

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН**

**Худжандский политехнический институт  
Таджикского технического университета  
имени академика М.С. Осими**

УДК 621.313: 621.313-57

На правах рукописи



**ДАДАБАЕВ ШАХБОЗ ТОЛИБДЖОНОВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ БЕСПЕРЕБОЙНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОРОСИТЕЛЬНЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ  
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ИХ НАГРУЗОК**

**Диссертация**

на соискание учёной степени кандидата технических наук  
по специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Грачева Елена Ивановна

Худжанд – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....</b>	<b>6</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>8</b>
<b>ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОРОСИТЕЛЬНЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ.....</b>	<b>14</b>
1.1. Общие сведения.....	14
1.2. Структура оросительной насосной станции.....	17
1.3. Анализ системы электроснабжения оросительной насосной станции первого подъема.....	20
1.4. Особенности пуска высоковольтных электродвигателей насосных агрегатов.....	28
1.5. Взаимное влияние пусковых режимов работы насосных агрегатов оросительной станции.....	32
Выводы по первой главе.....	34
<b>ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ПРИ РАБОТЕ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ.....</b>	<b>35</b>
2.1. Расчет энергетических балансов насосных агрегатов.....	35
2.2. Построение характеристик напора насосных агрегатов при различной скорости вращения рабочего колеса.....	43
2.3. Определение потерь мощности в насосном агрегате при регулировании производительности насоса напорной задвижкой.....	47
2.4. Особенности регулируемого электропривода насосных агрегатов.....	48
Выводы по второй главе.....	52
<b>ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОРОСИТЕЛЬНОЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ.....</b>	<b>54</b>
3.1. Математическое описание элементов системы электроснабжения	

оросительной насосной станции.....	54
3.1.1. Математическое описание трансформатора и линии электропередач.....	54
3.1.2. Математическое описание асинхронного электродвигателя.....	60
3.1.3. Математическое описание явнополюсного синхронного электродвигателя.....	67
3.2. Компьютерное моделирование трансформаторов.....	71
3.3. Компьютерное моделирование линии электропередач.....	75
3.4. Компьютерное моделирование пусковых режимов электродвигателей при идеальной сети.....	77
3.4.1. Моделирование прямого пуска электродвигателей насосных агрегатов.....	77
3.4.2. Моделирование плавного пуска электродвигателей насосных агрегатов.....	86
3.5. Компьютерное моделирование пусковых режимов синхронного электродвигателя насосной станции при реальной сети.....	96
3.6. Исследование переходных процессов системы электроснабжения оросительной насосной станции при прямых пусках электродвигателей....	98
Выводы по третьей главе.....	102
<b>ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУСКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ С ИНВЕРТОРОМ ТОКА.....</b>	<b>104</b>
4.1. Общие сведения и отличительные особенности инверторов тока.....	104
4.2. Моделирование инвертора тока.....	110
4.3. Моделирование параметров пусковых режимов асинхронных и синхронных электродвигателей насосных агрегатов с инвертором тока.....	113
4.4. Исследование переходных процессов системы электроснабжения оросительной насосной станции при пуске электродвигателя с инвертором тока.....	119

4.5. Компьютерное моделирование процесса нагрева обмоток электродвигателя насосных агрегатов и проводов линий электропередач...	123
4.5.1. Моделирование нагрева обмоток электродвигателей насосных агрегатов при пусковых режимах работы.....	123
4.5.2. Моделирование нагрева проводов линий электропередач.....	127
4.6. Сравнительный анализ результатов моделирования системы электроснабжения насосной станции при разных способах запуска насосов.....	128
Выводы по четвертой главе.....	130
<b>ГЛАВА 5. ПОВЫШЕНИЕ БЕСПЕРЕБОЙНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ ПРИ ПУСКОВЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ.....</b>	<b>131</b>
5.1. Схема замещения сетевого трансформатора и питающей энергосистемы.....	131
5.2. Расчет параметров механических характеристик электродвигателей при остаточном напряжении на шинах источников питания.....	134
5.2.1. Асинхронный электропривод.....	134
5.2.2. Синхронный электропривод.....	138
5.3. Исследование провалов напряжения при пуске асинхронных и синхронных электродвигателей.....	141
5.3.1. Асинхронный электропривод.....	141
5.3.2. Синхронный электропривод.....	145
5.4. Расчет провалов напряжения в системе электроснабжения насосной станции.....	147
5.5. Анализ рынка преобразовательных устройств для систем плавного пуска высоковольтных электродвигателей.....	150
5.6. Экономические аспекты проведенных исследований.....	152
5.6.1. Анализ основных экономических показателей Согдийской области.....	152

5.6.2. Техничко-экономическое обоснование плавного пуска высоковольтных электродвигателей насосных станций.....	154
5.7. Разработка рекомендаций по повышению бесперебойности работы систем электроснабжения насосных станций.....	160
Выводы по пятой главе.....	163
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	165
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	167
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1</b> .....	184
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2</b> .....	185
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3</b> .....	186
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 4</b> .....	187
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 5</b> .....	188
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 6</b> .....	189
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 7</b> .....	190

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

- АВК – асинхронно-вентильный каскад  
АД – асинхронный двигатель  
АИТ – автономный инвертор тока  
ВД – вентильный двигатель  
ВДС – вертикальный синхронный двигатель  
ВРУ – высоковольтное распределительное устройства  
ВСД – высоковольтный синхронный двигатель  
ВЭД – высоковольтный электродвигатель  
ГОСТ – государственный стандарт  
ДПТ – двигатель постоянного тока  
ИН – инвертор напряжения  
ИТ – инвертор тока  
КЗ – короткое замыкание  
КПД – коэффициент полезного действия  
ЛЭП – линия электропередачи  
МХ – механическая характеристика  
НА – насосный агрегат  
НС – насосная станция  
о.е. – относительные единицы  
ОНС – оросительная насосная станция  
ПКЭ – показатели качества электроэнергии  
ПЧ – преобразователь частоты  
РЭП – регулируемый электропривод  
САУ – система автоматического управления  
СД – синхронный двигатель  
СПП – система плавного пуска  
СР – сглаживающий реактор  
СУ – система управления

СУЭП – система управления электропривода  
СЭС – система электроснабжения  
ТР – токоограничивающий реактор  
ТТ – трансформатор тока  
ТЭО – технико-экономическое обоснование  
УВ – управляемый выпрямитель  
УМИ – управление мелиорации и ирригации  
УПП – устройство плавного пуска  
ЦН – центробежный насос  
ЦРП – центральная распределительная подстанция  
ЧРЭП – частотно-регулируемый электропривод  
ШИМ – широтно-импульсная модуляция  
ШПТУ-ВИ – шкаф пусковой тиристорный – выпрямитель-инвертор  
ЭД – электродвигатель  
ЭДС – электродвижущая сила  
ЭМС – электромагнитная совместимость  
ЭМХ – электромеханическая характеристика  
ЭП – электропривод  
ЭС – электроснабжение  
ЭЭ – электроэнергия  
GTO – gate turnoff thyristor  
IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor  
THD – Total Harmonic Distortion (содержание высших гармоник)

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** В настоящее время, в среднем, 40-60% всей вырабатываемой в Таджикистане электроэнергии расходуются на промышленный и сельскохозяйственный сектор экономики страны. В обоих секторах основными потребителями электроэнергии (ЭЭ) являются электроприводы (ЭП) переменного тока. Пик потребления ЭЭ указанных отраслей народного хозяйства был зафиксирован в 2012 г, тогда электропотребление составило 59%. В 2017 году потребление ЭЭ в сельскохозяйственном секторе страны составило более 27% от общего объема вырабатываемой ЭЭ. При этом основными потребителями ЭЭ являются ЭП оросительных насосных станций (ОНС). Данные объекты оснащены нерегулируемыми ЭП, причем электромагнитная совместимость (ЭМС) электрооборудования не учитывается. Такое состояние приводит к частым сбоям и авариям в насосных станциях (НС), внеплановым отключениям питающей сети и значительным финансовым затратам для их устранения. ЭП НС включают в себя высоковольтные асинхронные (АД) и синхронные двигатели (СД), для которых основной сложностью являются пусковые переходные процессы. Для бесперебойной работы электрооборудования ОНС и повышения надежности энергосистемы, в первую очередь, необходимо учесть пусковые режимы ЭП насосных агрегатов (НА), а также их влияние на другие НС. В настоящее время внедряются системы плавного пуска (СПП) для ВЭД, однако, без детального обследования агрегатов и ЭП ОНС данное мероприятие считается нецелесообразным.

В Согдийской области для водоснабжения сельского хозяйства городов и районов области используется более 110 НС, питающихся на напряжении 6 и 10 кВ, и 86 станций - на напряжении 0,4 кВ. Системы электроснабжения каждой НС соединены между собой и создают единую энергосистему Согдийской области. Электропотребление НС области составляет, в среднем, 500 - 600 МВт·ч в год. Каждый запуск высоковольтных электродвигателей



(ВЭД) данных станций приводит к провалам напряжения в питающей сети и негативно влияет на работу ЭП соседних станций. Например, в 2018 году на НС Согдийской области было зафиксирована более 48 отключений, из них 38 - по причине провала и отклонения напряжения в сети. Данное обстоятельство свидетельствует о недостаточной устойчивости энергосистемы и неучете ЭМС потребителей. Для повышения бесперебойности системы электроснабжения ОНС и увеличения технического ресурса электрооборудования необходимо исследование режимных параметров электродвигателя (ЭД), его пусковых характеристик, нагрева обмоток и взаимного влияния ЭП и системы электроснабжения ОНС.

**Степень разработанности темы.** Для определения путей повышения бесперебойности системы электроснабжения НС оросительных систем необходимы такие исследования, как энергоаудит, энергетическое обследование, математическое и компьютерное моделирование. В настоящее время отсутствуют методики и модели, при помощи которых можно в достаточной мере исследовать пусковые переходные процессы ЭП НС, а также их влияние на питающую сеть при разных способах пуска ЭД больших мощностей ОНС.

Теоретические основы данной проблемы заложены в трудах отечественных ученых Садыкова Х.Р., Юлдашева З.Ш., Рахимова О.С., Касобова Л.С. и других ученых. За рубежом для решения проблем в данной области большой вклад внесли такие ученые, как Горев А.А., Аракелян А.К., Афанасьев А.А., Гамазин С.И., Ковач К.П., Ларионов В.Н., Лезнов Б.С., Онищенко Г.Б., Поздеев А.Д., Мещеряков В.Н., Zimmermann J.A., Chapman S., Nevelsteen J., Aragon H., Collieran P.J., Rogers W.E. и др.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы. Полученные в работе научные результаты соответствуют п.п. 3.1 «Разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров,

показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии в целом и их основного и вспомогательного оборудования», п.п. 3.5 «Разработки и исследования в области энергосбережения и ресурсосбережения при производстве тепловой и электрической энергии, при транспортировке и использовании тепловой, электрической энергии и энергоносителей в энергетических системах, комплексах и системах энергоснабжения», п.п. 3.9 «Разработка методов расчета и моделирования установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости энергетических систем, комплексов, электрических станций и сетей, включая технико-экономическое обоснование технических решений, разработка методов управления режимами их работы», паспорта специальности.

**Цель исследования** – повышение бесперебойности работы систем электроснабжения оросительных насосных станций при изменении их нагрузок и увеличение технического ресурса электрооборудования ОНС.

Задачи исследования:

1. Анализ способов повышения бесперебойности работы системы электроснабжения ОНС.
2. Разработка компьютерной модели системы электроснабжения ОНС для исследования переходных процессов в сети.
3. Разработка компьютерной модели асинхронного и синхронного ЭП НА оросительных систем для исследования пусковых переходных процессов и нагрева обмоток ВЭД при различных способах пуска.
4. Разработка компьютерной модели для исследования пусковых режимов ВЭД с инвертором тока.
5. Технико-экономическое обоснование предложенного технического решения.

**Объект исследования** – высоковольтные асинхронные и синхронные ЭП ОНС.

**Предмет исследования** – бесперебойность электроснабжения и увеличение технического ресурса электрооборудования ОНС.

**Научная новизна.** Основные результаты диссертации являются новыми и заключаются в следующем:

1. Разработаны компьютерные модели асинхронного и синхронного ЭП, отличающиеся от известных моделей тем, что позволяют проводить комплексные исследования параметров ЭП при прямом и плавном пуске, включающих в себя фазные токи двигателя, скорость вращения его ротора, электромагнитный момент, а также нагрев обмоток и провалы напряжения.

2. Разработана компьютерная модель асинхронного и синхронного ЭП с инвертором тока, позволяющая проводить детальный анализ параметров ЭП при пуске с учётом внешних возмущений.

3. Разработаны компьютерные модели, с помощью которых возможно регулировать пусковые режимы электрооборудования - двигателей и НА - при использовании инвертора тока и эффективно внедрять мероприятия по повышению бесперебойности работы СЭС ОНС. Данный способ пуска двигателей отличается от существующих минимальными значениями пусковых токов, строгим ограничением пусковых знакопеременных электромагнитных моментов электродвигателя и минимизацией провалов напряжения в сети, а также повышением устойчивости работы энергосистем, объединяющих ОНС.

**Теоретическая значимость работы.** Заключается в развитии теории и методов расчёта параметров и моделирования энергосистемы для ОНС.

**Практическая ценность работы.** Использование предложенных выводов и рекомендаций способствует эффективному управлению ЭП НС оросительных систем, минимизации провалов напряжения в сети, повышению бесперебойности энергосистемы, увеличению технического ресурса ЭД НС и электрооборудования ОНС в целом.

**Методы исследования.** При проведении исследований применялись методы теории ЭП и электротехники, методы математического и компьютерного моделирования, а также метод энергетических балансов при

работе НА. Результаты научной работы получены с помощью экспериментальных и компьютерных исследований.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Компьютерная модель для исследования пусковых режимов ВЭД НА, а также нагрева обмоток ЭД и провалов напряжения в сети при пусковых режимах.
2. Альтернативный и перспективный способ безударного пуска ВЭД НА систем орошения.
3. Компьютерная модель для исследования пусковых режимов ЭП с инвертором тока.
4. Результаты технико-экономического анализа и обоснования внедрения СПП для ЭД НА ОНС.
5. Рекомендации по повышению бесперебойности и надежности работы системы электроснабжения ОНС, имеющих существенные значения провалов напряжения при пуске ЭД.

**Достоверность и обоснованность.** Результаты исследований приняты к использованию на НС АНС-1 Аштского района Республики Таджикистан, а также в СПП «Джавони» г. Худжанда и внедрены в учебный процесс на кафедре «Электроснабжение и Автоматика» Худжандского политехнического института Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Автоматизированный электропривод». Результаты работы сравнены с исследованиями зарубежных ученых России, США и др. стран.

**Личный вклад автора.** Постановка задач для исследования выполнялась совместно с научным руководителем. Основные результаты работы получены автором самостоятельно.

**Апробация результатов работы.** Результаты работы докладывались на научно-практических конференциях: «Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии» (г. Екатеринбург, Россия, 2015); «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи» (г.

Томск, Россия, 2016); «Перспективные информационные технологии» (г. Самара, Россия, 2017, 2018); «Энергетические системы» (г. Белгород, Россия, 2017-2020); «САПР и моделирование в современной электронике» (г. Брянск, Россия, 2019, 2021); «Наука и образование» (г. Мурманск, Россия - 2019); «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности» (г. Чебоксары, Россия, 2019); «Современные проблемы и перспективы развития науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, Россия, 2020); «Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте» (г. Вологда, Россия, 2020); «High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference» (HSTED-2020), (г. Прага, Чехия); «Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020)», (г. Санкт-Петербург, Россия, 2020); «Sustainable Energy Systems: innovative perspectives» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2021); «International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA-2022)» (Липецк, Россия, 2022).

**Основные публикации.** По теме диссертации опубликовано 39 печатных работ в журналах и сборниках, в том числе 17 публикаций в рецензируемых научных журналах ВАК, 7 статей в индексируемых международных базах данных SCOPUS и 15 публикаций в других изданиях и международных научных конференциях. Внедрение результатов исследования подтверждено 3 актами.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация представлена на 192 страницах, содержит введение, 5 глав, заключение, 133 литературных источника, 7 приложений, 20 таблиц и 121 рисунок.

## ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОРОСИТЕЛЬНЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

### 1.1. Общие сведения

По данным управления мелиорации и ирригации (УМИ) в Согдийской области в сезонный период полива 2018 и на начало летнего сезона 2019, в НС области зарегистрировано более 78 случаев внезапных и внеплановых отключений НА. Для водоснабжения сельского хозяйства городов и районов области используется более 110 НС, питающихся на напряжении 6 и 10 кВ, и более 86 НС на напряжении 0,4 кВ. Электропотребление НС области составляет, в среднем, 500 - 600 МВт·ч в год (рисунок 1.1).

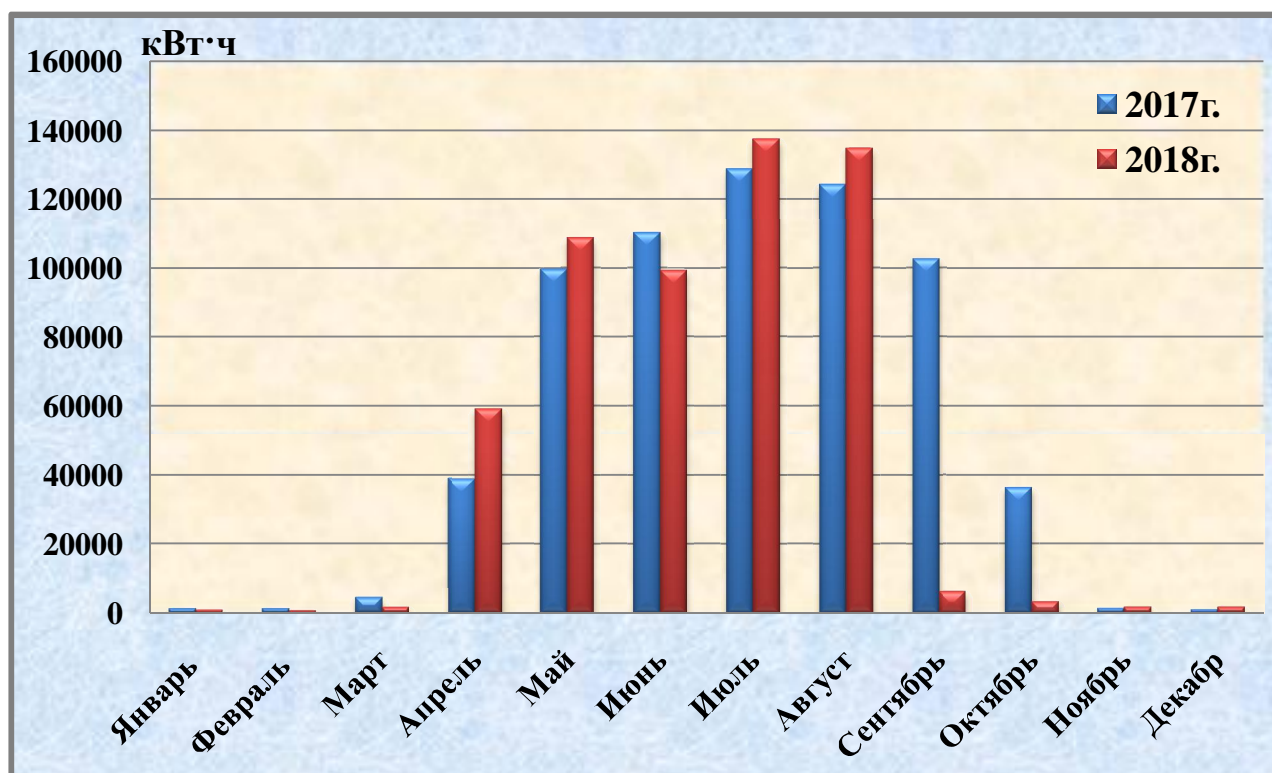


Рисунок 1.1. График потребления электроэнергии НС Согдийской области за 2017 - 2018 г.

Пик потребления электроэнергии приходится на период с мая до сентября, принято считать этот период сезоном орошения земель в стране [13 – А]. Выработка и потребление электроэнергии потребителями Республики Таджикистан за 2015 - 2020 г.г. приведена на рисунках 1.2 и 1.3 [1].



Рисунок 1.2. Выработка электроэнергии в Республике Таджикистан за 2015-2020 гг.

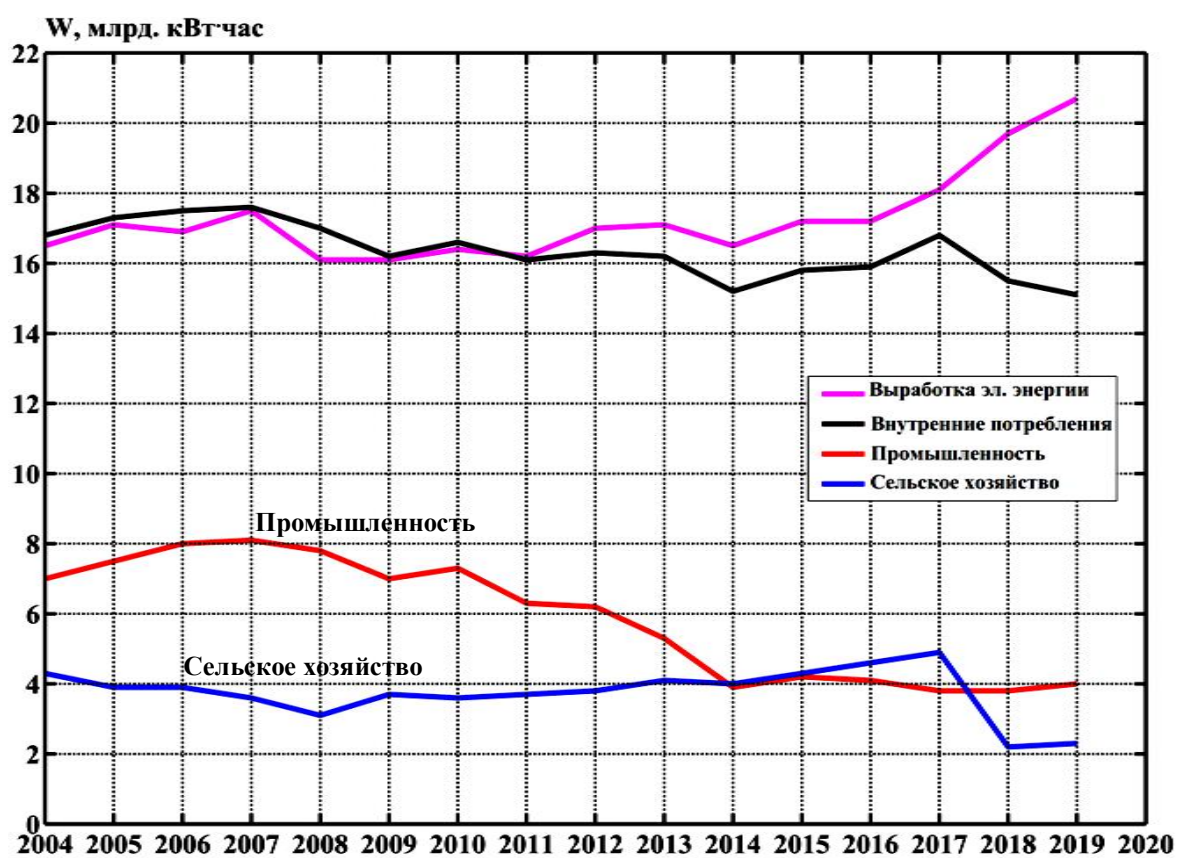


Рисунок 1.3. Потребление электроэнергии в Республике Таджикистан по секторам народного хозяйства

В Приложении 1 (Таблица 1.1) приведены статистические данные об отключениях и причинах отключений НА Аштского района Согдийской

области. Приведенные данные являются иллюстрацией сложной ситуации технического состояния в электроэнергетической системе области. Исследование проблемы показывает, что отклонения напряжения в энергосистеме Согдийской области, возникают при пусковых режимах ЭД НА. Крупные НА с ВЭД установлены на ОНС в Аштском, Б. Гафуровском и Зафарabadском районах. Каждый запуск НА на этих объектах вызывают отклонения напряжения, провалы напряжения, перенапряжение и т.п. [2, 3]. По статистическим данным УМИ, по Согдийской области Республики Таджикистан за 2018-2019 гг., только в ОНС Б. Гафуровского и Аштского района по причине низкой надежности системы электроснабжения, были зафиксированы 27 отключений НА (рисунок 1.4).

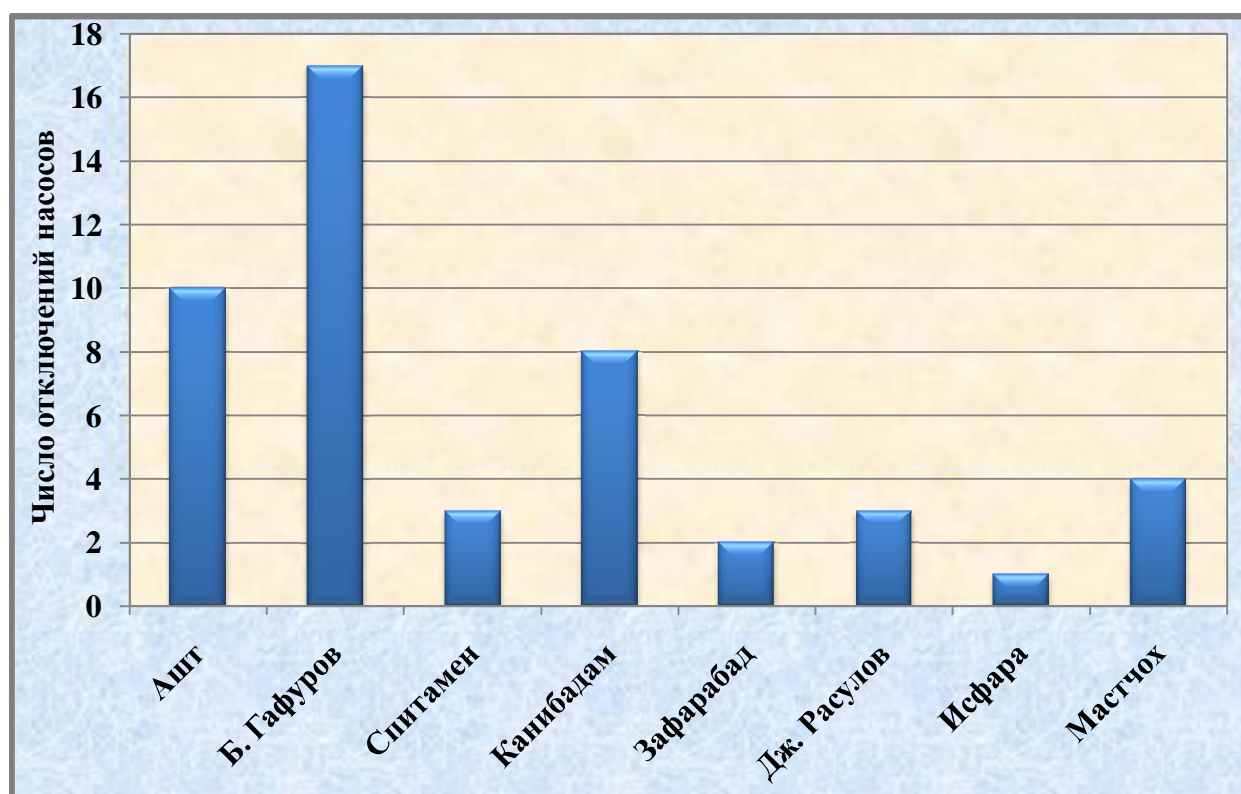


Рисунок 1.4. График отключения насосных агрегатов в НС районов Согдийской области за период 2018 г.

Недостаточное внимание к указанным проблемам ведет к частым отключениям электрооборудования в системы электроснабжения ОНС и срабатыванию релейной защиты. Самыми проблемными районами являются Б. Гафуровский и Аштский районы Согдийской области, в которых наблюдается



65% отключений из всех зарегистрированных в области. По причине перенапряжения и мигания в сети (отклонение напряжения) в указанных районах были произведены 22 отключения агрегатов НС. В развитых странах для повышения надежности системы электроснабжения ОНС применяются безударные системы пуска ВЭД [4]. Такие системы обеспечивают уменьшения токов и отклонения напряжения при пусковых режимах работы [39 – А]. Для этих целей применяют устройства плавного пуска (УПП) или преобразователей частоты (ПЧ). В среднем цены на ПЧ в 2-3 раза дороже, чем на УПП, что дает основание для проведения технико-экономической оценки при выборе систем безударного пуска [5].

Альтернативным и перспективным способом безударного пуска ВЭД ОНС, предлагаемым в данной работе, является пуск ВЭД с инвертором тока (ИТ). Такой способ пуска для ВЭД ОНС недостаточно изучен и потому нуждается в новых исследованиях, особенно при применении для запуска ВЭД ОНС. По сведениям некоторых производителей таких типов устройств, значения пусковых токов возрастают незначительно - на 30 % по сравнению с номинальными токами. Цена оборудования при этом ниже, чем цена обычных ПЧ [35 – А]. Технические и стоимостные преимущества повышают целесообразность внедрения для пуска ВЭД ИТ после проведения технико-экономического обоснования (ТЭО).

## **1.2. Структура оросительной насосной станции**

Аштский каскад НС является уникальным проектом, где установлены более 60 НА в 8 НС, разделенных на пять подъемов длиной 33621 м трубопроводов [13 – А]. В помещении машинного зала установлены четыре НА, внешний вид которых приведен на рисунке 1.5. Агрегаты АНС-1 представляют собой центробежные насосы (ЦН) типа 1200В-6,3/100-А (52В-11) с паспортными данными:  $Q = 22600,0 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $H = 88,0 \text{ м}$ , КПД  $\eta = 0,88$ ,  $n_n = 375,0 \text{ об/мин}$ , диаметр рабочих колес  $D = 2200,0 \text{ мм}$ .



Рисунок 1.5. Насосные агрегаты ОНС АНС-1

В качестве ЭП для насосов служат СД типа ВДС2-325/69-16 с паспортными данными:  $P_n = 8000$  кВт,  $U_{ном} = 10$  кВ, КПД  $\eta = 0,9$ ,  $n_n = 375$  об/мин. Внешний вид двигателей серии ВДС2 показан на рисунке 1.6 [6].

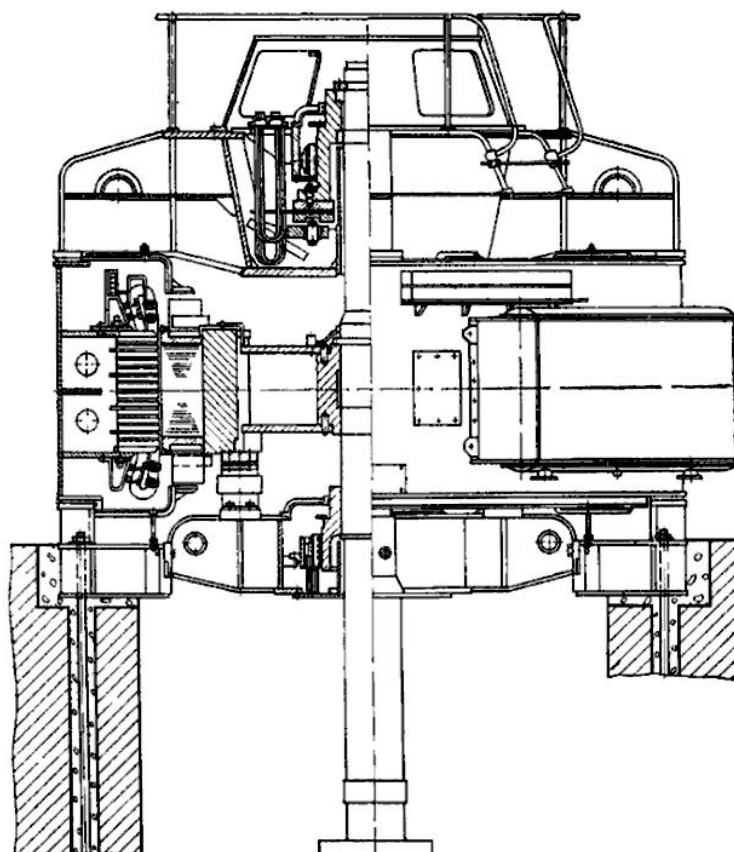


Рисунок 1.6. Вид вертикального синхронного ЭД серии ВДС2

В 1979 году были сданы в эксплуатацию агрегаты первых трех подъемов, а оборудование последнего, пятого подъема был сдан в эксплуатацию в 1987 году, после чего суммарная орошаемая площадь достигла более 12000 гектаров. Значительную часть мощности в данном каскаде потребляет НС первого подъема АНС-1.

В АНС-1 забор воды осуществляется через большой водоприёмный канал из реки Сырдарья. В АНС-1 установлены три вспомогательных агрегата для дренажа воды. Вспомогательные насосы типа Д4000-95 оснащены ЭД серии СДНЗ-15-49-6УЗ:  $P_H = 1600$  кВт,  $U_{НОМ} = 10$  кВ,  $n_H = 1000$  об/мин, КПД  $\eta = 0,9$ . На рисунке 1.7 изображена  $Q$ - $H$  характеристика насоса ВДС2-325/69-16 [7, 8].

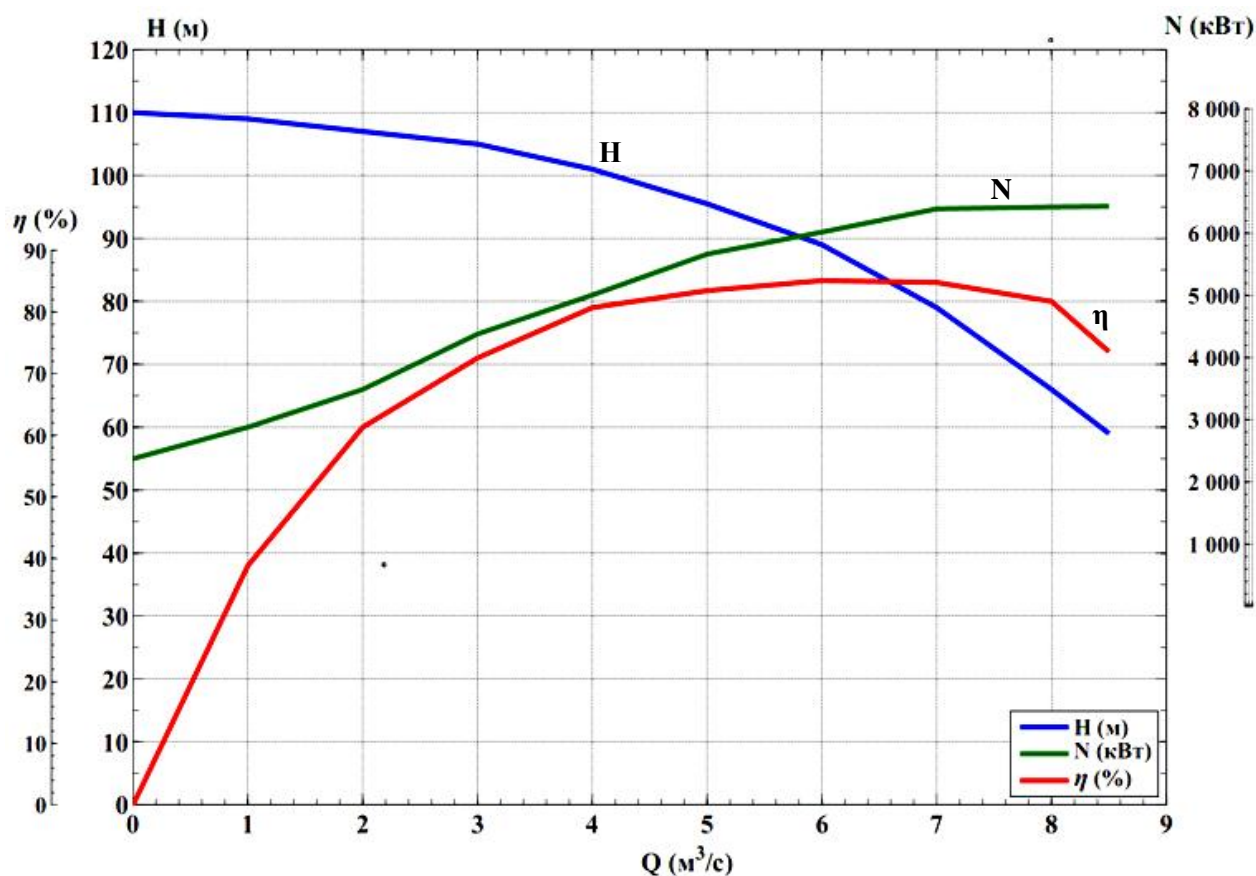


Рисунок 1.7.  $Q$ - $H$  характеристика насоса 1200В-6,3/100-А (52В-11)

ЦН установлены ниже уровня воды реки Сырдарья на 5 метров и это дает в среднем давление 0,5 атм. на вход насоса. На рисунке 1.8 показано здание НС в продольном и поперечном разрезе.

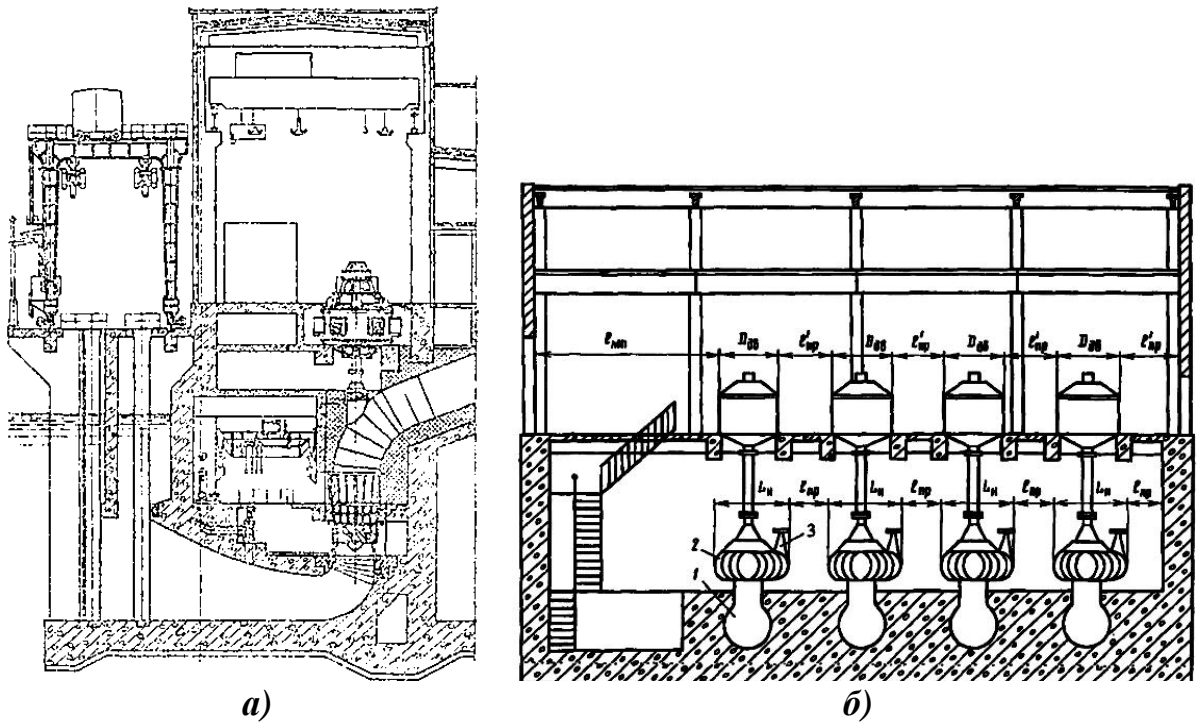


Рисунок 1.8. Здание насосной станции блочного типа.

а) и б) – поперечный и продольный разрезы: 1 – подводящая труба;  
2 – вертикальный центробежный насос; 3 – запорная арматура

Управление НА при позициях «пуск» и «стоп» выполняются в ручном режиме. Автоматика предназначена для защиты электрооборудования НС.

### 1.3. Анализ системы электроснабжения оросительной насосной станции первого подъема

ОНС первого подъёма АНС-1 выполняет передачу значительного объёма воды для орошения земель Аштского района Согдийской области Республики Таджикистан. Производительность АНС-1 по проекту составляла 1,78 млн. м<sup>3</sup> воды в сутки. В АНС-1 установлены 4 агрегата, из которых один резервный, а три - рабочие (рисунок 1.9). Основная проблема НС АНС-1 заключается в том, что оборудование данного объекта давно не модернизировалось, что приводит к большим потерям и затратам на электроэнергию. Технический ресурс электрооборудования НС находится на критическом уровне и вопрос модернизации ЭП станции АНС-1 является актуальным.

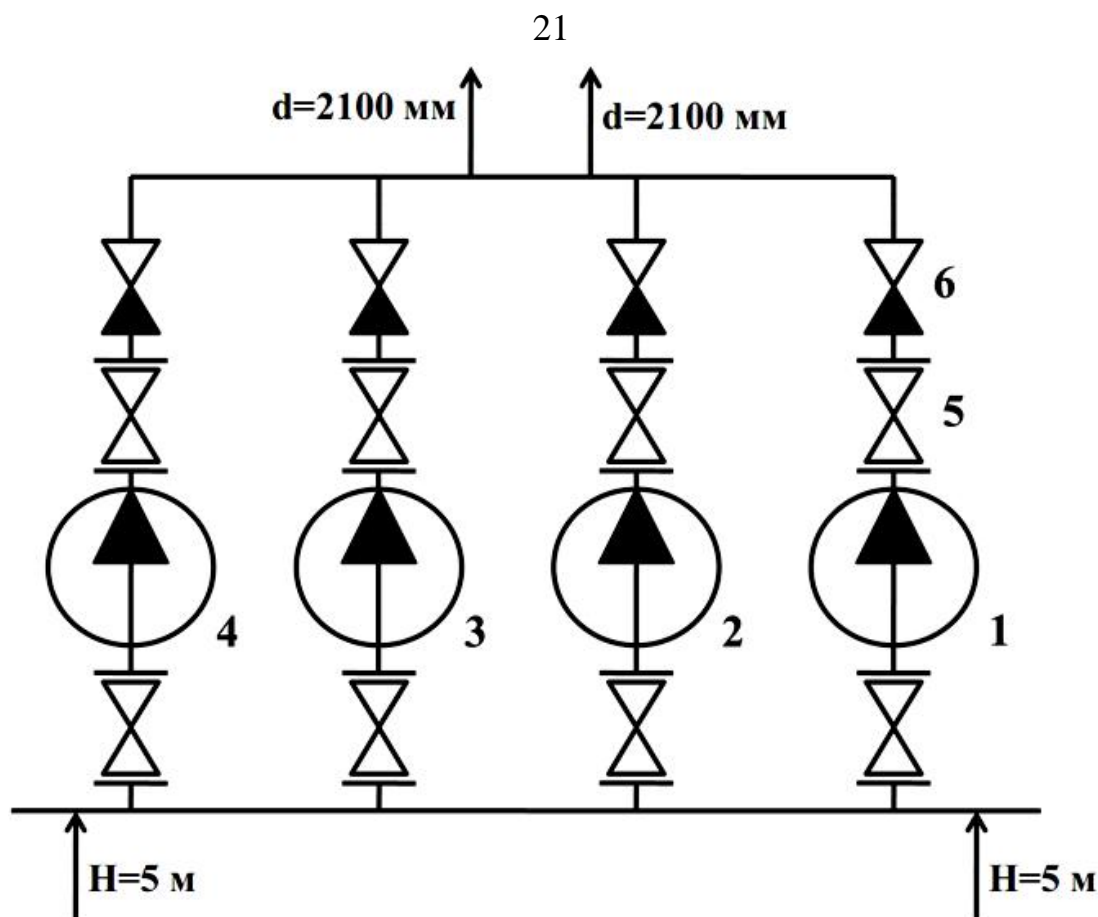


Рисунок 1.9. Технологическая схема АНС-1

В схеме (рисунок 1.9) насосы 1-4, задвижка 5 и обратный клапан 6 образуют технологическую схему станции. В АНС-1 используются нерегулируемые ЭП, которые имеют ряд недостатков в технологическом процессе, таких, как отсутствие возможности регулирования производительности НА и уменьшение негативных последствий пусковых переходных процессов [8-12]. Вода поступает к АНС-1 из реки Сырдарья с напором 5 м. Пуск НА АНС-1 выполняется только на открытую задвижку и после НА вода с напором до 88 м поступает по двум трубам длиной 1142 м и диаметром 2,1 м к резервуару второго подъёма, где функционируют НА 2-го подъёма. В Приложении 2 приведены данные о классах напряжений питающих НС Согдийской области.

Система электроснабжения Аштского района получает питание от Кайраккумской ГЭС г. Гулистана Согдийской области. От указанной ГЭС по линиям электропередачи (ЛЭП) Л-24-А и Л-О-А электроэнергия напряжением 220 кВ передается на электрическую подстанцию «Ашт»-220/110/6 кВ, длина

ЛЭП составляет 74,4 км. Блок- схема общей системы электроснабжения ОНС АНС-1 от ГЭС до насосных агрегатов с указанием основного оборудования системы показана на рисунке 1.10.

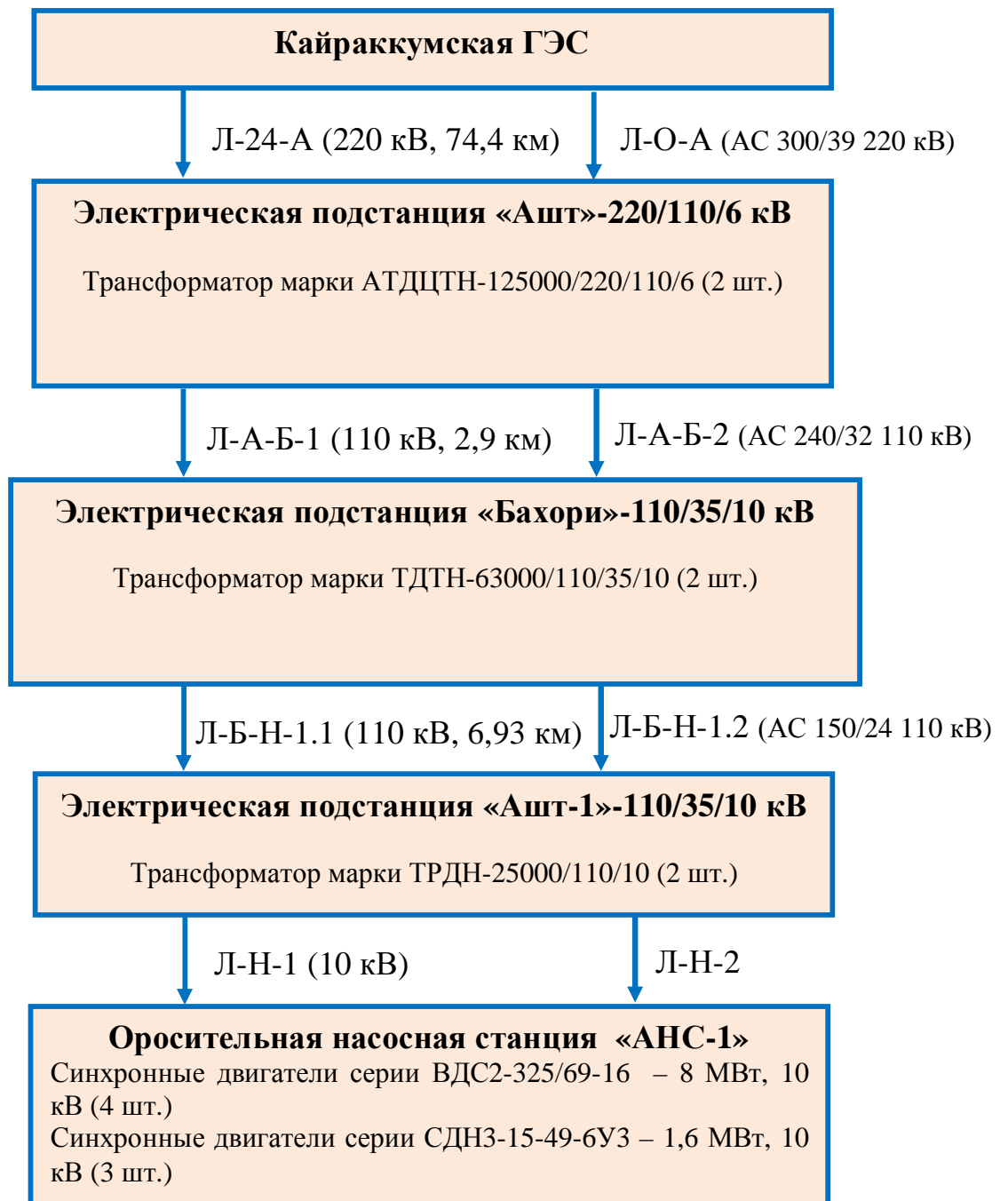


Рисунок 1.10. Блок- схема общей системы электроснабжения ОНС АНС-1

Рисунок 1.10 показывает, что общая система электроснабжения ОНС состоит из трех электрических подстанций, при этом общая длина ЛЭП составляет более 84 км. От электрической подстанции «Ашт» преобразованное напряжение при помощи ЛЭП Л-А-Б-1 и Л-А-Б-2 передается на подстанцию



«Бахори»-110/35/10 кВ, длина линии между подстанциями составляет 2,9 км. Затем от электрической подстанции «Бахори» по ЛЭП Л-Б-Н-1.1 и Л-Б-Н-1.1 электроэнергия поступает на подстанцию «Ашт-1»-110/35/10 кВ, длина ЛЭП между подстанциями составляет 6,93 км. Электрическая подстанция «Ашт-1» непосредственно служит для питания ОНС АНС-1 и, как стратегически важный объект, относится к первой категории по надежности потребителей электроэнергии [12 – А]. Схемы системы электроснабжения электрических подстанций «Ашт»-220/110/6 кВ, «Бахори»-110/35/10 кВ и «Ашт-1»-110/35/10 кВ показаны на рисунках 1.11-1.13.

Технические параметры трансформатора марки АТДЦТН-125000/220/110/6 приведены на таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Технические параметры трансформатора марки АТДЦТН-125000/220/110/6-У1

Тип	Номинальная мощность, МВА		Номинальные напряжения, кВ			Вид, диапазон и число ступеней регулирования напряжения
	автотрансформатора	обмотки НН	ВН	СН	НН	
АТДЦТН-125000/220/110/6	125,0	63,0	230	121	6,3; 6,6; 10,5; 11; 38,5	РПН в линии СН ±12%, ± 6 ступеней

Рисунок 1.10 показывает, что на электрической подстанции «Бахори»-110/35/10 кВ установлены два трансформатора марки ТДТН-63000/110/35/10. Технические параметры указанного трансформатора приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Технические параметры трансформатора марки ТДТН-63000/110/35/10-У1

Тип	$S_{ном}$ , МВА	Номинальные напряжения, кВ			Потери, кВт		Напряжение КЗ, %			Ток х.х. $I_0$ , %
		ВН	СН	НН	Х.Х	КЗ	ВН-СН	ВН-НН	СН-НН	
ТДТН-63000/110/35/10-У1	63,0	115	38,5	6,6; (11)	40	290	10,5	18,0	7,0	0,2





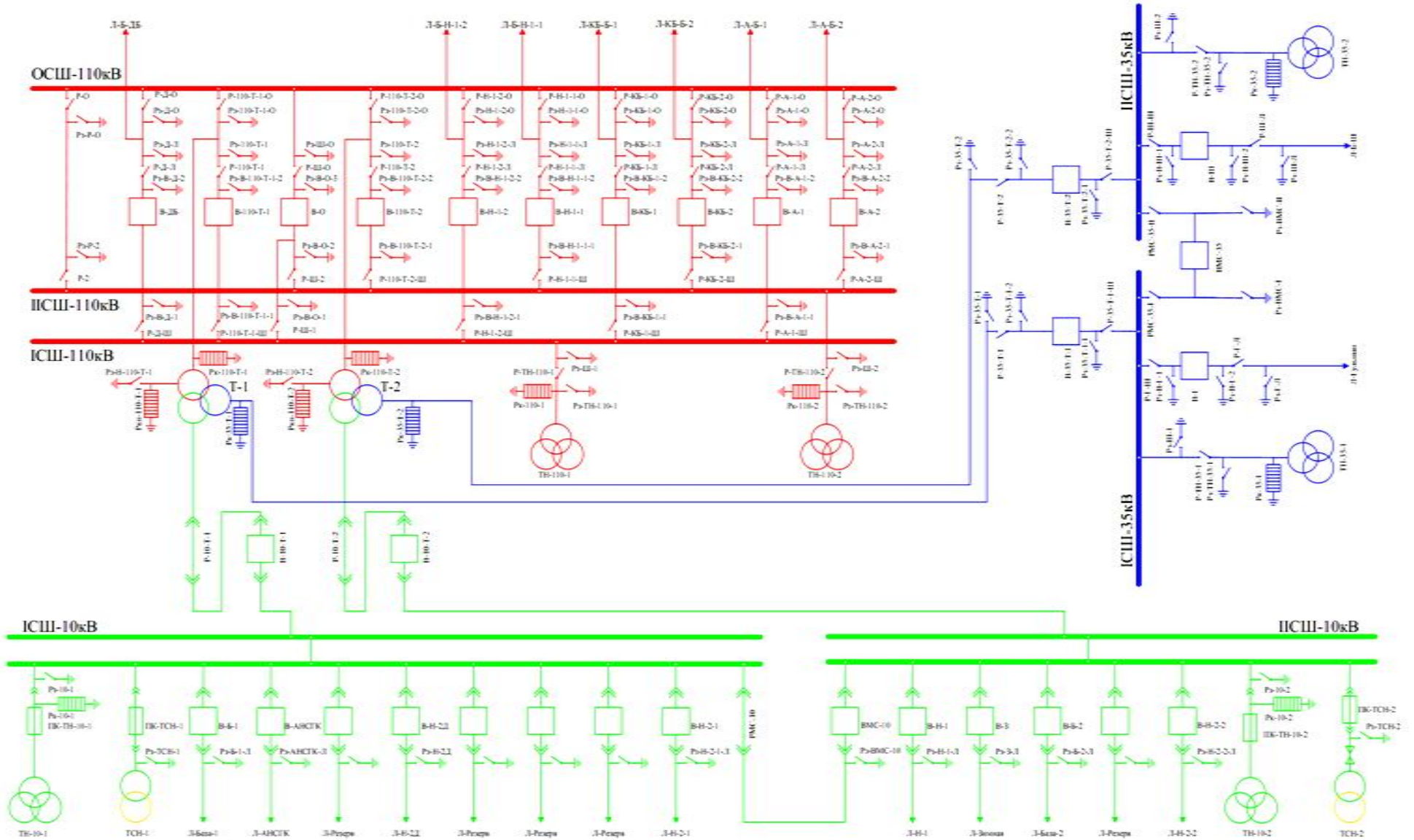


Рисунок 1.12. Однолинейная схема подстанции «Бахори»-110/35/10 кВ



Рисунки 1.10 и 1.11 показывают, что на электрической подстанции «Ашт»-220/110/6 кВ установлены два трансформатора марки АДЦТН-125000/220/110/6. Данный трансформатор является силовым трехфазным трехобмоточным с естественной циркуляцией масла и принудительной циркуляцией воздуха. Регулирование напряжения под нагрузкой (РПН) производится в диапазоне регулирования  $\pm 9 \times 1,78\%$  на стороне ВН, а на стороне СН в диапазоне регулирования  $\pm 2 \times 2,5\%$ .

На электрической подстанции «Ашт-1»-110/35/10 кВ установлены два трансформатора марки ТРДН-25000/110/10. Технические параметры указанного трансформатора приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Технические характеристики трансформатора  
ТРДН-25000/110/10

№	Наименование	ТРДН-25000/110/10	
1	Климатическое исполнение и категория размещения	У1	
2	Номинальная мощность, кВА	обмотка ВН	25000
		обмотка НН	25000
3	Номинальная частота, Гц	50	
4	Схема и группа соединения обмоток	Y <sub>н</sub> /Δ-Δ-11-11	
5	Номинальное значение напряжения, кВ	ВН	115
		НН	11
6	Напряжение короткого замыкания, U <sub>к</sub> , %	10,5	
7	Ток холостого хода, не более, %	0,55	
8	Вид системы охлаждения	Д	
12	Напряжение питания системы охлаждения и РПН, В	цепей управления	~ 220
		цепей сигнализации	= 220
		Двигателей	~ 380
13	Встроенные трансформаторы тока	коэффициент трансформации	600-400-300-200/5
		сердечник №1	05/20ВА/5
		сердечник №2	5P/40ВА/20
14	Срок эксплуатации, лет	25	

#### 1.4. Особенности пуска высоковольтных электродвигателей насосных агрегатов

Вертикальные синхронные электрические двигатели (ВСД) в основном, используются для приводов НА в ОНС. Кроме этого их применяют для привода осевых насосов без задвижек на напорном трубопроводе [13, 14]. Обычно момент сопротивления НА в начале пуска невелик и составляет 1 - 5% от номинальных значений и зависит прямопропорционально от радиуса сегментов подпятника, насоса и массы ротора двигателя [6]. Момент сопротивления при пуске ВСД составляет 15-20% от номинального момента двигателя. Для запуска ВСД при скольжении,  $s = 1$ , момент ЭД должен составлять, минимум,  $0,3M_n$ . Характерным отличием насосов от других механизмов является квадратичная зависимость скорости от его момента [15, 17 – А]. Пусковые токи таких СД могут превышать 4 - 6 кратное значение номинальных токов [16, 17]. Пусковой электрический ток у СД больших мощностей вызывает динамические усилия в обмотках статора, что может привести к ослаблению крепления его лобовых частей, а также могут вызывать недопустимые нагревы в элементах ротора. Поэтому ВЭД запускают обычно от пониженного напряжения, при этом пусковые токи тоже будут снижаться, примерно до  $3I_n$ , но в этом случае при понижении напряжения увеличивается время пуска, потому что у НА при большой длине трубопровода, момент сопротивления зависит от продолжительности пускового режима. При продолжительном пусковом режиме могут ухудшиться условия синхронизации СД, что приведет к нагреву пусковой обмотки. Следовательно, в каждом конкретном случае, пуск высоковольтных СД выполняется с учетом всех их особенностей. Кроме этого асинхронный момент в таком случае уменьшается пропорционально квадрату напряжения на выводах статора, но синхронизирующий момент будет пропорционально напряжению [6].

Напряжение на зажимах двигателя при пусковом режиме равняется (в о.е.):

$$U_{II} = \frac{x_{ДВ}}{x_{ДВ} + x_p + x_c}, \quad (1.1)$$

где  $x_c$  – суммарное индуктивное сопротивление трансформатора, линии, системы, приведенное к мощности и напряжению двигателя;

$x_{ДВ}$  – индуктивное сопротивление электрического двигателя;

$x_p$  – индуктивное сопротивление реактора, приведенное к мощности двигателя.

При пуске второго двигателя, когда на станции работает первый СД, условия пуска облегчаются, так как СД, работающие с опережающим коэффициентом мощности  $\cos \varphi$  компенсируют реактивный ток запускаемого двигателя при снижении напряжения [15]. На рисунке 1.14 приведены кривые изменения реактивного тока СД при неизменном токе возбуждения и при форсировке [9]. Кривая синего цвета означает, что  $I_p = I_{p.ном}$  кривая зеленого цвета  $I_p = 1,4I_{p.ном}$  и красная кривая  $I_p = 1,6I_{p.ном}$ .

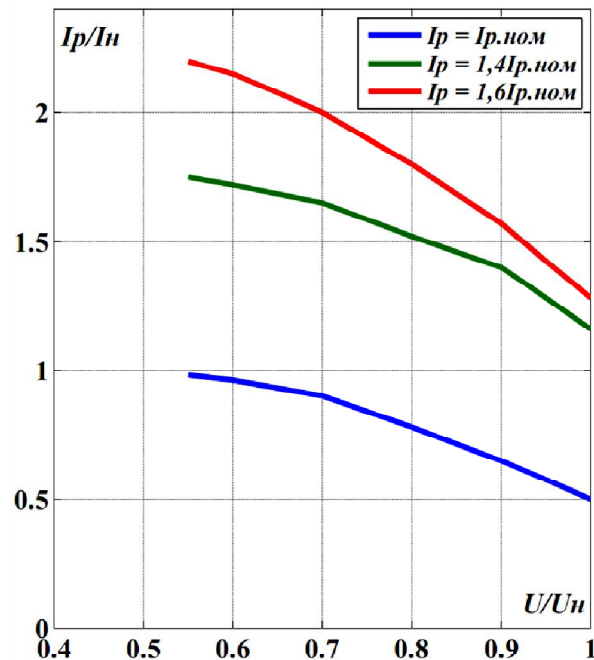


Рисунок 1.14. Графики реактивного тока СД при изменении напряжения

Пусковой ток и падение напряжения при пуске СД можно определить методом последовательных приближений [17]. Без учета переходных процессов

при работе двигателя, суммарное индуктивное сопротивление двигателя можно принять равным, в о.е.

$$X_{\Sigma\delta\theta} = \frac{1}{I_r}, \quad (1.2)$$

где  $I_r$  – суммарный реактивный ток работающих двигателей, определяемый ориентировочно по рисунку 1.14.

Пусковой ток СД можно определить, в о.е.

$$I_{II} = \frac{1}{x_d'' + x_p + \frac{x_c X_{\Sigma\delta\theta}}{x_c + X_{\Sigma\delta\theta}}}, \quad (1.3)$$

где  $x_d''$  – сверхпереходное индуктивное сопротивление двигателя.

Напряжение на двигателе, в о.е.

$$U = \frac{x_d''}{x_d'' + x_p + \frac{x_c X_{\Sigma\delta\theta}}{x_c + X_{\Sigma\delta\theta}}}. \quad (1.4)$$

Понижение напряжения в сети необходимо учесть для подсинхронной скорости и момента трогания. При этом индуктивное сопротивление запускаемого двигателя будет равно, в о.е.:

$$x_{0,05} = \frac{1}{I_{s=0,05}}, \quad (1.5)$$

где  $I_{s=0,05}$  – пусковой ток СД при скольжении 5 %.

Пуск ВСД для насосов первого подъема обычно производится при отключенном возбудителе, когда обмотка ротора замкнута на разрядное сопротивление. Величина этого сопротивления мало влияет на пусковой момент двигателя и его значение выбирается таким образом, чтобы на обмотке возбуждения СД не было высоких значений напряжений, особенно при тиристорном возбуждении. По известным правилам, значение разрядного сопротивления берется в 6-10 раз больше сопротивления обмотки возбуждения, а также рассчитывается для протекания пускового тока в течение пускового режима. При предельной температуре 300 °С, в течение 10 с допускается

нагрузка 6-8 кратным током двигателя. В течение 5 с допускается нагрузка током, превышающим в 10 раз значение номинального тока ЭД [6, 14 – А].

При пусковом режиме СД, когда скольжение равно  $s=1$ , ток в обмотке ротора определяется по параметрам схемы замещения ЭД (рисунок 1.15) при условии, что потери в обмотке ротора СД равны действительным потерям.

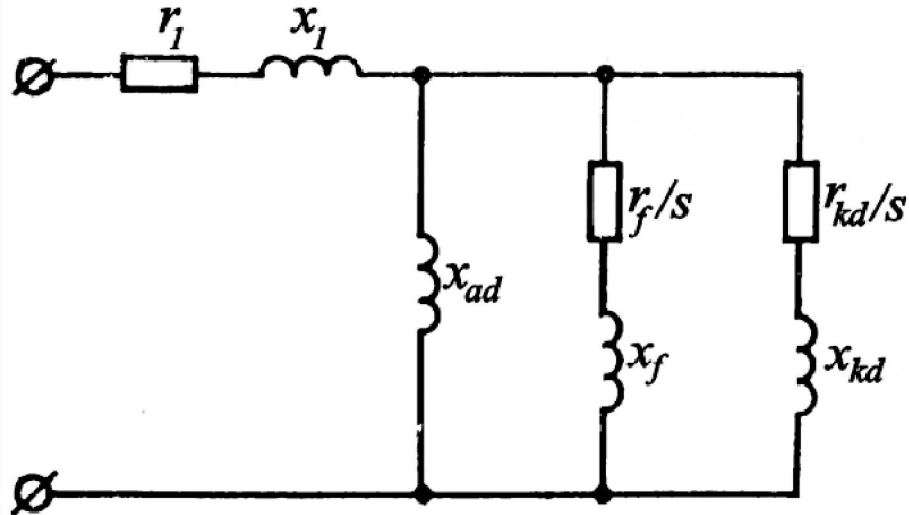


Рисунок 1.15. Эквивалентная схема СД для расчета пуска

Ток возбуждения СД в соответствии со схемой замещения

$$I_f = I_{II} \sqrt{\frac{R_f \cdot P \cdot 10^3}{R_2}}, \quad (1.6)$$

где  $P$  – мощность СД, кВт;

$I_{II}$  – пусковой ток, в о.е.;

$R_2, R_f$  – активные сопротивления ротора и обмотки возбуждения, Ом.

Электрические токи в стержнях демпферной обмотки СД рассчитываются из равенства токовых нагрузок на полюс статорной и роторной обмоток.

Средний ток в стержне демпферной обмотки СД рассчитываются по формуле:

$$I_{cm} = \frac{A \cdot \tau \cdot I_{II} / I_H}{n_{cm}}, \quad (1.7)$$

где  $n_{cm}$  – число стержней на полюс.

Средний ток в сегментах в пусковом режиме можно определить:

$$I_{cm} = \frac{I_{cm}}{2 \sin \pi / 2n_{cm}} \approx \frac{I_{cm} n_{cm}}{\pi}. \quad (1.8)$$

В реальных случаях, токи в стержнях СД распределены неравномерно и в крайних стержнях токи выше примерно на 50%, что приводит к дополнительным нагревам этих стержней. Из-за этого в крупных СД для понижения тока в крайних стержнях, стержни размещают в пазы с отличающиеся друг от друга проводимостями.

### **1.5. Взаимное влияние пусковых режимов работы насосных агрегатов оросительной станции**

По технологической схеме АНС-1 (рисунок 1.9) проведем исследование взаимного влияния пусковых режимов НА. Вода из реки Сырдарья поступает на рабочие колеса НА в грязном и мутном состоянии, что приводит к большим осадкам на дне резервуара. Кроме того, может наблюдаться негативное воздействие на рабочие колеса насосов и заторы в защитных решетках водозабора. Для устранения указанных проблем необходимо включить фильтры на вход резервуара первого подъема и обеспечить равномерную подачу воды на второй подъем. Однако, НС первого подъема АНС-1 не имеет фильтров, а имеет только решетки перед НА. К тому же, в АНС-1 используется дискретный способ регулирования НА, т.е. включение и отключение одного из НА. Такой способ регулирования производительности НА отличается простотой управления, однако имеет и свои недостатки, как отсутствие возможности обеспечения непрерывного и качественного поддержания напора, в особенности, при изменении потребления воды [16 – А]. Другим существенным недостатком данного способа регулирования являются частые пуски двигателей, которые приводят к уменьшению срока службы и технического ресурса электрооборудования. Вышеуказанные недостатки приводят к снижению устойчивой работы насосной установки и всего электрооборудования АНС-1 в целом [10 – А, 15 – А].



Число включений - отключений НА АНС-1, по рекомендациям завода изготовителя, составляет не более 200 пусков в год [6]. При прямом пуске насосов, за счет резкого увеличения подачи воды, возрастает мутность воды. Мутность воды создает и другие проблемы, такие, как грязь в решётках водоприёмников, в рабочих колесах, грязь на дне резервуара, увеличение затрат на промывку и очистку частей НС. Обычно насосные установки АНС-1 работают таким образом: при максимуме потребления воды в НС работают три агрегата, при минимальном потреблении воды работают два, а иногда, в конце сезона орошения, - один агрегат. Если объем воды резервуара НС второго подъема АНС-2 уменьшается или, наоборот, увеличивается, оператор станции сообщает об этом оператору АНС-1. С точки зрения теории управления, такие системы не могут обеспечить высокую надежность и точность регулирования, так как на процесс регулирования подачи в данной системе, кроме технических факторов, воздействует человеческий фактор. Эффективность процесса можно увеличить исключением функции «человека-оператора» в контуре управления [18]. Для обеспечения высокой эффективности работы НС второго подъема АНС-2 необходимо автоматизировать и согласовывать режимы работы НА НС первого подъема АНС-1.

Исследования показали, что использование нерегулируемого ЭП в ОНС первого подъема оказывают негативное влияние на технический ресурс НС и на качество перекачиваемой воды [12, 15]. В дальнейшем такой негативный эффект будет наблюдаться в НС второго подъема. Приведенные недостатки позволяют оспорить существующую точку зрения о том, что регулируемые электроприводы (РЭП) эффективны только для НС второго подъема. Для обеспечения бесперебойности работы системы электроснабжения ОНС, необходимо автоматизация и регулирование рабочих режимов НА, в первую очередь для пусковых режимов ЭП НА. Эффективность использования или внедрения РЭП в ОНС остается вопросом недостаточно изученным и нуждается в детальном исследовании.

**Выводы по первой главе:**

1. Показано, что ОНС первого подъема состоит из сложных электромеханических и гидравлических устройств, таких как ЦН с ВСД большой мощности и высоковольтных распределительных устройств (ВРУ).
2. В настоящее время в ОНС первого подъема используется ручное регулирование подачи воды путем включения и отключения НА.
3. Частые включения и отключения НА в ОНС оказывают негативное влияние на работу электрического и гидравлического оборудования, а также снижают надежность его работы.
4. Прямой пуск насоса увеличивает мутность воды и, тем самым, образует осадок в решётках водоприёмников, на рабочих колесах, осадок оседает на дне резервуара.
5. Включение или отключение НА или группы насосов исключает возможность обеспечения непрерывного и качественного поддержания напора.
6. Частые пуски ЭД уменьшают время наработки на отказ электрооборудования.
7. Режимы работы НА первого подъема при использовании нерегулируемого ЭП негативно влияют на работу и техническое состояние НС второго подъема.
8. Перспективное значение имеют применение РЭП и автоматизация технологического процесса, которые позволяют обеспечить непрерывное регулирование производительности насоса, а также снизить расход электроэнергии.

## ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ПРИ РАБОТЕ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

### 2.1. Расчет энергетических балансов насосных агрегатов

Момент сопротивления НУ состоит из момента гидравлического сопротивления, механического сопротивления (трение в подшипниках) и др. Момент трения  $M_{ТР}$  обычно составляет не более 5% от номинального момента [15]. В таком случае механическая характеристика турбомеханизма описывается, таким образом, в о.е.

$$\frac{M}{M_H} = 0,05 + 0,95\left(\frac{n}{n_H}\right)^2, \quad (2.1)$$

где  $M_H$  – номинальный момент турбомеханизма, Н·м;

$n_H$  – номинальная скорость вращения, об/мин.

На рисунке 2.1 показаны характеристики работы насоса на сеть со статическим напором.

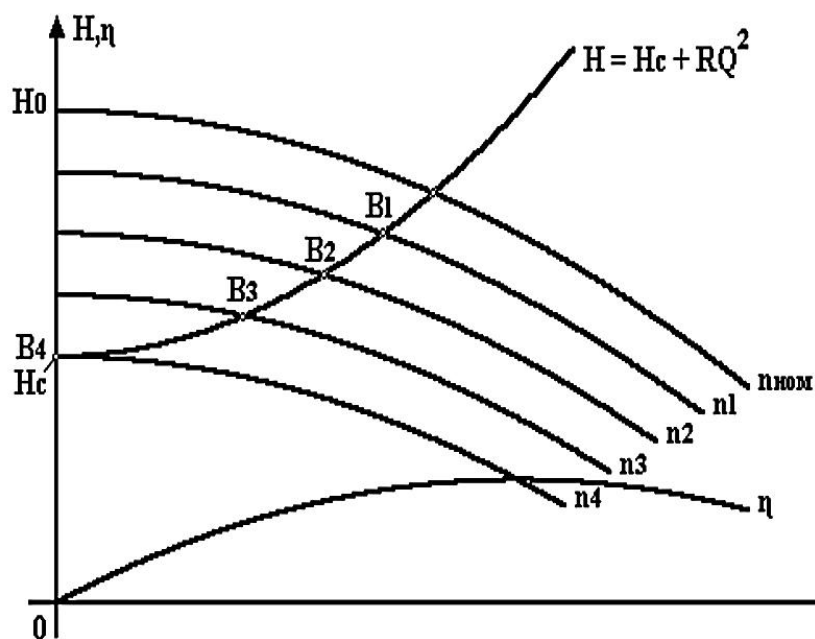


Рисунок 2.1. Характеристика работы турбомеханизма на сеть с статическим напором  $H_c$  зависимости от подачи  $Q$  при различных скоростях вращения рабочих лопастей насоса ( $n_{ном} > n_1 > n_2 > n_3 > n_4$ )

Рабочие точки  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B_3$  являются точками пересечения характеристики напора сети с характеристиками напора механизма, которые соответствуют

разным значениям скорости вращения насоса. Показано, что в пределах от  $n_4$  до  $n_{ном}$  лежит рабочая область регулирования скорости и расход  $Q$  падает со снижением скорости вращения, как и КПД механизма, который снижается по мере уменьшения скорости вращения насоса. Графики механических характеристик НА при различной величине напора приведены на рисунке 2.2 [17 – А].

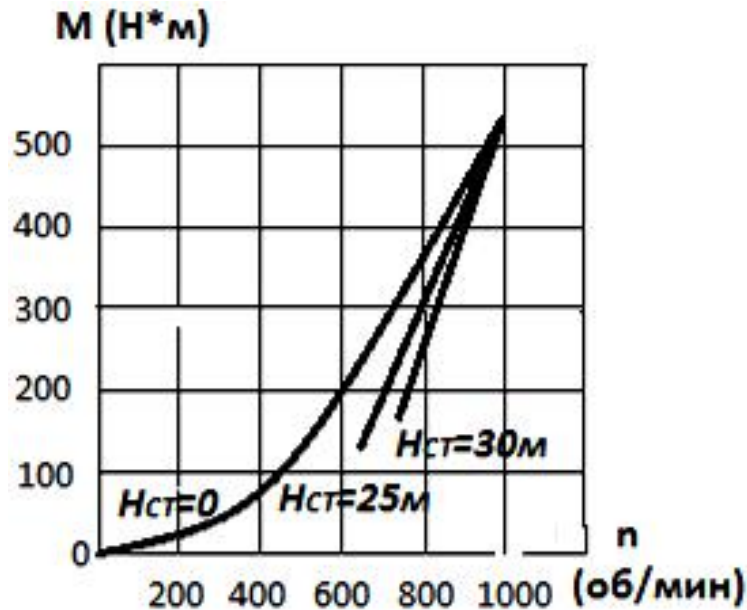


Рисунок 2.2. Зависимость момента насоса  $M$  от частоты вращения  $n$ , при различной величине статического напора  $H_{ст}$  в сети

На рисунке 2.2 показано, что при незначительном увеличении статического напора скорость вращения насоса значительно увеличивается.

Для анализа зависимости между расходом, напором и скоростью вращения насосов используем совместно уравнения характеристик турбомеханизма, тогда получим

$$Q = \frac{B_2 \cdot n - \sqrt{B_2^2 \cdot n^2 + 4(R - C_2) \cdot (A_2 \cdot n^2 - H_{СТ})}}{2 \cdot (R - C_2)}, \quad (2.2)$$

$$H = H_{СТ} + \frac{R}{2 \cdot (R - C_2)^2} \cdot [B_2^2 \cdot n^2 + 2 \cdot (R - C_2) \cdot (A_2 \cdot n^2 - H_{СТ}) - B_2 \cdot n \cdot \sqrt{B_2^2 \cdot n^2 + 4(R - C_2) \cdot (A_2 \cdot n^2 - H_{СТ})}]. \quad (2.3)$$

Зависимость между моментом сопротивления и скоростью вращения насоса имеет следующий вид

$$M = M_{TP} + f(n). \quad (2.4)$$

На рисунке 2.3 приведен график зависимости статического момента и скорости вращения насоса при пусковом режиме.

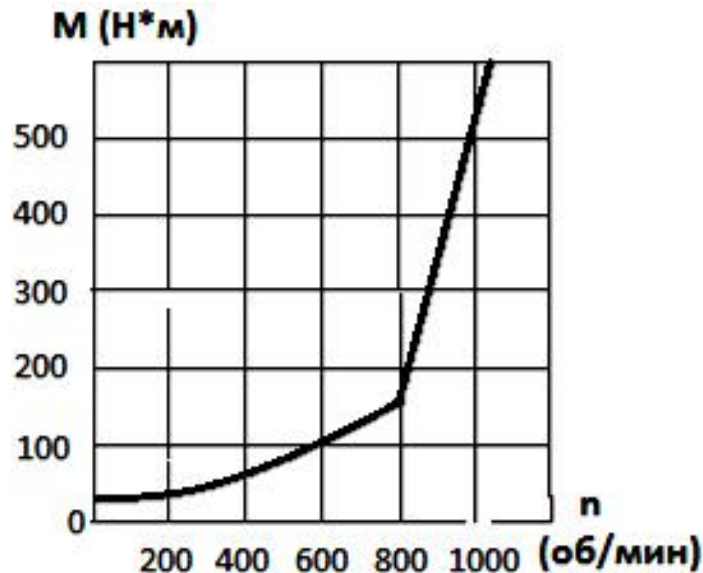


Рисунок 2.3. Зависимость статического момента  $M$  на валу насоса от скорости  $n$  при пуске

На рисунке 2.3 показано, что при пуске, когда скорость вращения равна нулю, статический момент имеет значение, отличное от нуля. После определенного интервала времени, момент сопротивления и скорость вращения пропорционально увеличиваются.

Как известно, зависимость момента от скорости вращения для турбомеханизмов можно выразить следующим выражением [16 – А]:

$$M = k_M n^k, \quad (2.5)$$

где  $k$  – показатель степени, является функцией параметров сети,  $k \geq 2$  соответствует механизмам с вентиляторным характером нагрузки.

Анализ работы турбомеханизмов показал, что при различных величинах статического напора вышеприведенные закономерности соблюдаются только при  $H_{ст} = 0$ , а в других случаях будут отличаться.

Напорная характеристика турбомеханизма  $H=f(Q)$  описывается следующим выражением [33 – А, 34 – А].

$$H = H_0 \frac{n^2}{n_{НОМ}^2} - C_4 Q^2. \quad (2.6)$$

Зависимость мощности насоса от расхода можно описать выражением

$$P_{МЕХ} = P_0 \frac{n^3}{n_{НОМ}^3} + A_4 Q \frac{n^2}{n_{НОМ}^2}. \quad (2.7)$$

При эксплуатации НА общая потребляемая мощность  $P_{C\Sigma}$ , (кВт), определяется выражением [19, 20, 22 – А].

$$P_{C\Sigma} = P_T + \Delta P_{НА} + \Delta P_{ЗАДВ} + \Delta P_{АРМ} + \Delta P_{ТР}, \quad (2.8)$$

где  $P_T$  – мощность, затрачиваемая для транспортировки жидкости, кВт;

$\Delta P_{НА}$  – потери в насосе, кВт;

$\Delta P_{ЗАДВ}$  – потери в входных задвижках, кВт;

$\Delta P_{АРМ}$  – потери образованные на напорной арматуре, кВт;

$\Delta P_{ТР}$  – потери на транспортировку воды по магистрали, кВт.

При разных способах регулирования производительности НА зависимости потребляемой мощности и производительности имеют различный вид (рисунок 2.4) [21].

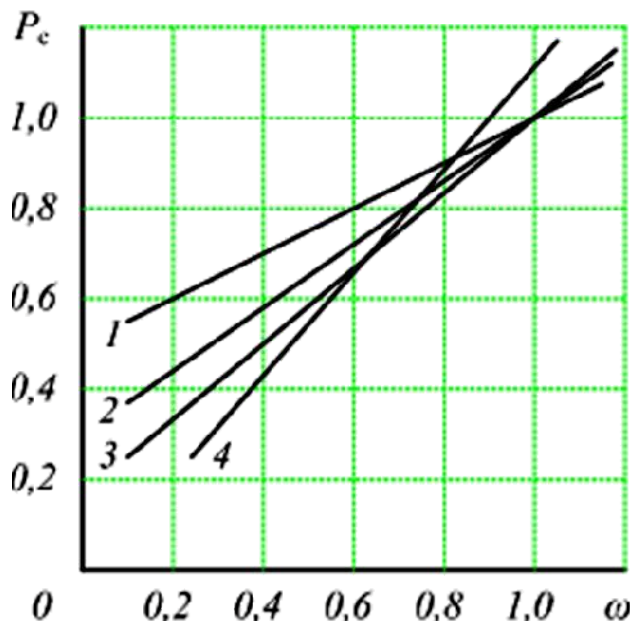


Рисунок 2.4. Графики зависимости потребляемой мощности от сети  $P_c$  при регулировании скорости вращения  $\omega$  насоса: 1- задвижкой; 2 – реостатное; 3 - система АВК; 4 – ЧРЭП

Общая мощность для подачи воды определяется по формуле, кВт

$$P_T = \gamma \cdot H_C \cdot Q \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} - \Delta P_{TP}, \quad (2.9)$$

где  $Q$  – производительность насосной установки, м<sup>3</sup>/с;

$\gamma$  – удельный вес жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$H_C$  – напор магистрали, м.

Для магистрали суммарные потери мощности можно определить по формуле, кВт

$$\Delta P_{МАГ} = \gamma \cdot \Delta H_{ДИН} \cdot Q \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}, \quad (2.10)$$

где  $\Delta H_{ДИН}$  – динамический напор характеристики магистрали, м.

Также для магистрали суммарную мощность можно определить следующим образом, кВт

$$\Delta P_{МАГ} = \Delta P_{ЗАДВ} + \Delta P_{АРМ} + \Delta P_{ТР}.$$

Для определения и расчета потребляемой мощности напорной задвижки необходимы основные исходные данные, такие, как:  $\Delta H_3$  – потери напора на задвижке,  $H_{ВХ.3}$  – напор до задвижки,  $H_2$  – напор после задвижки,  $S_3$  – гидросопротивление задвижки.

Потери напора на задвижке, м

$$\Delta H_3 = H_{ВХ.3} - H_2.$$

Для расчета гидравлического сопротивления на задвижке используется выражение, с<sup>2</sup>/м<sup>5</sup>

$$S_3 = \frac{\Delta H_3}{Q^2}. \quad (2.11)$$

В агрегатах НС баланс мощности рассчитывается в зависимости от потерь в НА. При этом используются следующие исходные данные:

- производительность НА -  $Q_{НА1}$ ,  $Q_{НА2}$ ;
- напор на выходе работающих НА -  $H_{ВЫХ1}$ ,  $H_{ВЫХ2}$ ;
- напор на входе НА -  $H_{ВХ НА}$ ;
- мощность, потребляемая ЭД из сети соответствующего агрегата -  $P_{С1}$ .

Расчётные параметры, которые можно получить по характеристикам НА:

- напор, создаваемый агрегатом  $H_{Н1} = H_{ВЫХ1} - H_{ВХ}$ ;

- мощность  $P_{Н1}$  на валу ЭД, определяемая по характеристикам агрегатов с учетом КПД, кВт

$$P_{C1} = \frac{P_{Н1}}{\eta_{ДВ}} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{Н1} \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}}{\eta_{Н1} \cdot \eta_{ДВ}}. \quad (2.12)$$

Потери мощности при работе НА, кВт [27, 28]

$$\Delta P_{НА1} = P_{C1} \left( \frac{1 - \eta_{Н} \cdot \eta_{ДВ}}{\eta_{Н} \cdot \eta_{ДВ}} \right) = \gamma \cdot Q \cdot H_{Н} \cdot 9,81 \cdot \left( \frac{1 - \eta_{Н} \cdot \eta_{ДВ}}{\eta_{Н} \cdot \eta_{ДВ}} \right). \quad (2.13)$$

При работе НА общий баланс мощности с учётом потерь на отдельных участках технологической цепочки рассчитывается, кВт

$$P_C = P_T + \Delta P_3 + \Delta P_{НА}. \quad (2.14)$$

Электроэнергия для подачи воды за год, кВт.ч

$$W = P_C \cdot \tau, \quad (2.15)$$

где  $\tau$  – рабочий интервал времени, ч.

Потери мощности определяются

$$\Delta P = P_C - P_T, \quad (2.16)$$

где  $P_T$  – мощность, соответствующая технологическим параметрам, кВт.

Дополнительные потери электроэнергии за год, кВт.ч

$$\Delta W = \Delta P \cdot \tau. \quad (2.17)$$

Технические (номинальные) данные НА станции АНС-1 представлены в таблицах 2.1 и 2.2 [11 – А].

Таблица 2.1 – Технические параметры насосных агрегатов АНС-1

№	Тип	$H$ , м	$Q$ , м <sup>3</sup> /ч	$n_{НОМ}$ , об/мин	$\eta$ , %	$P_{НОМ}$ , МВт
1	1200В-6,3/100-А (52В11)	88,00	22680,00	375,00	88,00	8,00
2	1200В-6,3/100-А (52В11)	88,00	22680,00	375,00	88,00	8,00
3	1200В-6,3/100-А (52В11)	88,00	22680,00	375,00	88,00	8,00
4	1200В-6,3/100-А (52В11)	88,00	22680,00	375,00	88,00	8,00



Энергетический баланс показывает, что внедрение РЭП с использованием ПЧ целесообразно при условии наличия переменной нагрузки. Так как в ОНС первого подъема нагрузка, в значительной мере, постоянная, использование или внедрение РЭП требует дополнительного обоснования.

Таблица 2.2 – Технические параметры электродвигателя насосов АНС-1

№	Наименование параметров	Обозначение параметров	Значение величин
1	Марка двигателя	ВДС2-325/69-16 УХЛ4	
2	Число насосных агрегатов		4
3	Электрическая мощность двигателя, МВт	$P_{ном}$	8,00
4	Ток обмотки статора двигателя, А	$I_1$	540,00
5	Напряжение обмотки статора, В	$U_1$	10000,00
6	Ток обмотки ротора двигателя, А	$I_2$	400,00
7	Напряжение обмотки ротора, В	$U_2$	160
8	Частота вращения двигателя, об/мин	$n_{ном}$	375,00
9	КПД двигателя, %	$\eta$	95,90
10	Коэффициент мощности двигателя	$\cos\varphi$	0,90
11	Система возбуждения двигателя	ТВУ-8	

Для расчета энергетического баланса НС АНС-1, кроме паспортных данных приведенных в таблицах 2.1 и 2.2, необходимы параметры, которые можно получить в результате инструментального обследования. Поэтому проведены инструментальные обследования оборудования НС АНС-1, результаты которых приведены в таблице 2.3 [38 – А].

Таблица 2.3 – Данные, полученные в ходе инструментального обследования

№	Наименование	Обозначение	Значение
1	Тип насоса 1200В-6,3/100-А		
2	Количество обследуемого насоса		1
3	Потребляемая активная мощность, кВт (получено расчетным путем)	$P_{ном}$	5860
4	Ток статора, А	$I_1$	390
5	Напряжение статора, кВ	$U_1$	10
6	Загрузка агрегата, % (получено расчетным путем)		73
7	Производительность агрегата, м <sup>3</sup> /с	$Q$	5,89
8	Давление до агрегата, кг/см <sup>2</sup> (м)	$H_1$	0,5 (5)
9	Давление после агрегата (до напорной задвижки), кг/см <sup>2</sup> (м)	$H_2$	8,8 (88)
10	Давление после напорной задвижки, кг/см <sup>2</sup> (м)	$H_3$	8 (80)
11	Коэффициент мощности	$\cos\varphi$	0,9

Расчёты приведены для одного агрегата установленной мощностью 8000 кВт, номинальное значение производительности насоса составляет 22680 м<sup>3</sup>/ч.

Суммарная мощность, которая необходима для транспортировки продукта без потерь по трубопроводу, определяется по формуле (2.9).

$$P_T = \gamma \cdot H_C \cdot Q \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} - \Delta P_{TP} = 1000 \cdot 83 \cdot 5,89 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} - 288,9 = 4506,9 \text{ кВт},$$

где  $\Delta P_{TP} = \gamma \cdot (H_1 - H_C) \cdot Q \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = (88 - 83) \cdot 5,89 \cdot 9,81 = 288,9 \text{ кВт},$

$H_1$  – определена по  $H$ - $Q$  характеристикам насосных агрегатов для рабочей точки мощности ЭД 5860 кВт и равна 88 м.

Значение  $P_T$  в процентном соотношении  $P_T^* = 76,2 \%$ .

Потери напора на задвижке определим по формуле

$$\Delta H_3 = H_{ВХ.3} - H_2 = 88 - 80 = 8 \text{ м.}$$

Тогда гидравлическое сопротивление на задвижке будет равно:

$$S_3 = \frac{\Delta H_3}{Q^2} = \frac{8}{5,89^2} = 0,23 \text{ с}^2/\text{м}^5.$$

Потери мощности на задвижке агрегата

$$\Delta P_{ЗАДВ} = \gamma \cdot \Delta H_3 \cdot Q \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = 8 \cdot 5,89 \cdot 9,81 = 462,2 \text{ кВт.}$$

Значение  $\Delta P_{ЗАДВ}$  в процентном соотношении  $\Delta P_{ЗАДВ}^* = 7,8 \%$ .

Напор, создаваемый НА, определяется

$$H_{Н1} = H_{ВЫХ1} - H_{ВХ} = 88 - 5 = 83 \text{ м.}$$

Мощность ЭД, определяемая по характеристике НА с учетом КПД, будет равно:

$$P_{C1} = \frac{P_{Н1}}{\eta_{ДВ}} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{Н1} \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}}{\eta_{Н1} \cdot \eta_{ДВ}} = \frac{5,89 \cdot 83 \cdot 9,81}{0,88 \cdot 0,959} = 5682,24 \text{ кВт.}$$

Потери мощности при работе НА определяются по следующей формуле

$$\Delta P_{НА1} = \gamma \cdot Q \cdot H_H \cdot 9,81 \cdot \left( \frac{1 - \eta_H \cdot \eta_{ДВ}}{\eta_H \cdot \eta_{ДВ}} \right) = 5,89 \cdot 88 \cdot 9,81 \cdot \left( \frac{1 - 0,88 \cdot 0,959}{0,88 \cdot 0,959} \right) = 940,4 \text{ кВт.}$$

Значение  $\Delta P_{НА1}$  в процентном соотношении  $\Delta P_{НА1}^* = 16 \%$ .

Общий баланс мощности при работе НА в процентном соотношении

$$P_C^* = 76,2 + 7,8 + 16 = 100\%.$$

Электроэнергия, расходуемая на транспортировку продуктов за год, включая расход на регулирование НА, составит:

$$W = P_C \cdot \tau = 5860 \cdot 8760 = 51333600 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Расход ЭЭ на транспортировку продуктов за сезон орошения с апреля до октября (6 месяцев), при  $\tau = 4400$  ч.

$$W = P_C \cdot \tau = 5860 \cdot 4400 = 25784000 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Дополнительные потери мощности

$$\Delta P = P_C - P_T = 8000 - 4506 = 3494 \text{ кВт}.$$

Дополнительные потери электроэнергии за год

$$\Delta W = \Delta P \cdot \tau = 3494 \cdot 8760 = 30607440 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Дополнительные потери электроэнергии за сезон орошения

$$\Delta W = \Delta P \cdot \tau = 3494 \cdot 4400 = 15373600 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Проведенные расчеты показывают, что потери электроэнергии при работе НА АНС-1 составляют 16%, а потери на задвижке почти 8% от общего электропотребления.

## **2.2. Построение характеристик напора насосных агрегатов при различной скорости вращения рабочего колеса**

Потери мощности на задвижке являются прямыми потерями при регулировании скоростей вращения рабочего колеса НА, которые приводят к увеличению затрат на электроэнергию [22]. В НА, которые работают с номинальной скоростью, рекомендуется не выходить из рабочей зоны, так как в этой зоне обеспечивается рациональное использование насоса при регулировании. Для анализа режимов работы насосов используют  $HQ$  характеристику насоса (рисунок 2.5).

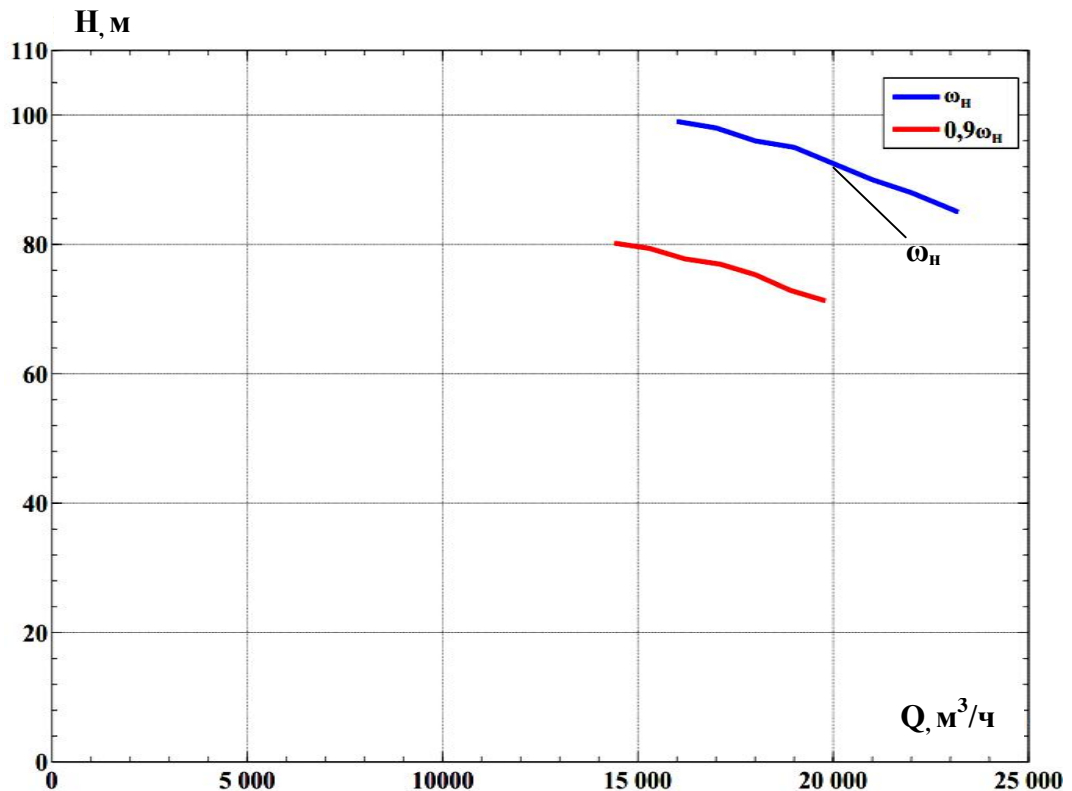


Рисунок 2.5. Зависимость напора от производительности насоса серии 1200В-6,3/100-А

Номинальная скорость насоса составляет  $n = 375$  об/мин. Графики характеристик насоса (рисунок 2.5) показывают, что рекомендуемый рабочий интервал составляет примерно  $(16-23,2) \cdot 10^3$  м³/ч. На рисунке 2.6 показана зависимость КПД насоса типа 1200В-6,3/100-А от производительности.

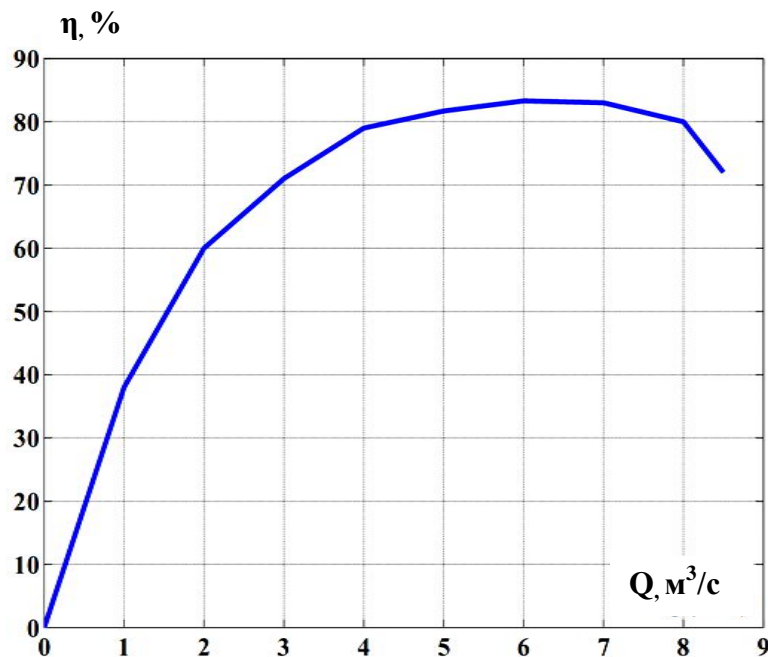


Рисунок 2.6. График зависимости КПД насоса  $\eta$  1200В-6,3/100-А от производительности  $Q$

Определение мощности, потребляемой насосом, осуществляется по паспортным данным и характеристикам насоса (рисунок 2.5) в соответствии с его производительностью

$$N_1 = \frac{\gamma \cdot H_1 \cdot Q_1 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}}{\eta \cdot 3600}, \quad (2.18)$$

где  $N_1$  – мощность насоса, кВт;

$H_1$  – напор насоса, м;

$Q_1$  – расход насоса, м<sup>3</sup>/ч;

$\eta$  – КПД насоса.

Применение РЭП для управления НА предполагает наличие семейства характеристик его напора для различных скоростей. Для расчета характеристик напора насоса можно использовать следующую методику: на характеристике насоса, соответствующей номинальной скорости  $\omega_H$  (рисунок 2.5), выбирается произвольно ряд точек 1, 2, 3 и задается скорость желаемого режима  $\omega_P$  [21, 22]. Коэффициенты пересчета для расхода  $Q$  будет равно:

$$k_Q = \frac{\omega_P}{\omega_H}, \quad (2.19)$$

где  $\omega_P$  – расчетная угловая скорость насосной установки.

Коэффициент пересчета для напора  $H$  можно рассчитать по формуле:

$$k_H = \left( \frac{\omega_P}{\omega_H} \right)^2. \quad (2.20)$$

Для каждой выбранной точки определяются значения  $Q'_i$  и  $H'_i$  в соответствии следующим формулам:

$$Q'_i = Q_{Hi} \cdot k_Q, \quad (2.21)$$

$$H'_i = H_{Hi} \cdot k_H, \quad (2.22)$$

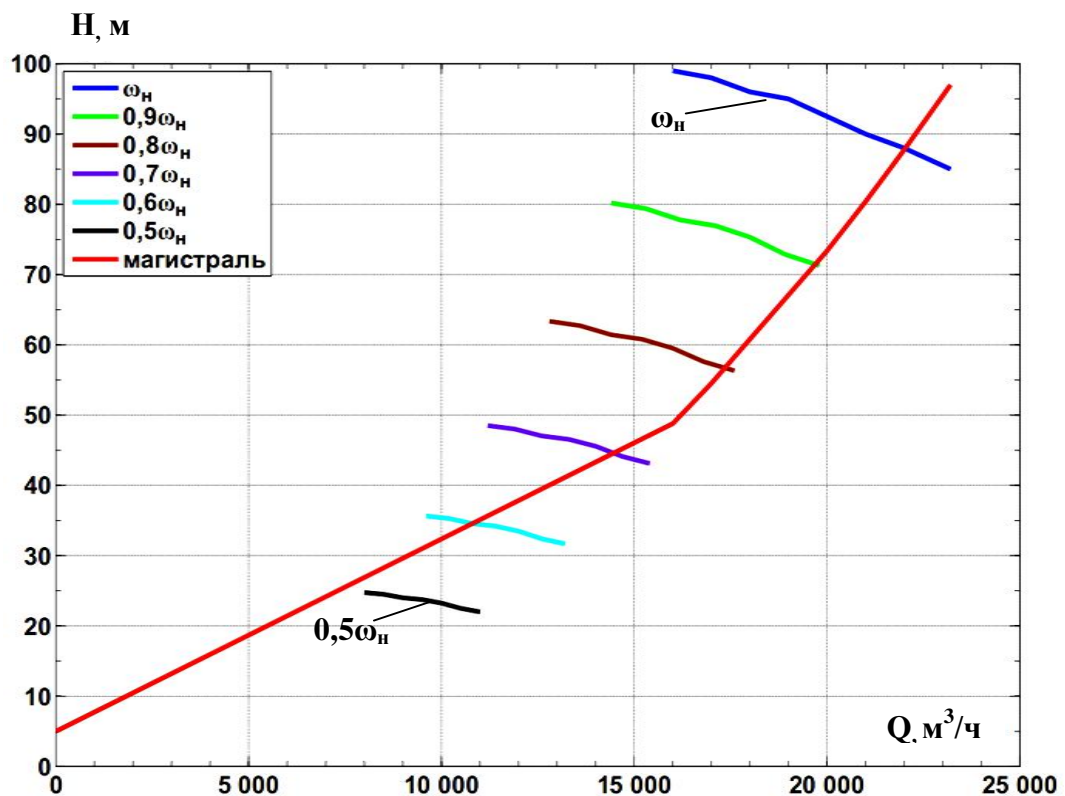
где  $Q_{Hi}, H_{Hi}$  – координата точки на характеристике напора НА при скорости  $\omega_H$ ;

$Q'_i, H'_i$  – точки на характеристике напора насоса при рабочей скорости  $\omega_P$ .

По рассчитанным параметрам  $Q$  и  $H$  (таблица 2.4), строится характеристика насоса (рисунок 2.7).

Таблица 2.4 – Расчетные данные насосной установки АНС-1

Скорость насоса	Параметры	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6	Точка 7
$\omega_n$	$Q$ , тысяч $\text{м}^3/\text{ч}$	23,20	22,0	21,0	19,0	18,0	17,0	16,0
	$H$ , м	85,0	88,0	90,0	95,0	96,0	98,0	99,0
$\omega=0,9\omega_n$	$Q$ , тысяч $\text{м}^3/\text{ч}$	19,8	18,9	18,0	17,1	16,2	15,3	14,4
	$H$ , м	71,3	72,9	75,3	76,9	77,8	79,4	80,2
$\omega=0,8\omega_n$	$Q$ , тысяч $\text{м}^3/\text{ч}$	17,60	16,8	16,0	15,2	14,4	13,6	12,8
	$H$ , м	56,3	57,6	59,5	60,8	61,4	62,7	63,4
$\omega=0,7\omega_n$	$Q$ , тысяч $\text{м}^3/\text{ч}$	15,40	14,7	14,0	13,3	12,6	11,9	11,2
	$H$ , м	43,1	44,1	45,6	46,6	47,1	48,1	48,5
$\omega=0,6\omega_n$	$Q$ , тысяч $\text{м}^3/\text{ч}$	13,20	12,6	12,0	11,4	10,8	10,2	9,6
	$H$ , м	31,7	32,4	33,5	34,2	34,7	35,3	35,6
$\omega=0,5\omega_n$	$Q$ , тысяч $\text{м}^3/\text{ч}$	11,0	10,5	10,0	9,5	9,0	8,5	8,0
	$H$ , м	22,0	22,5	23,3	23,6	24,0	24,5	24,8
Магистраль	$Q$ , тысяч $\text{м}^3/\text{ч}$	23,20	22,0	21,0	20,0	17,0	16,0	0,0
	$H$ , м	97,0	87,8	80,4	73,4	54,5	48,8	5,0

Рисунок 2.7.  $H$ - $Q$  характеристика насоса при различных скоростях рабочего колеса.

Графические зависимости  $HA$  (рисунок 2.7) построены для скоростей:  $\omega_1 = 39,27$  рад/с,  $\omega_2 = 35,3$  рад/с,  $\omega_3 = 31,4$  рад/с,  $\omega_4 = 27,5$  рад/с,  $\omega_5 = 23,7$  рад/с,  $\omega_6 = 19,6$  рад/с.

### 2.3. Определение потерь мощности в насосном агрегате при регулировании производительности насоса напорной задвижкой

Для определения потерь мощности при регулировании производительности насоса зададим следующие условия:

- диапазон изменения расхода  $Q_{\min} = 16000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $Q_{\max} = 23200 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- линейное давление на напорном коллекторе  $H_{\text{НК}}=70 \text{ м}$ ;
- в работе один НА;
- регулирование осуществляется напорной задвижкой.

Сначала определяются потери мощности при регулировании напорной задвижкой

$$\Delta N_{\text{ЗДВ}} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot 9,81}{\eta \cdot 3600} \cdot (H_{\text{НАС}} - H_{\text{ЛИН}}), \quad (2.23)$$

где  $H_{\text{НАС}}$  – линейное давление насоса, м;

$H_{\text{ЛИН}}$  – линейное давление на напорном коллекторе, м.

Мощность, необходимая для выполнения технологического процесса определяется по формуле:

$$N_{\text{ЛИН}} = \frac{H_{\text{ЛИН}} \cdot \gamma \cdot Q \cdot 9,81}{\eta \cdot 3600} \cdot 10^{-3}. \quad (2.24)$$

Результаты расчетов при регулировании производительности насоса напорной задвижкой приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Расчетные данные параметров НА при регулировании производительности насоса напорной задвижкой

№	$Q$ , тысяч $\text{м}^3/\text{ч}$	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0	22,0	23,20
1	$N_{\text{НАС}}$ , кВт	4360,0	4633,0	4905,0	5178,0	5450,0	5723,0	5995,0	6322,0
2	$N_{\text{ТЕХН}}$ , кВт	3468,0	3685,0	3902,0	4119,0	4335,0	4552,0	4769,0	5029,0
3	$\Delta N_{\text{ЗДВ}}$ , кВт	892,0	948,0	1003,0	1059,0	1115,0	1171,0	1226,0	1293,0

По данным таблицы 2.5 построены графики расхода мощности при регулировании производительности НА задвижкой (рисунок 2.8).

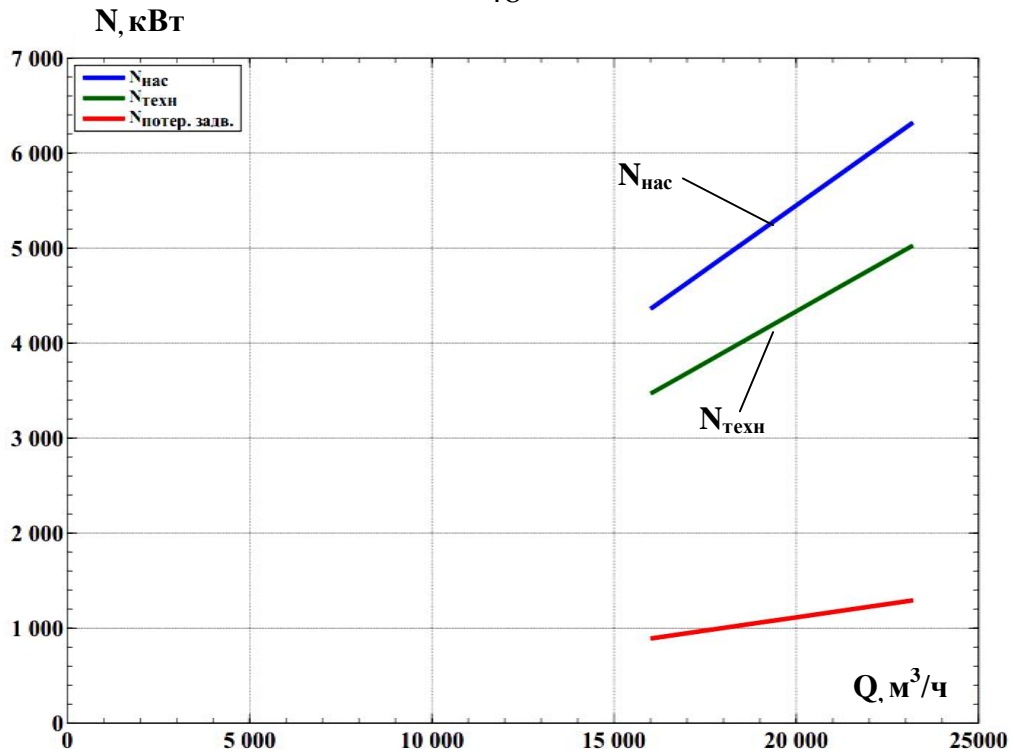


Рисунок 2.8. Графики расхода мощности  $N$  при работе насосного агрегата с регулированием производительности  $Q$  задвижкой

Графики (рисунок 2.8) показывают, что при регулировании производительности НА задвижкой, потери электроэнергии значительны и составляют от 900 до 1300 кВт.

#### 2.4. Особенности регулируемого электропривода насосных агрегатов

Для определения потерь мощности в НА и эффективности его регулирования с помощью частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП), примем следующие условия:

- диапазон изменения расхода:  $Q_{\min} = 16000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $Q_{\max} = 23200 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- линейное давление на напорном коллекторе  $H_{\text{НК}} = 70 \text{ м}$ ;
- в работе один НА.

Вид характеристик насоса (рисунок 2.7) показывает, что для заданных технологических условий диапазон регулирования скорости вращения ЭП лежит в пределах от  $n = 262 \text{ об/мин}$  до  $n = 375 \text{ об/мин}$ . Потери мощности на регулирование в напорной задвижке при этом равны нулю.



Потери мощности при регулировании с ЧРЭП, в основном, появляются в ПЧ, которые определяются:

$$\Delta N_{ПЧ} = \frac{N_{ДВ}(1 - \eta_{ПЧ})}{\eta_{ПЧ}} = N_2 \cdot \frac{1}{\eta_H \cdot \eta_{ДВ}} \cdot \frac{1 - \eta_{ПЧ}}{\eta_{ПЧ}}, \quad (2.25)$$

где  $\eta_{ПЧ}$  – КПД преобразователя частоты.

Расчетные мощности при КПД ПЧ, равном 97,5%, показаны в таблице 2.6, а графики мощностей приведены на рисунке 2.9.

Таблица 2.6 – Расчетные потери мощности ПЧ

№	Расход, тысяч м <sup>3</sup> /ч	23,2	22,0	21,0	20,0	19,0	18,0	17,0	16,0
1	$\Delta N_{техн},$ кВт	5029,0	4769,0	4552,0	4335,0	4119,0	3902,0	3685,0	3468,0
2	$\Delta N_{ПЧ},$ кВт	129,0	122,0	117,0	111,0	106,0	100,0	95,0	89,0

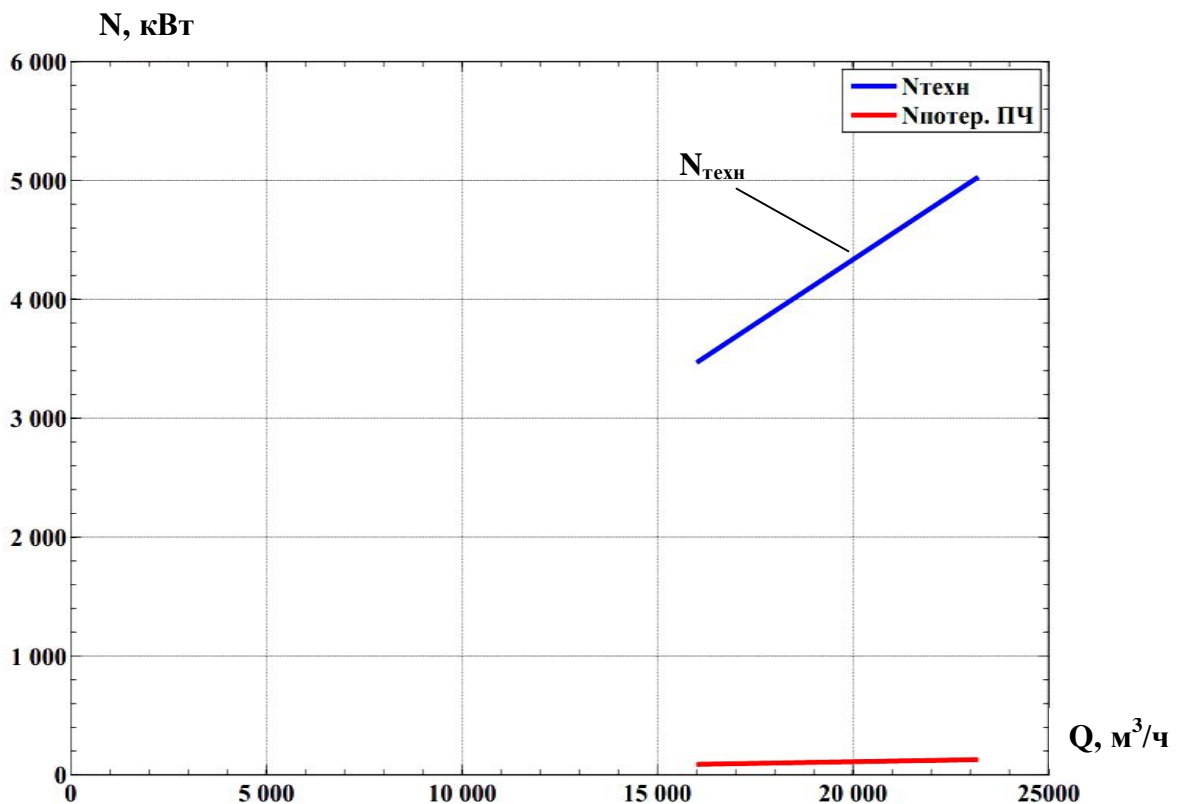


Рисунок 2.9. График технологической мощности и потерь мощности в преобразователе с КПД, равным 97,5 % в зависимости от подачи насоса

Эффект от внедрения ЧРЭП, относительно регулирования производительности насоса с напорной задвижкой, можно оценить, сравнив

потери мощности на задвижке и потери в ПЧ, при соответствующих подачах насоса [23, 24]

$$N_{\text{ЭКОН}} = \Delta N_{\text{ЗАДВ}} - \Delta N_{\text{ПР}}, \quad (2.26)$$

где  $\Delta N_{\text{ЗАДВ}}$  – потери мощности на задвижке, кВт;

$\Delta N_{\text{ПР}}$  – потери мощности на ПЧ, кВт.

Результаты расчетов потерь мощности при использовании некоторых способов регулирования производительности НА показаны в таблице 2.7, а графики - на рисунке 2.10.

Таблица 2.7 – Результаты расчетов потерь мощности НА

№	Расход тысяч м <sup>3</sup> /ч	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0	22,0	23,2
1	$\Delta N_{\text{ЗАДВ}}$ , кВт	892,0	948,0	1003,0	1059,0	1115,0	1171,0	1226,0	1293,0
2	$N_{\text{ЭКОН}}$ , кВт	89,0	95,0	100,0	106,0	111,0	117,0	122,0	129,0
3	$\Delta N_{\text{ПР}}$ , кВт	803,0	853,0	903,0	954,0	1004,0	1054,0	1104,0	1164,0

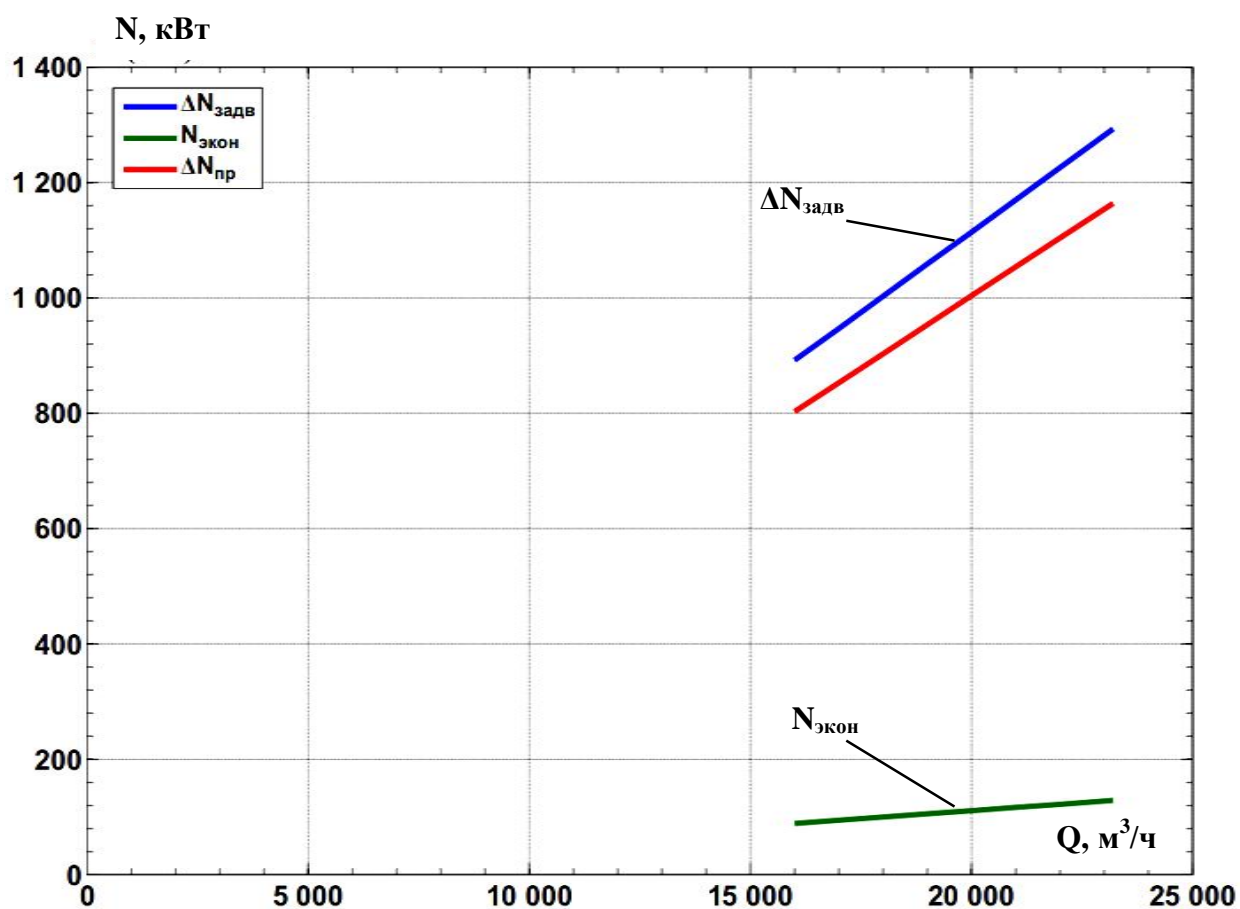


Рисунок 2.10. Графики потерь мощности при регулировании производительности НА задвижкой  $\Delta N_{\text{ЗАДВ}}$  и ЧРЭП  $\Delta N_{\text{ПР}}$ .

Приведенные в таблице 2.7 данные показывают, что:

- потери мощности при регулировании производительности насоса задвижкой существенно больше, чем потери при ЧРЭП;
- величина потерь на задвижке зависит от избыточного напора на выходе насоса по отношению к линейному напору насоса;
- эффективность применения ЧРЭП зависит от глубины регулирования расхода насоса;
- в зоне максимальных подач насоса существует область, в которой потери на задвижке оказываются меньше потерь в ЧРЭП,  $\Delta N_{ЗДВ} < \Delta N_{ПР}$ ;
- зона максимальных подач насоса с неблагоприятным режимом работы преобразователя зависит от величины КПД преобразователя.

В таблице 2.8 приведены расчетные данные параметров способов регулирования производительности НА с напорной задвижкой и с ЧРЭП.

Таблица 2.8 – Расчетные данные способов регулирования НА

Способ регулирования	Величины	точка 1	точка 2	точка 3	точка 4	точка 5	точка 6
Без учета КПД ПЧ	$Q$ , тысяч м <sup>3</sup> /ч	22,0	20,0	16,8	14,7	12,6	10,5
	$\eta_{нас}$ , %	88,0	88,0	88,0	88,0	88,0	88,0
	$P$ , кВт	6200,0	4521,0	2996,0	2007,0	1264,0	732,0
Задвижка	$Q$ , тысяч м <sup>3</sup> /ч	22,0	21,0	20,0	19,0	18,0	17,0
	$\eta_{нас}$ , %	88,0	85,0	83,0	80,0	74,0	74,0
	$\eta_{ПЧ}$ , %	97,0	97,0	97,0	97,0	97,0	97,0
	$P$ , кВт	6200,0	6100,0	6000,0	5800,0	5700,0	5600,0
ЧРЭП	$Q$ , тысяч м <sup>3</sup> /ч	22,0	20,0	16,8	14,7	12,6	10,5
	$\eta_{ПЧ}$ , %	97,0	97,0	97,0	97,0	97,0	97,0
	$P$ , кВт	6392,0	4661,0	3089,0	2069,0	1303,0	754,0

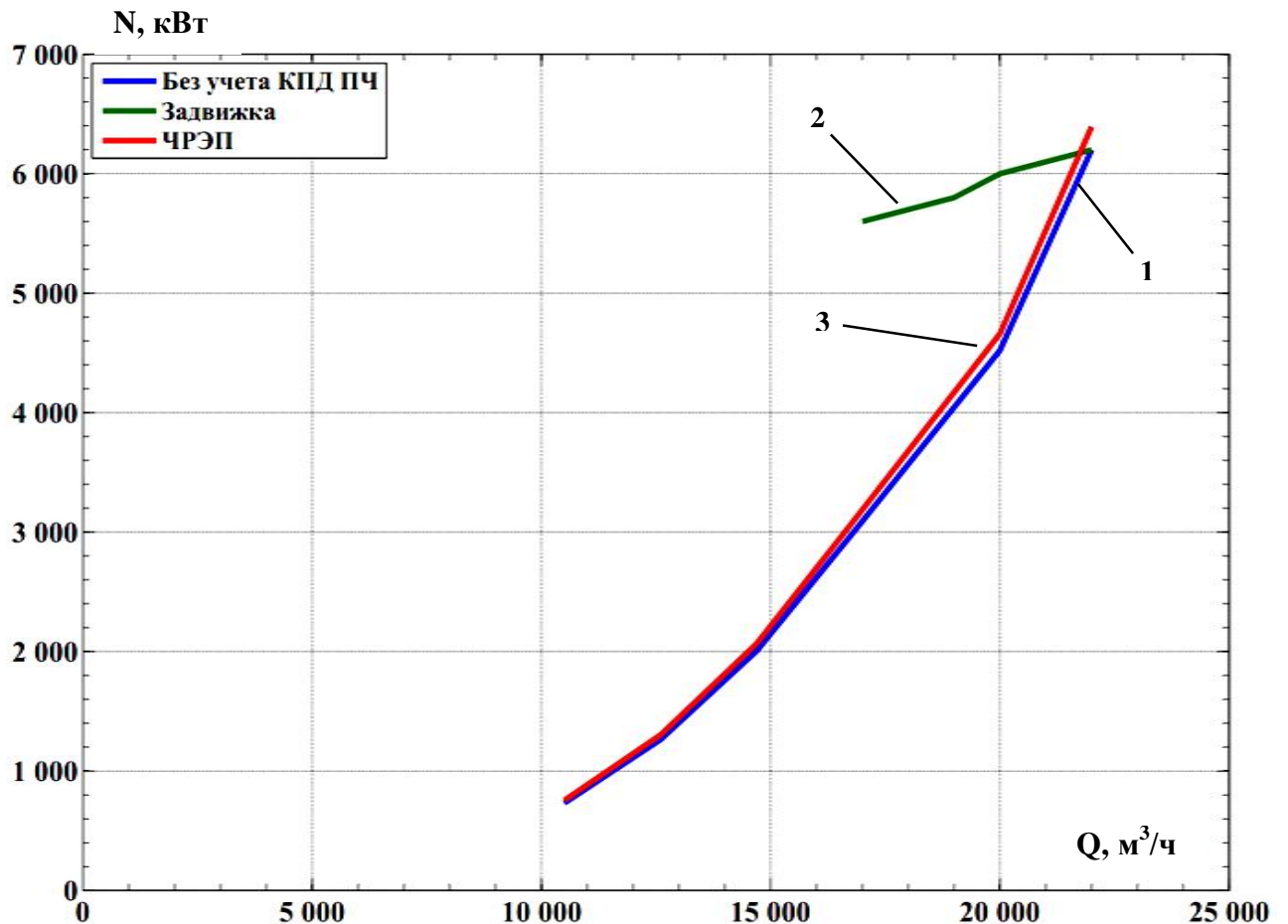


Рисунок 2.11. Графики потребления мощности насосом при разных способах регулирования: 1 – без учета КПД ПЧ; 2 – регулирование задвижкой; 3 – регулирование с помощью ЧРЭП

Графические зависимости на рисунке 2.11 показывают, что при использовании ЧРЭП повышается энергетическая эффективность эксплуатации технологического оборудования, т.е. потери мощности в НА имеют меньшее значение, чем при регулировании напорной задвижкой [25-28]. Однако, несмотря на это, в зоне максимальных подач насоса существует область, в которой потери мощности при регулировании с помощью ЧРЭП оказываются больше, чем при регулировании задвижкой.

#### Выводы по второй главе:

1. При отсутствии статической составляющей напора НА его производительность пропорциональна скорости вращения насоса.
2. Полезная мощность НА пропорциональна кубу скорости вращения.

3. КПД НА не зависит от скорости вращения при отсутствии противодействия.

4. ЧРЭП уменьшает потери на задвижке, снизив избыточный напор на выходе насоса посредством регулирования скорости НА.

5. Величина потерь мощности на задвижке зависит от избыточного напора на выходе насоса по отношению к линейному напору насоса.

6. Эффективность применения ЧРЭП зависит от глубины регулирования расхода насоса.

7. В зоне максимальных подач насоса существует область, в которой потери мощности при регулировании задвижкой оказываются меньше потерь, чем при регулировании с помощью ЧРЭП.

## ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОРОСИТЕЛЬНОЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ

### 3.1. Математическое описание элементов системы электроснабжения оросительной насосной станции

#### 3.1.1. Математическое описание трансформатора и линии электропередачи

Математическое описание трансформатора предполагает математические расчеты составляющих частей трансформатора в соответствии со схемами замещения. Основная цель расчетов заключается в определении сопротивлений и индуктивностей цепи намагничивания трансформатора. Исходными данными для расчетов служат паспортные данные трансформатора, а рекомендуемая схема замещения является Г-образной схемой (рисунок 3.1).

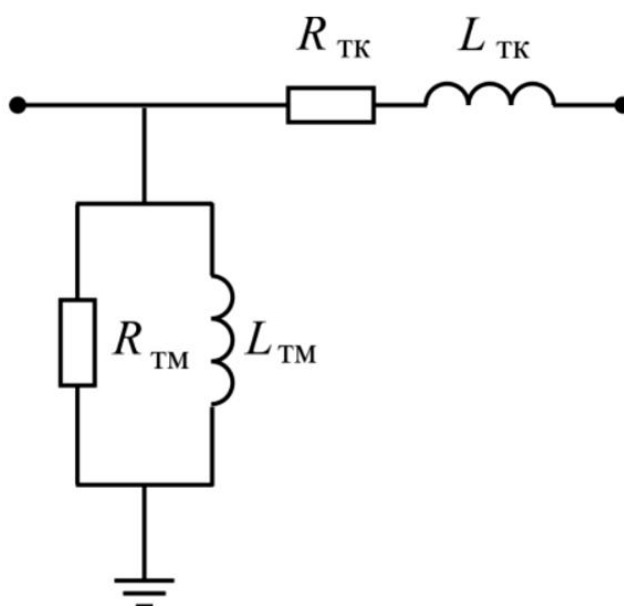


Рисунок 3.1. Г-образная схема замещения трансформатора:  $R_{ТМ}$  - активное сопротивление цепи намагничивания;  $L_{ТМ}$  - индуктивность цепи намагничивания;  $R_{ТК}$  - активное сопротивление короткого замыкания трансформатора;  $L_{ТК}$  - индуктивность, соответствующая сопротивлению короткого замыкания трансформатора.

Активное сопротивление цепи намагничивания трансформатора можно рассчитать по формуле, Ом

$$R_{\text{TM}} = \frac{U^2}{P_{xx}} \quad (3.1)$$

где  $P_{xx}$  – активные потери холостого хода трансформатора, Вт.

Индуктивное сопротивление цепи намагничивания трансформатора равно, Ом

$$X_{\text{TM}} = \frac{U^2}{Q_{xx}}, \quad (3.2)$$

где  $Q_{xx}$  – реактивные потери холостого хода трансформатора.

С учетом  $X_{\text{TM}}$  индуктивность цепи намагничивания трансформатора можно рассчитать по следующей формуле

$$L_{\text{TM}} = \frac{X_{\text{TM}}}{\omega}, \text{ Гн.}$$

Полная мощность в комплексной форме по схеме замещения (последовательная цепь) трансформатора

$$S_{\text{TK}} = P_{\text{TK}} + jQ_{\text{TK}}, \text{ ВА.}$$

Полное сопротивление цепи с учетом  $S_{\text{TK}}$  можно рассчитать по формуле

$$Z_{\text{TK}} = \frac{S_{\text{TK}}}{3 \cdot I_{\text{ном}}^2}, \text{ Ом.}$$

Индуктивность  $L_{\text{TK}}$  по схеме замещения трансформатора, Гн

$$L_{\text{TK}} = \frac{X_{\text{TK}}}{2\pi \cdot f}, \quad (3.3)$$

где  $f$  – частота напряжения сети, Гц.

Для моделирования трансформатора необходим ряд параметров, которые не задаются в паспортных данных, и определяются расчетным способом.

Номинальный фазный ток первичной обмотки трансформатора определяется по формуле, А

$$I_{1н} = \frac{S_{2н}}{\sqrt{3}U_{1н}}, \quad (3.4)$$

где  $S_{2н}$  – номинальная мощность трансформатора, ВА.

Полное сопротивление короткого замыкания трансформатора

$$Z_k = \frac{U_{1H} u_k \%}{\sqrt{3} \cdot I_{1H} \cdot 100\%}, \quad (3.5)$$

где  $u_k$  – напряжение короткого замыкания, %.

Активное сопротивление короткого замыкания трансформатора определяется по формуле

$$r_k = \frac{P_k}{3I_{1H}^2}, \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление первичной и приведенное активное сопротивление вторичной обмоток трансформатора

$$R_1 = R'_2 = \frac{r_k}{2}, \text{ Ом.}$$

Коэффициент трансформации трансформатора

$$k = \frac{U_1}{U_2}.$$

Активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора

$$R_2 = \frac{R'_2}{k^2}, \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление короткого замыкания трансформатора

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}, \text{ Ом.}$$

Индуктивность рассеяния первичной обмотки и приведенная индуктивность рассеяния вторичной обмотки трансформатора

$$L_1 = L'_2 = \frac{X_k}{2\omega}, \text{ мГн.}$$

Индуктивность рассеяния вторичной обмотки трансформатора определяется по формуле

$$L_2 = \frac{L'_2}{k^2}, \text{ мГн.}$$

Сопротивление параллельной ветви намагничивающего контура трансформатора



$$R_m = \frac{U_1^2}{P_x}, \text{ Ом.}$$

Расчет активной составляющей тока холостого хода трансформатора производится по формуле

$$I_{xxa} = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot R_m}, \text{ А.}$$

Ток холостого хода трансформатора

$$I_{xx} = I_{\text{н}} \frac{I_x}{100}, \text{ А.}$$

Реактивная составляющая тока холостого хода трансформатора

$$I_{xxr} = \sqrt{I_{xx}^2 - I_{xxa}^2}, \text{ А.}$$

Взаимная индуктивность обмоток трансформатора определяется по формуле

$$L_m = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot \omega \cdot I_{xxr}}, \text{ Гн.}$$

Таким образом, все необходимые параметры для компьютерного моделирования трансформатора определяются и рассчитываются.

Элементы систем электроснабжения электроэнергетической системы соединены между собой ЛЭП, которые также являются частью системы. В расчетах ЛЭП могут применяться Т-образная и П-образная схемы замещения (рисунки 3.2 и 3.3) [21 – А].

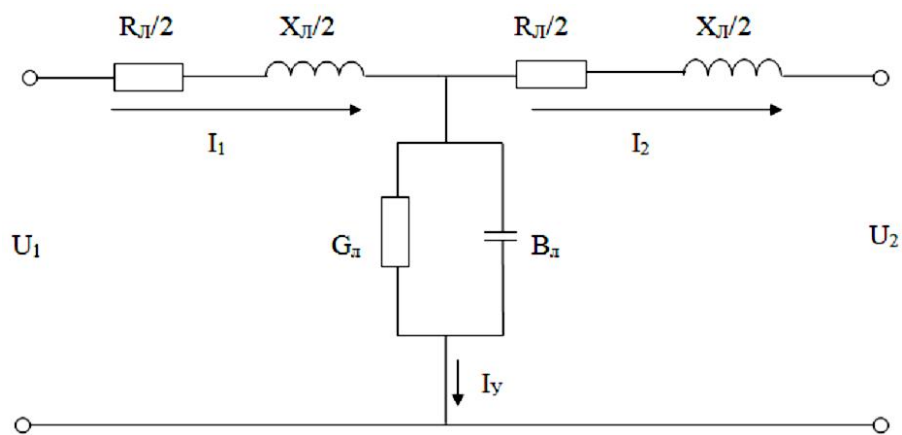


Рисунок 3.2. Т-образная схема замещения ЛЭП с сосредоточенными параметрами

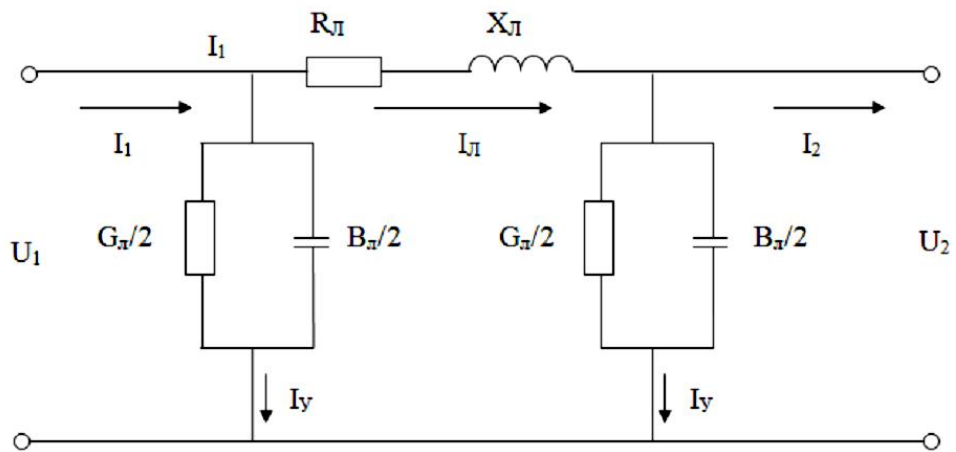


Рисунок 3.3. П-образная схема замещения ЛЭП с сосредоточенными параметрами

При моделировании ЛЭП необходимо учесть такие составляющие, как активное сопротивление  $R_{\text{л}}$ , реактивная емкостная проводимость линии  $B_{\text{л}}$ , активная проводимость линии  $G_{\text{л}}$ , длина линии, индуктивность и т.д. Активное сопротивление ЛЭП является параметром, определяющим процесс рассеивания энергии в виде отдачи тепла в окружающее пространство [20 – А].

Для проводов из цветных металлов, таких как алюминий и медь, принято определять сопротивление 1 км длины ЛЭП по формуле, Ом

$$r_0 = \frac{\rho}{F}, \quad (3.6)$$

где  $\rho$  – удельное активное сопротивление материала провода, Ом·мм<sup>2</sup>/км;

$F$  – сечение фазного провода, мм<sup>2</sup>.

Для провода из алюминия принимают  $\rho = 29,5 \div 31,5$  Ом·мм<sup>2</sup>/км, а для провода из меди  $\rho = 18 \div 19$  Ом·мм<sup>2</sup>/км.

По значению  $r_0$  можно определить сопротивление всей линии или определенного участка по следующей формуле

$$R_{\text{л}} = r_0 \cdot l, \quad (3.7)$$

где  $l$  – длина линии, км.

Индуктивное сопротивление провода ЛЭП зависит от конструктивного выполнения ЛЭП, диаметра проводов фазы, частоты тока в сети и расстояния между фазами.

Индуктивное сопротивление 1 км длины линии ЛЭП можно рассчитать по формуле, Ом

$$x_0 = \omega \cdot L_0, \quad (3.8)$$

где  $L_0$  – индуктивность фазы, Гн/км;

$\omega$  – угловая частота переменного тока, рад/с.

Индуктивное сопротивление линии определяется по формуле

$$X_{\text{л}} = x_0 \cdot l.$$

Расстояние между соседними проводами воздушной ЛЭП зависит от ее напряжения (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Примерные расстояния между проводами на опорах воздушных ЛЭП при различных классах напряжения

Напряжение, кВ	До 1	10	35	110	220
Расстояние, м	0,4-0,6	1-2	2,5-3	4-5	7

Анализ проведенных исследований показал, что индуктивное сопротивление ЛЭП практически не зависит от сечения проводов линии, а определяется исполнением линии и конструкцией фазы.

Активная проводимость ЛЭП обуславливается потерями активной мощности в режиме холостого хода линии. В линиях эти потери обусловлены явлением электрической «короны» или токами утечки через изоляторы [23 – А].

Величину активной проводимости ЛЭП можно рассчитать по формуле, См/км

$$g_0 = \frac{\Delta P_{\text{кор}}}{U_{\text{ном}}^2}, \quad (3.9)$$

где  $\Delta P_{\text{кор}}$  – потери мощности на корону, также могут быть учтены потери, связанные с токами утечки.

Активная проводимость участка ЛЭП определяется

$$G_{\text{л}} = g_0 \cdot l.$$

Реактивная емкостная проводимость ЛЭП обусловлена наличием емкостей между проводами линии и между «фазой» и «землей».

Емкостная проводимость воздушных и кабельных линий рассчитывается по формуле

$$b_0 = \omega \cdot C_0, \text{ См/км.}$$

Для ЛЭП длиной до 300 км можно полагать, что проводимость сосредоточены в середине линии, а сопротивления – по концам (Т-образная схема замещения), или, наоборот (Π-образная схема замещения). Примерные значения емкостных проводимостей для голых алюминиевых проводов воздушных ЛЭП находятся в пределах  $2,6-2,8 \cdot 10^{-6}$  См/км.

Удельная индуктивность сети определяется по формуле

$$L_0 = \frac{x_0}{2\pi f} = \frac{x_0}{314}.$$

Таким образом, приведенные математические выражения служат основой для компьютерного моделирования системы электроснабжения, включающей потребителей с электродвигательной нагрузкой.

### 3.1.2. Математическое описание асинхронного электродвигателя

АД широко используются в турбомеханизмах, особенно, в вентиляторах и компрессорах. Раньше для НА АД выбирались по максимальной доступной мощности, до 1,6 - 2 МВт. В настоящее время, с развитием науки и техники, АД производятся мощностью до 30 МВт, и потому АД двигатели по мощности мало уступают СД [29-32]. Конструктивно основными частями АД и СД являются статор и ротор. Одним из основных отличий в работе АД является наличие скольжения, которое в СД при нормальных режимах отсутствует. Обобщенная схема АД приведена на рисунке 3.4, где показано, как расположены трехфазные обмотки на статоре и роторе машины [19 – А, 24 – А, 33]. Принцип работы и процессы взаимосвязи параметров АД описываются законами электротехники и механики и могут быть математически

представлены в абсолютных или относительных единицах (о.е.) измерения. Обмотки статора и ротора АД подключены к симметричным трехфазным источникам питания, а уравнения равновесия электродвижущей силы (ЭДС) в этих обмотках основываются на втором законе Кирхгофа.

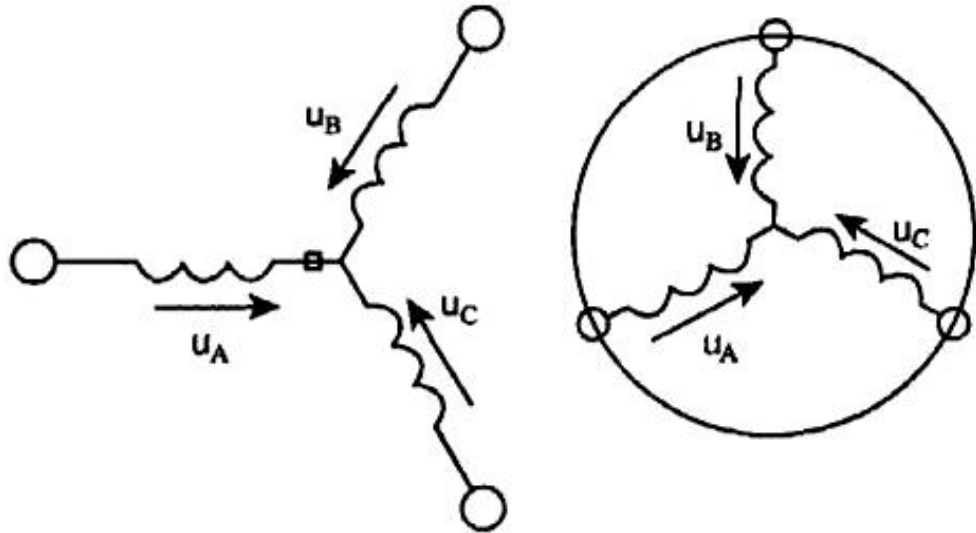


Рисунок 3.4. Обобщенная схема асинхронной машины

Мгновенные напряжения в обмотках АД можно описать уравнениями для статора [33]

$$\begin{aligned} u_A &= R_A i_A + \frac{d\Psi_A}{dt}, \\ u_B &= R_B i_B + \frac{d\Psi_B}{dt}, \\ u_C &= R_C i_C + \frac{d\Psi_C}{dt}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

для ротора

$$\begin{aligned} u_a &= R_a i_a + \frac{d\Psi_a}{dt}, \\ u_b &= R_b i_b + \frac{d\Psi_b}{dt}, \\ u_c &= R_c i_c + \frac{d\Psi_c}{dt}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

В уравнениях (3.10) и (3.11) приведены мгновенные значения напряжения, тока, потокосцепления и активных сопротивлений статора и ротора АД.

Потокосцепление обмоток АД описывается законом Ампера [34-38]

для статора

$$\begin{aligned}\Psi_A &= L_{AA}i_A + L_{AB}i_B + L_{AC}i_C + L_{Aa}i_a + L_{Ab}i_b + L_{Ac}i_c, \\ \Psi_B &= L_{BA}i_A + L_{BB}i_B + L_{BC}i_C + L_{Ba}i_a + L_{Bb}i_b + L_{Bc}i_c, \\ \Psi_C &= L_{CA}i_A + L_{CB}i_B + L_{CC}i_C + L_{Ca}i_a + L_{Cb}i_b + L_{Cc}i_c.\end{aligned}\quad (3.12)$$

для ротора

$$\begin{aligned}\Psi_a &= L_{aA}i_A + L_{aB}i_B + L_{aC}i_C + L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c, \\ \Psi_b &= L_{bA}i_A + L_{bB}i_B + L_{bC}i_C + L_{ba}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c, \\ \Psi_c &= L_{cA}i_A + L_{cB}i_B + L_{cC}i_C + L_{ca}i_a + L_{cb}i_b + L_{cc}i_c.\end{aligned}\quad (3.13)$$

Для описания равновесия моментов на валу АД используется уравнение движения ЭП [33]

$$J \frac{d\vec{\omega}_m}{dt} = \vec{M} - \vec{M}_c, \quad (3.14)$$

где  $J$  – момент инерции на валу АД, кг·м<sup>2</sup>;

$\vec{\omega}_m$  – угловая скорость вала АД, рад/с;

$M_c$  – момент сопротивления рабочего механизма, Н·м.

Для определения связи векторных величин момента, потокосцепления и тока применяется соотношение

$$\vec{M} = k(\vec{\Psi} \times \dot{i}). \quad (3.15)$$

где  $\dot{i}$  – ток в обмотках АД, А;

$\vec{\Psi}$  – потокосцепление АД.

Необходимо отметить, что для математического описания АД, уравнения (3.10) – (3.15) имеют следующие недостатки-- в одних уравнениях приведены векторные величины, а в других - скалярные величины; уравнения (3.12) и (3.13) являются уравнениями с переменными коэффициентами; уравнение (3.15) является нелинейным.

С целью упрощения математического описания АД можно использовать метод пространственного вектора. Метод позволяет существенно упростить и

сократить вышеприведенные системы уравнений. Кроме этого указанный метод дает возможность связать уравнения (3.10) – (3.15) в единую систему с векторными переменными состояния. Сущность метода заключается в представлении одним пространственным вектором мгновенные значения симметричных трехфазных напряжений, токов и потокосцеплений. В результате получим

$$\begin{aligned}\vec{u}_S &= R_S \dot{i}_S + \frac{d\vec{\Psi}_S}{dt}, \\ \vec{u}_R &= R_R \dot{i}_R + \frac{d\vec{\Psi}_R}{dt}, \\ \vec{\Psi}_S &= L_S \dot{i}_S + L_m(\theta) \dot{i}_R, \\ \vec{\Psi}_R &= L_R \dot{i}_R + L_m(\theta) \dot{i}_S,\end{aligned}\tag{3.16}$$

где  $L_S, L_R$  – собственные индуктивности АД;

$L_m(\theta)$  – взаимная индуктивность.

С помощью метода пространственного вектора преобразуем уравнения (3.16) в следующий вид

$$\begin{aligned}\vec{u}_S &= R_S \dot{i}_S + \frac{d\vec{\Psi}_S}{dt} + j\omega_k \vec{\Psi}_S, \\ \vec{u}_R &= R_R \dot{i}_R + \frac{d\vec{\Psi}_R}{dt} + j(\omega_k - p\omega_m) \vec{\Psi}_R, \\ \vec{\Psi}_S &= L_S \dot{i}_S + L_m \dot{i}_R, \\ \vec{\Psi}_R &= L_R \dot{i}_R + L_m \dot{i}_S,\end{aligned}\tag{3.17}$$

где  $\omega_m$  – частота вращения ротора АД;

$p$  – число пар полюсов АД.

В уравнениях (3.17) приведены коэффициенты, величины которых являются постоянными, а также их возможно определить по паспортным данным двигателя. По уравнению (3.17) получено шесть пар векторов:  $(\dot{i}_S, \dot{i}_R)$ ,  $(\vec{\Psi}_S, \vec{\Psi}_R)$ ,  $(\dot{i}_S, \vec{\Psi}_S)$ ,  $(\dot{i}_S, \vec{\Psi}_R)$ ,  $(\dot{i}_R, \vec{\Psi}_S)$ ,  $(\dot{i}_R, \vec{\Psi}_R)$ . Затем, после выбора той или иной пары векторов, уравнение момента АД приобретает определенность, вследствие чего количество уравнений в (3.17) сокращается

$$\begin{aligned}
\bar{M} &= \frac{3}{2} p L_m \cdot \text{Mod}(\dot{i}_R \times \dot{i}_S), \\
\bar{M} &= \frac{3}{2} p \cdot \text{Mod}(\bar{\Psi}_S \times \dot{i}_S), \\
\bar{M} &= \frac{3}{2} p k_R \cdot \text{Mod}(\bar{\Psi}_R \times \dot{i}_S).
\end{aligned} \tag{3.18}$$

Ранее описание АД приведено в абсолютных единицах, но, как уже было отмечено, описание в относительных единицах параметров АД также осуществимо. Для этого уравнения (3.14), (3.17) и (3.18) приводятся к относительным величинам. Амплитудные номинальные значения фазного напряжения и тока, номинальное значение угловой частоты выбираются как основные базовые величины

$$\begin{aligned}
U_b &= \sqrt{2} U_{\text{фн}}, \\
I_b &= \sqrt{2} I_{\text{н}}, \\
\omega_b &= \omega_{\text{н}} = 2\pi f_{\text{н}}.
\end{aligned} \tag{3.19}$$

На основе выражения (3.19) определяются базовые значения всех переменных и коэффициентов, входящих в уравнения

$$R_b = \frac{U_b}{I_b}, \quad L_b = \frac{U_b}{\omega_b I_b}, \quad \Psi_b = \frac{U_b}{\omega_b}, \quad M_b = \frac{3}{2} p \frac{U_b I_b}{\omega_b}, \quad t_b = \frac{1}{\omega_b}. \tag{3.20}$$

В результате для описания АД получим обобщенную систему уравнений [33]

$$\begin{aligned}
\bar{u}_S &= r_S \bar{i}_S + \frac{d\bar{\psi}_S}{dt} + j\alpha_k \bar{\psi}_S, \\
\bar{u}_R &= r_R \bar{i}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j(\alpha_k - p\mathcal{G}_m) \bar{\psi}_R, \\
\bar{\psi}_S &= x_S \bar{i}_S + x_m \bar{i}_R, \\
\bar{\psi}_R &= x_R \bar{i}_R + x_m \bar{i}_S, \\
m &= k \cdot \text{Mod}(\bar{\psi}_i \times \bar{i}_k), \\
T_m \frac{d\mathcal{G}_m}{dt} &= m - m_c.
\end{aligned} \tag{3.21}$$



В уравнениях (3.21) все переменные и коэффициенты уравнения приведены в о.е., значения которых получены в результате деления фактических значений на базовые.

Переменные и параметры в о.е., которые приведены в уравнениях (3.21)

$$\bar{u} = \frac{\vec{u}}{U_b}, \quad \bar{i} = \frac{\vec{i}}{I_b}, \quad \bar{\psi} = \frac{\vec{\Psi}}{\Psi_b} \quad - \text{ электромагнитные переменные состояния -}$$

напряжение, ток, потокосцепление, в о.е.;

$$\alpha_k = \frac{\omega_k}{\omega_b}, \quad \mathcal{G}_m = \frac{\omega_m}{\omega_b} \quad - \text{ частота вращения системы координат и частота}$$

вращения ротора, о.е.;

$$m = \frac{\vec{M}}{M_b} \quad - \text{ момент на валу машины, о.е.};$$

$$r_S = \frac{R_S}{R_b}, \quad r_R = \frac{R_R}{R_b}, \quad x_S = \frac{\omega_b L_S}{R_b}, \quad x_R = \frac{\omega_b L_R}{R_b}, \quad x_m = \frac{\omega_b L_m}{R_b}, \quad \bar{T}_m = \frac{J \omega_b^2}{M_b} \quad -$$

где  $r_S$  и  $r_R$  активные сопротивления статора и ротора АД в о.е.,  $x_S$  и  $x_R$  индуктивные сопротивления статора и ротора в о.е.,  $T_m$  – электромеханическая постоянная времени.

В уравнениях (3.21) время принято в о.е.

$$\bar{t} = \frac{t}{t_b} = \omega_b t.$$

Единицей измерения времени в уравнениях (3.21) является  $t_b = \frac{1}{\omega_b}$ , а не секунда.

Математическое описание и анализ АД с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат, а также во вращающейся системе координат детально рассмотрено в работе Германа-Галкина С.Г. [33].

Приведенные уравнения и выражения 3.10-3.21 служат для математического описания АД. Детальный анализ математического описания АД выполнен в работах Ковача К.П. [37], Шрейнера Р.Т. [41] и других, по материалам которых можно выделить структурные схемы АД (рисунок 3.5)

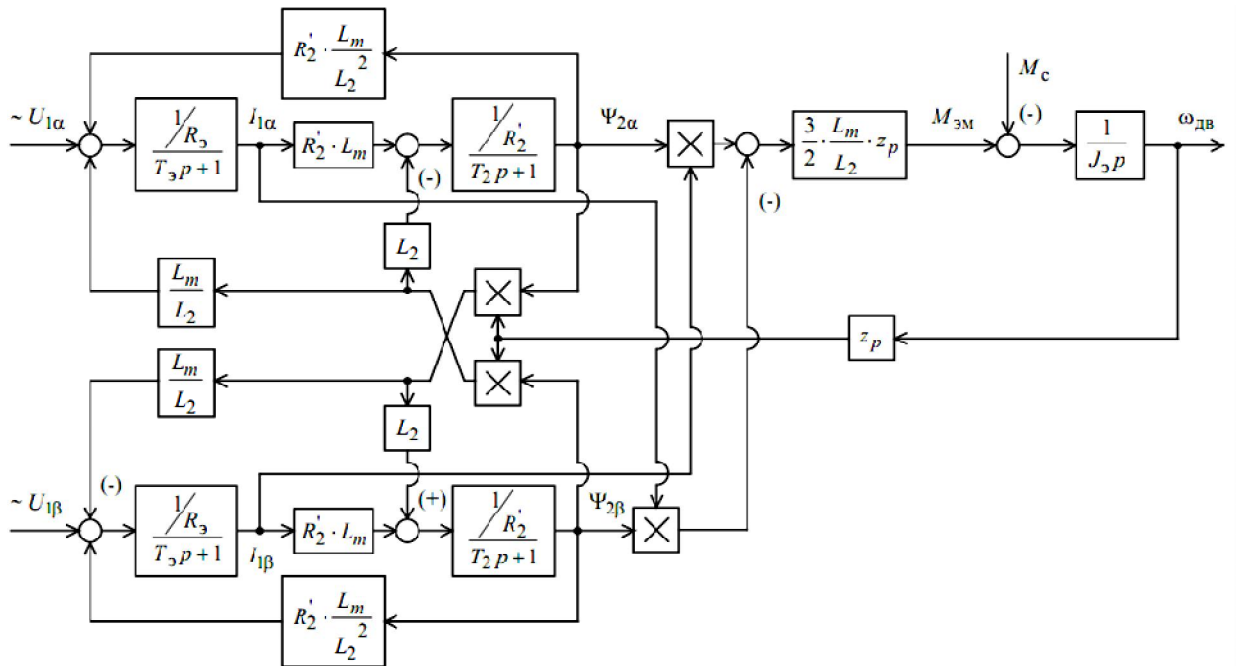


Рисунок 3.5. Структурная схема АД в неподвижной системе координат статора  $\alpha, \beta$

На рисунке 3.6 показана структурная схема АД в координатах  $d, q$ .

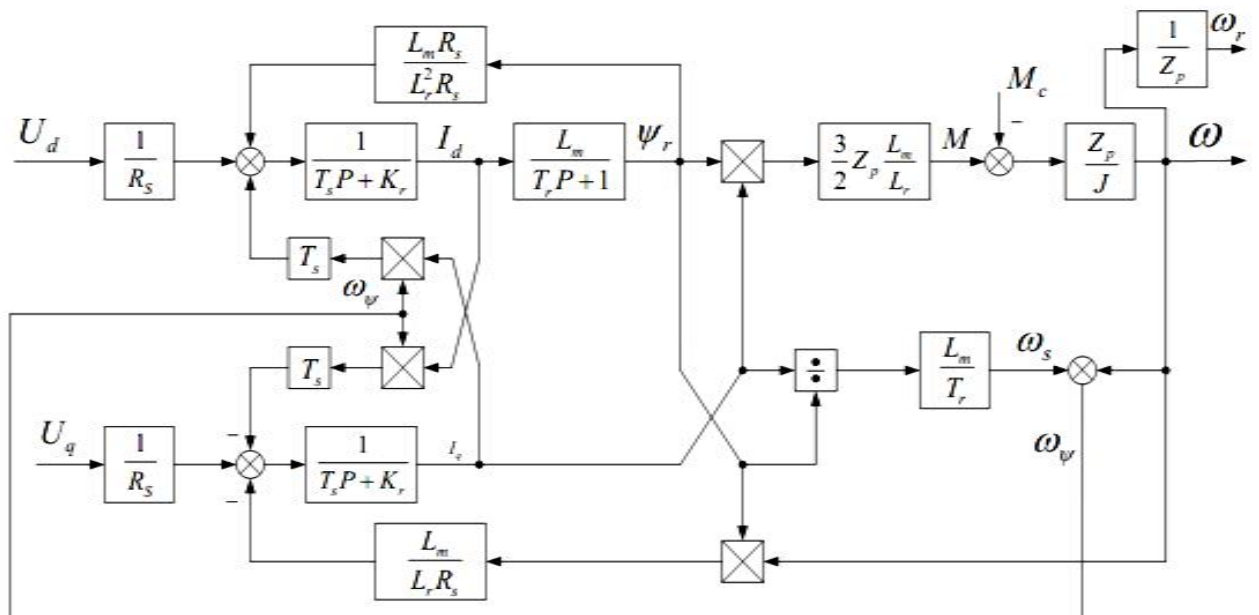


Рисунок 3.6. Структурная схема АД в координатах  $d, q$

Приведенные структурные схемы служат основой для компьютерного моделирования. В работе Германа-Галкина С.Г. [33] рассмотрены компьютерные модели, разработанные по данным схемам, однако они не полностью пригодны для комплексного анализа системы электроснабжения ОНС.

### 3.1.3. Математическое описание явнополюсного синхронного электродвигателя

В ОНС первого подъема обычно используют ВСД мощностью свыше 2 МВт и, соответственно, для технологии подачи воды использование скоростных СД нецелесообразно. Поэтому применяются явнополюсные СД, скорость вращения которых ниже, чем неявнополюсных СД [38-40]. Для упрощения математического описания явнополюсного СД используется модель двухфазного СД, схема соединения обмоток которого приведена на рисунке 3.7 [23, 40].

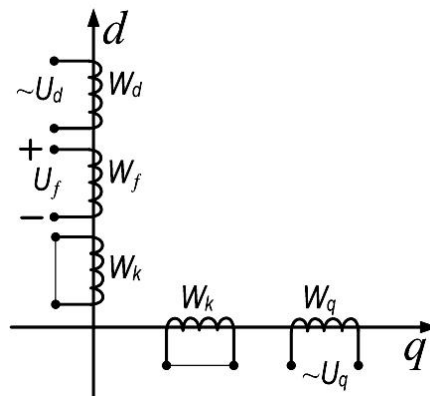


Рисунок 3.7. Схема модели СД в осях  $d$ - $q$ .

Система дифференциальных уравнений Парка - Горева для данной модели (рисунок 3.7) примет вид [38]

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{d\psi_d}{dt} + R_1 i_d - \omega \psi_q, \\
 -U_q &= \frac{d\psi_q}{dt} + R_1 i_q + \omega \psi_d, \\
 U_f &= \frac{d\psi_f}{dt} + R_f i_f, \\
 0 &= \frac{d\psi_{kd}}{dt} + R_{kd} \cdot i_{kd}, \\
 0 &= \frac{d\psi_{kq}}{dt} + R_{kq} \cdot i_{kq}, \\
 M_{эм} &= p_n (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d), \\
 M_{эм} - M_c &= \frac{J}{P_n} \frac{d\omega}{dt}.
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

Приложенное напряжение к обмоткам статора СД описывается следующим образом:

$$\begin{aligned} U_{1\alpha} &= U_{1\max} \sin \omega_{0\text{эл.}} t, \\ U_{1\beta} &= U_{1\max} \cos \omega_{0\text{эл.}} t. \end{aligned} \quad (3.23)$$

На модели (рисунок 3.7) напряжения по осям определяются формулами прямого преобразования координат [23, 24].

$$\begin{aligned} U_d &= U_{1\max} \sin \theta, \\ U_q &= -U_{1\max} \cos \theta. \end{aligned} \quad (3.24)$$

По модели СД (рисунок 3.7) потокосцепления СД можно описать

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + L_{df} i_f + L_{dk} i_{kd}, \\ \psi_q &= L_q i_q + L_{qk} i_{kq}, \\ \psi_f &= L_f i_f + L_{df} i_d + L_{fk} i_{kd}, \\ \psi_{kd} &= L_{kd} i_{kd} + L_{dk} i_{dk} + L_{fk} i_f, \\ \psi_{kq} &= L_{kq} i_{kq} + L_{qk} i_{qk}. \end{aligned} \quad (3.25)$$

В системе уравнений (3.22) и (3.25) входящие параметры обозначены переменными:  $\psi$  – потокосцепление в СД;  $i$  – ток в обмотках СД;  $\omega$  – угловая скорость СД;  $\theta$  – угол между продольной осью ротора и осью поля статора СД (рисунок 3.8) [23]. Индексы обозначают:  $d$  – продольная ось  $d$ ;  $q$  – поперечная ось  $q$ ;  $f$  – обмотка возбуждения СД;  $k$  – демпферная обмотка СД.

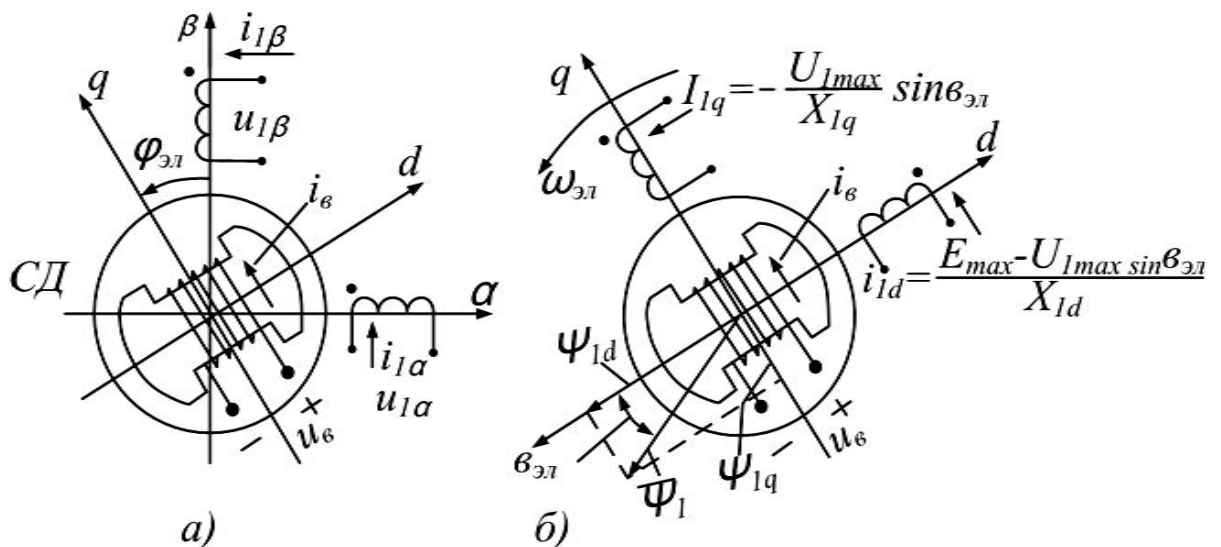


Рисунок 3.8. Модель явнополюсного СД: а) в осях  $\alpha, \beta, d, q$ ; б) в осях  $d, q$

В результате анализа получена система дифференциальных уравнений (3.22) и (3.25), которые для упрощения моделирования преобразуем в операторный вид [32]

$$\begin{aligned}
 U_d &= \psi_d p - \psi_q \omega_{эл} + i_d R_1, \\
 -U_q &= \psi_q p + \psi_d \omega_{эл} + i_q R_1, \\
 U_f &= \psi_f + i_f R_f, \\
 0 &= \psi_{kd} p + i_{kd} R_{kd}, \\
 0 &= \psi_{kq} + i_{kq} R_{kq}, \\
 M &= p_n (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d), \\
 M - M_c &= J p \omega.
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

Полученная система уравнений (3.26) является основой для компьютерного моделирования явнополюсного СД при исследовании его пусковых режимов работы. Основной целью компьютерного моделирования ЭД НС является определение их характеристик и параметров при различных способах пуска - при прямом и плавном пусках. Также компьютерное моделирование позволяет проводить различные эксперименты для анализа характеристик ЭП НС и исследовать новые, альтернативные способы пуска ЭД НА без дополнительных финансовых затрат.

Приведенные уравнения и выражения 3.22-3.26 служат для математического описания СД. Математическое описание СД выполнено в работах Горева А.А. [38], Калинина А.Г. [40], Перелмутера В.М. [72] и других. Представлены базовые структурные схемы СД, их математическое описание, параметры, необходимые для структурных схем. По данным проведенных исследований вышеупомянутыми учеными можно выделить структурную схему СД без демпферной обмотки во вращающейся системе координат (рисунок 3.9) и структурную схему СД с демпферной обмоткой во вращающейся системе координат (рисунок 3.10).

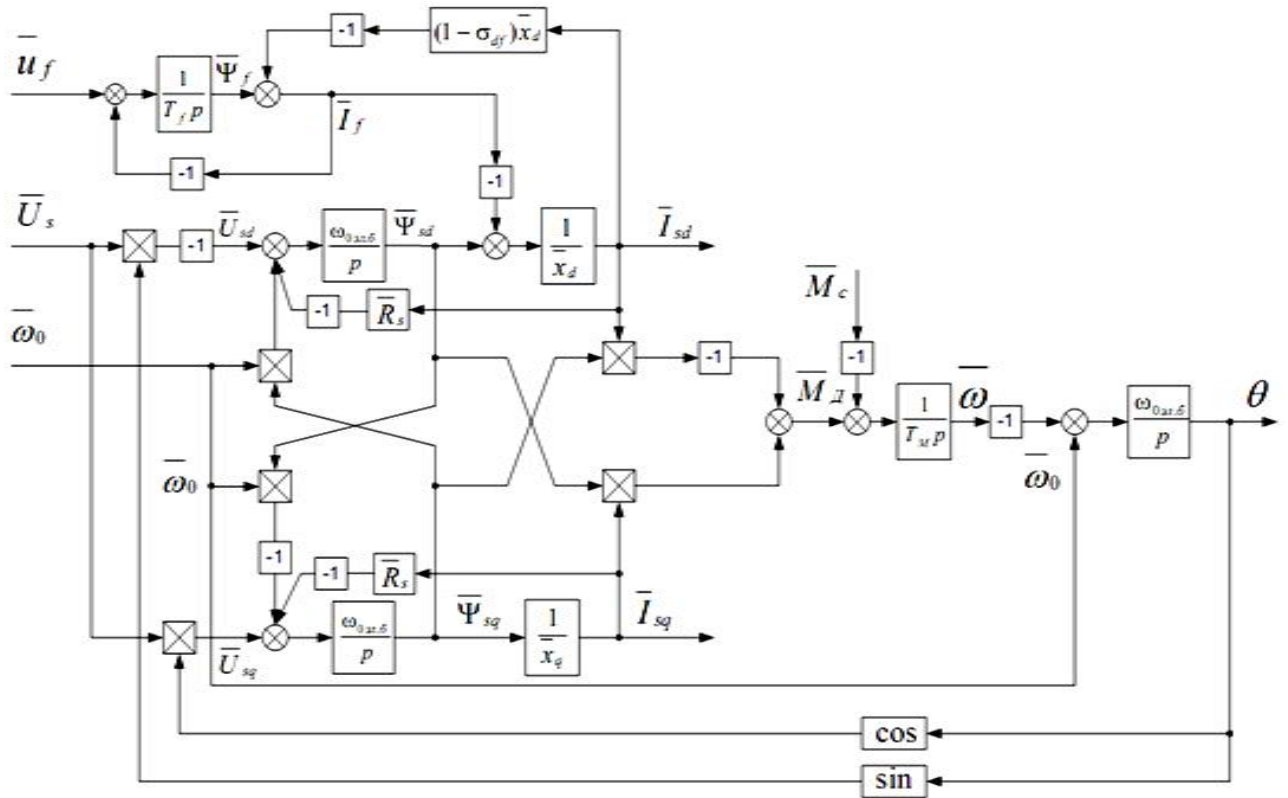


Рисунок 3.9. Структурная схема электропривода с СД без демпферной обмотки во вращающейся системе координат

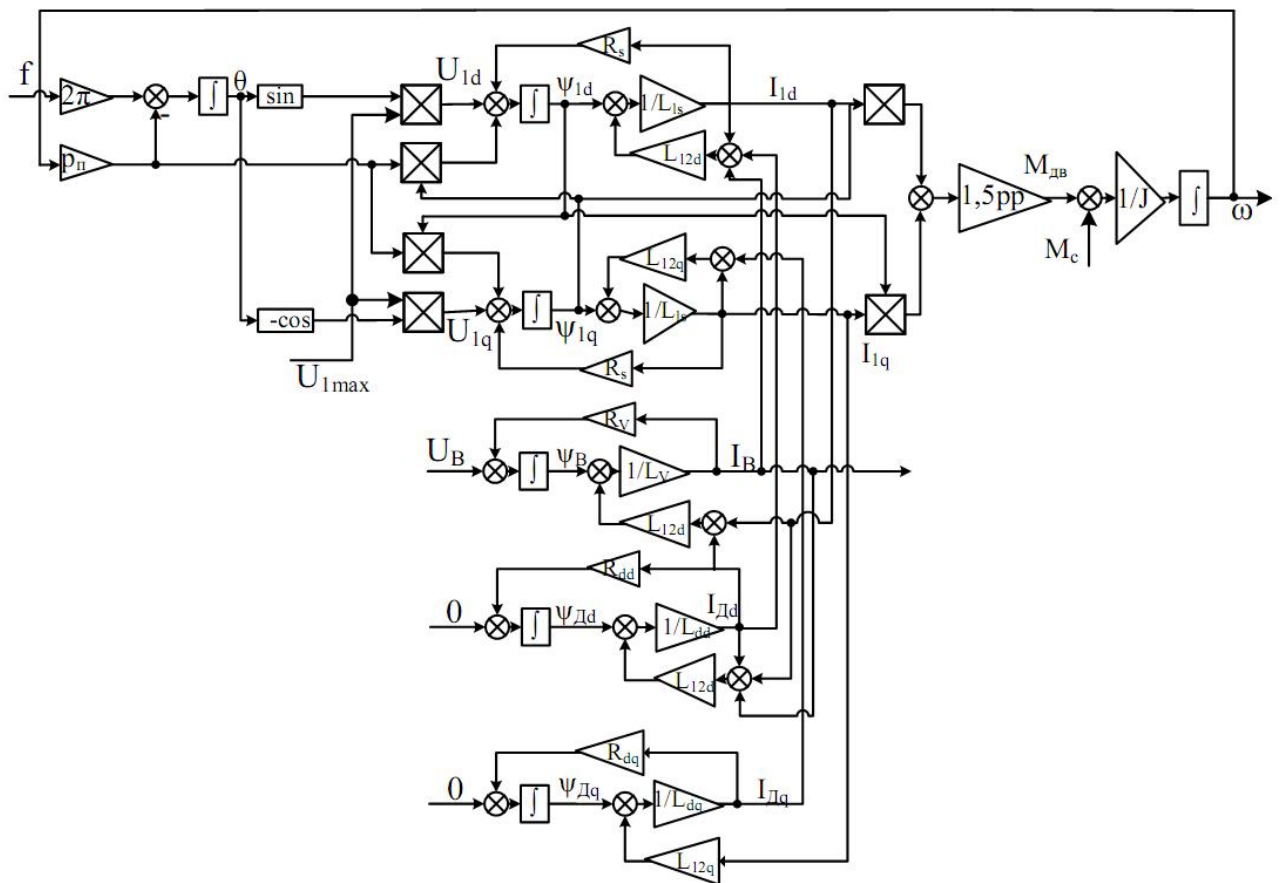


Рисунок 3.10. Структурная схема СД с демпферной обмотки во вращающейся системе координат

### 3.2. Компьютерное моделирование трансформаторов

Для компьютерного моделирования системы электроснабжения НС используем блок-схему, приведенную на рисунке 1.10. В состав системы электроснабжения ОНС входят трансформаторы, ЛЭП и СД НА. Математическое описание данных частей системы электроснабжения разработано. Далее необходимо провести расчеты и разработать компьютерные модели для исследования переходных процессов, протекающих в системе. Для расчетов используем каталожные данные элементов системы электроснабжения. В таблицах 3.2 и 3.3 приведены каталожные и расчетные данные основных параметров трансформаторов системы электроснабжения ОНС АНС-1.

Таблица 3.2 – Каталожные и расчетные параметры трансформатора марки АТДЦТН-125000/220/110/6-У1

Каталожные параметры	Расчетные параметры
$S_{ном}=125$ МВА, $U_{ВН}=230$ кВ, $U_{СН}=121$ кВ, $U_{НН}= 6,3; 10,5; 38,5$ кВ, $\Delta P_{ХХ}=65$ кВт, $\Delta P_{к.з(ВН-СН)}=315$ кВт, $\Delta P_{к.з(ВН-НН)}=160$ кВт, $\Delta P_{к.з(СН-НН)}=140$ кВт, $U_{к(ВН-СН)}=11$ %, $U_{к(ВН-НН)}=45$ % $U_{к(СН-НН)}=28$ % $I_{ХХ}=0,4$ %	$I_{1н} = 314,4$ А; $Z_k = 46,55$ Ом; $r_k = 1,06$ Ом; $R_1 = R_2 = 0,53$ Ом; $k = 1,9$ ; $R_2 = 0,147$ Ом; $x_k = 46,52$ Ом; $L_1 = L_2 = 0,074$ мГн; $L_2 = 0,02$ мГн; $R_m = 813846$ Ом; $I_{ХХa} = 0,1633$ А; $I_{ХХ} = 1,256$ А; $I_{ХХr} = 1,245$ А; $L_m = 340$ Гн.

Система электроснабжения ОНС АНС-1 получает питание от Кайраккумской ГЭС с установленной мощностью 250 МВт на напряжении 220 кВ. Имитационная модель источника питания энергосистемы Аштского района показана на рисунке 3.11.

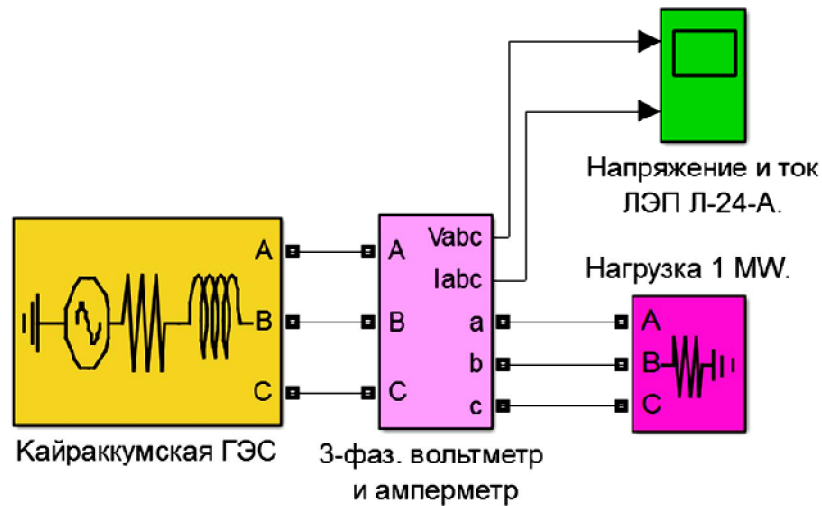


Рисунок 3.11. Компьютерная модель источника питания СЭС ОНС АНС-1

Результаты моделирования показаны на рисунке 3.12.

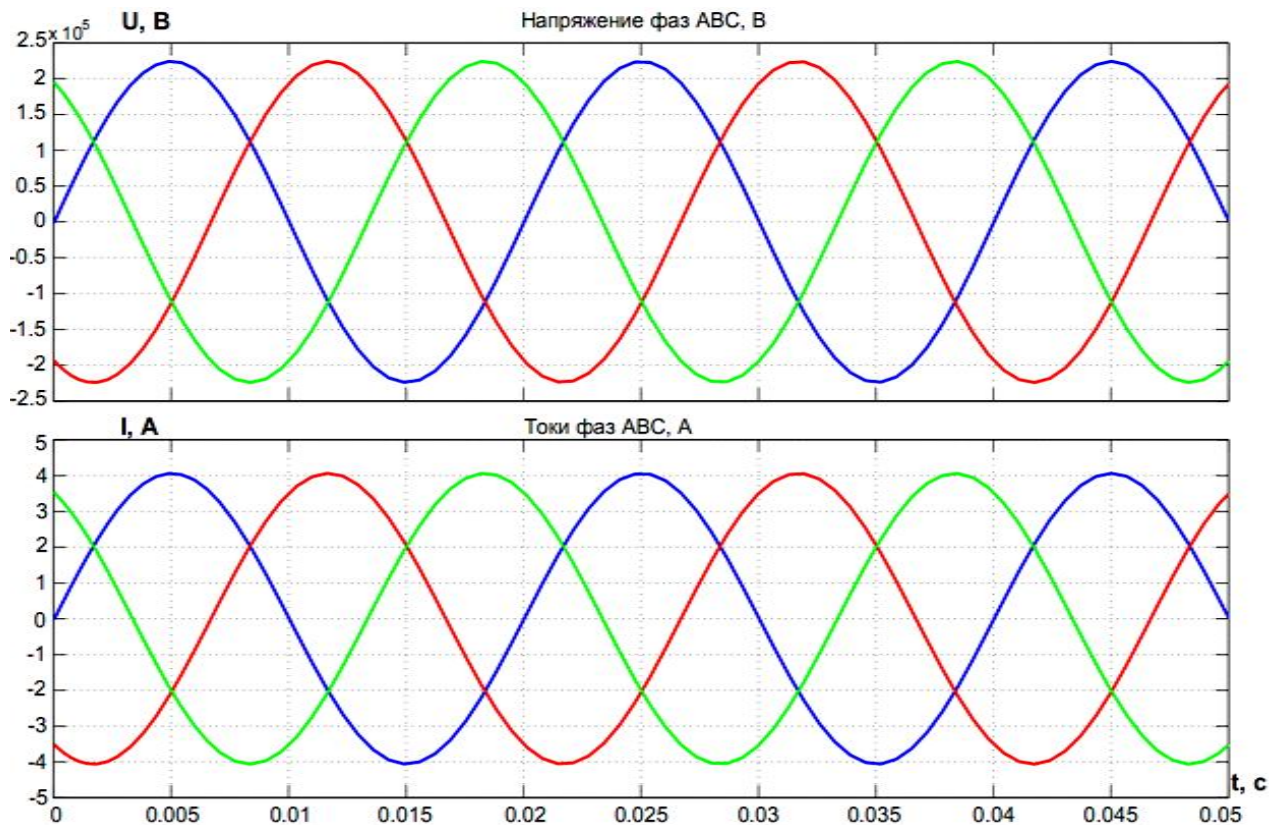


Рисунок 3.12. Графики изменения напряжения и тока на выходе источника питания СЭС ОНС АНС-1

Используя данные таблицы 3.2 смоделируем трансформатор марки АТДЦТН-125000/220/110 (рисунок 3.13).



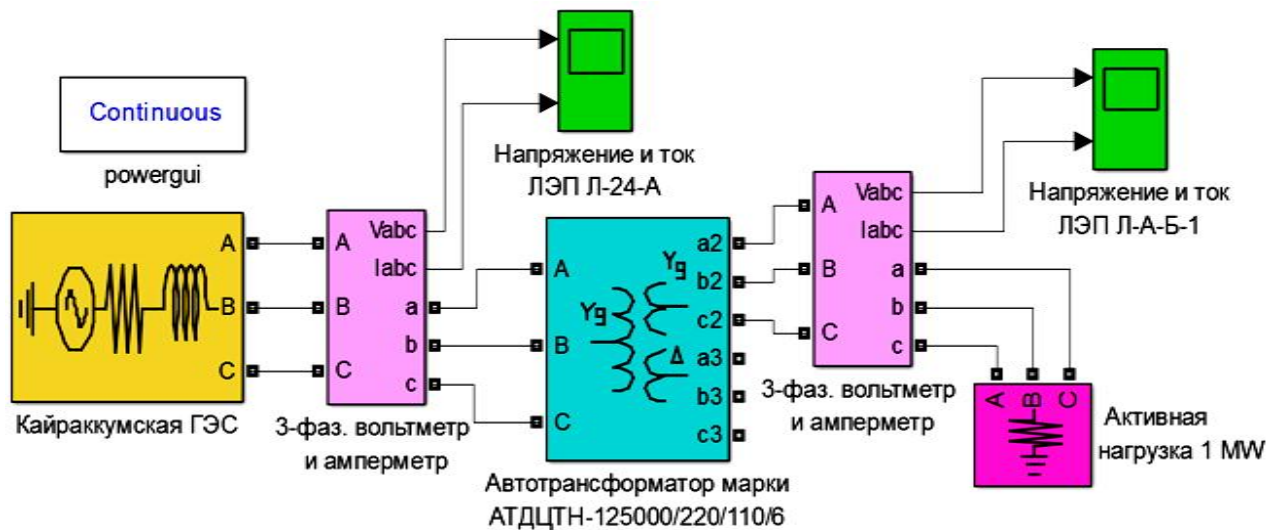


Рисунок 3.13. Компьютерная модель для исследования режимных параметров трансформатора марки АДЦТН-125000/220/110/6

Результаты моделирования параметров режимов исследуемого трансформатора показаны на рисунке 3.14.

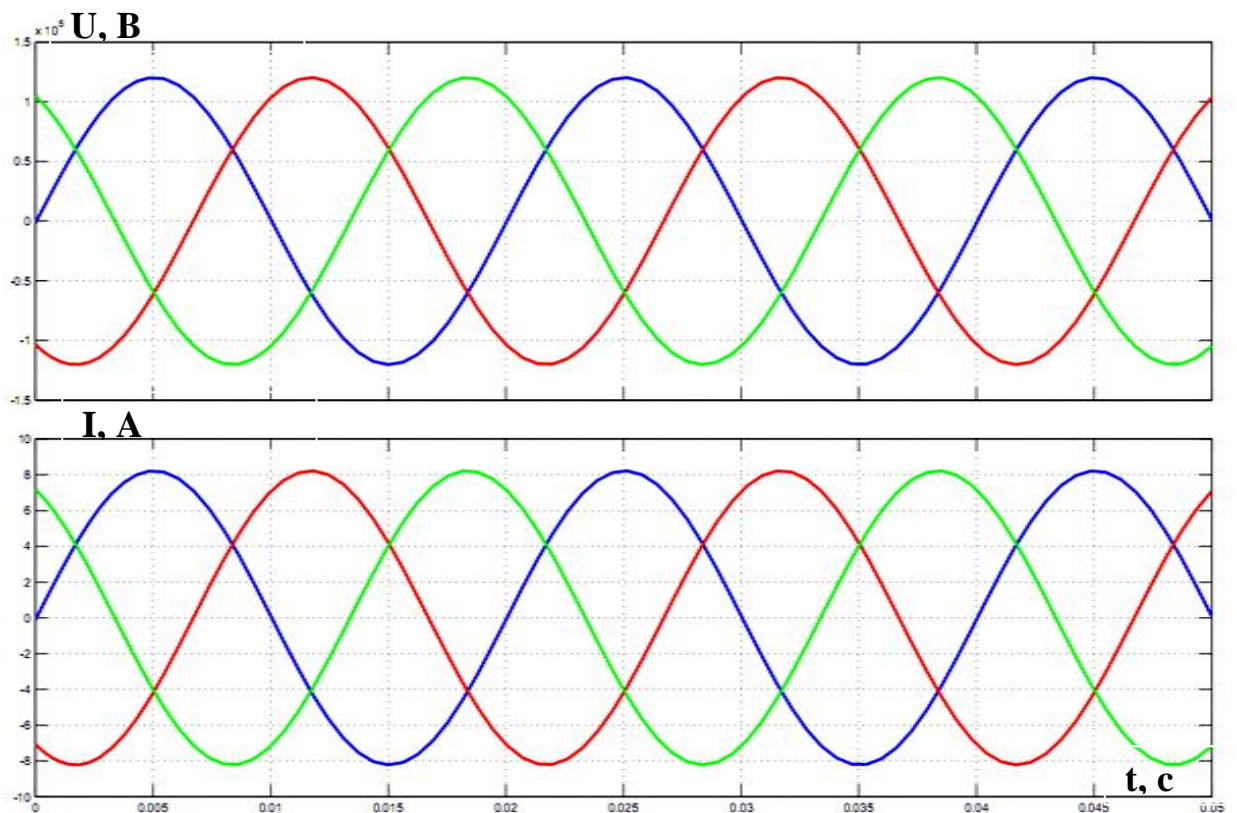


Рисунок 3.14. Графики изменения напряжения и тока на выходе трансформатора марки АДЦТН-125000/220/110/6

Далее смоделируем параметры трансформатора марки ТРДН-25000/110/10.

Таблица 3.3 – Каталожные и расчетные параметры трансформатора марки ТРДН-25000/110/10

Каталожные параметры	Расчетные параметры
$S_{ном}=25$ МВА, $U_{ВН}=115$ кВ, $U_{НН}=11$ кВ, $\Delta P_{ХХ}=27$ кВт, $\Delta P_{К.З}=120$ кВт, $U_{к.}=10,5$ %, $I_{ХХ}=0,7$ % $R_T=42,6$ Ом $X_T=508,2$ Ом $Q_X=37,5$ кВАр	$I_{1н} = 125,7$ А; $Z_k = 55,53$ Ом; $r_k = 2,53$ Ом; $R_1 = R_2 = 1,265$ Ом; $k = 10,45$ ; $R_2 = 0,0116$ Ом; $x_k = 55,47$ Ом; $L_1 = L_2' = 0,0883$ мГн; $L_2 = 0,000808$ мГн; $R_m = 489814$ Ом; $I_{ХХa} = 0,1357$ А; $I_{ХХ} = 0,88$ А; $I_{ХХr} = 0,8694$ А; $L_m = 243,5$ Гн.

На рисунке 3.15 приведена разработанная модель для исследования режимных параметров трансформатора марки ТРДН-25000/110/10.

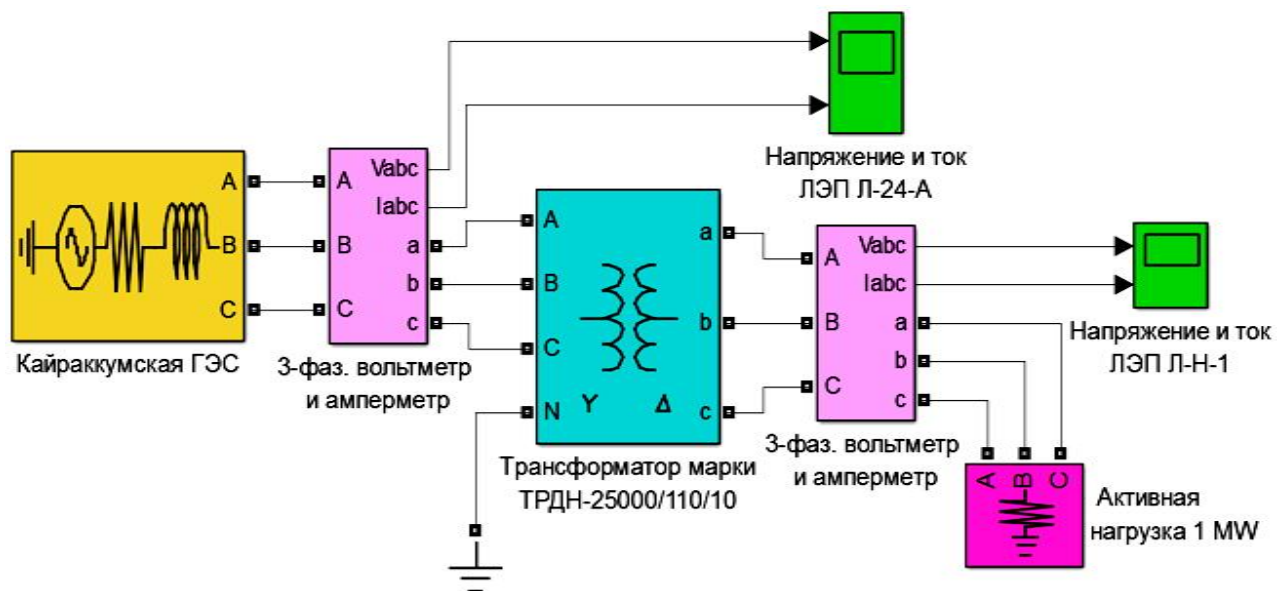


Рисунок 3.15. Компьютерная модель для исследования режимных параметров трансформатора марки ТРДН-25000/110/10

Результаты моделирования показаны на рисунке 3.16.

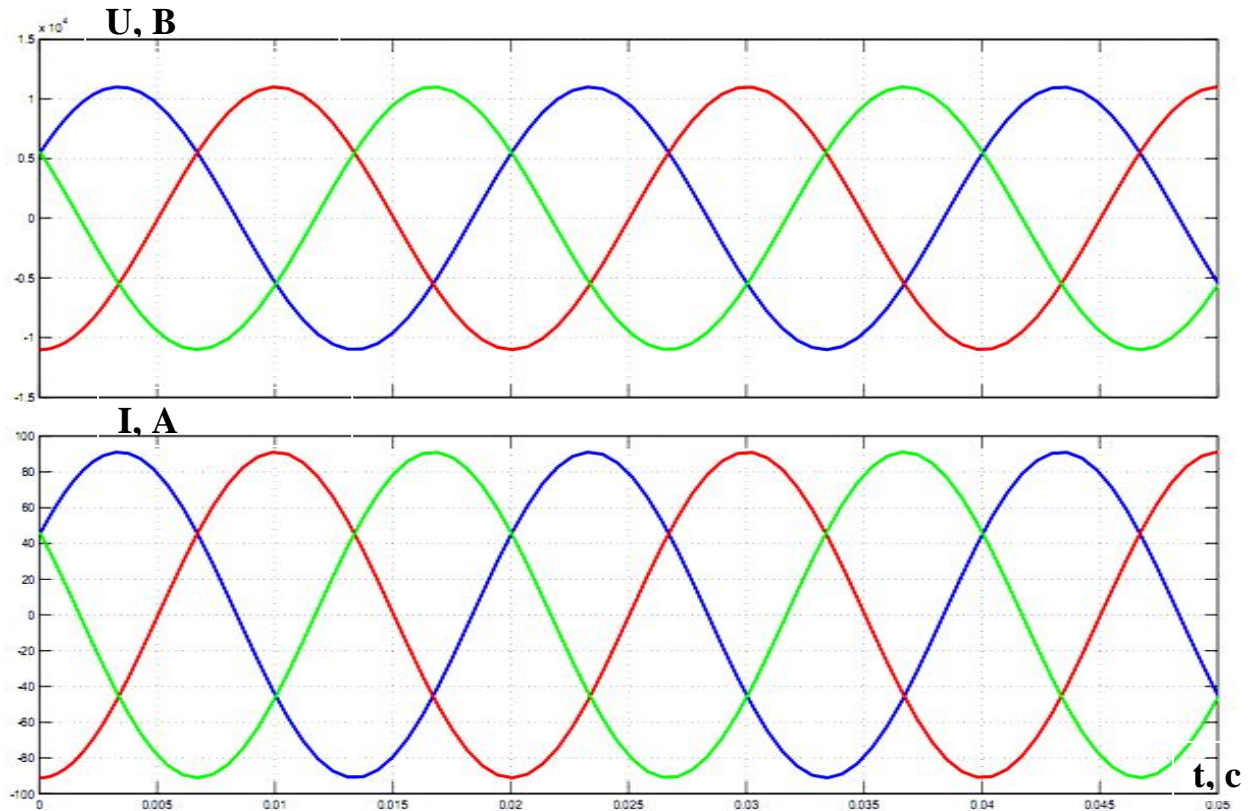


Рисунок 3.16. Графики изменения напряжения и тока на выходе трансформатора марки ТРДН-25000/110/10

Результаты моделирования источника питания и трансформаторов системы электроснабжения ОНС АНС-1 совпали с реальными паспортными данными, что свидетельствуют о достоверности составленных моделей.

### 3.3. Компьютерное моделирование линии электропередачи

В системе электроснабжения ОНС АНС-1 имеется три высоковольтных ЛЭП, имеющих различные марки проводов:

- ЛЭП Л-24-А 220 кВ,- провод марки АС-300/39, длина 74,4 км;
- ЛЭП Л-А-Б-1 110 кВ,- провод марки АС-240/32, длина 2,9 км;
- ЛЭП Л-Б-Н-1.1 110 кВ,- провод марки АС-150/24, длина 6,93 км.

В таблице 3.4 приведены основные параметры проводов ЛЭП системы электроснабжения ОНС АНС-1 (Приложение 6).

Таблица 3.4 – Справочные данные проводов марки АС

Класс напряжения кВ	Число проводов в фазе	Номинальное сечение провода, мм <sup>2</sup>	$r_0$ , Ом/100 км, при +20 °С	$x_0$ , Ом/100 км	$b_0$ , 10 <sup>-4</sup> См/100 км	Длительно допустимый ток вне помещений (+25° С), А	Длительно допустимый ток внутри помещений (+25° С), А
110	1	150/24	19,8	42	2,7	445	360
110	1	240/32	12	40,5	2,81	605	505
220	1	300/39	9,8	42,9	2,64	690	580

На рисунке 3.17 показана разработанная модель для исследования режимных параметров ЛЭП Л-24-А 220 кВ.

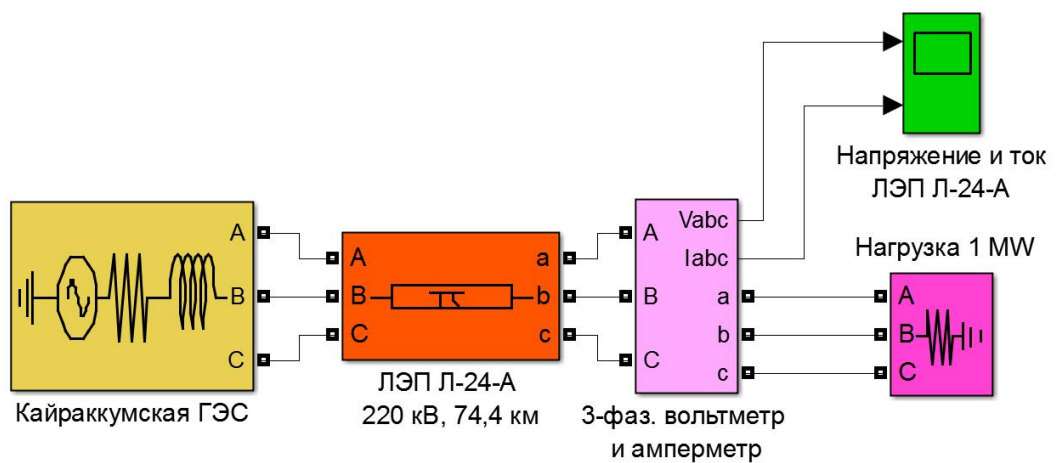


Рисунок 3.17. Компьютерная модель для исследования режимных параметров ЛЭП Л-24-А 220 кВ

Результаты моделирования ЛЭП Л-24-А 220 кВ показаны на рисунке 3.18.

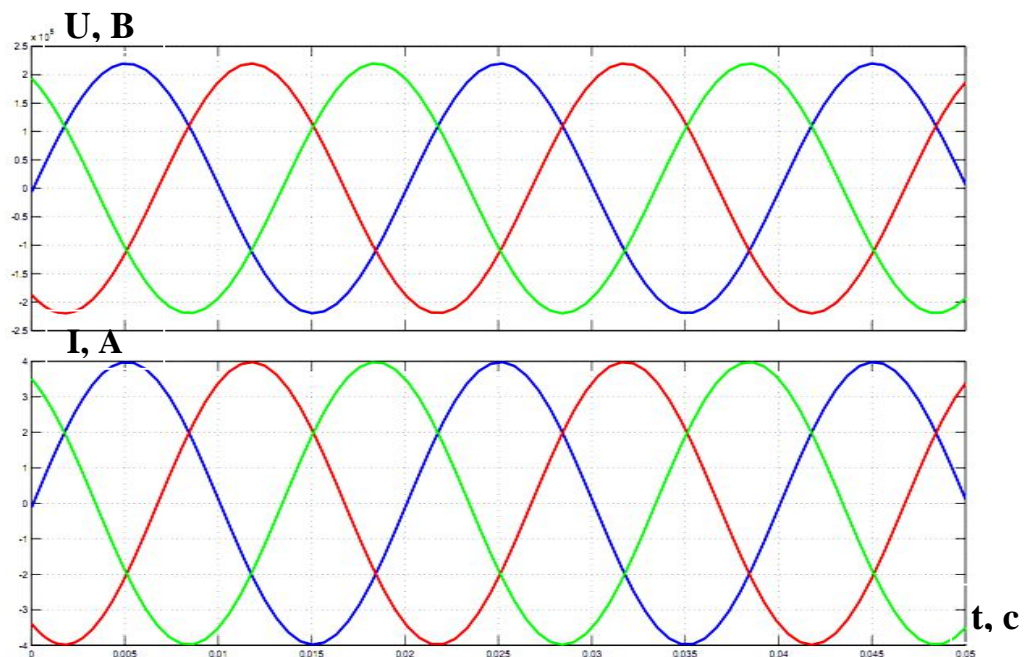


Рисунок 3.18. Графики изменения напряжения и тока в ЛЭП Л-24-А 220 кВ



На рисунке 3.19 приведена модель ЛЭП напряжением 110 кВ системы электроснабжения ОНС АНС-1.

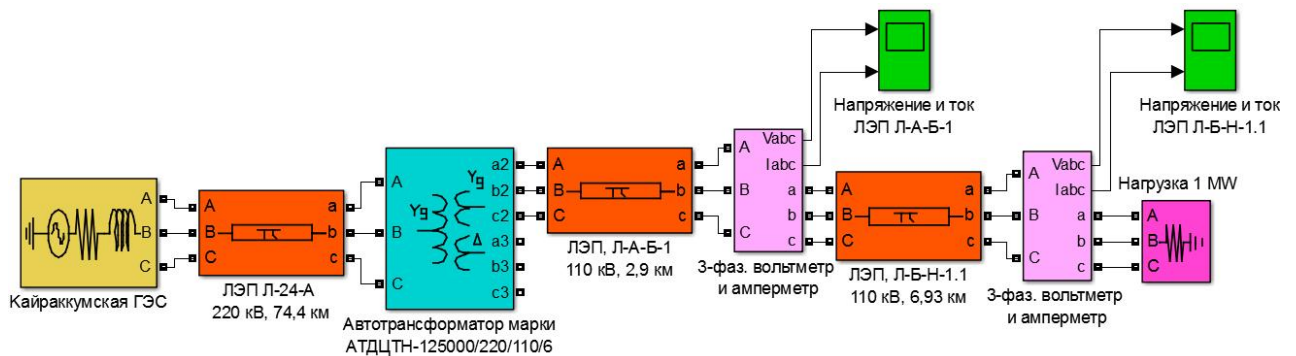


Рисунок 3.19. Компьютерная модель для исследования параметров режимов ЛЭП Л-А-Б-1 110 кВ и Л-Б-Н-1.1 110 кВ.

Результатом моделирования трансформаторов и ЛЭП системы электроснабжения ОНС АНС-1 является имитация системы по стандартным паспортным данным. При подключении электродвигательной нагрузки в качестве потребителей ЭЭ системы электроснабжения ОНС параметры системы изменятся, так как в этом случае подключена не только активная нагрузка, но и индуктивная.

### 3.4. Компьютерное моделирование пусковых режимов электродвигателей при идеальной сети

#### 3.4.1. Моделирование прямого пуска электродвигателей насосных агрегатов

Для компьютерного моделирования ЭД НА используем программу MATLAB/Simulink [41-43]. Данная программа существует уже более 35 лет и каждый год со стороны разработчиков системы добавляются обновления в программу. В нашем случае используем MATLAB R2013a, версия 8.1. В данной версии системы MATLAB для моделирования электротехнических систем имеется специальная библиотека Simulink/Simscape, под названием SimPowerSystems [43, 44]. С помощью элементов данной библиотеки выполнено компьютерное моделирование АД при прямом пуске, модель которого приведена на рисунке 3.20 [27 – А, 33 – А, 34 – А].

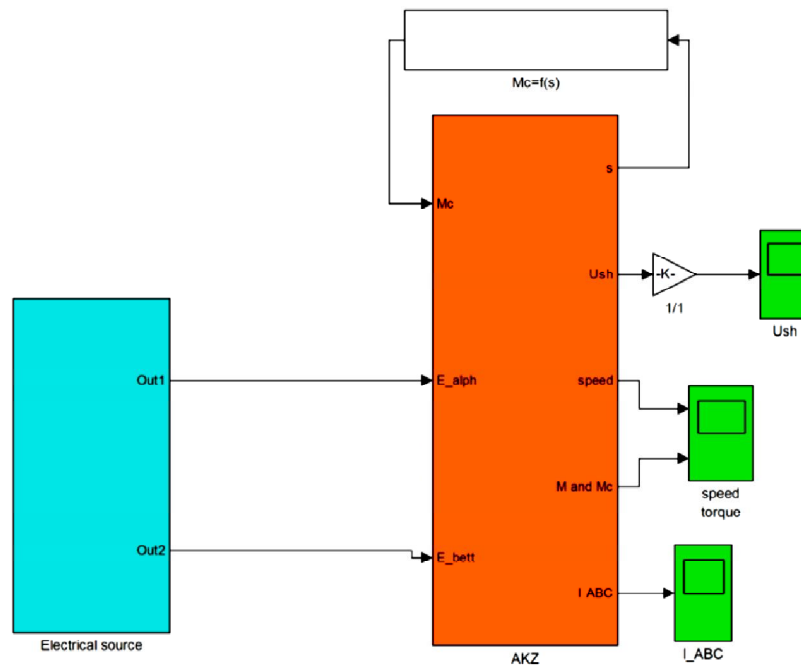


Рисунок 3.20. Компьютерная модель для исследования переходных процессов АД насосного агрегата при прямом пуске

В разработанной модели (рисунок 3.20) для упрощения ее вида объемные элементы преобразованы в подсистемы Electrical source и АКЗ (рисунок 3.21).

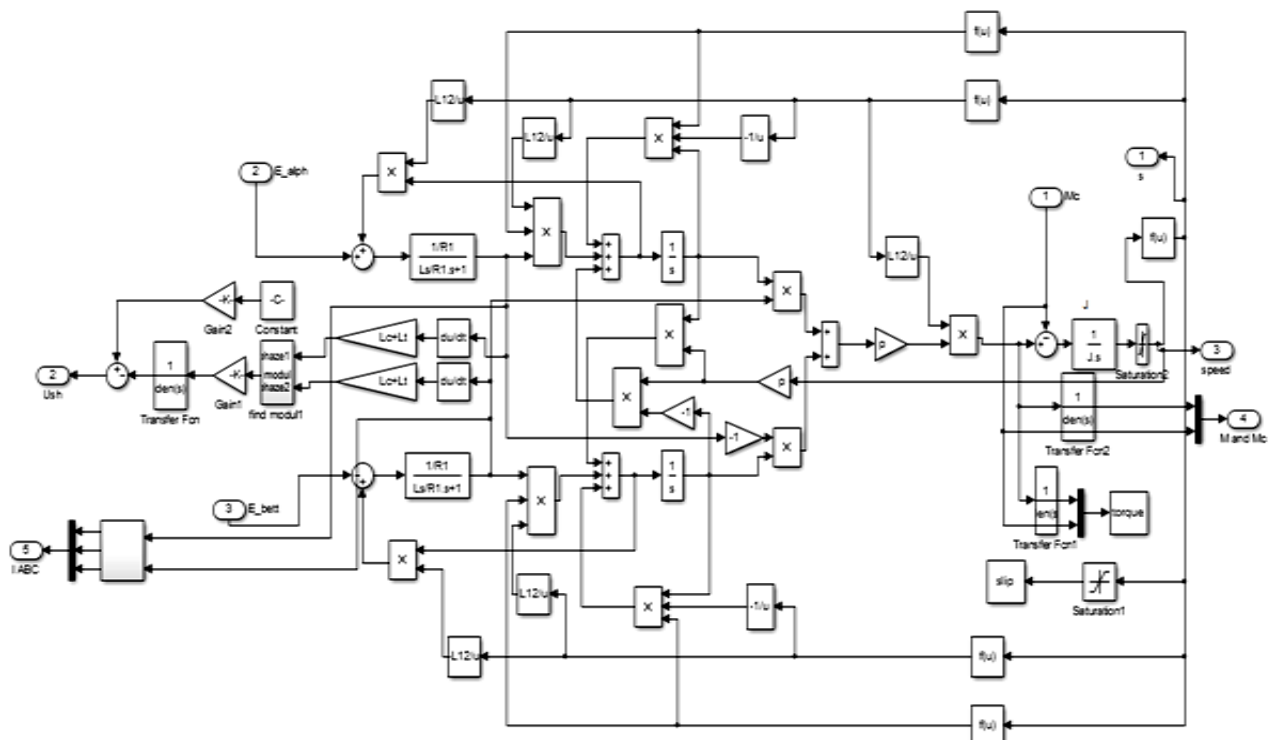


Рисунок 3.21. Подмаска подсистемы АКЗ (асинхронный двигатель)

Субсистема Electrical source моделирует источник электрической энергии для АД, а подсистема АКЗ моделирует АД марки 4АЗМ-5000/10000 УХЛ4

мощностью 5 МВт, напряжение питания 10 кВ. Технические характеристики АД данной серии приведены в Приложении 4. Блок  $f(u)$  служит для имитации статического момента механизма  $M_C$ , в нашем случае насоса [22 – А, 28 – А].

На рисунке 3.22 приведены графические зависимости результатов моделирования в абсолютных единицах.

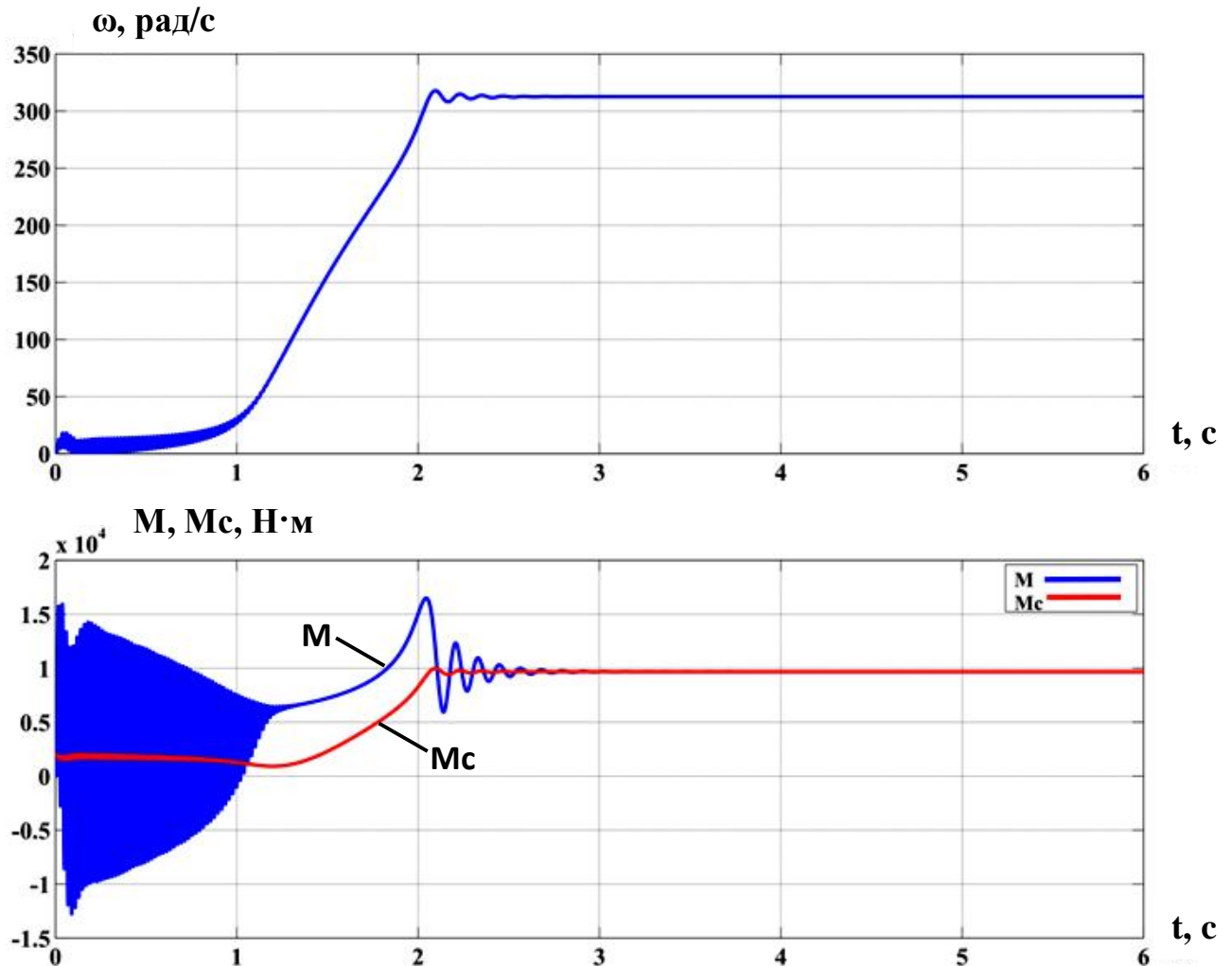


Рисунок 3.22. Пусковые переходные процессы параметров АД: угловая скорость  $\omega$ , электромагнитный момент  $M$  и момент сопротивления  $M_c$ .

Графики параметров АД при прямом пуске (рисунок 3.22) показывают сложность процесса пуска и иллюстрируют изменения момента и скорости ЭД во времени. График показывает, что момент двигателя при пуске имеет знакопеременный характер, это приводит к появлению вибрации и возможным поломкам частей АД. Критический момент АД наблюдается на 2-й секунде пуска, затем наступает заметное снижение момента, уже на 2,6 секунде разница

моментов равна нулю. Данный тип АД, в основном, используется для компрессорных установок и его синхронная скорость составляет 3000 об/мин. Для НА также используются такие типы АД, но со значительно меньшими скоростями вращения. При пуске мощных ЭД наблюдаются значительные провалы напряжения в сети, в нашем случае провал напряжения составил более 16% (рисунок 3.23). Графики тока показаны на рисунке 3.24.

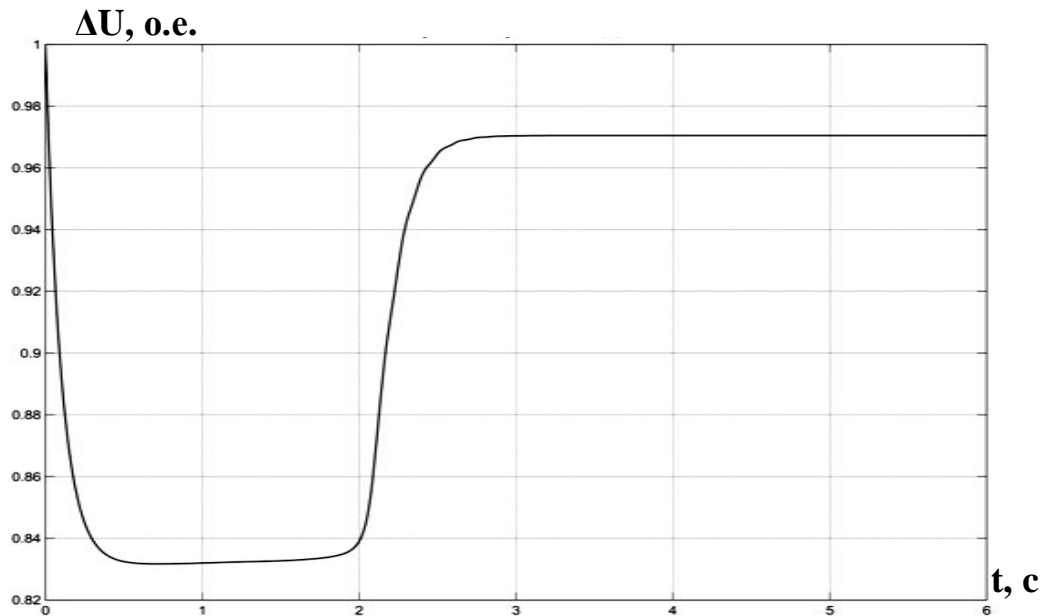


Рисунок 3.23. График провала напряжения  $\Delta U$  при пуске АД в о.е.

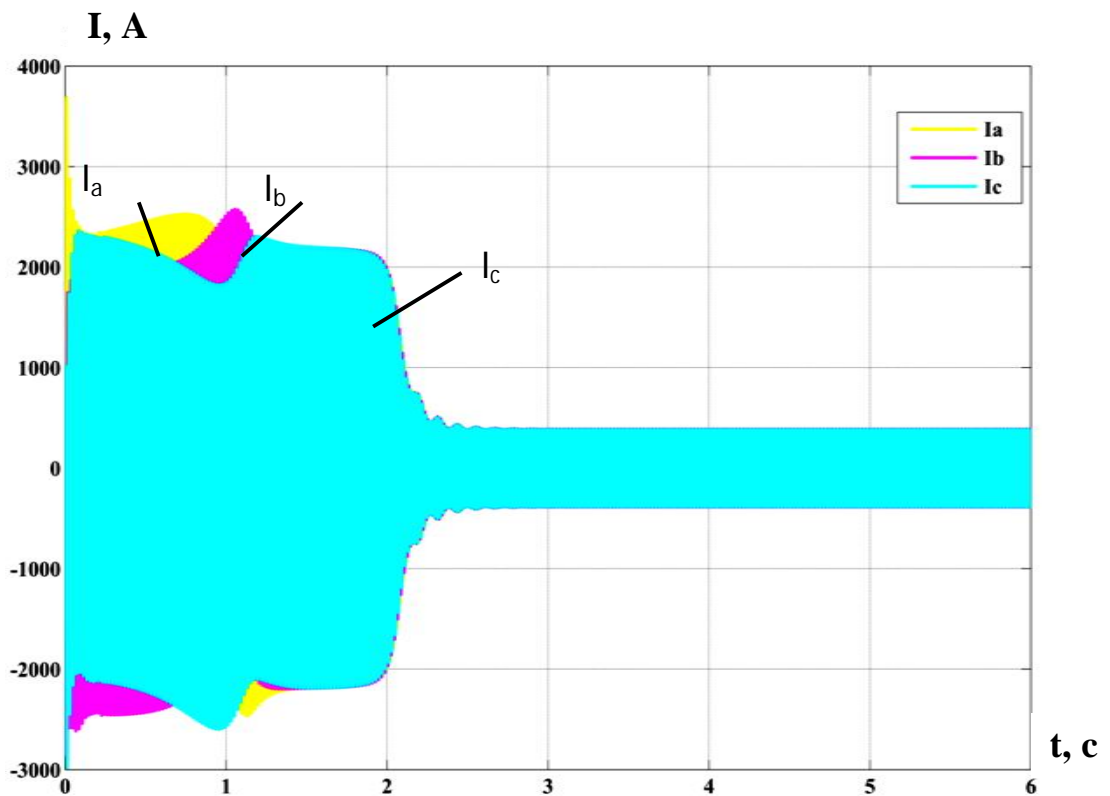


Рисунок 3.24. Графики токов статора  $I_a, I_b, I_c$  АД при прямом пуске



Другим недостатком прямого пуска АД являются большие пусковые токи двигателя, которые могут достигать 4-8,5 кратного значения номинального тока. В нашем случае номинальный ток АД равен 350 А, а пусковой ток по результатам моделирования (рисунок 3.24) - порядка 2,5 кА. Кратность пускового тока составила 7,1, что для АД при прямом пуске является допустимым. Результаты моделирования АД НА при прямом пуске выявили основные недостатки данного способа пуска. Полученные результаты компьютерного моделирования совпадают с паспортными и экспериментальными данными характеристик АД. Так как график (рисунок 3.24) показывает пусковой ток АД в пределах 1800-2100 А, а паспортный пусковой ток составляет 1900 А (Приложение 5), то погрешности в моделировании составляют примерно от 2 до 10%.

Для моделирования используем паспортные и расчетные данные СД марки ВДС2-325/69-16 (Таблица 2.2 и 2.3), установленная на АНС-1 [31 – А, 47]. Так как математическое описание СД имеет более сложную структуру, чем АД, моделирование СД проводим в о.е. (Приложение 4). Для моделирования прямого пуска СД НА используем аналогичную библиотеку программы MATLAB, как и применяемую для моделирования АД (рисунок 3.25) [40].

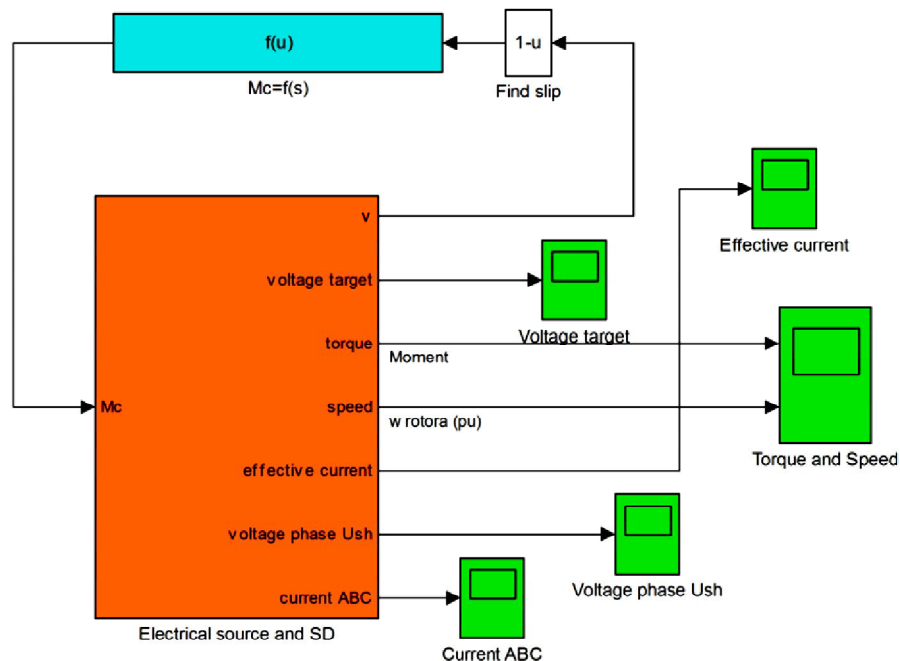


Рисунок 3.25. Компьютерная модель для исследования переходных процессов СД насосного агрегата при прямом пуске

На рисунке 3.26 показана раскрытая подсистема SD [25 – А, 40].

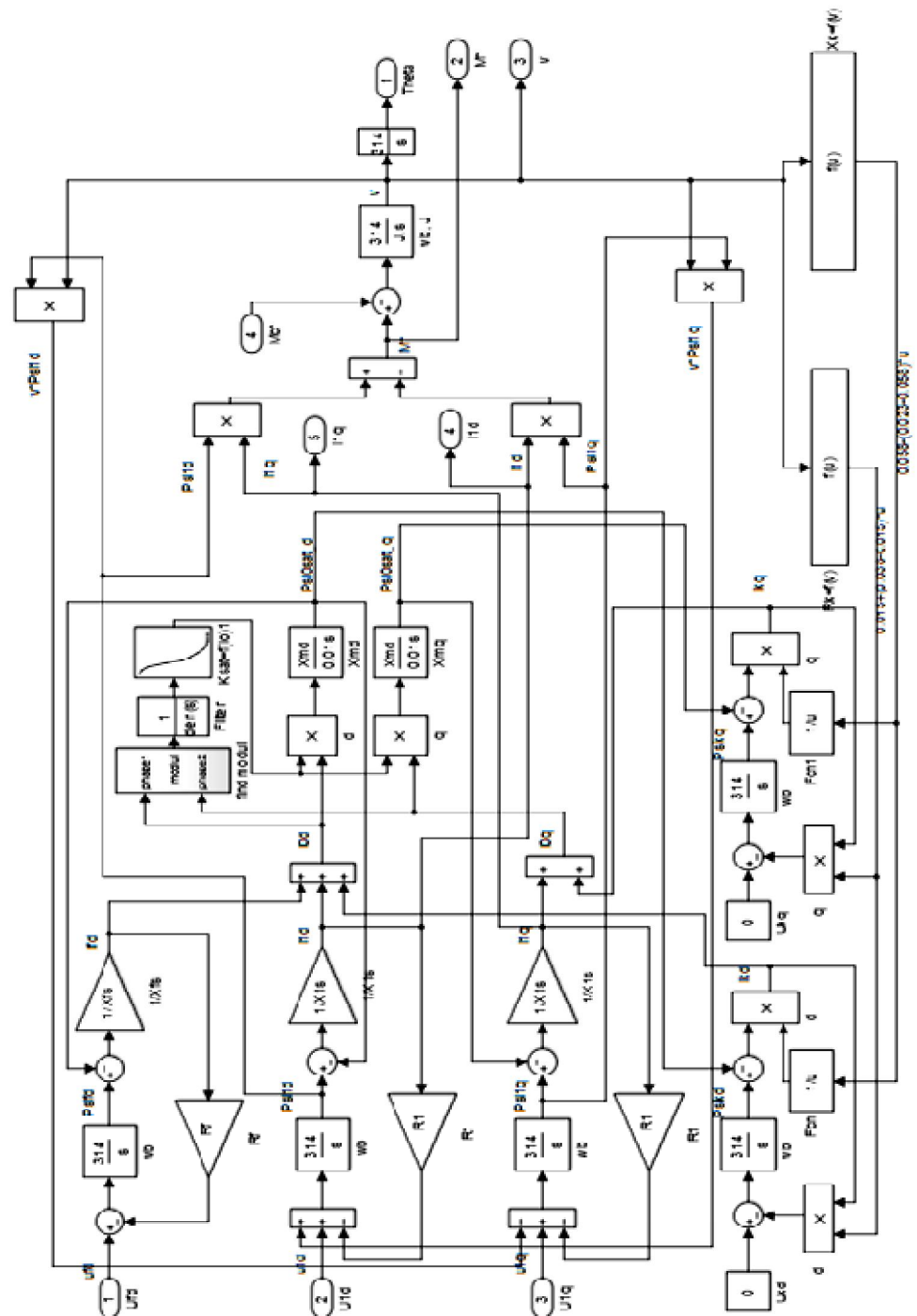


Рисунок 3.26. Подмаска подсистемы SD (синхронный двигатель в о.е.)

В отличие от АД, СД имеют ряд преимуществ: высокий коэффициент мощности, большая перегрузочная способность, возможность устойчивой работы при допустимых провалах напряжения, перенапряжениях в сети и т.д. Однако, несмотря на эти преимущества, СД имеет отличительные

конструктивные особенности: наличие возбудителя для обмотки возбуждения, наличие щеток и контактных колец и т.д. Наличие возбудителя требует дополнительных источников электроэнергии в НС, которые могут по классу напряжения отличаться от основной сети. В АНС-1 статор СД НА получают питание на напряжении 10 кВ, а возбудители данных ЭД питаются на напряжении 160 В, что требует установки отдельного трансформатора, например, трансформатора собственных нужд. Графики переходных процессов при прямом пуске СД серии ВДС2-325/69-16 показаны на рисунке 3.27.

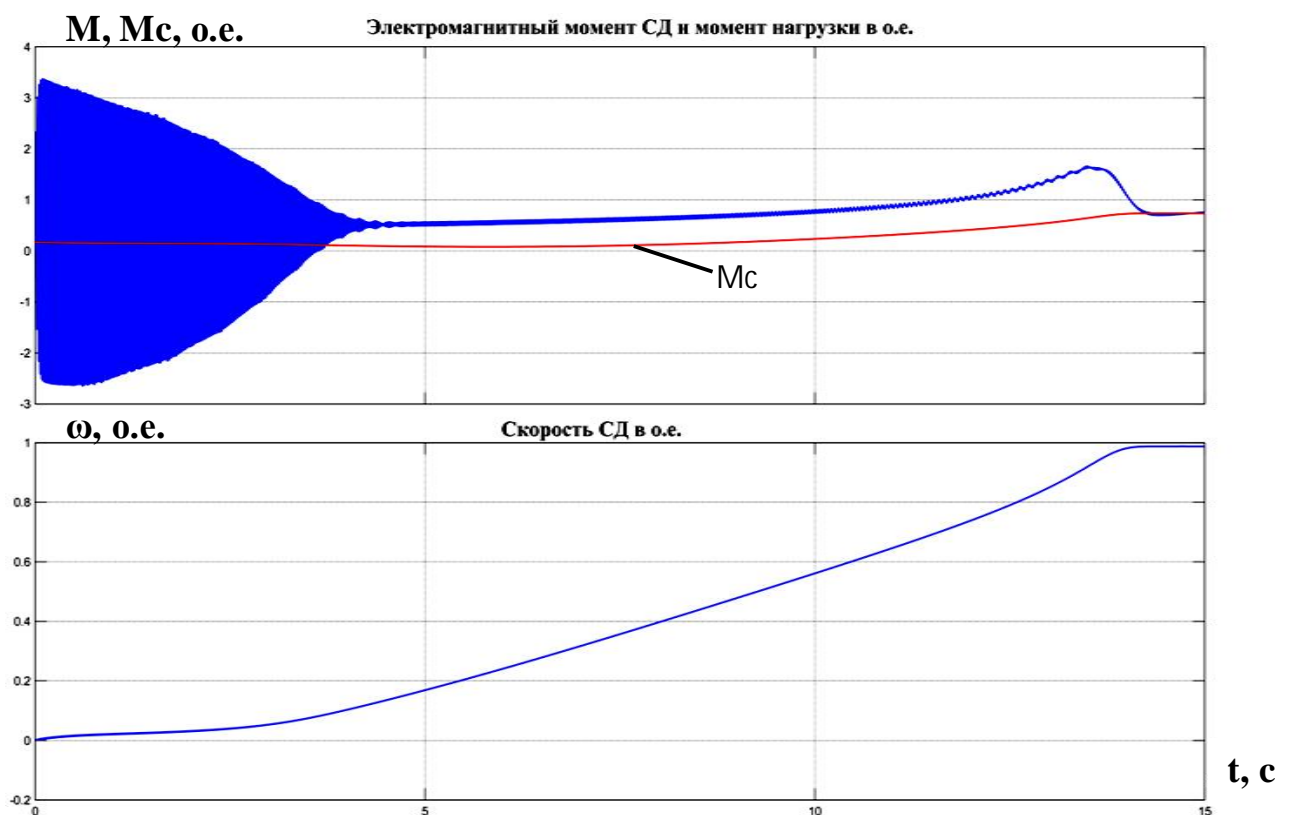


Рисунок 3.27. Графики переходных процессов момента  $M$  и скорости  $\omega$  при прямом пуске СД серии ВДС2-325/69-16 в о.е.

Графики рисунка 3.27 показывают, что электромагнитный момент СД при прямом пуске, как у АД, имеет знакопеременный характер. Одна из отличительных особенностей пуска СД по сравнению с АД, - это продолжительность пуска, которая в данном случае составила более 15 секунд. По инструкции завода изготовителя СД данного типа продолжительность прямого пуска ВДС2-325/69-16 составляет 16 с, что совпадает с результатами

моделирования. Результаты компьютерного моделирования приведены на рисунках 3.28-3.30.

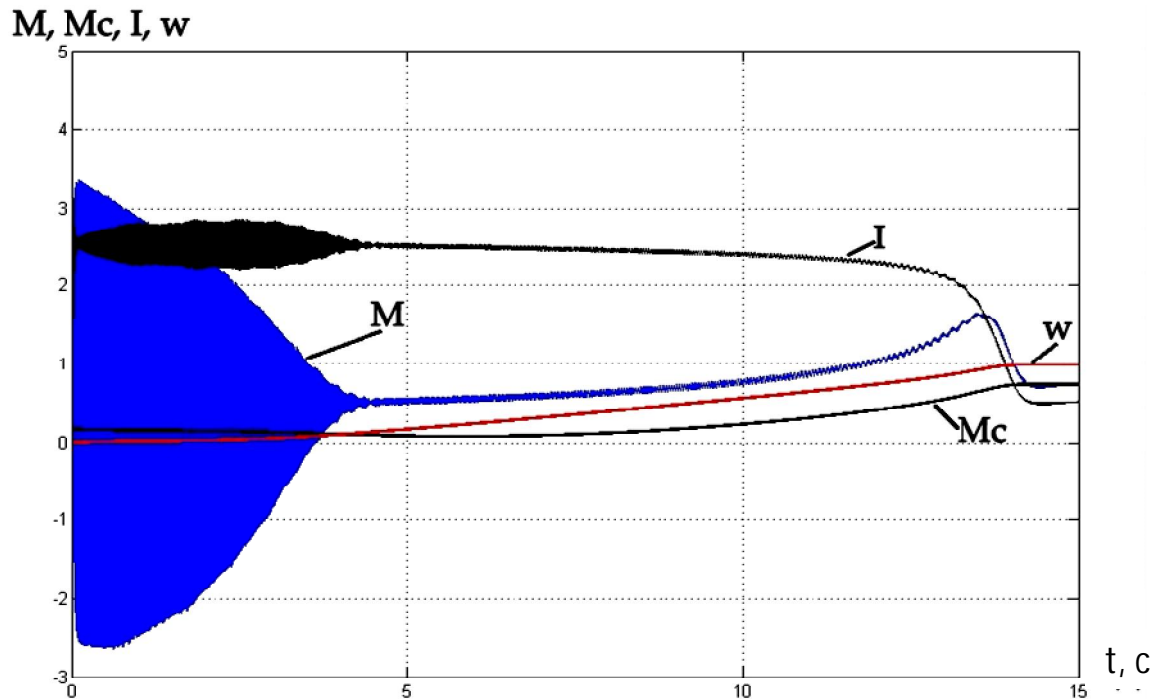


Рисунок 3.28. Графики действующего значения тока  $I$ , момента  $M$  СД, момента сопротивления  $M_c$  и скорости  $\omega$  СД при прямом пуске в о.е.

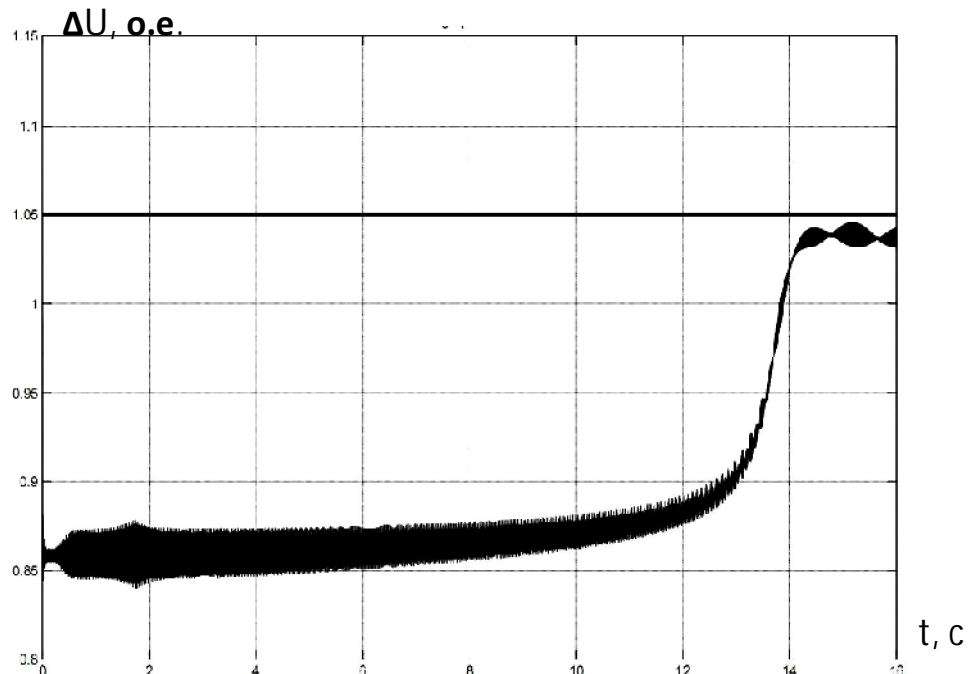


Рисунок 3.29. График провала напряжения  $\Delta U$  при прямом пуске СД

График рисунка 3.29 показывает, что провал напряжения в сети при прямом пуске СД составляет 13-16%

$I_A, I_B, I_C$  (A)



Рисунок 3.30. Графики токов статора  $I_A, I_B, I_C$  СД при прямом пуске

Механическая и электромеханическая характеристики СД при прямом пуске приведены на рисунках 3.31 и 3.32.

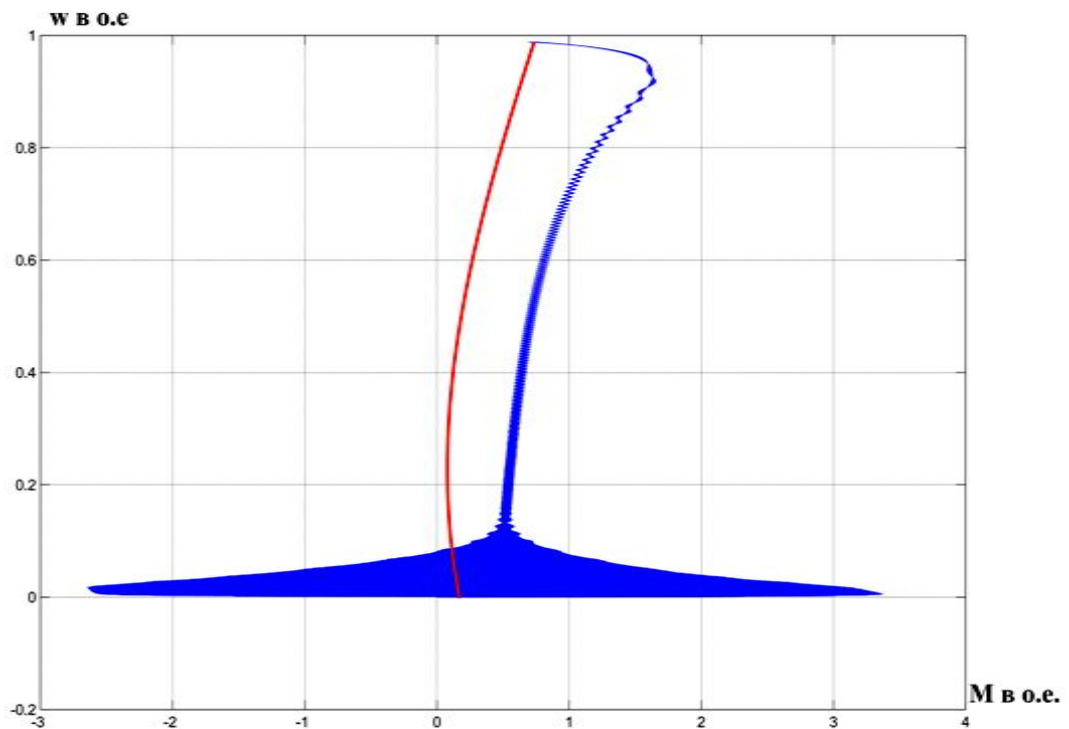


Рисунок 3.31. Механическая характеристика СД при прямом пуске

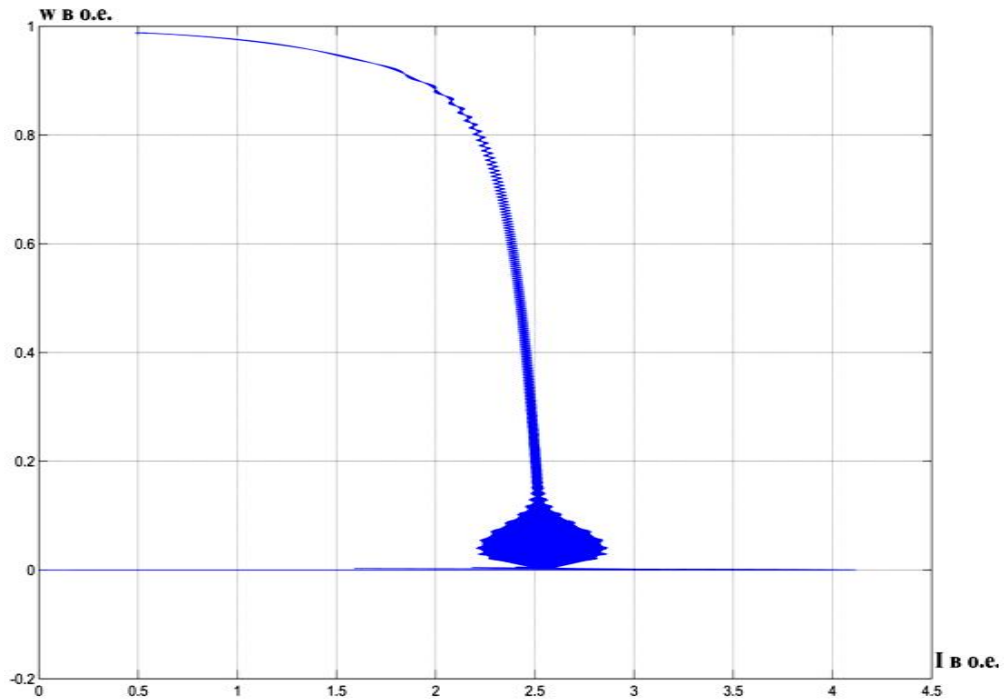


Рисунок 3.32. Электромеханическая характеристика СД при прямом пуске

Графики рисунков 3.30 и 3.32 показывают, что прямой пусковой ток в СД превышает номинальное значение более, чем в 4 раза. Согласно паспорту СД, номинальный ток двигателя составляет 540 А. При прямом пуске согласно результатам моделирования в обмотках статора СД будет протекать ток, равный  $2,2 \div 2,5$  кА. Такое превышение тока в двигателе негативно влияет на токопроводящие части НС, а также могут вызывать большие провалы напряжения в сети (рисунок 3.29), что в свою очередь, негативно будет влиять на соседние НА или НС.

### 3.4.2. Моделирование плавного пуска электродвигателей насосных агрегатов

Как показали проведенные исследования, прямой пуск ЭД приводят к многочисленным проблемам, как в электрических, так и в гидравлических частях ОНС. Чтобы ликвидировать данные проблемы на практике используют различные устройства плавного пуска для высоковольтных ЭД [45-49]. Компьютерная модель ЭП с АД при пуске с помощью УПП приведена на рисунках 3.33-3.34.

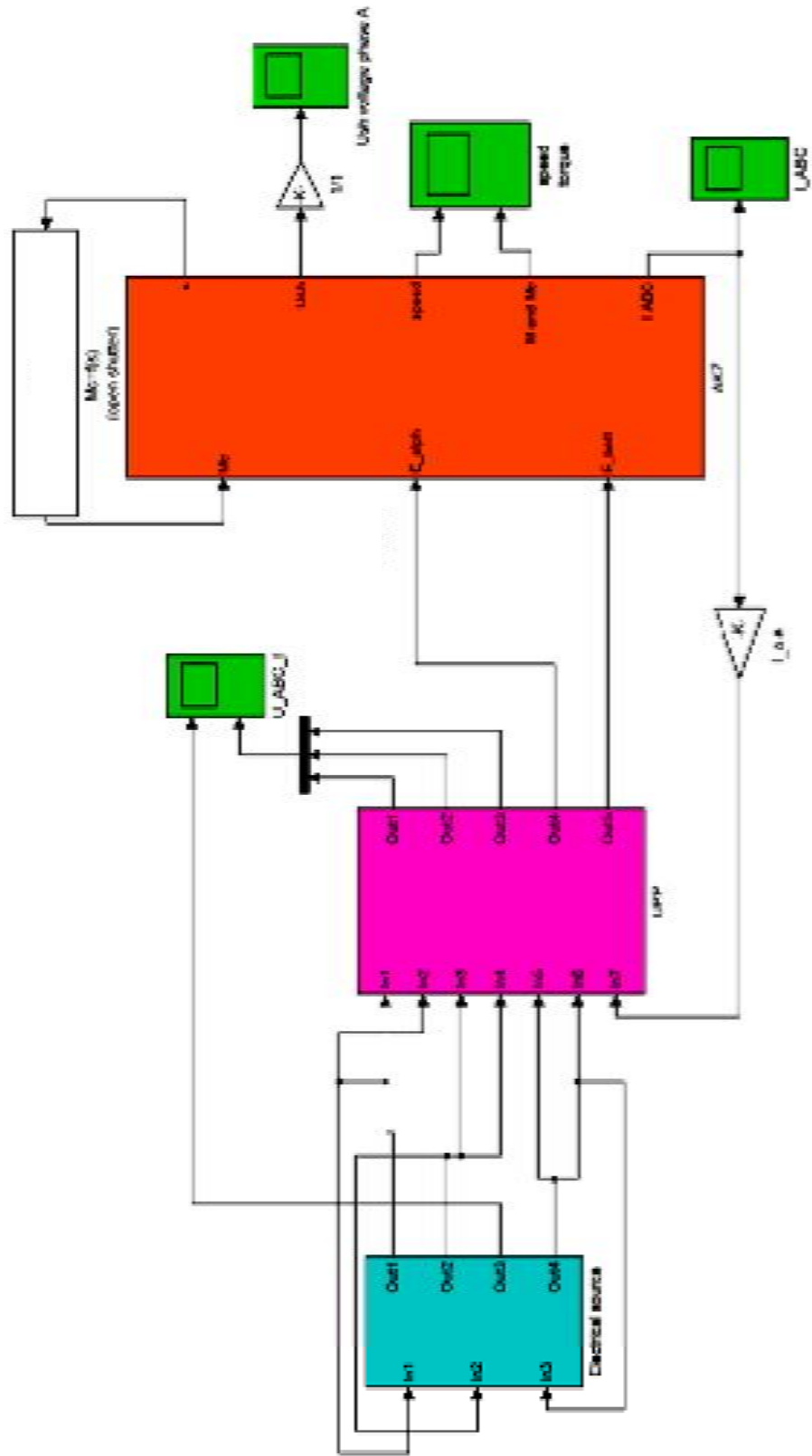


Рисунок 3.33. Модель для исследования плавного пуска асинхронного двигателя

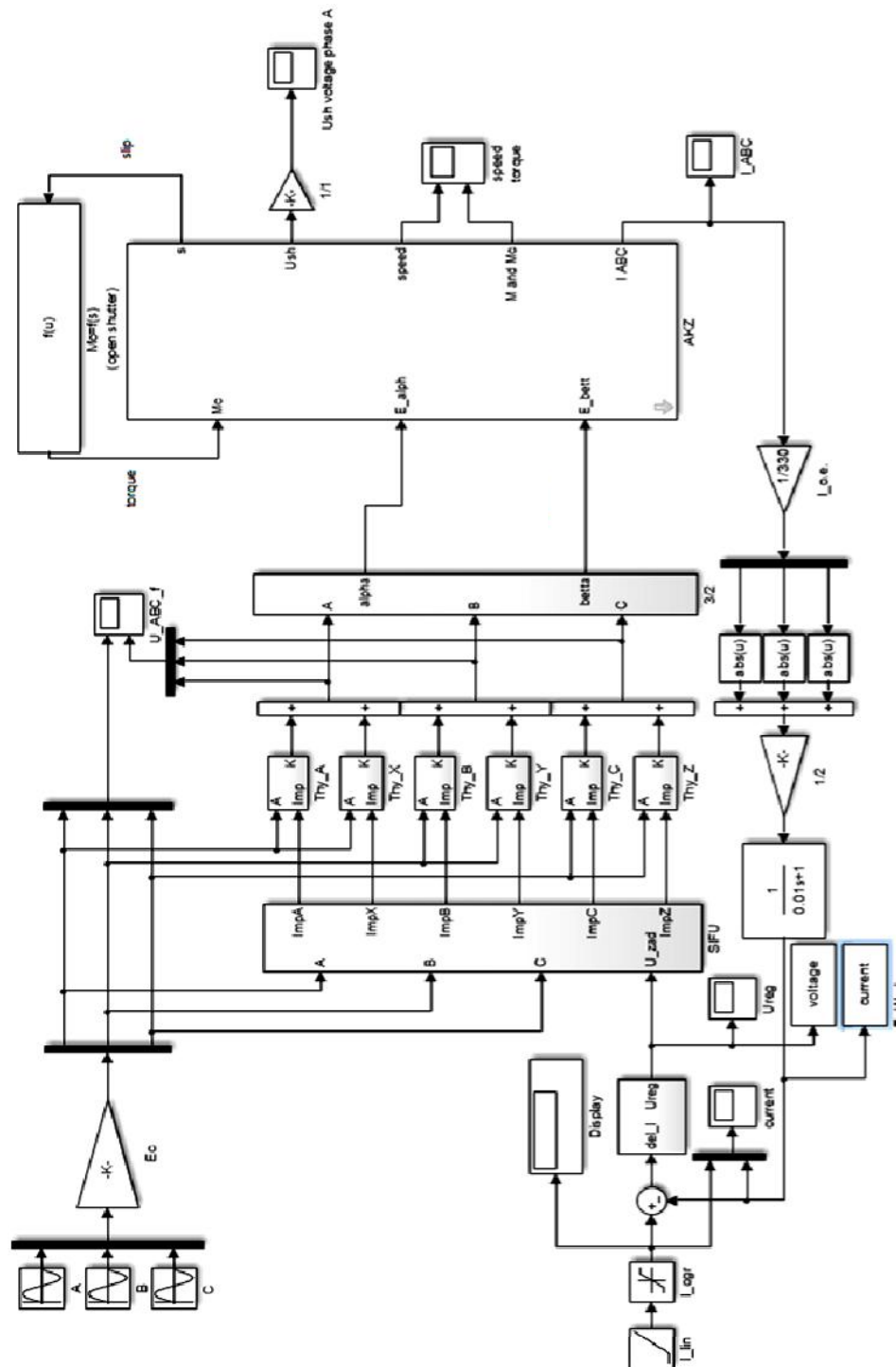


Рисунок 3.34. Подмаска subsystem источник питания и УПП для АД

Компьютерная модель для исследования пускового режима АД при плавном пуске разработана по модели рисунка 3.20, где исследовалась прямой пуск АД. В модель (рисунок 3.33) добавлено УПП, при котором возможен плавный пуск АД. Результаты моделирования представлены на рисунках 3.35-3.37.



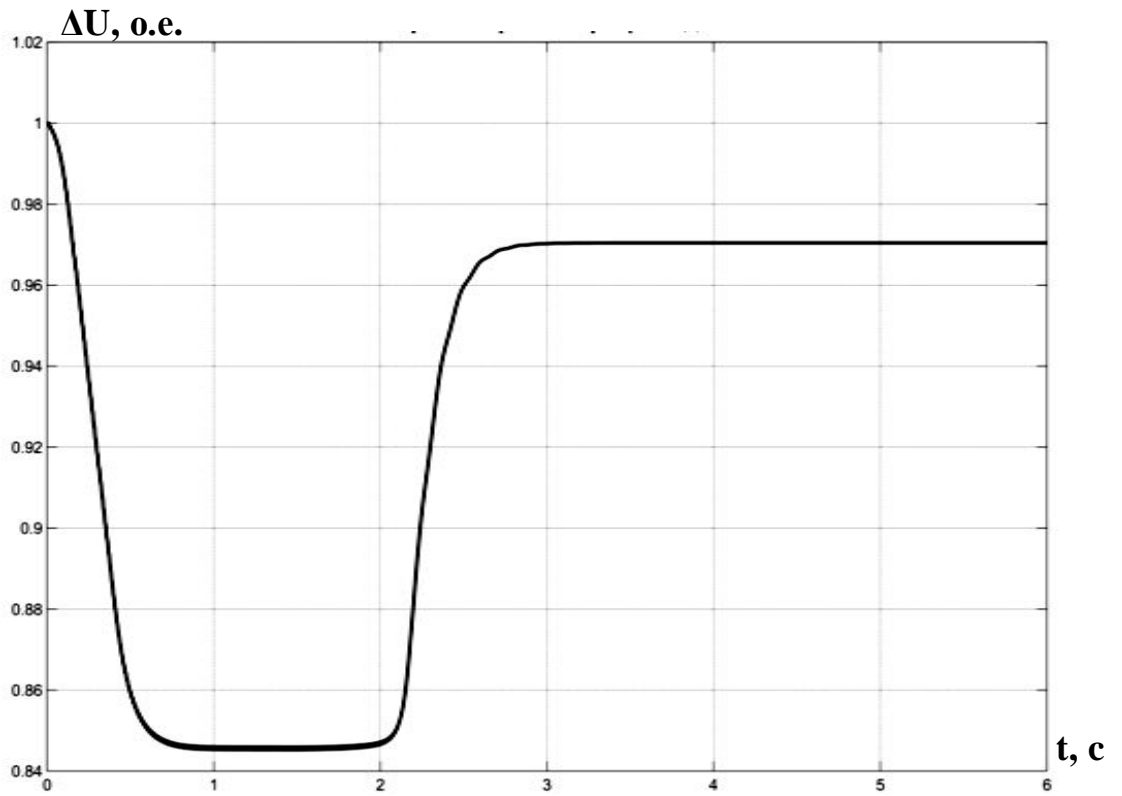


Рисунок 3.35. График провалов напряжения при плавном пуске АД

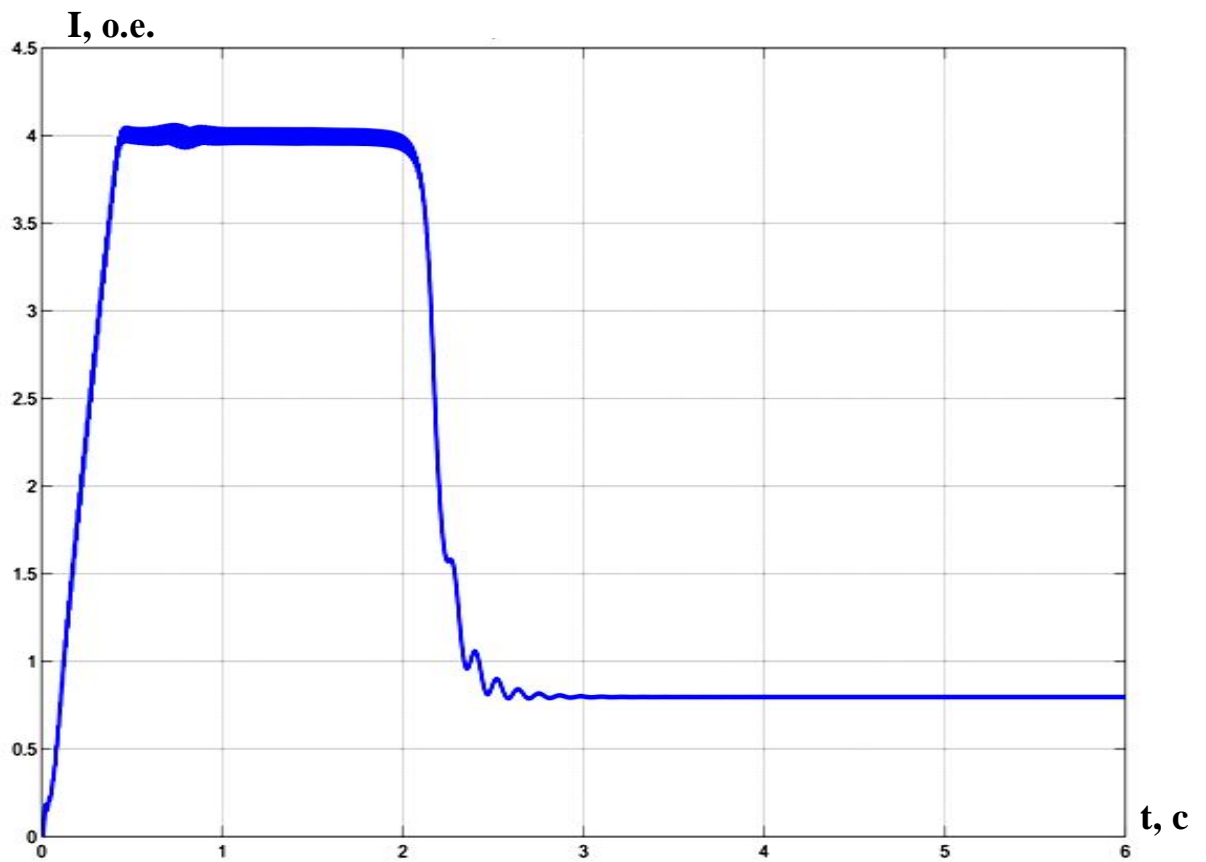


Рисунок 3.36. Действующее значение тока АД при плавном пуске

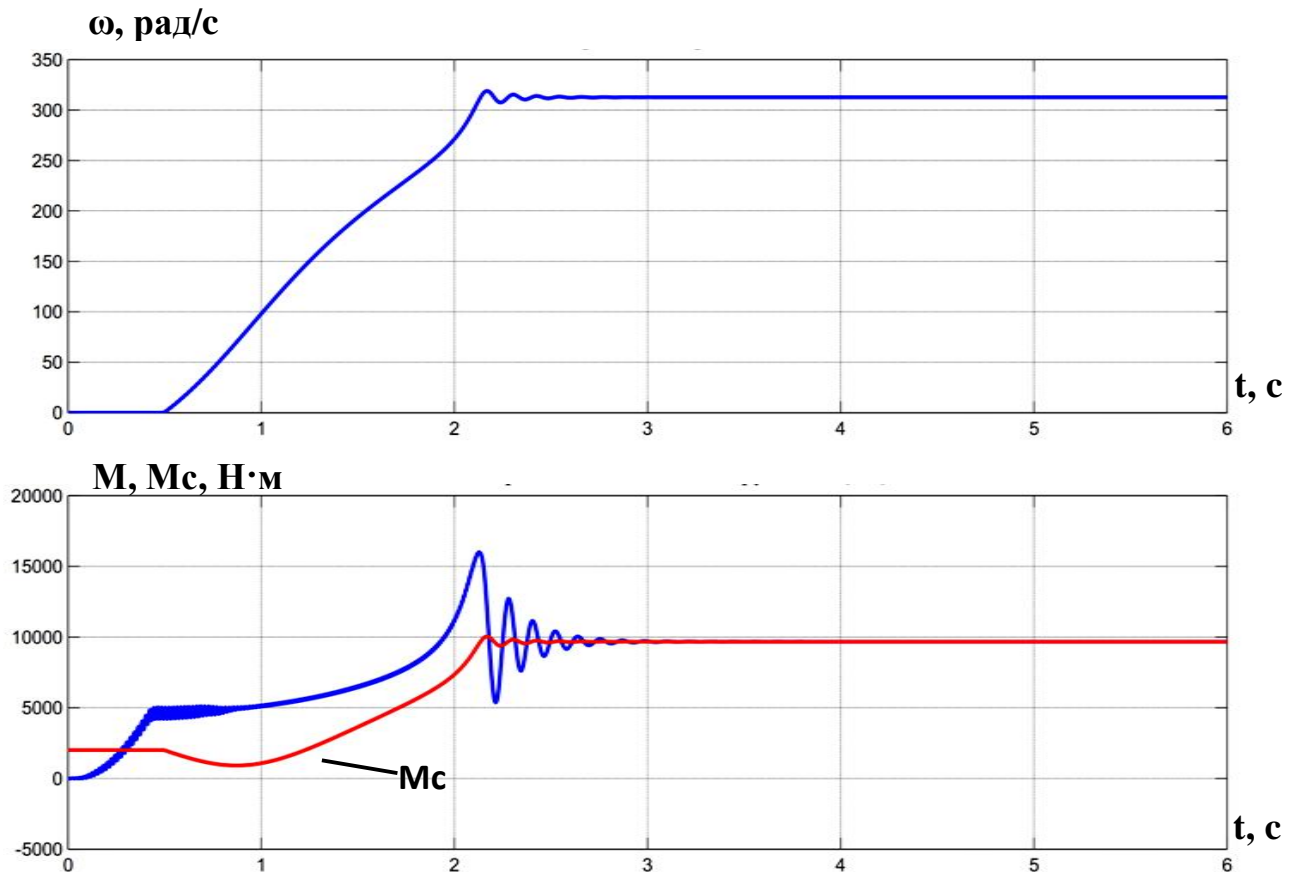


Рисунок 3.37. Графики переходных процессов механических параметров АД при плавном пуске

При плавном пуске АД провалы напряжения меньше, чем при прямом пуске (рисунок 3.23 и 3.35). Однако, значение провала напряжения при использовании УПП остается достаточно высоким, в нашем случае при прямом пуске провал напряжения составил около 17% (рисунок 3.23), а при плавном пуске это значение составило более 15% (рисунок 3.35). Кратность пускового тока при плавном пуске, по сравнению с пусковым режимом, снизилась от 7,1 до 4 номинального значения (рисунок 3.24 и 3.34). Снижение пускового тока при пуске дает возможность увеличить количество пусков АД, что улучшает технологический процесс ОНС. Механические параметры АД также при плавном пуске изменяются. Знакопеременное изменение электромагнитного момента АД отсечено и характеристика имеет положительное значение (рисунок 3.37).

Компьютерная модель, имитирующая режим плавного пуска АД, показана на рисунках 3.38-3.39.





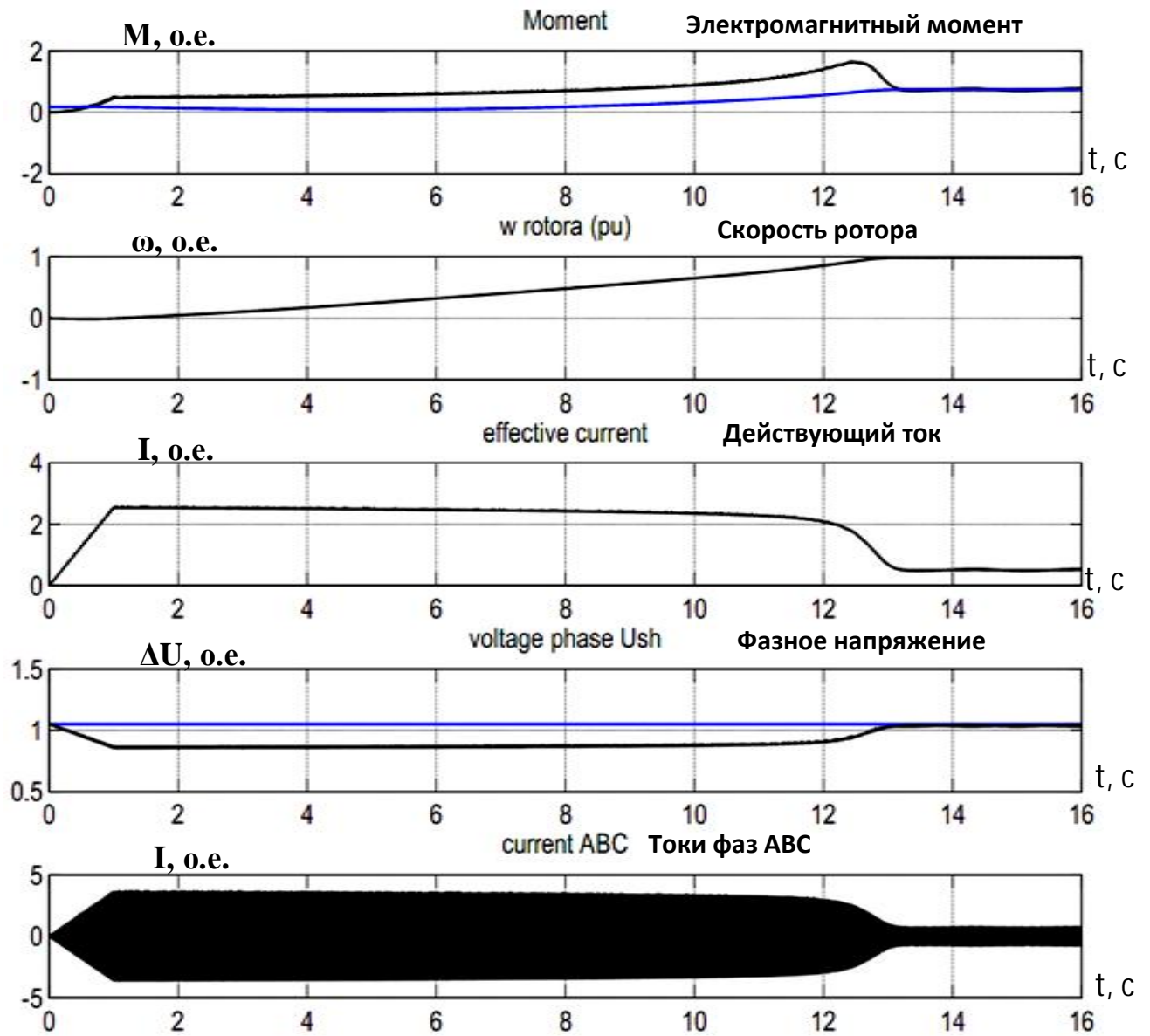


Рисунок 3.40. Графики параметров СД при плавном пуске (увеличение напряжения статора от 0 до  $U_{\text{ном}}$  за 1 секунду)

Графики (рисунок 3.40) показывают значительные изменения параметров СД при пуске с УПП. Особенность использования УПП заключается в возможности контроля времени подачи и нарастания напряжения питания СД.

На рисунке 3.40 данное время составило одну секунду. Детальный анализ представлен на рисунках 3.41-3.43.

$M, M_c, I, \omega, \text{о.е.}$

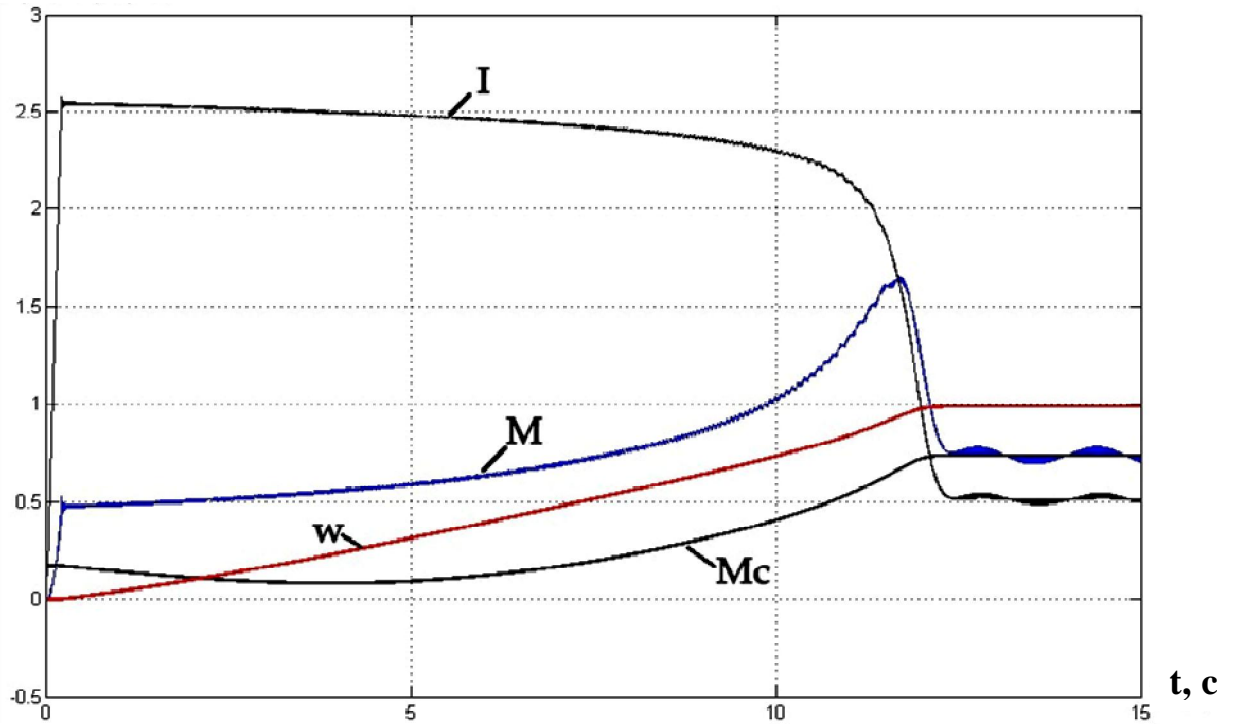


Рисунок 3.41. Графики электромагнитного момента  $M$ , тока  $I$ , скорости  $\omega$  и момента сопротивления  $M_c$  на валу СД при плавном пуске

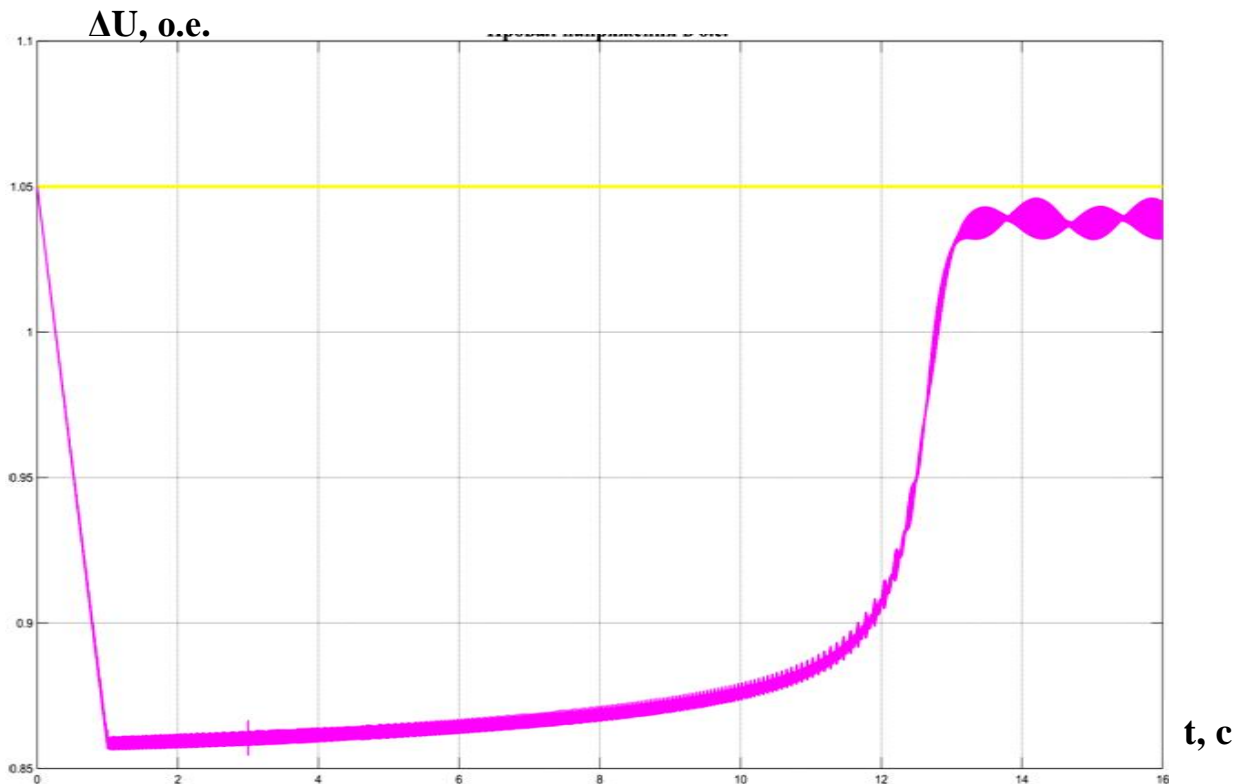


Рисунок 3.42. Провал напряжения  $\Delta U$  СД при плавном пуске

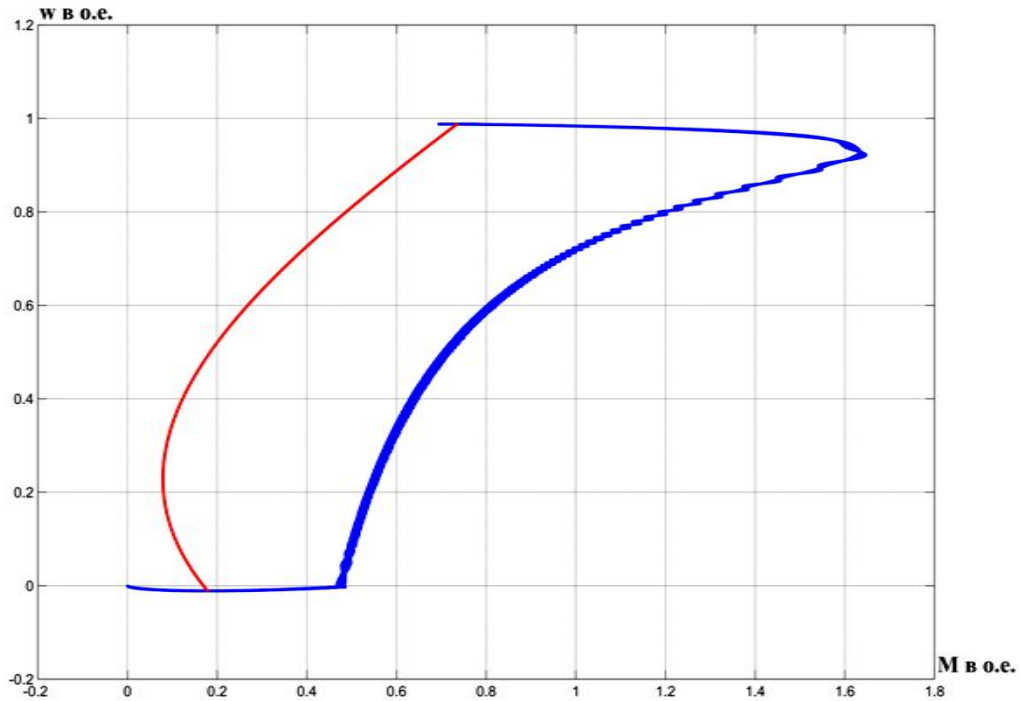


Рисунок 3.43. Механическая характеристика СД при плавном пуске при увеличении напряжения статора от 0 до  $U_{\text{ном}}$  за 1 секунду

На рисунке 3.41 показано, что электромагнитный момент СД изменяется не знакопеременно при пуске, скачки и колебания тока также уменьшились и имеют устойчивый и стабильный характер. Кратность пускового максимального тока составила 2,56 номинального значения, а момент - 1,6. Длительность переходных процессов составила 13-15 с, что близко к длительности прямого пуска. Провал напряжения в сети при плавном пуске снизился и составил 14-10% от номинального значения. Данные параметры СД пуска с помощью УПП улучшают техническое состояние и ресурс электрооборудования ОНС в целом [50, 51].

При плавном пуске появляется возможность запускать АД со снижением шума и вибрации, которые могли привести к поломкам в механических частях двигателя. Анализ результатов моделирования показал, что при плавном пуске незначительно увеличилось время пуска АД, примерно на несколько микросекунд. Такое явление объясняется технологией плавного пуска, когда к обмотке АД сначала подается пониженное напряжение, затем по ходу пуска напряжение увеличивают до номинальных значений. Как известно, при подаче

пониженного напряжения двигатель разгоняется медленнее и пусковой режим при этом, в какой-то степени, затягивается.

### 3.5. Компьютерное моделирование пусковых режимов синхронного электродвигателя насосной станции при реальной сети

Под «реальной сетью» подразумевается сеть с фактическими значениями напряжений и других параметров системы электроснабжения ОНС АНС-1. В такой сети результаты могут отличаться от «идеальной сети», так как в «идеальной сети» мощность сети принимается несоизмерима большой. В реальных сетях электроснабжения наблюдаются отклонения напряжения, которые влияют на пусковые режимы СД ОНС. Пусковые режимы мощных СД ОНС, в свою очередь, будут негативно влиять на систему электроснабжения ОНС, т.е. при этом наблюдается взаимное влияние сети и потребителей. На рисунках 3.44-3.47 показаны результаты моделирования прямого и плавного пуска СД ОНС при учете фактических параметров сети.

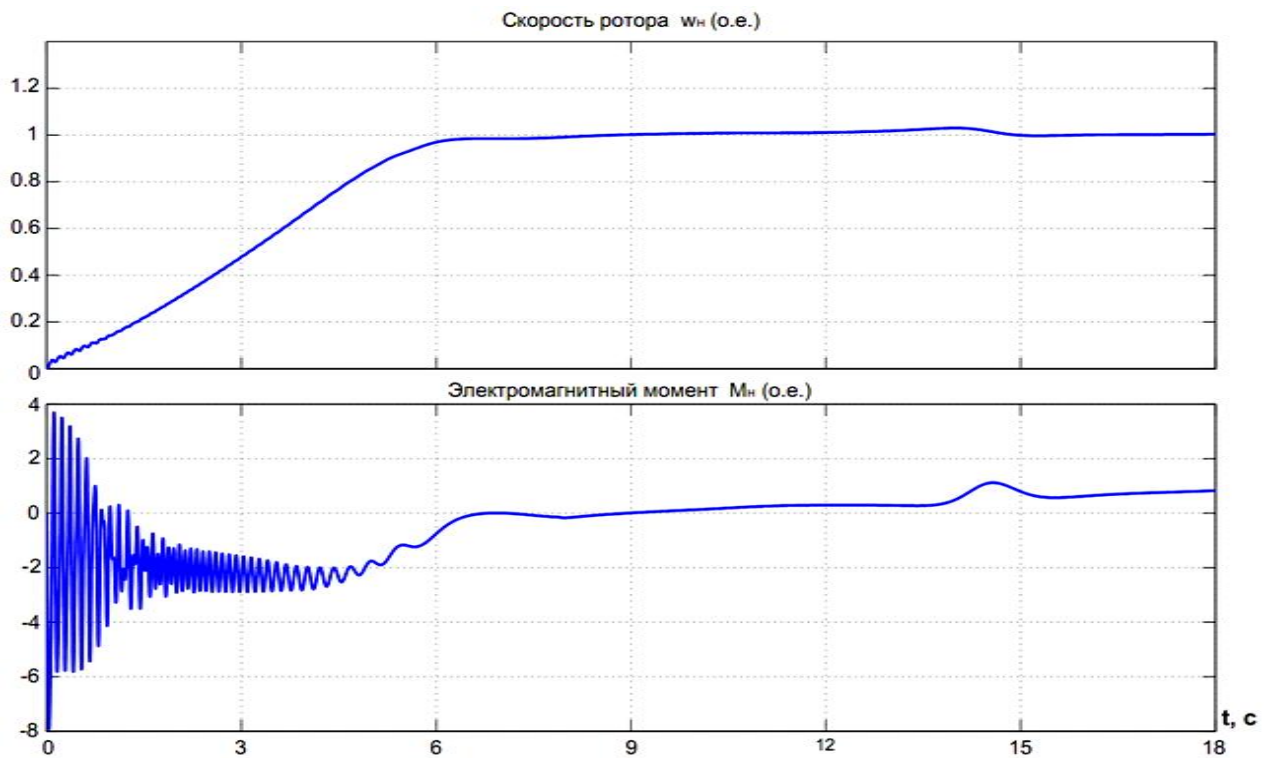


Рисунок 3.44. Переходные процессы скорости и электромагнитного момента СД при прямом пуске



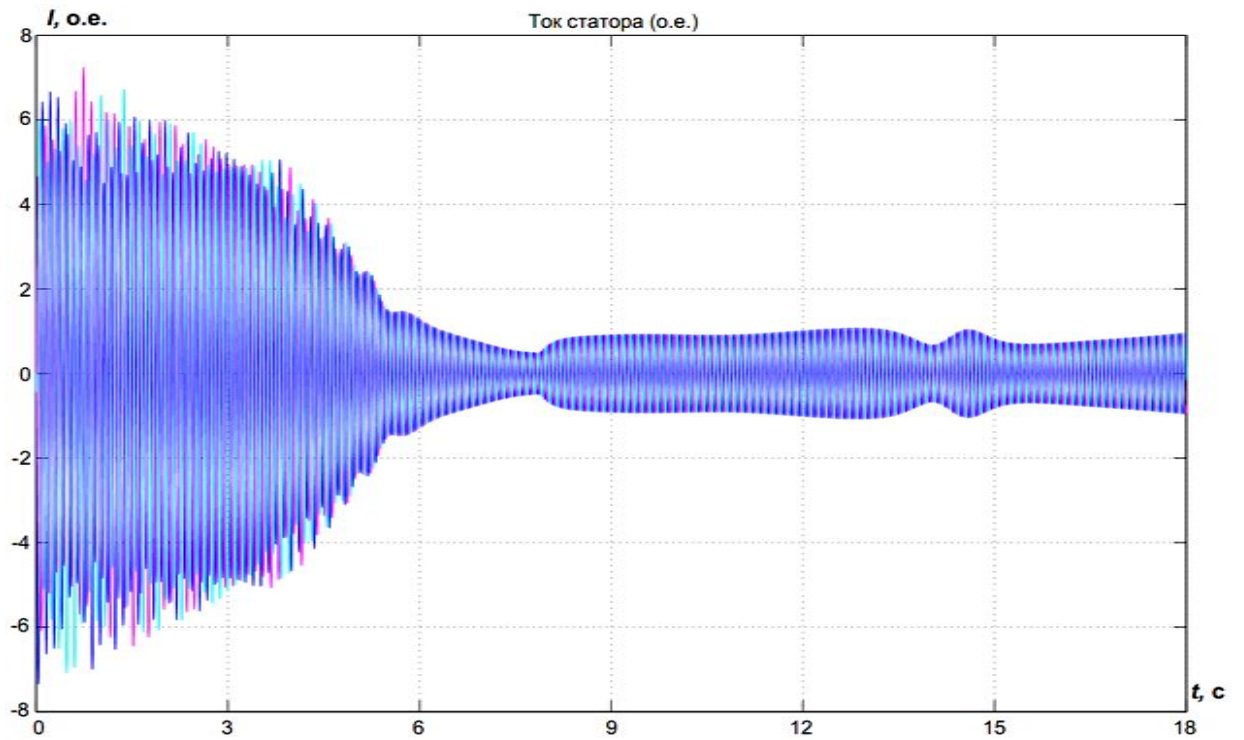


Рисунок 3.45. Переходные процессы токов статора СД при прямом пуске

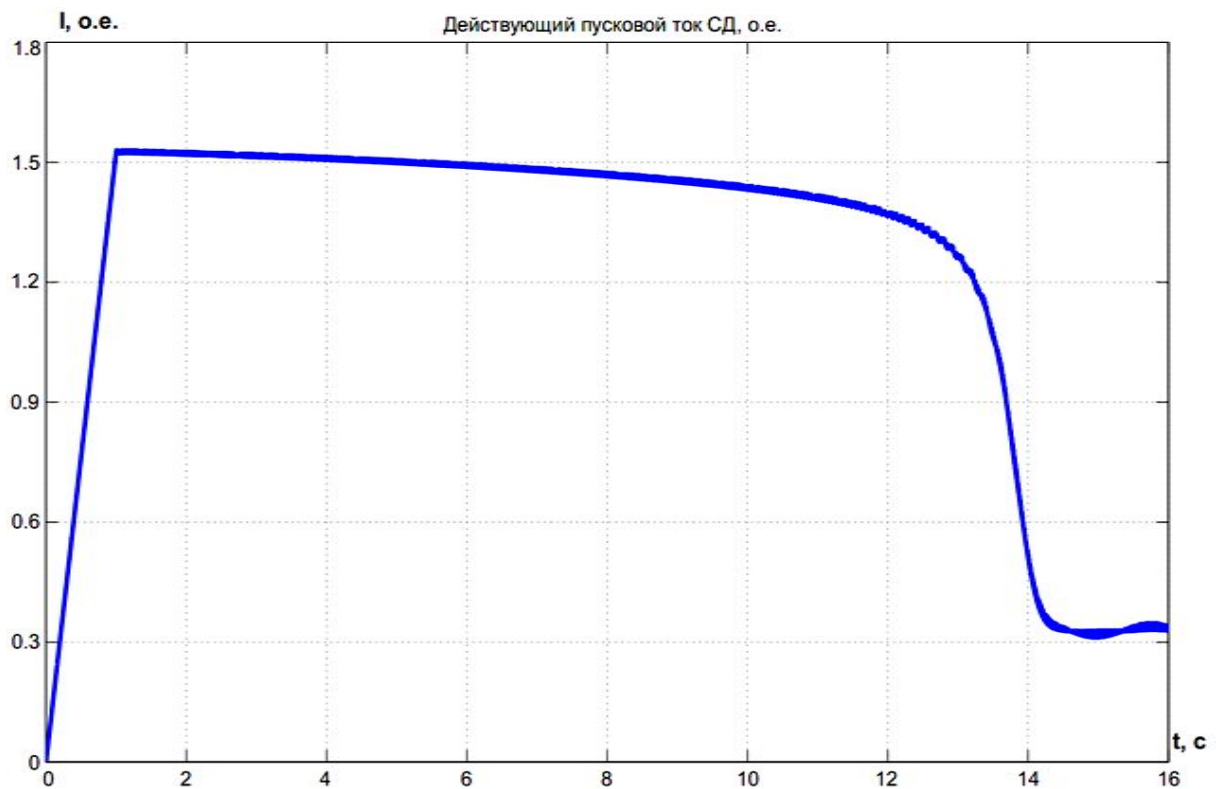


Рисунок 3.46. Переходные процессы токов статора СД при плавном пуске

Графики рисунка 3.44 показывают, что кратность пускового электромагнитного момента СД при прямом пуске составляет от -6-ти до 4-х относительно номинальных значений. Характер изменения электромагнитного

момента при прямом пуске СД и АД знакопеременный. Длительность пуска составляет (рисунок 3.44) 15-16 с. Токи статора СД при прямом пуске (рисунок 3.45) составляют  $(6-7)I_n$ , что может привести к провалу напряжения в системе электроснабжения ОНС, нагреву обмоток двигателя и проводов ЛЭП, а также износу токопроводящих частей электрооборудования НС.

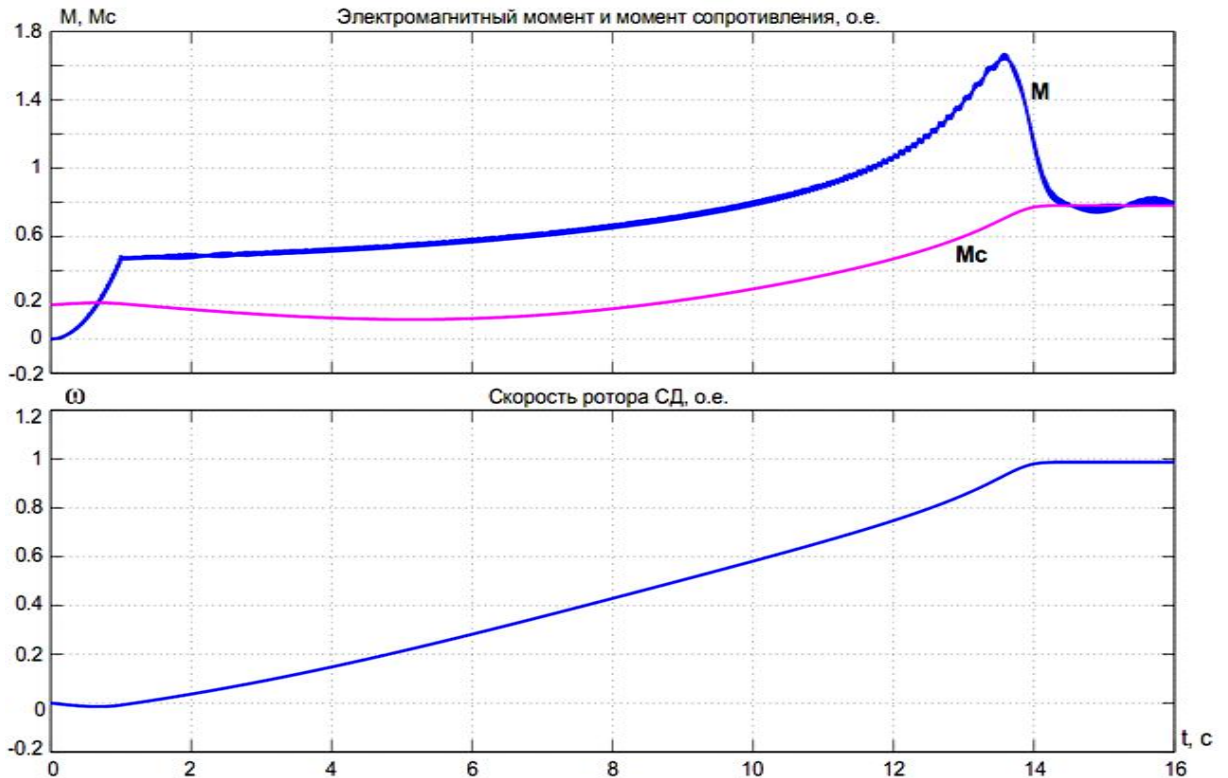


Рисунок 3.47. Переходные процессы скорости и электромагнитного момента СД при плавном пуске

Графики на рисунках 3.46 и 3.47 показывают изменение параметров ЭП в режиме плавного пуска СД. В данном режиме ток и электромагнитный момент СД имеют значительно меньшие значения с устранением знакопеременного изменения электромагнитного момента СД.

### 3.6. Исследование переходных процессов системы электроснабжения оросительной насосной станции при прямых пусках электродвигателей

Используя расчетные данные, построим компьютерную модель системы электроснабжения ОНС АНС-1 с помощью программы MATLAB 2013. Разработанная модель системы электроснабжения приведена на рисунке 3.48.

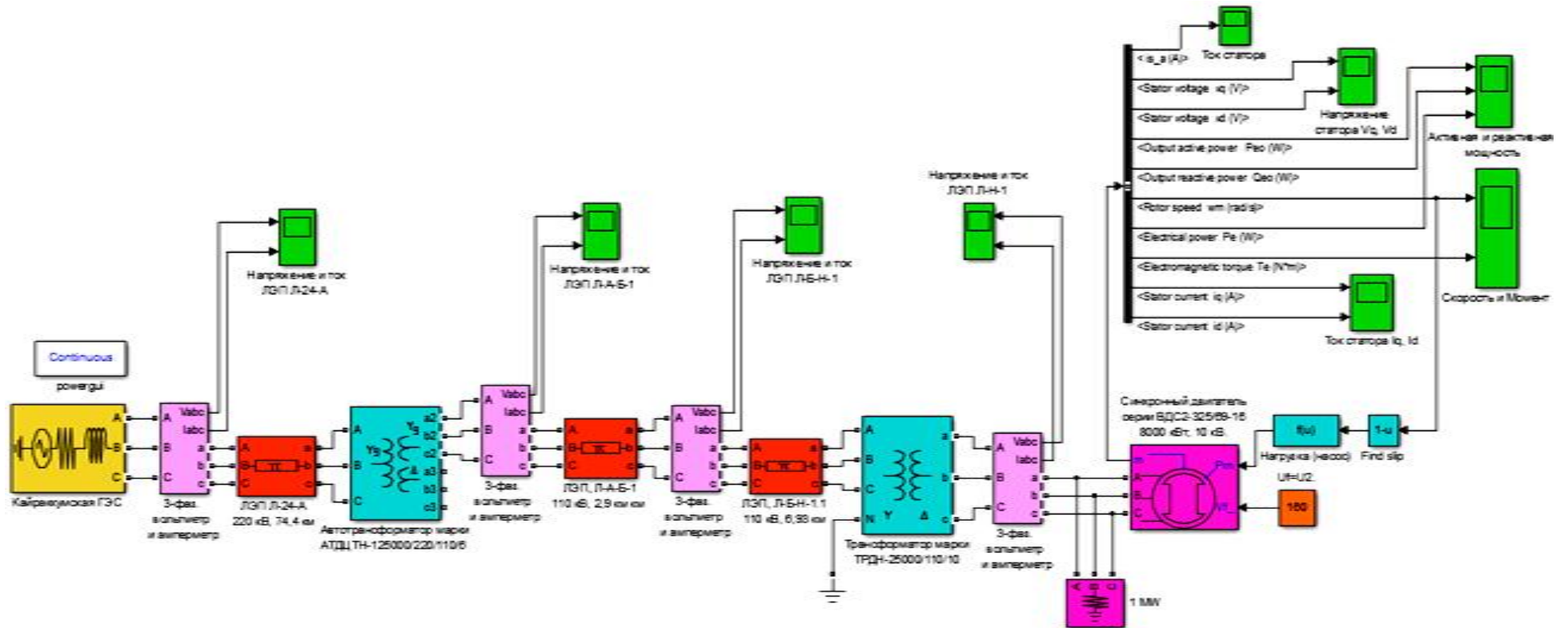


Рисунок 3.48. Компьютерная модель общей системы электроснабжения ОНС АНС-1 при прямом запуске НА

Результаты моделирования показаны на рисунках 3.49-3.52.

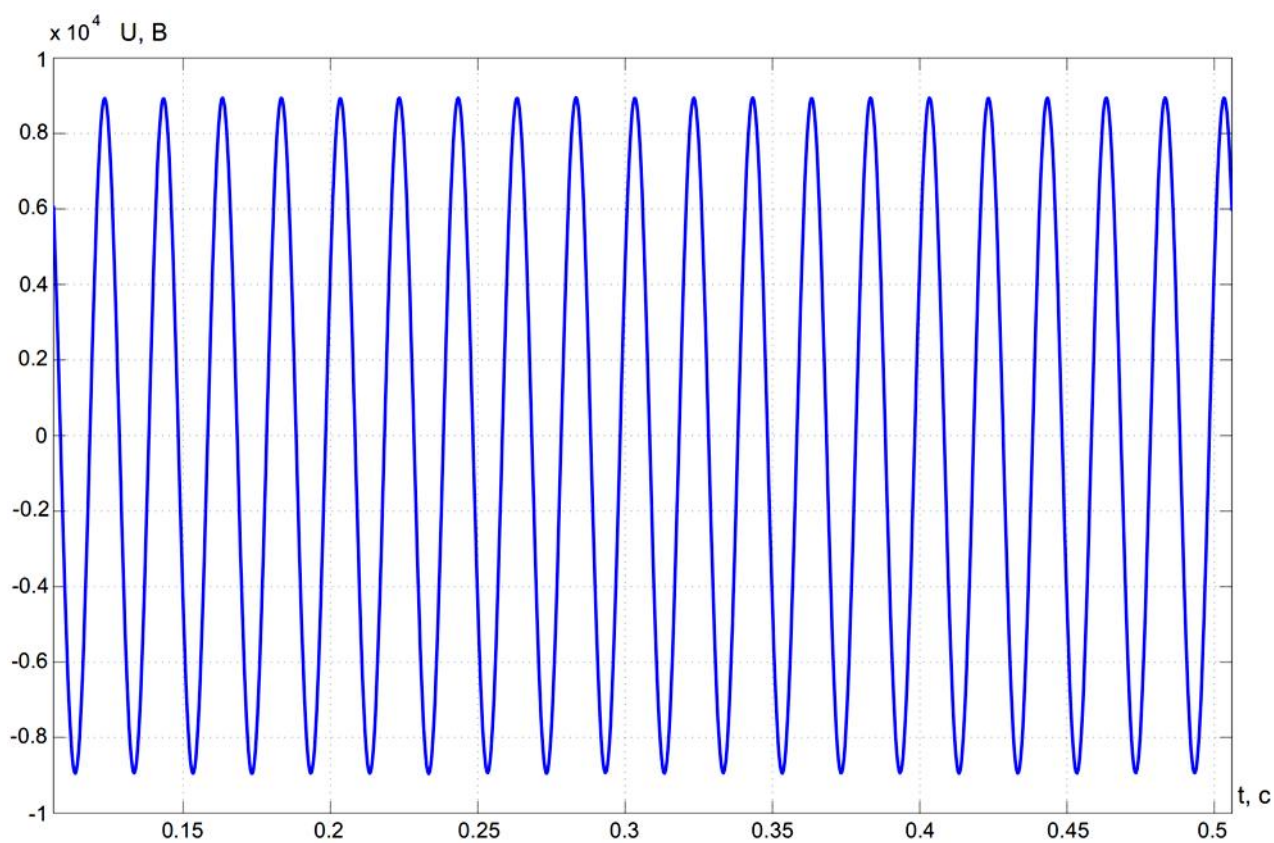


Рисунок 3.49. Форма кривой напряжения на ЛЭП 10 кВ

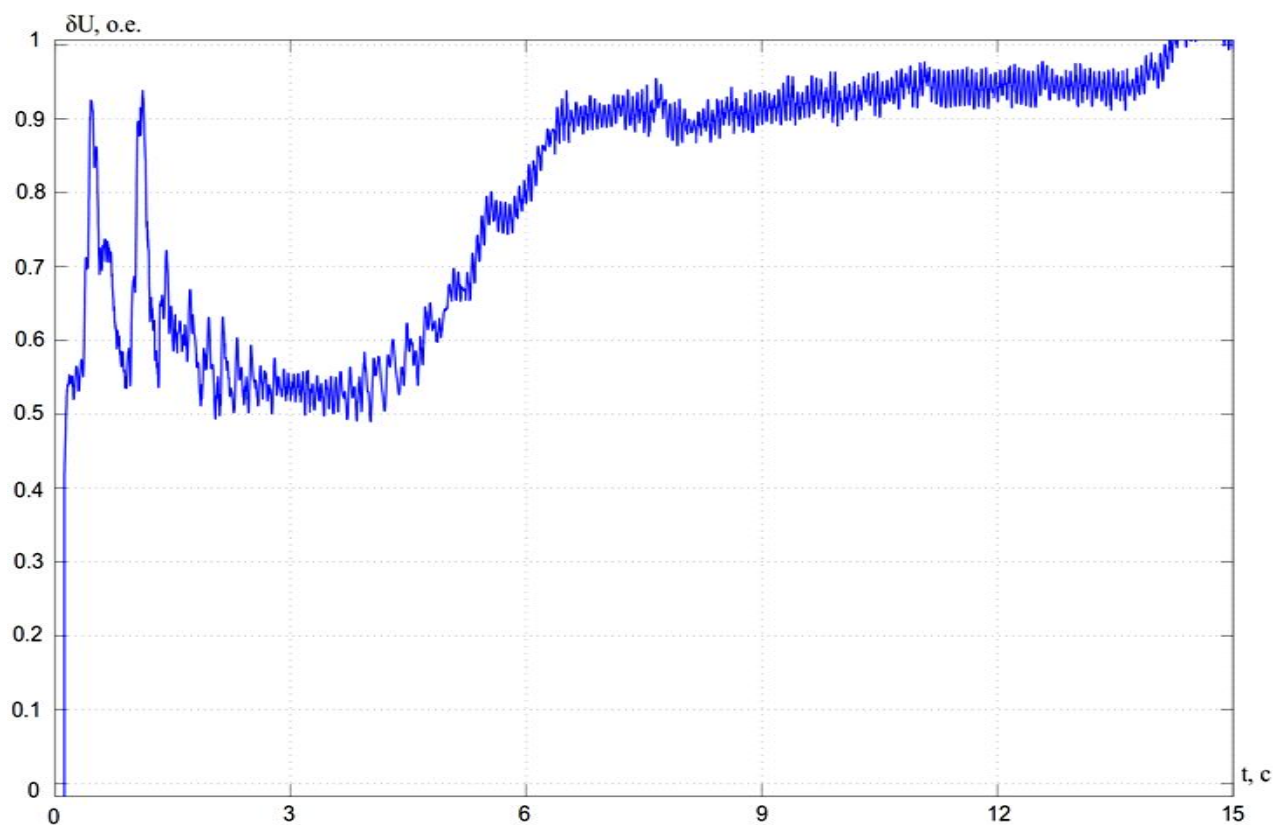


Рисунок 3.50. График провала напряжения при прямом пуске СД в системе электроснабжения, в о.е.



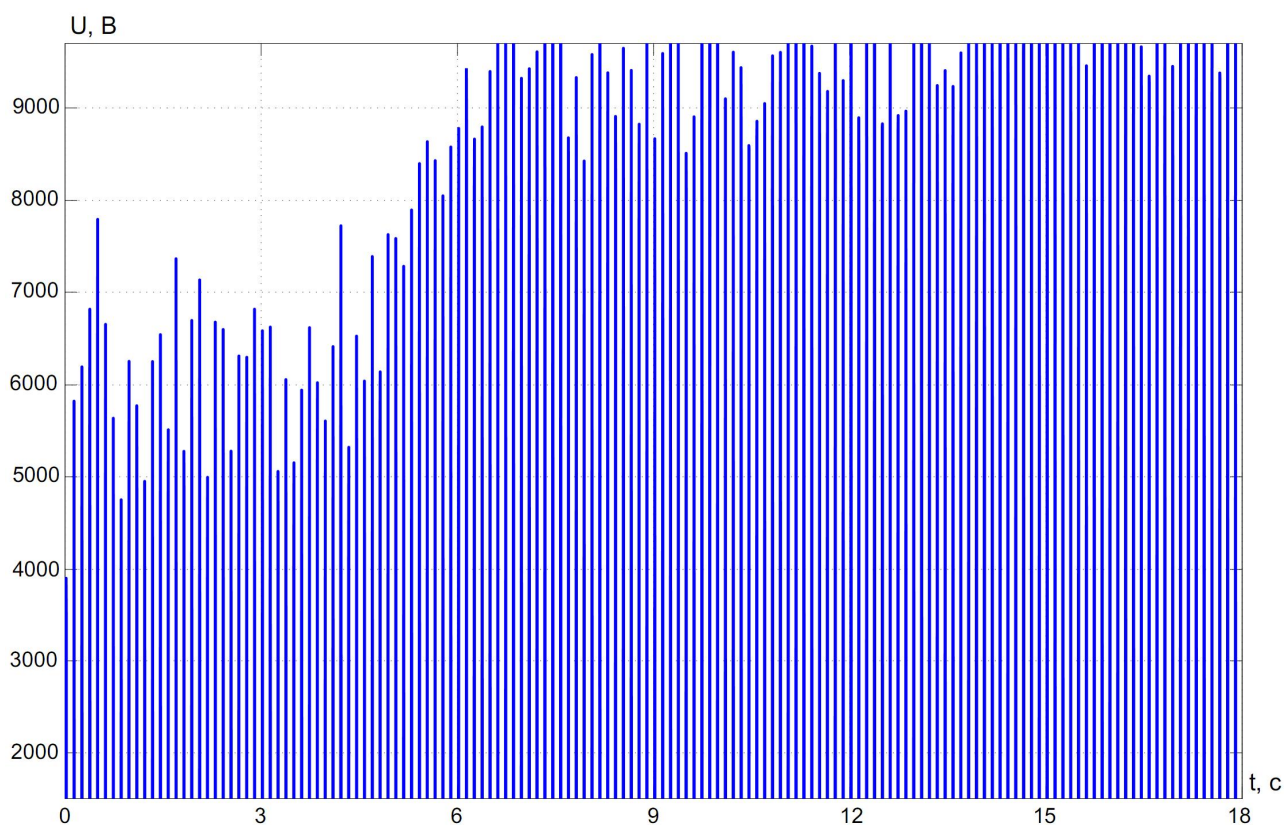


Рисунок 3.51. График изменения напряжения в ЛЭП 10 кВ при прямом пуске СД в системе электроснабжения

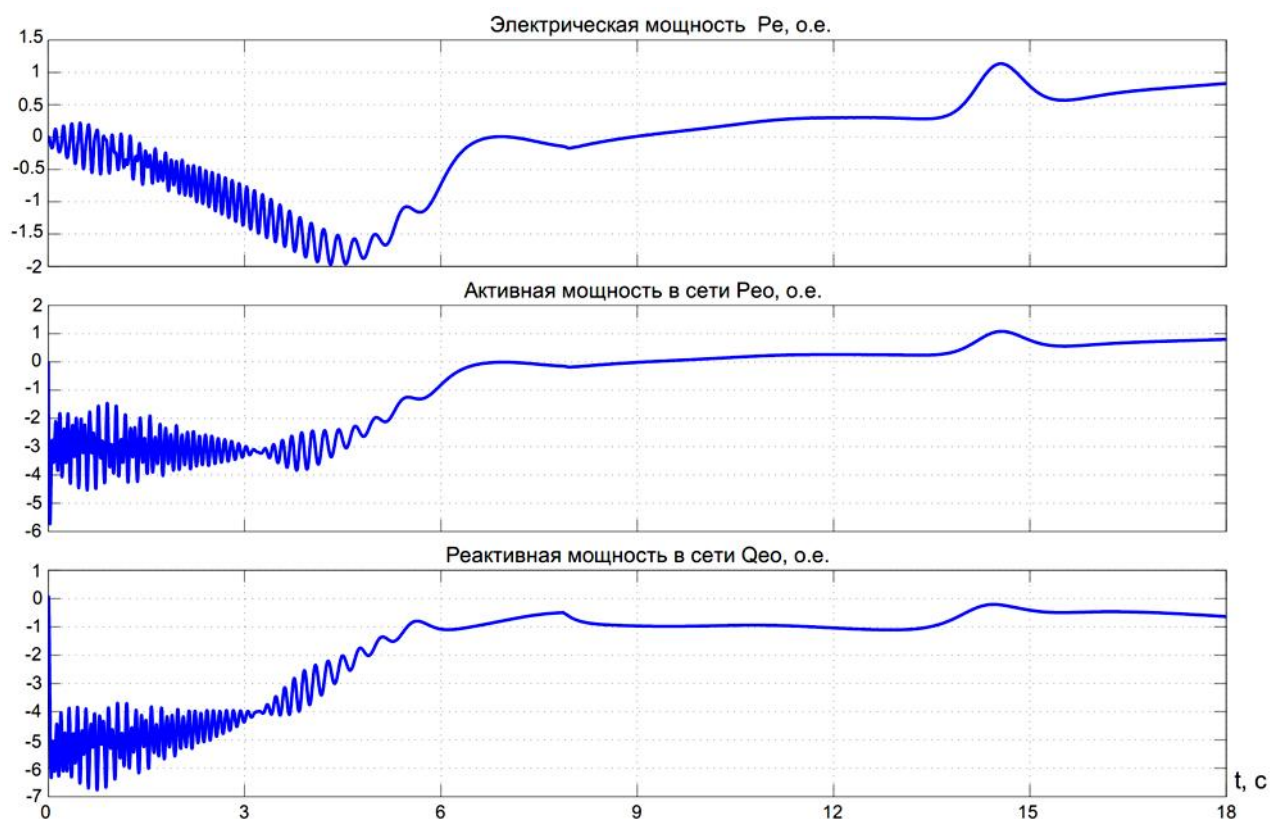


Рисунок 3.52. Графики изменения потребления мощности в системе электроснабжения ОНС при прямом пуске СД

Результаты исследования переходных процессов системы электроснабжения ОНС при прямых запусках НА показывают, что при прямом пуске СД форма кривой напряжения (рисунок 3.49) не изменяется и остается синусоидальной. Однако, провал напряжения в системе электроснабжения ОНС составил 45-50% (рисунок 3.50 и рисунок 3.51), что является недопустимым значением. Графики рисунка 3.52 показывают изменение потребления электрической мощности в системе электроснабжения при прямом пусковом режиме НА.

### **Выводы по третьей главе.**

1. Для компьютерного моделирования элементов системы электроснабжения ОНС представлено математическое описание каждого элемента.

2. В отличие от АД, СД имеют ряд преимуществ: высокий коэффициент мощности, значительная перегрузочная способность, возможность устойчивой работы при допустимых провалах напряжения и т.д.

3. При прямом пуске электромагнитный момент СД и АД имеет знакопеременный характер и продолжительность пуска СД больше, чем АД.

4. Недостатком прямого пуска АД являются большие значения пусковых токов, которые могут достигать 4-8,5 кратного значения номинального тока.

5. Ток статора СД при прямом пуске может привести к провалу напряжения в системе электроснабжения ОНС, нагреву обмоток двигателя и проводов ЛЭП, а также износу токопроводящих частей электрооборудования НС.

6. Знакопеременное изменение электромагнитного момента АД и СД при прямом пуске может создавать шумы и вибрацию.

7. При превышении провалов напряжения относительно допустимых значений пропорционально снижается скорость АД и квадратично пропорционально электромагнитный момент, в результате двигатель переходит

в перегрузочный режим. Поэтому целесообразна установка СД вместо АД в ОНС.

8. Снижение пускового тока при пуске дает возможность увеличить количество пусков ЭД, что улучшает технологический процесс ОНС.

9. Особенность использования УПП заключается в возможности контроля времени подачи и нарастания напряжения питания ЭД при пусковом режиме.

## ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ПУСКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ С ИНВЕРТОРОМ ТОКА

### 4.1. Общие сведения и отличительные особенности инверторов тока

Внедрение современных средств и систем управления электроприводами (СУЭП) позволяют не только экономить ЭЭ, но и увеличивать технический ресурс электрооборудования ОНС. Кроме этого появляется возможность внедрения инновационных технологий, которые позволят повысить качество выполнения технологических процессов. На сегодняшний день широкое применение получили ЭП с двухэтапным преобразованием электроэнергии. На первом этапе у таких ЭП переменный ток преобразуется в постоянный и на втором этапе постоянный ток преобразуется в переменный с регулируемым значением частоты и напряжения [52-54].

Один из главных вопросов при выборе силовой схемы РЭП является учет ЭМС преобразователя с ЭД и сетью. Этот фактор оценивается процентным содержанием высших гармоник в кривых тока и напряжения на выходе преобразователя. Например, для высоковольтного ЭП можно использовать инвертор тока (ИТ) на базе тиристоров. На выходе инвертора тока в результате переключения полупроводниковых приборов, как тиристоры, формируется ток определенной формы, а форма напряжения зависит от нагрузки [55, 56]. Вследствие этого можно получить устойчивый источник ЭЭ по току, и тем самым регулировать значения тока. Регулирование значения тока важно при пуске ВЭД, так как электрический ток является одним из основных параметров, которые влияют на условия пуска и на провал напряжения в системе электроснабжения.

В конце прошлого века начали производить преобразователей с ИТ на запираемых тиристорах, которые хорошо могут служить для плавного пуска ЭД. Вначале они производились для ЭД малой и средней мощностей. Сейчас



активно ведутся разработки для производства высоковольтных преобразователей с ИТ, и на рынке сбыта таких преобразователей участвуют многие компании разных стран мира. Пример российского производителя – является компания ООО НПП «ЭКРА», которая широко производят ПЧ различных типов. Один из направлений производства компании ООО НПП «ЭКРА» является разработка устройств для систем плавного пуска ВЭД. С этой целью в компании выпускается ряд устройств серии ШПТУ-ВИ, которые основаны на работе ИТ [50, 51, 56]. Данный преобразователь имеет относительно простую конструкцию и экономически выгодное схемотехническое решение для пуска АД и СД большой мощности. ШПТУ-ВИ служат, в основном, для пусков ЭД с механизмами на валу, обладающих большими моментами нагрузки (шаровые мельницы, дробилки, экструдеры и т.п.) и большими моментами инерции (вентиляторы, насосы, компрессоры и т.п.) с необходимостью пуска в тяжелых условиях (на открытую задвижку, без байпаса и т.п.). Система ШПТУ-ВИ обеспечивает автоматическое выполнение частотных пусков с ограничением пускового тока ЭД до  $1,3I_{ном}$  [8 – А]. Принцип работы зависимого ИТ заключается в том, что коммутация тока в тиристорах происходит за счет ЭДС двигателя [57]. Для этого угол опережения инвертора должен быть не менее 30 электрических градусов, такой режим называют «режимом естественной коммутации». Рассмотренная система обладает всеми достоинствами ДПТ, с точки зрения регулировочных характеристик, и достоинствами СД по конструктивным особенностям.

На рисунках 4.1 и 4.2 приведены функциональная схема электромеханической системы с ШПТУ-ВИ и график изменения параметров пуска СД марки СТД-6300/6000-2УХЛ4 магистрального насоса перекачки нефти с помощью ШПТУ-ВИ [7 – А, 32 – А].

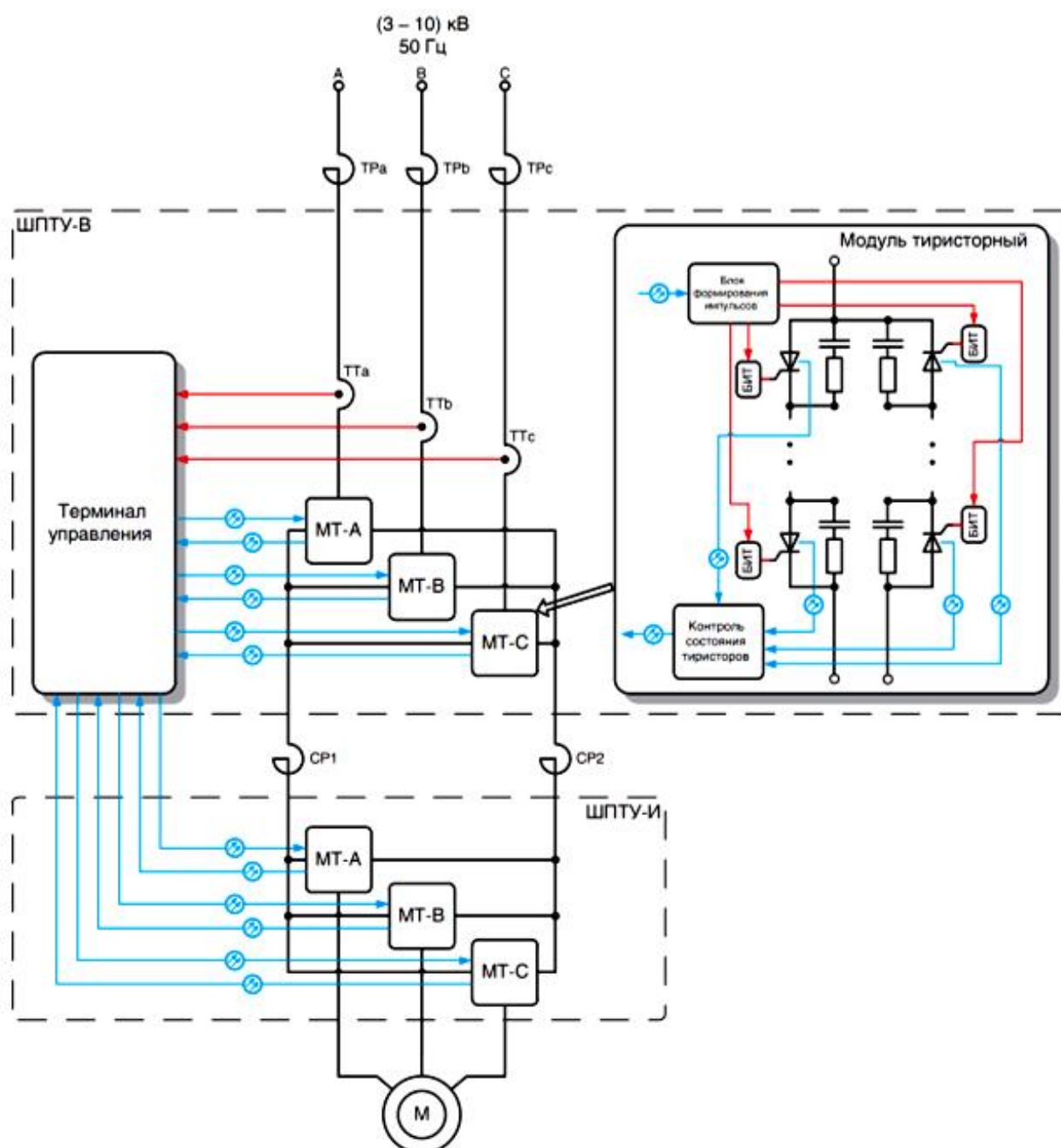


Рисунок 4.1. Схема ЭП с ШПТУ-ВИ

Функциональная схема (рисунок 57) показывает расположение частей ЭП. Основные элементы ЭП с ШПТУ-ВИ составляют терминал управления, тиристорные ключи, выпрямитель и инвертор. Кроме этого, в схеме использованы токоограничивающие (ТР) и сглаживающие (СР) реакторы, трансформатор тока (ТТ) и блок формирования импульсов для управления углом открывания тиристоров [57]. В рассматриваемой системе могут применяться АД и СД.

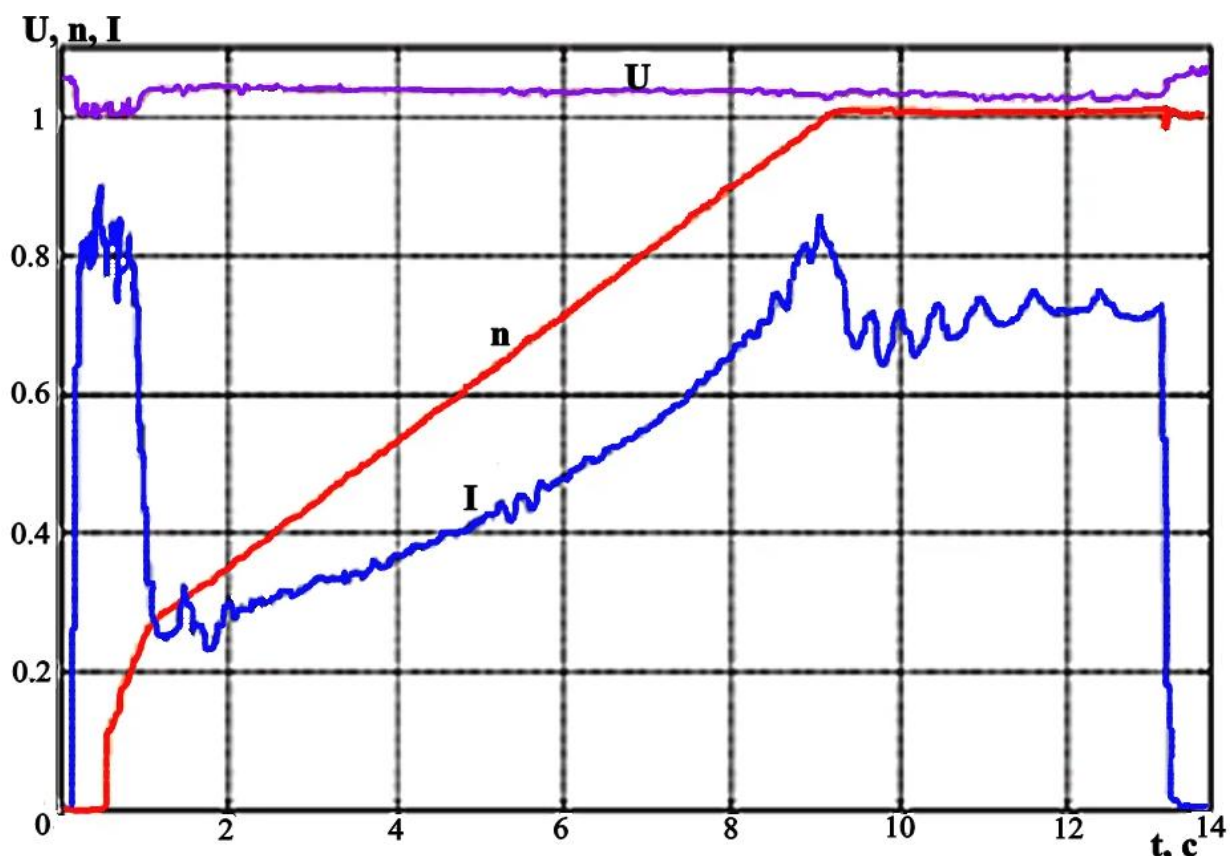


Рисунок 4.2. Параметры пусковых переходных процессов двигателя СТД-6300/6000-2УХЛ4 магистрального насоса перекачки нефти с помощью ШПТУ-ВИ

Таким образом, использование ПЧ на основе ИТ для пуска двигателей с механизмами на валу, обладающими большими моментами нагрузки и моментами инерции, является эффективным решением. Кроме этого, применение ПЧ на основе ИТ является целесообразным для ЭП большой мощности в случае необходимости, по технологическим условиям, обеспечения режима рекуперации энергии в сеть. Однако есть и минусы, например, при коммутации тока в тиристорах, в ПЧ появляются магнитные составляющие электромагнитных полей, которые сложно подавлять [56]. В тех случаях, когда при работе мощного СД не требуется регулирование скорости, ЭП с ИТ является экономичным решением для реализации плавного пуска СД. В этом случае увеличивается технический ресурс электрооборудования, что приводит к экономии затрат на ремонт и обслуживание всего электрооборудования ОНС в целом. Схема ИТ показана на рисунке 4.3.

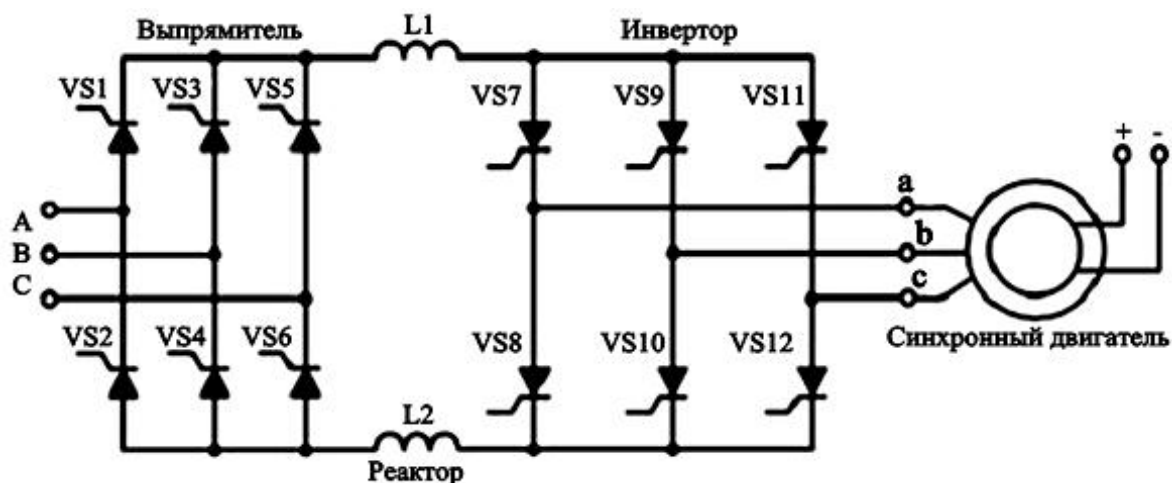


Рисунок 4.3. Схема ЭП с ведомым инвертором тока

Преимущество представленной схемы ЭП (рисунок 4.3) состоит в том, что здесь применяется система фазового управления. Регулирование тока инвертора выполняется по средствам управляемого выпрямителя. Управляемый выпрямитель имеет недостатки, основные которых являются: потребление из сети несинусоидального тока, снижение  $\cos\phi$ , появление сдвига фаз в потребляемом токе относительно напряжения сети.

Снижение  $\cos\phi$  обусловлено свойствами управляемого выпрямителя, а также его СУ. Кроме этого данный коэффициент может уменьшиться из-за увеличения диапазона регулирования скорости ЭП. В результате увеличиваются реактивный и результирующий токи, потребляемые ПЧ. В этом случае инвертор будет иметь искаженную форму тока на выходе, что может привести к нагреву ЭД [56]. Эти недостатки свидетельствуют о малой эффективности ЭП с СД и ИТ. Однако такую систему можно использовать для плавного пуска ЭП, так как такой режим является кратковременным. С целью улучшения формы выходных токов и напряжений, в ПЧ применяют широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) [58-62]. При коммутации тока в обмотках ЭД, на вентилях ИТ образуется перенапряжения и для их ограничения на выходе инвертора устанавливают мощные высоковольтные конденсаторные фильтры. Преобразователи на основе ИТ (рисунок 4.3) чувствительны к изменению параметров электрических машин, кроме этого их влияние на сеть питания соответствует уровню содержания высших гармоник THD 25-27% [56].

Зарубежные аналоги таких преобразователей – является продукция фирмы Allen-Bradley, выпускающая преобразователи PowerFlex 7000, которые имеют аналогичную топологию [63-65]. В PowerFlex 7000 использована 18-пульсная схема выпрямления и согласующий трансформатор. Данный преобразователь имеет следующие характеристики [63]: содержание высших гармоник (ТНД) во входном токе преобразователя 6,6%; обеспечение частоты ШИМ на 440-1000 Гц; приближенная форма инвертируемого тока к синусоидальной. Основным недостатком такой схемы преобразователя - наличие трансформатора, который увеличивает габариты самого преобразователя [64]. Для решения данной проблемы возможно использование активных выпрямителей, подключаемых к сети через LC фильтр. В этом случае влияние преобразователя на питающую сеть уменьшится, а также содержание высших гармоник будет снижено до уровня 4-5%. В активном выпрямителе и в ИТ используют запираемые тиристоры, и для реализации ЭП с номинальным напряжением 6 и 10 кВ, тиристоры должны включаться последовательно [66-71]. Переходные процессы электропривода при использовании ШПТУ-ВИ показаны на рисунке 4.4 [56].

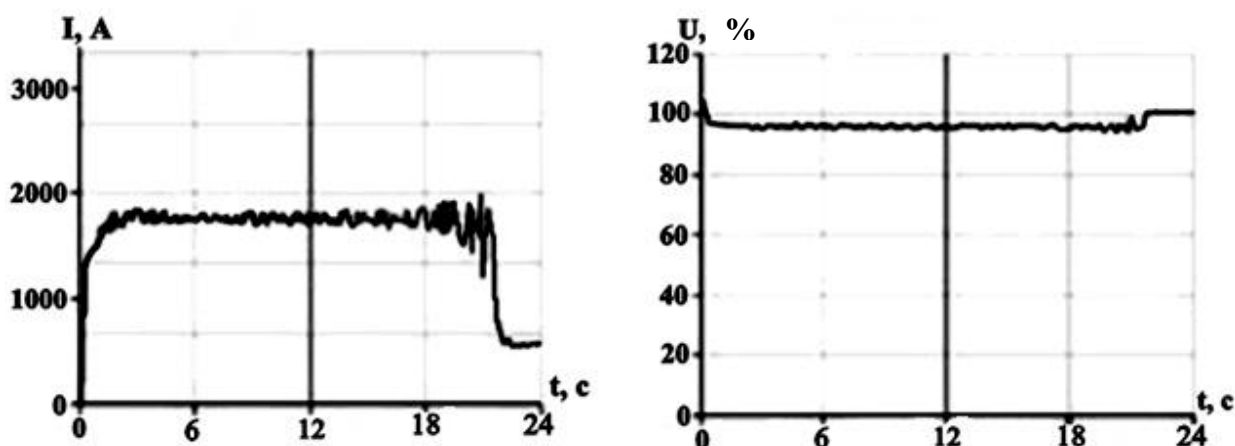


Рисунок 4.4. Графики тока и напряжения - ШПТУ-ВИ СД мощностью 12,5 МВт, напряжением 10 кВ с дожимным компрессором

Графики (рисунок 4.4) показывают, что ограничение пускового тока наблюдается по всей длительности пускового режима, при этом значение провала напряжения минимально. Проведенные исследования выявили целесообразность использования ЭП с ИТ для реализации плавного пуска ЭД.

## 4.2. Моделирование инвертора тока

Имитационное моделирование позволяет детально исследовать режимы работы ИТ. Для моделирования ИТ применяется программа MATLAB/Simulink 2013, а структура модели принята в соответствии с силовой схемой преобразователя (рисунок 4.5) [32 – А].

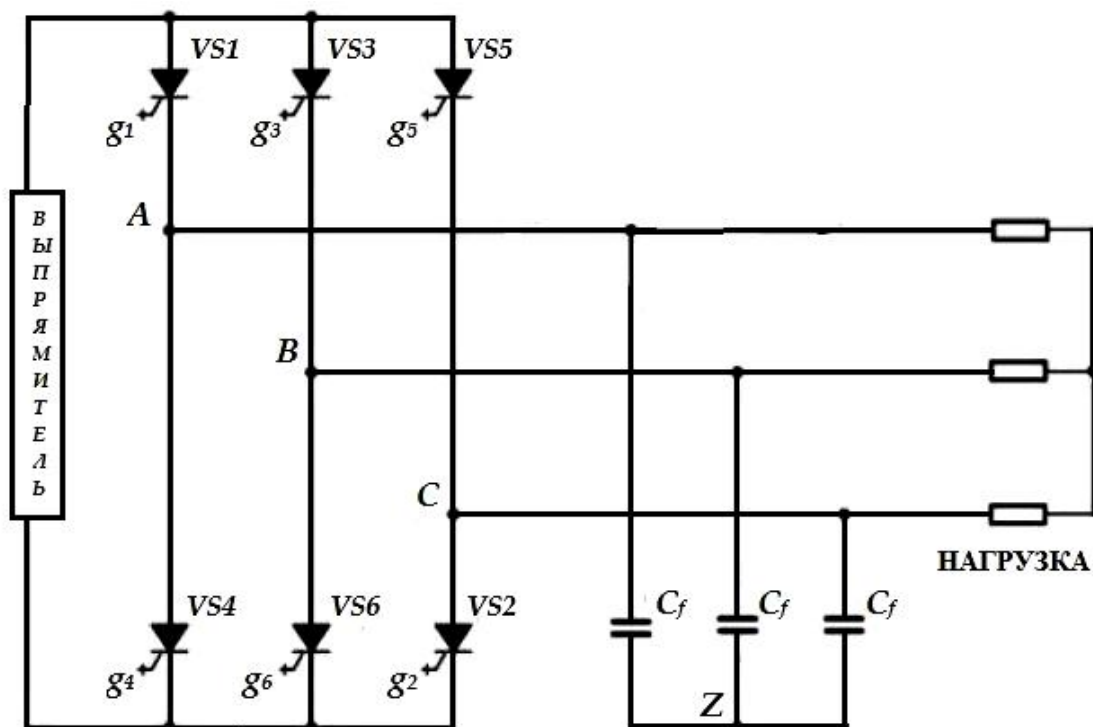


Рисунок 4.5. Силовая схема 3-фазного инвертора тока

Силовая схема (рисунок 4.5) показывает, что инвертор тока состоит из двух частей - выпрямителя и непосредственно инвертора. Так как обе части представляют собой устройства, выполняющие разные функции, моделирование целесообразно проводить отдельно для обеих частей. Разработанная модель выпрямителя на базе диодов и графики выходных параметров приведены на рисунках 4.6 и 4.7.

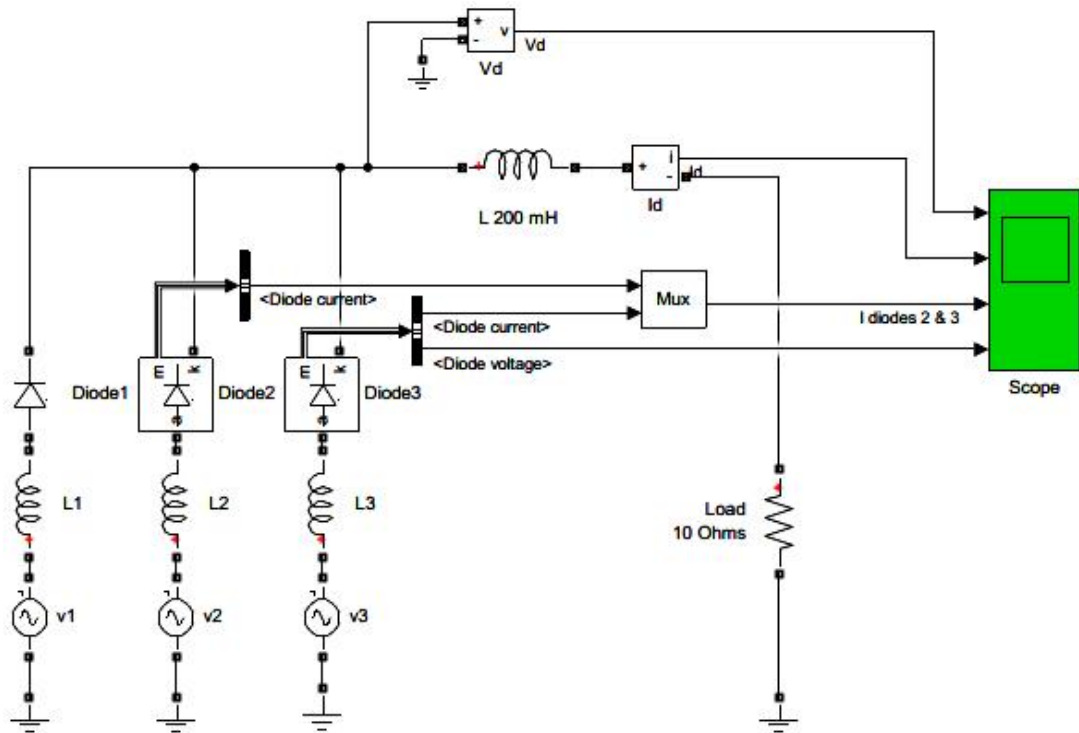


Рисунок 4.6. Модель выпрямителя

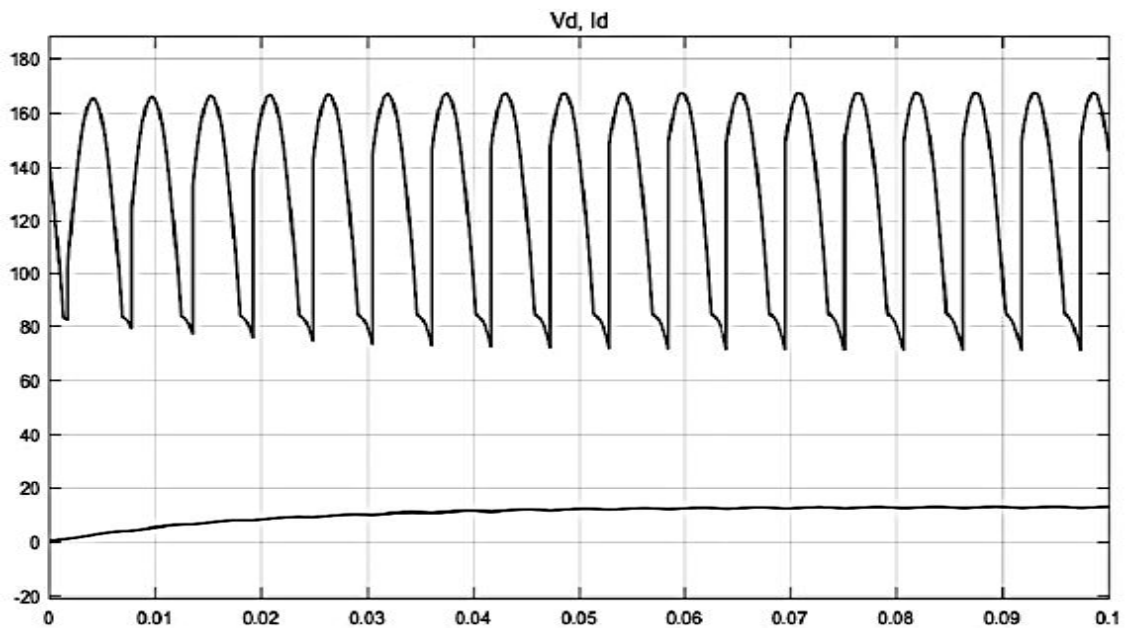


Рисунок 4.7. Графики тока и напряжения на выходе выпрямителя

Рисунок 4.7 показывает, что в выпрямителе ток преобразуется в постоянный, также не наблюдается его знакопеременное изменение, однако сохраняются микроколебания. Для устранения таких колебаний обычно используют фильтры после каждого выпрямителя.

Компьютерная модель ИТ на базе транзисторов IGBT и графики результатов моделирования инвертора приведены на рисунках 4.8 и 4.9.

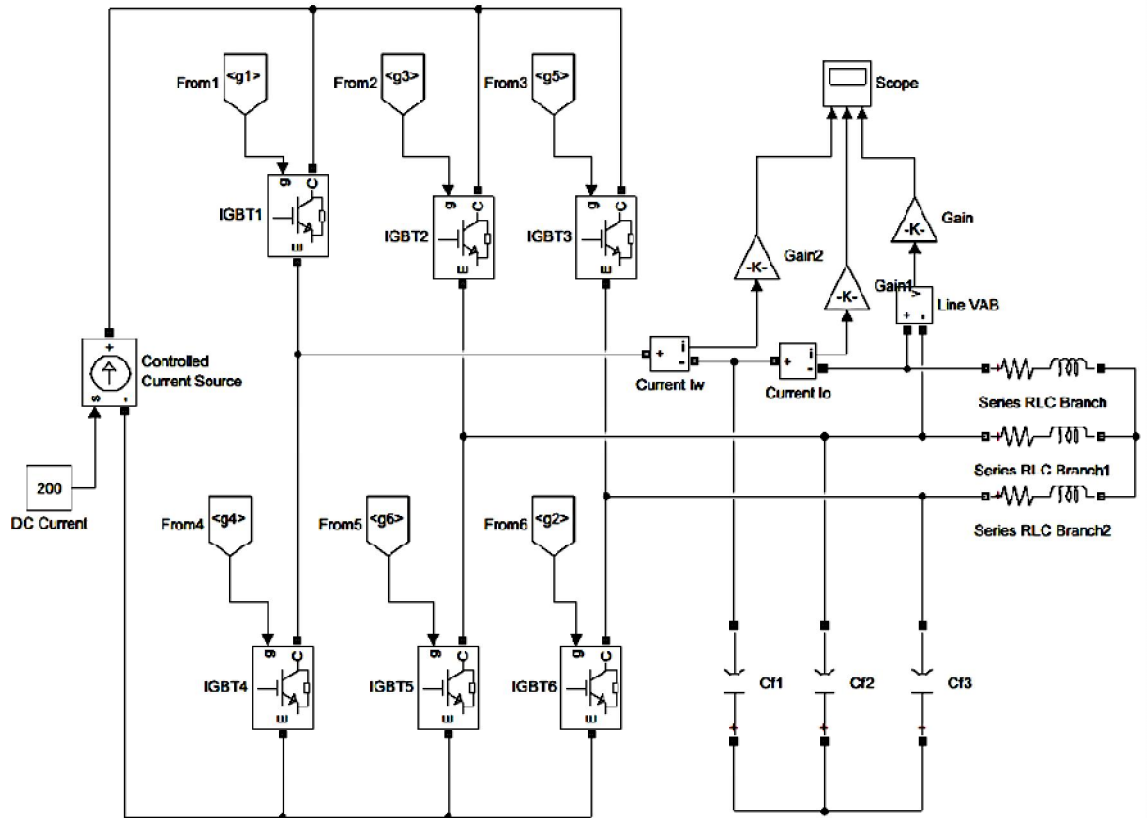


Рисунок 4.8. Модель инвертора тока

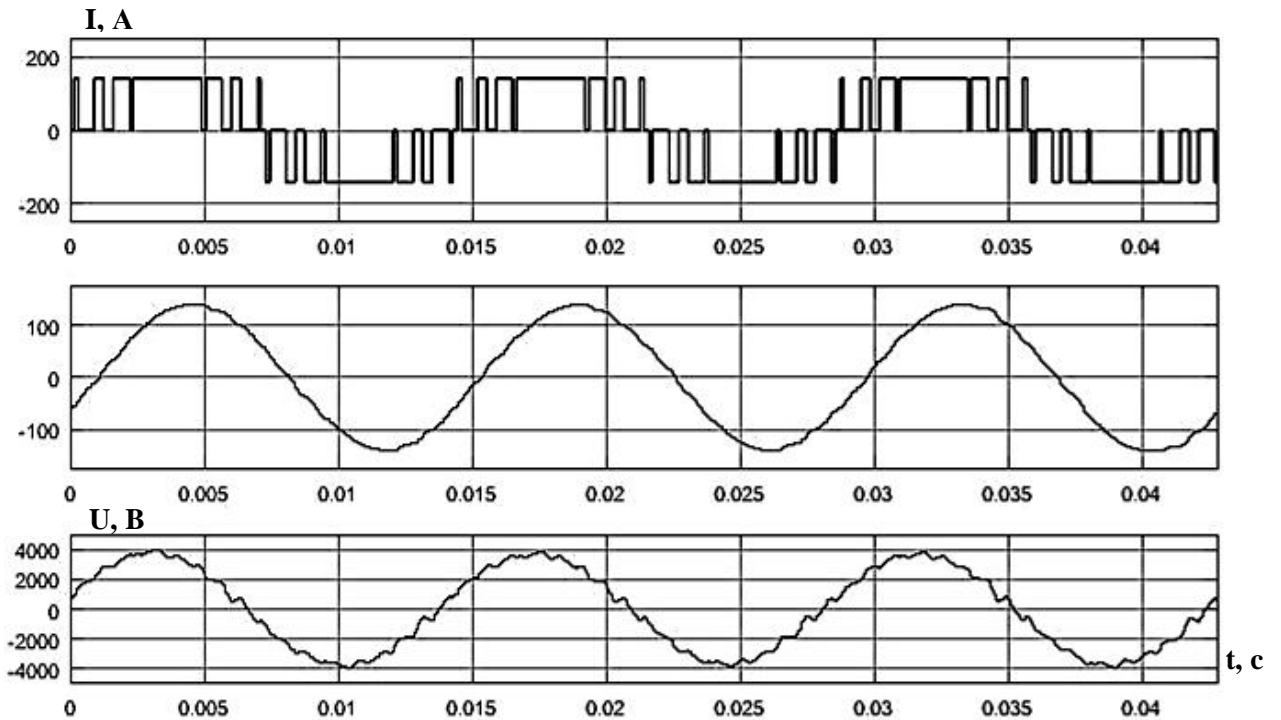


Рисунок 4.9. Ток и напряжение на выходе ИТ



Рисунок 4.9 показывает, что ток ИТ сформирован в виде прямоугольных импульсов. Это подтверждает адекватность разработанной модели ИТ и возможность дальнейшего моделирования данного устройства в составе ЭП с различными ЭД и режимами их работы.

### 4.3. Моделирование параметров пусковых режимов асинхронных и синхронных электродвигателей насосных агрегатов с инвертором тока

Для моделирования режима пуска ЭП с ИТ для насосной установки используется программа MATLAB R2013a. В данной версии программы существует специальная библиотека блоков для моделирования электротехнических устройств Simscape/SimPowerSystems, используем блок Asynchronous Machine [72]. Он служит для моделирования АД мощностью 1600 кВт для привода НА. Окно настройки параметров Asynchronous Machine показано на рисунке 4.10.

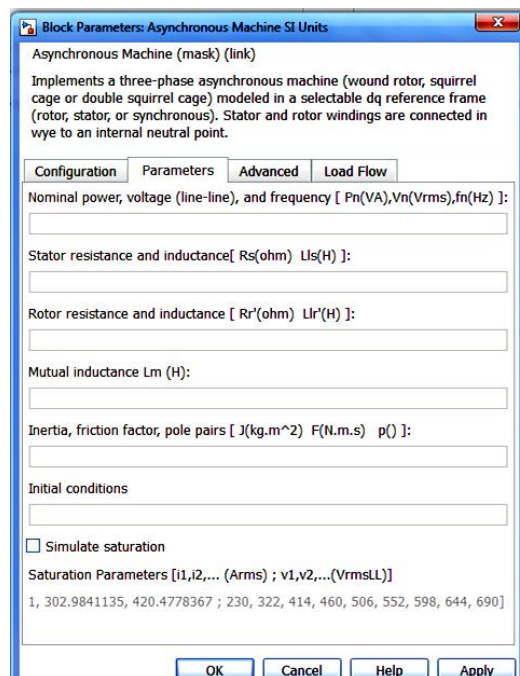


Рисунок 4.10. Блок настройки параметров АД

Разработанная модель для исследования пускового режима асинхронного ЭП с ИТ приведена на рисунке 4.11 [1 – А].

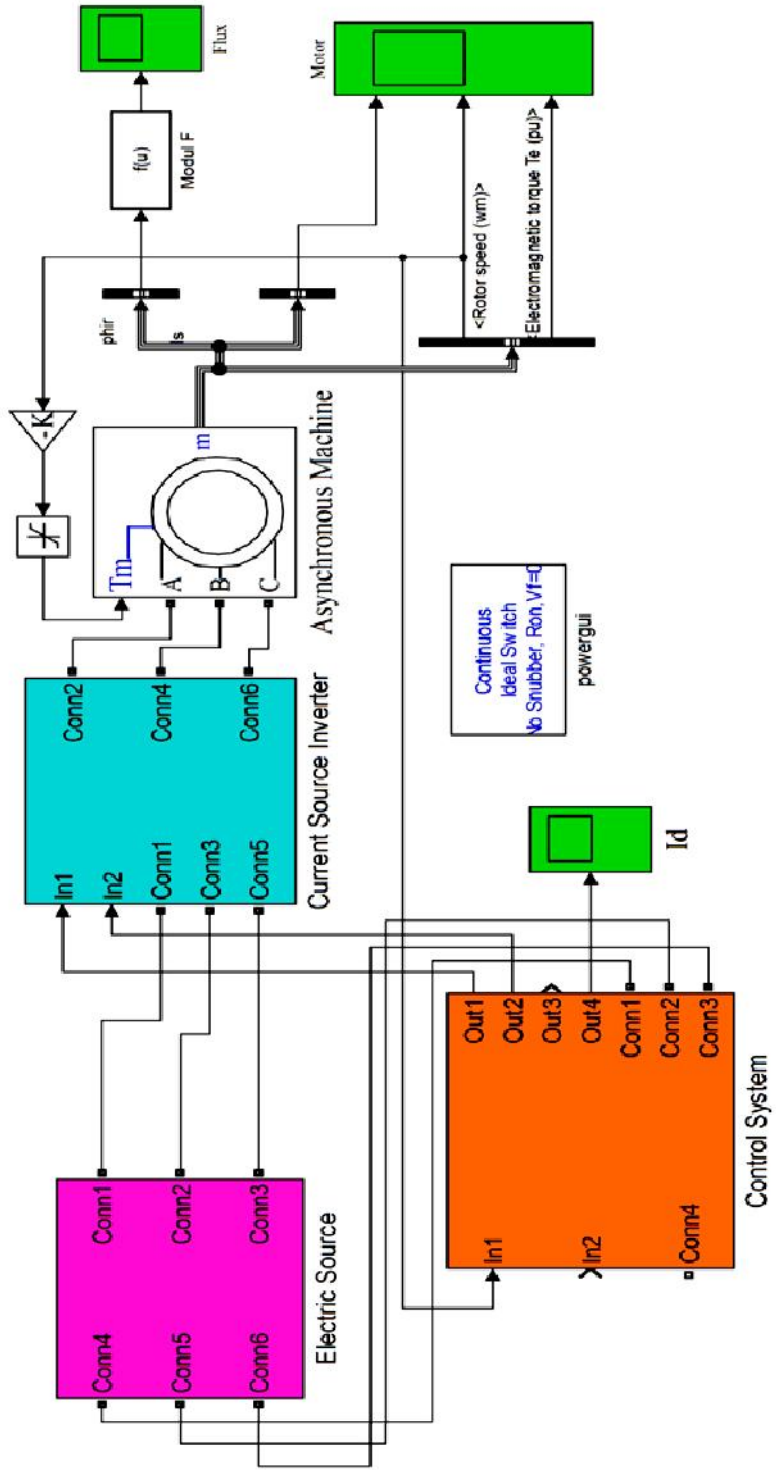


Рисунок 4.1.1. Модель для исследования пускового режима асинхронного ЭП с инвертором тока

Для наглядности модели, используя элементы ЭП, создаются subsystemы - как источник электроэнергии - Electrical Source, Current Source Inverter служит для имитации ИТ и Control System служит для имитации СУ ЭП. Если раскрыт subsystemы модели 67, то получим следующие модели (рисунок 4.12 и 4.13).

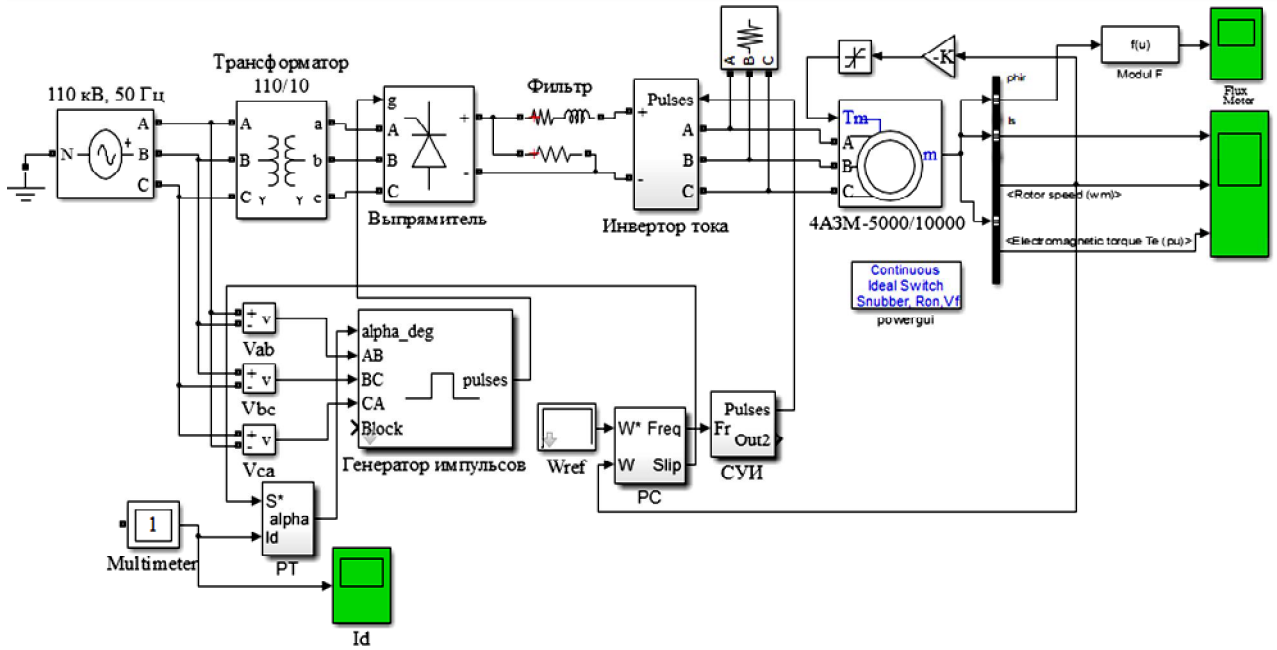


Рисунок 4.12 Подмаски subsystemы источник питания, системы управления и инвертора тока

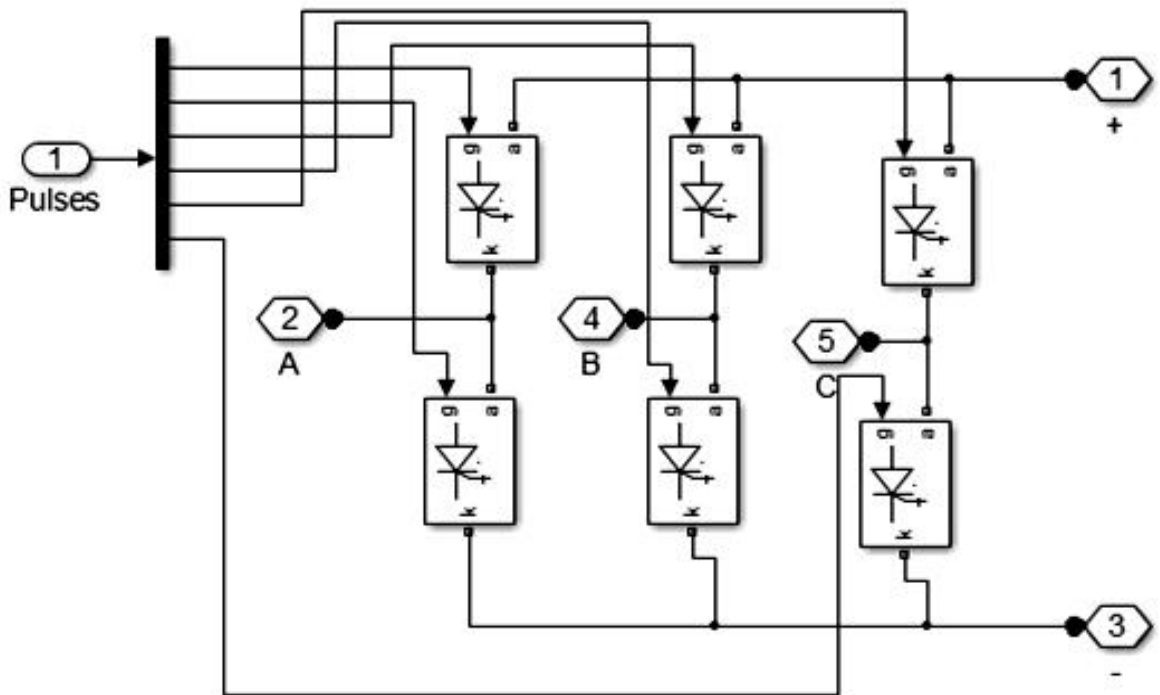


Рисунок 4.13. Подмаска инвертора тока

Результаты моделирования показаны на рисунках 4.14 – 4.16 [101, 102].

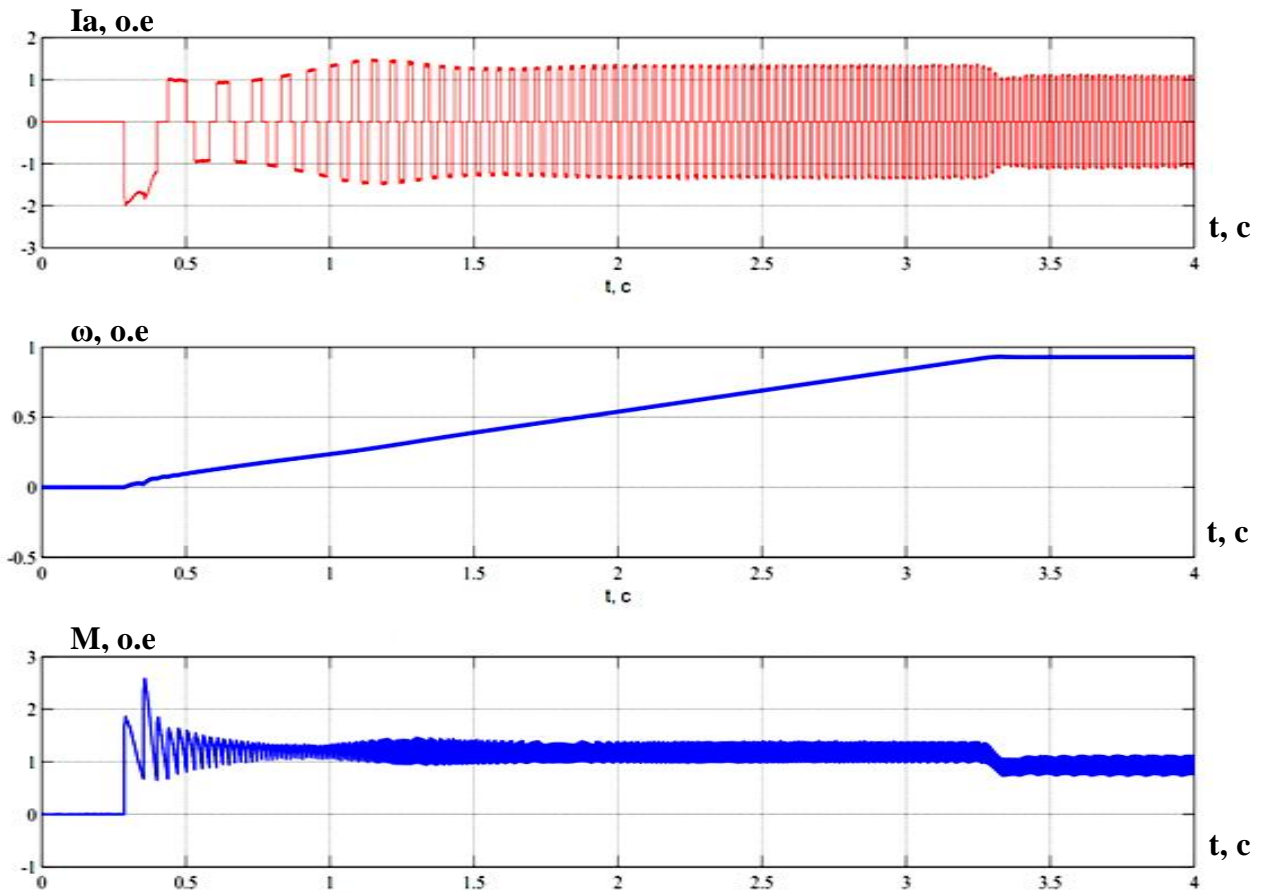


Рисунок 4.14. Пусковые переходные процессы асинхронного ЭП с ИТ

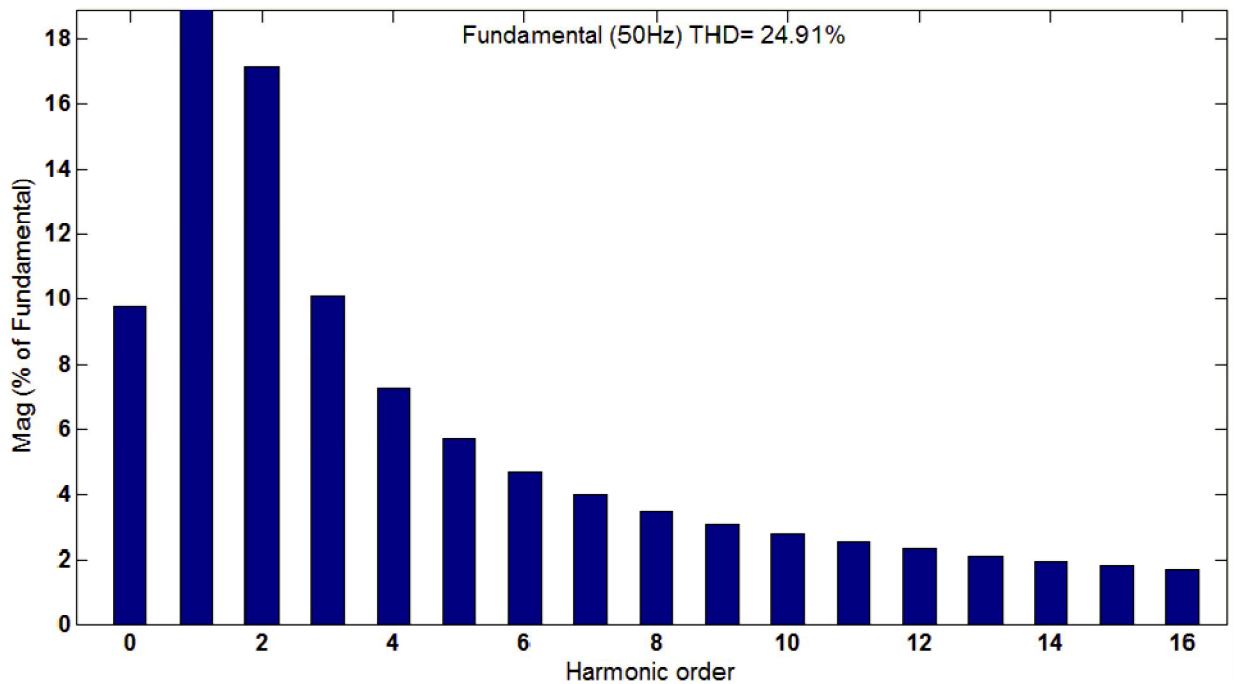


Рисунок 4.15. Гармонический состав напряжения ИТ

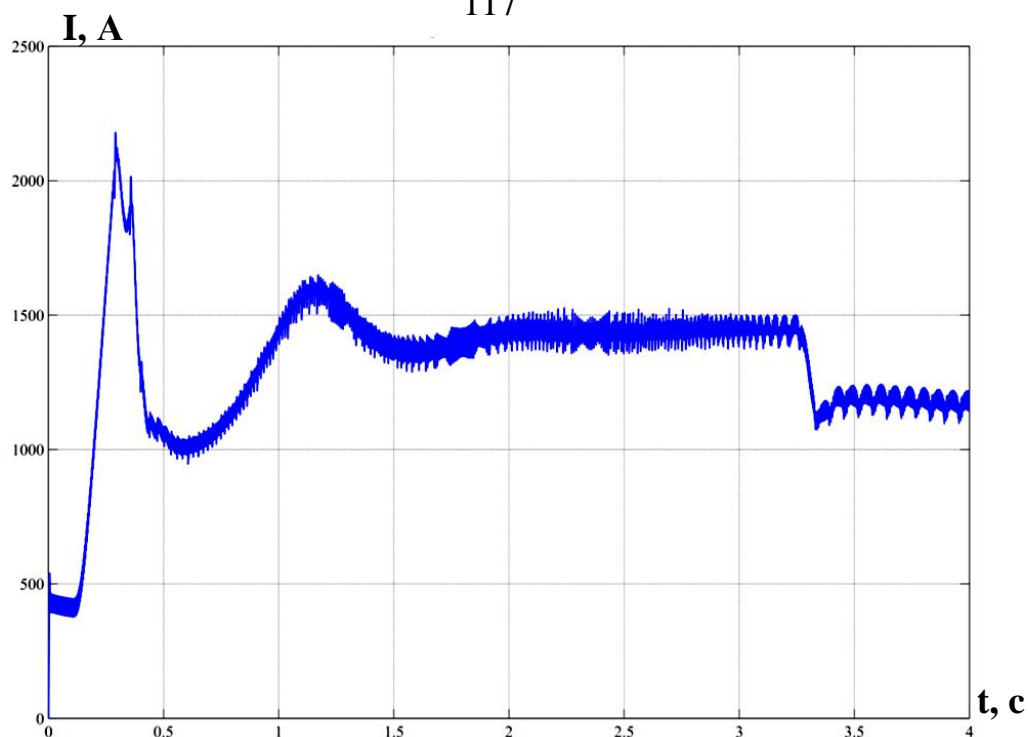


Рисунок 4.16. Графики результирующего пускового тока переходного процесса асинхронного ЭП с ИТ

Максимальный кратковременный пусковой ток (рисунок 4.16) при пуске ИТ составляет примерно 2200 А, а продолжительный пусковой ток не превышает 1600 А, в то время как номинальный ток АД составляет 1200 А. В процентном соотношении при использовании ИТ максимальный кратковременный пусковой ток составил 183% номинального тока, а продолжительный пусковой ток составил всего лишь 133% номинального значения тока. Это означает, что пусковой ток АД при пуске ИТ перевесил номинального значения от 1,33 до 1,83 раза, что является хорошим результатом. При этом, кратковременное влияние ИТ на сеть питания во время пуска соответствует заданным требованиям, так как его значение ниже допустимого уровня высших гармоник напряжения THD 25-27% и составляет 24,91%. Достоверность разработанной модели подтверждается практическими результатами испытаний аналогичных преобразователей в системах ЭП, которые разрабатываются и производятся на предприятиях России и США.

В большинстве крупных ОНС в качестве ЭД для НА выбирают СД вертикального исполнения. Критерии выбора ЭД для ОНС могут быть разные, например, коэффициент мощности, перегрузочная способность и т.д. На

рисунке 4.17 приведена разработанная компьютерная модель синхронного ЭП при пуске с помощью ИТ, результаты моделирования представлены в относительных единицах при прямом и плавном пусках СД [1 – А].

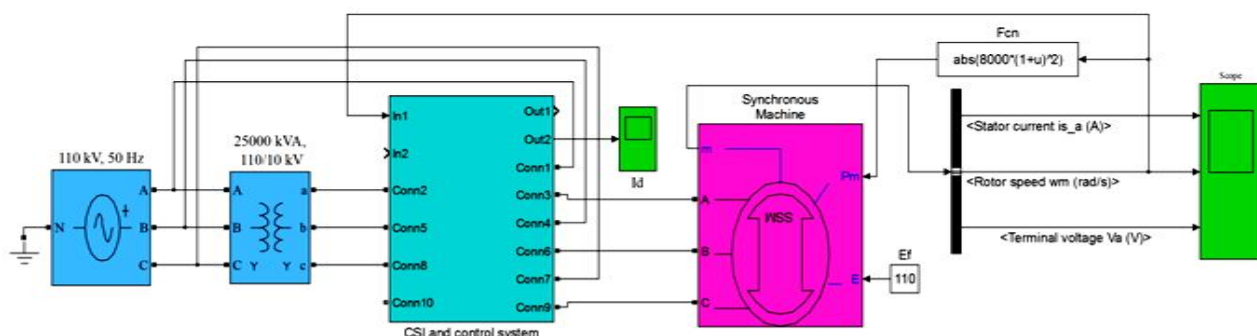


Рисунок 4.17. Модель синхронного ЭП с ИТ

Результаты приведены на рисунках 4.18-4.20.

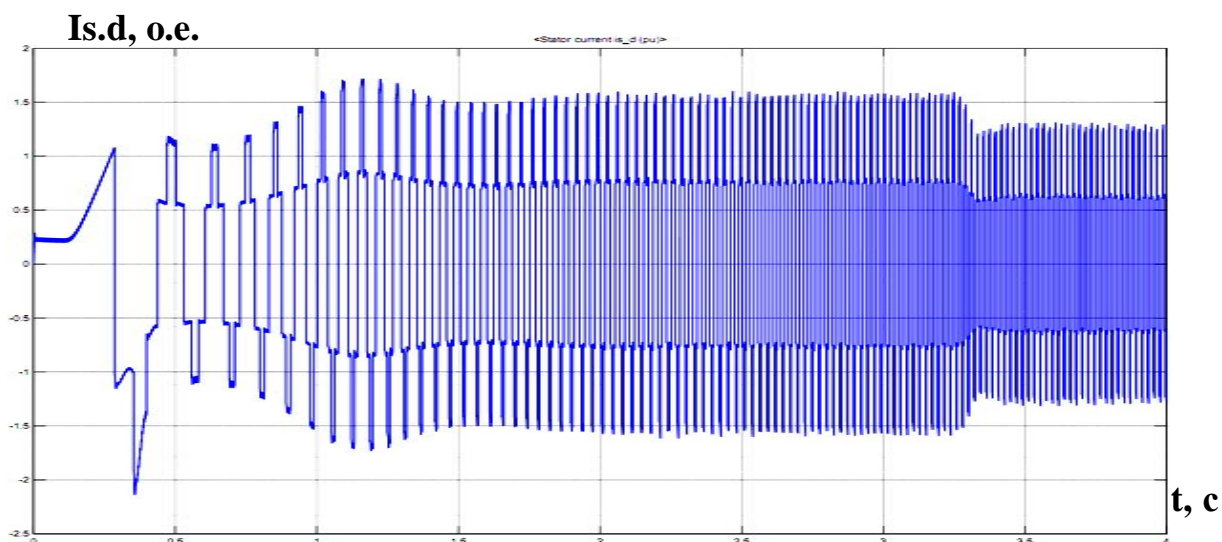


Рисунок 4.18. Графики тока статора СД по оси  $d$  при пуске

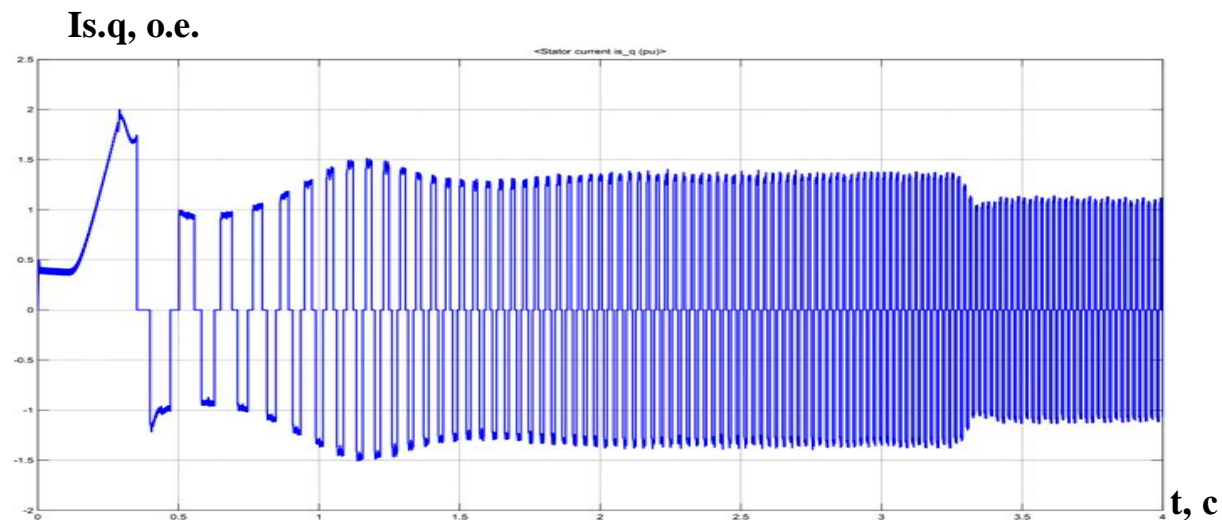


Рисунок 4.19. Графики тока статора СД по оси  $q$  при пуске

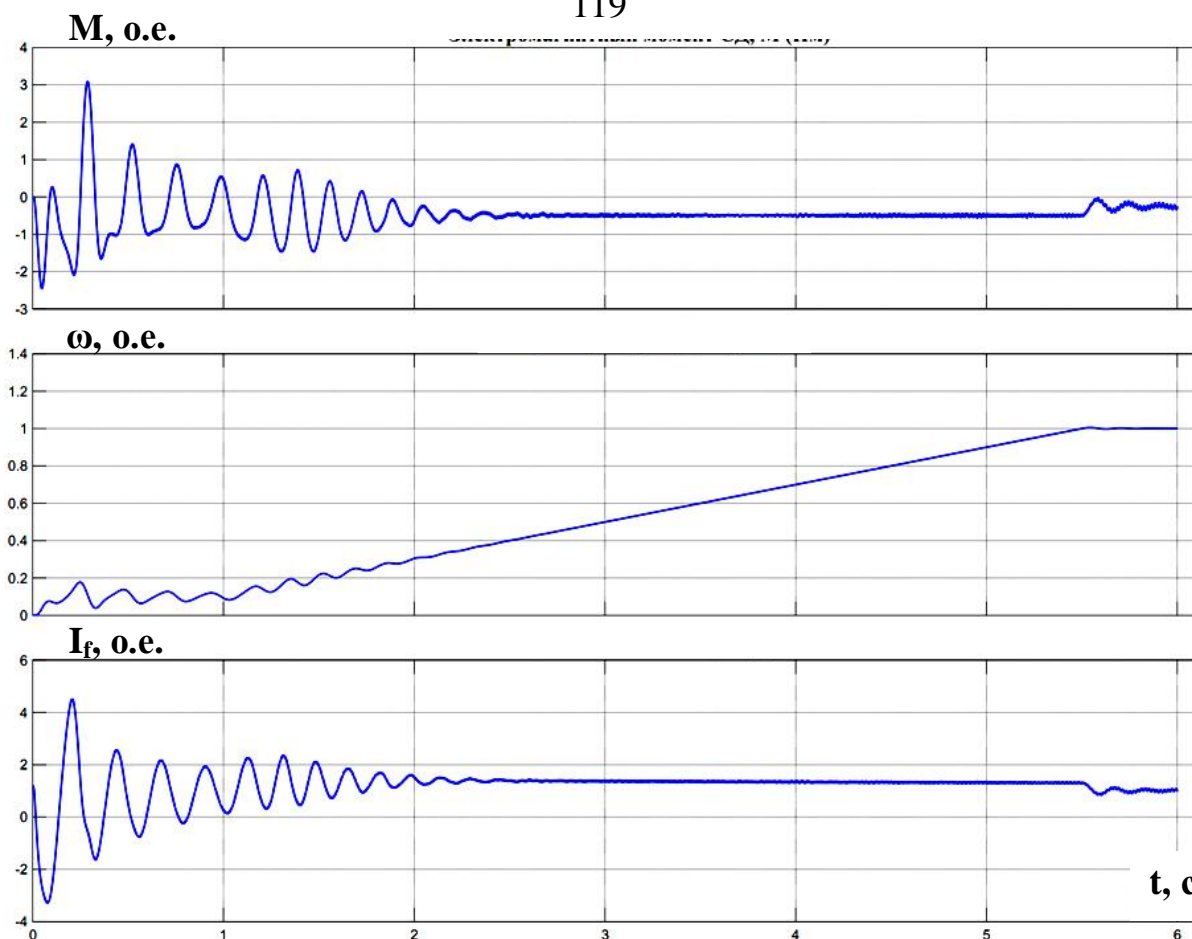


Рисунок 4.20. Пусковые переходные процессы момента  $M$ , скорости  $\omega$  и тока возбуждения  $I_f$  СД при пуске с ИТ

Графики пусковых токов СД с ИТ (рисунок 4.18 и 4.19) показывают хорошие значения пусковых токов ( $1,3-2I_{ном}$ ).

#### 4.4. Исследование переходных процессов системы электроснабжения оросительной насосной станции при пуске электродвигателя с инвертором тока

Используя расчетные данные, построим компьютерную модель системы электроснабжения ОНС АНС-1 с помощью программы MATLAB 2013. Разработанная модель системы электроснабжения приведена на рисунке 4.21 [18 – А, 27 – А, 28 – А]



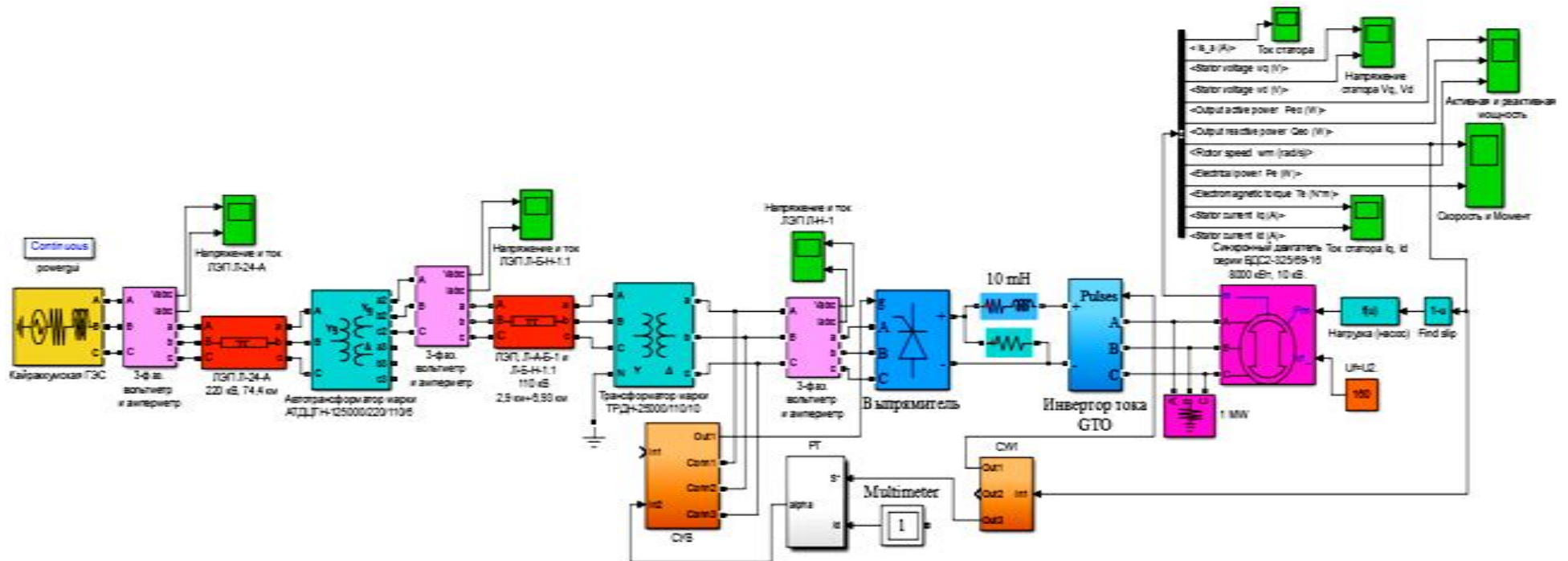


Рисунок 4.21. Компьютерная модель общей системы электроснабжения ОНС АНС-1 при запуске НА с ИТ



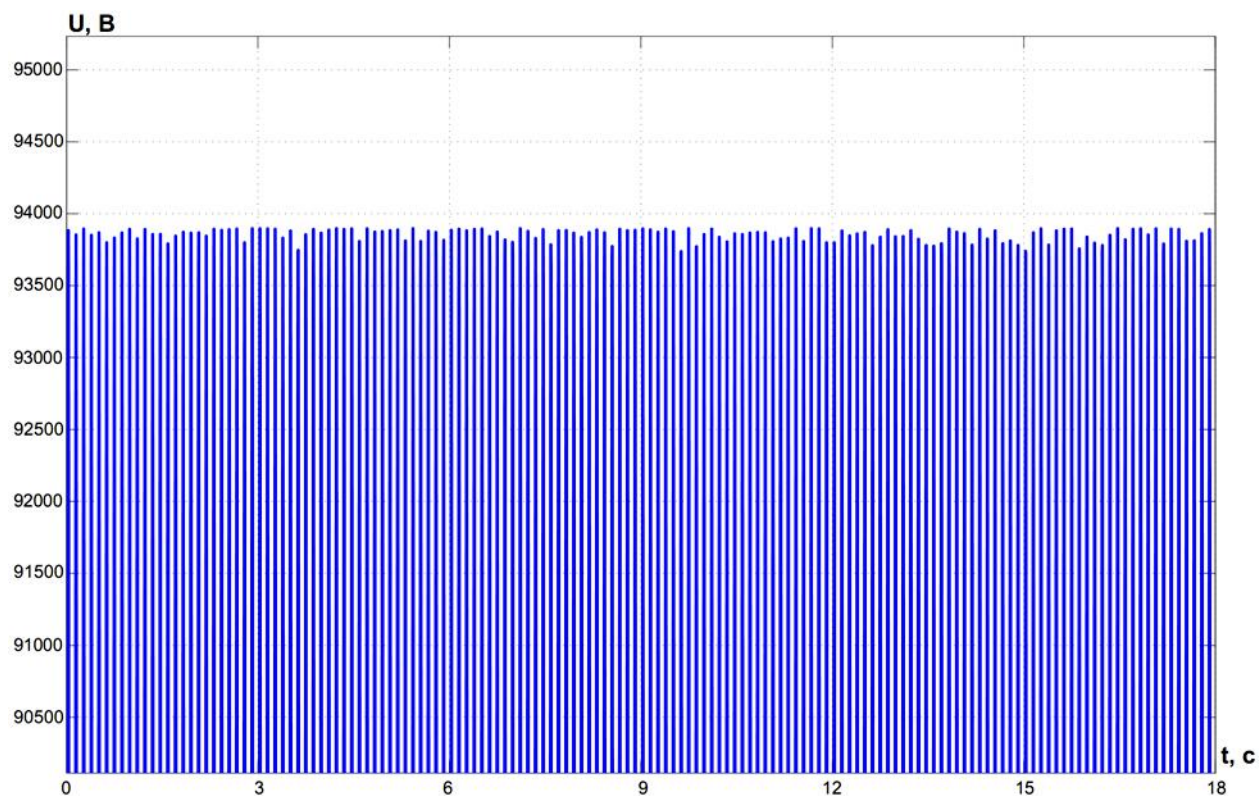


Рисунок 4.22. График изменения напряжения в ЛЭП 110 кВ при пуске СД с ИТ

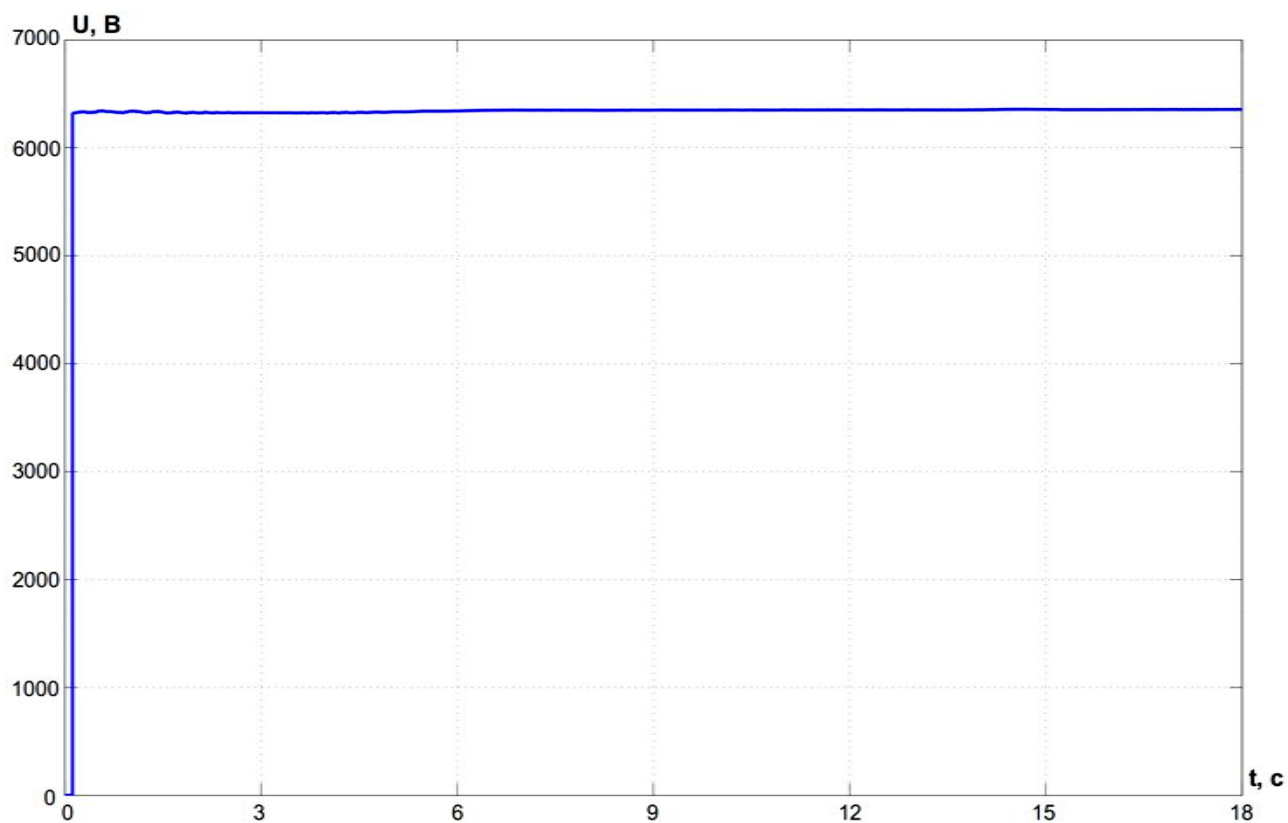


Рисунок 4.23. График изменения напряжения в ЛЭП 10 кВ при пуске СД с ИТ

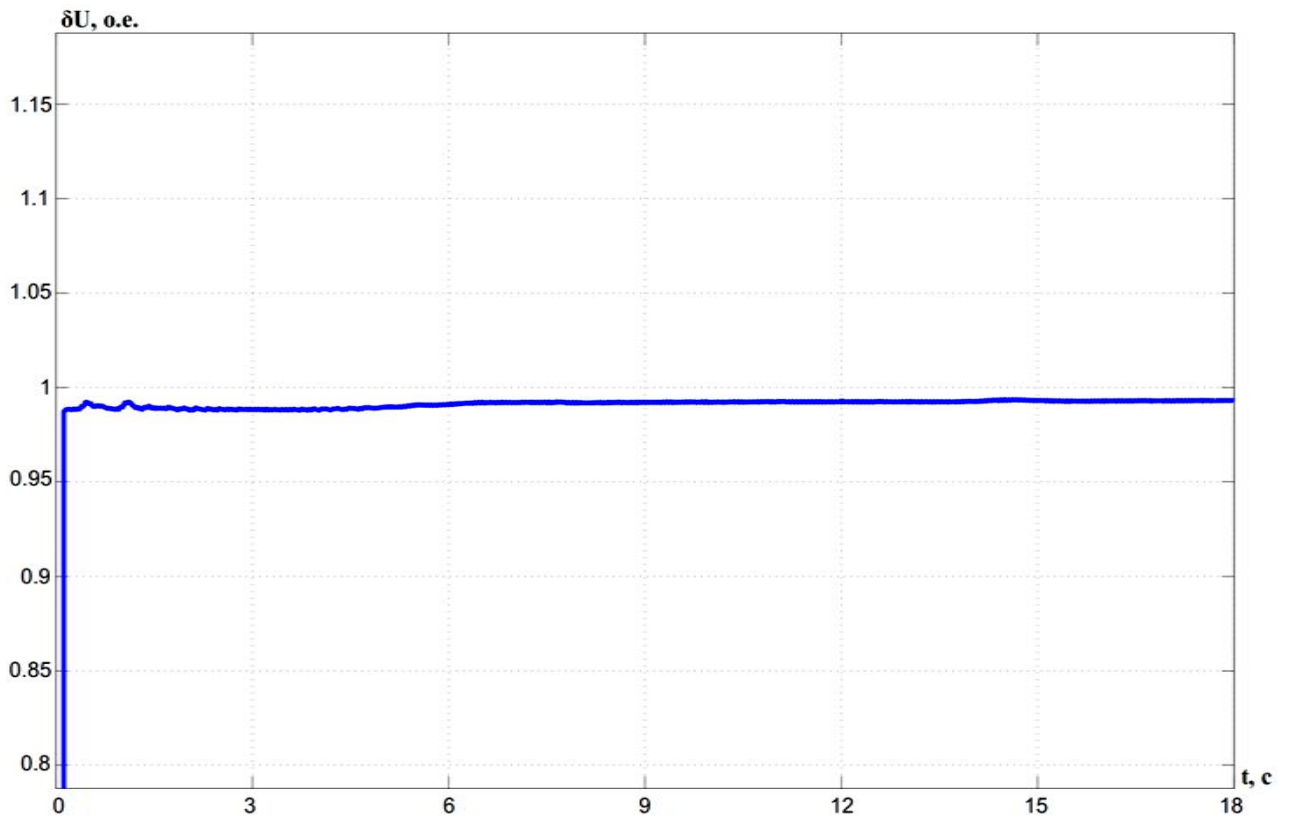


Рисунок 4.24. График провала напряжения в ЛЭП 10 кВ при пуске СД с ИТ, в о.е.

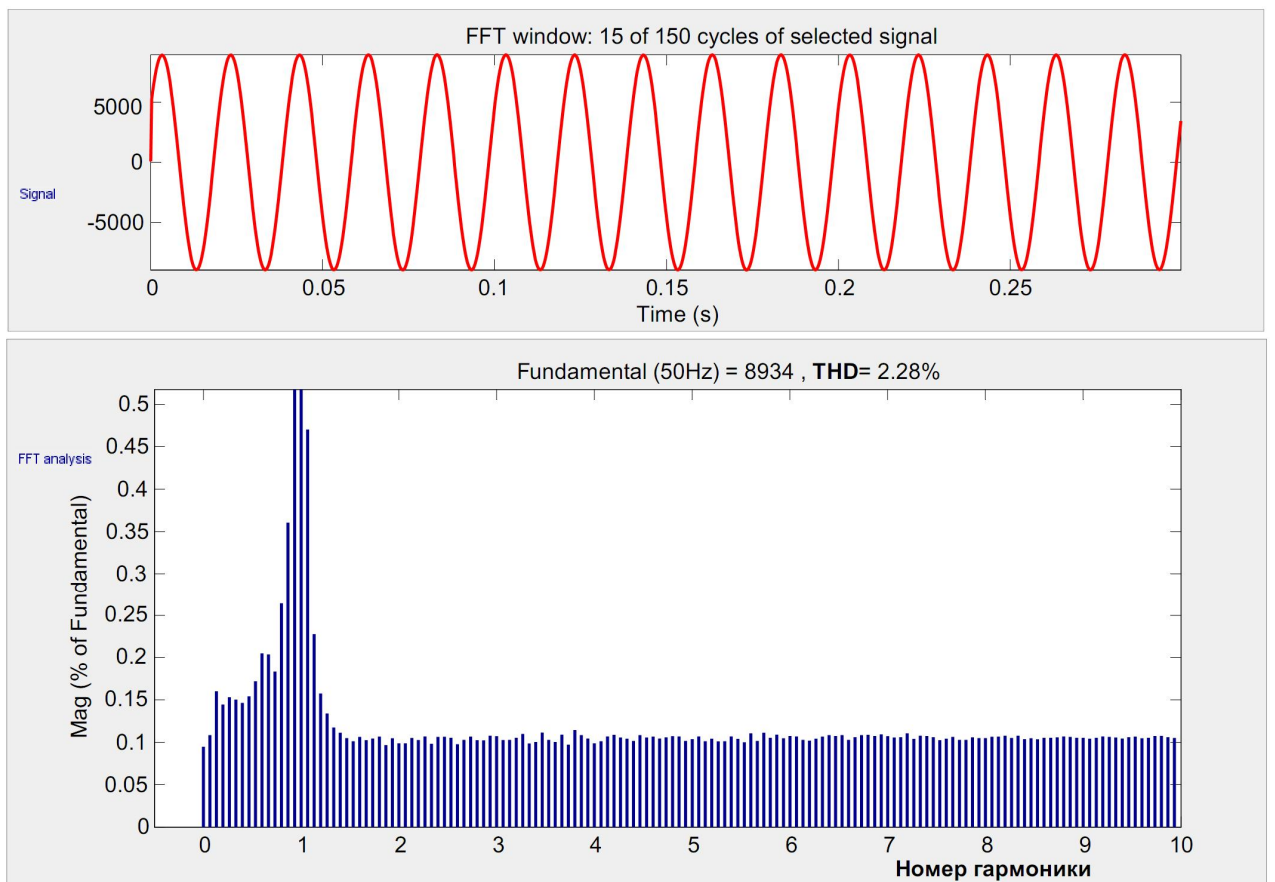


Рисунок 4.25. График напряжения и спектральный состав напряжения ЛЭП 10 кВ при пуске СД с ИТ

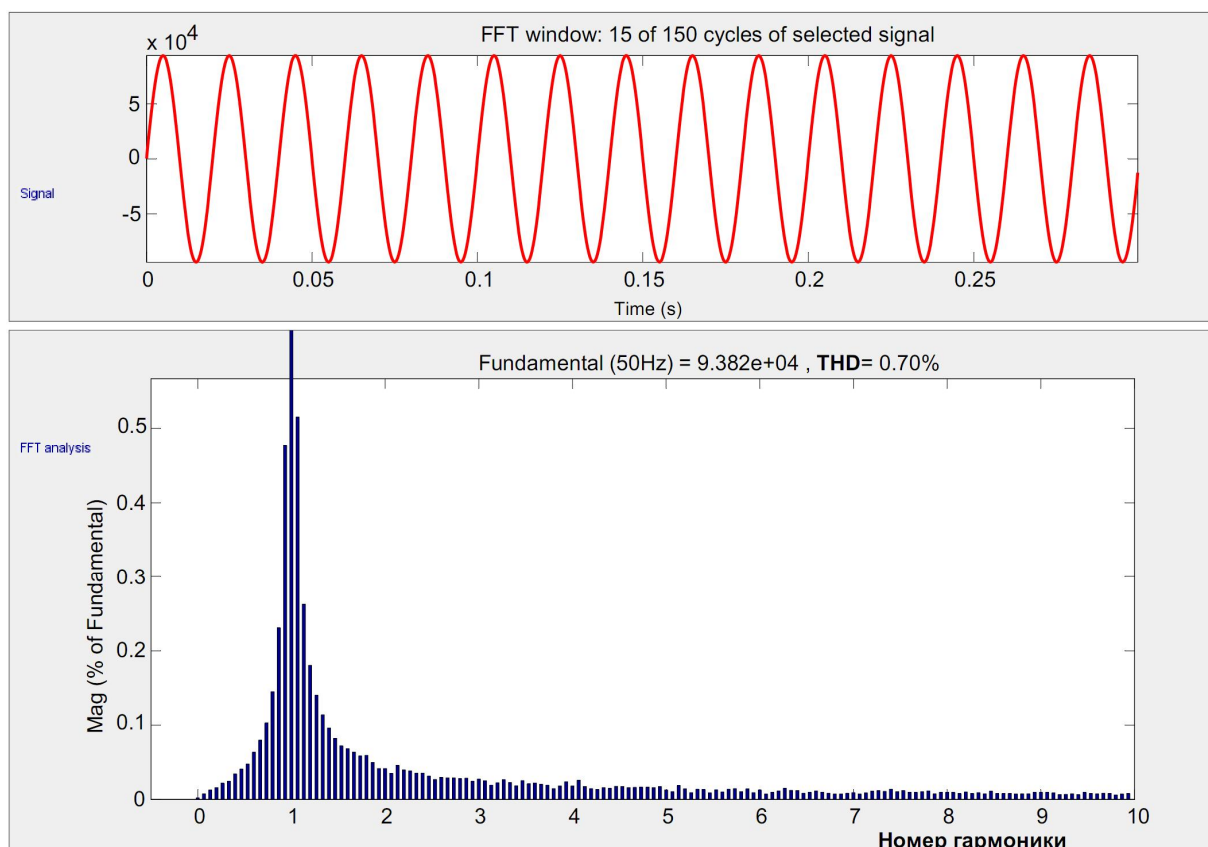


Рисунок 4.26. График напряжения и спектральный состав напряжения ЛЭП 110 кВ при пуске СД с ИТ

## 4.5. Компьютерное моделирование процесса нагрева обмоток электродвигателя насосных агрегатов и проводов линий электропередач

### 4.5.1. Моделирование нагрева обмоток электродвигателей насосных агрегатов при пусковых режимах работы

Одним из основных факторов, влияющих на технический ресурс ЭД, является нагрев обмоток. Во время запуска НА, кроме механических центробежных сил, возникают термодинамические силы, обусловленные нагревом обмоток ЭД. В связи с этим возникает необходимость в определении температуры обмоток ЭД при пусковых режимах (Приложение 3). При высокой температуре, резко ухудшаются механические свойства латуни и меди, из которых выполнены пусковые обмотки ВЭД [6 – А, 36 – А, 37 – А].

Время запуска НА обычно составляет 10-15 с, и за этот промежуток времени нагрев обмотки статора можно считать адиабатической. Это означает,

того что тепловая энергия не выделяется во внешнюю среду. Повышение температуры обмотки статора ЭД можно определить по формуле:

$$\Delta\vartheta = \frac{j_1^2 t}{160}, \quad (4.1)$$

где  $j_1$  – плотность тока в обмотке статора ЭД при пусковом режиме, А/мм<sup>2</sup>;

$t$  – время пускового режима ЭД, с.

Продолжительность пускового режима ЭД можно рассчитать по формуле

$$t = \frac{J \cdot 10^3}{9,55M_n} \sum_0^{n_n} \frac{\Delta n}{M_{\text{дв}} - M_c}, \quad (4.2)$$

где  $J$  – момент инерции двигателя, кг·м<sup>2</sup>;

$M_n$  – номинальный момент двигателя, Н·м;

$M_{\text{дв}}$  – фактический момент двигателя, Н·м;

$M_c$  – момент сопротивления на валу двигателя, Н·м.

Параметры двигателя при пуске, после останова или длительной работы определяются, в основном, нагревом обмотки статора. В случае, когда в номинальном режиме обмотка статора имеет некоторый тепловой запас по температуре, тогда допустимый дополнительный нагрев при пусковом режиме может составлять 25-30 °С.

Если пренебречь потерями мощности в статоре ЭД, то можно принять, что вся потребляемая из сети ЭЭ передается в ротор двигателя. Это энергия расходуется прежде всего на потери в роторе ЭД и на ускорение вращающихся масс. При запуске ЭД под нагрузкой, ЭЭ выделенная в виде потерь в роторе, является больше кинетической энергии и обратно пропорциональна избыточному моменту [6].

Выразив угловую скорость  $\omega$  через частоту вращения  $n$ , об/мин, получим превышение температуры

$$\Delta\vartheta = \frac{1,4Jn^2}{10^5(1-\alpha)G_{\text{кл}}}, \quad (4.3)$$

где  $\alpha = M_c / M_{\text{дв}}$ ;

$G_{кл}$  – масса клетки, кг.

Формула (4.3) предназначена для определения превышение температуры демпферной обмотки ЭД.

Повышение температуры стержней можно определить по формуле

$$\Delta \vartheta_{cm} = \frac{1,4 J n^2}{10^5 (1 - \alpha) G_{кл}} \cdot \frac{r_{cm}}{r_{обм}}, \quad (4.4)$$

где  $r_{cm}$  – активное сопротивление стержней СД, Ом;

$r_{об}$  – активное сопротивление обмоток СД, Ом.

Сопротивление стержней значительно больше сопротивления колец, поэтому нагрев стержней обычно в 2-3 раза выше нагрева колец. Нагрев пусковой обмотки двигателя НА при пуске обычно в среднем составляет 120-200 °С, при этом предельно допустимый средний нагрев - 300 °С.

Для моделирования нагрева обмоток СД выражение количества теплоты  $Q$  преобразуем в уравнение

$$W = \int R_1 \cdot i^2 dt.$$

Общий вид модели для исследования нагрева обмоток СД при пуске показан на рисунке 4.27.

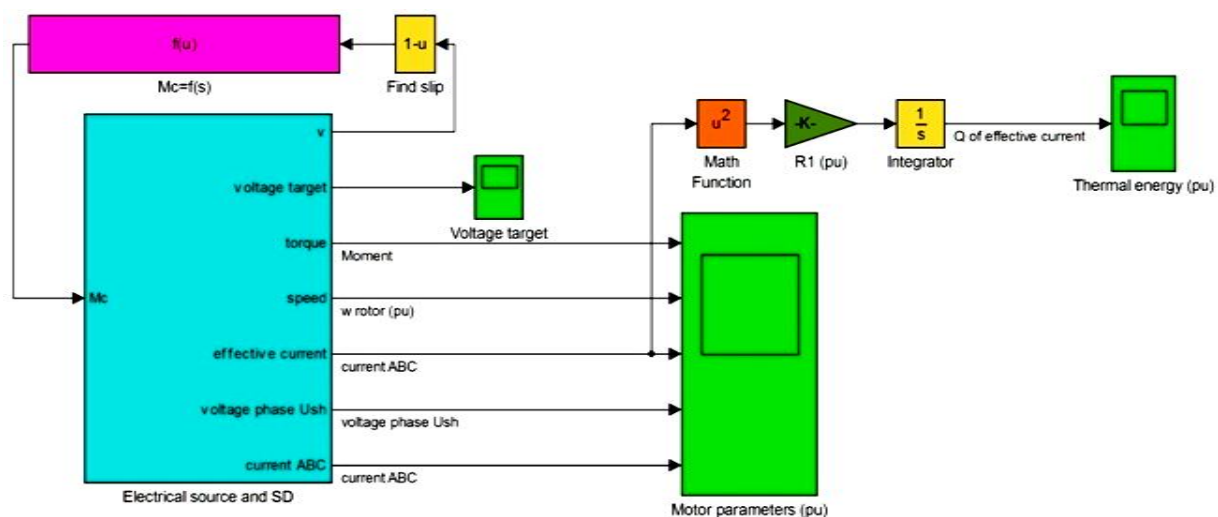


Рисунок 4.27. Модель для анализа нагрева ЭД

Результаты моделирования показаны на рисунке 4.28.

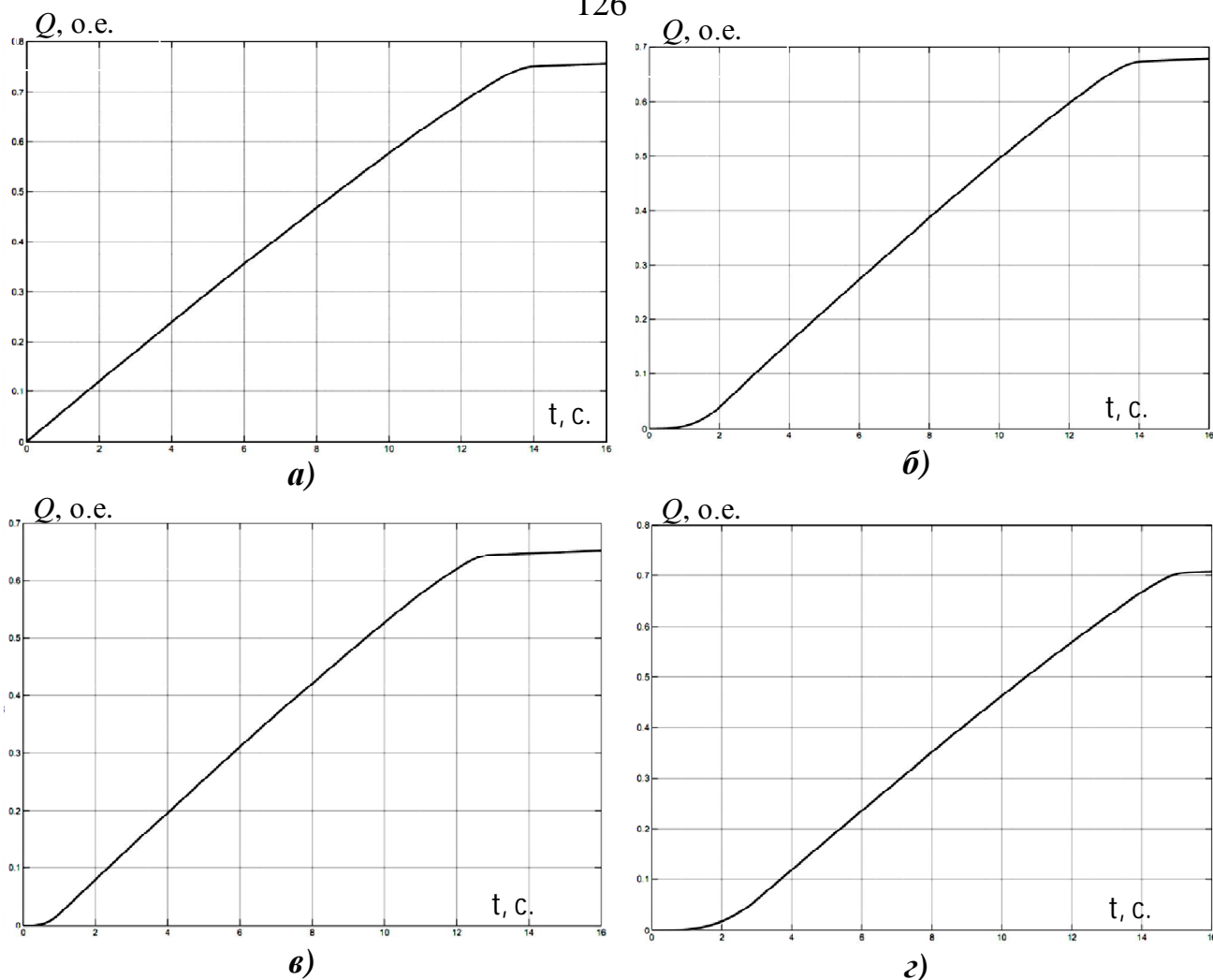


Рисунок 4.28. Графики выделения тепловой энергии в обмотке ЭД серии ВДС2-325:

- а) прямой пуск СД; б) плавный пуск СД, при нарастании  $U_{1н}$  от 0 до  $U_{ном}$  за 1 с;  
 б) плавный пуск, нарастании  $U_{1н}$  от 0 до  $U_{ном}$  за 2 с; в) плавный пуск, при нарастании  $U_{1н}$  от 0 до  $U_{ном}$  за 3 с.

В качестве значения сигнала тока принято действующее значение тока “effective current”. Полученные при моделировании графики тепловой энергии в функции времени (рисунок 4.28) показывают:

1) при прямом пуске количество теплоты имеет наибольшее значение (0,76 о.е.);

2) при плавном пуске ЭД, при увеличении напряжения обмотки статора от 0 до  $U_{ном}$  за 1 секунду, количество теплоты минимальное (0,66 о.е.);

3) при плавных пусках ЭД, при увеличении напряжения статора от 0 до  $U_{ном}$  за 2 и 3 секунды количество теплоты увеличивается (0,69 и 0,71 о.е.), что объясняется увеличением времени пуска при плавном пуске.

#### 4.5.2. Моделирование нагрева проводов линий электропередачи

Для моделирования нагрева проводов ЛЭП используем закон Джоуля-Ленца

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \Delta t, \quad (4.5)$$

где  $Q$  – количество теплоты, Дж;

$I$  – сила тока, А;

$\Delta t$  – время прохождения тока, с.

В результате применения данного закона в относительных единицах получены графики нагрева проводов ЛЭП (рисунок 4.29) при пусковых режимах СД в ОНС.

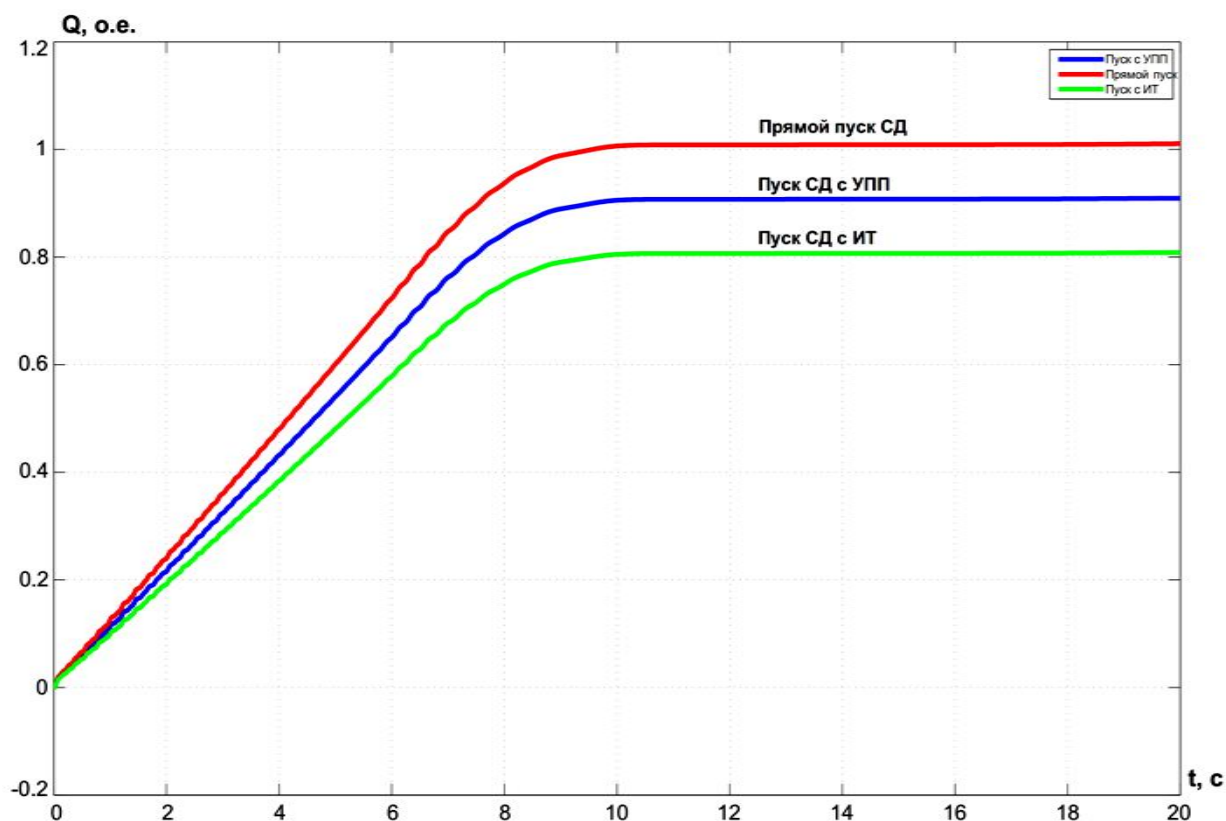


Рисунок 4.29. Графики нагрева проводов ЛЭП Л-Н-1 10 кВ

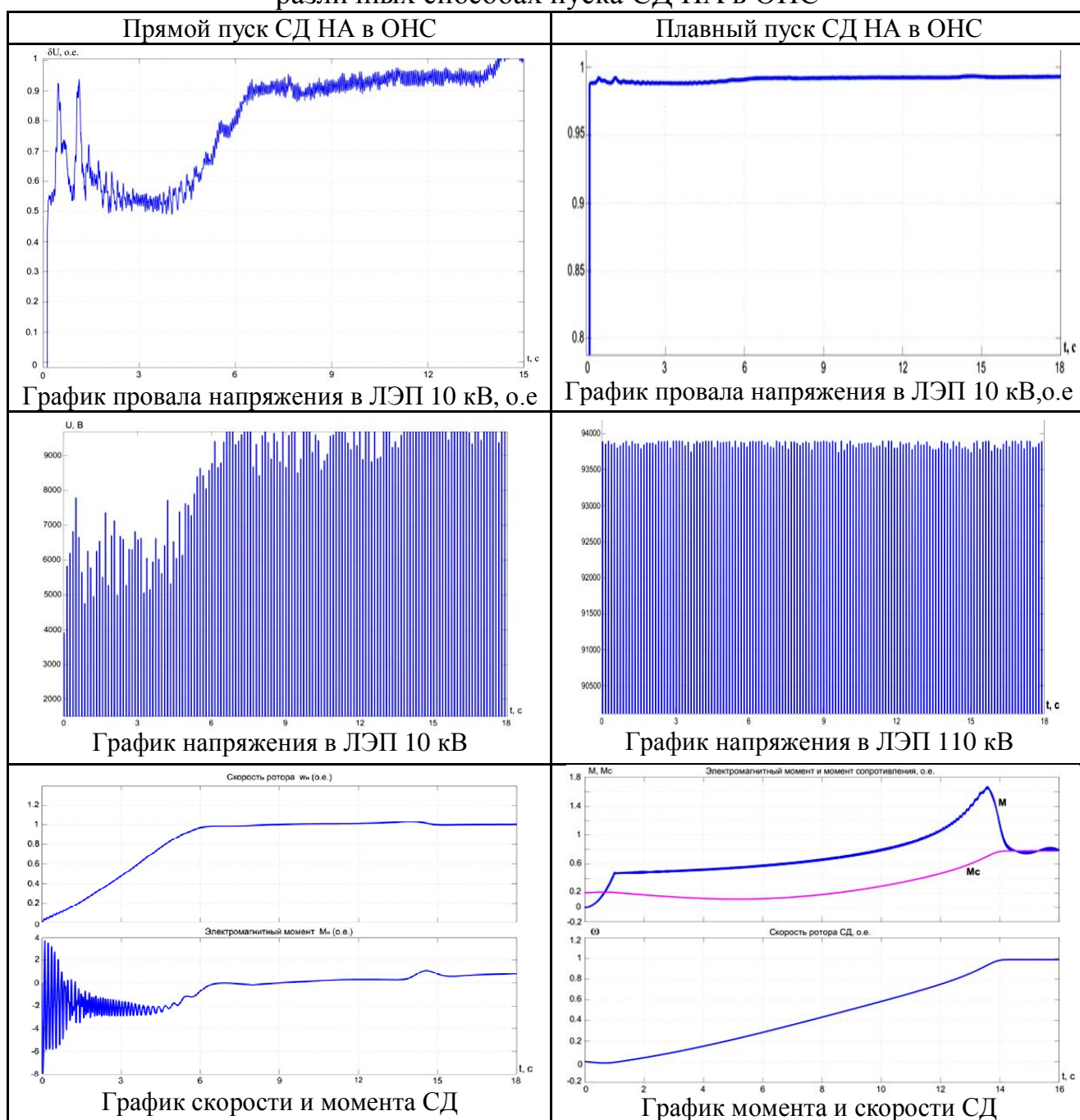
Т.к. количество теплоты, выделяемое в проводе пропорционально квадрату силы тока, - при плавных пусках СД нагрев проводов линии будет иметь меньшие значения.



#### 4.6. Сравнительный анализ результатов моделирования системы электроснабжения насосной станции при разных способах запуска насосов

Основные графики переходных процессов системы электроснабжения ОНС АНС-1, полученные при моделировании с учетом различных способов пуска СД, представлены в таблице 3.5.

Таблица 4.1 – Результаты моделирования системы электроснабжения при различных способах пуска СД НА в ОНС





Как показывают результаты моделирования (таблица 4.1), предложенный способ плавного пуска с помощью ИТ имеет ряд преимуществ по сравнению со способом прямого пуска СД. Основные преимущества пуска СД с ИТ:

- ограничение пускового тока СД (рисунок 4.18) до  $1,5I_n$ ;
- устранение знакопеременного изменения момента двигателя при пусковом режиме;
- минимизация провалов напряжения в ЛЭП и в системе электроснабжения ОНС.

Результаты моделирования показали:

- при прямом пуске СД ток ЭД НА имеет кратность  $(6-7)I_{ном}$ , а при плавном пуске -  $(1,5-2,5)I_{ном}$ ;
- при прямом пуске СД провал напряжения в системе электроснабжения ОНС составляет  $\delta U=50-55\%$ , что недопустимо по стандартам (ГОСТ 32144-2013);
- при плавном пуске СД уменьшение амплитуды напряжения в элементах систем электроснабжения ОНС, а именно, в ЛЭП 10 кВ составляет  $\delta U=2-3\%$ , что соответствует требованиям ГОСТ. При этом в ЛЭП 110 кВ это значение равно  $0,5-0,8\%$ ;
- спектральный анализ ЛЭП 10 кВ и 110 кВ (рисунки 4.25 и 4.26) при плавном пуске СД выявил уровень суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_U=2,28\%$  - для ЛЭП 10 кВ и  $K_U=0,7\%$  - для ЛЭП 110 кВ. Согласно ГОСТ 32144-2013 допустимым является значение  $K_U$  менее  $8\%$ ;
- при плавном пуске СД количество теплоты, выделяемое в обмотке двигателя минимальное -  $(0,66 \text{ о.е})$  (рисунок 4.28);
- при плавном пуске СД с ИТ количество теплоты, выделяемое в ЛЭП имеет меньшее значение, чем при прямом пуске и при пуске с УПП, -- на  $20\%$  и  $10\%$  соответственно (рисунок 4.29).

**Выводы по четвертой главе:**

1. Представлен анализ конструктивных особенностей и технических характеристик ИТ. Исследовано изменение основных параметров ЭП с ИТ при пусковых режимах.
2. Проведено моделирование ИТ в программе MATLAB/Simulink для различных типов ЭД и их режимов работы.
3. Разработаны модели для исследования параметров при пусковых режимах АД и СД НА с ИТ. Приведены результаты моделирования параметров ЭП, таких, как ток, скорость и момент при пуске с ИТ.
4. Разработаны модели для исследования и анализа нагрева обмоток ЭД при пусковых режимах работы. Приведены результаты исследований параметров двигателей при моделировании нагрева при прямом и плавном пусках с различными значениями изменения напряжения.
5. В ходе исследования нагрева обмоток ЭД при пусковых режимах работы выявлено, что наибольший нагрев наблюдается при прямом пуске двигателя.
6. При пуске СД с ИТ уменьшение амплитуды напряжения в системе электроснабжения ОНС, а именно в ЛЭП 10 кВ составляет  $\delta U=2-3\%$ , что соответствует требованиям ГОСТ.
7. Спектральный анализ ЛЭП 10 кВ и 110 кВ при пуске СД с ИТ показал уровень суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_U=2,28\%$  для ЛЭП 10 кВ и  $K_U=0,7\%$  для ЛЭП 110 кВ.
8. При пуске СД с ИТ количество выделяемой теплоты в ЛЭП имеет меньшее значение, чем при прямом пуске, на 10-20%.

## ГЛАВА 5. ПОВЫШЕНИЕ БЕСПЕРЕБОЙНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ ПРИ ПУСКОВЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

### 5.1. Схема замещения сетевого трансформатора и питающей энергосистемы

Схемы замещения часто используют для проведения расчетов и определения параметров электрических машин или других элементов энергосистемы, которые невозможно определить по их паспортным данным. В практике часто используют Г-образную схему замещения, но для проведения детальных и подробных расчетов необходимо использовать Т-образную схему замещения. Основными компонентами системы электроснабжения НС является силовой трансформатор, ЭД и питающая система. Как известно, схема замещения силового трансформатора учитывается в расчетах разомкнутой ветвью намагничивания. Поэтому суммарные активные и индуктивные сопротивления обмоток трансформатора обозначаются последовательно соединенными и приводятся к низшему напряжению трансформатора. При этом величина постоянной времени затухания свободного тока [40, 73]:

$$T = T'' = \frac{x_T}{\omega R_T}, \quad (5.1)$$

где  $x_T$  – индуктивное сопротивление трансформатора, Ом;

$R_T$  – активное сопротивление трансформатора, Ом.

Приведенное выражение можно применить для расчета параметров трансформатора с погрешностью 5% [74].

Для упрощения расчетов необходимо ввести некоторые допущения. В последующих расчетах внешняя питающая система будет приниматься как высоковольтный источник бесконечно большой мощности. А также схема замещения питающей системы вводится без учета активного сопротивления

сети. В пусковых режимах ЭД целесообразно использовать полные дифференциальные уравнения машин и проводить расчеты с учетом свободной составляющей тока.

С учетом принятых допущений используем схему замещения ЭД с последовательно включенными в ветвь статора сопротивлениями системы и трансформатора, которая приведена на рисунке 5.1 [40, 74].

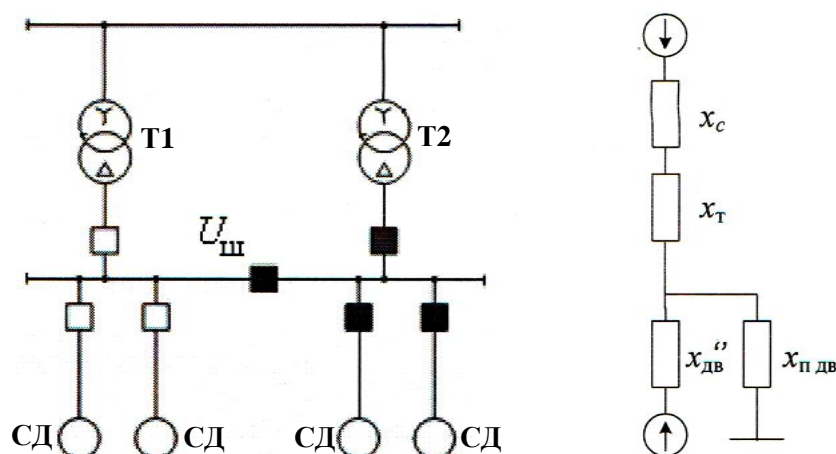


Рисунок 5.1. Типовая схема ЭС НС с ЭД: а – принципиальная схема; б – расчетная схема замещения.

Используя Т-образную схему замещения АД с учетом питающей энергосистемы и трансформатора, получим общую схему замещения системы, которая приведена на рисунке 5.2 [23 – А, 40].

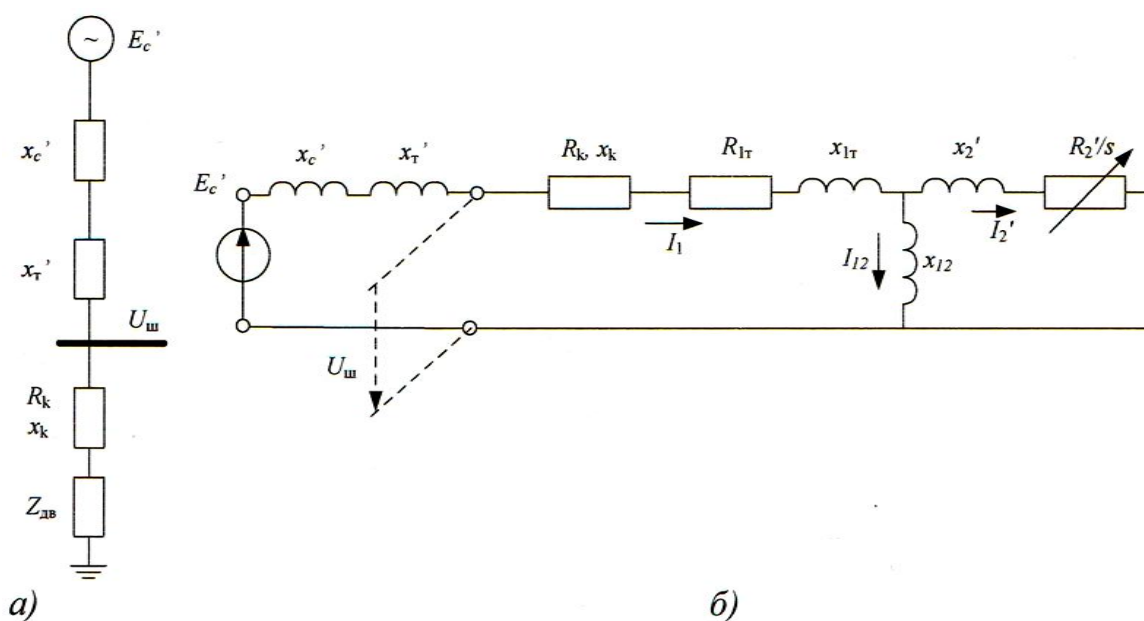


Рисунок 5.2. Схема замещения системы «сеть – трансформатор - АД»: а) однолинейная схема; б) схема замещения.

В схеме (рисунок 5.2) обозначены параметры цепи:  $E'_c$  – ЭДС и напряжение шин  $U_{ш}$ . Параметры обмоток ЭД включают полное сопротивление  $Z_{дв}$  и токи  $I_1, I'_2, I_{12}$ , активные и индуктивные сопротивления обмоток ЭД, как  $R_{1Г}, x_{1Г}, R'_2, x'_2$ .

С учетом принятых допущений, расчет сопротивления трансформатора и сопротивления питающей энергосистемы можно выполнить следующим образом:

$$x_c = \frac{U_c}{\sqrt{3}I_k^{(3)}} \left( \frac{U_{ш}}{U_c} \right)^2,$$

или

$$x_c = \frac{U_c^2}{S_k^{(3)}} \left( \frac{U_{ш}}{U_c} \right)^2, \quad (5.2)$$

где  $S_k^{(3)}$  – мощность трехфазного короткого замыкания (КЗ);

$I_k^{(3)}$  – ток трехфазного КЗ на стороне высокого напряжения;

$U_c$  – линейное напряжение питающей сети;

$U_{ш}$  – напряжение на шинах, т.е. напряжение вторичной обмотки трансформатора.

Индуктивное сопротивление силового трансформатора можно определить

$$x_T = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{U_{ш}^2}{S_T}. \quad (5.3)$$

Если двигатель подключается к шинам источника питания с помощью реакторов или других элементов, то в этом случае необходимо ввести в схему замещения их сопротивления. Например, сопротивление реактора можно вычислить таким образом

$$x_p = \frac{x_p \%}{100} \cdot \frac{U_{р.ном}}{\sqrt{3}I_{р.ном}} \left( \frac{U_{ш}}{U_{р.ном}} \right)^2, \quad (5.4)$$

где  $x_p \%$  – номинальное индуктивное сопротивление реактора,

$U_{р.ном}$  – рабочее напряжение реактора,

$I_{p.ном}$  – номинальный рабочий ток.

Полученная схема замещения и приведенные выражения определения параметров системы могут использоваться для дальнейших расчетов и исследований механических характеристик ЭД и расчетов провалов напряжения на шинах источников питания.

## **5.2. Расчет параметров механических характеристик электродвигателей при остаточном напряжении на шинах источников питания**

Основными характеристиками ЭД, по которым можно оценить их главные технические параметры, являются механические и электромеханические характеристики (ЭМХ) [75, 76]. Механические характеристики (МХ) показывают зависимости момента и скорости ЭД, а электромеханические - зависимости тока и скорости. Данные характеристики бывают естественными и искусственными. Второй тип характеристик ЭД можно получить при изменении напряжения, подаваемого к обмоткам статора ЭД. Для асинхронных и синхронных машин важное значение имеет скольжение и пусковой электромагнитный момент создаваемой ротором. По их значениям можно определить возможность пуска ЭД при остаточном напряжении [5 – А]. Более сложные процессы встречаются в пусковых режимах СД. Ввиду отличительных особенностей в характеристиках ЭД, возникает необходимость рассматривать их пусковые характеристики отдельно [15 – А, 18 - А].

### **5.2.1. Асинхронный электропривод**

Рассмотрим расчет параметров МХ и пусковых режимов АД. Относительно простая конструкция таких двигателей позволяет использовать для расчетов Г-образную схему замещения (рисунок 5.3) [40, 76].

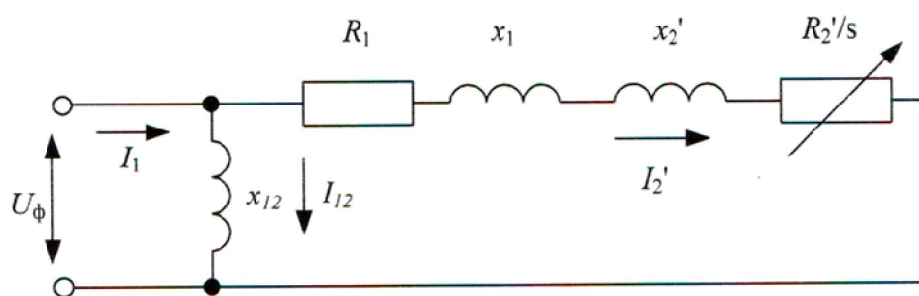


Рисунок 5.3. Г-образная схема замещения АД

Обозначения параметров схемы (рисунок 5.3) аналогичны параметрам схемы рисунка 5.2. Для предложенной схемы (рисунок 5.3) ток ротора АД определяется

$$I_2' = \frac{U_\phi}{\sqrt{(x_1 + x_2')^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2}}, \quad (5.5)$$

где  $U_\phi$  – фазное напряжение, подводимое к обмотке статора двигателя.

Для получения уравнения МХ АД необходимы выражения для определения потерь мощности в роторной цепи и скольжения двигателя

$$\Delta P_s = 3I_2'^2 R_2' = M\omega_c s, \quad (5.6)$$

$$s = \frac{\omega_c - \omega}{\omega_c}, \quad (5.7)$$

где  $\omega_c$  – синхронная скорость вращения АД;

$\omega$  – фактическая скорость вращения АД.

Полученное уравнение МХ АД будет иметь вид

$$M = \frac{3U_\phi^2 R_2'}{\omega_c s \left[ (x_1 + x_2')^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 \right]}. \quad (5.8)$$

Уравнение для определения критического момента АД

$$M_{кр} = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_c \left[ R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]}. \quad (5.9)$$

Формула критического скольжения АД с учетом вышеприведенных выражений

$$s_{кр} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}}. \quad (5.10)$$

В дальнейшем для расчета параметров и построения МХ необходимо применить формулы пусковых токов ротора и пускового момента АД. С этой целью используя уравнение (5.8), а также принимая скольжение двигателя  $s = 1$ , получим следующие выражения

$$I'_{н2} = \frac{U_\phi}{\sqrt{(x_1 + x'_2)^2 + (R_1 + R'_2)^2}}, \quad (5.11)$$

$$M_{н} = \frac{3U_\phi^2 R'_2}{\omega_c [(x_1 + x'_2)^2 + (R_1 + R'_2)^2]}, \quad (5.12)$$

где  $I'_{н2}$  – пусковой ток ротора двигателя;  $M_{н}$  – пусковой момент двигателя.

Для АД требуется учет эффекта вытеснения тока в роторе. Этот эффект в номинальном режиме двигателей и режимах с малыми скольжениями имеет очень малое воздействие, так как в этом случае ток распределяется равномерно по обеим обмоткам пропорционально их активному сопротивлению [76]. Однако, при увеличении скольжения в АД с короткозамкнутым ротором происходит увеличение действия эффекта вытеснения тока. Эффект вытеснения тока вызывает изменения сопротивлений обмотки ротора и может, в ряде случаев, использоваться для повышения пускового момента АД с короткозамкнутым ротором. В этом случае ток распределяется неравномерно по поперечному сечению стержней обмотки ротора и наблюдается уменьшение плотности тока в нижней части, но с увеличенным током в верхней части стержней обмотки ротора. Поэтому учет эффекта вытеснения тока является обязательным для построения характеристик АД.

Учет эффекта вытеснения тока в роторе производится по следующим выражениям [40, 76]

$$R'_2(s) = (R'_{2к} - R'_2)s^\xi + R'_2, \quad (5.13)$$

$$x'_2(s) = (x'_{2к} - x'_2)s^\xi + x'_2, \quad (5.14)$$



где  $R_{2\kappa}$  – активное сопротивление ротора при КЗ, т.е. при неподвижном роторе ( $s=1$ );  $x'_{2\kappa}$  – индуктивное сопротивление ротора при КЗ, т.е. при неподвижном роторе ( $s=1$ );  $\xi$  – показатель, значение которого принимают 0,5-0,7.

При известных значениях остаточного напряжения строится МХ АД при разных уровнях напряжения питания (рисунок 5.4 и 5.5) [24 – А].

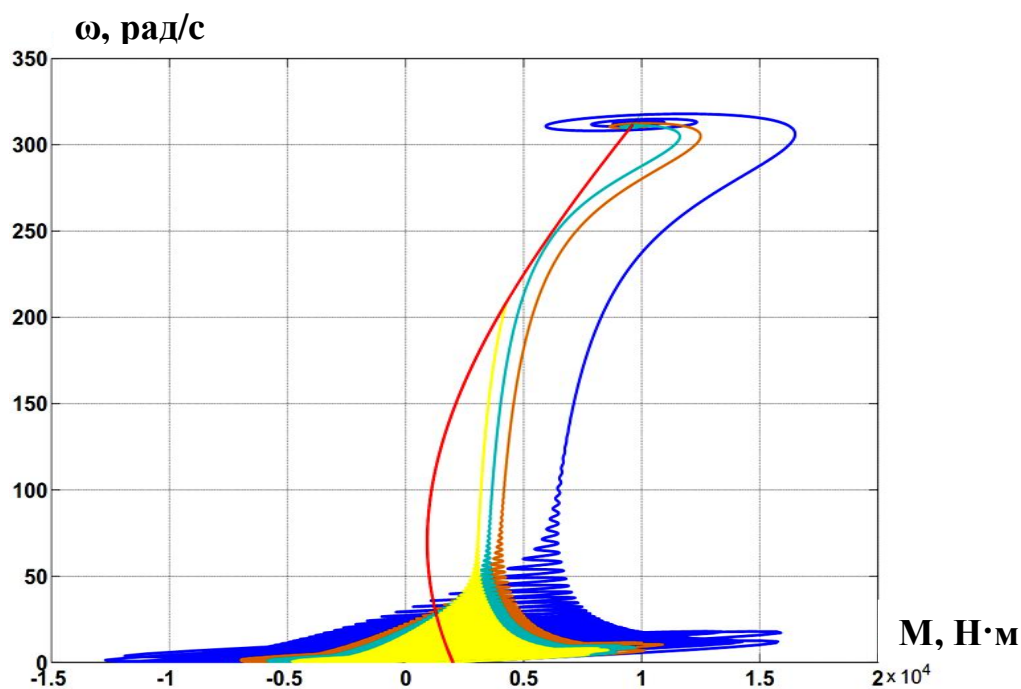


Рисунок 5.4. Семейство характеристик АД при провалах напряжения: 0%, 20%, 25% и 30%

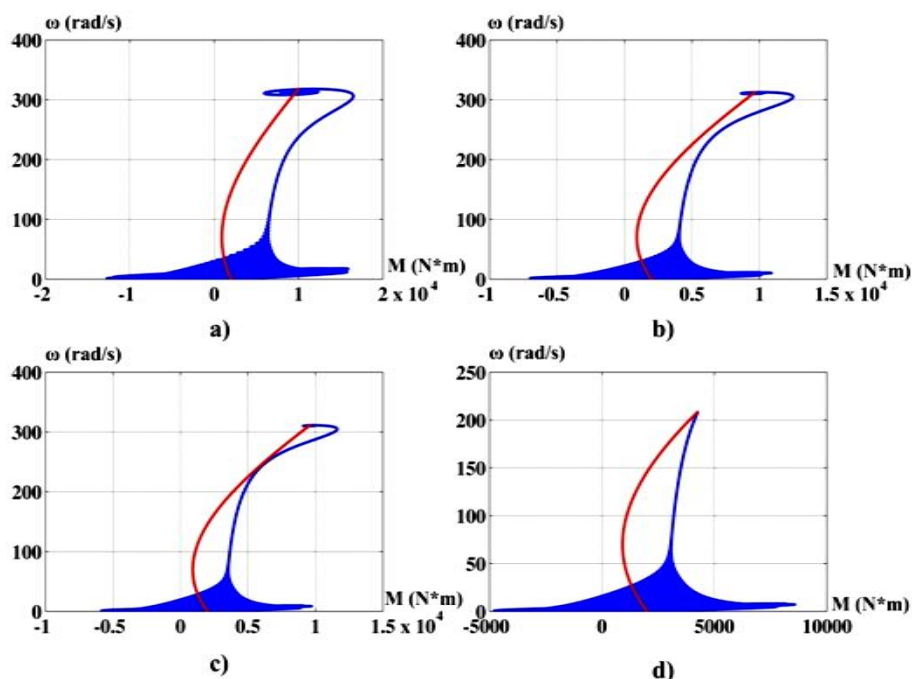


Рисунок 5.5. Механические характеристики АД при различных значениях остаточного напряжения на шинах источника питания: а) 100%, б) 80%, в) 75%, д) 70%

Для построения МХ используем в качестве примера АД напряжением 10 кВ, с током статора 350 А и синхронной скоростью вращения 3000 об/мин. Представленные характеристики показывают, что с уменьшением остаточного напряжения на шинах источника питания, уменьшается запас по динамическому моменту при пуске, что приводит к нагреву и затягиванию продолжительности пуска АД. Критическое состояние пускового режима результатам исследования наблюдается при остаточном напряжении менее 75%, а при 70% - АД не запустится.

### 5.2.2. Синхронный электропривод

Для построения МХ рассматриваем СД вертикального исполнения серии ВДС2-325/69-16 и номинальной мощностью 8 МВт, напряжением статора 10 кВ и током статора 540 А. Для построения исследуем пусковую характеристику  $M=f(s)$ ,  $I_1=f(s)$  и характеристику нагрузки  $M_c=f(s)$ .

Для расчета и построения МХ выбранного СД с учетом остаточного напряжения на шинах источника питания используются следующие соотношения и выражения

$$\frac{M_1}{M_2} = \left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2, \quad (5.15)$$

$$I^{*i} = \frac{U_{ост}^*}{U_{ном}} I_{ест}^{*i}, \quad (5.16)$$

$$M^{*i} = \left( \frac{U_{ост}^*}{U_{ном}} \right)^2 M_{ест}^{*i}. \quad (5.17)$$

где  $U_{ост}$  – остаточное напряжение на шинах источника питания, В;

$I_{ест}$  – ток при естественной механической характеристике, А.

$M_{ест}$  – момент при естественной механической характеристике, Н·м.

В результате получено семейство МХ СД серии ВДС2-325/69-16 при различных значениях остаточного напряжения на шинах источника питания (рисунок 5.6 и 5.7).

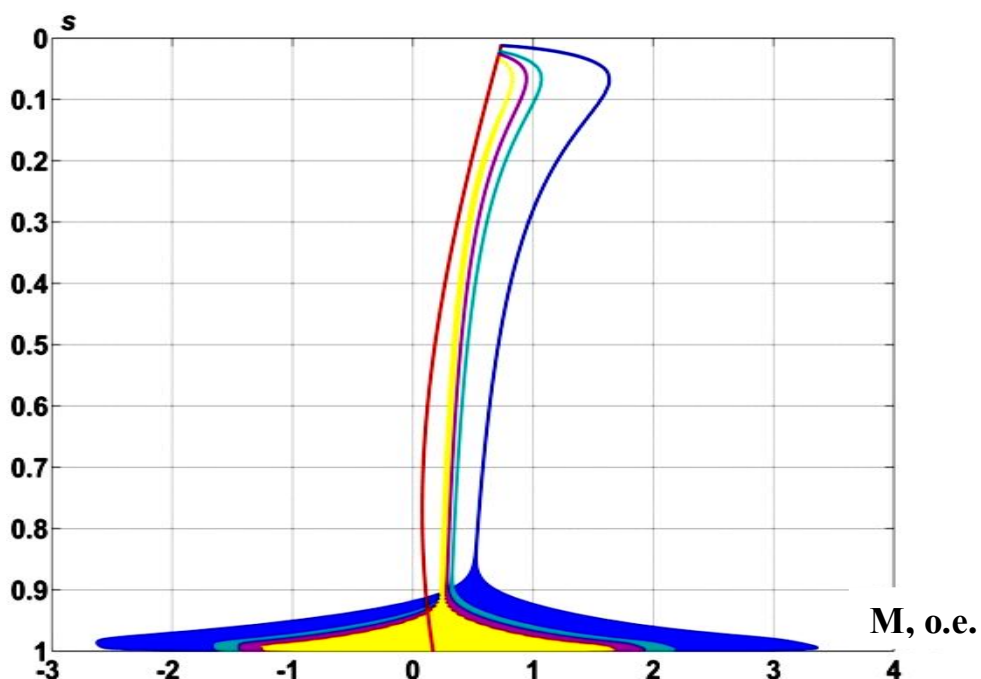


Рисунок 5.6. Характеристики СД серии ВДС2-325/69-16 для различных значений остаточного напряжения на шинах источника питания: 100%, 80%, 75% и 70%

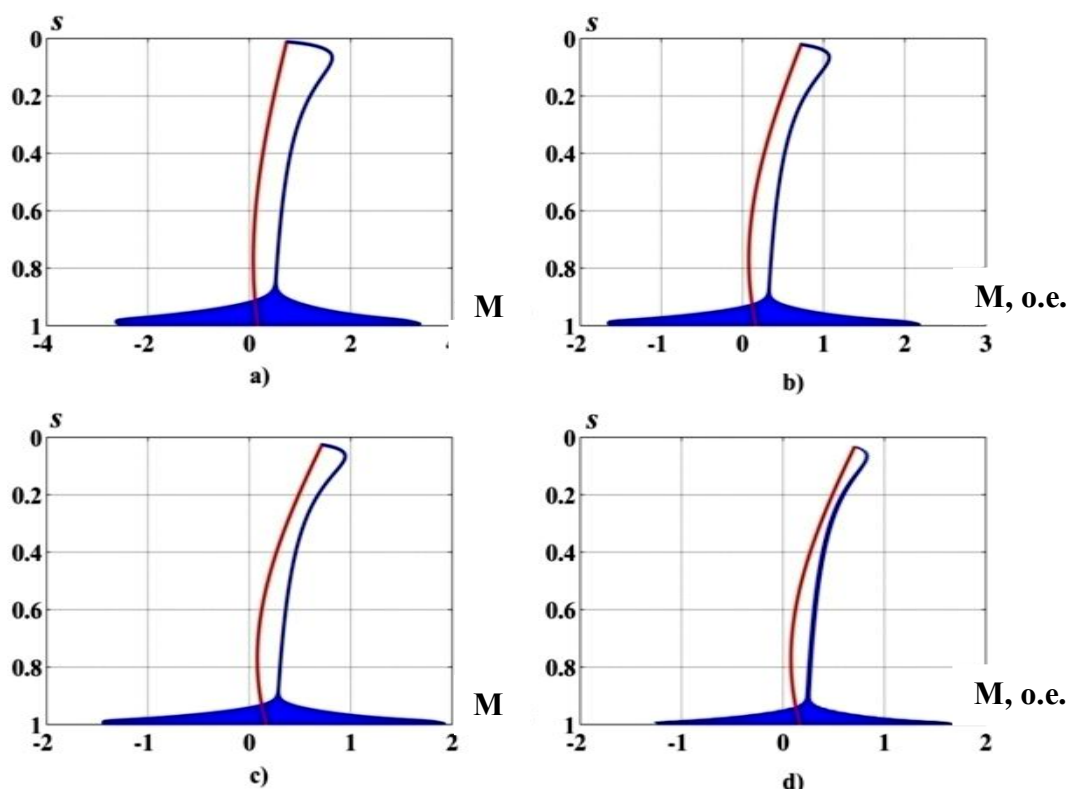


Рисунок 5.7. Пусковые характеристики СД серии ВДС2-325/69-16 для различных значений остаточного напряжения: 100%, 80%, 75% и 70%

Электромеханическая характеристика СД показан на рисунке 5.8.

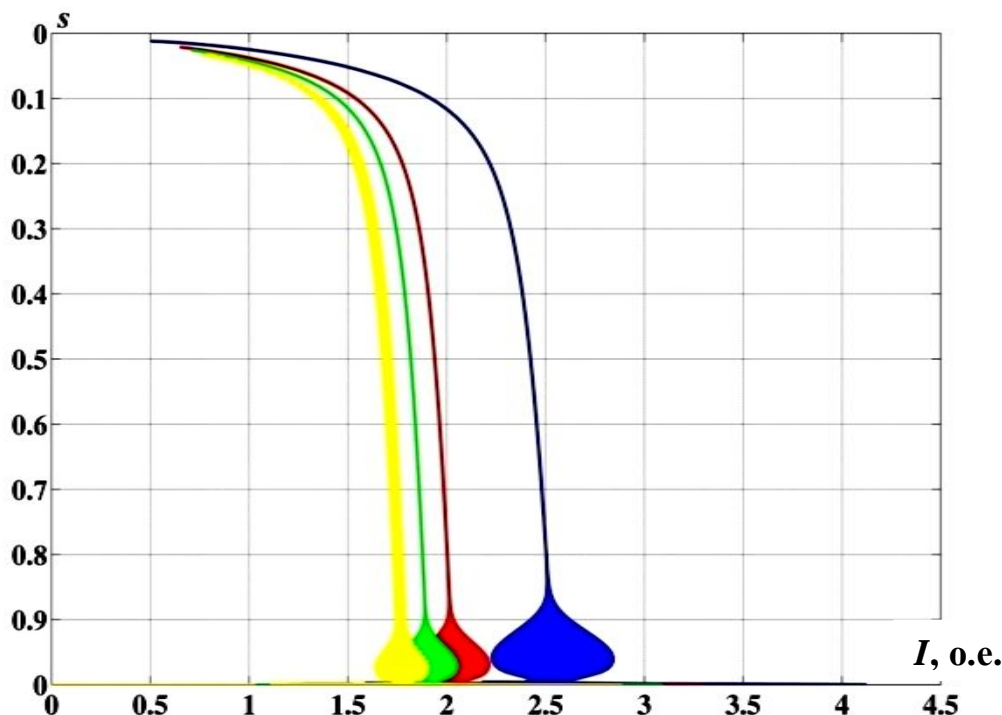


Рисунок 5.8. Пусковые ЭМХ СД серии ВДС2-325/69-16 для различных значений остаточного напряжения на шинах источника питания: 100%, 80%, 75% и 70%

Полученные результаты показали, что при глубине провала напряжения свыше 20%, двигатель имеет недостаточный запас по динамическому моменту и выход на подсинхронную скорость затягивается, или вообще не обеспечивается. А также при таких значениях остаточного напряжения, т.е. при  $U_{ост} = 75\% \div 70\%$ , время пуска ЭД увеличивается в 2,3 и 3,3 раза соответственно. Это обстоятельство приводит к срабатыванию ряда защит в автоматике ЭП, таких, как защита от затянувшегося пуска СД или защита от перегрузки.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о негативных последствиях глубоких провалов напряжения при пусковых режимах АД и СД, используемых на НС. Однако полученные результаты не дают полную картину зависимостей от провалов напряжения других параметров электрической системы. Поэтому необходимо более детально провести расчет провалов напряжения на шинах и исследовать зависимости других параметров ЭП и системы электроснабжения. При этом возможными расчетами по определению

глубины провала напряжения при прямом пуске асинхронных и синхронных машин будут расчеты в зависимости:

- от мощности питающего трансформатора;
- от мощности питающего трансформатора для различных  $U_k(\%)$  трансформатора;
- от мощности питающего трансформатора при различных кратностях пускового тока двигателя.

### 5.3. Исследование провалов напряжения при пуске асинхронных и синхронных электродвигателей

Как уже отмечалось выше, учет провалов напряжения при пусковых режимах ЭД имеет большое значение, так как от этого параметра зависит надежность самого ЭП НС и системы электроснабжения в целом. Т.к. на НС используются асинхронные и синхронные ЭП, а принципы их работы, в значительной мере, отличаются друг от друга, целесообразно проводить расчеты провалов напряжения для каждого вида ЭП отдельно.

#### 5.3.1. Асинхронный электропривод

Для упрощения расчетов используем схему замещения системы, которая приведена на рисунке 5.9.

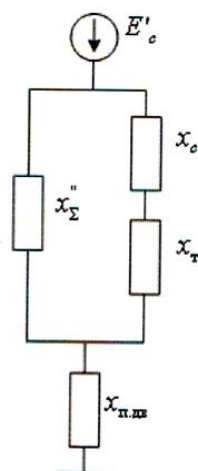


Рисунок 5.9. Схема замещения системы «сеть-трансформатор-двигатель»

Пусковое сопротивление АД

$$x_{n.\partial\partial} = \frac{1}{k_{nm}} \cdot \frac{U_{\partial\partial.n}^2}{S_{\partial\partial.n}} \left( \frac{U_{ш}}{U_{\partial\partial.n}} \right)^2, \quad (5.18)$$

где  $k_{nm}$  – кратность пускового тока АД;

$U_{\partial\partial.n}$  – номинальное напряжение АД, В;

$S_{\partial\partial.n}$  – полная номинальная мощность двигателя, ВА.

Формула пускового тока АД с учетом суммарного сопротивления элементов сети

$$I_n = \frac{U_{ш}}{\sqrt{3}(x_c + x_m + x_{n.\partial\partial})}. \quad (5.19)$$

где  $U_{ш}$  – напряжение на шинах, В;  $x_c$ ,  $x_m$ ,  $x_{n.\partial\partial}$  – индуктивные сопротивления сети, трансформатора и двигателя, Ом.

По следующим формулам можно определить остаточное напряжение на шинах источника питания, выводах ЭД при пуске и провал напряжения на шинах

$$U_{ост} = \sqrt{3}x_{n.\partial\partial}I_n. \quad (5.20)$$

$$\Delta U\% = \frac{(U_{ш} - U_{ост})}{U_{ш}} \cdot 100\%. \quad (5.21)$$

Если необходимо рассчитать провалы напряжения при пуске второго АД, при работающем первом, то этот двигатель вводится в схему замещения (рисунок 87) как сверхпереходное сопротивление  $x''_{\partial\partial}$

$$x''_{\partial\partial} = x''_{\partial\partial}^* \cdot \frac{U_{\partial\partial.n}^2}{S_{\partial\partial.n}} \left( \frac{U_{ш}}{U_{\partial\partial.n}} \right)^2, \quad (5.22)$$

где  $x''_{\partial\partial}^*$  – сверхпереходное сопротивление двигателя в о.е.

Ток запускаемого второго двигателя

$$I_n = \frac{U_{ш}}{\sqrt{3} \left( \left( \frac{1}{x''_{\partial\partial}} + \frac{1}{x_c + x_m} \right) + x_{n.\partial\partial} \right)}. \quad (5.23)$$

После определения пускового тока второго АД, аналогично проведем расчеты провалов напряжения для запускаемого второго ЭД. На рисунке 5.10 приведены графики провалов напряжения сети при прямом пуске АД, в зависимости от мощности питающего трансформатора [40].

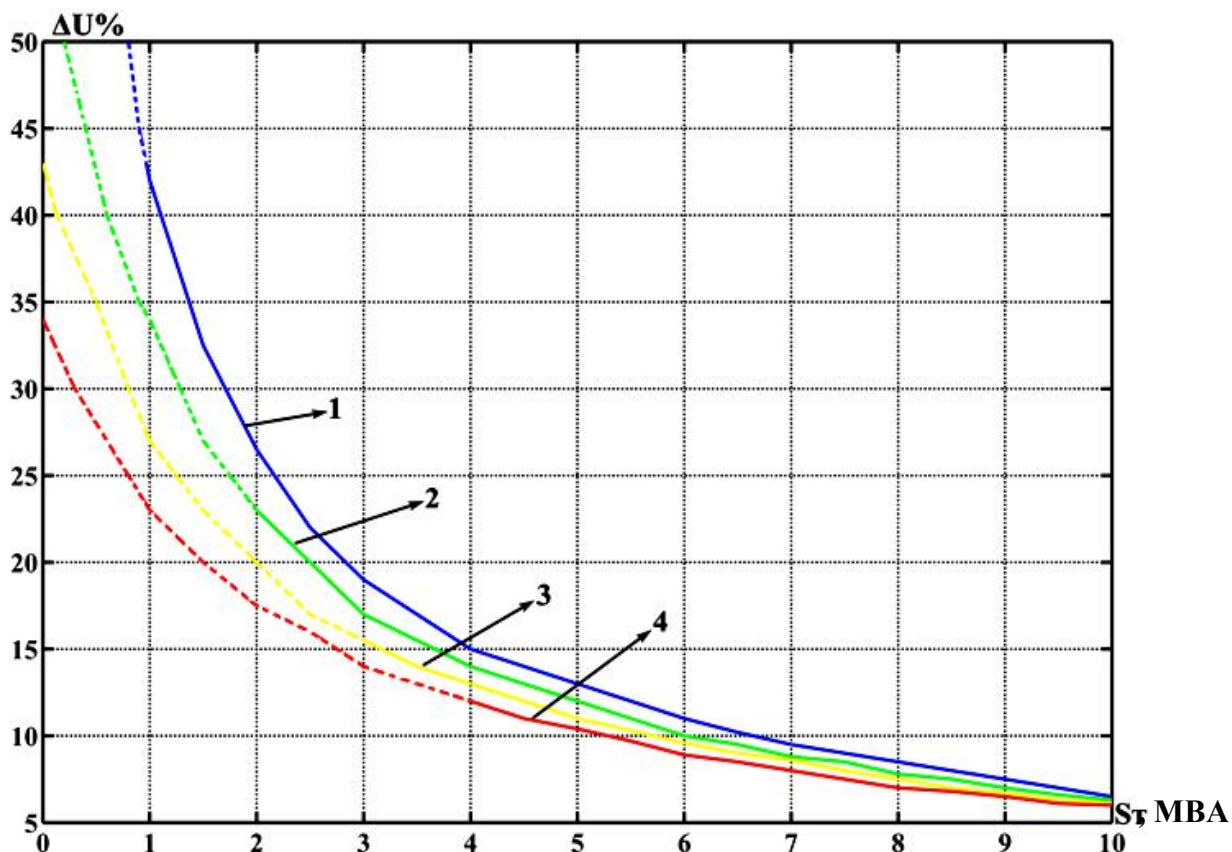


Рисунок 5.10. Влияние работы АД на глубину провалов напряжения при пуске следующих ЭД: 1 – пуск первого двигателя; 2 – пуск второго АД при работающем первом; 3 – пуск третьего АД при работающих двух и 4 – пуск четвертого АД.

Графические зависимости рисунка 5.10 показывают, что наибольшая глубина провала напряжения наблюдается при пуске первого АД, затем провалы напряжения при пуске следующих двигателей уменьшаются. Режим пуска первого двигателя считается самым тяжелым для системы электроснабжения.

На рисунке 5.11 приведены графики изменения провалов напряжения в режиме прямого пуска первого АД. Эти графики построены в зависимости от мощности питающего трансформатора для различных напряжений КЗ трансформатора  $U_k(\%)$ .



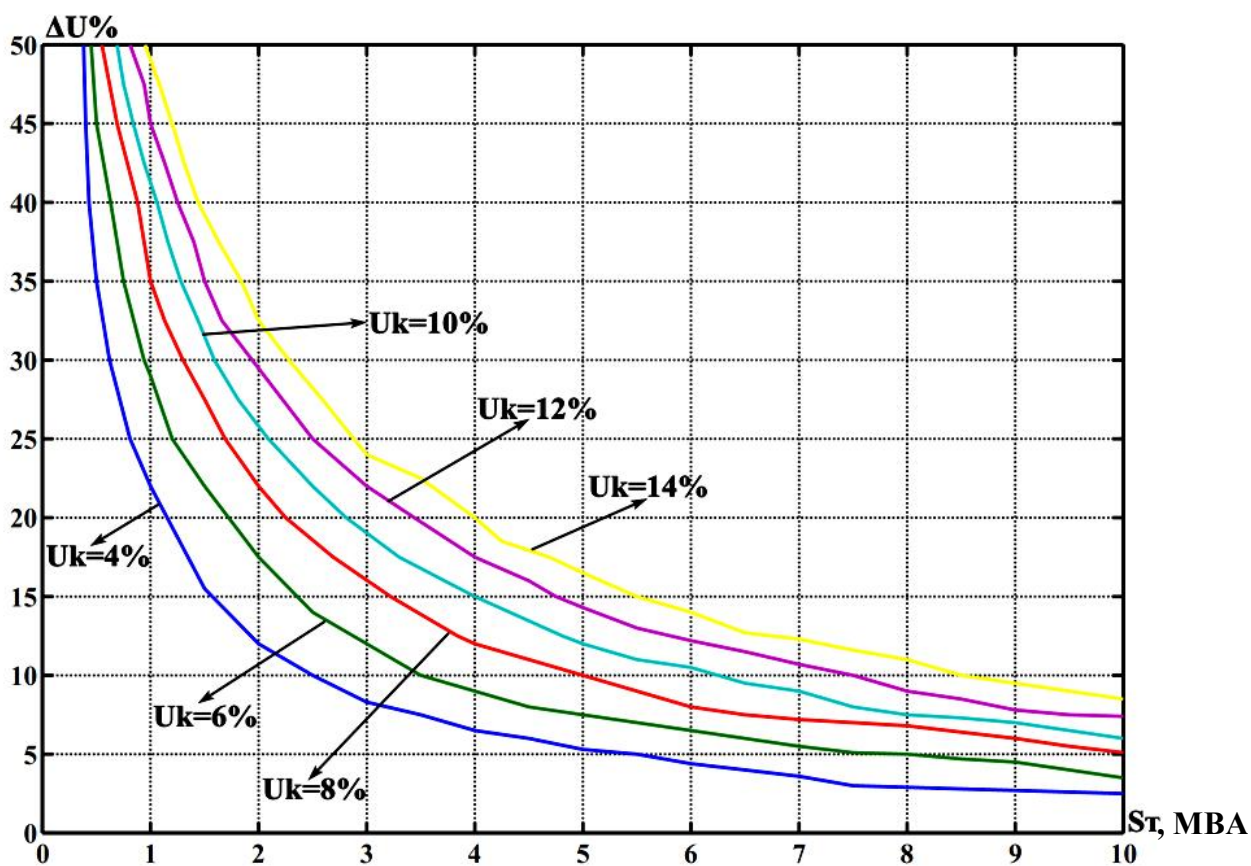


Рисунок 5.11. Влияние напряжения КЗ трансформатора  $U_k(\%)$  на величину провала напряжения при пусковых режимах АД

В зависимости от типа трансформатора и его мощности, значения напряжения КЗ могут отличаться. Следовательно, глубина провала напряжения при разных значениях сопротивления трансформатора  $x_T$ , будет различной. Значения напряжения КЗ, которые в качестве примера выбраны и приведены на рисунке 5.11, являются наиболее часто встречающимися для трансформаторов мощностью от 1 до 10 МВА [74-76].

На рисунке 5.6 изображены графики зависимости глубины провалов напряжения питающей сети от мощности питающего трансформатора при разных кратностях пускового тока АД. Данные графики получены для прямого пуска первого АД. Представленные графики (рисунок 5.12) позволяют оценить величину провалов напряжения при различных значениях пускового тока АД и при различной номинальной мощности питающего трансформатора.



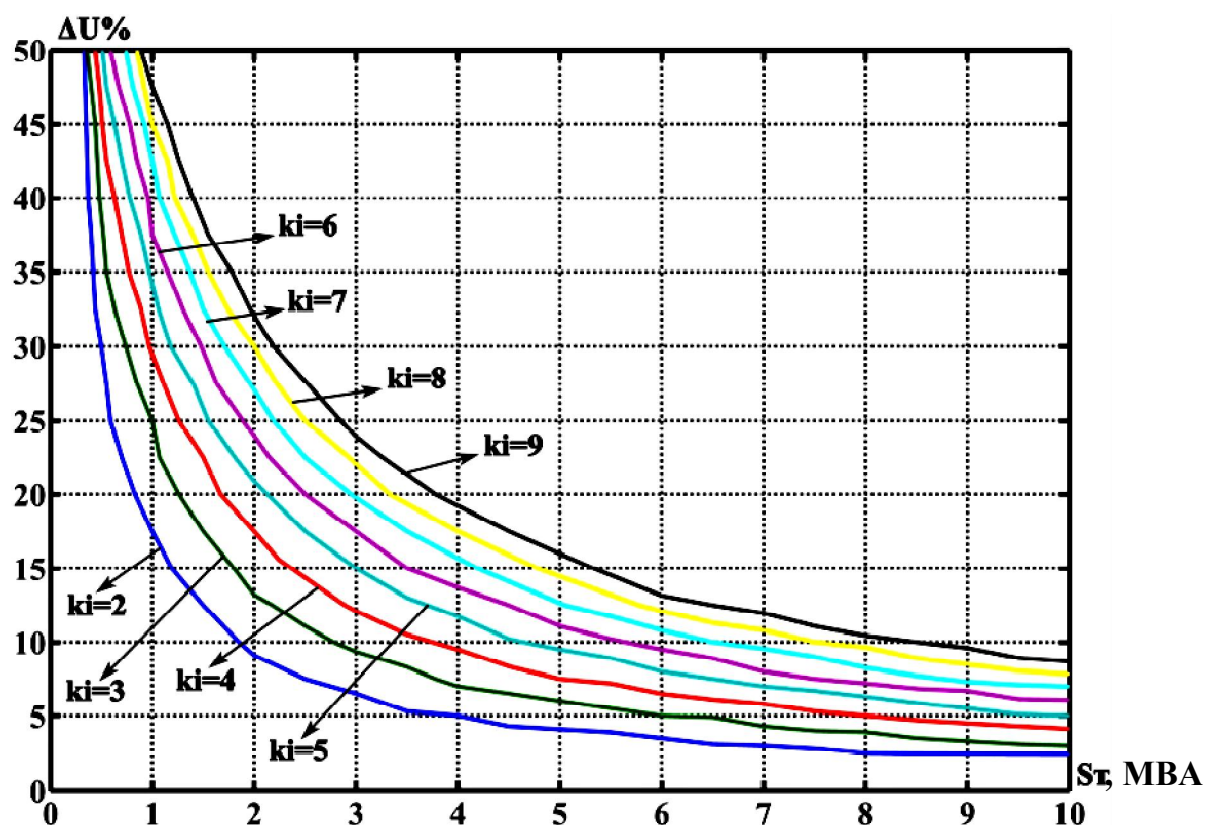


Рисунок 5.12. Графические зависимости влияния пусковых токов АД на глубину провала напряжения при прямом пуске

Графики, приведенные в рисунках 5.11 и 5.12, учитывают только прямой пуск первого двигателя, и параллельно работающие двигатели не учитываются. Этот недоучет принят согласно результатам исследования и графикам (рисунок 5.10). На рисунке 5.10 показано влияние работы двигателя на глубину провалов напряжения при запуске следующих ЭД. Результаты исследования показали, что воздействие параллельно работающих ЭД способствует уменьшению глубины провалов напряжения, при запуске установленных рядом двигателей.

### 5.3.2. Синхронный электропривод

Алгоритм расчета для СД аналогичен расчетам для АД, так как при прямом пуске СД запускаются также, как АД. Поэтому используемая схема замещения для расчета провалов напряжения при пуске СД не будет отличаться. Влияние пуска очередного СД на глубину провала напряжения при установившихся режимах работы ранее запущенных двигателей является менее значимым, чем при пуске первого двигателя. Это обстоятельство возникает в

силу того, что ЭД работающие в нормальном режиме, при пуске другого ЭД, служат как генераторы, т.е. подпитывают запускаемый ЭД.

С учетом сопротивлений рядом установленных двигателей, ЭДС СД [60]

$$E''_{CD} = \sqrt{(U_{CD} \cos \varphi_{CD})^2 + (U_{CD} \sin \varphi_{CD} + x''_{dc} I_{CD})^2}.$$

Пусковой ток запускаемого СД при работающих, рядом установленных двигателях, будет определен с учетом результирующих ЭДС всех двигателей, которые приняты равными напряжению  $U_{ин}$

$$I_{пуск} = \frac{U_{ин}}{\sqrt{3} \left[ \frac{(x_C + x_T) x''_{\Sigma}}{(x_C + x_T) + x''_{\Sigma}} + x_{CDпуск} \right]}, \quad (5.24)$$

где  $x''_{\Sigma}$  - суммарное сверхпереходное сопротивление установленных рядом работающих СД.

По формуле (5.24) рассчитано значение пускового тока и, затем, по формулам (5.20) и (5.21) проведены расчеты провалов напряжения. На рисунке 5.13 приведены графики влияния параллельно работающих СД на глубину провала напряжения при асинхронном пуске СД.

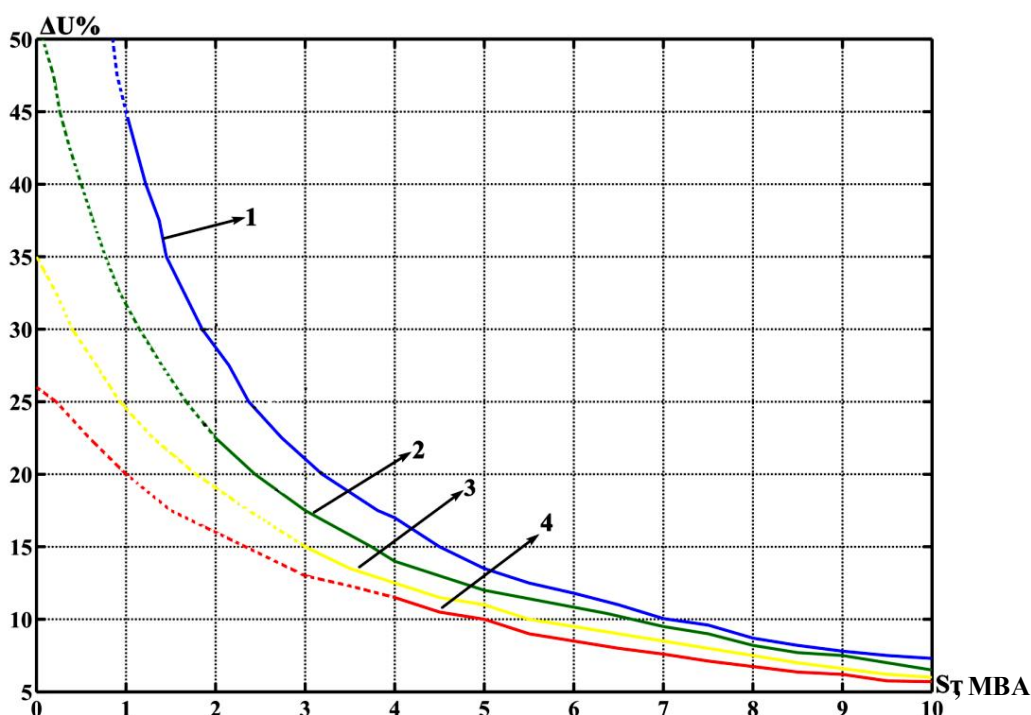


Рисунок 5.13. Влияние параллельно работающих СД на глубину провала напряжения при асинхронном пуске СД: 1 – пуск первого ЭД, 2 – второго ЭД при работающем первом, 3 – третьего при работающих двух и 4 - четвертого при работающих трех ЭД.

Графики, приведенные на рисунке 5.13, справедливы для СД при строго асинхронном пуске. Если пуск СД будут выполняться с УПП или ПЧ и т.п. других устройств, зависимости провалов напряжения будут отличаться [77-80].

Результаты исследования показывают, что самой тяжелой для системы электроснабжения НС режимом является режим прямого пуска первого ВЭД. Если двигатель имеет номинальный  $\cos\varphi$ , то провал напряжения при запуске следующего ЭД уменьшается до значений 10-15%. Как уже отмечалось, этот эффект достигается за счет подпитки запускаемого двигателя от установленных рядом работающих двигателей.

#### **5.4. Расчет провалов напряжения в системе электроснабжения насосной станции**

Электрооборудование синхронных ЭП является самым энергоемким на НС и, выбранная в качестве объекта исследования ОНС АНС-1, относится к такому виду электрооборудования. Паспортные данные и характеристики электрооборудования НС АНС-1 детально приведены в первых двух главах диссертационной работы, а особенности пуска ВСД рассмотрены в разделе 1.4.

Как было отмечено ранее, при пуске ВСД, возникают большие пусковые токи, которые вызывают провалы напряжения на шинах распределительных устройств. Возникающие провалы напряжения при пуске двигателя негативно влияют на работу других электроприемников. Регламентируемый уровень провала напряжения принят равным не более 10% в соответствии с ГОСТ на качество электроэнергии 32144-2013 [81]. На практике для достижения данной цели выбирают трансформатор мощностью на ступень выше расчетной, либо выбирают УПП для СД. Поэтому этот вопрос является весьма актуальным для повышения надежности системы электроснабжения и ЭП НС. Для упрощения расчетов провалов напряжений, в качестве допущения, мощность питающей сети 110 кВ принимается неограниченной, а расчеты ведутся на стороне шин 10

кВ. Как и для ранее проведенных расчетов, для расчета провала напряжения используем схему замещения, которая имеет следующий вид (рисунок 5.14).

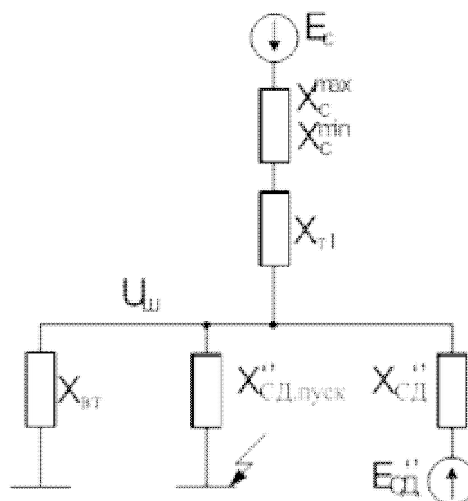


Рисунок 5.14. Схема замещения электрической системы НС

В представленной схеме замещения (рисунок 5.14)  $X_c$  означает индуктивное сопротивление сети,  $X_T$  означает индуктивное сопротивление трансформатора,  $X_{СД}$  означает индуктивное сопротивление обмоток СД. С учетом принятых допущений, определим провал напряжения в первый отрезок пуска СД. Схема замещения электрической системы НС используется для дальнейших расчетов по известной методике, которая более подробно описана в [40]. По данной методике для системы электроснабжения НС АНС-1 проведены расчеты по определению провалов напряжения в питающей сети при пуске одного СД, а также при пуске с учетом режима установленного рядом работающего двигателя.

### 1. Расчет провала напряжения при пуске первого СД

Сопротивление силового трансформатора на ступени  $U_{ш}$  определим по следующей формуле

$$X_T = \frac{U_k \%}{100} \frac{U_{ш}^2}{S_{T,НОМ}} = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{10,5^2}{25} = 0,507 \text{ Ом.}$$

Пусковое сопротивление и пусковой ток СД

$$X_{\text{СД,пуск}} = \frac{1}{K_{\text{п}}} \frac{U_{\text{ш}}^2}{S_{\text{СД}}} = \frac{1}{6,93} \cdot \frac{10,5^2}{9,16} = 1,74 \text{ Ом.}$$

где  $K_{\text{п}}$  – кратность пускового тока СД.

$$I_{\text{п}} = \frac{U_{\text{ш}}}{\sqrt{3}(X_{\text{с}} + X_{\text{т}} + X_{\text{СДпуск}})} = \frac{10,5}{\sqrt{3}(0,057 + 0,507 + 1,74)} = 2,63 \text{ кА.}$$

Остаточное напряжение на шинах и провал напряжения на шинах в первый момент времени

$$U_{\text{ост}} = \sqrt{3} I_{\text{п}} X_{\text{СД,пуск}} = 1,73 \cdot 2,63 \cdot 1,74 = 7,92 \text{ кВ,}$$

$$\Delta U(\%) = \frac{U_{\text{ш}} - U_{\text{ост,СД}}}{U_{\text{ш}}} 100\% = \frac{10,5 - 7,92}{10,5} 100\% = 24,6\%.$$

Проведенный расчет показал, что провал напряжения при пуске одиночного СД в НС АНС-1 составил значение, меньшее допустимого. Следовательно, в соответствии с ГОСТ 32144-2013 необходимо снизить значение провала напряжения при пуске двигателя до допустимых значений, а именно, в пределах не более 10% [81].

## 2. Расчет провала напряжения при пуске второго СД с учетом режима установленного рядом работающего двигателя

Если пуск производится при нормальном режиме работы СД, то для запускаемого установленного рядом СД, пусковой ток

$$I_n = \frac{U_{\text{ш}}}{\sqrt{3} \left( \frac{(X_{\text{с}} + X_{\text{м}}) \cdot X_{\text{дСД}}''}{(X_{\text{с}} + X_{\text{м}}) + X_{\text{дСД}}''} + X_{\text{СДпуск}} \right)} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \left( \frac{(0,057 + 0,507) \cdot 1,88}{(0,057 + 0,507) + 1,88} + 1,74 \right)} = 2,8 \text{ кА,}$$

где  $X_{\text{дСД}}''$  - сверхпереходное сопротивление установленного рядом работающего СД, определено по расчетам и принято 1,88 Ом.

Остаточное напряжение на шинах и провал напряжения в первый момент пуска двигателя

$$U_{\text{ост}} = \sqrt{3} I_n X_{\text{СД,пуск}} = 1,73 \cdot 2,8 \cdot 1,74 = 8,43 \text{ кВ,}$$

$$\Delta U(\%) = \frac{U_{ш} - U_{ост.СД}}{U_{ш}} 100\% = \frac{10,5 - 8,43}{10,5} 100\% = 19,7\%.$$

### **3. Расчет провала напряжения при пуске третьего СД с учетом режимов двух установленных рядом работающих двигателей**

Если принять, что пуск производится при двух нормально работающих установленных рядом СД, то пусковой ток, остаточное напряжение на шинах и провал напряжения запускаемого двигателя равны

$$I_n = \frac{10,5}{\sqrt{3} \left( \frac{(0,057 + 0,507) \cdot 0,94}{(0,057 + 0,507) + 0,94} + 1,74 \right)} = 2,9 \text{ кА},$$

$$U_{ост} = 1,73 \cdot 2,9 \cdot 1,74 = 8,74 \text{ кВ},$$

$$\Delta U(\%) = \frac{10,5 - 8,74}{10,5} 100\% = 16,8\%.$$

Результаты расчетов показали, что при дальнейших пусках установленных рядом СД, значение провалов напряжения уменьшается. Однако, недопустимое значение провала напряжения наблюдается при пуске первого СД, которое для двигателя НС АНС-1 составило 24,6%. При пуске второго и третьего двигателя, значение провала напряжения составило 19,7% и 16,8% соответственно. Такие значения провалов напряжения негативно влияют на надежность системы электроснабжения и ЭП НС АНС-1. По этой причине за последние годы участились случаи аварий и сбоев в электрооборудовании НС. Для повышения надежности электротехнической системы НС необходимо провести ряд мероприятий, направленных на снижение провалов напряжения при пуске ЭД НА.

### **5.5. Анализ рынка преобразовательных устройств для систем плавного пуска высоковольтных электродвигателей**

В настоящее время на рынке электротехнической продукции наблюдается рост типов высоковольтных пусковых устройств. Все преобразовательные устройства производятся зарубежными странами, в Республике Таджикистан

пока такие устройства не производятся. Зарубежные фирмы, выпускающие высоковольтные устройства для плавного пуска ЭД: Siemens, ABB, General Electric, ООО «ЧЭАЗ-ЭЛПРИ», ООО НПП "ЭКРА", ИК «Технорос», АБС «Электро» и др. В соответствии с техническими особенностями и стоимостью данной продукции, можно оценить возможности применения той или иной схемы преобразователей для ЭП различной мощности. Для ЭП мощностью менее 630 кВт, целесообразно применять ПЧ с понижающим трансформатором. При мощности ЭП до 1 МВт рекомендуется применить ПЧ на IGBT транзисторах. Если речь идет о мощностях более 1 МВт, то целесообразно применять многоуровневые ПЧ с многообмоточными трансформаторами [79-82].

Информацию о стоимости силовой преобразовательной техники довольно сложно получить, так как финансовая конкуренция между выпускающими компаниями усложняют этот процесс. В настоящее время примерная средняя стоимость низковольтных ПЧ (ВПЧ) составляет от 220 сомони/кВт. Если принять во внимание стоимость входного трансформатора, то окончательная цена увеличится и будет более 365 сомони/кВт. Цены для высоковольтных преобразователей могут отличаться у разных компаний, кроме этого, часто компании дают информацию о стоимости после заказа товара. Несмотря на данные трудности, известно, что средняя стоимость ВПЧ составляет порядка от 300 до 1750 сомони/кВт. Цены на высоковольтные УПП, в среднем, составляют 175-365 сомони/кВт [2 – А].

Особый интерес вызывают преобразователи производства компании ООО НПП «ЭКРА», основанные на работе ИТ. Данная электроустановка сокращенно именуется «ШПТУ-ВИ». Такое устройство представляет собой тиристорный ВПЧ с управляемым выпрямителем и зависимым ИТ [2 – А]. Применение преобразователей данного типа считается наиболее простым и экономически эффективным решением для пуска высоковольтных СД.

## 5.6. Экономические аспекты проведенных исследований

### 5.6.1. Анализ основных экономических показателей Согдийской области

Согдийская область находится на севере Республики Таджикистан с населением более 2,7 млн. человек. В таблице 5.1 приведены основные экономические показатели Согдийской области за последние 5 лет [83].

Таблица 5.1 – Основные экономические показатели Согдийской области

	2016	2017	2018	2019	2020
Валовый региональный продукт, в ценах 2020 года, млн. сомони	14654,8	17510,7	18343,8	20537,1	21621,9
Промышленная продукция, в ценах 2020 года, млн. сомони	8662,0	11390,6	12062,6	13413,6	15573,2
Продукция сельского хозяйства в ценах 2020 года, млн. сомони	9184,5	9631,7	10089,7	10725,4	11790,9

**Источник:** Статистический ежегодник Согдийской области – 2020

Область состоит из 10 районов и 8 городов, где главная водная артерия области - река Сырдарья. По данным областного комитета по землеустройству, в 2020 году общая площадь орошаемых земель составила 253,4 тысячи гектаров. Представленные данные (таблица 5.1) показывают, что внутренний валовый продукт (ВВП) области за последние 5 лет увеличился в 1,5 раза и составил 21,62 млрд. сомони (148,08 млрд. рублей). Стоимость произведенной сельхозпродукции составляет около 40 % ВВП, что является одним из основных показателей развития агропромышленного комплекса. В таблице 5.2 приведены данные о стоимости произведенной продукции сельского хозяйства Согдийской области [83].



Таблица 5.2 – Стоимость производства продукции сельского хозяйства  
Согдийской области (в ценах 2020 г)

<i>(по курсу ЦБ РТ на дату 1.02.2023г, 1 сомони – 6,85 рубль)</i>					
	2016	2017	2018	2019	2020
Растениеводство, млн. сомони	6912,90	7296,10	7634,80	8045,30	8704,50
Животноводство, млн. сомони	2271,50	2335,60	2454,90	2679,90	3086,40
Всего	9184,50	9631,70	10089,70	10725,40	11790,90

**Источник:** Статистический ежегодник Согдийской области – 2020

Данные, приведенные в таблице 5.2, показывают, что стоимость объема продукции растениеводства в три раза больше чем животноводства, и составляет 8,7 млрд. сомони в 2020 году. Поэтому данный сектор сельского хозяйства для Согдийской области имеет важное экономическое значение. По данным Управления мелиорации и ирригации (УМИ) Согдийской области, в 2020 году в соответствии с принятым договором, земледельцам области было поставлено 1,5 млрд. м<sup>3</sup> воды. Во всех районах области агрегаты НС имеют износ, связанный с давно истекшим сроком службы и нуждаются в комплексной модернизации. Однако, финансовые сложности в Управлении мелиорации и ирригации Согдийской области не позволяют в полной мере осуществить техническую реконструкцию оборудования НС, так как государственное ценообразование оказывается намного ниже, чем фактическое. Например, в 2020-2021 г.г. за каждый м<sup>3</sup> воды земледельцы платили 2 дирама, но на это в реальности затрачивался до 9 дирамов. Так как данная ситуация не изменяется в течение длительного времени, Управление остается в убытке, увеличиваются долги перед работниками, долги за электроэнергию и т.д. В 2020 году общий убыток Управления Согдийской области составил почти 78 млн. сомони. Величина суммарного долга Управления мелиорации и ирригации области энергохолдингу «Барки точик», т.е. плата за электроэнергию с учетом долгов прошлых лет, на 2021 г. составила 322 млн. сомони [84].

Правительство Республики Таджикистан для устранения существующих проблем принимает ряд мер, таких, как проекты, программы, субсидии и т.п. В

Республике действует государственная программа «О мерах по улучшению мелиоративного состояния орошаемых сельскохозяйственных земель Республики Таджикистан на 2019-2023 годы» [85]. В соответствии с данной программой управляющие структуры отрасли получают финансовую помощь. Также государственная политика позволяет удерживать фиксированные цены на электроэнергию и цены на воду для земледельцев. Данное обстоятельство является поддержкой государства агропромышленного комплекса. Кроме этого, в 2014 и 2018 г.г. часть долга Управления мелиорации и ирригации области энергохолдингу «Барки точик» была погашена за счет государства.

### **5.6.2. Техничко-экономическое обоснование плавного пуска высоковольтных электродвигателей насосных станций**

Из-за значительно износа оборудования НС и частых внезапных отключениях ЛЭП, число аварий в НС Согдийской области каждый год увеличивается. Самая крупная авария за этот период произошла в апреле 2020 года в НС АНС-1 Аштского района, в результате чего этот объект на 15 дней вышел из строя [2 – А]. Аварийная ситуация возникла в разгар сезона орошения земель, что в дальнейшем имело значительные негативные последствия. По данным Управления мелиорации и ирригации области, для устранения аварии в АНС-1, была выделена существенная финансовая помощь, - более чем 3 млн. сомони на 2020-2022 г.г. Эти средства, в первую очередь, направлены на ремонт насосных агрегатов, очистку резервуаров, каналов и другие профилактические работы. Однако, ущерб для земледельцев оцениваются гораздо больше.

В таблице 5.3 приведены данные о затратах на ремонты НС и сбор сельхозпродукции в Аштском районе Согдийской области за последние 5 лет.

Таблица 5.3 – Затраты на ремонт оборудования НС Аштского района

Год	Затраты на ремонт НС и др. проф. работ, млн. сомони	Площадь орошаемых земель, га	Объем сбора сельхозпродукции, тысяч тонн
2022	1,446		
2021	0,6	17134	19,2 (хлопок)
2020	1	16750	20 (фрукты), 13,8 (хлопок)
2019	0,3		20 (фрукты) 15,9 (хлопок)
2018	0,6	16743	14,5 (хлопок)
2017	1,064	16740	14,9 (хлопок)

Одной из главных причин аварий в НС области, кроме внезапных отключений ЛЭП, является недостаточный технический ресурс электрооборудования НС. Каскад НС Аштского района состоит из пяти подъемов, поэтому электроэнергии затрачивается значительно больше, чем в других НС области, так как обычно ОНС имеют два или три подъема.

Приведенные в таблице 5.3 данные представлены Управлением агентства по статистике при Президенте Республики Таджикистан в Согдийской области и Управлением мелиорации и ирригации Согдийской области. Эти данные (таблица 5.3) показывают, что в периоды 2017-2022 гг. для ОНС Аштского района было затрачено более 5 млн. сомони. При этом технический ресурс оборудования ОНС района так и остался на критическом уровне, так как средства были направлены на устранения последствий аварий, а не на модернизацию ОНС.

В настоящее время широкое применение получили регулируемые ЭП с частотным регулированием параметров системы, однако, в ряде отраслей экономики такое регулирование по технологическим соображениям не требуется. К таким отраслям относится, например, мелиорация, так как в качестве электрооборудования применяются ЭП, для которых требования по диапазону регулирования скорости или производительности низкие. Поэтому в

последнее время ведутся споры об эффективности внедрения РЭП в ОНС. Достоинством ПЧ является возможность их использования для регулирования параметров режимов установленного электрооборудования [26 – А]. При этом основные технико-экономические характеристики должны быть учтены при выборе ПЧ:

- цена;
- габариты и размеры;
- КПД;
- электромагнитная совместимость;
- диапазон регулирования.

Кроме приведенных показателей, при выборе УПП или ПЧ необходимо проанализировать требования к крутящему моменту, регулированию скорости, характеристикам электрической сети и т.п. Выполнение следующих условий при работе ЭП позволяет считать рациональным выбор УПП:

- ограничение пускового тока;
- необходимость снижения механического износа и защиты от повреждений при пуске;
- низкий пусковой крутящий момент;
- постоянная нагрузка;
- работа на номинальной скорости.

Использование УПП вместо ПЧ позволяет добиться значительной экономии, что обусловлено особенностями конструктивного исполнения УПП. Ориентировочные соотношения стоимости УПП и ПЧ могут составлять 2-4 раза. Кроме того, УПП имеют меньшие размеры по сравнению с ПЧ, примерно, в 10 раз. Также имеется различие значений КПД, - УПП имеют КПД до 99,5–99,9%, а КПД ПЧ обычно составляет 95–98%. Эффективность УПП, в отличие от ПЧ, повышается при работе на номинальную скорость с номинальной нагрузкой. После пускового режима полупроводниковые компоненты УПП не

работают и не выделяют тепла, а в ПЧ такие компоненты постоянно регулируют напряжение и частоту, т.е. постоянно работают.

Методики расчета экономической эффективности использования ПЧ давно разработаны, однако, для УПП методик, позволяющих получить достоверные результаты, в настоящее время не существует. УПП используются только для пуска, т.е. основная задача УПП - это устранение негативных последствий при пуске двигателя, что дает увеличение технического ресурса электрооборудования в целом [2 – А, 3 – А].

При применении ПЧ общая суточная экономия электроэнергии рассчитывается по формуле [86]

$$\Delta W_{\text{сут}} = \sum_i^k \Delta P_i \cdot t_i, \quad (5.25)$$

где  $\Delta P_i$  – экономия мощности за  $i$ -й период, кВт;

$t_i$  – время, в течение которого ЭП работает с постоянной нагрузкой, ч.

Годовая экономия электроэнергии определяется

$$\Delta W_{\text{год}} = 365 \cdot \Delta W_{\text{сут}}. \quad (5.26)$$

По действующему тарифу стоимость сэкономленной электроэнергии

$$CT_{\text{ээ}} = \Delta W_{\text{год}} \cdot T_{\text{э}}, \quad (5.27)$$

где  $T_{\text{э}}$  – тариф на электроэнергию, сомони кВт·ч.

Срок окупаемости ПЧ, год

$$T_{\text{ок}} = \frac{CT_{\text{ПЧ}}}{CT_{\text{ээ}}}, \quad (5.28)$$

где  $CT_{\text{ПЧ}}$  – стоимость преобразователя, сомони.

В настоящее время в ОНС АНС-1 применяется дискретный способ регулирования НА, где не требуется использования РЭП. Поэтому при расчете по (106) экономия электроэнергии с ПЧ для АНС-1 будет равна нулю или будет минимальной. Исходя из этого, срок окупаемости ПЧ (формула 5.28) для АНС-1 будет очень большим. В таком случае внедрение ПЧ считается

нецелесообразным. В таблице 5.4 даны экономические и технические параметры систем, применяемых для плавного пуска ЭД ОНС [2 – А].

Таблица 5.4 – Техничко-экономические показатели СПП СД большой мощности

№	Показатель	Системы для плавного пуска		
		ПЧ	УПП	Инвертор тока
1	Мощность СД, кВт	8000,00	8000,00	8000,00
2	Стоимость преобразователя, млн. сомони	4,38 - 7,30	2,19 - 2,34	2,19 - 2,34
3	Возможность с одним устройством запуск группы двигателей	нет	да	да
4	Диапазон ограничения пускового тока	до $3 \cdot I_{ном}$	до $3 \cdot I_{ном}$	до $1,3 \cdot I_{ном}$
5	Регулирования скорости СД	да	нет	нет
6	Экономия электроэнергии при регулировании СД ( для станции АНС-1)	0,00	0,00	0,00
7	КПД системы, %	95,0 – 98,0	99,50 - 99,90	99,50 - 99,90

Данные таблицы 5.4 доказывает наибольшую эффективность использования ИТ по сравнению с УПП и ПЧ. Технические параметры ИТ и УПП примерно равны, однако ИТ имеет лучшие характеристики по ограничению пускового тока. Для двигателей мощностью 8 МВт стоимость ПЧ, ориентировочно, в 2-4 раза выше, чем УПП и ИТ. Энергетические характеристики (КПД) ИТ выше на 2-5%, чем ПЧ. С учетом цены на ИТ (2,34 млн. сомони) и затрат на ремонты оборудования АНС-1, которые составили более 5 млн. сомони за последние пять лет (таблица 5.3), предложенный вариант модернизации ОНС считается эффективным. Согласно данным Приложения 1 в 2018 и 2019 г.г. в АНС-1 было зафиксировано более 8 аварий. Кроме этого, в 2020 г. произошла крупная авария в АНС-1, с которой была связана двухнедельная остановка водоснабжения в районе. Последствия аварии негативно отразились на качестве и количестве сельхозпродукции района, так как в Аштском районе в 2020 г. собрали хлопка на 2,1 тысяч тонн меньше, чем в 2019 г. Это количества хлопка по средней цене на мировой бирже в 2020 г. ущерб составил 28-38 млн. сомони. При этом, из-за остановки водоснабжения

качество фруктов оказалось на низком уровне, вследствие чего экспортная цена была значительно занижена и земледельцы района понесли большие финансовые убытки.

Согласно проведенным расчетам энергетических балансов насосных агрегатов в п. 2.1 и предложенной методики оценки срока окупаемости ПЧ (5.27-5.28), для НС АНС-1 представим расчеты для определения экономической эффективности системы плавного пуска (СПП).

Общий баланс мощности при работе одного насоса в АНС-1

$$P_C = P_T + \Delta P_{ЗДВ} + \Delta P_{НА} = 4506 + 462,25 + 887 = 5855 \approx 5860 \text{ кВт.}$$

Расход электроэнергии в ОНС за сезон орошения (с апреля по сентябрь,  $\tau = 4400$  ч)

$$W = P_C \cdot \tau = 5860 \cdot 4400 = 25784000 \text{ кВт.ч.}$$

Тариф на электроэнергию в соответствии с данными ОАО «Шабакахои таксимоти барк» на 2023 г. для сферы мелиорации составляет 0,092 сомони за кВт.ч энергии (с апреля по сентябрь) [87].

Тогда стоимость электроэнергии по действующему тарифу

$$CT_{\tau} = 0,092 \cdot 25784000 = 2372128 \text{ сомони}$$

Согласно аналогичным расчетам, средняя экономия достигает 15-20 %, и стоимость сэкономленной электроэнергии по действующему тарифу

$$CT_{\tau_{\text{э}}} = 0,2 \cdot 2372128 = 474425,6 \text{ сомони.}$$

Срок окупаемости СПП с ИТ рассчитаем для двух НА АНС-1, так как данная система может запускать до четырех СД по очереди.

С учетом цены на систему срок окупаемости СПП

$$T_{\text{ок}} = \frac{CT_{\text{СПП}}}{CT_{\tau_{\text{э}}}} = \frac{2340000}{2 \cdot 474425,6} = 2,47 \text{ год.}$$

Срок окупаемости с учетом монтажных работ (15% от цены СПП)

$$T_{\text{ок}} = \frac{CT_{\text{СПП}}}{CT_{\tau_{\text{э}}}} = \frac{1,15 \cdot 2340000}{2 \cdot 474425,6} = 2,84 \text{ год.}$$

Срок окупаемости СПП с учетом ремонтных и профилактических работ, которые за последние три года составили 3,046 млн. сомони (таблица 5.3)

$$T_{\text{ок}} = \frac{CT_{\text{СПП}}}{CT_{\text{Эр}}} = \frac{2340000}{1015333} = 2,3 \text{ год,}$$

где  $CT_{\text{Эр}}$  – средние затраты на ремонт, обслуживание и др. работы,  $3,046/3=1,015$  млн. сомони.

Срок окупаемости СПП с ИТ по расчетам составил от 2,3 до 2,84 г.г., что является достаточным для электрооборудования системы электроснабжения. Для СПП больших мощностей рекомендуемый  $T_{\text{ок}}$  составляет 2-4 г.г. [20, 51].

Режим работы ОНС является сезонным, и останов в их работе приводит к значительному техническому и экономическому ущербу. Предложенный вариант модернизации для увеличения технического ресурса электрооборудования НС с помощью ИТ является инновационным и перспективным для внедрения. При этом, в первую очередь, - повышается надежность и устойчивость системы электроснабжения, повышается стабильность орошения земель без останова и частых аварий, во-вторых, увеличивается технический ресурс оборудования НС, в - третьих увеличиваются межремонтные интервалы времени, уменьшается количество плановых ремонтов. Предлагаемые технические решения позволяют эффективно управлять режимами ОНС, при этом повышается качество и объемы сельхозпродукции.

### **5.7. Разработка рекомендаций по повышению бесперебойности работы систем электроснабжения насосных станций**

Основные электроприемники НС АНС-1 - ВСД мощностью 8 МВт и АД мощностью 1,6 МВт [4 – А]. Как известно, из всего класса электрических машин, у СД самый большой КПД и высокий коэффициент мощности, однако на их работу может негативно влиять низкое качество электроэнергии питающей сети [88, 89]. Одним из основных условий нормальной работы электроприемников является обеспечение качества электроэнергии в соответствии с ГОСТ [81].



Тепловой режим электрооборудования также влияет на надежность и долговечность его работы. Например, на тепловой режим АД и СД влияют отклонения напряжения и загрузка ЭД [89, 90]. При пониженном напряжении сети в ЭД переменного тока будут перегревы изоляции и тем самым их дальнейшему выходу из строя. При понижении напряжения в пределах нормы ГОСТ на  $\pm 10\%$ , токи обмоток ротора и статора ЭД увеличиваются, в среднем, на 14% у ротора и 10% у статора [90].

Известно, что отрицательные отклонения напряжения на обмотках АД - 10% (при его номинальной нагрузке), вдвое сокращается его срок службы.

У СД колебания, отклонения и провалы напряжения могут привести к сбоям [91-94]:

- в работе электрооборудования;
- в вычислительной технике и компьютеров;
- к ложным срабатываниям аппаратов защиты.

Магнитное поле, создаваемые токами обратной последовательности статора СД, индуцирует в магнитопроводе ротора большие вихревые токи, которые вызывают нагрев и вибрацию ротора. При дальнейшем появлении несимметрии напряжения, вибрация ротора может стать разрушительной для конструкции двигателя. Нагрев обмотки возбуждения СД, за счет дополнительных потерь полученных от несимметрии напряжения, приводит к необходимости снижать ток возбуждения. Как показывает практика несимметрия напряжения не оказывает значимого влияния на работу кабельных и воздушных линий [94]. Для трансформаторов, наоборот, несимметрия напряжения может стать причиной значительного сокращения его срока службы.

Повышение бесперебойности системы электроснабжения НС обычно связано с определенными затратами, однако дорогостоящая система не дает гарантий высокой надежности. Поэтому подходы к повышению бесперебойности всегда должны быть комплексными и все решения детально

проанализированными. Для повышения бесперебойности системы электроснабжения НС можно предложить ряд рекомендаций:

**1. Применение ПЧ на основе инвертора тока** – согласно проведенным исследованиям в главах 3-5, применение таких типов ПЧ положительно влияет на пусковые режимы ЭД ОНС первого подъема. При этом также уменьшаются значительные провалы напряжения в сети. Кроме этого, плавный пуск двигателей увеличивает технический ресурс электрооборудования и повышает бесперебойность системы электроснабжения НС. Основное отличие данного преобразователя является строгое ограничение пускового тока ЭД до  $1,3I_n$ , что дает обоснование снимать ограничения по количеству запусков НА в ОНС. Кроме этого строгое ограничение тока уменьшает провалы напряжения в сети при пусковых режимах ВЭД.

**2. Применение нового, современного и модернизация действующего электрооборудования в системы электроснабжения ОНС, а также его рациональная компоновка.**

**3. Правильный, технически и экономически обоснованный выбор схем электроснабжения НС** – осуществляется при реконструкции систем цехового ЭС. Так, например, радиальные схемы ЭС по сравнению с магистральными обладают более высокой надежностью, и применяют их для мощных электроприемников как насосов и компрессоров.

**4. Внедрение автоматизации и телемеханизации в системы электроснабжения НС** – позволяет повысить не только бесперебойность, но и безопасность системы электроснабжения, избежать ошибочных действий оперативного персонала.

**5. Повышение надежности функционирования защиты и автоматики системы электроснабжения НС** – осуществляется за счет применения простых схем и микропроцессорных устройств.

**6. Совмещение ремонта электрооборудования с ремонтом технологического оборудования** – частое явление в ОНС, где режим работы станции является сезонным.

**7. Повышение статической и динамической устойчивости системы электроснабжения** – может быть достигнуто уменьшением времени срабатывания релейной защиты, например, применением быстродействующих устройств АВР, микропроцессорной защиты и т.п.

**8. Повышение качества ЭЭ.** Одним из возможных способов повышения качества электроэнергии является применение СД вместо АД, где это возможно по технологическим требованиям, так как СД «сглаживают» реактивную мощность и, тем самым, снижают колебания напряжения в сети.

### **Выводы по пятой главе**

1. Произведен расчет и построение характеристик ЭД при различных значениях остаточного напряжения на шинах источника ЭЭ.

2. Проведены исследования провалов напряжения при пуске АД и СД, в результате чего было выявлено следующее:

– влияние работы АД на глубину провалов напряжения при пуске следующих АД (четыре АД);

– графические зависимости влияния напряжения КЗ трансформатора  $U_k(\%)$  на величину провала напряжения при пуске АД;

– графические зависимости влияния пусковых токов АД на глубину провала напряжения при прямом пуске.

3. Произведены расчеты провалов напряжения при пуске до трех СД.

4. Проведен анализ рынка преобразовательных устройств для СПП ВЭД.

5. Выполнено технико-экономическое обоснование плавного пуска ВЭД ОНС.

6. В результате исследования энергосистемы ОНС первого подъема, разработаны рекомендации по повышению бесперебойности системы электроснабжения ОНС.

7. Эффективность и целесообразность предложенного технического решения, подтверждается следующими выводами:

- повышается надежность и устойчивость системы электроснабжения ОНС за счет улучшения условий пуска ВЭД НС, особенно, при удаленных источниках питания и системы электроснабжения;
- повышается стабильность орошения земель без останова и частых аварий за счет исключения гидроударов в трубах систем орошения и поломок в механических частях НА;
- увеличивается технический ресурс оборудования ОНС за счет ограничения пусковых токов и провалов напряжения;
- увеличиваются межремонтные интервалы времени, уменьшается количество плановых ремонтов;
- возможность эффективного управления режимами ОНС, повышая качество и объемы сельхозпродукции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Негативные последствия возникают в ОНС за счет ручного регулирования подачи НА и запуска ЭД больших мощностей. **Установлено**, что частые пуски ЭД НА приводят к снижению срока службы оборудования ОНС, а также негативно влияют на работу и техническое состояние соседних НС и СЭС в целом [38 – А].

2. По результатам исследования энергетического баланса при работе агрегатов ОНС, **выявлено**, что эффективность применения ЧРЭП, зависит от глубины регулирования производительности насоса. В зоне максимальных подач насоса потери мощности в оборудовании при применении ЧРЭП могут быть больше, чем при регулировании подачи насоса задвижкой [9 – А, 29 – А].

3. По результатам исследования и анализа существующих математических моделей АД и СД, **разработаны компьютерные модели СЭС ОНС** с асинхронным и синхронным ЭП НА при прямом и плавном пусках двигателей [24 – А, 25 – А, 30 – А, 31 – А]. Основной направленностью алгоритмов данных моделей является исследование пусковых переходных процессов в ВЭД и СЭС ОНС. При исследованиях с помощью разработанных компьютерных моделей ЭД НА получены следующие результаты: электромагнитные моменты СД и АД при прямом пуске имеют знакопеременный характер, что повышает уровень шума и вибрации в ЭД; при плавном пуске обеспечивается ограничение пускового тока и провала напряжения; ограничение пускового тока при плавном пуске ВЭД дает возможность увеличить количество запусков двигателей [25 – А, 31 – А]

4. **Разработаны компьютерные модели** для исследования пусковых переходных процессов АД и СД, запускаемых с помощью ИТ [7 – А, 8 – А].

5. **Разработана компьютерная модель** для исследования нагрева обмотки статора СД а также проводов ЛЭП СЭС ОНС при прямом и плавном пуске ЭД. Результаты моделирования показали, что нагрев обмотки статора СД и проводов ЛЭП при прямом пуске выше, чем при плавном пуске ЭД [6 – А].

6. Результаты исследования бесперебойности СЭС ОНС показали, что недопустимое значение провала напряжения наблюдается при пуске первого ВЭД, которое для двигателя НС АНС-1 составило 24,6%. При пуске второго и третьего ЭД значение провала напряжения уменьшилось и составило 19,7% и 16,8% соответственно. Однако, данные значения не соответствуют допустимым нормам, в результате чего частота аварий в исследуемой ОНС увеличилась.

7. **Выполнено технико-экономическое обоснование** внедрения СПП ВЭД в ОНС, а также проведен сравнительный технико-экономический анализ способов и средств СПП для повышения бесперебойности СЭС ОНС. По результатам анализа: цена ИТ 2-4 раза ниже, чем ПЧ; ИТ имеют возможность ограничения пускового тока до  $1,3 \cdot I_{ном} [1 - A, 2 - A]$ .

8. **Предложено** мероприятие по повышению бесперебойности работы СЭС ОНС первого подъема с помощью ИТ [35 – А]. Эффективность и целесообразность данного способа подтверждают результаты проведенных исследований в представленной диссертации и в научных трудах зарубежных ученых данной области. По результатам исследований установлено: при пуске СД с ИТ провал напряжения в элементах СЭС ОНС, а именно, в ЛЭП 10 кВ составил  $\delta U=2-3 \%$ , что соответствует требованиям ГОСТ; в ЛЭП 110 кВ провал напряжения составил  $\delta U=0,5-0,8\%$ . Спектральный анализ ЛЭП 10 кВ и 110 кВ при пуске СД с ИТ показал уровень суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_U=2,28\%$  и  $K_U= 0,7\%$  соответственно; при этом срок службы ЭД увеличивается более, чем на 30-40%; продолжительность эксплуатации технологического оборудования увеличивается на 50-60% [1 – А, 8 – А].

**Перспективами дальнейшего развития** научно-технических исследований в области повышения надежности и бесперебойности работы СЭС ОНС являются продолжение исследований по применению ИТ в СПП для СД больших мощностей, исследование ЭМС ЭП ОНС, совершенствование релейной защиты и мониторинга СЭС ОНС с учетом результатов полученных в диссертационной работе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Производство электроэнергии, продажа и потребление в Республике Таджикистан за 1980–2019 г. – Текст : электронный // Агенства по статистике при Президенте Республики Таджикистан : [сайт]. – Душанбе. – URL: <https://stat.tj/ru/tables-real-sector> (дата обращения: 5.02.2023 г).
2. Veeman, D. *Industrial Power Systems Handbook* / D Veeman. – New York : McGraw-Hill, 1955. – 971 p.
3. Aree, P. Starting time calculation of large induction motors using their manufacturer technical data / P. Aree // *Proceedings of the 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. – Chiba, Japan, 13–16 February 2016. – Chiba, 2016. – P. 1-5.
4. Gülich, J. F. *Centrifugal Pumps* / J. F. Gülich. – 2nd edition. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin, Heidelberg, 2010. – 966 p.
5. Nevelsteen, J. Starting of large motors-methods and economics / J. Nevelsteen, H. Aragon // *IEEE Transactions on Industry Applications*, Nov.-Dec. – 1989, – Vol. 25, – No. 6, – P. 1012-1018. doi: 10.1109/28.44236.
6. Нейман, З. Б. Крупные вертикальные электродвигатели переменного тока / З. Б. Нейман, В. З. Пекне, Л. С. Моз. – Москва : Энергия, 1974. – 376 с.
7. Электрические машины. Каталог продукции / АО «Уралгидромаш», 2019. – 21 с.
8. Volk, M. *Pump Characteristics and Applications* / M. Volk. – 2nd edition. Taylor & Francis, 2005. – 568 p. <https://doi.org/10.1201/9781420028355>
9. Boldea, I. *Electric Drives* / I. Boldea, S. A. Nasar. 3rd edition. Taylor & Francis, 2016. – 672 p. <https://doi.org/10.1201/9781315368573>
10. Boldea, I. *Induction Machines Handbook* / I. Boldea. 3rd edition. Taylor & Francis, 2020. – 989 p. <https://doi.org/10.1201/9781003035206>
11. Онищенко, Г. Б. Энергетическая эффективность станций водоподготовки систем водоснабжения / Г. Б. Онищенко, А. Н. Горюнов // *Энергосбережение и водоподготовка*. – 2015. – № 6(98). – С. 48-51.

12. Чиликин, В. Г. Теория автоматизированного электропривода / В. Г. Чиликин, В. И. Ключев. – Москва : Энергия, 1979. – 616 с.
13. Лезнов, Б. С. Технологические основы использования регулируемого электропривода в насосных установках / Б. С. Лезнов, С. В. Воробьев // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2012. – № 5(53). – С. 24-35.
14. Технологические особенности использования регулируемого электропривода в водном хозяйстве / Б. С. Лезнов, В. Б. Чебанов, Н. Б. Лезнов [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. – 2012. – № 20. – С. 10-32.
15. Онищенко, Г. Б. Электропривод турбомеханизмов / Г. Б. Онищенко, М. Г. Юньков. – Москва : Энергия, 1972. – 240 с.
16. Двигатели синхронные вертикальные. Техническое описание и инструкция по эксплуатации / ОПБ.460.073 ТО. – 1991. – С. 29-30.
17. Zimmermann, J. A. Starting requirements and effects of large synchronous motors / J. A. Zimmermann, T. A. Hauck // *IEEE Transactions on Industry and General Applications*. – 1969. – Vol. IGA-5. – No. 2. – P. 169-175, doi: 10.1109/TIGA.1969.4181008.
18. Репина, Ю. В. Устойчивость промышленных электротехнических систем с асинхронными и синхронными электроприводами : специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Репина Юлия Валерьевна. – Москва, 2005. – 135 с.
19. Калинин, А. Г. Экономия ресурсов и энергосбережение в автоматизированных системах управления электроприводами насосных агрегатов / А. Г. Калинин, С. А. Лазарев, В. Н. Ларионов // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения : сборник научных трудов / А.Ю. Александров (гл. редактор). Том Выпуск 11. – Чебоксары : Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, 2015. – С. 245-251.
20. Ларионов, В. Н. Энергоэффективность и энергосбережение в электроприводах с вентиляторной нагрузкой : учебное пособие / В. Н.



Ларионов, А. Г. Калинин. – Чебоксары : Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2012. – 146 с.

21. Ларионов, В. Н. Энергоаудит технологических установок с асинхронным и синхронным электроприводом с вентиляторной нагрузкой / В. Н. Ларионов, А. Г. Калинин, В. Г. Ковалев // Труды VIII международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 : в 2-х томах, Саранск, 07–09 октября 2014 года / Ответственный за выпуск И. В. Гуляев. Том 2. – Саранск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва", 2014. – С. 506-511.

22. Ларионов, В. Н. Сравнительный анализ вариантов энергосберегающих режимов насосных агрегатов / В. Н. Ларионов, М. И. Альтшуллер // Цифровая электротехника: проблемы и достижения : Сборник научных трудов НПП «ЭКРА». Том IV. – Чебоксары : Рекламно-издательский центр «Содействие развитию релейной защиты, автоматики и управления в электроэнергетике», 2015. – С. 30-47.

23. Горюнов, А. Н. Исследование эффективности применения регулируемого электропривода насосных агрегатов первого подъема : специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Горюнов Александр Николаевич. – Москва, 2013. – 139 с.

24. Поздеев, А. Д. К вопросу о снижении энергопотребления при применении регулируемых электроприводов насосных агрегатов / А. Д. Поздеев, В. Н. Ларионов // Электротехника. – 1994. – № 3. – С. 19-21.

25. Лезнов, Б. С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок / Б. С. Лезнов. – Москва : Машиностроение, 2013. – 176 с.

26. Leonhard W. Control of electrical drives / W. Leonhard. – New York : Springer-Verlag, 1995. – 460 p.

27. Лезнов, Б. С. Энергетические основы использования регулируемого электропривода в насосных установках / Б. С. Лезнов, С. В. Воробьев // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2012. – № 10(58). – С. 14-31.
28. Лезнов, Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках / Б. С. Лезнов. – Москва : Энергоатомиздат, 2006. – 359 с.
29. Шепелин, В. Ф. Пусковые режимы синхронных двигателей с тяжелыми условиями пуска / В. Ф. Шепелин, Н. В. Донской, Б. С. Федоров // Электротехника. – 2006. – №2. – С. 34-40.
30. Clenet, D. Electronic starters and variable speed drives / D. Clenet // Schneider Electric Cahier Technique. – 2003. – № 208. 30 p.
31. Ned Mohan. Advanced Electric Drives: Analysis, Control, and Modeling Using MATLAB / Simulink / Mohan Ned. Wiley, 2014. – 208 p.
32. Браславский, И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – Москва : АСАДЕМА, 2004. – 202 с.
33. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2002. – 320 с., ил.
34. Soft Starting of Induction Motor with Torque Control / A. Nied, J. de Oliveira, R. de Campos [et al.] // *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2008. – P. 1-6.
35. Paul, C.K. Analysis of Electric Machines and Drive Systems / C. K. Paul, Oleg Wasynczuk, D. Scott, Sudhoff, D. P. Steven, 2nd edition. – New York: Wiley-IEEE Press, 2002. – 680 p.
36. Sen, P.C. Principle of Electric Machines and Power Electronics / P.C. Sen. – 3rd edition. Wiley, 2013. – 640 p.
37. Ковач, К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац; пер. с нем. – Москва : Госэнергоиздат, 1963. – 735 с.

38. Горев, А. А. Переходные процессы синхронной машины / А. А. Горев. – Москва : Государственное энергетическое издательство, 1950. – 551 с.
39. Сыромятников, И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей / И. А. Сыромятников. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
40. Калинин, А. Г. Исследование и разработка энергоэффективных режимов электроприводов в системах электроснабжения : специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Калинин Алексей Германович. – Чебоксары, 2011. – 137 с.
41. Шрейнер, Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург : УРО РАН, 2000. – 654 с.
42. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SimPowerSystem и Simulink / И. В. Черных. – Москва : ДМК Пресс, 2008. – 288 с.
43. Mathworks, SimPowerSystems, User's Guide 2010-2017. – 1500 p.
44. Colleran, P. J. Controlled Starting of AC Induction Motors / P. J. Colleran, W. E. Rogers // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1983. – Vol. IA-19. - No. 6. – P. 1014-1018. doi: 10.1109/TIA.1983.4504328.
45. Krishnan, R. Electric motor drives: modeling, analysis and control / R. Krishnan // New Jersey, USA: Prentice Hall PTR. – 2001. – 626 pp.
46. Zenginobuz, G. Soft-Starting of Large Induction Motors at Constant Current with Minimized Starting Torque Pulsations / G. Zenginobuz, I. Cadirci, M. Ermis, C. Barlak // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2001. – Vol. 37. – No. 5. – P. 1334-1347. doi: 10.1109/28.952509.
47. Ильин, В. И. О пуске синхронной машины в режиме вентильного двигателя с имитатором положения ротора / В. И. Ильин, С. М. Гинзбург, В. И. Севастьянова // *Электричество*. – 1982. – №2. – С. 55-59.

48. Крюков, О. В. Пуск электроприводных газоперекачивающих агрегатов / О. В. Крюков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2016. – № 20. – С. 62-83.

49. Исследование способов снижения пускового тока при запуске высоковольтных двигателей / В. Н. Мещеряков, Т. В. Синюкова, А. В. Синюков [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2021. – Т. 21. – № 2. – С. 94-104.

50. Устройства и системы плавного пуска и регулирования скорости электродвигателей напряжением 3-10 кВ и мощностью до 17 МВт. ООО НПП «ЭКРА». Издание 9. 2016. – 32 с.

51. Устройства и системы плавного пуска и регулирования скорости электродвигателей напряжением 3-15 кВ и мощностью до 25 МВт. ООО НПП «ЭКРА». Издание 10. 2017. – 32 с.

52. Wu, B. High-Power converters and AC drives / B. Wu, M. Narimani. Wiley-IEEE Press, 2017. – 480 p.

53. Power Electronics and Drive Systems / Marius Rosu, Ping Zhou, Dingsheng Lin [et al.] // *Multiphysics Simulation by Design for Electrical Machines, Power Electronics and Drives*, IEEE. – 2018. – P. 251-281. doi: 10.1002/9781119103462.ch6.

54. Grahame D. H. Modulation of Current Source Inverters / D. H. Grahame, A. L. Thomas // *Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice*, IEEE. – 2003. – P. 337-348. doi: 10.1109/9780470546284.ch7.

55. Афанасьев, А. А. Частотный пуск синхронной машины с имитатором датчика положения ротора / А. А. Афанасьев, В. А. Чихняев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1987. – № 2. – С. 20-27.

56. Лазарев, С. А. Применение инверторов тока в высоковольтном электроприводе / С. А. Лазарев // Экспозиция Нефть Газ. – 2013. – № 4(29). – С. 78-80.

57. Руководство по эксплуатации ЭКРА.674512.002 РЭ.1. Шкаф пусковой тиристорного устройства типа ШПТУ-ВИ // ООО НПП «ЭКРА». – 63 с.

58. Мещеряков, В. Н. Построение системы управления мгновенными значениями тока статора в электроприводе переменного тока / В. Н. Мещеряков, В. Н. Воеков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2014. – Т. 14. – № 2. – С. 44-48.

59. Robert W. Erickson. Fundamentals of Power Electronics / W. Erickson. Robert, Dragan Maksimović. - 2nd edition. Springer New York, NY, 2007. – 883 p. <https://doi.org/10.1007/b100747>

60. Bin Wu. PWM-CSI inverter for induction motor drives / Wu Bin, S. B. Dewan, G. R. Slemon // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1992. – Vol. 28. – No. 1. – P. 64-71. doi: 10.1109/28.120202

61. Xiao Y. Design of line/motor side capacitors for PWM CSR-CSI drives to achieve optimal power factor in high power fan/pump applications / Y. Xiao, B. Wu, N. R. Zargari, R. Sotudeh // *Proceedings of APEC 97 - Applied Power Electronics Conference*, Atlanta, USA. – 1997. – Vol. 1. – P. 333-337 doi: 10.1109/APEC.1997.581472.

62. Абросимов, А. С. Разработка и исследование векторных систем управления асинхронными электроприводами с автономными инверторами тока с релейным регулированием : специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Абросимов Александр Сергеевич. – Липецк, 2013. – 18 с.

63. Егоров, А. Н. Практический опыт применения преобразователей частоты power Flex 7000 в горнодобывающей промышленности / А. Н. Егоров, А. С. Семёнов, О. В. Федоров // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2017. – №4(119). – С. 86-93.

64. PowerFlex 7000 Medium Voltage AC Drive. Rockwell Automation Publication 7000-TD002J-EN-P - September 2020. – 472 p.

65. Башлыков, А. М. Разработка и исследование систем асинхронного и синхронизированного частотного электропривода на базе инвертора тока : специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Башлыков Александр Михайлович. – Липецк, 2012. – 18 с.

66. Аракелян, А. К. Развитие теории электромеханических систем с синхронным двигателем, питаемым от преобразователя с зависимым инвертором тока : специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Аракелян Александр Карапетович. – Чебоксары, 1999. – 63 с.

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

68. Мещеряков, В. Н. Системы управления асинхронным электроприводом на базе автономного инвертора тока / В. Н. Мещеряков, А. С. Абросимов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 4. – С. 53-57.

69. Муркин, М. Н. Исследование коммутационных процессов в инверторе тока / М. Н. Муркин, С. К. Земан, Е. В. Ярославцев // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 4. – С. 111-116.

70. Паймурзов, Е. Г. Алгоритм работы бездатчикового зависимого инвертора тока в зоне низких скоростей / Е. Г. Паймурзов // Экспозиция Нефть Газ. – 2010. – № 5(11). – С. 41-45.

71. Паймурзов, Е. Г. Реализация пуска бездатчикового электропривода с синхронным электродвигателем и зависимым тиристорным инвертором тока / Е. Г. Паймурзов // Труды VIII международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 : в 2-х томах, Саранск, 07–09 октября 2014 года / Ответственный за выпуск И. В. Гуляев. Том 1. – Саранск: Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего профессионального образования "Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва", 2014. – С. 252-260.

72. Perelmuter, V. M. *Electrotechnical Systems: Simulation with Simulink and SimPowerSystems* / V. M. Perelmuter. CRC Press. 2013. – 450 p.  
<https://doi.org/10.1201/b13013>

73. Шабад, В. К. *Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах* / В. К. Шабад. – Москва: Издательский центр «Академия», 2013. – 192 с.

74. Гамазин, С. И. *Переходные процессы в электродвигательной нагрузке систем промышленного электроснабжения* / С. И. Гамазин, Д. Б. Понаровкин, С.А. Цырук. – Москва : Издательство МЭИ, 1991. – 352 с.

75. *Электромагнитные и электромеханические процессы в электроприводе при параллельной работе преобразователей частоты на асинхронный двигатель* / Д. В. Беляев, А. М. Вейнгер, Г. Б. Лазарев [и др.] // *Электротехника*. – 2007. – №5. – С. 20-28.

76. Поздеев, А. Д. *Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах* / А. Д. Поздеев. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 172 с.

77. Ершов, М. С. *Математическая модель переходных процессов в электромеханической системе асинхронный электродвигатель- турбомашина* / М. С. Ершов, А. Д. Яризов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 1999. – № 3. – С. 26-27.

78. *Проблемы и опыт модернизации высоковольтных синхронных электроприводов насосных станций* / Г. М. Иванов, О. И. Осипов, А. С. Дронов, К. А. Кузин // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2010. – № 3-4. – С. 86-96.

79. Анишев, Е. Ю. *Особенности применения преобразователя частоты в мощном электроприводе циркуляционных насосов* / Е. Ю. Анишев, Г. Б. Лазарев // *Электротехника*. – 2007. – №10. – С. 64-68.

80. Лазарев, Г. Б. Мощные высоковольтные преобразователи частоты для регулируемого электропривода в электроэнергетике / Г. Б. Лазарев // Электротехника. – 2005. – №11. – С. 3-8.

81. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст межгосударственный стандарт: дата введения 01-07-2014. - Москва : Стандартиформ, 2014. - 16 с.

82. Мещеряков, В. Н. Выбор топологии высоковольтных преобразователей частоты по технико-экономическим критериям / В. Н. Мещеряков, С. Е. Степанов, О. В. Крюков // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2020. – № 8. – С. 53-65.

83. Статистический ежегодник Согдийской области. Таджикистан: 30 лет государственной независимости. – Худжанд : Главное управление Агентства по статистике при Президенте Республики Таджикистан в Согдийской области, 2021. – 744 с.

84. Садои мардум : [сайт] / учредитель Маджлиси Оли Республики Таджикистан. – Душанбе, 2021 – №96 (4358) 24.07.2021. Обновляется в течение суток. <https://sadoimardum.tj/nishast-oi-matbuot/agentii-be-doshti-zamin-va-obyor-az-bar-i-to-ik-321-9-million-somon-arzdor-ast/> (дата обращения: 3.02.2023 г).

85. Официальный сайт Агентство мелиорации и ирригации при Правительстве Республики Таджикистан. <https://imis.alri.tj/> (дата обращения: 3.02.2023 г).

86. Приложение к решению Совета Альметьевского муниципального района Республики Татарстан от 28 апреля 2011 г. N 72. Инвестиционная программа "Развитие систем водоснабжения и водоотведения города Альметьевск на 2012-2014 годы" (с изменениями на 2013-2014 годы). – URL: <https://base.garant.ru/34576120/89300effb84a59912210b23abe10a68f/> (дата обращения: 3.02.2023 г). – Текст : электронный.



87. Антимонопольная служба при Правительстве Республики Таджикистан : официальный сайт. – Душанбе. – Обновляется в течение суток. – URL: <http://ams.tj/ru/> (дата обращения: 3.02.2023 г). – Текст : электронный.

88. Карташев, И. И. Анализ провалов напряжения в электрических сетях 110-220 кВ / И. И. Карташев, А. В. Плакида, Н. К. Хромышев // Электричество. – 2005. – № 4. – С. 2-8.

89. Конюхова, Е. А. Надежность электроснабжения промышленных предприятий / Е. А. Конюхова, Э. А. Киреева. – Москва : Энергопрогресс, 2001. – 91 с. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 12(36)]

90. Федоров, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Федоров, В. В. Каменова. – Москва : Энергия, 1979. – 408 с.

91. Фишман, В. С. Провалы напряжения в сетях промышленных предприятий / В. С. Фишман // Новости электротехники. – 2004. – №5(29).

92. Фишман, В. С. Провалы напряжения в сетях промышленных предприятий. Минимизация последствий / В. С. Фишман // Новости электротехники. – 2004. – №6(30).

93. Шпиганович, А. Н. Провалы напряжения в электрических системах предприятий / А. Н. Шпиганович, И. С. Муров // Национальная Ассоциация Ученых. – 2015. – № 2-4(7). – С. 6-7.

94. Перенапряжения систем электроснабжения и их квалификация / А. Н. Шпиганович, А. А. Шпиганович, Е. П. Зацепин, К. А. Пушница // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 12. – С. 75-82.

**Основное содержание диссертации изложено в следующих изданиях:**

***Статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК Российской Федерации и ВАК при Президенте Республики Таджикистан.***

[1 – А] Дадабаев Ш.Т. Мероприятия по повышению технического ресурса электрооборудования мощных оросительных насосных станций / Ш.Т.

Дадабаев, Э.Ю. Абдуллазянов, Е.И. Грачева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25. – № 2. – С. 26-40.

[2 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Техничко-экономическое обоснование применения системы плавного пуска для высоковольтных электродвигателей насосных агрегатов / Ш.Т. Дадабаев, Е.И. Грачева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24. – № 1. – С. 141-150.

[3 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Исследование пусковых режимов асинхронных двигателей при низком качестве электроэнергии питающей сети / Ш.Т. Дадабаев, Е.И. Грачева, И.Р. Каримов, С. Валтчев // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13. – № 1(49). – С. 3-15.

[4 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Исследование пусковых переходных процессов асинхронного двигателя при пониженной частоты напряжения сети / Ш.Т. Дадабаев, И.И. Исмоилов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 10. – С. 290-295.

[5 – А] Мирхаликова, Д.С. Исследование пусковых режимов асинхронного электропривода оросительной насосной станции при пониженном напряжении сети / Д.С. Мирхаликова, **Ш.Т. Дадабаев** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 3. – С. 303-309.

[6 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Исследование нагрева обмоток синхронного электродвигателя большой мощности при прямом пуске / Ш.Т. Дадабаев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 12. – С. 213-215.

[7 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Компьютерное моделирование инвертора тока используемое для пуска высоковольтных электродвигателей / Ш.Т. Дадабаев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 2. – С. 370-375.

[8 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Исследование эффективности пуска высоковольтных синхронных электродвигателей при помощи инвертора тока /

Ш.Т. Дадабаев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 10. – С. 618-621.

[9 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Оптимизация пусковых режимов работы высоковольтных электроприводов оросительной насосной станции с учетом жаркого климата / Ш.Т. Дадабаев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2018. – Т. 61. – № 2. – С. 86-91.

[10 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Разработка математической модели системы регулирования насосных агрегатов оросительной станции первого подъема / Ш.Т. Дадабаев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 9-1. – С. 532-536

[11 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Исследование технологических и переходных процессов электроприводов турбомеханизмов / Ш.Т. Дадабаев, Х.А. Рахматов, Б.А. Абдумаликов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 4. – С. 256-262.

[12 – А] **Вохидов, А.Д.** К вопросу о задачах повышения надежности системы электроснабжения насосной станции первого подъема / А.Д. Вохидов, **Ш.Т. Дадабаев**, Ф.М. Разоков // Надежность. – 2016. – Т. 16. – № 4(59). – С. 36-39.

[13 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Перспективы внедрения регулируемых электроприводов в насосных агрегатах большой мощности / Ш.Т. Дадабаев // Энергетик. – 2015. – № 7. – С. 31-33.

[14 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Математическая модель оросительной насосной станции первого подъема / Ш.Т. Дадабаев // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2015. – № 3(178). – С. 239-242.

[15 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Исследования применения энергоэффективных способов управления в электроприводах с вентиляторной нагрузкой / Ш.Т. Дадабаев, В.Н. Ларионов // Вестник Таджикского технического университета. – 2014. – № 4(28). – С. 56-59.

[16 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Обзор и оценка способов управления насосными установками / Ш.Т. Дадабаев // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт.* – 2013. – № 12. – С. 28-30.

[17 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Особенности механических характеристик электроприводов с вентиляторным характером нагрузки / Ш.Т. Дадабаев // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт.* – 2013. – № 11. – С. 29-34.

***Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в  
международных базах данных SCOPUS, Web of Science***

[18 – А] **Dadabaev S.T.** Failure Distribution Laws for 110 kV Overhead Power Lines in a Sharply Continental Climate / M. Toshkhodzhaeva, E. Gracheva, M. Homidova [et al.] // *4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, – Lipetsk, 2022, – P. 787-791.

[19 – А] **Dadabaev S.T.** Study of starting transition processes of asynchronous motor at a lowered mains voltage frequency / S.T. Dadabaev, Z.A. Dadabaeva, E.I. Gracheva // *Sustainable Energy Systems: innovative perspectives : Conference proceedings*, Saint-Petersburg, 29–30 October 2020. – Saint-Petersburg: Springer, Cham, 2021. – P. 206-213.

[20 – А] **Dadabaev S.T.** Some issues of the functioning of electric power systems with distributed generation sources / M.I. Toshkhodzhaeva, A.A. Mirzoakhmedev, S.T. Dadabaev, E.I. Gracheva // *Sustainable Energy Systems: innovative perspectives : Conference proceedings*, Saint-Petersburg, 29–30 October 2020. – Saint-Petersburg: Springer, Cham, 2021. – P. 331-338.

[21 – А] **Dadabaev S.T.** Modeling the Reliability of High-Voltage Power Transmission Lines Taking into Account the Influence of the Parameters of a Sharply Continental Climate / E. Gracheva, M. Toshkhodzhaeva, O. Rahimov [et al.] // *International Journal of Technology.* – 2020. – Vol. 11. – No 8. – P. 1557-1569.

[22 – A] **Dadabaev S.T.** Computer Modeling of Pumping Station with Unregulated Electric Drive / S. Dadabaev, E. Gracheva // *E3S Web of Conferences*, Saint-Petersburg, 29–30 October 2020. – Saint-Petersburg, 2020. – P. 01039.

[23 – A] **Dadabaev S.T.** Problems of Electric Power System Management taking into account Sources Distributed Generation / M. Toshkhodzhaeva, O. Rahimov, S. Dadabaev, E. Gracheva // *E3S Web of Conferences*, Saint-Petersburg, 29–30 October 2020. – Saint-Petersburg, 2020. – P. 01034.

[24 – A] **Dadabaev S.T.** Modeling of starting transition processes of asynchronous motors with reduced voltage of the supply network / S.T. Dadabaev, T.M. Islomovna, M.D. Saidulloevna // *European Journal of Electrical Engineering*. – 2020. – Vol. 22. – No 1. – P. 23-28.

#### *Публикации в других изданиях*

[25 – A] **Дадабаев Ш.Т.** Моделирование пусковых режимов синхронного электропривода насосной станции / Ш. Т. Дадабаев // САПР и моделирование в современной электронике : Сборник научных трудов V Международной научно-практической конференции, Брянск, 21–22 октября 2021 года. – Брянск: Новый формат, 2021. – С. 115-119.

[26 – A] **Дадабаев Ш.Т.** Исследование пусковых режимов асинхронного двигателя при низком качестве питающей сети / Ш. Т. Дадабаев // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте : материалы XV МНТК, Вологда, 08 декабря 2020 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2021. – С. 87-91.

[27 – A] **Дадабаев Ш.Т.** Исследования провалов напряжения в сети при пусковых режимах мощных асинхронных двигателей / Ш. Т. Дадабаев // Энергетические системы. – 2020. – № 2. – С. 102-107.

[28 – A] **Дадабаев Ш.Т.** К вопросу об исследовании провалов напряжения в сети при пусковых режимах электропривода насосных станций / Ш. Т. Дадабаев // Современные проблемы и перспективы развития науки, техники и образования. [Электронный ресурс]: Материалы I Национальной научно-

практической конференции (30 ноября 2020 г.); ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова». – Электрон. текстовые дан. (1,29 Мб). – Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова», 2020. С. 773-776.

[29 – А] **Дадабаев Ш.Т.** К вопросу эффективности внедрения регулируемых электроприводов в насосных станциях / Ш. Т. Дадабаев // Наука и образование - 2019 : Материалы всероссийской научно-практической конференции, Мурманск, 15 ноября 2019 года. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2020. – С. 296-301.

[30 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Моделирование пусковых режимов синхронных электродвигателей насосных агрегатов / Ш. Т. Дадабаев // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности : Материалы III МНТК, Чебоксары, 14–16 ноября 2019 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2019. – С. 311-314.

[31 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Моделирование мягкого пуска синхронных электроприводов / Ш. Т. Дадабаев // САПР и моделирование в современной электронике : Сборник научных трудов III МНПК, Брянск, 24–25 октября 2019 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2019. – С. 140-144.

[32 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Компьютерное моделирование инвертора тока в программе MATLAB/Simulink используемое для электроприводов большой мощности / Ш. Т. Дадабаев // Энергетические системы. – 2019. – № 1. – С. 113-118.

[33 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Математическое моделирование системы регулирования насосной станции путем изменения производительности насоса / Ш. Т. Дадабаев // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2018) : Труды МНТК, Самара, 14–16 апреля 2018 года / Под редакцией С.А. Прохорова. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2018. – С. 982-987.

[34 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Математическая модель системы регулирования насосных агрегатов / Ш. Т. Дадабаев // Вестник ПИТТУ имени академика М.С. Осими. – 2018. – № 1(6). – С. 37-43.

[35 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Теория и практика использования инвертора тока для пуска высоковольтного синхронного электропривода / Ш. Т. Дадабаев // Энергетические системы. – 2018. – № 1. – С. 95-99.

[36 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Исследование пусковых переходных процессов высоковольтного синхронного электропривода с учетом нагрева и жаркого климата / Ш. Т. Дадабаев // Энергетические системы. – 2017. – № 1. – С. 179-184.

[37 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Компьютерное моделирование нагрева синхронных электроприводов насосных агрегатов при различных способах пуска / Ш. Т. Дадабаев // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2017) : труды МНТК, Самара, 14–16 марта 2017 года. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2017. – С. 878-882.

[38 – А] **Дадабаев Ш.Т.** К вопросу эффективности внедрения регулируемого электропривода в насосных агрегатах оросительных станций первого подъема / Ш. Т. Дадабаев // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи : материалы IV российской молодежной научной школы-конференции: в 2 томах, Томск, 01–03 ноября 2016 года / Томский политехнический университет. Том 1. – Томск: ООО «ЦРУ», 2016. – С. 4-10.

[39 – А] **Дадабаев Ш.Т.** Анализ пусковых режимов крупных вертикальных синхронных двигателей насосных агрегатов / Ш. Т. Дадабаев // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии : сборник докладов 4-й МНПК в рамках выставки «Энергосбережение. Отопление. Вентиляция. Водоснабжение», Екатеринбург, 26–28 мая 2015 года / научный редактор Ф. Н. Сарапулов. – Екатеринбург: ООО "Издательство УМЦ УПИ", 2015. – С. 160-163.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица 1.1 – Сведения о внезапных отключений насосных агрегатов в насосных станциях Аштского района Согдийской области от 6.04.2018 до 27.06.2019 г.

№	Район	Общее количество	Наименование насосных станций	Откл. элек. энергии			Примечание (причины откл. агрегатов НС)
				Дата	Время	Фин. затраты (сомони)	
1	Ашт	12	Чумчукжар	24.04.2018	11-00 до 16-15		Отключение
			Каскад НС Ашт (АНС-1,2,3)	29.04.2018	16-00		Перенапряжение
			Етитеппа	21.06.2018	19-50		Отключение
			Каскад НС Ашт (АНС-1,2,3)	03.07.2018	18-00		Временное отключение
			Каскад НС Ашт (АНС-1,2,3)	12.07.2018	19-50		Перенапряжение
			Каскад НС Ашт (АНС-1,2,3), Чумчукжар, Етитеппа	17.07.2018	17-42		Временное отключение
			Каскад НС Ашт (АНС-1,2,3), Чумчукжар, Етитеппа	20.07.2018	21-00		Временное отключение
			Каскад НС Ашт (АНС-1,2,3,4), Чумчукжар, Етитеппа	28.07.2018	18-15		Временное отключение
			Каскад НС Ашт (АНС-1,2,3,4)	08.08.2018	15-00		Временное отключение
			Каскад НС Ашт (АНС-1,2,3,4), Чумчукжар, Етитеппа	17.09.2018	12-00	505360	Отключение
			Чумчукжар, Етитеппа	07.04.2019	21-45		Отключение
			АШТ-1,2,3,4	27.06.2019	18-30		Отключение
<b>Итого</b>		<b>12</b>			<b>505360</b>		



Таблица 2.1 – Класс напряжений питающих сетей насосных станций  
Согдийской области

№	Наименование районов	10 кВ	6 кВ	0,4 кВ	6/0,4 кВ
1	Б. Гафуров	-	20	17	-
2	Пенджикент	2	10	7	-
3	Исфара	1	6	4	-
4	Ашт	4	18	18	1
5	Айни	-	2	8	-
6	Истаравшан	-	-	1	-
7	Зафаробод	10	4	-	-
8	Спитамен	-	-	6	-
9	КВД Ходжабакирган	-	2	2	-
10	Дж. Расулов	-	8	5	-
11	Конибодом	-	4	15	-
12	Мастчоҳ	-	16	2	1
13	Гончи	-	4	1	-
<b>Итого</b>		<b>17</b>	<b>94</b>	<b>86</b>	<b>2</b>

Таблица 3.1 – Максимальные температуры нагрева частей вертикальных двигателей большой мощности

Место измерения	Класс изоляции	Метод измерения	Температура С°, не более
Обмотка статора машин мощностью 5000 кВА и выше или с длиной сердечника 1 м и более: а) с компаундированной изоляцией б) с термореактивной изоляцией	В	По сопротивлению Заложённые термометры	115 105
	В	сопротивления По сопротивлению Заложённые термометры	120 115
	В	сопротивления Заложённые термометры	115 105*
	В	сопротивления По сопротивлению Заложённые термометры	120 115*
Обмотка возбуждения синхронных машин	В	По сопротивлению	130
Сердечник статора	-	Заложённые термометры сопротивления	105
Обмотка якоря и обмотка возбуждения машинного возбудителя	В	Термометром	110
		По сопротивлению	120
Стержневая обмотка ротора асинхронной машины	В	По сопротивлению	130
Охлаждающая вода	-	Термометры сопротивления	30 (не ниже +10)
Охлаждающая масло	-	Термометры сопротивления	45 (не ниже +20)
Нагретое масло	-	Термометры сопротивления	55
Сегменты подпятника и направляющих подшипников	-	Термометры сопротивления и термосигнализаторы	70 (отключение машины)

Таблица 4.1 – Значения параметров синхронных машин в о.е.

Параметр	Явнополюсные генераторы и двигатели	
	С успокоительной обмоткой	Без успокоительной обмоткой
Продольное индуктивное сопротивление реакции якоря, $x_{ad}$	0,5-1,5	0,5-1,5
Поперечное индуктивное сопротивление реакции якоря, $x_{aq}$	0,3-0,9	0,3-0,9
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря, $x_{\sigma a}$	0,1-0,3	0,1-0,3
Активное сопротивление обмотки якоря, $r_a$	0,002-0,02	0,002-0,02
Продольное синхронное индуктивное сопротивление, $x_d$	0,6-1,8	0,6-1,8
Поперечное синхронное индуктивное сопротивление, $x_q$	0,4-1,2	0,4-1,2
Продольное переходное индуктивное сопротивление, $x'_d$	0,2-0,5	0,2-0,5
Продольное сверхпереходное индуктивное сопротивление, $x''_d$	0,15-0,35	-
Поперечное сверхпереходное индуктивное сопротивление, $x''_q$	0,15-0,35	-
Индуктивное сопротивление обратной последовательности, $x_2$	0,15-0,35	0,3-0,8
Активное сопротивление обратной последовательности, $r_2$	0,015-0,025	0,02-0,05
Индуктивное сопротивление нулевой последовательности, $x_0$	0,02-0,2	0,04-0,025
Активное сопротивление нулевой последовательности, $r_0$	0,002-0,02	0,002-0,02

Таблица 5.1 – Пусковые характеристики синхронных двигателей  
 $I/I_n(s)$  – верхняя строка,  $M/M_n(s)$  – нижняя строка

Серия двигателя	Скольжение								
	1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025
СТМ, СТМП	1	0,95	0,86	0,82	0,78	0,65	0,53	0,4	0,25
	1	0,98	0,92	0,87	0,82	0,65	0,5	0,3	0,15
ВДС-325	1	0,98	0,96	0,94	0,92	0,83	0,67	0,53	0,4
	1	1,17	1,6	1,87	2,23	3,19	3,4	2,8	1,27
ДСМ, ДСМП	1	0,98	0,93	0,88	0,81	0,63	0,44	0,33	0,22
	1	1,13	1,33	1,466	1,58	1,53	1,2	0,8	0,4
ДСП-116/49-4	1	0,96	0,91	0,88	0,81	0,67	0,55	0,43	0,34
	1	1,03	1,11	1,14	1,18	1,14	1	0,81	0,51
ДСП-140/74-4	1	0,97	0,93	0,87	0,82	0,64	0,48	0,36	0,27
	1	1,15	1,29	1,35	1,42	1,45	1,31	1,13	0,63
ДСКЗ-260	1	0,99	0,98	0,97	0,96	0,87	0,69	0,48	0,29
	1	1,31	1,75	2,19	2,66	4	4,5	3,44	1,88

Таблица 5.2 – Технические характеристики асинхронных двигателей серии  
 4АЗМ

Тип двигателя	Мощность, МВт	Напряжение, кВ	Частота вращения, об/мин	Ток статора, А	КПД, %	Сosφ, о.е.	Кратность максимального вращающего момента	Кратность пускового вращающего момента	Кратность пускового тока	Скольжение, %	Масса, т
4АЗМ-1250/6000 УХЛ4	1,25	6	2973	140	96,4	0,89	2,1	0,95	5,5	0,9	4
4АЗМ-1250/10000 УХЛ4	1,25	10	2973	85,1	96,4	0,88	2,7	1,3	7	0,9	4,3
4АЗМ-1600/6000 УХЛ4	1,6	6	2973	179	96,6	0,89	2	0,9	5,2	0,9	4,3
4АЗМ-1600/10000 УХЛ4	1,6	10	2973	109	96,3	0,88	1,9	0,8	4,6	0,9	5,6
4АЗМ-2000/6000 УХЛ4	2	6	2973	226	96,7	0,88	1,9	0,77	4,7	0,9	5,6
4АЗМ-2000/10000 УХЛ4	2	10	2973	134	96,6	0,89	2,1	0,9	5,2	0,9	6,2
4АЗМ-2500/6000 УХЛ4	2,5	6	2973	279	97	0,89	2	0,85	5	0,9	6,2
4АЗМ-2500/10000 УХЛ4	2,5	10	2982	167	97,1	0,89	2,7	1,2	7	0,6	7
4АЗМ-3150/6000 УХЛ4	3,15	6	2976	346	97,2	0,9	2,1	0,9	5,3	0,8	7
4АЗМ-3150/10000 УХЛ4	3,15	10	2979	213	96,9	0,88	2	0,85	5,4	0,7	8,7
4АЗМ-4000/6000 УХЛ4	4	6	2982	444	97,3	0,89	2,2	0,9	5,7	0,6	9,2
4АЗМ-4000/10000 УХЛ4	4	10	2976	268	96,8	0,89	2	0,85	5,4	0,8	9,2
4АЗМ-5000/6000 УХЛ4	5	6	2982	548	97,5	0,9	2,2	0,9	5,7	0,6	10,4
4АЗМ-5000/10000 УХЛ4	5	10	2976	334	97	0,89	2,1	0,9	5,6	0,8	10,4
4АЗМ1-8000/6000 УХЛ4	8	6	2982	876	97,6	0,9	2,3	1,05	6	0,6	14,4
4АЗМ-8000/6000 УХЛ4	8	6	2985	876	97,6	0,9	2,3	0,95	6	0,5	14,4

## ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Допустимые длительные токи и мощности для неизолированных  
сталеалюминиевых проводов марок АС, АСК, АСКП, АСКС при температуре  
воздуха +25 °С

Номинальное сечение, мм <sup>2</sup>	Ток, А		Мощность МВт, вне помещений при напряжении, кВ					
	Вне помещений	Внутри помещений	35	110	150	220	330	500
35/6,2	175	135	10	-	-	-	-	-
5	210	165	12	-	-	-	-	-
7	265	210	15,2	47,6	-	-	-	-
9	330	260	18,9	59,3	80,9	-	-	-
120/19	390	313	22,3	70,1	95,6	-	-	-
120/27	375	-	21,5	67,4	92	-	-	-
150/19	450	365	25,7	80,9	110,3	-	-	-
150/24	450	365	25,7	80,9	110,3	-	-	-
150/34	450	-	25,7	80,9	110,3	-	-	-
185/24	520	430	29,7	93,5	127,5	-	-	-
185/29	510	425	29,2	91,7	125,1	-	-	-
185/43	515	-	29,5	92,6	126,3	-	-	-
240/32	605	505	-	108,8	148,4	217	326	-
240/39	610	505	-	109,7	149,6	219	329	-
240/56	610	-	-	109,7	149,6	219	329	-
300/39	710	600	-	-	-	255	383	580
300/48	690	585	-	-	-	248	372	564
300/66	680	-	-	-	-	245	367	556
330/27	730	-	-	-	-	-	-	597
400/22	830	713	-	-	-	298	448	678
400/51	825	705	-	-	-	297	445	674
400/64	860	-	-	-	-	309	464	703
500/27	960	830	-	-	-	345	518	785
500/64	945	815	-	-	-	340	510	772
600/72	1050	920	-	-	-	-	-	-
700/86	1180	1040	-	-	-	-	-	-

## ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Агентство мелиорации и  
ирригации при Правительстве  
Республики Таджикистан  
Управление мелиорации и  
ирригации по Согдийской области  
Аштское государственное  
управление мелиорации и  
ирригации



Агентии беҳдошти замин  
ва обёрии назди Ҳукумати  
Ҷумҳурии Тоҷикистон  
Раёсати беҳдошти замин  
ва обёри дар вилояти Суғд  
Идораи давлатии беҳ-  
дошти замин ва обёрии  
ноҳияи Ашт

р./с 20202972600347226000 к/с 20402972316264 МФО 350101626 ИНН 680005230 ГСБ РТ «Амонатбанк» г. Душанбе

Электронная почта: [ldbzo@mail.ru](mailto:ldbzo@mail.ru)

№ 260/1

« 9 » 11 2017



«УТВЕРЖДАЮ»  
Руководитель «АГУМИ»

*Абдуллоҳ Воҳидов Абдураҳмонов*  
(Печать) ФИО  
« 9 » 11 2017 г.

## АКТ

о внедрении результатов исследования, полученных в диссертации  
Дадабаева Шахбоза Толибджоновича

Результаты диссертационного исследования Дадабаева Ш.Т. представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в работе насосной станции АНС-1 в виде практического применения:

- 1) методики экспресс обследования насосных установок при энергоаудите;
- 2) метода расчета потерь насосных агрегатов;
- 3) перечень рекомендации по плавному пуску синхронных двигателей.

Использование положений диссертационной работы Дадабаева Ш.Т. позволяет оперативно оценивать фактические параметры и потери электродвигательного оборудования насосной станции для обоснования необходимости проведения детального обследования и профилактических работ по снижению электрических потерь.

Начальник насосной станции АНС-1

*Ш.Т. Дадабаев*  
Подпись

*Абдураҳмонов Абдураҳмонов*  
ФИО



ЧАМБИЯТИ ДОРОИ  
МАСЪУЛИЯТИ МАХДУДИ  
«ЧАВОНИ»

735702 Ҷумҳурии Тоҷикистон вил. Сугд,  
ш. Хучанд, кўчаи Чавони-1, нишон 7118  
Суратҳисоб 20202972100285  
Ҳисоби арзи 20206840900157  
Рақами мушаххас 510000065  
ҚСШК «Бонки Эската»  
ш. Хучанд, Ҷумҳурии Тоҷикистон  
Нишонаи қабули бор: истгоҳи  
роҳи оҳани «Хучанд» нишон 747802  
тел: +992(3422) 40861, 40295, 65167  
e-mail: [giavoni@giavoni.net](mailto:giavoni@giavoni.net)

LIMITED LIABILITY COMPANY  
«GIAVONI»

735702 Sugd region, Tajikistan,  
Khujand, 1 Javoni, code 7118  
Account: 20206840900157  
USD : 20202972100285  
Taxpayer number 510000065  
Bank beneficiary: OJSC «Bank Eskhata»  
Republic of Tajikistan, Khujand city,  
Station of destination "Khujand"  
Code 747802 Railway of Tajikistan  
tel : +992(3422) 40861, 40295, 65167  
e-mail: [giavoni@giavoni.net](mailto:giavoni@giavoni.net)

№ 93 аз «25» 05 2017с.

«УТВЕРЖДАЮ»  
Директор ООО «Джавони»  
  
Гафуров И.Р.  
«25» 05 2017 г.

#### АКТ

#### о внедрении результатов исследования, полученных в диссертации Дадабаева Шахбоза Толибджоновича «Оптимизация режимов работы электроприводов с вентиляторным характером нагрузки при жарком климате»

Результаты диссертационного исследования Дадабаева Ш.Т. на тему «Оптимизация режимов работы электроприводов с вентиляторным характером нагрузки при жарком климате», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в практике деятельности ООО «Джавони» в виде практического применения:

- 1) упрощенной методики расчета потерь электроприводов с вентиляторным характером нагрузки;
- 2) компьютерная модель для исследования пусковых переходных процессов электропривода с вентиляторным характером нагрузки.

Использование положений диссертационной работы Дадабаева Ш.Т. позволил частично модернизировать переменный электропривод компрессорного цеха с путем перехода от не регулируемого электропривода к регулируемым, а также в ходе эксплуатации электрооборудования позволяет оперативно оценивать фактические параметры и потери электрооборудования компрессорного цеха для обоснования необходимости проведения детального обследования и профилактических работ по снижению электрических потерь при переходных и рабочих режимах.

Главный энергетик  
ООО «Джавони»



Джураев А.Э.





**ВАЗОРАТИ МАОРИФ ВА ИЛМИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН**  
**ДОНИШКАДАИ ПОЛИТЕХНИКИИ**  
**ДОНИШГОҲИ ТЕХНИКИИ ТОҶИКИСТОН**  
 ба номи академик М.С. Осимӣ

735700 Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Хучанд, кӯчаи Ленин 226  
 тел.: (+992 3422) 60454, факс: (9923422)60454  
 e-mail: director@kbtut.tj, www.kbtut.tj

Сод. № 386

аз «30» май с. 2017

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

Худжанского политехнического института  
 Таджикского технического университета  
 имени академика М.С. Осими



К.т.н. Саиди Д.Р.

май 2017 г.

**АКТ О ВНЕДРЕНИИ**

Настоящий акт составлен в том, что разработанные в диссертационной работе Дадабаева Шахбоза Толибджоновича:

- математические модели системы регулирования насосных агрегатов оросительной насосной станции 1-го подъема;
- компьютерная модель позволяющая исследовать переходные процессы и нагрев синхронного электродвигателя при пуске;
- перечень рекомендаций по увеличению технического ресурса электрооборудования оросительной насосной станций первого подъема

используются в учебном процессе подготовки бакалавров (4-го курса) и магистров (1-го и 2-го курсов) направления электроэнергетики и электротехники Худжанского политехнического института Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими начиная с 2016-2017 учебного года.

Заместитель директора  
 по учебной работе, к.ф.-м.н., доцент

Х.Т. Максудов