

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

НОВОЖИЛОВ НИКИТА ГЕННАДЬЕВИЧ

**СТРУКТУРА И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ
ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРИ ПРОВАЛАХ
НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Шонин Олег Борисович

Санкт-Петербург – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕСПЕРЕБОЙНОЙ РАБОТЫ ЧАСТОТНО РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.....	15
1.1 Показатели качества электрической энергии.....	15
1.2 Определение и характеристики провалов напряжения.....	17
1.3 Причины провалов напряжения.....	20
1.4 Влияние провалов напряжения и прерываний питания на работу ЧРП.....	22
1.4.1 Влияние провалов напряжения на работу электродвигателя и приводного механизма.....	22
1.4.2 Влияние провалов напряжения и прерываний питания на работу входного и выходного преобразователя частоты ЧРП.....	24
1.4.3 Влияние провалов напряжения и прерываний питания на работу коммутационной аппаратуры привода	27
1.4.4 Влияние провалов напряжения и прерываний питания на систему управления преобразователя.....	28
1.5 Влияние провалов напряжения и прерываний питания на технологический процесс. Оценка ущерба от отказов ЧРП	30
1.6 Средства повышения устойчивости оборудования при нарушениях КЭ	32
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ПРОВАЛЫ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕЖИМ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.....	37
2.1 Вводные замечания	37
2.2 Классификация провалов в трехфазной сети.	38
2.3 Статистика провалов напряжений в системе электроснабжения предприятия « КИНЕФ»	44
2.3.1 Вводные замечания	44
2.3.2 Методика и результаты исследований	46

2.4 Моделирование аварийных режимов в передающей и распределительной сети. Распространение провалов напряжения в системе электроснабжения.....	52
2.4.1 Методика исследований	52
2.4.2 Построение компьютерной модели системы электроснабжения предприятия	53
2.4.3 Короткие замыкания в линии 110 кВ. Влияние схем соединения обмоток трансформатора ГПП на провалы напряжения в сети	55
2.4.4 Короткие замыкания в сети 6 кВ	57
2.4.5 Короткие замыкания в сети 0.4 кВ	58
2.4.6 Влияние аварийных режимов на различных участках сети на систему трехфазных напряжений на входе низковольтной нагрузки	60
2.5 Оценка напряжения ЗПТ при провалах входного напряжения ЧРП различного типа в соответствии с ABC классификацией	61
2.6 Выводы по главе.....	65
ГЛАВА 3 ВЫЯВЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ ЧРП В ОБЛАСТИ ОСЛАБЛЕННОГО ПОЛЯ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ.....	67
3.1 Вводные замечания	67
3.2 Математическая модель двигателя.....	70
3.2.1 Уравнения обобщенной модели двигателя во вращающейся системе координат	70
3.2.2 Уравнения двигателя при ориентации потокосцепления ротора по действительной оси вращающейся системы координат	74
3.3 Границы рабочей области электропривода	77
3.3.1 Кривые постоянного электромагнитного момента.....	77
3.3.2 Граница по току статора.....	80
3.3.3 Граница по напряжению статора.....	81
3.4 Уравнение границы по напряжению в форме канонического уравнения эллипса.....	83

3.5	Идея построения системы управления в области ослабленного поля для сохранения режимных параметров приводного механизма	87
3.6	Область допустимых режимов работы привода при пониженном напряжении питания	89
3.6.1	Классификация предельных режимов привода в области ослабленного поля. Характеристическая кривая электромагнитного момента.....	91
3.6.2	Определение координат предельного режима работы привода при условии, что момент приводного механизма превышает характеристическое значение электромагнитного момента в критической точке	94
3.6.3	Определение координат предельного режима работы привода при условии, что момент приводного механизма меньше характеристического значения электромагнитного момента в критической точке	96
3.7	Влияние режимных параметров привода и параметров АД на минимально допустимое напряжение ЗПТ	98
3.7.1	Влияние максимально допустимого значения тока статора и синхронной частоты	98
3.7.2	Влияние активного сопротивления статорной обмотки на точность определения предельных режимов.....	101
3.8	Влияние типа механической характеристики приводного механизма на минимально допустимое напряжение ЗПТ.....	102
3.8.1	Механизмы с вентиляторной характеристикой	102
3.8.2	Механизмы с постоянным моментом.....	104
3.9	Выводы по главе.....	105
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЧРП В РЕЖИМЕ ОСЛАБЛЕННОГО ПОЛЯ ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ С ЦЕЛЮ СОХРАНЕНИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ПРИВОДНОГО МЕХАНИЗМА		107
4.1	Введение.....	107
4.2	Обоснование алгоритм управления, основанного на полученных соотношениях между координатами привода.....	108
4.3	Обоснование итерационного алгоритма управления привода	111

4.4 Компьютерная модель привода	115
4.5 Исследование работы привода с векторной системой управления при провалах напряжения в сети питания	123
4.5.1 Провалы напряжения при полной загруженности привода.....	124
4.5.2 Провалы напряжения при частичной загруженности привода	129
4.6 Выводы по главе.....	136
ГЛАВА 5 ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АСИНХРОННОГО ЧРП ВО ВРЕМЯ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕКУПЕРАЦИИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	138
5.1 Вводные замечания	138
5.2 Скалярная система управления асинхронным электроприводом без датчика скорости.....	141
5.2.1 Обоснование наблюдателя скорости вращения	141
5.2.2 Структура системы скалярного управления асинхронным приводом без датчика скорости вращения ротора.....	145
5.3 Работа привода в нормальных условиях эксплуатации	150
5.4 Поведение привода при провалах напряжения в сети	151
5.4.1 Приближенные методы оценки параметров разряда конденсатора ЗПТ при провалах напряжения сети	151
5.4.2 Оценка параметров кривой устойчивости по результатам компьютерного моделирования.....	152
5.4.3 Погрешность расчета параметров кривой устойчивости привода.....	156
5.5 Система управления приводом с реализацией режима рекуперации кинетической энергии.....	157
5.6. Рекуперативный режим работы асинхронного привода со скалярной системой частотного управления без датчика скорости в условиях провала напряжения в электрической сети.....	159
5.7 Оценка длительности работы привода в режиме рекуперации.....	163
5.7.1 Обсуждение результатов компьютерного моделирования	163
5.7.2 Теоретическая оценка предельного времени рекуперации	165

5.8 Выводы по главе.....	170
Заключение	173
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	177
Приложение А Граница по напряжению в форме обобщенного уравнения эллипса	189
Приложение Б Определение параметров предельного режима работы привода с учетом сопротивления статора	192
Приложение В Акт внедрения результатов диссертационной работы.....	199

ВВЕДЕНИЕ

Актуальности темы:

Одна из проблем создания эффективного промышленного производства связана с повышением надежности работы технологического оборудования, отказ которого вызывает нарушение непрерывности сложного технологического цикла, что приводит к значительному ущербу для предприятий. По данным статистики 60% отказов технологического оборудования связаны с возникновением в распределительных и передающих сетях промышленных предприятий провалов напряжения.

Основным потребителем в составе современного промышленного предприятия является электропривод, доля которого в общей структуре потребления электроэнергии достигает 70%. Стремление к повышению энергетической эффективности и производительности технологического оборудования обусловило широкое распространение в различных отраслях промышленности частотно-регулируемого электропривода (ЧРП), который в настоящее время можно считать основой большинства технологических установок. Особенностью ЧРП является высокая чувствительность к провалам напряжения питания, возникновение которых приводит к срабатыванию собственной защиты минимального напряжения (ЗМН) преобразователя и отключению привода от сети во избежание опасных бросков, как зарядных токов конденсатора, так и пусковых токов двигателя. Для ЧРП общепромышленного применения на основе двухзвенного преобразователя частоты время срабатывания ЗМН составляет 0,02-0,04с, что на порядок меньше длительности кратковременных провалов.

Одним из способов сохранения работоспособности привода во время провалов напряжения является использование дополнительных источников и накопителей энергии различного типа, установленных в узле питания приемников или непосредственно в приводе. Экономическая целесообразность применения таких устройств определяется соотношением между ущербом от нарушения технологического процесса и затратами на установку дополнительного

оборудования. В тех случаях, когда установка дополнительного оборудования не имеет достаточного экономического обоснования, целесообразно использование программных средств управления.

Одним из надежных и перспективных способов обеспечения устойчивости привода к провалам напряжения является использование внутренних энергетических ресурсов привода, которые вводятся в действие путем изменения структуры системы управления и использования алгоритмов управления двигателем в зоне ослабленного поля с целью сохранения режима приводного механизма в рамках пропускной способности преобразователей. Другой возможностью является разработка и использование алгоритмов управления процессом рекуперации запасенной кинетической энергии с целью поддержания напряжения звена постоянного тока на требуемом уровне и сохранения тем самым управляемости приводом, что обеспечивает минимизацию времени повторного пуска привода при восстановлении напряжения питания. Основное достоинство такого способа преодоления провалов напряжения заключается в его реализации программными средствами за счет изменения структуры системы управления приводом без установки дополнительного оборудования в силовую часть преобразователя, что делает этот способ наименее затратным.

В связи с этим тему диссертационной работы, направленную на разработку алгоритмических методов повышения устойчивости привода к провалам напряжения следует считать актуальной.

Степень разработанности темы:

Проблеме обеспечения работоспособности привода в условиях нестабильной сети посвящены исследования и разработки ведущих отечественных и зарубежных научных центров, университетов и фирм, таких как НИИПТ, ЦНИИСЭТ, СПбГЭТУ, каф. РАПС, ИГЭУ, ОАО «Силовые машины», Siemens, Danfoss, Schneider Electric и др. Большинство решений основано на совершенствовании схем самозапуска, использовании в электроприводе дополнительных накопительных элементов и преобразователей. В последнее время заметное внимание уделяется алгоритмическим методам, которые

используют особенности электромеханических процессов в приводе при провалах напряжения сети. Исследованиям в данной области посвящены работы dr. J.Holtz (Bergische University Wuppertal), д.т.н. Виноградова А.Б. (ИГЭУ, каф. ЭиА), д.т.н. Косчинского С.В. (ПГУ, каф. ЭВТИБ), д.т.н. Шрейнера Р.Т. (УрФУ), к.т.н. Дементьева Ю.Н. (ТПУ, каф. ЭПЭО), ms Rajagopalan L.N. (University of Wollongong).

Однако остаются нерешенными ряд важных вопросов. К ним следует отнести

- Оценка влияния на устойчивость ЧРП провалов напряжения, характеризующихся различными типами асимметрии;

- Влияние режима работы и типа приводного механизма на устойчивость ЧРП к провалам напряжения;

- Обоснование предельных возможностей работы привода в зоне ослабленного поля для обеспечения требуемого режима приводного механизма в зависимости от глубины провала и степени загруженности привода по мощности;

- Обоснование способа рекуперации кинетической энергии в бездатчиковом асинхронном приводе со скалярной системой частотного управления

- Оценка влияния параметров приводного механизма и электродвигателя на длительность работы привода в режиме рекуперации и оценка эффективности применения режима рекуперации с учетом наиболее вероятного значения длительности провалов напряжения.

Разработка алгоритмов управления приводом при пониженном напряжении в сочетании с алгоритмами рекуперации запасенной энергии позволит повысить устойчивость привода к кратковременным нарушениям в сети электроснабжения и тем самым обеспечить непрерывность технологического процесса.

Цель работы:

Обоснование и разработка программно-алгоритмических средств управления частотно-регулируемым приводом при кратковременных провалах и прерываниях напряжения для сохранения рабочего режима приводного

механизма, непрерывности технологического процесса и минимизации потерь во время аварий в сети электроснабжения.

Основные задачи работы:

Разработка математической и компьютерной модели частотно-регулируемого привода для исследования режима его работы при различных видах провалов напряжения в сети;

Исследование процессов в приводе при работе двигателя в зоне ослабленного поля с целью выявления максимальной глубины провалов напряжения, которую допустимо скомпенсировать с помощью соответствующих алгоритмов управления в рамках существующих ограничений по напряжению и току;

Исследование способов и алгоритмов автоматического перезапуска привода, позволяющих минимизировать длительность повторного пуска и пусковых токов двигателя при восстановлении нормального режима работы сети;

Разработка структуры и алгоритмов скалярного частотного управления бездатчиковым асинхронным электроприводом в нормальном и аварийном режиме на основе переключаемой двухконтурной системы регулирования рекуперацией кинетической энергии, запасенной в приводе.

Методы исследований:

Решение поставленных в работе задач базируется на основных положениях мехатроники, автоматизированного электропривода, теоретических основ электротехники, силовой электроники, современных систем автоматического управления. Для решения задач используются современные методы и программные средства компьютерного моделирования электротехнических комплексов и динамических систем MATLAB/SIMULINK и вычислительные средства MATHCAD.

Научная новизна:

Закономерности протекания электромеханических процессов при работе двигателя в области ослабленного поля, которые позволяют определить зоны устойчивости привода при его различной загруженности по мощности. Оценка

предельных значения провалов напряжения, которые могут быть скомпенсированы за счет внутренних ресурсов привода и алгоритмы обеспечения требуемого режима приводного механизма в условиях провала напряжения и существующих ограничениях по току и напряжению.

Закономерности запаса и регенерации энергии в зависимости от типа двигателя, способа управления и свойств приводного механизма. Алгоритм рекуперации кинетической энергии и зависимость времени работы привода в режиме рекуперации кинетической энергии.

Система скалярного частотного управления асинхронным электроприводом переменной структуры без датчика положения ротора на базе принципа подчиненного регулирования, обеспечивающая эффективную работу привода в нормальном режиме и режиме рекуперации кинетической энергии путем замены внешнего контура регулирования скорости на контур регулирования напряжения звена постоянного тока.

Защищаемые положения:

1. Сохранение режима приводного механизма при провалах напряжения в сети достигается управлением приводом в области ослабленного поля на основе разработанного алгоритма, учитывающего зависимость минимально допустимого напряжения от параметров привода. Формирование требуемой рабочей точки привода происходит при одновременном регулировании d - и q -компонент тока статора по законам, зависящих от соотношения между требуемым моментом и характеристическим моментом – параметром привода в области ослабленного поля, введенным в рассмотрение для выделения области ослабленного поля при относительно малых провалах напряжения и области, соответствующей более глубоким провалам.

2. Минимизация времени повторного пуска асинхронного привода со скалярной системой управления и наблюдателем скорости вращения достигается реконфигурацией двухконтурной системы подчиненного регулирования для осуществления электрической рекуперации кинетической энергии с целью поддержания напряжения ЗПТ на требуемом уровне. Оценка эффективного

времени рекуперации производится на основе предложенной модели выбега двигателя с учетом тормозного электромагнитного момента, параметров ЗПТ и приводного механизм. Кратное превышение максимального времени рекуперации по отношению к среднестатистической длительностью провалов напряжения позволяет говорить о рекуперации кинетической энергии как эффективном методе преодоления приводом провалов напряжения.

Научная и практическая ценность:

1. Система векторного управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом, реализующая управление приводом в режиме ослабленного поля для обеспечения неизменности режимных параметров приводного механизма при возникновении провалов напряжения в сети питания.

2. Зависимость минимально-допустимого значения напряжения звена постоянного тока от параметров привода, при котором достигается неизменность режимных параметров приводного механизма при реализации режима ослабленного поля.

3. Система скалярного управления асинхронным электроприводом без датчика скорости вращения основанная на косвенном вычислении частоты вращения ротора двигателя по линеаризованной зависимости частоты скольжения от активной составляющей тока статора и реализующая управление приводом в режиме рекуперации кинетической энергии для сохранения работоспособности привода в течении длительности провала напряжения или перерыва электропитания.

4. Зависимости времени работы привода в режиме рекуперации кинетической энергии от параметров привода, которая используется для оценки максимального времени, в течении которого возможно сохранение заданного значения напряжения звена постоянного тока.

Апробация работы:

Основные положения диссертационной работы докладывались на международном форуме-конкурсе молодых ученых «Проблемы недропользования», 2014г.; на научно-практической конференции с

международным участием «Неделя науки СПбПУ», 2014г.; на международной научно-практической конференция «Энергоэффективность энергетического оборудования», 2015г.; на 2-ом международном научно-техническом семинаре «Современные разработки в области электроснабжения и электропривода», 2015г.; международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», 2016г; 10-й международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения», 2016г.; 2-й всероссийской молодежной научно-практической конференции «Введение в энергетику»; конференции молодых исследователей в области электротехники и электроники: ElConRus, 2017г.; Международной научно-технической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017», 2017г.

Результаты реализации работы:

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований приняты к использованию для разработки методов и средств повышения надежности работы технологического электрооборудования при кратковременных провалах напряжения в сети электроснабжения предприятия ООО ПО «Киниф».

Личный вклад автора:

1. Разработана имитационная компьютерная модель частотно-регулируемого электропривода с векторной системой управления в среде Simulink/MatLab для исследования работы привода в области ослабленного поля.

2. Получена зависимость минимально-допустимого значения напряжения звена постоянного тока от параметров привода, при котором достигается неизменность режимных параметров приводного механизма при реализации режима ослабленного поля.

3. Разработана имитационная компьютерная модель частотно-регулируемого электропривода с бездатчиковой системой скалярного управления, реализующая алгоритм управления приводом в режиме рекуперации кинетической энергии механизма в среде Simulink/MatLab.

4. Получена зависимость времени работы привода в режиме рекуперации кинетической энергии от параметров привода, которая используется для оценки максимального времени, в течении которого возможно сохранение заданного значения напряжения звена постоянного тока.

Публикации:

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 11 печатных работах, из них 5 в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы:

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, изложенных на 200 страницах. Содержит 83 рисунка, 4 таблицы, список литературы из 103 наименования и 3 приложения.

ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕСПЕРЕБОЙНОЙ РАБОТЫ ЧАСТОТНО РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

1.1 Показатели качества электрической энергии

Нормальный режим работы технологического оборудования возможен при бесперебойной поставке электроэнергии надлежащего качества в соответствии с требованиями со стороны электротехнического оборудования. Показатели качества электрической энергии (КЭ) отражают допустимое отклонение напряжения от номинального значения по таким параметрам как частота, значение и форма напряжения, содержание высших гармоник, степень асимметрии трехфазной системы напряжений и ряду других. Требованиями к качеству энергии отражены в современных стандартах ГОСТ, EN, IEC. Действующий в настоящее время в России межгосударственный стандарт ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [19] является аналогом регионального европейского стандарта EN 50160 – 2010 [99], применяемого в Европейском Союзе [16]. Основой этих документов являются данные исследований Международной Электротехнической Комиссии, которые отражены в серии технических отчетов IEC – 61000[103]. В соответствии с этими данными отклонение параметров качества энергии от нормативных показателей приводит к отказам электрического оборудования и много миллиардным убыткам [1,4,21,37,62,73,85].

В последнее время широкое распространение в различных отраслях промышленности получил частотно-регулируемый электропривод (ЧРП)[7,9,11,53], который является одним из основных элементов современных технологических установок различного назначения. Несмотря на ряд преимуществ, ЧРП, построенный на базе силовых полупроводниковых преобразователей и микропроцессорной техники, оказался весьма чувствительным к отклонению параметров электрической энергии от нормы,

особенно в части отклонения напряжения от номинальных значений и возникновения асимметрии трехфазной системы напряжений [3,27,30].

В соответствии с ГОСТ одним из показателей КЭ является отклонение напряжения U от номинального значения $U_{\text{ном}}$

$$\delta U = \frac{U_{\text{ном}} - U}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

В нормативных документах используются нормально допустимые и предельно допустимые значения показателей КЭ. В соответствии ГОСТ 721 и ГОСТ 21128 нормально допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения δU на выводах приемников электрической энергии составляют

$$\delta U_{\text{доп}} = \pm 5\% ; \quad \delta U_{\text{пред}} = \pm 10\%$$

Нормально допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения в точках общего присоединения потребителей электрической энергии к электрическим сетям напряжением 0,38 кВ и более должны быть установлены в договорах на пользование электрической энергией между энергоснабжающей организацией и потребителем с учетом необходимости выполнения норм настоящего стандарта на выводах приемников электрической энергии.

Режим работы сети, при котором показатели КЭ отличаются от заданных стандартом норм, считается аварийным режимом [1].

В соответствии с действующими международными стандартами все явления, связанные с нарушением установленных норм КЭ, принято разделять на продолжительные и кратковременные.

Наибольшую угрозу для технологического процесса и нормального режима работы электротехнического оборудования представляют кратковременные нарушения КЭ [29,22,23,73,85]. Кратковременные нарушения вызваны возникновением в сетях электроснабжения таких явлений как провалы напряжения, перенапряжения и кратковременные прерывания питания.

Прерывание питания – явление, при котором в трёхфазных системах электроснабжения напряжение меньше 5 % опорного напряжения во всех фазах. Если напряжение меньше 5 % опорного напряжения не во всех фазах, ситуацию рассматривают, как провал напряжения. Пороговое значение начала прерывания считают равным 5 % опорного напряжения [19].

1.2 Определение и характеристики провалов напряжения.

Под провалом напряжения (рисунок 1.1) понимается явление, которое характеризуется уменьшением среднеквадратического значения напряжения в одной или более фазах сети ниже порогового значения, равного 90% номинального напряжения [1,19,99,103]. Провал напряжения характеризуется такими показателями как длительность провала $T_{\text{п}}$, остаточное напряжение $U_{\text{ост}}$ или минимальное среднеквадратическое значение напряжения, отмеченное в течение провала напряжения, глубина провала $\Delta U_{\text{п}} = U_{\text{ном}} - U_{\text{ост}}$. Длительность провалов напряжения обычно не превышает 1 минуты.

Глубина провала и остаточное напряжение часто задаются в относительных единицах

$$h = U_{\text{ост}}/U_{\text{ном}} ; d = \Delta U_{\text{п}}/U_{\text{ном}} ; d = 1 - h \quad (1.2)$$

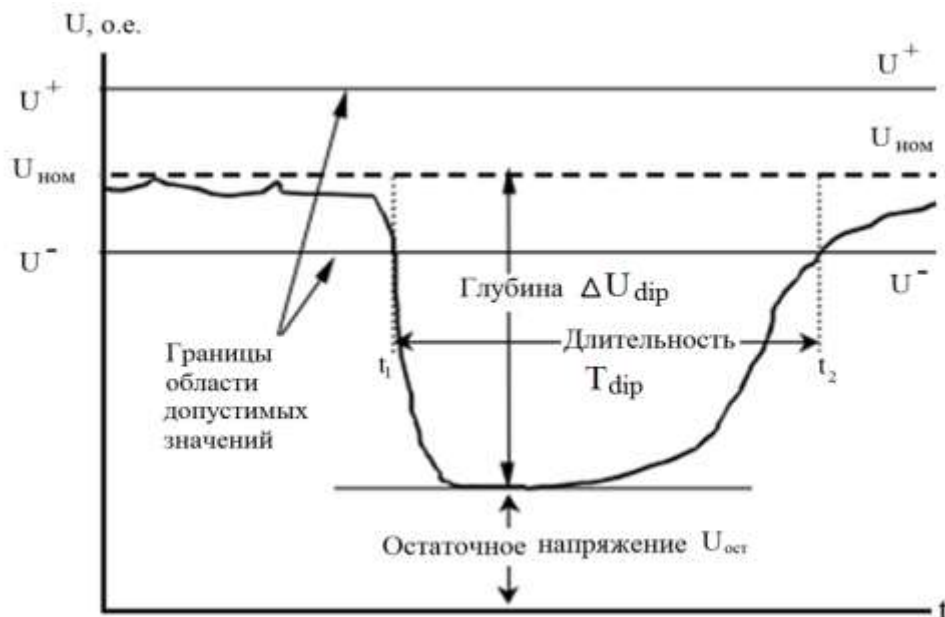


Рисунок 1.1 - Кривая провала напряжения в одной фазе

К другим важным параметрам относится скачок фазы во время аварии в сети (рисунок 1.2)[87].

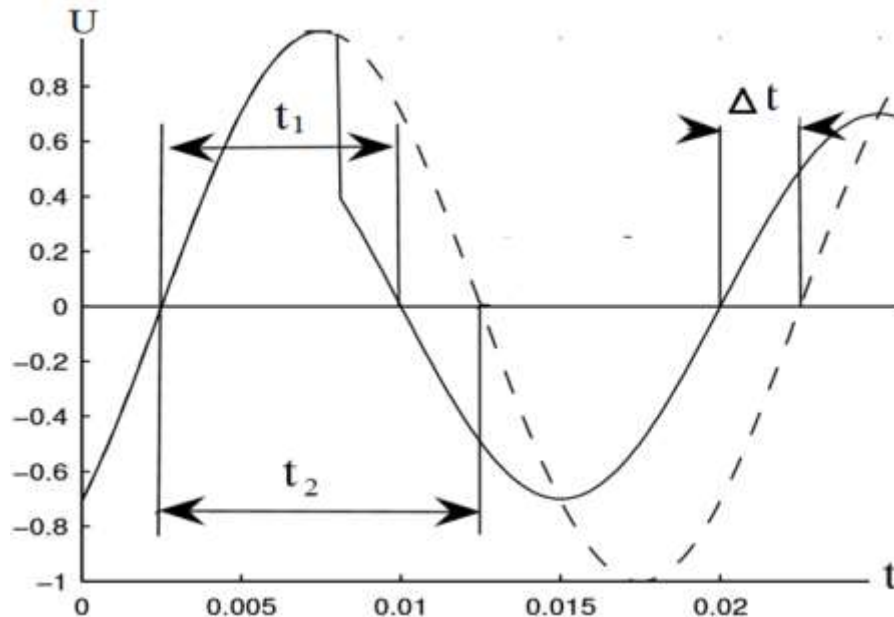


Рисунок 1.2 - Скачок фазы при провале напряжения

Изменение угла сдвига фаз между напряжениями в нормальном и аварийном режиме определяется по смещению Δt точки пересечения нуля мгновенными значениями фазного напряжения как показано на рисунке 1.2, на котором пунктирной линией выделена форма напряжения при отсутствии провала. Смещение угла сдвига фаз может быть записано следующим образом:

$$\Delta\psi_{\Pi} = \Delta t \frac{2\pi}{T} \quad (1.3)$$

Здесь T – период колебания напряжения сети.

Существует несколько способов описания провалов напряжения: по наименьшему уровню напряжения одной из фаз, по провалам напряжения в каждой из фаз, которые в этом случае рассматриваются как три провала напряжения. В третьем случае провал оценивается по напряжению, усредненному по фазам.

При оценке провалов по значениям напряжений каждой из фаз различают симметричные провалы, при которых остаточные напряжения одни и те же для всех фаз при угле сдвига фаз $\theta = 120^\circ$, и несимметричные провалы, для которых

характерны разные значения остаточных напряжений в фазах и отличие угла сдвига фаз от стандартного угла 120° .

В настоящее время широко используется описание провалов с помощью ABC классификации, которая включает семь характерных типов провалов А, В, С, D, Е, F, G, обобщающих возможные виды несимметричных напряжений, возникающих в результате аварий в сети [87]. Подробно ABC классификация рассмотрена в главе 2. Приведем пример описания фазных и линейных напряжений в относительных единицах при провале типа С

$$\dot{U}_a = 1, \quad \dot{U}_b = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}h, \quad \dot{U}_c = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}h$$

$$\dot{U}_{ab} = \frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}h, \quad \dot{U}_{bc} = -jh\sqrt{3} \quad \dot{U}_{ca} = -\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}h$$

Здесь h - остаточное напряжение, о.е.

Осциллограммы и векторная диаграмма комплексных амплитуд фазных напряжений показаны на рисунке 1.3.

Другой способ описания провалов напряжения основан на методе симметричных составляющих [58,81,82,92], в соответствии с которым асимметричная система напряжений представляется как наложение прямой, обратной и нулевой последовательностей.

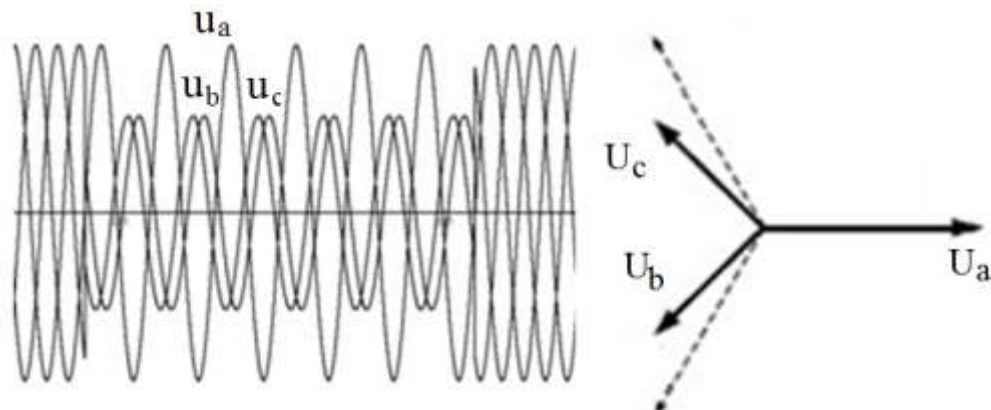


Рисунок 1.3 - Осциллограммы и векторные диаграммы фазных напряжений асимметричной системы типа С

По известной асимметричной системе напряжений напряжение фазы А симметричных составляющих могут быть записаны в виде:

$$\begin{bmatrix} U^+ \\ U^- \\ U^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}, \quad a = \exp(j2\pi/3) \quad (1.4)$$

Для рассмотренного примера провала типа С (рис.1.3) получим :

$$U_a^{(+)} = 0.75, \quad U_a^{(-)} = 0.25, \quad U_a^{(0)} = 0.$$

1.3 Причины провалов напряжения

Провалы напряжения и прерывания питания являются по своему характеру случайными событиями, возникновение которых обусловлено действием многих факторов. К основным причинам возникновения провалов напряжения относятся короткие замыкания в передающих линиях и распределительных сетях, броски токов, связанные с включением трансформаторов, прямым пуском двигателей и др. [67,71]. Для оценки глубины провала и скачка фазы напряжения в результате КЗ в линии часто используется упрощенная схема, показанная на рисунке 1.4. Напряжение узла нагрузки определяется формулой делителя напряжения

$$\dot{U}_n = \dot{E}_s \frac{l_1 \hat{Z}_{f1}}{l_1 \hat{Z}_{f1} + Z_s}, \quad (1.5)$$

где l_1 – расстояние до точки КЗ, \hat{Z}_{f1} – погонное сопротивление линии передачи энергии.

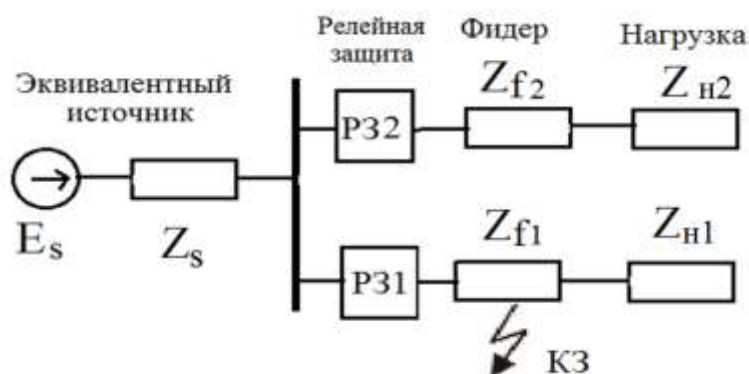


Рисунок 1.4 - Упрощенная схема для определения параметров провалов напряжения

Остаточное напряжение в произвольном узле нагрузки при КЗ в разветвленной сети зависит от удаленности узла от места возникновения КЗ,

режима нейтрали сети, схемы соединения обмоток трансформаторов, включенных между точкой КЗ и конкретным потребителем [31,57,87,103].

Длительность провалов напряжения в значительной мере обусловлена временем срабатывания устройств релейной защиты и сетевой автоматики, предназначенных для отключения поврежденных участков сети, автоматического повторного включения в предположении самоустранения причин КЗ, системы автоматического ввода резерва при аварии на основной питающей линии и т.д.

Продолжительность режима КЗ и связанного с ним провала напряжения определяется временем срабатывания релейной защиты, которое зависит от типа защиты, разветвленности защищаемой сети и других факторов. Среднее время срабатывания может составлять 100-200мс [29].

Независимое действие многих факторов приводит к тому, что провалы напряжения носят случайных характер. Пример распределения провалов по факторам остаточного напряжения и длительности праведен на рисунке 1.5

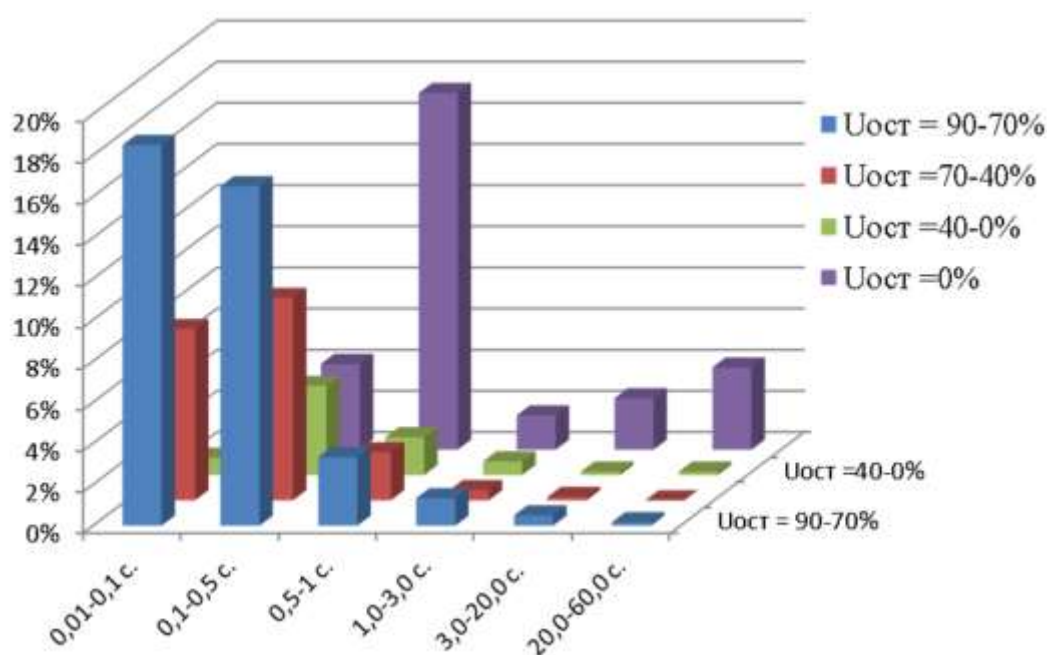


Рисунок 1.5 - Усредненное распределение провалов напряжения по факторам длительности и остаточного напряжения

Оценка влияния провалов напряжения и перерывов электропитания на работу технологического оборудования и выбор способов и средств повышения устойчивости к аварийным ситуациям в сети могут быть выполнены на базе

статистических данных для конкретных сетей электроснабжения и применения компьютерного моделирования аварийных режимов электрических сетей. .

1.4 Влияние провалов напряжения и прерываний питания на работу ЧРП

В соответствии с ГОСТ Р 50369-92-2005 электроприводом является электромеханическая система, состоящая в общем случае из взаимодействующих преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления. Рассмотрим влияние провалов напряжения на работу отдельных блоков привода, образующих электромеханическую систему.

1.4.1 Влияние провалов напряжения на работу электродвигателя и приводного механизма

Рассмотрим влияние провалов напряжения на работу технологических установок с асинхронным электроприводом, используя механические характеристики двигателя и приводного механизма (рисунок 1.6).

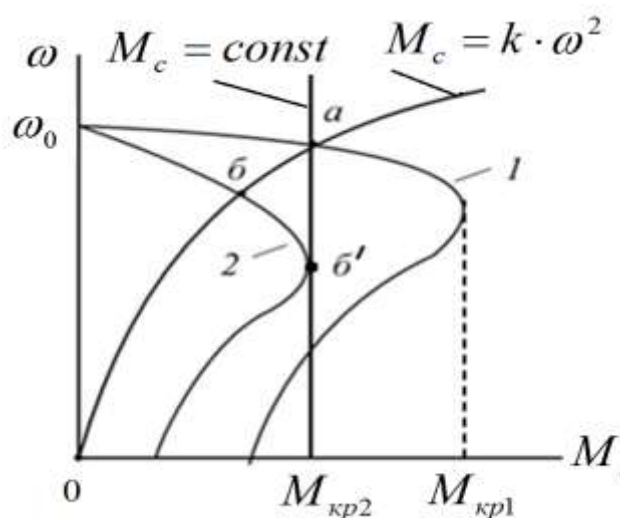


Рисунок 1.6 - Механические характеристики асинхронного двигателя и приводного механизма в нормальном режиме работы (кривая 1) и при пониженном напряжении питания (кривая 2)

Нормальный режим работы электропривода определяется точкой пересечения механических характеристик a электродвигателя (кривая 1) и обоих механизмов $M_c = \text{const}$ и $M_c = k\omega^2$. При уменьшении напряжения питания без изменения синхронной частоты, происходит уменьшение критического момента АД, который определяется выражением:

$$M_{\text{кр.}} = \frac{3z_p U_s^2}{2\omega_s (\omega_s \cdot (L_{s\sigma} + L_{r\sigma}))^2}, \quad (1.6)$$

где z_p - число пар полюсов электродвигателя; U_s - напряжение питания двигателя; ω_s - частота напряжения питания, $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ - индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора.

При изменении критического момента происходит изменение механической характеристики электродвигателя (кривая 2), в результате возникают новые режимы, которым соответствует точка b для механизма с вентиляторной характеристикой и точка b' – для механизма с постоянным моментом сопротивления. Под устойчивостью понимается способность электродвигателя совершать вращательное движение при отклонении параметров питающего напряжения, для чего необходимо, чтобы точка пересечения механических характеристик двигателя и механизма сопротивления всегда оставалась на рабочем участке механической характеристики двигателя [42,65,68]. Этим требованиям, видно из рисунка (1.6), удовлетворяет электропривод с вентиляторной нагрузкой. В случае же нагрузки с постоянным моментом сопротивления $M_c = M_{\text{кр}2}$ точка b' является границей устойчивости, и при дальнейшем снижении напряжения происходит «опрокидывание» двигателя.

При снижении напряжения двигателя происходит снижение момента и скорости вращения асинхронного двигателя, что вызывает нарушение нормальной режима технологического процесса. Другим следствием снижения напряжения является рост тока, что может привести к перегреву обмоток при длительном режиме работы. Более опасным является перегрузка током ключей

инвертора, которая может привести к отключению двигателя внутренней защитой. Анализ преобразователей частоты, представленных в настоящее время на рынке, показывает, что перегрузочная способность по току в среднем составляет 150-200% от номинального значения.

При восстановлении напряжения в сети все привода, которые не были отключены от сети защитой минимального напряжения, переходят в режим самозапуска [10,61,72]. Использование плавного пуска позволяет ограничить броски токов до номинальных значений [8,17]. Однако, в случае отключения привода по сигналу реле минимального напряжения возникает проблема повторного пуска выбегающего двигателя при восстановлении напряжения из-за отсутствия синхронизации процессов в двигателе с питающим напряжением [39].

Повторный пуск привода с частотными преобразователями имеет свои особенности, которые необходимо учитывать.

1.4.2 Влияние провалов напряжения и прерываний питания на работу входного и выходного преобразователя частоты ЧРП

Наиболее распространенной топологией ЧРП является структура «диодный выпрямитель – звено постоянного тока – автономный инвертора напряжения – асинхронный двигатель» (рисунок 1.7) [9,36].

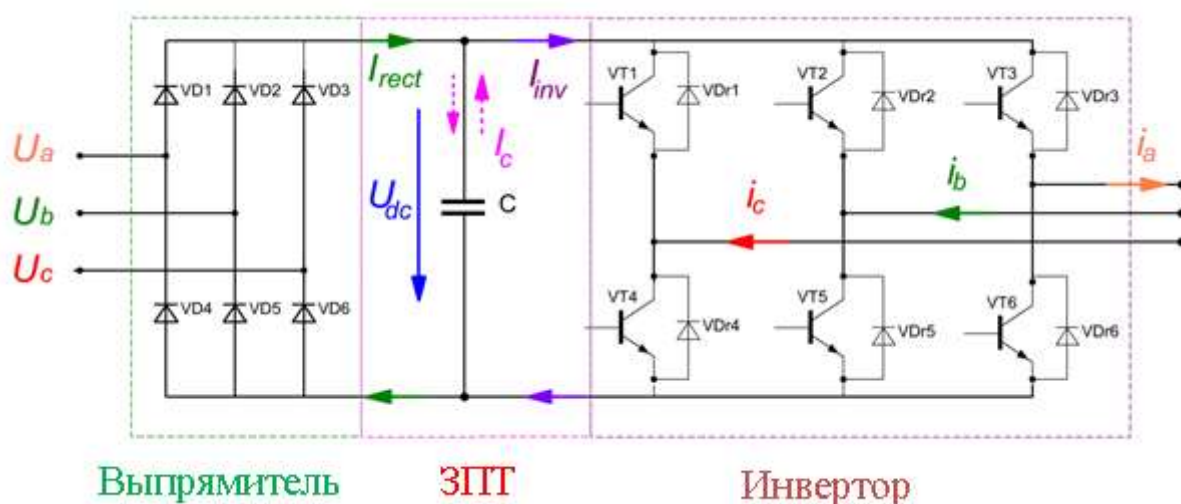


Рисунок 1.7 - Схема преобразователя частоты на основе АИН

Важную роль в работе ЧРП играет накопительный конденсатор [20,48,56,88,75,], удельная емкость которого $\hat{C} = C/P_{\text{ном}}$ определяет коэффициент пульсаций ЗПТ и время разряда при снижении напряжения сети до остаточного напряжения U_{dc} . В зависимости от уровня остаточного напряжения в сети возможны следующие варианты развития событий:

- напряжение ЗПТ уменьшается до уровня остаточного напряжения, которое меньше уставки срабатывания собственной защиты минимального напряжения (ЗМН) $U_{\text{dc}}^{\text{ЗМН}}$. В этом случае преобразователь и привод продолжают работать при пониженном напряжении $U_{\text{dc}}^{\text{ЗМН}} < U_{\text{dc}} < U_{\text{dc}}^{\text{НОМ}}$ до тех пор, пока не произойдет срабатывание защиты от перегрузки по току или пока напряжение в сети не восстановится.

- напряжение ЗПТ уменьшается до уровня срабатывания ЗМН преобразователя. При условии $U_{\text{dc}} = U_{\text{dc}}^{\text{ЗМН}}$ срабатывает внутренняя защита минимального напряжения, которая прерывает работу инвертора, прекращая тем самым питание двигателя и предотвращая дальнейший разряд конденсатора ЗПТ. В этом случае остается проблема безаварийного повторного пуска выбегающего двигателя при восстановлении напряжения сети [76,80]. Альтернативой является разряд конденсатора, остановка двигателя, повторный заряд конденсатора и пуск двигателя.

Выбор уставки срабатывания защиты минимального напряжения зависит от максимально-допустимого тока диодов выпрямителя, способных выдержать бросок зарядного тока, который прямо пропорционален разности напряжений, номинального и остаточного [94,95]. Значение минимального напряжения ЗПТ устанавливается производителем оборудования и выбирается в диапазоне 80-60% от номинального значения. Такой выбор уставки $U_{\text{dc}}^{\text{ЗМН}}$ учитывает также минимально допустимое снижение напряжения из условия сохранения работоспособности системы управления, которая получает питание от звена постоянного тока.

Работа реле минимального напряжения отображается вольт-секундной характеристикой, которая также носит название кривой устойчивости ЧРП к провалам напряжения (рисунок 1.8) [76,77,102]. Кривая устойчивости строится в прямоугольной системе координат, в которой по оси абсцисс откладывается время, а по оси ординат - напряжение конденсатора и напряжение сети питания в относительных единицах. За начало отсчета берется момент возникновения в сети провала напряжения. Кривая устойчивости имеет ступенчатую форму функции Хэвисайда:

$$U_1(t) = U_{\min 1} \delta_1(t - T_1) \quad (1.7)$$

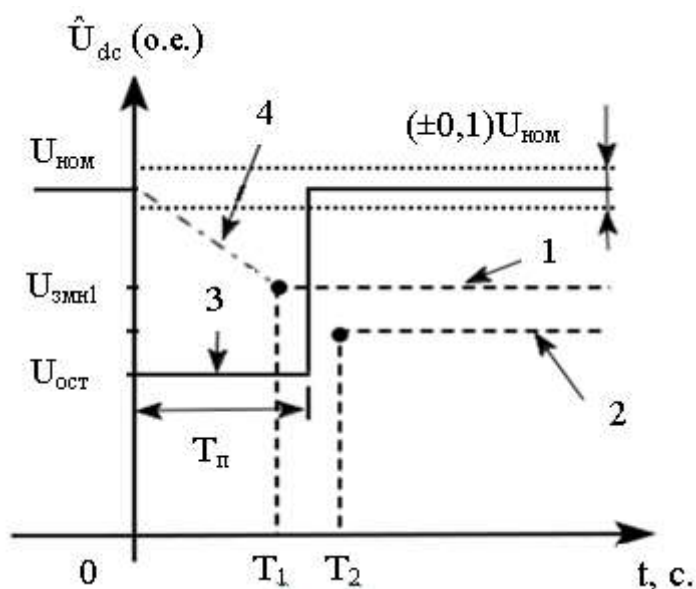


Рисунок 1.8 - Характеристика устойчивости ЧРП к провалам напряжения. Кривая 1 соответствует номинальным параметрам привода, кривая 2 соответствует отклонению привода от номинального режима, кривая 3 отражает изменение напряжения при провале и последующем восстановлении нормального питания, кривая 4 соответствует разряду конденсатора

Кривая задается двумя параметрами: напряжением срабатывания защиты минимального напряжения $U_{зmn1}$ и временем работы привода до срабатывания релейной защиты T_1 . Здесь индекс 1 относится к номинальному режиму работы привода. Если остаточное напряжение U_{dc} меньше уставки срабатывания $U_{зmn1}$, а время провала $T_{п}$ больше времени T_1 , то ЗМН срабатывает и отключает привод.

Максимально возможная длительность работы привода в отсутствии сетевого питания или при глубоком снижении напряжения в сети определяется ёмкостью конденсаторной батареи (КБ) и загруженности привода по мощности. Эта величина рассчитывается для номинального режима по формуле, вытекающей из условия баланса энергии [80,102]

$$T = \frac{\left((U_{dc}^{ном})^2 - (U_{dc \text{ мин}})^2 \right) \cdot C}{2 \cdot P_{ном}} \quad (1.8)$$

Максимальное время отсутствия питания, как правило, составляет значение 1-2 периода питающего напряжения $T_1 = 20 - 40$ мс, что существенно меньше длительности провалов напряжения [80,102]. Увеличение ёмкости КБ позволяет повысить устойчивость привода к провалам напряжения, однако такое решение связано с увеличением массово-габаритных и стоимостных показателей привода. По разным оценкам удельная ёмкость КБ составляет $\hat{C} = 80 - 500$ мкф/кВт. Максимальное время работы привода при глубоких провалах напряжения в сети и прерываниях питания на порядок меньше наиболее вероятной длительности существования аварийного режима.

1.4.3 Влияние провалов напряжения и прерываний питания на работу коммутационной аппаратуры привода

Для соединения привода с сетью используются магнитные пускатели или контакторы (рисунок 1.9).

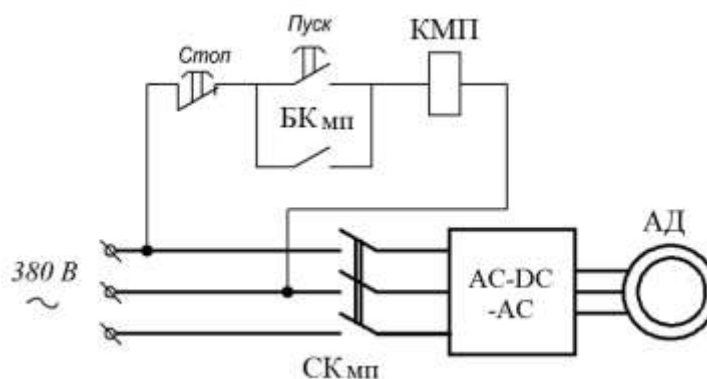


Рисунок 1.9 - Схема подключения ЧРП к сети через магнитный пускатель. КМП – катушка магнитного пускателя, БКМП – блокирующие контакты, СКМП – силовые контакты

Пускатель одновременно выполняет функцию исполнительного механизма различных систем РЗА. Посредством пускателя реализуется внешняя система защиты минимального напряжения и система автоматического повторного включения.

Являясь составной частью электропривода, пускатель обладает низкой устойчивостью провалам и прерываниям напряжения[21,67]. Проблема низкой устойчивости пускателя к перебоям электроснабжения связана с тем, что катушка пускателя получает питание от входных линий ЧРП и при провалах теряет удерживающую способность при снижении питающего напряжения до 85-80% номинального напряжения[73]. Вследствие размыкания контактов это приводит к прерыванию питания самого преобразователя. Для сохранения удерживающей способности пускателя применяют дополнительные источники питания, как правило, небольшие конденсаторные батареи. В отдельных случаях для питания катушки питания могут применяться независимые линии питания.

1.4.4 Влияние провалов напряжения и прерываний питания на систему управления преобразователя

Система управления преобразователем частоты реализуется на базе программируемого логического контроллера, который служит для обработки информации, поступающей от различных датчиков, и реализации алгоритмов управления за счет формирования управляющих импульсов. Контроллер является устройством микропроцессорной техники. Для анализа чувствительности данного микропроцессорной техники к провалам напряжения в настоящее время пользуются кривой СВЕМА - Computer and Business Equipment Manufacturers Association [73,85,97,103] которая представлена на рисунках 1.10 и 1.11.

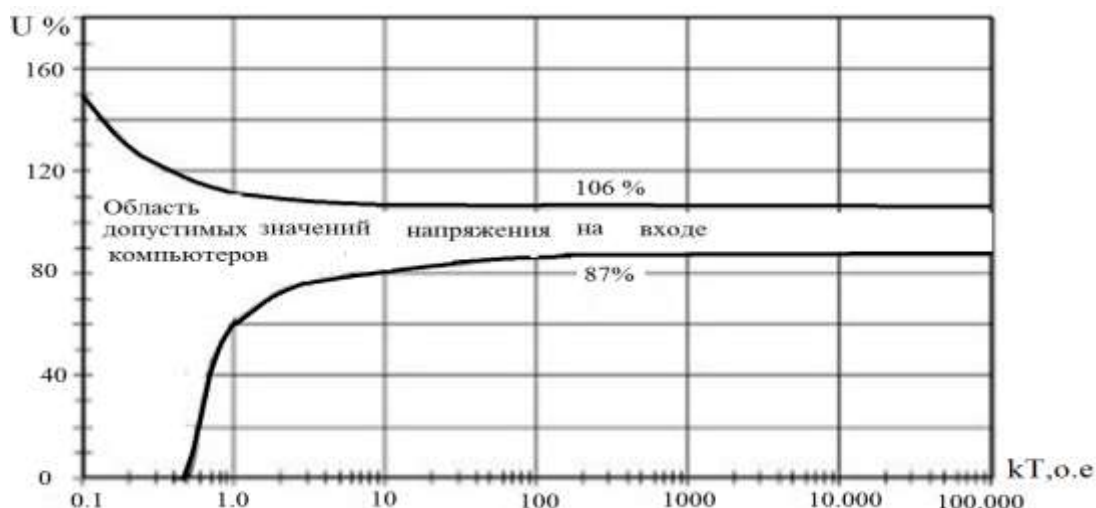


Рисунок 1.10 - СВЕМА кривая для установившегося режима входного напряжения микропроцессорного оборудования

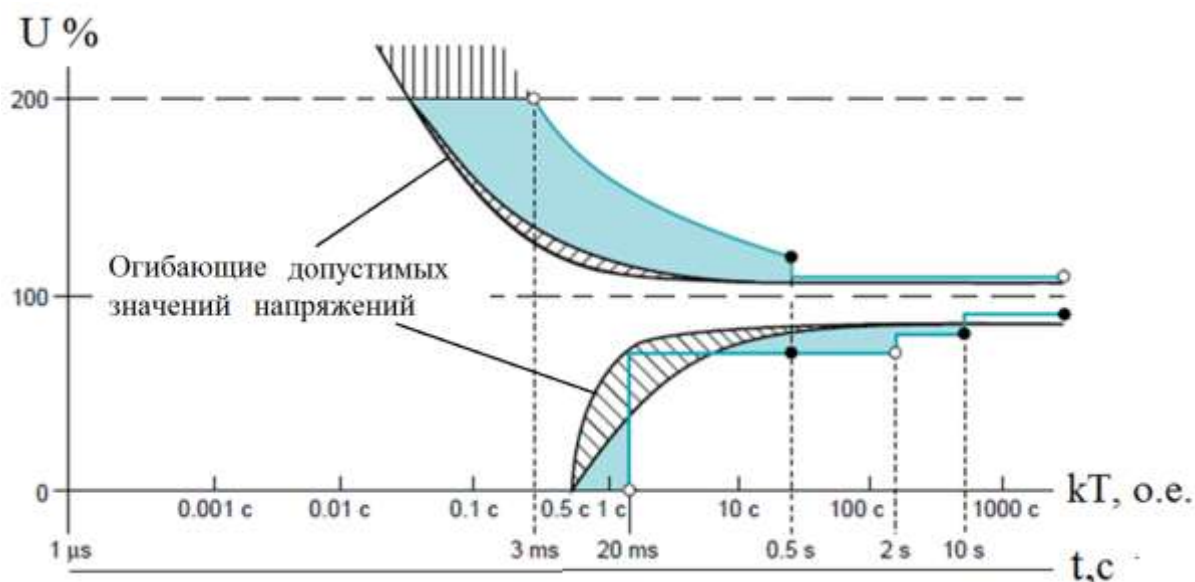


Рисунок 1.11 - Кривая устойчивости микропроцессорного оборудования СВЕМА , учитывающая импульсное воздействие и отклонение от номинального напряжения вследствие приходных процессов

Кривые СВЕМА также как и кривые устойчивости частотно-регулируемого привода отображают две области:

- область допустимых значений напряжений, которая ограничена сверху кривой перенапряжений и снизу - кривой провалов;
- область, в которой работа устройств является недопустимой в силу возможного повреждения устройств компьютерной и микропроцессорной техники.

Из рассмотрения кривых СВЕМА следует, что основные параметры, такие как допустимая глубина снижения напряжения и предельная длительность провалов напряжения соответствуют кривой устойчивости преобразователя частоты ЧРП.

Для того чтобы получить полное представление о влиянии возмущений в сети на работу частотно регулируемого привода необходимо рассматривать кривые устойчивости основных элементов ЧРП на одной плоскости. Анализ таких кривых показывает, что наиболее уязвимыми звеньями являются элементы системы управления и коммутационная аппаратура, которые имеют минимальное время допустимого отсутствия питания. Отметим, что предельное время работы контроллера в условиях глубокого снижения напряжения минимум в два раза меньше времени отключения самого преобразователя.

1.5 Влияние провалов напряжения и прерываний питания на технологический процесс. Оценка ущерба от отказов ЧРП

Одной из особенностей современного промышленного производства является сложная технологическая последовательность обработки сырья. В таких условиях незапланированное отключение технологического оборудования приводит не только к нарушению одной ступени обработки, но также ведет к нарушению всего технологического цикла, что сопровождается большими экономическими потерями для предприятия. Убытки, которые несет предприятие вследствие нарушения технологического процесса, складываются из брака части продукции, недовыпуска продукции, вызванного вынужденным простоем оборудования, и затратами сопровождающими процесс восстановления нормального режима работы [85]. Особенно негативны последствия нарушений режима работы технологического оборудования для предприятий с непрерывным технологическим циклом, к которым относятся предприятия металлургической и нефтеперерабатывающей промышленности [4,55,62]. Для того чтобы определить насколько временное нарушение режима работы оборудования негативно влияет на технологический процесс и какие средства повышения устойчивости привода

следует применить необходимо производить анализ экономического ущерба, который может быть вызван провалами напряжения и прерыванием питания.

Выбор средств обеспечения непрерывности технологического процесса или способов минимизации времени аномального функционирования технологического комплекса основывается на сопоставлении затрат на установку дополнительного оборудования или разработку других мер с одной стороны и размера ущерба вследствие отказов ЧРП.

В настоящее время информация об экономических убытках отечественных предприятий, вызванных нарушениями качества энергии, в открытом доступе не представлено. Однако с учетом общих направлений развития промышленности можно приблизительно получить представление о таких убытках, опираясь на зарубежные источники. Воспользуемся данными работы [73], в которой оцениваются убытки в различных отраслях промышленности Швеции, связанные с провалами напряжения (рисунок 1.12).

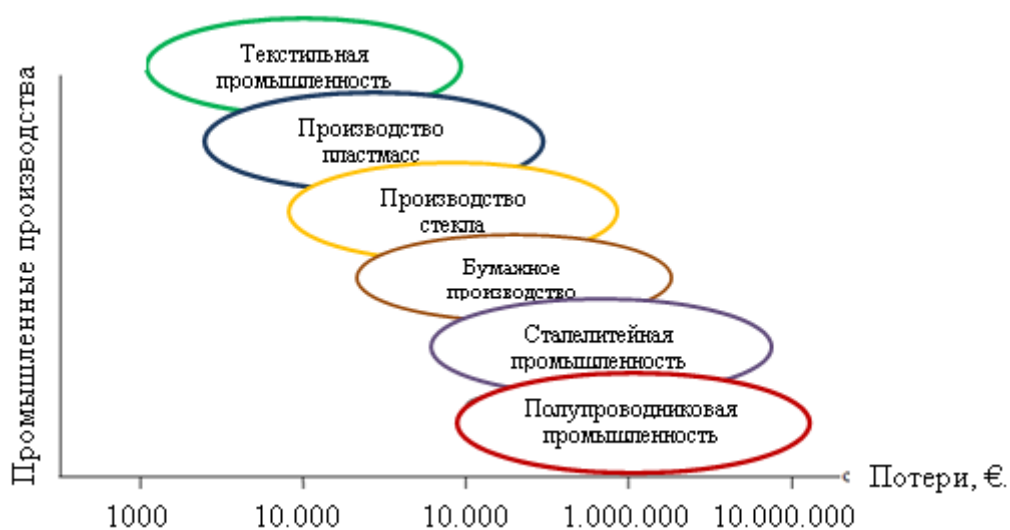


Рисунок 1.12 - Потери предприятий, вызванные провалами напряжения.

Из анализа представленной статистики следует, что провалы напряжения приводят к существенным экономическим потерям. Наличие подобной информации позволяет сделать оценку затрат на использование дополнительных средств повышения надежности и устойчивости технологического оборудования.

1.6 Средства повышения устойчивости оборудования при нарушениях КЭ

Для обеспечения бесперебойной работы ЧРП технологических установок используются различные средства, которые условно можно разделить на несколько групп:

средства релейной защиты и противоаварийной автоматики, используемых в системах электроснабжения, элементы FACTS, источники бесперебойного питания на базе накопителей энергии различного типа, дополнительные силовые элементы в составе ЧРП, программно-алгоритмические методы [76,79,80,92].

Средства системы электроснабжения

К данной категории оборудования относятся системы восстановления нормального режима работы (ВНР) электрических сетей. Под системами ВНР сетей понимается устройства сетевой автоматики, задача которых состоит в том, чтобы после устранения неисправности в сети электроснабжения устройствами релейной защиты восстановить и обеспечить электроснабжение ранее отключенных потребителей. Для решения данной задачи используются системы автоматического повторного включения (АПВ) и системы автоматического ввода резерва (АВР) [21,23].

В зависимости от требований по обеспечению бесперебойной работы системы АВР и АПВ могут применяться самостоятельно либо совместно.

АВР применяется для потребителей 1-й и 2-й категорий на шинах первичной и вторичной сборок. Работа АВР инициируется срабатыванием реле минимального напряжения с уставкой $U_{\text{вкл}} = 0.35 - 0.42 U_{\text{ном}}$. Время срабатывания АВР в среднем составляет 0.8-1с. Применение быстродействующих устройств АВР, выполненных на микропроцессорных устройствах и совмещающих в себе функции токовой защиты, позволяет сократить время срабатывания до 0.3-0.4 с. Особенностью АВР является однократность действия с запретом на повторное включение.

Устройства АПВ в виду простоты исполнения и низкой стоимости является наиболее распространенным. Срабатывание АПВ происходит в результате

срабатывания релейной защиты с выдержкой времени, которая включает в себя время отключения выключателя, время подготовки выключателя к повторному отключению и вероятное время самоустранения КЗ, полученное из статистических данных. Устройства повторного включения, как правило, имеют две ступени срабатывания. На первой ступени выдержка времени может составлять 2-5с. При повторном срабатывании релейной защиты устройство АПВ производит повторное включение с выдержкой времени 10-30с. Если после второй попытки нормальный режим не восстанавливается, то КЗ считается установившимся и требует вмешательства рабочего персонала.

Средства FACTS

Система FACTS – Flexible Alternating Current Transmission Systems – первоначально разрабатывалась для регулирования энергетических потоков в ВВ линиях передачи с целью повышения устойчивости энергетической системы и обеспечения требуемых показателей качества энергии. Основу системы FACTS составляют сетевые полупроводниковые преобразователи последовательного, параллельного и смешанного типов [84, 98].

В последнее время элементы FACTS стали применяться в распределительных сетях 6/10кВ. На этом уровне напряжения сетевые преобразователи выполняются на IGBT модулях вместо тиристоров, используемых для устройств более высоких классов напряжения.

Динамический компенсатор типа DSTATCOM представляет собой сетевой преобразователь параллельного типа со звеном постоянного тока, которое соединено с сетью через инвертор напряжения. Такой преобразователь может выполнять различные функции: выступать в качестве компенсатора реактивной мощности, корректора провалов напряжения, активного фильтра высших гармоник либо совмещать несколько функций в пределах пропускной способности преобразователя.

Сетевой преобразователь последовательного типа включается в рассечку линии через трансформатор и служит для компенсации потерь напряжения в

линии подобно другим устройствам продольной компенсации. Такой преобразователь носит название Dynamic Voltage Restorer (DVR)

Сетевой преобразователь комбинированного действия обладает структурой и свойствами преобразователей последовательного и параллельного типов. Такой преобразователь может быть использован для компенсации падений напряжения в сети и компенсации потерь энергии в линии.

Элементы FACTS обладают высоким быстродействием, способностью работать в условиях искаженного напряжения и поэтому могут эффективно решать большинство задач передачи, распределения и преобразования энергии. Следует отметить, что сетевые инверторы также являются неотъемлемой частью генераторов на базе возобновляемых источников энергии.

Ввиду высокой стоимости генерируемой реактивной мощности применение сетевых преобразователей требует экономического обоснования.

Источники бесперебойного питания на базе накопителей энергии. Возобновляемые источники энергии.

В последнее время большое внимание уделяется разработке накопителей энергии в широком диапазоне мощностей и емкости накопителей. Примером крупномасштабных накопителей энергии может служить гидроаккумулирующая электростанция станция (ГАЭС), которая преобразует электрическую энергию в часы малого спроса в потенциальную энергию путем закачивания с помощью обратимой турбины воды из одного водоема в другой, расположенный на определенной высоте относительно первого. При повышенном спросе на электрическую энергию в сети система работает как гидроэлектрическая станция. Сопряжение ГАЭС и центральной системы осуществляется с помощью сетевых преобразователей.

В настоящее время широко распространены накопители на базе аккумуляторных батарей различного типа. Мощность таких накопителей составляет единицы и десятки мегаватт, емкость – единицы и десятки МВт-час (рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 - Накопительный блок на базе химических элементов мощностью 8 МВт, Япония

Для компенсации провалов напряжения в распределительных сетях используются накопители кинетической энергии на базе синхронных генератор типа Fly Wheel. В других типах накопителей используются суперконденсаторы, водородные ячейки и др. Обязательными элементами таких накопителей являются DC/DC и DC/AC преобразователи. Принцип работы таких накопителей основан на медленном заряде элементов и быстром высвобождении энергии во время провалов напряжения для питания ответственных приемников.

При наличии в электрической сети распределенных источников, использующих, например, ветровую и солнечную энергию, появляется возможность компенсировать отклонения напряжения от нормы с помощью специальных режимов работы сетевых инверторов, включенных на выходе таких источников.

Дополнительное оборудование привода.

В последнее время стали весьма широко использоваться асинхронные электроприводы, у которых в качестве входного преобразователя используется активный выпрямитель, который способен обеспечивать двухсторонний обмен энергии между двигателем и сетью [5,6,18,34,38,70,93]. Регулировка угла сдвига фаз между первыми гармониками напряжения и тока на его входе позволяет рассматривать привод со стороны сети как резистивную, резистивно-индуктивную и резистивно-емкостную нагрузку. При неполной загрузке привода

по мощности возникает возможность использовать активный выпрямитель в качестве одного из элементов FACTS. Например, активный выпрямитель может работать в качестве компенсатора провалов напряжения подобно сетевому преобразователю типа DSTATCOM. В номинальном режиме активный выпрямитель способен обеспечить требуемое напряжение ЗПТ при провале напряжения в сети до уровня 70% от номинального значения.

Другой способ улучшить устойчивость привода к провалам напряжения состоит в использовании импедансного Z инвертора, исследованию которого в последнее время уделяется много внимания из-за его свойства повышать напряжение ЗПТ за счет накопления энергии в L и C элементах симметричного моста [78,100].

В некоторых случаях для повышения устойчивости ЧРП к провалам напряжения на приводе устанавливают накопитель энергии, который во время провала напряжения подключается к ЗПТ через преобразователь DC/DC типа [41,77,83].

Из приведенного анализа средств поддержания работоспособности ЧРП во время провалов напряжения следует, что их использование в каждом конкретном случае требует экономического обоснования.

В последнее время большое внимание в зарубежной литературе стало уделяться разработке программно-алгоритмических методов обеспечения работоспособности привода при провалах напряжения, которые не требуют дополнительных затрат на установку дополнительного силового оборудования. В последующих главах такой подход реализуется путем обоснования алгоритмов управления приводом в зоне ослабленного поля и разработки эффективных средств электрической рекуперации кинетической энергии для поддержания напряжения ЗПТ при провалах напряжения и обеспечения тем самым управляемости приводом в аварийной ситуации [2,39,89,96,101].

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ПРОВАЛЫ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕЖИМ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

2.1 Вводные замечания

Для разработки эффективных методов и средств обеспечения работоспособности частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) при провалах напряжения сети важно располагать информацией о возможных видах асимметрии напряжения на входе ЧРП в соответствии их типам провалов напряжения по принятой в настоящее время классификации. Также представляют интерес данные о характерном диапазоне изменения длительности и глубины провалов на конкретном предприятии, частоте появления симметричных и асимметричных провалов. Важно также уметь предсказывать реакцию звена постоянного тока на появление провалов напряжения того или иного типа в зависимости от глубины провалов в поврежденных фазах с целью построения наблюдателя напряжения ЗПТ.

Наличие наблюдателя напряжения ЗПТ позволяет одновременно с появлением провала напряжения осуществить своевременную реконфигурацию системы управления ЧРП за минимально возможное время, при котором напряжение звена постоянного тока будет незначительно отличаться от номинального значения и не достигнет значения уставки защиты минимального напряжения. Это позволяет минимизировать броски зарядных токов при восстановлении нормального режима сети.

Зарядно-разрядные процессы в звене постоянного тока, питаемого от неуправляемого выпрямителя, зависят от параметров системы трехфазных напряжений, возникающей на входе ЧРП после аварии:

- остаточного напряжения в каждой из фаз,
- угла сдвига фаз между напряжениями фаз,

– наличия/отсутствия скачков начальных фаз напряжений относительно напряжений фаз сети в нормальном режиме работы.

Поэтому важно представлять совокупность возможных искажений напряжения, возникающих при разнообразных авариях в сети заданной конфигурации. Таковую совокупность дает классификация провалов напряжения по тем или иным признакам. Ее использование позволяет предсказать реакции привода на наиболее характерные типы провалов напряжения в сети и своевременно выбрать стратегию управления по обеспечению управляемости и работоспособности привода.

Глава построена следующим образом. Сначала дается классификация провалов напряжения, затем рассматриваются особенности протекания аварийных процессов в сети электроснабжения ООО «КИНЕФ». Вопросы формирования симметричных/асимметричных рассматриваются с помощью компьютерной модели типовой схемы электроснабжения промышленных предприятий. Глава заканчивается оценкой ЗПТ по известному типу провала напряжения на входе ЧРП.

2.2 Классификация провалов в трехфазной сети.

Аварии в передающих и распределительных линиях трехфазных сетей могут влиять на амплитуду напряжения как одной, так и нескольких фаз. Кроме того, при снижении напряжения в нескольких фазах, глубина провала в каждой фазе может отличаться либо быть одинаковой. Если форма напряжения во время провала одинаково изменяется во всех фазах, то провал напряжения трёхфазной сети называют симметричным. В противном случае провал напряжения называют асимметричным, при этом как глубина, так и длительность провала напряжения в каждой фазе могут быть различными [73].

Характер и уровень асимметрии трехфазной системы и соответствующих провалов напряжения зависит от нескольких факторов:

— режима нейтрали, под которым понимается способ соединения нейтральной точки силового трансформатора с землей; различают режим глухо заземленной, изолированной, компенсированной и резистивной нейтрали;

— характера аварии – однофазного короткого замыкания, межфазного КЗ и др.;

— способа соединения обмоток трансформаторов в сети, способных преобразовывать не только линейные и фазные напряжения и токи, но и изменять тип провалов напряжения, определенный в соответствии с той или иной классификацией.

— способа соединения фаз приемника - по схеме «звезда» или схеме «треугольник»

В настоящее время используются два метода классификации провалов напряжения, используемых при мониторинге событий в сети. Первый метод основан на использовании ABC –классификации [73], второй метод использует метод симметричных составляющих [81,82].

ABC –метод использует упрощенную модель сети, для которой выделяются семь типов провалов, вызванных различными видами короткого замыкания в сети. Выделенные типы отличаются числом фаз с пониженным напряжением, симметрией или асимметрией провалов по фазам, углом сдвига фаз между смежными фазами. Преимуществом ABC –классификации является возможность осуществлять анализ распространения провалов напряжения по электрической сети с учетом влияния схем соединения обмоток трансформаторов, схем включения нагрузок и режимов нейтралей на изменение типа провалов напряжения. Пример оценки зон распространения провалов напряжения показан на рисунке 2.1.

Классификация по методу симметричных составляющих (МСС) имеет более общий характер, в соответствии с которым симметричные составляющие определяются непосредственно по наблюдаемым фазным напряжениям сети. Однако в ряде случаев ABC –метод является более удобным и поэтому для ряда

приложений используют переход от симметричных составляющих к ABC – типам провалов напряжения [58,78].

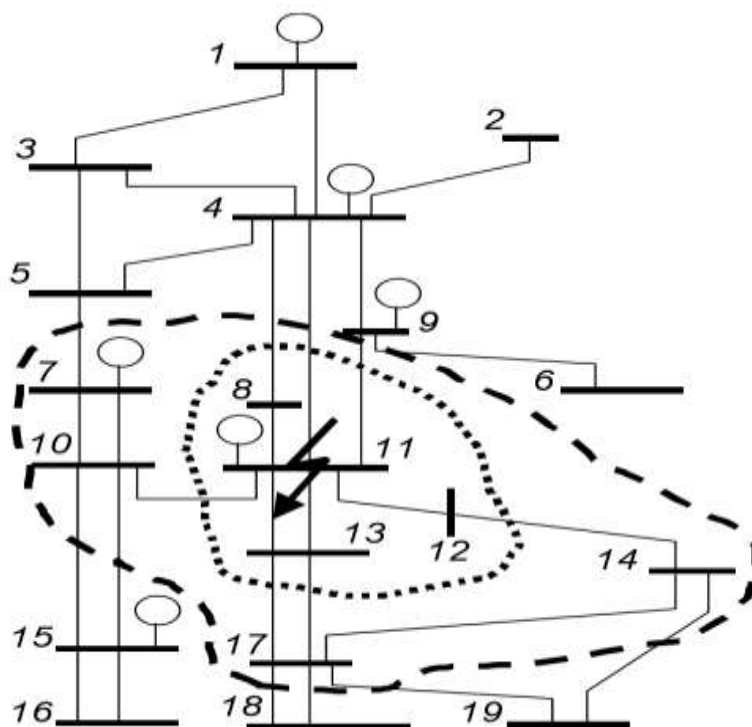
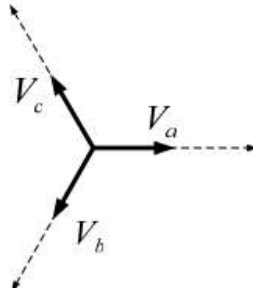
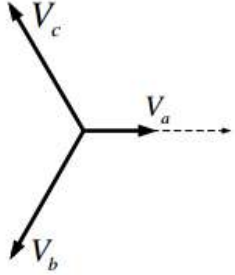
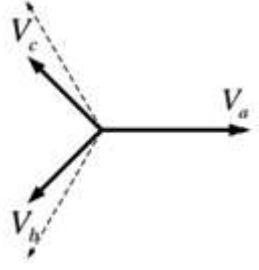
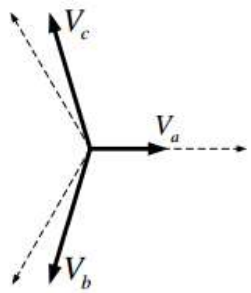


Рисунок 2.1 - Зоны равного провала напряжения, вызванные аварией в узле №11. Внешний контур соответствует уровню напряжения 0.9, внутренний – 0.7

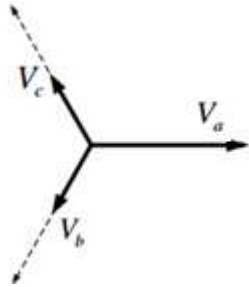
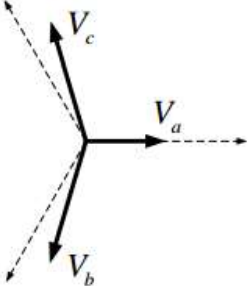
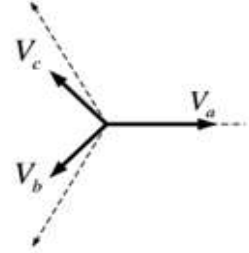
Типы провалов напряжения в соответствии с ABC –классификацией описываются соотношением между комплексными амплитудами фазных напряжений асимметричной трехфазной системы.

Характеристика семи типов провалов напряжения представлена в таблице 2.1. В первом столбце приведены выражения для комплексных амплитуд в алгебраической форме, во втором столбце приведены соответствующие векторные диаграммы напряжений, на которых пунктирной линией выделены вектора, соответствующие нормальному режиму сети. В таблице использованы обозначения \hat{U}_m – фазное напряжение сети в нормальном режиме работы, U_m – остаточное напряжение фазы при провале.

Таблица 2.1 - Характеристика провалов напряжения в соответствии с ABC –классификацией.

<p>Тип А – симметричный провал напряжения в трёх фазах</p> $\underline{U}_a = U_m$ $\underline{U}_b = -\frac{1}{2}U_m - j\frac{\sqrt{3}}{2}U_m$ $\underline{U}_c = -\frac{1}{2}U_m + j\frac{\sqrt{3}}{2}U_m$	
<p>Тип В – провал напряжения в одной фазе</p> $\underline{U}_a = U_m$ $\underline{U}_b = -\frac{1}{2}\tilde{U}_m - j\frac{\sqrt{3}}{2}\tilde{U}_m$ $\underline{U}_c = -\frac{1}{2}\tilde{U}_m + j\frac{\sqrt{3}}{2}\tilde{U}_m$	
<p>Тип С – провал напряжения в двух фазах с изменением угла сдвига фаз</p> $\underline{U}_a = \tilde{U}_m$ $\underline{U}_b = -\frac{1}{2}\tilde{U}_m - j\frac{\sqrt{3}}{2}U_m$ $\underline{U}_c = -\frac{1}{2}\tilde{U}_m + j\frac{\sqrt{3}}{2}U_m$	
<p>Тип D – провал напряжения в одной фазе с изменением угла сдвига фаз</p> $\underline{U}_a = U_m$ $\underline{U}_b = -\frac{1}{2}U_m - j\frac{\sqrt{3}}{2}\tilde{U}_m$ $\underline{U}_c = -\frac{1}{2}U_m + j\frac{\sqrt{3}}{2}\tilde{U}_m$	

Продолжение таблицы 2.1

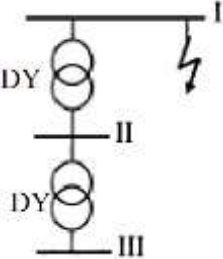
<p>Тип Е – провал напряжения в двух фазах</p> $\underline{U}_a = \check{U}_m$ $\underline{U}_b = -\frac{1}{2}U_m - j\frac{\sqrt{3}}{2}U_m$ $\underline{U}_c = -\frac{1}{2}U_m + j\frac{\sqrt{3}}{2}U_m$	
<p>Тип F – несимметричный провал напряжения в трёх фазах</p> $\underline{U}_a = U_m$ $\underline{U}_b = -\frac{1}{2}U_m - j\left(\frac{\sqrt{3}}{6}U_m + \frac{\sqrt{3}}{3}\check{U}_m\right)$ $\underline{U}_c = -\frac{1}{2}U_m + j\left(\frac{\sqrt{3}}{6}U_m + \frac{\sqrt{3}}{3}\check{U}_m\right)$	
<p>Тип G – несимметричный провал напряжения в трёх фазах</p> $\underline{U}_a = \frac{2}{3}\check{U}_m + \frac{1}{3}U_m$ $\underline{U}_b = -\frac{1}{3}\check{U}_m - \frac{1}{6}U_m - j\frac{\sqrt{3}}{2}U_m$ $\underline{U}_c = -\frac{1}{3}\check{U}_m - \frac{1}{6}U_m + j\frac{\sqrt{3}}{2}U_m$	

При А–типе провала напряжения имеет место одинаковое снижение напряжения по всем фазам. Этот тип провала соответствует трехфазному короткому замыканию независимо от схем соединения обмоток трансформатора и фаз нагрузки. В–тип характеризуется провалом напряжения в поврежденной фазе и соответствует однофазному короткому замыканию в сети с глухо заземленной нейтралью. Для С, D–типов характерно изменение как амплитуды, так угла для двух фаз вследствие снижения мнимой части комплексной амплитуды в одном случае и реальной части в другом. Эти типы провалов

вызываются однофазным КЗ или межфазным замыканием. Провалы E, F, G – типов вызываются двухфазным коротким замыканием на землю.

Заметим, что тип провалов может трансформироваться при распространении возмущений в сети в зависимости от схем соединения обмоток трансформаторов и схем соединения фаз нагрузок. Влияние трансформаторов на преобразование провалов напряжения отражено в таблице 2.2 [31,73].

Таблица 2.2 - Типы провалов напряжения в сети с трансформаторами.

	Тип КЗ	Место аварии на схеме		
		I	II	III
	Межфазное короткое замыкание, три фазы	A	A	A
	короткое замыкание одной фазы на землю	B	C	D
	Межфазное короткое замыкание, две фазы	C	D	C
	Двухфазное короткое замыкание на землю	E	F	G

Из таблицы видно, что наличие в сети трансформаторов, включенных по схеме «треугольник-звезда» приводит к преобразованию типов провалов напряжения. Так, если произошло короткое замыкание на землю на шине I, то в этом сечении будет зафиксирован провал напряжения B-типа. Однако после трансформатора на шине II будет наблюдаться уже провал C-типа и на шине III – D-типа.

Использование ABC-классификация позволяет связать тип провала напряжения с видом и местом аварии в структуре сети [73].

2.3 Статистика провалов напряжений в системе электроснабжения предприятия «КИНЕФ»

2.3.1 Вводные замечания

Анализ литературы показывает, что изучение провалов напряжений в сетях производится с нескольких позиций:

- построение и анализ статистических моделей провалов [19,103];
- выявление влияния структуры сети и режима нейтрали, схем и группы включения трансформаторов, типа и точки короткого замыкания на формирование провалов и трансформацию их формы при распространении провалов в сети [61,73,81,82,87];
- разработка методов и средств обнаружения и локализации точек КЗ в сети [57]
- обоснование места включения компенсирующего устройства с целью охвата наибольшей области сети компенсирующим действием устройства [98];
- оценка влияния глубины и типа провалов напряжения различного происхождения на работу ЧРП [102].

Большинство работ посвящено исследованию провалов напряжения симметричного типа, вызванных трёхфазными короткими замыканиями. Это связано с тем, что трёхфазные короткие замыкания и соответствующие провалы напряжения создают наиболее неблагоприятные условия для работы электротехнического оборудования - поэтому результатам исследований и предлагаемым рекомендациям по снижению негативных последствий провалов придавалась большая значимость.

Статистика возникновения КЗ различного типа по данным работы [67] представлена на рисунке 2.2, из которого следует, что доля трёхфазных КЗ составляет 14% от общего числа коротких замыканий в сетях электроснабжения, при этом 20% замыканий являются двухфазными и 66% - однофазными.

При такой статистике для разработки решений, направленных на повышение устойчивости частотно-регулируемого привода при провалах

напряжения сети, необходимо произвести исследование ЧРП при действии всех возможных видов провалов напряжения.

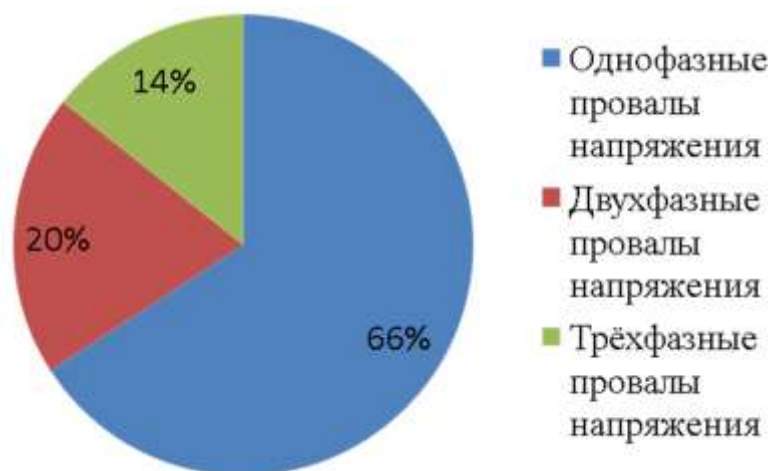


Рисунок 2.2 - Статистика типов коротких замыканий

Ниже рассматриваются вопросы статистического исследования провалов напряжения в системе электроснабжения нефтеперерабатывающего комплекса «КИНЕФ», а также вопросы формирования и распространения провалов напряжения при коротких замыканиях в различных точках системы электроснабжения предприятия.

Анализ публикаций в области статистического анализа напряжения в сетях показывает разнообразие подходов к построению статистики провалов напряжения по глубине и длительности, включая модели распределения плотности вероятности, использование метода Монте-Карло и других методов [34]. В усредненном виде статистика провалов, отраженная в ГОСТ [19], повторяет статистику Европейских электросетей, отраженную в документах EN, IEC [103,99]. Анализ статистических данных показывает, что в настоящее время в отечественных сетях электроснабжения наибольшее распространение имеют кратковременные провалы и прерывания напряжения длительностью менее 1с., доля которых составляет 89% от общего числа зарегистрированных провалов и прерываний напряжения. Статистика кратковременных провалов напряжения в соответствии с ГОСТ 32144-2013 представлена в таблице 2.3, в

которой указано процентное число провалов V для остаточного напряжения $\hat{U}_{\text{ост}}$, выраженного в процентах относительно номинального значения.

Таблица 2.3 - Частота появления провалов с заданным остаточным напряжением

$\hat{U}_{\text{ост}}, \%$	90-70	70-40	40-0	0
$V, \%$	43	23	8	26

Приведенные данные имеют обобщенный характер и могут отличаться в зависимости от множества факторов. К таким факторам относятся климатические условия работы линий электропередач, тип линии - кабельные/воздушные /смешанные, степень загруженности, техническое состояние оборудования и др.

Рассмотрим статистику отказов на примере конкретного предприятия - предприятия по переработке нефтепродуктов ООО «Кинеф», расположенного в Ленинградской области г. Кириши.

2.3.2 Методика и результаты исследований

Для крупных промышленных предприятий точкой подключения к сети являются приемные подстанции предприятия: главная понизительная подстанция (ГПП) или подстанция глубокого ввода (ПГВ). Как правило, при сборе статистических данных используются результаты мониторинга напряжения на выходе понизительного трансформатора ПГВ или ГПП, который соединяет внешние электрические сети с внутренними распределительными сетями предприятия.

Упрощенная схема электроснабжения предприятия «Кинеф» представлена на рисунке 2.3. Электрическая сеть данного предприятия выполнена по наиболее распространенной схеме радиального питания.

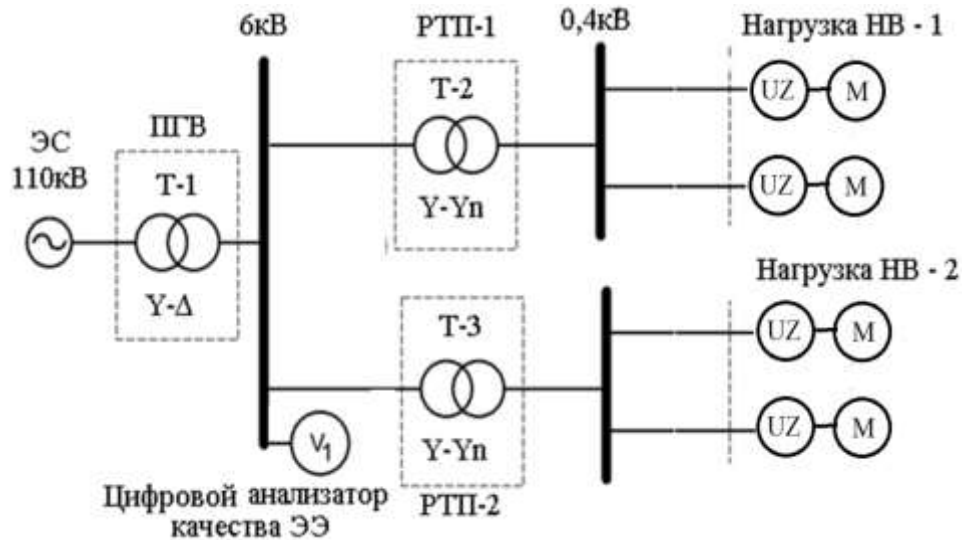


Рисунок 2.3 - Упрощенная схема электроснабжения участка сети «Кинеф»

В качестве точки соединения с внешними электрическими сетями напряжением 110кВ используется подстанция глубокого ввода (ПГВ) с понизительным трансформатором Т-1. От ПГВ посредством распределительной сети 6кВ электрическая энергия передается на распределительные трансформаторные подстанции (РТП – 1/2), где происходит понижение напряжения до значения 0,4кВ. Непосредственно от РТП электроэнергия распределяется между различными потребителями.

Анализ качества электрической энергии в распределительной сети осуществляется посредством цифровых анализаторов качества электрической энергии V , которые установлены на выходных распределительных устройствах ПГВ. Анализаторы качества осуществляют обработку сигналов датчиков напряжения и тока. По мгновенным значениям вычисляется действующее значение контролируемых величин, а также симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей. Также анализаторы качества служат для регистрации аварийных режимов работы сети. На рисунке 2.4 показан внешний вид используемых анализаторов качества электрической энергии фирмы «Satec».



Рисунок 2.4 - Цифровые анализаторы качества электрической энергии фирмы Satec

Вся собранная информация передается на пульт дежурного оператора и обрабатывается при помощи программного комплекса PSA, который позволяет фиксировать все данные, составлять журнал событий и представлять информацию в виде осциллограмм.

На рисунке 2.5 представлены осциллограммы линейных напряжений (кВ) и линейных токов (кА) на выходе трансформатора ПГВ (Т-1). Представленные осциллограммы соответствуют показаниям анализатора V-1, установленного на выходе трансформатора Т-1 (рис. 2.3). Причиной провала напряжения в распределительной сети 6 кВ, послужила авария во внешней сети 110кВ. Рассматриваемый провал напряжения относится к типу несимметричных провалов и характеризуется следующими показателями: длительность – 130мс.; остаточное напряжение линейных напряжений АВ и СА составляет 81%; ВС – 95%.

Другие наблюдаемые провалы относились к симметричному типу длительностью 220мс и остаточным напряжением 85% . Наиболее тяжелый вид провала напряжения, который характеризовался снижением линейных напряжений на выводах ПГВ до 25% в течении 200мс., был вызван коротким замыканием в смежной линии 110кВ.

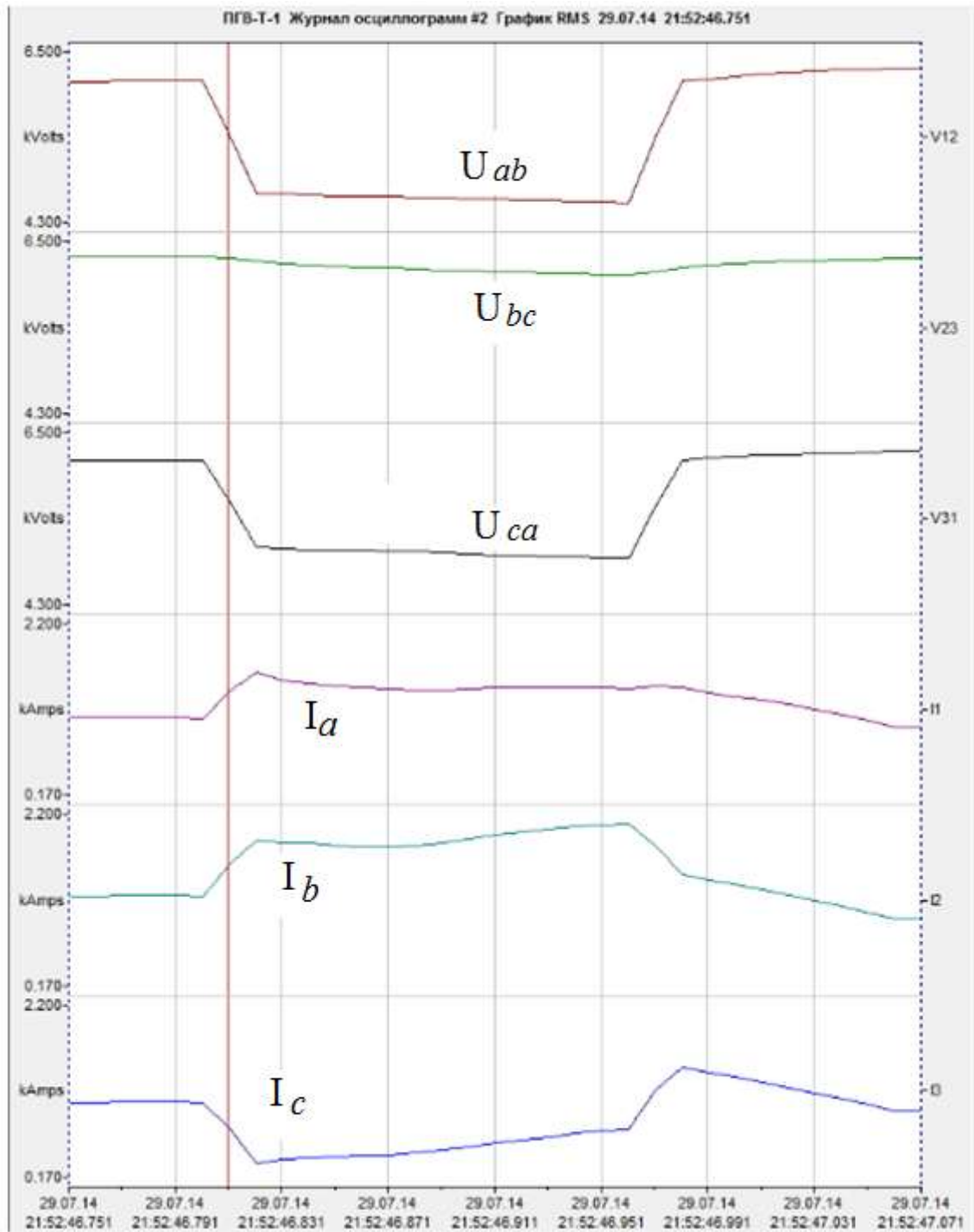


Рисунок 2.5 - Осциллограммы линейных напряжений и токов на выводах трансформатора Т-1 при несимметричном провале напряжения

Большинство зафиксированных аварийных случаев могут быть классифицированы как кратковременные провалы напряжения длительностью не более 250 мс. Необходимо отметить, что рассматриваемые аварии сопровождались отключением оборудования в сети 0,4кВ, в частности частотно-регулируемых электроприводов вентиляторных установок охлаждения

нефтепродуктов. Отключение электроприводов приводило к сбою в технологии производства.

Для сохранения непрерывности всего технологического процесса применялся режим повторного пуска/самозапуска электроприводов после восстановления напряжения в сети питания. Информация об отключении электроприводов и информация о начале повторного пуска передавалась оператору. Из анализа журнала событий следует, что время от момента поступления сигнала об аварийном отключении до поступления сигнала о начале процесса повторного пуска составляет 2,5-3с.

Было отмечено, что время от момента распознавания провала напряжения до формирования сигнала для системы повторного пуска составляло 1с., время от момента получения системой управления приводом разрешения на повторный пуск и началом процесса повторного пуска – 1,5-2с.

Анализ случаев провалов напряжения за период с 2011-2015гг. позволил сформировать статистику провалов напряжения предприятия «Кинеф». Эта отражена в виде гистограмм представленных на рисунках 2.6 – 2.7 , на которых представлены данные о частоте и параметрах провалов напряжения в сетях предприятия ООО «КИНЕФ» за период 2011-2014гг.

Анализ полученной статистики показывает, что в среднем в год возникает 24 провала напряжения, что совпадает с общей статистикой. Наиболее характерными для данного предприятия являются кратковременные провалы напряжения длительностью не более 1с. при значении остаточного напряжения 85-60% от номинального значения.

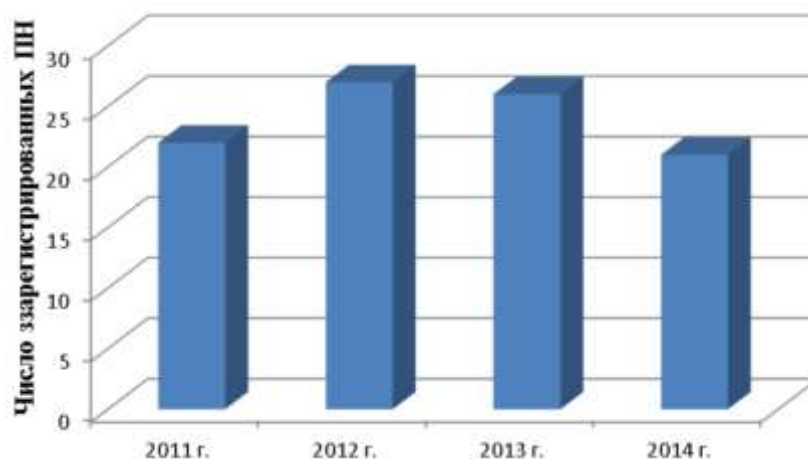


Рисунок 2.6 - Число зарегистрированных провалов по годам в период с 2011 г. по – 2014 г.

Опыт многолетней эксплуатации частотно-регулируемого электропривода на предприятии ООО «Киниф» показывает, что провалы напряжения в распределительных и внешних сетях электроснабжения приводят к отключению частотно-регулируемого электропривода. Одним из способов сохранения непрерывности технологического процесса является применение режима автоматического повторного включения (АПВ) электропривода после восстановления питания в сети.

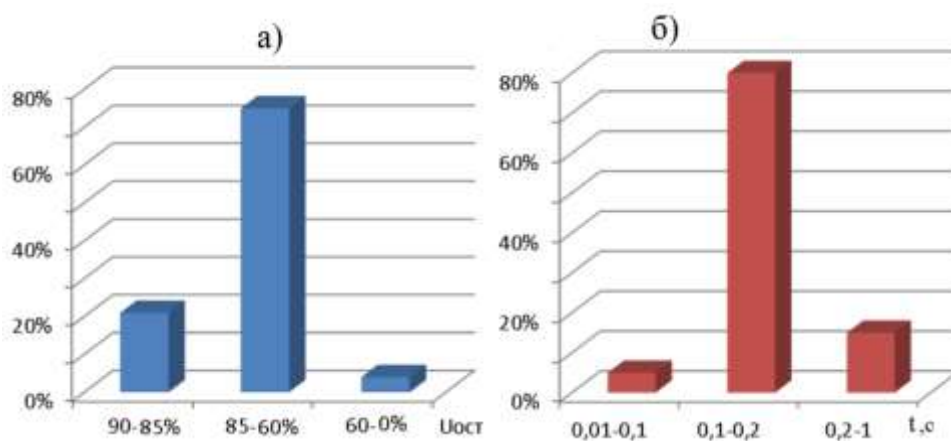


Рисунок 2.7 - Распределение провалов по остаточному напряжению – а) и длительности провалов – б)

Применение АПВ в рассматриваемой системе электроснабжения имеет особенность, которая заключается в том, что система контроля и управления АПВ не реагирует на провалы напряжения длительностью менее 100мс.

Это связано с тем, что время срабатывания реле минимального напряжения в этой системе $T_{\text{рмн}}^{(\text{апв})} \geq 0.1\text{с}$ существенно превышает время срабатывания защиты минимального напряжения частотно-регулируемого привода $T_{\text{змн}}^{(\text{чрп})} = 0.02 - 0.04\text{с}$, отключающего питание привода при длительности привода $\Delta t_{\text{пр}} \geq T_{\text{змн}}^{(\text{чрп})}$.

Этот пример указывает на остроту проблемы обеспечения работоспособности ЧРП при кратковременных провалах напряжения для исключения аномальных режимов приводных механизмов, осуществляющих непрерывный технологический процесс, в данном случае процесс нефтепереработки.

2.4 Моделирование аварийных режимов в передающей и распределительной сети. Распространение провалов напряжения в системе электроснабжения

2.4.1 Методика исследований

Приведенные выше данные по глубине и продолжительности провалов напряжения не учитывают типы провалов по ABC классификации, отражающие особенности возникающей асимметрии напряжений, которые важны для оценки работоспособности ЧРП и разработки мер по повышению устойчивости привода к провалам напряжения. При отсутствии полных данных мониторинга событий в сети рассмотрение поставленной задачи целесообразно производить с помощью компьютерного моделирования с использованием современного программного обеспечения, которое позволяет получать результаты в условиях, максимально приближенных к натурным экспериментам, что значительно упрощает задачу получения новых научных и технических решений.

Отметим, что для оценки ситуации в сети не достаточно описания аварии с помощью системы напряжений в точке одного из четырех типов короткого замыкания поскольку точка электрической сети, в которой наблюдается провал напряжения, и точка возникновения короткого замыкания могут находиться на значительном удалении друг от друга и располагаться на разных ступенях

трансформации. Это, в зависимости от схемы и группы соединения обмоток трансформатора и сопротивления линии, может приводить к трансформации исходного типа провала напряжения в другой тип, который будет испытывать конечный потребитель. В качестве приемников электрической энергии используется в основном высоковольтный привод 6 кВ и низковольтный привод 0.4 кВ, на долю которого, как известно, приходится 90% всех частотных приводов [9].

Для оценки работоспособности ЧРП важно выявить тип и уровень провала напряжения на зажимах приемника и сопоставить его с одним из семи типов провалов напряжений в соответствии с принятой ABC классификацией. Эта система классификации, как отмечалось выше, строится на основе отличительных признаков фазных/линейных напряжений и углов сдвига фаз относительно симметричной системы напряжений в нормальном режиме работы сети. В связи с этим целью данного раздела является исследование взаимосвязи между различными видами коротких замыканий и вызываемыми ими провалами напряжения на различных участках сети электроснабжения, включая шины подключения сетевых преобразователей ЧРП. С этой целью была разработана имитационная модель электрической сети в соответствии с основными принципами проектирования распределительных электросетей промышленных предприятий. В ходе исследования получены параметры провалов напряжения, которые соответствуют наиболее характерным видам КЗ на различных участках электрической сети и учитывают влияние таких факторов, как удаленность точки КЗ и наличие трансформаторной связи между участками сети.

2.4.2 Построение компьютерной модели системы электроснабжения предприятия

Для исследования сетей в аварийных режимах в работе использовалась среда *MatLab/Simulink* и пакет *SimPower Block Set*. Рассматривалась упрощенная схема сети электроснабжения предприятия (рисунок 2.8), для которой характерно наличие несколько ступеней трансформации напряжения и различные режимы

нейтрали. В таблице рисунка 2.8 указаны типы короткого замыкания, которые воспроизводились в рассматриваемых сетях в зависимости от способа заземления нейтральной точки трансформатора.

В качестве схемы распределительной сети принята наиболее распространенная радиальная схема электроснабжения с линией электропередачи напряжением 110кВ от районной подстанции протяженностью 40км. Мощность трансформатора главной понизительной подстанции (ГПП) выбрана равной 6,5 МВА с трансформатором ТДН 16000/110 со схемой соединения обмоток ВН/СН «звезда-треугольник» Y-Δ. Для распределения электроэнергии внутри предприятия используются сети 10/6кВ. Распределительные сети среднего напряжения выполнены кабельными линиями, длина которых не превышает 6км. От распределительной сети 6кВ непосредственно питаются две нагрузки мощностью 1,5МВА и 4,5МВА. Электроэнергия по распределительной сети поступает на трансформатор 6/0,4кВ. От понизительного трансформатора электроэнергия распределяется по двум кабельным линиям 0,4кВ, от которых питаются два потребителя энергии активно индуктивного типа. Мощность каждого потребителя составляет 250кВА.

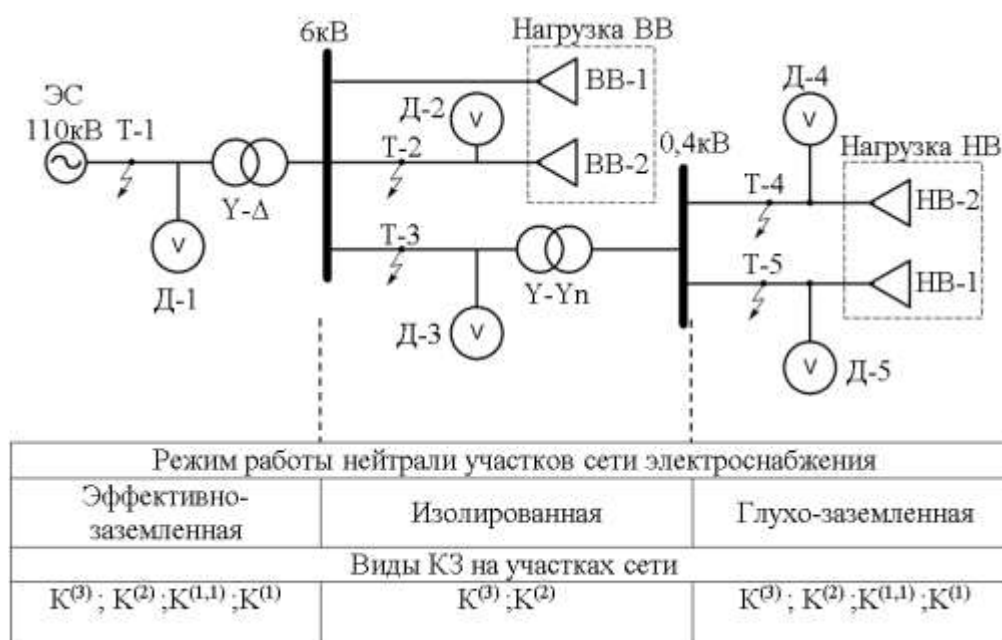


Рисунок 2.8 - Структурная схема системы электроснабжения

Для моделирования различных типов КЗ используются стандартные блоки Three-Phase Fault, воспроизводящие короткие замыкания в различных точках рассматриваемой сети:

в точке Т-1 линии 110кВ,

в точке Т-2 линии 6кВ, питающей высоковольтную нагрузку ВВ-2,

в точке Т-3 линии 6кВ на входе трансформатора 6/0,4кВ,

в точке Т-4 линии 0,4кВ, питающей нагрузку НВ-2

в точке Т-5 линии 0,4кВ, которая питает нагрузку НВ - 1 выбранную в качестве объекта исследования

Целью эксперимента является определение влияния типов короткого замыкания и их местоположения в сети на параметры провалов напряжения на входе нагрузки НВ-1 линии 0.4 кВ. Для обозначения вида КЗ используется стандартные обозначения ГОСТ 26522-85 «Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения»:

$K^{(3)}$ – трёхфазное короткое замыкание;

$K^{(2)}$ – двухфазное короткое замыкание;

$K^{(1,1)}$ – двухфазное короткое замыкание на землю;

$K^{(1)}$ – однофазное короткое замыкание на землю;

2.4.3 Короткие замыкания в линии 110 кВ. Влияние схем соединения обмоток трансформатора ГПП на провалы напряжения в сети

Как было отмечено ранее, тип провала зависит от расстояния точки наблюдения то точки КЗ, схемы соединения обмоток трансформаторов, схемы соединения фаз нагрузки. Влияние схем соединения обмоток трансформатора на распространение провалов напряжения в сети производилось по данным компьютерного эксперимента для двух схем соединения обмоток трансформатора ГПП – схемы Y/Y и схемы Y/Δ .

Пример осциллограмм фазных и линейных напряжений в точке Д-5 при однофазном замыкании в линии 110 кВ для случая соединения обмоток трансформатора ГПП по схеме Y_n/Y представлен на рисунке 2.9. Значения

фазных напряжений нагрузки НВ-1 составляют : $U_b = U_c = 0.88, U_a = 0.33$. Напряжения $u_b(t), u_c(t)$ сдвинуты относительно напряжения $u_a(t)$ на угол $\varphi_B = -100$ эл.гр. и $\varphi_C = 100$ эл.гр. Симметричные составляющие фазных напряжений равны: $U_+ = 0.665, U_- = 0.335, U_0 = 0$. **Трёхфазное короткое замыкание $K^{(3)}$** в сети 110кВ приводит к возникновению провала напряжения типа А во всех точках электрической сети. При этом провал типа А не зависит от режимов работы нейтрали и схем соединения обмоток трансформаторов.

Межфазное короткое замыкание $K^{(2)}$ вызывает провал напряжения типа С, который в случае соединения обмоток трансформатора по схеме $Y_n - Y$ распространяется по сети без изменения. В том случае если точка КЗ отделена от сети трансформатором со схемой соединения обмоток $Y_n - \Delta$, то происходит трансформация провала типа С в провал типа F.

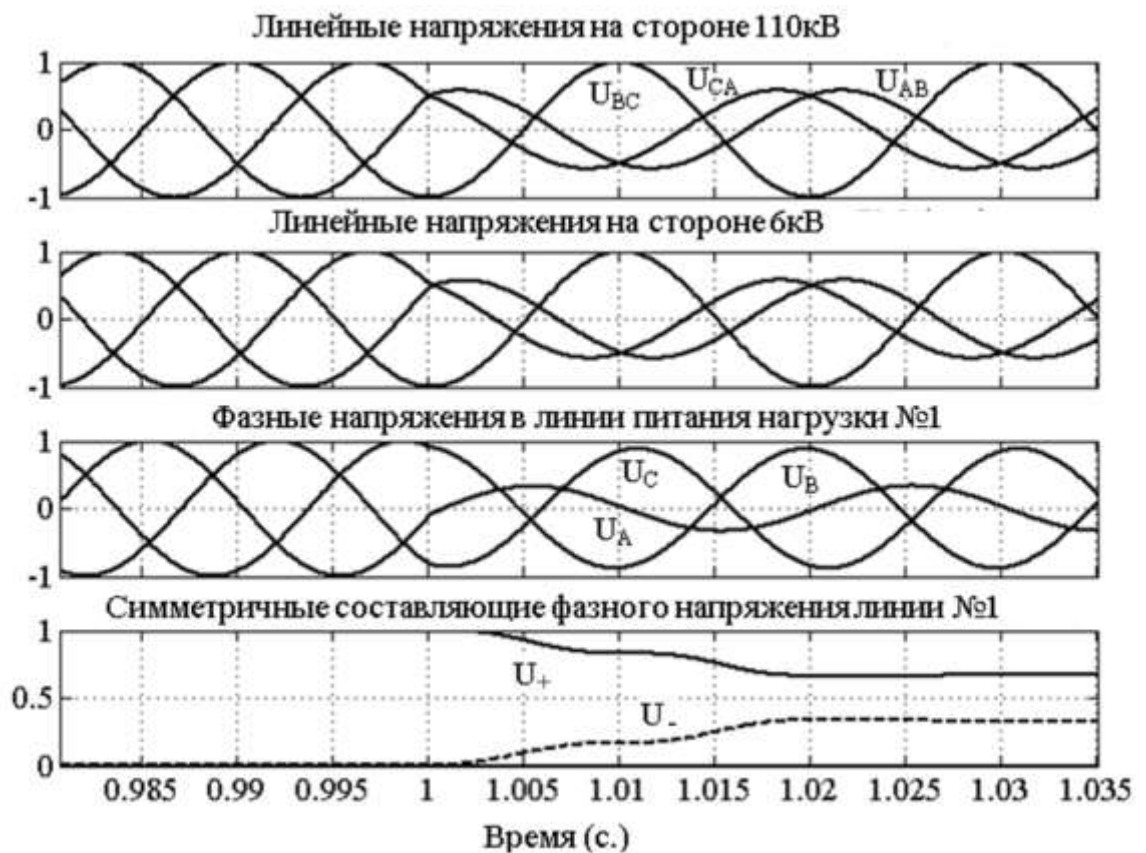


Рисунок 2.9 - Осциллограммы фазных и линейных напряжений в сети при замыкании вида $K^{(1)}$ в точке Т – 1 для соединения обмоток трансформатора 220/6 кВ по схеме Y-Y

Характерной особенностью **двухфазного КЗ на землю** $K^{(1,1)}$ в сети 110кВ является появление составляющей нулевой последовательности в системе фазных напряжений на стороне поврежденного участка сети. На трансформацию типа провала напряжения оказывает влияние трансформатор, т.к. соединение обмотки ВН по схеме Y препятствует прохождению токов нулевой последовательности во вторичную обмотку. При соединении обмоток по схеме $Y_n - Y$, происходит изменение провала напряжения типа C на тип G , при соединении обмоток по схеме $Y_n - \Delta$ провал напряжения типа C трансформируется в тип F .

В случае **однофазного короткого замыкания на землю** $K^{(1)}$, так же как и в случае двухфазного КЗ на землю в системе фазных напряжений поврежденного участка присутствует составляющая нулевой последовательности. Провал напряжения на стороне 110кВ в этом случае можно классифицировать, как тип B . При соединении обмоток трансформатора ГПП по схеме $Y_n - Y$ на остальных участках сети имеет место провал типа G , при соединении обмоток по схеме $Y - \Delta$, тип B трансформируется в тип C .

2.4.4 Короткие замыкания в сети 6 кВ

Рассмотрим действие двухфазного короткого замыкания $K^{(2)}$ в точке Т-2 линии 6кВ, которое возникает в момент $t_{кз} = 1с$ (рисунок 2.10). При коротком замыкании между фазами a, b в сети с изолированной нейтралью линейное напряжение U_{ab} между этими фазами становится равным нулю, оставшиеся напряжения уменьшаются в $\sqrt{3}$ раз. Такой вид аварии практически не оказывает влияния на входное напряжение трансформатора ГПП, но приводит к провалу напряжения в сети низковольтной нагрузки 0.4 кВ. Значение фазных напряжений на нагрузке НВ-1 составляет: $U_a = 0.84$, $U_b = 0.6$, $U_c = 1.0$. Угол сдвига фаз напряжений $u_b(t), u_c(t)$ относительно напряжения фазы $u_a(t)$ составляет: $\varphi_B = -90$ эл.гр. и $\varphi_C = 144$ эл.гр. Симметричные составляющие фазных напряжений принимают значения: $U_+ = 0.7$, $U_- = 0.3$, $U_0 = 0$.

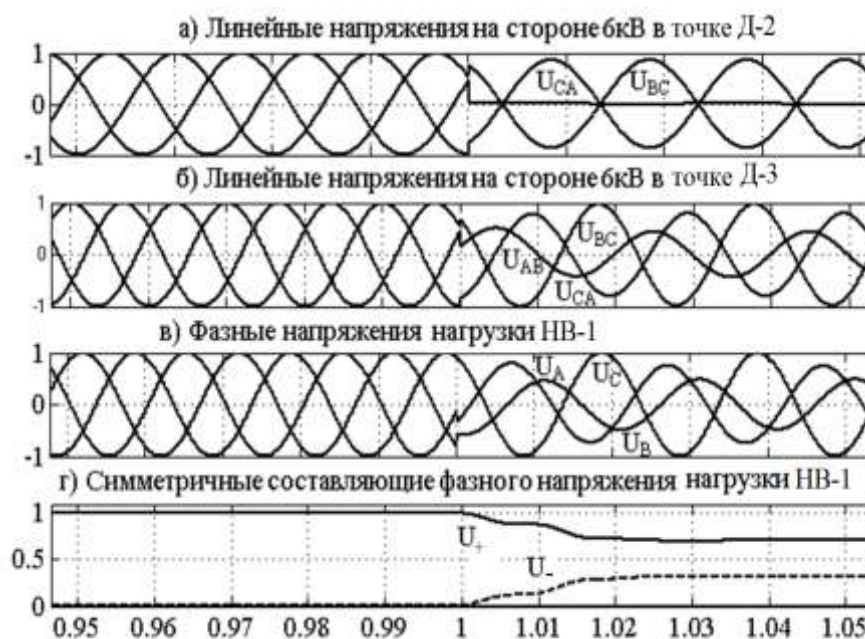


Рисунок 2.10 - Осциллограммы фазных и линейных напряжений в сети при замыкании вида $K^{(2)}$ в точке $T-2$ распределительной сети 6 кВ

При коротком замыкании $K^{(2)}$ в точке $T-3$ линии, питающей трансформатор 6/0.4 кВ, режим питания нагрузки меняется. Значение фазных напряжений на нагрузке НВ-1 составляет: $U_a = U_b = 0.5$, $U_c = 1.0$. Угол сдвига фаз напряжений $u_b(t), u_c(t)$ относительно напряжения фазы $u_a(t)$ составляет: $\varphi_b = 0$ эл.гр. и $\varphi_c = 180$ эл.гр. Симметричные составляющие фазных напряжений принимают значения: $U_+ = 0.5, U_- = 0.5, U_0 = 0$.

Из приведенных данных следует, что параметры асимметричной системы трехфазных напряжений на входе нагрузки НВ-1 зависят от местоположения точки межфазного короткого замыкания $K^{(2)}$ в сети 6кВ. Это связано с тем, что фазные напряжения на входе трансформатора зависят от того, где произошло короткое замыкание – на линии питающей трансформатор или на смежной линии.

2.4.5 Короткие замыкания в сети 0.4 кВ

В последней серии виртуальных экспериментов производилось моделирование коротких замыканий в линиях 0,4кВ в точках $T-4$ и $T-5$. В данной серии рассматривались следующие виды коротких замыканий: $K^{(3)}, K^{(2)}, K^{(1,1)}$,

$K^{(1)}$. Рассмотрим случай межфазного замыкания фаз без контакта с землей $K^{(2)}$ в точке Т-4. Пример осциллограмм напряжений для рассматриваемого случая приведен на рисунке 2.11. Возникновение КЗ на стороне 0,4кВ приводит к уменьшению напряжений поврежденных фаз как в линии, содержащей точку КЗ, так в смежной линии. При этом напряжение неповрежденной фазы в обеих линиях остается неизменным. Фазные напряжения поврежденных фаз $u_a(t), u_b(t)$ в точке Т-4 синфазны и равны между собой по амплитуде: $U_a = U_b = 0.5$, $U_c = 1.0$. Симметричные составляющие рассматриваемой системы трехфазных напряжений равны: $U_+ = U_- = 0.5$, $U_0 = 0$. В смежной линии, которая питает нагрузку НВ-1, напряжения поврежденных фаз $u_a(t), u_b(t)$ имеют фазовый сдвиг и не равны по амплитуде: $U_a = 0.64, U_b = 0.5, U_c = 1.0$. Фазовый сдвиг напряжений фаз $u_b(t), u_c(t)$ относительно напряжения $u_a(t)$ составляет: $\varphi_B = -56$ эл.гр. и $\varphi_C = 153$ эл.гр. Симметричные составляющие асимметричного напряжения нагрузки равны: $U_+ = 0.65, U_- = 0.35, U_0 = 0$.

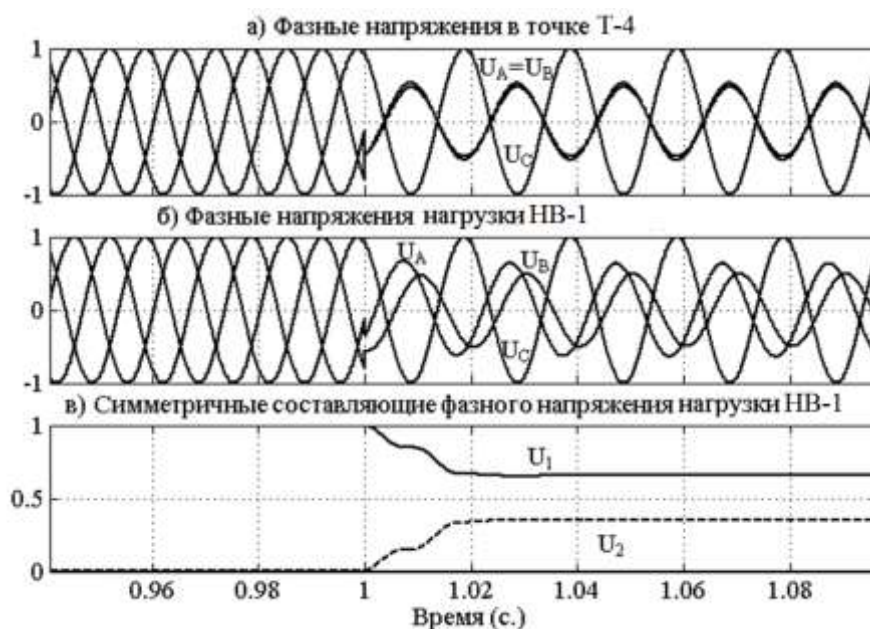


Рисунок 2.11 - Осциллограммы фазных напряжений в точке Т-4 – а) , фазных напряжений на входе нагрузки НВ-1 – б), симметричных составляющих напряжения нагрузки НВ-1 – в) для случая $K^{(2)}$ в точке Т-4

2.4.6 Влияние аварийных режимов на различных участках сети на систему трехфазных напряжений на входе низковольтной нагрузки

Анализ показывает, что при отсутствии в напряжении составляющих нулевой последовательности можно утверждать, что анализируемый провал напряжения вызван коротким замыканием типа $K^{(1)}$ или $K^{(1,1)}$ в сети 0.4 кВ, поскольку схема соединения обмоток трансформатора Y/Y_n препятствует прохождению токов нулевой последовательности, вызванных короткими замыканиями на участках сети 110 и 6кВ.

Межфазные короткие замыкания на стороне 110 и 6кВ, а также непосредственно в рассматриваемой линии 0.4 кВ сопровождаются снижением одного или двух фазных напряжений, или всех фазных напряжений. Этот вид короткого замыкания можно определить по его характерной особенности – равенству амплитуд составляющих прямой и обратной последовательности.

Однофазное короткое замыкание в линии 110кВ вызывает провал напряжения на входе нагрузки НВ-1, при котором имеет место снижение напряжения в двух или трех фазах в зависимости от схемы соединения обмоток трансформатора ГПП. Характерной особенностью данного типа провала напряжения в точке наблюдения является равенство напряжений в двух фазах.

Каждому типу короткого замыкания в сети электроснабжения соответствует своя определенная форма асимметрии фазного напряжения в линии питания нагрузки, которая обусловлена местом возникновения КЗ в сети, режимом работы нейтрали участка возникновения КЗ и схемой соединения обмоток трансформатора, отделяющего поврежденный участок от точки, в которой осуществляется контроль напряжения.

Полученные результаты представляют интерес в решении задач мониторинга напряжения в сети. Совокупность параметров фазного напряжения в точке наблюдения, позволяет классифицировать тип провала напряжения в соответствии с международной ABC классификацией провалов напряжения, а

также при известной топологии сети определить источник и причину возникновения провала.

По полученным результатам моделирования можно заключить, что основными типами провалов напряжения в исследуемой системе электроснабжения в соответствии с ABC классификацией являются следующие типы провалов:

- тип А, вызываемый трехфазным коротким замыканием;
- типы С и В, которые возникают при однофазных замыканиях на землю и двухфазных замыканиях;
- типы F и G, возникающие при однофазных и двухфазных коротких замыканиях на землю.

Полученные в ходе эксперимента данные могут быть использованы при исследовании влияния несимметричных провалов напряжения на работу частотно-регулируемого электропривода и при разработке алгоритмов работы систем управления для частотно-регулируемых электроприводов в аварийных режимах сети.

2.5 Оценка напряжения ЗПТ при провалах входного напряжения ЧРП различного типа в соответствии с ABC классификацией

Обнаружение провалов напряжения и идентификация их типов может быть осуществлено путем измерения параметров обобщенного вектора входных напряжений и сопоставления полученных результатов с таблицей данных этих параметров для каждого из семи типов провалов в соответствии с ABC классификацией [92].

По известным типам провалов и их параметрам можно предсказать напряжение звена постоянного тока, предполагая, что конденсатор ЗПТ обеспечивает достаточно малый коэффициент пульсаций, например, не более 2%. При оценке напряжения ЗПТ, очевидно следует учитывать отличие трехфазного режима выпрямления при симметричных провалах и однофазного режима при асимметричных провалах.

Симметричные провалы напряжения

При провалах типа А имеет место симметричное снижение как фазных, так и линейных напряжений:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= h, \quad \dot{U}_b = a^2 h, \quad \dot{U}_c = ah \\ \dot{U}_{ab} &= h\sqrt{3}e^{j30^\circ}, \quad \dot{U}_{bc} = h\sqrt{3}e^{-j90^\circ}, \quad \dot{U}_{ca} = h\sqrt{3}e^{j150^\circ} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Здесь остаточные напряжения нормированы относительно номинального напряжения $h = U/U_{nom}$. Примерный вид кривой напряжения ЗПТ $U_{dc}(t)$ при симметричном провале показан на рисунке 2.12, из которого видно, что при остаточном напряжении $h = 0.6$ происходит срабатывание защиты минимального напряжения в силу того, что $U_{ml} \leq U_{min}$.

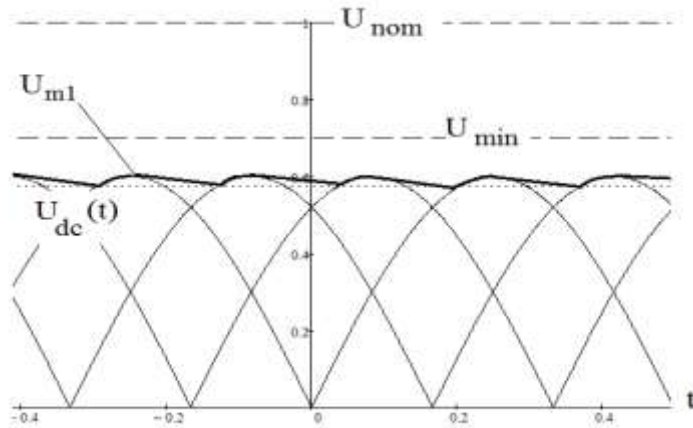


Рисунок 2.12 - Напряжение ЗПТ при симметричном провале глубиной 40%

Асимметричные провалы напряжения типа В и D

Запишем комплексные амплитуды линейных напряжений при провале типа В и D

$$\text{Тип В} - \dot{U}_{ab} = h - a^2, \quad \dot{U}_{bc} = -j\sqrt{3}, \quad \dot{U}_{ca} = -h + a \quad (2.2)$$

$$\text{Тип D} - \dot{U}_{ab} = \frac{3}{2}h + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad \dot{U}_{bc} = -j\sqrt{3}, \quad \dot{U}_{ca} = -\frac{3}{2}h + j\frac{\sqrt{3}}{3} \quad (2.3)$$

Зависимость модуля линейных напряжений от остаточного напряжения в поврежденной фазе показана на рисунке 2.13.

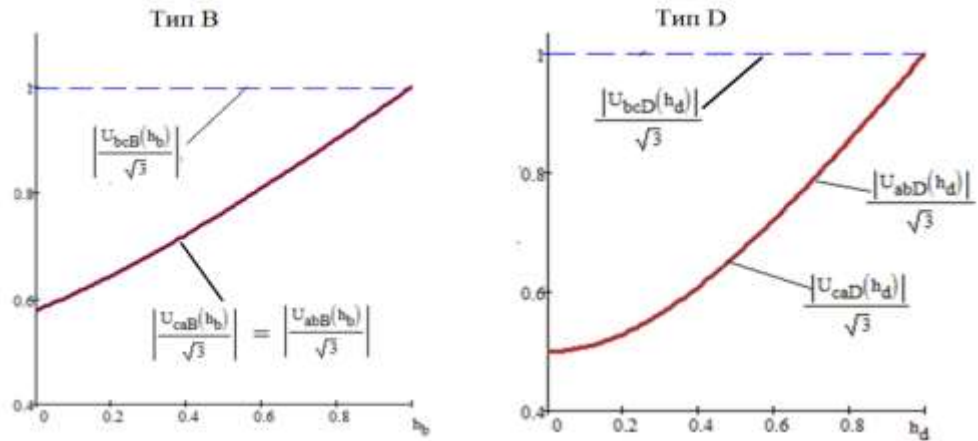


Рисунок 2.13 - Амплитуды линейных напряжений при провалах типа В и D

Особенностью этих провалов является неизменность одного из линейных напряжений при изменении двух других примерно по одинаковому закону. Типичная осциллограмма модуля линейных напряжений и напряжения ЗПТ при глубине провала $d = 1 - h = 0.7$ показана на рисунке 2.14.

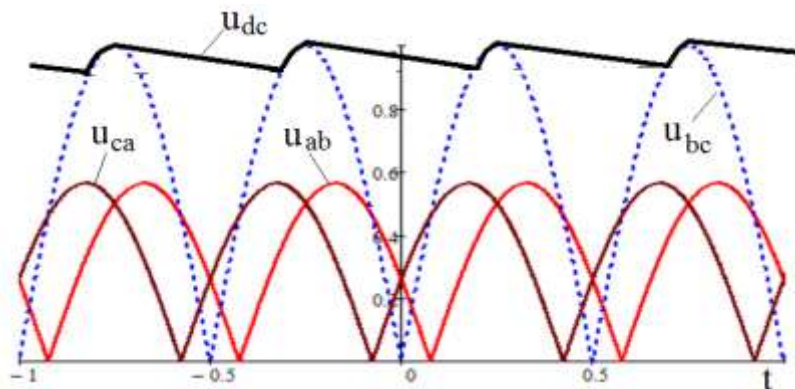


Рисунок 2.14 - Примерный вид осциллограмм модуля линейных напряжений и напряжения звена постоянного тока

Асимметричные провалы типа F

Запишем комплексные амплитуды линейных напряжений

$$\dot{U}_{ab}(h) = h \frac{3}{2} + j\sqrt{3} \frac{2+h}{6}, \quad \dot{U}_{bc}(h) = -j\frac{\sqrt{3}}{3}(2+h), \quad \dot{U}_{ca}(h) = -h \frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{6}(2+h) \quad (2.4)$$

В этом случае все линейные напряжения зависят от глубины провала, причем одно из линейных напряжений всегда больше двух других. Осциллограммы напряжений подобны осциллограммам, показанным на

рисунке 2.9. Зависимость амплитуд линейных напряжений от параметра h представлена на рисунке 2.15.

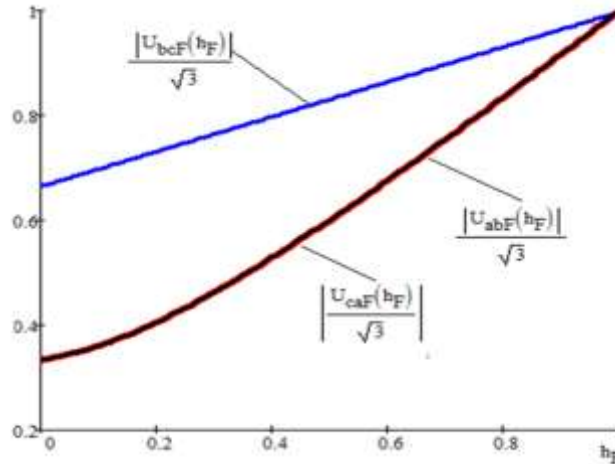


Рисунок 2.15 - Линейные напряжения при провалах типа F

Провалы напряжения типа C, E, G.

При таком роде провалов все три линейных напряжения зависят от глубины провала, причем амплитуды двух линейных напряжений всегда больше третьего напряжения как показано на рисунке 2.16.

Приведенные зависимости построены по формулам для линейных напряжений.

$$\text{Тип C: } \dot{U}_{ab} = 1 - \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)h; \quad \dot{U}_{bc} = -j\sqrt{3}h; \quad \dot{U}_{ca} = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)h - 1 \quad (2.5)$$

$$\text{Тип G: } \dot{U}_{ab} = 1 + \frac{h}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}h; \quad \dot{U}_{bc} = -j\sqrt{3}h; \quad \dot{U}_{ca} = -1 - \frac{h}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}h \quad (2.6)$$

Следует отметить, что для всех случаев асимметрия проявляется также в отличии угла сдвига фаз между фазами от 120 градусов.

Из анализа структуры линейных напряжений и соответствующих кривых напряжения ЗПТ можно сделать вывод, что при наличии измерительного блока для идентификации провалов напряжения можно построить наблюдатель напряжения ЗПТ на основе выражений для модулей линейных напряжений, их начальных фаз и модели разрядно зарядных процессов накопительного конденсатора.

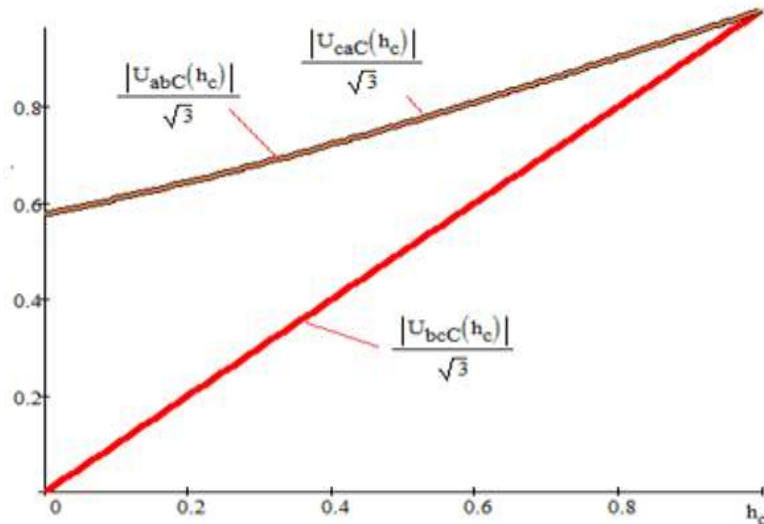


Рисунок 2.16 - Соотношения между линейными напряжениями для провалов типа C, E, G

Использование данных, полученных с помощью наблюдателя, позволяет осуществить выбор способа преодоления за счет перестройки системы управления на работу в области ослабленного поля либо на работу в режиме электрической рекуперации кинетической энергии.

2.6 Выводы по главе.

1. Для снижения отклонений от номинального режима работы приводного механизма во время провалов напряжения и снижения зарядных токов после восстановления нормальных условий работы сети важно сократить время перехода на тот или иной способ преодоления провалов напряжения по сравнению с характерным временем задержки срабатывания реле минимального напряжения, используемых в стандартных схемах ЧРП. Эту задачу может выполнить быстродействующее устройство обнаружения и идентификации провалов напряжения в сети в комбинации с наблюдателем напряжения ЗПТ на основе анализа структуры асимметричных линейных напряжения на входе ЧРП.

2. Для учета совокупности возможных искажений напряжения, возникающих при различных авариях в сети той или иной конфигурации, целесообразно использовать ABC классификацию провалов напряжения. Классификация основана на описании семи характерных типов асимметричных напряжений, зависящих от глубины провала напряжения в одной или нескольких

фазах, и предоставляет возможность проводить анализ распространения провалов в пределах сети электроснабжения с учетом схем соединения обмоток трансформаторов.

3. Повышение устойчивости ЧРП к провалам напряжения является особенно важной задачей для предприятий с непрерывным технологическим циклом, например предприятий нефтехимического производства. В связи с этим был выполнен статистический анализ провалов напряжения в системе электроснабжения предприятия ООО «КИНЕФ». Построение гистограмм провалов показало, что статистика провалов в целом совпадает со статистическими данными ГОСТ.

4. Для исследования связи типов КЗ на линиях разного класса напряжений с типом провалов в соответствии с *ABC* классификацией построена компьютерная модель системы электроснабжения промышленного предприятия с тремя уровнями напряжения 110-6 и 6-0.38 кВ, разными режимами нейтрали и трансформаторами с различными схемами соединения обмоток ВН и НН. В результате анализа асимметричных напряжений на входе ЧРП напряжением 0.38 кВ, вызванных короткими замыканиями типа $K^{(1)}$, $K^{(2)}$, $K^{(1,1)}$, $K^{(3)}$, установлен характер трансформации типов провалов напряжения при их распространении в сети за счет влияния на симметричные составляющие схем соединения обмоток трансформаторов Y_n/Δ , Y/Y_n .

5. Установлено соответствие *ABC* типов провалов напряжения на входе ЧРП типам короткого замыкания в линиях передачи энергии. Установлены зависимости между модулями линейных напряжений и углами сдвига фаз между ними от глубины провалов напряжения. Это позволяет предсказать параметры напряжения ЗПТ и сопоставить их с уставкой для защиты минимального напряжения или с уставкой изменения структуры системы управления для регулирования привода в режиме ослабленного поля или в режиме электрической рекуперации кинетической энергии.

ГЛАВА 3 ВЫЯВЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ ЧРП В ОБЛАСТИ ОСЛАБЛЕННОГО ПОЛЯ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ

3.1 Вводные замечания

В соответствии с кривой устойчивости на рисунке 3.1 можно выделить два следствия провалов напряжения заданной глубины.

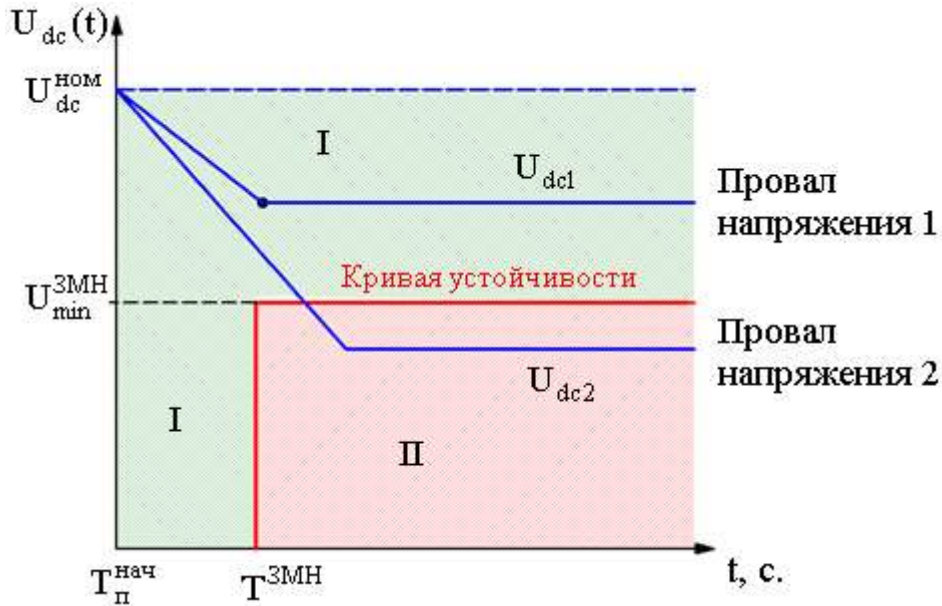


Рисунок 3.1 - Кривая устойчивости привода в виде ступенчатой функции, у которой имеется область срабатывания ЗМН - область II и область несрабатывания ЗМН – область I

В первом случае (провал напряжения 1) остаточное напряжение ЗПТ не превышает уставки срабатывания защиты $U_{dc1} > U_{dc}^{ЗМН}$. При нахождении рабочей точки в области I привод продолжает работать, но при пониженном напряжении $U_{dc1} < U_{dc}^{ном}$ и, следовательно, при уменьшенном электромагнитном моменте, при котором двигатель не способен обеспечить требуемый режим приводного механизма по скорости и моменту. Это приводит к сбою технологического процесса.

Во втором случае (провал напряжения 2) установившееся значение напряжения ЗПТ $U_{dc2} < U_{dc}^{ЗМН}$ находится в области срабатывания реле, которое отключает привод от сети в момент t_1 пересечения кривой разряда конденсатора

с горизонтальной линией $u_{dc}(t_1) = U_{\min}^{3МН}$. После отключения выпрямителя от сети конденсатор быстро разряжается на выбегающий двигатель. Повторный пуск возможен после полной остановки двигателя и перезарядки конденсатора, что занимает заметное время, которое намного превышает длительность провала напряжения, вызвавшего срабатывание ЗМН [51].

В зависимости от соотношения между уставкой срабатывания ЗМН и остаточным напряжением ЗПТ для решения задачи прохождения приводом провалов напряжения используются два разных подхода, определяющих стратегию и соответствующие алгоритмы управления приводом в аварийном режиме.

В первом случае $U_{dc}^{НОМ} > U_{dc} > U_{\min}^{3МН}$ задача стоит в сохранении режимных параметров привода при пониженном напряжении [94,95]. Во втором случае $U_{dc} < U_{\min}^{3МН}$, когда происходит срабатывание ЗМН, задача системы управления состоит в том, чтобы минимизировать время повторного пуска после восстановления питания [45,46,47,80,101].

Целью настоящей главы является исследование и разработка способа обеспечения режимных параметров электропривода при провалах напряжения, не приводящих к срабатыванию ЗМН. Задача минимизации повторного пуска после срабатывания ЗМН будет рассмотрена в следующей главе.

При уменьшении напряжения ЗПТ в пределах $U_{dc}^{НОМ} > U_{dc} > U_{\min}^{3МН}$ и соответствующего снижения входного напряжения двигателя по первой гармонике двигатель переходит в зону ослабленного поля. В этом случае обеспечение требуемого режима привода при существующих ограничениях по напряжению и току возможно за счет изменения системы управления двигателем с учетом особенностей работы привода в этой области.

Режим ослабленного поля широко применяется в системах двухзонного регулирования скорости вращения электродвигателей тягового привода [86,89,] при регулировании скорости вращения выше номинальной (рисунок 3.2).

Область возможных сочетаний значений напряжения и частоты при частотном регулировании можно разделить на две зоны:

- зона I – зона, в которой сохраняется неизменное отношение напряжения к частоте основной гармонии ($U/f = const$)

- II – зона, в которой напряжение поддерживается неизменным $U_n = const$, в то время как частота вращения может принимать значения больше номинального. В области частот $f > f_{0n}$, где f_{0n} – номинальная частота вращения магнитного поля статора, напряжение первой гармоники напряжения остается постоянной величиной в силу естественного ограничения по напряжению ЗПТ: $U_{dc} \leq U_{dc}^{HOM}$.

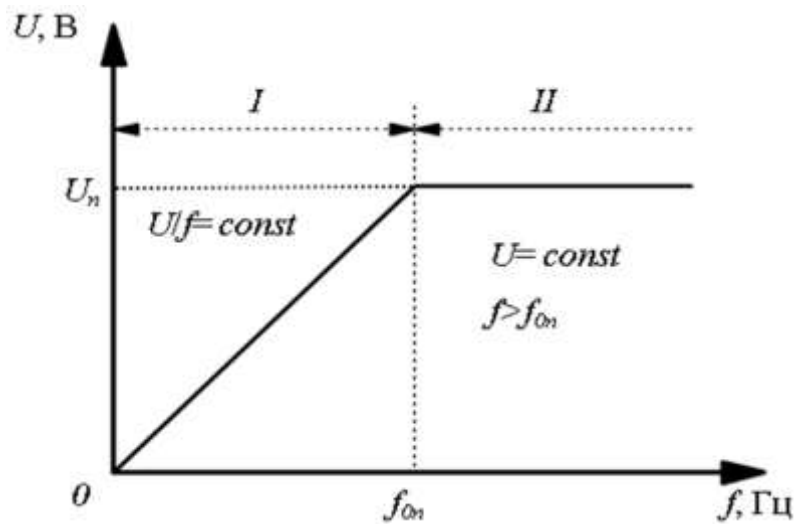


Рисунок 3.2 - Вольт-герцевая характеристика работы частотно-регулируемого привода

Режим работы при пониженном напряжении в сети можно рассматривать, как частный случай двухзонного регулирования скорости. Переход в область ослабленного поля обусловлен тем, что при провалах напряжения в сети напряжение звена постоянного тока становится меньше номинального значения, в то время как частота поля статора оказывается больше того значения, которое должно соответствовать новому напряжению ЗПТ в соответствии с кривой на рисунке 3.2.

Использование режима ослабления поля в условиях пониженного напряжения в сети питания рассмотрено в ряде работ [94,95]. Представленные результаты свидетельствуют о возможности сохранения режимных параметров электропривода при провалах напряжения в сети. Однако в этих работах

отсутствует ключевой момент оценки допустимого снижения напряжения в ЗПТ, при котором данный режим управления способен обеспечивать непрерывность работы привода. Также не рассмотрено влияние особенностей приводных механизмов на работу ЧРП в области ослабленного поля. В то же время учет данных моментов является необходимым условием для построения комплексной системы управления, которая могла бы повысить устойчивость привода к провалам напряжения.

Целью данной главы является:

- изучение особенностей работы привода в области ослабленного поля;
- определение параметров приводного механизма, влияющих на возможность привода работать при пониженном напряжении;
- оценка минимально-допустимого значения напряжения в ЗПТ по условию сохранения режимных параметров привода;
- разработка и обоснование системы векторного управления в режиме ослабленного поля при провалах напряжения в сети для обеспечения непрерывности работы привода.

3.2 Математическая модель двигателя

3.2.1 Уравнения обобщенной модели двигателя во вращающейся системе координат

Модель асинхронного электропривода строится на основе понятия обобщенная машина [43,60] (Рисунке 3.3) и использования векторного представления координат привода с помощью пространственных или обобщенных векторов.

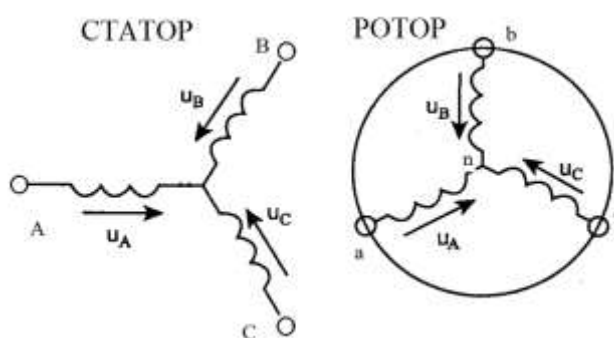


Рисунок 3.3 - Схематическое изображение обобщенной электрической машины

Уравнения обобщенной машины составляются на основе закона Кирхгофа для напряжений фаз и выражений для потокосцеплений статора и ротора. Для фазы статора A и фазы ротора a имеем

$$u_{sA} = R_{sA} i_{sA} + \frac{d\psi_{sA}}{dt}, \quad u_{ra} = R_{ra} i_{ra} + \frac{d\psi_{ra}}{dt} \quad (3.1)$$

Для других фаз выражения имеют аналогичный вид. Потокосцепление обмоток фаз определяется потоками самоиндукции и взаимной индукции и зависит от токов других фаз [14,65].

Для уменьшения числа уравнений используют переход от трехфазной системы токов i_a, i_b, i_c к обобщенному вектору \vec{i}_s и его проекциям на оси одной из ортогональных систем координат, которые для удобства вычислений совмещаются с плоскостью комплексных чисел:

$$\vec{i}_s = \frac{2}{3} [1 \ a \ a^2] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} [i_a, a i_b, a^2 i_c] = \dot{I}_m e^{j\theta}, \quad (3.2)$$

$$\theta = \omega t, \quad a = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad a^2 = e^{-j2\pi/3} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Положение вектора на abc - и $\alpha\beta$ -плоскости в момент времени t_1 показано на рисунке 3.4.

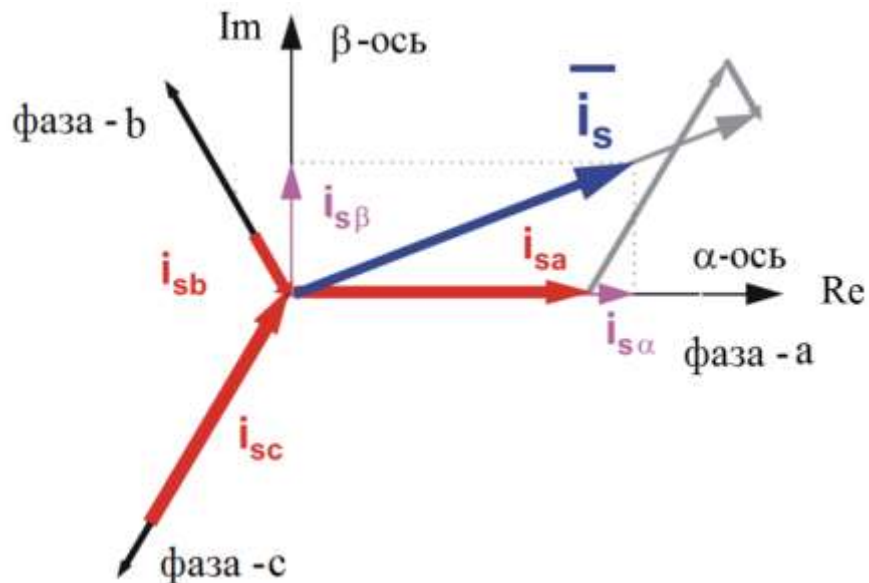


Рисунок - 3.4 Обобщенный вектор тока и его проекции на оси abc - и $\alpha\beta$ -системы координат

При совмещении неподвижной системы координат $\alpha\beta$ с плоскостью комплексных чисел Re, Im вращающийся вектор тока можно выразить через его проекции:

$$\bar{i}_s = i_{s\alpha} + j i_{s\beta} \quad (3.3)$$

Заметим, что $\alpha\beta$ -компоненты вектора тока эквивалентной двухфазной машины связаны с трехфазными токами реальной машины соотношениями:

$$i_{s\alpha} = \frac{1}{3}[2i_{sa} - (i_{sb} + i_{sc})], \quad i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{sb} - i_{sc}) \quad (3.4)$$

Помимо рассмотренных систем координат для описания машин переменного тока также используется система координат x, y , которая вращается с угловой частотой ω_k , и d, q – система координат, связанная с роторной обмоткой (рисунок 3.5).

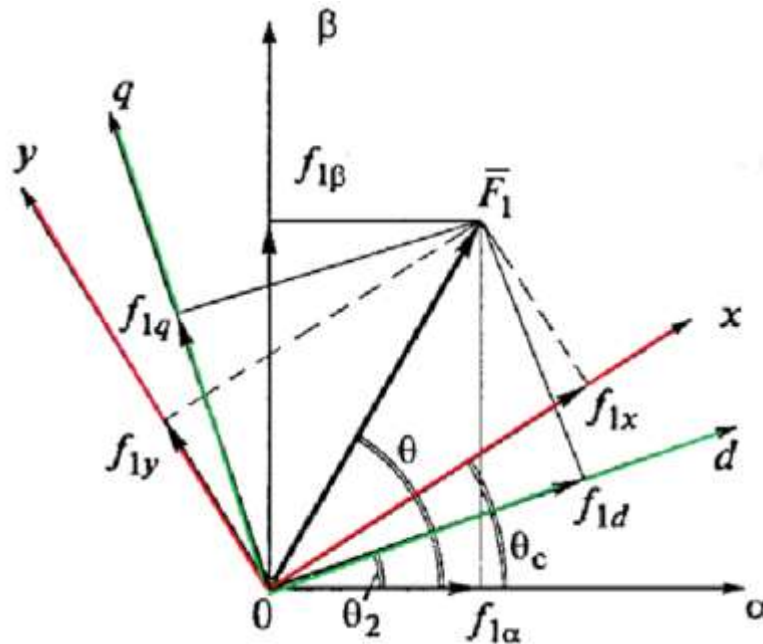


Рисунок 3.5 - Проекция пространственного вектора на оси различных систем координат

Выражения для пространственных векторов, записанных в разных системах координат, связаны между собой соотношениями:

$$F_{\alpha\beta} = F_{\max} e^{j\theta}, \quad F_{xy} = F_{\max} e^{j(\theta-\theta_c)} \rightarrow F_{xy} = F_{\alpha\beta}^{-j\theta_c} \rightarrow F_{\beta\alpha} = F_{xy}^{j\theta_c} \quad (3.5)$$

$$F_{dq} = F_{\max} e^{j(\theta-\theta_2)} = F_{\alpha\beta} e^{-j\theta_2} \rightarrow F_{dq} = F_{xy}^{j(\theta_c-\theta_2)} \quad (3.6)$$

Здесь $\theta, \theta_2, \theta_c$ – угловые координаты вектора \vec{F} , оси d и оси x.

Применение преобразования (3.2) к исходным уравнениям (3.1) и использование формул перехода из одной системы в другую (3.5), (3.6) позволяет записать уравнения машины во вращающейся системе координат ху, в которой отсутствует зависимость параметров уравнений от угла θ :

$$\vec{u}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d\vec{\psi}_s}{dt} + j\omega_k \vec{\psi}_s, \quad \vec{u}_r = R_r \vec{i}_r + \frac{d\vec{\psi}_r}{dt} + j(\omega_k - z_p \omega) \vec{\psi}_r \quad (3.7)$$

$$\vec{\psi}_s = L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r, \quad \vec{\psi}_r = L_m \vec{i}_s + L_r \vec{i}_r, \quad (3.8)$$

Здесь L_s, L_r – индуктивности статора и ротора, L_m – взаимная индуктивность,

ω_k – частота вращения системы координат х,у, ω – угловая скорость вращения вала двигателя, $\omega_r = \omega_k - z_p \cdot \omega$ – частота тока ротора, z_p – число пар полюсов.

После выражения токов через потокосцепления из уравнений (3.8) и подстановки в уравнения (3.7) получаем систему дифференциальных уравнений в форме Коши относительно потокосцеплений. Существуют и другие формы записи системы уравнений, например, относительно тока статора и потокосцепления ротора. Вид системы дифференциальных уравнений предопределяет структурную схему их решения.

Если принять $\omega_k = 0$, то получим описание машины в статорной системе координат α, β . В случае $\omega_k \neq 0$ структура модели зависит от выбора базового вектора [65], т.е. вектора, который совмещается с одной из осей системы координат.

Так, если за базовый вектор принять вектор напряжения статора, то система координат будет вращаться со скоростью ω_s , равной угловой частоте напряжения питания. Если при этом совместить этот вектор с осью x вращающейся системы координат, тогда в уравнениях (3.7) следует учитывать только одну проекцию вектора $\mathbf{u}_s = u_{sx}$, $u_{sy} = 0$. Такой подход использован в главе 3 при построении

системы скалярного управления асинхронным приводом без датчика положения ротора.

3.2.2 Уравнения двигателя при ориентации потокосцепления ротора по действительной оси вращающейся системы координат

Реализация векторных систем управления осуществляется на основе модели двигателя в обобщенной системе координат. В качестве базового вектора могут быть использован обобщенный вектор потокосцепления статора, вектор потокосцепления ротора, вектор тока намагничивания. Наиболее широко используется система управления, использующая в качестве базового вектора обобщенный вектор потокосцепления ротора. Описание процессов производится в dq – системе координат, которая вращается с синхронной скоростью $\omega_k = \omega_s$.

Запишем уравнения (3.7), (3.8) для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, для которого напряжение питания со стороны ротора равно нулю $\bar{u}_r = 0$. После подстановки в уравнения векторов в виде $\vec{F}_{dq} = F_d + jF_q$ получим уравнения относительно проекций F_d, F_q :

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_s \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_{sq} + \omega_s \psi_{sd} \\ 0 = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - (\omega_s - z_p \omega) \psi_{rq} \\ 0 = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} - (\omega_s - z_p \omega) \psi_{rd} \\ \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{array} \right. \quad (3.9)$$

Система уравнений (3.9) добавляется выражением для электромагнитного момента M_e и уравнением вращения вала приводного механизма с моментом сопротивления M_c :

$$M_e = \frac{3}{2} z_p \frac{L_m}{L_r} (\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd}) \quad (3.10)$$

$$M_e - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.11)$$

Здесь J - момент инерции, кгм².

При выборе в качестве базисного вектора обобщенный вектор потокосцепления ротора проекция этого вектора на ось q равна нулю. Учитывая в формулах (3.9),(3.10) $\psi_{rq} = 0$ и $\psi_{rd} = \psi_r$, получим:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_s \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_{sq} + \omega_s \psi_{sd} \\ 0 = R_r i_{rd} + p\psi_r \\ 0 = R_r i_{rq} - (\omega_s - z_p \omega) \psi_r \\ \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_r = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ 0 = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (3.12)$$

$$M_e = \frac{3}{2} z_p \frac{L_m}{L_r} \psi_r i_{sq} \quad (3.13)$$

Из 3-его и 7-ого уравнения системы (3.12) получим:

$$i_{rd} = -\frac{p\psi_r}{R_r} \rightarrow \psi_r = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} = L_m i_{sd} - T_r p\psi_r \quad (3.14)$$

$$\psi_r = \frac{L_m}{1 + pT_r} i_{sd}; \quad T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

Из уравнений (3.13) и (3.14) следует, что за управление потокосцеплением ротора ψ_r отвечает проекция тока статора i_{sd} , управление инерционное с постоянной времени T_r . За создание электромагнитного момента отвечает проекция тока i_{sq} , управление безынерционное. Это позволяет построить систему управления асинхронным двигателем с отдельным управлением потокосцеплением и электромагнитным моментом.

В установившемся режиме $d\psi/dt = 0$ и $d\omega/dt = 0$, что упрощает систему уравнений:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_s \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \psi_{sd} \\ 0 = R_r i_{rd} \\ 0 = R_r i_{rq} - \omega_r \psi_r \\ \psi_{sd} = L_s i_{sd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_r = L_m i_{sd} \\ 0 = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (3.15)$$

$$M_e = \frac{3}{2} z_p \frac{L_m^2}{L_r} i_{sd} i_{sq} \quad (3.16)$$

С учетом ограничений, $\psi_{rq} = 0$ и $i_{rd} = 0$ получим:

$$\begin{cases} |\psi_r| = L_m i_{sd} \Rightarrow i_{sd} = \frac{|\psi_r|}{L_m} \\ i_{rq} = -\frac{L_m}{L_r} i_{sq} \end{cases} \quad (3.17)$$

Проекции векторов тока статора связаны между собой через проекции напряжения:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_s \psi_{sq} = R_s i_{sd} - \omega_s L_s \sigma i_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \psi_{sd} = \omega_s L_s i_{sd} + R_s i_{sq} \end{cases}, \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (3.18)$$

где σ – коэффициент рассеяния.

Векторная диаграмма двигателя в установившемся режиме показана на рисунке 3.6.

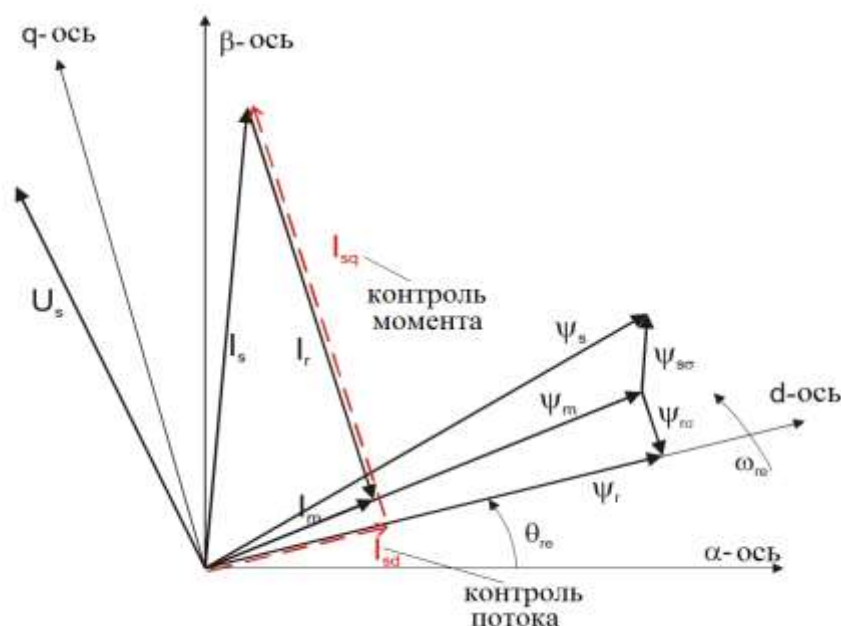


Рисунок 3.6 - Векторные диаграммы обобщенных векторов в $\alpha\beta$ - и dq -плоскости при ориентации потокосцепления ротора вдоль вещественной оси вращающейся системы координат

3.3 Границы рабочей области электропривода

3.3.1 Кривые постоянного электромагнитного момента

Из выражения для электромагнитного момента асинхронного двигателя (3.16) следует, что одно и то же значение момента $M_e = \text{const}$ может быть реализовано при различных сочетаниях проекций векторов тока статора i_{sd}, i_{sq} , определяющих положение вектора тока статора \vec{i}_s на dq -плоскости при перемещении его конца вдоль линии - гиперболы, задаваемой уравнением

$$i_{sq} = \frac{c \cdot M_e}{i_{sd}}, \quad c = \frac{1}{1.5z_p(L_m^2/L_r)} \quad (3.19)$$

На рисунке 3.7 представлены линии постоянного момента $M_e = \text{const}$ на плоскости dq при значениях: $M_{e1} = M_{e\text{ном}}$, $M_{e2} \leq M_{e\text{ном}}$, $M_{e3} \geq M_{e\text{ном}}$, где $M_{e\text{ном}}$ — номинальный момент.

Ось симметрии гиперболы проходит через точку A , в которой проекции тока i_{sd-A}, i_{sq-A} равны между собой и равны проекциям вектора тока статора при его номинальном значении $|\dot{i}_s^{HOM}| = I_{HOM}$

$$\dot{i}_{sq}^{HOM} = \dot{i}_{sd}^{HOM} = \sqrt{\frac{M_{HOM}}{1.5z_p(L_m^2/L_t)}}$$

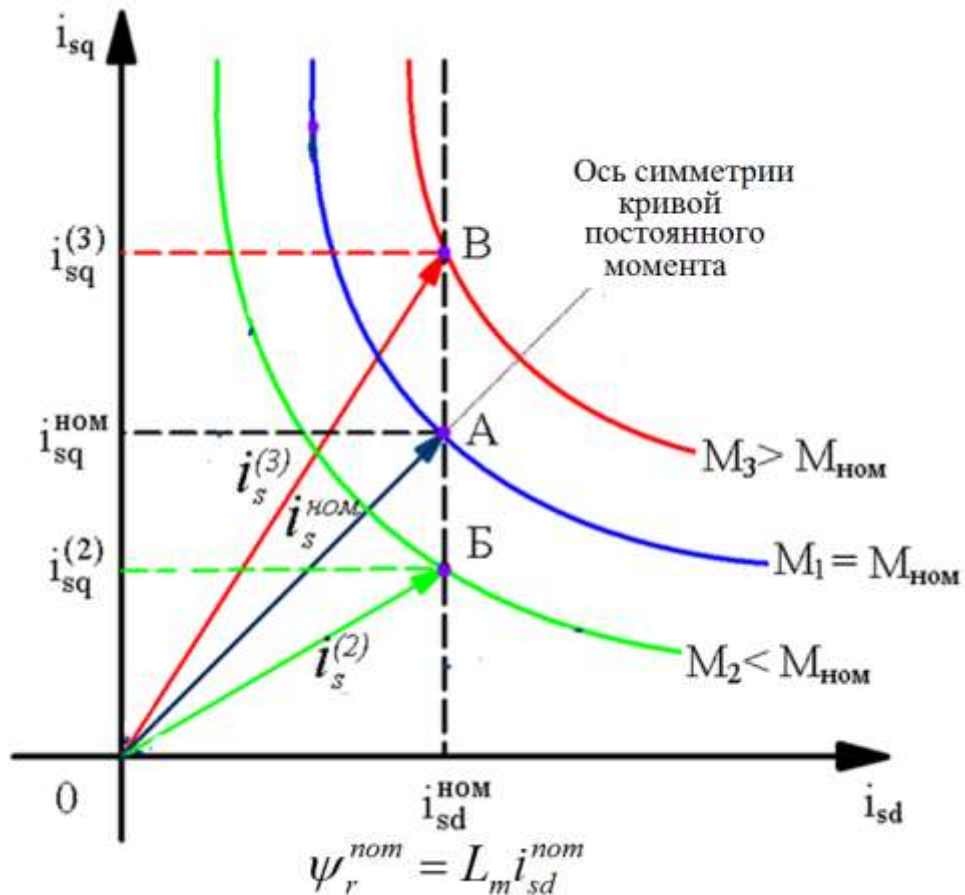


Рисунок 3.7 - Кривые постоянного момента M_1, M_2, M_3 и траектория перемещения конца вектора тока (пунктирная линия) при поддержании постоянного значения потокоцепления ротора

При увеличении момента соответствующие кривые удаляются по оси симметрии от начала координат. Регулирование привода по закону $\psi_r = \text{const}$ обеспечивается путем поддержания значения проекции тока $i_{sd} = \text{const}$ на заданном уровне i_{sd}^{HOM} . Регулирование момента осуществляется за счет изменения проекции тока $i_{sq} = \text{var}$. При увеличении требуемого момента рабочая точка A на

кривой $M_1 = \text{const}$ смещается вверх по линии $i_{sd} = \text{const}$ параллельной оси i_{sq} к новому установившемуся режиму в точке B , которая лежит на кривой $M_3 = \text{const}$.

При реализации системы управления необходимо, чтобы рабочая точка привода, принадлежащая линии постоянного момента, находилась бы в области допустимых значений по току, границей которой является окружность, и допустимых значений по напряжению, границей которой является эллипс. Из рисунка 3.8 видно, что рабочая точка A не может быть реализована, поскольку она находится внутри области допустимых значений по току и вне допустимой зоны по напряжению.

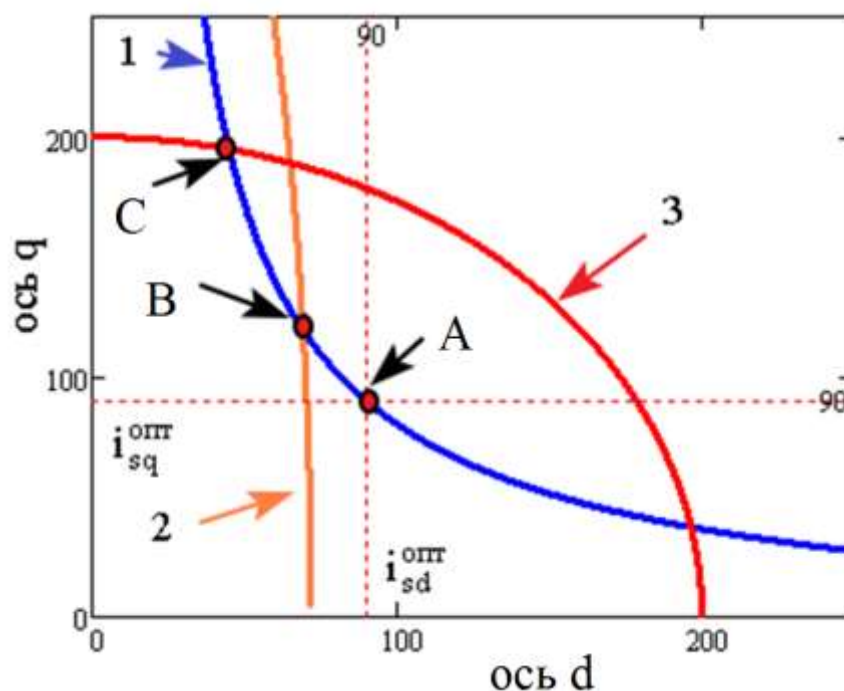


Рисунок 3.8 - Определение координат рабочей точки электропривода по кривой постоянного электромагнитного момента -1) по границе рабочей области по напряжению -2) и по границе рабочей области по току -3)

Для обеспечения требуемого электромагнитного момента рабочая точка должна принадлежать дуге BC , которая находится внутри границы, как по току, так и напряжению. Способ расчёта координат для крайних точек отрезка будет рассмотрен ниже. Для обеспечения требуемого момента при снижении напряжения путем перевода рабочей точки на отрезок BC стандартная система

векторного управления должна быть дополнена отдельным регулятором потокосцепления ротора, управление которым должно обеспечивать неизменность режима работы привода.

3.3.2 Граница по току статора

Ограничение по току статора, применительно к частотно-регулируемому электроприводу, связано с максимальной пропускной способностью силовых ключей автономного IGBT- инвертора напряжения. Анализ характеристик различных преобразователей частоты показывает, что предельно допустимое значение выходного тока составляет 150-200% от номинального тока преобразователя.

В зависимости от тока в преобразователях частоты предусмотрено два типа токовых защит:

- Защита от перегрузки или тепловая защита, которая предназначена для отключения электродвигателя от питания в том случае, если выходной ток преобразователя превышает номинальное значение, но не превышает максимально-допустимого значения. Работа привода при значении выходного тока преобразователя в пределах $I_{ном} \leq I \leq I_{max}$ ограничена во времени уставкой $T_{пред}$, при превышении которого система управления отключает электродвигатель от питания.

- Максимально-токовая защита, которая в отличие от тепловой защиты работает без уставки по времени. В случае превышения выходного тока максимально-допустимого значения $I_{s max}$, система управления без выдержки по времени отключает питание электродвигателя.

Область допустимых значений тока статора определяется неравенством:

$$|i_s| = \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2} \leq I_{s max} \quad (3.20)$$

где $|i_s|$ – модуль обобщенного вектора тока статора.

Граница области допустимых значений тока определяется уравнением окружности :

$$i_{sd}^2 + i_{sq}^2 = I_{s \max}^2 \quad (3.21)$$

Для получения области допустимых токов также необходимо учитывать ограничение токов по напряжению.

3.3.3 Граница по напряжению статора

Ток статора и электромагнитный момент электродвигателя зависят от напряжения, которое может быть сформировано на выходе преобразователя частоты. Максимальное амплитудное значение основной гармоники фазного напряжения U_{ml}^{\max} зависит от среднего напряжения звена постоянного тока и от способа формирования выходного напряжения.

При синусоидальной ШИМ можно считать [74] :

$$U_{ml}^{(\max)} = U_{\max} = U_{dc} / 2,$$

U_{dc} - среднее значение напряжения звена постоянного тока.

Уравнение границы допустимых значений напряжений найдем из условия $|u_s| = U_{\max}$, где \bar{u}_s - обобщенный вектор напряжения статора.

Искомое уравнение получим из выражения для квадрата модуля обобщенного вектора напряжения:

$$u_{sd}^2 + u_{sq}^2 = (R_s i_{sd} - \omega_s L_s \sigma i_{sq})^2 + (\omega_s L_s i_{sd} + i_{sq} R_s)^2 = U_{\max}^2.$$

$$A \cdot i_{sd}^2 + B \cdot i_{sd} i_{sq} + C \cdot i_{sq}^2 = U_{\max}^2 \quad (3.22)$$

где

$$A = R_s^2 + \omega_s^2 L_s^2,$$

$$B = 2R_s \omega_s L_s (1 - \sigma),$$

$$C = R_s^2 + \omega_s^2 L_s^2 \sigma^2$$

Из выражения (3.22) следует, что, граница допустимых значений тока при ограничении по напряжению описывается эллипсом, ось симметрии которого отклонена на угол γ , отсчитываемый по направлению вращения системы координат dq .

Объединение выражений (3.20) и (3.22) дает область допустимых значений тока статора для формирования электромагнитного момента:

$$\begin{cases} i_{sd}^2 + i_{sq}^2 \leq I_{s \max}^2 \\ A \cdot i_{sd}^2 + B \cdot i_{sd} i_{sq} + C \cdot i_{sq}^2 \leq U_{\max}^2 \end{cases} \quad (3.23)$$

Пример построения области допустимых значений и кривых постоянного момента дан на рисунке 3.9.

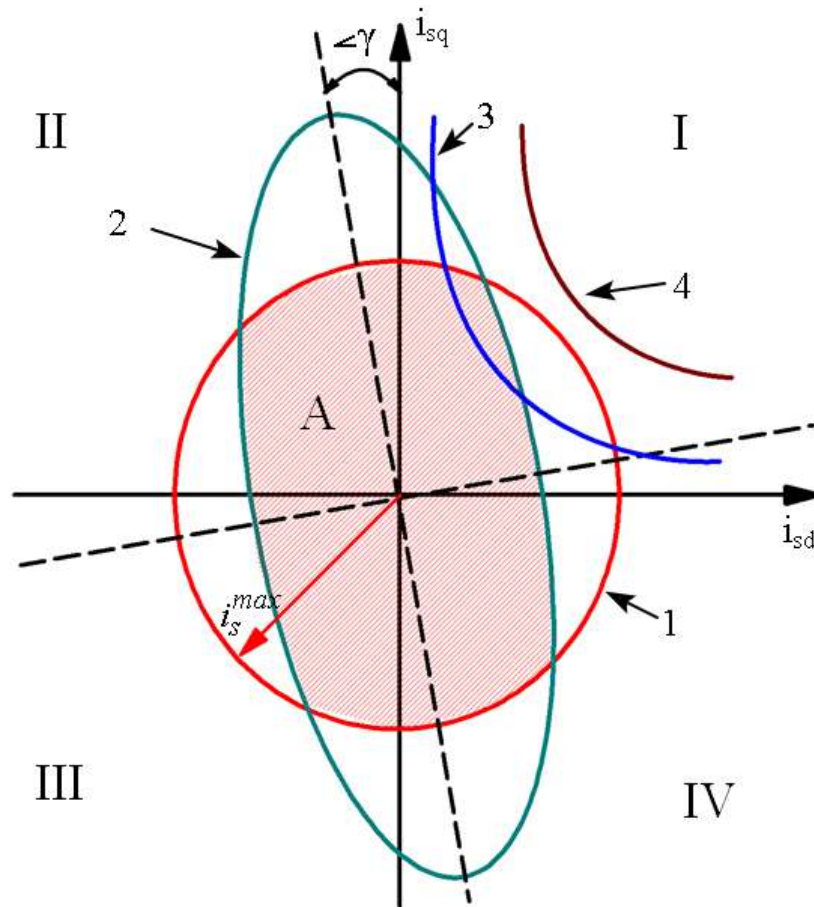


Рисунок 3.9 - Рабочая область электропривода с векторной системой управления при законе регулирования $\psi_r = const$. Кривая 1 – ограничение по току; кривая 2 – ограничение по напряжению; кривая 3,4 – электромагнитный момент

Рабочая область электропривода «А» образована пересечением границы по току (кривая 1) и границы по напряжению (кривая 2). Из построений видно, что часть кривой постоянного момента $M_3 = const$ (кривая 3) приходится на область допустимых значений тока статора, и такой момент может быть реализован. Кривая 4 находится вне области допустимых значений, поэтому соответствующий

момент $M_4 > M_3$ реализован быть не может. Из построений на рисунке 3.7. видно, из-за наклона границы по напряжению (кривая 2) на некоторый угол γ , рабочая область привода в различных квадрантах системы координат dq будет отличаться. Так в квадранте I, который соответствует двигательному режиму работы привода рабочая область меньше чем в квадранте II, который соответствует генераторному режиму работы привода.

Как следует из выражения (3.22) ограничение по напряжению зависит от среднего значения напряжения ЗПТ и частоты тока статора. Поэтому граница по напряжению может изменяться вследствие изменения напряжения ЗПТ, например, вследствие провалов напряжения в сети, так и вследствие изменения режима работы привода за счет изменения частоты тока статора при регулировании частоты вращения. Для разработки алгоритмов управления необходимо рассмотреть влияние различных условий и факторов на форму и границу рабочей области привода.

3.4 Уравнение границы по напряжению в форме канонического уравнения эллипса

Для задач определения рабочей области в зависимости от изменения параметров напряжения звена постоянного тока и частоты поля статора приведем выражение (3.22) к каноническому уравнению эллипса[33]. Данная операция аналогична к переходу записи уравнения (3.22) из dq - системы координат в систему координат $d'q'$, ориентированную по осям симметрии эллипса. Проекция тока статора в новой системе координат будем обозначать i'_{sd}, i'_{sq} . Уравнение (3.22) является частным случаем уравнения кривой второго порядка. Полное уравнение кривой второго порядка имеет вид [23]:

$$A' \cdot i_{sd}^2 + 2B' \cdot i_{sd} \cdot i_{sq} + C' \cdot i_{sq}^2 + 2D' \cdot i_{sd} + 2E' \cdot i_{sq} + F' = 0 \quad (3.24)$$

Это уравнение переходит в уравнение (3.22) при следующих значениях коэффициентов:

$$A' = A; B' = B/2; C' = C; D' = E' = 0; F' = -U_{\max}^2.$$

Известно, что в общем уравнении кривой 2-ого порядка коэффициенты D', E' отвечают за смещение кривой относительно начала координат, коэффициент B' - за наклон осей кривой относительно осей системы координат. Поэтому в новой системе координат $d'q'$ коэффициенты D_1, E_1 и B_1 должны равняться нулю, и уравнение эллипса в должно иметь вид:

$$A_1 \cdot (i'_{sd})^2 + C_1 \cdot (i'_{sq})^2 + F_1 = 0 \quad (3.25)$$

Получение коэффициентов $A_1 B_1 F_1$ методом инвариантов [59] дано в приложении А.

Приведем окончательный результат преобразований в виде уравнения эллипса, большая сторона которого a расположена на оси q' , а малая b на оси d' .

$$\frac{i'_{sd}{}^2}{b^2} + \frac{i'_{sq}{}^2}{a^2} = 1$$

Где a, b - большая и малая полуоси эллипса:

$$a = \frac{U_{\max}}{\sqrt{C_{12}}}, \quad b = \frac{U_{\max}}{\sqrt{A_{12}}} \quad (3.26)$$

Коэффициенты C_{12}, A_{12} связаны с коэффициентами A, B, C исходного уравнения эллипса (3.22) соотношениями:

$$C_{12} = \frac{A + C - \sqrt{(A - C)^2 + B^2}}{2}, \quad (3.27)$$

$$A_{12} = \frac{A + C + \sqrt{(A - C)^2 + B^2}}{2}$$

Угол наклона γ системы координат $d'q'$ относительно системы dq определяется по формуле

$$\gamma = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{B}{A - C} \right) \quad (3.28)$$

Необходимо отметить, что полуоси эллипса являются функциями напряжения и частоты $a = f_a(U_{\max}, \omega_s); b = f_b(U_{\max}, \omega_s)$, а угол наклона только функцией частоты $\gamma = f_\gamma(\omega_s)$. Влияние синхронной частоты на изменение формы

эллипса, задающего границу по напряжению, при неизменном напряжении ЗПТ показано на рисунке 3.10.

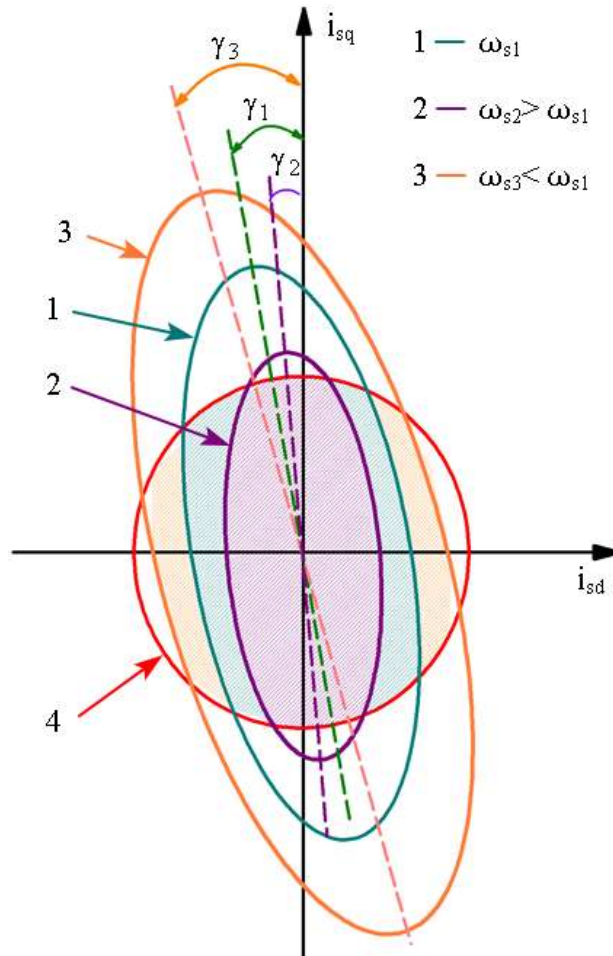


Рисунок 3.10 - Изменение рабочей области электропривода при изменении частоты тока статора: кривая 1- граница по напряжению при частоте ω_{s1} ; кривая 2 - $\omega_{s2} > \omega_{s1}$; кривая 3- $\omega_{s3} < \omega_{s1}$; кривая 4 – граница по току

Из графиков видно, что с увеличением синхронной частоты область допустимых значений тока сужается, угол наклона оси эллипса уменьшается. Рассмотренный случай изменения рабочей области электропривода характерен для регулирования частоты вращения ротора двигателя.

Влияние напряжения ЗПТ на границу допустимых значений токов показано на рисунке 3.11. Изменение напряжения ЗПТ связано с провалами напряжения в сети.

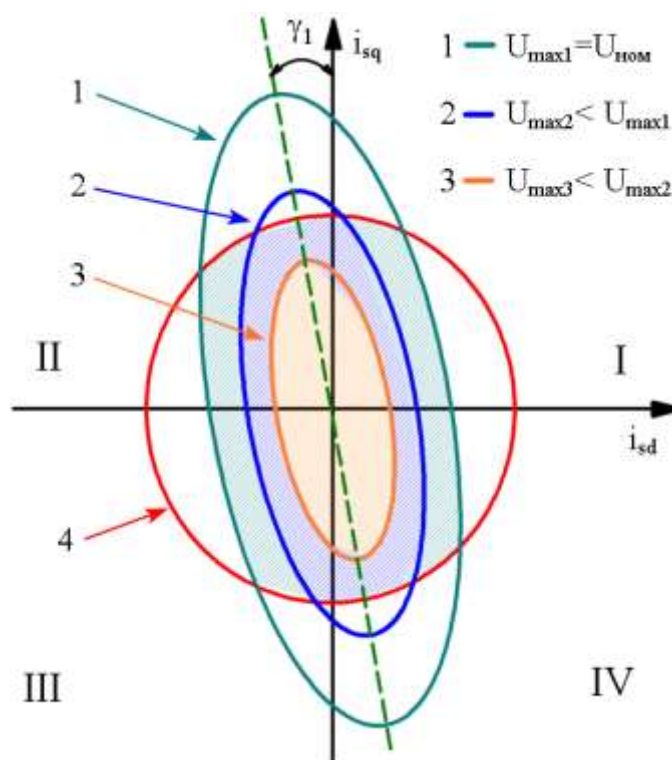


Рисунок 3.11 - Изменение рабочей области электропривода при изменении напряжения основной гармоники фазного напряжения: кривая 1 - $U_{\max 1} = U_{\text{ном}}$; кривая 2 - $U_{\max 2} < U_{\max 1}$; кривая 3 - $U_{\max 3} < U_{\max 2}$; кривая 4 – граница по току

Рисунок 3.11 показывает, что при провалах напряжения в сети область допустимых значений токов уменьшается, угол наклона оси эллипса γ_1 остается неизменным по сравнению с рассмотренным выше случаем влияния частоты тока статора (рисунок 3.10).

Отметим, что в случае наибольшего провала напряжения (кривая 3) точки пересечения границ по току и напряжению отсутствуют. В таком случае рабочая область будет определяться только кривой по напряжению.

На основании полученного представления о характере изменения рабочей области электропривода при векторной системе управления, сформируем основные положения управления приводом в области ослабленного поля для сохранения режимных параметров электропривода.

3.5 Идея построения системы управления в области ослабленного поля для сохранения режимных параметров приводного механизма

Рассмотрим совместно несколько кривых на рисунке 3.12, ограничивающих допустимые области по току (кривая 5) и напряжению (кривые 1,2,3), а также кривую электромагнитного момента (кривая 6) при возникновении провалов напряжения в сети.

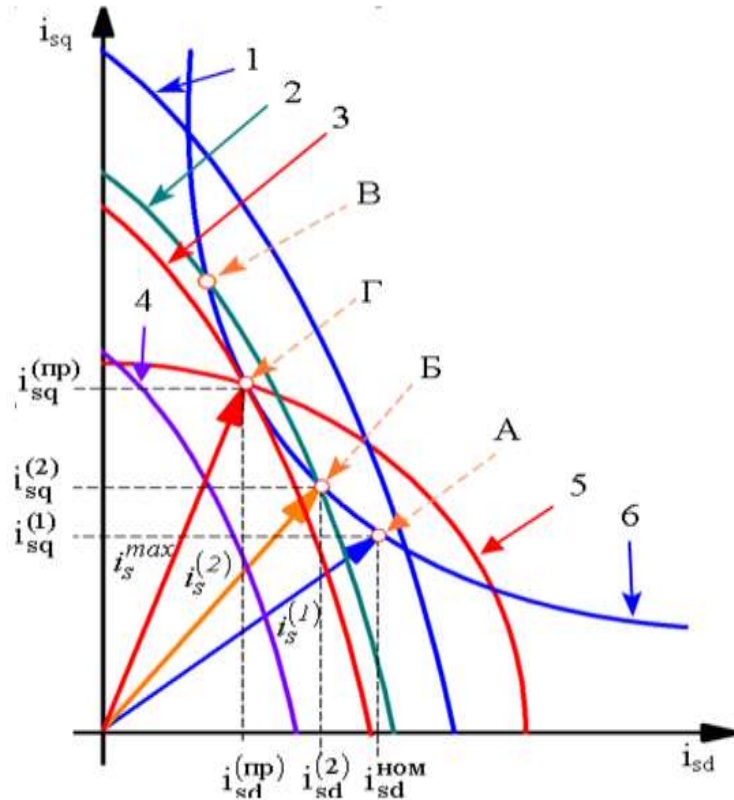


Рисунок 3.12 - Изменение рабочей области электропривода при различных значениях напряжения основной гармоники фазного напряжения: кривая 1 - $U_{\max 1}=U_{\text{ном}}$; кривая 2 - $U_{\max 2}=0,9U_{\text{ном}}$; кривая 3 - $U_{\max 3}=0,85U_{\text{ном}}$; кривая 4 - $U_{\max 4}=0,6U_{\text{ном}}$; кривая 5 - граница по току; кривая 6 - кривая электромагнитного момента

Точка А на кривой 6 является рабочей точкой, которая находится внутри рабочей области электропривода, ограниченной кривой 5 и кривой 1. Кривая 1 границы по напряжению представляет собой отрезок эллипса, построенного для номинального значения напряжения $U_{\max 1}=U_{\text{ном}}$. Нормальному режиму работы соответствует вектор тока статора $\vec{i}_s^{(1)}$, который в системе управления,

реализующей закон постоянства потокосцепления ротора, задан проекциями $i_{sq}^{(1)}, i_{sd}^{ном}$.

Уменьшение напряжения ЗПТ приводит к смещению границы по напряжению (кривая 2), которая соответствует значению максимального напряжения $U_{max2}=0,9U_{ном}$. В результате точка А оказывается вне рабочей области электропривода. При сохранении нормальной структуры управления, обеспечивающей постоянство потокосцепления ротора посредством поддержания постоянства тока $i_{sd}^{ном} = const$, это приведет к уменьшению электромагнитного момента двигателя и, следовательно, к уменьшению скорости вращения.

Для того чтобы сохранить режимные параметры приводного механизма необходимо обеспечить неизменность электромагнитного момента при снижении напряжения. С этой целью необходимо изменить задание по проекциям тока статора i_{sq} и i_{sd} таким образом, чтобы рабочая точка А переместилась по кривой заданного момента в точку Б, которая принадлежит новой рабочей области. Режиму работы привода в точке Б соответствует вектор тока статора $\vec{i}_s^{(2)}$ с проекциями $i_{sq}^{(2)} > i_{sq}^{(1)}$ и $i_{sd}^{(2)} < i_{sd}^{ном}$. Из рассмотренного примера видно, что для того чтобы обеспечить сохранение электромагнитного момента двигателя при снижении напряжения питания необходимо уменьшить значение d-проекции тока статора, что соответствует уменьшению потокосцепления ротора за счет ослабления магнитного потока двигателя.

При дальнейшем уменьшении напряжения питания сохранение режимных параметров приводного механизма возможно в диапазоне, ограниченным сверху точкой Г пересечения кривой электромагнитного момента и дуги окружности, являющейся границей по току, и дуги эллипса, соответствующего в данном примере напряжению $U_{max3}=0,85U_{ном}$. Режим работы привода в точке Г характеризуется максимальным значением модуля вектора тока статора \vec{i}_s^{max} .

В рассматриваемом примере напряжение U_{max3} определяет минимально допустимое снижение напряжения, при котором возможно сохранение режимных

параметров приводного механизма за счет ослабления магнитного потока. При других значениях напряжения $U_{\max} < U_{\max 3}$, например $U_{\max 3} = 0,6U_{\text{ном}}$ (кривая 4), линия электромагнитного момента будет находиться за пределами рабочей области привода, следовательно, сохранение заданного режима работы привода будет невозможным.

Из проведенного анализа следует, что регулирование приводом в режиме ослабленного магнитного поля двигателя при провалах напряжения питания для сохранения режимных параметров приводного механизма заключается в уменьшении задания по d-составляющей тока статора с целью сохранения электромагнитного момента при изменении напряжения звена постоянного тока частотного преобразователя в пределах:

$$U_{\text{dc min}}^{(\text{оп})} \leq U_{\text{dc}} \leq U_{\text{dc}}^{\text{ном}} \quad (3.29)$$

Здесь $U_{\text{dc min}}^{(\text{оп})}$ - минимально допустимое напряжение ЗПТ, при котором имеет место пересечение кривых ограничения по току и напряжению и линии постоянного момента, который необходимо стабилизировать при провалах напряжения в сети.

Для того чтобы построить систему управления приводом в режиме ослабленного поля необходимо получить выражения для координат $i_{\text{sd}}, i_{\text{sq}}$ точек, соответствующих минимально допустимому значению напряжения ЗПТ $U_{\text{dc min}}^{(\text{оп})}$ (точка Г на рисунке 3.12) и точек, в которых возможно обеспечение заданного электромагнитного момента двигателя при изменении напряжения в диапазоне $U_{\text{dc min}}^{(\text{оп})} \leq U_{\text{dc}} \leq U_{\text{dc}}^{\text{ном}}$, которому принадлежит точка Б на рисунке 3.12.

3.6 Область допустимых режимов работы привода при пониженном напряжении питания

В общем случае координаты рабочей точки, соответствующей предельному режиму работы привода с минимально допустимым напряжением находятся из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} i_{sd}^2 + i_{sq}^2 = I_{s \max}^2 \\ A \cdot i_{sd}^2 + B \cdot i_{sd} \cdot i_{sq} + C \cdot i_{sq}^2 = U_{\max}^2 \\ i_{sd} \cdot i_{sq} = c \cdot M \end{cases} \quad (3.30)$$

Здесь коэффициенты A, B, C определяются по формулам (3.22).

Решение системы уравнений, определяющее положение точек предельного режима i_{sd}, i_{sq} на dq -плоскости и, следовательно, значения минимально допустимого напряжения $U_{dc \min}^{(оп)}$, зависит от параметров двигателя, ограничений по току $I_{s \max}$ и напряжению U_{\max} , синхронной частоты ω_s . Рассмотрим три наиболее характерных случаев существования предельных режимов привода, соответствующих разным решениям системы уравнений (3.30). В общем случае эти решения приведены в приложении Б.

Ниже рассматривается случай, когда сопротивлением обмотки статора можно пренебречь. Это позволяет найти решение в относительно простом для анализа виде, которое сохраняет все особенности выбора рабочего режима привода в области ослабленного поля. При численном анализе используется точное решение с учетом сопротивления R_s .

В случае пренебрежимо малого значения сопротивления статора уравнение границы режима по напряжению (2.22) принимает вид:

$$\frac{i_{sq}^2}{a_1^2} + \frac{i_{sd}^2}{b_1^2} = U_{\max}^2 \quad (3.31)$$

$$a_1 = \frac{1}{\omega_s L_s \sigma} = \frac{1}{\sqrt{C_0}}; \quad b_1 = \frac{1}{\omega_s L_s} = \frac{1}{\sqrt{A_0}}$$

Здесь C_0, A_0 – коэффициенты C, A (3.22) при нулевом значении сопротивления статорной обмотки $R_s = 0$.

Запишем каноническую форму уравнения эллипса для случая $R_s = 0$

$$\frac{i_{sq}^2}{a_0^2} + \frac{i_{sd}^2}{b_0^2} = 1; \quad a_0 = U_m a_1, \quad b_0 = U_m b_1,$$

где a_0, b_0 – большая и малая полуоси эллипса вдоль осей q, d , соответственно.

3.6.1 Классификация предельных режимов привода в области ослабленного поля. Характеристическая кривая электромагнитного момента

Для распознавания предельных режимов, определяющих тот или иной алгоритм работы САУ по обеспечению режимных параметров приводного механизма при провалах напряжения, необходимо выделить особенности этих режимов, которые определяются взаимным расположением кривых, ограничивающих область рабочих токов.

Введем понятие характеристической кривой электромагнитного момента, под которой будем понимать гиперболу постоянного момента $M_{хар}$ в координатах i_{sd}, i_{sq} , которая касается эллипса максимального напряжения в точке его пересечения с окружностью максимального тока (рисунок 3.13).

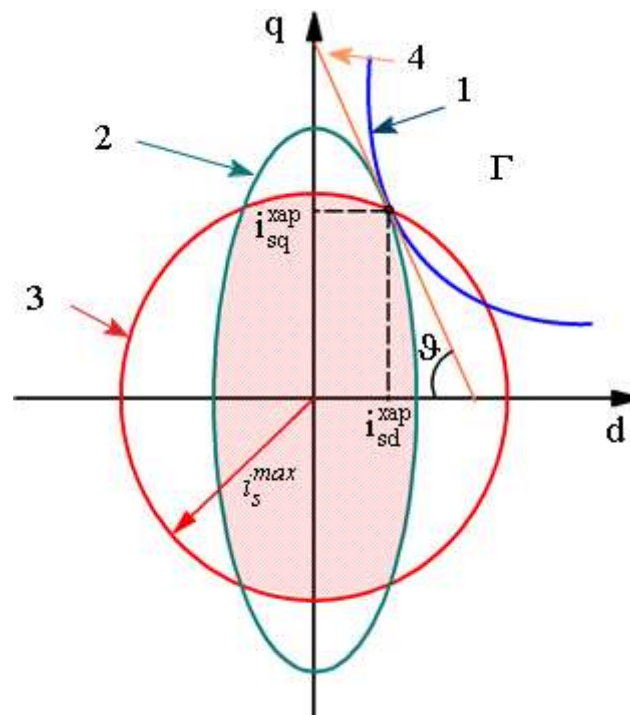


Рисунок 3.13 - Предельный режим работы электропривода при минимально допустимом напряжении ЗПТ $U_{dmin}^{(хар)}$: 1 – характеристическая кривая электромагнитного $M_e = M_{хар}$; 2- кривая границы по напряжению $U_{max} = U_{min}^{(хар)}$; 3 – граница по току; 4 – касательная к эллипсу напряжения в точке Γ ; Γ – рабочая точка в предельном режиме

Режим привода в точке Γ с координатами $i_{sd}^{(xap)}$, $i_{sq}^{(xap)}$ называется предельным режимом с характеристическим моментом M_{xap} . Напряжение, соответствующее эллипсу, которому принадлежит критическая точка Γ , называется минимально допустимым напряжением или характеристическим $U_{dc\ min}^{(xap)}$

Найдем координаты точки предельного режима и параметры кривых как решение системы уравнений (3.30), в которой второе уравнение заменено на уравнение (3.31):

$$\begin{cases} i_{sq} = \sqrt{I_{s\ max}^2 - i_{sd}^2} \\ i_{sq} = a_1 \sqrt{U_{max}^2 - \frac{i_{sd}^2}{b_1^2}} \\ i_{sq} = \frac{c \cdot M_{xap}}{i_{sd}} \end{cases} \quad (3.32)$$

Координаты критической точки Γ $i_{sd}^{(np)} = i_{sd}^{(xap)}$, $i_{sq}^{(np)} = i_{sq}^{(xap)}$ на рисунке 3.11 найдем из 2-ого и 3-его уравнения, на которые налагаются условия совпадения функций и их производных к эллипсу и гиперболе в этой точке:

$$\begin{cases} \frac{c \cdot M_{xap}}{i_{sd}^{(xap)}} = a_1 \sqrt{U_{max}^2 - \frac{i_{sd}^{2(xap)}}{b_1^2}} \\ \frac{c \cdot M_{xap}}{i_{sd}^{2(xap)}} = \frac{a_1 \cdot i_{sd}^{(xap)}}{b_1^2 \sqrt{U_{max}^2 - \frac{i_{sd}^{2(xap)}}{b_1^2}}} \end{cases} \quad (3.33)$$

Используя решение системы относительно проекции $i_{sd}^{(xap)}$ и 3-е уравнение системы (2.32) получим искомые координаты критической точки Γ :

$$i_{sd}^{(xap)} = \sqrt{\frac{c \cdot M_{xap} \cdot b_1}{a_1}} ; i_{sq}^{(xap)} = \sqrt{\frac{c \cdot M_{xap} \cdot a_1}{b_1}} \quad (3.34)$$

По найденным координатам и выражению 1 системы (3.32) получим формулу для вычисления характеристического момента:

$$M_{\text{хар}} = \frac{a_1 \cdot b_1 \cdot I_{s \max}^2}{c \cdot (a_1^2 + b_1^2)}, \quad c = \frac{1}{1.5z_p (L_m^2 / L_r)} \quad (3.35)$$

После подстановки выражений для параметров c, a_1, b_1 в формулу (3.35) запишем характеристический момент в другом виде:

$$M_{\text{хар}} = K_M I_{s \max}^2, \quad K_M = 1.5z_p \frac{L_m^2}{L_r} \frac{\sigma}{1 + \sigma^2} \quad (3.36)$$

Из формулы (3.36) следует, что значение характеристического предельного момента пропорционально квадрату тока статора. Коэффициент пропорциональности является функцией параметров АД.

Из 2-ого уравнения системы (3.32) находим значение амплитуды основной гармоники фазного напряжения, при котором можно сохранить электромагнитный момент двигателя неизменным при управлении приводом в режиме ослабленного поля:

$$U_{\min}^{(\text{хар})} = \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot M_{\text{хар}}}{b_1 \cdot a_1}} \quad (3.37)$$

Рассмотрим применение полученных выше формул для получения характеристик предельного режима привода в критической точке для асинхронного привода с параметрами:

$P_{\text{ном}}=37\text{кВт}$, $U_{\text{ном}}=380\text{ В}$, $\Omega_0=428,6\text{ об/мин}$, $s=0.026$, $R_s=0.084\text{ Ом}$, $L_{s\sigma}=0.0009\text{ Гн}$, $R_r'=0,0564\text{ Ом}$, $L_{r\sigma}'=0.0011\text{ Гн}$, $L_m=0.0109\text{ Гн}$, $Z_p=7$; $M_{\text{ном}}=850\text{Нм}$, $I_{\text{ном}}=140\text{А}$, $\omega_s^{\text{НОМ}} = 314\text{рад/с}$; $U_{\text{dc}}^{\text{НОМ}} = 537\text{В}$.

Таблица 3.1 - Параметры предельного режима при номинальной нагрузке

$i_{sd}^{\text{хар}}$, А	$i_{sq}^{\text{хар}}$, А	$M_{\text{хар}}$, Нм	$U_{\min}^{(\text{хар})}$, В	$U_{\text{dc min}}^{(\text{хар})}$, В
20.7	148.6	366	125	250

Результаты расчета кривых второго порядка, формирующих область допустимых токов при заданных ограничениях, показаны на рисунке 3.14.

Результаты расчета показывают, что при работе рассматриваемого электродвигателя с моментом $M_{\text{хар}}=366\text{Нм}=0.42M_{\text{ном}}$ при номинальной частоте

тока статора допустимо снижение среднего значения напряжения звена постоянного тока до значения $U_{dc\ min}^{(хар)} = 250\text{В} = 0.44U_{dc}^{НОМ}$ без изменения электромагнитного момента, если управление приводом будет осуществляться по принципу ослабления магнитного поля двигателя.

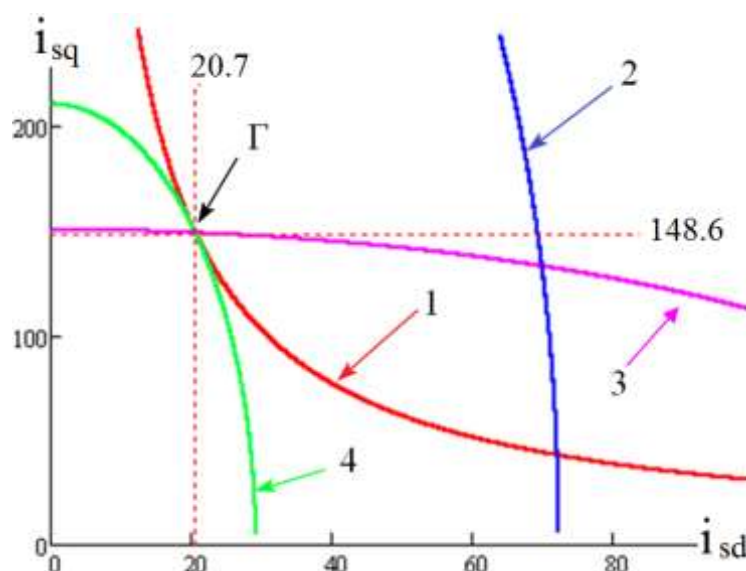


Рисунок 3.14 - Получение критической точки предельного режима: 1- характеристическая кривая электромагнитного момента при $M_{хар} = \text{const}$; 2 – кривая границы по напряжению $U_{max}^{НОМ} = \text{const}$, 3 – кривая границы по току $I_{max} = \text{const}$; 4 – кривая минимально допустимого напряжения ЗПТ $U_{dc\ min}^{(хар)} = \text{const}$; Г – критическая рабочая точка предельного режима работы

3.6.2 Определение координат предельного режима работы привода при условии, что момент приводного механизма превышает характеристическое значение электромагнитного момента в критической точке

Если при возникновении провала напряжения момент сопротивления приводного механизма $M_c = M_{e1}$ превышает значение предельного электромагнитного момента характеристической кривой $M_{e1} > M_{хар}$, то рабочая точка предельного режима работы привода находится на пересечении кривой электромагнитного момента $M_e = \text{const}$ и границ по току $I_{max} = \text{const}$ и напряжению $U_{max} = \text{const}$.

В этом случае гипербола постоянного момента формально имеет по две точки пересечения с эллипсом напряжения и окружностью тока. Сначала найдем точки пересечения кривой постоянного момента заданного значения и кривой максимального тока из 1-ого и 3-его уравнения системы (3.32), приравняв их правые части:

$$\frac{c \cdot M}{i_{sd}} = \sqrt{I_{s \max}^2 - i_{sd}^2} \quad (3.38)$$

Из четырех корней выбирается корень, который дает точку наиболее близко расположенную к характеристической кривой электромагнитного момента. После преобразований получим искомое решение:

$$i_{sdl}^{(np)} = \sqrt{\frac{I_{s \max}^2 - \sqrt{I_{s \max}^4 - 4(c \cdot M)^2}}{2}}; \quad i_{sq1}^{(np)} = \sqrt{\frac{I_{s \max}^2 + \sqrt{I_{s \max}^4 - 4(c \cdot M)^2}}{2}} \quad (3.39)$$

Используя найденные координаты во 2-ом уравнении системы (2.32) определим минимальное значение напряжения, при котором через указанную точку пройдет граница по напряжению

$$U_{\min}^{(on1)} = \frac{\sqrt{(a_1^2 + b_1^2) I_{s \max}^2 + (b_1^2 - a_1^2) \sqrt{I_{s \max}^4 - 4(c \cdot M)^2}}}{\sqrt{2} \cdot a_1 \cdot b_1} \quad (3.40)$$

Соответственно минимальное напряжение звена постоянного тока для случая $M_{e1} > M_{\text{хар}}$ равно $U_{dc \min}^{(on1)} = 2U_{\min}^{(on1)}$

На рисунке 3.15 представлены кривые предельного режима работы привода, параметры которого приведены в разделе 3.6.1. Момент сопротивления приводного механизма меньше номинального значения $M_{e1} = 600 \text{ Нм} = 0.7M_{\text{ном}}$ и больше характеристического значения $M_{e1} = 1.64M_{\text{хар}}$. Как видно из рисунка 3.15 рабочей точкой в предельном режиме является точка Г.

Напряжение, при котором кривая 3 проходит через точку Г является минимально-допустимым напряжением.

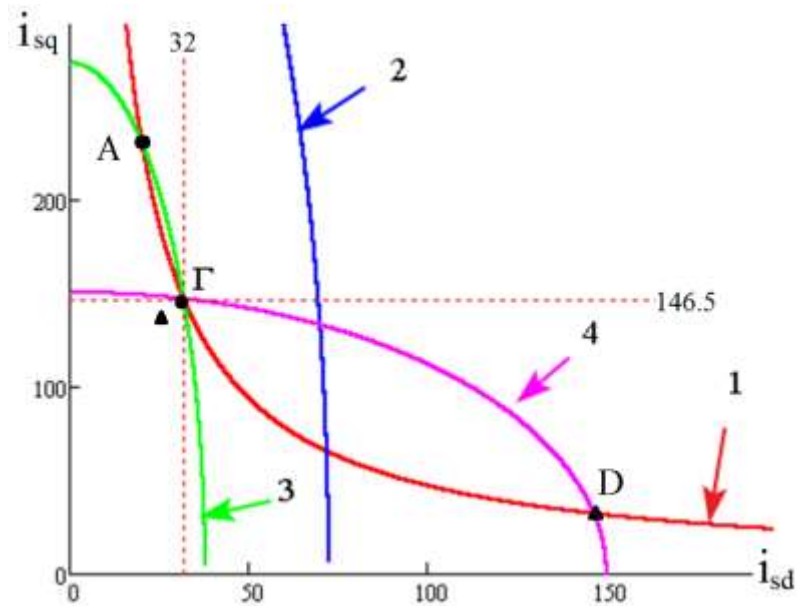


Рисунок 3.15 - Определение предельного режима привода при моменте сопротивления $M_{e1} = 0.7M_{ном} = 1.64M_{хар}$ (кривая 1), границе по напряжению при $U_{min}^{(оп1)} = 0.26U_{ном}$; границе по току (кривая 4); Г – рабочая точка предельного режима работы, 2 – кривая максимального напряжения в номинальном режиме

3.6.3 Определение координат предельного режима работы привода при условии, что момент приводного механизма меньше характеристического значения электромагнитного момента в критической точке

Если значение момента сопротивления приводного механизма и соответствующего электромагнитного момента двигателя $M_c = M_{e2}$ меньше значения характеристического момента $M_{e1} < M_{хар}$, предельным режимом работы будет такой режим, в котором рабочая точка является точкой касания кривой границы по напряжению и кривой электромагнитного момента. При этом эта точка находится внутри окружности, образованной границей по току и не принадлежит кривой границы по току (рисунок 3.16).

Для рассматриваемого электродвигателя ВАСО-37-14 с номинальным моментом $M_{ном} = 842 \text{ Нм}$, границей по току $I_{s,max} = 150 \text{ А}$ и характеристическим моментом $M_{хар} = 366 \text{ Нм}$ такой случай может возникнуть при любом значении электромагнитного момента $M_{e2} < 366 \text{ Нм}$.

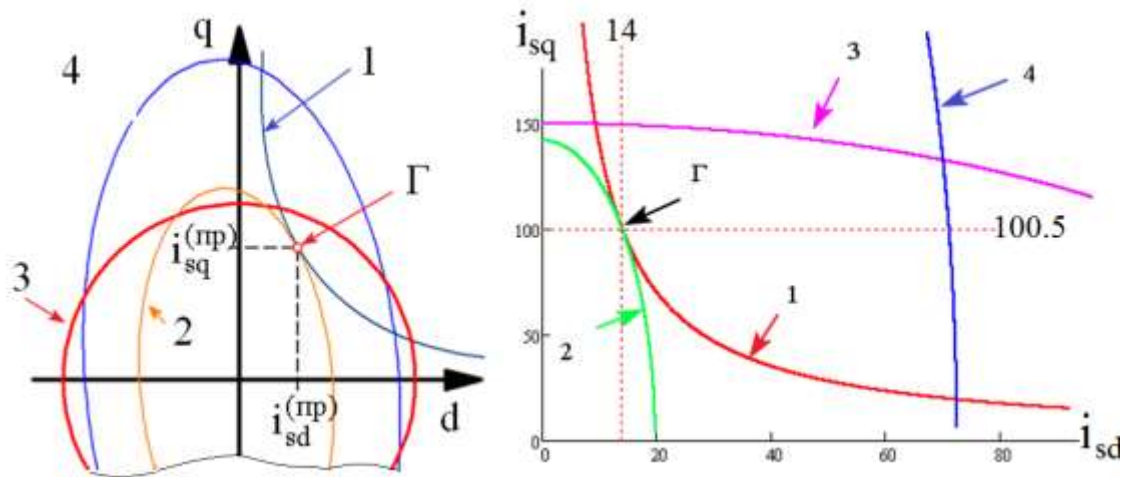


Рисунок 3.16 - Предельный режим работы электропривода при $M_e < M_{хар}$ 1 –кривая электромагнитного $M_e = const$; 2- кривая границы по напряжению $U_{max} = const$; 3 – граница по току; 4 – граница по напряжению в номинальном режиме ЗПТ, Γ – рабочая точка в предельном режиме

Координаты рабочей точки и граничное значение напряжения вычисляется по формулам, полученным в разделе 3.6.1. Отличие состоит в том, что в рассматриваемом случае электромагнитный момент задан, а случае раздела 3.6.1. этот момент нужно было определить.

$$i_{sd2}^{(np)} = \sqrt{\frac{c \cdot M \cdot b_1}{a_1}}; i_{sq2}^{(np)} = \sqrt{\frac{c \cdot M \cdot a_1}{b_1}} \quad (3.41)$$

$$U_{min}^{(оп2)} = \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot M}{b_1 \cdot a_1}}, \quad M < M_{хар} \quad (3.42)$$

На рисунке 3.16 представлены кривые, рассчитанные для параметров рассматриваемого электродвигателя при заданном электромагнитном моменте $M_e=150\text{Нм}$.

Анализ результатов теоретического анализа показывает, что при использовании в системе управления режима ослабленного поля значение минимально-допустимого напряжения звена постоянного тока по условию сохранения режимных параметров приводного механизма зависит от значения заданного электромагнитного момента. На значение минимально-допустимого напряжения оказывает влияние значение характеристического электромагнитного

момента, которое определяется максимально-допустимым значением тока статора. В зависимости от значений предельного и заданного электромагнитного момента могут существовать три различных случая, от которых зависит выбор уравнения для нахождения минимально-допустимого напряжения звена постоянного тока.

3.7 Влияние режимных параметров привода и параметров АД на минимально допустимое напряжение ЗПТ

3.7.1 Влияние максимально допустимого значения тока статора и синхронной частоты

Рассмотрим зависимость минимального напряжения звена постоянного тока от момента сопротивления механизма, который необходимо обеспечить при провалах напряжения. Расчет зависимостей произведем для параметров двигателя ВАСО–37-14. Для удобства представим результаты расчета в относительных единицах при базовом напряжении ЗПТ частотного преобразователя $U_{dc}^{HOM} = 537V$. Формулы имеют разный вид в зависимости от соотношения между характеристическим значением и текущим значением электромагнитного момента:

$$U_{dc \min}^{(оп2)}(M) = \frac{2}{U_{dc}^{HOM}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot M}{b_1 \cdot a_1}}, \quad M < M_{хар} \quad (3.43)$$

$$U_{dc \min}^{(оп1)}(M) = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{(a_1^2 + b_1^2) I_{s \max}^2 + (b_1^2 - a_1^2) \sqrt{I_{s \max}^4 - 4(c \cdot M)^2}}}{a_1 \cdot b_1 \cdot U_{dc}^{HOM}}, \quad M > M_{хар} \quad (3.44)$$

Коэффициенты и свободные члены этих уравнений являются функциями максимально допустимого значения тока статора $I_{s \max}$, синхронной частоты ω_s , активной составляющей сопротивления статорной обмотки R_s , индуктивностей L_s, L_r, L_m и коэффициента рассеивания σ . График зависимости $U_{dc \min}(M)$ при частоте $\omega_s = 100\pi$ и максимальном токе статора $I_{s \max} = 150A$ представлен на рисунке 3.17.

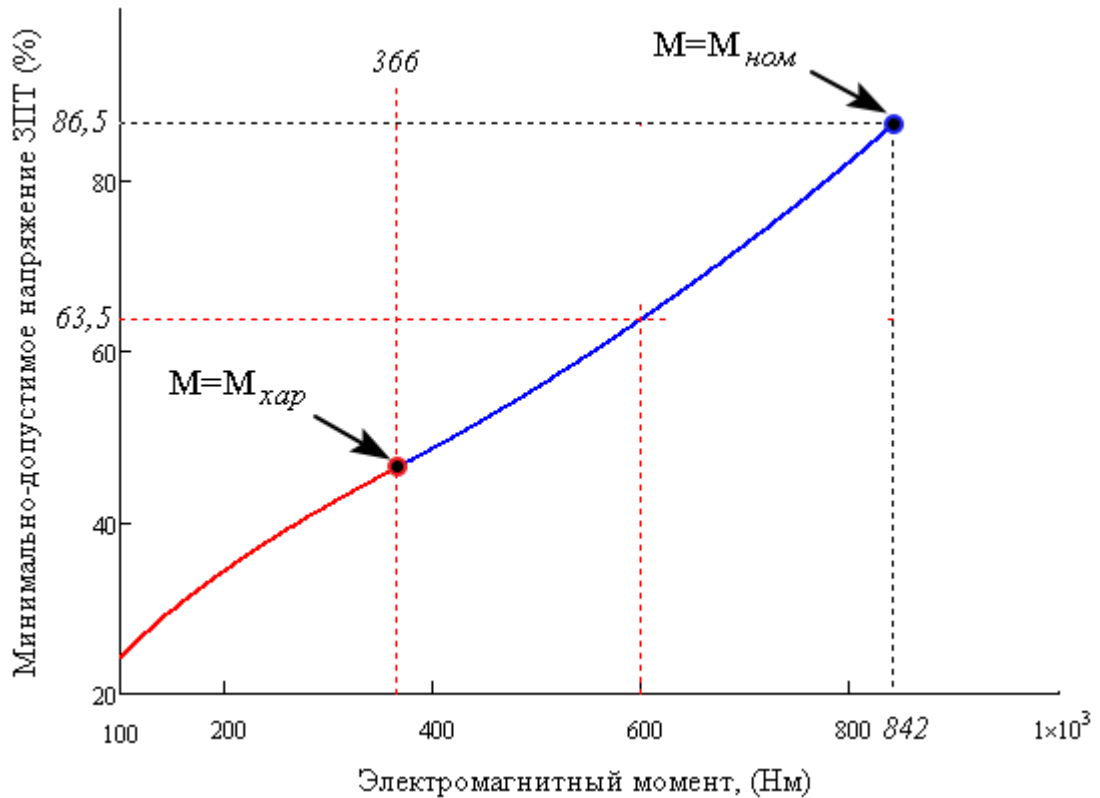


Рисунок 3.17 - Зависимость минимально-допустимого напряжения звена постоянного тока от электромагнитного момента

В полученной кривой можно выделить два участка, которые описываются формулами (2.43), (2.44) и сопрягаются в точке перегиба $M = M_{хар}$.

Зависимость $U_{dc\ min} = f_U(M)$, которая отражает способность привода сохранять режимные параметры приводного механизма, в определенном смысле может рассматриваться как аналог кривой устойчивости привода $U_{dc\ min} = f_U(T)$, которая определяет возможность функционирования или отключения привода при провале напряжения.

Влияние частоты тока статора и значения максимального тока статора на зависимость минимального напряжения от электромагнитного момента показано на рисунке 3.18, на котором представлены зависимости $U_{dc\ min} = f_U(M)$ при различных значениях ω_s и $I_{s\ max}$.

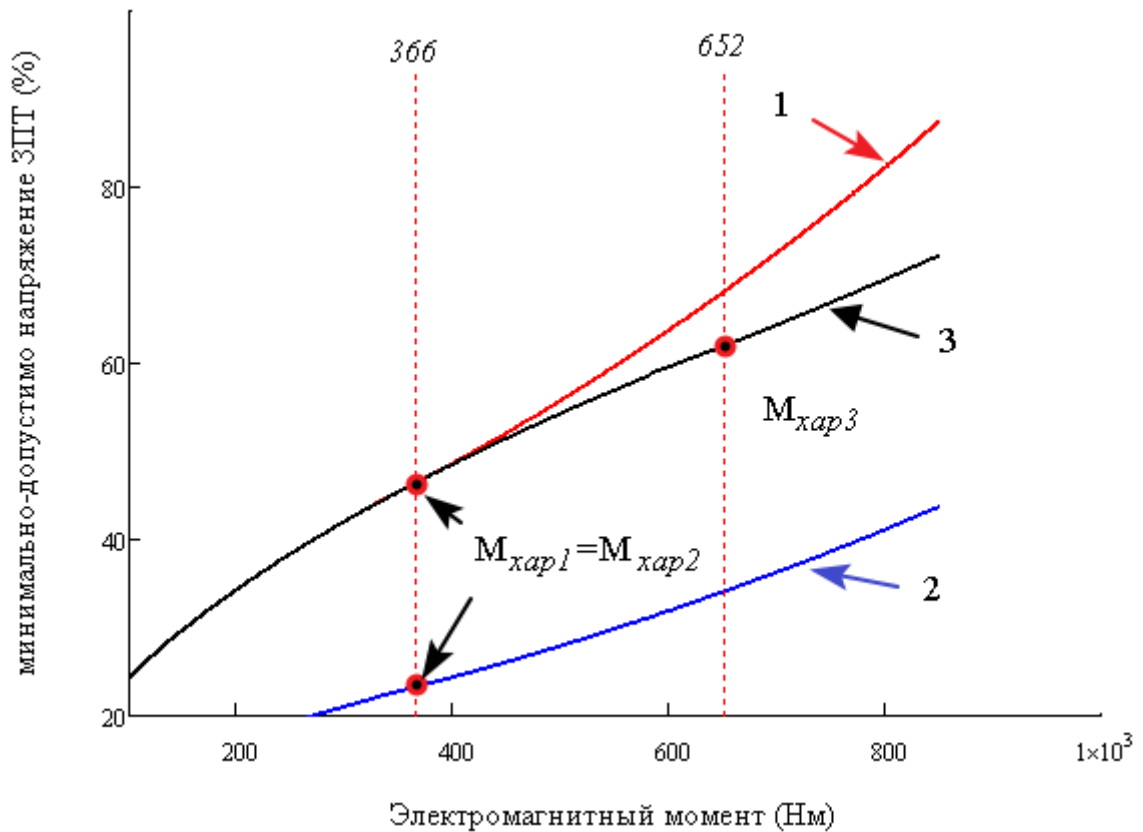


Рисунок 3.18 - Зависимость минимально допустимого напряжения ЗПТ от требуемого электромагнитного момента: кривая 1 – $\omega_{s1}=314\text{рад/с}$ и $I_{s\text{max}1}=150\text{А}$; кривая 2 – $\omega_{s2}=157\text{рад/с}$ и $I_{s\text{max}2}=150\text{А}$; кривая 3 – $\omega_{s3}=314\text{рад/с}$ и $I_{s\text{max}3}=200\text{А}$

Влияние рассматриваемых величин на характер зависимости $U_{\text{dc min}} = f_U(M)$ видно из сопоставления кривой 1 ($\omega_s = 100\pi$, $I_{s\text{max}} = 150$) с кривыми 2 ($\omega_s = 50\pi$, $I_{s\text{max}} = 150$) и 3 ($\omega_s = 100\pi$, $I_{s\text{max}} = 200$).

Из сравнения кривых 1 и 2 видно, что при уменьшении частоты тока статора $\omega_{s2} = 0.5\omega_{s1}$ кривая $U_{\text{dc min}1} = f_U(M)$ смещается вниз. Из полученной кривой $U_{\text{dc min}1} = f_U(M)$ следует, что при снижении частоты ω_s требуемый момент сопротивления обеспечивается приводом при более глубоких провалах напряжения, чем при работе привода с номинальной частотой. Отметим, что при изменении частоты тока статора значение характеристического момента остается неизменным: $M_{\text{хар}1} = M_{\text{хар}2}$.

При увеличении максимально допустимого тока статора (кривая 3) на 33% при неизменной синхронной частоте $\omega_{s3} = \omega_{s1}$ заметно увеличивается характеристический момент, примерно на 78% , в соответствии с формулой

$$M_{\text{хар}} = K_M I_{s \text{ max}}^2, \quad K_M = 1.5z_p \frac{L_m^2}{L_r} \frac{\sigma}{1 + \sigma^2}$$

Увеличение максимально допустимого тока статора за счет роста пропускной способности ключей инвертора позволяет обеспечить требуемый момент сопротивления приводного механизма при более глубоких провалах напряжения.

3.7.2 Влияние активного сопротивления статорной обмотки на точность определения предельных режимов

При расчете координат точки предельного режима работы и точного значения минимально-допустимого режима работы на низких частотах питающего напряжения необходимо учитывать активное сопротивление обмоток статора. Получение точных формул расчета по аналогии с ранее рассмотренными формулами приведено в приложении Б. Влияние сопротивления проявляется в основном в появлении угла наклона большой полуоси эллипса γ относительно оси q (рисунок 3.11).

На рисунке 3.19 показаны зависимости $U_{dc \text{ min}} = f_U(M)$ для двух значений синхронной частоты 50 и 25 Гц без учета и с учетом сопротивления R_s , полученные в результате расчета по соответствующим формулам раздела приложения Б . Из графиков видно, что пренебрежение сопротивлением R_s дает заниженное значение напряжения $U_{dc \text{ min}}$ по сравнению со случаем $R_s \neq 0$. Отличие в расчетах составляет 5-10% в зависимости от значения синхронной частоты. В связи с этим, пренебрежение сопротивлением R_s для упрощения аналитических выражений при анализе особенностей зон работы привода в области ослабленного поля можно считать правомерным. При построении САУ

приводом следует использовать точные формулы расчета либо итерационные методы.

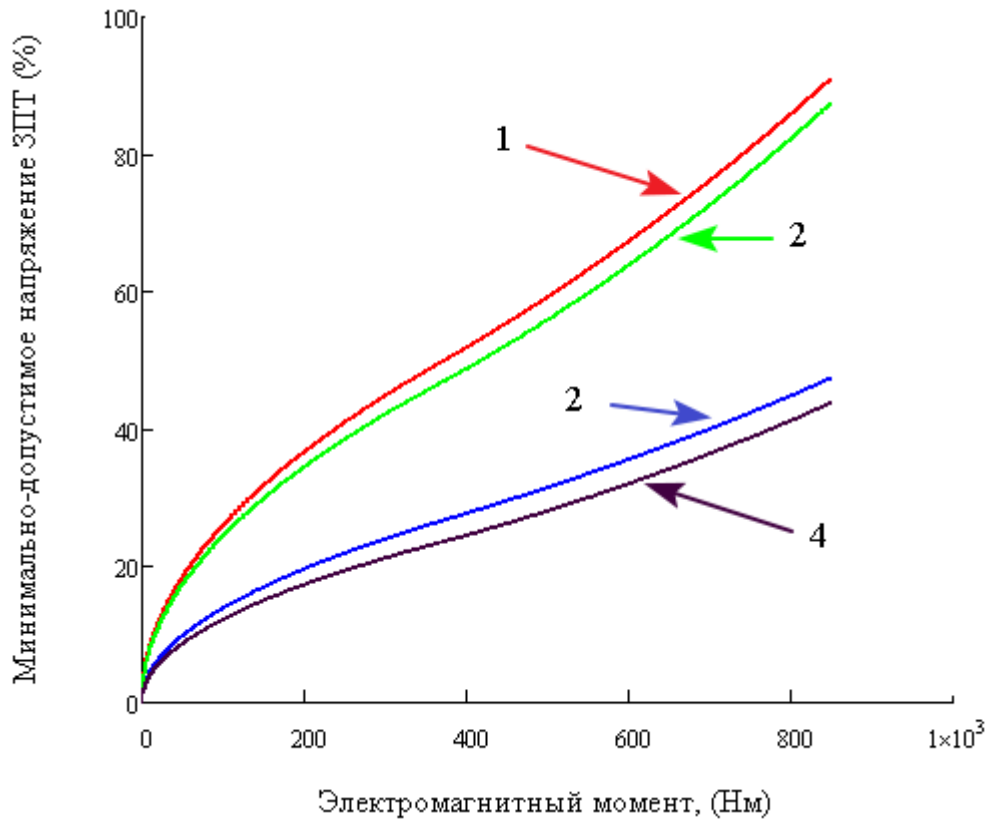


Рисунок 3.19 - Зависимость минимально допустимого напряжения звена постоянного тока от электромагнитного момента двигателя. Кривая 1 – $R_s \neq 0$, $\omega_s = 314$ рад/с; кривая 2 – $R_s = 0$, $\omega_s = 314$ рад/с; кривая 3 – $R_s \neq 0$, $\omega_s = 157$ рад/с; кривая 4 – $R_s = 0$, $\omega_s = 157$ рад/с

3.8 Влияние типа механической характеристики приводного механизма на минимально допустимое напряжение ЗПТ

3.8.1 Механизмы с вентиляторной характеристикой

Рассмотрим влияние параметров режима работы привода $\omega, M_c(\omega)$ на минимально допустимое значение напряжение ЗПТ $U_{dc \min}(\omega_s, M_e, I_{s \max})$, при котором еще обеспечивается стационарный режим $M_c = M_e$.

Влияние обусловлено тем, что при изменении скорости вращения вала двигателя $\omega = \text{var}$ изменяется и момент сопротивления приводного механизма $M_c(\omega)$, следовательно, характеристики режима работы АД, в частности частота

основной гармонике напряжения статора ω_s , которая, как видно из рисунка 3.16, заметно влияет на вид кривой $U_{dc\min}(M_e)$.

Построим зависимости предельно минимального напряжения ЗПТ от скорости вращения ротора, используя формулы (2.43), (2.44) в которых учтем зависимость момента сопротивления от скорости вращения ротора $M_c(\omega)$, связь между скоростью вращения ротора и синхронной частотой в предельном режиме:

$$\omega_s = \omega z_p + \frac{1}{T_r} \frac{i_{sq}^{pp}}{i_{sq}^{pp}} \quad (3.45)$$

На рисунке 3.20 представлена зависимость минимально-допустимого напряжения звена постоянного тока в зависимости от частоты вращения вала двигателя для приводного механизма с вентиляторной характеристикой

$$M_c(\omega) = M_{nom} (\omega/\omega_{nom})^2$$

Кривая $U_{dc\min}(\omega)$ состоит из двух участков 1 и 2, которые соответствуют разным участкам кривых $U_{dc\min}(M)$, разделенных точкой перегиба, которая определяется характеристическим моментом $M_{хар}$.

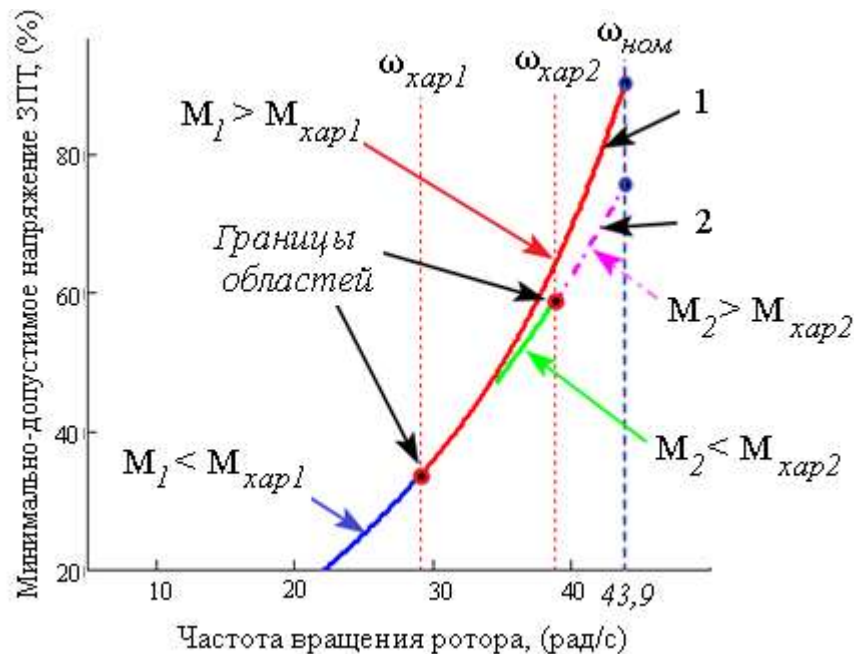


Рисунок 3.20 - Зависимость минимально-допустимого напряжения звена постоянного тока от частоты вращения вала двигателя с вентиляторной нагрузкой при $I_{smax}=150A$ – кривая 1;
 $I_{smax}=200A$ – кривая 2

Характеристическому моменту соответствует частота вращения ротора, определяемая по формуле:

$$\omega_{\text{хар}} = \omega_{\text{ном}} \sqrt{\frac{M_{\text{хар}}}{M_{\text{ном}}}} \quad (3.46)$$

3.8.2 Механизмы с постоянным моментом

Особенностью определения минимально допустимого напряжения звена постоянного тока в зависимости от частоты вращения вала механизма, момент сопротивления которого не зависит от частоты вращения $M_c(\omega) = M_{c0} = \text{const}$ и не изменяется в процессе работы, является то, что зависимость $U_{\text{dc min}}(\omega)$ будет определяться только одним из уравнений (3.43) или (3.44). Выбор уравнения в этом случае будет зависеть от соотношения между моментом сопротивления M_{c0} и характеристическим моментом: $M_{c0} > M_{\text{хар}}$ или $M_{c0} < M_{\text{хар}}$. Зависимости $U_{\text{dc min}}(\omega)$ для двух возможных случаев представлены на рисунке 3.21.

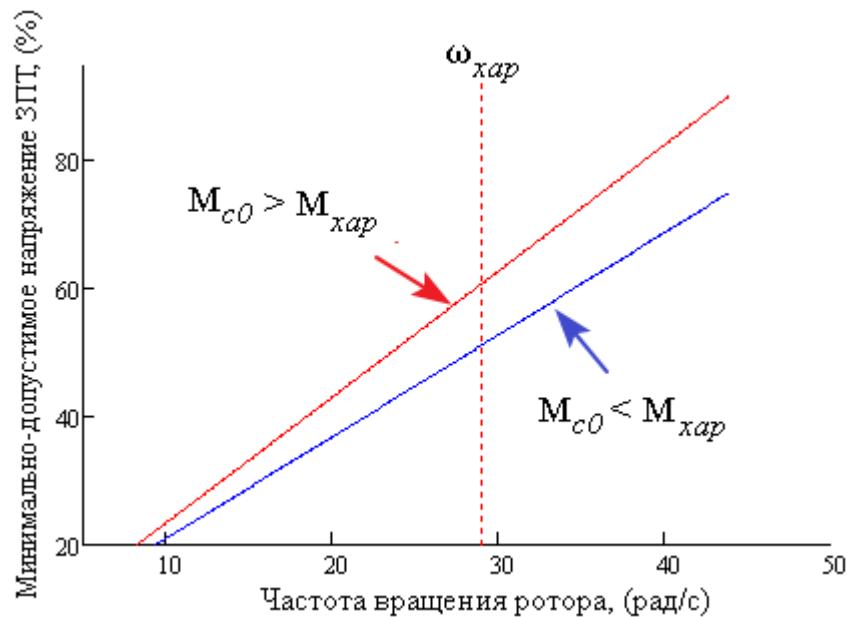


Рисунок 3.21 - Зависимость минимально-допустимого напряжения звена постоянного тока от частоты вращения вала двигателя при нагрузке с постоянным моментом сопротивления

На основании теоретического анализа режимов работы электропривода сформируем алгоритм системы управления приводом в зоне ослабленного поля при провалах напряжения в сети.

3.9 Выводы по главе

1. На основании уравнений АД относительно обобщенных векторов и их проекций на оси различных систем координат приведены основные соотношения между координатами привода в операторном виде. Для обоснования законов управления используются выражения для установившегося режима.

2. Выполнен анализ системы уравнений, описывающих dq – рабочую область привода. На границе этой области проекции вектора тока i_{sd}, i_{sq} связаны между собой гиперболой постоянного электромагнитного момента, окружностью максимального тока и эллипсом максимальной амплитуды первой гармоники напряжения статора, которая однозначно связана с напряжением звена постоянного тока.

3. Показано, что параметры эллипса - большая и малая полуоси a, b и угол наклона γ относительно оси q- являются функциями напряжения, синхронной частоты и параметров расчетной схемы АД в установившемся режиме. Установлено, что при уменьшении синхронной частоты область ограничения по напряжению расширяется, а при снижении напряжения ЗПТ эта область сужается.

4. Введено понятие предельного характеристического режима в точке с координатами $i_{sd}^{(хар)}, i_{sq}^{(хар)}$, которая совпадает с точкой касания гиперболы характеристического момента $M_{хар} = const$ с эллипсом напряжения $U_{dc\ min}^{(оп)}$ при условии, что кривая $I_{s\ max} = const$ пересекает эти кривые в точке их касания. Показано, что величина $M_{хар}$ пропорциональна квадрату максимального тока. Относительно предельного характеристического выделены два предельных режима 1 и 2, определяемых по критериям $M_{c1} < M_{хар}$ или $M_{c2} > M_{хар}$. Для каждого из режимов получены выражения для проекций тока i_{sd}, i_{sq} , предельных напряжений ЗПТ $U_{dc\ min}^{(оп1)}$ и $U_{dc\ min}^{(оп2)}$. Предложенная классификация режимов

является основой для разработки алгоритмов управления приводом в зоне ослабленного поля.

5. Выявлено влияние синхронной частоты и максимального значения тока статора на зависимость минимально допустимого значения звена DC от электромагнитного момента, который необходимо создать, чтобы сохранить режим приводного механизма. Показано, что синхронная частота не влияет на значение характеристического момента, в то время как увеличение максимального тока приводит к его росту, смещая границу раздела области 1 ($M_{c1} < M_{хар}$) и области 2 ($M_{c2} > M_{хар}$).

6. Выявлено влияние вида и параметров механической характеристики приводного механизма на зависимость минимально допустимого напряжения ЗПТ от скорости вращения ротора. Эта зависимость носит квадратичный характер для механической характеристики вентиляторного типа и линейный характер для приводных механизмов с постоянным моментом.

7. Выявленные особенности формирования рабочих областей привода при провалах напряжения и закономерности их изменения при варьировании скорости вращения ротора и момента сопротивления приводного механизма являются основой для разработки алгоритмов управления ЧРП в зоне ослабленного поля из условия сохранения режима приводного механизма при пониженном напряжении.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЧРП В РЕЖИМЕ ОСЛАБЛЕННОГО ПОЛЯ ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ С ЦЕЛЬЮ СОХРАНЕНИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ПРИВОДНОГО МЕХАНИЗМА

4.1 Введение

Результаты проведенных теоретически исследований показывают, что допустимое снижение напряжения звена постоянного тока зависит от режимных параметров работы привода в установившемся режиме таких как, электромагнитный момент и частота вращения ротора, а также от ограничений по пропускной способности инвертора. На основании проведенных исследований получена зависимость минимально допустимого напряжения от частоты вращения ротора двигателя. Эта зависимость позволяет определить границы диапазона изменения напряжения звена постоянного тока, в котором возможно обеспечение заданного электромагнитного момента двигателя, которое определяется режимом приводного механизма до провала напряжения.

Целью данного раздела является разработка алгоритма управления приводом в режиме ослабленного поля при изменении напряжения звена постоянного тока в диапазоне $U_{dc\min}^{(op)} \leq U_{dc} \leq U_{dc}^{nom}$. Блок, отвечающий за работу САУ привода в режимах ослабленного поля (рисунок 4.1), вырабатывает задание по потокосцеплению ротора и ограничивает задание по моменту двигателя для соблюдения границ по напряжению и току.

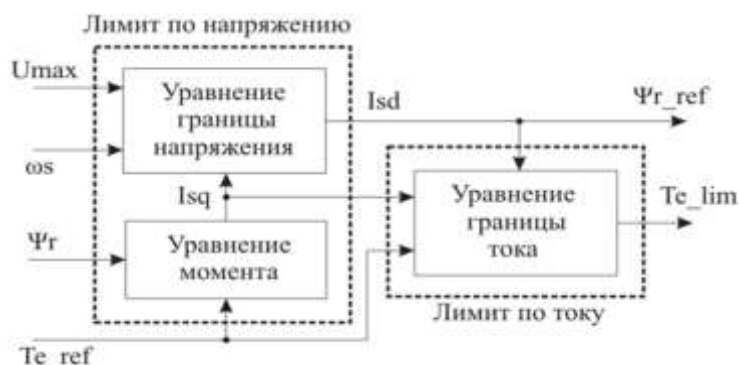


Рисунок 4.1 - Блок САУ ЧРП, отвечающий за работу привода в зоне ослабленного поля

В этом диапазоне изменения напряжений $U_{dc \min}^{(оп)} \leq U_{dc} \leq U_{dc}^{НОМ}$ существует ограниченное число рабочих точек на кривой электромагнитного момента $M_e = \text{const}$, которым соответствуют различные положения вектора тока статора в dq- системе координат. Если вследствие провала напряжения рабочая точка привода оказывается вне рабочей области, тогда для сохранения заданного электромагнитного момента $M_e = M_c$ необходимо изменить положение вектора тока статора так, чтобы его проекции i_{sd}, i_{sq} стали координатами точки, принадлежащей кривой заданного электромагнитного момента и лежащей в рабочей области, ограниченной кривыми по току и напряжению.

При работе в режиме ослабленного поля, также как и в нормальном режиме работы, необходимо обеспечить наиболее оптимальные условия работы привода, например за счет минимизации тока статора. Минимум тока статора в режиме ослабленного поля достигается в точке пересечения границ по напряжению и кривой электромагнитного момента, за исключением случаев предельного режима работы, когда единственная рабочая точка находится на кривой границы по току.

Сначала в главе рассматривается алгоритм управления, основанный на выполнении полученных выше соотношений между координатами привода. Другой способ реализации системы управления привода в режиме ослабленного поля состоит в формировании алгоритма по принципу итерационного вычисления координат рабочей точки. Далее рассматривается структура САУ привода и ее реализация в среде Simulink/MatLab. Глава заканчивается обсуждением результатов моделирования различных режимов и выводами по главе.

4.2 Обоснование алгоритм управления, основанного на полученных соотношениях между координатами привода

Предлагаемый алгоритм основан на непосредственном расчете координат рабочей точки по измеренному напряжению ЗПТ и заданному в системе управления значению электромагнитного момента в установившемся режиме работы. Для построения алгоритма управления необходимо определить

номинальное значение i_{sd} , которое определяется по номинальному потокосцеплению ротора:

$$i_{sd}^{\text{НОМ}} = \frac{|\Psi_r^{\text{НОМ}}|}{L_m}, \quad (4.1)$$

Где $\Psi_r^{\text{НОМ}}$ - потокосцепление ротора в номинальном режиме работы привода; L_m - индуктивность намагничивания двигателя.

Полученное при расчёте (4.1) значение используется для определения проекции i_{sq} при заданном значении электромагнитного момента:

$$i_{sq}^{\text{зад}} = M_{\text{зад}} \frac{L_r}{1,5z_p L_m^2 i_{sd}^{\text{НОМ}}}, \quad (4.2)$$

Здесь $M_{\text{зад}}$ - заданное значение электромагнитного момента, Нм.

Необходимо учитывать, что при провале напряжения привод может работать с неполной загрузкой, в результате чего рабочая точка привода будет изначально находиться внутри рабочей области. На рис.4.2 точка А соответствует заданному значению электромагнитного момента и находится внутри области образованной кривой ограничения по току 5 и кривой ограничения по напряжению 1, которая соответствует номинальному напряжению ЗПТ. Кривые 2 и 3 соответствуют границам при пониженных напряжениях ЗПТ. Если кривая границы предельного напряжения находится между кривой 1 и кривой 2, то точка А будет находиться внутри рабочей области привода и для сохранения заданного режима работы не требуется изменения закона управления. Кривая 2 соответствует напряжению, при котором граница по напряжению проходит через рабочую точку заданного режима, координаты которой определяются по формулам (4.1) и (4.2) по соответствующей этому режиму частоте тока статора.

Это напряжение будем называть граничным напряжением. Граничное значение напряжения определяет условие перехода из обычного режима в режим ослабленного поля:

$$U_{dc}^{(гр)} = 2 \cdot \sqrt{A(\omega_s^{\text{зад}}) \cdot i_{sd}^{\text{НОМ}^2} + B(\omega_s^{\text{зад}}) \cdot i_{sd}^{\text{НОМ}} \cdot i_{sq}^{\text{зад}} + C(\omega_s^{\text{зад}}) \cdot i_{sq}^{\text{зад}^2}}. \quad (4.3)$$

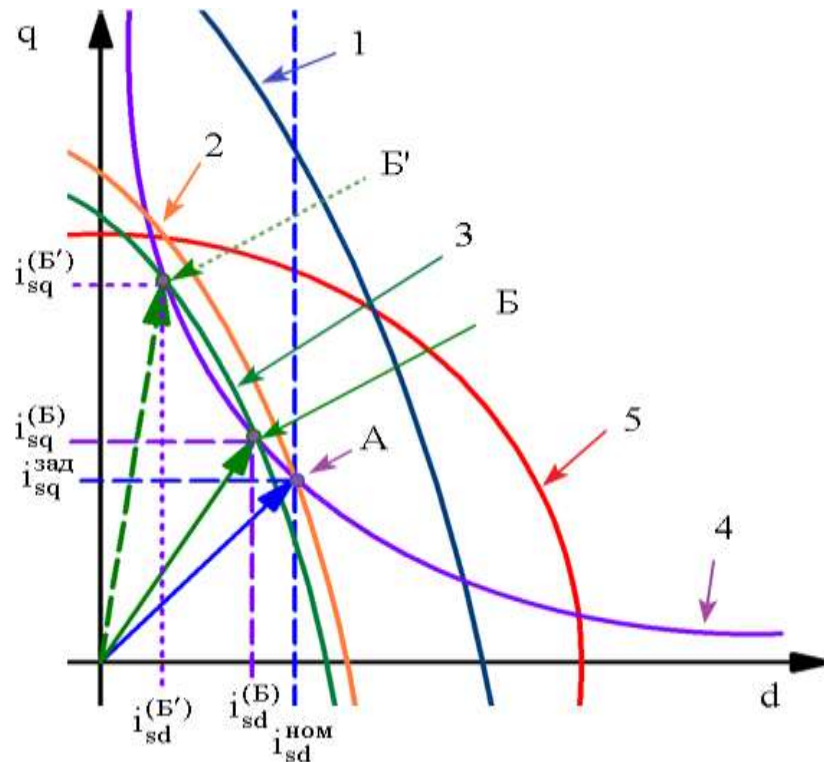


Рисунок 4.2 - Изменение рабочей точки привода при изменении напряжения питания: 1 – кривая границы по напряжению при номинальном напряжении звена постоянного тока $U_{dc}^{ном}$; 2 – кривая границы по напряжению при $U_{dc}^{(rp)}$; 3- кривая границы по напряжению при $U_{dc} \leq U_{dc}^{(rp)}$; 4 – кривая электромагнитного момента в установившемся режиме работы при номинальном моменте сопротивления $M_{зад} = M_c^{ном}$; 5 – кривая границы по току

Если $U_{dc} < U_{dc}^{(rp)}$, то для сохранения электромагнитного момента необходимо перейти от управления по закону $\psi_r = const$ к управлению в режиме ослабленного потока. При значении напряжения, соответствующего кривой 3 на рисунок 4.2, требуемый электромагнитный момент будет достигаться при перемещении точки А в точку Б, координаты которой находятся из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} A \cdot i_{sd}^2 + B \cdot i_{sd} \cdot i_{sq} + C \cdot i_{sq}^2 = U_{max}^2 \\ c \cdot M = i_{sd} \cdot i_{sq} \end{cases} \quad (4.4)$$

Решения системы (4.4) имеют вид :

$$\begin{aligned}
 i_{sd} &= \sqrt{\frac{U_{m(1)}^2 - B \cdot c \cdot M_{зад} + \sqrt{(B \cdot c \cdot M_{зад} - U_{m(1)}^2)^2 - 4A \cdot C \cdot (c \cdot M_{зад})^2}}{2 \cdot A}} \\
 i_{sq} &= \sqrt{\frac{2 \cdot A \cdot (c \cdot M_{зад})^2}{U_{m(1)}^2 - B \cdot (c \cdot M_{зад}) + \sqrt{(B \cdot (c \cdot M_{зад}) - U_{m(1)}^2)^2 - 4A \cdot C \cdot (c \cdot M_{зад})^2}}}
 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Реализация рассмотренного алгоритма требует большого количества вычислений и дополнительных программно релейных элементов. С целью упрощения структуры управления рассмотрим алгоритм на базе итерационных вычислений.

4.3 Обоснование итерационного алгоритма управления привода

При формировании алгоритма по принципу итерационного вычисления координат рабочей точки достаточно использовать только одно уравнение системы (3.30) - уравнение кривой границы по напряжению. Последовательность алгоритма определения координат рабочей точки состоит в следующем.

Используя выражения (4.1) и (4.2), определяют координаты рабочей точки А (рисунок 4.3) в заданном режиме работы i_{sd}^{HOM} и i_{sq}^{HOM} . Затем по значению составляющей i_{sq}^{HOM} определяется координата i_{sd} точки пересечения прямой $i_{sq}^{HOM} = const$ с кривой границы по напряжению, соответствующей текущему значению ЗПТ:

$$A \cdot i_{sd}^2 + 2 \cdot B \cdot i_{sd} i_{sq}^{(HOM)} + C \cdot i_{sq}^{HOM^2} - U_{max}^2 = 0 \quad (4.6)$$

Решение уравнения имеет вид:

$$i_{sd}^{(U)} = \frac{-B \cdot i_{sq}^{HOM} + \sqrt{(B^2 - A \cdot C) \cdot i_{sq}^{HOM^2} + A \cdot U_{max}^2}}{A} \quad (4.7)$$

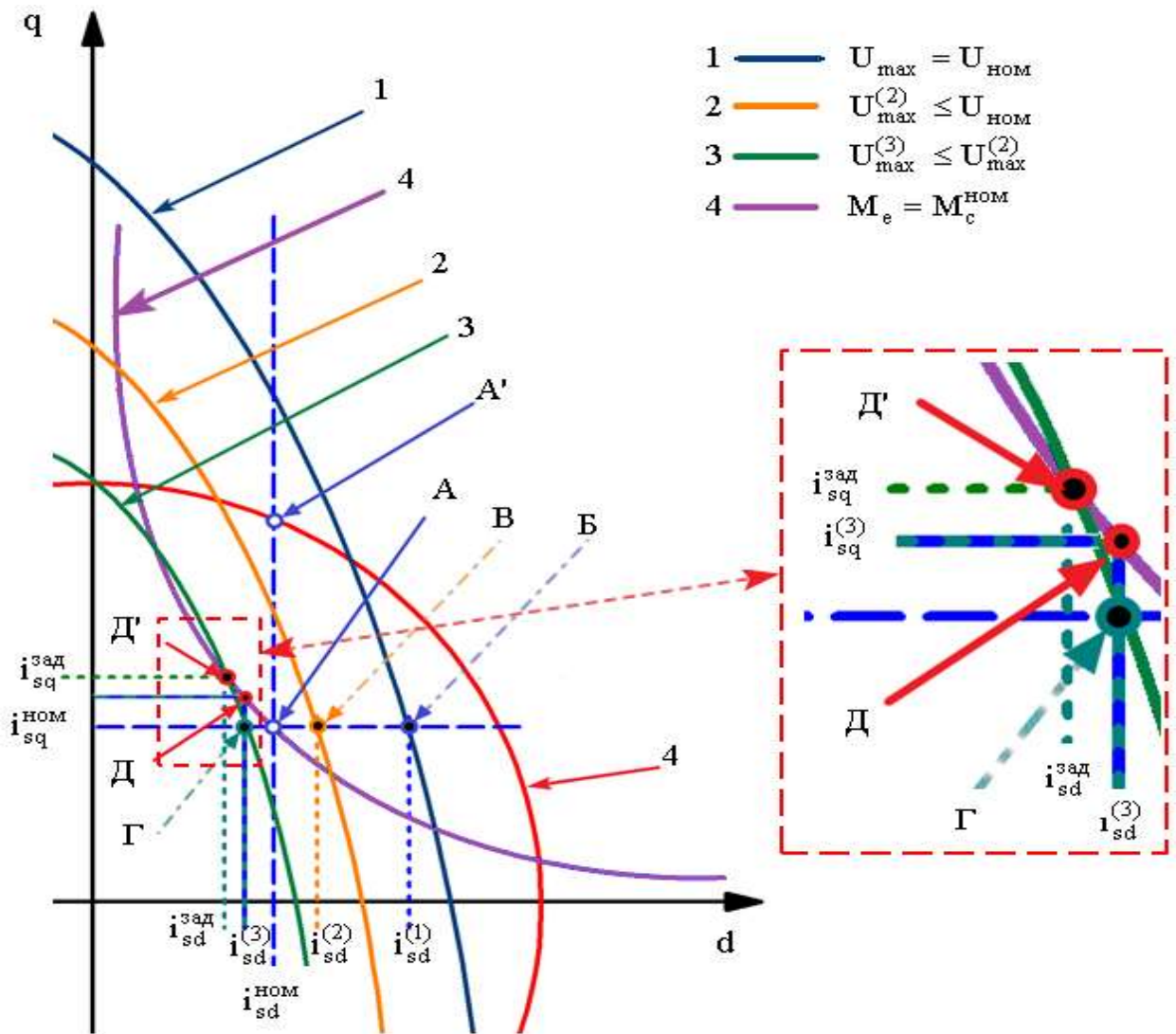


Рисунок 4.3 - Изменение рабочей точки привода при изменении напряжения питания: 1 – граница по напряжению при номинальном напряжении звена постоянного тока $U_{\text{dc}} = U_{\text{dc}}^{\text{НОМ}}$; 2 – граница по напряжению при $U_{\text{dc}2} < U_{\text{dc}}^{\text{НОМ}}$; 3- граница по напряжению при $U_{\text{dc}3} < U_{\text{dc}2}$; 4 – кривая номинального электромагнитного момента сопротивления $M_e = M_c^{\text{НОМ}}$; 5 – кривая границы по току

В зависимости от значения напряжения звена постоянного тока могут быть получены различные координаты точек на кривых границ напряжения, представленные на рисунке 4.3: кривая 1 соответствует номинальному напряжению ЗПТ $U_{\text{dc}} = U_{\text{dc}}^{\text{НОМ}}$, кривая 2- $U_{\text{dc}2} < U_{\text{dc}}^{\text{НОМ}}$, кривая 3 - $U_{\text{dc}3} < U_{\text{dc}2}$

Точки А,Б,В,Г являются точками пересечения прямой $i_{sq}^{(НОМ)} = \text{const}$ с кривыми границ по напряжению $U_{dc1} = \text{const}$, $U_{dc2} = \text{const}$ и $U_{dc3} = \text{const}$. Эти точки имеют одинаковые проекции на ось q и различные проекции по оси d . Сравнение полученного выше значения $i_{sd}^{(U)}$ с номинальным значением $i_{sd}^{(НОМ)}$ позволяет судить о том, принадлежит точка А рабочей области при текущем напряжении U_{dc} или нет. Если $i_{sd}^{(U)} \geq i_{sd}^{(НОМ)}$, то точка А принадлежит рабочей области и заданный режим достигается при стандартном законе векторного управления. Если выполняется противоположное неравенство $i_{sd}^{(U)} \leq i_{sd}^{(НОМ)}$ (кривая 3), то точка А находится вне рабочей области - для поддержания заданного режима требуется переход к алгоритму управления приводом в зоне ослабленного поля. Таким образом, условием перехода к управлению в режиме ослабленного потока является $i_{sd}^{(U)} < i_{sd}^{(НОМ)}$.

Для нахождения проекций тока $i_{sq}^{(3)}$ $i_{sd}^{(3)}$, при которых достигается требуемый заданный электромагнитный момент при $U_{dc3} = \text{const}$, значение $i_{sd}^{(3)}$, полученное из уравнения (4.7), подставляется в уравнение (4.2) результатом расчёта которого будет $i_{sq}^{(3)}$. Значениям проекций $i_{sd}^{(3)}$ и $i_{sq}^{(3)}$ соответствует точка Д, которая однако не принадлежит рабочей области. Для того чтобы перейти в точку Д' рабочей области, необходимо выполнить несколько циклов расчёта, состоящих из последовательного вычисления режима по формулам (4.7) и (4.2), пока не будет найдено требуемое значение с заданной точностью :

$$i_{sd}^{(U)}(N) = i_{sd}^{(U)}(N - 1) \quad (4.8)$$

где N – шаг вычисления.

Структура итерационного алгоритма работы привода в режиме ослабленного поля представлена на рисунке 4.4.

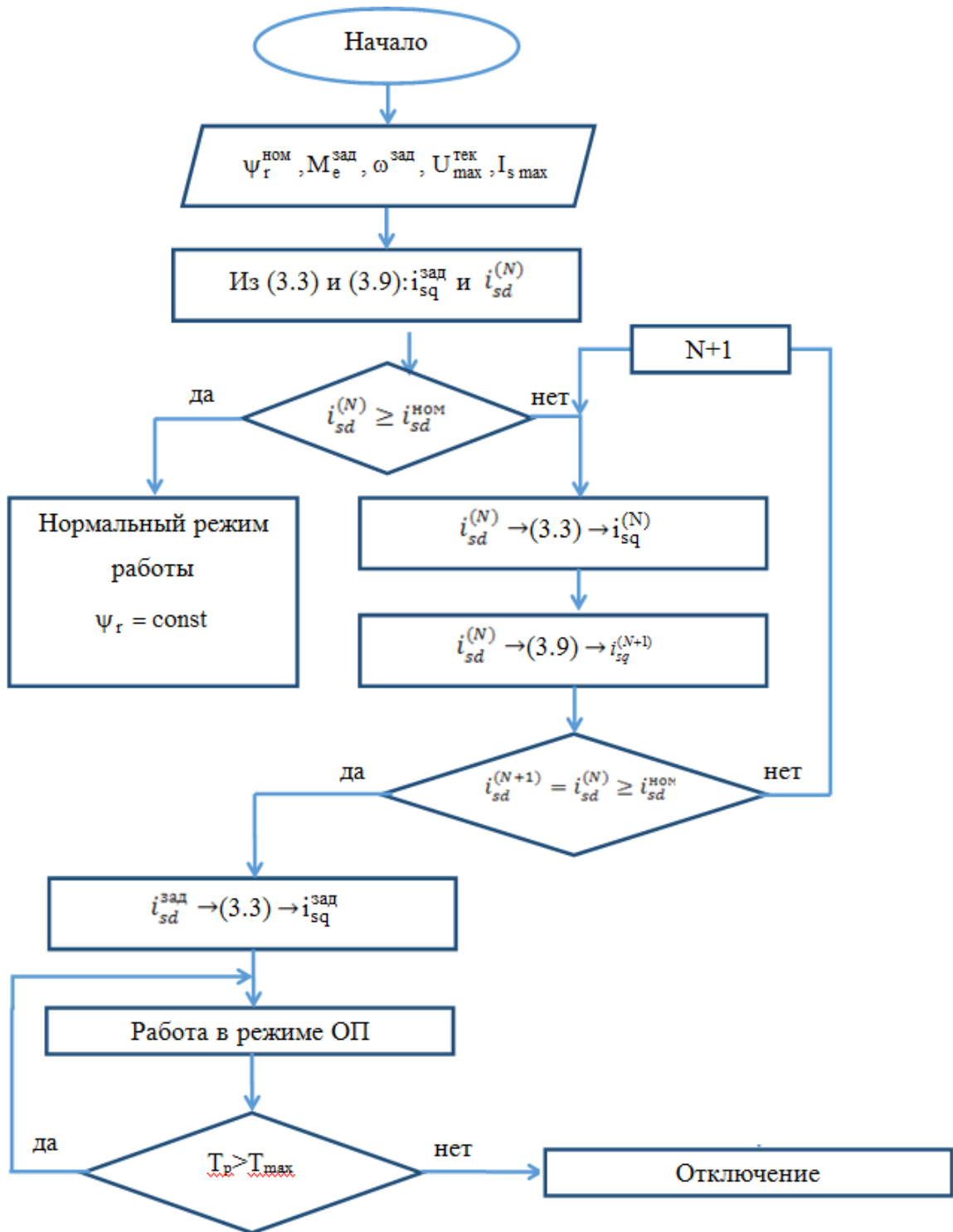


Рисунок 4.4 - Блок схема алгоритма работы в режиме ослабленного поля

Входными параметрами алгоритма являются: значение частоты вращения $\omega^{\text{зад}}$, значение электромагнитного момента $M_e^{\text{зад}}$, значение потокосцепления ротора в номинальном режиме работы $\psi_r^{\text{ном}}$, значение напряжения ЗПТ U_{dc} и максимально допустимое значение тока статора $I_{s \text{ max}}$. На основе заданных

значений производится расчёт рабочей точки привода. В зависимости от значения напряжения звена постоянного тока система управления может работать как в режиме ослабленного поля, так и в нормальном режиме с неизменным потокосцеплением ротора.

В схему алгоритма помимо описанных условий введено дополнительное условие, ограничивающее длительность работы привода в режиме ослабленного поля (T_p), которое не должно превышать максимальную длительность работы привода (T_{max}) при максимально допустимом токе статора.

4.4 Компьютерная модель привода

Исследование результатов теоретических исследований производилось при помощи компьютерного моделирования с использованием программной среды MatLab/Simulink. На рисунке 4.5 представлена компьютерная модель электропривода, разработанная для исследования режима ослабленного поля.

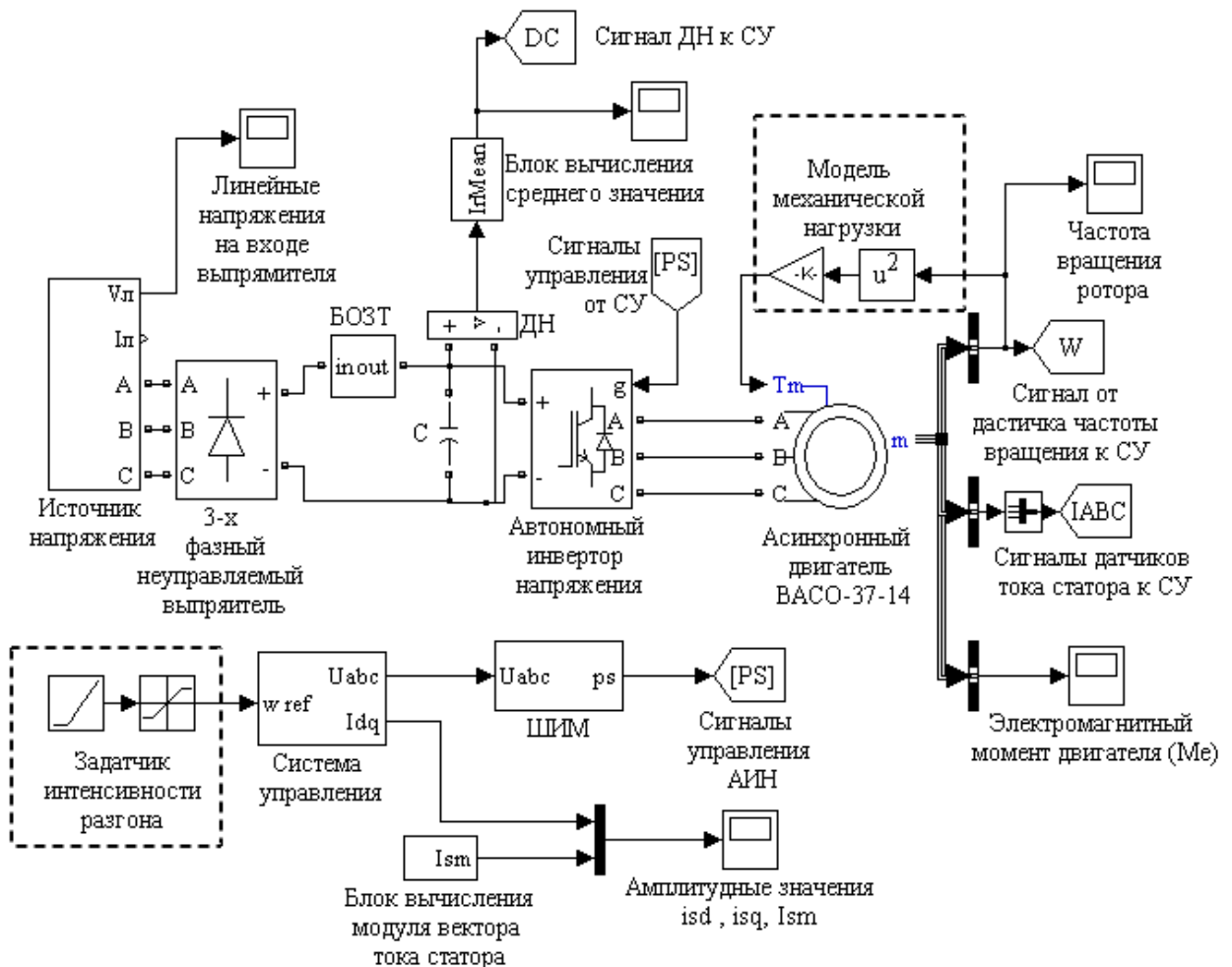


Рисунок 4.5 - Компьютерная модель привода в MatLab/Simulink

Силовая часть экспериментальной модели содержит следующие элементы:

- Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, параметры которого соответствуют электродвигателю марки ВАСО – 37-14;
- Трёхфазный мостовой инвертор напряжения, выполненный на IGBT модулях;
- Звено постоянного тока, которое содержит конденсатор ёмкостью 0,02Ф и блок ограничения зарядного тока (БОЗТ);
- Неуправляемый трёхфазный мостовой выпрямитель на силовых диодах;
- Трёхфазный источник напряжения. Структура источника напряжения представлена на рисунке 4.6.

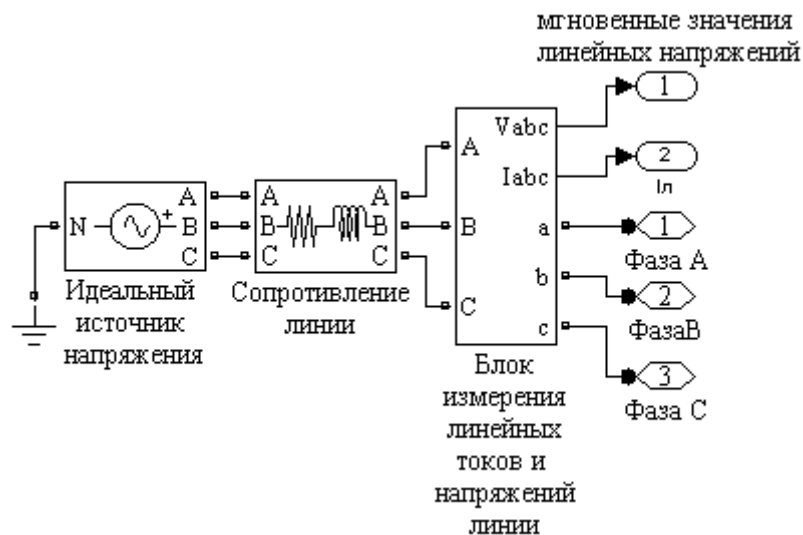


Рисунок 4.6 - Компоненты блока «Источник напряжения» схемы на рисунке 4.5

В состав источника напряжения входит управляемый источник трёхфазного напряжения с линейным напряжением 380 В и частотой 50Гц. Управляемый источник напряжения служит для моделирования провалов напряжения в сети. Линия имеет следующие параметры: $R_{л} = 0,005\text{Ом}$; $X_{л} = 0,001\text{Ом}$. Блок измерения линейных напряжений используется для получения сигнала мгновенных линейных напряжений на входе выпрямителя, который выводится на осциллограф.

Нагрузка электродвигателя имеет вентиляторную механическую характеристику, которая задана в виде зависимости квадратичной момента сопротивления от частоты вращения

$$M_c = \frac{P_{\text{ном}}}{3} \cdot \omega^2, \quad (4.10)$$

Где $P_{\text{ном}}$ - номинальная мощность электродвигателя, $\omega_{\text{ном}}$ - номинальная частота вращения двигателя (рад/с); ω - текущая частота вращения вала электродвигателя (рад/с).

Управление электродвигателем осуществляется формированием на выходе автономного инвертора напряжения заданной амплитуды и частоты на основе синусоидальной ШИМ с несущей частотой 5кГц.

Плавный пуск обеспечивает задатчик интенсивности разгона до заданного значения скорости вращения ротора. Для обеспечения требуемой скорости вращения в широком диапазоне регулирования в системе управления используются обратные связи по току и скорости вращения. Сигнал датчика скорости формируется в стандартном блоке измерения параметров электродвигателя. Токковые сигналы формируются с помощью датчиков тока. Для работы привода в режиме ослабленного поля в систему управления дополнительно вводится сигнал с датчика напряжения постоянного тока ДН.

На рисунке 4.7 представлены компоненты блока системы управления. Система управления работает следующим образом: сигнал задания по частоте вращения $\omega^{\text{зад}}$ сравнивается с сигналом текущей частоты вращения ротора ω от датчика скорости. Результат сравнения $\Delta\omega$ подается на пропорционально-интегральный регулятор скорости, выходным сигналом которого является задание электромагнитного момента $M_e^{\text{зад}}$.

Значение $i_{\text{sq}}^{\text{зад}}$ вычисляется с учетом текущего значения потокосцепления ротора ψ_r , текущей частоты тока статора ω_s и среднего значения напряжения звена постоянного тока U_{dc} . Значения ψ_r и ω_s вычисляются в системе управления, для чего служит наблюдатель потокосцепления ротора. Наблюдатель потокосцепления ротора производит вычисления на основании следующих выражений:

$$\Psi_r = \frac{L_m}{T_r p + 1} i_{sd} \cdot \text{ и } \omega_s = z\omega - \frac{L_m i_{sq}}{T_r \Psi_r} \quad (4.11)$$

Входными сигналами наблюдателя потокосцепления ротора являются сигнал текущей частоты вращения и текущие значения проекций тока статора i_{sq} и i_{sd} .

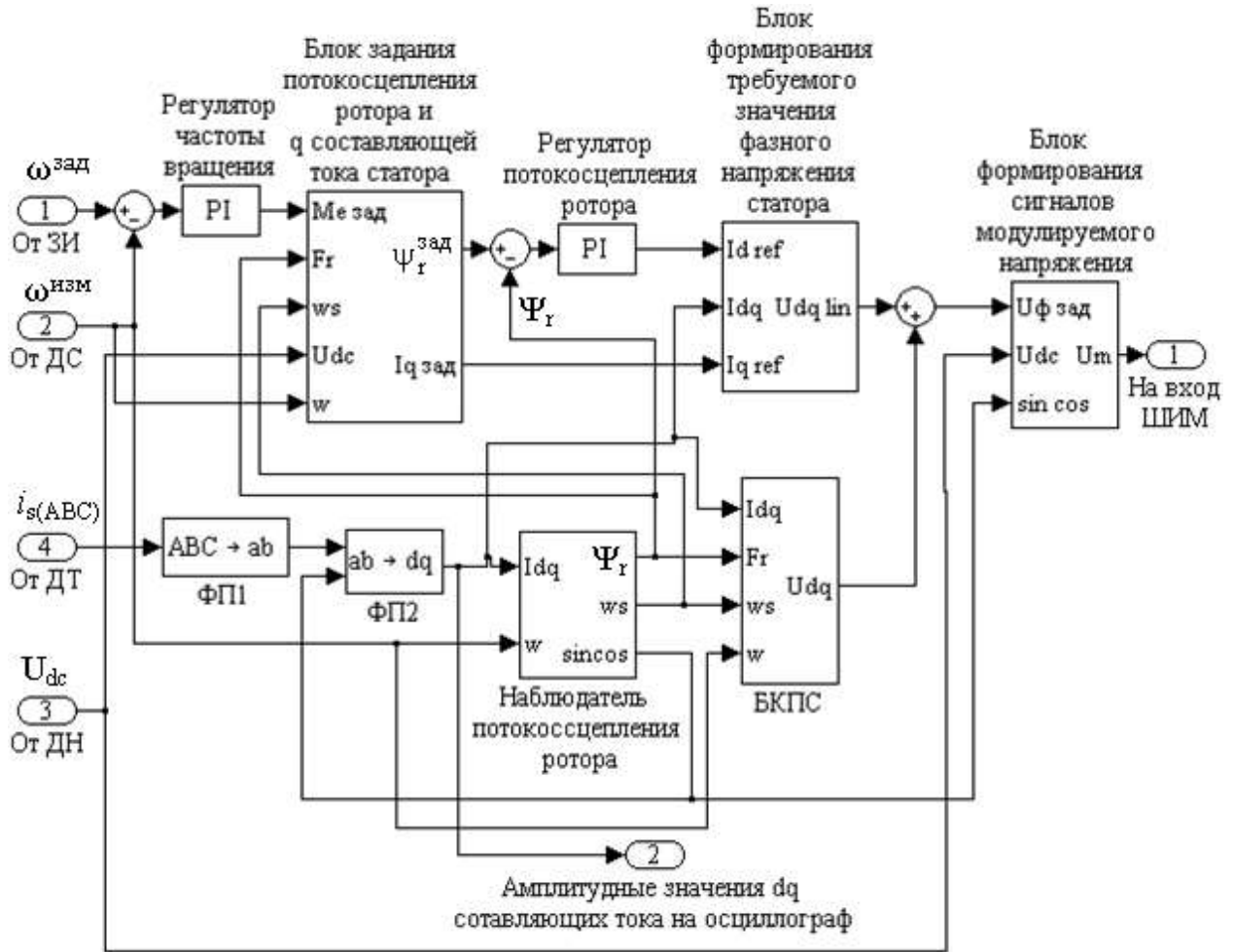


Рисунок 4.7 - Структура системы управления приводом

Для вычисления проекций тока статора используются сигналы датчиков тока i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} , которые поступают на вход функционального преобразователя ФП1 для преобразования в двухфазную неподвижную систему координат $\alpha\beta$:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, \quad (4.12)$$

Выходной сигнал преобразователя ФП1 поступает на вход другого преобразователя ФП2, который с учетом текущей частоты тока статора производит преобразование в двухфазную вращающуюся систему координат dq по формулам:

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Где φ – угловое положение вектора потокосцепления, которое определяется по вычисленной частоте тока статора

$$\varphi = \int \omega_s dt \quad (4.14)$$

Сигнал задания по потокосцеплению $\psi_r^{\text{зад}}$ сравнивается с текущим значением, и результат сравнения поступает на пропорционально-интегральный регулятор потока. Выходным сигналом регулятора потока является сигнал задания по $i_{sd}^{\text{зад}}$ - составляющей тока статора. Сигналы $i_{sd}^{\text{зад}}$ и $i_{sq}^{\text{зад}}$ поступают на вход блока формирования требуемого напряжения статора, где сравниваются с текущими значениями. На основе результатов сравнения Δi_{sd} и Δi_{sq} формируется задание по фазному напряжению статора $U_{sd}^{\text{зад}}$ и $U_{sq}^{\text{зад}}$ для чего используются пропорционально-интегральные регуляторы проекций токов.

Полученные сигналы складываются с сигналами блока компенсации перекрестных связей. Полученный в результате сигнал поступает на вход блока формирования модулируемого напряжения, где происходит нормирование сигнала относительно напряжения звена постоянного тока. Нормированный сигнал, представляющий собой задание по напряжению статора в dq -системе координат, преобразуется в систему фазных напряжений. Преобразование производится по формулам:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Полученные в результате преобразования сигналы поступают на вход широтно-импульсного модулятора, который формирует сигналы управления ключами инвертора.

Особенностью разработанной системы управления от типовой векторной системы управления [25,40], реализующей закон постоянства потокосцепления ротора, является блок формирования задания по потокосцеплению ротора и q -составляющей тока статора. На рисунке 4.8 представлена структура этого блока.

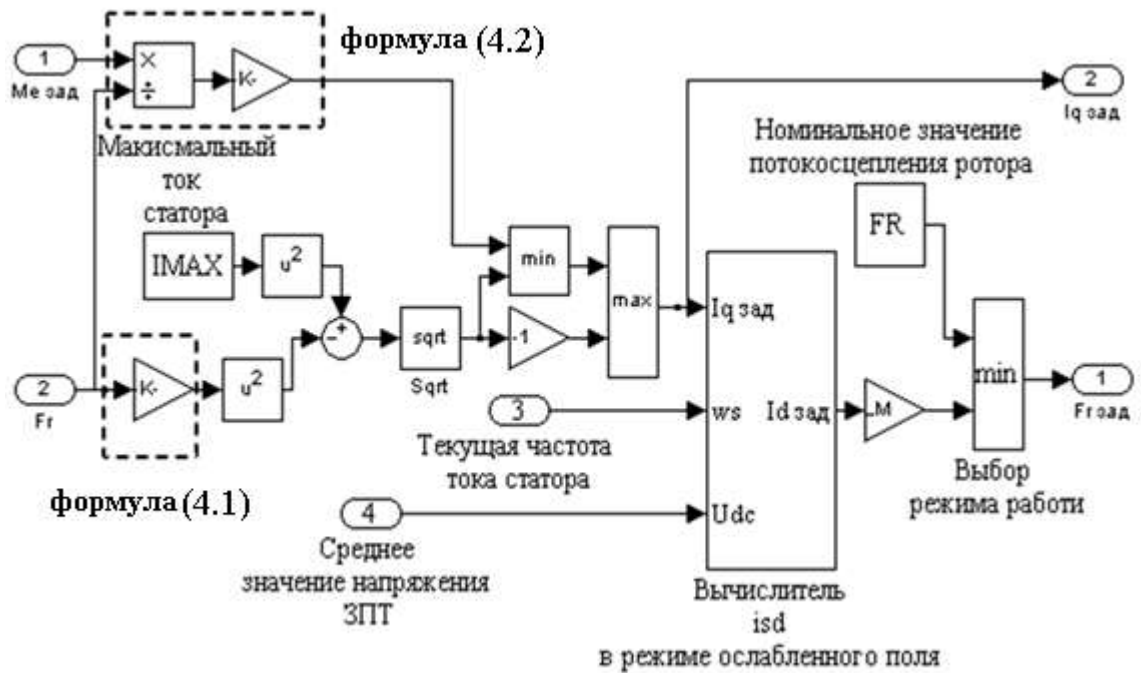


Рисунок 4.8 - Структура блока формирования задания

Рассматриваемый блок является программной реализацией алгоритма управления, который был представлен в разделе 4.3. Входными сигналами являются: заданное значение электромагнитного момента $M_e^{\text{зад}}$, текущее значение потокосцепления ротора ψ_r , текущая частота тока статора ω_s и среднее значение напряжения звена постоянного тока U_{dc} .

В соответствии с формулами (4.2), (4.3) по значениям ψ_r и $M_e^{\text{зад}}$ вычисляются текущие значения проекций - i_{sq} и i_{sd} . Вычисленное значение i_{sd} используется для определения проекции точки лежащей на кривой границы по току:

$$i_{sq}^{\text{max}} = \sqrt{I_{\text{max}}^2 - i_{sd}^2} \quad (4.16)$$

Из значений q-проекции тока статора, полученных по формулам (4.3) и (4.16), в качестве задания принимается наименьшее значение, что предотвращает возможность превышения током максимально допустимого значения.

Полученное значение $i_{sq}^{\text{зад}}$ поступает на вход вычислителя, который находит проекцию i_{sd} в соответствии с формулой (4.9). Структура блока представлена на рисунке 4.9.

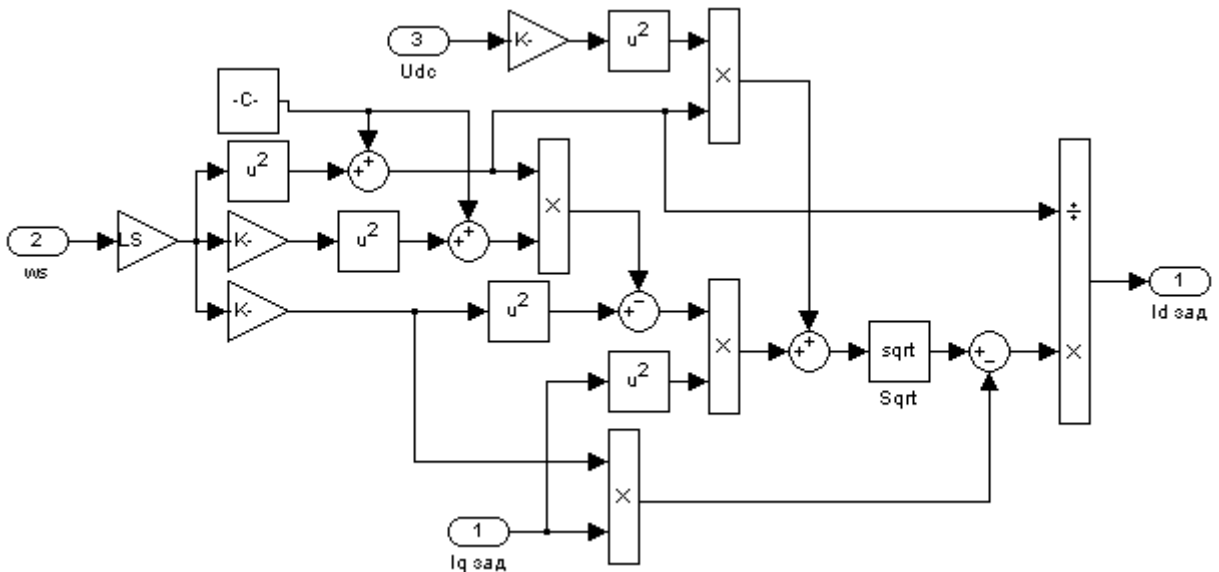


Рисунок 4.9 - Блок вычисления задания проекции тока i_{sd} в режиме ослабленного поля

Полученное значение тока $i_{sd}^{\text{зад}}$ используется для определения потокосцепления ротора $\psi_r^{\text{зад}}$, которое сравнивается с номинальным значением $\psi_r^{\text{ном}}$. Из двух значений выбирается наименьшее, которое и принимается как задание по потокосцеплению. В течении нескольких циклов система определяет точку установившегося режима работы.

При восстановлении напряжения в сети питания значение i_{sq} и вычисленное по этому значению ψ_r превысит значение $\psi_r^{ном}$, что приведет к переходу системы к работе по номинальному потокосцеплению.

В случае работы привода в режиме ослабленного поля при снижении напряжения ниже допустимого значения, для защиты диодов выпрямителя от бросков тока используется блок ограничения зарядного тока, структурная схема которого представлена на рисунке 4.10.

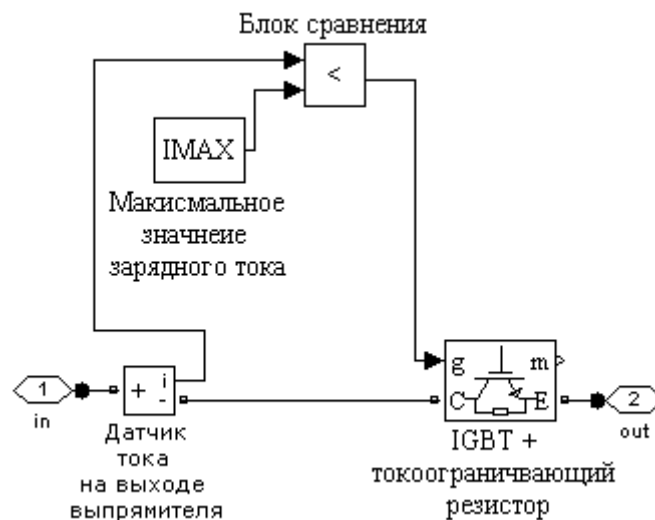


Рисунок 4.10 - Блок ограничения зарядного тока

Блок ограничения зарядного тока содержит силовой IGBT – транзистор, шунтированный токоограничивающим сопротивлением. Управление транзистором осуществляется по принципу сравнения силы тока с уставкой по току, которая выбирается по значению максимального импульса тока диодов выпрямителя. В нормальном режиме работы транзистор находится в открытом состоянии. При больших токах транзистор запирается и включает в работу шунтирующее сопротивление. В процессе восстановления напряжения сети и заряда тока циклы работы транзистора и резистора будут чередоваться до тех пор, пока конденсатор не зарядится до установившегося значения

4.5 Исследование работы привода с векторной системой управления при провалах напряжения в сети питания

Используя компьютерные модели привода и систем управления, представленные в предыдущих разделах, рассмотрим и сравним работу асинхронного электропривода при провалах напряжения в сети питания в случае векторной системой управления при законе управления $\Psi_r = \text{const}$ и в случае предложенных законов управления в области ослабленного поля. В качестве объекта исследования использовался асинхронный привод на базе АД марки ВАСО – 37 -14, параметры которого были рассмотрены выше. Для приводного механизма с вентиляторной характеристикой указанные способы управления сравниваются по критерию устойчивости привода к провалам напряжения для двух режимов привода, соответствующих а) полной загрузке $\omega = \omega_{\text{ном}}$ и б) частичной загрузке привода $\omega = 0,8 \cdot \omega_{\text{ном}}$.

Для каждого из экспериментов моделировалось двух ступенчатое снижение напряжения питания с последующим восстановлением нормального режима работы сети $U_c = 380\text{В}$, $f = 50\text{Гц}$. Номинальное значение напряжения ЗПТ в режиме ХХ составляет $U_{\text{dc}}^{\text{ном}} = 537\text{В}$. Максимальное значение тока статора $I_{\text{smax}} = 150\text{А}$ принято равным 150% от номинального значения. Этому значению тока соответствует характеристический момент $M_{\text{хар}} = 642\text{Нм}$, который составляет 77.5% от номинального момента $M_{\text{ном}} = 840\text{Нм}$. Номинальная скорость вращения ротора при числе пар полюсов $z_p = 7$ и номинальном скольжении $s_{\text{ном}} = 0,026$ составляет $\omega = 43,9$ рад/с, мощность $P_{\text{ном}} = 37\text{кВт}$.

Напряжение срабатывания РМН по предельному значению ударного тока заряда конденсатора составляет 70% от номинального напряжения ЗПТ и составляет $U_{\text{min}}^{(\text{уд})} = 376\text{В}$. Задание по потокосцеплению ротора выбрано из условия минимума тока статора, которое при полной загрузке привода определяется точкой пересечения границы по напряжению и кривой электромагнитного момента: $\Psi_r = 0,72\text{Вб}$ и $i_{\text{sd}} = 66\text{А}$.

4.5.1 Провалы напряжения при полной загруженности привода

Векторная система при законе управления $\Psi_r = const$.

Результаты моделирования работы привода при номинальной нагрузке и трехступенчатом изменении напряжения ЗПТ показаны на рисунке 4.11.

Первая область: $U_{dc1} = 532\text{В}$, $0 \leq t \leq t_1 = 5\text{с}$

Вторая область: $U_{dc2} = U_{dc\min}^{(оп1)} = 425\text{В}$, $t_1 \leq t \leq t_2 = 7.5\text{с}$

Третья область: $U_{dc3} = U_{dc\min}^{(уд)} = 376\text{В}$, $t_2 \leq t \leq t_3 = 10\text{с}$

Четвертая область: $U_{dc4} = 532\text{В}$, $t \geq t_3 = 10\text{с}$

В первой области значение напряжения ЗПТ с учетом падения напряжения на сопротивлении линии равно 532В (рис.4.11а). Значения проекций токов статора в номинальном режиме работы составляют: $i_{sd}=66\text{А}$ и $i_{sq}=122\text{А}$ (рис.4.11б). Частота вращения ротора 43,9рад/с (рис.4.11в) обеспечивается электромагнитным моментом 842 Нм (рис.4.11г).

При снижении напряжения до значения 425В проекция тока i_{sd} и соответствующее значение потокосцепления ротора Ψ_r при снижении частоты напряжения статора остаются неизменными, значение проекции i_{sq} уменьшается до 84А. Это приводит к снижению электромагнитного момента $M_e=590\text{Нм}$ и уменьшению скорости вращения ротора $\omega=36,6\text{рад/с}$. При дальнейшем снижении напряжения до значения 380В значение i_{sd} остается на заданном уровне, составляющая тока i_{sq} уменьшается до 66А, что приводит к снижению момента $M_e=480\text{Нм}$ и скорости вращения ротора $\omega=33\text{рад/с}$. При восстановлении питания ток заряда конденсатора звена постоянного тока не превышает максимального значения.

Из анализа результатов моделирования следует, что уменьшение напряжения на $\Delta U=20\%$ приводит к уменьшению частоты вращения и электромагнитного момента на $\Delta\omega=17\%$ и $\Delta M_e=30\%$, соответственно. При уменьшении напряжения на $\Delta U=30\%$ отклонение частоты составляет $\Delta\omega=25\%$ и отклонение момента - $\Delta M_e=43\%$.

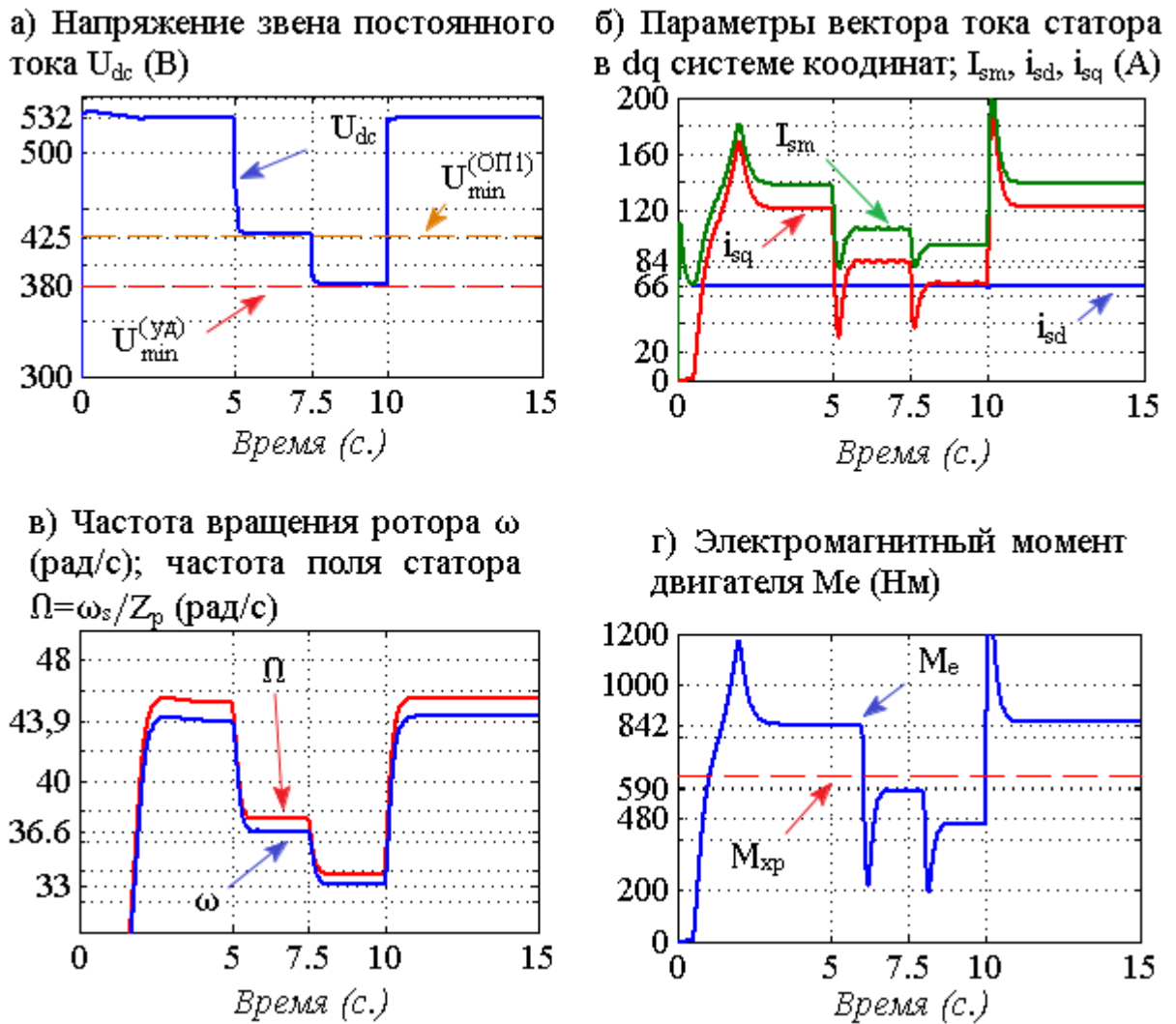


Рисунок 4.11 - Осциллограммы работы привода с векторной системой управления, реализующей закон $\Psi_r = \text{const}$, при провале напряжения питания

Проиллюстрируем полученные результаты с помощью векторной диаграммы тока статора на рисунке 4.12. В нормальном режиме работы при заданном потокоцеплении ротора рабочей точкой является точка А, которой соответствует вектор тока статора I_s и его проекции $i_{sd} = 66\text{А}$ и $i_{sq} = 122\text{А}$. Рабочая точка является точкой пересечения гиперболы постоянного момента $M_e = 842\text{Нм}$ и эллипса постоянного напряжения $U_{dc} = 532\text{В}$.

При новой границы по напряжению $U_{dc} = 532\text{В}$ (кривая 3) рабочая точка А перемещается по линии $i_{sd} = \text{const} = 66\text{А}$ в точку Б с меньшим значением момента $M_e = 590\text{Нм}$ (кривая 4). Дальнейшее уменьшение ЗПТ до уровня $U_{dc} = 425\text{В}$ (кривая 5) переводит режим привода в точку В.

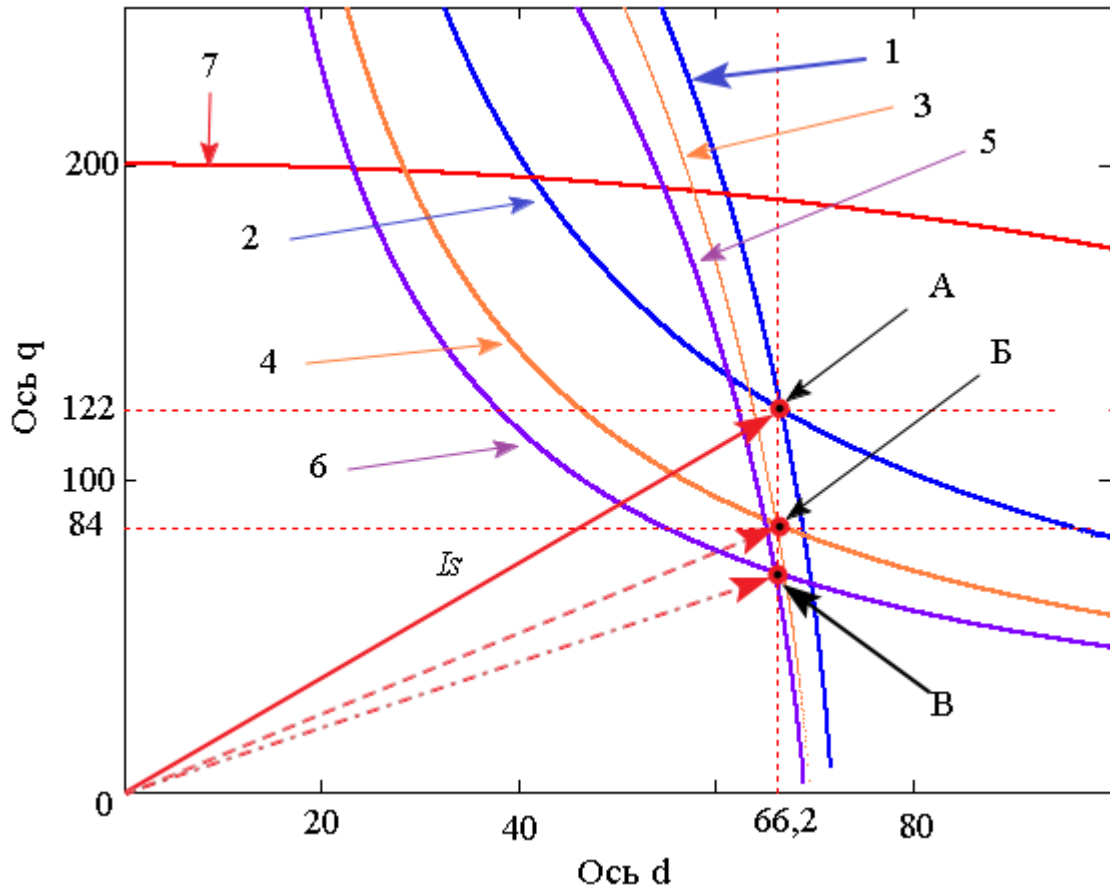


Рисунок 4.12 - Изменение рабочей точки электропривода при провалах напряжения в сети при законе управления $\Psi r = \text{const}$.

1 – кривая границы по напряжению $U_{dc} = 532B$; 2- кривая электромагнитного момента $M_e = 842\text{Нм}$; 3-кривая границы по напряжению $U_{dc} = 425B$; 4- кривая момента $M_e = 590\text{Нм}$; 5 – кривая границы по напряжению $U_{dc} = 380B$; 6- кривая электромагнитного момента $M_e = 480\text{Нм}$; 7- кривая границы по току

Алгоритмы управления приводом в зоне ослабленного поля.

Результаты моделирования привода при полной нагрузке и использовании в системе контроля алгоритмов управления, учитывающих особенности области ослабленного поля, показаны на рисунке 4.13. Из осциллограмм видно, что реакция привода на провалы напряжения изменяется по сравнению с алгоритмом управления по закону постоянства потокосцепления ротора.

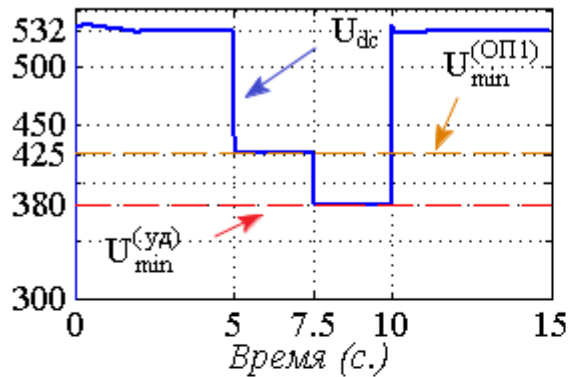
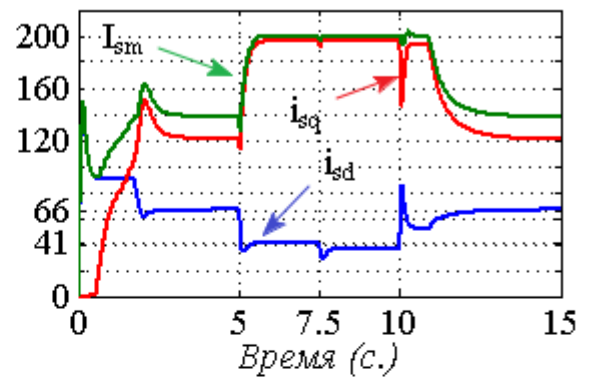
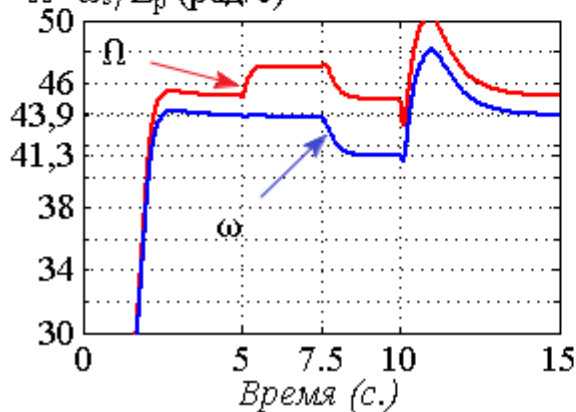
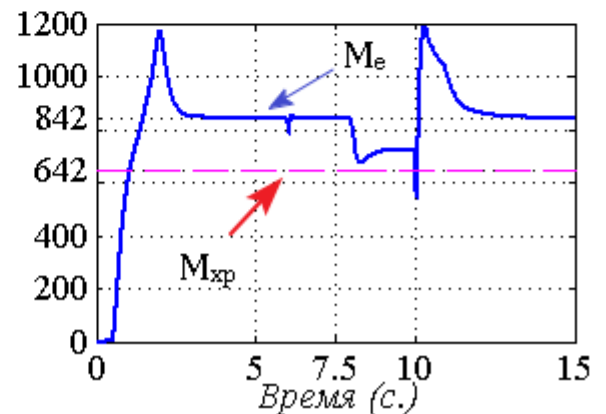
а) Напряжение звена постоянного тока U_{dc} (В)б) Параметры вектора тока статора в dq системе координат; I_{sm} , i_{sd} , i_{sq} (А)в) Частота вращения ротора ω (рад/с); частота поля статора $\Omega = \omega_s / Z_p$ (рад/с)г) Электромагнитный момент двигателя M_e (Нм)

Рисунок 4.13. - Характеристики режима работы привода с системой управления, реализующей режим ослабленного поля при провале напряжения сети

При снижении напряжения ЗПТ до уровня $U_{dc} = 425\text{В}$ система управления переходит в режим ослабленного поля. Работа привода в области ослабленного поля характеризуется уменьшением d-составляющей и увеличением q составляющей тока статора до значений $i_{sd} = 41.4\text{А}$, $i_{sq} = 195\text{А}$, которым соответствует максимально допустимое значение вектора тока $I_{smax} = 200\text{А}$. В результате увеличения q составляющей, уменьшения d составляющей тока статора, роста частоты тока скорость вращения ротора и электромагнитный момент остаются неизменными. При уменьшении напряжения ЗПТ до значения $U_{dc} = 380\text{В}$ система управления больше не способна поддерживать заданный электромагнитный момент $M_{ном} = 842\text{Нм}$ из-за ограничения по току. В этом

режиме система управления формирует задание по d составляющей тока статора исходя из максимально возможного значения q составляющей тока статора: $i_{sd}=36.5\text{A}$; $i_{sq}=197\text{A}$. В этом режиме формируется электромагнитный момент $M_e = 746\text{Нм}$, который меньше заданного электромагнитного момента. В результате этого частота вращения ротора уменьшается до значения $41,3$ рад/с. В рассматриваемом случае развиваемые электромагнитные моменты оказываются меньше характеристического значения момента.

Из анализа результатов моделирования следует, что управление приводом в режиме ослабленного поля при полной загруженности привода обеспечивает полную устойчивость привода к изменениям напряжения на $\Delta U=20\%$. При уменьшении напряжения на $\Delta U=30\%$ имеет место отклонение частоты вращения ротора на $\Delta\omega=6\%$ и отклонение момента на $\Delta M_e=11\%$.

При использовании традиционного алгоритма векторного управления уменьшение напряжения на $\Delta U=30\%$ вызывает более заметное отклонение частоты и момента на $\Delta\omega=25\%$ и $\Delta M_e=43\%$, соответственно.

Выполним анализ движения рабочей точки привода в координатах i_{sd}, i_{sq} относительно границ рабочей области по напряжению, току и кривых электромагнитного момента при работе привода в режиме ослабленного поля (рисунок 4.14).

В нормальном режиме рабочая точка А находится на пересечении кривой границы по напряжению 1 и кривой заданного электромагнитного момента 2. При уменьшении напряжения звена постоянного тока до значения 425В , формируется новая граница по напряжению – кривая 3. Кривая 3 имеет только одну точку пересечения Б с кривой электромагнитного момента 2, которая не выходит за пределы ограничения по току. Точка Б находится на кривой границы по току (кривая 6), что соответствует первой зоне предельных режимов, для которой характерно соотношение: $M_e > M_{\text{хар}}$. При значении напряжения ЗПТ $U_{dc} = 380\text{В}$ новая кривая границы по напряжению (кривая 4) не имеет точек пересечения с кривой электромагнитного момента 2. Рабочей точкой является точкой

пресечения кривой 4 ($U_{dc} = 380V$) с кривой 6 ($i_{s,max} = const$). При работе привода в точке В привод работает с максимально-возможным значением момента, которому соответствует кривая 5.

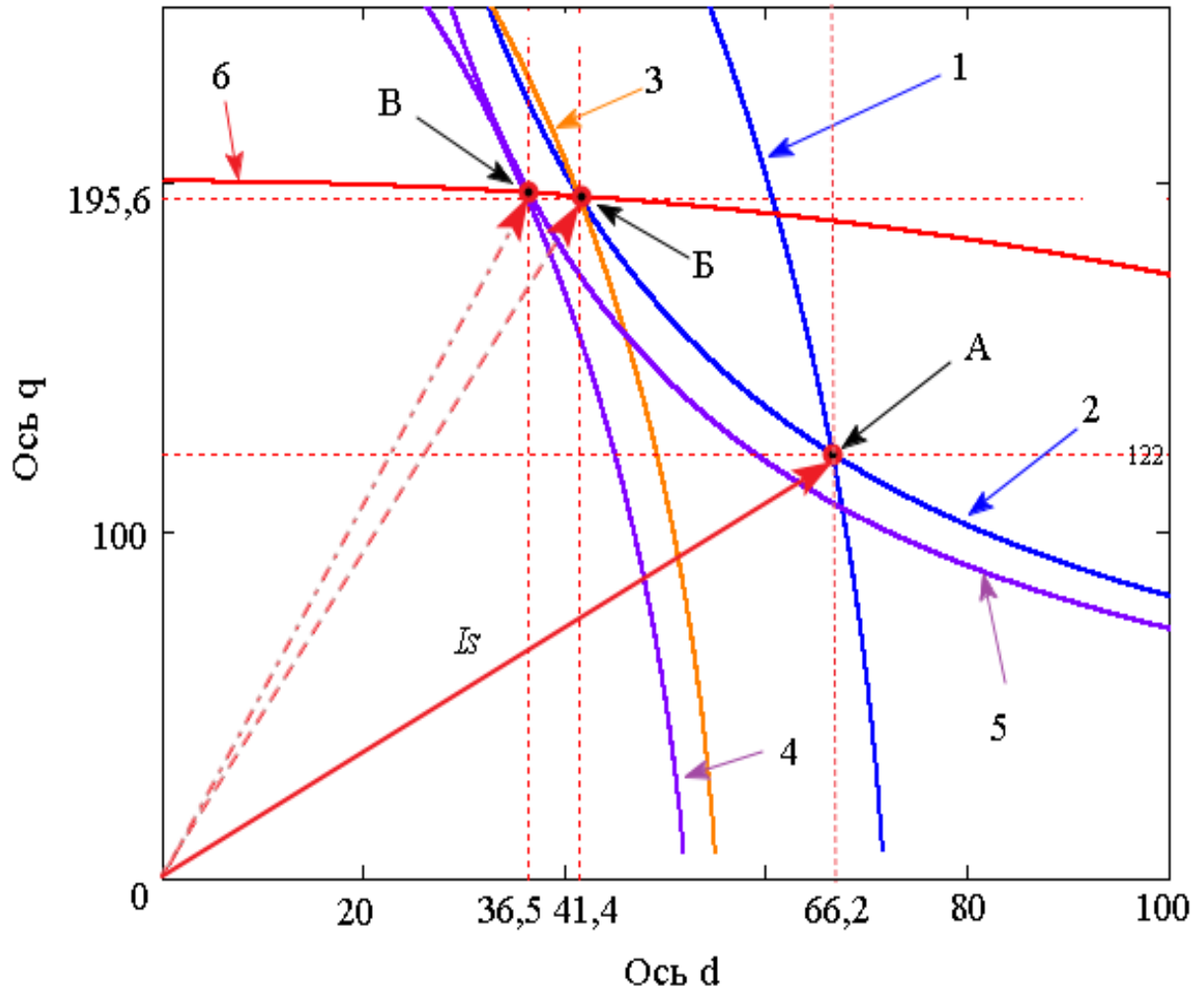


Рисунок 4.14 - Изменение рабочей точки электропривода при управлении в режиме ослабленного поля:

1 – кривая границы по напряжению в нормальном режиме $U_{dc} = 532V$; 2- кривая электромагнитного момента в нормальном режиме $M_e=842Нм$; 3-кривая границы по напряжению при $U_{dc} = 425V$; 4 – кривая границы по напряжению при $U_{dc} = 380V$; 5- кривая момента при $M_e=746Нм$; 6- кривая границы по току

4.5.2 Провалы напряжения при частичной загрузке привода

Векторная система при законе управления $\Psi_r = const$.

Для исследования влияния провалов напряжения на реакцию привода при его неполной загрузке уменьшим задание по частоте вращения ротора

$$\omega_{\text{зад}} = 0.8\omega_{\text{ном}} = 35.1 \text{ рад/с}.$$

В этом случае момент сопротивления и необходимый для нового режима электромагнитный момент также уменьшится и примет в соответствии с вентиляторной характеристикой значение $M_{\text{зад}} = 0.64M_{\text{ном}} = 540 \text{ Нм}$. Отметим, что в этом случае электромагнитный момент двигателя в установившемся режиме работы меньше значения характеристического момента привода $M_{\text{хар}} = 642 \text{ Нм}$.

Определим ступени снижения напряжения, задаваемые для получения сравнительной оценки откликов привода при двух способов управления.

Минимальное значение напряжения ЗПТ во второй зоне области ослабленного поля определим по заданным величинам $i_{\text{sd}}, M_{\text{зад}}$. Полученное значение $U_{\text{dc min}}^{(\text{оп}2)} = 280 \text{ В}$ меньше уставки срабатывания ЗМН $U_{\text{min}}^{\text{ЗМН}} = 380 \text{ В}$

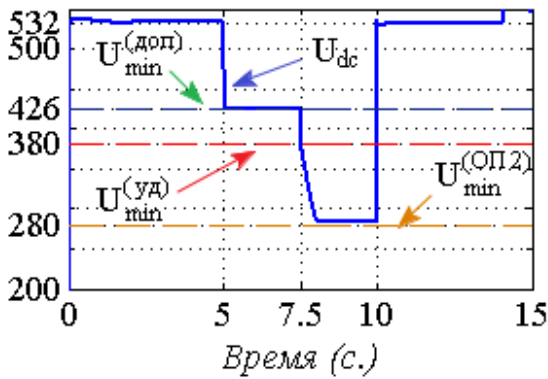
Теоретически, работа привода при значениях $U_{\text{dc}} < U_{\text{min}}^{\text{ЗМН}}$ возможна, однако существует опасность возникновения зарядных сверхтоков при восстановлении напряжения. Сделаем допущение, что в структуре преобразователя предусмотрено ограничение зарядного тока.

Так как привод работает с меньшей частотой вращения, рабочая область электропривода будет больше по сравнению с рабочей областью при работе привода с номинальной скоростью вращения. Увеличение рабочей области связано с расширением границы по напряжению, которая имеет обратно пропорциональную зависимость от частоты тока статора. В результате рабочая точка привода при заданном значении потокосцепления ротора не будет совпадать с точкой пересечения границы напряжения и кривой момента. Это в свою очередь приводит к повышению устойчивости привода к провалам напряжения, так как возникает множество значений напряжения ЗПТ меньших номинального значения, при которых рабочая точка находится внутри рабочей области. Определим значение напряжения ЗПТ, при котором граница по напряжению проходит через рабочую точку $i_{\text{sdA}}, i_{\text{sqA}}$ (рис.4.16) заданного режима

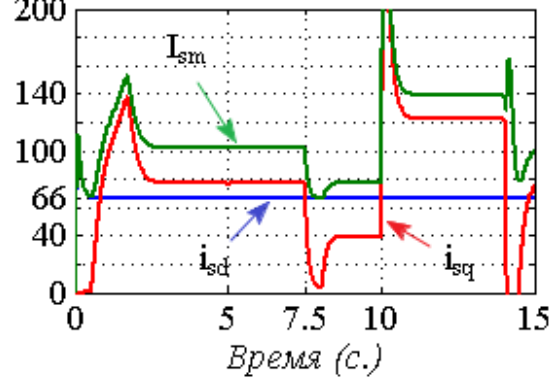
работы: $U_{dc}^{(rp)} = 426\text{В}$. При проведении эксперимента примем провалы напряжения ЗПТ до остаточных значений 426В и 280В.

Результаты исследования работы привода представлены на рисунке 4.15.

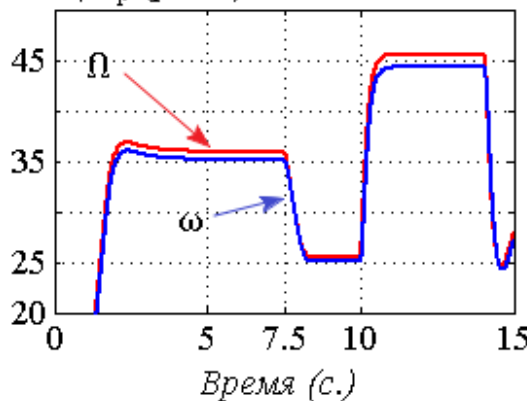
а) Напряжение звена постоянного тока U_{dc} (В)



б) Параметры вектора тока статора в dq системе координат; I_{sm} , i_{sd} , i_{sq} (А)



в) Частота вращения ротора ω (рад/с); частота поля статора $\Omega = \omega_s / Z_p$ (рад/с)



г) Электромагнитный момент двигателя M_e (Нм)

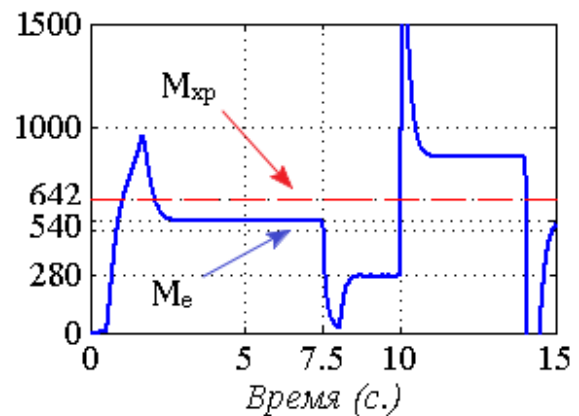


Рисунок 4.15 - Осциллограммы работы привода с векторной системой управления, реализующей закон $\Psi_r = \text{const}$, при провале напряжения питания и заданной частоте вращения

$$\omega = 0,8\omega_{\text{ном}}$$

Из графиков видно, что изменение напряжения не вызывает изменения частоты вращения и электромагнитного момента. Это связано с тем, что требуемое значение первой гармоники напряжения $U_{m(1)} = mU_{dc}/2$ при пониженном напряжении обеспечивается за счет увеличения коэффициента модуляции. Таким образом, при частоте вращения равной 80% от номинального

значения привод обладает устойчивостью к провалам напряжения до значения $U_{dc}^{(гр)}$.

Из осциллограмм также следует, что при падении напряжения на $\Delta U=48\%$ до значения $U_{dc \min}^{(оп2)} = 280\text{В}$ происходит электромагнитного момента на $\Delta M_e=48\%$, скорости вращения на $\Delta \omega=28\%$ до значений $M_e = 280\text{Нм}$ и $\omega = 25\text{рад/с}$, соответственно.

Рассмотрим, как изменяется рабочая точка привода при снижении напряжения в соответствии диаграммой, показанной на рисунке 4.16.

Из графиков видно, что при выбранном значении потокосцепления ротора и соответствующем ему значению i_d – составляющей тока статора, рабочая точка привода А находится внутри рабочей области, ограниченной кривой тока и кривой постоянного напряжения $U_{dc}^{ном} = 532\text{В}$. Следовательно, при любом значении напряжения ЗПТ, при котором граница напряжения будет находиться на участке между кривой 1 и кривой 3, электропривод будет обладать способностью поддерживать заданный режим работы без изменения закона управления за счет изменения коэффициента модуляции. При уменьшении напряжения до значения 280В, формируется новая граница по напряжению (кривая 4). В результате чего новой рабочей точкой становится точка Б, которой соответствует меньший электромагнитный момент (кривая 5). Координаты точки Б соответствуют осциллограммам проекций тока статора, полученным в результате моделирования.

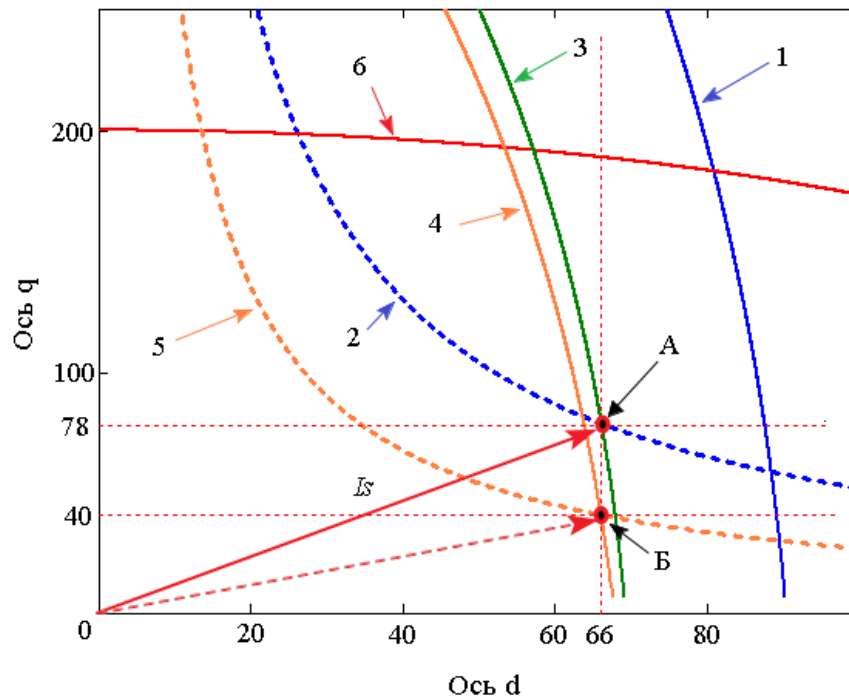


Рисунок 4.16 - Изменение рабочей точки электропривода при провале напряжения в сети при законе $\Psi_T = \text{const}$ с частотой вращения $\omega = 0,8\omega_{ном}$.

1 – кривая границы по напряжению в нормальном режиме $U_{dc} = 532\text{В}$; 2- кривая электромагнитного момента в нормальном режиме $M_e = 540\text{Нм}$; 3-кривая границы по напряжению при $U_{dc} = 426\text{В}$; 4 – кривая границы по напряжению при $U_{dc} = 280\text{В}$; 5- кривая момента при $M_e = 280\text{Нм}$; 6- кривая границы по току

Управление приводом в зоне ослабленного поля в соответствии с разработанными алгоритмами.

Результаты моделирования привода и системы управления на базе предложенных алгоритмов в области ослабленного поля представлены на рис.4.17. Из анализа результатов осциллограмм следует, что при уменьшении напряжения звена постоянного тока до значения 426В, система управления сохраняет режим работы с заданным потокосцеплением ротора.

Уменьшение напряжения ЗПТ на 47% до значения 280В сопровождается уменьшением i_{sd} – составляющей, увеличением i_{sq} – составляющей тока статора и ростом скорости вращения поля статора $\Omega = \omega_s / z_p$. При этом скорость вращения ротора и электромагнитный момент двигателя сохраняют заданные

значения. Рост величины Ω объясняется формулой (4.17), которая получается из формул для стационарного режима привода (4.15) и условия сохранения скорости вращения при переходе привода из обычной области i_{sd}, i_{sq} в область ослабленного поля $i_{sd}^{(np)}, i_{sq}^{(np)}$

$$\omega_s^{(оп)} = \left(\omega_s^{норм} + \frac{R_r}{L_r} \left(\frac{i_{sq}^{(оп)}}{i_{sd}^{(оп)}} - \frac{i_{sq}}{i_{sd}} \right) \right) \quad (4.17)$$

Из этого уравнения следует, что переход привода в режим ослабленного поля всегда будет сопровождаться увеличением частоты тока статора, что в свою очередь будет вызывать дополнительное уменьшение границы по напряжению.

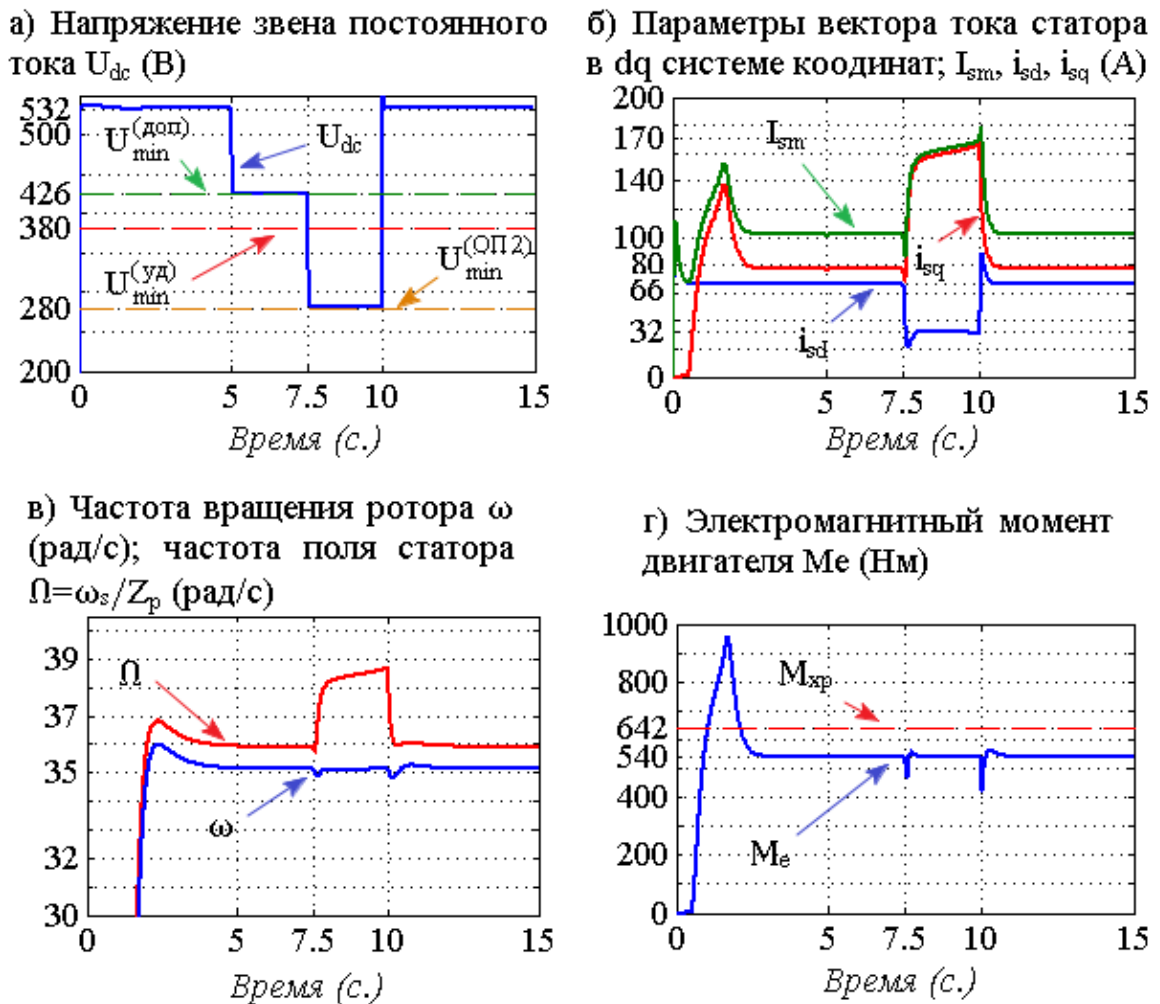


Рисунок 4.17 - Осциллограммы работы привода с системой управления, реализующей режим ослабленного поля

На рисунке 4.18 показано изменение рабочей точки привода при провалах напряжения питания и работе привода в режиме ослабленного поля.

Из анализа кривых следует, что при значении напряжения ЗПТ $U_{dc} = U_{dcmin}^{(on2)}$ проекции тока статора, полученные при моделировании, являются координатами точки Б, в которой кривая электромагнитного момента 2 касается кривой границы по напряжению. Это подтверждает результаты теоретического исследования в части определения предельного режима в области $M < M_{хар}$ как точки касания гиперболы постоянного момента и эллипса предельно минимального напряжения.

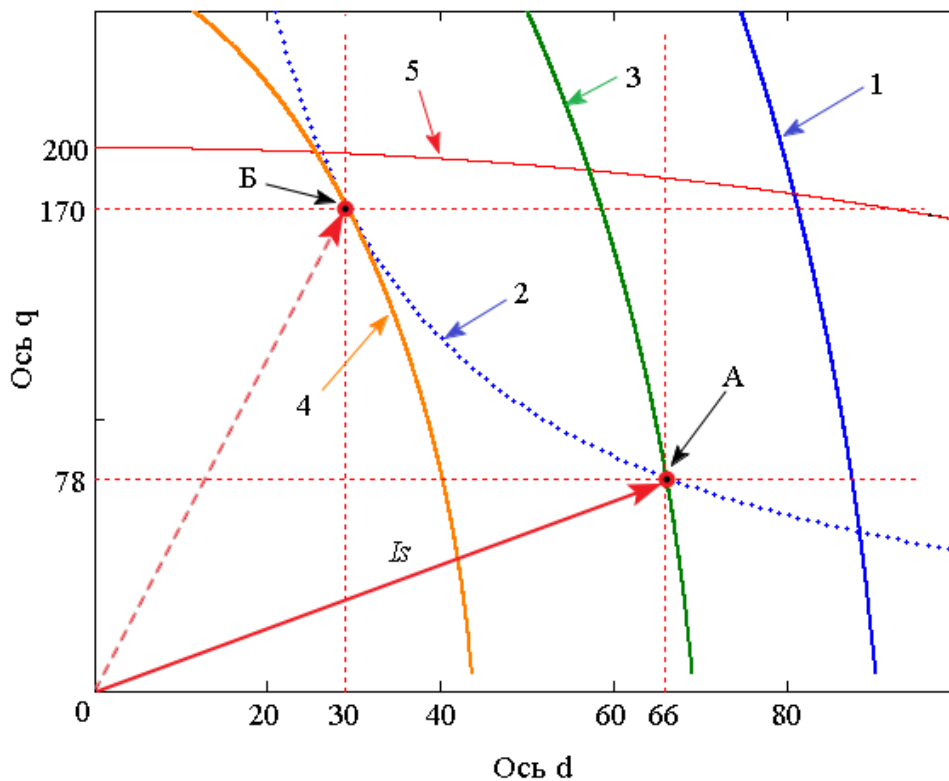


Рисунок 4.18 - Изменение рабочей точки электропривода в условиях провала напряжения в сети питания в режиме ослабленного поля с заданной частотой вращения $\omega=0,8\omega_{ном}$. 1 – кривая границы по напряжению в нормальном режиме $U_{dc} = 532В$; 2- кривая электромагнитного момента в нормальном режиме $M_e=540Нм$; 3-кривая границы по напряжению при $U_{dc} = 426В$; 4 – кривая границы по напряжению при $U_{dc} = 280В$; 5- кривая момента $M_e=280Нм$; 6- кривая границы по току

4.6 Выводы по главе

1. Предложена структура и алгоритм управления ЧРП при работе в зоне ослабленного поля, возникающей вследствие провалов напряжения сети. Структура отличается от структуры системы традиционного векторного управления наличием дополнительного блока, назначение которого состоит в выработке задания по потокосцеплению ротора и задания по моменту двигателя из условия соблюдения границ по напряжению и току. В отличие от обычного режима работы векторной системы, управление приводом в зоне ослабленного поля достигается регулированием не только проекцией i_{sq} , отвечающей за электромагнитный момент, но и проекцией i_{sd} , отвечающей за потокосцепление ротора.

2. В модифицированной системе управления также учитывается дополнительное ограничение на длительность работы привода в режиме ослабленного поля, которое не должно превышать максимальную длительность работы привода при максимально допустимом токе статора.

3. Рассмотрены два подхода для реализации алгоритма управления приводом при работе в области ослабленного поля. Первый из них основан на непосредственном расчете координат привода при ограничениях по току и напряжению, второй метод – на итерационном поиске требуемой рабочей точки. Работа итерационного алгоритма поясняется соответствующей блок-схемой.

4. На базе разработанной методики проведения компьютерного эксперимента получены данные в виде осциллограмм координат привода при полной загрузке привода и при частичной загрузке, соответствующей уменьшению вдвое скорости вращения. В обоих случаях моделировалось двухступенчатое снижение напряжения: 100-80-53% при полной загрузке и частичной загрузке.

5. Показано, что управление приводом в области ослабленного поля при провалах напряжения в сети питания позволяет обеспечить устойчивость электропривода при изменении напряжения звена в диапазоне от номинального

значения до минимально допустимого значения, определяемого по условию неизменности электромагнитного момента двигателя.

6. Установлено, что при значении напряжения ЗПТ, которое меньше минимально-допустимого значения напряжения, управление приводом в режиме ослабленного поля позволяет минимизировать снижение частоты вращения и электромагнитного момента при провале напряжения.

7. Показано, что при неполной загрузке разработанный алгоритм позволяет обеспечить требуемый режим привода при провале напряжения до значений минимально допустимого напряжения ЗНТ, которые меньше уставки срабатывания реле минимального напряжения. Такой режим возможен, если обеспечить минимизацию тока заряда конденсатора после восстановления напряжения.

8. Результаты компьютерного моделирования соответствуют основным положениям предложенного способа обеспечения устойчивости привода к провалам напряжения, и подтверждают результаты аналитических расчетов минимального напряжения ЗПТ как функций режимных параметров привода. Эти функции имеют разный вид в зависимости от соотношения между текущим значением электромагнитным моментом M_e и характеристическим моментом $M_{хар}$ - параметром зоны ослабленного поля, введенным для выделения рабочей области при относительно малых провалах напряжения $M_e \geq M_{хар}$ и области, соответствующей глубоким провалам $M_e \leq M_{хар}$.

ГЛАВА 5 ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АСИНХРОННОГО ЧРП ВО ВРЕМЯ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕКУПЕРАЦИИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

5.1 Вводные замечания

Как было показано выше, допустимая глубина провалов напряжения из условия сохранения заданного режима работы, зависит от пропускной способности инвертора по току, скорости вращения ротора, момента сопротивления приводного механизма, а также от ограничения по зарядному току конденсатора ЗПТ.

Управление приводом в зоне ослабленного поля позволяет обеспечить номинальный режим приводного механизма при снижении напряжения ЗПТ до 70% от номинального значения. В случае неполной загрузки привода по мощности сохранение требуемого режима возможно при остаточном напряжении, которое меньше уставки срабатывания защиты минимального напряжения $U_{\min}^{3МН} = 0.7U_{dc}^{ном}$. Для реализации такого режима необходимо иметь блок ограничения зарядного тока, так как при условии $U_{dc} < U_{\min}^{3МН}$ ток превышает допустимые значения кратковременных бросков токов полупроводниковых преобразователей. В этом случае необходимо изменять параметры реле минимального напряжения из условия срабатывания при минимально допустимом напряжении ЗПТ, определяемым для режима работы привода в зоне ослабленного поля.

Если напряжение ЗПТ принимает предельно низкие значения, то сохранение работы привода невозможно без использования дополнительных источников питания. Экономическая целесообразность применения таких устройств определяется соотношением между ущербом от нарушения технологического процесса и затратами на установку дополнительного оборудования.

В тех случаях, когда установка дополнительного оборудования не имеет достаточного экономического обоснования, основным критерием успешного

прохождения приводом аварийного состояния сети является минимизация времени повторного пуска привода, которое в идеальном случае должно совпадать с длительностью провалов напряжения.

Обычно при провалах напряжения происходит отключение привода от сети с последующим разрядом конденсатора на выбегающий двигатель. При восстановлении напряжения сети требуется инициализация ЗПТ и последующий повторный пуск.

Для уменьшения времени повторного пуска используется двухсторонне отключение ЗПТ с целью сохранения напряжения на время аварии. Последующий пуск на выбегающий двигатель производится с использованием устройства синхронизации напряжения инвертора с электромеханическими процессами в выбегающем двигателе. Синхронизация привода, как правило, осуществляется по критерию минимума тока при изменении частоты модулирующего сигнала ШИМ. Опыт показывает, что такой способ не всегда дает положительный эффект [4,39].

Одним из надежных и перспективных способов сохранения управляемости привода является использование кинетической энергии вращающихся масс привода и приводного механизма для преобразования в электрическую энергию конденсатора. Электрическая рекуперация энергии позволяет поддерживать напряжение ЗПТ на уровне, близком к номинальному значению [80,101], и сохранять я тем самым питания системы автоматического управления, осуществляющей контроль электромеханических процессов при выбеге двигателя.

Если обеспечить остаточное напряжение ЗПТ на уровне, близком к номинальному значению $U_{dc}^{ост} \approx U_{dc}^{НОМ}$, тогда при восстановлении напряжения броски тока будут существенно меньше, чем в случае использования уставки срабатывания ЗМН $U_{dc}^{ост} = 0.7U_{dc}^{НОМ}$ [50,94].

Основное достоинство способа заключается в его реализации программными средствами за счет изменения структуры системы управления

приводом без установки дополнительного оборудования в силовую часть преобразователя. Сохранение непрерывного взаимодействия преобразователя частоты и двигателя во время провалов напряжения позволяет приблизить длительность выбега двигателя ко времени существования аварийного режима сети и обеспечить тем самым минимизацию ущерба от временного пропадания напряжения.

Особый интерес представляет реализация режима рекуперации энергии в рамках современной тенденции развития “бездатчиковых” систем управления электроприводом [12,13,44,49,54,66,79,90]. Данная тенденция вызвана стремлением к уменьшению себестоимости и повышению надежности электропривода за счет исключения дополнительных элементов. В некоторых случаях отказ от применения датчиков скорости вызван конструктивными особенностями привода, исключающими возможность установки такого датчика, или требованиями по обеспечению безопасной эксплуатации привода в сложных условиях возможного возгорания или взрывов.

Известны способы реализации режима рекуперации в системах векторного управления электроприводом [80,96]. В разработках систем скалярного частотного управления без датчиков скорости вращения ротора, реализации режимов рекуперации уделено недостаточно внимания. В тоже время задача обеспечения непрерывной связи преобразователя и двигателя в таких системах во время провалов напряжения является ключевым моментом обеспечения работоспособности привода в целом. В силу широкого использования асинхронного ЧРП со скалярной системой управления для привода механизмов с вентиляторной характеристикой разработка надежного и эффективного электропривода имеет большое значение.

Глава посвящена разработке и исследованию системы управления «бездатчикового» асинхронного ЧРП со скалярной системой управления, реализующей режим рекуперации запасенной энергии привода в условиях провалов напряжения в сети. Глава построена следующим образом. Дается краткое описание работы системы скалярного управления на основе наблюдателя

скорости вращения ротора, на базе компьютерной модели рассматривается работа привода в основном и аварийном режимах, приводятся результаты исследования режима рекуперации, которые сравниваются с теоретической оценкой параметров выбега.

5.2 Скалярная система управления асинхронным электроприводом без датчика скорости

5.2.1 Обоснование наблюдателя скорости вращения

Для косвенного измерения скорости вращения ротора асинхронного двигателя $\omega = (\omega_s - \omega_r)/Z_p$ необходимо знать частоту тока статора ω_s и частоту ЭДС ротора ω_r . Частота ω_s задается законом управления частотно-регулируемым приводом, частота ω_r требует вычисления на основе непосредственно измеряемых величин – напряжения и тока статорных обмоток.

Рассмотрим определение скорости вращения ротора АД на основе зависимости активной составляющей тока статора от частоты ЭДС ротора. Для получения этой зависимости воспользуемся Г – образной схемой замещения АД (рисунок 5.1). Схема замещения построена для скалярной системы управления, в которой используется IR – компенсация. Функция компенсации падения напряжения на активном сопротивлении статора является стандартной в современных преобразователях частоты [64].

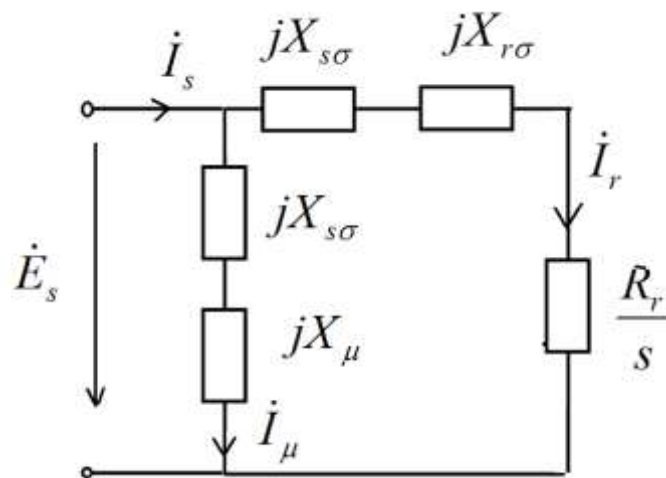


Рисунок 5.1 - Г-образная схема замещения АД с учетом IR – компенсации

Ток статора $\dot{I}_s = I_{sa} - jI_{sr}$ определяется напряжением и проводимостью ветвей схемы замещения АД

$$I_{sa} = \frac{E_s (R_r/s)}{(R_r/s)^2 + (X_{r\sigma} + X_{s\sigma})^2}, \quad (5.1)$$

$$I_{sp} = \frac{E_s (X_{r\sigma} + X_{s\sigma})}{(R_r/s)^2 + (X_{r\sigma} + X_{s\sigma})^2} + \frac{E_s}{X_{s\sigma} + X_m}, \quad (5.2)$$

где R_r – активное сопротивление ротора, $X_{r\sigma}$, $X_{s\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния ротора и статора, s – скольжение.

Для получения явной зависимости активной составляющей тока от частоты тока ротора преобразуем формулу (4.1) с учетом закона управления $(E/\omega_s) = \kappa_y = \text{const}$ и выражения $s = \omega_r/\omega_s$:

$$I_{sa} = \frac{\kappa_y \omega_r / R_r}{1 + \omega_r^2 \tau^2}, \quad \tau = (L_{s\sigma} + L_{r\sigma})/R_r. \quad (5.3)$$

С учетом малости величины $\omega_r \tau \ll 1$ выполним линеаризацию зависимости (5.3).

$$I_{sa} = k_a \omega_r \quad (5.4)$$

Коэффициент пропорциональности k_a определим из условия совпадения нелинейной зависимости (4.3) с линеаризованной функцией (4.4) в номинальном режиме:

$$k_a = \frac{\kappa_y \omega_r^{\text{НОМ}}}{R_r} \frac{1}{1 + (\omega_r^{\text{НОМ}} \tau)^2} = \frac{I_{sa}^{\text{НОМ}}}{\omega_r^{\text{НОМ}}}. \quad (5.5)$$

Активная составляющая тока статора и частота тока ротора в номинальном режиме определяются по паспортным данным двигателя

$$\omega_r^{\text{НОМ}} = \omega_0^{\text{НОМ}} s_{\text{НОМ}}, \quad I_{sa}^{\text{НОМ}} = I^{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}}.$$

Оценка частоты скольжения по измеренному значению активной составляющей тока статора позволяет определить скорость вращения ротора по формуле:

$$\omega = (\omega_s - k_\omega I_{sa})/Z_p, \quad k_\omega = 1/k_a, \quad (5.6)$$

здесь Z_p – число пар полюсов.

Для оценки текущего значения активной составляющей тока используется представление величин в неподвижной α, β и системе координат x, y , вращающейся со скоростью ω_s (рисунок 5.2). В качестве базового вектора принят обобщенный вектор напряжения статора.

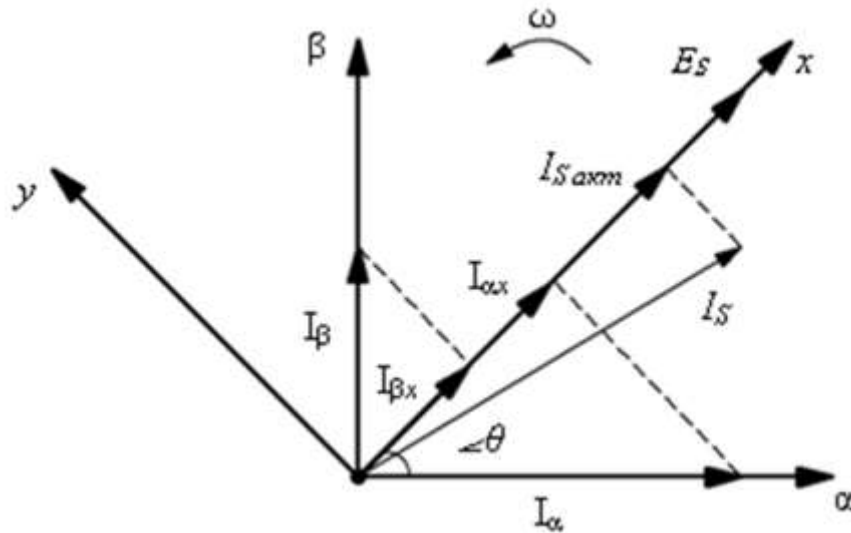


Рисунок 5.2 - Схема вычисления активной составляющей тока статора

Положение вектора θ основной гармоники напряжения \vec{E}_s задается обобщенным вектором системы модулирующих напряжений ШИМ инвертора \vec{e}_s , который ориентирован вдоль оси x

$$\theta(t) = \int_0^t \omega_s(t) dt \quad (5.7)$$

При известном угле положения θ и измеренных α, β – компонентах вектора тока \vec{I}_s активная составляющая тока I_{sa} вычисляется как сумма проекций токов i_α и i_β на ось x :

$$I_{sa} = i_\alpha \cos\theta + i_\beta \sin\theta. \quad (5.8)$$

Для получения проекций i_α и i_β по измеренным токам i_a, i_b, i_c используется преобразование:

$$i_\alpha = i_a, \quad i_\beta = (i_b - i_c)/\sqrt{3}. \quad (5.9)$$

Найдем ошибку вычисления частоты скольжения по линеаризованной

формуле

$$W = (1 - \omega_r^* / \omega_r) \cdot 100\%, \quad (5.10)$$

где ω_r^* – оценка частоты скольжения, ω_r – решение уравнения (3) для рабочего участка механической характеристики

$$\omega_r = \frac{\kappa_y}{2R_r \tau^2 I_{sa}} + \sqrt{\frac{\kappa_y^2}{(2R_r \tau^2 I_{sa})^2} - \frac{1}{\tau^2}}. \quad (5.11)$$

Из формулы (5.11) следует, что при использовании IR -компенсации погрешность линеаризации зависит от параметров схемы замещения и не зависит от частоты поля статора.

График зависимости относительной погрешности линеаризации от скольжения для двигателей разной мощности 7.5, 37 и 160 кВт показан на рисунке 5.3. Влияние мощности двигателя на погрешность связано с зависимостью параметра τ от мощности. Например, для двигателя мощностью 160 кВт имеем $\tau^2 \approx 10^{-3}$, для двигателя 7,5 кВт - $\tau^2 \approx 10^{-5}$.

Из графиков видно, что при снижении механической нагрузки двигателя погрешность линеаризации возрастает до значения $W = 1.6\%$.

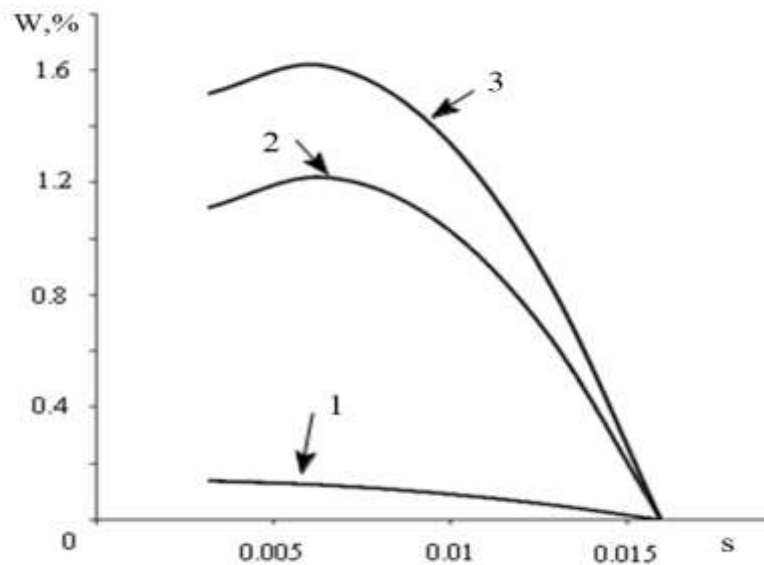


Рисунок 5.3 - Относительная погрешность определения частоты скольжения для двигателей мощностью 7.5 кВт (кривая 1), мощностью 37 кВт (кривая 2) и мощностью 160 кВт (кривая 3)

5.2.2 Структура системы скалярного управления асинхронным приводом без датчика скорости вращения ротора

Исследование предложенного способа бездатчикового определения скорости вращения ротора в системе скалярного управления асинхронным двигателем выполнено с помощью модели привода в среде MatLab/Simulink.

Модель включает асинхронный двигатель, автономный инвертор напряжения, модель вентиляторной нагрузки, датчики тока и блок синусоидальной ШИМ. Использовался двигатель ВАСО-37-14 с параметрами [35]: $P_{ном}=37\text{кВт}$, $U_{ф.н.}=220\text{ В}$, $\omega_s=45,2\text{ рад/с}$, $s=0,026$, $R_s=0,084\text{ Ом}$, $L_{\sigma s}=0,0009\text{ Гн}$, $R_r'=0,0564\text{ Ом}$, $L_{\sigma r}'=0,0011\text{ Гн}$, $L_m=0,0109\text{ Гн}$, $U_{dc}=540\text{ В}$, $J=18\text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $C=22\text{ мФ}$.

Структура системы управления показана на рисунке 5.4. Входными сигналами для системы управления служат токи статора i_a, i_b, i_c , которые затем преобразуются в проекции вращающегося вектора на оси α, β стационарной системы координат.

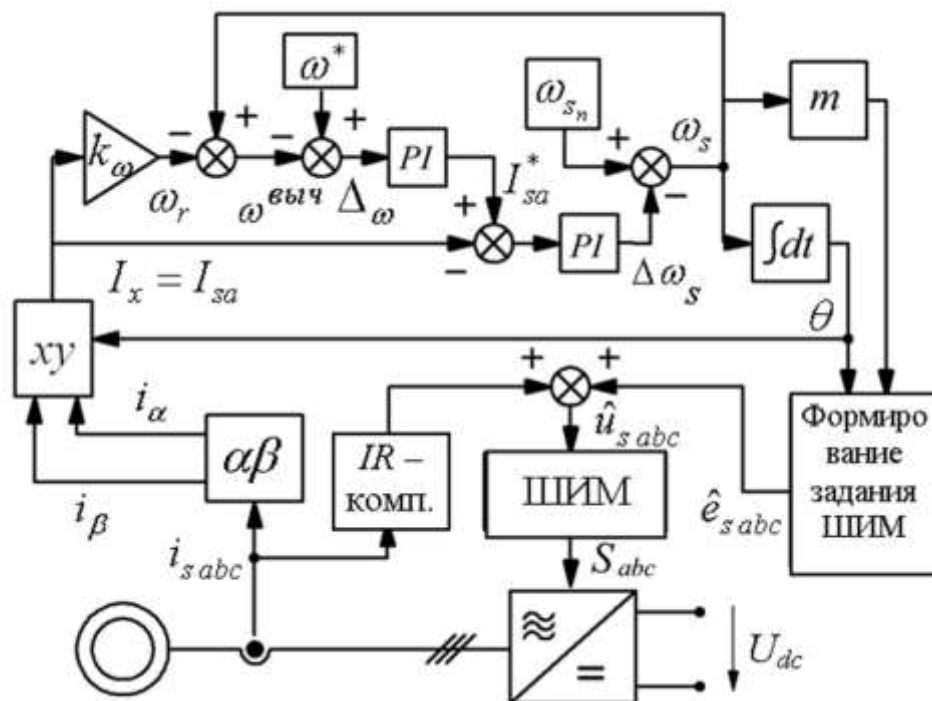


Рисунок 5.4 - Структурная схема скалярного управления асинхронным приводом без датчика скорости вращения ротора

Используя данные о положении θ обобщенного вектора трехфазной системы модулирующих напряжений, α, β – компоненты проецируются на ось x вращающейся системы координат. Проекции $I_{\alpha x}, I_{\beta x}$ формируют активную составляющую тока статора I_{sa} .

Частота скольжения оценивается по линейной зависимости $\omega_r = k_\omega I_{sa}$. Сравнение вычисленной частоты вращения ротора по формуле (5) с заданным значением тока дает ошибку $\Delta_\omega = \omega^* - \omega^{est}$, которая поступает на вход ПИ-регулятора скорости, выходом которого является задание по активной составляющей тока I_{sa}^* для внутреннего контура регулирования тока.

Выходным сигналом ПИ-регулятора тока является величина $\Delta\omega_s$, с помощью которой формируется частота модулирующего напряжения $\omega_s = \omega_{s_{nom}} - \Delta\omega_s$, где $\omega_{s_{nom}}$ – номинальная частота. Частота ω_s используется для формирования с помощью интегратора угла θ , а также коэффициента модуляции m . Коэффициент модуляции при законе регулирования $E/\omega_s = const$ определяется как отношение частот $m = \omega_s / \omega_{s_{nom}}$. По относительной амплитуде m и текущему углу $\theta(t)$ формируется симметричная трехфазная система модулирующих сигналов $\hat{e}_a(t), \hat{e}_b(t), \hat{e}_c(t)$, которая затем корректируется слагаемыми, учитывающими ИР – компенсацию [26]. Сравнение полученных модулирующих напряжений $\hat{u}_a(t), \hat{u}_b(t), \hat{u}_c(t)$ с опорным сигналом ШИМ дает функции переключения S_a, S_b, S_c , управляющие IGBT – модулями инвертора напряжения.

Задача моделирования состояла в оценке погрешности косвенного определения скорости ротора в зависимости от нагрузки привода и соотношении этой погрешности с точностью современных бездатчиковых систем векторного управления, которая в соответствии с данными работы [13,12] составляет $\pm 1\%$.

Для оценки погрешности использовались данные измерительного блока двигателя $\omega^{изм}$ и данные расчета скорости системой управления $\omega^{выч}$

$$W_{\omega} = \frac{\omega^{\text{ИЗМ}} - \omega^{\text{ВЫЧ}}}{\omega^{\text{ИЗМ}}} \cdot 100\% \quad (5.12)$$

Исследование предложенной системы управления электроприводом производилось следующим образом. Сначала осуществлялся разгон двигателя до номинальной частоты вращения, и затем включалась система регулирования скорости. В системе регулирования задавалось ступенчатое изменение скорости вращения по закону:

$$\hat{\omega}(t) = 1 - \sum_{k=1}^{10} \Delta\hat{\omega} \delta_1(t - kT_1) \quad (5.13)$$

где δ_1 – единичная ступенчатая функция, $\Delta\hat{\omega}$ – шаг приращения скорости, T_1 – длительность одной ступени приращения.

Время $T_1 = 2\text{с}$ выбрано из условия получения стационарного режима на каждом шаге изменения скорости $\Delta\hat{\omega} = 0.1$. На последнем шаге приращение скорости составляло $\Delta\hat{\omega} = 0.05$.

Графики скорости вращения ротора и относительная ошибка ее оценки по формуле (5.12) представлены на рисунке 5.5. Из рисунка следует, что с уменьшением задания по скорости растет ошибка оценивания. Такой же вывод вытекает из результатов теоретического анализа (рис.5.3). В диапазоне относительных скоростей от 1 до 0,1 статическая ошибка не превышает 0,5%. При уменьшении скорости вращения до значения 0,05, ошибка увеличивается до 1,5%.

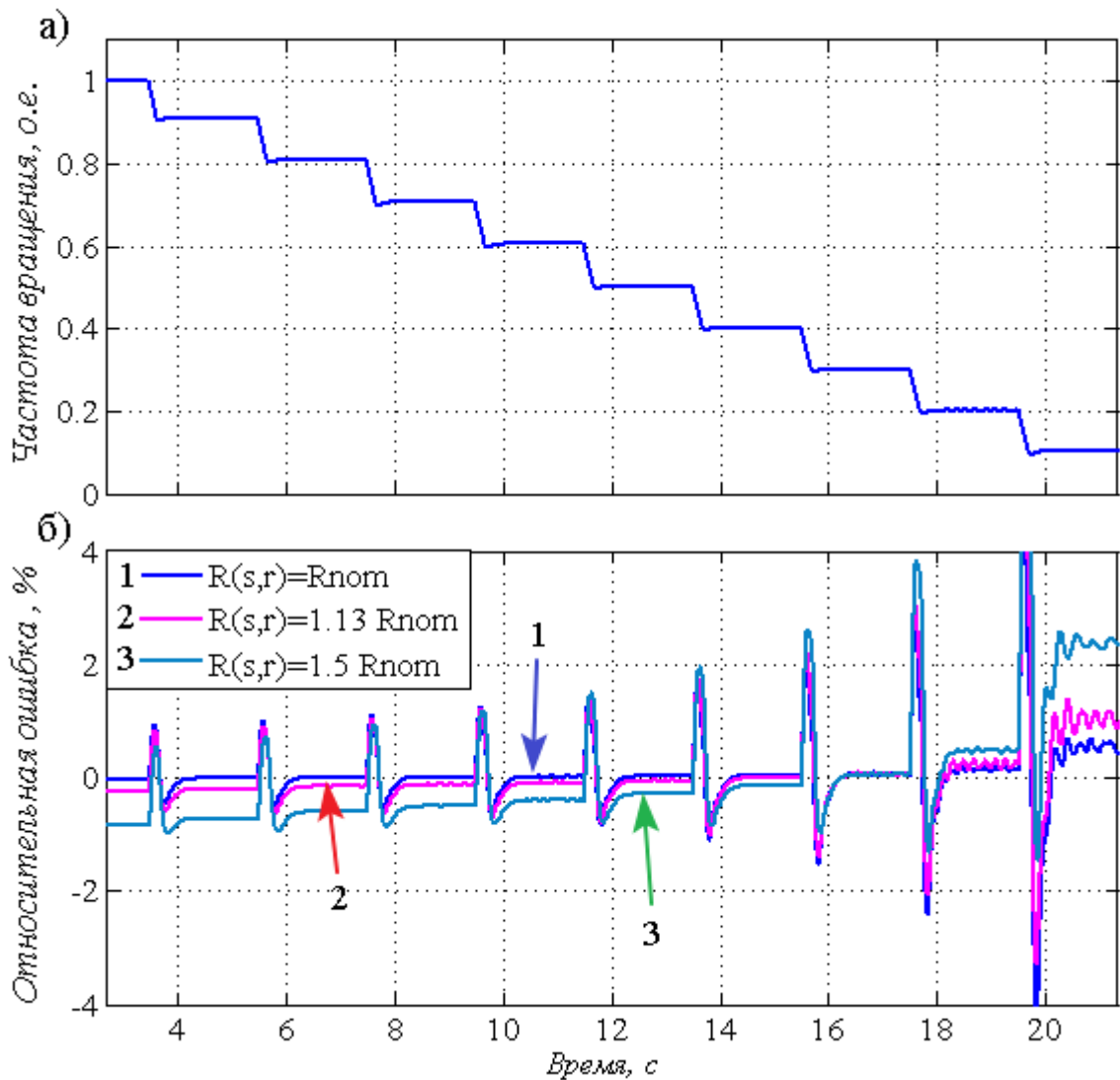


Рисунок 5.5 - Скорость вращения ротора ω – а). Относительная ошибка оценивания скорости вращения ротора при номинальных значениях параметров (кривая 1) и при изменении сопротивления ротора и статора на 13% (кривая 2) и на 50% (кривая 3)- б)

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что представленная система бездатчикового скалярного управления электроприводом позволяет осуществлять регулирование скорости вращения ротора в диапазоне 1:10 с ошибкой косвенного вычисления скорости, не превышающей ошибки, характерной для бездатчиковых систем векторного управления $W_{\omega} \leq 1\%$.

Полученные результаты справедливы для случая, когда параметры двигателя соответствуют паспортным данным. Однако эксплуатационные параметры двигателя могут отличаться от номинальных значений вследствие их зависимости от ряда факторов и влиять тем самым на оценку скорости с помощью

наблюдателя [12,15]. Рассмотрим влияние температурной зависимости $R(T)$ активных сопротивлений обмоток статора и ротора [35] на ошибку косвенного измерения скорости:

$$R(T) = R^{(20)} [1 + \alpha(T - 20)] \quad (5.14)$$

Здесь $R^{(20)}$ – сопротивление при температуре $T = 20^\circ\text{C}$, $\alpha = 0.004$ – температурный коэффициент сопротивления меди.

Для оценки погрешности наблюдателя сохраним в системе управления исходные параметры, а в компьютерной модели исследуемого двигателя установим другие значения сопротивлений ротора и статора, которые вследствие нагрева двигателя превышают номинальные значения сначала на 13 % (кривая 2) и затем на 50 % (кривая 3).

Из полученных данных следует, что при изменении сопротивлений на 13% ошибка не превышает $W \leq 1\%$ в диапазоне регулирования скорости 1:10, достигая предельно допустимого значения для относительной скорости $\hat{\omega} = 0.1$.

При отклонении сопротивления от номинального значения на 50% ошибка достигает $W = -1\%$ при номинальной скорости $\hat{\omega} = 1$ и значения $W = 2\%$ при скорости $\hat{\omega} = 0.1$. В последнем случае область регулирования при условии $W \leq 1\%$ снижается до интервала 1:5 по сравнению с диапазоном 1:10, который имеет место в случае оценки скорости в номинальном режиме.

Полученные характеристики бездатчикового привода со скалярным законом частотного управления удовлетворяют требованиям наиболее распространенных приводных механизмов, имеющих вентиляторную характеристику, например вентиляторов главного проветривания шахт [69], аппаратов воздушного охлаждения [33] и др.

5.3 Работа привода в нормальных условиях эксплуатации

Рассмотрим основные процессы в системе «выпрямитель – конденсатор – ШИМ инвертор – асинхронный двигатель» в двигательном режиме. Осциллограммы входного тока инвертора и фазных токов двигателя, полученные при моделировании процессов в среде *Simulink MatLab*, показаны на рисунке 5.6.

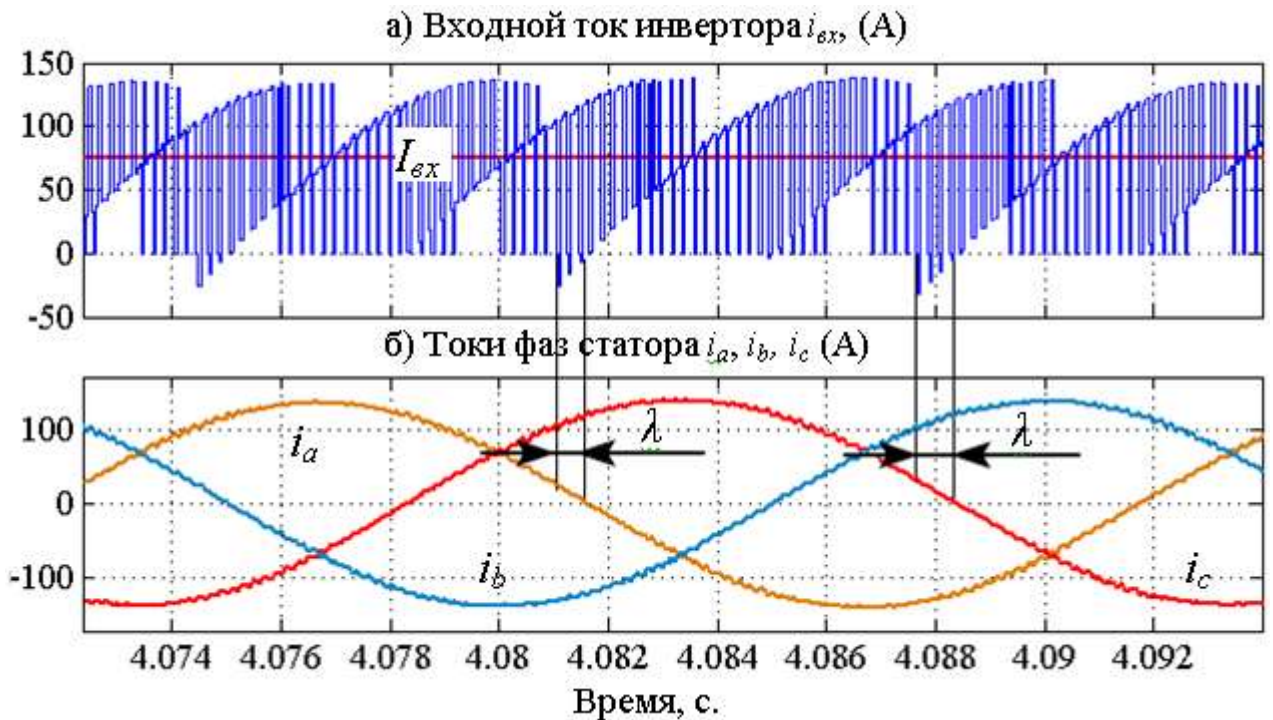


Рисунок 5.6 - Осциллограммы токов на входе инвертора – а) и в обмотках статора – б)

Входной ток инвертора $i_{вх}(t)$ представляет собой последовательность импульсов, которые имеют как положительную, так и отрицательную полярность. Положительной полярности соответствует проводящее состояние ключей, отрицательной полярности в течение времени λ – проводящее состояние обратных диодов. Положительному значению усредненного входного тока инвертора $I_{вх}$ соответствует поток энергии от источника к нагрузке, который определяет мощность, развиваемую двигателем $P = 3P_{\phi}$.

Мощность фазы двигателя определяется основными гармониками тока и напряжения и углом сдвига фаз между ними. Для идеального инвертора мощность, отдаваемая звеном постоянного тока $P_{вх} = U_{dc} I_{вх}$, равна мощности двигателя $P = 3/2 U_{ml} I_{ml} \cos\varphi$.

Учитывая связь между амплитудой первой гармоникой фазного напряжения и напряжением ЗПТ $U_{m1} = mU_{dc}/2$, где m – коэффициент модуляции, получим, что усредненный ток инвертора $I_{вх}$ пропорционален активной составляющей тока двигателя, отвечающей за преобразование электрической энергии в механическую энергию

$$I_{вх} = 3/4 m I_{m1} \cos\varphi = 3/4 m I_{та} \quad (6.15)$$

В нормальных условиях напряжение конденсатора поддерживается на требуемом уровне за счет энергии, потребляемой преобразователем от сети.

5.4 Поведение привода при провалах напряжения в сети

При провалах напряжения диоды выпрямителя переходят в закрытое состояние и блокируют поступление энергии из сети, что приводит к разряду конденсатора на нагрузку. Время достижения напряжением конденсатора напряжения срабатывания защиты минимального напряжения в сравнении с длительностью провала напряжения является важным параметром кривой устойчивости привода (рис.2.1) . В связи с этим важно представлять характер зависимости $U_{dc}(t)$ и как влияют параметры привода и приводного механизма на разряд накопительного конденсатора.

5.4.1 Приближенные методы оценки параметров разряда конденсатора ЗПТ при провалах напряжения сети

Оценку параметров разряда конденсатора обычно производят с помощью уравнения энергетического баланса [74] , из которого получают кривую разряда конденсатора:

$$U_{dc}(t) = \sqrt{U_{dc}^{ном2} - \frac{2 \cdot P_{нагр}}{C} \cdot t} \quad (5.16)$$

Здесь $U_{dc}^{ном}$ – номинальное значение напряжения ЗПТ, C – емкость конденсатора, $P_{нагр}$ – нагрузка привода.

Выражение (5.16) получено в предположении, что на интервале наблюдения, которое намного меньше времени выбега двигателя, мощность

нагрузки остается неизменной. Эта формула используется для расчета емкости ЗПТ [20,52,101]. Исходными данными для расчета является время срабатывания реле минимального напряжения $T = 20 - 40$ мс и уровень срабатывания $U_{dc}(T) = U_{dc\text{ мин}}$, который выбирается в пределах 60-80% от номинального значения $U_{dc\text{ ном}}$:

$$C = \frac{2 \cdot P_{\text{ном}} \cdot T}{(U_{dc\text{ ном}})^2 - (U_{dc\text{ мин}})^2} \quad (5.17)$$

Анализ выражения (5.16) показывает, что изменение напряжения конденсатора ЗПТ во время разряда зависит от мощности, потребляемой нагрузкой привода. Для нахождения параметров новой кривой устойчивости необходимо знать влияние нагрузки на зависимость $U_{dc}(t)$ в диапазоне, характерном для скалярного закона управления $\omega = (0.1 - 1.0)\omega_{\text{ном}}$. Знание такой зависимости позволяет пользователю устанавливать параметры срабатывания ЗМН для различных условий работы привода. Отметим, что изменение параметров кривой устойчивости может производиться автоматически средствами системы управления по результатам измерения режимных параметров привода.

5.4.2 Оценка параметров кривой устойчивости по результатам компьютерного моделирования

Для получения зависимости $U_{dc}(t)$ при различных режимах работы воспользуемся компьютерным моделированием электропривода со скалярной системой управления в нормальном режиме и в режиме свободного выбега после исчезновения напряжения питания для случая, когда нагрузка привода двигателя задана механической характеристикой вентиляторного типа, для которой зависимость мощности от скорости вращения выражается формулой:

$$P_{\text{нагр}}(\omega) = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}^3} \cdot \omega^3 \quad (5.18)$$

Мощность нагрузки в номинальном режиме работы принята равной номинальной мощности двигателя $P_{\text{нагр}} = P_{\text{ном}}$, частота вращения - $\omega_{\text{ном}} = \omega_s - s \cdot \omega_s = 43.9 \text{ рад/с}$. Ёмкость конденсатора ЗПТ при параметрах кривой устойчивости $T=0,04 \text{ с}$, $U_{\text{dc}}^{\text{ЗМН}}=380 \text{ В}$, рассчитанная по формуле (5.17), равна $C=0,022 \text{ Ф}$.

Цель компьютерного эксперимента состояла в получении закономерностей изменения режимных параметров привода в процессе выбега при различных начальных условиях, определяемых типом механической характеристики и загруженностью привода по мощности до появления провала напряжения. Режим работы задавался путем изменения заданий по скорости в диапазоне $\bar{\omega} = \omega/\omega_{\text{ном}} = 0.1, 0.2 \dots 1.0$

На рисунке 5.7 представлены типичные осциллограммы режимных параметров привода вентиляторной установки: механической мощности, скорости вращения ротора, активной составляющей тока статора, напряжения звена постоянного тока при возникновении провала напряжения глубиной 100% в момент $t_1 = 5 \text{ с}$, после которого начинается разряд конденсатора.

Из рассмотрения кривой разряда конденсатора следует, что зависимость $U_{\text{dc}}(t)$ можно аппроксимировать линейной функцией с угловым коэффициентом K_u .

$$U_{\text{dc}}(t) = U_{\text{dcnom}} - K_u(t - t_1) \cdot \delta_1(t - t_1) \quad (5.19)$$

Здесь t_1 – момент появления провала напряжения δ_1 – единичная ступенчатая функция.

Угловой коэффициент линейной функции K_u определяется через приращения

$$K_u = \Delta U_{\text{dc}} / \Delta T \quad (5.20)$$

Эксперимент показал, что скорость разряда конденсатора зависит от загруженности двигателя по мощности.

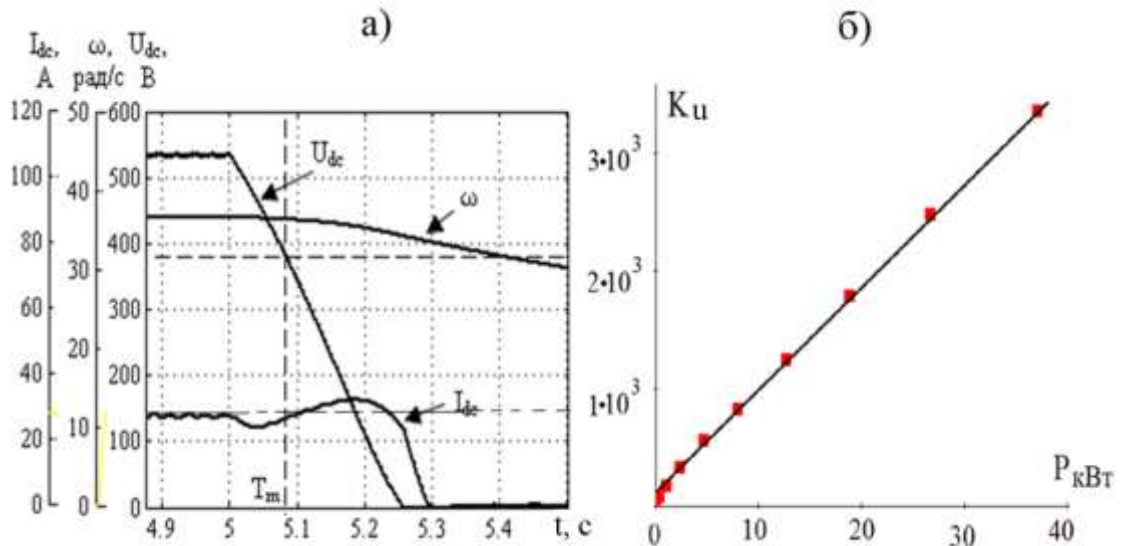


Рисунок 5.7 - Осциллограммы параметров режима выбегающего двигателя – а) и аппроксимация углового коэффициента линеаризованной зависимости кривой разряда конденсатора – б)

Зависимость углового коэффициента от мощности нагрузки как видно из рисунка 4.7б можно аппроксимировать линейной функцией

$$K_u(P) = k_0 + \nu P, \quad (5.21)$$

где $k_0 = 120$, $\nu = 0.087$

Тогда кривую разряда напряжения, полученную в условиях эксперимента, можно рассматривать как функцию мощности привода:

$$U_{dc}(t, P) = U_{dcnom} - (k_0 + \nu P) \cdot (t - t_1) \cdot \delta_1(t - t_1) \quad (5.22)$$

Сравним линейную зависимость (5.22) и нелинейную зависимость (5.16) по точности оценки параметра T кривой устойчивости относительно данных компьютерного моделирования. На рисунках 5.8а и 5.9-а представлены кривые разряда конденсатора, полученные расчетным путем в среде MathCAD по формулам (5.16) и (5.22), на рисунках 5.8б и 5.9б – результаты моделирования в среде MatLab.

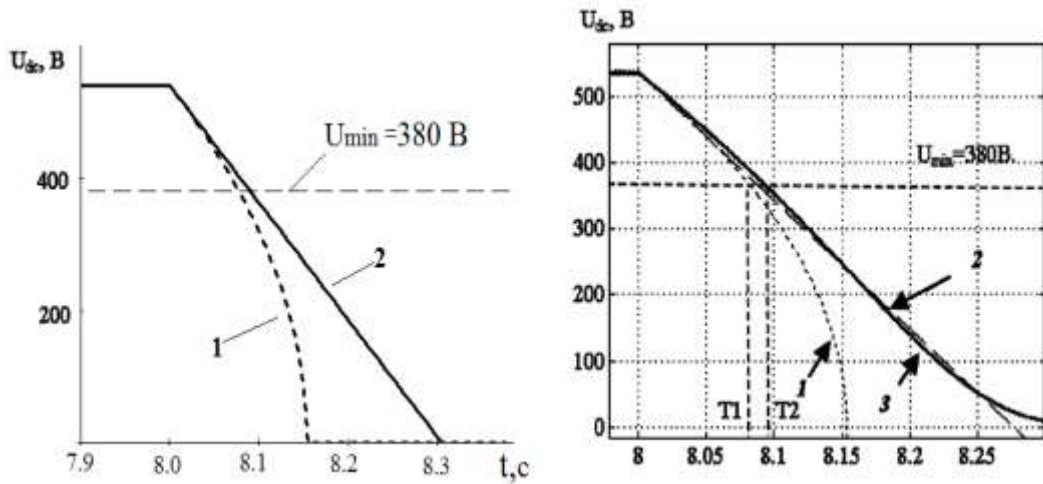


Рисунок 5.8 - Расчет кривых разряда в среде MathCAD по формуле (5.16) – (кривая 1) и по формуле (5.22) – (кривая 2) и результаты моделирования в среде MatLab – (кривая 3). Исходные параметры режима привода: $\hat{\omega} = 0.8$, $\hat{P} = 0.51$

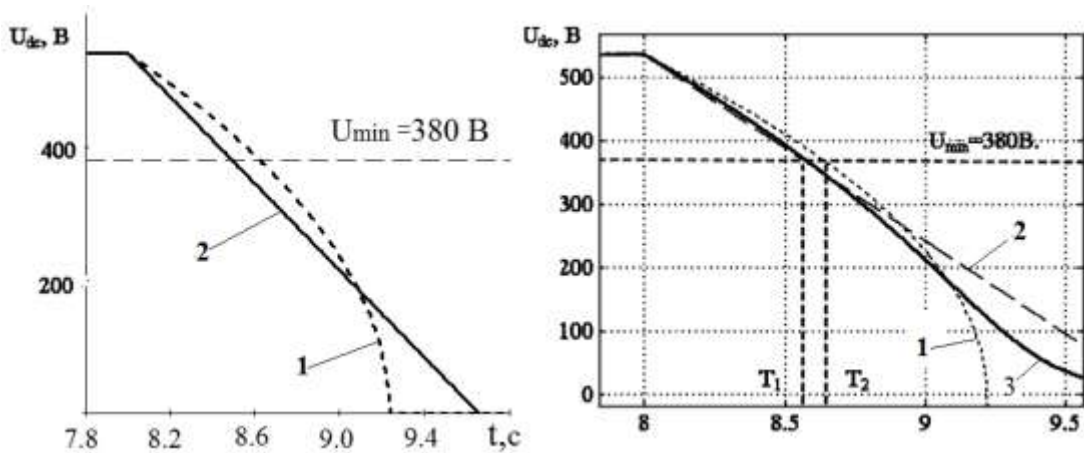


Рисунок 5.9 - Расчет кривых разряда в среде MathCAD по формуле (4.16) – (кривая 1) и по формуле (4.22) – (кривая 2), результаты моделирования в среде MatLab – (кривая 3). Исходные параметры режима привода: $\hat{\omega} = 0.4$, $\hat{P} = 0.064$

Из графиков следует, что использование линейной зависимости (5.22) дает лучшее приближение к эксперименту, нежели нелинейная зависимость (5.16).

Аппроксимация кривой разряда конденсатора кусочно-линейной функцией соответствует примерно постоянному значению разрядного тока $I_{\text{ВХ}}$ (рис.5.7а), которое определяется по предшествующему режиму работы привода. Это позволяет предложить модель разряда в виде

$$U_{\text{dc}}(t) = U_{\text{dc}}^{\text{НОМ}} - \frac{I_{\text{ВХ}}}{C} \cdot t. \quad (5.23)$$

Ток $I_{\text{вх}}$ в стационарном режиме связан с амплитудой активной составляющей тока двигателя в номинальном режиме $I_{\text{асm}}$ соотношением

$$I_{\text{вх}} = \frac{3}{4} \frac{1}{C} m I_{\text{сам}}, \quad I_{\text{асm}} = I_{\text{mnom}} \cos \varphi \quad (5.24)$$

Здесь m – коэффициент модуляции ШИМ инвертора, φ – угол сдвига фаз между основными гармониками напряжения и тока двигателя.

5.4.3 Погрешность расчета параметров кривой устойчивости привода

Для оценки параметров кривой устойчивости привода при провалах напряжения определим момент времени T (рис. 5.8б и 5.9б), при котором кривая разряда пересекает границу минимального напряжения для различной нагрузки привода. Погрешность оценки параметра T по формулам (5.16) и (5.23) относительно данных компьютерного эксперимента вычислим по формулам:

$$\delta_{\text{W}} = \frac{T_{\text{m}} - T_{\text{W}}}{T_{\text{m}}} \cdot 100\% ; \quad \delta_{\text{P}} = \frac{T_{\text{m}} - T_{\text{P}}}{T_{\text{m}}} \cdot 100\% \quad (5.25)$$

Здесь T_{m} – время разряда конденсатора до уровня срабатывания ЗМН, полученное из модели привода; T_{W} – время разряда конденсатора по выражению (4.16); T_{P} – время разряда конденсатора по выражению (5.23).

График зависимости относительной погрешности оценки параметра T от начальной скорости вращения привода представлен на рисунке 5.10.

Из анализа кривых следует, что при расчете времени разряда конденсатора по зависимости (5.23), ошибка определения времени разряда до напряжения срабатывания ЗМН относительно мала - в рабочем диапазоне скоростей вращения привода она не превышает 6%,

Ошибка определения времени разряда по выражению (5.16) оказывается выше и возрастает с уменьшением мощности нагрузки, достигая 70%. При этом, оценка времени срабатывания оказывается завышенной, что в реальной ситуации соответствует отказу в срабатывании ЗМН.

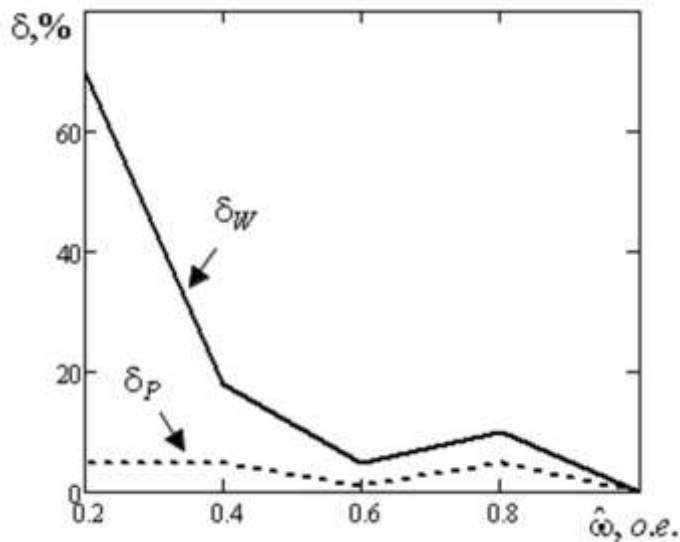


Рисунок 5.10 - Относительная ошибка определения параметра T в зависимости от скорости вращения двигателя в момент возникновения провала напряжения

5.5 Система управления приводом с реализацией режима рекуперации кинетической энергии

Если преобразователь не имеет защиты минимального напряжения, то конденсатор за короткое время полностью разряжается до нулевого уровня. Время разряда зависит от удельного значения емкости $\hat{C} = C/P_{\text{ном}}$ и загруженности привода по мощности $\hat{P} = P/P_{\text{ном}}$. Проблем, связанных с перезапуском выбегающего или остановленного двигателя можно избежать, если сохранить управляемость привода на время провалов напряжения сети за счет поддержания напряжения звена постоянного тока за счет преобразования кинетической энергии вращающихся частей привода в электрическую энергию конденсатора. Управление этим процессом в рассматриваемом приводе достигается использованием внешнего контура регулирования напряжения звена постоянного тока, на который переключается внешний контур регулирования скорости вращения двигателя в момент появления провала напряжения

Рассмотрим модифицированную систему скалярного частотного управления асинхронным приводом, в которой используется наблюдатель скорости вращения ротора, основанный на соотношении между скольжением и активной

составляющей тока статора. Структура двухконтурной системы починенного регулирования показана на рисунке 5.11.

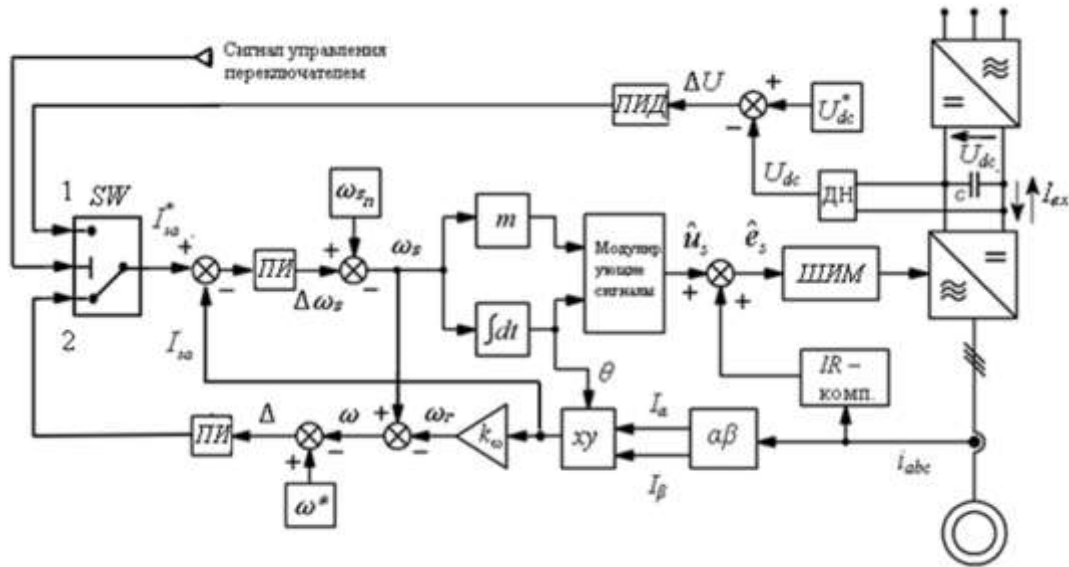


Рисунок 5.11 - Структура бездатчиковой скалярной системы управления асинхронным приводом в нормальном режиме и в режиме рекуперации кинетической энергии приводного механизма во время провалов напряжения сети

Модификация системы управления, описанной в разделе 5.2, состоит в том, что в режиме рекуперации в систему управления вводится дополнительный контур для регулирования напряжения звена постоянного тока по сигналу внешнего устройства контроля напряжения. В нормальных условиях переключатель SW находится в положении 1, в котором система управления работает в режиме поддержания заданной скорости вращения ротора ω^* путем регулирования активной составляющей тока статора I_{sa} .

При обнаружении провалов напряжения переключатель переходит в положение 2, в котором задание для внутреннего контура регулирования тока формируется дополнительным контуром регулирования напряжения ЗПТ. Регулирование напряжения достигается за счет изменения частоты основной гармоники выходного напряжения ПЧ в зависимости от скорости вращения ротора. При сравнении напряжения ЗПТ U_{dc} с заданием U_{dc}^* формируется сигнал ошибки ΔU_{dc} , который поступает на вход регулятора напряжения. Выходом

регулятора напряжения является задание активной составляющей тока статора I_{sa}^* , которое сравнивается с текущим значением этой величины I_{sa} . Все остальные преобразования осуществляются, так же как и в исходной структуре управления.

5.6. Рекуперативный режим работы асинхронного привода со скалярной системой частотного управления без датчика скорости в условиях провала напряжения в электрической сети

Исследование разработанной системы управления проводилось при помощи компьютерной модели привода, построенной в среде MatLab/Simulink.

Регулятор напряжения ЗПТ в дополнительном контуре должен обеспечивать минимальную длительность переходного процесса, минимальное перерегулирование и максимальную точность. Совокупность требований, предъявляемых к разрабатываемой системе управления, приводит к необходимости использовать во внешнем контуре регулирования напряжения ПИД закон управления.

Настройка ПИД регулятора напряжения (рисунок 5.11) производилась по методу Зиглера – Никольса [32]. В результате были получены следующие параметры регулятора:

- коэффициент пропорциональной составляющей $K_p = 6,07$;
- коэффициент интегральной составляющей $K_i = 109,5$;
- коэффициент дифференциальной составляющей $K_d = 0,215$.

До аварии в сети привод работал с частотой вращения $\omega = 43,9$ рад/с. В момент времени $t_1 = 5$ с. произошел трёхфазный провал напряжения глубиной 100% , в момент $t_2 = 6$ с. напряжение в сети восстановилось.

Если обнаружение провала напряжения производится по кривой разряда конденсатора $U_{dc}(t)$, то перевод системы управления в режим рекуперации происходит, когда контролируемое напряжение $U_{dc}(t_1)$ сравнивается с напряжением срабатывания реле рекуперации $U_{рек}$ в момент t_1 . Уставка U_{rec} выбирается из условия $U_{min}^{3МН} \leq U_{rec} \leq U_{dc\ nom}^{НОМ}$, где $U_{min}^{3МН}$ - уставка 3МН.

Если обнаружение провала напряжения и идентификация его типа осуществляется быстродействующим анализатором симметричных составляющих [92], тогда переход системы управления в режим рекуперации происходит без задержки во времени. В этом случае блок рекуперации поддерживает напряжение ЗПТ на номинальном уровне.

На рисунке 5.12 представлены временные зависимости скорости вращения ротора, электромагнитного момента, среднего значения входного тока инвертора и активной составляющей тока двигателя, напряжения ЗПТ и осциллограмма тока фазы А, на рисунке 5.13 – осциллограммы тока инвертора и токов фаз двигателя. Анализ полученных результатов позволяет выделить следующие особенности работы привода в режиме рекуперации.

Переход в режим рекуперации сопровождается уменьшением электромагнитного момента до нулевого значения, изменением знака и последующим возрастанием в связи с необходимостью компенсации потерь энергии в сопротивлении статора. Активная составляющая тока статора и входной ток инвертора изменяются аналогичным образом. Изменение знака этих величин соответствует переходу привода от двигательного режима к генераторному режиму работы. Переход привода в режим рекуперации происходит в течение времени $t_s = 0.4с$.

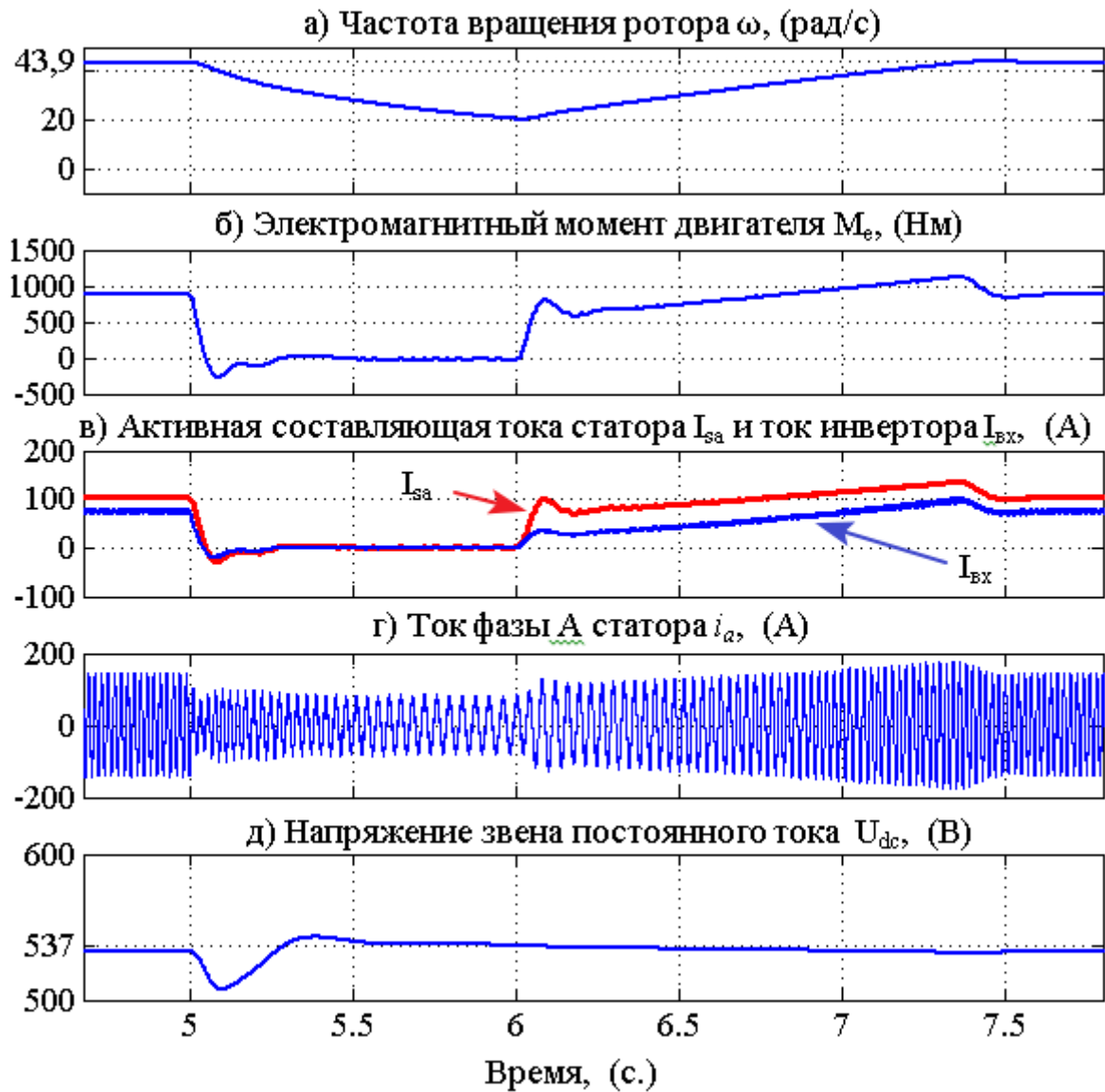


Рисунок 5.12 - Осциллограммы скорости вращения двигателя – а); электромагнитного момента – б) активной составляющей тока статора и среднего значения тока инвертора – в) фазного тока статора – г) напряжения ЗПТ– д.)

Переходной процесс сопровождается снижением напряжения ЗПТ на 2%, которое затем восстанавливается до заданного значения U_{dc}^{HOM} и поддерживается на этом уровне до момента восстановления нормального режима сети. При этом перерегулирование не превышает 0,5%.

Особенностью работы привода в режиме рекуперации является форма входного тока инвертора $i_{вх}(t)$ (рис.5.13а), для которой характерна симметрия относительно оси времени, а также равенство длительности проводящего состояния обратных диода λ и длительности проводящего состояния

транзисторов моста инвертора, что примерно соответствует предельному режиму работы инвертора [20].

Равенство среднего значения тока на входе инвертора нулю означает сохранение напряжения конденсатора ЗПТ на заданном уровне. Фазные токи двигателя в режиме рекуперации носят реактивный характер.

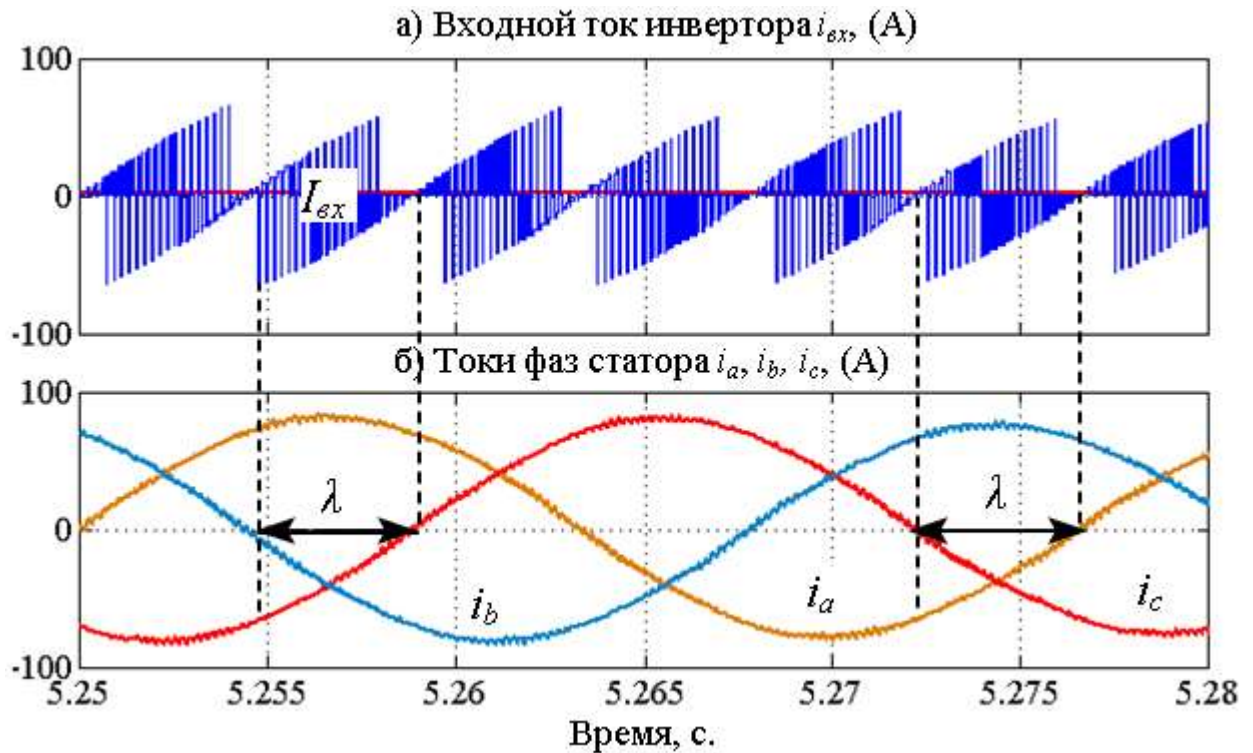


Рисунок 5.13 - Осциллограммы входного тока инвертора – а) и фазных токов двигателя – б)

Амплитуда тока равна амплитуде реактивного тока статора в нормальном режиме до перехода привода в режим рекуперации.

Приведенные кривые показывают, что при провале напряжения сети синхронизация преобразователя и двигателя не прерывается, что позволяет осуществить контролируемый повторный пуск в момент восстановления напряжения сети $t_2 = 6с.$ К моменту повторного пуска скорость вращения уменьшилась на 50% и составила $\omega(t_2) = 22\text{рад/с.}$

После восстановления напряжения система управления переходит к структуре, соответствующей нормальному режиму работы, и осуществляет разгон привода до скорости, которая была до возникновения провала напряжения. Необходимо отметить, что при повторном пуске потребляемый приводом ток не

превышает значения тока в нормальном режиме работы более чем в 1,5 раза, что является максимально допустимым значением для большинства ЧРП.

5.7 Оценка длительности работы привода в режиме рекуперации

Режим рекуперации кинетической энергии является эффективным решением проблемы сохранения управляемости приводом при глубоких провалах напряжения и перерывах электропитания в том случае, если максимально возможная длительность работы привода $T_{рек}$ в этом режиме будет больше длительности существования аварийного режима в сети. Поэтому важно представлять влияние на величину $T_{рек}$ различных факторов, включая характер и параметры механических характеристик приводного механизма, с тем, чтобы иметь возможность рассчитывать максимальную длительность рекуперации для конкретных видов ЧРП. Построение модели выбега двигателя в режиме рекуперации основывается на результатах компьютерного моделирования и теоретического анализа процессов.

5.7.1 Обсуждение результатов компьютерного моделирования

Исследования проводились с помощью компьютерной модели асинхронного привода, рассмотренного в предыдущем параграфе. Дополнительно в состав компьютерной модели введен блок вычисления реактивной составляющей тока статора:

$$I_{sp} = i_{\beta} \cos\theta - i_{\alpha} \sin\theta \quad (5.27)$$

Условия эксперимента следующие: до возникновения провалов напряжения в сети привод работал с номинальной скоростью и соответствующим электромагнитным моментом. В момент времени $t' = 5с$ с помощью управляемого источника трехфазного напряжения моделируется провал напряжения глубиной 100%, длительность которого превышает время выбега двигателя. Предполагается, что перевод системы управления производится без задержки во времени по сигналу безинерционной схемы обнаружения и идентификации

провалов напряжения на входе привода[58,92]. Результаты моделирования в приведены на рисунке 5.14.

Из графиков видно, что при переходе привода в режим рекуперации сначала наблюдается незначительное снижение напряжение ЗПТ на 2% . Уменьшение напряжения ЗПТ происходит на интервале времени до перехода электромагнитного момента M_e и активной составляющей тока статора I_{sa} через ноль в область отрицательных значений.

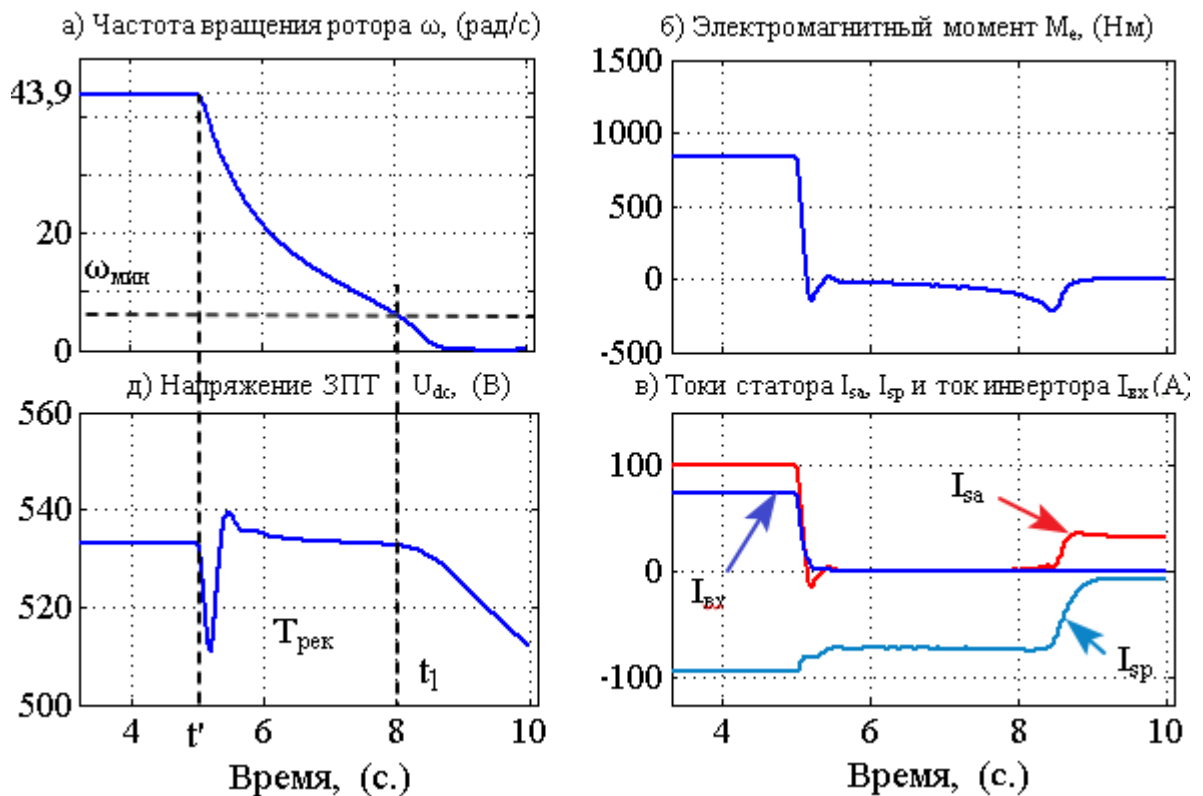


Рисунок 5.14 - Режимные параметры привода при рекуперации кинетической энергии во время провала напряжения глубиной 100%

При работе в генераторном режиме система управления осуществляет заряд конденсатора при 1%-ом перерегулировании, после чего напряжение устанавливается на заданном уровне $U_{dc}^* = U_{dc}^{(ном)}$.

В установившемся режиме с заданным напряжением значение U_{dc}^* среднее значение входного тока инвертора равно нулю. При этом активная составляющая тока статора и электромагнитный момент двигателя находятся в области отрицательных значений, что соответствует тормозному режиму двигателя. При

этом реактивная составляющая тока статора при работе привода в режиме рекуперации остаётся практически неизменной, численно равной амплитуде фазного тока двигателя до провала напряжения.

Из осциллограмм видно, что в интервале времени от 5 до 8с. напряжение звена постоянного тока поддерживается на требуемом уровне, после чего напряжение начинает падать. В момент остановки ротора $t_2 = 8.4\text{с}$ напряжение ЗПТ 98% от номинального значения.

Минимально допустимое для режима рекуперации снижение скорости вращения примем на уровне 10% от значения скорости ω_0 в момент начала режима рекуперации $t' = 0$, где $t' = t - t_1$

$$\omega_{\text{мин}} = \omega(T_{\text{рек}}) = 0.1\omega_0 \quad (5.28)$$

где $T_{\text{рек}}$ – максимально возможная длительность работы привода в режиме рекуперации

5.7.2 Теоретическая оценка предельного времени рекуперации

Время $T_{\text{рек}}$ находится из решения уравнения движения $\omega(t)$ [90], к которому применяется условие (5.28):

$$M_e - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad \omega(0) = \omega_0 \quad (5.29)$$

где M_e - электромагнитный момент электродвигателя, Нм; M_c - момент сопротивления механизма, Нм; J - приведенный момент инерции привода, кг·м²; t – время, с..

Значение электромагнитного момента в режиме рекуперации находится из уравнения баланса активной мощности цепи «звено постоянного тока – автономный инвертор – асинхронный электродвигатель»:

$$P_{\text{зпт}} = P_{\text{нагр}} + \Delta P, \quad (5.30)$$

Здесь $P_{\text{зпт}} = U_{\text{dc}} I_{\text{вх}}$ - активная мощность конденсатора звена постоянного тока, $P_{\text{нагр}}$ - активная мощность двигателем, ΔP - мощность потерь, Вт.

В установившемся режиме рекуперации среднее значение входного тока инвертора $I_{\text{вх}} = 0$ (рис.5.14в). Следовательно, мощность конденсатора звена постоянного тока также равна $P_c = 0$. Тогда уравнение (5.30) приобретает вид:

$$P_{\text{нагр}} = -\Delta P \quad (5.31)$$

Это соотношение означает, что в режиме рекуперации электродвигатель генерирует мощность, которая необходима для компенсации мощности потерь в АД, которая в основном определяется электрическими потерями в обмотках фаз статора.

$$\Delta P_s = 3 \cdot I_s^2 \cdot R_s \quad (5.32)$$

где I_s - действующее значение основной гармоники фазного тока статора, А.

Из графиков 5.14-в следует, в установившемся режиме ток статора имеет реактивный характер и практически не изменяется в процессе рекуперации. Аналогичный вывод следует из формулы (5.2) для реактивной составляющей тока статора.

Уравнение (5.2) состоит из двух слагаемых, из которых только первое зависит от скольжения s . Из графика зависимости скольжения от времени выбега $s(t)$ (рис. 5.15) видно, что на интервале рекуперации эта величина меньше номинального значения. Тогда первым слагаемым формулы (5.2) можно пренебречь

$$\frac{E_s (X_{r\sigma} + X_{s\sigma})}{(R_r/s)^2 + (X_{r\sigma} + X_{s\sigma})^2} \ll \frac{E_s}{X_{s\sigma} + X_m}$$

и реактивная составляющая тока будет определяться только вторым слагаемым.

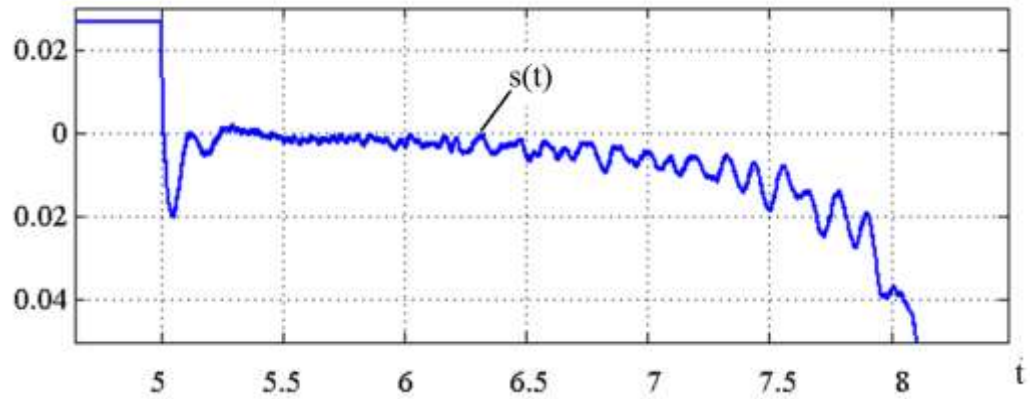


Рисунок 5.15 - Изменение скольжения на интервале рекуперации

С учетом выбранного закона управления $(E_s/\omega_s) = \kappa_y = \text{const}$ получим:

$$I_{sp} = \kappa_y / L_s \quad (5.33)$$

где L_s - полная индуктивность фазной обмотки статора.

С учетом постоянства реактивного тока получим, что мощность потерь двигателя при работе в режиме рекуперации так же является постоянной величиной:

$$\Delta P_s = 3 \cdot I_{sr}^2 \cdot R_s = \text{const} \quad (5.44)$$

Электромагнитный момент двигателя при работе в режиме рекуперации можно определить по формуле :

$$M_e^{\text{рек}} = -\frac{\Delta P_s}{\omega} \quad (5.45)$$

Уравнение движения электропривода в режиме рекуперации с учетом формулы электромагнитного момента и выражения для момента сопротивления вентиляторной нагрузки примет вид:

$$-\frac{\Delta P_s}{\omega} - K_f \cdot \omega^2 = J \frac{d\omega}{dt}, \quad \omega(0) = \omega_0 \quad (5.46)$$

где K_f – коэффициент пропорциональности, $K_f = P_{\text{ном}} / \omega_{\text{ном}}^3$, $P_{\text{ном}}$ - номинальная мощность электродвигателя; $\omega_{\text{ном}}$ - номинальная частота вращения ротора.

Решение уравнения (5.46) дает:

$$t(\omega) = \frac{W_{ke} \cdot \sqrt[3]{\rho}}{3 \cdot P_{nom}} \left(\ln \frac{(\sqrt[3]{\rho^2} \cdot \hat{\omega}^2 - \sqrt[3]{\rho} \cdot \hat{\omega} + 1)}{(\sqrt[3]{\rho} \cdot \hat{\omega} + 1)^2} + 2\sqrt{3} \operatorname{arctg} \left(\frac{2\sqrt[3]{\rho} \cdot \hat{\omega} - 1}{\sqrt{3}} \right) \right) \Big|_{\omega}^{\omega_0}, \quad (5.47)$$

$$\rho = P_{nom} / \Delta P; \quad W_{ke} = J \cdot \omega_{nom}^2 / 2; \quad \hat{\omega} = \omega / \omega_{nom}; \quad \omega_0 = \omega(0)$$

Полученная зависимость найти максимальную длительность работы привода в режиме рекуперации из уравнения:

$$T_{рек} = t(\omega_{min}), \quad \omega_{min} = 0.1\omega_0 \quad (5.48)$$

Из полученных выражений следует, что длительность работы привода в режиме рекуперации зависит от запаса кинетической энергии приводного механизма и требуемой электрической энергии в ЗПТ, отношения механической мощности нагрузки к мощности потерь в электродвигателе, а также от вида зависимости момента сопротивления приводного механизма от частоты вращения.

Результаты расчета и моделирования выбега двигателя в условиях рекуперации кинетической энергии показаны на рисунке 5.16.

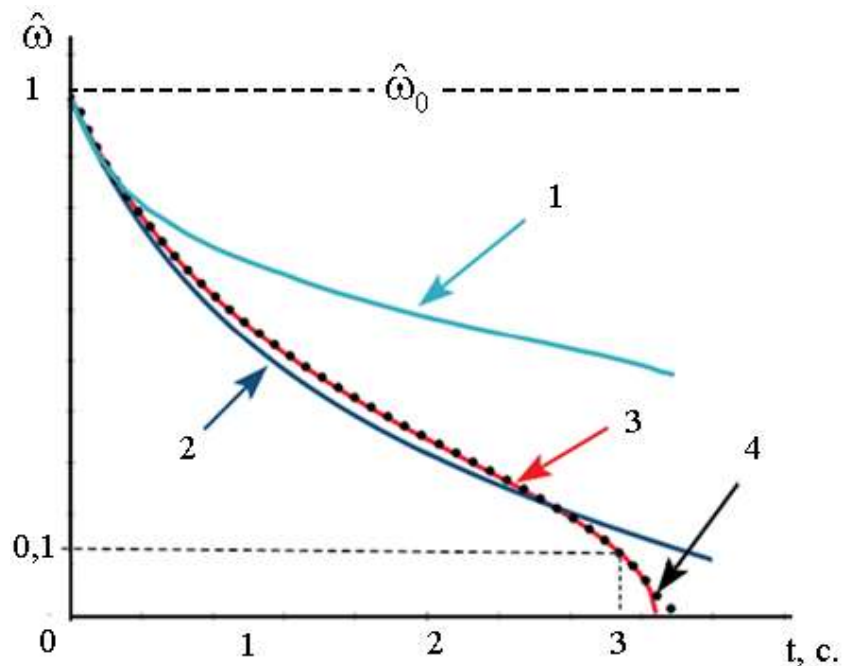


Рисунок 5.16 - Зависимость частоты вращения от времени на интервале рекуперации кинетической энергии и при свободном выбеге. Кривая 1- случай свободного выбега; кривая 2- расчетная зависимость выбега при рекуперации в предположении постоянства момента торможения; кривая 3 – расчетная зависимость выбега при рекуперации с учетом зависимости тормозного момента от скорости вращения; кривая 4, выделенная на графике точками - изменение частоты вращения в компьютерной модели привода

Сравнение расчетных кривых выбега, полученных при разных допущениях, с результатами компьютерного моделирования (кривая 4) показывает, что формула (5.47), в которой учтена зависимость тормозного электромагнитного момента от скорости вращения ротора, дает практически полное совпадения с результатами моделирования за исключением небольшой области выбега $\omega < 0.05\omega_0$.

Это позволяет рекомендовать формулы (5.47) и (5.48) для оценки максимально возможного времени работы привода в режиме рекуперации.

Рассмотрим влияние на выбег двигателя в режиме рекуперации других видов механических характеристик приводных механизмов.

Для механизмов, имеющих постоянный момент сопротивления $M_{C2}(\omega) = \text{const}$, и механизмов с прямо-пропорциональной зависимостью момента сопротивления от скорости вращения $M_{C3} = K_{f3} \cdot \omega$ решения уравнения движения в случае рекуперации кинетической энергии имеют вид:

$$t(\omega) = \ln \left(e^{\frac{J \cdot \hat{\omega}}{P_{\text{nom}}}} \cdot (\rho \cdot \hat{\omega} + 1)^{-J \frac{\Delta P}{M_c^2}} \right) \Bigg|_{\omega}^{\omega_0} \quad (5.49)$$

$$t(\omega) = \frac{W_{ke} \cdot \sqrt{\rho}}{P_{\text{nom}}} \cdot \ln(\rho \cdot \hat{\omega}^2 + 1) \Bigg|_{\omega}^{\omega_0} \quad (5.50)$$

Построим кривые зависимостей по выражениям (5.47), (5.49) и (5.50) при равных значениях запасенной кинетической энергии, мощности потерь и начальной частоты вращения (рис.5.17).

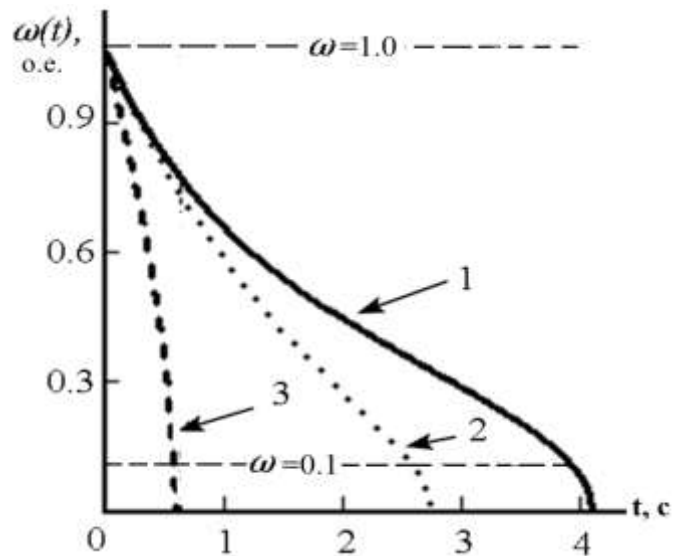


Рисунок 5.17 - Выбег двигателя при рекуперации кинетической энергии. Кривая 1- механическая характеристика $M(\omega) = K_f \cdot \omega^2$; кривая 2- механическая характеристика

$M(\omega) = K_f \cdot \omega$; кривая 3 – механическая характеристика $M(\omega) = const$

Сравнение кривых показывает, что при всех прочих равных условиях наибольшая длительность режима рекуперации наблюдается для механизмов с вентиляторной характеристикой.

5.8 Выводы по главе

1. Дано обоснование косвенного измерения скорости вращения асинхронного двигателя в приводе со скалярной системой частотного управления. Оценка частоты вращения производится по результатам $\alpha\beta$ -преобразования измеренных токов статора, нахождения активной составляющей тока и использовании линеаризованной зависимости активной составляющей тока от частоты тока ротора.

2. Предложена двухконтурная структура системы скалярного частотного управления асинхронным приводом без датчика скорости вращения. По результатам моделирования привода в среде MatLab/Simulink произведена оценка точности работы наблюдателя скорости. Показано, что в диапазоне регулирования скорости вращения ротора 1:10 относительная погрешность определения скорости не превышает 1% – значения, характерного для

бездатчиковых систем векторного управления. Показано, что для сохранения 1 %-ой точности оценки скорости изменение активного сопротивления статорной и роторной цепи двигателя не должно превышать 13 %.

3. На основе результатов компьютерного моделирования свободного выбега привода предложена линейная модель разряда конденсатора, которая точнее описывает процесс по сравнению с общепринятой нелинейной зависимостью, которая получена из уравнения баланса энергии. Предложена формула для расчета времени срабатывания ЗМН с точностью не хуже 6%, которая может быть рекомендована для использования в системе управления приводом с целью автоматического изменения параметров кривой устойчивости в зависимости от режима работы привода.

4. На основе двухконтурной системы скалярного управления предложена структура системы управления, реализующая режим рекуперации запасенной энергии привода для поддержания напряжения ЗПТ на номинальном уровне при возникновении провалов напряжения в сети. Управление этим процессом достигается переключением внешнего контура регулирования скорости вращения в нормальном режиме на внешний контур регулирования напряжения звена постоянного тока в режиме рекуперации.

5. Приведены результаты компьютерного моделирования привода в нормальном и аварийном режиме, дано описание процессов, характерных для перехода в режим рекуперации, стационарного режима рекуперации и для повторного пуска. Показано, что разработанная система управления позволяет поддерживать напряжение ЗПТ на номинальном уровне при глубине провала напряжения 100% и длительности 1с. Использование в контуре регулирования напряжения ЗПТ ПИД – регулятора обеспечивает длительность переходного процесса в режим рекуперации 0,4с. и перерегулирование 0,5%. Во время провала напряжения сохраняется управляемость приводом, что позволяет после восстановления питания обеспечить плавный разгон двигателя от скорости 22рад/с до первоначальной скорости 43,9рад/с. и восстановление тем самым

нормального режима работы привода. При повторном пуске вращающегося двигателя ток не превышает предельно допустимых значений.

6. На базе результатов исследования привода в режиме рекуперации кинетической энергии выявлена закономерность формирования электромагнитного тормозного момента, которая была использована для получения характеристик процесса выбега двигателя в режиме рекуперации в зависимости от параметров двигателя и параметров приводного механизма.

7. Эффективность применения режима рекуперации зависит от соотношения между длительностью провала напряжения и максимально возможной длительностью работы привода, которая определяется временем, в течение которого напряжения звена постоянного тока поддерживается на заданном уровне.

8. Определение максимальной длительности работы привода в режиме рекуперации осуществляется на основании полученной зависимости времени от частоты вращения ротора двигателя и параметров приводного механизма и электродвигателя. Правомерность предложенных формул подтверждается сходимостью результатов расчета и компьютерного моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная задача обеспечения работоспособности асинхронного частотно-регулируемого привода при кратковременных провалах сетевого напряжения с целью сохранения непрерывности технологического процесса и предотвращения ущерба от вынужденных отключений электропривода как основного элемента большинства технологических комплексов.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. На основе анализа статистических данных по отказам системы электроснабжения предприятия ООО «КИНЕФ» и результатов компьютерного моделирования аварийных ситуаций в электрической сети установлено влияние топологии сети, схем соединения обмоток трансформаторов для различных классов напряжения на связь между типами коротких замыканий в различных точках сети с видами провалов напряжения на входе приемника. Показано, что на основе блока обнаружения и идентификации видов провалов напряжения в соответствии с их ABC классификацией возможно построение наблюдателя напряжения звена постоянного тока, что позволяет без задержки во времени переходить на один из предложенных способов преодоления провалов напряжения.

2. Дано обоснование способа обеспечения требуемого режима приводного механизма при кратковременных провалах напряжения с помощью разработанной системы управления приводом в области ослабленного поля. Система осуществляет одновременное регулирование обеих компонент тока статора на основе выявленных закономерностей формирования рабочей области в условиях ограничения по напряжению и току в зависимости от соотношения между требуемым моментом и характеристическим моментом - параметром введенным в рассмотрение для выделения областей ослабленного поля при относительно малых провалах напряжения и при более глубоких провалах. Определены уставки перехода системы управления в область ослабленного поля и

уставки минимально допустимого остаточного напряжения ЗПТ для перехода привода в режим рекуперации кинетической энергии.

3. Предложена структура и алгоритм управления ЧРП при возникновении провалов напряжения, которая отличается от традиционной структуры векторного управления наличием дополнительного блока. Назначение блока состоит в формировании уставки по переходу в режим управления в зоне ослабленного поля и выработке задания по потокосцеплению ротора и задания по моменту двигателя с учетом ограничений по напряжению и току. Рассмотрены два подхода для реализации алгоритма управления приводом в области ослабленного поля. Первый из них основан на непосредственном расчете координат привода, второй – на итерационном поиске требуемой рабочей точки в соответствии с предложенной методикой.

4. На базе компьютерной модели ЧРП проведен сравнительный анализ предложенной и традиционной систем управления по реакциям привода на двухступенчатые провалы с остаточным напряжением 80 и 53% при номинальной скорости и при скорости вращения ротора 80% от номинального значения. Показано, что при неполной загрузке предложенная система управления обеспечивает требуемый режим независимо от уровня провала напряжения, в то время как при традиционной системе происходило снижение скорости на 30%. При полной загрузке и наибольшем провале напряжения снижение скорости составило 6% и 25% при предложенной и традиционной системе управления соответственно.

При наличии устройства ограничения зарядных токов и частичной загрузке привода возможна его работа с предложенной системой управления при снижении напряжения ЗПТ ниже уставки срабатывания ЗМН.

5. Разработана структура системы скалярного частотного управления асинхронным электроприводом с наблюдателем скорости вращения, обеспечивающим точность косвенного измерения скорости не хуже 1% в диапазоне регулирования 1:10. При переходе в режим рекуперации кинетической энергии происходит реконфигурация двухконтурной системы регулирования

путем введения внешнего контура регулирования напряжения ЗПТ. Использование быстродействующего ПИД –регулятора в контуре регулирования напряжения достигается минимизация как перерегулирования, которое по результатам моделирования не превышает 5% , так и времени переходного процесса, которое составило 0,3с. Повышение быстродействия позволяет подготовить привод к повторному пуску за минимально время в условиях кратковременных провалов напряжения, что особенно важно для сохранения непрерывности технологических процессов.

6. Разработана компьютерная модель привода со скалярной двухконтурной системой управления и наблюдателем скорости для исследования процессов в приводе, который находится в режиме свободного выбега и режиме рекуперации кинетической энергии. На основании исследований свободного выбега привода при различной начальной скорости предложена формула для определения времени разряда конденсатора, которая дает точность оценки не хуже 6% против 20-50% по известной формуле, полученной на основе уравнения баланса энергии.

7 Предложена модель выбега двигателя в режиме рекуперации, учитывающая параметры ЗПТ, предложенную формулу для тормозного электромагнитного момента и вид механической характеристики приводного механизма, которая дает высокую степень сходимости с результатами компьютерного эксперимента в диапазоне снижения скорости вращения до 5% от начального значения. Предложенная модель позволяет производить оценку максимального времени, в течение которого привод в отсутствии питания со стороны сети способен поддерживать напряжение звена постоянного тока на заданном уровне и сохранять работоспособность для осуществления безаварийного повторного пуска при восстановлении питания. Показано, что это время намного превышает характерную длительность провалов напряжения, что говорит о режиме рекуперации как эффективном способе преодоления приводом провалов напряжения.

8. Полученные в работе результаты могут быть использованы при проектировании новых или модернизации существующих типов частотно-

регулируемым электроприводов для обеспечения их работоспособности в условиях нестабильных сетей и высоких требований по обеспечению непрерывности работы технологического оборудования. Полученные в работе результаты целесообразно использовать для разработки методов и средств повышения устойчивости к провалам напряжения сети других типов приводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананичева, С.С. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учебное пособие / С.С. Ананичева, А.А. Алексеев, А.Л. Мызин. - Екатеринбург: УрФУ, 2012.-93 с.
2. Андреев, А.Н. Моделирование режимов внутренней рекуперации энергии в асинхронном электроприводе / А.Н. Андреев, Е.В. Несговоров, Д.А. Колесниченко, Т.В. Королев// Вестник ИГЭУ - 2013.- В.4. – С.1-6.
3. Андреева, Н.В. Приборный комплекс контроля энергетических характеристик асинхронных электроприводов / Н.В. Андреева, В.Ю. Корнилов, А.С. Малацион // Труды 7-й международной конференции по автоматизированному электроприводе. – Саранск: Изд-во Мордовского университета,2014. – Т.1.– С.187-190.
4. Басов, П.М. Защита электроприёмников металлургических предприятий от провалов напряжения в системе электроснабжения с помощью электроприводов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03/ Басов Павел Михайлович. - Липецк, - 2012. – 18с.
5. Борисов, П.А. Синхронизация трехфазных активных выпрямителей напряжения с питающей сетью / П.А. Борисов, Н.А. Поляков// Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики – 2012. - № 4(80). – С.55-60.
6. Бородин, М.Ю. Анализ режимов преобразователей частоты с рекуперацией энергии / М.Ю. Бородин, Е.М. Бородин, М.Е. Бортников// Труды 7-й международной конференции по автоматизированному электроприводе. – Саранск: Изд-во Мордовского университета,2014. – Т.1. - С.413-417.
7. Браславский, И.Я. Оценка технико-экономической эффективности внедрения частотно-регулируемых электроприводов с емкостными накопителями энергии в крановых механизмах/ Браславский И.Я., Плотников Ю.В., З.Ш. Ишматов, Ф.А. Полунин// Труды 7-й международной конференции по автоматизированному электроприводе. – Саранск: Изд-во Мордовского университета,2014. – Т.2. - С.491-497.

8. Браславский, И.Я. Оптимизация пусковых процессов в асинхронном частотном электроприводе со скалярной САР / И.Я. Браславский, А.В. Костылев, Д.В. Цибанов, А.И. Хабаров // Вестник ЮУрГУ – 2013. – В.2, Т.13. – С.69-74.
9. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.:Academa, 2004. – 202 с.
10. Бугров, В.Г. Электромеханические переходные процессы в системах электроснабжения: учебное пособие. / В.Г. Бугров. - Тверь: Тверской государственный технический университет, 2005.- 114 с.
11. Воробьев, А.А. Групповое питание электроприводов с общим накопителем энергии как новое направление энергосбережения / А.А. Воробьев, А.А. Колб // Вестник Харьковского политехнического университета. Проблемы автоматизированного электропривода. – 2003. – №10. – С. 224–228.
12. Вейнмейстер, А.В. Косвенное измерение скорости вращения в электроприводе с асинхронным двигателем на основе идентификатора состояния: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03 / Вейнмейстер Андрей Викторович. СПб., 2013. - 17 с.
13. Виноградов, А.Б. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ / А.Б. Виноградов, А.Н. Сибирцев, И.Ю. Колодин // Силовая электроника. - 2006. - №3. - С. 50-55.
14. Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов. - Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2008. - 298 с.
15. Вейнмейстер, А.В. Области устойчивости процессов идентификации в системах бездатчикового асинхронного электропривода / А.В. Вейнмейстер, Н.Д. Поляхов // Труды 7-й международной конференции по автоматизированному электроприводу. – Саранск: Изд-во Мордовского университета, 2014. – Т.1.– С.116-122.
16. Вагин, Г.Я. Анализ нормативных документов по электромагнитной совместимости и качеству электрической энергии / Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов // Труды 7-й международной конференции по автоматизированному электроприводу (г.Саранск) – 2014. – Т.1.– С.224-226.

17. Вечеркин, М.В. Сравнительная оценка способов пуска асинхронных двигателей по колебательной составляющей электромагнитного момента / М.В. Вечеркин, А.С. Сарваров, Е.В. Макарчева, А.В. Макаров // Труды 7-й международной конференции по автоматизированному электроприводу. – Саранск: Изд-во Мордовского университета, 2014. – Т.1. – С.197-202.

18. Волков А. В. Управление при провале сетевого напряжения асинхронным электроприводом с автономным инвертором тока / А. В. Волков, И. А. Косенко // Вісн. Кременчуцького держ. університету. – Кременчук: КДПУ, 2010. – В.№3(62). – Ч.2. – С. 11– 14.

19. Гост 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в сетях общего назначения [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 2013. – 16 с.

20. Гельман, М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.

21. Гуревич, Ю.Е. О бесперебойности электроснабжения промышленных потребителей / Ю.Е. Гуревич, Д.Л. Файбисович, З.Г. Хвощинская // Электричество. - 1995. - №8. – с. 2-10.

22. Гуревич, В.И. О режиме питания мощного контактора переменного тока при провалах напряжения в сети 0.4 кВ / В.И. Гуревич // Электроника-инфо. – 2008. - № 7. - С. 34 – 38.

23. Гуревич, В.И. Автоматическое повторное включение промышленных электроустановок / В.И. Гуревич // Промышленная энергетика. – 2005. - №8. - С.8 – 10.

24. Бенкхов, Ш. Безопасный заряд / Ш. Бенкхов, О. Гнушев // Силовая электроника. – 2008. - №17. С.16-18.

25. Даденков, Д.А. Моделирование системы векторного управления асинхронным двигателем в пакете MATLAB/SIMULINK / Д.А. Даденков, Е.М. Солодкий, А.М. Шачков // Вестник ПНИПУ. – 2014. - № 11. – С.117-128.
(ОП)

26. Дементьев, Ю.Н. Электрический привод: учебное пособие / Ю.Н. Дементьев, А. Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010.-232 с.
27. Дементьев, Ю.Н. Обеспечение живучести асинхронных электроприводов / Ю.Н. Дементьев, И.Г. Однокопылов// Вестник ЮУрГУ. – 2014. – Т.14,№2. – С.55-61.
28. Емельянов, А.П. Скалярное управление асинхронным короткозамкнутым двигателем по активной составляющей тока статора / А.П. Емельянов, Б.А. Чуркин // Вестник Южно-Уральского государственного университета.-2014. - Т.14. № 3. - С. 85-90.
29. Ершов, С.В. Особенности определения провалов напряжений в системах электроснабжения / С.В. Ершов, Б.А. Жабин Б.А. // Известия ТулГУ. Технические науки.- 2014. - № 8. – С.97-102.
30. Ершов, М.С. Устойчивость многомашинных промышленных электротехнических комплексов и систем / М.С. Ершов, А.В. Егоров, А.А. Трифонов // Труды 7-й международной конференции по автоматизированному электроприводу. – Саранск: Изд-во Мордовского университета,2014. – Т.1. – С. 268-274.
31. Ершов, М.С. Характеристики провалов напряжения при авариях в сетях систем электроснабжения нефтегазовых комплексов/ М.С. Ершов, Н.В. Валов //Территория «Нефтегаз». – 2000. – № 5. – С. 114-119.
32. Жмудь, В.А. О методах расчетов ПИД – регуляторов / В.А. Жмудь // Автоматика и программная инженерия. - 2013. – №2(4). – с. 118-124.
33. Захаров, П.А. Принципы инвариантного управления электроприводами газотранспортных систем при случайных возмущениях / П.А. Захаров, О.В. Крюков // Вестник ИГЭУ. - 2008. - В.№2 - С.1-7.
34. Золов, П.Д. Моделирование работы активного выпрямителя напряжения в электромеханической системе с двухсторонним обменом энергией/ П.Д. Золов, Н.А. Поляков // Труды 7-й международной конференции по автоматизированному электроприводу. – Саранск: Изд-во Мордовского университета,2014. – Т.1. – С.165 – 169.

35. Кравчик, А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник/ А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболевская. - М.: Энергоатомиздат, 1982.- 504 с.
36. Карлов, Б.А. Современные преобразователи частоты и аппаратная реализация/ Б.А. Карлов, Е.Б. Есин // Силовая электроника - 2004. - №1. – С. 50-54.
37. Корнилов, Г.П. Ограничение провалов напряжения в сетях промышленных предприятий/ Г.П. Корнилов, А.Ю. Коваленко, А.А Николаев, И.Р. Абдулвелеев, Т.Р. Храмшин // Электротехнические системы и комплексы. – 2014, - №2, Т.23.-С. 44-48.
38. Колб, А.А. Пространственно – векторное управление групповым IGBT- преобразователем для коррекции качества электроэнергии в системах электропривода с общими шинами постоянного тока/ А.А. Колб, //Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2004., В. № 71. – С. 46–53.
39. Косчинский, С.Л. Управление асинхронным электродвигателем в квазистационарных режимах повторный пуск, подхват и удержание / С.Л. Косчинский, Ю.В. Колоколов // Электротехника. – 2007.- №11. – С.25-30.
40. Кирлан, В.Л. Моделирование асинхронного двигателя / В.Л. Кирлан, И.Ф. Саитов//Нефтегазовое дело. – 2012. - № 5. – С.4-11.
41. Ладыгин, А.Н. Применение аккумуляторов для бесперебойного питания частотно-регулируемого электропривода/ А.Н. Ладыгин, Д.Д. Богаченко, В.В. Холин // Труды 7-й международной конференции по автоматизированному электроприводу. - Саранск: Изд-во Мордовского университета,2014. – Т.2. – С.21-23.
42. Мелешкин, Г.А. Устойчивость энергосистем. Теория: монография/ Г.А. Мелешкин, Г.В. Меркурьев.- СПб.:НОУ «Центр подготовки кадров энергетики»,2006. - 369 с.
43. Мальцева, О.П. Системы управления электроприводов.:учебное пособие / О.П. Мальцева, Л.С. Удут, Н.В. Кояин. – Томск: Издательство ТПУ, 2007. – 164с.

44. Мельников, В.Ю. Способы измерения угловой скорости вращения и крутящего момента асинхронного электродвигателя / В.Ю. Мельников, А.Д. Умурзакова // Материалы докладов шестнадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: Экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – С. 404–406.

45. Новожилов, Н.Г. Обеспечение бесперебойной работы частотно-регулируемого электропривода технологической установки при провалах напряжения за счет рекуперации кинетической энергии./ О.Б. Шонин, Н.Г. Новожилов // Сборник научных трудов международного форума-конкурса молодых ученых «Проблемы недропользования». – СПб, 2014. – Ч.2. – С.236.

46. Новожилов, Н.Г. Кинетическая поддержка частотно-регулируемого привода со скалярной системой управления при провалах напряжения сети./ О.Б. Шонин, Н.Г. Новожилов, В.С. Пронько // Материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем СПбГПУ. – СПб, 2015. – Ч.1. – С.264-267

47. Новожилов, Н.Г. Сохранение работоспособности асинхронного частотно-регулируемого привода при провалах напряжения./ О.Б. Шонин, Н.Г. Новожилов // Сборник трудов международной научно-практической конференции «Энергоэффективность энергетического оборудования». - СПб, 2015. - Ч.2. – С.177.

48. Новожилов, Н.Г. Сравнительный расчет ёмкости конденсатора звена постоянного тока частотного преобразователя./ Н.Г. Новожилов // Научно-практический журнал Современная наука и практика// г. Санкт-Петербург, 2015г. №1(1) - С.20-24.

49. Новожилов, Н.Г. Наблюдатель частоты вращения ротора в скалярной системе управления асинхронного электропривода/ О.Б. Шонин, Н.Г. Новожилов, С.Б. Крыльцов // Электротехнические системы и комплексы. - 2016. - №2(31) - С. 15-19.

50. Новожилов, Н.Г. Повышение устойчивости асинхронного электропривода с бездатчиковой скалярной системой управления при провалах

напряжения сети./ О.Б. Шонин, Н.Г. Новожилов, С.Б. Крыльцов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2016. - В.11, Ч.2. - С.507-520.

51. Новожилов, Н.Г. Оценка устойчивости частотно-регулируемого привода при провалах напряжения в сети/ О.Б. Шонин, Н.Г. Новожилов // Сборник трудов 2-й всероссийской молодежной научно-практической конференции «ВВЕДЕНИЕ В ЭНЕРГЕТИКУ». - Кемерово, 2016. – С. 155-160.

52. Новожилов, Н.Г. Определение параметров кривой устойчивости частотно-регулируемого привода при провалах напряжения в сети./ О.Б. Шонин, Н.Г. Новожилов, С.Б. Крыльцов//Труды Крыловского государственного научного центра. - 2017. - 1(379) – С.120-127.

53. Онищенко, Г.Б. Проблемы и перспективы развития электропривода / Г.Б. Онищенко, М.Г. Юньков // Труды 7-й международной конференции по автоматизированному электроприводу. – Сранск: Изд-во Мордовского университета, 2014. – 2014. – Т.1. – С.5-9.

54. Пересада С.М. Сравнительное экспериментальное тестирование систем бездатчикового управления асинхронными двигателями / С.М. Пересада, С.Н. Ковбаса, А.Б. Воронко, Д.Л. Приступа // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. - 2012. - Т.19. - №3. - С. 137-141.

55. Петроченков, А.Б. Развитие теории и совершенствование методов обеспечения эффективного функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли/ А.Б. Петроченков // Труды 7-й международной конференции по автоматизированному электроприводу. – Саранск, 2014. – Т.2. – С. 442-446.

56. Петрович, В.П. Силовые преобразователи электрической энергии: учебное пособие/ В.П. Петрович, Н.А. Воронина, А.В. Глазачев – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 240 с.

57. Попов, Н.М. Анализ переходных процессов в электрических сетях 0,38 кВ при однофазном коротком замыкании / Н.М. Попов, И.А. Молодов // Журнал Достижения науки и техники АПК. – 2011. - №8. – С. 71-73.

58. Свидетельство №2016617881 Российская Федерация. Программа вычисления обобщенных симметричных составляющих трёхфазной системы напряжений в реальном масштабе времени: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ/ Н.Г. Новожилов, О.Б. Шонин, С.Б. Крыльцов; правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» - 2016615244; заявл. 24.05.2016; регистр.15.07.2016 – 1с.

59. Свиркина, Л.А. Приведение к каноническому виду линий и поверхностей второго порядка, заданных своими общими уравнениями относительно ДПСК: учебное пособие / Л.А. Свиркина. – СПб.: СПГУ, 2013.- 65с.

60. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учеб. для студентов высших. учеб. заведений./ Г.Г. Соколовский. – 2-е изд., испр. – М.: Изд. Центр «Академия», 2007. – 272с.

61. Сыромятников, И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей/ И.А. Сыромятников; под ред. Л.Г. Мамиконянца. - 4-ое изд. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 240 с.

62. Теличко, Л.Я. Влияние провалов напряжения в распределительных сетях промышленных предприятий на работу современных регулируемых электроприводов/ Л.Я. Теличко, П.М. Басов // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2009. - №2. С.16-20.

63. Толочко, О.И. Скалярное частотное управление асинхронным электроприводом с улучшенными динамическими характеристиками./ О.И. Толочко, Г.С. Чекавский, П.И. Розкаряка // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. - 2012. - Т. 19, №3. - С. 309-312.

64. Томасов, В.С. Определение времени рекуперации электропривода телескопов траекторных измерений / В.С. Томасов, А.В. Егоров, М.А. Соколов, Р. Джастрзевски// Труды 7-й международной конференции по автоматизированному электроприводу. – Саранск, 2014. – Т.2. – С.185-190.

65. Усольцев, А.А. Электрически й привод: учебное пособие / А.А. Усольцев. - СПб.: Изд-во НИУ ИТМО, 2012. - 238 с.

66. Умурзакова, А.Д. Косвенный контроль выходных механических переменных асинхронного электродвигателя в электроприводе: дис. на соискание уч. ст. канд. тех. наук: 05.09.03 / Умурзакова Анара Даукеновна. – Томск, 2015. – 116 с.

67. Фишман, В. Провалы напряжения в сетях промпредприятий [Электронный ресурс] / В. Фишман // - Новости электротехники. – 2004. - №5(29). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2004/30/05.php>.

68. Шабанов, В.А. Исследование частотно-регулируемых электроприводов магистральных насосных агрегатов на НПС при нарушениях электроснабжения / В.А. Шабанов, Р.Ф. Гилязов // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2011.- № 4. – С. 20-29.

69. Шонин, О.Б. Повышение энергетической эффективности главных вентиляторных установок шахт на основе многоцелевой системы управления частотно-регулируемым приводом / О.Б. Шонин, В.С. Пронько // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2014. – Т.195,№2. – С. 49-57.

70. Шрейнер, Р.Т. Рекуперирующий двухсекционный преобразователь частоты для электроприводов переменного тока / Р.Т. Шрейнер, В.К. Кривовяз, А.В. Костылев, С.И. Шилин // Труды 7-й международной конференции по автоматизированному электроприводе. – Саранск,2014. – Т.2. – С.536-540. (реку)

71. Шуин, В.А. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ / В.А. Шуин, А.В. Гусенков. - М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. – 104 с.

72. Эрнст, А.Д. Самозапуск асинхронных электродвигателей: Учеб. Пособие / А.Д. Эрнст. - Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. - 46 с.

73. Anderson, T Test and evaluation of voltage dip immunity / T. Anderson, D. Nisson. – Inst. Elteknik: STRI, 2002. – 122 p.

74. Bose, B.K. Power electronics and motor drives/ B.K. Bose. - Elsevier, 2008. – 935 p.

75. Bose, B.K. Modern Power Electronics and AC Drives/ B.K. Bose. - Prentice Hall,2002. — 711 p.

76. Djokic, S.Ž. Sensitivity of AC Adjustable Speed Drives to Voltage Sags and Short Interruptions/ S.Ž. Djokic, K. Stockman, J. V. Milanovic, J. J. M. Desmet, R. Belmans // IEEE Transactions on Power Delivery. - 2005 - 20(1). – P. 494-505
77. Deswal, S.S. Ride through topology of ASD's during power systems faults / S.S. Deswal, R. Dahiya, D.K. Jain // Journal of Science, Informatics and Electrical engineering. - 2008. - V.2(1).-P. 2-10.
78. Ellaban, O. Capacitor Voltage Control Techniques of the Z-source Inverter: A Comparative Study [Electronic resource]/ O. Ellaban, J.V. Mierlo, P.Latairre // Selected works. – 2012. - Available at: http://works.bepress.com/omar_ellabban/23
79. Holtz J. Sensorless Control of Induction Motor Drives/ J. Holtz // Proceedings of the IEEE. - 2002. - V. 90, № 8. - P. 1359–1394.
80. Holtz, J. Controlled AC Drives with Ride-Through Capability at Power Interruption / J. Holtz, W. Lotzkat // IEEE Transactions on Industry Applications. - 1994. - Vol.30, No.5., - P. 1275-1283.
81. Ignatova, V. Classification and characterization of three phase voltage dips by space vector methodology / V. Ignatova, P. Granjon, S. Bacha, F. Dumas // Proc. of International Conference on Future Power Systems. - Netherlands: Amsterdam, 2005. - P. 6-10.
82. Ignatova, V. Space vector method for voltage dips and swells analysis / V. Ignatova, P. Granjon, S.Bacha // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2009.- №24(4). - P. 2054-2061.
83. Jouanne, A. Assessment of Ride-Through Alternatives for Adjustable-Speed Drives / A. Jouanne, P.N. Enjeti, B. Banerjee // IEEE Transactions on Industry Applications. - 1999.- v. 35, № 4. – P.908-916
84. Jeong, J. Three-phase interactive DVR with new sag detection algorithm / J. Jeong, J. Lee, B. Han // Journal of power electronic. – 2010. - V.10, № 2. – P.1-2.
85. Kennedy, B.W. Power quality primer/ B.W. Kennedy. – McGraw-Hill, 2000. – 385 p.

86. Krause, P.C. Analysis of electric machinery and drive systems / P.C. Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff. – Purdue university:Wiley-Interscience, 2002. – 632p.
87. Leborgne, R.C. Voltage sag characterization and estimation: thesis for the degree of licentiate of engineering / Leborgne Roberto Chouhy. – Sweden: Goteborg, 2005. – 99 p.
88. Manana, M. The role of the dc-bus in voltage sags experienced by three-phase adjustable-speed drives/ M. Manana,; L.M. Muniz, A. Ortiz, R. Aranda, A. Arroyo, F. Delgado // International Conference on Renewable Energies and Power Quality. – Spain: Granada, 2010. – V.1,№8. – P. 1047-1050.
89. Nguyen-Thac, K. Influence of the stator winding resistance on the field-weakening operation of the DRFOC induction motor drive / K. Nguyen-Thac, T. Orłowska-Kowalska, G. Tarchala // Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical sciences. - 2012. - V. 60, N. 4 - P.815-823
90. Nagasekhar, R. P. Sensorless control of induction motor using Simulink by direct synthesis technique / R. P. Nagasekhar, R. P. Linga, J. Amarnath // International Journal of Electrical Engineering. - 2011. - V.4, №1. - P. 23–32.
91. Novozhilov, N.G. Assessment of duration of the drive operation in the mode of kinetic energy recovery under power supply voltage sags in electrical grids of mechanical engineering enterprises/ N.G. Novozhilov, O.B. Shonin,S.B. Kryltcov // IOP: Materials Science and Engineering. -2017. - V.177 – P.121-127.
92. Novozhilov, N.G. Digital algorithm for fast detecting and identifying the asymmetry of voltages in three-phase electric grids of mechanical engineering facilities./ N.G. Novozhilov, O.B. Shonin,S.B. Kryltcov // IOP: Materials Science and Engineering. – 2017. -V.177 – P.253-258.
93. Pronin, M. Control System of the Multi-Stage PWM-Rectifier Energizing Power-Shovel Multi-Motor Variable-Frequency Drive for Mining Applications / M. Pronin, O. Shonin, A. Vorontsov, G.A. Gogolev // Proceedings of the 14-th European Conference on Power Electronics and Adjustable Speed Drives. – Birmingham:United Kingdom, 2011. – T.12. - P.1-8.

94. Pietilainen, K. DC-link stabilization and voltage sag ride-through / K. Pietilainen, L. Harneforce, A. Petersson, H.P. Nee // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2006. - V.53, №4. –P. 1261-1268.
95. Petronijević, M.P. Voltage Sag Drop in Speed Minimization in Modern Adjustable Speed Drives /M.P. Petronijević, B.I. Jeftenić, N.M. Mitrović, V.Z. Kostić // Facta universitatis. - 2006. - v.16 – P.231-237
96. Rajagopalan L. N. Behavior of variable speed drives under influence of voltage sags: Master of engineering degree thesis/ Rajagopalan Lakshmi Narayan. - University of Wollongong, 1999. – 158 p.
97. Rector, D.S. PEAC throws new CBEMA Curve to computer industry / D.S. Rector // System Compatibility Research News. – 1995. – P. 1-4.
98. Smriti, D. Comparison of DVR and D-STATCOM for Voltage Quality Improvement/ D. Smriti // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2014. - V.4, I.10. - P. 187-193.
99. Standart EN 50160 Voltage Characteristics inPublic Distribution Systems. Voltage disturbances. – Wroclaw: Copper Development Association, 2004. – 16p.
100. Srinivasan, K. Performance Analysis of a Reduced Switch Z-Source Inverter fed IM Drives / K. Srinivasan, and Dr.S.S. Dash// International Journal of Computer and Electrical Engineering. – 2010. - V.2, №4. – P. 649-653.
101. Stockman, K. Ride-through of adjustable speed drives during voltage dips/ F. D’hulster, K Verhaege, M Didden, R Belmans// Electric Power Systems Research. – 2003. – №66. – P. 49-58
102. Stockman, K. Voltage sag imunity test setup for induction motor/ F. D’hulster, K Verhaege, M Didden, R Belmans // Proc. of 11th International symposium on Power Electronics. – Ugoslavia:Novi Sad, 2001. – P. 1-5.
103. Technical report IEC 61000-2-8 Electromagnetic compatibility. Voltage dips and short interruptions on public electric power supply systems with statistical measurement results. - International Electrotechnical Commission, 2002. – 98.

ПРИЛОЖЕНИЕ А ГРАНИЦА ПО НАПРЯЖЕНИЮ В ФОРМЕ ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ ЭЛЛИПСА

Для того чтобы проанализировать зависимость рабочей области от напряжения ЗПТ и частоты поля статора приведем уравнение эллипса (2.22), полученное в главе 2, к каноническому виду. Данная операция аналогична переходу записи уравнения (2.22) из dq системы координат в систему координат $d'q'$, ориентированную по осям симметрии эллипса. Проекция тока статора в системе координат, ориентированной по осям симметрии эллипса, будем обозначать i'_{sd} и i'_{sq} .

Для преобразований воспользуемся методом инвариантов [59].

Уравнение (2.22) является частным случаем уравнения кривой второго порядка:

$$A' \cdot i_{sd}^2 + 2B' \cdot i_{sd} \cdot i_{sq} + C' \cdot i_{sq}^2 + 2D' \cdot i_{sd} + 2E' \cdot i_{sq} + F' = 0 \quad (A. 1)$$

где A' , B' , C' , D' , E' , F' - коэффициенты.

Уравнение А.1 переходит в уравнение (2.22), если принять:

$$A' = A; \quad B' = B/2; \quad C' = C; \quad D' = E' = 0; \quad F' = -U_{\max}^2.$$

Известно, что в общем уравнении кривой 2-ого порядка коэффициенты D', E' отвечают за смещение кривой относительно начала координат, коэффициент B' - за наклон осей кривой относительно осей системы координат. Поэтому в новой системе координат $d'q'$ коэффициенты D_1, E_1 и B_1 должны равняться нулю, и уравнение эллипса в каноническом виде должно иметь вид

$$A_1 \cdot (i'_{sd})^2 + C_1 \cdot (i'_{sq})^2 + F_1 = 0 \quad (A.2)$$

Под инвариантами понимаются числа, которые неизменны, инвариантны, относительно переноса и поворота прямоугольной системы координат. К инвариантам кривой второго порядка, например (А.1), относятся следующие числа:

$$S = A' + C'; \quad \delta = \begin{vmatrix} A' & B' \\ B' & C' \end{vmatrix}; \quad \Delta = \begin{vmatrix} A' & B' & D' \\ B' & C' & E' \\ D' & E' & F' \end{vmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Учитывая, что $D_1 = E_1 = B_1 = 0$ и $D' = E' = 0$, выразим (A.3) через коэффициенты эллипса в новой и старой системах систем координат в виде:

$$\begin{cases} A_1 + C_1 = S \\ A_1 \cdot C_1 = \delta \\ A_1 \cdot C_1 \cdot F_1 = \Delta \end{cases} \quad \begin{cases} A + C = S \\ AC - (B/2)^2 = \delta \\ F[AC - (B/2)^2] = \Delta \end{cases}$$

Приравнявая инварианты S, δ, Δ , выраженные через коэффициенты уравнений в обеих системах координат, получим:

$$\begin{cases} A + C = A_1 + C_1 \\ AC - (B/2)^2 = A_1 C_1 \\ F[AC - (B/2)^2] = A_1 C_1 F_1 \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

Из 2-ого и 3-уго уравнения системы (A.4) находим

$$F_1 = F = -U_m^2 \quad (\text{A.5})$$

Коэффициенты A_1, C_1 вычисляем по 1-ому и 2-ому уравнениям. Их объединение дает квадратное уравнение и два его решения C_{11}, C_{12} , одно из которых C_{12} удовлетворяет условиям задачи

$$C_1^2 - (A + C) \cdot C_1 + A \cdot C_1 - (B/2)^2 = 0$$

$$C_{12} = \frac{A + C - \sqrt{(A - C)^2 + B^2}}{2} \quad (\text{A.6})$$

Используя полученное значение коэффициента и первое уравнение системы (A.4), находим

$$A_{12} = \frac{A + C + \sqrt{(A - C)^2 + B^2}}{2} \quad (\text{A.7})$$

Тогда уравнение (2.22) в новой системе координат примет вид:

$$A_{12} \cdot i'_{sd}{}^2 + C_{12} \cdot i'_{sq}{}^2 - U_{\max}^2 = 0 \quad (\text{A.8})$$

Из этого выражения переходим к канонической форме уравнения эллипса

$$\frac{i'_{sd}{}^2}{b^2} + \frac{i'_{sq}{}^2}{a^2} = 1 \quad (\text{A.9})$$

Здесь a, b – большая и малая полуоси эллипса:

$$a = \frac{U_{\max}}{\sqrt{C_{12}}}, \quad b = \frac{U_{\max}}{\sqrt{A_{12}}} \quad (\text{A.10})$$

Угол наклона γ системы координат $d'q'$ относительно системы dq определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{B}{A - C} \right) \quad (\text{A.11})$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРЕДЕЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ПРИВОДА С УЧЕТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАТОРА

Рассмотрим влияние сопротивления обмотки статора на параметры предельного режима i_{sd}^{pp}, i_{sq}^{pp} , при котором обеспечивается требуемый электромагнитный момент $M_{зад}$ при минимально возможном напряжении ЗПТ $U_{dc\ min}^{pp}$, которое предопределяет значение первой гармоники напряжения статора $U_{m(1)}$. Знание предельных режимов необходимо для оценки работоспособности привода при провалах напряжения.

Анализ производится на базе системы уравнений Б.1, которая включает уравнение окружности, ограничивающей рабочую область по току (первое уравнение), уравнение эллипса, ограничивающего рабочую область по напряжению (второе уравнение) и уравнение электромагнитного момента (третье уравнение).

$$\begin{cases} i_{sd}^2 + i_{sq}^2 = I_{s\ max}^2 \\ A \cdot i_{sd}^2 + B \cdot i_{sd} \cdot i_{sq} + C \cdot i_{sq}^2 = U_{max}^2 \\ i_{sq} = \frac{c \cdot M}{i_{sd}} \end{cases} \quad (Б.1)$$

При синусоидальной модуляции имеем $U_{max} = U_{dc} / 2$; коэффициенты А, В, С и параметр К равны

$$A = R_s^2 + \omega_s^2 L_s^2, \quad B = 2R_s \omega_s L_s (1 - \sigma), \quad C = R_s^2 + \omega_s^2 L_s^2 \sigma^2 \quad (Б.2)$$

$$K = c \cdot M, \quad c = \frac{1}{1,5 \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{L_r}}. \quad (Б.3)$$

Здесь М - электромагнитный момент

Характеристический режим

Определим режим, который соответствует точке касания кривой электромагнитного момента $M = const$ и кривой ограничения по напряжению

$U_{m(1)} = \text{const}$, которая одновременно является точкой пересечения этих кривых с кривой ограничения по току $I_{s \max} = \text{const}$ (рис.Б.1).

Электромагнитный момент $M_{\text{хар}} = \text{const}$, удовлетворяющий этим условиям, будем называть характеристическим или граничным.

Запишем систему (Б.1) в системе координат $d'q'$, которая смещена относительно системы dq на угол γ (рисунок Б.1). Для этого воспользуемся уравнением эллипса (Б.9), а для преобразования первого и третьего уравнения системы (Б.1)- формулами поворота системы координат на угол γ [59].

$$i'_d = i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma ; \quad i'_q = -i_d \sin \gamma + i_q \cos \gamma \quad (\text{Б.4})$$

$$i_d = i'_d \cos \gamma - i'_q \sin \gamma ; \quad i_q = i'_d \sin \gamma + i'_q \cos \gamma \quad (\text{Б.5})$$

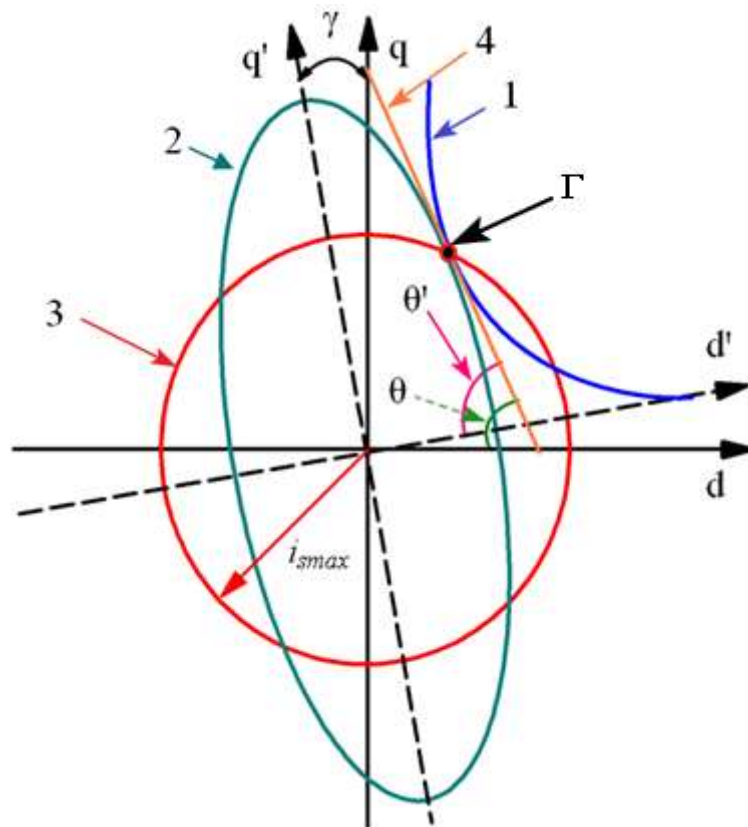


Рисунок Б.1 - Предельный режим работы электропривода при минимально допустимом напряжении, при условии $R_s \neq 0$. Кривая электромагнитного момента $M_{\text{хар}} = \text{const}$ - 1; кривая границы по напряжению $U_{\min}^{(\text{оп})} = \text{const}$ - 2; граница по току $I_{s \max} = \text{const}$ - 3; Γ - рабочая точка предельного, граничного, режима; кривая касательной в точке Γ - 4

$$\begin{cases} i'_{sd}{}^2 + i'_{sq}{}^2 = I_{\max}^2 \\ \frac{i'_{sd}{}^2}{b^2} + \frac{i'_{sq}{}^2}{a^2} = 1 \\ V(i'_{sd}, i'_{sq}, M) = 0 \end{cases} \quad (\text{Б.6})$$

Последнее уравнение представляет собой обобщенное уравнение гиперболы в $d'q'$ - системе координат.

Для нахождения координат точки касания эллипса и гиперболы воспользуемся вторым и третьим уравнениями системы (Б.6)

$$\begin{cases} i'_{sq} = a_{1r} \sqrt{U_{\max}^2 - (i'_{sd}/b_{1r})^2} \\ i'_{sq} = f(i'_{sd}, M) \end{cases} \quad (\text{Б.7})$$

Здесь коэффициенты a_{1r}, b_{1r} , имеющие размерность проводимости, выражаются формулами

$$a_{1r} = \frac{a}{U_{\max}} = \frac{1}{\sqrt{C_{12}}}; \quad C_{12} = \frac{A + C - \sqrt{(A - C)^2 + B^2}}{2} \quad (\text{Б.8})$$

$$b_{1r} = \frac{b}{U_{\max}} = \frac{1}{\sqrt{A_{12}}}; \quad A_{12} = \frac{A + C + \sqrt{(A - C)^2 + B^2}}{2} \quad (\text{Б.9})$$

Условие касания двух кривых заключается в равенстве угловых коэффициентов касательных и принадлежности точки касания обеим кривым. Угловой коэффициент касательной к кривой постоянного момента H' в системе координат $d'q'$ выразим через коэффициент H в системе координат d, q , который определяется через производную уравнения 3 системы Б.1. В соответствии с рисунком Б.1 можно записать

$$H'_M = \text{tg}(\theta') = \text{tg}(\theta + \gamma) = \text{tg}(\text{arctg}(K_{\text{хар}}/i'_{sd}) + \gamma) \quad (\text{Б.10})$$

Здесь коэффициент K определяется формулой (Б.3). Найдем производную от первого уравнения системы (Б.7) и приравняем выражению (Б.8). После тригонометрических преобразований получим

$$H'_M = H' \rightarrow \frac{\frac{K_{\text{хар}}}{i_{\text{sd}}^2} + \text{tg}\gamma}{1 - \frac{K_{\text{хар}}}{i_{\text{sd}}^2} \cdot \text{tg}\gamma} = \frac{a_{1r} i_{\text{sd}}^{\text{np}}}{b_{1r}^2 \sqrt{U_{\text{min}}^2 - \frac{i_{\text{sd}}^{\text{np}2}}{b_{1r}^2}}} \quad (\text{Б.11})$$

Выразим проекцию $i_{\text{sd}}^{\text{np}}$ в формуле (Б.9) через проекции в исходной системе координат $i_{\text{sd}}^{\text{np}}$, используя формулы преобразования (Б.4) и выражение для электромагнитного момента в d, q - системе координат (3-е уравнение системы (Б.1)).

$$\frac{\frac{K_{\text{хар}}}{i_{\text{sd}}^2} + \text{tg}\gamma}{1 - \frac{K_{\text{хар}}}{i_{\text{sd}}^2} \cdot \text{tg}\gamma} = \frac{a_{1r} \cdot \left(i_{\text{sd}} \cdot \cos\gamma + \frac{K_{\text{хар}}}{i_{\text{sd}}} \cdot \sin\gamma \right)}{b_{1r}^2 \sqrt{U_{\text{min}}^2 - \frac{\left(i_{\text{sd}} \cdot \cos\gamma + \frac{K_{\text{хар}}}{i_{\text{sd}}} \cdot \sin\gamma \right)^2}{b_{1r}^2}}} \quad (\text{Б.12})$$

Дополнительное уравнение получим из системы (Б.7) из условия соприкосновения кривой постоянного напряжения и кривой постоянного момента. Используя формулы преобразования координат (Б.4) и связь между проекциями тока $i_{\text{sq}} = K/i_{\text{sd}}$, можно записать:

$$a_{1r} \sqrt{U_{\text{min}}^2 - \frac{\left(i_{\text{sd}} \cdot \cos\gamma + \frac{K_{\text{хар}}}{i_{\text{sd}}} \cdot \sin\gamma \right)^2}{b_{1r}^2}} = \frac{K_{\text{хар}}}{i_{\text{sd}}} \cdot \cos\gamma - i_{\text{sd}} \cdot \sin\gamma \quad (\text{Б.13})$$

После решения уравнений (Б.12) и (Б.13) относительно напряжения U_{min} и приравнивания этих решений получим уравнение относительно проекции i_{sd}

$$\frac{a_{1r}^2 \cdot \left(1 - \frac{K_{\text{хар}}}{i_{\text{sd}}^{\text{np}2}} \cdot \text{tg}\gamma \right)^2}{b_{1r}^2 \left(\frac{K_{\text{хар}}}{i_{\text{sd}}^{\text{np}2}} + \text{tg}\gamma \right)^2} = \frac{b_{1r}^2 \cdot \left(\frac{K_{\text{хар}}}{i_{\text{sd}}} - i_{\text{sd}}^{\text{np}} \text{tg}\gamma \right)^2}{a_{1r}^2 \cdot \left(i_{\text{sd}}^{\text{np}} + \frac{K_{\text{хар}}}{i_{\text{sd}}} \text{tg}\gamma \right)^2} \quad (\text{Б.14})$$

Решение этого уравнения и использование формулы $i_{sq} = K/i_{sd}$ дает координаты рабочей точки характеристического режима:

$$i_{sd}^{xap} = \sqrt[4]{\frac{1 + \frac{a_{1r}^2}{b_{1r}^2} \operatorname{tg}^2 \gamma}{\frac{a_{1r}^2}{b_{1r}^2} + \operatorname{tg}^2 \gamma}} \cdot K_{xap}^2, \quad i_{sq}^{np} = \sqrt[4]{\frac{\frac{a_{1r}^2}{b_{1r}^2} + \operatorname{tg}^2 \gamma}{1 + \frac{a_{1r}^2}{b_{1r}^2} \operatorname{tg}^2 \gamma}} \cdot K_{xap}^2 \quad (\text{Б.15})$$

Для определения характеристического момента $M_{xap} = K_{xap}/c$ воспользуемся уравнением границы рабочей области по току – первым уравнением системы (Б.6). После подстановки в это уравнение формул (Б.15) и соответствующих преобразований получим выражение для искомой величины:

$$M_{xap} = \frac{I_{s \max}^2 \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{a_{1r}^2}{b_{1r}^2} \operatorname{tg}^2 \gamma\right) \cdot \left(\frac{a_{1r}^2}{b_{1r}^2} + \operatorname{tg}^2 \gamma\right)}}{c \cdot \left(1 + \frac{a_{1r}^2}{b_{1r}^2} \operatorname{tg}^2 \gamma + \frac{a_{1r}^2}{b_{1r}^2} + \operatorname{tg}^2 \gamma\right)} \quad (\text{Б.16})$$

Если принять $\gamma=0$, то можно убедиться, что формула (Б.16) переходит в формулу для характеристического момента, полученную в приближении $R_s=0$. Координаты точки пересечения кривой электромагнитного момента и кривой границы по току *не зависят от угла наклона* кривой границы по напряжению и рассчитываются по выражениям (Б.14), в которых коэффициент K выражается через характеристический момент:

$$K_{xap} = c \cdot M_{xap}, \quad c = \frac{1}{1,5 \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{L_r}}. \quad (\text{Б.17})$$

Граница по напряжению $U_{\min}^{(xap)}$, соответствующая характеристическому моменту, определяется из выражения (Б.13)

$$U_{\min}^{(xap)2} = \frac{\cos^2 \gamma}{b_{1r}^2} \left(i_{sd}^{np} + \frac{K_{xap}}{i_{sd}^{np}} \operatorname{tg} \gamma \right)^2 \cdot \left(1 + \frac{b_{1r}^2}{a_{1r}^2} \cdot \frac{\left(\frac{K_{xap}}{i_{sd}^{np}} - i_{sd}^{np} \cdot \operatorname{tg} \gamma \right)^2}{\left(i_{sd}^{np} + \frac{K_{xap}}{i_{sd}^{np}} \cdot \operatorname{tg} \gamma \right)^2} \right) \quad (\text{Б.18})$$

1-ая область управления приводом в зоне ослабленного поля $M > M_{\text{хар}}$

Первая рабочая область ослабленного поля, определяемая из условия, что требуемый электромагнитный момент превышает характеристическое значение момента $M_{\text{зад}} > M_{\text{хар}}$, соответствует относительно малым провалам напряжения. Координаты точки предельного режима в этой области определяются как координаты точки пересечения заданного электромагнитного момента и границей рабочей области по току из первого и третьего уравнения системы (Б.1), объединение которых дает:

$$\frac{c \cdot M}{i_{\text{sd}}} = \sqrt{I_{\text{s max}}^2 - i_{\text{sd}}^2}$$

После преобразований получим искомое решение

$$i_{\text{sdl}}^{\text{np}} = \sqrt{\frac{I_{\text{s max}}^2 - \sqrt{I_{\text{s max}}^4 - 4(c \cdot M)^2}}{2}}; \quad i_{\text{sql}}^{\text{np}} = \sqrt{\frac{I_{\text{s max}}^2 + \sqrt{I_{\text{s max}}^4 - 4(c \cdot M)^2}}{2}} \quad (\text{Б.19})$$

По известным координатам точки предельного режима определим минимальное значение напряжения, при котором через указанную точку пройдет граница по напряжению, из уравнения 2 системы (Б.1):

$$U_{\text{min}}^{(\text{onl})} = \sqrt{A \cdot i_{\text{sdl}}^{\text{np}2} + B \cdot i_{\text{sdl}}^{\text{np}} \cdot i_{\text{sql}}^{\text{np}} + C \cdot i_{\text{sql}}^{\text{np}2}}$$

$$\text{или } U_{\text{min}}^{(\text{onl})} = \frac{\sqrt{(a_{\text{lr}}^2 + b_{\text{lr}}^2) I_{\text{s max}}^2 + (b_{\text{rl}}^2 - a_{\text{lr}}^2) \sqrt{I_{\text{s max}}^4 - 4(c \cdot M)^2}}}{\sqrt{2} \cdot a_{\text{rl}} \cdot b_{\text{lr}}} \quad (\text{Б.20})$$

2-ая область управления приводом в зоне ослабленного поля $M_{\text{зад}} < M_{\text{хар}}$

Вторая область ослабленного поля, определяемая из условия $M_{\text{зад}} < M_{\text{хар}}$, описывает более глубокие провалы напряжений. Точка предельного режима в этой области определяется как точка касания кривой заданного момента $M_{\text{зад}} = \text{const}$. Расчет производится по формуле (Б.15), в которой вместо характеристического момента используется текущее значение

$$i_{sd2}^{np} = \sqrt[4]{\frac{1 + \frac{a_{1r}^2}{b_{1r}^2} \operatorname{tg}^2 \gamma}{\frac{a_{1r}^2}{b_{1r}^2} + \operatorname{tg}^2 \gamma}} \cdot c^2 \cdot M_{ref2}^2, \quad i_{sq2}^{np} = \sqrt[4]{\frac{\frac{a_{1r}^2}{b_{1r}^2} + \operatorname{tg}^2 \gamma}{1 + \frac{a_{1r}^2}{b_{1r}^2} \operatorname{tg}^2 \gamma}} \cdot c^2 \cdot M_{ref2}^2 \quad (\text{Б.21})$$

Минимально-допустимое амплитудное значение фазного напряжения, необходимое для сохранения режима приводного механизма при работе в области ослабленного поля находится из второго уравнения системы (Б.1) с учетом формулы (Б.21):

$$U_{\min}^{(оп2)} = \sqrt{A \cdot i_{sd2}^{np\ 2} + B \cdot i_{sd2}^{np} \cdot i_{sq2}^{np} + C \cdot i_{sq2}^{np\ 2}} \quad (\text{Б.22})$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ
 Главный энергетик
 ООО «КИНЕФ»

 В.А. Хачатурян
 « 27 » 02 2017 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы

«Структура и алгоритмы управления асинхронным частотно-регулируемым электроприводом при провалах напряжения в электрической сети».

Предприятие: ООО «Киришинефтеоргсинтез» Российская Федерация, Ленинградская обл., г. Кириши, ш. Энтузиастов д. 1 индекс 187110 телефон 8(81368) 97-807.

Настоящим актом подтверждается факт использования результатов диссертационной работы «Структура и алгоритмы управления асинхронным частотно-регулируемым электроприводом при провалах напряжения в электрической сети», выполненной Новожиловым Никитой Геннадиевичем в «Санкт-Петербургском горном университете» в период с 2013 г. по 2017 г.

Результаты и рекомендации диссертационной работы приняты к использованию при разработке методов и средств повышения надежности работы технологического электрооборудования при кратковременных провалах напряжения в сети электроснабжения.

Внедрение результатов диссертационной работы состоит в использовании системы обеспечения управляемости и работоспособности привода при кратковременных провалах напряжения, обеспечивающей в соответствии с разработанными в диссертации методами и алгоритмами реконфигурацию системы регулирования приводом для работы в режиме ослабленного поля или в режиме управляемой рекуперации кинетической энергии.

Разработанные алгоритмы позволяют обеспечить и создать:

- эффективное управление приводом при его работе в зоне ослабленного поля, вызванного провалами напряжения в сети, с целью обеспечения требуемого режима приводного механизма в рамках пропускной способности преобразователей частоты по напряжению и току;

- структуру асинхронного электропривода со скалярной системой управления без датчика скорости, обеспечивающую высокую точность регулирования в диапазоне скоростей 1/10;

- систему управления приводом в режиме электрической рекуперации кинетической энергии, запасенной в приводном механизме, построенную на базе выявленных закономерностей управляемого выбега в зависимости от типа и загруженности приводного механизма и параметров звена постоянного тока.

Использование разработанных средств и алгоритмов управления позволит обеспечить непрерывность технологического процесса переработки нефти за счет обеспечения работоспособности и управляемости привода во время провалов напряжения в сети на основе предложенных алгоритмических методов, реализующих потенциальные энергетические ресурсы частотно- регулируемого асинхронного электропривода.

Ведущий инженер – энергетик



В.Д. Головин

Руководитель группы силовой
полупроводниковой техники



А.В. Горчаков