

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Политехнический институт
Факультет «Заочный»
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Рецензент

_____ 2018г.
« ____ » _____

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой ЭССиСЭ

_____ И.М. Кирпичникова
« ____ » _____ 2018г.

ОПТИМИЗАЦИЯ СЭС НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩЕЙ СТАНЦИИ ЮРГАМЫШ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ МАГИСТРА
ЮУрГУ – 13.04.02.2018.040.00.00 ПЗ ВКР

Руководитель ВКР
доцент, к.т.н.

_____ Х.К Харасов
« ____ » _____ 2018г.

Автор ВКР
студент группы ПЗ-385

_____ А.В. Плугин
« ____ » _____ 2018г.

Нормоконтролер
старший преподаватель

_____ Н.Ю. Аверина
« ____ » _____ 2018г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Политехнический институт
Факультет «Заочный»
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»
Направление 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»
Магистерская программа
«Оптимизация развивающихся систем электроснабжения»

УТВЕРЖДАЮ:

Заведующий кафедрой ЭССиСЭ,
д.т.н., профессор

_____ И.М. Кирпичникова
« ____ » _____ 2018г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу магистра
Плугина Алексея Владимировича
Группа ПЗ-385

1 Тема работы Оптимизация СЭС нефтеперекачивающей станции
Юргамыш

Утверждена приказом ректора ЮУрГУ от «23» сентября 2017г.

Срок сдачи студентом законченной работы – 01.06.2017

2 Исходные данные к работе Результаты проведения научно-исследовательской
работы

3 Перечень вопросов, подлежащих разработке

4 Графический материал

5 Дата выдачи задания «10» октября 2015г.

Научный руководитель

_____ Х.К. Харасов

Задание принял к исполнению

_____ А.В. Плугин

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

№ п/п	Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов работы	Отметки руководителя о выполнении
1	Поиск научно-технической литературы по теме ВКР, анализ и систематизация научных работ по кругу исследуемых вопросов, составление библиографического списка	Октябрь-ноябрь 2015г.	
2	Обоснование актуальности выбранной темы, определение целей и задач научных исследований, определение объекта и предмета исследований	Январь-июнь 2016г.	
3	Разработка 1-го раздела ВКР	Июль-декабрь 2016г.	
4	Разработка 2-го и 3-го разделов ВКР	Январь-июнь 2017г.	
5	Разработка 4-го раздела ВКР	Июль-ноябрь 2017г.	
6	Написание введения	Ноябрь-декабрь 2017г.	
7	Написание заключения, библиографического списка	Ноябрь-декабрь 2017г.	
8	Завершающий этап оформления работы, прохождения нормоконтроля	Ноябрь-декабрь 2017г.	
9	Представление на кафедре готовой ВКР на предварительную защиту с последующим представлением на рецензию	Ноябрь-декабрь 2017г.	

Заведующий кафедрой СЭС _____ И.М. Кирпичникова

Научный руководитель работы _____ Х.К. Харасов

Магистрант _____ А.В. Плугин

АННОТАЦИЯ

Плугин А.В. Оптимизация СЭС нефтеперекачивающей станции Юргамыш
– Челябинск: ЮУрГУ, Заочный, 2018. – 68 с., 28 рис., 7 табл., библиогр. список
– 26 наим.

Ключевые слова: релейная защита и автоматика, синхронный электродвигатель, система возбуждения.

Объект исследования – ЛПДС Юргамыш НС НКК.

Цель работы – Оптимизировать работу системы электроснабжения распределительных устройств, питающих синхронные электродвигатели, с целью уменьшения переходных процессов, возникающих при потере напряжения от источника электроснабжения.

Результаты исследования – работа ориентирована на решение актуальных проблем улучшения эксплуатационных качеств электрических сетей.

Работа может представлять интерес для организаций, проектирующих устройства релейной защиты, а также эксплуатирующих данные устройства.

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПОТЕРЕ ПИТАНИЯ ИЛИ СНИЖЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ ОТ ВНЕШНЕГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	
1.1 Характеристика нефтеперекачивающей станции	7
1.2 Краткая характеристика СЭС НПС	7
1.3 Характеристика системы возбуждения синхронных двигателей 10 кВ.....	11
1.4 Анализ релейной защиты и автоматики ЗРУ-10 кВ с синхронной нагрузкой.....	12
1.5 Анализ работы магистральных насосных агрегатов	14
1.6 Анализ научно-информационных источников	15
Задачи исследования.....	17
2 РАСЧЕТ ВОЗМОЖНОСТИ САМОЗАПУСКА В ТЕКУЩЕЙ СЭС	
2.1 Влияние изменения напряжения и частоты на работу СД	18
2.2. Расчет режима самозапуска группы ЭД после АВР ЗРУ-10 кВ НС НКК....	30
Выводы по разделу два.....	51
3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА КОНТРОЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ.....	52
Выводы по разделу три.....	56
4 ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НПС	
4.1 Предлагаемый метод оптимизции.....	57
4.2 Результаты исследования работы НПС	59
Выводы по разделу четыре	61
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	66
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	67

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АВР – автоматическое включение резерва
- АГП – автомат гашения поля; автоматическое гашение поля
- АД – асинхронный двигатель
- АРВ – автоматический регулятор возбуждения
- АЧР – автоматическая частотная разгрузка
- ВЛ – воздушная линия
- ВН – высокое (высшее) напряжение
- ГПП – главная понизительная подстанция
- КЗ – короткое замыкание
- КЛ – кабельная линия
- КПД – коэффициент полезного действия
- ЛЭП – линия электропередачи
- НН – низшее напряжение
- ОЗЗ – однофазное замыкание на землю
- ПГВ – подстанция глубокого ввода
- ПП – переходные процессы
- ПС – подстанция (районная, узловая, главная понизительная)
- ПУЭ – Правила устройства электроустановок
- РЗ – релейная защита
- РП – распределительная подстанция
- СД – синхронный двигатель
- СЭС – система электроснабжения
- ТП – трансформаторная подстанция (потребительская)
- ЭДС – электродвижущая сила
- ЭС – электростанция

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. В настоящее время идет стремление на повышение надежности СЭС и непрерывность технологических процессов в результате потери напряжения от одного из источников электроснабжения. На нефтеперекачивающих станциях эксплуатируются крупные синхронные электродвигатели. Данные электродвигатели обладают более высоким КПД и низкой зависимостью момента от напряжения сети. При эксплуатации СД возникает проблема их самозапуска при потере напряжения от внешнего источника электроснабжения.

Цель исследования. Оптимизировать работу системы электроснабжения распределительных устройств, питающих синхронные электродвигатели, с целью уменьшения переходных процессов, возникающих при потере напряжения от источника электроснабжения.

Задачи исследования. Построить математическую модель закрытого распределительного устройства с синхронным электродвигателем для изучения поведения электродвигателе при потере питания.

Объектом исследования является система электроснабжения закрытого распределительного устройства с синхронной нагрузкой.

Предмет исследования. Релейная защита и автоматики закрытого распределительного устройства с синхронной нагрузкой.

Новизна. Внедрение в существующую систему электроснабжения устройств быстрого ввода резерва, которые позволят избежать электродинамических толчков при автоматическом секционировании. Модель закрытого распределительного устройства с синхронной нагрузкой, обеспечивающая расчет устойчивости при аварийных режимах.

Методы исследования. Для решения оптимизационной задачи применялось компьютерное моделирование в программе Matlab.

Практическая значимость. Данные исследования могут быть использованы в схожих системах электроснабжения.

1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПОТЕРЕ ПИТАНИЯ ИЛИ СНИЖЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ ОТ ВНЕШНЕГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

1.1 Характеристика нефтеперекачивающей станции

Нефтеперекачивающая станция (НПС) представляет собой комплекс сооружений и устройств для приема, и перекачки нефти по магистральному нефтепроводу. В настоящее время в нефтеперекачивающей отрасли идет стремление на исключение ущербов и обеспечение непрерывности технологических процессов. Для привода магистральных насосных агрегатов на нефтеперекачивающих станциях используют мощные синхронные двигатели. Синхронные двигатели имеют ряд преимуществ: более высокий коэффициент полезного действия по сравнению с асинхронными двигателями, наименьшая зависимость крутящего момента от нагрузки на валу электродвигателя, использование в качестве устройств для компенсации реактивной мощности. Однако эксплуатация синхронных электродвигателей имеет ряд особенностей, так при отсутствии или снижении напряжения, либо потери возбуждения синхронные электродвигатели будут работать, как асинхронные генераторы. При генерировании электроэнергии вектор напряжения электродвигателя затухает по спиралевидной форме и отличается от вектора напряжения сети на смежной СШ. При мгновенном секционировании существует вероятность включения выключателя, когда вектор напряжения сети и вектор генерируемого электродвигателем напряжения окажутся противофазе, при этом на электродвигатель будет действовать динамический момент больше чем момент при коротком замыкании, что является опасным, и влечет за собой повреждение обмотки статора и выбросу ротора из электродвигателя [1].

Поэтому систему автоматизации промышленного предприятия, эксплуатирующего высоковольтные синхронные электродвигатели, можно разделить на подсистемы:

– подсистема автоматизации электроснабжения двигателей (релейная защита и автоматика, система возбуждения, устройство плавного пуска и тд.)

– подсистема автоматизации вспомогательных систем (маслосистема, подпорная вентиляция, вентиляция безпромвальной камеры, приточно-вытяжная вентиляция, система промышленной канализации, система водоснабжения, отопительная система и тд.)

– подсистема автоматизации нефтеперекачивающей станции (регуляторы, задвижки, система откачки утечек, система пожаротушения и тд.)

Для сохранения электродвигателя в устойчивом состоянии требуется слаженная работа всех подсистем, но в настоящее время наблюдается ситуация, когда обслуживанием, настройкой и вводом в эксплуатацию занимаются разные подразделения и необходимый комплексный подход не обеспечивается [2].

Для питания потребителей особой 1-й категорией в период потери питания от энергосистемы на время до 10 с предусматривается установка дизель-электрической станции мощностью до 630 кВА, запускающееся автоматически при потере напряжения до вводов РУ-0,4 кВ КТП. К числу потребителей особой категории относится входная и выходная задвижки для работы нефтепровода при отключенной станции, противопожарный пенный насос и его задвижка, освещение насосной, система автоматического пенного пожаротушения, система автоматики и телемеханики насосной станции [3].

Современные НПС оснащаются системой диспетчеризации и управления электроснабжения. Данная система предназначена для оперативного управления НПС, режимами работы, планированием электропотребления, АСТУЭ.

В настоящее время в мире началось массовое внедрение решений класса «Цифровая подстанция», основанных на стандартах серии МЭК 61850, реализуются технологии управления SmartGrid, вводятся в эксплуатацию приложения автоматизированных систем технологического управления. Сегодня в России активно ведется работа над проектом цифровая подстанция. Ведущие российские фирмы предлагают свои решения для цифровой [4].

1.2 Описание системы электроснабжения НПС

Объектом исследования является насосная станции (НС) НКК линейной производственно-диспетчерской станции (ЛПДС) «Юргамыш» Курганского нефтепроводного управления филиал АО «Транснефть-Урал». Источником электрической энергии является ПС 110/10/10кВ «Мирная» в зоне ответственности ПАО «СУЭНКО», на которой установлены три трансформатора с расщепленной обмоткой мощностью 40 МВА каждый. От Т2 и Т3 ПС «Мирная» с помощью гибких токопроводов марки АСО-2х600 электрической энергией обеспечивается ЗРУ-10кВ НС НКК. В ЗРУ-10кВ НС НКК в виде основного потребителя электрической энергии выступают 4 магистральных агрегата с электроприводом СТД-8000, насосом НМ-10000 и 4 подпорных агрегата мощностью 1600 кВт каждый. Для электроснабжения вспомогательных систем установлены 2 трансформаторных подстанции 10/0,4 кВ: КТП 2х630кВА и КТП 2х400кВА. Общая схема электроснабжения НС НКК представлена на рисунке 1. Однолинейная схема электроснабжения ЗРУ-10кВ НС НКК представлена на рисунке 2.

Для регулирования тока возбуждения синхронных электродвигателей применяются статическое тиристорное устройство ЦРВД-Т серии 06. Система возбуждения представляется тиристорными преобразователями, питание на которых поступает от отдельного трансформатора возбуждения типа ТСЗВ, подключенного к КТП 2х630кВА. Постоянный ток поступает непосредственно на обмотку возбуждения.

1.3 Характеристика системы возбуждения синхронных двигателей 10 кВ

Регулятор возбуждения типа ЦРВД-Т обеспечивает следующие функции:

– автоматическую подачу возбуждения в функции скольжения или тока статора с определением положения ротора и гарантированной синхронизацией двигателя;

- автоматическое регулирование тока возбуждения СД по выбранному закону;
- форсировку по току возбуждения с кратностью не меньше 1.4 номинала при уменьшении значения напряжения на зажимах двигателя до 0.8 от номинального значения с продолжительностью форсировки от 10 до 50 сек;
- снятие форсировки при восстановлении питающего напряжения до 0.8-0.95 номинального значения;
- защиту синхронного электродвигателя от асинхронного хода, защиту от КЗ в цепи ротора, защиту от потери возбуждения, защиту от затянувшегося пуска, защиту от нерасчетного режима, защиту от низкого напряжения статора и защиту от низкого тока статора;
- защиту и сигнализацию, предотвращающие перегрев ротора, реализован ограничитель перегрузки ротора с режимом его остывания, а также имеется ограничитель минимального возбуждения,
- форсированное гашение поля с возможностью последующего самозапуска и ресинхронизации двигателя;
- работоспособность при уменьшении напряжения питания на 30% от номинального и при превышении напряжения питания на 20%;
- работоспособность при исчезновении одного из двух источников электроснабжения (~ 220 В либо =220 В);

1.4 Анализ релейной защиты и автоматики ЗРУ-10 кВ с синхронной нагрузкой

Назначение релейной защиты и автоматики – выявление повреждений и ненормальных режимов электрической сети и принятие мер к отключению поврежденного участка либо устранению ненормального режима работы. В качестве РЗА ячеек вводных выключателей ЗРУ-10 кВ предусматривается:

Максимальная токовая защита (МТЗ) с пуском по напряжению с действием на отключение вакуумного выключателя с выдержкой времени 1,00 секунда по условию селективности с последующей и предыдущей защитами при условии снижения напряжения менее 6000 В.

Ускорение МТЗ с действием на отключение вакуумного выключателя при его включении на короткое замыкание с выдержкой времени 0,20 с.

Защита от потери питания с действием на отключение вакуумного выключателя при снижении частоты до 48,2 Гц и изменением знака по активной мощности с действием на гашение поля СД с последующей организацией режима самозапуска. В случае режима работы обоих СД на одной секции при срабатывании ЗПП происходит отключение одного электродвигателя для возможности успешного самозапуска (алгоритм разгрузки секции шин). Время ЗПП устанавливается электроснабжающей организацией и составляет 0,50 с.

ЗМН-1 ступени с блокировкой от МТЗ ввода и с действием на отключение вакуумного выключателя с разрешением АВР-10 кВ. ЗМН срабатывает при снижении напряжения ниже 5000 В с блокировкой при снижении напряжения до резервного ввода 8000 В с выдержкой времени 0,50 с.

АЧР 1 и 2 ступени с действием на отключение вакуумных выключателей электродвигателей МНА и ПНА секции с блокировкой по скорости изменения частоты при снижении частоты напряжения с выдержкой времени (уставка задается электроснабжающей организацией)

АВР с действием на включение резервного ввода после работы ЗПП или ЗМН, с блокировкой при работе МТЗ, резервной защиты трансформатора при условии снижения напряжения на секции ниже 4000 В и отключенного положения выключателя ввода.

ВНР с действием на включение ввода с последующим отключением ввода резервного с контролем напряжения до ввода выше 9500 В в течении 8,00 с.

В качестве защит ячеек ЗРУ питающих синхронные двигатели предусматривается:

Дифференциальная защита двигателя (ДЗД) с действием на отключение вакуумного выключателя без выдержки времени.

Защита от перегрузок по току с действием на отключение вакуумного выключателя с выдержкой времени (время должно быть больше времени защиты от асинхронного хода на ступень селективности).

Защита от однофазных замыканий на землю с действием на отключение вакуумного выключателя с выдержкой 0,50 с, исходя из условий отстройки от переходных процессов.

ЗМН-2 ступени с действием на отключение вакуумного выключателя при условии снижения напряжения ниже 5000 В с выдержкой времени 6,00 с.

УРОВ с действием на отключение вакуумного выключателя ввода своей секции шин и вакуумных выключателей СД с выдержкой времени 0,35 с.

Защита от несимметричного режима работы с действием на сигнал [5].

1.5 Анализ работы магистральных насосных агрегатов

Используемые на НПС синхронные электродвигатели запускаются методом самосинхронизации. СД вначале разгоняется как асинхронный электродвигатель, затем достигнув подсинхронной скорости на его обмотку возбуждения подается напряжение. С этого момента двигатель приобретает свойства синхронного и после нескольких качений входит в синхронизм. Ненормальным режимом синхронного электродвигателя является асинхронный ход, который появляется вследствие выпадания СД из синхронизма. При асинхронном ходе перегружаются демпферные контуры электродвигателя, не рассчитанные на протекание больших токов длительное время. Особенную опасность представляет асинхронный ход возбужденного электродвигателя, когда значение тока статора превышает пусковые. Фактором асинхронного хода считается: исчезновение тока статора, нарушение устойчивости сильно перегруженной системы электроснабжения при слабом возмущении. Появления асинхронного режима приводит к различным нарушениям нормального функционирования системы электроснабжения. Характерной особенностью электроснабжения двигателей на нефтеперекачивающих станциях является использование режимов самозапуска.

Режим потери питания синхронных электродвигателей разделяется на два вида: вызванные отключением питающей линии или трансформатора и вызванные коротким замыканием в сети. В случае короткого замыкания

возникает подпитка места замыкания от двигателя, торможение двигателя в таком случае происходит быстрее, быстрее происходит снижение частоты и амплитуды напряжения секции шин, от которой питаются синхронные электродвигатели [6].

Данный комплекс защит и автоматики подразумевает устойчивую работу НПС, но в 2015 году при установке синхронного электродвигателя компанией Siemens был проведен ряд экспериментов включения электродвигателя при различных напряжениях остаточного напряжения. В результате опытов было выявлено, что снижение напряжения до 4000 В является небезопасным, так как магнитный поток сохраняется за счет изменения тока в замкнутых обмотках ротора и после восстановления электроснабжения начинается самозапуск ЭД, еще вращающихся с некоторой скоростью под нагрузкой, при этом возникают утяжеленные переходные процессы, которые значительно сокращают срок его эксплуатации.

1.6 Анализ научно-информационных источников

За время написания данной работы были просмотрены и проанализированы публикации и отчеты о проводимых исследованиях, направленные на поддержание устойчивой работы СД при снижении напряжения или полной потере питания от одного из источников электроснабжения.

Для разработки алгоритма оценки устойчивости системы электроснабжения с синхронной нагрузкой использовалась работа [7], в которой установлены пределы устойчивости электромеханических комплексов с ЭД. Также данная работа показывает что увеличение допустимого предела потери питания от внешнего источника электроснабжения происходит при увеличении остаточного напряжения генерируемого СД на секцию шин, при увеличении механической постоянной времени и уменьшении коэффициента загрузки.

В работе [8] помимо комплексного анализа условий эксплуатации обмотки статора ЭД, показано влияние отклонений питающего напряжения на изоляцию ЭД, приведены данные по рабочей температуре изоляции СД.

В работе [9] выдвигается концепция автоматизированного синтеза оптимального автоматического регулятора возбуждения с учетом вероятностного характера тока узла нагрузки, предлагается использовать математические алгоритмы синтеза оптимальных линейных систем по среднеквадратичным критериям качества, которые принимают во внимание несколько дополнительных условий, в том числе стабильность системы. Такие алгоритмы приведены в работе [10]. Предлагается осуществить программу с целью автоматизированного синтеза оптимальных регуляторов возбуждения СД, которая будет включать в себя математическую модель узла нагрузки, учитывать вероятностные характеристики возмущающих воздействий, статистические погрешности измерительных приборов.

В работах [11], [12], [13], [14], [15] приведены подходы к созданию модели СД, АРВ, трансформаторов и линий, специализированных с целью расчета электромеханических переходных процессов и стабильности в энергосистемах. Использованные публикации применены при осуществлении математической модели СД и АРВ в главе 2.

В работе [16] описана модель системы электроснабжения СД, построенная с помощью стандартных элементов программной среды Matlab(Simulink). Приведены зависимости устойчивой работы синхронного электродвигателя при внешних однофазных коротких замыканиях от длительности замыканий, сечения и длины кабеля, питающего синхронный электродвигатель.

В работе [17] проведен сравнительный анализ способов гашения поля СД и сделано заключение, что более эффективным методом является гашение поля посредством перевода статической системы возбуждения в инверторный режим.

В публикации [18] помимо оценки влияния высоковольтного преобразователя частоты на алгоритмы защиты потери питания и автоматического ввода резерва на НПС, приведен сравнительный анализ алгоритмов данных защит.

Указанный анализ использован при обзоре существующих алгоритмов работы РЗА на подстанции с СД, а также при моделировании указанных функций, описанном в главе 2.

В публикации [19] рассмотрен процесс торможения СД при ступенчатом снижении частоты питающего напряжения двигателя МН. Особый интерес обращается на то, что МНА работает не изолированно и при снижении его частоты вращения, существенное влияние на работу привода будут оказывать другие МНА, подключенные к нефтепроводу.

Приведены вычисления внутреннего угла СД с учетом воздействия противодействия в магистральном трубопроводе. В работе [10] рассмотрены схемы ЗМН на НПС, выявлены их основные недостатки и пути их устранения.

В публикации [16] исследуется способность СД удерживать устойчивую работу при снижениях питающего напряжения, сведения из данной публикации применены при обзоре поведения СД при кратковременной потере напряжения в подразделе 1.4.

Задачи исследования

В качестве исследуемой схемы электроснабжения была выбрана схема с явным резервированием НС НКК ЛПДС «Юргамыш». Данная схема является типовой для многих НПС и близкой к схемам других подстанций, питающих высоковольтные электродвигатели. В процессе изучения особенностей работы НПС, была обнаружена проблема при эксплуатации синхронных электродвигателей. Для решения данной проблемы планируется оптимизировать существующую систему электроснабжения. Для проверки модернизированной системы с текущей предлагается построить математическую модель, с помощью которой определить устойчивость данных систем.

2 РАСЧЕТ ВОЗМОЖНОСТИ САМОЗАПУСКА В ТЕКУЩЕЙ СЭС

2.1 Влияние изменения напряжения и частоты на работу СД

Процесс выбега СД происходит при двух вариантах: при кратковременной потере напряжения и в случае кратковременного снижения напряжения вследствие короткого замыкания.

При снижении или отсутствия напряжения, питающего НПС, торможение будет происходить за счет момента сопротивления от приводимого механизма. Система возбуждения находится в насыщении, после восстановления питания вследствие действия АВР происходит электромагнитный переходный процесс из-за несинхронного включения, возбужденного СД. Возникающие ток в обмотке СД и электромагнитный момент, передающийся по валу на насос, значительно превышают величины, возникающие при коротком замыкании на вводе ЭД, а также при пуске ЭД, вследствие этого гашение поле СД обеспечивают при пуске защиты от потери питания.

При восстановлении питания после короткого замыкания на питающих ЗРУ элементах сети, ток и электромагнитный момент имеют меньшие величины чем при несинхронном включении, так как результирующий магнитный поток двигателя значительно ослаблен из-за размагничивающего эффекта тока короткого замыкания.

Рассмотрим влияние отклонения напряжения на угол нагрузки.

Активная мощность вычисляется по формуле:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \quad (1)$$

При снижении напряжения и сохраняющейся нагрузке на валу электродвигателя, должна увеличиваться активная составляющая тока. Данный вывод справедлив при неизменном токе возбуждения.

Электромагнитный момент неявнополюсного СД определяется по выражению:

$$M = \frac{E_q \cdot U}{x_d} \cdot \sin \delta, \quad (2)$$

где E_q – возбуждение;

U – действующее значение напряжение, питающего двигатель;

x_d – эквивалентное индуктивное сопротивление двигателя по продольной оси;

δ - угол нагрузки.

$$E_q = x_{ad} \cdot I_f, \quad (3)$$

где x_{ad} – индуктивное сопротивление реакции якоря;

I_f – значение тока возбуждения, приведенное к обмотке возбуждения.

При отклонении напряжения сети от номинального значения изменяется угол нагрузки δ . В таком случае при сохранении значений момента M , возбуждения E_q и сопротивления x_d , приняв в относительных единицах номинальное напряжение $U_n = 1$, соответственно из 2 имеем:

$$\sin \delta = \frac{\sin \delta_n}{U}, \quad (4)$$

где δ_n – номинальное значение угла нагрузки.

Из выражения 4 видно, что при уменьшении напряжения сети угол нагрузки будет увеличиваться.

Основной причиной неустойчивости энергосистемы является нехватка реактивной мощности. Реактивная мощность синхронной неявнополюсной машины находится по формуле:

$$Q = \frac{E_q \cdot U}{x_d} \cdot \cos \delta + \frac{U^2}{x_d} \quad (5)$$

Первая часть выражения представляет реактивную мощность, отдаваемую двигателем в сеть. Вторая часть, пропорциональная квадрату напряжения, определяет потребляемую СД реактивную мощность на намагничивание.

$$\cos \delta = \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \delta_H}{U}\right)^2} = \frac{1}{U} \sqrt{U^2 - \sin^2 \delta_H}, \quad (6)$$

$$Q = \frac{1}{x_d} \left(-E_q \sqrt{U^2 - \sin^2 \delta_H} + U^2 \right). \quad (7)$$

Установим первую производную реактивной мощности по напряжению и приравняем её к нулю:

$$\frac{dQ}{dU} = \frac{-E_q \cdot 2U}{2\sqrt{U^2 - \sin^2 \delta_H}} + 2U = 0. \quad (8)$$

Решение уравнения показывает величину напряжение при которой отдаваемая в сеть реактивная мощность принимает максимальное значение.

$$U_{\max} = \sqrt{\left(\frac{-E_q}{2}\right)^2 + \sin^2 \delta_H} = \sqrt{\left(\frac{m_{с.м.} \cdot x_d}{2}\right)^2 + \sin^2 \delta_H}, \quad (9)$$

где $m_{с.м.}$ – отношение максимального синхронного момента двигателя к номинальному.

При $U_{\max} < 1$ максимальная отдача реактивной мощности двигателем в сеть происходит при пониженном напряжении. С точки зрения устойчивости энергосистемы такая характеристика двигателя является наиболее благоприятной для энергосистемы. Увеличение реактивной мощности при этом происходит, пока снижающееся напряжение сети не достигнет U_{\max} , после чего величина отдаваемой реактивной мощности начнет стремительно уменьшаться.

Таблица 1 – Характеристики серийно выпускаемых синхронных двигателей

$m_{с.м.}$	$\sin \delta_n$	x_d
1,4÷2	0,5÷0,6	>1

По параметрам таблицы 1 видно что двигатели выполненные с данными характеристиками снижают величину отдаваемой реактивной мощности при снижении напряжения, но даже у СД изготовленному с $x_d < 1$ максимальная отдача реактивной мощности не превышает 1,2. При использовании статической системы возбуждения питающейся от тех же шин, что и синхронный двигатель величина отдаваемой реактивной мощности снижается вследствие уменьшения максимального выходного напряжения системы возбуждения.

Рассмотрим влияние снижения частоты на работу СД.

Электромагнитная мощность на валу СД с вентиляторной нагрузкой вычисляется по формуле:

$$P = m_n \cdot \omega^3. \quad (10)$$

Из данной формулы видно что при снижении частоты на 5% мощность на валу СД снижается на 15%. Также в [6] отмечено, что при снижении частоты уменьшается реактивная мощность отдаваемая в сеть.

ГОСТ 32144-2013 допускает: предельно допустимое отклонение напряжения в точке передачи ЭЭ не должны превышать $\pm 10\%$ от номинального или согласованного напряжения, отклонение частоты в синхронизированных системах электроснабжения не должно превышать $\pm 0,2$ Гц в течение 95% времени интервала в одну неделю и $\pm 0,4$ Гц в течение 100% времени интервала в одну неделю;

Рассмотрим поведение СД при близком КЗ.

При КЗ на отходящем от ЗРУ фидере, в момент времени $t=0$ с., ток в месте КЗ равен сумме тока источника питания и СД. На рисунке 3 изображена схема замещения такого режима.

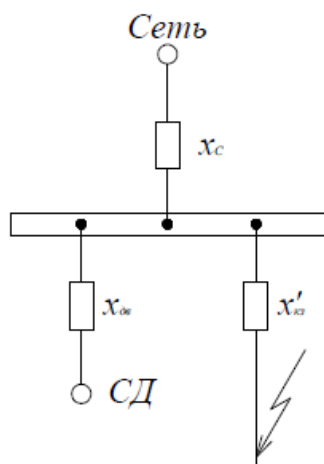


Рисунок 3 – Схема замещения для расчета близкого КЗ СД

Запишем уравнения для схемы замещения изображенной на рисунке 3:

$$x_{с.к.з.} = x_c + x'_{к.з.} + \frac{x_c \cdot x'_{к.з.}}{x_{дв.к.з.}}; \quad (11)$$

$$x_{дв.к.з.} = x_{дв} + x'_{к.з.} + \frac{x_{дв} \cdot x'_{к.з.}}{x_c}; \quad (12)$$

где $x_{с.к.з.}$ – индуктивное сопротивление между питающим источником сети и местом КЗ;

$x_{дв.к.з.}$ – индуктивное сопротивление между СД и местом КЗ;

x_c – индуктивное сопротивление сети;

$x'_{дв.к.з.}$ – переходное индуктивное сопротивление от шин ЗРУ до места КЗ;

$x_{дв}$ – индуктивное сопротивление двигателя.

Периодические составляющие токов от системы и СД в относительных единицах будут равняться:

$$I_{с.к.з.} = \frac{U}{x_{с.к.з.}}; \quad (13)$$

$$I_{дв.к.з.} = \frac{E''_q}{x_{дв.к.з.}}; \quad (14)$$

где $I_{с.к.з.}$ – ток, протекающий от сети к месту КЗ;

$I_{дв.к.з.}$ – ток, протекающий от СД к месту КЗ в начальный момент времени;

U – напряжение сети;

E_q'' – напряжение, развиваемое СД в генераторном режиме в начальный момент времени.

Полный ток КЗ в данном режиме равняется:

$$I_{к.з.} = I_{с.к.з.} + I_{дв.к.з.} \approx 1,05 \cdot \left(\frac{1}{x_{с.к.з.}} + \frac{1}{x_{дв.к.з.}} \right). \quad (15)$$

Максимальное значение на шинах в таком режиме равняется:

$$U_{ш} \approx 1,05 \cdot x'_{к.з.} \cdot \left(\frac{1}{x_{с.к.з.}} + \frac{1}{x_{дв.к.з.}} \right). \quad (16)$$

Сопротивление между СД и источником сети равняется:

$$x_{св} = x_{дв} + x_c + \frac{x_c \cdot x_{дв}}{x'_{к.з.}}. \quad (17)$$

Устойчивая работа СД при КЗ любой длительности выполняется при условии:

$$\frac{x_{дв}}{x_{св}} \geq \left(\frac{m_{мех}}{m_{с.м.к.} \cdot K_{\phi}} \right)_{\max}, \quad (18)$$

где $m_{мех}$ – момент на валу СД;

$m_{с.м.к.}$ – максимальная кратность синхронного момента при номинальном возбуждении;

K_{ϕ} – кратность форсировки возбуждения.

Выражение 18 дает относительную величину напряжения на выводах СД без учета без учета подпитки от самих СД. В практике, напряжение на шинах при КЗ за сопротивление $x_{кз}$ будет несколько выше, однако для оценки устойчивости остаточное напряжение нужно определять согласно выражения 18. Это выражение сравнивается с максимальной величиной критического напряжения:

$$U_{кр.макс} = \left(\frac{m_{мех}}{m_{с.м.к.} \cdot K_{\phi}} \right)_{макс} \quad (19)$$

В ЗРУ-10кВ НС НКК в качестве нагрузки выступают 4 АД мощностью 1600 кВт каждый, поэтому в расчетах необходимо учесть их постоянные индуктивные сопротивления, которые должны складываться параллельно с сопротивлением $x'_{к.з.}$. Поэтому сопротивление КЗ будет определяться по выражению:

$$\frac{1}{x_{к.з.}} = \frac{1}{x'_{к.з.}} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_{adi}} \quad (20)$$

где x_{adi} - сопротивление асинхронного двигателя.

Сопротивление АД определяется из условия, что двигатель потребляет номинальный ток при напряжении $0,7U_n$ в случае, если действительное напряжение на шинах при КЗ с учетом подпитки от СД равно или больше $0,7U_n$, то есть сопротивление АД в относительных единицах, приуроченное к его номинальным характеристикам и принимается равным $x_{adi}=0,7$. Если напряжение на шинах при КЗ ниже $0,7U_n$, сопротивление АД принимается равным сопротивлению КЗ.

Полный ток КЗ для выбора уставок защиты, а также напряжение на шинах необходимо определять с учетом подпитки от двигателей. При этом следует

понимать, что ток и напряжение будут снижаться. Оценку чувствительности уставок следует определять без учета подпитки от двигателей.

В случае если

$$\frac{x'_{к.з.}}{x_{с.к.з.}} \leq \left(\frac{m_{\text{мех}}}{m_{с.м.к.} \cdot K_{\phi}} \right)_{\text{макс}}, \quad (21)$$

СД, подключенные к шинам ЗРУ, начнут тормозиться. Скорость изменения угла нагрузки зависит от того, насколько максимальное значение электромагнитного момента с учетом пониженного напряжения, определяемого только током от источника питания, будет меньше момента на валу. Поэтому для определения скорости изменения угла нагрузки и решения вопроса о допустимом времени отключения КЗ необходимо решать уравнение движения:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{двиг.эл}} - M_{\text{мех}}, \quad (22)$$

где J – суммарный момент инерции СД и насоса;

$M_{\text{двиг.эл}}$ – вращающий момент двигателя;

$M_{\text{мех}}$ – механический момент сопротивления нагрузки.

Вращающий момент синхронного электродвигателя представляет собой совокупность асинхронного момента, синхронного момента и генераторного момента, обусловленного только током возбуждения. С учетом того, что асинхронный и синхронный моменты ускоряют ротор двигателя, а генераторный момент тормозит его выражение 22 принимает следующий вид:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_a + M_c - M_f - M_{\text{мех}}, \quad (23)$$

Выражения для синхронного, генераторного и асинхронного моментов с учетом неявнополюсности синхронного ЭД примет вид:

$$M_a = \frac{1}{2} \cdot U^2 \left(\operatorname{Im} \left(\frac{1}{x_d} + \frac{1}{x_q} \right) \right), \quad (24)$$

$$M_c = \frac{E_q \cdot U}{x_d} \cdot \sin \delta, \quad (25)$$

$$M_f = \left(\frac{E_q}{x_d} \right)^2 \cdot \frac{r}{1-s}, \quad (26)$$

где s – скольжение в относительных единицах.

Постоянная инерции H и механическая постоянная времени τ_j двигателя определяются:

$$2H = \frac{GD^2 \cdot n_0^2}{365 \cdot S_H}, \quad (27)$$

$$\tau_j = \frac{GD^2 \cdot n_0^2}{365 \cdot P_H} = 2H \cdot \cos \varphi_H, \quad (28)$$

где GD^2 – маховый момент электродвигателя;

n_0 – номинальная синхронная частота вращения.

В относительных единицах выражение принимает вид:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = 2H \frac{ds}{dt} = 2H \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = \tau_j \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \cdot \cos \varphi_H, \quad (29)$$

С учетом выражений 24-28 уравнение 23 примет вид:

$$\begin{aligned} 2H \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} &= \tau_j \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \cdot \cos \varphi_H = \\ &= \frac{1}{2} \cdot U^2 \left(\operatorname{Im} \left(\frac{1}{x_d} + \frac{1}{x_q} \right) \right) + \frac{E_q \cdot U}{x_d} \cdot \sin \delta - \left(\frac{E_q}{x_d} \right)^2 \cdot \frac{r}{1-s} - M_{\text{мех}}. \end{aligned} \quad (30)$$

Изменение скольжения при выбеге определяется из уравнения движения при $U=0$, установив за положительное направление изменения угла – направление его отставания от поля. При отсутствии питания, составляющие синхронного момента и асинхронный момент будут равны нулю и уравнения движения примет следующий вид:

$$\tau_j \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = \tau_j \frac{ds}{dt} = M_{\text{мех}} + \left(\frac{E_q}{x_d}\right)^2 \cdot \frac{r}{1-s} \cdot \frac{1}{\cos \varphi_H}. \quad (31)$$

Составляющая генераторного момента появляется при подпитке места короткого замыкания. Так как данный режим, как правило, непродолжителен, возможно предположить генераторный момент не зависящим от скольжения. При синхронной частоте вращения и номинальном возбуждении этот момент составит 10-20% от номинального момента двигателя. Он может быть учтен в соответствии с выражением:

$$\tau_j \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = M_{\text{мех}} + (0,1 \div 0,2) \cdot K_{\Phi}^2, \quad (32)$$

При кратковременном перерыве питания по причине отключения двигателя от питающей сети генераторный момент отсутствует. При этом механический момент можно предположить, что не зависит от скольжения. Тогда решением уравнения 31 будет:

$$s = \frac{M_{\text{мех}}}{\tau_j} \cdot t, \quad (33)$$

где t – время, прошедшее после отключения.

Если к шинам подстанции подключена группа двигателей, то при близком коротком замыкании их выбег будет происходить по индивидуальным характеристикам. При отключении группы ЭД от питающей сети их выбег будет

групповым пока напряжение на шинах не упадет ниже $0,4U_H$. В этом случае генераторный момент от тока возбуждения будет иметь место, если в выбеге принимают участие АД. Однако величина этого момента существенно меньше, чем при коротком замыкании и его можно не учитывать.

При групповом выбеге скольжение определяется аналогично одиночному, необходимо заменить момент и механическую постоянную времени на приведенные величины:

$$M_{\text{мех}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{\text{мех}i} \cdot P_{Hi}}{\sum_{i=1}^n P_{Hi}}; \quad (34)$$

$$\tau_{j \text{ пр}} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{ji} \cdot P_{Hi}}{\sum_{i=1}^n P_{Hi}}. \quad (35)$$

Для определения угла поворота оси ротора двигателя относительно вектора напряжения сети проинтегрируем 32, получим:

$$\delta = \delta_0 \cdot \frac{M_{\text{мех}}}{\tau_j} \cdot \frac{t^2}{2}, \quad (36)$$

где $\delta_0 = \arctg \frac{x_q \cdot P_0}{U_0^2 + x_q \cdot Q_0}$ – определяется предшествующей нагрузкой, для

группового выбега заменяется на $\delta_{0 \text{ пр}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_{0i} \cdot P_{Hi}}{\sum_{i=1}^n P_{Hi}}$.

Если подставить τ_j и t в секундах, угол δ в радианах определяется из выражения:

$$\delta = \delta_0 \cdot \frac{\pi \cdot f_0 \cdot M_{\text{мех}}}{\tau_j} \cdot \frac{t^2}{2}. \quad (37)$$

Определим время, за которое ротор отстанет от вектора напряжения сети на угол $\delta_0 + \pi$:

$$t_{\delta_0+\pi} = \sqrt{\frac{\tau_j}{50 \cdot M_{\text{мех}}}}. \quad (38)$$

В практических расчетах пользуются 100% вероятностью вхождения в синхронизм:

$$s_{\text{ср}} \leq s_{\text{кр}} = 1,05 \sqrt{\frac{M_{\text{с.м.к.}}}{\tau_j}}, \quad (39)$$

где $s_{\text{ср}}$ – среднее скольжение, соответствующее точке пересечения характеристики механического момента на валу со средней асинхронной характеристикой.

Преобразовав данное выражение получим:

$$s = \frac{M_{\text{мех}}}{\tau_j} \cdot t \leq 1,05 \sqrt{\frac{m_{\text{с.м.к.}}}{\tau_j}}. \quad (40)$$

Из этого выражения определим полное время отключения КЗ при которой обеспечивается 100% вероятность вхождения в синхронизм двигателя:

$$t_{\text{пер}} \leq \frac{1,05}{m_{\text{мех}}} \sqrt{m_{\text{с.м.к.}} \cdot \tau_j}. \quad (41)$$

Произведя расчеты по данной формуле, получаем что в практике допустимое время перерыва питания, при котором будет обеспечиваться 100% вхождение в синхронизм двигателя, не должно превышать 0,3 с.

Кроме того нужно отметить, что при перерыве питания из-за КЗ на смежной СШ, в случае, если угол нагрузки d не вырос до критической величины, при

которой возможно нарушение динамической устойчивости, электромеханический переходный процесс носит характер затухающих синхронных качаний. При кратковременной потере питания, обусловленной отключением питающего источника и последующим действием устройств АПВ и АВР, СД успевают выпасть из синхронизма, поскольку полный цикл отключение-включение, как правило, превышает $0,3 \div 0,4$ с.

2.2. Расчет режима самозапуска группы ЭД после АВР ЗРУ-10 кВ НС НКК

Самозапуском называется восстановление нормальной работы электропривода без вмешательства персонала после кратковременного перерыва электроснабжения или глубокого снижения напряжения. Самозапуск считается состоятельным в случае, если после восстановления напряжения агрегат разогнался до нормальной частоты вращения и продолжает длительно работать с нормальной производительностью приводимого механизма и нагрузкой электродвигателя.

На нефтеперекачивающей станции используется следующая последовательность действий:

1. при срабатывании защиты от потери питания происходит инвертирование силового тиристора системы возбуждения, работает схема гашения поля и схема разгрузки секции шин, в результате которой происходит отключение одного СД при работе двух СД на секции;
2. по истечению уставки времени защиты от потери питания отключается вакуумный выключатель рабочего ввода;
3. после снижения напряжения генерируемого электродвигателем до 4000В, срабатывает АВР и осуществляется питание от резервного ввода;
4. двигатель разгоняется до подсинхронной частоты вращения, после чего подается возбуждение и СД входит в синхронизм.

Процесс времени гашения поля до нуля требует много времени, поэтому ожидание полного гашения поля снижает эффективность самозапуска и

ограничиваются гашением до величины, при которой ток и момент не превышают предельных значений

Успешность самозапуска синхронного электродвигателя в наибольшей степени зависит от времени перерыва питания. Малое время перерыва питания приводит к малому скольжению, тем самым больше сопротивление двигателя и больше средний асинхронный момент.

Расчет процесса перерыва питания и самозапуска СД при любой сложности электрической схемы и различном предшествующем режиме работы источника питания практически невозможно реализовать вручную. Для этих целей применяются ЭВМ. Для построения модели самозапуска СД используем программно-вычислительный комплекс Matlab. В системе Matlab используются следующие допущения:

- 1) не учитываются насыщение и гистерезис намагничивающей характеристики магнитопроводов;
- 2) не учитывается эффект вытеснения тока;
- 3) не учитывается несимметрия обмоток статора.

Схемы замещения модели СД по синхронным осям имеют вид, представленный на рисунке 3.

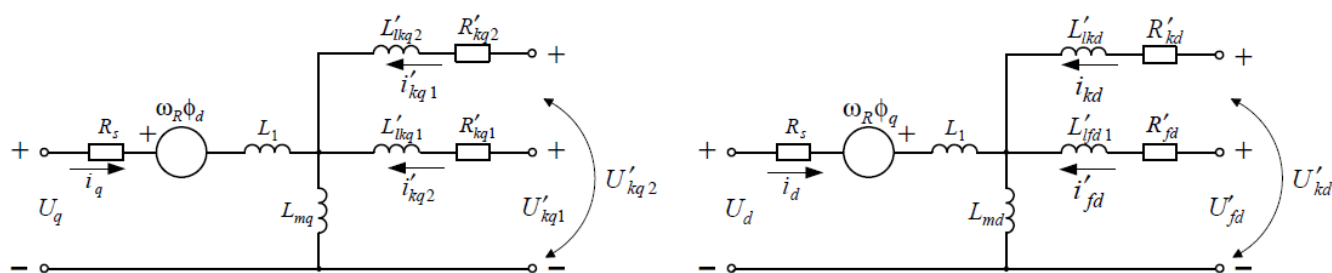


Рисунок 3 – Схемы замещения СД

На рисунке 3 приняты следующие обозначения:

d, q – синхронные оси координат;

R, s – переменная относится к ротору или статору;

l, m – индуктивность рассеяния или намагничивания;

f, k – переменная относится к обмотке возбуждения или демпферной обмотке.

В таблицах 2-5 представлены основные характеристики двигателя СТД-8000 и насоса НМ-10000-210 использованные для моделирования .

Таблица 2 – Технические данные СТД-8000

Тип двигателя	P_n , кВт	S_n , кВА	U_n , В	I_n , А	η_n , %	$M_{с.м.к.}$, отн.ед.	$M_{п.н.}$, отн.ед.	$I_{п.н.}$, отн.ед.	GD^2 , т·м ²
СТД-8000	8000	9130	10000	527	97,8	1,61	1,76	6,93	0,191

Таблица 3 – Пусковые характеристики СТД-8000

Параметр	Скольжение, отн. ед.								
	1,00	0,80	0,60	0,50	0,40	0,20	0,10	0,05	0,02
$\frac{I_{пуск}}{I_n} = I_n(s)$	6.93	6.72	6.42	6.20	5.92	4.95	3.95	3.01	1.93
$\frac{M_{пуск}}{M_n} = m_n(s)$	1.76	1.89	2.05	2.13	2.21	2.29	2.14	1.83	1.26

Таблица 4 – Расчетные индуктивные сопротивления и постоянные времени СТД-8000

U_n , В	x_d'' , %	x_d' , %	x_d , %	x_2 , %	x_0 , %	τ_{d0}' , с	τ_d' , с	τ_d'' , с	τ_a , с
10000	14,47	25,84	219,2	17,65	6,76	6,06	0,714	0,0893	0,0777

Таблица 5 – Параметры насоса НМ-10000-210

Марка	Подача, м ³ /ч	Напор, м	Частота вращения, об/мин	Момент инерции GD^2 , кг·м ²	Предельное давление, кгс/см ²	Мощность насоса, кВт	КПД, %
НМ-10000-210	10000	210	3000	28,3	75	7900	89

При моделировании системы возбуждения типами ST1A или ST2A были выявлены следующие недостатки:

– отсутствие контуров регулирования по коэффициенту мощности, по реактивной мощности;

- не предусмотрено моделирование релейной форсировки возбуждения;
- не учитывается изменение напряжения питания возбудителя;
- нет возможности отдельной настройки программного цикла составляющих регулятора.

Поэтому для моделирования была использована система возбуждения, описанная в источнике [13]. В качестве базовой модели выбрана универсальная модель АРВ, модель была изменена с учетом моделирования только тиристорных устройств и с учетом действительно используемых в АРВ СД законов регулирования. В модели учтены способы гашения поля инвертированием и включением обмотки возбуждения на разрядное сопротивление. В результате модель приняла вид, показанный на рисунке 4.

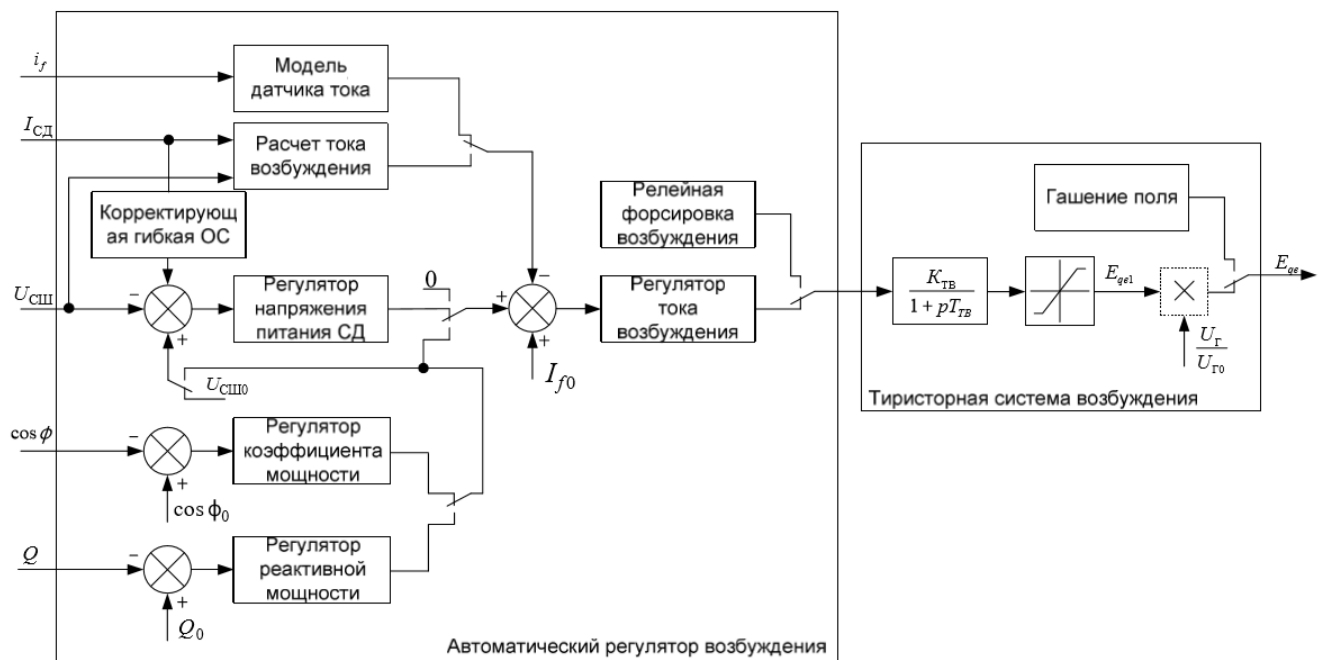


Рисунок 4 – Модель системы возбуждения

Модель выполнена в виде S-функции Simulink и обеспечивает следующие возможности:

- контуры регулирования согласно тока возбуждения, согласно напряжения питания двигателя, согласно коэффициента мощности, согласно реактивного тока с перспективой осуществления системы подчиненного регулирования;
- по любому контуру регулирования может быть реализован ПИД-регулятор;

- учтена возможность применения гибкой корректирующей ОС согласно производной активного тока статора с целью демпфирования колебаний ротора и квадрату активного тока статора для форсировки тока возбуждения;
- выполнена возможность ввода релейной форсировки возбуждения;
- предусматривается влияние снижения напряжения питающей сети на выходное напряжение возбудителя;
- предусмотрено задание шага работы алгоритмов модели;
- предусмотрена возможность моделирования гашения поля.

В настоящее время для выполнения функций релейной защиты и автоматики используются микропроцессорные устройства, функциональная схема микропроцессорного устройства РЗА приведена на рисунке 5.

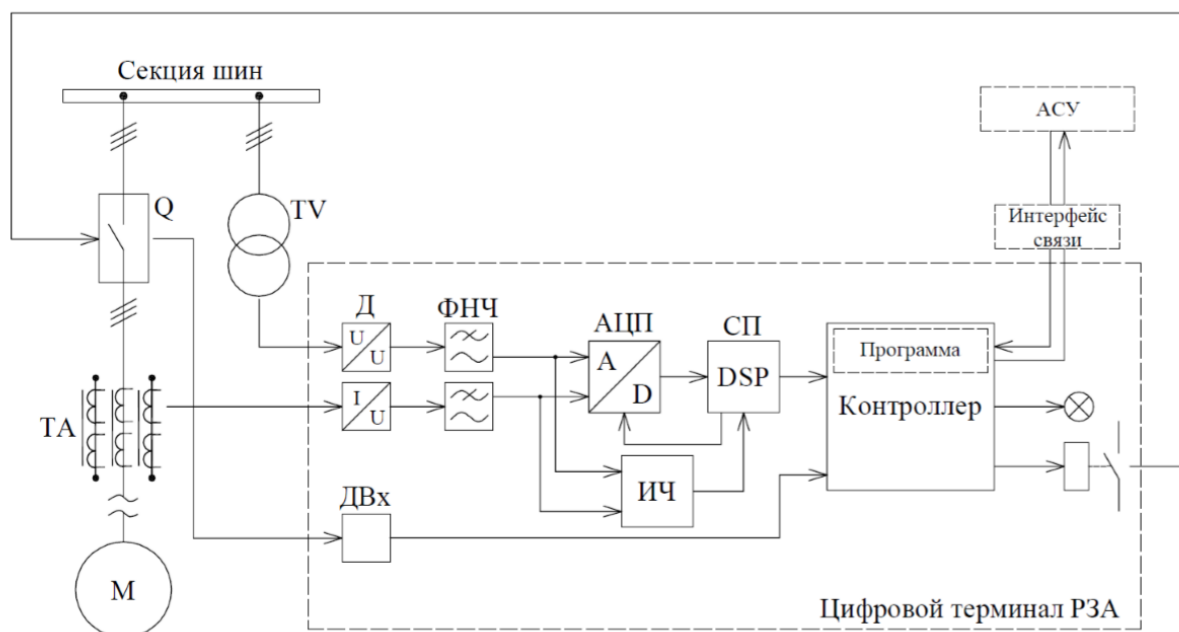


Рисунок 5 – Функциональная схема микропроцессорного устройства РЗА

В микропроцессорное устройство РЗА поступают аналоговые сигналы с трансформаторов тока ТА и напряжения TV защищаемого присоединения. Поступившие сигналы преобразуются с помощью датчиков Д к унифицированному сигналу напряжения (как правило 0-10В) и поступают на ФНЧ. Обработка оцифрованных сигналов осуществляется в сигнальном

процессоре СП (англ. DSP). Алгоритмы работы функций защиты и автоматики выполняются в контроллере. Программный цикл контроллеров существующих устройств РЗА составляет от 1мс до 10мс. Контроллер выдает управляющие сигналы на выходные реле, время срабатывания применяемых в устройствах РЗА реле на замыкание составляет от 1мс до 10мс на размыкание – от 0,5 до 5 мс. Могут также применяться бесконтактные (оптические) выходные реле с типовым временем замыкания от 0,5 до 2мс и временем размыкания от 0,1 до 0,5 мс. Для выполнения преобразования Фурье необходимо знать частоту сигнала, измерение которой осуществляется с помощью частотомера ИЧ. С помощью дискретных сигналов и промышленных интерфейсов осуществляется передача сигналов между устройствами РЗА, устройствами РЗА и АСУ.

Модель микропроцессорного устройства РЗА включает в себя:

- модели измерительных трансформаторов тока, учитывающие возможность их насыщения;
- модель аналогового фильтра нижних частот;
- модель частотомера;
- модель АЦП, управляемого сигнальным процессором;
- функции обработки сигналов в сигнальном процессоре, выполняемые с частотой работы сигнального процессора;
- функции обработки сигналов в контроллере, выполняемые с частотой работы контроллера;
- задержки входных сигналов, отражающие работу устройства фильтрации дребезга (ДВх);
- задержки выходных сигналов, отражающие задержки работы выходных реле.

За основу модели трансформаторов тока была принята упрощенная модель трансформаторов тока, в которой не учитывается сопротивление первичной обмотки ТТ. Схема изображена на рисунке 6.

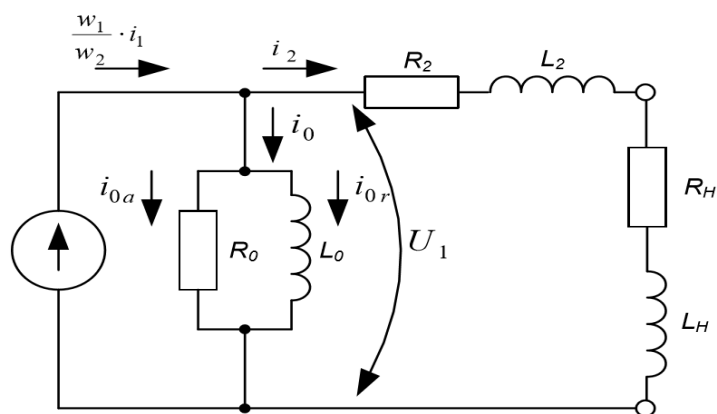


Рисунок 6 – Схема замещения ТТ

На рисунке 6 приняты следующие обозначения:

w_1 – количество витков первичной обмотки;

w_2 – количество витков вторичной обмотки;

i_1 – ток первичной обмотки;

i_2 – ток вторичной обмотки;

i_0 – ток намагничивания;

L_0 – индуктивность ветви намагничивания;

R_0 – активное сопротивление ветви намагничивания;

R_2 – активное сопротивление вторичной обмотки;

L_2 – индуктивное сопротивление вторичной обмотки;

R_n – активное сопротивление нагрузки;

L_n – индуктивное сопротивление нагрузки.

Для выполнения моделирования ТТ необходимо задать исходные данные модели:

- материал магнитопровода;
- площадь поперечного сечения и длина магнитопровода;
- активное и реактивное сопротивление вторичной обмотки;
- активное и реактивное сопротивление нагрузки;
- число витков первичной обмотке;
- число витков вторичной обмоток;
- начальное значение индукции в магнитопроводе (Тл).

Для моделирования, задаем параметры трансформаторов выбранных для двигателя СТД-8000.

Тип – ТВЛМ-10;

Коэффициент трансформации – 1000/5;

Материал магнитопровода – сталь 3411;

Площадь поперечного сечения магнитопровода – 0,00042 м²;

Средняя длина магнитопровода – 0,628 м;

Число витков первичной обмотки – 1;

Число витков вторичной обмотки – 200.

Во вводных ячейках установлены трансформаторы тока со следующими параметрами:

Тип – ТЛШ-10

Коэффициент трансформации – 2000/5

Материал магнитопровода – сталь 3411;

Площадь поперечного сечения магнитопровода – 0,00153 м²;

Средняя длина магнитопровода – 0,581 м;

Число витков первичной обмотки – 1;

Число витков вторичной обмотки – 400.

Для модели сопротивление вторичной цепи ТТ выбрано 0,5 Ом, для токовых цепей идущих от нейтрали двигателей и 0,05 Ом для токовых цепей, идущих от ТТ, установленных в ячейках.

Для моделирования используется система дифференциальных уравнений, описывающая процессы, происходящие в ТТ:

$$\begin{cases} i_2 \cdot r_2 = \omega_2 \cdot S_m \cdot \frac{dB(t)}{dt} \\ i_0 = \frac{H \cdot l_m}{\omega_1} \\ i_2 = \frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot (i_1 - i_0) \end{cases}, \quad (42)$$

где S_m – площадь сечения магнитопровода;

l_m – средняя длина магнитопровода.

Для реализации полученных выражений в прикладном математическом ПО выполняем переход к дискретному представлению вычислений, для k -го шага вычисления система (42) примет вид:

$$\begin{cases} i_{2k} \cdot r_2 = \omega_2 \cdot S_m \cdot \frac{B_k - B_{k-1}}{\Delta t} \\ i_{0k} = \frac{H_{k-1} \cdot l_m}{\omega_1} \\ i_{2k} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot (i_{1k} - i_{0k}) \end{cases} \quad (43)$$

Преобразуем выражение (43), получаем:

$$\begin{cases} B_k = \frac{\Delta t \cdot r_2}{\omega_2 \cdot S_m} \cdot i_{2k} + B_{k-1} \\ i_{2k} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot \left(i_{1k} - \frac{H_{k-1} \cdot l_m}{\omega_1} \right) \end{cases} \quad (44)$$

С учетом представления характеристики намагничивания получаем:

$$\begin{cases} B_k = \frac{\Delta t \cdot r_2}{\omega_2 \cdot S_m} \cdot i_{2k} + B_{k-1} \\ i_{2k} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot \left(i_{1k} - \frac{l_m}{\omega_1} \cdot (2,534 \cdot 10^{-12} \cdot \sinh(20 \cdot B_{k-1}) + 67,736 \cdot B_{k-1}) \right) \end{cases} \quad (45)$$

Полученную схему уравнений используем для моделирования ТТ. Пример результата процесса насыщения на основе полученной системы уравнений представлен на рисунке 7. Для удобства сравнения полученных результатов значения вторичного тока и тока намагничивания приведены к первичному току.

На рисунке 7 приняты следующие обозначения:

- 1 – первичный ток;
- 2 – вторичный ток;
- 3 – ток намагничивания.

Также в модели используются: эквивалент энергосистемы, модель токопровода питающих ЗРУ.

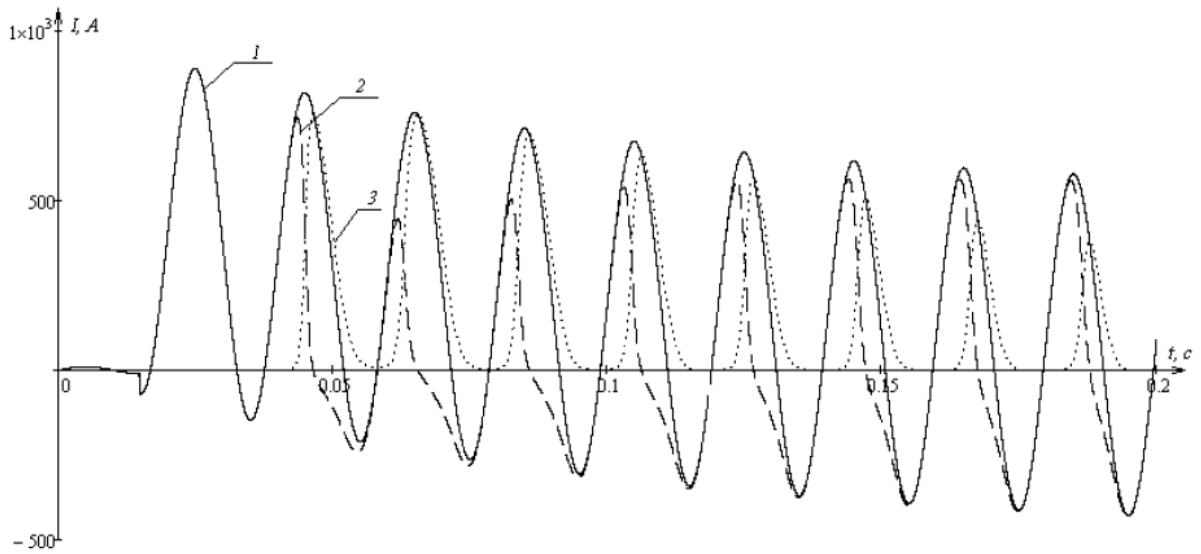


Рисунок 7 – Пример моделирования процесса насыщения ТТ

Энергоснабжающая организация для проверки чувствительности защит предоставляет значения тока трехфазного КЗ в максимальном и минимальном режиме. Максимальный режим соответствует нормальной схеме электроснабжения, в минимальном режиме часть электрических связей отключена. Для определения параметров энергосистемы воспользуемся наиболее тяжелым минимальным режимом.

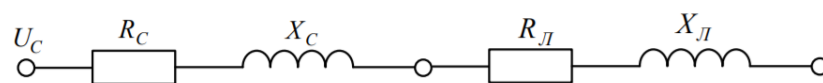


Рисунок 8 – Схема для определения параметров эквивалентного источника питания

Таблица 6 – Токи трехфазного КЗ в сети внешнего электроснабжения

Наименование объекта ВЭС	Напряжение сети, кВ	Ток трехфазного КЗ в максимальном режиме, кА	Ток трехфазного КЗ в минимальном режиме, кА
ПС 110/10/10 кВ «Мирная»	10,5	10,464	8,43

Сопротивление системы определяется по выражению:

$$x_c = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot I_{КЗ}^3}, \quad (46)$$

где x_c – сопротивление системы, приведенное к шинам источника;

U_c – линейное напряжение на шинах системы неограниченной мощности;

$I_{КЗ}^3$ – значение тока трехфазного короткого замыкания.

Согласно (46) получаем:

$$x_c = \frac{10,5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 8,43 \cdot 10^3} = 0,72 \text{ Ом.}$$

Сопротивление токопроводов, питающих ЗРУ, найдем воспользовавшись формулой:

$$x_{вл} = x_0 \cdot l; \quad (47)$$

$$r_{вл} = r_0 \cdot l; \quad (48)$$

где $x_{вл}$ – индуктивное сопротивление воздушной линии, Ом;

x_0 – удельное индуктивное сопротивление воздушной линии, Ом/км;

$r_{вл}$ – активное сопротивление воздушной линии, Ом;

r_0 – удельное индуктивное сопротивление воздушной линии, Ом/км;

l – длина воздушной линии, км.

Для гибкого токопровода АСО-2х600 $r_0=0,026$ Ом/км, $x_0=0,315$ Ом/км. Длина токопровода от ПС Мирная до ЗРУ-10 кВ НС НКК составляет 0,68 км. По формулам (47) и (48) определим общее активное и индуктивное сопротивления линии:

$$x_{вл} = 0,315 \cdot 0,68 = 0,2142 \text{ Ом;}$$

$$r_{вл} = 0,026 \cdot 0,68 = 0,01768 \text{ Ом.}$$

Соотношение активного и индуктивного сопротивления эквивалентного источника питания определены в соответствии с рекомендуемыми углами внутреннего сдвига реле направления мощности, которые для сетей 10 кВ рекомендуется устанавливать равными 45° . Для сетей 110 кВ этот угол находится в пределах от 75° до 82° , в расчетах примем его равным 78° .

Модель трансформатора с расщепленной обмоткой выполнена на основе встроенной модели «Three-Phase Transformer». Для систем, работающих в сетях с частотой 50 Гц, шаг дискретизации выполняется от 20 до 50 мкс. Для исключения колебаний при моделировании электрических машин, рекомендуется включение резистора в ветви питания двигателя, при этом необходимо обеспечить, чтобы на резисторе выделялось не менее 5% мощности машины. Эта мощность примерно соответствует мощности несинхронной нагрузки, которая питается от секции шин, поэтому в данной работе возможно выполнение данной рекомендации.

Возникновение аварийного режима фиксируется по снижению активной мощности ниже доаварийного значения, при этом начинается расчет площади торможения. Площадь торможения рассчитывается до момента когда мощность вырастет выше доаварийного значения, после этого начинается расчет ускорения. Расчет площадей выражается формулами:

$$S_{\text{тор}} = \int_{t_0}^{t_1} P_{\text{доав}} dt; \quad (49)$$

$$S_{\text{уск}} = \int_{t_1}^{t_2} (P(t) - P_{\text{доав}}) dt; \quad (50)$$

где t_0 – момент возникновения аварийного процесса;

t_1 – момент времени, при котором текущая мощность превышает доаварийную;

$P_{\text{доав}}$ – значение доаварийной мощности;

t_2 – момент времени, при котором значение угла нагрузки принимает максимальное значение, либо значения текущей мощности ниже доаварийной;

$P(t)$ – текущее значение активной мощности, которое потребляет электродвигатель.

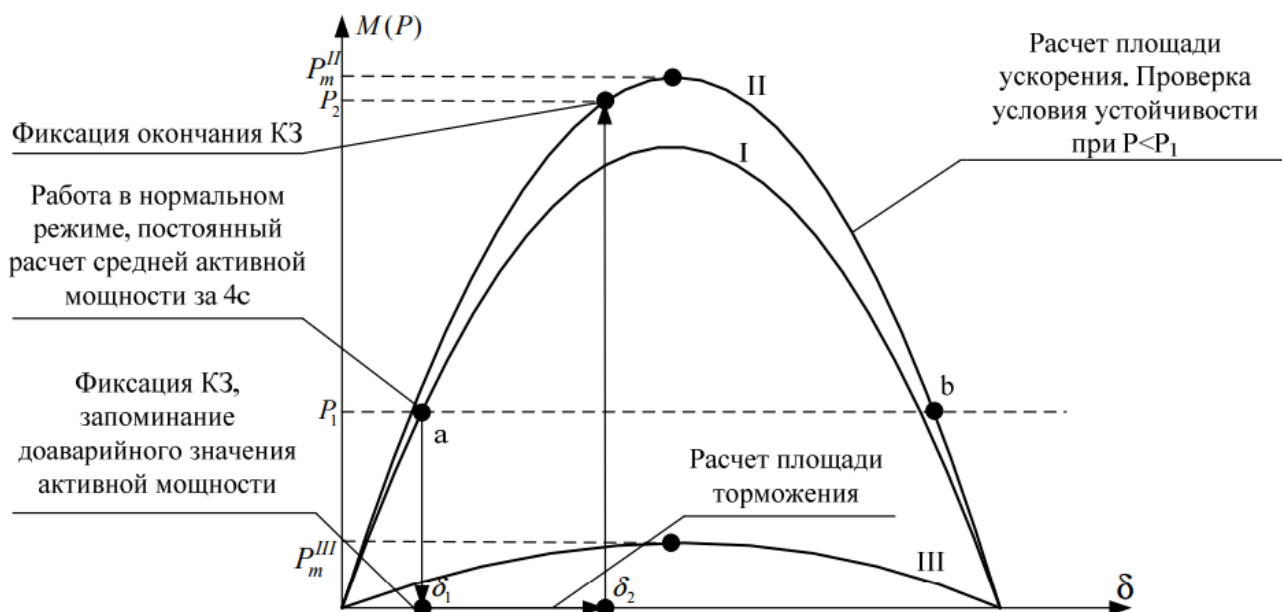


Рисунок 8 – Схема работы электродвигателя. (I – доаварийный режим, II – послеаварийный режим, III – аварийный режим)

После завершения расчетов, сравниваются площади ускорения и торможения и принимается решение о успешности процесса синхронизма.

Рассмотрим функцию опережающего отключения. Описание функции описано в источниках [20] и [21]. Функция состоит из трех ступеней: грубая, точная и резервная, при этом работа функции разделена на несколько режимов: нормальный, аварийный и послеаварийный.

Грубая ступень предсказывает переход СД в асинхронный режим по факту достижения приращения абсолютного угла ротора СД уставки, определяемой автоматически по значению нагрузки СД в доаварийном режиме:

$$\Delta\delta_{\text{сраб}} = 2,8 - 1,1 \frac{P_{\text{доав.}}}{P_{\text{н}}}. \quad (51)$$

При этом приращение угла $\Delta\delta$ рассчитывается во время переходного процесса по выражениям:

$$\Delta\delta = \int_{t_0}^t s \, dt; \quad (52)$$

$$s = \frac{1}{T_J} \int_{t_0}^t (P_{\text{доав}} - P + R_{\text{экв}} \cdot \sum i^2) \cdot dt; \quad (53)$$

где s – скольжение ротора синхронного двигателя в текущий момент времени;

P – текущая мощность синхронного двигателя в переходном процессе;

$R_{\text{экв}}$ – эквивалентное сопротивление активных потерь СД в аварийном режиме;

$\sum i^2$ – сумма квадратов мгновенных значений фазных токов двигателя;

T_J – постоянная инерции двигателя с приводом.

Постоянная инерции определяется по формуле:

$$T_J = \frac{GD_{\text{дв}}^2 \cdot n_{\text{ном.дв}}^2 + GD_{\text{мех}}^2 \cdot n_{\text{ном.мех}}^2}{365 \cdot P_{\text{ном.дв}}}. \quad (54)$$

Например, зачастую аварийным режимом потери питания является короткое замыкание во внешней сети, для нефтеперекачивающих станций с СТД-8000 $T_J=2,44$ с. Эквивалентное сопротивление активных потерь в СД во время КЗ определяется по формуле:

$$R_{\text{экв}} = (R_{\text{экв.дв}} + R_{\text{экв.сети}}) \cdot \frac{K_I}{K_U}, \quad (55)$$

где K_I – коэффициент трансформации трансформаторов тока;

K_U – коэффициент трансформации трансформаторов напряжения;

$R_{\text{экв.дв}}$ – приведенное к напряжению статора эквивалентное сопротивление активных потерь в СД, определяется по паспортным данным. Для двигателя СТД-8000 $R_{\text{экв.дв}}=0,197$ Ом;

$R_{э\text{кв.сети}}$ – активное сопротивление внешней сети от зажимов электродвигателя до точки подключения измерительных трансформаторов напряжения.

Точная ступень предсказывает переход СД в асинхронный режим путем сравнения соотношения между избыточной и предельно допустимой энергиями движения ротора с заданной уставкой срабатывания. При этом для устойчивой работы СД необходимо выполнение условия:

$$\frac{S_y - S_T}{S_y} \geq k_d, \quad (56)$$

где k_d – коэффициент динамической устойчивости, рекомендуется в расчетах принять равным 0,22.

Резервная ступень формирует команду на отключение вакуумного выключателя синхронного двигателя по факту начала асинхронного проворота путем анализа изменений тока, напряжения и активной мощности.

Пуск функции опережающего отключения производится при возникновении короткого замыкания во внешней сети, которое фиксируется по факту одновременного скачкообразного снижения напряжения и активной мощности.ю а также при увеличении хотя бы одного из фазных токов выше, чем ном $2 \cdot I_{ном}$.

После пуска, по результатам измерений тока и напряжения СД во время переходного процесса, производится накопление информации, необходимой для работы точной ступени. В течение этого периода согласно итогов измерений производится проверка условия срабатывания грубой ступени и, если оно выполняется, то выдается команда на отключение СД. После накопления необходимой информации, оценку производит точная ступень.

Отметим, что увеличение угла до значения, когда мощность снизится ниже доаварийной происходит за время меньшее 0,3 с. После возврата точной ступени в течение 0,4 с резервная ступень оценивает состояние СД и, в случае необходимости, формирует команду на его отключение. Резервная ступень

функции опережающего отключения срабатывает, если в течение трех периодов сети (60 мс) одновременно выполняются следующие условия:

- $P < P_{доав}$;
- $U_1 < 0,8 U_H$;
- $I_1 > 1,5 I_H$;

Как видно из описания функции первая ступень действует согласно определенного в доаварийном режиме предельному углу, превышение которого ведет к неизбежной потере устойчивости.

Для рассмотрения применяемых в настоящее время алгоритмов контроля устойчивости применялись сведения при проведении комплексных испытаний проверки устойчивой работы НПС при отключении одного из источников внешнего электроснабжения. Для анализа использовалась программа FastView 4.2, разработанная компанией ООО «НПЦ «Механотроника».

Испытания показали, что при кратковременной потере питания вследствие отключения источника электроснабжения, угловая характеристика работы ЭД имеет вид показанный на рисунке 9. Площадь торможения показана упрощенно.

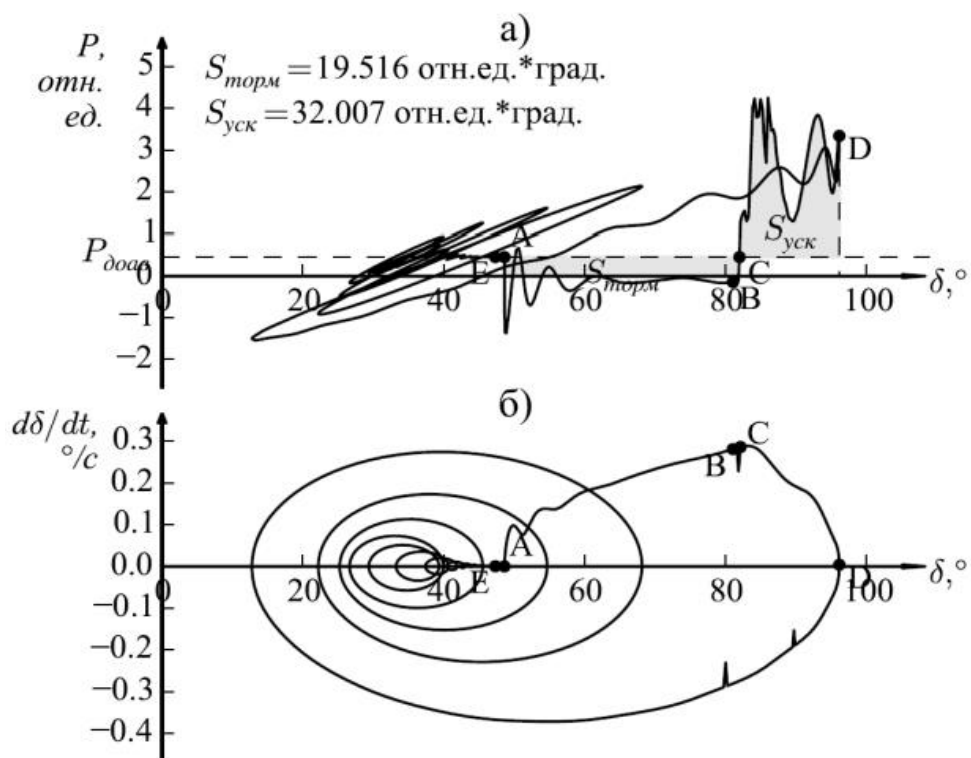


Рисунок 9 – Угловая характеристика ЭД при кратковременной потере питания

Номер отсчета, соответствует характерным точкам характеристики А, В, С, D, Е, выбранными на рисунке 9 вручную. Доаварийный режим работы двигателя соответствует точке А. Мощность двигателя в этом режиме равна половине номинальной. Восстановлению питания на двигателе соответствует точка В. Как видно из графика, некоторый период времени после восстановления питания угол нагрузки продолжает увеличиваться, далее уменьшается и после собственных колебаний угла и мощности, обусловленных инерцией механизма и регулированием возбуждения стягивается в точку Е.

При моделировании были приняты допущения:

- расчет участка торможения начинается при уменьшении активной мощности на 20% за время менее 50 мс;
- расчет участка ускорения начинается при увеличении активной мощности выше доаварийного значения (точка С);
- непосредственно момент восстановления питания не важен для работы функции, поэтому положение точки В не рассчитывается;
- расчет площади ускорения осуществляется до достижения максимального значения угла нагрузки (точка D) либо до достижения угла нагрузки, соответствующего доаварийной мощности;
- на первом этапе в алгоритм вводится значение угла нагрузки, полученное на модели подстанции, реализованной в Matlab, на втором этапе расчет угла осуществляется в соответствии с приведенными в [22] формулами:

$$\vec{E} = \vec{U} + j \cdot X_d \cdot \vec{I}; \quad (57)$$

$$\delta = \text{angle}(\vec{E}; \vec{U}); \quad (58)$$

где \vec{U} – вектор напряжения прямой последовательности на вводах двигателя;

X_d – синхронное индуктивное сопротивление двигателя по продольной оси;

\vec{I} – ток потребляемый двигателем;

$\text{angle}()$ – функция вычисления угла между векторами.

Для случая, представленного на рисунке 9 значение площади торможения равняется 19,516 отн.ед.·град., площади ускорения – 32,007 отн.ед.·град. Таким образом, согласно правилу площадей, устойчивость работы сохраняется. Подчеркнем, что полученная площадь ускорения значительно больше площади торможения, что никак не согласуется с данными, получаемыми другими учеными. На самом деле, к моменту достижения наибольшего угла δ , скорость приращения δ должна быть равна нулю, для чего необходимо, чтобы область торможения была равна области ускорения (если пренебречь потерями в ЭД). Как видно из рисунка 9 б), скорость приращения действительно равна нулю в точке максимального угла D, после чего становится отрицательной. Проведем далее уточнение расчета площадей. Поскольку при расчете площадей, приведенных на рисунке 9, пренебрегли активными потерями в двигателе, уменьшим активное сопротивление обмотки статора модели синхронного двигателя до 0 (физичность такого эксперимента учитывать не будем). Результаты приведены на рисунке 10.

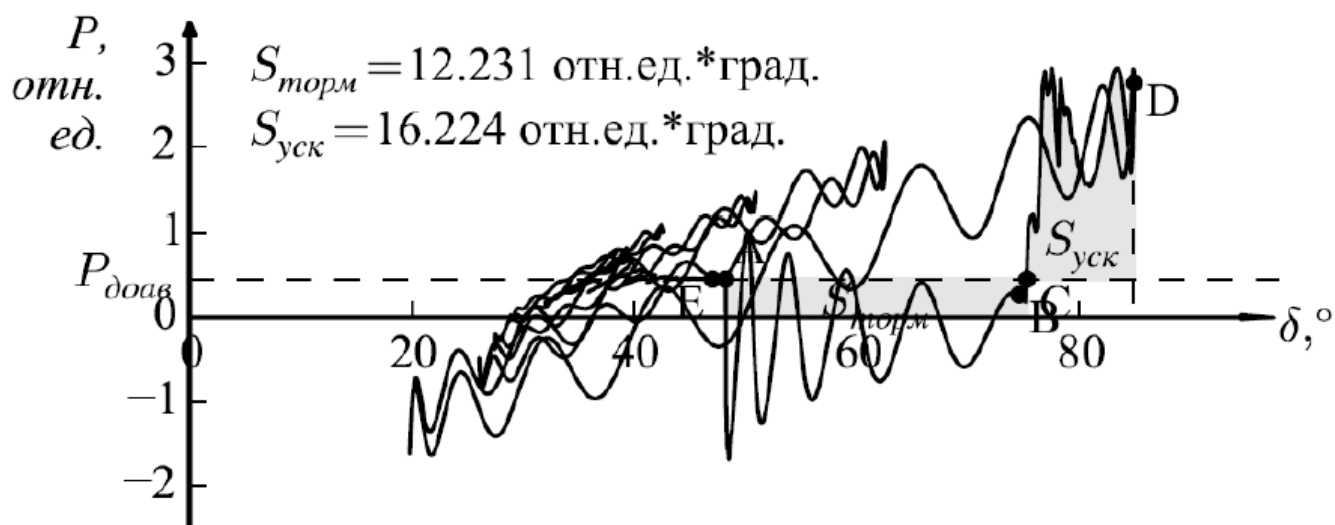


Рисунок 10 – Угловая характеристика при $R_{\text{статора}}=0$

Определим площадь торможения более точно – полностью проинтегрировав наблюдаемые колебания мощности в режиме потери питания.

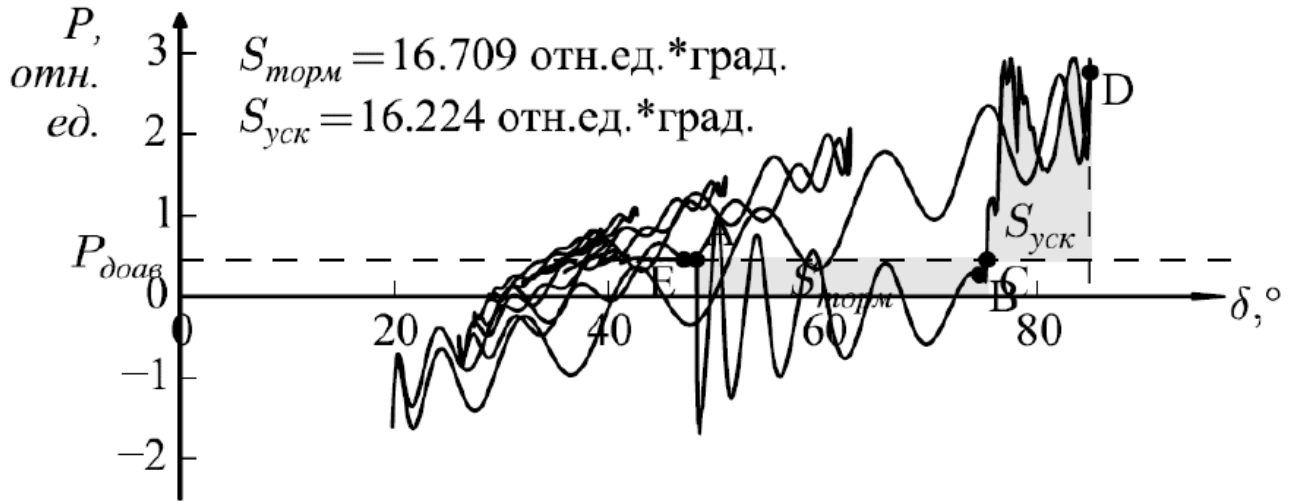


Рисунок 11 – Угловая характеристика с уточнением площади торможения

Погрешность полученных площадей составляет не более 3%.

Итогом моделирования является характеристика при трехфазном коротком замыкании в сети 110 кВ представленная на рисунке 12.

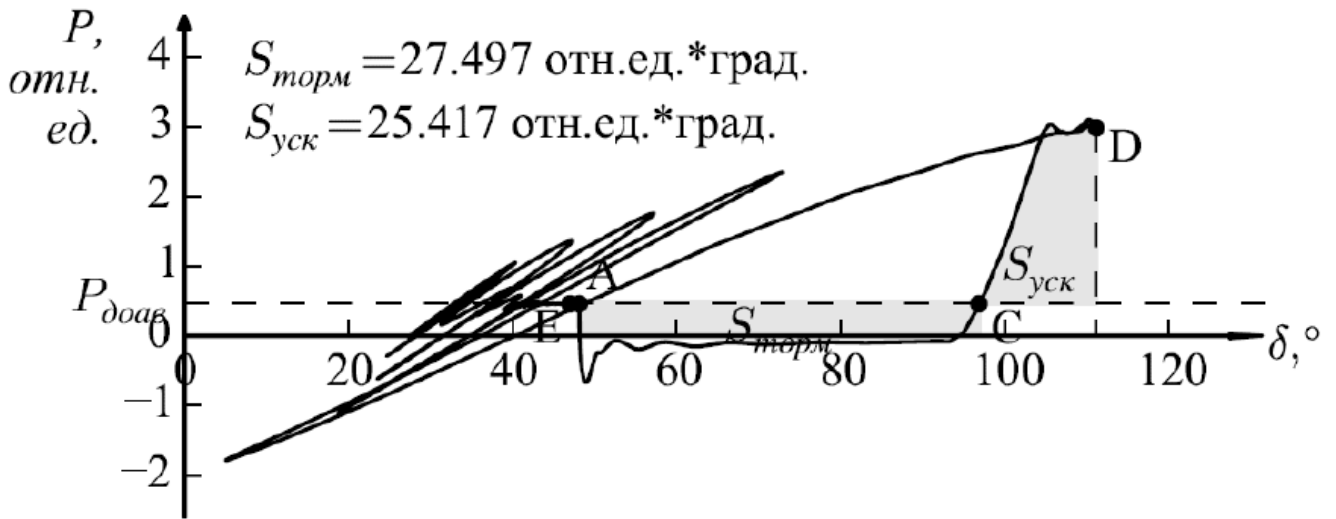


Рисунок 12 – Угловая характеристика при трехфазном КЗ в сети 110 кВ

По итогам моделирования видно, что самозапуск электродвигателя прошел успешно, несмотря на то что площадь торможения превышает площадь ускорения. Также стоит отметить, что в данной модели не учитывается отрицательное значение мощности подпитки места КЗ от СД, которое также создает дополнительное торможение, также не учитываются доаварийные

значение превышения мощности в момент переходного процесса, изображенного на рисунке 9.

Далее рассмотрим работу функции опережающего отключения. При вводе значения угла δ из модели СД представлен на рисунках 12

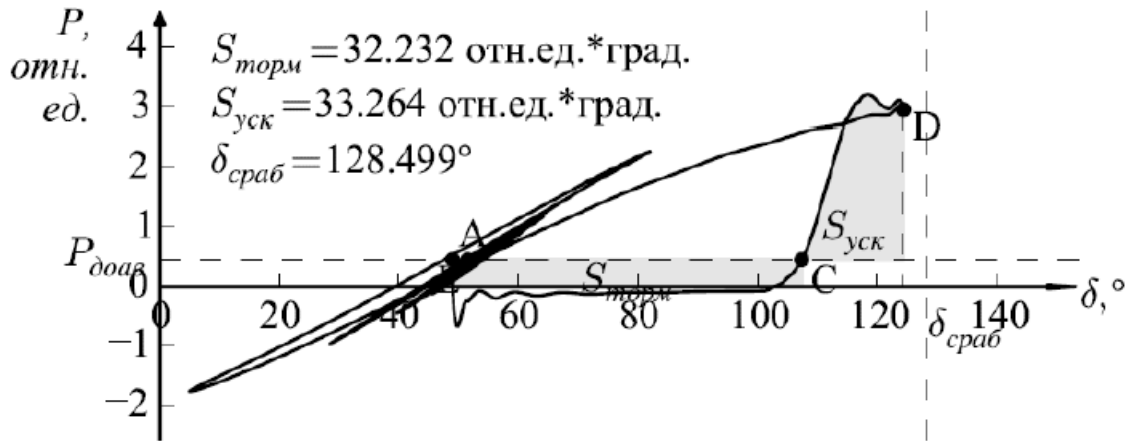


Рисунок 12 – Угловая характеристика при некорректной работе функции опережающего отключения

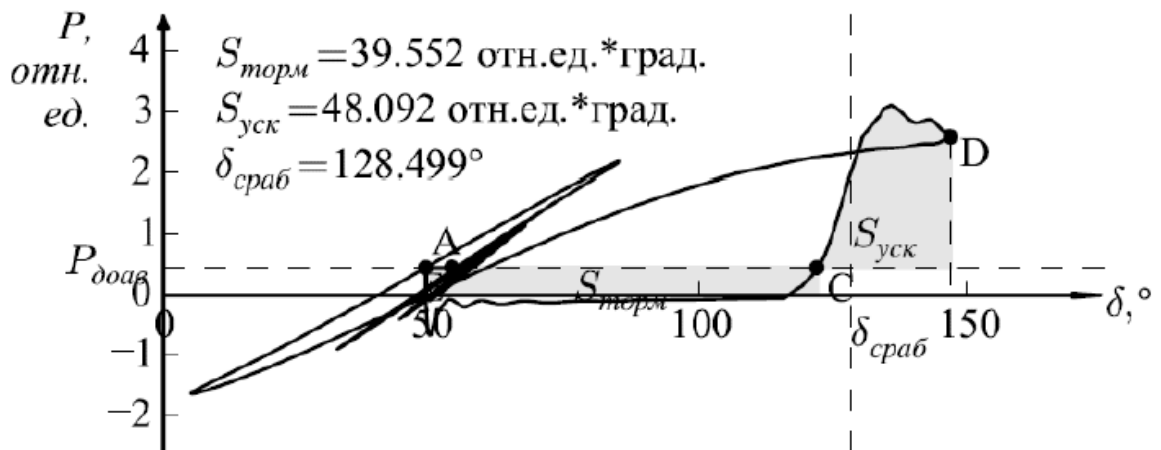


Рисунок 13 – Угловая характеристика при корректной работе функции опережающего отключения

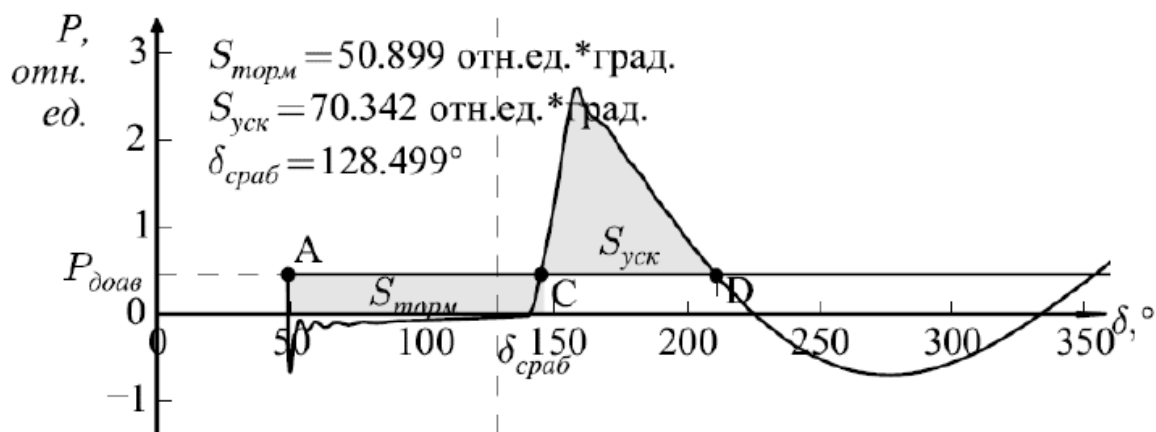


Рисунок 14 – Угловая характеристика при корректной работе функции опережающего отключения, но нарушением устойчивости СД

По полученным графикам видно, что грубая ступень срабатывает корректно при нарушении устойчивости и в случае ее сохранения. Моделирование проводилось при отсутствии форсировки возбуждения.

Произведём моделирование при отключении источника питания с форсировкой возбуждения. Результаты моделирования приведены на рисунке 15.

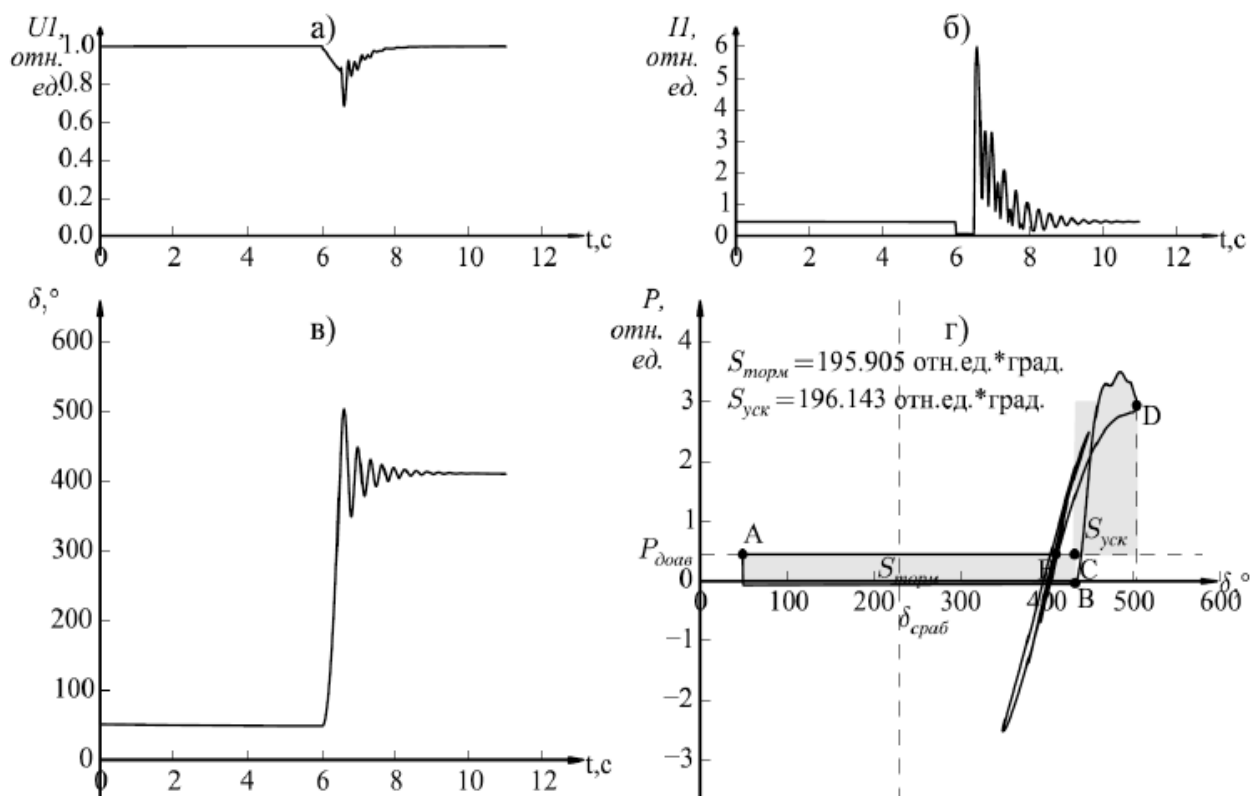


Рисунок 15 – Моделирование при отключении источника внешнего электроснабжения

Выводы по разделу два

1) В процессе работы выполнено моделирование нарушения устойчивости СД при коротких замыканиях и отключении питающего источника. В случае сохранения устойчивости площадь торможения меньше или больше не более чем на 10% площади ускорения. Таким образом невозможно судить о сохранении устойчивости только сравнением площадей ускорения и торможения.

2) В случае колебания мощности происходят кратковременные возвраты мощности к значению выше доаварийного, это приводит к некорректному определению положению точки С и неверному расчету площадей.

3) Существующие алгоритмы контроля устойчивости при работе СД некорректно производят расчет угла δ , что также приводит к неверному расчету площадей

3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА КОНТРОЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ

В разделе 2 было выяснено что для корректной работы алгоритма контроля устойчивости необходим точный расчет угла δ в доаварийном и аварийном режимах. Для вычисления угла в аварийном режиме, воспользуемся методом математической модели двигателя для определения текущего угла ротора и методом последовательных интервалов.

Суть метода последовательных интервалов заключается в том, что ускорение ротора пропорционально избыточному моменту и может быть определено по формуле:

$$s = \frac{\Delta P}{T_J}, \quad (59)$$

где ΔP – текущее значение активной мощности.

Текущее значение приращения ротора при этом будет равняться:

$$\Delta\delta = \frac{360 \cdot f \cdot \Delta t^2}{2 \cdot T_J} \cdot (P_{\text{доав}} - P). \quad (60)$$

Для численного интегрирования применяется метод Эйлера, как наиболее простой. При этом получается:

$$\delta_i = \delta_{i-1} + \frac{360 \cdot f \cdot \Delta t^2}{2 \cdot T_J} \cdot (P_{\text{доав}} - P). \quad (61)$$

Учет доаварийного значения активных потерь повышает точность расчетов.

Смысл метода с использованием математической модели заключается в вычислении текущего значения момента СД с использованием уравнений Парка-Горева:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = L_{\sigma d} \cdot \frac{d}{dt} I_d + M_{ad} \cdot \frac{d}{dt} I_d + M_{ad} \cdot \frac{d}{dt} I_f - L_q \cdot I_q \cdot \omega + r_a \cdot I_d \\ U_q = L_{\sigma d} \cdot \frac{d}{dt} I_q + M_{aq} \cdot \frac{d}{dt} I_q + L_d \cdot I_d \cdot \omega + M_{ad} \cdot I_f \cdot \omega + r_a \cdot I_q \\ U_f = L_{\sigma d} \cdot \frac{d}{dt} I_f + M_{ad} \cdot \frac{d}{dt} (I_f + I_d) + r_f \cdot I_f \\ M_{эл} = (U_d - r \cdot I_d) \cdot I_d + (U_q - r \cdot I_q) \cdot I_q \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_{эл} - M_{мех} \end{array} \right. , \quad (62)$$

параметры модели двигателя приняты в соответствии [23].

Есть несколько способов определения положения ротора без датчиков. Для неявнополюсных СД возможно применение различных методов, например метода приведенного в [24]. Порядок выполнения расчетов изображен на рисунке 15.

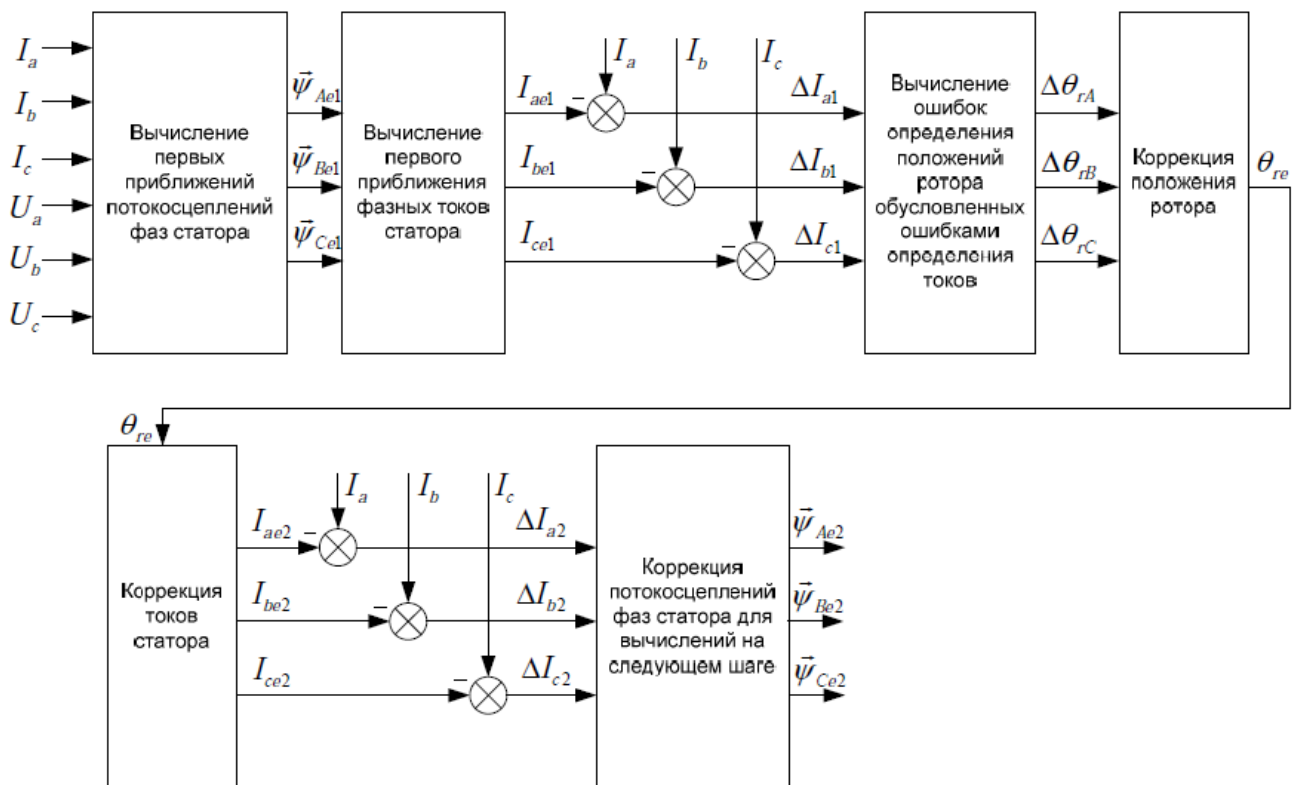


Рисунок 15 – Структурная схема алгоритма, определяющего положение ротора

Порядок работы алгоритма основан на измерении мгновенных значений тока и напряжения статора, осуществляется расчет первого приближения потокосцепления обмоток статора по формулам:

$$\psi_{Ae1} = \int (u_a - R_s \cdot i_a) dt; \quad (63)$$

$$\psi_{Be1} = \int (u_b - R_s \cdot i_b) dt; \quad (64)$$

$$\psi_{Ce1} = \int (u_c - R_s \cdot i_c) dt. \quad (65)$$

Далее осуществляется определение мгновенных значений токов статора (первая оценка) по формулам:

$$I_{Ae1} = \frac{\psi_{Ae1} - \psi_F \cdot \cos(\theta_{r0})}{L_s}; \quad (66)$$

$$I_{Be1} = \frac{\psi_{Be1} - \psi_F \cdot \cos(\theta_{r0})}{L_s}; \quad (67)$$

$$I_{Ce1} = \frac{\psi_{Ce1} - \psi_F \cdot \cos(\theta_{r0})}{L_s}. \quad (68)$$

Дальше проходит обработка полученных результатов и определение ошибок.

1) Ошибка определения тока статора:

$$i_{A1} = i_A - i_{Ae1}. \quad (69)$$

2) Ошибка определения угла поворота ротора:

$$\Delta\theta_{rA1} = -\frac{L_s \cdot \Delta i_{sA1}}{\psi_F \cdot \sin(\theta_{r0})}. \quad (70)$$

3) Общая ошибка нахождения угла:

$$\Delta\theta_r = \frac{1}{3} \cdot (\Delta\theta_{rA1} + \Delta\theta_{rB1} + \Delta\theta_{rC1}). \quad (71)$$

4) Выполняется коррекция угла поворота ротора:

$$\theta_r = \theta_{r0} + \Delta\theta_r. \quad (72)$$

Затем определяются мгновенные значения токов статора (вторая оценка):

$$I_{Ae2} = \frac{\psi_{Ae1} - \psi_F \cdot \cos(\theta_r)}{L_s}; \quad (73)$$

Определяется ошибка определения токов статора:

$$i_{A2} = i_A - i_{Ae2}. \quad (74)$$

Выполняется коррекция потокосцепления фаз статора для следующего шага:

$$\psi_{Ae2} = \psi_{Ae1} + L_s \cdot \Delta i_{A2}. \quad (75)$$

На рисунке изображен график угловой характеристики при различных способах определения угла .

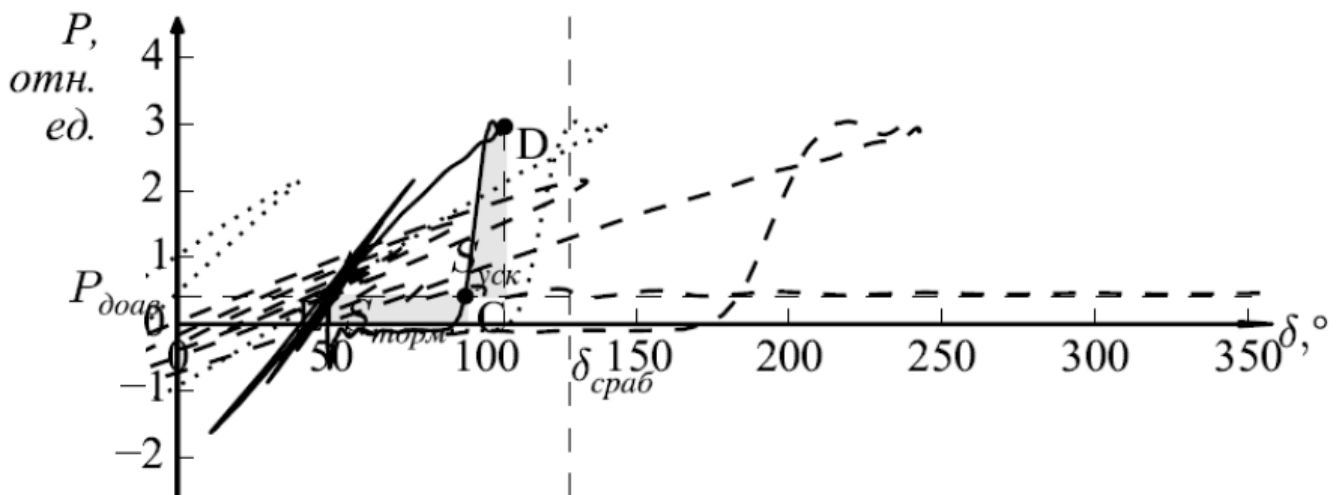


Рисунок 16 – Сравнение различных способов расчета угла δ

На рисунке штриховой линией показан график, рассчитанный согласно начального алгоритма, точками показан график на основе уравнений Прака-Горева. Таким образом наибольшая точность дает расчет угла на основе уравнений Прака-Горева. Также достоинством данного расчета является отсутствие необходимости переключения между разными способами определения угла при разных режимах работы.

В итоге получается схема контроля устойчивости СД представленная на рисунке 17.

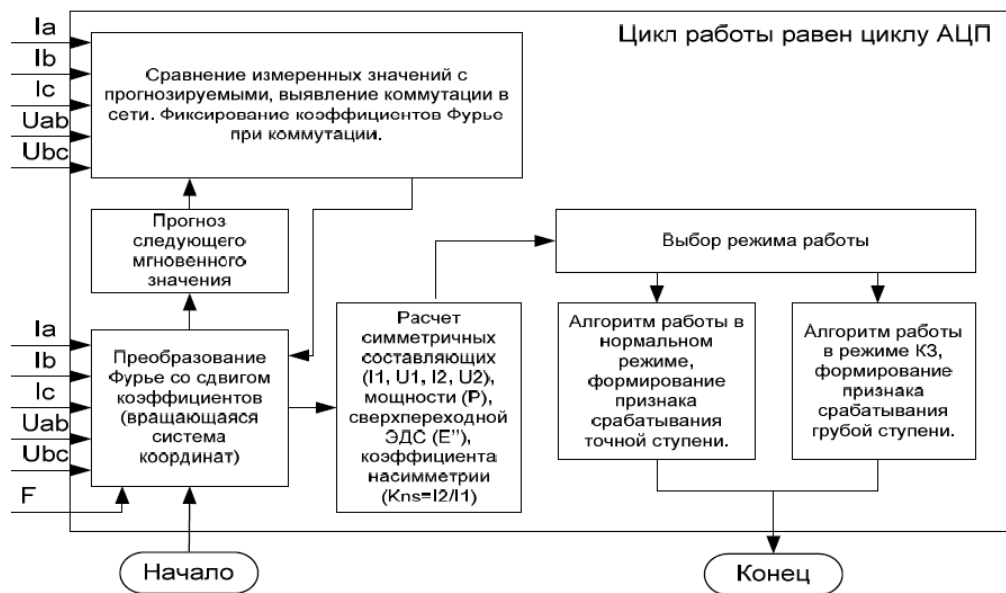


Рисунок 17 – Алгоритм контроля устойчивости

Выводы по разделу три

В данном разделе был предложен алгоритм контроля устойчивости синхронного электродвигателя при кратковременной потере питания. На основании данного алгоритма и уже получившейся модели, имеется возможность выявить наиболее безопасный метод автоматического включения резерва, при котором не будет утяжеленных переходных процессов и позволит увеличить срок эксплуатации синхронного электродвигателя.

4 ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НПС

4.1 Предлагаемый метод оптимизации

Применяемые в настоящее время схемы электроснабжения узлов нагрузки от двух независимых источников электрической энергии с использованием штатного автоматического ввода резерва обладает высокой надежностью, но не обеспечивают бесперебойное электроснабжение двигателей и несут значительные экономические потери при нарушении технологического процесса. Также данная система автоматики является причиной возникновения гидравлических ударов, что в свою очередь может повлечь повреждения трубопровода. Для обеспечения непрерывности технологического процесса и улучшения условий самозапуска в рамках данной работы предлагается использование микропроцессорный устройств быстрого действия ввода резерва.

Быстродействующий АВР предназначен для повышения надежности СЭС с синхронной нагрузкой и обеспечения устойчивости путем софазного включения резервного источника питания. Для этого требуется оперативно выявить факт исчезновения (уменьшения) напряжения со стороны основного питания, проверить отсутствие повреждений на шинах ЗРУ, отключить основной источник питания и включить резервный. Включение резервного источника питания производится до момента расхождения угла между напряжениями резервного источника питания и напряжения, генерируемого электродвигателем на секцию шин. Основой БАВР является быстродействие устройств защиты и автоматики.

На сегодняшний день эксплуатируются два вида БАВР:

- 1) с использованием высоковольтных тиристоров. Высоковольтный тиристорный выключатель устанавливается параллельно штатному секционному выключателю (резервному вводу). Быстродействие открытия тиристоров обеспечивает синхронный переход на резервный источник питания без гашения поля возбуждения у СД. ТАВР имеет следующий алгоритм работы: после выявления аварии на основном вводе, подается команда на его отключение. При

синхронизме напряжений до резервного ввода и генерируемого электродвигателем происходит открытие высоковольтных тиристоров. После открытия тиристоров подается команда на включение резервного источника электроснабжения и после его включения работа ТАВР прекращается.

2) с использованием вакуумных выключателей. Взамен обычного секционного выключателя (резервного ввода) устанавливается быстродействующий вакуумный выключатель. Помимо быстрого включения вакуумный выключатель должен обеспечивать стабильное время включения. После выявления аварии на основном источнике питания происходит отключение вакуумного выключателя ввода. Происходит включение источника резервного питания, таким образом что в момент его включения угол рассогласования напряжений составит не более 15° .

За время эксплуатации ТАВР показал низкую надежность за счет перегорания цепи высоковольтных тиристоров. Также для обеспечения работы ТАВР требуется установка двух дополнительных ячеек ЗРУ (на защитный вакуумный выключатель ТАВРа и на сам ТАВР). Поэтому в рамках данной работы принято решение рассмотреть работу БАВР с использованием вакуумного выключателя.

Структурная схема БАВР приведена на рисунке 18.

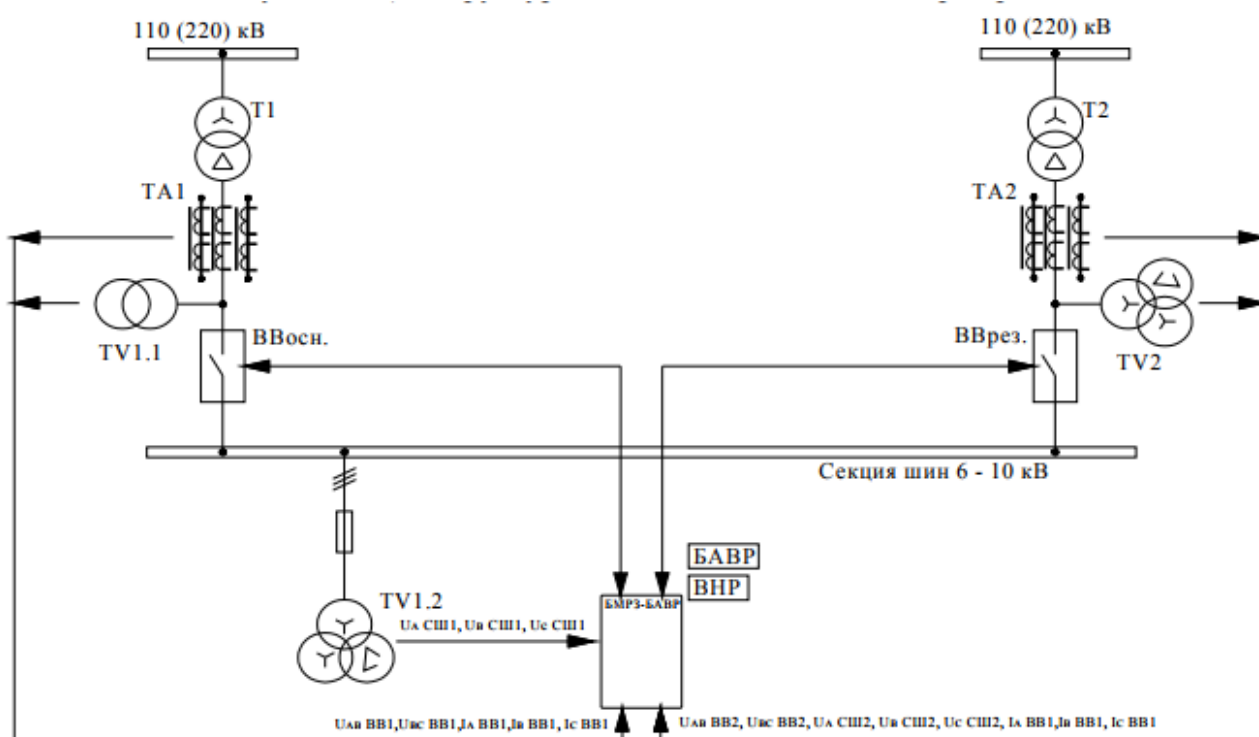


Рисунок 18 – Структурная схема БАВР с явным резервом

Пуск БАР осуществляется по фату срабатывания релейной защиты подстанции со стороны ВН и дискретным сигналом подается на блок микропроцессорный релейной защиты, при снижении напряжения прямой последовательности на секции ниже уставки и направлении мощности прямой последовательности на вводе, при изменении угла между ветрами напряжений прямой последовательности СШ и направления мощности прямой последовательности на вводе в сторону питания. Диаграмма реле направления мощности изображена на рисунке 19.

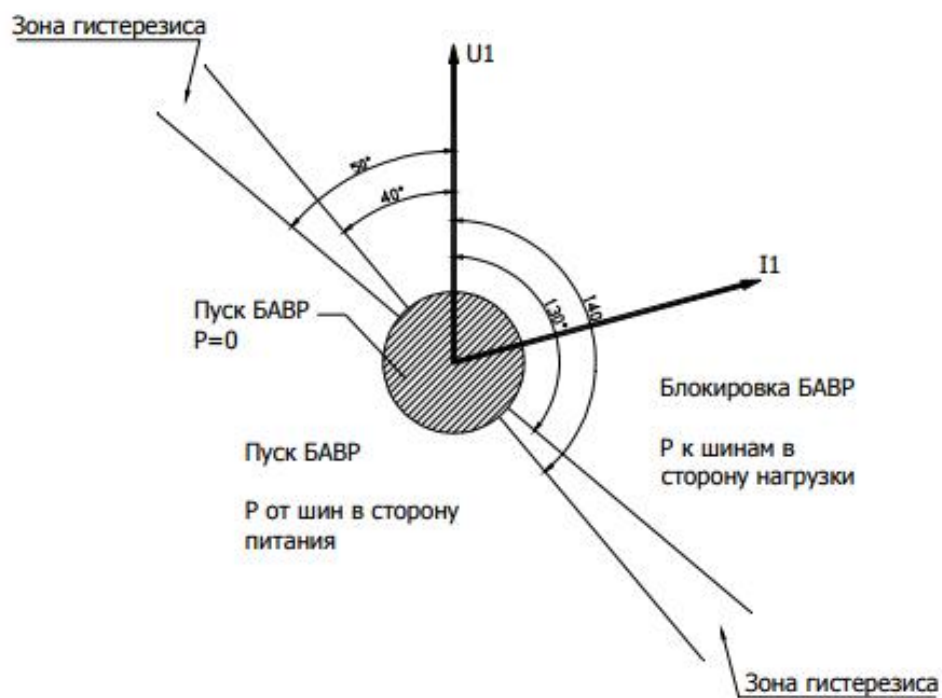


Рисунок 19 – Диаграмма реле направления мощности

4.2 Результаты исследования работы оборудования НПС

Для исследования по разработанному алгоритму были проведены следующие эксперименты:

1. Перерыв электроснабжения;
2. Трехфазное КЗ;
3. Двухфазное КЗ.

При моделировании короткого замыкания сопротивление в месте замыкания принималось равным 0,0001 Ом. Из [82] известно, что устойчивость зависит от длительности процесса короткого замыкания, причем от 0,3 до 0,4 с, угол δ принимает значение 180°. Для оценки возможности самозапуска при АВР и БАВР отключение КЗ предполагается от 0,05 с, что соответствует минимальному времени отключения КЗ, до 0,5 с, что соответствует времени работы АВР.

При проведении экспериментов также анализировалось время работы АВР и БАВР и корректность работы релейной защиты.

По результатам моделирования составлена таблица 7.

Таблица 7 – Результаты экспериментов

АВР/ БАВР	$T_{\text{вост}}$	Тип возму- щения	Место КЗ	Кол-во работа- ющих СД	Результаты экспериментов приведены на рисунке	Наруше- ние устойчи- вости	Выявление нарушения устойчивости
АВР	0,5	Потеря питания	–	1	21	ДА	ДА
БАВР	0,163		–	1	22	НЕТ	НЕТ
АВР	0,5		–	2	23	ДА	ДА
БАВР	0,164		–	2	24	ДА	ДА
АВР	0,15	3-х фазное КЗ	На линии питающей ЗРУ	1	25	ДА	ДА
БАВР	0,107			1	26	НЕТ	НЕТ
АВР	0,5	2-х фазное КЗ		1	27	ДА	ДА
БАВР	0,221			1	38	НЕТ	НЕТ

Предлагаемый метод позволяет исключить избыточные срабатывания устройств РЗА, а также вероятность возникновения асинхронного хода с форсировкой возбуждения. Предлагаемая модель организации релейной защиты показана на рисунке 20.

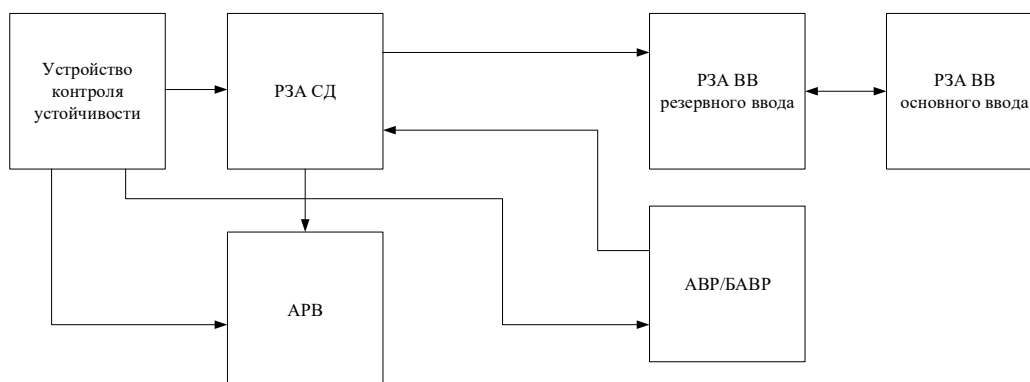


Рисунок 20 – Диаграмма системы поддержания устойчивой работы СД

Алгоритм предполагает:

1. При возникновении внешнего КЗ, устройство контроля устойчивости фиксирует аварийный режим и передает сигнал БАВР;
2. БАВР осуществляет отключение вводного выключателя рабочего ввода и производит включение выключателя ввода резервного;
3. Если устройство контроля устойчивости не выявляет возможность синхронного включения, выдается блокировка на работу БАВР. В этом случае бесперебойное электроснабжение осуществляется средствами штатного АВР, вводной выключатель отключается по ЗПП, по пуску ЗПП ЦРВД инвертированием тиристора производится ашение поля СД. При снижении напряжения на секции шин до безопасной величины происходит включение выключателя резервного ввода и осуществляется асинхронный самозапуск СД.

Выводы по разделу четыре

На основании проведенных модуляций сделаны следующие выводы:

При потере питания, возможно сохранение устойчивой работы двигателя при превышении внутренним углом значения 180° - после нескольких проворотов ротора двигатель вновь входит в синхронизм

При всех видах аварийного режима алгоритм корректно выявил сохранение или потерю устойчивости синхронным электродвигателем.

При расчете уставок в соответствии с методиками [25] и [26] обеспечивается корректная работа ЭД вне зависимости от режима.

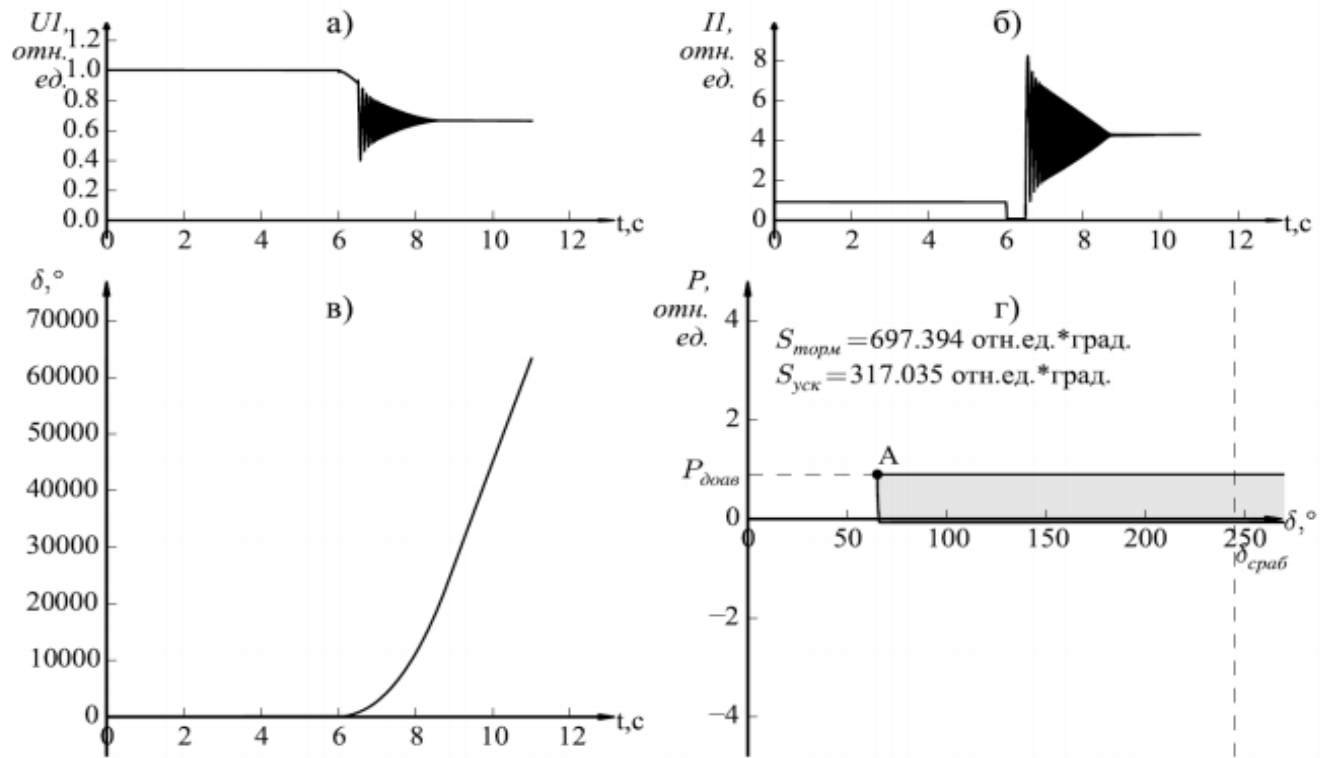


Рисунок 21 – Моделирование отключения питающего источника с одним рабочим СД (АВР)

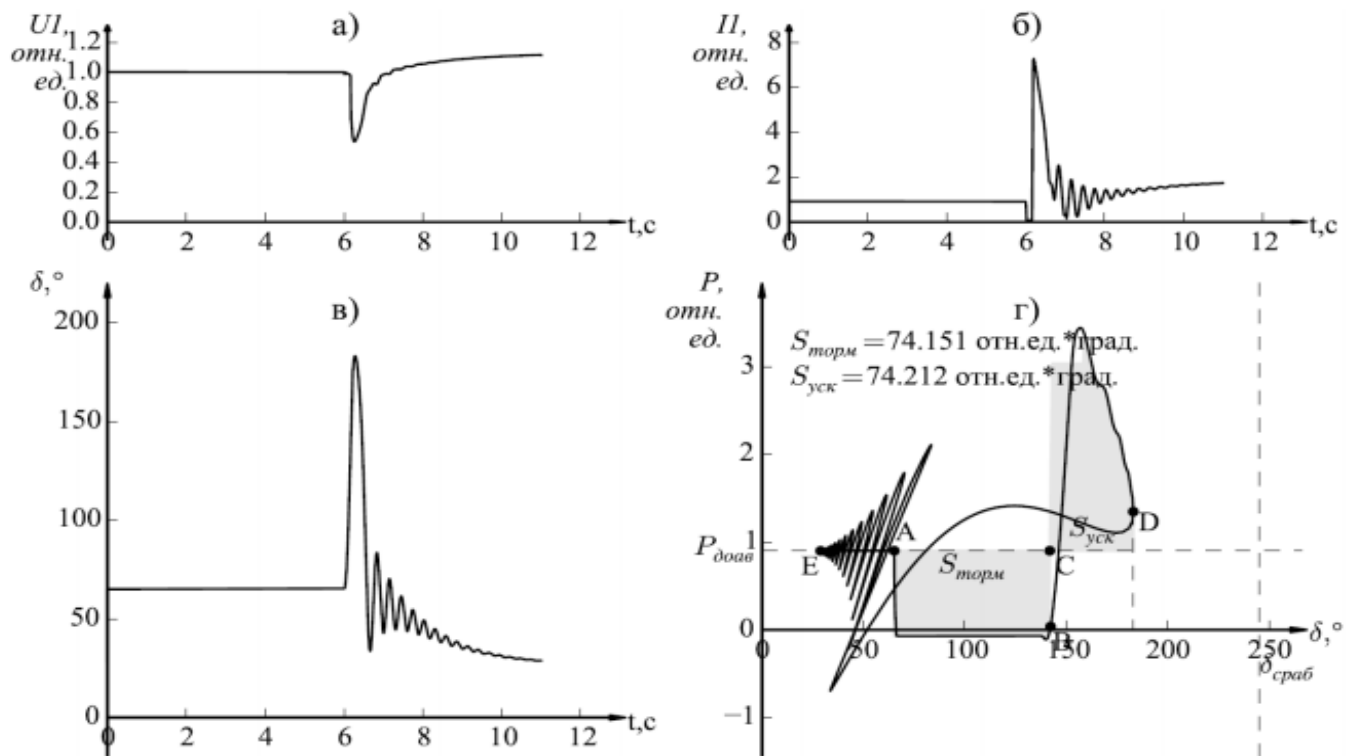


Рисунок 22 – Моделирование отключения питающего источника с одним рабочим СД (БАВР)

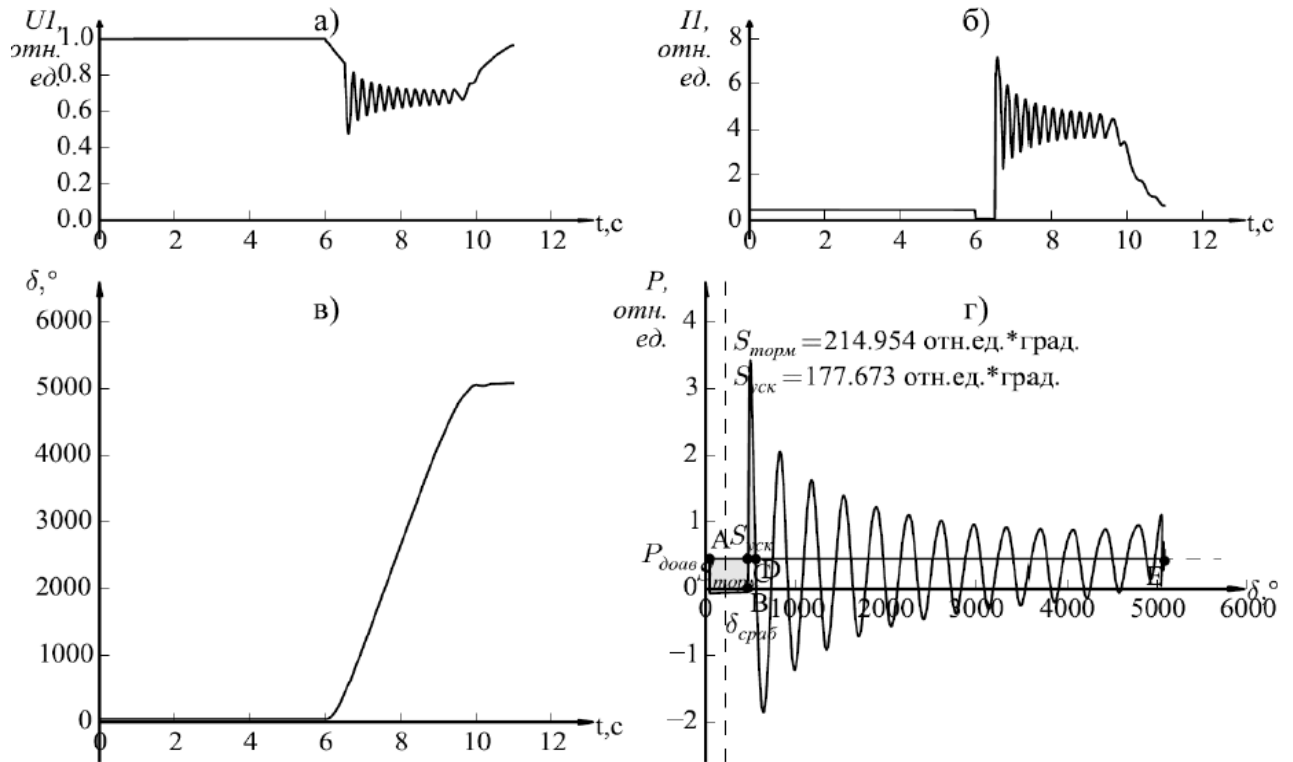


Рисунок 23 – Моделирование отключения питающего источника с двумя рабочими СД (АВР)

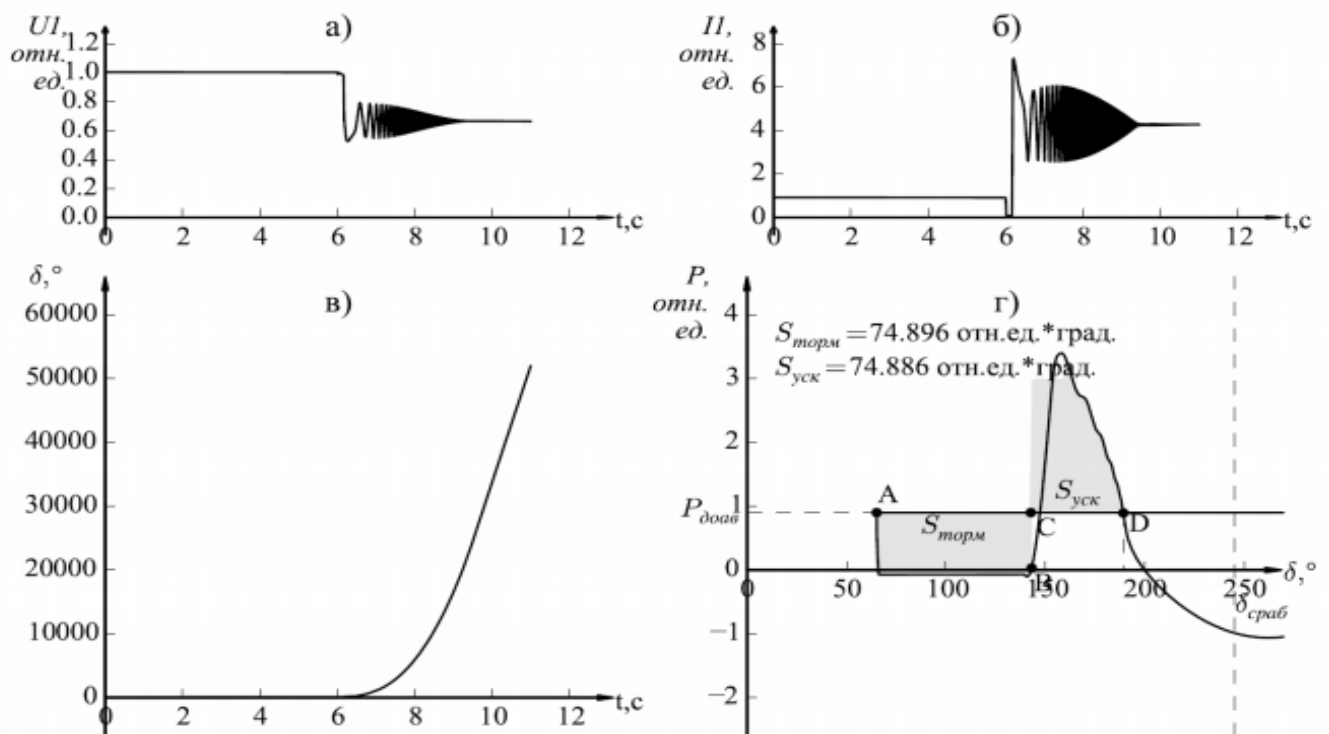


Рисунок 24 – Моделирование отключения питающего источника с двумя рабочими СД (БАВР)

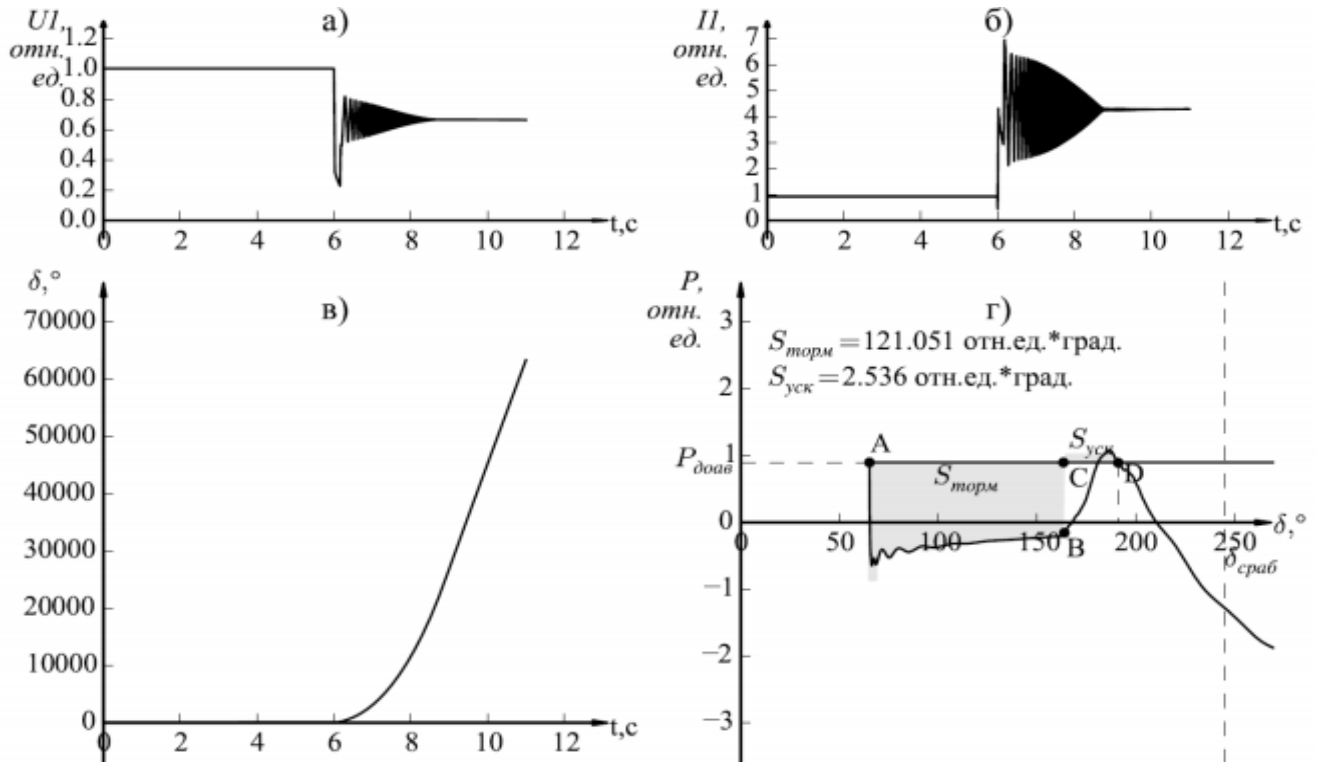


Рисунок 25 – Моделирование трехфазного КЗ (АВР)

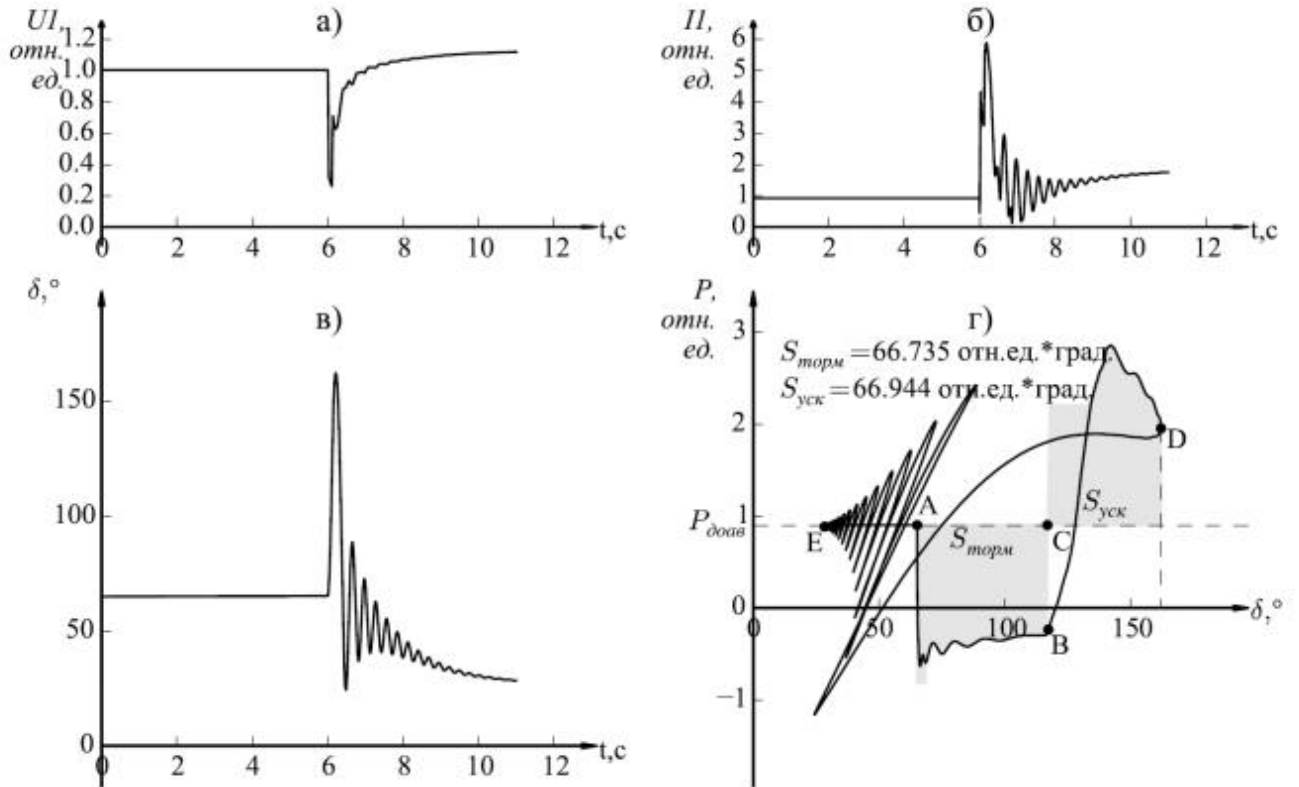


Рисунок 26 – Моделирование трехфазного КЗ (БАВР)

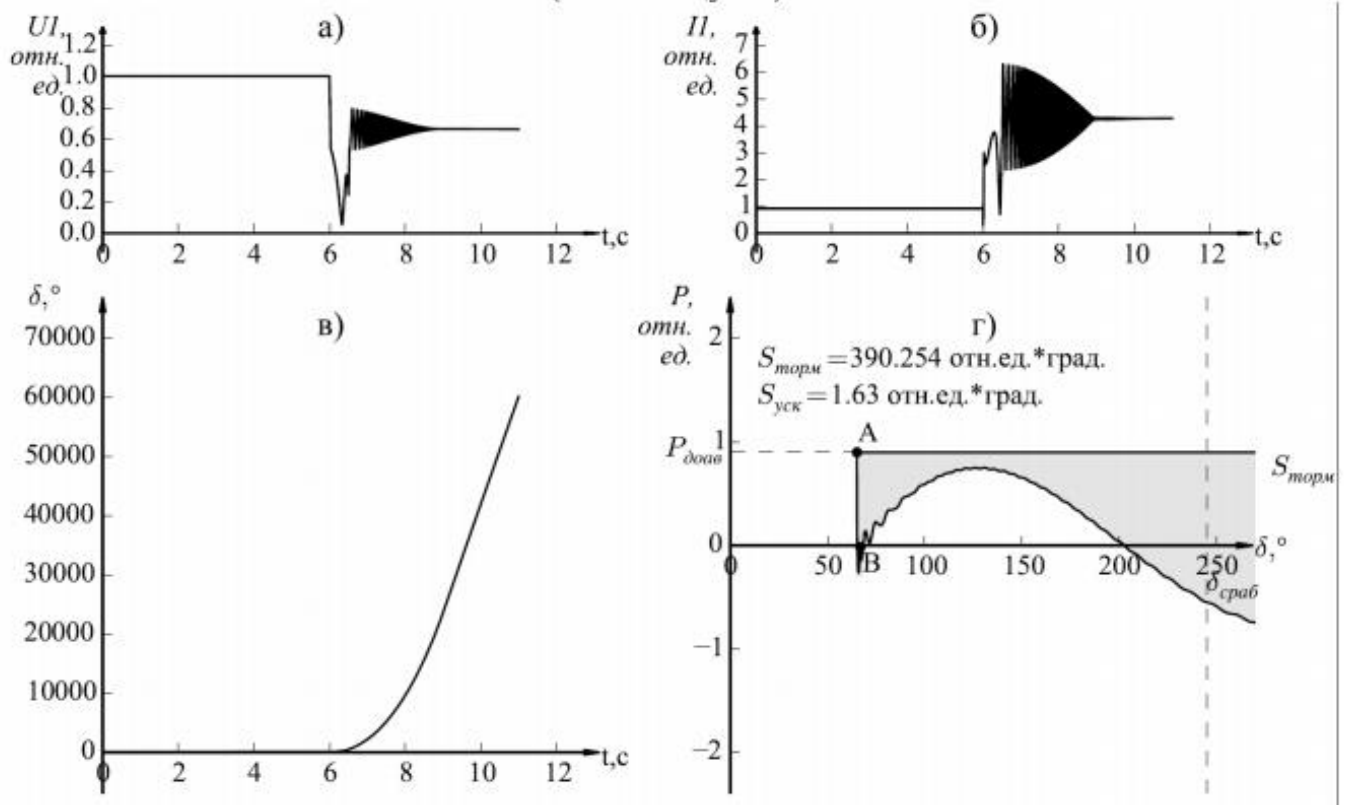


Рисунок 27 – Моделирование двухфазного КЗ (ABP)

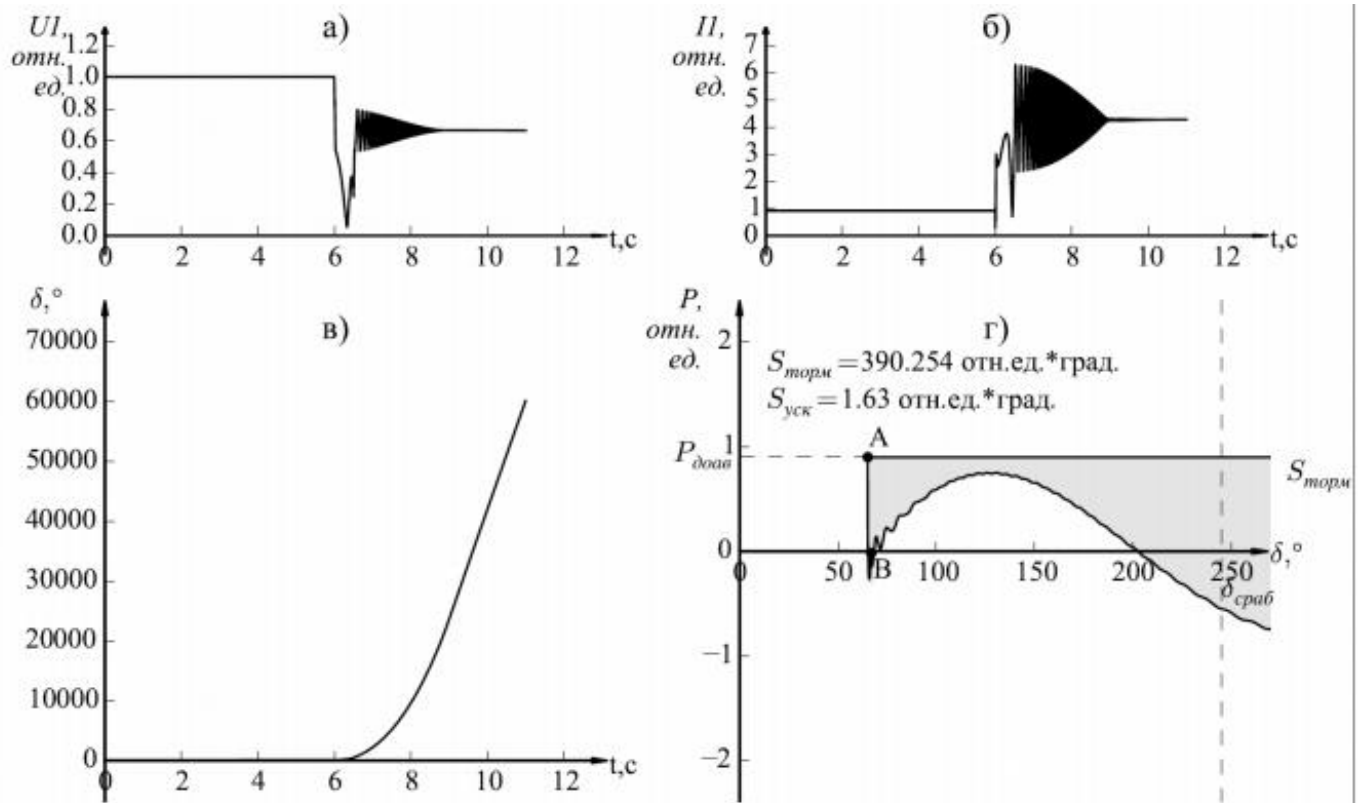


Рисунок 28 – Моделирование двухфазного КЗ (BABP)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленной в выпускной квалификационной работе целью и задачами проведены математические и практические эксперименты.

Была разработана модель ЗРУ с синхронной нагрузкой, которая может быть использована для анализа аварийных режимов. С помощью данной модели была проанализирована работа цифровых регуляторов возбуждения двигателя, устройств РЗА, устройств БАВР и штатного АВР.

Разработан алгоритм контроля устойчивости СД. Использование данного алгоритма на модели продемонстрировало, корректное обнаружение потери устойчивости СД при различных аварийных режимах.

Был разработан алгоритм взаимодействия БАВР и штатного АВР, для поддержания бесперебойного электроснабжения.

Проведенное моделирование позволяет утверждать о многочисленных преимуществах внедрения устройств БАВР с синхронной нагрузкой.

Применение разработанной концепции позволяет уменьшить броски тока и момента на вал ЭД. Таким образом, исключается возможность потери устойчивой работы ЭД и общей останки НПС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меньшов, Б.Г. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности / Б.Г. Меньшов, М.С. Ершов, А.Д. Яризов. – М.: Недра, 2000. – 487 с.
2. Шабанов, В.А. Проектирование электротехнических комплексов нефтегазовой отрасли: учеб. пособие / В.А. Шабанов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2006. – 70 с.
3. Сибикин, Ю.Д. Электроснабжение предприятий и установок нефтяной промышленности / Ю.Д. Сибикин, В.А. Яшков. – М.: Недра, 1997. – 285 с.
4. Горелик, Т.Г. Цифровая подстанция. Подходы к реализации / Т.Г. Горелик, О.В. Кириенко, Н.А. Дени // Сборник докладов XXI конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем». – М.: ФСК ЕЭС, 2012. – С. 10–17.
5. РД-29.020.00-КТН-083-17. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Релейная защита и автоматика подстанций 35-220 кВ и распределительных устройств 6(10) кВ/ ПАО «Транснефть» – 2017.
6. Слодарж, М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных двигателей/ М.И. Слодарж. – М.:«Энергия», 1977. – 215 с.
7. Абрамович, Б.Н. Динамическая устойчивость электромеханических комплексов с синхронными и асинхронными двигателями на предприятиях нефтедобычи/ Б.Н. Абрамович, Д.А. Устинов, Ю.А. Сычев, И.Г. Плотников // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – №3. – С. 17 – 25.
8. Бабичев, С.А. Комплексный анализ условий эксплуатации изоляции обмоток статоров электродвигателей газоперекачивающих агрегатов/ С.А. Бабичев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина. – 2009. – №2
9. Кусумова, Т.К. Разработка и проектирование оптимального стохастического автоматического регулирования возбуждения синхронного двигателя/ Т.К. Кусумова, Т.Д. Велиева // Проблемы энергетики. – 2005. – №3.

10. Горев, А.А. Переходные процессы синхронной машины/ А.А. Горев. – М., Л.: Государственное энергетическое издательство, 1950. – 552 с.
11. Гусев, А.С. Адаптируемая математическая модель систем возбуждения синхронных машин/ А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – №7. – С. 211 – 215
12. Гусев, А.С. Всережимная математическая модель линий электропередачи/ А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – №7. – С. 206 – 210
13. Гусев, А.С. Универсальная математическая модель силовых трансформаторов и автотрансформаторов/ А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – №7. – С. 206 – 210
14. Лоханин, Е.К. Моделирование синхронных машин/ Е.К. Лоханин, В.А. Глаголев, А.И. Скрыпник // Сборник докладов III международной научно-практической конференции «Энергосистема: управление, конференция, образование». – Екатеринбург, 2008. – С. 240 – 244
15. Лоханин, Е.К. Математические модели современных регуляторов возбуждения синхронных машин для расчета и анализа электромеханических переходных процессов и устойчивости энергосистем/ Е.К. Лоханин, В.А. Глаголев, А.И. Скрыпник, Т.О. Товстяк, А.А. Юрганов // Сборник докладов III международной научно-практической конференции «Энергосистема: управление, конференция, образование». – Екатеринбург, 2008. – С. 257 – 262
16. Джазанков, Е.Б. Решение задачи оптимизации распределения нагрузки между газоперекачивающими агрегатами// Вестник Казахского национального технического университета. – 2008. – №6.
17. Осадчук, Ю.Г. Сравнительный анализ способов гашения поля синхронных двигателей/ Ю.Г. Осадчук, И.А. Козакевич// Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2007 №2. – С. 36 – 40
18. Шабанов, В.А. Влияние высоковольтного частотно-регулируемого привода магистральных насосов на алгоритмы ЗПП и АВР на НПС/ В.А. Шабанов, В.Ю.

Алексеев, О.В. Кабаргина // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. - №3. – С. 434 – 440

19. Шабанов, В.А. Влияние частотного регулирования и режима перекачки на внутренний угол синхронных двигателей/ В.А. Шабанов, В.Ю. Алексеев // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2010. - №__

20. ДИВГ.648228.023 РЭ. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-ДС-00-01-11. Руководство по эксплуатации/ В.Г. Езерский, М.Е. Клюкин, И.А. Карлова, Л.М. Ермоленко.–Санкт-Петербург: «НТЦ«Механотроника», 2006.–46 с.

21. Беляев, А.В. Автоматика и защита на подстанциях с синхронными и частотно-регулируемыми электродвигателями большой мощности/ А.В. Беляев, – Санкт-Петербург: ПЭИПК, 2012

22. Seram серии 80. Руководство по эксплуатации, SEPED303001RU/ Schneider Electric. – 2006. – 247 p.

23. Гамазин, С.И. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой/ С.И. Гамазин, В.А. Ставцев, С.А. Цырук. – М.: Издательство МЭИ, 1997. – 424 с.

24. Vas, P. Sensorless Vector and Direct Torque Control/ Peter Vas. – Oxford, New York, Tokyo: Oxford University Press, 1998. – 729 p.

25. Михалев, С.В. Релейная защита электродвигателей напряжением 6-10 кВ терминалами БМРЗ. Методика расчета/ С.А. Гондуров, С.В. Михалев, М.Г. Пирогов, А.Л. Соловьёв. – Санкт-Петербург:ПЭИПК, 2013

26. НТЦ «Механотроника». Стандарт организации СТО ДИВГ-046-2012. Терминалы релейной защиты синхронных и асинхронных электродвигателей 6-10 кВ. Расчет уставок. Методические указания/ М.Г. Пирогов, С.В. Михалев. – Санкт- Петербург, 2012. – 90 с.