

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

ЛАЩЕНОВ МИХАИЛ БОРИСОВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ САМОЗАПУСКА
СИНХРОННОГО
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Шевырёв Юрий Вадимович

Москва – 2023

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы. В настоящее время на промышленных предприятиях в системах электроприводов компрессорных, вентиляторных, насосных и других установок широко применяются синхронные электродвигатели. В процессе эксплуатации синхронных двигателей возможны аварийные ситуации, возникающие в случае кратковременного перерыва питания или короткого замыкания в системе электроснабжения, которые влияют на устойчивость нормального режима работы и выпадению двигателей из синхронизма. В связи с этим незапланированное отключение синхронных двигателей может привести к материальному ущербу, риску для жизни и здоровья людей.

Одним из эффективных путей решения обеспечения нормального режима работы электрооборудования на предприятиях при кратковременных перерывах питания или коротких замыканиях является применение самозапуска синхронных электродвигателей. Самозапуском называется процесс восстановления нормального режима работы двигателей без вмешательства персонала после кратковременного отключения или глубокого снижения питающего напряжения.

Отличительной особенностью самозапуска является то, что в связи с ростом мощностей применяемых синхронных двигателей, все больше внимания должно уделяться влиянию этих двигателей на питающую сеть в переходных режимах. Не учет этого влияния может привести к нарушению устойчивости узла нагрузки и возникновению аварийной ситуации.

Степень разработанности проблемы. Вопросам повышения устойчивости и исследованию самозапуска посвящено достаточно много работ. Среди них необходимо выделить работы отечественных ученых: Сыромятникова И. А., Барзама А. Б., Шапошникова К. Я., Дворак Н. М., Ершова М.С., Голоднова Ю. М., Михалева С. В., Жеребцова А. Л., Абрамовича Б.Н., Гончарова А.Ф. и др., и работы зарубежных авторов: Lewes M., Bednarek C. и др.

Выполненный анализ показал, что практически во всех работах для определения условий самозапуска синхронных двигателей используются допущения, которые не позволяют учесть все факторы, влияющие на протекание переходных процессов самозапуска синхронных электродвигателей. В то же время исследования переходных процессов в синхронном электроприводе методом имитационного моделирования позволяют проанализировать влияние на самозапуск таких значимых факторов как: структура и параметры системы электроснабжения, время срабатывания релейной защиты, структура и параметры системы автоматического регулирования возбуждения синхронных двигателей, одновременную работу нескольких синхронных электродвигателей различной мощности в случае кратковременного перерыва питания или короткого замыкания.

Вышеуказанные обстоятельства позволили сформулировать цель работы и поставить задачи научных исследований.

Целью работы является обоснование параметров самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях при

аварийных ситуациях, возникающих вследствие кратковременного перерыва питания или короткого замыкания.

Идея работы заключается в том, что установление влияния на переходные процессы в синхронном электродвигателе его параметров, одновременной работы нескольких электродвигателей, автоматических регуляторов возбуждения, параметров системы электроснабжения, времени срабатывания релейной защиты позволяют обосновать параметры самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях при аварийных ситуациях.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать компьютерные модели для исследования переходных процессов самозапуска синхронного электродвигателя, учитывающие структуру и параметры системы электроснабжения, время срабатывания релейной защиты, электромагнитные процессы в синхронном электродвигателе, систему автоматического регулирования возбуждения и одновременную работу нескольких электродвигателей.

2. Методом имитационного моделирования получить зависимости времени восстановления нормального режима работы и пикового значения тока статора синхронного электродвигателя от времени восстановления напряжения, характеризующие особенности самозапуска вследствие кратковременного перерыва питания или короткого замыкания.

3. Обосновать параметры самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях при аварийных ситуациях, возникающих вследствие кратковременного перерыва питания или короткого замыкания.

Научная новизна результатов исследования:

1. Разработаны компьютерные модели для исследования переходных процессов самозапуска синхронных электродвигателей, учитывающие электромагнитные процессы, автоматические регуляторы возбуждения, одновременную работу нескольких электродвигателей и время срабатывания релейной защиты в системе электроснабжения.

2. Установлены зависимости времени восстановления нормального режима работы и пикового значения тока статора синхронного электродвигателя от времени восстановления напряжения в случае кратковременного перерыва питания или короткого замыкания.

3. Обоснованы параметры самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях при аварийных режимах, отличающиеся учётом электромагнитных процессов в синхронном электродвигателе, автоматических регуляторов возбуждения, одновременной работы нескольких электродвигателей и времени срабатывания релейной защиты в системе электроснабжения.

Теоретическая значимость работы состоит:

- в исследовании переходных процессов самозапуска синхронных двигателей с учетом электромагнитных процессов при одновременной работе нескольких электродвигателей, содержащих автоматические регуляторы

возбуждения и времени срабатывания релейной защиты в системе электроснабжения;

- в обосновании рациональных параметров самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях вследствие кратковременного перерыва питания или короткого замыкания.

Практическая значимость работы состоит:

- в создании компьютерных моделей, позволяющих исследовать переходные процессы во время самозапуска синхронных электродвигателей и принимать обоснованные решения по его обеспечению на этапе проектирования и эксплуатации электротехнических комплексов и систем;

- в разработке методики нахождения рациональных параметров самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях.

Методы исследования. В процессе исследований использовались методы анализа электрических цепей, электрических машин, силовой полупроводниковой техники, теории автоматического регулирования, систем электроснабжения предприятий и имитационного моделирования.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Компьютерные модели для исследования переходных процессов самозапуска в случае кратковременного перерыва питания или короткого замыкания в сети электроснабжения, учитывающие электромагнитные процессы в синхронном электродвигателе, одновременную работу нескольких электродвигателей, содержащих автоматические регуляторы возбуждения, структуру и параметры системы электроснабжения, времени срабатывания релейной защиты.

2. Зависимости времени восстановления нормального режима работы и пикового значения тока статора синхронного электродвигателя от времени восстановления напряжения, позволяющие обосновать рациональные параметры самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях в случае кратковременного перерыва питания.

3. Зависимости времени восстановления нормального режима работы и пикового значения тока статора синхронного электродвигателя от времени устранения короткого замыкания, позволяющие обосновать рациональные параметры самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях в случае коротких замыканий.

4. Способ управления током возбуждения синхронного электродвигателя во время самозапуска, позволяющий уменьшить пиковое значение тока статора и обеспечить самозапуск при увеличении времени срабатывания релейной защиты.

Степень достоверности результатов. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, подтверждаются: критическим анализом литературы, посвященной исследованию самозапуска синхронных двигателей; корректным применением теорий электрических цепей, электрических машин, силовой полупроводниковой техники, теории автоматического регулирования, систем электроснабжения; сходимостью

результатов компьютерного моделирования с теоретическими расчётами аналогичных процессов в системах электроснабжения с синхронными двигателями (относительная погрешность не превышает 10%).

Апробация результатов. Основные положения работы докладывались и обсуждались на Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2019–2022 гг.), заседаниях научного семинара кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности» НИТУ «МИСиС» (г. Москва, 2020–2022 гг.).

Реализация выводов и рекомендаций работы. Компьютерные модели, позволяющие исследовать переходные процессы самозапуска синхронного двигателя и методики рациональных параметров самозапуска в случае кратковременного перерыва питания или короткого замыкания используются в ООО «Электротехническая промышленная компания» при разработке нового электрооборудования для горных предприятий.

Публикации. Результаты исследований, отражены в 4 публикациях, в том числе 2 опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, 1 работа опубликована в издании, индексируемом Scopus, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура диссертационной работы состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 114 наименований и 1 приложения. Основная часть диссертационной работы содержит 55 рисунков и 23 таблицы. Общий работы изложен на 130 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и степень научной разработанности темы исследования, сформулированы цель, основная идея работы, задачи исследования, основные научные положения и новизна, а также научное и практическое значение работы.

В первой главе выполнен обзор исследований режимов самозапуска для синхронных электродвигателей (СД). Проанализированы особенности работы защиты и автоматики подстанции в случае кратковременного перерыва питания или короткого замыкания.

Показано, что практически во всех работах для определения условий самозапуска СД используются допущения, которые не позволяют учесть все факторы, влияющие на протекание переходных процессов синхронных электродвигателей. В то же время исследования переходных процессов в синхронном электроприводе методом имитационного моделирования позволяют проанализировать влияние на самозапуск таких значимых факторов как: структура и параметры системы электроснабжения, время срабатывания релейной защиты, структура и параметры системы автоматического регулирования возбуждения двигателей, одновременную работу нескольких электродвигателей различной мощности в случае кратковременного перерыва питания или короткого замыкания.

Исследования переходных процессов синхронных электродвигателей для самозапуска проводились на примере вентиляторных установок, применяемых на промышленных предприятиях.

Для разработки компьютерной модели выбрана наиболее распространенная типовая структурная схема системы электроснабжения промышленного предприятия, которая представлена на рисунке 1, где 1 – нагрузки на шинах РП, создаваемые каждой из отходящих линий; 2 – нагрузки на шинах ГПП, создаваемые каждой из отходящих линий; 3 – общая нагрузка на шинах ГПП; 4 – силовые трансформаторы.

Примерная диаграмма работы автоматики подстанции для двигателей представлена на рисунке 2, где t_1 – время от начала провала напряжения до отключения выключателей на линиях к СД; t_2 – время восстановления питания за счет включения секционного выключателя действием АВР; t_3 – время окончания гашения поля (от t_1); t_4 – время запуска и синхронизации первого СД.

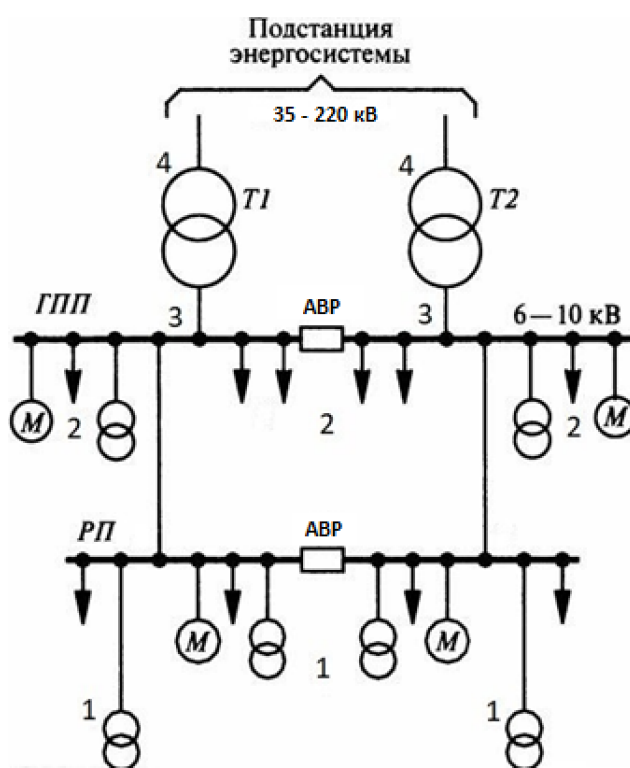


Рисунок 1 – Структурная схема системы электроснабжения промышленного предприятия

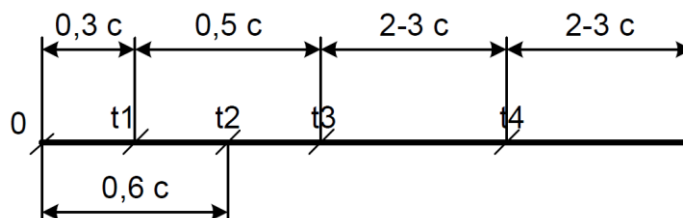


Рисунок 2 – Диаграмма работы автоматики в случае кратковременного перерыва питания

Во второй главе разработаны модели в программном комплексе MATLAB (Simulink) для исследования переходных процессов самозапуска синхронных

электродвигателей, отличающиеся учётом электромагнитных процессов, автоматических регуляторов возбуждения, одновременной работы нескольких электродвигателей и времени срабатывания релейной защиты в системе электроснабжения.

На рисунке 3 приведена обобщенная модель системы электроснабжения предприятия.

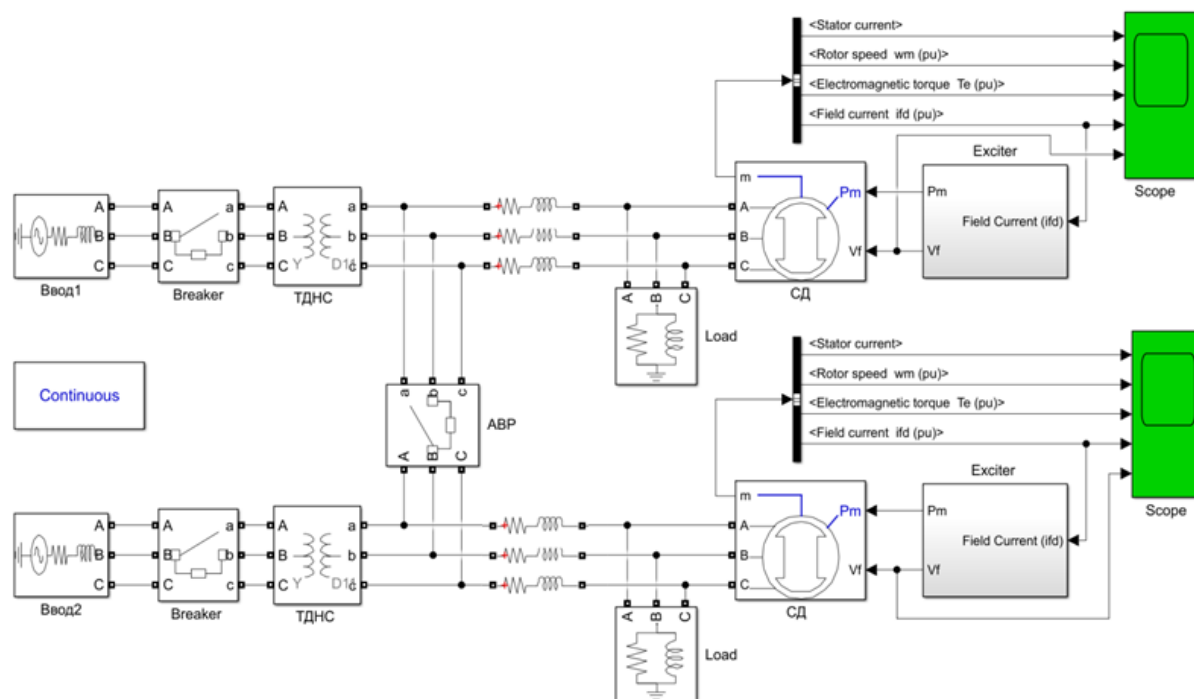


Рисунок 3 – Обобщенная модель системы электроснабжения предприятия

Разработаны модели систем управления возбуждением СД с применением блоков *PID Controller*, которые обеспечивают автоматическую настройку параметров соответствующего регулятора.

Модель подсистемы автоматического регулятора возбуждения по реактивной мощности в среде Matlab Simulink представлена на рисунке 4.

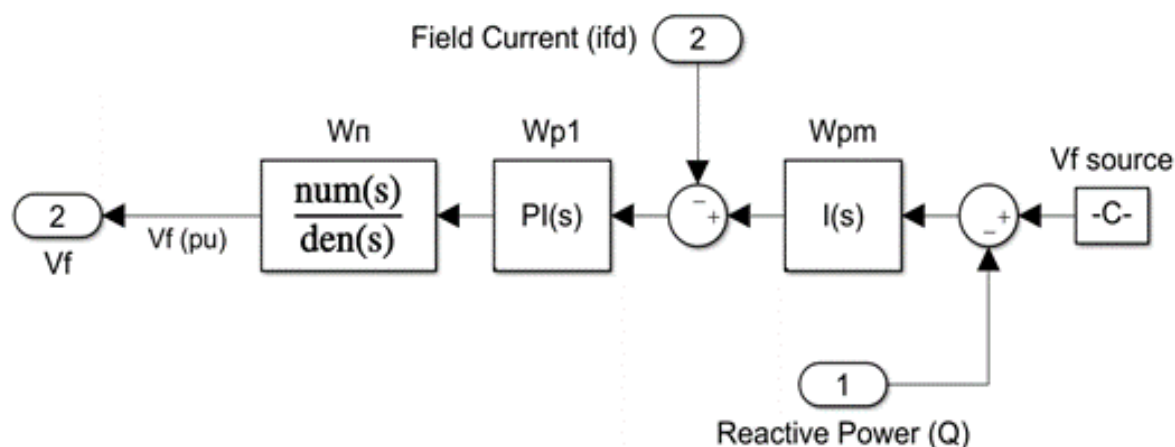


Рисунок 4 – Модель подсистемы автоматического регулятора возбуждения по реактивной мощности

Третья глава посвящена исследованию переходных процессов самозапуска СД в случае кратковременного снижения напряжения. При

проведении экспериментов исследовалось влияние на процесс самозапуска СД следующих факторов и их значений:

- напряжение питания СЭС $U_{\text{ном}}$: 35 и 110 кВ;
- мощность КЗ системы электроснабжения $S_{\text{КЗ}}$: 390, 790 и 1590 МВ·А;
- полная мощность СД $S_{\text{сд}}$: 880 кВА (СДВ-15-39-10), 2222 кВА (СДВ-16-64-12);
- время восстановления напряжения $T_{\text{ном}}$: 0,1, 0,3 и 0,5 секунд.

При проведении экспериментов исследовалось влияние на переходные процессы самозапуска следующих структур систем АРВ:

- отсутствие системы автоматического регулирования (АП);
- одноконтурная система автоматического регулирования тока возбуждения синхронного электродвигателя (РТВ);
- двухконтурная система автоматического регулирования реактивной мощности синхронного электродвигателя (РРМ).

Были проведены следующие эксперименты:

1. Аварийное отключение одного из источников питания и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-15-39-10 при номинальном значении напряжения СЭС 35 кВ.
2. Аварийное отключение одного из источников питания и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-16-64-12 при номинальном значении напряжения СЭС 35 кВ.
3. Аварийное отключение одного из источников питания и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-15-39-10 при номинальном значении напряжения СЭС 110 кВ.
4. Аварийное отключение одного из источников питания и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-16-64-12 при номинальном значении напряжения СЭС 110 кВ.

Результаты выполненных исследований для электродвигателя СДВ-15-39-10 при номинальном значении напряжения СЭС 35 кВ приведены в таблице 1.

Таблица 1.

№ п/п	Тип возмущения	$U_{\text{ном}}^1$	СВ ²	$T_{\text{ном}}^3$	$S_{\text{КЗ}}^4$	Нарушение устойчивости	$T_{\text{восст}}^5$	$I_{\text{пик}}^6$
1	Перерыв питания	35	АП	0.1	390	Нет	1.87	1.2
2					790	Нет	1.94	
3					1590	Нет	2.01	
4				0.3	390	Нет	2.68	2.9
5					790	Нет	2.75	
6					1590	Нет	2.82	
7				0.5	390	Нет	3.19	5.1
8					790	Нет	3.26	
9					1590	Нет	3.33	
10			РТВ	0.1	390	Нет	2.81	2.3
11					790	Нет	2.93	
12					1590	Нет	3.05	
13				0.3	390	Нет	3.37	5.6
14					790	Нет	3.49	

15					1590	Нет	3.57	
16				0.5	390	Да	-	-
17					790	Да	-	
18					1590	Да	-	
19			PPM	0.1	390	Нет	4.11	2.9
20					790	Нет	4.24	
21					1590	Нет	4.37	
22			0.3		390	Нет	4.68	5.5
23					790	Нет	4.75	
24					1590	Нет	4.82	
25			0.5		390	Да	-	-
26					790	Да	-	
27					1590	Да	-	

- 1) – номинальное значение напряжения внешнего электроснабжения, кВ.
- 2) – система возбуждения (АП – асинхронный пуск, РТВ – одноконтурный регулятор по току возбуждения, РРМ – двухконтурный регулятор по реактивной мощности).
- 3) – время восстановления напряжения, сек.
- 4) – мощность КЗ, МВА.
- 5) – время, за которое двигатель выходит на номинальный режим работы после аварийного режима, сек.
- 6) – пиковое значение тока статора, отн.ед.

На рисунках 5 и 6 приведены примеры графиков переходных процессов изменения частоты вращения ротора и тока статора СД в случае кратковременного перерыва питания для времени восстановления напряжения $T_{\text{ном}} = 0,3$ сек (устойчивый режим работы) и 0,5 сек (неустойчивый режим работы). На графиках отображены следующие режимы работы: вхождение в синхронизм при пуске, номинальный режим работы, самозапуск в случае кратковременного перерыва питания, установившийся режим или выпадение двигателя из синхронизма.

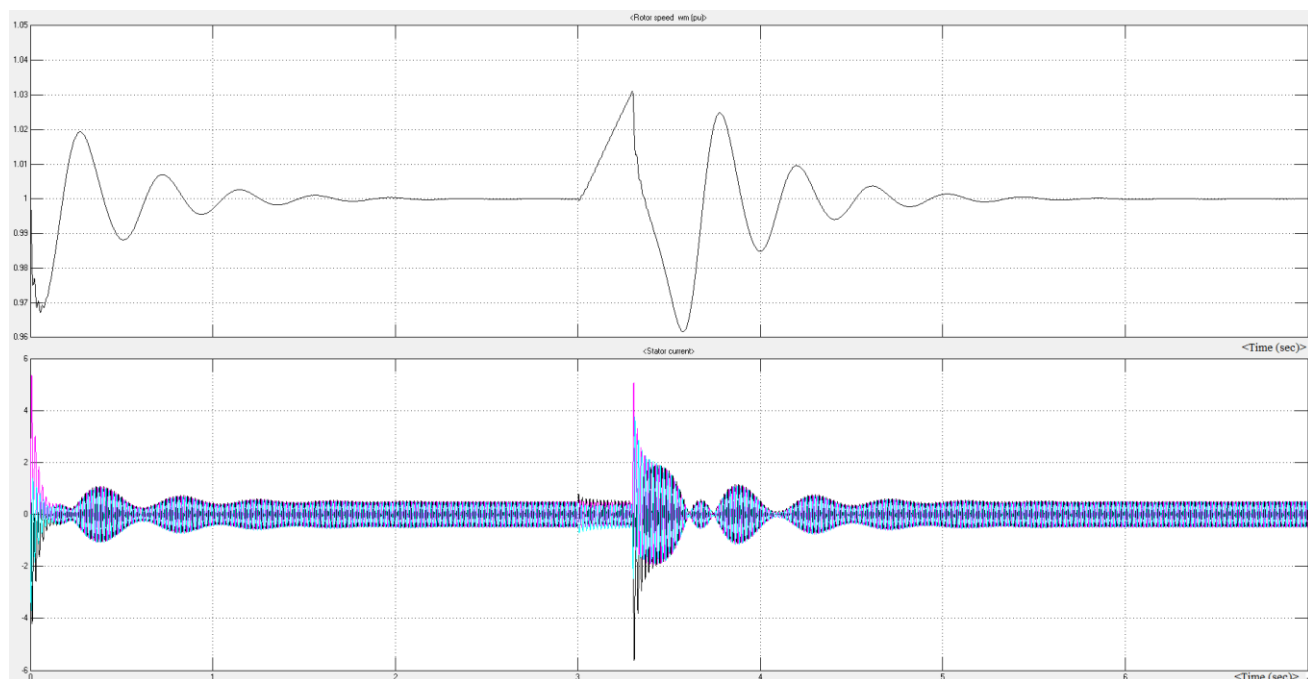


Рисунок 5 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора для времени восстановления напряжения $T_{\text{ном}} = 0,3$ сек

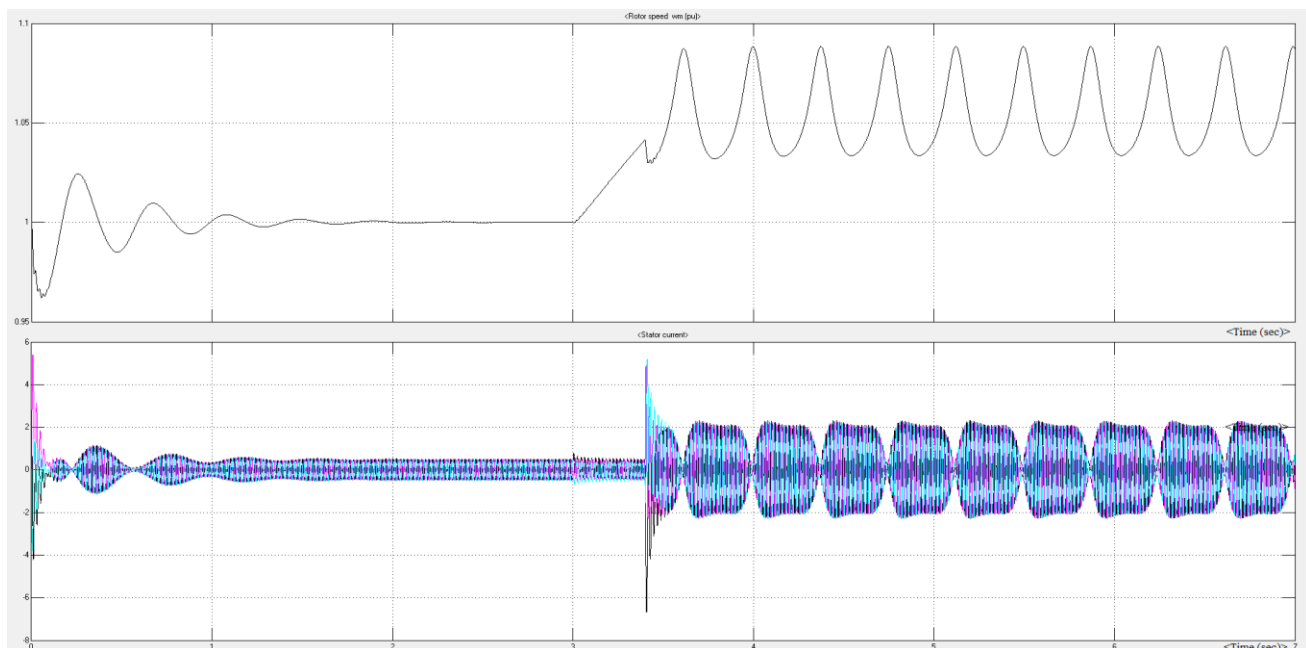


Рисунок 6 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора для времени восстановления напряжения $T_{\text{ном}} = 0,5$ сек

При помощи программного пакета STATISTICA получены зависимости времени восстановления нормального режима работы $T_{\text{восст}}$ и пикового значения тока статора СД $I_{\text{пик}}$ от времени восстановления напряжения $T_{\text{ном}}$ (таблица 2).

Для всех рассмотренных случаев коэффициент детерминации R^2 принимает значения равные или большие 0,9. Это означает, что предложенная модель адекватно описывает поведение выходной переменной при изменении входной переменной.

На основе полученных зависимостей построены графики времени восстановления нормального режима работы $T_{\text{восст}}$ (рисунок 7), и пикового значения тока статора $I_{\text{пик}}$ от времени восстановления напряжения $T_{\text{ном}}$ (рисунок 8).

Таблица 2.

35кВ	СДВ-15-39-10	R^2	СДВ-16-64-12	R^2
АП	$T_{\text{восст}} = 1,66 + 3,3 \cdot T_{\text{ном}}$	0,97	$T_{\text{восст}} = 3,05 + 2,54 \cdot T_{\text{ном}}$	0,96
РТВ	$T_{\text{восст}} = 2,66 + 2,733 \cdot T_{\text{ном}}$	0,9	$T_{\text{восст}} = 1,95 + 2,47 \cdot T_{\text{ном}}$	0,93
РРМ	$T_{\text{восст}} = 3,99 + 2,55 \cdot T_{\text{ном}}$	0,9	$T_{\text{восст}} = 2,03 + 2,53 \cdot T_{\text{ном}}$	0,97
АП	$I_{\text{пик}} = 0,88 \cdot e^{(3,62 \cdot T_{\text{ном}})}$	0,98	$I_{\text{пик}} = 1,237 \cdot e^{(1,73 \cdot T_{\text{ном}})}$	0,96
РТВ	$I_{\text{пик}} = 1,47 \cdot e^{(4,45 \cdot T_{\text{ном}})}$	0,95	$I_{\text{пик}} = -1,63 + 59 \cdot T_{\text{ном}} - 97,5 \cdot T_{\text{ном}}^2$	0,93
РРМ	$I_{\text{пик}} = 2,11 \cdot e^{(3,2 \cdot T_{\text{ном}})}$	0,96	$I_{\text{пик}} = -1,69 + 50 \cdot T_{\text{ном}} - 81,3 \cdot T_{\text{ном}}^2$	0,94
110кВ	СДВ-15-39-10	R^2	СДВ-16-64-12	R^2
АП	$T_{\text{восст}} = 1,78 + 3,55 \cdot T_{\text{ном}}$	0,97	$T_{\text{восст}} = 3,3 + 2,22 \cdot T_{\text{ном}}$	0,90
РТВ	$T_{\text{восст}} = 2,95 + 1,95 \cdot T_{\text{ном}}$	0,92	$T_{\text{восст}} = 2,11 + 2,32 \cdot T_{\text{ном}}$	0,94
РРМ	$T_{\text{восст}} = 4,04 + 2,55 \cdot T_{\text{ном}}$	0,92	$T_{\text{восст}} = 2,14 + 2,37 \cdot T_{\text{ном}}$	0,95
АП	$I_{\text{пик}} = 0,96 \cdot e^{(3,46 \cdot T_{\text{ном}})}$	0,99	$I_{\text{пик}} = 1,43 \cdot e^{(1,42 \cdot T_{\text{ном}})}$	0,95
РТВ	$I_{\text{пик}} = 1,64 \cdot e^{(4,21 \cdot T_{\text{ном}})}$	1,00	$I_{\text{пик}} = -0,49 + 47 T_{\text{в}} - 76,3 T_{\text{ном}}^2$	0,93
РРМ	$I_{\text{пик}} = 2,31 \cdot e^{(2,95 \cdot T_{\text{ном}})}$	1,00	$I_{\text{пик}} = -1,46 + 60 T_{\text{в}} - 98,8 T_{\text{ном}}^2$	0,94

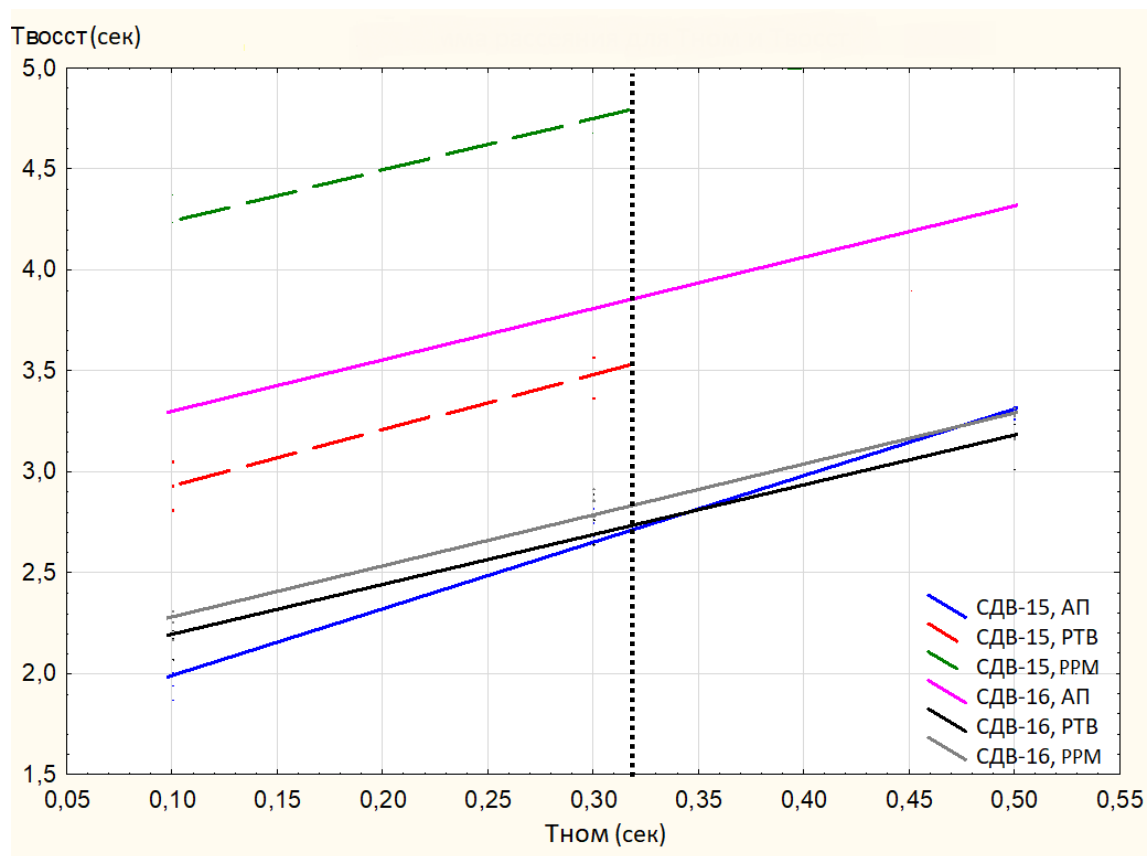


Рисунок 7 – Графики зависимостей времени восстановления нормального режима работы от времени восстановления напряжения в случае кратковременного перерыва питания

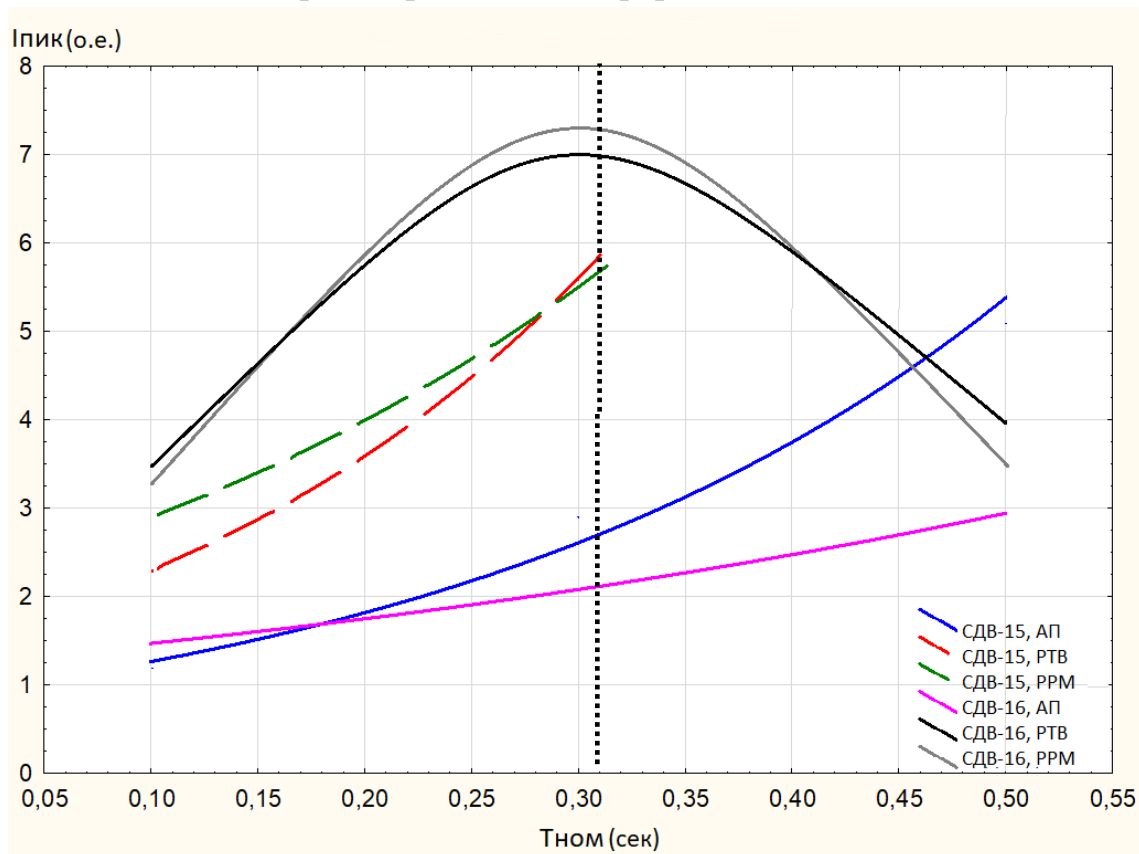


Рисунок 8 – Графики зависимостей пиковых значений тока статора от времени восстановления напряжения в случае кратковременного перерыва питания

На основании полученных результатов предложен способ снижения тока статора СД во время самозапуска. Решение заключается в том, что при аварийной ситуации, регулятор по току возбуждения отключается до устранения аварии. Модель подсистемы управления возбуждением с отключаемым АРВ по току возбуждения представлена на рисунке 9, и графики изменения частоты вращения ротора и тока статора в случае отключения системы регулирования представлены на рисунке 10.

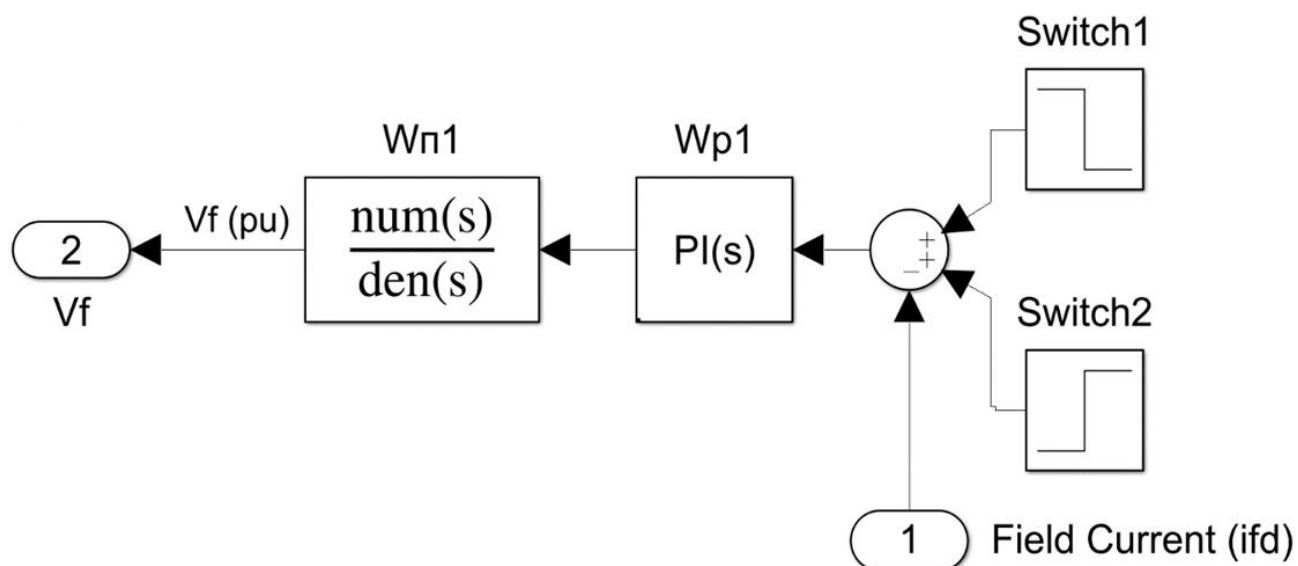


Рисунок 9 – Модель подсистемы управления возбуждением с отключаемым регулятором по току возбуждения синхронного двигателя

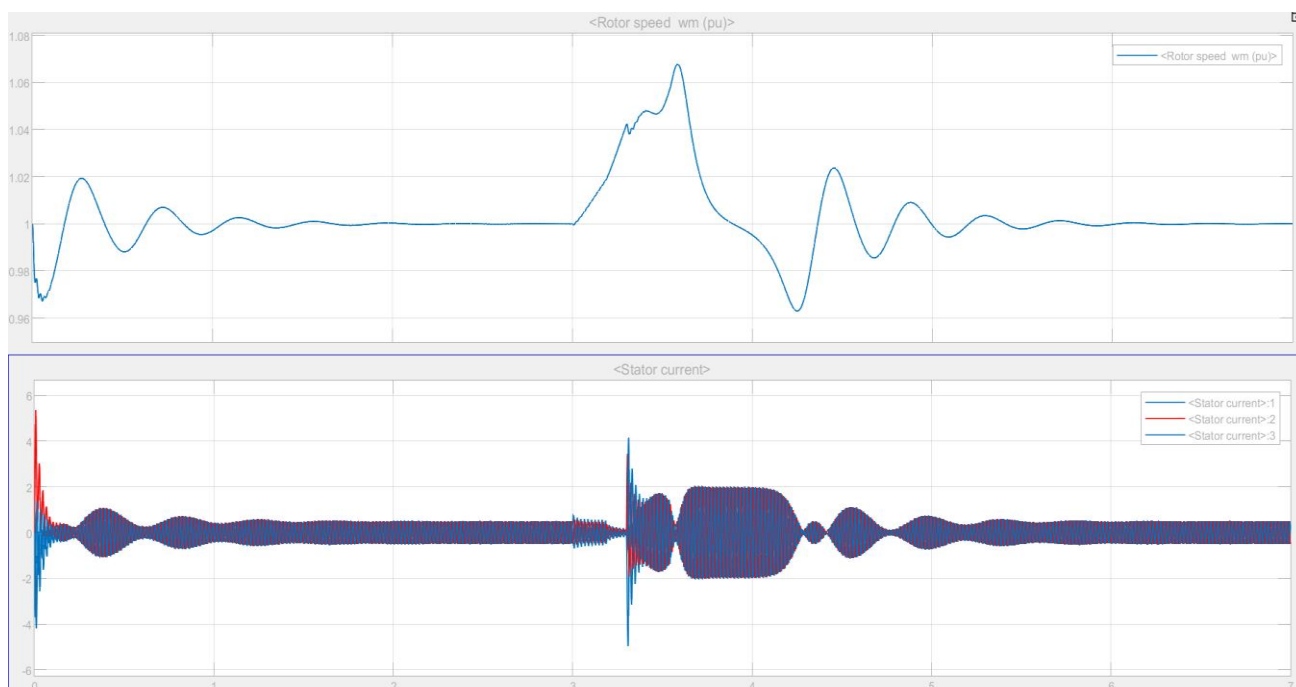


Рисунок 10 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора в случае отключения системы регулирования

Использование данного способа позволяет снизить ток статора в среднем на 15–35%, но увеличивается время выхода СД на номинальный режим работы в среднем на 10–20% в зависимости от типа АРВ.

Сохранение устойчивой работы СД в режиме самозапуска при увеличении времени срабатывания релейной защиты до 0,3–0,5 сек возможно посредством увеличения величины тока возбуждения. В этом случае при аварийной ситуации необходимо увеличить величину тока возбуждения, а после устранения аварии и появлении на шинах двигателя напряжения, через выдержку времени, необходимо подать номинальный ток возбуждения в обмотку СД. В этом случае электродвигатель выходит на номинальный режим работы, не теряя устойчивости (рисунок 11).

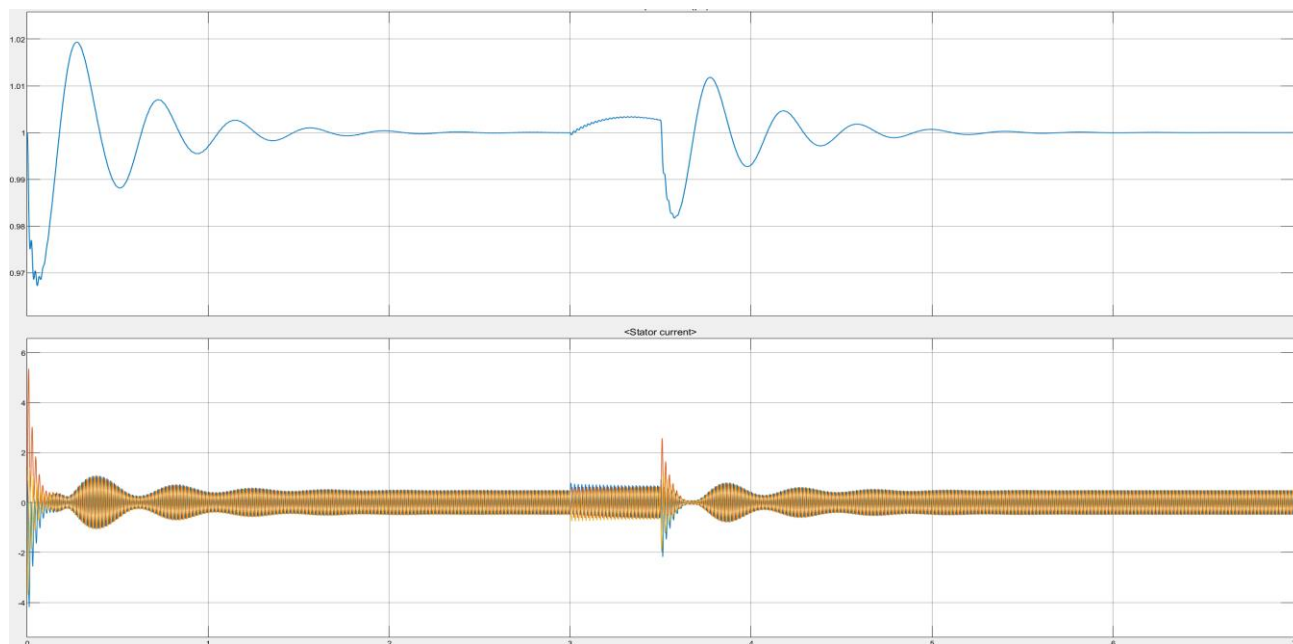


Рисунок 11 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора в случае форсировки возбуждения

Основные выводы по результатам исследований самозапуска синхронных двигателей в системе электроснабжения в случае кратковременного перерыва питания обобщены в таблице 3:

Таблица 3.

Тип аварий		Параметры синхронного двигателя			
		Мощность < 2 МВ·А		Мощность > 2 МВ·А	
		Применение АРВ	Пиковые токи статора	Применение АРВ	Пиковые токи статора
Перерыв питания	Увеличение времени восстановления напряжения	Для любых АРВ не должно превышать 0,3 с.	Возрастают в среднем в 2 раза	Не нарушается устойчивость СД	Возрастают в среднем в 2 раза
	Увеличение мощности КЗ	Время восстановления нормального режима работы СД уменьшается на 4–5% для всех типов АРВ, и не влияет на пиковые токи статора		Время восстановления нормального режима работы СД уменьшается на 6–7% для всех типов АРВ, и не влияет на пиковые токи статора	

	Номинальное напряжение внешней СЭС	С увеличением напряжения до 110 кВ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 5% для всех типов АРВ, а пиковый ток статора увеличивается на 8%	С увеличением напряжения до 110 кВ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 5% для всех типов АРВ, а пиковый ток статора увеличивается на 8%
	АРВ с отключаемым регулятором по току возбуждения	Время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 20%, а пиковый ток статора уменьшается на 35%	Время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 22%, а пиковый ток статора уменьшается на 30%

Результаты, отраженные в таблице 3, позволяют оценить влияние структуры и параметров системы электроснабжения, времени срабатывания релейной защиты, системы АРВ при одновременной работе нескольких СД разной мощности на протекание переходных процессов самозапуска синхронных двигателей в случае кратковременного перерыва питания:

1. Для всех типов АРВ, с увеличением мощности КЗ от 390 до 1590 МВ·А, время восстановления нормального режима работы СД увеличивается в среднем на 3–4%.

Влияние мощности КЗ на пиковые значения тока статора не установлено.

2. При наличии одноконтурного АРВ, с увеличением времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,3 секунд, время выхода двигателя меньшей мощности на номинальный режим работы возрастает в среднем на 20%, тогда как двигатель большей мощности в среднем на 30%.

Пиковые значения тока статора возрастают в среднем в 2 раза для обоих двигателей при использовании одноконтурного АРВ.

С увеличением времени восстановления напряжения более 0,3 секунд нарушается устойчивость работы двигателя меньшей мощности.

3. При наличии двухконтурного АРВ, с увеличением времени перерыва питания до 0,3 секунд, время выхода двигателя меньшей мощности на номинальный режим работы возрастает на 21%, тогда как двигатель большей мощности на 11%.

Пиковые значения тока статора возрастают на 20% для обоих двигателей при наличии двухконтурного АРВ в сравнении с одноконтурным.

С увеличением времени восстановления напряжения более 0,3 секунд нарушается устойчивость работы двигателя меньшей мощности.

4. Применение двухконтурного АРВ требует большее время, по сравнению с применением одноконтурного АРВ, необходимое СД для восстановления нормального режима работы, в среднем на 4%.

5. С увеличением величины номинального напряжения с 35 кВ до 110 кВ, время восстановления нормального режима работы СД увеличивается в среднем на 5% для всех типов АРВ, тогда как пиковый ток статора увеличивается в среднем на 10%.

На основании полученных результатов были сформулированы следующие выводы и рекомендации по нахождению оптимальных параметров самозапуска СД в системе электроснабжения в случае кратковременного перерыва питания:

1. На устойчивость самозапуска синхронного электродвигателя влияют следующие факторы:

- полная мощность СД $S_{сд}$;
- время восстановления напряжения: $T_{ном}$;
- структура системы АРВ синхронного электродвигателя.
- напряжение питания СЭС $U_{ном}$;
- мощность КЗ системы электроснабжения $S_{кз}$.

2. Обеспечить устойчивую работу синхронного электродвигателя возможно следующими способами:

- изменить настройки релейной защиты с целью уменьшения времени устранения аварийной ситуации до 0,3 секунд или менее;
- выполнить форсировку возбуждения СД до восстановления подачи номинального напряжения.

3. Обеспечить снижение тока статора СД возможно отключением АРВ синхронного двигателя до восстановления подачи номинального напряжения.

Четвертая глава посвящена исследованию переходных процессов самозапуска СД для случаев трехфазных и двухфазных коротких замыканий. При проведении экспериментов исследовалось влияние на процесс самозапуска СД следующих факторов и их значений:

- напряжение питания СЭС $U_{ном}$: 35 и 110 кВ;
- мощность КЗ системы электроснабжения $S_{кз}$: 390, 790 и 1590 МВ·А;
- полная мощность СД $S_{сд}$: 880 кВА (СДВ-15-39-10), 2222 кВА (СДВ-16-64-12);
- время устранения КЗ $T_{ном}$: 0,1, 0,3 и 0,5 секунд;
- вид короткого замыкания: трехфазное/двухфазное.

При проведении экспериментов исследовалось влияние на переходные процессы самозапуска следующих структур систем АРВ:

- отсутствие системы автоматического регулирования (АП);
- одноконтурная система автоматического регулирования тока возбуждения синхронного электродвигателя (РТВ);
- двухконтурная система автоматического регулирования реактивной мощности синхронного электродвигателя (РРМ).

Были проведены следующие эксперименты:

1. Аварийное отключение при трёхфазном коротком замыкании и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-15-39-10 при номинальном значении напряжения СЭС 35 кВ.

2. Аварийное отключение при двухфазном коротком замыкании и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-15-39-10 при номинальном значении напряжения СЭС 35 кВ.

3. Аварийное отключение при трёхфазном коротком замыкании и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-16-64-12 при номинальном значении напряжения СЭС 35 кВ.

4. Аварийное отключение при двухфазном коротком замыкании и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-16-64-12 при номинальном значении напряжения СЭС 35 кВ.

5. Аварийное отключение при трёхфазном коротком замыкании и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-15-39-10 при номинальном значении напряжения СЭС 110 кВ.

6. Аварийное отключение при двухфазном коротком замыкании и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-15-39-10 при номинальном значении напряжения СЭС 110 кВ.

7. Аварийное отключение при трёхфазном коротком замыкании и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-16-64-12 при номинальном значении напряжения СЭС 110 кВ.

8. Аварийное отключение при двухфазном коротком замыкании и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-16-64-12 при номинальном значении напряжения СЭС 110 кВ.

На рисунках 12 и 13 приведены примеры графиков переходных процессов изменения частоты вращения ротора и тока статора СД в случае коротких замыканий для времени устранения КЗ $T_{\text{ном}} = 0,1$ сек (устойчивый режим работы) и 0,3 сек (неустойчивый режим работы).

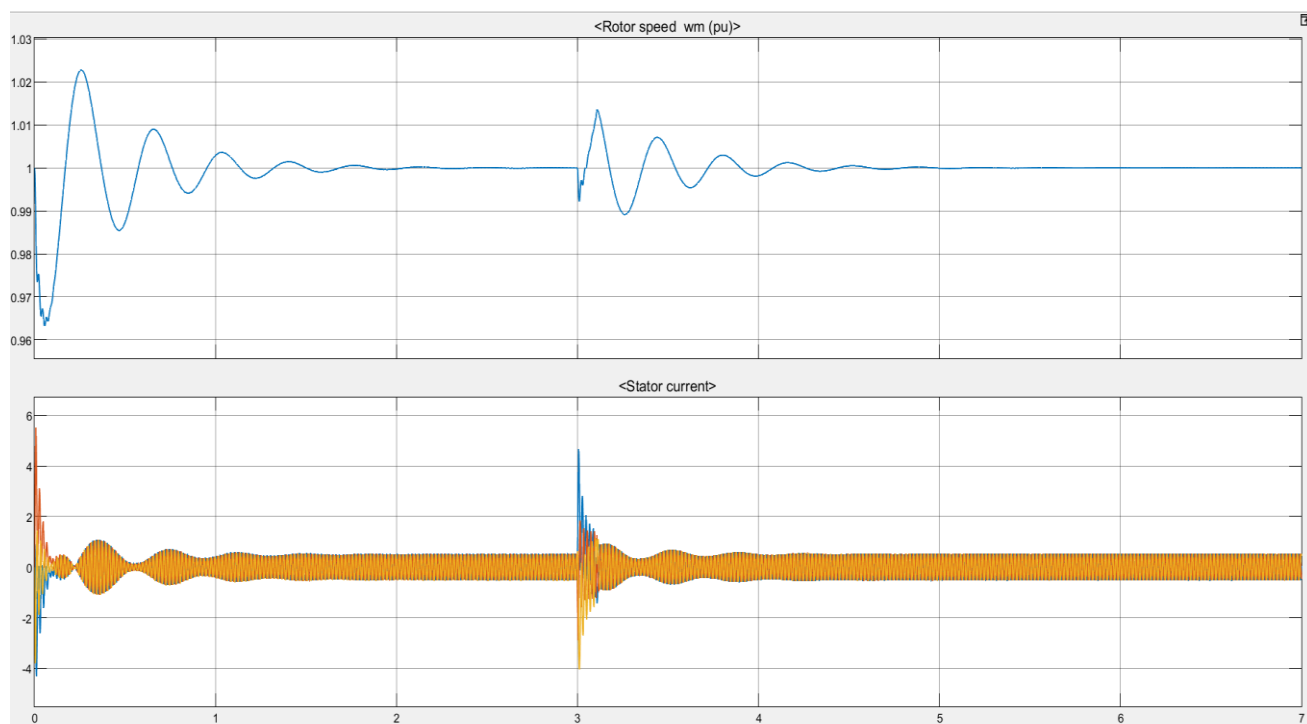


Рисунок 12 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора для времени устранения КЗ $T_{\text{ном}} = 0,1$ сек

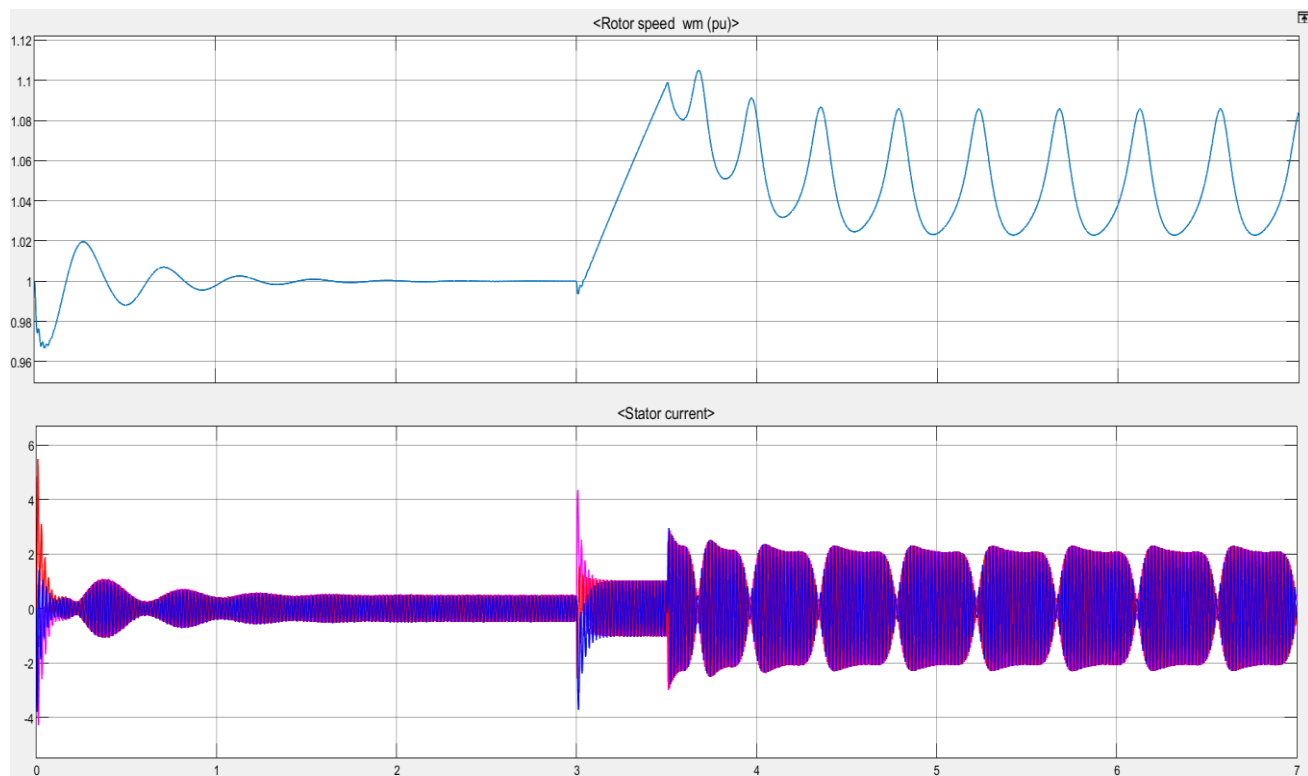


Рисунок 13 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора для времени устранения КЗ $T_{\text{НОМ}} = 0,3 \text{ сек}$

При помощи программного пакета STATISTICA получены зависимости времени восстановления нормального режима работы $T_{\text{ВОССТ}}$ от времени устранения КЗ $T_{\text{НОМ}}$ (таблица 4).

На основе полученных зависимостей построены графики времени восстановления нормального режима работы $T_{\text{ВОССТ}}$ (рисунок 14), и пикового значения тока статора $I_{\text{ПИК}}$ от времени устранения КЗ $T_{\text{НОМ}}$ (рисунок 15).

Таблица 4.

35кВ 3ф. КЗ	СДВ-15-39-10	R²	СДВ-16-64-12	R²
АП	$T_{\text{ВОССТ}} = 3,74 + 2,8 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,95	$T_{\text{ВОССТ}} = 2,65 + 1,65 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,91
РТВ	-	-	$T_{\text{ВОССТ}} = 1,3 + 5,22 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,97
PPM	$T_{\text{ВОССТ}} = 3,99 + 2,53 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,988	$T_{\text{ВОССТ}} = 1,74 + 2,87 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,91
35кВ 2ф. КЗ	СДВ-15-39-10	R²	СДВ-16-64-12	R²
АП	$T_{\text{ВОССТ}} = 3,66 + 2,3 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,95	$T_{\text{ВОССТ}} = 1,34 + 1,79 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,96
РТВ	$T_{\text{ВОССТ}} = 3,7 + 1,74 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,95	$T_{\text{ВОССТ}} = 1,55 + 1,65 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,93
PPM	$T_{\text{ВОССТ}} = 3,75 + 2,6 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,89	$T_{\text{ВОССТ}} = 1,21 + 3,55 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,96
110кВ 3ф. КЗ	СДВ-15-39-10	R²	СДВ-16-64-12	R²
АП	$T_{\text{ВОССТ}} = 3,88 + 2,7 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,97	$T_{\text{ВОССТ}} = 3,75 + 2,47 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,91
РТВ	-	-	$T_{\text{ВОССТ}} = 3,79 + 1,75 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,93
PPM	$T_{\text{ВОССТ}} = 4,09 + 2,5 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,94	$T_{\text{ВОССТ}} = 1,76 + 2,8 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,92
110кВ 2ф. КЗ	СДВ-15-39-10	R²	СДВ-16-64-12	R²
АП	$T_{\text{ВОССТ}} = 2,88 + 1,45 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,83	$T_{\text{ВОССТ}} = 1,43 + 1,75 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,94
РТВ	$T_{\text{ВОССТ}} = 1,38 + 5,25 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,96	$T_{\text{ВОССТ}} = 1,66 + 1,56 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,95
PPM	$T_{\text{ВОССТ}} = 1,83 + 2,9 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,95	$T_{\text{ВОССТ}} = 1,29 + 3,6 \cdot T_{\text{НОМ}}$	0,96

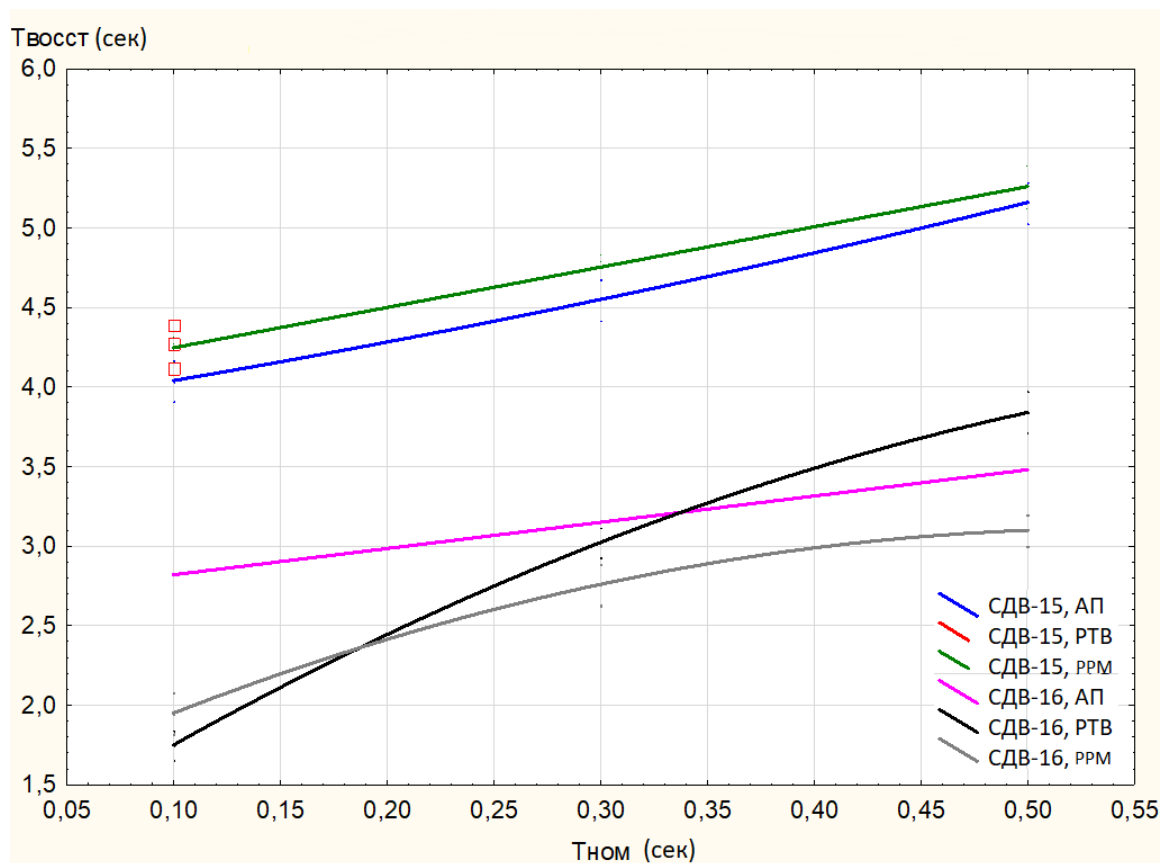


Рисунок 14 – Графики зависимостей времени восстановления нормального режима работы от времени устранения КЗ в случае коротких замыканий

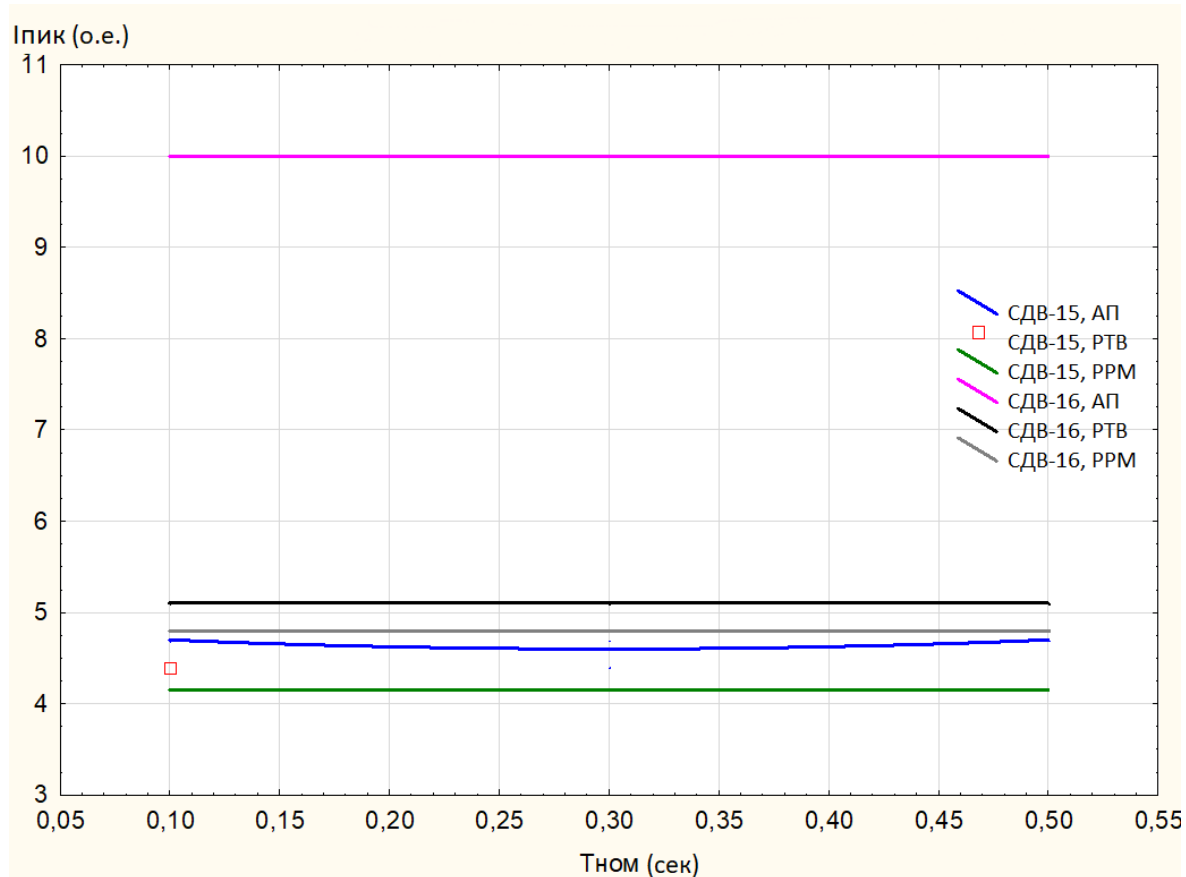


Рисунок 15 – Графики зависимостей пиковых значений тока статора от времени устранения КЗ в случае коротких замыканий

Основные выводы по результатам исследований самозапуска синхронных двигателей в системе электроснабжения в случае коротких замыканий обобщены в таблицах 5 и 6.

Таблица 5.

Тип аварий			Параметры синхронного двигателя			
			Мощность < 2 МВ·А		Мощность > 2 МВ·А	
			Применение АРВ	Пиковые токи статора	Применение АРВ	Пиковые токи статора
Короткие замыкания	3ф. КЗ	Увеличение времени устранения КЗ	Для АРВ по току возбуждения не должно превышать 0,1 с.	Не влияет на пиковые значения тока статора	Не нарушается устойчивость СД	Не влияет на пиковые значения тока статора
		Увеличение мощности КЗ	Время восстановления нормального режима работы СД уменьшается на 4–5% для всех типов АРВ, и не влияет на пиковые токи статора		Время восстановления нормального режима работы СД уменьшается на 5–6% для всех типов АРВ, и не влияет на пиковые токи статора	
		Номинальное напряжение внешней СЭС	С увеличением напряжения до 110 кВ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 5% для всех типов АРВ, а пиковый ток статора уменьшается на 3%		С увеличением напряжения до 110 кВ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 5% для всех типов АРВ, а пиковый ток статора уменьшается на 5%	
		АРВ с отключаемым регулятором по току возбуждения	Время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 7%, а пиковый ток статора уменьшается на 13%		Время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 8%, а пиковый ток статора уменьшается на 15%	

Таблица 6.

Тип аварий			Параметры синхронного двигателя			
			Мощность < 2 МВ·А		Мощность > 2 МВ·А	
			Применение АРВ	Пиковые токи статора	Применение АРВ	Пиковые токи статора
Короткие замыкания	2ф. КЗ	Увеличение времени устранения КЗ	Для АРВ по току возбуждения не должно превышать 0,1 с.	Не влияет на пиковые значения тока статора	Не нарушается устойчивость СД	Не влияет на пиковые значения тока статора
		Увеличение мощности КЗ	Время восстановления нормального режима работы СД уменьшается на 4–5% для всех типов АРВ,		Время восстановления нормального режима работы СД уменьшается на 5–6% для всех типов АРВ,	

			и не влияет на пиковые токи статора	и не влияет на пиковые токи статора
		Номинальное напряжение внешней СЭС	С увеличением напряжения до 110 кВ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 5% для всех типов АРВ, а пиковый ток статора уменьшается на 3%	С увеличением напряжения до 110 кВ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 5% для всех типов АРВ, а пиковый ток статора уменьшается на 4%
		АРВ с отключаемым регулятором по току возбуждения	Время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 7%, а пиковый ток статора уменьшается на 13%	Время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 8%, а пиковый ток статора уменьшается на 15%

Результаты, приведённые в таблицах 6 и 7 позволяют оценить влияние структуры и параметров системы электроснабжения, времени срабатывания релейной защиты, системы АРВ при одновременной работе нескольких СД разной мощности на протекание переходных процессов самозапуска синхронных двигателей при коротких замыканиях:

1. Для всех типов АРВ, с увеличением мощности КЗ от 390 до 1590 МВ·А, время восстановления нормального режима работы СД увеличивается в среднем на 5%.

Влияние мощности КЗ на пиковые значения тока статора не установлено.

2. При наличии одноконтурного АРВ, с увеличением времени перерыва питания до 0,3 сек. оба двигателя работают устойчиво. Однако двигатель большей мощности показывает меньшее время восстановления номинального режима работы и меньшие пиковые значения токов статора в 2 раза по сравнению с двигателем меньшей мощности.

При наличии одноконтурного АРВ в сравнении с его отсутствием пиковые значения тока статора снижаются в 2 раза для обоих двигателей.

С увеличением времени устранения КЗ более 0,3 сек. при трехфазных КЗ и наличии одноконтурного АРВ нарушается устойчивость работы двигателя меньшей мощности.

3. При наличии двухконтурного АРВ, с увеличением времени устранения КЗ до 0,5 сек., время выхода двигателя меньшей мощности на номинальный режим работы возрастает на 29% для трехфазных, и на 31% для двухфазных КЗ, тогда как двигатель большей мощности на 15% и 16% соответственно.

Пиковые значения тока статора снижаются на 10% для обоих двигателей при наличии двухконтурной АРВ в сравнении с одноконтурным.

4. В случае трехфазного КЗ время восстановления нормального режима работы двигателя меньшей мощности возрастает, в среднем в 2 раза, по сравнению со случаем кратковременного перерыва питания.

5. Применение двухконтурного АРВ требует большее время, по сравнению с применением одноконтурного АРВ, необходимое СД для восстановления нормального режима работы, в среднем на 5%.

6. С увеличением величины номинального напряжения с 35 кВ до 110 кВ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается в среднем на 5%, для всех типов АРВ, тогда как пиковый ток статора уменьшается в среднем на 3%.

Аналогично выполненным исследованиям в случае кратковременного перерыва питания, показана возможность снижения тока статора СД во время самозапуска при коротких замыканиях, посредством отключения контура регулирования тока возбуждения.

Для сохранения устойчивой работы СД в режиме самозапуска при коротких замыканиях в случае увеличения времени срабатывания релейной защиты до 0,3–0,5 сек., так же, как и при кратковременном перерыве питания, необходимо увеличить величину тока возбуждения. После устранения неисправности через выдержку времени необходимо подать номинальный ток возбуждения в обмотку СД. В этом случае электродвигатель выходит на номинальный режим работы, не теряя устойчивости.

На основании полученных результатов были сформулированы выводы и рекомендации по нахождению оптимальных параметров самозапуска СД в системе электроснабжения при коротких замыканиях, аналогичные выводам, полученным в третьей главе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научной задачи обоснования параметров самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях при кратковременном перерыве питания или коротком замыкании, что имеет существенное значение для устранения негативных последствий при возникновении аварийных ситуаций в электротехнических комплексах и системах, содержащих синхронные электродвигатели.

В соответствии с поставленными целью и задачами получены следующие результаты:

1. Разработаны компьютерные модели для исследования переходных процессов самозапуска синхронного электродвигателя, учитывающие структуру и параметры системы электроснабжения, время срабатывания релейной защиты, электромагнитные процессы в синхронном электродвигателе, систему автоматического регулирования возбуждения и одновременную работу нескольких электродвигателей.

2. Определены зависимости времени восстановления нормального режима работы и пикового значения тока статора синхронного электродвигателя от времени восстановления напряжения, характеризующие особенности самозапуска вследствие кратковременного перерыва питания или короткого замыкания в системе электроснабжения.

3. Обоснованы параметры самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях при аварийных ситуациях, возникающих вследствие кратковременного перерыва питания или короткого замыкания. Показано влияние на процесс самозапуска СД следующих параметров: напряжение питания и мощность КЗ системы электроснабжения, полная

мощность СД, время восстановления напряжения, структура системы автоматического регулирования возбуждением СД.

4. Предложен способ снижения тока статора синхронных двигателей во время самозапуска, основанный на отключении контура регулирования тока возбуждения. Предлагаемый способ позволяет снизить ток в среднем на 15–35%. Однако в этом случае увеличивается время выхода СД на номинальный режим работы, в среднем на 10–20% в зависимости от типа АРВ.

5. Предложен способ обеспечения самозапуска синхронных двигателей в случае кратковременного перерыва питания или короткого замыкания в системе электроснабжения посредством форсировки возбуждения синхронного электродвигателя. Данный способ позволяет реализовать самозапуск при увеличении времени срабатывания релейной защиты до 0,3–0,5 секунд.

6. Результаты диссертационной работы рекомендуются для использования электротехническими компаниями, работающими в области электрификации промышленных предприятий и разработки электроприводов с синхронными электродвигателями, что позволит предотвратить выпадение двигателей из синхронизма и избежать возникновения аварийных ситуаций.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Лащенко М. Б. Влияние самозапуска мощных двигателей на систему электроснабжения. Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 1. – С. 134–140.

2. Лащенко М. Б., Шевырев Ю. В. Исследование работы синхронного двигателя при кратковременной потере питания для условий горных предприятий. Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика. – 2020. – № 1. – С. 116–122.

3. Лащенко М. Б., Шевырев Ю. В. Влияние систем управления возбуждением синхронного двигателя на самозапуск при кратковременной потере питания. Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 37. – С. 121–136.

4. Лащенко М. Б., Шевырев Ю.В. Программа для оценки влияния самозапуска синхронного двигателя на электрическую сеть горных предприятий. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022668603. Правообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 10.10.2022г. – С. 1.