

На правах рукописи

Михалев Сергей Владимирович

**СИСТЕМА ПОДДЕРЖАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ СИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ 6-10 кВ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2014

Работа выполнена на кафедре систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель	Поляхов Николай Дмитриевич доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ), профессор кафедры систем автоматического управления
Официальные оппоненты:	Юрганов Алексей Анатольевич доктор технических наук, профессор кафедры Электротехники, электроэнергетики, электроснабжения ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет "Горный"» Лукичев Дмитрий Вячеславович кандидат технических наук, доцент кафедры Электротехники и Прецизионных Электромеханических Систем ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»
Ведущая организация	ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет».

Защита состоится «25» июня 2014 г. в 15³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан «24» апреля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

М.П. Белов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Крупные синхронные двигатели (далее СД) находят в настоящее время широкое применение в системах электропривода насосных, компрессорных и вентиляторных установок. Такие двигатели обладают существенными преимуществами: более высоким КПД по сравнению с асинхронными машинами такой же мощности, меньшей зависимостью вращающего момента от подводимого напряжения, независимостью частоты вращения от нагрузки на валу электродвигателя, возможностью использования двигателя для компенсации реактивной мощности. Вместе с тем, эксплуатация синхронных двигателей сопровождается определенными особенностями, связанными с возможностью перехода машины в генераторный или асинхронный (относительно питающего напряжения) режимы работы вследствие кратковременного снижения или отсутствия напряжения либо потери возбуждения. В то же время, как правило, крупные синхронные машины являются потребителями первой категории, незапланированное отключение которых может привести к существенным материальным потерям, риску для здоровья и жизни людей.

Вышеперечисленные обстоятельства приводят к необходимости комплексного подхода к мероприятиям, направленным на сохранение устойчивости работы синхронных машин в различных режимах.

Систему автоматизации современного промышленного объекта с использованием высоковольтных синхронных двигателей можно разделить на следующие подсистемы:

– подсистема автоматизации электроснабжения двигателя (релейная защита и автоматика (далее РЗА) подстанции 6(10) кВ, система возбуждения, устройство плавного пуска и т.д.);

– подсистема автоматизации вспомогательного оборудования двигателя (маслостанция, гидростанция, система охлаждения и т.д.);

– подсистема автоматизации компрессорной станции (регуляторы, клапаны, задвижки и т.д.).

Для сохранения двигателя в состоянии устойчивости требуется слаженная работа этих подсистем. Тем не менее, в настоящее время наблюдается ситуация, когда настройкой, вводом в эксплуатацию и обслуживанием этих подсистем занимаются различные организации и службы, необходимый комплексный подход к автоматизации электродвигателя не обеспечивается. Следует также отметить отсутствие руководящих указаний и нормативных документов, регламентирующих построение системы автоматизации с учетом возможного перехода двигателя в асинхронный режим работы.

В настоящее время многие исследователи и научные коллективы занимаются исследованиями, связанными с поддержанием устойчивости работы крупных синхронных машин. Разрабатываются новые алгоритмы работы регуляторов возбуждения, новые системы автоматического включения резервного питания, новые алгоритмы работы релейной защиты и автоматики, новые конструкции электродвигателей. Работы в этой области в настоящее время ведутся такими отечественными и зарубежными исследователями, как Б.Н. Абрамович, Д.А. Устинов, Ю.А. Сычев, И.Г. Плотников, Б.Ю. Васильев, А.С. Гусев, С.В. Свечкарёв, И.Л. Плодистый, Е.К. Лоханин, В.А. Глаголев, А.И. Скрыпник, Т.О. Товстяк, А.А. Юрганов, В.Л. Невельский, А.В. Беляев, М.А. Эдлин, В.А. Васильев, Ю.П. Сурин, В.Я. Чаронов, Л.Ф. Борисов, В.И. Васинеж, А.П. Рукавишников, В.Ю. Алексеев, В.А. Шабанов, В.А. Савицкий, Marius Babescu, Octavian Prostean, Gabriela Prostean, Iosif Szeidert, Cristian Vasar, Kai Pietiläinen, Magnus Jansson, Lennart Harnefors.

Целью диссертационной работы является разработка системы поддержания устойчивости работы СД, позволяющей выявить неизбежность возникновения асинхронного режима до первого проворота ротора, и оптимизировать с точки зрения сохранения устойчивости работу оборудования подстанции с СД.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Анализ исследований, проводимых по вопросам автоматизации высоковольтных синхронных электроприводов, оптимизации режимов их работы и способов оценки запаса устойчивости в различных режимах;
2. Разработка математической модели узла нагрузки с синхронными двигателями, включая модель двигателя, модель автоматического регулятора возбуждения, модель нагрузки двигателей, модели устройств защиты и противоаварийной автоматики;
3. Разработка алгоритма контроля устойчивости работы синхронного двигателя с учетом текущего значения тока возбуждения;
4. Разработка методических указаний по настройке устройств релейной защиты, использующихся совместно с алгоритмом контроля устойчивости;
5. Проведение экспериментов с использованием реализованной модели с целью подтверждения эффективности предлагаемых методических указаний и алгоритма контроля устойчивости синхронного двигателя.

Объект исследования.

Непосредственным объектом исследований выступили компрессорные станции ООО «Газпром». Результаты исследования могут быть распространены на другие промышленные объекты, где применяется высоковольтный синхронный электропривод с учетом специфики режимов работы технологической установки.

Методы и средства исследования. В качестве математического аппарата в работе использованы методы теории устойчивости и теории электропривода. Компьютерное моделирование при решении поставленных задач выполнялось в программе MatLab (Simulink), при этом были реализованы собственные программные блоки: модель устройства оценки запаса динамической устойчивости, модель устройства определения частоты сигнала, модель автоматического регулятора возбуждения, модель трансформатора тока, модель устройства релейной защиты и автоматики. Начальные значения переменных для моделирования были получены с использованием программы «Мустанг». Для анализа данных, полученных на модели, реализованы программы на языке программирования Python 3.3 (используются дополнительные программные модули: Matplotlib, Numpy).

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. Математическая модель подстанции с синхронными двигателями;
2. Способ тестирования алгоритмов устройств автоматики с использованием функциональных моделей устройств;
3. Алгоритм контроля устойчивости двигателя при кратковременной потере питания с учетом текущего значения тока возбуждения;
4. Методические рекомендации по настройкам устройств релейной защиты и автоматики, работающих совместно с алгоритмом контроля устойчивости.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Математическая модель подстанции с синхронной нагрузкой, обеспечивающая моделирование работы двигателей, устройств РЗА, АРВ, АВР, БАВР при коротких замыканиях в различных точках электрической сети и потере питания вследствие отключения питающих источников.
2. Способ тестирования алгоритмов устройств автоматики с использованием функциональных моделей устройств, позволяющий проводить оценку новых функций до их реализации в реальном устройстве;
3. Алгоритм контроля устойчивости двигателя при кратковременной потере питания, отличительной особенностью которого является учет текущего значения тока возбуждения двигателя;
4. Методические рекомендации по настройкам устройств релейной защиты и автоматики, работающих совместно с алгоритмом контроля устойчивости, разработанные

на основе структурирования и систематизации материалов по эксплуатации синхронных двигателей.

Достоверность результатов работы. Достоверность научных результатов, представленных в диссертации, достигается применением адекватных математических моделей элементов подстанции с синхронной нагрузкой, использованием при реализации этих моделей апробированных методов математического моделирования динамики энергосистем, а также тщательным сопоставлением результатов экспериментов, проведенных для разных условий.

Теоретическая и практическая значимость работы. Проведенные исследования позволяют повысить устойчивость работы СД газоперекачивающих станций, а также других промышленных объектов с синхронными электроприводами.

Реализация результатов работы. Разработанный алгоритм оценки устойчивости синхронного двигателя при кратковременной потере питания нашел применение в новых устройствах защиты и автоматики электродвигателей, производства ООО «НТЦ «Механотроника»: БМРЗ-152-ДС (акт о внедрении № 76 от 14.11.2013). Модель подстанции с синхронной нагрузкой используется в ООО «НТЦ «Механотроника» для расчета параметров срабатывания защит и функций автоматики, в том числе АВР и БАВР. Рекомендации по настройкам устройств релейной защиты и автоматики, работающих совместно с алгоритмом контроля устойчивости, используются в ООО «НТЦ «Механотроника» при проектировании систем РЗА подстанций с СД. Результаты работы используются в учебном процессе ФГАОУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации».

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на международном научно-практическом семинаре «Инновационные технологии в энергетике и развитие человеческого капитала ТЭК», международных научно-практических конференциях «Современное общество, образование и наука», на ежегодных научных конференциях и семинарах кафедры САУ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» с 2009 по 2013г.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 14 научных трудах, в том числе 4 статьи в рецензируемых и входящих в перечень ВАК, 3 публикации в других изданиях, 5 публикаций в материалах международных и всероссийских семинаров и конференций, 1 методическое пособие, 1 стандарт организации.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав с выводами, заключения, списка литературы. Полный объем диссертации составляет 121 страницу машинописного текста. Основная часть работы содержит 32 рисунка и 10 таблиц, список литературы содержит 106 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, перечислены основные научные результаты и положения выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор характеристик узлов нагрузки с высоковольтными синхронными электродвигателями, а также электрических схем таких узлов нагрузки. Выполнен обзор схем электроснабжения компрессорных станций магистральных газопроводов. В качестве исследуемой схемы выбрана схема электроснабжения компрессорной станции «Лукояновская» ОАО «Газпром», представленная на рисунке 1.

Схема является типовой для компрессорных станций магистральных газопроводов, таким образом, результаты исследований могут быть распространены на другие КС.

Выполнен анализ систем возбуждения, применяемых на компрессорных станциях магистральных газопроводов, в том числе регуляторов, применяемых в системах возбуждения. Проанализировано технологическое оборудование компрессорных

агрегатов, отмечена невозможность поддержания устойчивости работы СД средствами технологических регуляторов

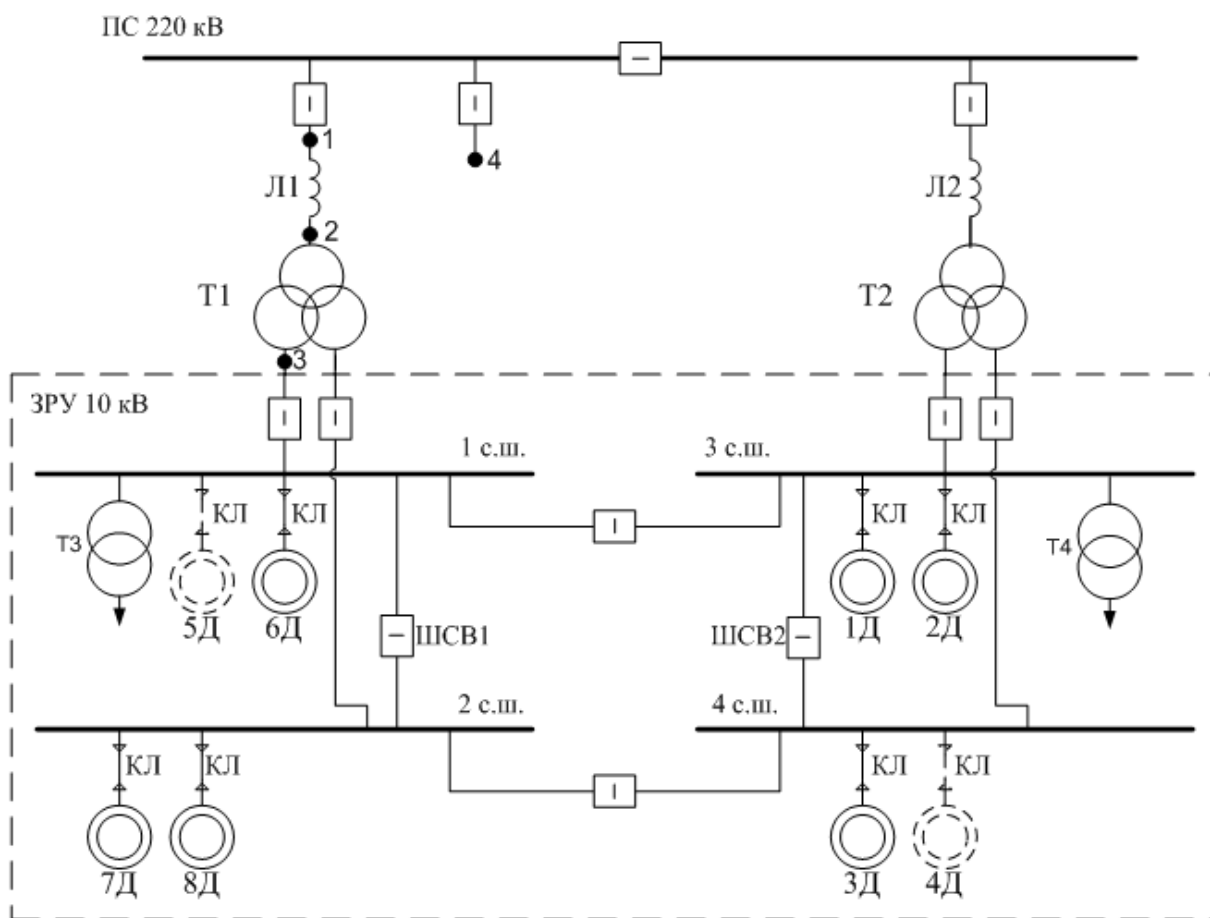


Рисунок 1. Схема электроснабжения компрессорной станции «Лукояновская»

Проанализировано влияние изменений напряжения и частоты питающей сети на работу синхронных двигателей, в том числе на изменение угловой характеристики работы двигателя. Показано влияние регулирования возбуждения и демпферного контура на угловую характеристику работы двигателя. Показано, что практические критерии устойчивости – по времени отключения внешнего короткого замыкания, по соотношению площадей ускорения и торможения могут быть применены в алгоритме контроля устойчивости, работающем в реальном времени.

Предложено для контроля устойчивости в реальном времени использовать следующие способы:

- постоянное сравнение площади торможения и предполагаемой максимально-возможной площади ускорения при наличии внешнего КЗ и постоянного сравнения площадей торможения и ускорения после отключения внешнего КЗ;

- определение достижения углом нагрузки предельного угла отключения КЗ либо предельного угла после отключения КЗ.

Предельный угол отклонения угла нагрузки после отключения КЗ рассчитывается по формуле:

$$\delta_{кр} = 180^\circ - \arcsin\left(\sin \frac{\delta_1 \cdot P_1}{P_1 - P_2}\right), \quad (1)$$

Предельный угол отключения КЗ рассчитывается по формуле:

$$\delta_{откл.пр.} = \arccos \frac{P_1 \cdot (\delta_{кр} - \delta_1) + P_m^{II} \cdot \cos \delta_{кр} - P_m^{III} \cdot \cos \delta_1}{P_m^{II} - P_m^{III}}, \quad (2)$$

Выдвинута идея использования расчетных значений предельных углов с учетом возможной форсировки возбуждения в качестве дополнительных признаков потери синхронизма.

Приведённый анализ источников показал, что допустимое время перерыва питания при котором гарантируется успешная ресинхронизация не превышает 0,3с. Восстановление питания за такое время возможно средствами быстродействующего включения резервного питания (БАВР). При более длительных перерывах питания должно применяться гашение поля и автоматическое включение резервного питания (АВР) с асинхронным самозапуском.

Проведенный анализ работы релейной защиты и автоматики подстанции с синхронными двигателями при снижении питающего напряжения показал возможность:

- излишнего срабатывания токовых защит двигателей, если при их расчете не учитывалась возможность самозапуска;
- несинхронного включения возбужденного СД при быстром восстановлении питания;
- замедление АВР вследствие длительного поддержания напряжения на шинах синхронными двигателями.

На основании анализа режимов самозапуска синхронных двигателей сделан вывод о преимуществах синхронного самозапуска: меньших пусковых токах и моментах, меньшем влиянии на питающую сеть и соседние двигатели, появлении возможности избежать ступенчатого самозапуска и запускать двигатели одновременно.

Вторая глава посвящена разработке комплексной модели подстанции с синхронной нагрузкой, являющейся одним из научных результатов данной работы (научный результат №1). Поскольку близкие задачи по нахождению областей устойчивости и оптимальных режимов работы оборудования решаются в программах по моделированию энергосистем, при разработке модели учтены особенности математических моделей, применяемых в этих программах. Основные проанализированные программы: Mustang, DAKAR, АНАРЭС-2000, EUROSTAG.

Обосновано использование встроенной модели СД, линий электропередачи и трансформаторов MATLAB (Simulink) для моделирования режимов потери питания синхронных двигателей.

Были разработаны собственные модели с использованием «S-функций» Matlab для моделирования:

- автоматического регулятора возбуждения синхронного двигателя, поскольку встроенные в MATLAB модели предназначены для моделирования АВР синхронных генераторов и не обеспечивают всех режимов работы АВР синхронных двигателей;
- измерительных трансформаторов тока, поскольку встроенных в Matlab моделей ТТ нет; при этом возможно насыщение ТТ в переходных режимах двигательной нагрузки;
- функциональная модель устройства релейной защиты и автоматики СД, позволяющая осуществлять проверку эффективности новых алгоритмов работы РЗА до их реализации в устройстве (научный результат №2);
- функциональная модель устройства контроля устойчивости работы синхронных двигателей на базе модели устройства РЗА.

Все модели были объединены в комплексную модель газоперекачивающей станции. Общая структурная схема модели газоперекачивающей станции приведена на рисунке 2.

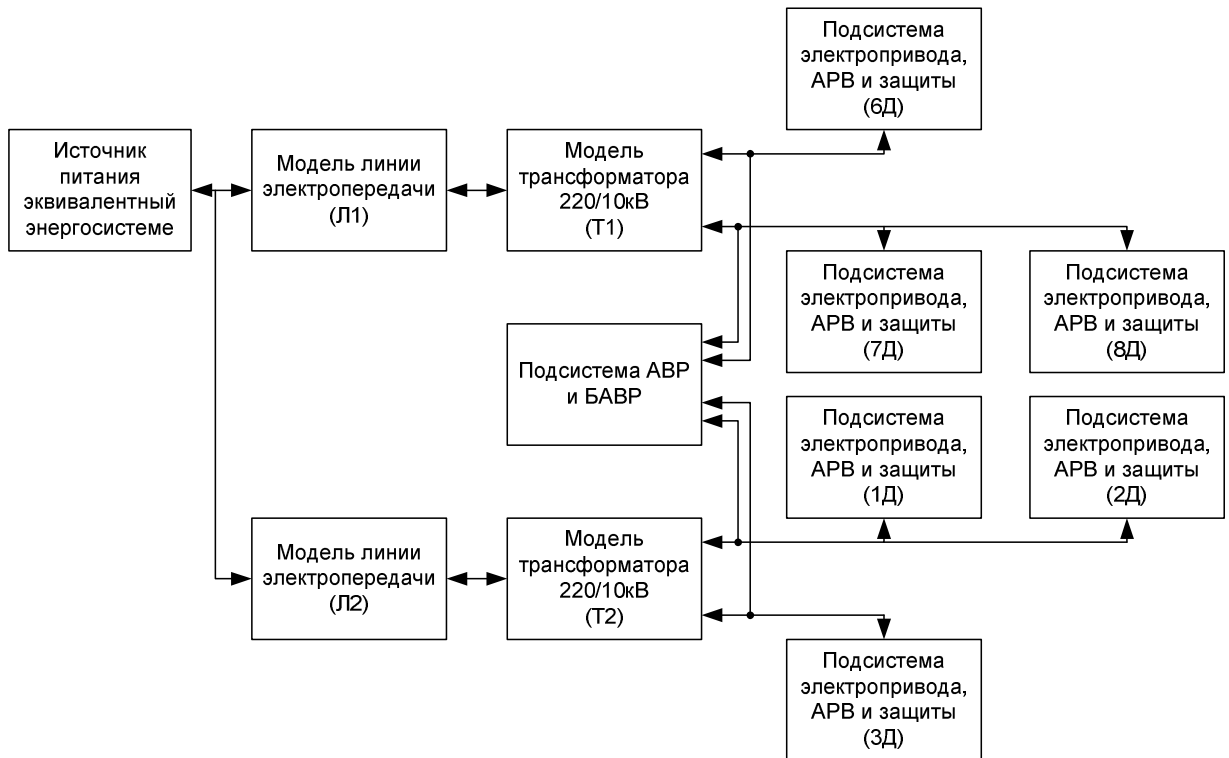


Рисунок 2. Общая структура модели газоперекачивающей станции

В комплексную модель в качестве подсистем входят модели отдельных синхронных электроприводов, АВР и защит электродвигателя. Состав отдельной подсистемы представлен на рисунке 3.

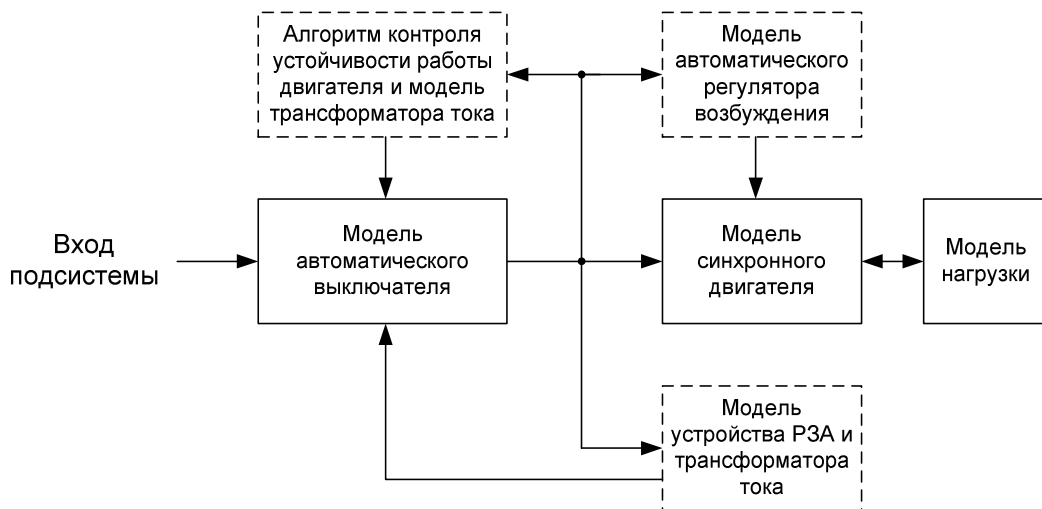


Рисунок 3. Состав подсистемы электропривода, АВР и защит (разработанные блоки показаны пунктиром)

В состав подсистемы электропривода АВР и защит входят модели системы возбуждения, устройства РЗА и алгоритм контроля устойчивости работы двигателя, структуры которых показаны на рисунках 4, 5 и 6 соответственно.

Третья глава посвящена моделированию работы существующих алгоритмов контроля устойчивости и разработке нового алгоритма. Реализована схема исследований, изображенная на рисунке 7.

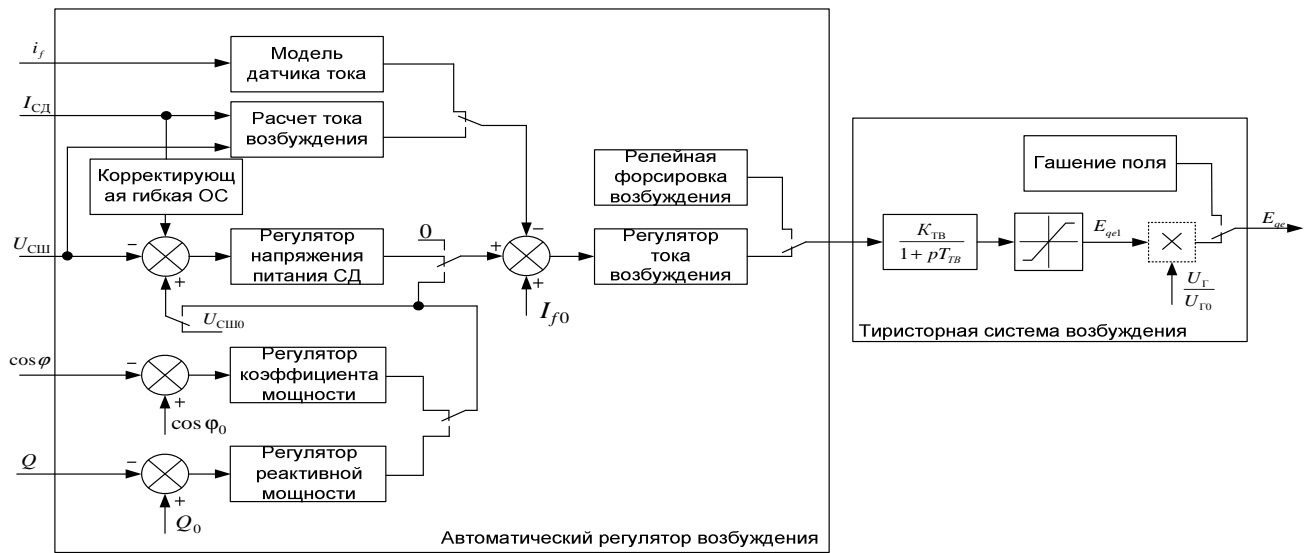


Рисунок 4. Структура модели АРВ

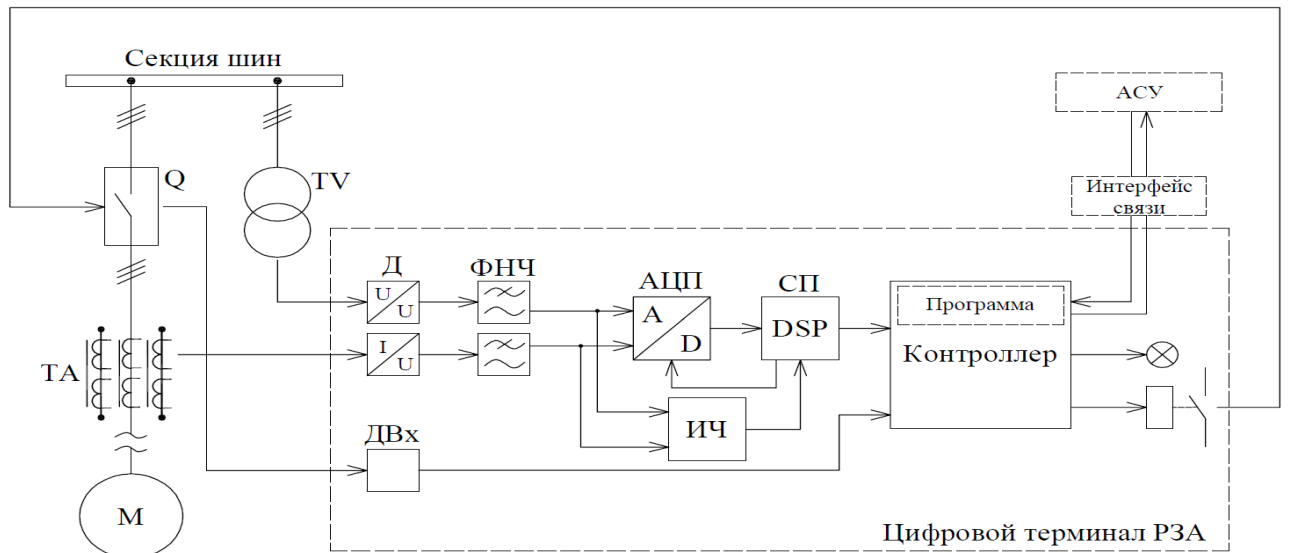


Рисунок 5. Структура модели микропроцессорного устройства PZA

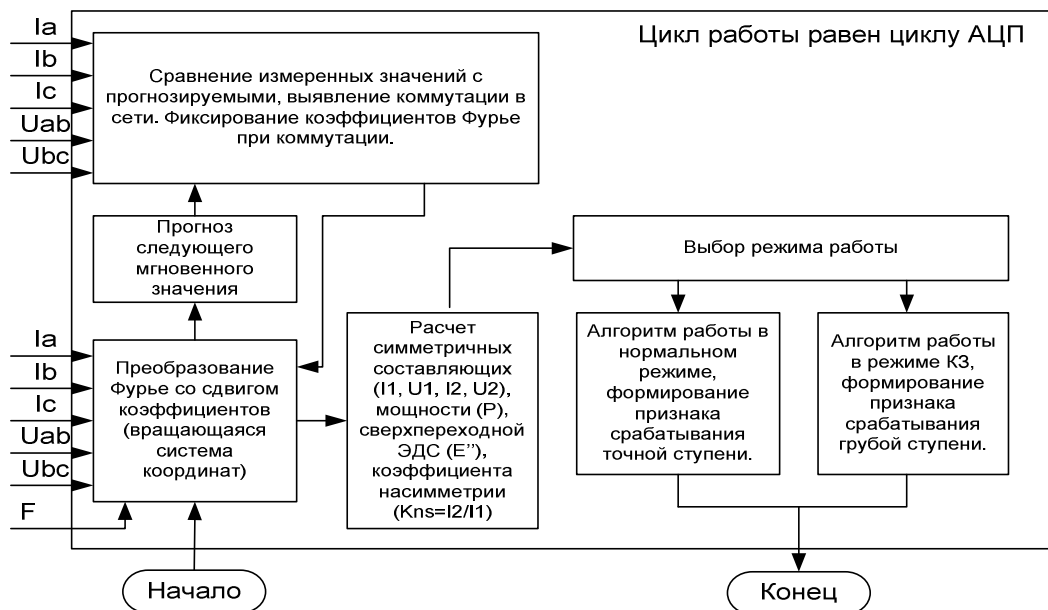


Рисунок 6. Структура алгоритма контроля устойчивости работы двигателя

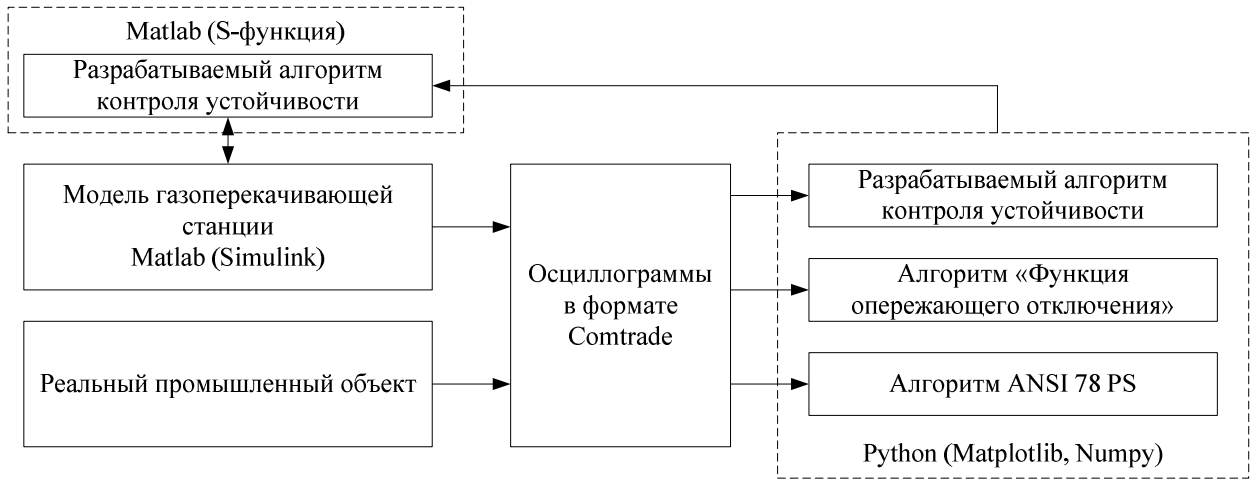


Рисунок 7 Схема проводимых исследований

Типовые кривые, получаемые при моделировании, изображены на рисунке 8.

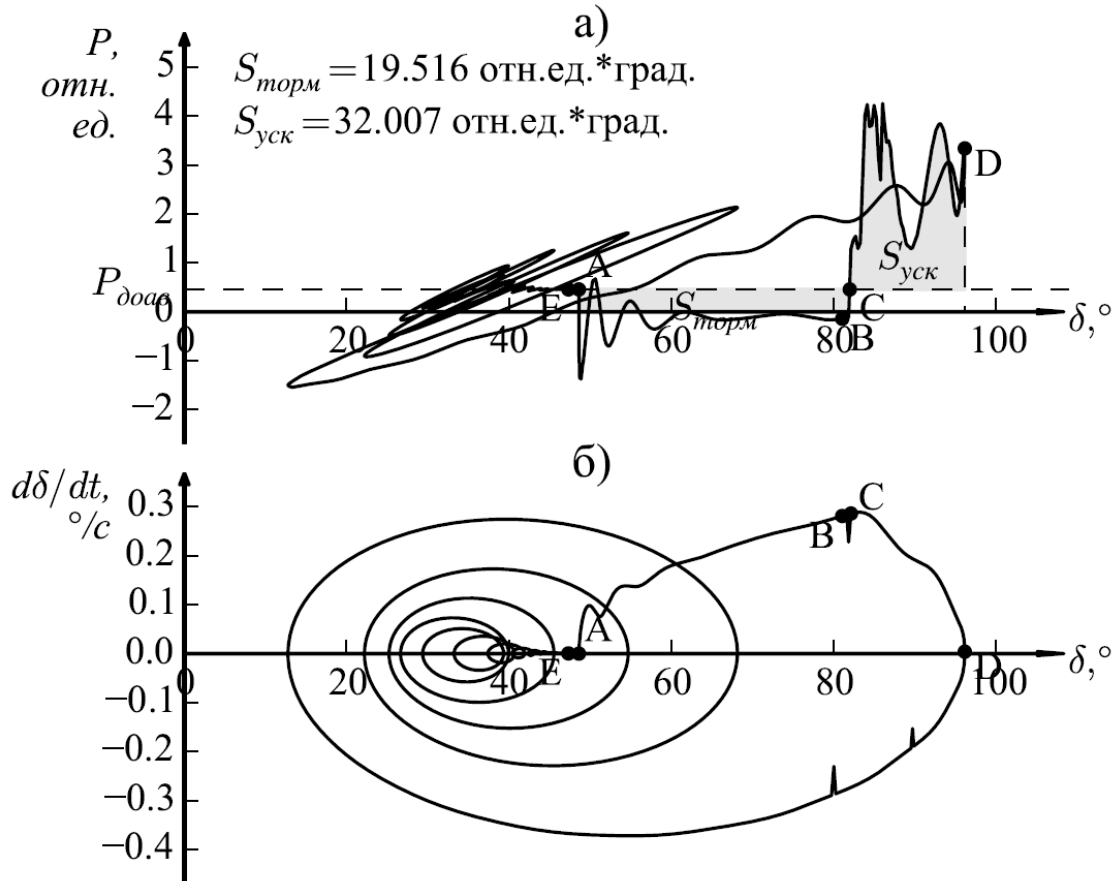


Рисунок 8. Угловая характеристика двигателя при кратковременной потере питания, площадь торможения учтена упрощенно

Приведены результаты работы разработанных программ, моделирующих работу функций ANSI 78 PS и функции опережающего отключения.

Функция ANSI 78 PS определяет устойчивость работы двигателя на основании сравнения площадь ускорения и торможения, при этом:

- площадь торможения рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{уск}} = \int_{t_0}^{t_1} P_{\text{доав}} dt, \quad (3)$$

где t_0 - момент возникновения внешнего короткого замыкания, t_1 - момент превышения значения доаварийной мощности после отключения внешнего короткого замыкания, $P_{\text{доав}}$ - вычисленное значение доаварийной мощности, усредненное за 4 секунды.

– площадь ускорения рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{уск}} = \int_{t_1}^{t_2} (P(t) - P_{\text{доав}}) dt, \quad (4)$$

где t_2 - момент фиксации максимального значения угла нагрузки, либо снижения мощности ниже доаварийной при значении угла большем t_1 , $P(t)$ - текущее значение активной мощности, потребляемой двигателем.

– угол δ в доаварийном и аварийном режиме определяется по формулам:

$$\vec{E} = \vec{U} + j \cdot X_d \cdot \vec{I}, \quad (5)$$

$$\delta = \text{angle}(\vec{E}, \vec{U}), \quad (6)$$

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.

На основании проведенных экспериментов отмечены особенности работы функции:

– близость значений площадей ускорения и торможения, что приводит к необходимости вычисления их с высокой точностью.

– возможность неправильной работы в случае колебаний мощности в режиме потери питания;

– функция никак не учитывает подпитку места КЗ от двигателя;

– применяемый метод расчета угла δ дает некорректные результаты в режиме потери питания.

Функция опережающего отключения (далее ФОО) включает в себя грубую ступень, точную ступень и резервную ступень, при этом работа ФОО разделена на несколько режимов: нормальный, режим короткого замыкания и послеаварийный режим.

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

$$\Delta\delta_{\text{сраб}} = 2,8 - 1,1 \frac{P_{\text{да}}}{P_{\text{н}}}, \quad (7)$$

где $\Delta\delta_{\text{ср}}$ - уставка, при которой срабатывает грубая ступень ФОО, радиан, $P_{\text{да}}$ - мощность ДС в доаварийном режиме, Вт, $P_{\text{н}}$ - номинальная мощность двигателя, Вт.

При этом приращение угла $\Delta\delta$, рад., рассчитывается в темпе переходного процесса по выражениям:

$$\Delta\delta = \int_{t_0}^t s dt, \quad (8)$$

$$s = \frac{1}{T_J} \int_{t_0}^t (P_{\text{доав}} - P + R_{\text{экс}} \cdot \sum i^2) \cdot dt, \quad (9)$$

где s – скольжение ротора синхронного двигателя в текущий момент времени; P – текущая мощность синхронного двигателя в переходном процессе; $R_{\text{экс}}$ – эквивалентное сопротивление активных потерь СД в режиме КЗ, $\sum i^2$ - сумма квадратов текущих мгновенных значений фазных токов СД; T_J – постоянная инерции двигателя совместно с приводом.

Точная ступень прогнозирует переход ДС в асинхронный режим путем сравнения соотношения между площадями ускорения и торможения, при этом для устойчивой работы ДС должно выполняться соотношение:

$$\frac{S_y - S_T}{S_y} \geq k_D \quad (10)$$

где k_D – коэффициент динамической устойчивости, предлагается принимать равным 0,22.

Проведенные эксперименты показали корректность работы грубой ступени как в случае нарушения устойчивости, так и при её сохранении при отсутствии форсировки возбуждения.

Как показали эксперименты, работа точной ступени не всегда корректна.

Проведенный анализа и моделирование существующих алгоритмов контроля устойчивости были учтены при разработке алгоритма.

При разработке были проанализированы различные методы вычисления угла δ : анализ показал, что наиболее точные результаты дает метод с использованием модели СД.

В разработанном алгоритме контроля устойчивости учтено увеличение площади торможения за счет подпитки места КЗ или несинхронной нагрузки, а также изменение соотношения площадей за счет ограничений преобразования Фурье. Замечания графически показаны на рисунке 9.

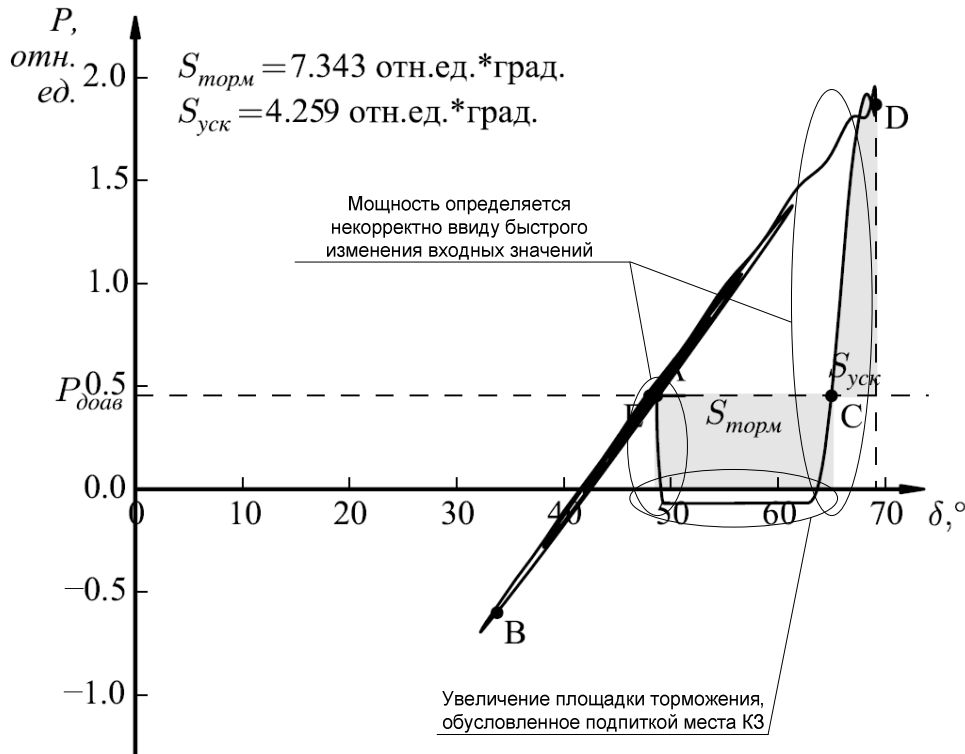


Рисунок 9. Недостатки в расчете площади ускорения и торможения

После учета вышеперечисленных недостатков, значения площадей практически сравнялись, как показано на рисунке 10.

В алгоритме контроля устойчивости используется определение угла на основе математической модели СД в уравнениях Парка-Горева. Применяемый подход близок к используемому при реализации бездатчикового векторного управления – угол нагрузки определяется итерационно на основе измеренных значений токов и напряжений на вводах двигателя.

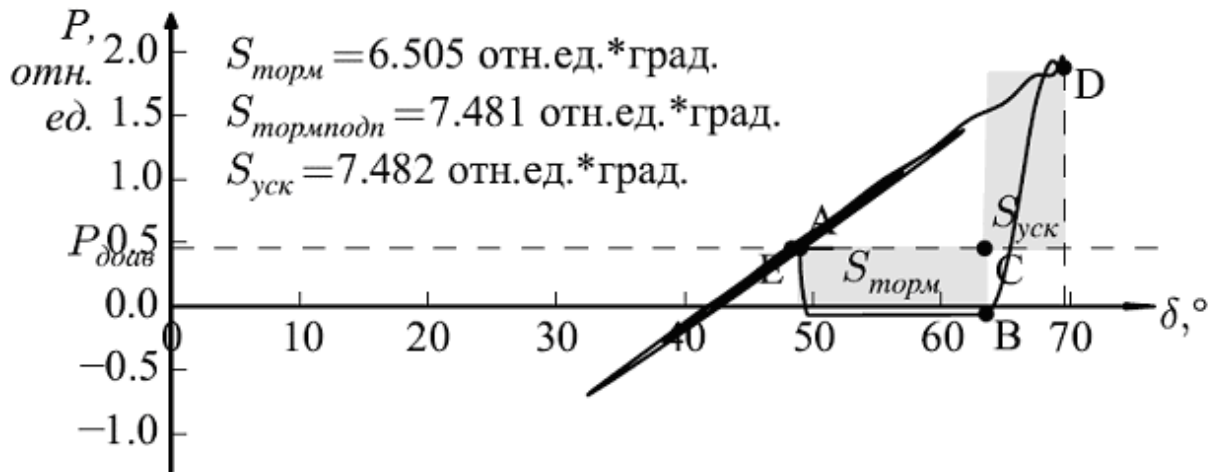


Рисунок 10. Учет ограничений преобразования Фурье при расчете площадей торможения и ускорения

При этом для определения потокосцепления статора в первом приближении используется уравнение вида:

$$\frac{d\vec{\Psi}_{e1}}{dt} = \vec{u}_s - R_s \cdot \vec{i}_s, \quad (11)$$

где $\vec{\Psi}_{e1}$ - первое приближение вектора потокосцепления статора, \vec{u}_s - текущее значение вектора напряжения статора, \vec{i}_s - текущее значение вектора тока статора.

Для определения тока статора в первом приближении используется уравнение вида:

$$\vec{i}_{e1} = \frac{\vec{\Psi}_{e1} - \psi_F \cdot \exp(j\theta_{r0})}{L_s}, \quad (12)$$

где \vec{i}_{e1} - первое приближение вектора тока ротора, ψ_F - модуль составляющей потока ротора, обусловленной контуром возбуждения, θ_{r0} - угол поворота ротора, L_s - индуктивность статора.

После определения первого приближения тока статора, находится его отклонение от реального тока и вносится соответствующая корректировка в предполагаемое значение угла ротора и потокосцепления статора. После внесения корректировок расчет повторяется. Целевой функцией является минимизация отклонения предполагаемого тока ротора от реального. Ввиду использования тригонометрических функций с неизвестными заранее значениями аргументов, алгоритм обладает высокой вычислительной сложностью. Показано, что предварительное задание значений тригонометрических функций со значениями аргументов от 0° до 360° с шагом 1° и последующей аппроксимацией, позволяет существенно сократить количество необходимых вычислений, практически не сказываясь на результатах определения угла.

Для учета вклада от демпферных контуров, в алгоритм расчета введены дополнительные уточняющие выражения, зависящие от частоты вращения двигателя.

Предлагаемый метод расчета угла нагрузки помимо обеспечения повышенной, по сравнению с применяемыми в алгоритмах контроля устойчивости, точности, не требует определения режима работы двигателя, а поскольку все вычисления осуществляются с фазными составляющими векторов, алгоритм корректно работает в несимметричных режимах.

Метод имеет пути дополнительного совершенствования, например применение адаптивных моделей. Результаты вычисления угла различными способами приведены на рисунке 11.

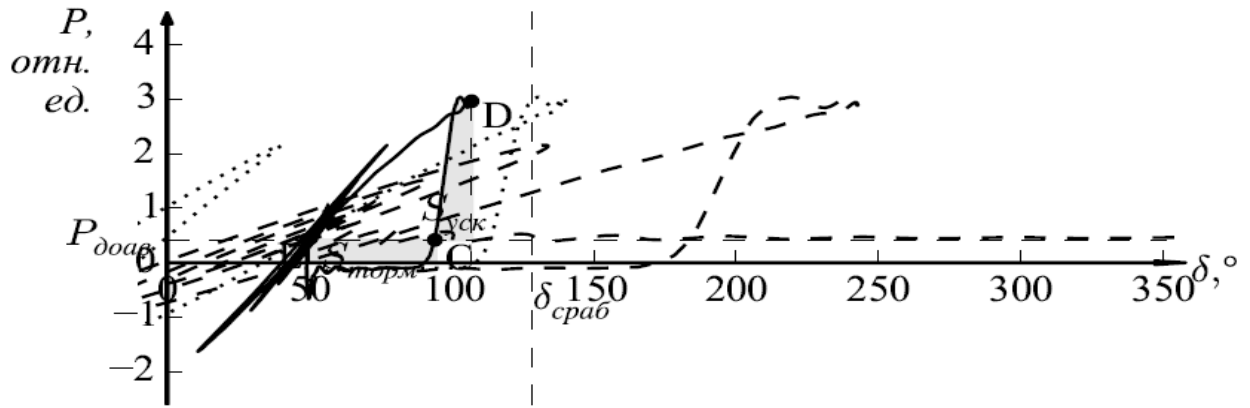


Рисунок 11. Сравнение различных способов расчета угла δ

На рисунке штриховой линией показан график, рассчитанный согласно ФОО, точками показан график, построенный на основе формулы:

$$\delta_i = \delta_{i-1} + \frac{360 \cdot f \cdot \Delta t^2}{2 \cdot T_j} \cdot (P_{доав} - P_i + R_{эква_доав} \cdot \sum i^2), \quad (13)$$

график угла, полученный на основе уравнений Парка-Горева практически совпал с полученным из модели Matlab.

В главе 4 приводятся результаты моделирования различных видов коротких замыканий в точках 1-4 схемы, представленной на рисунке 1. Графики вынесены в приложения к диссертационной работе. Пример графиков основных параметров работы синхронной машины при коротком замыкании в точке 2, показан на рисунке 12. На рисунке 12 д) показан график работы разработанного алгоритма контроля устойчивости.

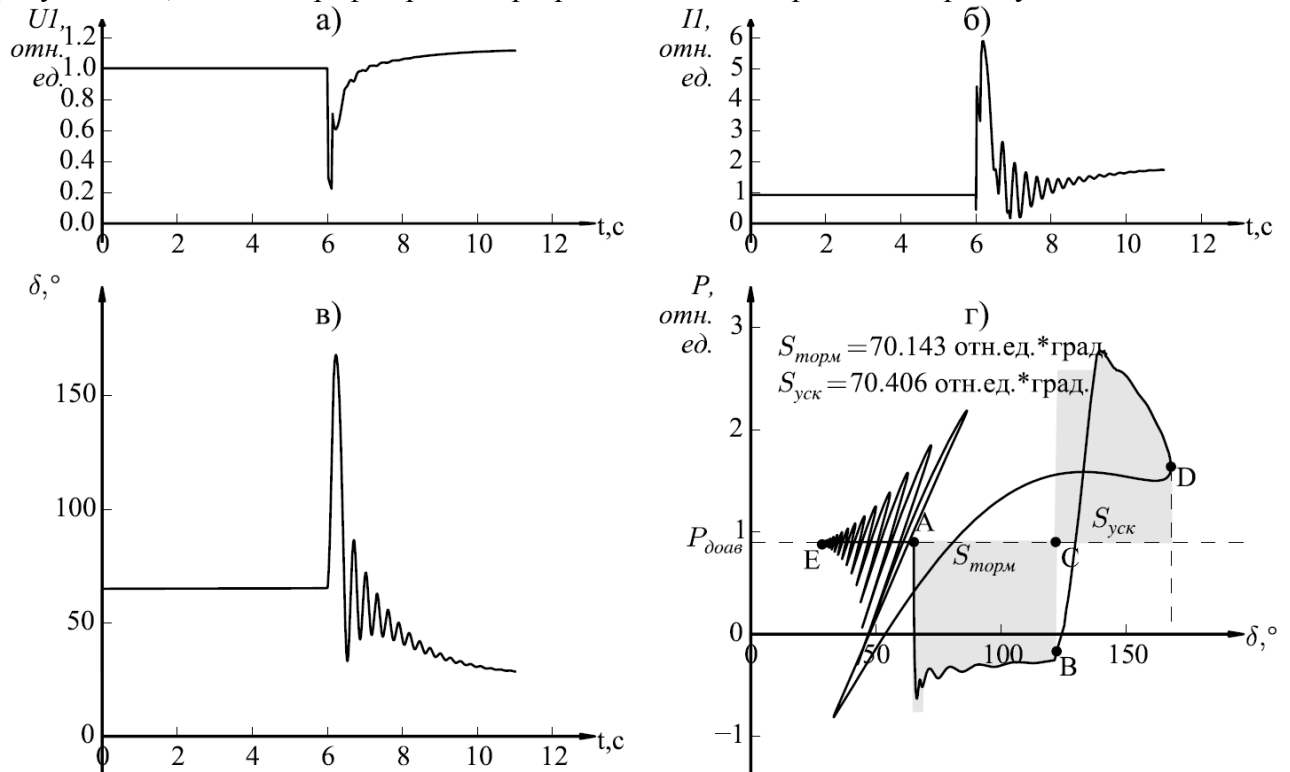


Рисунок 12. Пример основных параметров работы СД при КЗ в точке 2

При моделировании, разработанный алгоритм контроля устойчивости был реализован в качестве составной части модели микропроцессорного устройства защиты и автоматики, при этом расчетное значение угла δ выводилось в Comtrade-файл для последующего анализа средствами Python.

Были проведены следующие вычислительные эксперименты:

1. Трехфазные короткие замыкания в точках 1-4 различной длительности до нахождения границы устойчивости (ток возбуждения - постоянный);
2. Двухфазные короткие замыкания в точках 1-4 различной длительности до нахождения границы устойчивости (ток возбуждения - постоянный);
3. Однофазные короткие замыкания в точках 1, 2, 4 длительностью 0,5с (ток возбуждения - постоянный);
4. Трехфазные короткие замыкания в точке 4 различной длительности до нахождения границы устойчивости (ток возбуждения регулируется по напряжению на вводах двигателя, с релейной форсировкой возбуждения);
5. Трехфазные короткие замыкания в точке 4 различной длительности до нахождения границы устойчивости (ток возбуждения регулируется по напряжению на вводах двигателя и коэффициенту мощности, с релейной форсировкой возбуждения);
6. Перерыв питания различной длительности до нахождения границы устойчивости (ток возбуждения регулируется по напряжению на вводах двигателя, с релейной форсировкой возбуждения);

На основании проведенных экспериментов были сделаны следующие выводы:

1. при потере питания без внешнего короткого замыкания, возможно сохранение устойчивости двигателя при превышении внутренним углом значения 180° ;
2. нарушение устойчивости двигателя при одном и том же времени отключения короткого замыкания и одинаковых алгоритмах работы АВР зависит от расстояния до места замыкания и нагрузки двигателя, что подтверждает выводы других исследователей;
3. во всех экспериментах, устойчивость сохранялась при времени восстановления питания 100 мс, что дает возможность применения синхронного самозапуска (типовое время действия релейных защит, работающих без выдержки времени составляет от 30 до 60 мс, типовое время срабатывания БАВР - от 100 до 150мс);
4. при нагрузке двигателя равной 50% от номинальной, появляется возможность осуществить синхронный самозапуск средствами АВР (типовое время восстановления питания - 0,5 с)
5. для корректной работы АВР и БАВР необходимо выявлять, сохранит ли двигатель устойчивость в темпе переходного процесса;
6. при всех видах перерыва питания, разработанный алгоритм контроля устойчивости обеспечил корректное выявление сохранения или потери устойчивости до первого проворота ротора;
7. во всех протестированных режимах регулирования возбуждения, разработанный алгоритм контроля устойчивости обеспечивал корректное обнаружение потери устойчивости двигателя.

Практически невозможно увеличить запас устойчивости путем настройки контуров регулятора возбуждения, при выведенной форсировке возбуждения и гашении поля. Указанное справедливо как для регулятора напряжения на вводах двигателя, так и для регуляторов коэффициента мощности и реактивной мощности. Изменение напряжения при коротком замыкании оказывается значительным поэтому регулятор уходит в ограничение. Исходя из этого настройки контуров регулирования АВР следует выполнять на основе требований к работе двигателя при напряжении на его вводах близком к номинальному.

Поскольку при экспериментах алгоритм контроля устойчивости был использован в качестве программы контроллера, входящего в модель микропроцессорного устройства защиты и автоматики (см. рис. 5), эксперименты доказывают практическую реализуемость алгоритма в устройстве защиты и автоматики.

Эксперименты показали, что применение параметров срабатывания защит (токовой отсечки, защиты от потери питания, защиты от перегрузки), рассчитанных в соответствии с разработанной методикой практически исключает возможность их излишнего

срабатывания при потере питания синхронными двигателями. При экспериментах была промоделирована работа устройств защит отходящих выключателей к двигателям. При экспериментах было выявлено корректное срабатывание защиты от потери питания при подпитке двигателями места КЗ либо другой нагрузки (при потере питания вследствие отключения питающего источника). Поскольку указанная защита устанавливается на отходящих линиях к двигателям, требуется задержка её действия по сигналу пуска АВР.

Методические рекомендации по настройке устройств релейной защиты и автоматики, работающим совместно с разработанным алгоритмом контроля устойчивости, являются научным результатом данной работы (научный результат № 4). Методические указания позволяют практически исключить излишнее срабатывание устройств РЗА, а также возможность возникновения асинхронного режима с возбуждением. Предлагаемая схема соединения устройства контроля устойчивости, устройств РЗА и АВР(БАВР) показана на рисунке 9 (показано оборудование одного двигателя, для остальных реализуется аналогично, на схеме: РЗА СВ – устройство РЗА секционного выключателя, РЗА ВВ – устройство РЗА вводного выключателя).

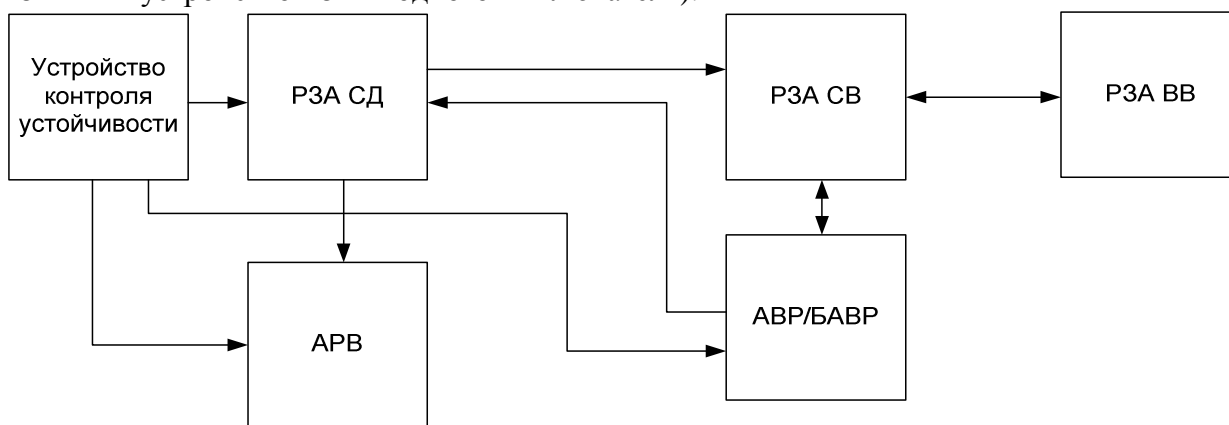


Рисунок 13. Организация системы поддержания устойчивости работы СД

Предлагается следующий алгоритм работы автоматики:

- возникновение внешнего короткого замыкания фиксируется устройством контроля устойчивости работы синхронного двигателя, устройство передает сигнал схеме БАВР;
- БАВР осуществляет отключение вводного выключателя и включение секционного;
- в случае, если устройство контроля устойчивости выявляет невозможность осуществления синхронного самозапуска, выдается сигнал на блокирование схемы БАВР (в этом случае восстановление питания осуществляется средствами АВР), отключение СД и гашение поля СД, вводной выключатель отключается защитой от потери питания, после снижения напряжения на секции, потерявшей питание, осуществляется последовательный асинхронный самозапуск синхронных двигателей;
- при осуществлении как асинхронного, так и синхронного самозапуска, автоматика осуществляет блокирование отключения маслостанции двигателя до включения резервного питания;

Отличительной особенностью системы является осуществление блокирования БАВР по сигналу от алгоритма контроля устойчивости синхронного двигателя, что позволяет исключить вероятность нарушения устойчивости СД после срабатывания БАВР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленными в диссертации целью и задачами проведены вычислительные и экспериментальные исследования.

Была разработана модель подстанции с синхронными двигателями, которая может быть использована для анализа режимов кратковременной потери питания. С помощью модели может быть проанализирована работа автоматических регуляторов возбуждения, устройств релейной защиты и автоматики, устройств АВР и БАВР.

Был разработан способ тестирования новых алгоритмов автоматики до их реализации в реальном устройстве, на основе функциональных моделей устройств автоматики.

Был разработан алгоритм контроля устойчивости двигателя. Проверка алгоритма на модели показала, что он обеспечивает обнаружение потери устойчивости двигателя до первого проворота ротора. Дополнительными преимуществами разработанного алгоритма являются:

- алгоритм расчета угла δ основан на математической модели СД и не требует определения текущего режима работы двигателя;
- учитывается вклад от остаточного напряжения либо подпитки места КЗ от двигателя;
- уточнен расчет площадей торможения и ускорения на основе вычисления мгновенной мощности двигателя.

Были разработаны методические указания по настройке устройств релейной защиты подстанции с синхронными двигателями, а также по организации связей между подсистемами подстанции. Проведенное моделирование позволяет утверждать, что учет этих методических указаний на этапе проведения проектных и пуско-наладочных работ позволит увеличить запас устойчивости синхронных двигателей.

Применение разработанной системы позволяет минимизировать воздействие повышенных токов и моментов на обмотки и вал двигателя. В связи с тем, что время срабатывания алгоритма контроля устойчивости в некоторых случаях оказывается меньше времени действия БАВР, появилась возможность блокировать БАВР в темпе переходного процесса либо отключать секционный выключатель сразу после включения, в случае выявления невозможности осуществления синхронного самозапуска (таким образом, исключается возможность потери устойчивости двигателей смежной секции).

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Поляхов Н.Д., Михалев С.В., Повышение устойчивости синхронных двигателей при кратковременной потере питания/ Н.Д. Поляхов, С.В. Михалев// Известия СПбЭТУ (ЛЭТИ). №10. – 2012. С. 62 – 68
2. Михалев С.В., Вейнмейстер А.В., Пути совершенствования тепловых моделей электрических машин/ С.В. Михалев, А.В. Вейнмейстер// Известия СПбЭТУ (ЛЭТИ). №8. – 2011. С. 56 – 62
3. Михалев, С.В. Новое решение проблем автоматизации и релейной защиты высоковольтных регулируемых электроприводов/ С.В. Михалев// Главный энергетик. №9. – 2011. С. 20 – 25
4. Михалев, С.В. Модернизированный алгоритм защиты электродвигателей от перегрузки/ С.В. Михалев// Энергетик. №12. – 2012. С. 24 – 25.

Статьи, опубликованные в других изданиях:

5. Михалев С.В., Пирогов М.Г., Проблема излишнего действия дифференциальной защиты при повреждениях в измерительных токовых цепях/ С.В. Михалев, М.Г. Пирогов// Новости Электротехники №2. – 2012. С. 40 – 41

6. Михалев С.В., Пирогов М.Г., Илюхин Е.В. Автоматизация подстанции с использованием модернизированных устройств РЗА серии БМРЗ-100/ С.В. Михалев, М.Г. Пирогов, Е.В. Илюхин // Автоматизация и ИТ в энергетике. – №4. – 2013. С. 38 – 40
7. Михалев С.В., Пирогов М.Г. О несовершенстве тепловых моделей электродвигателей в цифровых устройствах РЗА/ С.В. Михалев, М.Г. Пирогов // Энергоэксперт. – №5 – 2010. С. 52 – 54

Конференции:

8. Михалев, С.В. Комплексный подход к поддержанию устойчивости работы синхронных двигателей 6-10кВ / С.В. Михалев // Инновационные технологии в энергетике и развитие человеческого капитала ТЭК: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 04 июня 2013г.:– Санкт-Петербург: ПЭИПК, 2013
9. Михалев, С.В. Применение математического моделирования для анализа работы микропроцессорных устройств защиты трансформаторов и разработки новых функций защиты / С.В. Михалев // Инновационные решения и современные технологии эксплуатации трансформаторного оборудования высокого напряжения: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 25 сентября 2013г.:– Санкт-Петербург: ПЭИПК, 2013
10. Михалев, С.В. Математическая модель для оценки устойчивости синхронных электродвигателей при кратковременной потере питания/ С.В. Михалев // Современное общество, образование и наука: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 31 июля 2013г.: в 5 частях, Часть 3. – Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. – С. 99 – 103
11. Михалев, С.В. Математическая модель автоматического регулятора возбуждения для анализа устойчивости синхронного двигателя при кратковременной потере питания/ С.В. Михалев // Современное общество, образование и наука: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 31 августа 2013г.: в 5 частях, Часть 1. – Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. – С. 99 – 102
12. Михалев С.В., Пирогов М.Г. Комплексная модель микропроцессорного устройства РЗА для анализа работы функций защиты и автоматики // Сборник докладов научно-практической конференции «Релейная защита и автоматизация энергосистем», Москва 4 декабря 2013 г. – Чебоксары: РИЦ «Содействие развитию РЗА и управления в энергетике», 2014.

Другие публикации:

13. 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
14. Стандарт организации СТО ДИВГ-046-2012. Терминалы релейной защиты синхронных и асинхронных электродвигателей 6-10кВ. Расчет уставок. Методические указания. – Санкт-Петербург. – 2012