_B / \omega_B^2$	0,481	кг·м ²

Реализация математических моделей в среде SIMULINK

При использовании приложения Simulink системы MatLab существенно облегчается моделирование режимов функционирования мощного СД для пользователя. Указанный интерфейс в данной разработке используется для облегчения запуска подготовленных модулей вычислительных экспериментов.

Система идентификации моделей и данных

Simulink-модели готовятся для обеспечения возможности проведения основных вычислительных экспериментов.

Идентифицируются следующие наборы данных:

- имена моделей, совпадающие с именами процессов (таблица Б.1); для каждого вычислительного эксперимента готовится своя директория, в качестве корня имени которой используется имя модели; каждая модель и соответствующий ей процесс имеют цифровой номер-идентификатор согласно таблице Б.1;

- имена запоминаемых и визуализируемых мгновенных значений переменных; на данном этапе предусмотрено рассмотрение последнего воспроизведенного периода; впоследствии будет произведено расширение до нескольких периодов или до их определенного числа;

- имена запоминаемых и визуализируемых дискретных значений переменных; в их число входят вектора начальных условий для продолжения воспроизведения процессов (Y_n , $tspan$), а также интегральные показатели, получаемые на основе анализа массивов рассчитанных значений физических переменных.

Таблица Б.1 - Перечень анализируемых процессов

Воспроизведенный режим (этап, интервал, процесс)	Строковый идентификатор процесса/модели	Цифровой идентификатор процесса	Имя библиотеки
Разгон до подсинхронной частоты вращения	pusk_asynchron	1	
Втягивание в синхронизм	pusk_synchron	2	
Статический режим с простейшей схемой питания	static_1	3	
Статический режим с упрощенной схемой электроснабжения (circuit 7)	static_7	4	
1 этап режима форсировки	forse_1	5	
2 этап режима форсировки	forse_2	6	
3 этап режима форсировки	forse_3	7	
Переход к статическому режиму с заданным коэффициентом мощности в схеме circuit_8_0 при одноконтурной САУ и простейшем интегральном регуляторе	sau_1_circuit_8_0	8	
Переход к статическому режиму с заданным коэффициентом мощности в схеме circuit_8_0 при двухконтурной САУ с аналогами цифрового регулятора	sau_2_circuit_8_0	9	
Статический режим при работе одного двигателя с разомкнутой САУ	circuit_8_dqf_M1	10	circuit_8
Статический режим при работе двух двигателей в одной секции с разомкнутой САУ	circuit_8_dqf_M1_M2	11	circuit_8
Переходный процесс пуска одного из двигателей в одной секции с разомкнутой САУ	circuit_8_dqf_dq42	12	circuit_8
Втягивание в синхронизм М2 при работе с М1 в одной секции с разомкнутой САУ	circuit_8_dqf_dqf	13	circuit_8
Переходный процесс пуска одного двигателя с включением форсировки у второго двигателя с первым алгоритмом выхода из форсировки	forse_1_circuit_9	14	circuit_9
Переходный процесс пуска одного двигателя с включением форсировки у второго двигателя со вторым алгоритмом выхода из форсировки	forse_2_circuit_9	15	circuit_9

Окончание таблицы Б.1

Воспроизведенный режим (этап, интервал, процесс)	Строковый идентификатор процесса/модели	Цифровой идентификатор процесса	Имя библиотеки
Переходный процесс пуска одного двигателя с включением форсировки у второго двигателя с осложнениями при изменениях алгоритма выхода из форсировки	forse_3_circuit_9	16	circuit_9
Статический режим модели dqf при идеальном питающем напряжении на статоре; с подбором начальных условий для установившегося режима	STD2_12500_var_1_1	17	circuit_3
Статический режим с возможностью задания различных видов пофазной асимметрии	Sub_5_2	18	circuit_5
Статический режим с предварительным воспроизведением исходного статического режима	start_circuit_6_static	19	circuit_6
Статический режим с формированием массивов внешней среды	circuit_7	20	circuit_7
Переходный процесс выхода на заданный коэффициент мощности	SAU	21	SAU

Приложение В

Акт внедрения результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ
 Заместитель генерального директора
 по эксплуатации компрессорных
 станций

И.А. Асосков
 _____ 2016 г.



АКТ

внедрения нового алгоритма цифрового возбудительного устройства
 высоковольтных синхронных электродвигателей СТД-12500
 газоперекачивающих агрегатов на электроприводных компрессорных
 станциях ООО «Газпром трансгаз Сургут».

Применявшийся ранее в газотранспортной системе ООО «Газпром трансгаз Сургут» алгоритм цифрового возбудительного устройства типа ВТЦ-СД-Щ предусматривал при выходе из режима «форсировка тока возбуждения» управление током возбуждения с помощью ПИД-регулятора, который не обеспечивал плавное снижение тока, приводил к перерегулированию тока и сваливанию СТД-12500 в асинхронный режим с последующим аварийным остановом.

В целях повышения динамической устойчивости работы СТД-12500 на электроприводных компрессорных станциях разработан новый алгоритм цифровых возбудительных устройств типа ВТЦ-СД-Щ, который после режима «форсировка тока возбуждения» предусматривает:

- плавное снижение тока, до значения, при котором $\cos \varphi = 1$;
- отсутствие перерегулирования тока;
- полный контроль всех параметров работы возбудительного устройства;
- последующее включение ПИД-регулятора для дальнейшего автоматического управления током возбуждения СТД-12500.

Скорость снижения тока возбуждения по новому алгоритму регулируется параметром «Delta cos форсировка» в диапазоне от 1 до 50 о.е.

Новый способ управления током возбуждения и алгоритм АРВ в послефорсировочных режимах синхронных высоковольтных электроприводов СТД-12500 газоперекачивающих агрегатов, предложенный главным энергетиком–начальником отдела Жеребцовым А.Л. и специалистами АО «НИПОМ» Ефремовым М.М., Ковалевым Д.В., Захаровым А.Г., внедрен на всех электроприводных компрессорных станциях ООО «Газпром трансгаз Сургут» (за исключением КС-11 Богандинская).

Заместитель начальника ОГЭ
ООО «Газпром Трансгаз Сургут»



В.В. Киреев

Заместитель начальника ИТЦ



Г.А. Смирнов

Ведущий инженер
по наладке и испытаниям ИТЦ



Е.Е. Жуков

Сведения по патенту на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2658741

**Способ управления током возбуждения синхронного
электродвигателя в послеаварийных процессах
энергосистемы**

Патентообладатель: *Акционерное общество "Научно-исследовательское предприятие общего машиностроения" (АО "НИПОМ") (RU)*

Авторы: *Ефремов Михаил Михайлович (RU), Ковалев Денис Валерьевич (RU), Захаров Алексей Геннадьевич (RU), Куликов Владимир Геннадьевич (RU), Жеребцов Андрей Леонидович (RU)*

Заявка № 2017118298

Приоритет изобретения 25 мая 2017 г.

Дата государственной регистрации в

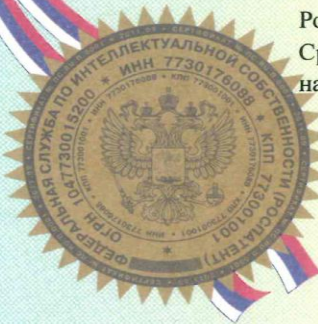
Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 22 июня 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 25 мая 2037 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 658 741** (13) **C1**

(51) МПК
H02H 7/08 (2006.01)
H02P 25/022 (2016.01)
H02P 1/46 (2006.01)
H02P 9/14 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

(52) СПК
H02H 7/08 (2006.01); *H02P 25/022* (2006.01); *H02P 9/14* (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2017118298, 25.05.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
 25.05.2017

Дата регистрации:
 22.06.2018

Приоритет(ы):
 (22) Дата подачи заявки: 25.05.2017

(45) Опубликовано: 22.06.2018 Бюл. № 18

Адрес для переписки:
 603106, г. Нижний Новгород, а/я 15, ООО
 Патентно-правовая фирма "Петухов и
 Партнеры"

(72) Автор(ы):

Ефремов Михаил Михайлович (RU),
 Ковалев Денис Валерьевич (RU),
 Захаров Алексей Геннадьевич (RU),
 Куликов Владимир Геннадьевич (RU),
 Жеребцов Андрей Леонидович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Акционерное общество
 "Научно-исследовательское предприятие
 общего машиностроения" (АО "НИПОМ")
 (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
 о поиске: RU 2239936 C2, 19.11.2004. RU
 2242080 C2, 10.12.2004. RU 2385528 C1,
 27.03.2010. GB 1430844 A, 07.04.1976. DE
 102007057499 A1, 01.05.2013. US 4297739 A,
 27.10.1981. WO 2008142756 A1, 27.10.1981. EP
 2587661 A1, 10.05.2013. CN 10404087 A,
 10.09.2014.

(54) Способ управлением током возбуждения синхронного электродвигателя в послеаварийных процессах энергосистемы

RU
 2
 6
 5
 8
 7
 4
 1
 C
 1

Приложение Д

Анализ нарушений и аварийных остановов в работе СТД-12500 ГПА за 2011-2018гг.

Анализ нарушений и аварийных остановов электроприводных ГПА СТД-12500 за 2011-2018гг.

№п/п	Кол-во нарушений и причин АО ГПА СТД-12500	год, кол-во нарушений / количества АО								Всего за 8 лет:
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
1	Кол-во нарушений внешнего электроснабжения/кол-во АО ГПА (Провалы напряжения в сетях вн. электроснабжения)	10н / 18 АО	7н / 14 АО	7н / 20 АО	3н / 3 АО	2н / 4 АО	3н / 9 АО	1н / 0 АО	2н / 0 АО	35/67
2	Нарушения в работе ГПА по режиму работы КЦ и пусках СД ГПА	2н / 2 АО	1н / 3 АО	2н / 2 АО	2н / 2 АО	2н / 2 АО	1н / 1 АО	0	0	10/12
3	Нарушения вспомогательного оборудования ГПА (эл. двигатели СТД, МНУ, АЩСУ, системы возбуждения, КТП КЦ)	9н / 14 АО	4н / 5 АО	4н / 4 АО	6н / 6 АО	1н / 1 АО	4н / 4 АО	2н / 2 АО	2н / 2 АО	32/38
Всего нарушений за год:		21н / 34 АО	12н / 22 АО	13н / 26 АО	11н / 11 АО	5н / 7АО	8н / 14 АО	3н / 2 АО	3н / 2 АО	ИТОГО: 77/117

Заместитель начальника ОГЭ



В.В. Киреев

