

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ульяновский государственный технический университет»

На правах рукописи

Афлятунов Ильдар Фаатович

**АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С КОНДЕНСАТОРНЫМ
ПУСКО-КОМПЕНСИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**Диссертация на соискание
ученой степени кандидата технических наук**

Научный руководитель:
доктор технических наук,
старший научный сотрудник
А. В. Кузнецов

Ульяновск 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Состояние вопроса и задачи исследования	12
1.1. Обзор известных способов пуска асинхронного двигателя	13
1.2. Конденсаторные способы пуска	20
1.3. Компенсация реактивной мощности как один из путей энергосбережения в электроприводе	25
1.4. Анализ влияния конденсаторов на пусковой ток и коэффициент мощности АД	27
1.5. Выводы, цели и задачи исследования	44
2. Математическое описание основных элементов асинхронного электропривода ПКУ	45
2.1. Математическое описание асинхронного двигателя	45
2.2. Математическое описание конденсаторного пуско-компенсирующего устройства	49
2.3. Математическая модель асинхронного электропривода с пуско-компенсирующим устройством	51
2.4. Учет нелинейности параметров асинхронной машины	61
2.5. Математическое описание нагрузки	67
2.5.1. Описание нагрузки при плавном конденсаторном пуске	67
2.5.2. Описание нагрузки при форсированном конденсаторном пуске.....	70
Выводы	71
3. Исследование пусковых режимов асинхронного двигателя с пуско-компенсирующим устройством	73
3.1. Исследование влияния величины емкости конденсаторов на пусковые характеристики АД	75
3.2. Моделирование процесса разгона АД с последовательно включенными в цепь статора конденсаторами	80
3.3. Исследование плавного конденсаторного пуска АД	84

3.3.1. Исследование плавного конденсаторного пуска АД на холостом ходу.....	84
3.3.2. Исследование плавного конденсаторного пуска АД с нагрузкой на валу	87
3.4. Исследование форсированного конденсаторного пуска АД	95
3.4.1. Исследование устойчивой работы АД без шунтирования пусковых конденсаторов	96
3.4.2. Исследование форсированного конденсаторного пуска АД без добавочных активных сопротивлений с шунтированием конденсаторов после разгона	100
Выводы	106
4. Исследование коммутационных режимов системы асинхронный двигатель – пуско-компенсирующее устройство	108
4.1. Исследование переходных процессов подключения АД на сетевое напряжение	110
4.2. Конденсаторное пуско-компенсирующее устройство с тиристорными коммутаторами в силовой цепи	113
4.3. Определение благоприятного момента времени для отключения АД в конечной стадии разгона	119
4.4. Исследование переходных процессов при переключении пусковых конденсаторов на режим компенсации реактивной мощности	127
4.5. Работа АД при несимметрии емкости подключаемых конденсаторов.....	137
Выводы	140
5. Результаты экспериментального исследования и технико-экономическая оценка разработанного асинхронного электропривода с конденсаторным пуско-компенсирующим устройством.....	142
5.1. Схема системы управления конденсаторным пуском АД	142
5.2. Реализация микропроцессорной системы управления конденсаторным пуско-компенсирующим устройством	145

5.3. Результаты экспериментальных исследований	149
5.4. Экономическая оценка использования ПКУ	155
5.4.1. Методика расчета экономического эффекта	156
5.4.2. Расчет капиталовложений	156
5.4.3. Расчет эксплуатационных расходов	159
5.4.4. Расчет экономии расходов за счет компенсации реактивной мощности	160
5.4.5. Расчет общих затрат и экономической эффективности	162
Выводы	163
Заключение	164
Литература	166
Приложение	181

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АД) хорошо зарекомендовал себя в качестве приводного звена различных механизмов благодаря своей простой конструкции, высокой надежности, простоте в обслуживании. Одним из недостатков АД является высокое потребление реактивной мощности, особенно в моменты снижения механической нагрузки на валу, что характерно для многих исполнительных механизмов по условиям технологического процесса. Это вызывает потери в питающей электрической сети, которые уменьшаются путем установки компенсирующих устройств (КУ). На практике сложилось так, что в силу экономических причин КУ устанавливаются не индивидуально у каждого электроприемника со сниженным значением коэффициента мощности – $\cos\varphi$, а в точках сети, питающих группы электроприемников – распределительных пунктах. При таком решении обеспечивается снижение потерь, обусловленных передачей реактивной мощности по сетям от генераторов станций до места установки КУ. Участки сети от места установки групповой КУ до индивидуальных электроприемников остаются не разгруженными от реактивной мощности, потери на этих участках достигают значительных величин.

К другим недостаткам АД можно отнести высокий пусковой ток, значительные электродинамические усилия, действующие на активные части электродвигателя, механические удары в механизмах вследствие значительных колебаний пускового электромагнитного момента, которые приводят к снижению срока службы как самого двигателя, так и приводного механизма. Пусковые токи вызывают колебания напряжения в питающей сети, снижают качество электрической энергии, что негативно сказывается на всех электроприемниках, получающих питание от этой сети, особенно это ощутимо при значительных пусковых моментах, частых пусках и реверсах.

Необходимая величина пускового момента АД определяется моментом трогания исполнительного механизма. В преобладающем большинстве случаев исполнительные механизмы не имеют высокого значения момента трогания.

Появляется возможность ограничить пусковые токи АД до уровня 2–3 от номинального путем применения устройств плавного пуска (УПП). В случае высокого момента трогания исполнительного механизма требуется высокий пусковой момент. В этом случае, чтобы избежать завышения номинальной мощности АД и ограничить пиковый ток в питающей сети, возможно применение устройств форсированного пуска.

Известны пусковые устройства с применением конденсаторов, которые используются только в пусковом режиме для обеспечения либо плавного, либо форсированного пуска АД. В рабочих режимах конденсаторы отключаются. Однако использование этих же конденсаторов в рабочем режиме для компенсации реактивной мощности позволило бы снизить расчетную мощность групповой КУ на сумму мощностей индивидуальных КУ, установленных в пуско-компенсирующем устройстве (ПКУ) и практически без дополнительных инвестиций на КУ снизить потери на участках сети от места установки групповой КУ до АД с ПКУ.

В литературе имеются предложения по объединению пускового и компенсирующего устройств в единое ПКУ, когда одни и те же конденсаторы используются как при пуске АД, так и при компенсации реактивной мощности, потребляемой из сети двигателем. Однако предварительные исследования показали, что схемотехника устройств и заложенные в них алгоритмы переключения конденсаторов с пускового режима на режим компенсации реактивной мощности (рабочий режим) могут привести к самораскачиванию АД в пусковом режиме, возникновению значительных переходных амплитуд колебания тока и электромагнитного момента при переключении конденсаторов с пускового на рабочий режим, а также перекомпенсации реактивной мощности в рабочем режиме. Все это не позволяет использовать ПКУ на практике.

Задача выбора емкости конденсаторов для пускового режима не имеет аналитического решения, а известные расчетные зависимости, полученные из анализа режима самовозбуждения, не учитывают динамических свойств электромеханической системы и не отражают влияния момента инерции

привода. Минимальное значение емкости последовательно включенных конденсаторов, при которой не возникает режим самовозбуждения и обеспечивается устойчивый двигательный режим электромеханической системы привода, может быть определено путем решения уравнений нелинейной модели двигателя совместно с уравнениями для падения напряжения на предвключенных конденсаторах.

Коммутация конденсаторов может вызвать повышение напряжений (перенапряжения) и токов по сравнению с их номинальными значениями. Появляющиеся в сети перенапряжения создают опасность выхода из строя ответственных потребителей, содержащих полупроводниковые приборы. Это обстоятельство требует рассмотрения коммутационных процессов при включении нагрузки, содержащей конденсаторы.

Анализ перечисленных выше проблем позволил сформулировать цель работы и основные задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности функционирования электротехнического комплекса «Электрическая сеть – ПКУ – АД – нагрузка» за счет совершенствования алгоритма управления асинхронным электроприводом с конденсаторным ПКУ с обеспечением управляемого пуска АД и компенсации реактивной мощности электродвигателя в рабочем режиме.

Для достижения цели решены следующие задачи:

1. Проведен анализ известных схем конденсаторных ПКУ, определены их достоинства и недостатки.
2. Созданы математическая и компьютерная модели асинхронного электропривода с конденсаторным ПКУ, предназначенные для изучения статических и динамических режимов его работы.
3. Проведен анализ влияния включенных последовательно с обмотками статора АД конденсаторов на пусковые характеристики электродвигателя.
4. Исследованы переходные процессы при переключении конденсаторного

ПКУ с режима пуска на режим компенсации реактивной мощности, определены благоприятные условия протекания этих процессов и способы их реализации.

5. Экспериментально подтверждена работоспособность предложенных способов конденсаторного управления пусковыми и рабочими режимами работы асинхронного электропривода.

Объектом исследования является электротехнический комплекс «Электрическая сеть – ПКУ – АД – нагрузка».

Предметом исследования является алгоритм управления асинхронным электроприводом с конденсаторным ПКУ и способы его реализации.

Методы исследования:

Теоретические исследования проведены с использованием основных положений теории электрических цепей, математической теории электрических машин, методов электромеханической аналогии и математического моделирования на ЭВМ. В качестве средства компьютерного моделирования использовалась программная среда МВТУ 3.7. Экспериментальные исследования, в которых использовались современные средства сбора и обработки данных, проводились на опытном образце.

Научная новизна и теоретическая значимость работы:

1. Впервые получены соотношения емкостного сопротивления конденсаторов и индуктивного сопротивления АД, при которых обеспечиваются форсированный и плавный режимы конденсаторного пуска АД, позволяющие упростить анализ этих режимов на универсальных моделях путем использования полученных соотношений в качестве ограничений.

2. Разработана математическая модель электротехнического комплекса «Электрическая сеть – ПКУ – АД – нагрузка», которая отличается от известных тем, что она позволяет определить момент времени переключения ПКУ с пускового режима на режим выбега АД в функции тока статора, момент времени переключения ПКУ с режима выбега АД на режим питания АД от сети в функции угла между вектором ЭДС статора и обобщенным вектором сети и момент времени подключения конденсаторов ПКУ на компенсацию реактивной

мощности в функции напряжения на конденсаторах, и позволяет рассчитать технические характеристики элементов принципиальной схемы для технической реализации ПКУ.

3. Разработан алгоритм управления асинхронным электроприводом с конденсаторным ПКУ, отличающийся от известных тем, что он исключает возникновение самораскачивания АД, ограничивает переходные амплитуды колебания тока и электромагнитного момента, и позволяет повысить эффективность функционирования электротехнического комплекса «Электрическая сеть – ПКУ – АД – нагрузка».

Практическая ценность:

1. Предложено схемотехническое решение для конденсаторного ПКУ, защищенное патентом Российской Федерации на изобретение, отличающееся от известных схемой соединения конденсаторов и алгоритмом управления переключением ПКУ, обеспечивающими отсутствие явления перекомпенсации реактивной мощности.

2. Полученные соотношения емкостного сопротивления конденсаторов и индуктивного сопротивления АД могут быть использованы проектными организациями для выбора емкости конденсаторов при проектировании асинхронного электропривода с конденсаторным ПКУ.

3. Разработано конденсаторное ПКУ для асинхронного электропривода, внедренное на заводе Полиолефинов ПАО «Нижекамскнефтехим», которое в пусковом режиме ограничивает ток АД, в рабочем режиме компенсирует реактивную мощность, потребляемую АД из сети, снижает ударные нагрузки при переключении ПКУ на рабочий режим, что повышает надежность и энергоэффективность ЭП.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением строгих математических методов исследований, компьютерным моделированием и сравнением с результатами экспериментов на опытном образце.

Реализация результатов работы.

Опытный образец конденсаторного ПКУ с микропроцессорной системой управления принят в качестве альтернативы при реконструкции системы управления плавным пуском электропривода вентилятора приточной вентиляционной камеры, обслуживающей технологическое здание производства полипропилена завода Полиолефинов ПАО «Нижекамскнефтехим», и проходит эксплуатационные испытания. Эффективность установленного электропривода подтверждена актом о внедрении результатов диссертационной работы. На предложенное конденсаторное пуско-компенсирующее устройство получен патент на изобретение Российской Федерации.

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих НТК: II Международная научно-практическая конференция, г. Пенза, 2011г.; XVII Международная научно-практическая конференция, г. Томск, 2011г.; III Международная научно-практическая конференция, г. Пенза, 2012г.; Международная научно-техническая конференция, г. Севастополь, 2012г.; Международная научно-практическая конференция, г. Ульяновск, 2012г.; VIII Международная молодежная научная конференция, г. Казань, 2013г.; Международная научно-техническая конференция, г. Севастополь, 2013г.; Международная научно-практическая конференция, г. Ульяновск, 2014г.; VIII международная (XIX Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2014, г. Саранск, 2014г.; Международная научно-техническая конференция, г. Севастополь, 2014г.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 17 работ, из них 3 статьи в изданиях из перечня ВАК, 1 тезис докладов, 1 патент на изобретение.

Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. Математическая модель электротехнического комплекса «Электрическая сеть – ПКУ – АД – нагрузка», позволяющая определить моменты времени

переключения между различными режимами работы ПКУ, и рассчитать технические характеристики элементов принципиальной схемы для технической реализации ПКУ.

2. Алгоритм управления асинхронным электроприводом с конденсаторным ПКУ, позволяющий повысить эффективность функционирования электротехнического комплекса «Электрическая сеть – ПКУ – АД – нагрузка» благодаря исключению негативного влияния явления самораскачивания АД и переходных процессов переключения ПКУ на рабочий режим.

3. Схемотехническое решение для конденсаторного ПКУ, защищенное патентом Российской Федерации на изобретение, обеспечивающее отсутствие явления значительной перекомпенсации реактивной мощности.

Научная квалификационная работа на соискание степени кандидата технических наук выполнена в соответствии с паспортом специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» и соответствует формуле специальности: «... принципы и средства управления объектами, определяющие функциональные свойства действующих или создаваемых электротехнических комплексов и систем промышленного, ... бытового и специального назначения».

Объектом изучения: «...являются электротехнические комплексы и системы... электропривода... промышленных и сельскохозяйственных предприятий и организаций, ... служебных и жилых зданий, специальной техники».

Область исследования соответствует пунктам: 1 «...математическое... и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», 3 «...разработка алгоритмов эффективного управления», 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах...»

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (135 наименований) и приложения (1 страница), включает 181 страницы машинописного текста, 80 рисунков и 15 таблиц.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работу конденсаторного ПКУ можно разделить на два основных режима: пусковой режим, в котором происходит пуск АД с требуемыми величинами тока и электромагнитного момента, и рабочий режим, в котором АД питается от сети, а конденсаторы компенсируют реактивную мощность, потребляемую электродвигателем.

К рассмотрению вопроса пуска АД следует подходить с учетом следующих основных положений [27, 60, 82, 84]:

1) двигатель должен развивать при пуске достаточно большой пусковой момент, который должен быть больше статического момента сопротивления на валу, чтобы ротор электродвигателя мог прийти во вращение и достичь номинальной скорости вращения;

2) величина пускового тока должна быть ограничена таким значением, чтобы не происходило повреждения двигателя и нарушения нормального режима работы сети;

3) схема пуска должна быть по возможности простой, а количество и стоимость пусковых устройств – малыми.

К рассмотрению вопроса компенсации реактивной мощности следует подходить с учетом того, что емкость батареи компенсирующих конденсаторов должна быть ограничена таким значением, чтобы не происходило перекомпенсации реактивной мощности.

Исследованию пуска и работы АД с подключенными к обмоткам статора конденсаторами посвящены работы таких российских ученых, как В.Н. Дмитриев [40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50], А.И. Игнайкин, Л.А. Кучумов, Б.Д. Гандин [30], В.И. Кашкалов [66], Б.И. Комаров [14], Л.П. Петров [93, 94, 95, 96, 97, 98], О.В. Иванов [14], А-З.Р. Джендубаев, И.И. Петров [92].

С целью определения целесообразности применения конденсаторов в пусковом режиме проведем обзор существующих основных способов пуска АД.

1.1 Обзор известных способов пуска асинхронного двигателя

В зависимости от мощности электродвигателя, характера нагрузки существуют различные способы пуска АД с короткозамкнутым ротором: прямой пуск, автотрансформаторный пуск, пуск переключением обмоток со звезды на треугольник, реакторный пуск, пуск с помощью тиристорного преобразователя напряжения, пуск с помощью преобразователя частоты, конденсаторный пуск. Рассмотрим особенности каждого способа пуска.

Так, наиболее простым способом пуска АД является прямой пуск, когда обмотка статора включается непосредственно в сеть, на номинальное напряжение обмотки статора.

Однако прямой пуск АД обладает существенным недостатком, который проявляется в возникновении броска тока в сети, питающей электродвигатель. Известно, что в серийных двигателях при прямом пуске возникает ток, превышающий номинальный в 4 – 7 раз, при этом коэффициент мощности $\cos\varphi$ остается небольшим (0,2 – 0,4), а потребляемая активная мощность превышает номинальную мощность электродвигателя в 1,5 – 2 раза [30]. Большой пусковой ток может вызвать значительное падение напряжения, вследствие чего другие электродвигатели, питающиеся от этой сети, могут остановиться. Поэтому прямой пуск возможен, когда сеть достаточно мощна и пусковые токи электродвигателей не вызывают недопустимо больших падений напряжения в сети. Необходимо также учитывать, что при прямом пуске возникают механические удары, отрицательно влияющие на срок службы приводного механизма, а возникающие электродинамические усилия, действующие на активные части АД, снижают срок службы самого электродвигателя.

При реакторном способе пуска на время пуска последовательно с обмоткой статора АД подключается реактор, который по завершению пуска шунтируется. Так как реактор ограничивает пусковой ток АД, то провал напряжения при пуске уменьшается. При использовании реактора можно достичь практически любой степени ограничения пускового тока и тем самым добиться допустимой

величины провала напряжения генератора, что позволяет обеспечить большую, чем при прямом пуске, соизмеримость мощностей электродвигателя и генератора – до 0,4–0,5. Этот способ пуска удобен также потому, что он дает возможность изменить сопротивление реактора путем изменения числа витков в процессе наладки электропривода. К преимуществам реакторного пуска нужно отнести большую простоту схемы, меньшее количество необходимой аппаратуры [30].

Необходимо помнить, что ограничение тока реактором вызывает резкое (в квадрате) уменьшение момента АД. Поэтому реакторный способ пуска может применяться в тех случаях, когда при требуемом ограничении тока соблюдается необходимое превышение пускового момента АД над моментом страгивания механизма. Пуск через реактор рекомендуется для электроприводов механизмов, у которых пусковой режим осуществляется на холостом ходу, например, винты регулируемого шага, крыльчатые движители. На практике, как правило, при реакторном пуске $M_{\text{пр}} = (0,15 \div 0,5)M_{\text{ном}}$.

Также во время разгона АД не высок коэффициент мощности электродвигателя – из сети потребляется большая реактивная мощность. Для осуществления требуемой пусковой характеристики требуется несколько комплектов реакторов разного номинала, которые включаются в определенный момент времени в питающую АД сеть. Недостатком этого метода пуска является также возникновение уравнильных (свободных составляющих) токов, вызванных коммутацией реакторов, ударные знакопеременные моменты затухают медленней, чем при обычном пуске.

Автотрансформаторный способ пуска заключается в пуске электродвигателя с пониженным напряжением через автотрансформатор. По достижении АД определенной скорости двигатель получает питание через часть обмотки автотрансформатора, который работает как реактор, а в конечной стадии разгона АД подключается к сети на полное напряжение. Особенностью автотрансформаторного пуска является то, что пусковой момент электродвигателя и пусковой ток сети уменьшаются в одинаковое число раз.

Однако это преимущество достигается ценой значительного удорожания и усложнения схемы. Поэтому автотрансформаторный пуск целесообразно применять при тяжелых условиях пуска для мощных АД [30].

Пуск переключением «звезда – треугольник» может применяться в случаях, когда выведены все шесть концов обмотки статора и АД нормально работает соединением обмотки статора в треугольник, например, когда электродвигатель на 380/220В и с соединением обмоток Y/Δ работает от сети 220В. В этом случае при пуске обмотка статора включается в звезду, а при достижении нормальной скорости вращения переключается в треугольник. Так как пусковой ток в сети при соединении обмоток статора звездой в три раза меньше, чем при соединении треугольником, то пусковой и критический моменты также уменьшаются в три раза, соответственно в три раза уменьшаются пусковая и критическая мощности АД.

Пуск АД способом переключения обмоток со звезды на треугольник целесообразно применять в тех случаях, когда требуется значительное уменьшение тока, а по условиям разгона механизма пусковой момент электродвигателя может быть снижен в три раза. Применению способа пуска переключением обмоток со звезды на треугольник способствует то, что промышленностью серийно выпускаются станции управления для этого способа, рассчитанные на различные мощности электродвигателей [30].

Недостатком пуска переключением со звезды на треугольник является то, что при пусковых переключениях цепь АД разрывается, что связано с возникновением коммутационных перенапряжений. При этом в момент повторного включения возникают кратковременные броски токов и моментов, которые могут значительно превысить номинальные значения. Поэтому применять указанный способ в электроприводах сложных в кинематическом отношении механизмов не рекомендуется во избежание нарушения их работы. Этот способ ранее широко применялся при пуске низковольтных электродвигателей, однако с увеличением мощности сетей потерял свое прежнее значение и в настоящее время используется сравнительно редко.

При пуске с помощью тиристорных преобразователей напряжения (ТПН) за счет изменения во времени угла открытия вентилей от некоторого максимального значения до значения $\alpha=\varphi$ первая гармоника напряжения, приложенного к статору АД, изменяется от некоторого начального значения (в пределе $U_{1\text{нач}}=0$) до значения $U_1=U_{1\text{ном}}$, при этом частота переменного напряжения основной гармоники остается неизменной и равна частоте сети, т.е. $f_1=f_{1\text{ном}}$. При таком управлении напряжением при пуске синхронная скорость АД и критическое скольжение не изменяются, но регулируется момент электродвигателя $M=f(U_1^2)$ [16, 17, 30, 95].

При таком подходе к управлению пуском вид динамических характеристик (при прочих равных условиях) зависит от времени регулирования напряжения $t_{\text{рег}}$, в течение которого и происходит изменение статорного напряжения от значения $U_{1\text{нач}}$ до $U_{1\text{ном}}$. Увеличивая время регулирования $t_{\text{рег}}$, можно обеспечить желаемую скорость изменения момента, т.е. его плавное нарастание до установившихся значений на статической характеристике, что должно привести к увеличению времени пуска АД. При заданном значении времени регулирования $t_{\text{рег}}$ скорость, при которой электродвигатель выходит на естественную характеристику, зависит от статического момента и момента инерции электропривода [16].

Использование устройств плавного пуска на основе ТПН-АД позволяет одновременно снижать потребление электроэнергии, выполняя функцию энергосбережения недогруженного АД при работе в зоне номинальной скорости, обеспечив его работу за счет ТПН на регулировочной ($U_1 < U_{1\text{ном}}$), а не на естественной ($U_1 = U_{1\text{ном}}$) характеристике (где U_1 – действующее значение 1-й гармоники напряжения, приложенного к двигателю; $U_{1\text{ном}}$ – действующее значение номинального напряжения сети). При работе АД на естественной характеристике при изменении S от 0 до $S=S_{\text{ном}}$ электромагнитные потери в двигателе $\Delta P_{\text{эм}}$ зависят только от статического момента. При работе на регулировочной характеристике ($U_1 < U_{1\text{ном}}$) электромагнитные потери в двигателе являются функцией от статического момента и скольжения АД

$\Delta P_{эм} = f(M_c, S)$, что позволяет определить значение $S_{опт}$, доставляющее минимум функции $\Delta P_{эм} = f(M_c, S)$ [17, 78].

Стоит отметить, что экономия электроэнергии при применении системы ТПН - АД не столь значительна, чтобы обеспечить быструю окупаемость ТПН, включенного в статорные цепи электродвигателя. Использование ТПН в большинстве случаев вызвано технологическими требованиями, производственных механизмов (транспортёров, насосов, вентиляторов, лифтов, конвейеров и др.), требующих плавного пуска и ограничения ударных моментов, ускорений и рывков, возникающих при прямом подключении АД к номинальному напряжению сети.

Наряду со снижением перегрузочной способности АД пуск по системе ТПН–АД имеет следующие недостатки:

- пуск сопряжен со значительным снижением коэффициента мощности;
- в выходном напряжении ТПН присутствуют высшие гармоники, которые увеличивают потери в АД;
- длительный пуск при пониженном напряжении сопровождается повышенными потерями в статоре и в роторе. В этом случае для обеспечения работы короткозамкнутого АД без перегрева необходимо увеличение в несколько раз номинальной мощности электродвигателя по сравнению с максимальной мощностью статической нагрузки.

Пусковые токи, ударные моменты, потери мощности и потребление реактивной мощности могут быть снижены при плавном изменении частоты напряжения статора АД с помощью преобразователя частоты. При частотном пуске плавно повышается частота питающего электродвигатель переменного напряжения от нуля до номинальной. Частота вращения поля статора также плавно изменяется от нуля до синхронной. Ротор, следуя за полем статора, также плавно разгоняется.

Проведенные в работах [17, 79, 86] исследования позволяют сделать вывод о том, что частотный пуск позволяет ограничить пусковой ток без снижения при этом перегрузочной способности АД, что важно, когда надо обеспечить большое

значение пускового момента, например, при пуске двигателя под нагрузкой или от сети ограниченной мощности.

Использование преобразователя частоты только в качестве устройства плавного пуска, когда нет необходимости регулировать частоту вращения двигателя, может быть экономически невыгодно, так как устройство использует принцип двойного преобразования энергии (выпрямление-инвертирование), что приводит к увеличению габаритов, мощности и как следствие стоимости устройства. Также следует отметить, что обычно в качестве выпрямительного каскада используется выпрямитель на базе не полностью управляемых ключевых элементов (тиристоров, диодов), что приводит к искажению формы потребляемого из сети тока (повышенное содержание высших гармоник), что оказывает негативное влияние на питающую сеть. Поэтому пуск АД с помощью преобразователей частоты целесообразно осуществлять только в тех случаях, когда эти преобразователи используются для управления рабочими режимами электродвигателя [77].

Все вышеперечисленные методы позволяют ограничить величину пускового тока, но при соизмеримости мощностей электродвигателя и источника электроэнергии эти способы (кроме частотного пуска) не позволяют рационально решить задачу пуска. Кроме того, при использовании рассмотренных способов ухудшается и без того низкий пусковой коэффициент мощности сети, а пониженный электромагнитный момент имеет такой же колебательный характер, как и при прямом пуске.

Для механизмов с тяжелыми условиями пуска, момент сопротивления которых максимален в начале пуска, а по мере разгона его величина снижается, по условию гарантированного пуска зачастую выбирается приводной асинхронный двигатель (АД) завышенной мощности, который остается недогруженным в рабочем режиме. ГОСТом установлено, что пусковой момент АД с короткозамкнутым ротором мощностью 0,6—100 кВт находится в диапазоне от 1,0 до 2,0 от номинального, а мощностью 100—1000 кВт – от 0,7 до 1,0 от номинального. Получение кратностей пускового момента, больших

регламентированных ГОСТом, обычно связано либо с увеличением активного сопротивления ротора, либо с изменением конструкции ротора, что ухудшает энергетические показатели двигателя [85, 87, 109]. Таким образом, в тех случаях, когда необходимо преодоление момента трогания, превышающего пусковой момент АД, актуальным является форсирование пуска.

Форсированный пуск АД применим также в тех случаях, когда возникает необходимость быстрого прохождения электродвигателем зоны резонанса, в которой при недостаточной динамике разгона момент сопротивления механизма увеличивается настолько, что дальнейший разгон электропривода невозможен. В работе [29] проведены исследования асинхронного электропривода зарезонансных вибрационных транспортирующих машин и форсирование пуска электропривода в зарезонансную область осуществляется последовательным подключением в цепь статора АД конденсаторов.

Для обеспечения пуска с заданными параметрами пускового режима АД и качества электроэнергии может оказаться целесообразным применение способов пуска, основанных на использовании статических конденсаторов, так как, во-первых, по окончании пуска конденсаторы могут быть подключены к зажимам обмотки статора и во время работы электродвигателя компенсировать его намагничивающий ток, а при отключении АД играть роль тормозных; во-вторых, благодаря улучшению коэффициента мощности цепи значения апериодических составляющих токов, а следовательно, и ударных знакопеременных составляющих момента уменьшаются; в-третьих, способность конденсаторов компенсировать падение напряжения в протяженной кабельной линии, а также, в частных случаях, повышать напряжение на участке цепи выше значения напряжения питающей сети позволяет повысить перегрузочную способность АД, что особенно актуально при питании электродвигателя от источника ограниченной мощности.

Рассмотрим основные виды пуска АД, основанные на использовании статических конденсаторов.

1.2 Конденсаторные способы пуска

Суть конденсаторных способов пуска состоит в том, что с целью управления пуском АД и увеличения коэффициента мощности применяются пусковые контуры, составной частью которых являются статические конденсаторы, последовательно или параллельно подключаемые к электродвигателю во время пуска. Емкость конденсаторов выбирается такой, чтобы пусковой ток был либо опережающим, либо отстающим, но с повышенным коэффициентом мощности. При этом продольная составляющая реакции якоря генератора либо приобретает намагничивающий характер, либо, оставаясь размагничивающей, будет существенно уменьшена, что в обоих случаях аналогично эффекту форсировки возбуждения в функции тока. Таким образом, напряжение на шинах генератора может быть стабилизировано в нужных пределах [30].

Конденсаторные пусковые устройства (КПУ) можно разделить на четыре основных типа: феррорезонансное пусковое устройство, КПУ с последовательным включением конденсаторов, КПУ с параллельным включением конденсаторов, конденсаторно-реакторное пусковое устройство.

Феррорезонансное пусковое устройство (ФПУ), изображенное на рис. 1.1, включает в себя насыщающийся серийный трансформатор Tr , блок конденсаторов C и контактор $K2$, который своими контактами шунтирует пусковое устройство после достижения АД номинальной частоты вращения. При замыкании контактора $K1$ (контактор $K2$ разомкнут) электродвигатель начинает разгоняться. По мере увеличения частоты вращения индуктивное сопротивление АД и приведенное сопротивление пускового устройства непрерывно и синхронно растут, обеспечивая неизменный характер сопротивления системы АД–ФПУ и исключая тем самым самовозбуждение. Устройство позволяет изменять величину и характер пускового тока в зависимости от параметров трансформатора и емкости конденсаторов. Вид искусственной механической характеристики АД такой же, как и при реакторном пуске.

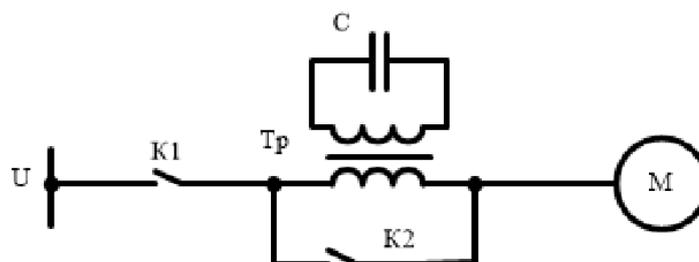


Рис. 1.1 – Феррорезонансное пусковое устройство

Для систем с частотой 50 Гц ФПУ имеет довольно значительные массогабаритные характеристики, поэтому целесообразно применять эти устройства только в системах частотой 400 Гц.

КПУ с последовательным включением емкости (рис. 1.2) состоит из блока конденсаторов C , активного сопротивления R и контактора $K2$, шунтирующего своими контактами устройство после достижения АД номинальной частоты вращения. Устройство позволяет ограничивать пусковой ток, одновременно обеспечивая опережающий характер тока. Напряжение при этом способе пуска может быть полностью стабилизировано либо даже повышено. Активное сопротивление служит для устранения самовозбуждения в системе. Искусственная механическая характеристика АД определяется расчетным путем для каждого конкретного случая [30].

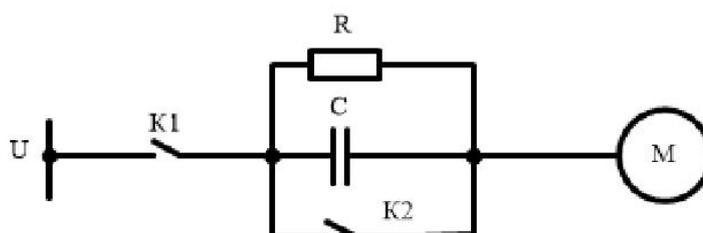


Рис. 1.2 – КПУ с последовательным включением конденсаторов

Пуск с параллельным включением конденсаторов заключается в подключении параллельно к обмоткам двигателя неполярных конденсаторов. Схема КПУ с параллельным включением конденсаторов представлена на рис. 1.3. КПУ состоит из параллельно включенных конденсаторов $C1$ и $C2$ и контактора $K2$, отключающего конденсаторы $C1$ после завершения пуска [30].

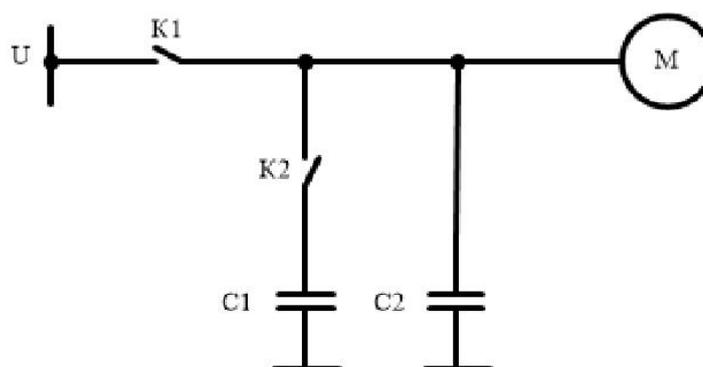


Рис. 1.3 – КПУ с параллельным включением конденсаторов

Данный способ пуска может применяться в тех случаях, когда не требуется ограничения пусковой активной мощности АД. Пусковой ток двигателя, потребляемый из сети, уменьшается за счёт компенсации конденсаторами С1 и С2 реактивной мощности АД. В случае пуска АД от сети ограниченной мощности достигается увеличение напряжения питания двигателя, так как из сети потребляется только активная мощность, то есть только активная составляющая тока АД.

Однако для компенсации реактивной мощности при пуске требуется большая мощность конденсаторов, превосходящая мощность компенсации АД в номинальном режиме в 8-10 раз, что обусловлено низким коэффициентом мощности двигателя в процессе пуска (0,2-0,3). Поэтому после достижения электродвигателем номинальной частоты вращения конденсаторы С1 отключаются и остаются включенными конденсаторы С2, компенсируя реактивную мощность АД в рабочих режимах. Таким образом, в данном устройстве в рабочих режимах АД используется часть конденсаторов из числа пусковых. При пуске с параллельным включением конденсаторов АД запускается по естественной механической характеристике.

Конденсаторно-реакторное пусковое устройство КРПУ (рис. 1.4) состоит из последовательно включенного реактора Р в цепи АД, служащего для ограничения пусковой мощности, параллельно включенных конденсаторов С1 и С2 и контакторов К2 и К3, отключающих конденсаторы С1 и шунтирующих реактор Р после достижения электродвигателем номинальной частоты вращения. Конденсаторы С1 и С2 служат для компенсации реактивной составляющей тока.

Существенным достоинством устройства, так же как и в предыдущем случае, является возможность использования конденсаторов из числа пусковых для компенсации реактивной мощности АД в рабочих режимах. Искусственная механическая характеристика АД имеет вид характеристики при реакторном пуске [30].

Более эффективно для пуска АД, особенно мощных, применять схему, в которой при пуске конденсаторы включены с обмотками статора последовательно, а после пуска переключаются параллельно обмоткам статора и сети, обеспечивая компенсацию реактивной мощности двигателя в рабочем режиме. При этом включение конденсаторов, компенсируя часть реактивного сопротивления, должно привести к уменьшению периодических составляющих электромагнитного момента двигателя и повышению плавности разгона двигателя. Эта способность конденсаторов, включенных в цепь статора, уменьшать переходные составляющие момента, не ограничивая его установившегося значения, является важной отличительной особенностью данного способа формирования динамических характеристик и представляет практический интерес [30, 29].

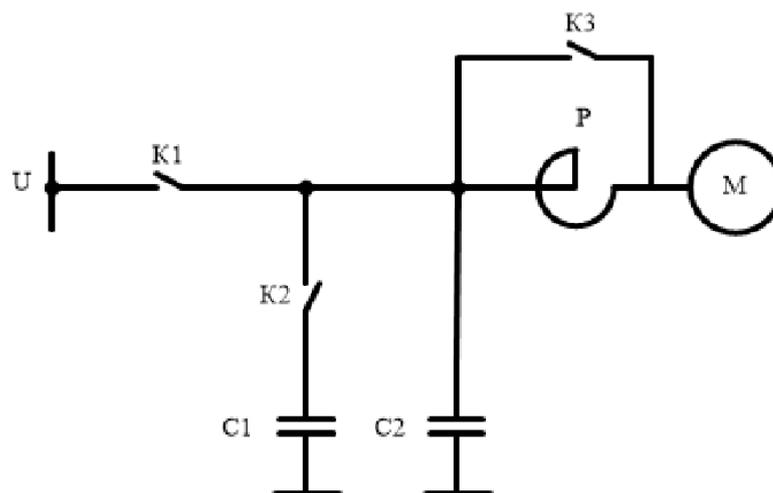


Рис. 1.4 – Конденсаторно-реакторное пусковое устройство

Однако при всех положительных моментах при работе асинхронного двигателя с последовательно включенными конденсаторами необходимо учитывать, что наличие конденсаторов в составе электрической системы может привести к ряду явлений, нарушающих работоспособность системы.

В системах, содержащих электрические машины и конденсаторы, возможно нарушение электромагнитной устойчивости в виде параметрического резонанса. Параметрический резонанс характеризуется ростом напряжений и токов, которые могут значительно превысить номинальные значения. Такой режим в инженерной практике получил название самовозбуждения. Самовозбуждение может сопровождаться явлением самораскачивания, то есть периодическими колебаниями частоты вращения роторов машин [29, 30, 67, 97].

Поэтому емкость конденсаторов должна выбираться так, чтобы самовозбуждение и самораскачивание не развивались. Если при этом емкость выбрана так, что номинальная скорость двигателя находится вблизи зоны асинхронного самовозбуждения, то при пуске с малой нагрузкой значительно увеличивается перерегулирование при скорости, близкой к установившейся. Однако периодическая составляющая момента и число колебаний невелики.

Конденсаторные пусковые устройства с последовательным включением конденсаторов в зависимости от величины предвключенной емкости могут применяться как для форсирования пуска, так и для снижения значения пускового тока. В последнем случае АД запускается при приложенном к статорным обмоткам пониженном напряжении, что влечет за собой снижение перегрузочной способности двигателя. В связи с этим конденсаторные пусковые устройства с последовательным включением конденсаторов с целью снижения пускового тока АД целесообразно применять для электроприводов, имеющих вентиляторную характеристику момента сопротивления, или механизмов, пускающихся на холостом ходу.

На промышленных предприятиях встречаются насосные, компрессорные и вентиляторные станции, отдельные электроприводы которых работают с более низким коэффициентом мощности, чем остальные. В таких случаях, а также в сетях ограниченной мощности, наряду с групповой компенсацией реактивной мощности целесообразно применять единичную компенсацию реактивной мощности таких электроприводов. Для таких целей могут применяться

конденсаторные ПКУ, которые при пуске АД работают как устройства плавного пуска, а в рабочем режиме обеспечивают компенсацию реактивной мощности.

Проведенные в работе [43] исследования показали, что величина емкости конденсаторов в пусковом режиме должна в несколько раз превышать емкость конденсаторов в номинальном режиме, и поэтому делается вывод о целесообразности применения ПКУ с регулируемой емкостью конденсаторов.

1.3 Компенсация реактивной мощности как один из путей энергосбережения в электроприводе

Циркуляция реактивной мощности между системой электроснабжения и электроприводом сопровождается потерями мощности. В связи с этим снижение уровня этой мощности, называемое обычно компенсацией реактивной мощности, определяет одну из возможностей энергосбережения [60]. Более того, прохождение реактивной мощности снижает пропускную способность всех элементов системы электроснабжения и приводит к дополнительному падению напряжения в линиях электропередачи и трансформаторах. Таким образом, компенсация реактивной мощности представляет собой важную технико-экономическую задачу.

К средствам компенсации реактивной мощности относятся конденсаторные батареи, синхронные двигатели, синхронные компенсаторы и фильтрокомпенсирующие устройства [38, 53, 60, 111].

На промышленных предприятиях наибольшее распространение как средство компенсации реактивной мощности получили статические конденсаторы, основными достоинствами которых являются:

- 1) незначительные потери активной мощности;
- 2) отсутствие вращающихся частей и сравнительно малая масса установки с конденсаторами;
- 3) более простая и дешевая эксплуатация, чем других компенсирующих устройств;
- 4) возможность увеличения или уменьшения установленной мощности в

зависимости от потребности;

5) возможность установки в любой точке сети: у отдельных электроприемников, группами в цехах или крупными батареями.

Кроме того, выход из строя отдельного конденсатора, при надлежащей его защите, не отражается обычно на работе всей конденсаторной установки.

Для безопасности обслуживания отключенных конденсаторов при снятии электрического заряда требуется применение разрядных сопротивлений, присоединенных параллельно к конденсаторам. В целях надежного разряда присоединение разрядных сопротивлений к конденсаторам следует производить без промежуточных разъединителей, рубильников или предохранителей. Разрядные сопротивления должны обеспечивать быстрое автоматическое снижение напряжения на зажимах конденсатора.

При непосредственном присоединении конденсаторов и приемника электроэнергии к сети под общий выключатель специальных разрядных сопротивлений не требуется. В этом случае разряд конденсаторов происходит на обмотки электроприемника.

По способам компенсации различают единичную, групповую и централизованную схемы компенсации.

Единичная компенсация предусматривает компенсацию реактивной мощности одной отдельной электроустановки.

Групповая компенсация предусматривает компенсацию реактивной мощности нескольких электроустановок, расположенных рядом и подключенных к одному распределительному устройству.

Централизованная компенсация применяется для компенсации реактивной мощности нескольких групп электроприемников цеха или предприятия в целом.

Включение компенсирующих устройств может осуществляться параллельно электроустановке или последовательно с ней. Первый вариант, получивший название поперечной компенсации, применяется для повышения собственно коэффициента мощности электроустановок. Вторым вариантом включения, называемый продольной компенсацией, применяется для

электроприемников, работающих с резкопеременной нагрузкой. Его применение позволяет снизить колебания напряжения за счет компенсации индуктивных сопротивлений элементов систем электроснабжения.

Реактивная мощность компенсирующей установки (КУ) $Q_{КУ}$ определяется по формуле

$$Q_{КУ} = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2), \quad (1.1)$$

где P – активная мощность электроприемника (электропривода); $\operatorname{tg}\varphi_1$, $\operatorname{tg}\varphi_2$ – тангенсы угла φ соответственно после и до компенсации.

В практике электропривода применение находит индивидуальная компенсация реактивной мощности электродвигателей, в том числе и низковольтных. Такая компенсация производится как в целях снижения потерь мощности в системе электроснабжения, так и для повышения напряжения на двигателе при его питании по длинным линиям. Формула для расчета мощности компенсирующего устройства $Q_{КУ}$, повышающего напряжение на величину ΔU , имеет вид

$$Q_{КУ} = \Delta U \cdot U_{\text{ном}} / (X_0 \cdot L),$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение питания; X_0 – удельное реактивное сопротивление двигателя; L – длина питающей линии.

Использование конденсаторов для пуска АД, а в рабочем режиме для компенсации потребляемой им реактивной мощности представляется весьма перспективным. Однако требуются дополнительные исследования в данной области для определения целесообразных соотношений между пусковым и компенсирующим емкостными сопротивлениями.

1.4 Анализ влияния конденсаторов на пусковой ток и коэффициент мощности АД

С целью определения достоинств и недостатков известных схем пуско-компенсирующих устройств проведен теоретический анализ влияния конденсаторов, включенных в цепь статора, на начальный пусковой ток АД, а также на коэффициент мощности в режиме компенсации реактивной мощности,

потребляемой электродвигателем в рабочем режиме после подключения пусковых конденсаторов параллельно обмоткам статора АД. Стоит отметить, что схемы рассматриваемых ПКУ в пусковом режиме предназначены для ограничения пускового тока АД.

Анализ проведен для трех АД серии 4А, имеющих различную мощность и синхронную частоту вращения: 4А90Л6У3, 4А132М4У3, 4А225М2У3. Паспортные данные электродвигателей представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Паспортные данные электродвигателей

АД	P _{2ном} , кВт	КПД, %, при		cosφ при		S _{ном} , %	K _i	M _п	M _{max}	J, кг·м ²	I _{ном} , А
		P ₂ /P _{2ном} , %		P ₂ /P _{2ном} , %							
		50	100	50	100						
4А90Л6У3	1,5	0,75	0,75	0,53	0,74	6,4	4,5	2,0	2,2	0,0073	4,1
4А132М4У3	11	0,86	0,875	0,75	0,87	2,8	7,5	2,2	3,0	0,04	22
4А225М2У3	55	0,895	0,91	0,89	0,92	1,8	7,5	1,4	2,5	0,25	99,8

В ходе проведенного анализа для каждой схемы пуско-компенсирующего устройства выполнено следующее:

– Рассчитаны значения емкостных сопротивлений конденсаторов, необходимых для ограничения пускового тока АД в диапазоне от I_{ном} до 0,5·I_п.

– Для полученного диапазона емкостных сопротивлений определен результирующий коэффициент мощности АД в режиме компенсации реактивной мощности.

– Построены зависимости пускового тока и результирующего коэффициента мощности АД от подключенного емкостного сопротивления. Стоит отметить, что на графиках емкостное сопротивление представлено в относительных единицах по отношению к номинальному сопротивлению АД, а пусковой ток представлен в виде кратности к номинальному току электродвигателя: $X_{C,o.e.} = X_C/Z_{ном}$; $I_{п,o.e.} = I_{п}/I_{ном}$.

– Сделаны выводы о рациональности применения рассматриваемых схем.

Для Т-образной схемы замещения, пренебрегая цепью намагничивания ввиду малого значения тока намагничивания, величина начального пускового тока определится выражением:

$$I_{\Pi} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

После введения емкостного сопротивления в цепь статора, заданная величина начального пускового тока АД определится выражением:

$$I_{\Pi} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2' - X_C)^2}}$$

Для определения пускового тока АД согласно методике [83] рассчитаны параметры схемы замещения, а именно активные и индуктивные сопротивления статора и ротора в начальный момент пуска, для рассматриваемых двигателей, которые приведены в таблице 1.2.

Также в данной таблице приведены значения пусковых токов при прямом пуске и полных сопротивлениях АД при номинальном токе статора.

Таблица 1.2. Параметры схемы замещения электродвигателей

АД	R_1 , Ом	$R_{2\Pi}'$, Ом	$X_{1\Pi}$, Ом	$X_{2\Pi}'$, Ом	Z_{Π} , Ом	I_{Π} , А	$Z_{\text{ном}}$, Ом
4А90L6У3	6,43	3,94	2,46	3,4	11,91	18,45	53,66
4А132М4У3	0,448	0,46	0,423	0,583	1,355	165	10
4А225М2У3	0,0695	0,0909	0,1064	0,1469	0,2998	748,5	2,204

Реактивная мощность конденсаторной батареи, необходимой для повышения коэффициента мощности АД до требуемого значения, определяется по формуле:

$$Q_{\text{КУ}} = P(\text{tg}\varphi_1 - \text{tg}\varphi_2), \text{вар},$$

где P – активная мощность АД, Вт; $\text{tg}\varphi_1$, $\text{tg}\varphi_2$ – тангенсы угла φ соответственно до и после компенсации.

Следовательно, тангенс угла φ после компенсации определится из выражения

$$\text{tg}\varphi_2 = \text{tg}\varphi_1 - \frac{Q_{\text{КУ}}}{P}.$$

Реактивная мощность конденсаторной батареи, соединенной по схеме «звезда», определяется по формуле:

$$Q_{\text{КУ}} = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2}{X_C}, \text{вар.}$$

Реактивная мощность конденсаторной батареи, соединенной по схеме «треугольник», определяется по формуле:

$$Q_{\text{КУ}} = \frac{9 \cdot U_{\phi}^2}{X_C}, \text{вар.}$$

Для осуществления конденсаторного пуска известно конденсаторное пусковое устройство (КПУ), состоящее из блока конденсаторов C , активных сопротивлений R и контактора $КМ$, шунтирующего своими контактами устройство после достижения АД номинальной частоты вращения [30]. Схема КПУ представлена на рис. 1.5.

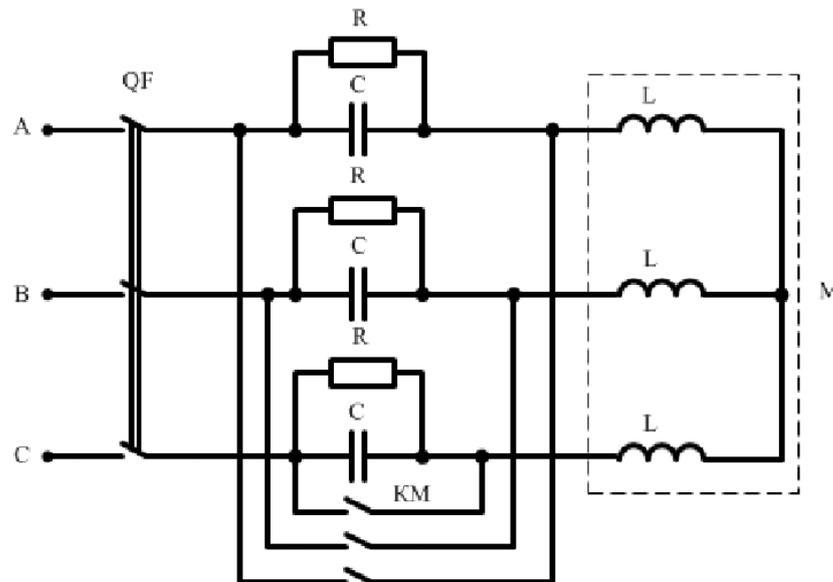


Рис. 1.5 – КПУ с последовательным включением конденсаторов

В таблице 1.3 приведены результаты расчетов значений емкостного сопротивления, которое необходимо подключить к статорной обмотке АД для ограничения пускового тока в диапазоне от $I_{\text{ном}}$ до $0,5 \cdot I_{\text{п}}$.

На рис. 1.6 представлены графики зависимостей пускового тока АД от величины подключенного в цепь статора емкостного сопротивления.

Анализируя графики можно отметить, что при значении емкостного сопротивления $X_C < 0,2 \cdot Z_{\text{ном}}$ для всех рассматриваемых АД наблюдается увеличение значения пускового тока выше значений тока при прямом пуске –

наблюдается форсирование пуска АД.

Таблица 1.3. Результаты расчетов пусковых емкостных сопротивлений

АД	$I_{\text{пуск}}$	$X_C, \text{ Ом}$	$C, \text{ мкФ}$	$X_C/Z_{\text{НОМ}}$
4A90L6Y3	$I_{\text{НОМ}}$	57,87	55	1,08
	$2,25 \cdot I_{\text{НОМ}}$	27,68	115	0,52
4A132M4Y3	$I_{\text{НОМ}}$	10,61	300	1,07
	$3,75 \cdot I_{\text{НОМ}}$	3,54	900	0,35
4A225M2Y3	$I_{\text{НОМ}}$	2,449	1300	1,11
	$3,75 \cdot I_{\text{НОМ}}$	0,816	3900	0,37

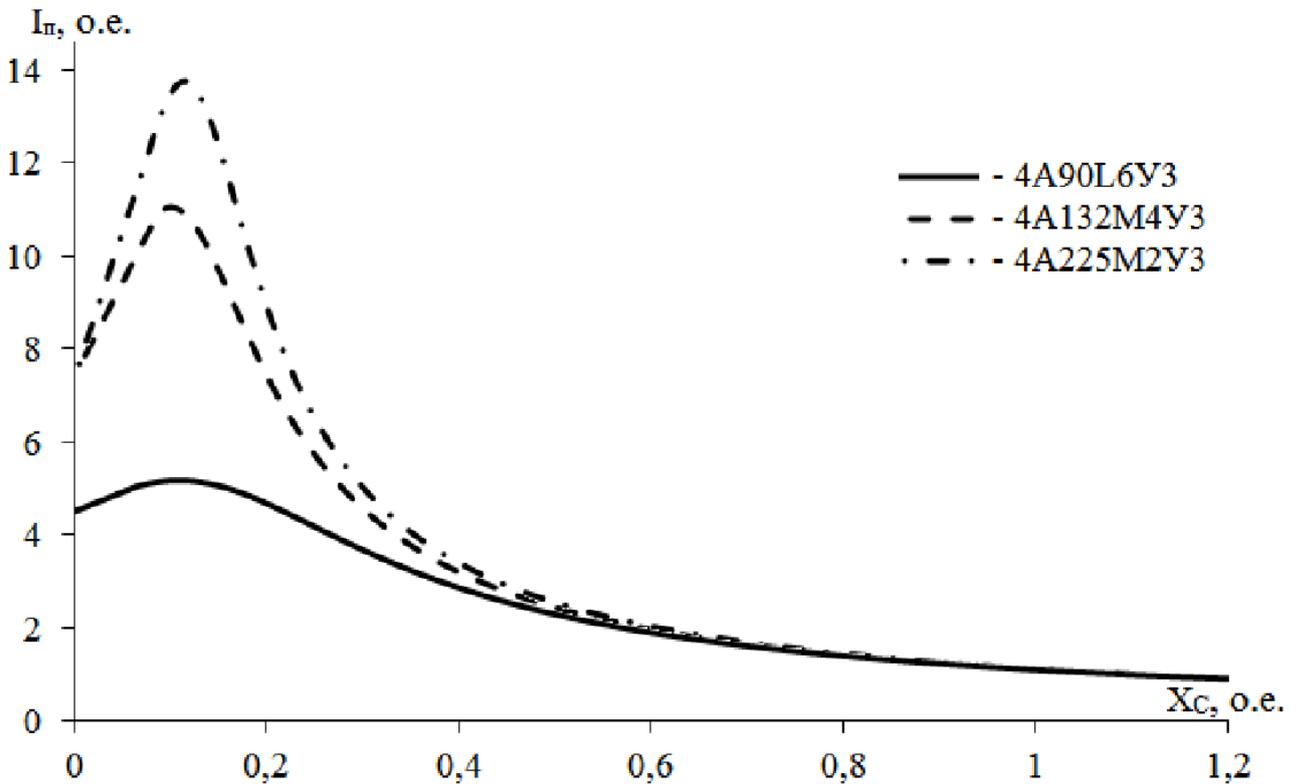


Рис. 1.6 – Графики зависимостей пусковых токов АД от величины подключенного емкостного сопротивления

Для ограничения пускового тока АД в диапазоне от $I_{\text{НОМ}}$ до $0,5 \cdot I_p$ необходимо к его статорным обмоткам подключить конденсаторы, емкостные сопротивления X_C которых находятся в диапазоне от $0,35 \cdot Z_{\text{НОМ}}$ до $1,1 \cdot Z_{\text{НОМ}}$, причем большее значение емкостного сопротивления соответствует меньшему значению пускового тока.

Стоит отметить, что при пуске с помощью КПУ, схема которого представлена на рис. 1.5, по завершению пуска конденсаторы полностью исключаются из работы, не обеспечивая компенсацию реактивной мощности.

Таким образом, большую часть времени конденсаторы в работе не участвуют, а работают лишь в короткие промежутки времени пуска АД, следовательно, в рабочем режиме электродвигатель имеет низкий коэффициент мощности.

Известно устройство для пуска и компенсации реактивной мощности АД, особенностью которого является пуск электродвигателя по схеме соединения обмоток «треугольником», что обеспечивает повышение пускового момента за счет повышения питающего напряжения в момент пуска. В рабочем же режиме к каждой обмотке статора АД подключена индивидуальная емкость [пат. 2288534, кл. H02P 1/42, 2006]. Схема ПКУ представлена на рис. 1.7.

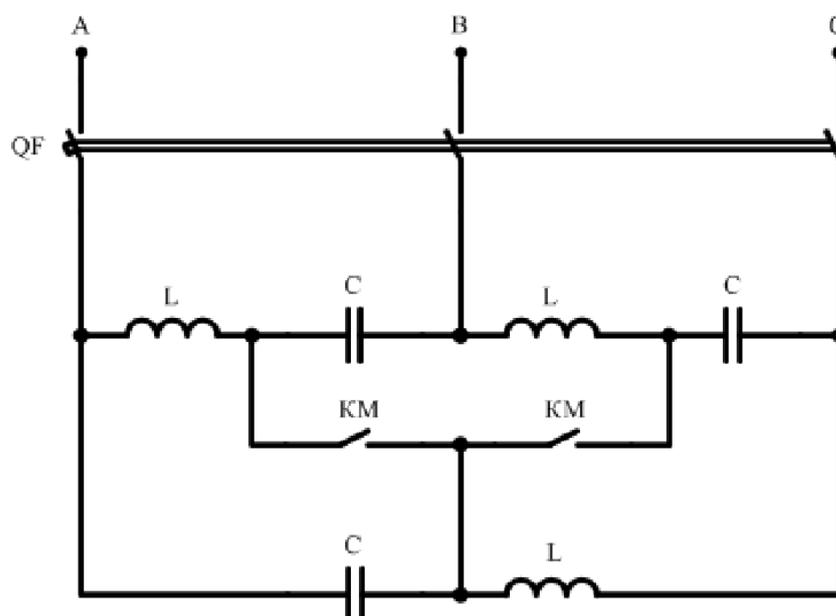


Рис. 1.7 – Схема конденсаторного пуско-компенсирующего устройства [пат. 2288534, кл. H02P 1/42, 2006]

В таблице 1.4 приведены результаты расчетов значений емкостного сопротивления, которое необходимо подключить к статорной обмотке АД для ограничения пускового тока в диапазоне от $I_{\text{НОМ}}$ до $0,5 \cdot I_{\text{П}}$.

Таблица 1.4. Результаты расчетов пусковых емкостных сопротивлений

АД	$I_{\text{пуск}}$	X_C , Ом	C , мкФ	$X_C/Z_{\text{НОМ}}$
4A90L6Y3	$I_{\text{НОМ}}$	90,95	35	1,69
	$2,25 \cdot I_{\text{НОМ}}$	45,47	70	0,85
4A132M4Y3	$I_{\text{НОМ}}$	17,68	180	1,77
	$3,75 \cdot I_{\text{НОМ}}$	5,49	580	0,55
4A225M2Y3	$I_{\text{НОМ}}$	3,979	800	1,81
	$3,75 \cdot I_{\text{НОМ}}$	1,273	2500	0,58

Анализируя результаты расчетов можно сделать вывод, что для ограничения пускового тока АД в диапазоне от $I_{ном}$ до $0,5 \cdot I_{п}$ с помощью конденсаторного ПКУ, схема которого представлена на рис. 1.7, необходимо к статорным обмоткам подключить конденсаторы, емкостные сопротивления X_C которых находятся в диапазоне от $0,55 \cdot Z_{ном}$ до $1,8 \cdot Z_{ном}$. По сравнению с КПУ, схема которого представлена на рис. 1.5, при пуске с помощью рассматриваемого устройства (рис. 1.7), значения емкостных сопротивлений, необходимые для ограничения тока в том же диапазоне, должны быть в $\sqrt{3}$ раза больше.

В таблице 1.5 приведены результаты расчетов результирующего коэффициента мощности системы «АД – Компенсатор реактивной мощности» при подключении параллельно обмоткам статора АД батарей конденсаторов, емкостное сопротивление которых выбрано из диапазона, представленного в таблице 1.4. При этом АД работает с номинальной нагрузкой.

Таблица 1.5. Результаты расчетов коэффициента мощности

АД	$I_{пуск}$	X_C , Ом	C , мкФ	$tg\varphi$	$cos\varphi$
4A90L6Y3	$I_{ном}$	90,95	35	0,11	0,994
	$2,25 \cdot I_{ном}$	45,47	70	-0,69	0,82
4A132M4Y3	$I_{ном}$	17,68	180	-0,08	0,996
	$3,75 \cdot I_{ном}$	5,49	580	-1,54	0,55
4A225M2Y3	$I_{ном}$	3,979	800	-0,18	0,985
	$3,75 \cdot I_{ном}$	1,273	2500	-1,46	0,56

На рис. 1.8 представлены графики зависимостей пускового тока АД и результирующего коэффициента мощности электродвигателя при номинальной нагрузке от величины подключенного в цепь статора АД емкостного сопротивления в диапазоне от $0,55 \cdot Z_{ном}$ до $1,8 \cdot Z_{ном}$.

Анализируя результаты расчетов можно отметить, что в режиме компенсации реактивной мощности для конденсаторного ПКУ (рис. 1.7) с емкостными сопротивлениями от $0,55 \cdot Z_{ном}$ до $1,8 \cdot Z_{ном}$ для всех рассматриваемых АД, работающих в номинальном режиме, характерна перекомпенсация реактивной мощности. При этом в зависимости от номинального коэффициента

мощности АД результирующий коэффициент мощности увеличивается только при кратности пускового тока 1,4 – 1,8 от номинального и ниже. Исключением является АД 4A90L6У3, для которого ввиду низкого номинального коэффициента мощности перекомпенсация незначительна.

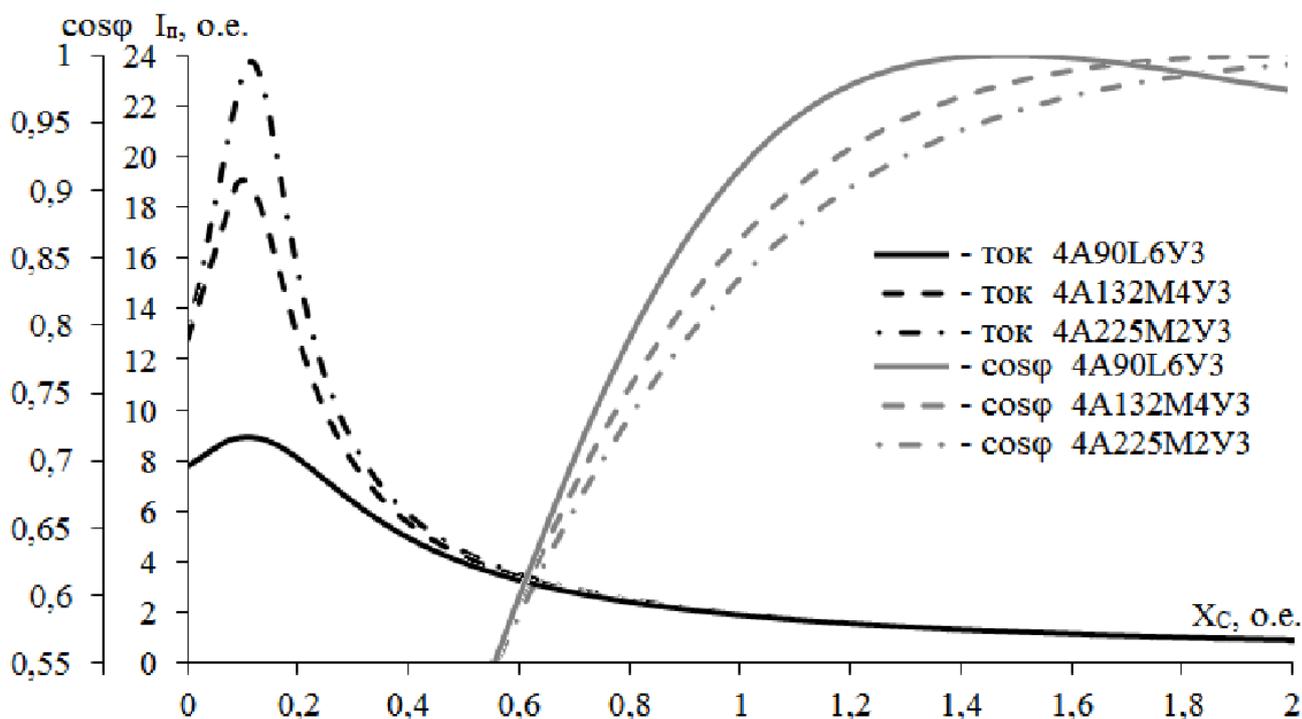


Рис. 1.8 – Графики зависимостей пусковых токов АД и коэффициента мощности при номинальной нагрузке от величины введенного емкостного сопротивления

Таким образом, для рассматриваемого конденсаторного ПКУ (рис. 1.7) в пусковом режиме по сравнению с пусковым устройством, представленным на рис. 1.5, для ограничения фазного тока АД на одинаковом уровне требуются конденсаторы меньшей емкости, так как требуется большее ограничение приложенного к обмоткам статора напряжения, равного линейному напряжению сети. Однако, при этом ток, потребляемый из сети в пусковом режиме, при пуске с помощью рассматриваемого устройства в $\sqrt{3}$ раз выше. При переключении пусковых конденсаторов на компенсацию реактивной мощности наблюдается либо значительная перекомпенсация, в результате чего коэффициент мощности снижается, либо для повышения коэффициента мощности необходимо выбирать значения емкостей, при которых пусковой ток АД ограничивается значениями, равными 1 – 1,4 от $I_{ном}$.

К недостаткам рассматриваемого ПКУ (рис. 1.7) можно отнести неэффективность его использования для АД с обмотками, рассчитанными на линейное напряжение. Работа же АД по схеме «треугольник» в рабочем режиме снижает надежность устройства из-за проявления резонансных явлений.

Известно устройство для пуска и компенсации реактивной мощности АД, особенностью которого является то, что электродвигатель запускается по схеме соединения обмоток статора «звездой» с последовательно подключенными в каждой фазе конденсаторами. В рабочем же режиме обмотки статора АД переключаются в схему «треугольник», а конденсаторы подключаются «звездой» параллельно обмоткам статора АД. Таким образом, пуск происходит способом переключения обмоток статора со «звезды» на «треугольник», при этом подключенные в режиме пуска в цепи статора конденсаторы позволяют дополнительно снизить пусковой ток [пат. №2444837, кл. H02P 1/16, 2012]. Схема ПКУ представлена на рис. 1.9.

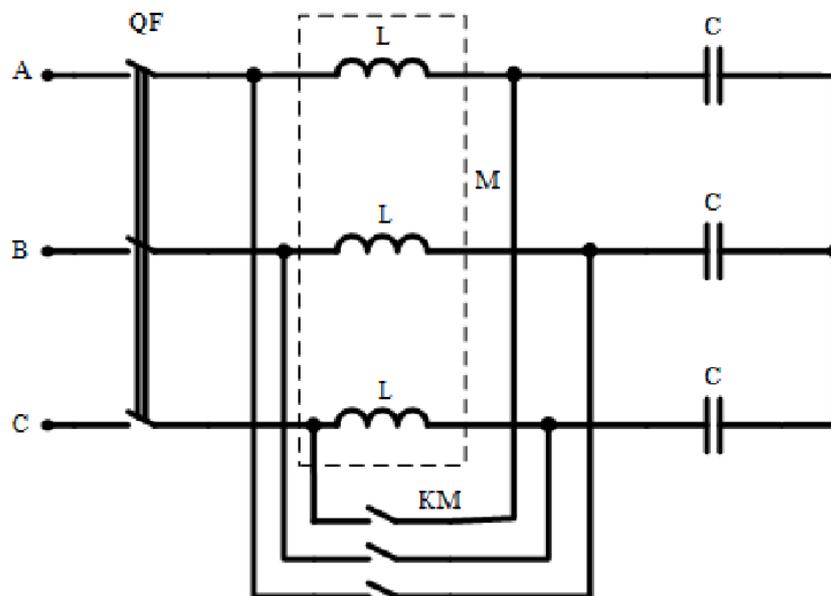


Рис. 1.9 – Схема конденсаторного пуско-компенсирующего устройства [пат. №2444837, кл. H02P 1/16, 2012]

В таблице 1.6 приведены результаты расчетов значений емкостного сопротивления, которое необходимо подключить к статорной обмотке АД для ограничения пускового тока в диапазоне от $I_{ном}$ до $0,5 \cdot I_{п}$.

Анализируя результаты расчетов можно сделать вывод, что для

ограничения пускового тока АД в диапазоне от $I_{\text{НОМ}}$ до $0,5 \cdot I_{\text{П}}$ с помощью рассматриваемого ПКУ (рис. 1.9) необходимо к статорным обмоткам подключить конденсаторы, емкостные сопротивления X_C которых находятся в диапазоне от $0,22 \cdot Z_{\text{НОМ}}$ до $0,69 \cdot Z_{\text{НОМ}}$. В данном случае, по сравнению с КПУ, схема которого представлена на рис. 1.5, значения емкостных сопротивлений, необходимые для ограничения тока в том же диапазоне, должны быть в $\sqrt{3}$ раза меньше. Это объясняется тем, что к статорным обмоткам АД с конденсаторами при пуске подводится напряжение, уровень которого в $\sqrt{3}$ раза меньше уровня напряжения в рабочем режиме, и для ограничения тока в заданном диапазоне требуются меньшие значения емкостных сопротивлений.

Таблица 1.6. Результаты расчетов пусковых емкостных сопротивлений

АД	$I_{\text{пуск}}$	X_C , Ом	C , мкФ	$X_C/Z_{\text{НОМ}}$
4А90L6У3	$I_{\text{НОМ}}$	35,37	90	0,66
	$2,25 \cdot I_{\text{НОМ}}$	14,81	215	0,28
4А132М4У3	$I_{\text{НОМ}}$	6,63	480	0,66
	$3,75 \cdot I_{\text{НОМ}}$	2,24	1420	0,22
4А225М2У3	$I_{\text{НОМ}}$	1,516	2100	0,69
	$3,75 \cdot I_{\text{НОМ}}$	0,549	5800	0,25

В таблице 1.7 приведены результаты расчетов результирующего коэффициента мощности системы «АД – Компенсатор реактивной мощности» при подключении параллельно обмоткам статора АД батареи конденсаторов, емкостное сопротивление фазы которой выбрано из диапазона, представленного в таблице 1.6. При этом АД работает с номинальной нагрузкой.

Таблица 1.7. Результаты расчетов коэффициента мощности

АД	$I_{\text{пуск}}$	X_C , Ом	C , мкФ	$\text{tg}\varphi$	$\text{cos}\varphi$
4А90L6У3	$I_{\text{НОМ}}$	35,37	90	0,22	0,97
	$2,25 \cdot I_{\text{НОМ}}$	14,81	215	-0,73	0,81
4А132М4У3	$I_{\text{НОМ}}$	6,63	480	-0,01	0,999
	$3,75 \cdot I_{\text{НОМ}}$	2,24	1420	-1,15	0,66
4А225М2У3	$I_{\text{НОМ}}$	1,516	2100	-0,1	0,995
	$3,75 \cdot I_{\text{НОМ}}$	0,549	5800	-1,03	0,7

На рис. 1.10 представлены графики зависимостей пускового тока АД и результирующего коэффициента мощности электродвигателя при номинальной нагрузке от величины подключенного в цепь статора АД емкостного сопротивления в диапазоне от $0,22 \cdot Z_{\text{ном}}$ до $0,69 \cdot Z_{\text{ном}}$.

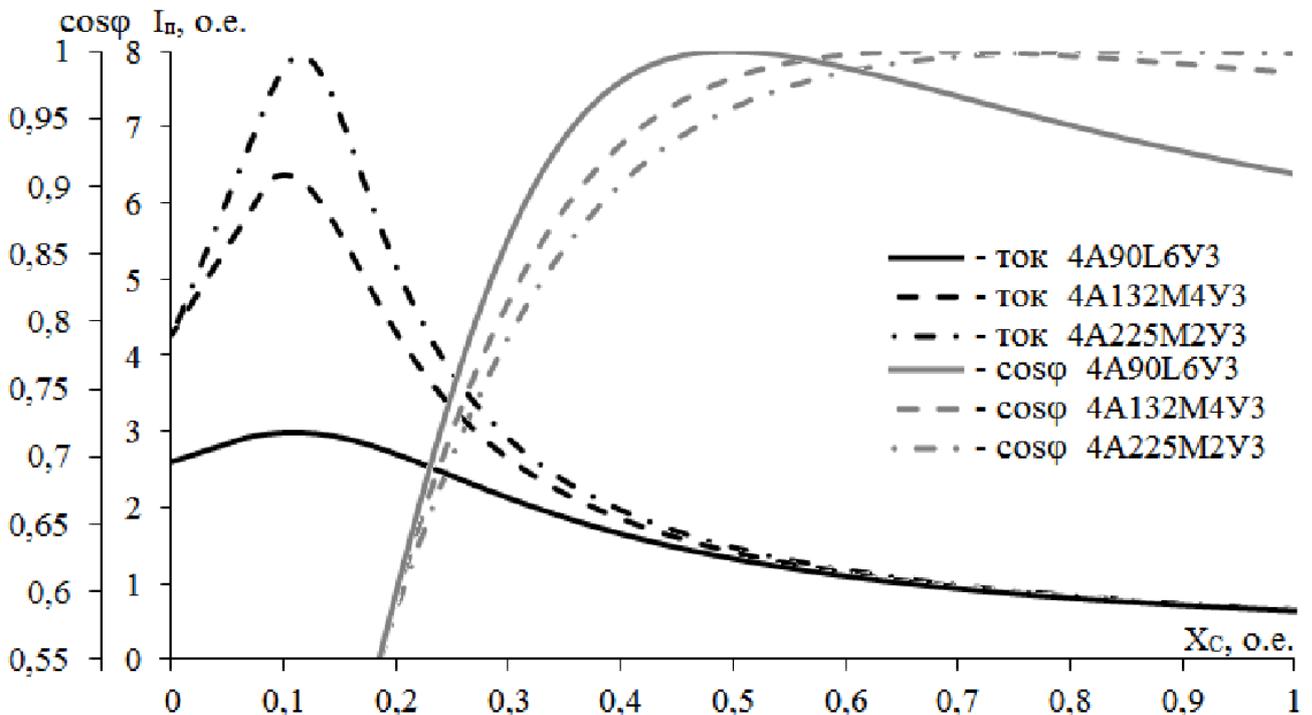


Рис. 1.10 – Графики зависимостей пусковых токов АД и коэффициента мощности при номинальной нагрузке от величины введенного емкостного сопротивления

Анализируя результаты расчетов можно отметить, что в режиме компенсации реактивной мощности для конденсаторного ПКУ (рис. 1.9) с емкостными сопротивлениями от $0,22 \cdot Z_{\text{ном}}$ до $0,69 \cdot Z_{\text{ном}}$ для всех рассматриваемых АД, работающих в номинальном режиме, характерна перекомпенсация реактивной мощности. При этом в зависимости от номинального коэффициента мощности АД результирующий коэффициент мощности повышается только при кратности пускового тока 1,75 – 2,2 от номинального и ниже. Исключением является АД 4A90L6Y3, для которого ввиду низкого номинального коэффициента мощности перекомпенсация незначительна. Следовательно, рассматриваемое ПКУ (рис. 1.9) обладает лучшими пусковыми характеристиками по сравнению с устройством, представленным на рис. 1.7, при условии использования одних и тех же

конденсаторов как в режиме пуска, так и в режиме компенсации реактивной мощности.

Недостатком рассматриваемого ПКУ (рис. 1.9) является возможность работы устройства лишь с АД, обмотки статора которых в рабочем режиме подключаются по схеме «треугольник». Также к недостаткам следует отнести необходимость иметь большую емкость конденсаторов для мягкого пуска электродвигателя.

Проведены исследования ПКУ, в котором конденсаторы в пусковом режиме подключены последовательно с обмотками статора АД по схеме «звезда», а по окончании разгона в рабочем режиме переключаются в конденсаторную батарею по схеме «треугольник» для компенсации реактивной мощности электродвигателя. Схема ПКУ представлена на рис. 1.11.

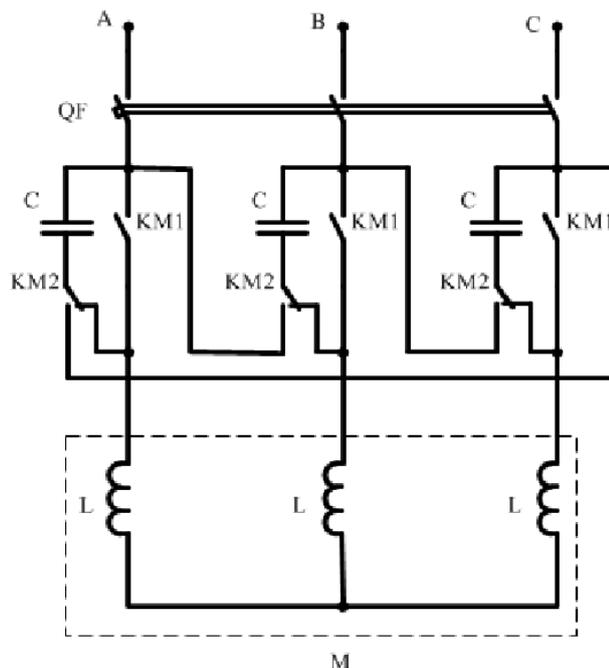


Рис. 1.11 – Принципиальная схема системы ПКУ – АД

В таблице 1.8 приведены результаты расчетов значений емкостного сопротивления, которое необходимо подключить к статорной обмотке АД для ограничения пускового тока в диапазоне от $I_{ном}$ до $0,5 \cdot I_{п}$.

Анализируя результаты расчетов можно сделать вывод, что для ограничения пускового тока АД в диапазоне от $I_{ном}$ до $0,5 \cdot I_{п}$ с помощью рассматриваемого ПКУ (рис. 1.11) необходимо к статорным обмоткам

электродвигателя подключить конденсаторы, емкостные сопротивления X_C которых находятся в диапазоне от $0,35 \cdot Z_{\text{НОМ}}$ до $1,1 \cdot Z_{\text{НОМ}}$. В данном случае значения емкостных сопротивлений, необходимые для ограничения тока в требуемом диапазоне, аналогичны значениям емкостных сопротивлений при пуске с помощью КПУ, схема которого представлена на рис. 1.5.

Таблица 1.8. Результаты расчетов пусковых емкостных сопротивлений

АД	$I_{\text{пуск}}$	X_C , Ом	C , мкФ	$X_C/Z_{\text{НОМ}}$
4A90L6Y3	$I_{\text{НОМ}}$	57,87	55	1,08
	$2,25 \cdot I_{\text{НОМ}}$	27,68	115	0,52
4A132M4Y3	$I_{\text{НОМ}}$	10,61	300	1,07
	$3,75 \cdot I_{\text{НОМ}}$	3,54	900	0,35
4A225M2Y3	$I_{\text{НОМ}}$	2,449	1300	1,11
	$3,75 \cdot I_{\text{НОМ}}$	0,816	3900	0,37

В таблице 1.9 приведены результаты расчетов результирующего коэффициента мощности системы «АД – Компенсатор реактивной мощности» при подключении параллельно обмоткам статора электродвигателя батареи конденсаторов, емкостное сопротивление фазы которой выбрано из диапазона, представленного в таблице 1.8. При этом АД работает с номинальной нагрузкой.

Таблица 1.9. Результаты расчетов коэффициента мощности

АД	$I_{\text{пуск}}$	X_C , Ом	C , мкФ	$\text{tg}\varphi$	$\cos\varphi$
4A90L6Y3	$I_{\text{НОМ}}$	57,87	55	-2,85	0,33
	$2,25 \cdot I_{\text{НОМ}}$	27,68	115	-6,96	0,14
4A132M4Y3	$I_{\text{НОМ}}$	10,61	300	-2,7	0,35
	$3,75 \cdot I_{\text{НОМ}}$	3,54	900	-9,23	0,11
4A225M2Y3	$I_{\text{НОМ}}$	2,449	1300	-2,52	0,37
	$3,75 \cdot I_{\text{НОМ}}$	0,816	3900	-8,4	0,12

На рис. 1.12 представлены графики зависимостей пускового тока АД и результирующего коэффициента мощности электродвигателя при номинальной нагрузке от величины подключенного в цепь статора АД емкостного сопротивления в диапазоне от $0,35 \cdot Z_{\text{НОМ}}$ до $1,1 \cdot Z_{\text{НОМ}}$.

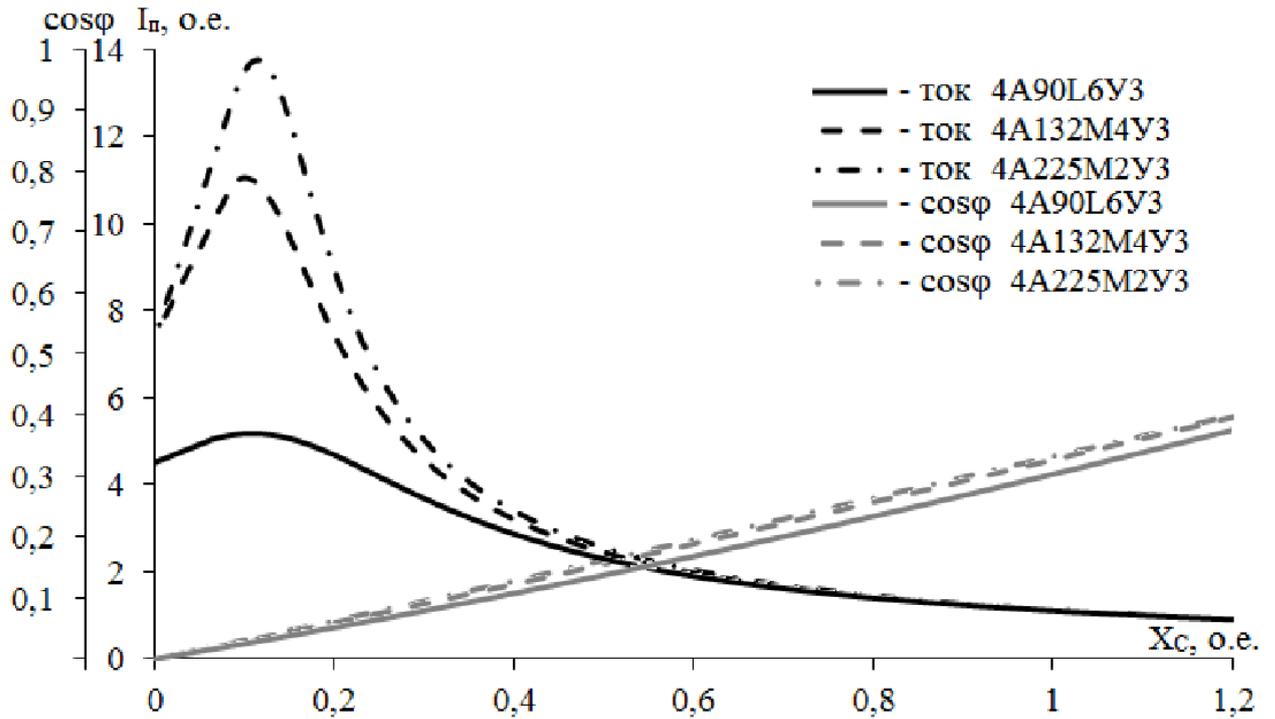


Рис. 1.12 – Графики зависимостей пусковых токов АД и коэффициента мощности при номинальной нагрузке от величины введенного емкостного сопротивления

Анализируя результаты расчетов можно сделать вывод, что при подключении пусковых конденсаторов на компенсацию реактивной мощности АД, работающего в номинальном режиме, в диапазоне емкостного сопротивления от $0,35 \cdot Z_{\text{ном}}$ до $1,1 \cdot Z_{\text{ном}}$ происходит значительная перекомпенсация реактивной мощности.

С точки зрения максимальной компенсации реактивной мощности в рабочем режиме и ограничения тока на требуемом уровне во время пуска АД наилучшим вариантом является использование отдельных комплектов конденсаторов для каждого режима работы ПКУ, либо отключение части конденсаторов при переключении на режим компенсации реактивной мощности.

Для определения соотношений между требуемыми пусковыми и компенсирующими емкостными сопротивлениями произведен расчет значений емкостного сопротивления, необходимого для полной компенсации реактивной мощности, потребляемой АД, работающим при номинальной нагрузке. Емкостные сопротивления рассчитаны для конденсаторной батареи, соединенной по схеме «звезда» и по схеме «треугольник».

Емкостное сопротивление фазы конденсаторной батареи, соединенной по схеме «звезда», определяется по формуле:

$$X_C = \frac{3 \cdot U_{\Phi}^2}{Q_{КУ}}, \text{ Ом.}$$

Емкостное сопротивление фазы конденсаторной батареи, соединенной по схеме «треугольник», определяется по формуле:

$$X_C = \frac{9 \cdot U_{\Phi}^2}{Q_{КУ}}, \text{ Ом.}$$

Результаты расчетов приведены в таблице 1.10.

Таким образом, в зависимости от коэффициента мощности АД для полной компенсации реактивной мощности требуется батарея конденсаторов с емкостным сопротивлением фазы для схемы соединения «звезда» от $1,49 \cdot Z_{НОМ}$ до $2,54 \cdot Z_{НОМ}$, а для схемы соединения «треугольник» – от $4,47 \cdot Z_{НОМ}$ до $7,67 \cdot Z_{НОМ}$. Следовательно, для максимальной компенсации реактивной мощности в рабочем режиме компенсирующее емкостное сопротивление должно быть выше пускового емкостного сопротивления в 2 – 4 раза для схемы соединения батареи компенсирующих конденсаторов «звездой» и в 7 – 12 раз для схемы соединения батареи компенсирующих конденсаторов «треугольником».

Таблица 1.10. Результаты расчетов емкостных сопротивлений

АД	Схема соединения «звезда»			Схема соединения «треугольник»		
	X_C , Ом	C , мкФ	$X_C/Z_{НОМ}$	X_C , Ом	C , мкФ	$X_C/Z_{НОМ}$
4A90L6Y3	79,9	39,9	1,49	239,6	13,3	4,47
4A132M4Y3	20,4	156,2	2,04	61,1	52,1	6,11
4A225M2Y3	5,6	564,4	2,54	16,9	188,1	7,67

Если допустить перекомпенсацию реактивной мощности при условии, что коэффициент мощности цепи после компенсации не должен быть ниже коэффициента мощности до компенсации, то в этом случае плотность тока в проводах не увеличивается, однако характер тока является емкостным, что благоприятно сказывается на режиме работы источника электроэнергии, в частности, трансформатора, питающего данный электродвигатель.

Рассчитаны значения емкостного сопротивления, необходимые для компенсации реактивной мощности, потребляемой АД, работающим при номинальной нагрузке.

Результаты расчетов приведены в таблице 1.11.

Таблица 1.11. Результаты расчетов емкостных сопротивлений

АД	Схема соединения «звезда»			Схема соединения «треугольник»		
	X_C , Ом	C, мкФ	$X_C/Z_{ном}$	X_C , Ом	C, мкФ	$X_C/Z_{ном}$
4A90L6Y3	39,9	79,7	0,74	119,8	26,6	2,23
4A132M4Y3	10,2	312,4	1,02	30,6	104,1	3,06
4A225M2Y3	2,8	1128,8	1,27	8,5	376,3	3,86

Таким образом, при допущении незначительной перекомпенсации в зависимости от коэффициента мощности АД для компенсации реактивной мощности требуется батарея конденсаторов с емкостным сопротивлением фазы для схемы соединения «звезда» от $0,74 \cdot Z_{ном}$ до $1,27 \cdot Z_{ном}$, а для схемы соединения «треугольник» – от $2,23 \cdot Z_{ном}$ до $3,86 \cdot Z_{ном}$. Тогда, компенсирующее емкостное сопротивление должно быть выше пускового емкостного сопротивления в 1 – 2 раза для схемы соединения батареи компенсирующих конденсаторов «звездой» и в 3,5 – 6 раз для схемы соединения батареи компенсирующих конденсаторов «треугольником».

Сравнивая результирующие коэффициенты мощности для рассмотренных ПКУ можно отметить, что для них характерно наличие перекомпенсации в случае работы АД с номинальным коэффициентом мощности, т.е. при номинальной нагрузке. В зависимости от величины нагрузки асинхронного двигателя значительно меняется его коэффициент мощности, который имеет максимальное значение при номинальной нагрузке на валу и минимальное значение при пуске и работе на холостом ходу. Поэтому в случае работы АД с неполной нагрузкой результирующий коэффициент мощности в случае перекомпенсации увеличивается.

Рассмотренные ПКУ обладают как достоинствами, так и недостатками. Эти

устройства нельзя назвать универсальными, так как каждое из них предназначено для АД имеющих определенную схему соединения обмоток статора.

ПКУ, работающее по схеме, представленной на рис. 1.9, предназначено для АД, нормально работающих со схемой соединения «треугольником», следовательно, работа такого устройства возможна в сетях с линейным напряжением, равным 220В, либо обмотки двигателя должны быть рассчитаны на фазное напряжение, равное 380В.

ПКУ, работающее по схеме, представленной на рис. 1.7, осуществляет пуск АД по схеме «треугольник», следовательно, при ограничении тока в обмотках статора требуемым значением сетевой ток оказывается в $\sqrt{3}$ раза больше. При ограничении же требуемым значением сетевого тока, ток в обмотках статора оказывается в $\sqrt{3}$ раз меньше и может оказаться недостаточным для пуска АД.

Таким образом, возникает задача разработки нового схемотехнического решения для конденсаторного ПКУ, в котором для эффективного использования конденсаторов как в режиме пуска, так и в режиме компенсации реактивной мощности обеспечивается целесообразное соотношение между пусковым и компенсирующим емкостными сопротивлениями, исключающее перекомпенсацию реактивной мощности.

Задача выбора емкости конденсаторов не имеет аналитического решения, а известные расчетные зависимости, полученные из анализа режима самовозбуждения, не учитывают динамических свойств электромеханической системы и не отражают влияния момента инерции привода. Минимальное значение емкости последовательно включенных конденсаторов, при которой не возникает режим самовозбуждения и обеспечивается устойчивый двигательный режим электромеханической системы привода, может быть определено путем решения уравнений нелинейной модели двигателя совместно с уравнениями для падения напряжения на предвключенных конденсаторах.

Коммутация конденсаторов и АД при переключении ПКУ с пускового режима на рабочий режим может вызвать повышение напряжений

(перенапряжения) и токов по сравнению с их номинальными значениями. Броски тока АД вызывают ударные нагрузки на механизмах, приводимых электродвигателем, а появляющиеся в сети перенапряжения создают опасность выхода из строя ответственных потребителей, содержащих полупроводниковые приборы. Это обстоятельство требует рассмотрения коммутационных процессов при переключении конденсаторного ПКУ.

1.5 Выводы, цели и задачи исследования

По итогам первой главы можно сделать следующие выводы:

1. Для пуска АД с требуемыми характеристиками может оказаться целесообразным применение конденсаторных ПКУ, конденсаторы которых в рабочем режиме переключаются на компенсацию реактивной мощности.

2. Существующие недостатки конденсаторных способов пуска не позволяют эффективно применять их на практике, в связи с этим необходимо исследование конденсаторных способов пуска и разработка на основе этих исследований ПКУ.

3. Установлено, что для известных схем ПКУ в рабочем режиме характерна перекомпенсация реактивной мощности. Поэтому необходима разработка нового схемотехнического решения для конденсаторного ПКУ, лишенная данного недостатка.

4. Разработка и исследование конденсаторных ПКУ сводится к рассмотрению системы «Электрическая сеть – ПКУ – АД – нагрузка» с учетом всех связей между составляющими ее элементами. Задача исследования представляет известные математические трудности, поэтому исследование динамических режимов работы целесообразно производить с использованием ЭВМ путем решения с его помощью уравнений нелинейной модели двигателя совместно с уравнениями для падения напряжения на предвключенных конденсаторах.

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПКУ

Как было отмечено в первой главе, выбор емкости конденсаторов целесообразно проводить с помощью математической модели системы «Электрическая сеть – ПКУ – АД – нагрузка». Также математическая модель позволяет исследовать переходные процессы при переключении конденсаторного ПКУ с пускового режима на режим компенсации реактивной мощности с целью разработки алгоритма переключения, исключающего повышения напряжения и тока при коммутациях. В математической модели должно быть произведено математическое описание всех составляющих рассматриваемую систему элементов с учетом их взаимосвязей, а также накладываемых на модель допущений и ограничений. Решению задачи разработки адекватной математической модели электротехнического комплекса «Электрическая сеть – ПКУ – АД – нагрузка» и посвящена вторая глава.

2.1 Математическое описание АД

Процессы в реальной электромеханической системе с некоторым приближением описываются математическими моделями, с помощью которых и проводится исследование динамики асинхронных электроприводов. Степень приближения должна одновременно обеспечивать достаточную точность и наибольшую простоту проводимого исследования. Однако выполнение этих противоречивых требований представляет известные трудности, которые еще больше возрастают при необходимости учета нелинейности параметров электрических цепей машины [93].

Рассмотрим для начала простейшую модель асинхронной машины – трехфазную идеализированную машину. Эта машина двухполюсная, имеет гладкий воздушный зазор, все параметры ее линейные, а напряжения на выводах синусоидальные [73, 74].

При описании электромагнитных процессов в идеализированной электрической машине делаются следующие допущения [29, 105]:

1. Трехфазная система симметрична, нулевой ток в ней отсутствует, сумма мгновенных значений токов фаз равна нулю;

2. Каждый протекающий по фазной обмотке ток порождает магнитодвижущую силу, синусоидально распределенную по окружности воздушного зазора машины;

3. Сложение магнитодвижущих сил отдельных фазных обмоток порождает общую магнитную индукцию, также синусоидально распределенную по окружности воздушного зазора.

В непреобразованной системе координат при перемещении обмоток взаимные индуктивности между собой изменяются, а $d\theta/dt = \omega_r$. Для трехфазной машины в непреобразованной системе в фазных осях координат A, B, C, a, b, c дифференциальные уравнения имеют вид [29, 73, 74]:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_A = R_A i_A + \frac{d\Psi_A}{dt}; \\ u_B = R_B i_B + \frac{d\Psi_B}{dt}; \\ u_C = R_C i_C + \frac{d\Psi_C}{dt}; \\ u_a = R_a i_a + \frac{d\Psi_a}{dt}; \\ u_b = R_b i_b + \frac{d\Psi_b}{dt}; \\ u_c = R_c i_c + \frac{d\Psi_c}{dt}, \end{array} \right. \quad (2.1)$$

$$J \frac{d\omega_r}{dt} + M_c = M_{\Sigma}, \quad (2.2)$$

где u_i – напряжения ($i = A, B, C, a, b, c$); i_i – токи; R_i – активные сопротивления обмоток фаз статора и ротора; Ψ_i – результирующие потокосцепления.

Результирующее потокосцепление для фазы A :

$$\Psi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Aa} i_a + M_{Ab} i_b + M_{Ac} i_c. \quad (2.3)$$

Аналогично записываются потокосцепления для пяти других контуров.

В непреобразованных естественных координатах индуктивности и

взаимные индуктивности в потокосцеплениях (2.3) – периодические коэффициенты, изменяющиеся по гармоническому закону при вращении ротора машины. Уравнения (2.1) – (2.2) после подстановки в них известных выражений результирующих потокосцеплений имеют громоздкие решения с несколькими десятками членов, содержащих периодические коэффициенты. Чтобы избавиться от периодических коэффициентов, необходимо перейти к заторможенной системе координат и выполнить необходимые преобразования.

Произведя преобразования, запишем уравнения для трехфазной машины в преобразованной трехфазной заторможенной системе координат [29]:

$$\begin{cases} u_{s\alpha} = R_{s\alpha} i_{s\alpha} + \frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt}; \\ u_{s\beta} = R_{s\beta} i_{s\beta} + \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt}; \\ u_{s\gamma} = R_{s\gamma} i_{s\gamma} + \frac{d\Psi_{s\gamma}}{dt}; \\ 0 = R_{r\alpha} i_{r\alpha} + \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} + (\Psi_{r\beta} - \Psi_{r\gamma}) \frac{\omega_r}{\sqrt{3}}; \\ 0 = R_{r\beta} i_{r\beta} + \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} + (\Psi_{r\gamma} - \Psi_{r\alpha}) \frac{\omega_r}{\sqrt{3}}; \\ 0 = R_{r\gamma} i_{r\gamma} + \frac{d\Psi_{r\gamma}}{dt} + (\Psi_{r\alpha} - \Psi_{r\beta}) \frac{\omega_r}{\sqrt{3}}. \end{cases} \quad (2.4)$$

Здесь обозначено: $u_{s\alpha}, u_{s\beta}, u_{s\gamma}$ – фазные напряжения питания статора; $R_{s\alpha}, R_{s\beta}, R_{s\gamma}$ – активные сопротивления фаз обмотки статора; $R_{r\alpha}, R_{r\beta}, R_{r\gamma}$ – активные сопротивления фаз обмотки ротора; $i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{s\gamma}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}, i_{r\gamma}$ – токи статора и ротора; $\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}, \Psi_{s\gamma}, \Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}, \Psi_{r\gamma}$ – потокосцепления статорных и роторных обмоток; ω_r – частота вращения ротора.

Потокосцепления в выражении (2.4):

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{s\alpha} = L_{s\alpha}i_{s\alpha} - \frac{1}{2}Mi_{s\beta} - \frac{1}{2}Mi_{s\gamma} + M\left(i_{r\alpha} - \frac{1}{2}i_{r\beta} - \frac{1}{2}i_{r\gamma}\right); \\ \Psi_{s\beta} = L_{s\beta}i_{s\beta} - \frac{1}{2}Mi_{s\gamma} - \frac{1}{2}Mi_{s\alpha} + M\left(i_{r\beta} - \frac{1}{2}i_{r\alpha} - \frac{1}{2}i_{r\gamma}\right); \\ \Psi_{s\gamma} = L_{s\gamma}i_{s\gamma} - \frac{1}{2}Mi_{s\alpha} - \frac{1}{2}Mi_{s\beta} + M\left(i_{r\gamma} - \frac{1}{2}i_{r\alpha} - \frac{1}{2}i_{r\beta}\right); \\ \Psi_{r\alpha} = L_{r\alpha}i_{r\alpha} + M\left(i_{s\alpha} - \frac{1}{2}i_{s\beta} - \frac{1}{2}i_{s\gamma}\right) - \frac{1}{2}Mi_{r\beta} - \frac{1}{2}Mi_{r\gamma}; \\ \Psi_{r\beta} = L_{r\beta}i_{r\beta} + M\left(-\frac{1}{2}i_{s\alpha} + i_{s\beta} - \frac{1}{2}i_{s\gamma}\right) - \frac{1}{2}Mi_{r\gamma} - \frac{1}{2}Mi_{r\alpha}; \\ \Psi_{r\gamma} = L_{r\gamma}i_{r\gamma} + M\left(-\frac{1}{2}i_{s\alpha} - \frac{1}{2}i_{s\beta} + i_{s\gamma}\right) - \frac{1}{2}Mi_{r\alpha} - \frac{1}{2}Mi_{r\beta}. \end{array} \right. \quad (2.5)$$

Подставляя выражения потокосцеплений (2.5) в уравнения (2.4), получим уравнения напряжений обобщенной машины в заторможенных трехфазных координатах.

Электромагнитная энергия, сконцентрированная в воздушном зазоре машины:

$$W_{\text{Э}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \psi_i i_i, \quad (2.6)$$

где $i=1,2,\dots, N$ – число контуров с током (обмоток) машины.

Для трехфазной машины электромагнитный момент и электромагнитная энергия соответственно:

$$M_{\text{Э}} = p \frac{\partial W_{\text{Э}}}{\partial \theta}, \quad (2.7)$$

$$W_{\text{Э}} = \frac{1}{2} (\psi_{s\alpha}i_{s\alpha} + \psi_{s\beta}i_{s\beta} + \psi_{s\gamma}i_{s\gamma} + \psi_{r\alpha}i_{r\alpha} + \psi_{r\beta}i_{r\beta} + \psi_{r\gamma}i_{r\gamma}). \quad (2.8)$$

После подстановки выражений токов в уравнения машины в трехфазных заторможенных координатах:

$$M_{\text{Э}} = p \frac{\sqrt{3}}{2} M [(i_{s\alpha}i_{r\gamma} + i_{s\beta}i_{r\alpha} + i_{s\gamma}i_{r\beta}) - (i_{s\alpha}i_{r\beta} + i_{s\beta}i_{r\gamma} + i_{s\gamma}i_{r\alpha})]. \quad (2.9)$$

Выражение содержит все возможные пары произведений токов трехфазной машины, определяющие значения электромагнитного момента.

Система уравнений напряжения и движения описывает процессы электромеханического преобразования энергии в трехфазной машине.

2.2 Математическое описание конденсаторного ПКУ

Для рассмотренных в первой главе конденсаторных ПКУ характерны следующие основные режимы работы:

- 1) пусковой режим, когда конденсаторы подключены последовательно с обмотками статора АД (Рис. 2.1а);
- 2) режим компенсации реактивной мощности, когда конденсаторы подключены параллельно сети (Рис. 2.1б).

В пусковом режиме конденсаторы подключены последовательно с обмотками статора АД, поэтому ток, протекающий через пусковые конденсаторы, равен току, потребляемому из сети электродвигателем (Рис. 2.1а). Таким образом, напряжение сети является суммой напряжения, приложенного к статорным обмоткам, и падения напряжения на сопротивлениях конденсаторов.

Запишем уравнения для трехфазной машины в преобразованной трехфазной заторможенной системе координат с учетом пусковых конденсаторов:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{s\alpha} = R_{s\alpha} i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} + u_{Cps\alpha}; \\ u_{s\beta} = R_{s\beta} i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} + u_{Cps\beta}; \\ u_{s\gamma} = R_{s\gamma} i_{s\gamma} + \frac{d\psi_{s\gamma}}{dt} + u_{Cps\gamma}; \\ 0 = R_{r\alpha} i_{r\alpha} + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + (\psi_{r\beta} - \psi_{r\gamma}) \frac{\omega_r}{\sqrt{3}}; \\ 0 = R_{r\beta} i_{r\beta} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} + (\psi_{r\gamma} - \psi_{r\alpha}) \frac{\omega_r}{\sqrt{3}}; \\ 0 = R_{r\gamma} i_{r\gamma} + \frac{d\psi_{r\gamma}}{dt} + (\psi_{r\alpha} - \psi_{r\beta}) \frac{\omega_r}{\sqrt{3}}, \end{array} \right. \quad (2.10)$$

где $u_{Cps\alpha}$, $u_{Cps\beta}$, $u_{Cps\gamma}$ – напряжения на пусковых конденсаторах.

Стоит отметить, что представление уравнений для трехфазной машины в фазовых координатах позволяет учитывать возможную асимметрию емкостей подключаемых в цепь статора конденсаторов.

Падение напряжения на пусковых конденсаторах в фазах электродвигателя определяется из выражения:

$$\begin{cases} u_{Cps\alpha} = \frac{1}{C_p \pm k_\alpha \cdot C_p} \int i_{s\alpha} dt; \\ u_{Cps\beta} = \frac{1}{C_p \pm k_\beta \cdot C_p} \int i_{s\beta} dt; \\ u_{Cps\gamma} = \frac{1}{C_p \pm k_\gamma \cdot C_p} \int i_{s\gamma} dt, \end{cases} \quad (2.11)$$

где $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $i_{s\gamma}$ – фазные токи статора; C_p – емкость пусковых конденсаторов, k_α , k_β , k_γ – коэффициенты, учитывающие отклонения подключаемых емкостей конденсаторов от номинальной величины.

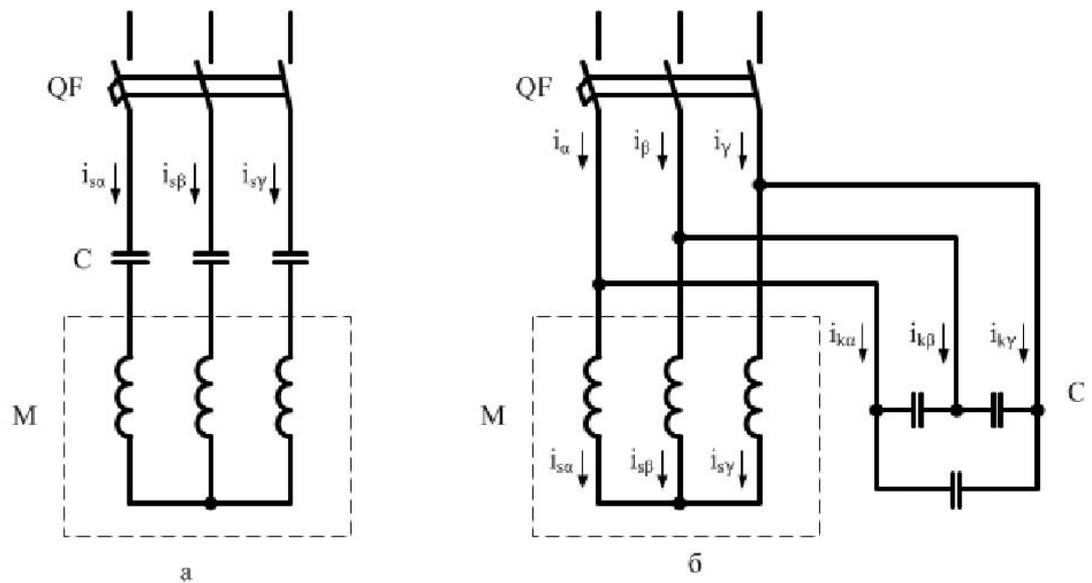


Рис. 2.1 – Режимы работы пуско-компенсирующего устройства:
а) пусковой режим; б) режим компенсации реактивной мощности.

В режиме компенсации реактивной мощности реактивная составляющая тока, потребляемая установкой из сети, представляет собой геометрическую сумму токов индуктивности обмоток АД и емкости конденсаторов ПКУ (Рис. 2.1б). Индуктивный ток отстает от напряжения, а емкостной опережает его. При соответствующем значении емкости суммарный ток оказывается ниже индуктивного тока нагрузки, что приводит к увеличению коэффициента мощности.

Падение напряжения на компенсирующих конденсаторах определяется из выражения:

$$\begin{cases} u_{Ck\alpha} = \frac{1}{C_k \pm k_\alpha \cdot C_k} \int i_{k\alpha} dt; \\ u_{Ck\beta} = \frac{1}{C_k \pm k_\beta \cdot C_k} \int i_{k\beta} dt; \\ u_{Ck\gamma} = \frac{1}{C_k \pm k_\gamma \cdot C_k} \int i_{k\gamma} dt, \end{cases} \quad (2.12)$$

где $i_{k\alpha}$, $i_{k\beta}$, $i_{k\gamma}$ – токи через компенсирующие конденсаторы; C_k – эквивалентная емкость компенсирующих конденсаторов при соединении их в «звезду»; k_α , k_β , k_γ – коэффициенты, учитывающие отклонения подключаемых емкостей конденсаторов от номинальной величины.

Токи через компенсирующие конденсаторы определяются из выражения:

$$\begin{cases} i_{k\alpha} = \frac{u_{s\alpha} - u_{Ck\alpha}}{R_{доб}}; \\ i_{k\beta} = \frac{u_{s\beta} - u_{Ck\beta}}{R_{доб}}; \\ i_{k\gamma} = \frac{u_{s\gamma} - u_{Ck\gamma}}{R_{доб}}, \end{cases} \quad (2.13)$$

где $u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$, $u_{s\gamma}$ – фазные напряжения сети, $R_{доб}$ – добавочное активное сопротивление.

Суммарный ток, потребляемый из сети в режиме компенсации реактивной мощности, определяется из выражения:

$$\begin{cases} i_\alpha = i_{s\alpha} + i_{k\alpha}; \\ i_\beta = i_{s\beta} + i_{k\beta}; \\ i_\gamma = i_{s\gamma} + i_{k\gamma}, \end{cases} \quad (2.14)$$

где $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $i_{s\gamma}$ – фазные токи статора АД; $i_{k\alpha}$, $i_{k\beta}$, $i_{k\gamma}$ – токи через компенсирующие конденсаторы.

2.3 Математическая модель асинхронного электропривода с ПКУ

Для исследования работы АД с конденсаторным ПКУ создана модель в программном комплексе МВТУ 3.7 [34], основные функциональные блоки которой представлены на рис. 2.2.

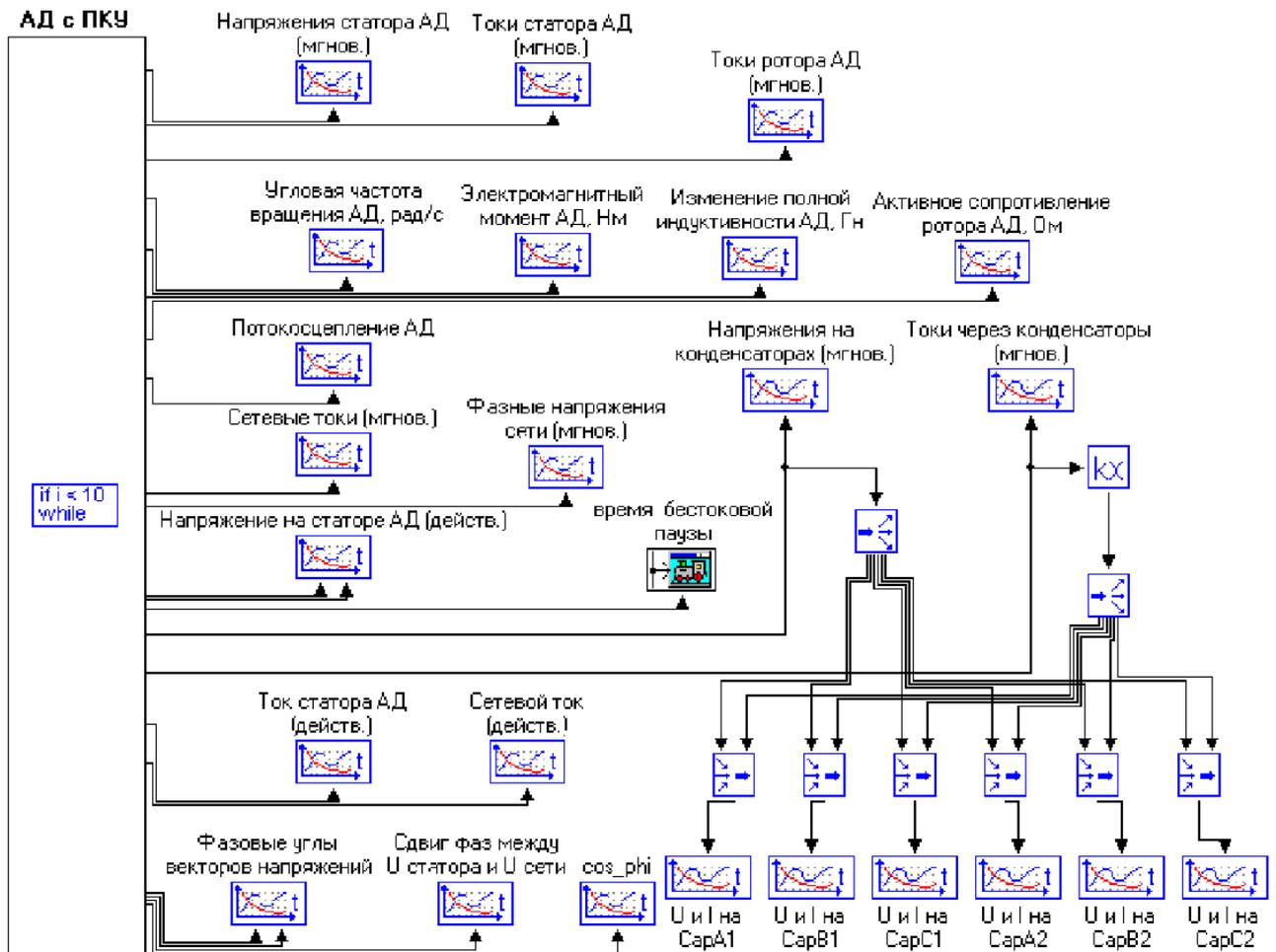


Рис. 2.2 – Модель системы «ПКУ – АД» в программном комплексе MBTU 3.7

Модель создана на основе системы дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_A = R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt} + u_{CA}; \\ u_B = R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt} + u_{CB}; \\ u_C = R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt} + u_{CC}; \\ 0 = R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt}; \\ 0 = R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt}; \\ 0 = R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt}, \end{array} \right. \quad (2.15)$$

где u_A, u_B, u_C – значения фазных напряжений статора; $R_A, R_B, R_C, R_a, R_b, R_c$ – активные сопротивления обмоток статора и приведенные активные сопротивления обмоток ротора; $i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$ – фазные токи статора и ротора; $\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_a, \psi_b, \psi_c$ – потокоцепления статорных и роторных обмоток; $u_{CA}, u_{CB},$

u_{CC} – падение напряжения на конденсаторах в фазах электродвигателя.

На рис. 2.3 представлена принципиальная схема асинхронного электропривода с конденсаторным пуско-компенсирующим устройством, для которой создана модель.

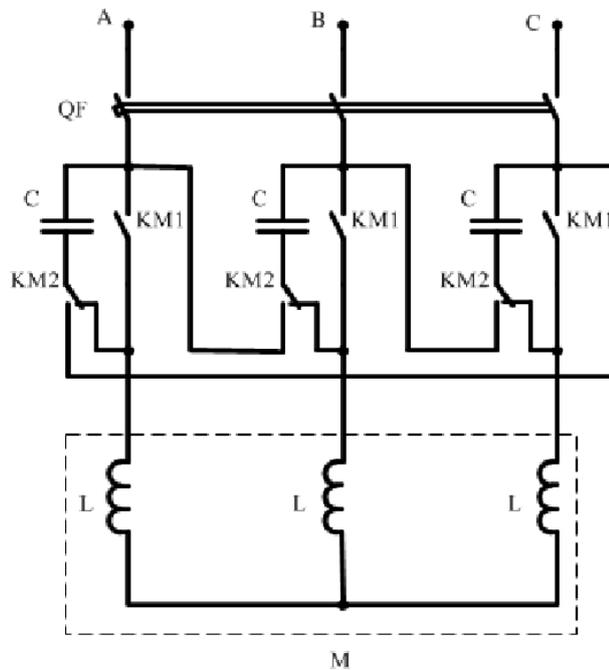


Рис. 2.3 – Принципиальная схема асинхронного ЭП с ПКУ

Схема работает следующим образом:

1) Изначально автомат QF разомкнут, контакты KM1 разомкнуты, контакты KM2 находятся в положении, показанном на рис. 2.3. Конденсаторы подключены последовательно статорным обмоткам АД. Все конденсаторы разряжены за счет наличия разрядных сопротивлений. Схема готова к пуску.

2) Автомат QF замыкается, и электродвигатель начинает плавно разгоняться. В определенный момент времени замыкаются контакты KM1 и переключаются контакты KM2. Электродвигатель получает питание напрямую от сети, а конденсаторы подключаются параллельно сети, выполняя роль компенсаторов реактивной мощности.

Рассмотрим более подробно каждый из режимов работы схемы. Для удобства примем, что активные сопротивления контактов R_{KM1} и R_{KM2} равны нулю. Тогда для пускового режима характерна схема, представленная на рис. 2.4.

Преобразуем схему. Введем:

$$X_C = \frac{1}{\omega_{0Э} C}; \quad (2.16)$$

$$Z_{Э} = \frac{R_p(-jX_C)}{R_p - jX_C} = \frac{R_p X_C^2 - jR_p^2 X_C}{R_p^2 + X_C^2}, \quad (2.17)$$

где $\omega_{0Э}$ – угловая частота сети; X_C – емкостное сопротивление конденсатора;
 R_p – разрядное сопротивление.

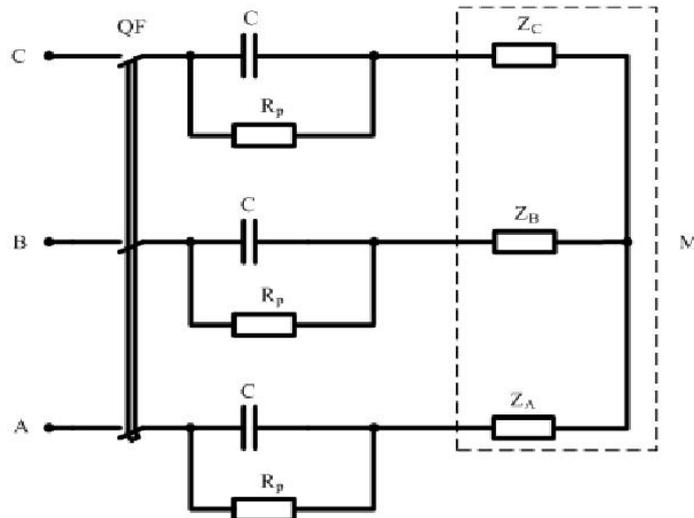


Рис. 2.4 – Эквивалентная схема пускового режима

Эквивалентное сопротивление $Z_{Э}$ можно представить в виде суммы добавочных сопротивлений: $Z_{Э} = R_{доб1} - jX_{Сдоб1}$, где

$$R_{доб1} = \frac{R_p X_C^2}{R_p^2 + X_C^2}; \quad X_{Сдоб1} = \frac{R_p^2 X_C}{R_p^2 + X_C^2}. \quad (2.18)$$

Выразим эквивалентную пусковую емкость:

$$C_{Э} = \frac{1}{\omega_{0Э} X_{Сдоб}}. \quad (2.19)$$

С учетом преобразований расчетная схема примет вид (Рис. 2.5)

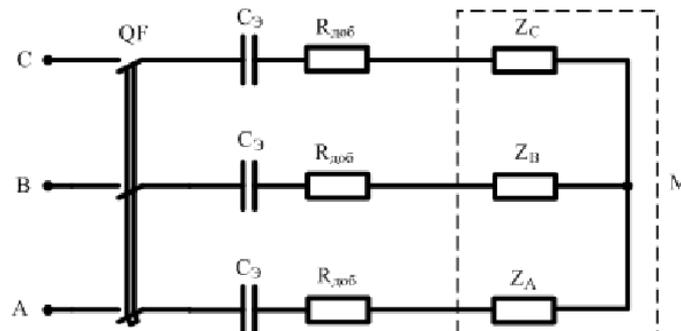


Рис. 2.5 – Преобразованная расчетная схема

Уравнения равновесия напряжений в фазах АД будут выглядеть следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_A}{dt} = u_A - (R_1 + R_{\text{доб}})i_{1A} - u_{C_{\text{э}A}}; \\ \frac{d\psi_B}{dt} = u_B - (R_1 + R_{\text{доб}})i_{1B} - u_{C_{\text{э}B}}; \\ \frac{d\psi_C}{dt} = u_C - (R_1 + R_{\text{доб}})i_{1C} - u_{C_{\text{э}C}}; \\ \frac{d\psi_a}{dt} = -R_2 i_{1a}; \\ \frac{d\psi_b}{dt} = -R_2 i_{1b}; \\ \frac{d\psi_c}{dt} = -R_2 i_{1c}, \end{array} \right. \quad (2.20)$$

где u_A, u_B, u_C – фазные напряжения, приложенные к обмоткам статора электродвигателя; R_1 – сопротивление фазы статора АД; R_2 – приведенное сопротивление ротора АД; $i_{1A}, i_{1B}, i_{1C}, i_{1a}, i_{1b}, i_{1c}$ – фазные токи статора и ротора; $u_{C_{\text{э}A}}, u_{C_{\text{э}B}}, u_{C_{\text{э}C}}$ – падения напряжений на пусковых конденсаторах.

В соответствии с правилами языка программирования программного комплекса МВТУ 3.7 мы указываем, как считать производную, а сама величина-оригинал рассчитывается автоматически. Следовательно, падения напряжений на пусковых конденсаторах рассчитываются следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du_{C_{\text{э}A}}}{dt} = \frac{i_{1A}}{C_{\text{э}} + k_{\alpha} \cdot C_{\text{э}}}; \\ \frac{du_{C_{\text{э}B}}}{dt} = \frac{i_{1B}}{C_{\text{э}} + k_{\beta} \cdot C_{\text{э}}}; \\ \frac{du_{C_{\text{э}C}}}{dt} = \frac{i_{1C}}{C_{\text{э}} + k_{\gamma} \cdot C_{\text{э}}}. \end{array} \right. \quad (2.21)$$

Сетевые токи i_{0A}, i_{0B}, i_{0C} в пусковом режиме равны токам фаз статора электродвигателя:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{0A} = i_{1A}; \\ i_{0B} = i_{1B}; \\ i_{0C} = i_{1C}. \end{array} \right. \quad (2.22)$$

Для режима компенсации реактивной мощности (рабочего режима)

характерна схема, представленная на рис.2.6.

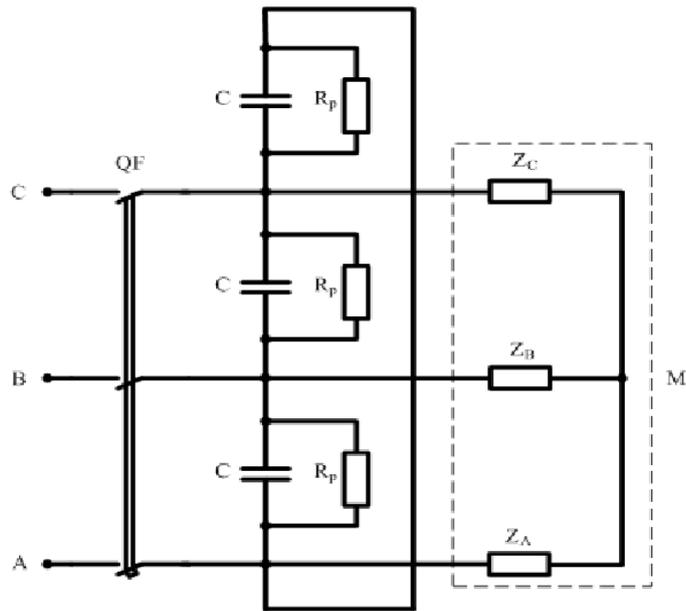


Рис. 2.6 – Эквивалентная схема режима компенсации реактивной мощности

Преобразуем схему. В режиме компенсации реактивной мощности конденсаторы подключены к сети «треугольником». Для расчетов преобразуем фактический «треугольник» в эквивалентную «звезду»:

$$Z_{\Delta} = \frac{R_p(-jX_C)}{R_p - jX_C} = \frac{R_p X_C^2 - jR_p^2 X_C}{R_p^2 + X_C^2}; \quad (2.23)$$

$$Z_{\lambda} = \frac{Z_{\Delta}}{3} = R_{\text{доб2}} - jX_{\text{Сдоб2}}; \quad (2.24)$$

$$R_{\text{доб2}} = \frac{R_p X_C^2}{3(R_p^2 + X_C^2)}; \quad X_{\text{Сдоб2}} = \frac{R_p^2 X_C}{3(R_p^2 + X_C^2)}. \quad (2.25)$$

Выразим эквивалентную компенсирующую емкость:

$$C_{\text{КЭ}} = \frac{1}{\omega_{03} X_{\text{Сдоб2}}}. \quad (2.26)$$

С учетом преобразований расчетная схема примет вид, изображенный на рис. 2.7.

Уравнения равновесия напряжений в фазах АД будут выглядеть следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_A}{dt} = u_A - R_1 i_{1A}; \\ \frac{d\psi_B}{dt} = u_B - R_1 i_{1B}; \\ \frac{d\psi_C}{dt} = u_C - R_1 i_{1C}; \\ \frac{d\psi_a}{dt} = -R_2 i_{1a}; \\ \frac{d\psi_b}{dt} = -R_2 i_{1b}; \\ \frac{d\psi_c}{dt} = -R_2 i_{1c}, \end{array} \right. \quad (2.27)$$

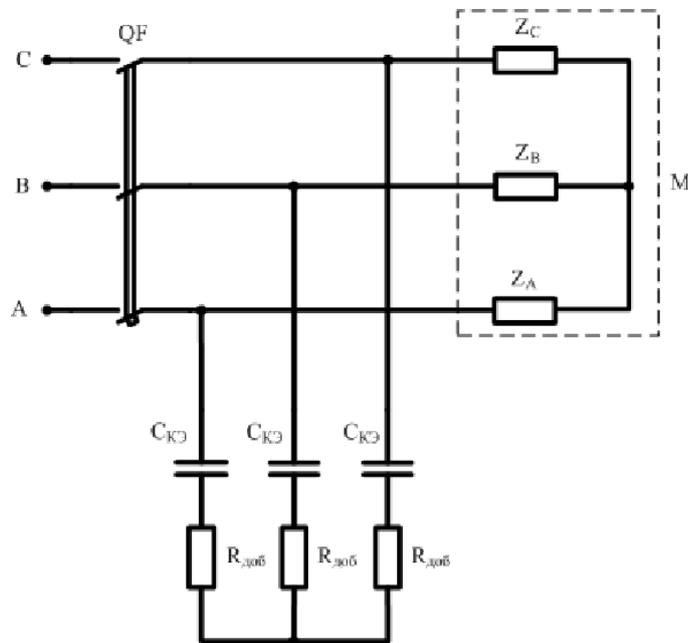


Рис. 2.7 – Преобразованная расчетная схема

Токи через эквивалентные компенсирующие емкости $C_{кэ}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{2A} = \frac{u_A - u_{C_{кэ}A}}{R_{доб}}; \\ i_{2B} = \frac{u_B - u_{C_{кэ}B}}{R_{доб}}; \\ i_{2C} = \frac{u_C - u_{C_{кэ}C}}{R_{доб}}, \end{array} \right. \quad (2.28)$$

Где $u_{C_{кэ}A}$, $u_{C_{кэ}B}$, $u_{C_{кэ}C}$ – падения напряжений на эквивалентных компенсирующих емкостях, которые определяются следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{du_{C_{кэ}A}}{dt} = \frac{i_{2A}}{C_{кэ} + k_{\alpha} \cdot C_{кэ}}; \\ \frac{du_{C_{кэ}B}}{dt} = \frac{i_{2B}}{C_{кэ} + k_{\beta} \cdot C_{кэ}}; \\ \frac{du_{C_{кэ}C}}{dt} = \frac{i_{2C}}{C_{кэ} + k_{\gamma} \cdot C_{кэ}}. \end{cases} \quad (2.29)$$

Сетевые токи в режиме компенсации реактивной мощности i_{0A}, i_{0B}, i_{0C} определяются следующим образом:

$$\begin{cases} i_{0A} = i_{1A} + i_{2A}; \\ i_{0B} = i_{1B} + i_{2B}; \\ i_{0C} = i_{1C} + i_{2C}. \end{cases} \quad (2.30)$$

Таким образом, анализируя (2.30) можно сделать вывод, что так как компенсирующий ток i_2 опережает ток статора АД i_1 , то значение суммарного тока i_0 , потребляемого из сети, при соответствующем значении емкости компенсирующих конденсаторов оказывается ниже значения тока статора АД i_1 .

Предварительные исследования показали, что в пусковом режиме возможно развитие процесса самораскачивания АД, а при переключении на рабочий режим работы ПКУ возникают значительные амплитуды тока и электромагнитного момента электродвигателя [10]. Поэтому с целью определения причин возникновения негативных явлений представляет интерес исследование переходных процессов, происходящих при переключении ПКУ с пускового режима на режим работы, в котором АД отключен от конденсаторов и происходит его торможение выбегом; при переключении ПКУ с режима выбега АД на режим работы, в котором АД подключен напрямую к сети, но конденсаторы не подключены на компенсацию реактивной мощности; при подключении конденсаторов на компенсацию реактивной мощности, т.е. переключении ПКУ на рабочий режим. Для этого математическая модель дополнена математическим описанием режима работы ПКУ, в котором АД тормозится выбегом, и режима, в котором АД питается от сети, но конденсаторы ПКУ к сети не подключены.

Выдержка времени для переключения на режим выбега АД определяется в

функции тока статора: $t_1 = f(I_S)$, выдержка времени для переключения на режим питания АД от сети определяется в функции угла между вектором ЭДС статора АД и обобщенным вектором напряжения сети: $t_2 = f(\varphi)$, выдержка времени для подключения конденсаторов ПКУ на компенсацию реактивной мощности определяется в функции напряжения на конденсаторах: $t_3 = f(U_C)$.

Для режима выбега АД расчетная схема имеет вид, представленный на рис. 2.8.

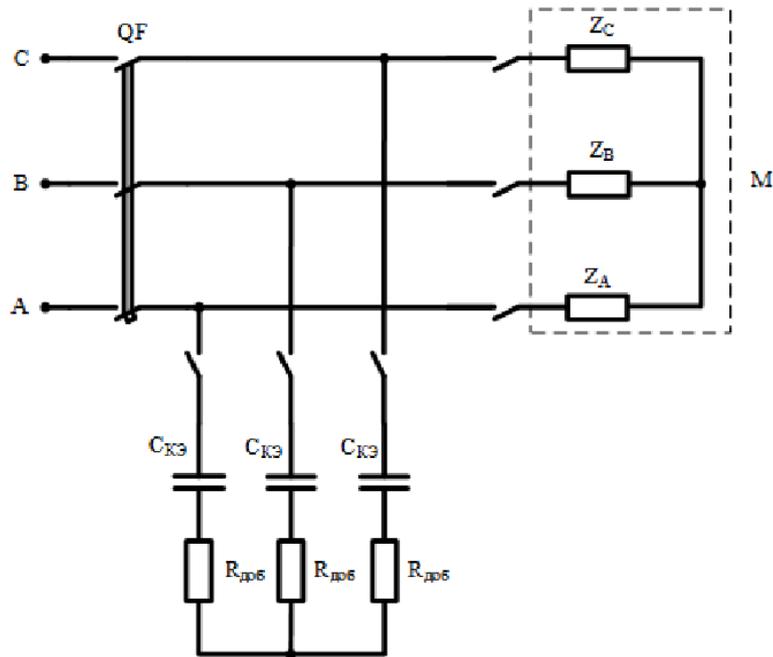


Рис. 2.8 – Расчетная схема режима выбега АД

Уравнения равновесия напряжений в фазах АД в режиме выбега электродвигателя имеют следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_A}{dt} = -R_1 i_{1A}; \\ \frac{d\psi_B}{dt} = -R_1 i_{1B}; \\ \frac{d\psi_C}{dt} = -R_1 i_{1C}; \\ \frac{d\psi_a}{dt} = -R_2 i_{1a}; \\ \frac{d\psi_b}{dt} = -R_2 i_{1b}; \\ \frac{d\psi_c}{dt} = -R_2 i_{1c}, \end{array} \right. \quad (2.31)$$

Токи через эквивалентные емкости $C_{КЭ}$:

$$\begin{cases} i_{2A} = \frac{-u_{C_{КЭ}A}}{R_{доб}}; \\ i_{2B} = \frac{-u_{C_{КЭ}B}}{R_{доб}}; \\ i_{2C} = \frac{-u_{C_{КЭ}C}}{R_{доб}}, \end{cases} \quad (2.32)$$

где $u_{C_{КЭ}A}, u_{C_{КЭ}B}, u_{C_{КЭ}C}$ – падения напряжений на конденсаторах, которые определяются следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{du_{C_{КЭ}A}}{dt} = \frac{i_{2A}}{C_{КЭ} + k_{\alpha} \cdot C_{КЭ}}; \\ \frac{du_{C_{КЭ}B}}{dt} = \frac{i_{2B}}{C_{КЭ} + k_{\beta} \cdot C_{КЭ}}; \\ \frac{du_{C_{КЭ}C}}{dt} = \frac{i_{2C}}{C_{КЭ} + k_{\gamma} \cdot C_{КЭ}}. \end{cases} \quad (2.33)$$

Сетевые токи в режиме выбега АД i_{0A}, i_{0B}, i_{0C} равны нулю:

$$\begin{cases} i_{0A} = 0; \\ i_{0B} = 0; \\ i_{0C} = 0. \end{cases} \quad (2.34)$$

Для режима питания АД от сети расчетная схема имеет вид, представленный на рис. 2.9.

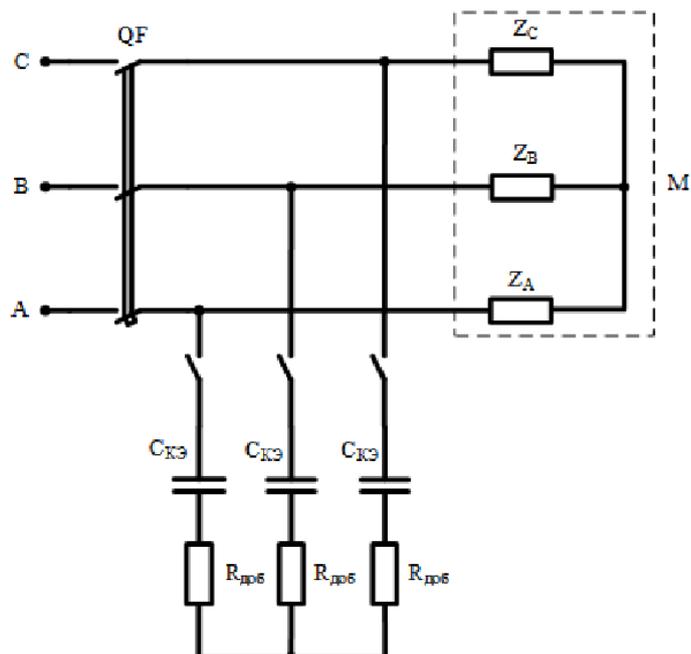


Рис. 2.9 – Расчетная схема режима питания АД от сети

Уравнения равновесия напряжений в фазах АД в режиме питания электродвигателя от сети имеют следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_A}{dt} = u_A - R_1 i_{1A}; \\ \frac{d\psi_B}{dt} = u_B - R_1 i_{1B}; \\ \frac{d\psi_C}{dt} = u_C - R_1 i_{1C}; \\ \frac{d\psi_a}{dt} = -R_2 i_{1a}; \\ \frac{d\psi_b}{dt} = -R_2 i_{1b}; \\ \frac{d\psi_c}{dt} = -R_2 i_{1c}, \end{array} \right. \quad (2.35)$$

Токи через эквивалентные емкости $C_{КЭ}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{2A} = \frac{-u_{C_{КЭ}A}}{R_{доб}}; \\ i_{2B} = \frac{-u_{C_{КЭ}B}}{R_{доб}}; \\ i_{2C} = \frac{-u_{C_{КЭ}C}}{R_{доб}}, \end{array} \right. \quad (2.36)$$

где $u_{C_{КЭ}A}, u_{C_{КЭ}B}, u_{C_{КЭ}C}$ – падения напряжений на конденсаторах, которые определяются следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du_{C_{КЭ}A}}{dt} = \frac{i_{2A}}{C_{КЭ} + k_\alpha \cdot C_{КЭ}}; \\ \frac{du_{C_{КЭ}B}}{dt} = \frac{i_{2B}}{C_{КЭ} + k_\beta \cdot C_{КЭ}}; \\ \frac{du_{C_{КЭ}C}}{dt} = \frac{i_{2C}}{C_{КЭ} + k_\gamma \cdot C_{КЭ}}. \end{array} \right. \quad (2.37)$$

Сетевые токи в режиме питания АД от сети i_{0A}, i_{0B}, i_{0C} равны :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{0A} = i_{1A}; \\ i_{0B} = i_{1B}; \\ i_{0C} = i_{1C}. \end{array} \right. \quad (2.38)$$

2.4 Учет нелинейности параметров асинхронной машины

В диссертационной работе выполнено математическое описание и

исследование переходных процессов, происходящих в асинхронном электроприводе при конденсаторном пуске электродвигателя с последующим переключением конденсаторов в режим компенсации реактивной мощности. Поэтому с целью получения более точных результатов математическая модель учитывает нелинейность параметров статора и ротора АД при различных режимах работы электропривода.

Нелинейность параметров асинхронной машины обуславливается в основном влиянием насыщения ее магнитной цепи как по пути главного потока, так и по путям рассеяния, а также эффектом вытеснения тока. Как показывают исследования эффект насыщения цепей рассеяния достаточно слабо влияет на динамические процессы и им можно пренебречь. Наиболее существенное влияние, которое должно учитываться при исследованиях динамики оказывает насыщение по пути главного магнитного потока – потока взаимоиндукции. В частности, в рабочих режимах привода с электродвигателями серии 4А индуктивность намагничивания L_m может изменяться до 30 %.

Учет непрерывно изменяющейся степени насыщения магнитной цепи асинхронной машины необходим при анализе ряда специальных режимов электропривода, особенно связанных с самовозбуждением, при котором предельные (установившиеся) значения параметров режима определяются нелинейностью кривой намагничивания, а степень насыщения магнитной системы машины, в свою очередь, является функцией этих параметров [29, 96].

При исследовании на ЭВМ имеются возможности отдельного учета увеличения активного и уменьшения индуктивного сопротивлений ротора при изменении частоты и их взаимного влияния. Исследование показывает, что нелинейное изменение активного сопротивления ротора оказывает наибольшее влияние на динамику при пуске асинхронных двигателей. За счет вытеснения тока в пазах ротора уменьшается время разгона, снижаются ударные токи и моменты [73, 74].

Поэтому разработанная в процессе выполнения диссертации математическая модель имеет следующие особенности:

- учет насыщения элементов машины от основного магнитного потока;
- учет эффекта вытеснения тока в стержнях короткозамкнутого ротора АД.

Математическая модель асинхронной машины с учетом переменного насыщения стали по главному пути магнитного потока может быть получена, если считать, что, несмотря на наличие насыщения стали, МДС и магнитные индукции распределяются в воздушном зазоре машины синусоидально, а магнитная проводимость по внутреннему диаметру статора постоянна и не зависит от положения ротора. Кроме того, следует принять, что насыщения по главному пути магнитного потока и по путям рассеяния не влияют друг на друга и могут учитываться отдельно.

Наиболее совершенным способом учета насыщения является представление взаимной индуктивности в виде непрерывной функции обобщенного вектора намагничивающего тока. Однако в этом случае систему алгебраических уравнений, связывающих токи и потокосцепления асинхронной машины, нельзя записать так, чтобы получить устойчивое решение. Поэтому для получения устойчивого решения приходится при записи уравнения прибегать к различного рода искусственным приемам. Один из них заключается в том, что взаимная индуктивность представляется состоящей из двух частей: неизменной M_{0i} , не зависящей от насыщения, и переменной ΔM_i , зависящей от намагничивающего тока i_m [29, 93, 97]:

$$M_i = M_{0i} - \Delta M_i, \quad (2.39)$$

где переменная составляющая индуктивностей достаточно точно определяется квадратичной зависимостью от результирующего вектора потокосцепления:

$$\Delta M_i = k\psi_m^2, \quad (2.40)$$

причем коэффициент k , зависит от марки электротехнической стали, может быть определен аналитическим или экспериментальным путем.

Величина ΔM_i является однозначной функцией модуля намагничивающего тока, но при решении на ЭВМ ΔM_i удобнее определять как функцию потокосцепления ψ_m , поскольку диапазон изменения последнего значительно меньше диапазона изменения намагничивающего тока. При работе

электромеханического преобразователя интерес представляет исследование влияния вытеснения тока в пазу, пренебрежение которым в некоторых режимах приводит к существенным количественным и качественным отклонениям расчетных динамических и статических характеристик привода от реальных. При изменении угловой скорости ротора в нем изменяется частота тока, что влияет на распределение плотности тока по высоте проводника, находящегося в пазу. Ток в проводнике изменяется по высоте паза за счет различного индуктивного сопротивления проводников, лежащих на дне паза и ближе к зазору. При этом изменяется и амплитуда токов и фаза. Ток распределяется неравномерно по ширине паза [96].

Характер изменения переменных параметров АД в различных статических режимах работы электропривода известен в литературе, однако получить точное математическое описание закона изменения параметров ротора от частоты тока в его обмотке или скольжения ($R_{Ri} = f(f_2), L_{Ri} = f(f_2)$) не удастся ввиду его нелинейности. Однако доказано, что в зоне низких частот ротора (в области номинального скольжения) параметры R_{Ri} и L_{Ri} могут быть с высокой степенью точности приняты постоянными. Также доказано, что для исследования динамики привода необходимо определить номинальные и пусковые значения параметров двигателя, а вид изменения параметров не имеет большого значения. На этом основании считается целесообразным использование линейной аппроксимации графика. В итоге получен следующий закон изменения параметров ротора [29]:

$$R_{Ri} = \begin{cases} R_{Ri_{\text{НОМ}}}, & 0 < s \leq s_{\text{НОМ}} \\ R_{Ri_{\text{НОМ}}} + k_1 s, & s_{\text{НОМ}} < s \leq 1 \end{cases}; \quad (2.41)$$

$$L_{Ri} = \begin{cases} L_{Ri_{\text{НОМ}}}, & 0 < s \leq s_{\text{НОМ}} \\ L_{Ri_{\text{НОМ}}} - k_2 s, & s_{\text{НОМ}} < s \leq 1 \end{cases} \quad (2.42)$$

где R_{Ri} и L_{Ri} – номинальные (паспортные) параметры ротора, а коэффициенты k_1 и k_2 – коэффициенты, зависящие от пусковых значений активного и индуктивного сопротивлений ротора ($R_{Ri\Pi}$, $L_{Ri\Pi}$), которые рассчитываются по паспортным данным серийно выпускаемых двигателей.

Так как учет нелинейности параметров АД усложняет математическую модель, то с целью ее упрощения стоит вопрос о допущении линейности этих параметров. Для чего проведем сравнение результатов моделирования пуска АД АИР80А2У3 с емкостным сопротивлением в цепи статора на математической модели без учета эффекта насыщения магнитной цепи и эффекта вытеснения тока ротора электродвигателя и на математической модели, учитывающей эти нелинейности. Параметры АД: $P_n=1,5 \text{ кВт}$, $n_n=2850 \text{ об/мин}$, $R_1=5,6 \text{ Ом}$, $L_1=0,011 \text{ Гн}$, $R'_2=3,27 \text{ Ом}$, $L_2=0,017 \text{ Гн}$, $L_m=0,53 \text{ Гн}$, $J_d=0,0018 \text{ кг/м}^2$. Пусковые свойства АД: $M_{II}=2,1M_{ном}$, $M_{min}=1,4M_{ном}$, $M_{кр.}=2,6M_{ном}$, $I_{II}=6,5I_{ном}$, где $M_{ном}=5 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $I_{ном}=3,3 \text{ А}$.

На рис. 2.10 представлены полученные математическим моделированием графики изменения основных параметров АД при конденсаторном пуске с номинальным моментом нагрузки на валу ($M_{ст}=M_{ном}$), с включенной в цепь статора емкостью, равной 1000 мкФ , полученные с помощью дифференциальных систем уравнений без учета эффекта насыщения магнитной цепи и эффекта вытеснения тока ротора электродвигателя.

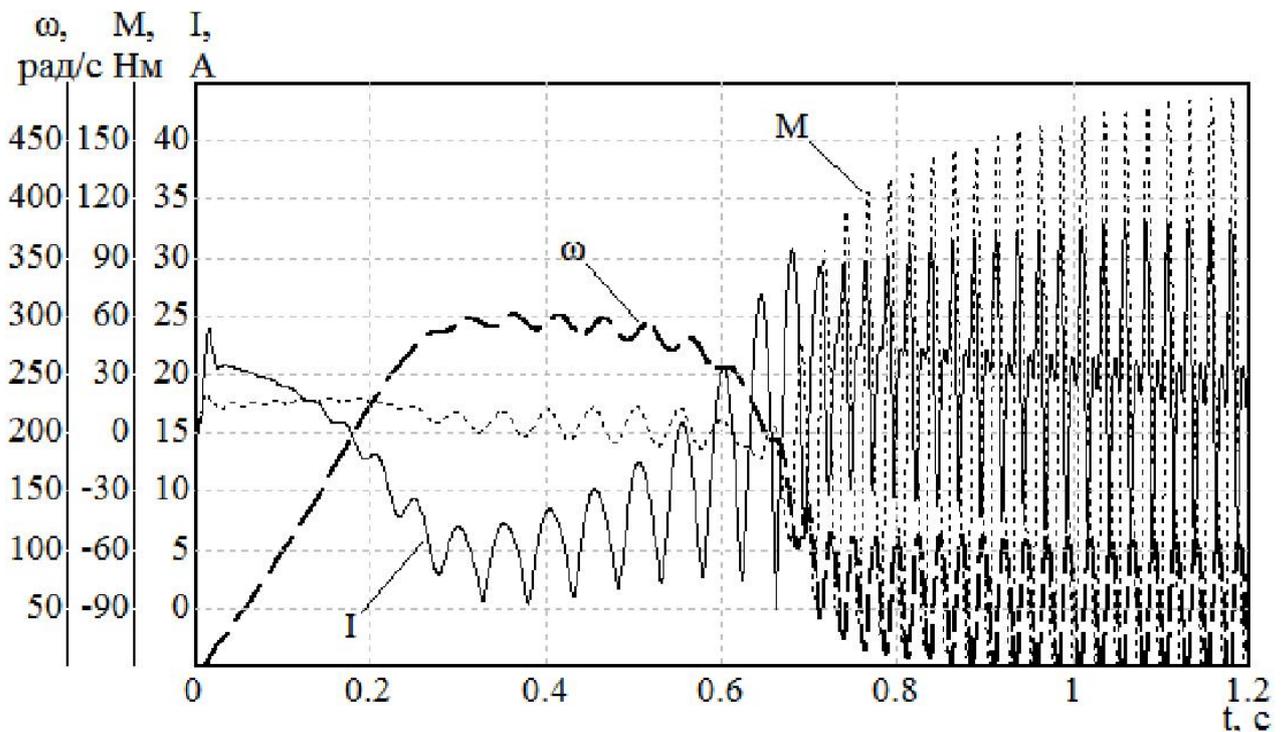


Рис. 2.10. Графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при конденсаторном пуске, полученные с помощью модели без учета нелинейности параметров электродвигателя

Анализируя графики (рис. 2.10) следует отметить, что в модели без учета насыщения магнитной цепи и вытеснения тока в пазах ротора АД в режиме самовозбуждения возникают значительные колебания электромагнитного момента, превышающие номинальный момент АД в 30 раз, а скорость вращения ротора электродвигателя колеблется около нулевого значения.

На рис. 2.11 представлены полученные математическим моделированием графики изменения основных параметров АД при конденсаторном пуске с номинальным моментом нагрузки на валу ($M_{ст} = M_{ном}$), с включенной в цепь статора емкостью, равной 1000 мкФ, полученные с помощью дифференциальных систем уравнений с учетом эффекта насыщения магнитной цепи и эффекта вытеснения тока в пазах ротора электродвигателя.

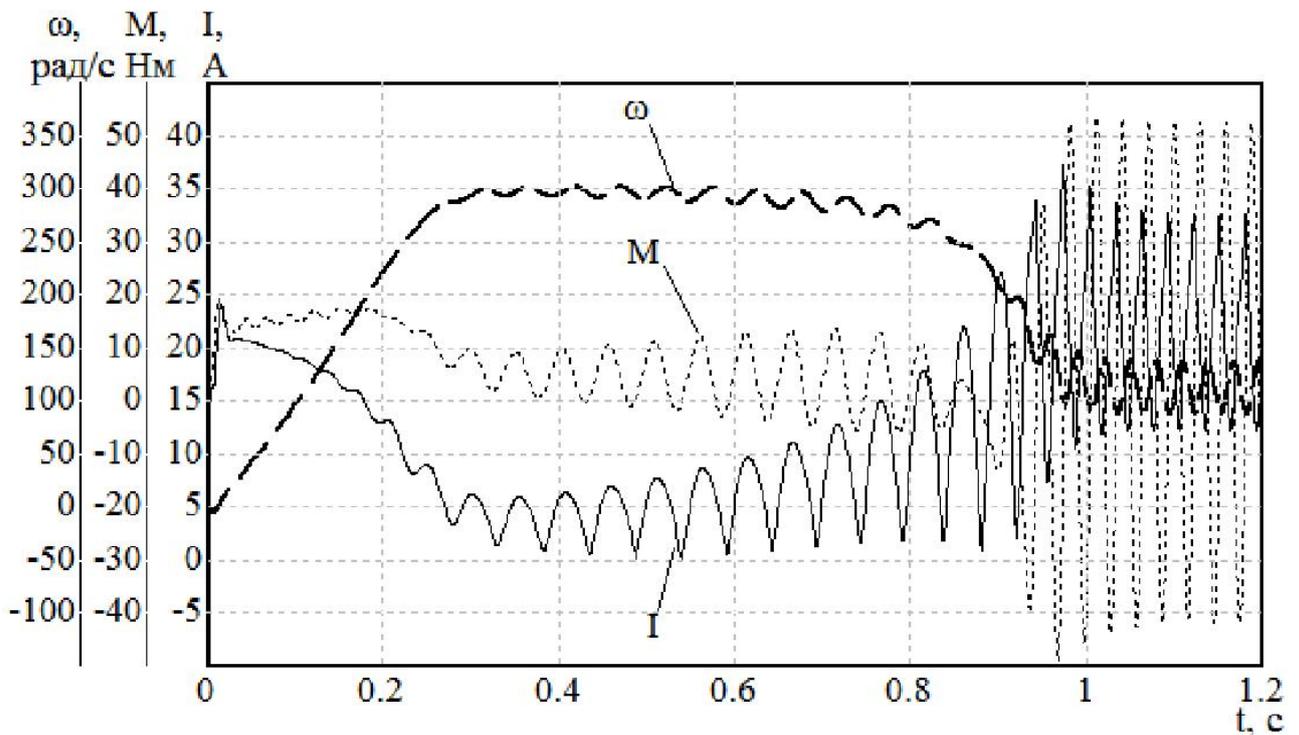


Рис. 2.11. Графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при конденсаторном пуске, полученные с помощью модели с учетом нелинейности параметров электродвигателя

Анализируя графики (рис. 2.11) и сравнивая их с графиками из рис. 2.10, можно сделать вывод, что учет насыщения магнитной цепи и эффекта вытеснения тока в стержнях короткозамкнутого ротора АД необходим, так как позволяет более точно описать поведение электродвигателя при самовозбуждении. Так, по сравнению с графиками из рис. 2.10 на графиках из

рис. 2.11 можно отметить значительно меньшие колебания электромагнитного момента АД (амплитуда колебаний снизилась на 50-60%), а частота вращения ротора двигателя не снижается до нуля, а колеблется на частоте резонанса. Процесс развития самовозбуждения в модели с учетом насыщения магнитной цепи и вытеснения тока в пазах ротора АД занимает на 40-50% больше времени, чем в модели без учета этих эффектов, так как колебания тока и электромагнитного момента в данном случае имеют меньший размах.

2.5 Математическое описание нагрузки

Как было сказано в первой главе, конденсаторный пуск АД может применяться как для ограничения пускового тока электродвигателя, так и для его форсировки. Поэтому в данной работе для этих двух режимов конденсаторного пуска рассматривается целесообразная для них нагрузка.

2.5.1 Описание нагрузки при плавном конденсаторном пуске

При плавном конденсаторном пуске АД пусковой момент, развиваемый двигателем, также снижается, поэтому такой способ пуска целесообразно применять для электроприводов, имеющих вентиляторную характеристику момента сопротивления, то есть турбомеханизмов. Поэтому в данной работе исследование конденсаторного пуска с ограничением пускового тока АД проводится для вентиляторной нагрузки.

Основными особенностями турбомеханизмов, с точки зрения условий работы электропривода, относятся [84]:

- 1) зависимость момента нагрузки и мощности на валу от скорости вращения;
- 2) длительный режим работы;
- 3) отсутствие реверсов и торможений;
- 4) ограниченный диапазон регулирования скорости вращения;
- 5) отсутствие перегрузок.

Одну из основных особенностей турбомеханизмов как нагрузочных машин для электропривода составляет зависимость статического момента сопротивления на валу турбомеханизма от скорости его вращения. Эту зависимость $M_c = f(n)$ обычно называют механической характеристикой.

Развиваемая турбомеханизмом полезная мощность:

$$P_{\text{пол}} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{102}, \text{ кВт} \quad (2.43)$$

где γ – удельный вес вещества потока при данных условиях, кгс/м³; Q – производительность (расход) турбомеханизма, м³/с; H – напор, м.

Мощность, развиваемая приводным двигателем турбомеханизма, соответственно будет:

$$P_{\text{мех}} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{102 \cdot \eta_{\text{ТМ}}}, \quad (2.44)$$

где $\eta_{\text{ТМ}}$ – КПД турбомеханизма при данном режиме его работы

На характер рассматриваемой зависимости существенным образом влияет вид характеристики сети, на которую работает турбомеханизм, а именно, соотношение между статической и динамической составляющими требуемого напора.

Характеристика сети с постоянными параметрами имеет вид:

$$H = H_{\text{ст}} + R \cdot Q^2, \quad (2.45)$$

где $H_{\text{ст}}$ – статический напор, м; R – коэффициент сопротивления сети, сек²/м⁵.

В данной работе при исследовании конденсаторного пуска с ограничением пускового тока АД в качестве нагрузки на валу выступает рабочее колесо вентилятора. Вентилятор является механизмом, который не имеет статической составляющей напора, поэтому рассмотрим работу турбомеханизма на сеть без противодействия $H_{\text{ст}} = 0$. Характеристика сети в этом случае определяется формулой [84]:

$$H = R \cdot Q^2. \quad (2.46)$$

Производительность турбомеханизма при работе на сеть без статической составляющей напора пропорциональна скорости вращения турбомеханизма:

$$Q = k_Q \cdot n. \quad (2.47)$$

Напор, развиваемый турбомеханизмом, пропорционален квадрату скорости вращения:

$$H = k_H \cdot n^2. \quad (2.48)$$

Полезная мощность, развиваемая турбомеханизмом, пропорциональна кубу скорости:

$$P_{\text{пол}} = k_P \cdot n^3. \quad (2.49)$$

Поскольку полезная мощность турбомеханизма пропорциональна кубу скорости, а коэффициент полезного действия его при работе на сеть без противодействия неизменен, то подводимая к турбомеханизму мощность пропорциональна кубу скорости:

$$P_{\text{мех}} = k_P \cdot n^3. \quad (2.50)$$

Следовательно, момент аэродинамического сопротивления турбомеханизма пропорционален квадрату скорости:

$$M = k_M \cdot n^2. \quad (2.51)$$

Для случая, когда турбомеханизм работает на сеть, не имеющую статической составляющей напора, момент сопротивления турбомеханизма, приведенный к валу двигателя, имеет вид:

$$M = M_{\text{тр}} + k_M \cdot n^2 \quad (2.52)$$

Момент сопротивления складывается из момента аэродинамического сопротивления, определяемого формулой (2.42), и момента, обусловленного механическими сопротивлениями (трением в подшипниках, редукторе и др.). Момент трения $M_{\text{тр}}$ для большинства турбомеханизмов не превышает 5% номинального момента. С учетом последнего механическая характеристика турбомеханизма в относительных единицах имеет вид:

$$M = \left(0,05 + 0,95 \left(\frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^2 \right) \cdot M_{\text{ном}}, \quad (2.53)$$

где $M_{\text{ном}} = 9565 \cdot P_{\text{мех.ном}}/n_{\text{ном}}$ – номинальный момент вентилятора, Н·м; $n_{\text{ном}}$ – номинальная скорость, об/мин; $P_{\text{мех.ном}}$ – номинальная мощность на валу при скорости $n_{\text{ном}}$, кВт.

2.5.2 Описание нагрузки при форсированном конденсаторном пуске

Для механизмов с тяжелыми условиями пуска, момент сопротивления которых максимален в начале пуска, а по мере разгона его величина снижается, по условию гарантированного пуска зачастую выбирается приводной асинхронный двигатель (АД) завышенной мощности, который остается недогруженным в рабочем режиме. ГОСТом установлено, что пусковой момент АД с короткозамкнутым ротором мощностью 0,6—100 кВт находится в диапазоне от 1,0 до 2,0 от номинального, а мощностью 100—1000 кВт – от 0,7 до 1,0 от номинального. Получение кратностей пускового момента, больших регламентированных ГОСТом, обычно связано либо с увеличением активного сопротивления ротора, либо с изменением конструкции ротора, что ухудшает энергетические показатели двигателя. Таким образом, в тех случаях, когда необходимо преодоление момента трогания, превышающего пусковой момент АД, актуальным является форсирование пуска.

Форсированный пуск АД применим также в тех случаях, когда возникает необходимость быстрого прохождения электродвигателем зоны резонанса, в которой при недостаточной динамике разгона момент сопротивления механизма увеличивается настолько, что дальнейший разгон электропривода невозможен. В работе [29] проведены исследования асинхронного электропривода зарезонансных вибрационных транспортирующих машин и форсирование пуска электропривода в зарезонансную область осуществляется последовательным подключением в цепь статора АД конденсаторов.

В данной работе при исследовании форсированного конденсаторного пуска в качестве нагрузки принят момент сопротивления, изменяющийся по закону:

$$M_C = M_0 + (M_{\text{НОМ}} - M_0) \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{НОМ}1}}\right)^{-1}, \quad (2.54)$$

где $M_{\text{НОМ}}$ – номинальный момент сопротивления механизма, Н·м; M_0 – момент сопротивления вала, подшипников и т.д. Н·м; $n_{\text{НОМ}1}$, об/мин – скорость вращения, при которой момент сопротивления равен номинальному моменту АД.

Приведенному выше закону соответствует нелинейно-спадающая механическая характеристика. При этом момент сопротивления M_C изменяется обратно пропорционально скорости, а мощность, потребляемая механизмом, остается постоянной. Такой характеристикой обладают, например, некоторые токарные, расточные, фрезерные и другие металлорежущие станки, моталки в металлургической промышленности и т. п.

Момент трения $M_{ТР}$ для большинства механизмов не превышает 5% номинального момента. С учетом последнего механическая характеристика (2.45) в относительных единицах имеет вид:

$$M = \left(0,05 + 0,95 \left(\frac{n}{n_{НОМ1}} \right)^{-1} \right) \cdot M_{НОМ}, \quad (2.55)$$

Таким образом, в данной работе при исследовании конденсаторного пуска с ограничением пускового тока АД момент сопротивления на валу электродвигателя изменяется по закону (2.53) а при исследовании форсированного конденсаторного пуска АД – по закону (2.55).

Выводы

1. Разработана обобщенная математическая модель АД в фазовых координатах, учитывающая насыщение магнитопровода статора и эффект вытеснения тока ротора, наличие конденсаторов в цепи статора и возможную асимметрию их емкостей, а также состояния полупроводниковых коммутационных элементов, которая позволяет исследовать возможные режимы работы конденсаторного ПКУ, а также переходные процессы, возникающие в системе «Электрическая сеть – ПКУ – АД – нагрузка» при переключении между режимами работы ПКУ.

2. Создан программный комплекс на основе математической модели асинхронного электропривода с конденсаторным ПКУ в среде МВТУ 3.7.

3. Установлено, что учет нелинейности параметров АД позволяет более точно описать поведение электродвигателя при самовозбуждении. Так, по сравнению с моделью без учета нелинейности параметров АД отмечено

снижение на 50-60% колебаний электромагнитного момента АД, а частота вращения ротора двигателя не снижается до нуля, а колеблется на частоте резонанса, процесс развития самовозбуждения в модели с учетом насыщения магнитной цепи и вытеснения тока в пазах ротора АД длится на 40-50% дольше.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОНДЕНСАТОРНЫМ ПУСКО-КОМПЕНСИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

Подключение последовательно с обмотками статора АД конденсаторов является эффективным средством управления пусковыми характеристиками асинхронного электропривода, позволяющим как форсировать пуск, увеличивая перегрузочную способность АД, так и ограничивать амплитуды пускового тока и электромагнитного момента электродвигателя, снижая механические ударные нагрузки на рабочие органы механизмов, а также электродинамические нагрузки на обмотки статора АД. Более того, существует возможность комбинирования обоих режимов конденсаторного пуска, когда с целью преодоления момента страгивания приводного механизма в начальной стадии разгона АД пускается в режиме форсировки с увеличенным пусковым моментом, а далее разгон продолжается в режиме плавного пуска.

Описанная в предыдущей главе математическая модель позволяет определить значение емкости конденсаторов, которую необходимо подключить в цепь статора АД для реализации необходимого режима конденсаторного пуска. Однако недостатком математической модели является трудоемкость выбора емкости конденсаторов по причине значительного числа итераций, что связано с широким диапазоном возможного изменения емкости, предназначенного как для плавного, так и для форсированного пуска. Для снижения трудоемкости предлагается сузить диапазон емкостей конденсаторов, в котором осуществляется поиск необходимой емкости. В связи с этим ставится задача исследования влияния величины подключенной в цепь статора емкости на характер пуска АД, а также выявление зависимостей между подключенной емкостью и индуктивным сопротивлением статора электродвигателя для реализации требуемых режимов форсировки или плавного пуска.

Конденсаторный способ пуска АД помимо плюсов имеет существенные недостатки, такие как явления самораскачивания и самовозбуждения, а также превышения напряжений и токов их номинальных значений при коммутации

конденсаторов и при коротких замыканиях в системе [30]. С целью исключения развития процессов самовозбуждения и самораскачивания необходимо шунтировать конденсаторы до начала развития этих процессов. В дальнейшем конденсаторы с целью их эффективного использования подключаются параллельно обмоткам статора АД для компенсации реактивной мощности.

В связи с этим, актуальным является исследование влияния подключенной емкости, нагрузки на валу АД на развитие процессов самораскачивания и самовозбуждения, а также исследование переходных процессов при переключении конденсаторов с пускового режима на режим компенсации реактивной мощности.

В настоящей главе проведено исследование конденсаторного способа пуска АД. Рассмотрены следующие вопросы:

- исследование влияния величины емкости конденсаторов на пусковые характеристики АД;
- моделирование пуска АД с подключенной емкостью в цепи статора;
- исследование конденсаторного пуска АД с нагрузкой на валу.

Исследования пуска с последовательно подключенными с обмотками статора конденсаторами проводились на асинхронном двигателе марки Siemens 1LA7113-2AA60. Параметры АД: $P_n=4 \text{ кВт}$, $n_n=2905 \text{ об/мин}$, $R_1=1,57 \text{ Ом}$, $L_1=0,0061 \text{ Гн}$, $R'_2=1,02 \text{ Ом}$, $L_2=0,0084 \text{ Гн}$, $L_m=0,25 \text{ Гн}$, $J_d=0,0055 \text{ кг/м}^2$. Пусковые свойства АД: $M_{II}=2,6M_{ном}$, $M_{кр.}=2,9M_{ном}$, $I_{II}=7,2I_{ном}$, где $M_{ном}=13 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $I_{ном}=7,8 \text{ А}$.

Исследования пусковых характеристик АД проводились на основе дифференциальных уравнений, представленных в главе 2, т. к. они позволяют получить достаточные для инженерных расчетов результаты, характеризующие систему в динамических режимах работы. На рис. 3.1 изображены полученные математическим моделированием графики изменения основных параметров АД при прямом пуске на холостом ходу ($M_{ст}=0,05M_{ном}$), полученные с помощью дифференциальных систем уравнений.

Результаты исследования пусковых режимов представлены в виде графиков тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД, полученных

математическим моделированием при номинальных параметрах питающей сети.

Анализируя рис. 3.1 можно заключить, что модель дает достаточную сходимость с реальным АД.

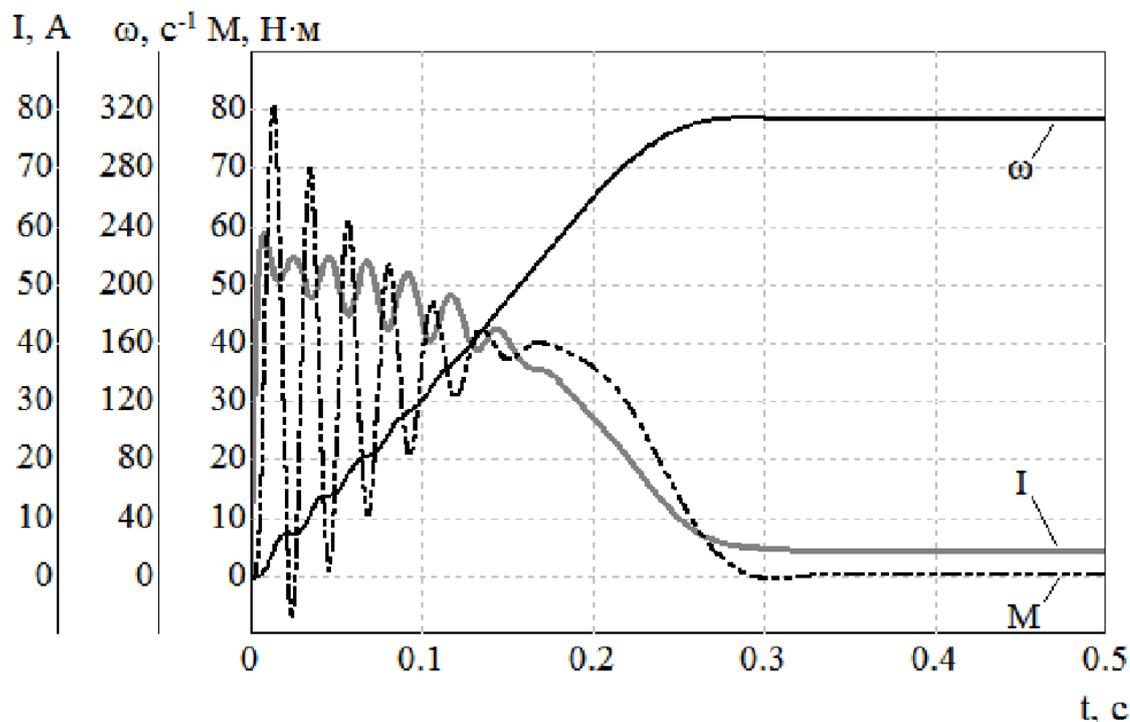


Рис. 3.1. Графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при прямом пуске на холостом ходу ($M_{ст}=0,05M_{ном}$), полученные с помощью дифференциальных уравнений

3.1 Исследование влияния величины емкости конденсаторов на пусковые характеристики АД

С целью оценки влияния величины емкости конденсаторов на пусковые характеристики АД проведен анализ изменения начальных значений тока статора, приложенного к статору напряжения, а также электромагнитного момента электродвигателя при пуске АД на холостом ходу с подключенными в цепь статора конденсаторами различной емкости.

Упрощенные выражения для электромеханических и механических характеристик АД имеют вид [29, 107]:

$$I_1 = \frac{U_\Phi}{R_1 + R_2'/s + j(X_1 + X_2' - X_C)}, \quad (3.1)$$

$$U_D = U_\Phi \cdot \frac{\sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2}}{\sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2' - X_C)^2}}, \quad (3.2)$$

$$M_{\text{мех}} = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2 \cdot R'_2 / s}{\omega_c \cdot [(R_1 + R'_2 / s)^2 + (X_1 + X'_2 - X_C)^2]}, \quad (3.3)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение, В; R_1, R'_2, X_1, X'_2 – активные и индуктивные сопротивления обмоток АД, Ом; X_C – сопротивление пусковой емкости, Ом; ω_c – синхронная угловая скорость, рад/с.

В начальный момент пуска скольжение АД равно единице: $s = 1$. Поэтому выражения для пускового тока, пускового момента и пускового фазного напряжения АД запишутся в виде:

$$I_{1\text{пуск}} = \frac{U_{\phi}}{R_1 + R'_2 + j(X_1 + X'_2 - X_C)}, \quad (3.4)$$

$$U_{\text{Д.пуск}} = U_{\phi} \cdot \frac{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2 - X_C)^2}}, \quad (3.5)$$

$$M_{\text{мех.пуск}} = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2 \cdot R'_2}{\omega_c \cdot [(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2 - X_C)^2]}, \quad (3.6)$$

Емкостное сопротивление X_C определяется из выражения:

$$X_C = \frac{1}{\omega_c \cdot C \cdot 10^{-6}}, \quad (3.7)$$

где C – емкость пусковых конденсаторов, мкФ.

Согласно выражениям (3.4) – (3.6) для АД Siemens 1LA7113-2AA60 построены в относительных единицах зависимости пускового тока, пускового момента и пускового фазного напряжения АД от емкости пусковых конденсаторов (Рис. 3.2).

Анализируя (3.4) – (3.6) можно заключить, что максимальный пусковой ток и момент будет получен при равенстве емкостного сопротивления пусковых конденсаторов пусковому индуктивному сопротивлению АД: $X_C = X_{\text{АД}} = X_1 + X'_2$. В этом случае реактивная мощность, потребляемая АД, полностью компенсируется реактивной мощностью конденсаторов, и из сети потребляется только активная мощность. Однако при этом напряжение, приложенное к статорным обмоткам АД, превышает номинальное напряжение. Например, для АД Siemens 1LA7113-2AA60 ток повышается на 30-35%,

пусковой момент увеличивается в 2 раза, а напряжение, приложенное к обмоткам статора, повышается на 41%.

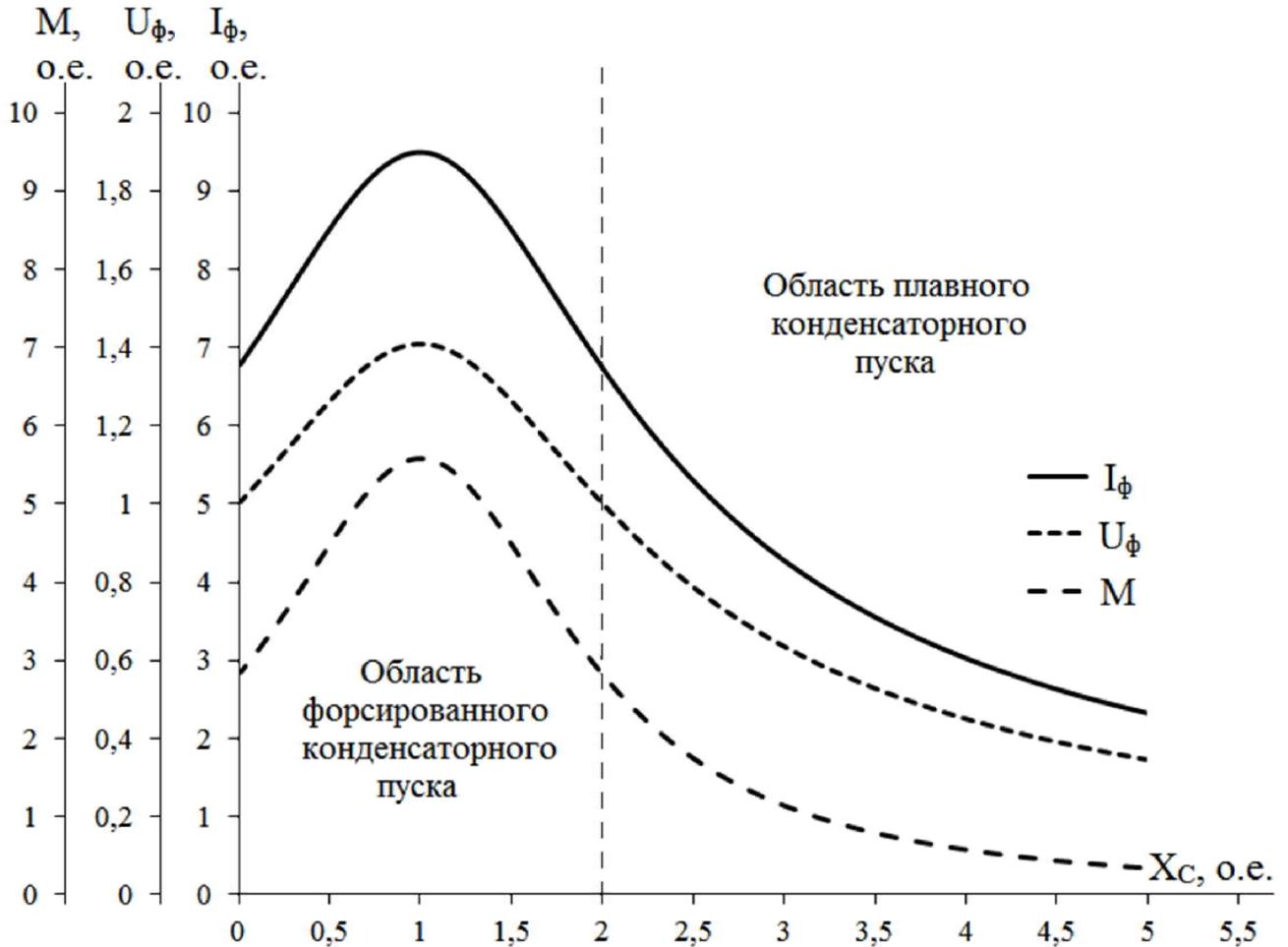


Рис. 3.2 – Зависимости пускового тока, пускового момента и пускового фазного напряжения АД от емкости пусковых конденсаторов

На основе выражения (3.4) построен график зависимости пускового тока от емкости пусковых конденсаторов на комплексной плоскости. Для каждого значения емкости пусковых конденсаторов C от 10 до 10000 мкФ с шагом в 10 мкФ определено емкостное сопротивление из выражения (3.7), далее, после подстановки этого значения в выражение (3.4), определены действительная и мнимая части пускового тока.

Результаты расчетов зависимости пускового тока представлены на рис. 3.3. Здесь точка А соответствует пусковому току при значении емкости $C = \infty$ или, что аналогично, емкостному сопротивлению $X_C = 0$, т.е. току при прямом пуске; точка Г соответствует пусковому току при $C = 10$ мкФ. В точке Б емкостное сопротивление пусковых конденсаторов равно пусковому индуктивному

сопротивлению АД: $X_C = X_{АД}$, емкость конденсаторов при этом равна $C = 1080$ мкФ, в этой точке полное сопротивление цепи равно активному сопротивлению АД, поэтому пусковой ток и пусковой момент АД максимальны. Таким образом, при значениях емкости конденсаторов, соответствующих участку кривой АБ, ток, потребляемый электроприводом, имеет активно-индуктивный характер (ток отстает от напряжения), и чем ближе значение емкости конденсаторов к точке Б, тем меньше полное сопротивление цепи, а, следовательно, значение пускового тока АД при этом повышается, в связи с чем повышаются также значения пускового момента и пускового фазного напряжения АД (рис. 3.2).

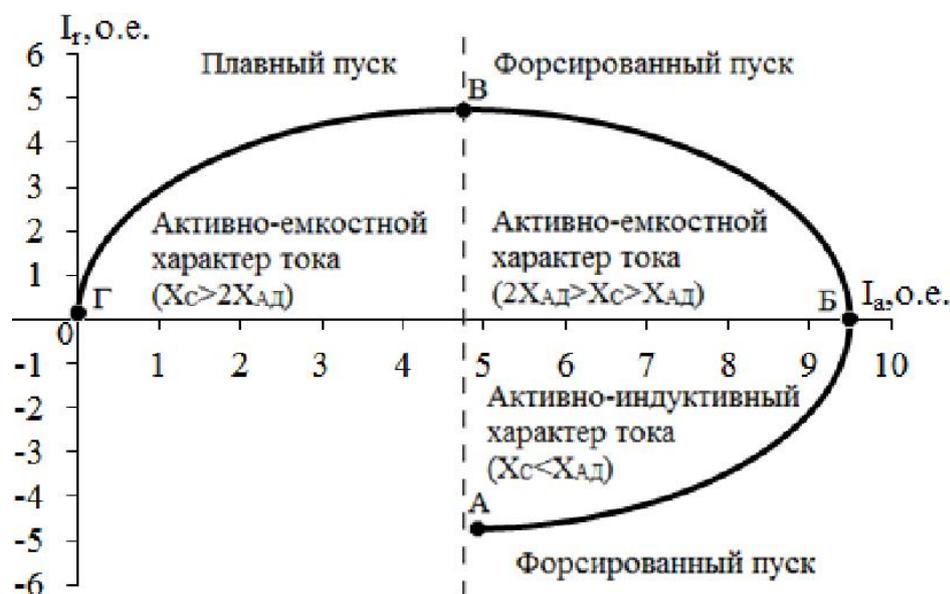


Рис. 3.3 – Зависимость пускового тока АД Siemens 1LA7113-2AA60 от емкости пусковых конденсаторов, изображенная на комплексной плоскости

При значениях емкости пусковых конденсаторов, соответствующих участку кривой БГ (рис. 3.3), ток, потребляемый электроприводом из сети, имеет опережающий характер. Точке В соответствует значение емкости $C = 540$ мкФ. При данном значении емкости емкостное сопротивление пусковых конденсаторов равно двукратному значению пускового индуктивного сопротивления АД: $X_C = 2 \cdot X_{АД}$, полное сопротивление цепи равно полному сопротивлению АД, поэтому пусковой ток АД равен пусковому току АД при прямом пуске, но имеет опережающий характер. Таким образом, при значениях

емкости конденсаторов, соответствующих участку кривой БВ, ток имеет активно-емкостной характер (ток опережает напряжение), и чем ближе значение емкости конденсаторов к точке В, тем значения пускового тока, а также пускового момента и пускового фазного напряжения АД ближе к значениям пускового тока, пускового момента и пускового фазного напряжения АД при прямом пуске (рис. 3.2).

При значениях емкости пусковых конденсаторов, соответствующих участку кривой ВГ (рис. 3.3), емкостное сопротивление конденсаторов в 2 раза превышает пусковое индуктивное сопротивление АД: $X_C > 2 \cdot X_{АД}$, суммарное реактивное сопротивление цепи превышает индуктивное сопротивление электродвигателя, следовательно, полное сопротивление цепи больше полного сопротивления АД. Таким образом, имеет место ограничение пускового тока и пускового момента АД и, чем ближе значение емкости конденсаторов к точке Г, тем значения пускового тока и пускового момента электродвигателя по сравнению с прямым пуском ниже (рис. 3.2).

Итак, результаты проведенного анализа подтверждают, что в зависимости от соотношения пускового индуктивного сопротивления АД и емкостного сопротивления пусковых конденсаторов существует теоретическая возможность как форсировки пуска, так и, наоборот, ограничения пускового тока электродвигателя. При пуске АД с последовательно подключенными с обмотками статора конденсаторами с целью форсирования пуска емкостное сопротивление пусковых конденсаторов должно компенсировать индуктивное сопротивление электродвигателя, т.е. суммарное реактивное сопротивление цепи должно быть ниже индуктивного сопротивления АД: $X_C < 2 \cdot X_{АД}$. При этом в зависимости от соотношения между емкостным сопротивлением конденсаторов и индуктивным сопротивлением АД ток, потребляемый из сети, может иметь либо активно-индуктивный, либо активно-емкостной, либо и вовсе чисто активный характер. При пуске АД с последовательно подключенными с обмотками статора конденсаторами с целью уменьшения пускового тока емкостное сопротивление пусковых конденсаторов должно быть в 2 раза больше,

чем пусковое индуктивное сопротивление АД: $X_C > 2 \cdot X_{АД}$, при этом ток, потребляемый из сети, имеет активно-емкостной характер.

Однако, проведенный анализ не раскрывает полной картины переходного процесса конденсаторного пуска АД, так как учитывает лишь начальные значения его электромеханических и механических характеристик. Для оценки влияния конденсаторов на характер изменения основных параметров АД во времени проведено моделирование переходного процесса пуска электродвигателя с последовательно включенными в цепь статора конденсаторами.

3.2 Моделирование процесса разгона АД с последовательно включенными в цепь статора конденсаторами

С целью дальнейшей оценки влияния конденсаторов на пусковые характеристики АД проведено моделирование пуска АД с различной величиной емкости конденсаторов в цепи статора.

На рис. 3.4 – 3.8 представлены полученные с помощью математической модели графики пуска АД при значениях емкости пусковых конденсаторов, соответствующих различным участкам кривой АГ (рис. 3.3).

Длительная работа конденсаторов может привести к возникновению неблагоприятного эффекта самовозбуждения АД, который может сопровождаться явлением самораскачивания, т. е. периодическими колебаниями ротора машины. В настоящих исследованиях для исключения явления самовозбуждения электродвигателя производится шунтирование конденсаторов при достижении скорости АД близкой к номинальной (90% от синхронной), таким образом, в конце разгона электродвигатель переключается на сетевое напряжение.

На рис. 3.4 представлены графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске на холостом ходу ($M_{ст}=0,05M_{ном}$) с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{II}=2800$ мкФ.

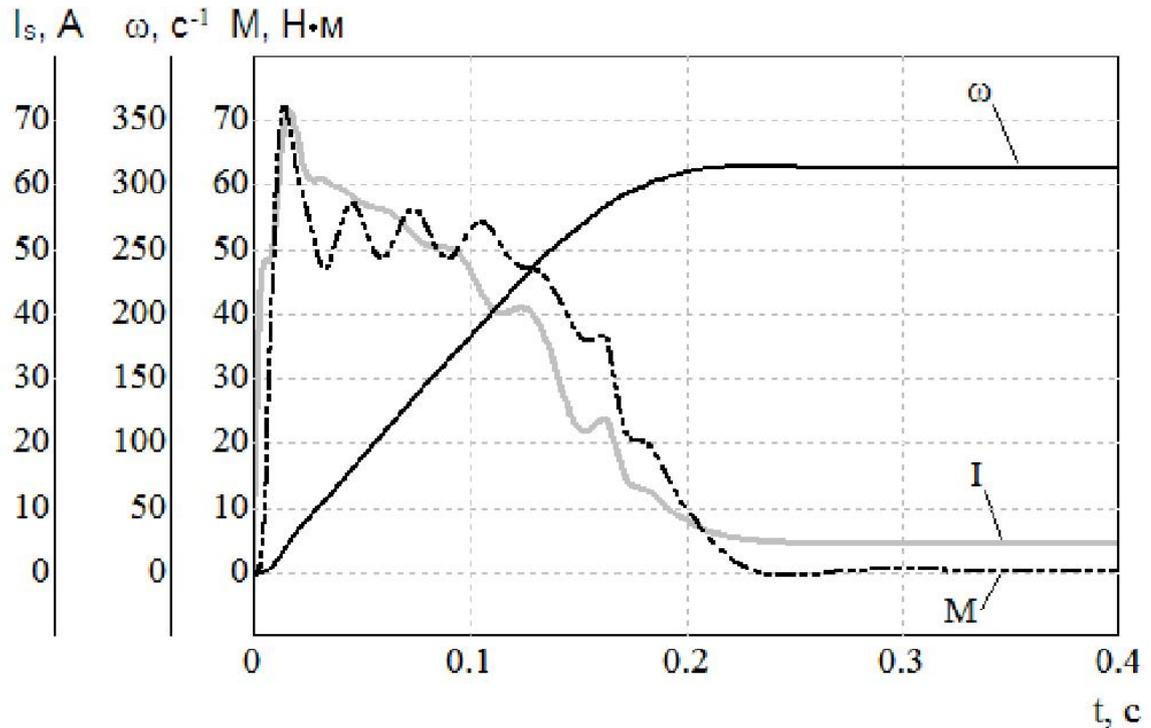


Рис. 3.4 – Графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске на холостом ходу ($M_{ст}=0,05M_{ном}$) с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{П}=2800$ мкФ

В данном случае емкостное сопротивление пусковых конденсаторов меньше пускового индуктивного сопротивления АД, по сравнению с прямым пуском (рис. 3.1) наблюдается увеличение пускового электромагнитного момента и пускового тока АД, однако, амплитуды их начальных колебаний снижены, сокращается время разгона АД до номинальной частоты вращения, двигатель пускается в режиме форсировки.

На рис. 3.5 представлены графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске на холостом ходу ($M_{ст}=0,05M_{ном}$) с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{П}=1080$ мкФ.

В данном случае емкостное сопротивление пусковых конденсаторов равно пусковому индуктивному сопротивлению АД: $X_{CП} \approx X_{АД}$, пусковой ток и пусковой момент АД имеют максимальное значение.

На рис. 3.6 представлены графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске на холостом ходу ($M_{ст}=0,05M_{ном}$) с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{П}=670$ мкФ.

При данном значении емкости конденсаторов их емкостное сопротивление

больше пускового индуктивного сопротивления АД, эквивалентное реактивное сопротивление АД равно эквивалентному реактивному сопротивлению АД при емкости пусковых конденсаторов в цепи статора $C_{II}=2800$ мкФ (рис. 3.4), но имеет емкостной характер.

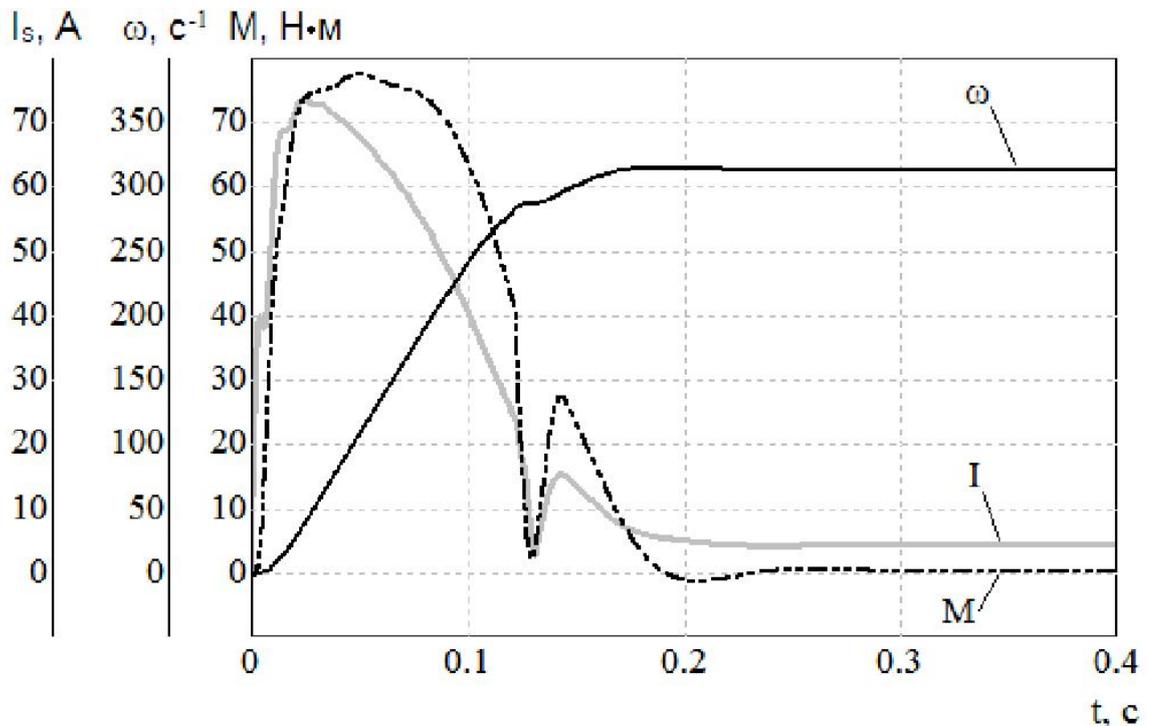


Рис. 3.5 – Графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске на холостом ходу ($M_{ст}=0,05M_{ном}$) с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{II}=1080$ мкФ

Сравнивая графики рис. 3.4 и рис. 3.6, можно заключить, что значения пускового тока и пускового момента в обоих случаях примерно одинаковы. Однако, при эквивалентном реактивном сопротивлении емкостного характера (рис. 3.6) отсутствуют начальные колебания электромагнитного момента, присутствующие при эквивалентном реактивном сопротивлении индуктивного характера (рис. 3.4). Объясняется данный результат тем, что благодаря улучшению коэффициента мощности цепи значения апериодических составляющих токов, а, следовательно, и ударных знакопеременных составляющих момента уменьшаются [104].

На рис. 3.7 представлены графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске на холостом ходу ($M_{ст}=0,05M_{ном}$) с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{II}=540$ мкФ.

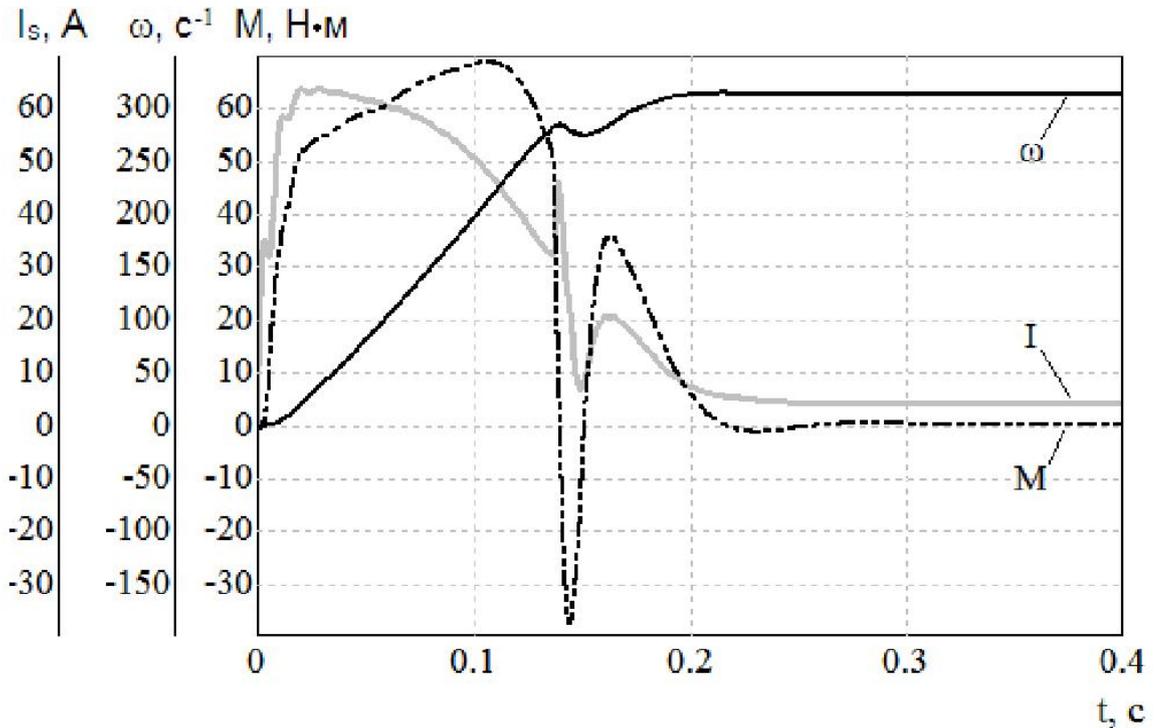


Рис. 3.6 – Графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске на холостом ходу ($M_{ст}=0,05M_{ном}$) с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{Г}=670$ мкФ

При данном значении емкости конденсаторов их емкостное сопротивление равно двукратному значению пускового индуктивного сопротивления АД: $X_C = 2 \cdot X_{АД}$, эквивалентное реактивное сопротивление АД равно эквивалентному реактивному сопротивлению АД при прямом пуске (рис. 3.1), но имеет емкостной характер. Значения пускового тока и пускового электромагнитного момента АД в данном случае равны значениям при прямом пуске, однако отсутствуют их начальные колебания.

Таким образом, графики рис. 3.4 – 3.7 подтверждают зависимости рис. 3.2: при увеличении добавочного емкостного сопротивления от 0 Ом до значения $X_C = 2 \cdot X_{АД}$ сначала происходит увеличение пускового тока и пускового момента (режим форсировки), максимумы которых будут при $X_C = X_{АД}$, а затем – снижение значений пускового тока и пускового момента до значений при прямом пуске.

Стоит отметить, что последовательное подключение конденсаторов в цепь статора АД позволяет уменьшить ударные значения тока на 15-20%, а момента на 30 – 40%.

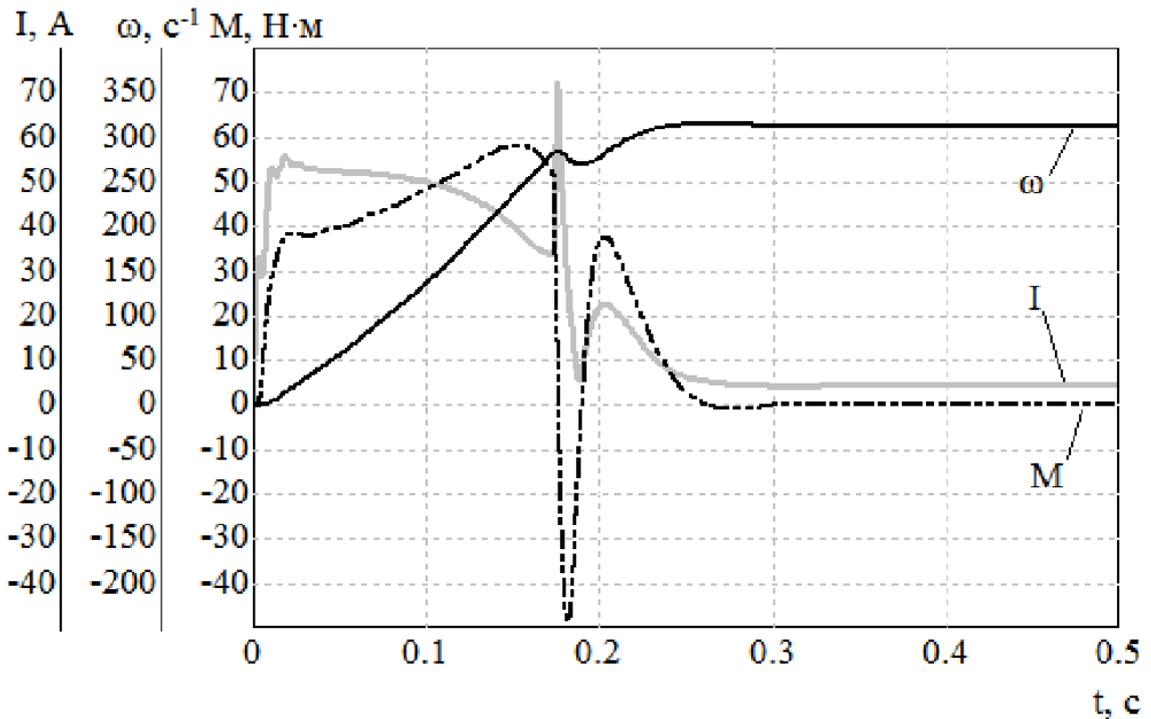


Рис. 3.7 – Графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске на холостом ходу ($M_{ст}=0,05M_{ном}$) с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{П}=540$ мкФ

Во всех случаях при достижении двигателем скорости, близкой к номинальной, необходимо шунтировать пусковую емкость, так как возможно развитие режима самовозбуждения АД, либо в рабочем режиме обмотки статора АД питаются повышенным напряжением.

В дальнейшем в данной работе проведены отдельные исследования форсированного конденсаторного пуска и конденсаторного пуска с ограничением пускового тока. Следующий параграф посвящен исследованию режима конденсаторного пуска АД с ограничением пускового тока, потребляемого электроприводом из сети.

3.3 Исследование плавного конденсаторного пуска АД

3.3.1 Исследование плавного конденсаторного пуска АД на холостом ходу

Как было сказано выше, для ограничения пускового тока и пускового электромагнитного момента АД емкостное сопротивление пусковых конденсаторов должно удовлетворять условию: $X_C > 2 \cdot X_{АД}$. В этом случае

напряжение, приложенное к статорным обмоткам, уменьшается на величину падения напряжения на сопротивлениях пусковых конденсаторов.

На рис. 3.8 представлены построенные на основе выражений (3.4) – (3.6) графики зависимостей пускового тока, пускового момента и пускового фазного напряжения АД Siemens 1LA7113-2AA60 от емкости пусковых конденсаторов в цепи статора при значениях C_{II} от 10 до 540 мкФ. Анализируя графики, можно заключить, что с уменьшением емкости пусковых конденсаторов снижается начальное напряжение, приложенное к обмоткам статора АД во время пуска, а вместе с ним снижаются пусковой ток и пусковой момент.

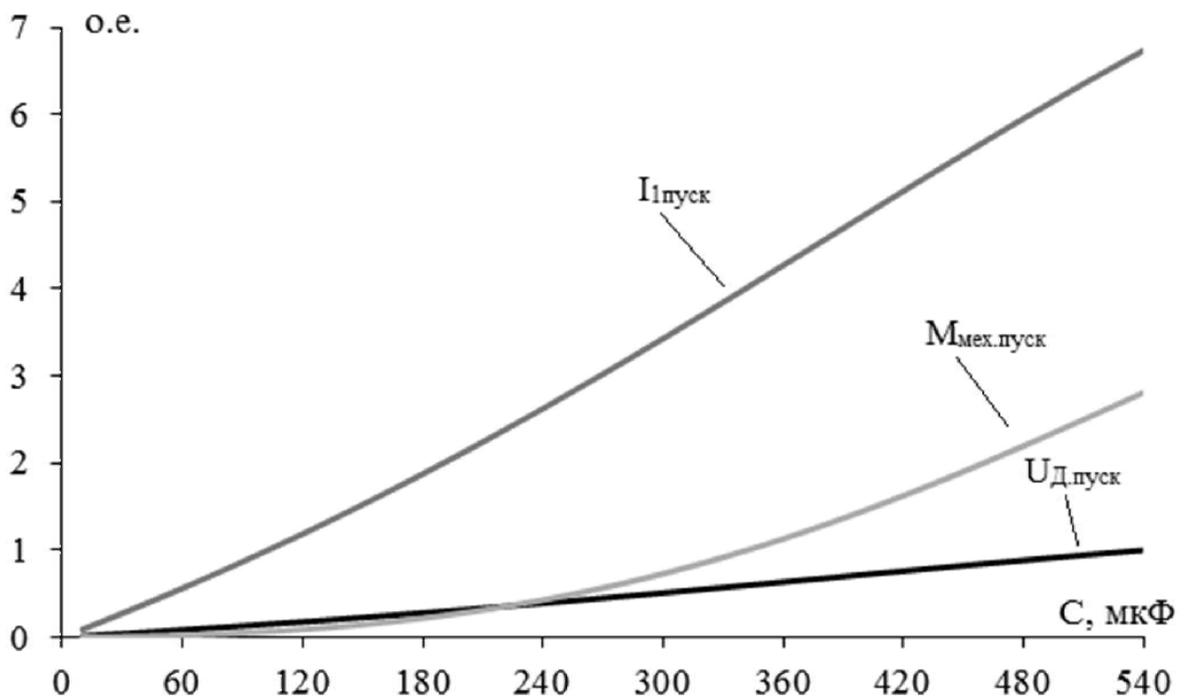


Рис. 3.8 – Зависимости пускового тока, пускового момента и пускового фазного напряжения АД от емкости пусковых конденсаторов

На рис. 3.9 представлены графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента при моделировании пуска АД на холостом ходу ($M_{ст}=0,05M_{ном}$) с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{II}=280$ мкФ. По графикам видно, что введение пусковой емкости $C_{II}=280$ мкФ позволило ограничить пусковой ток на уровне $3I_{ном}$, при этом пусковой момент по сравнению с прямым пуском снизился в 4,5 раза, а время разгона увеличилось вдвое.

По графику зависимости пускового тока от емкости пусковых конденсаторов (рис. 3.8) видно, что существует возможность пуска АД с ограничением пускового тока номинальным значением.

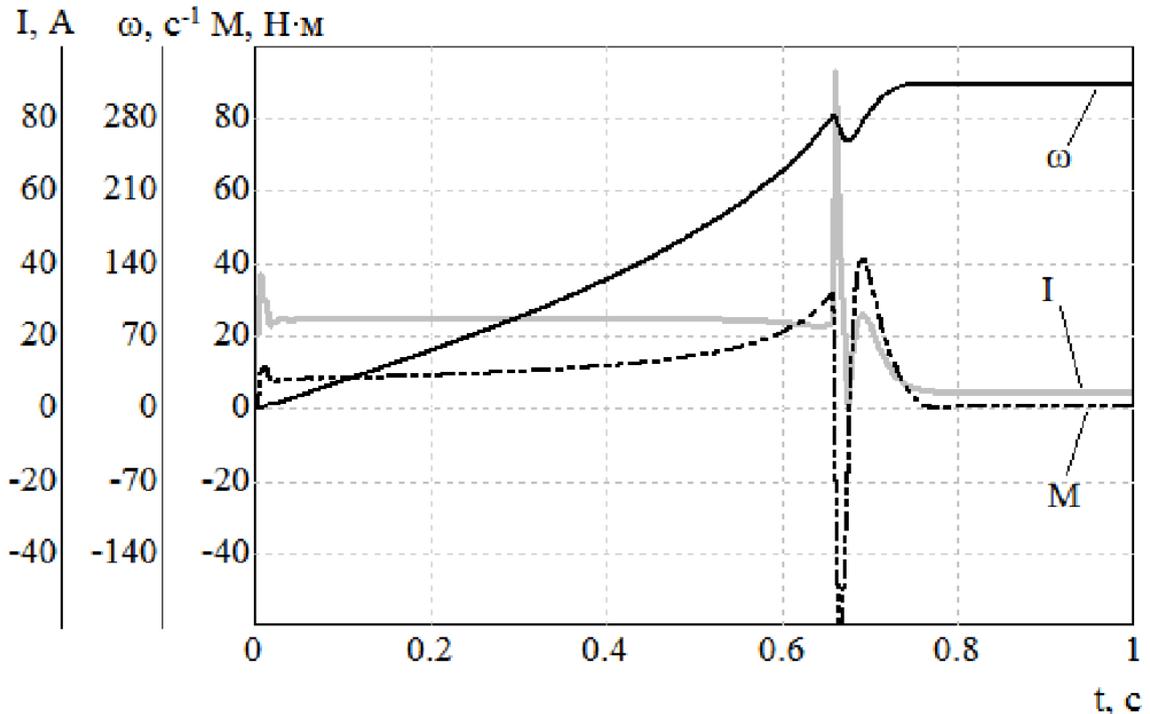


Рис. 3.9 – Графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске с $M_{ст}=0,05M_{ном}$ и $C_{П}=280$ мкФ (переключение при близкой к номинальной скорости)

На рис. 3.10 представлены результаты моделирования такого пуска, значение пусковой емкости конденсаторов $C_{П}=105$ мкФ. Как видно по графикам пусковой момент, развиваемый АД, достаточен лишь для пуска двигателя на холостом ходу.

Таким образом, моделирование конденсаторного пуска АД на холостом ходу подтверждает возможность ограничения пускового тока АД, при этом с уменьшением пускового тока снижается и пусковой момент АД. Так как лишь небольшая часть асинхронных приводов пускается на холостом ходу, то возникает необходимость анализа возможности конденсаторного пуска АД с различным характером нагрузки на его валу.

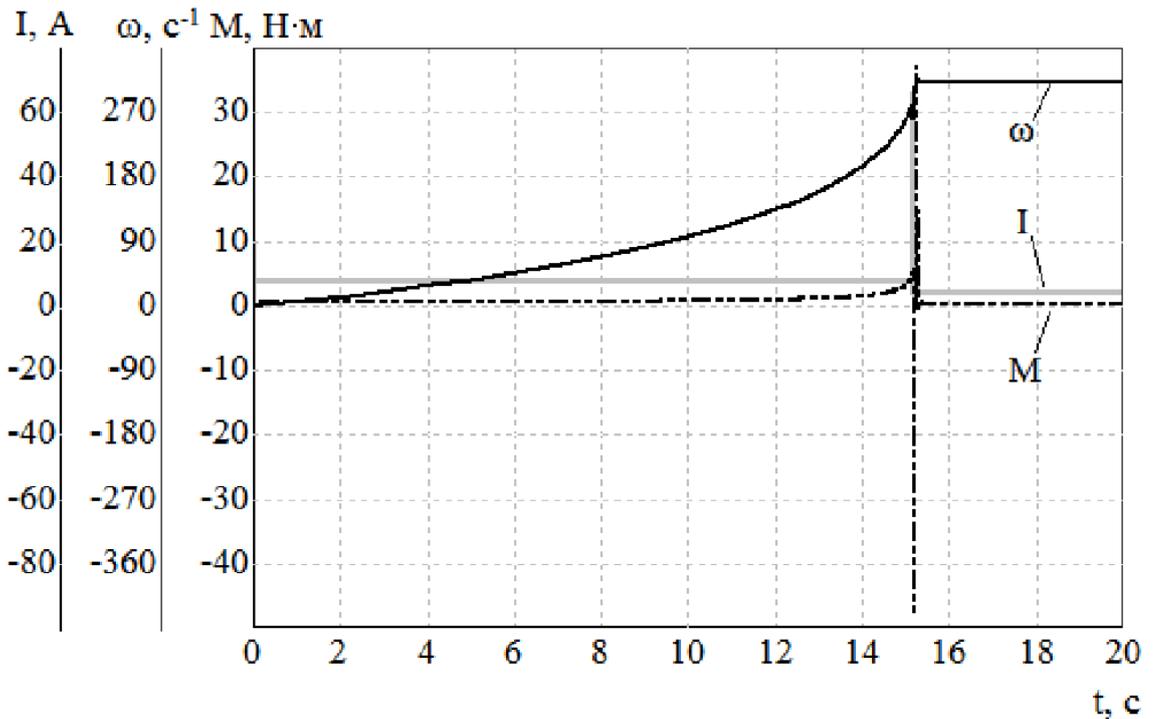


Рис. 3.10 – Графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске с $M_{ст}=0,05M_{ном}$ и $C_{П}=105$ мкФ (переключение при близкой к номинальной скорости)

3.3.2 Исследование плавного конденсаторного пуска АД с нагрузкой на валу

Пуск АД с подключенными в цепь статора последовательными конденсаторами с целью ограничения пускового тока фактически в начальный момент времени является пуском АД при пониженном напряжении. Так как пусковой момент АД пропорционален квадрату приложенного напряжения, то вместе со снижением прикладываемого к обмоткам статора АД напряжения значительно снижается и его пусковой момент.

Как было сказано в главе 2, при исследовании конденсаторного плавного пуска АД с нагрузкой на валу момент сопротивления изменяется по закону (2.44), т.е. нагрузка имеет «вентиляторный» характер. Целесообразность применения конденсаторного плавного пуска АД для механизмов с вентиляторной нагрузкой подтверждается также графиками зависимостей пускового тока, пускового момента и пускового фазного напряжения АД Siemens 1LA7113-2AA60 от емкости пусковых конденсаторов в цепи статора (рис. 3.8). Анализируя эти графики можно сделать вывод, что конденсаторный пуск с

ограничением пускового тока имеет смысл применять в электроприводах механизмов, начальный момент сопротивления которых составляет 30 – 50% номинального момента двигателя. Ярким примером таких механизмов как раз и являются механизмы, преодолевающие сопротивление воздуха, газа или жидкости (вентиляторы, центрифуги, дымососы, судовые гребные винты, центробежные насосы, турбовоздуходувки и т.п.).

При исследовании конденсаторного пуска АД с вентиляторной нагрузкой на валу в качестве нагрузки использовано рабочее колесо вентилятора «Центримастер» GTLB-1-040 фирмы Лада-Флект, который имеет следующие характеристики [101]:

- номинальная производительность по воздуху: $Q_v = 8500 \text{ м}^3/\text{час}$
- номинальная частота вращения рабочего колеса: $n_{\text{ном}} = 2905 \text{ об/мин}$
- момент инерции рабочего колеса: $J = 0,24 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
- потребляемая мощность привода рабочего колеса: $P = 3,7 \text{ кВт}$
- КПД вентилятора: $\eta = 81\%$

С учетом (2.44) момент сопротивления рабочего колеса изменяется по закону вида:

$$M_c = 0,61 + 0,004 \cdot n^2. \quad (3.8)$$

Для адекватного анализа конденсаторного пуска АД с вентиляторной нагрузкой на валу промоделирован сначала прямой пуск АД с эквивалентной нагрузкой (Рис. 3.11). Как видно из графиков, электродвигатель выходит на рабочий режим через 3 секунды, при этом пусковой ток $I_{\text{п}}=56\text{А}$, а пусковой момент колеблется в достаточно широких пределах: от -10 до 85 Н·м.

Выполнено моделирование конденсаторного пуска АД с вентиляторной нагрузкой на валу с пусковой емкостью конденсаторов $C_{\text{п}}=280 \text{ мкФ}$ (Рис. 3.12). По графикам видно, что при данной емкости конденсаторов пусковой ток $I_{\text{п}}=25\text{А}$, т.е. подключение в каждую фазу конденсаторов емкостью 280 мкФ позволило ограничить пусковой ток 3-х кратным значением номинального тока. Стоит отметить, что во время пуска АД развивает пониженный пусковой момент (30% от пускового момента при прямом пуске), однако его достаточно, чтобы

стронуть рабочее колесо с места и обеспечить его дальнейшее ускорение. Также стоит отметить отсутствие колебаний электромагнитного момента по сравнению с прямым пуском.

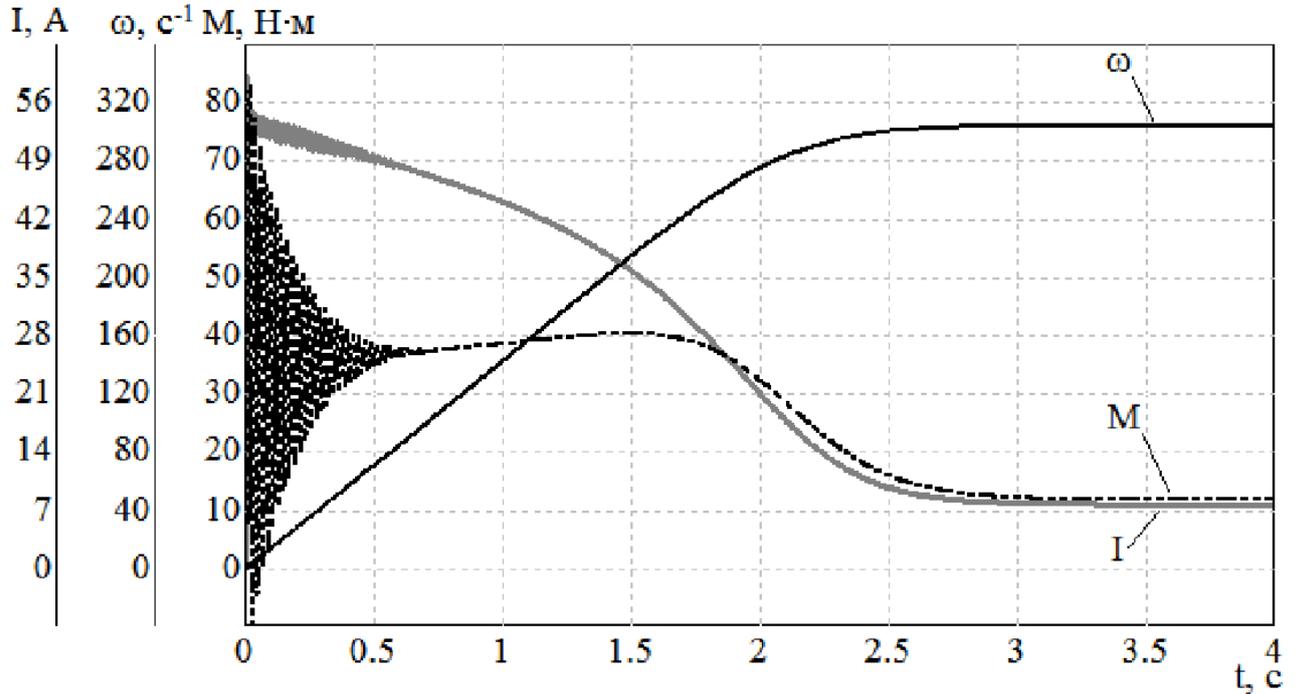


Рис. 3.11 – Графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при прямом пуске с вентиляторной нагрузкой на валу ($J = 0,24 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$)

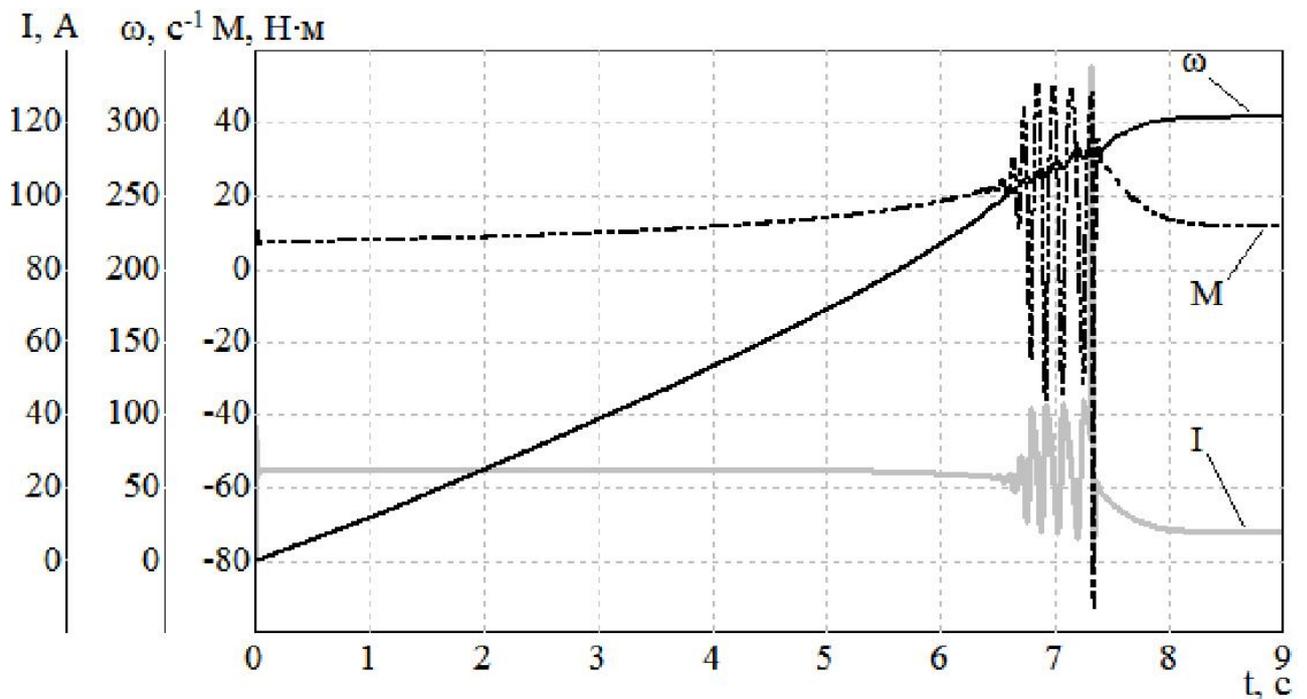


Рис. 3.12 – Графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске с вентиляторной нагрузкой на валу ($J = 0,24 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{IT}=280 \text{ мкФ}$ (переключение при близкой к номинальной скорости)

По графикам рис. 3.12 видно, что на скорости АД, равной 80% от синхронной, начинает развиваться процесс самораскачивания, сопровождающийся значительными колебаниями тока и электромагнитного момента, в 2 раза превышающие амплитуды колебаний при прямом пуске, а также напряжения, приложенного к статорным обмоткам АД (рис. 3.13).

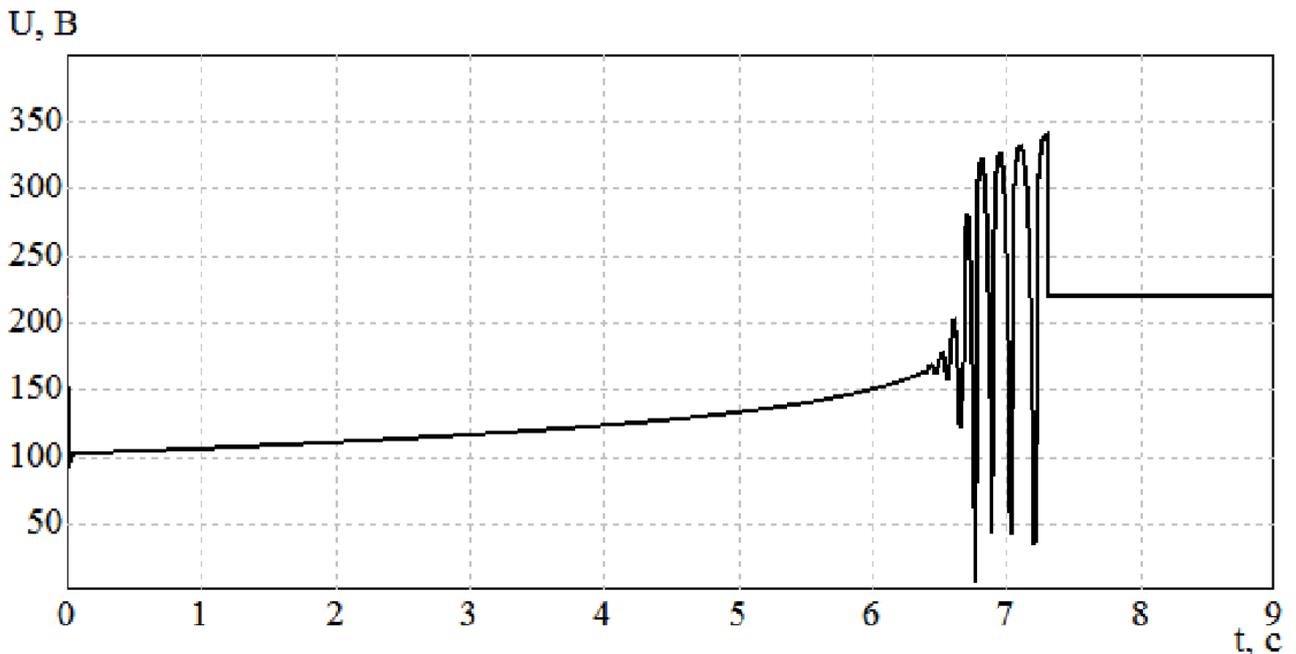


Рис. 3.13 – Фазное напряжение АД при пуске с вентиляторной нагрузкой на валу ($J = 0,24 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{II}=280 \text{ мкФ}$ (переключение при близкой к номинальной скорости)

Для исключения этого негативного режима возникает необходимость отключать конденсаторы и подключать АД напрямую в сеть, когда амплитуда колебаний напряжения на статорных обмотках электродвигателя достигает уровня номинального значения (рис. 3.14).

По рис. 3.14 видно, что скорость АД при переключении достигает лишь 80% от синхронной частоты, поэтому подключение АД напрямую в сеть также вызывает броски тока и электромагнитного момента, однако амплитуда их колебаний на 40-50% ниже, чем при переключении на скорости, близкой к номинальной (рис. 3.12).

На рисунке 3.15 представлены графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске с вентиляторной нагрузкой на валу с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{II}=200 \text{ мкФ}$.

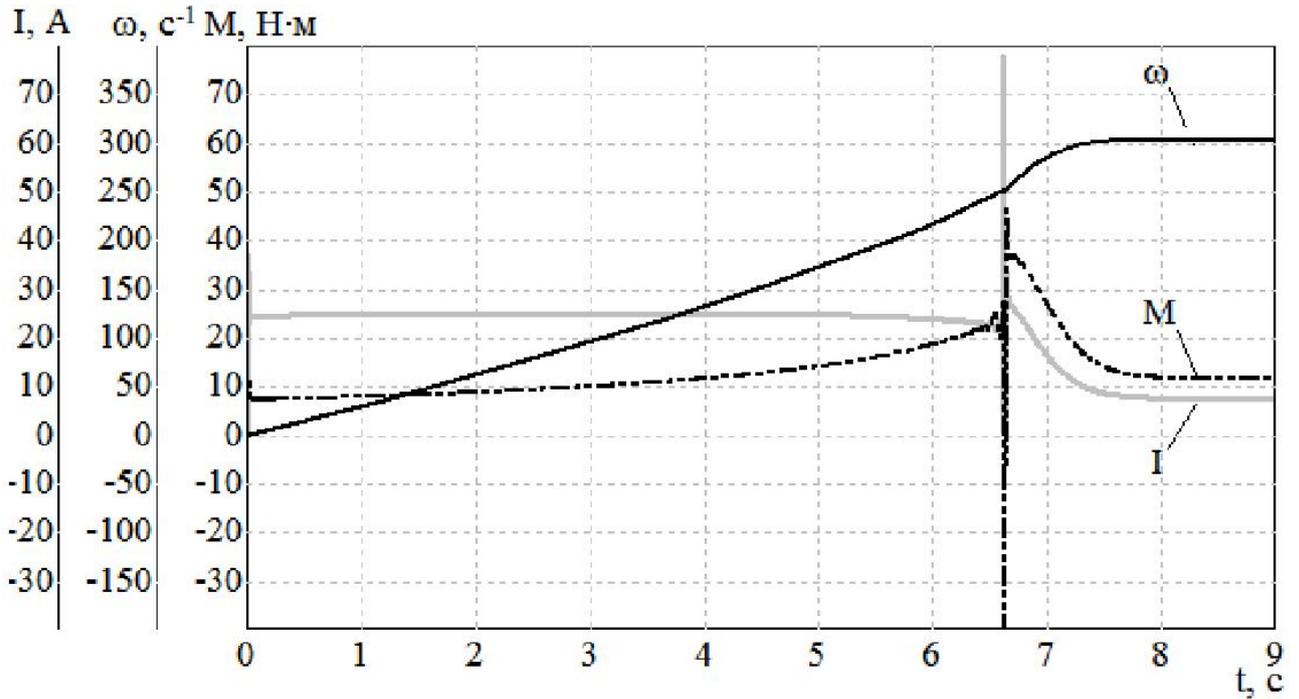


Рис. 3.14 – Графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске с вентиляторной нагрузкой на валу ($J = 0,24 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{IT}=280 \text{ мкФ}$ (переключение при достижении напряжением номинального значения)

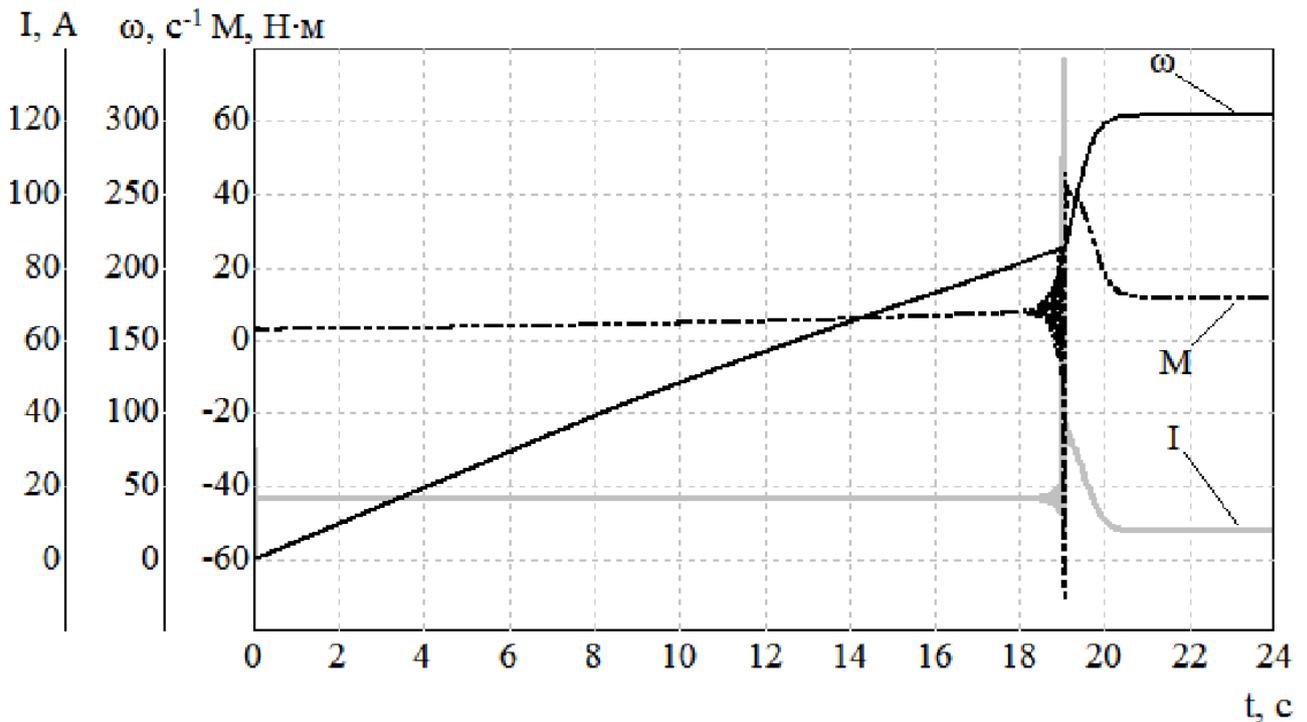


Рис. 3.15 – Графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске с вентиляторной нагрузкой на валу ($J = 0,24 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{IT}=200 \text{ мкФ}$ (переключение при достижении напряжением номинального значения)

При данном значении пусковой емкости значительно увеличилось время разгона, которое равно 20 секундам, самовозбуждение начинает развиваться

раньше. Амплитуда колебаний напряжения, прикладываемого к статорным обмоткам АД, достигает уровня номинального значения в момент времени, когда ротор электродвигателя вращается с частотой равной 70% синхронной частоты. По этой причине переключение АД напрямую в сеть вызывает увеличение амплитуды бросков тока и момента по сравнению с пуском двигателя с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{IT}=280$ мкФ (рис. 3.14) на 50-60%.

Моделирование конденсаторного пуска АД с вентиляторной нагрузкой на валу, имеющей значительный момент инерции, с различной емкостью пусковых конденсаторов (Рис. 3.14 – 3.15) показывает, что во время разгона возникают низкочастотные колебания напряжения, подводимого к обмоткам статора, амплитуда которых успевает возрасти до номинального значения $U_{\phi}=220$ В до того, как АД наберет скорость, близкую к номинальной (рис. 3.16, рис. 3.17).

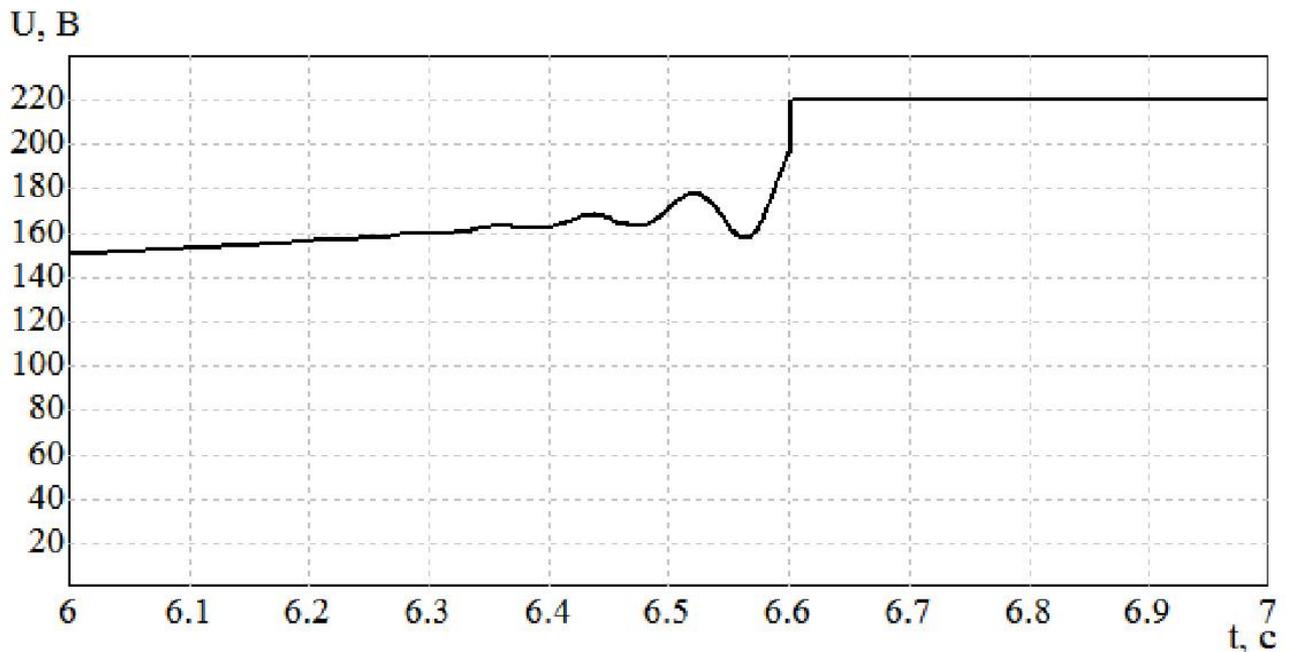


Рис. 3.16 – Фазное напряжение АД при пуске с вентиляторной нагрузкой на валу ($J = 0,24$ кг · м²) с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{IT}=280$ мкФ (переключение при достижении напряжением номинального значения)

Если при этом не шунтировать конденсаторы, то напряжение на обмотках статора АД превысит номинальное значение. Также вместе с колебаниями напряжения возникают колебания тока статора и электромагнитного момента. Однако, моделирование конденсаторного пуска на холостом ходу (рис. 3.9, рис. 3.10) показало, что при достаточном ускорении АД колебаний напряжения

не возникает.

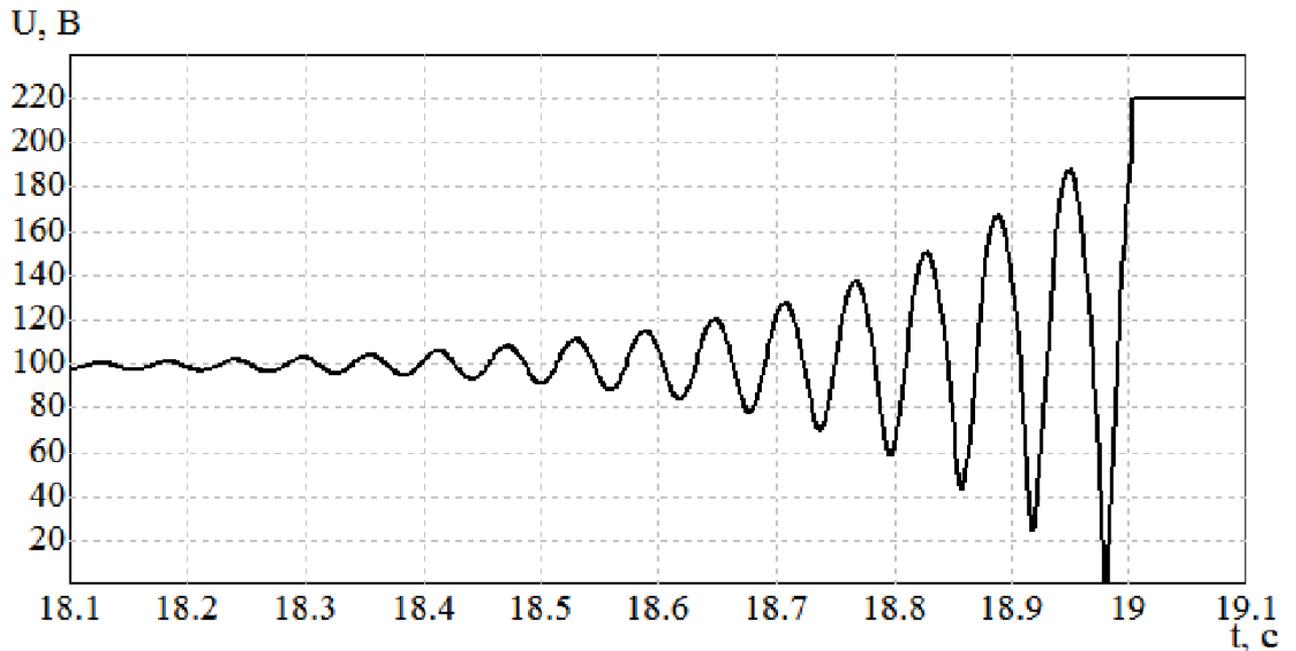


Рис. 3.17 – Фазное напряжение АД при пуске с вентиляторной нагрузкой на валу ($J = 0,24 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{IT}=200 \text{ мкФ}$ (переключение при достижении напряжением номинального значения)

Из уравнения движения привода известно, что ускорение АД обратно пропорционально моменту инерции привода [16, 27, 30, 82, 104]:

$$M - M_C = \frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.9)$$

где ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с; J – момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя; p – число пар полюсов двигателя; M_C – статический момент нагрузки.

Из формулы (3.9) следует, что чем меньше значение момента инерции привода, тем большее значение ускорения будет иметь АД при разгоне.

С целью оценки влияния момента инерции на развитие этих колебаний проведены исследования конденсаторного пуска АД с вентиляторной нагрузкой на валу, имеющей меньший момент инерции.

Для этого в качестве нагрузки использовано рабочее колесо вентилятора «Центримастер» GTLF-1-025 фирмы Лада-Флект, которое имеет следующие характеристики [101]:

– номинальная производительность по воздуху: $Q_v = 2400 \text{ м}^3/\text{час}$ при

потребляемой мощности привода рабочего колеса $P = 4$ кВт

- номинальная частота вращения рабочего колеса: $n_{\text{ном}} = 2905$ об/мин
- момент инерции рабочего колеса: $J = 0,03$ кг · м²
- потребляемая мощность привода рабочего колеса: $P = 3,5$ кВт
- КПД вентилятора: $\eta = 61\%$

С учетом (2.44) момент сопротивления рабочего колеса изменяется по закону вида:

$$M_c = 0,58 + 0,0038 \cdot n^2. \quad (3.10)$$

На рисунке 3.18 представлены графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске с вентиляторной нагрузкой на валу с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{II}=280$ мкФ. Как видно из графиков, при нагрузке с меньшим моментом инерции самовозбуждение при разгоне не развивается.

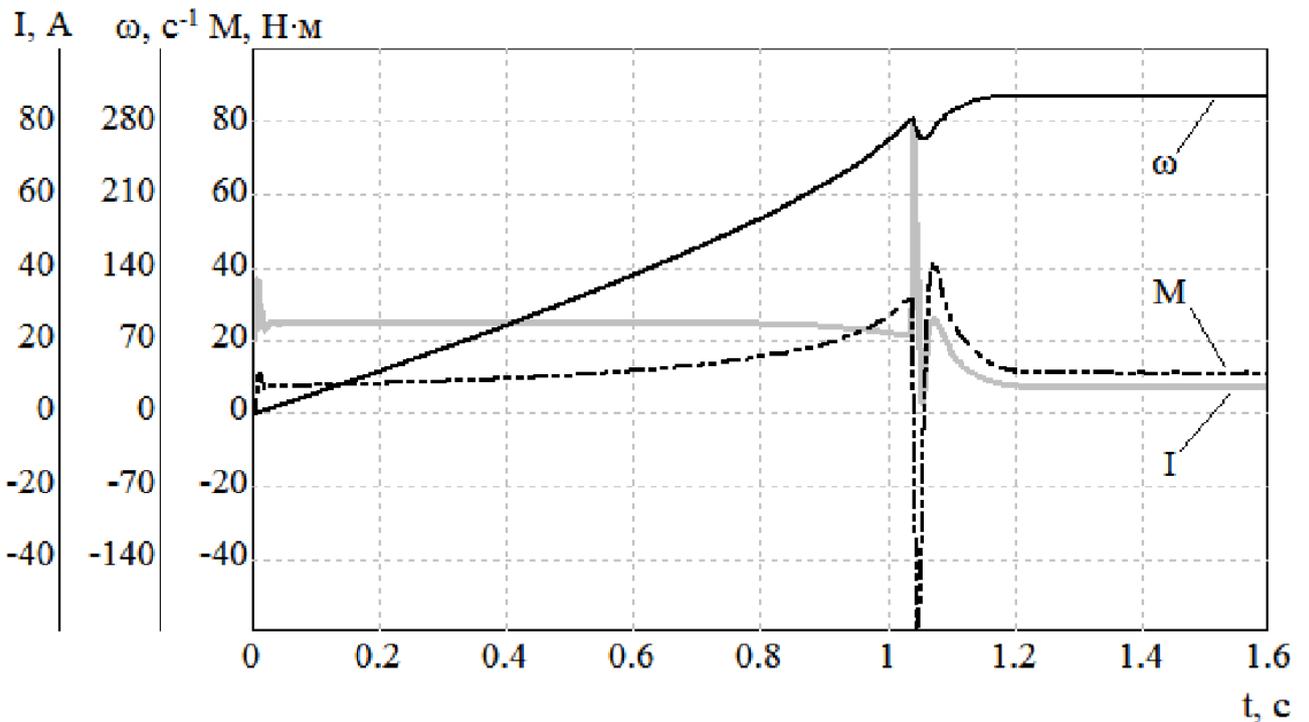


Рис. 3.18 – Графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске с вентиляторной нагрузкой ($J = 0,03$ кг · м²) и $C_{II}=280$ мкФ (переключение при номинальной скорости)

Рисунок 3.19 иллюстрирует графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске с вентиляторной нагрузкой на валу с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{II}=200$ мкФ.

Сравнивая данные графики с графиками, изображенными на рис. 3.15, также видно, что самовозбуждение при разгоне АД не развивается.

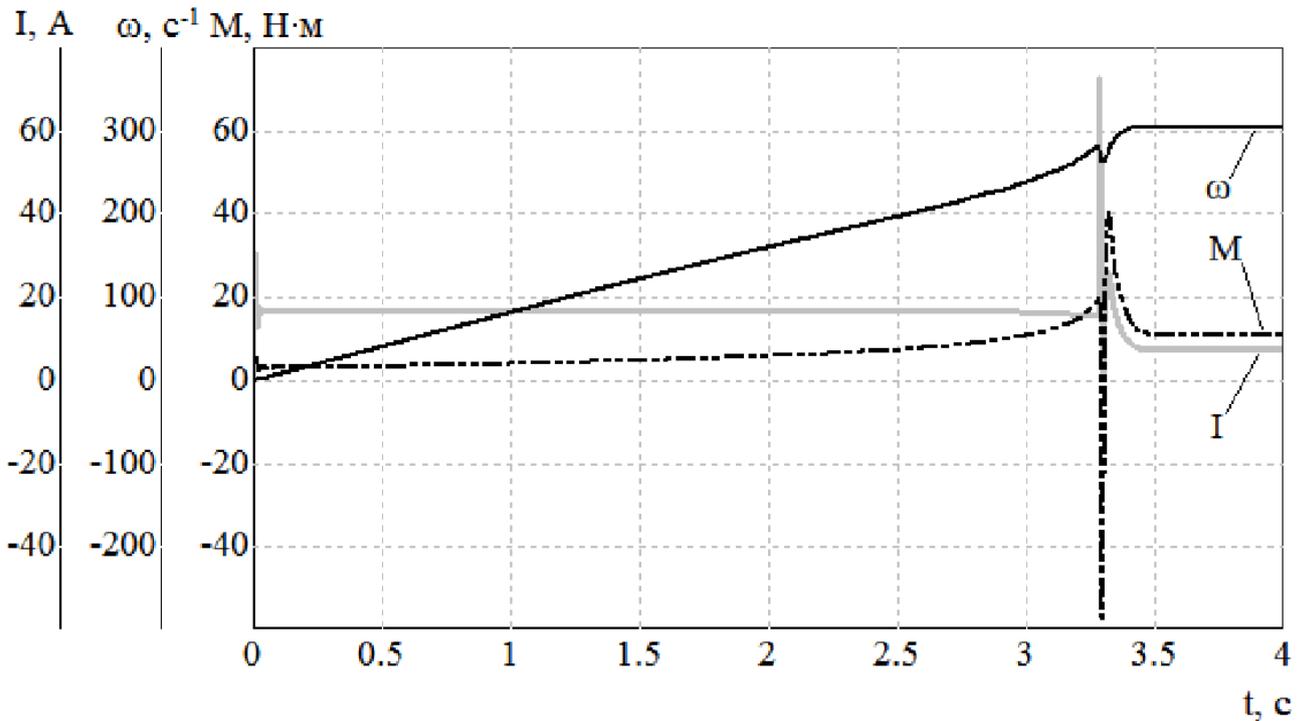


Рис. 3.19 – Графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске с вентиляторной нагрузкой на валу ($J = 0,03 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) и $C_{IT}=200 \text{ мкФ}$ (переключение при достижении напряжением номинального значения)

Таким образом, при конденсаторном пуске с ограничением пускового тока АД с вентиляторной нагрузкой на валу необходим учет не только условия развития достаточного электромагнитного момента, превышающего момент сопротивления нагрузки, но также и величины момента инерции приводного механизма.

3.4 Исследование форсированного конденсаторного пуска АД

В настоящем параграфе рассмотрены следующие вопросы:

- выявление возможности устойчивой работы АД без шунтирования конденсаторов в цепи статора после форсированного конденсаторного пуска электродвигателя;

- исследование влияния величины добавочного активного сопротивления при неизменном значении емкости конденсаторов на процесс разгона АД;

– исследование форсированного режима конденсаторного пуска АД без добавочных активных сопротивлений с шунтированием конденсаторов после разгона.

В качестве нагрузки принят момент сопротивления, изменяющийся по закону (2.46). Окончательно момент сопротивления нагрузки изменяется по следующему закону:

$$M_c = \left(0,05 + 0,95 \cdot \left(\frac{n}{950} \right)^{-1} \right) \cdot 13. \quad (3.11)$$

Момент инерции нагрузки принят равным $J_c = 15J_d$.

3.4.1 Исследование устойчивой работы АД без шунтирования пусковых конденсаторов

Как было сказано ранее, форсированный режим конденсаторного пуска будет иметь место, если соотношение между емкостным сопротивлением пусковых конденсаторов и пусковым индуктивным сопротивлением АД удовлетворяет условию: $X_C < 2 \cdot X_{АД}$. Так, на рис. 3.20 представлены графики изменения во времени тока статора, электромагнитного момента и частоты вращения ротора исследуемого АД при форсированном конденсаторном пуске с емкостью пусковых конденсаторов $C = 10000 \text{ мкФ}$.

По графикам видно, что при разгоне АД проходит область самораскачивания, однако ее верхняя граница при данной емкости находится ниже номинальной скорости электродвигателя. Стоит отметить, что при увеличении момента инерции нагрузки более чем в 3 раза самораскачивание практически не проявляется.

На рис. 3.21 представлены графики изменения во времени тока статора, электромагнитного момента и частоты вращения ротора АД при форсированном пуске с последовательно включенными в цепь статора статическими конденсаторами, емкости которых равны 600, 1000 и 5000 мкФ, без шунтирования их в конце разгона.

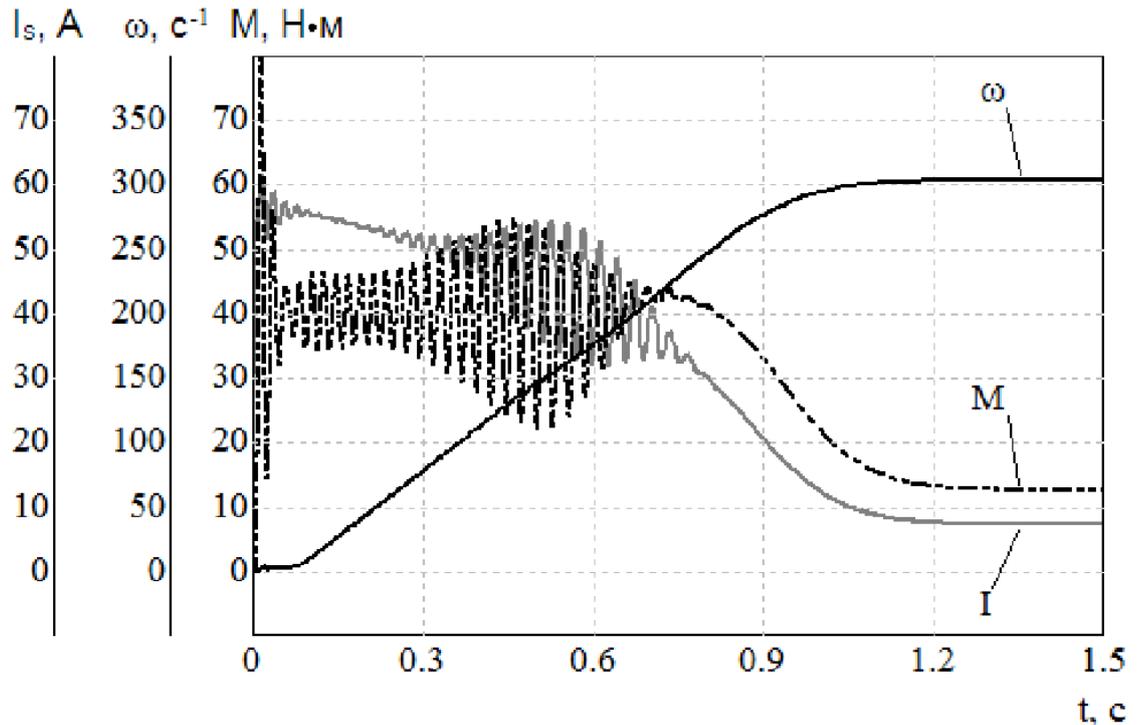


Рис. 3.20 – Графики изменения тока, электромагнитного момента и частоты вращения ротора АД при форсированном пуске без шунтирования конденсаторов ($C=10000$ мкФ)

Анализируя графики рис. 3.20 и рис. 3.21 следует отметить следующее:

– Устойчивая работа АД без шунтирования конденсаторов по окончании разгона возможна при включении в цепь статора емкостных сопротивлений, не превышающих 10–15% пускового индуктивного сопротивления АД. При больших емкостных сопротивлениях работа АД неустойчива и, достигнув некоторой частоты вращения, возникают явления самовозбуждения и самораскачивания, при этом АД «застревает» на пониженной частоте вращения ротора. Необходимо отметить, что на процесс самовозбуждения значительное влияние оказывает величина момента инерции: чем ниже момент инерции электропривода, тем ниже вероятность возникновения самовозбуждения.

– Чем больше величина подключенного емкостного сопротивления, тем выше частота вращения ротора и амплитуда ее колебаний в процессе самовозбуждения.

В [12, 30, 94, 98] отмечается, что введение добавочных сопротивлений в цепь статора АД позволяет расширить диапазон последовательно подключаемых в цепь статора емкостных сопротивлений, при которых удастся получить устойчивые режимы работы АД. С целью исследования влияния величины

подключенного активного сопротивления при неизменном значении емкостного сопротивления проведено моделирование форсированного пуска АД с активно-емкостными сопротивлениями в цепи статора, результаты которого представлены на рис. 3.22.

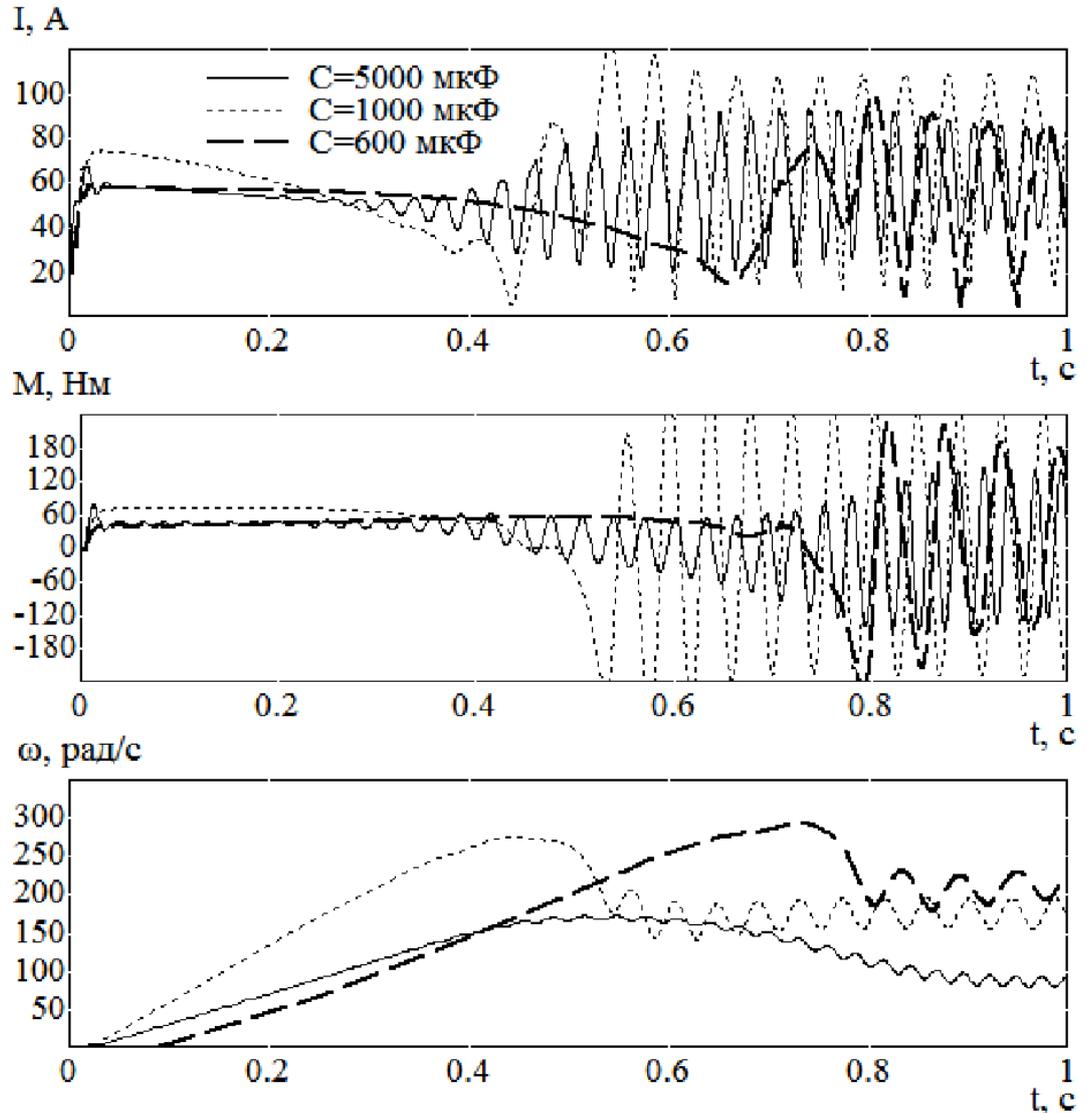


Рис. 3.21 – Результаты моделирования форсированного пуска АД без шунтирования конденсаторов

По графикам рис. 3.22 видно, что с увеличением значения активного сопротивления снижаются колебания тока статора и электромагнитного момента, вследствие чего АД быстрее проходит область самораскачивания. Таким образом, активные сопротивления служат своего рода ограничителями колебаний тока, а, следовательно, и электромагнитного момента, что положительно влияет на динамику разгона АД.

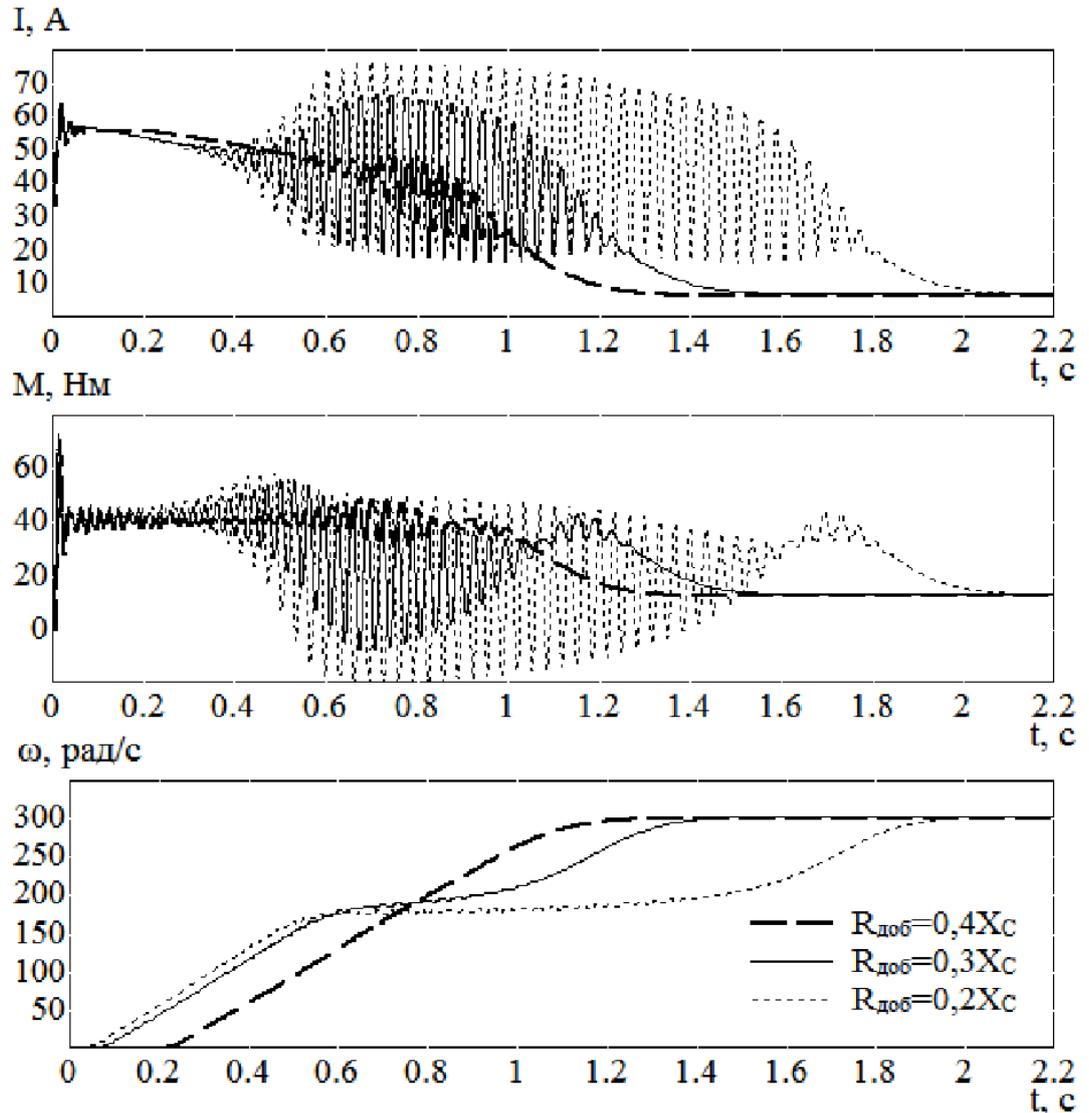


Рис. 3.22 – Графики изменения токов статора, электромагнитного момента и частоты вращения ротора АД при форсированном пуске с активно-емкостными сопротивлениями в цепи статора без шунтирования конденсаторов ($C=5000$ мкФ)

Однако, дальнейшие исследования в этом направлении выявили, что устойчивые режимы работы АД без шунтирования пусковых сопротивлений в рабочем режиме возможны лишь в слишком узких диапазонах емкостного и активного сопротивлений. Так, при увеличении подключаемого к обмоткам статора значения емкостного сопротивления для сохранения достаточного пускового электромагнитного момента АД необходимо снижать значение добавочного активного сопротивления.

Следует иметь в виду, что подключение активных сопротивлений в цепь статора вызывает дополнительные электрические потери, величина которых с увеличением мощности электропривода только увеличивается.

Отдельно стоит отметить, что при значениях емкостных сопротивлений, подключаемых к обмоткам АД, больших значения пускового индуктивного сопротивления АД ($X_C > X_{АД}$), устойчивая работа АД без шунтирования конденсаторов невозможна, так как с увеличением частоты вращения ротора индуктивное сопротивление АД также увеличивается и на некоторой частоте вращения при равенстве индуктивного сопротивления АД емкостному сопротивлению пусковых конденсаторов возникает резонанс напряжений и дальнейшее самовозбуждение АД.

Таким образом, более рациональным является форсированный конденсаторный пуск без использования добавочных активных сопротивлений в цепи статора, но с обязательным шунтированием конденсаторов на ранней стадии возникновения нежелательных явлений самовозбуждения и самораскачивания. Такой подход позволяет максимально увеличить пусковой момент АД (на 50-70% по сравнению с прямым пуском) благодаря полной компенсации индуктивного сопротивления.

3.4.2 Исследование форсированного конденсаторного пуска АД без добавочных активных сопротивлений с шунтированием конденсаторов после разгона

Так как для пуска мощных двигателей более эффективно применять последовательное включение с обмотками статора конденсаторов, часть которых после пуска переключаются параллельно сети, обеспечивая компенсацию реактивной мощности АД в рабочем режиме, то для форсированного режима конденсаторного пуска предлагается пуско-компенсирующее устройство (ПКУ), схема которого представлена на рис. 3.23 [30].

Для пуска электродвигателя M включается трехфазный выключатель QF , контакты $KM2$ находятся в положении, изображенном на рисунке 3.23, контакты $KM1$ разомкнуты, конденсаторы $C1$ и $C2$ при этом оказываются включенными параллельными парами последовательно со статорными обмотками L . Эквивалентная емкость конденсаторов $C_{экв} = C1 + C2$ подобрана таким образом,

что напряжение, приложенное к статорным обмоткам L , повышается на величину падения напряжения на конденсаторах, что в свою очередь увеличивает пусковой ток и момент АД.

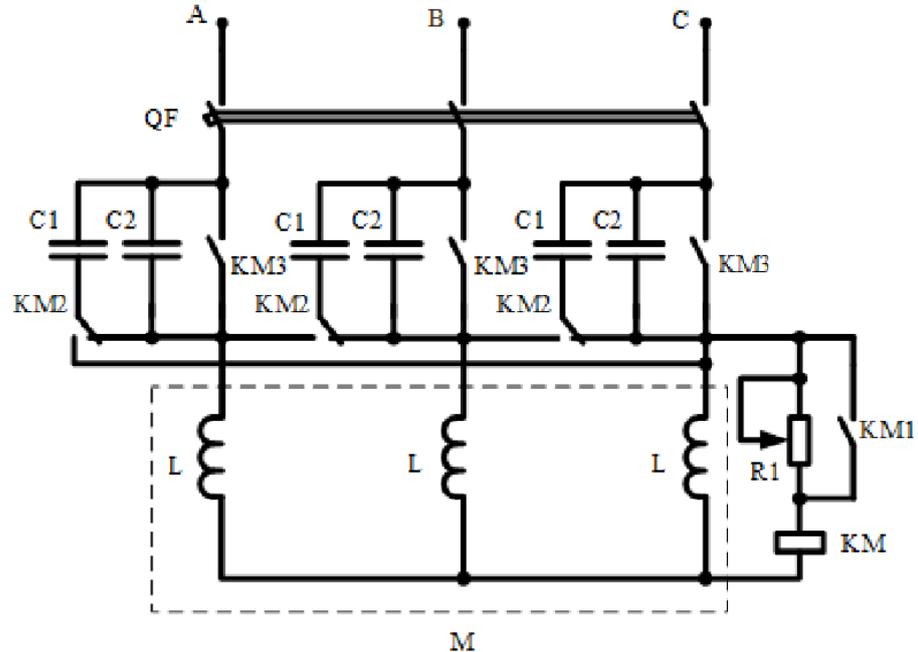


Рис. 3.23 – Схема принципиальная пуско-компенсирующего устройства

По мере увеличения частоты вращения двигателя M , увеличивается индуктивное сопротивление АД, а ток снижается. При возникновении явлений самовозбуждения и самораскачивания возникают колебания тока статора двигателя, а вместе с ним и напряжения на статорных обмотках, и при достижении амплитуды колебаний определенного порогового значения происходит срабатывание катушки KM магнитного пускателя. В результате этого посредством контакта $KM1$ шунтируется резистор $R1$, что увеличивает напряжение на катушке KM до номинального и обеспечивает надежное срабатывание магнитного пускателя. Кроме того, замыкание контакта $KM1$ исключает потери на резисторе $R1$ в рабочем режиме. Одновременно переключаются контакты $KM2$ и замыкаются контакты $KM3$ магнитного пускателя, конденсаторы $C1$ при этом включаются параллельно статорным обмоткам L двигателя M , обеспечивая компенсацию реактивной мощности АД в рабочем режиме, а конденсаторы $C2$ шунтируются.

На рис. 3.4, 3.5 и 3.6 были представлены результаты моделирования форсированного конденсаторного пуска АД на холостом ходу с пусковыми конденсаторами, емкость которых равна 2800мкФ, 1050мкФ и 670мкФ соответственно. Значения выбраны такими, что при 2800мкФ и 670мкФ пусковые значения тока и электромагнитного момента АД одинаковы, отличается только характер потребляемого системой ПКУ-АД тока. Для таких же значений емкостей пусковых конденсаторов на рис. 3.24, 3.25 и 3.26 представлены результаты моделирования форсированного конденсаторного пуска АД с переключением на сетевое напряжение по схеме ПКУ, представленной на рис. 3.23, с нагрузкой на валу, изменяющейся по закону (3.11).

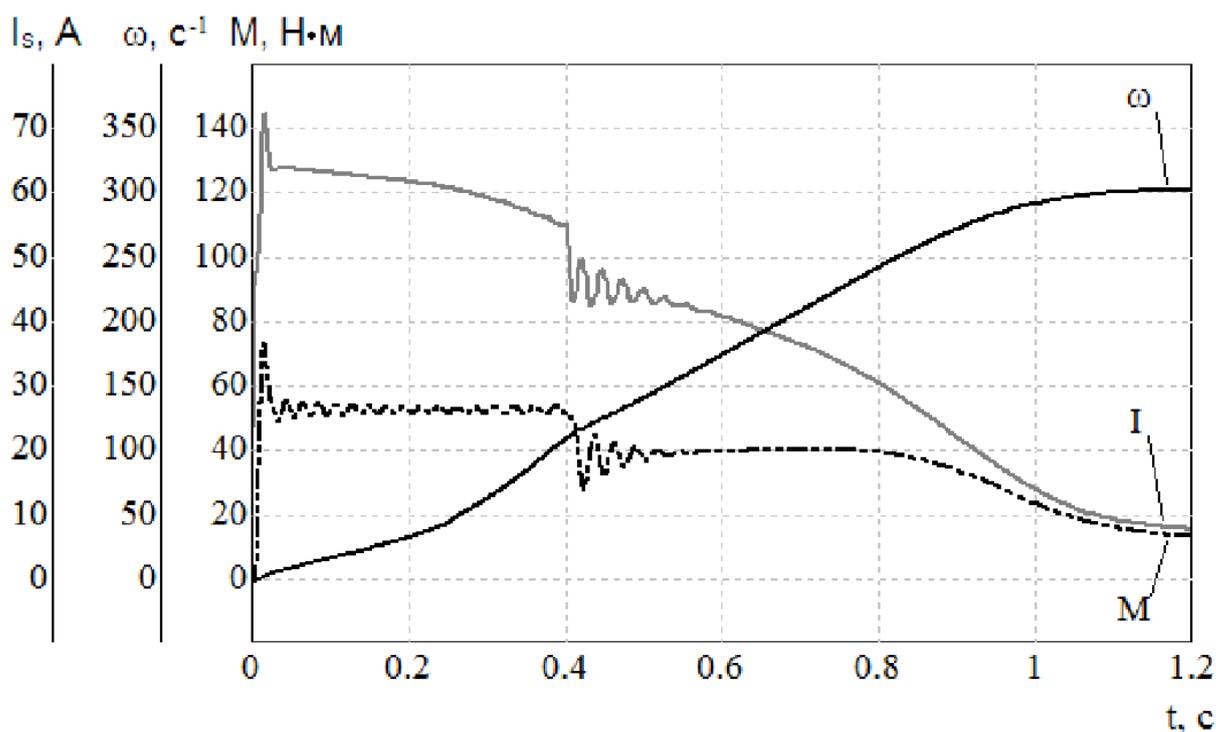


Рис. 3.24 – Графики изменения тока, электромагнитного момента и частоты вращения ротора АД при форсированном пуске ($C=2800$ мкФ) и переключением на сетевое напряжение при $n=1000$ об/мин

Стоит указать, что при моделировании условием шунтирования пусковых конденсаторов выбрано условие достижения ротором АД частоты вращения, равной 1000 об/мин, по достижении которой принято, что момент сопротивления механизма снизился до номинального значения электромагнитного момента АД.

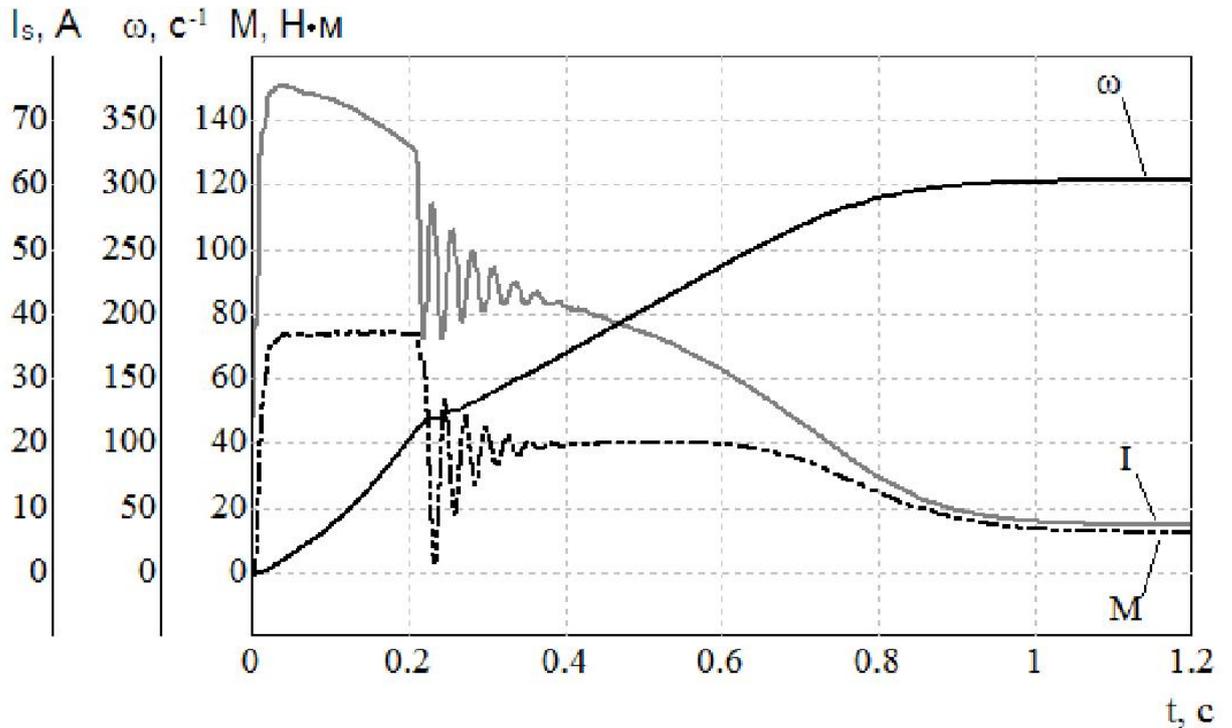


Рис. 3.25 – Графики изменения тока, электромагнитного момента и частоты вращения ротора АД при форсированном пуске ($C=1050 \mu\text{F}$) и переключением на сетевое напряжение при $n=1000$ об/мин

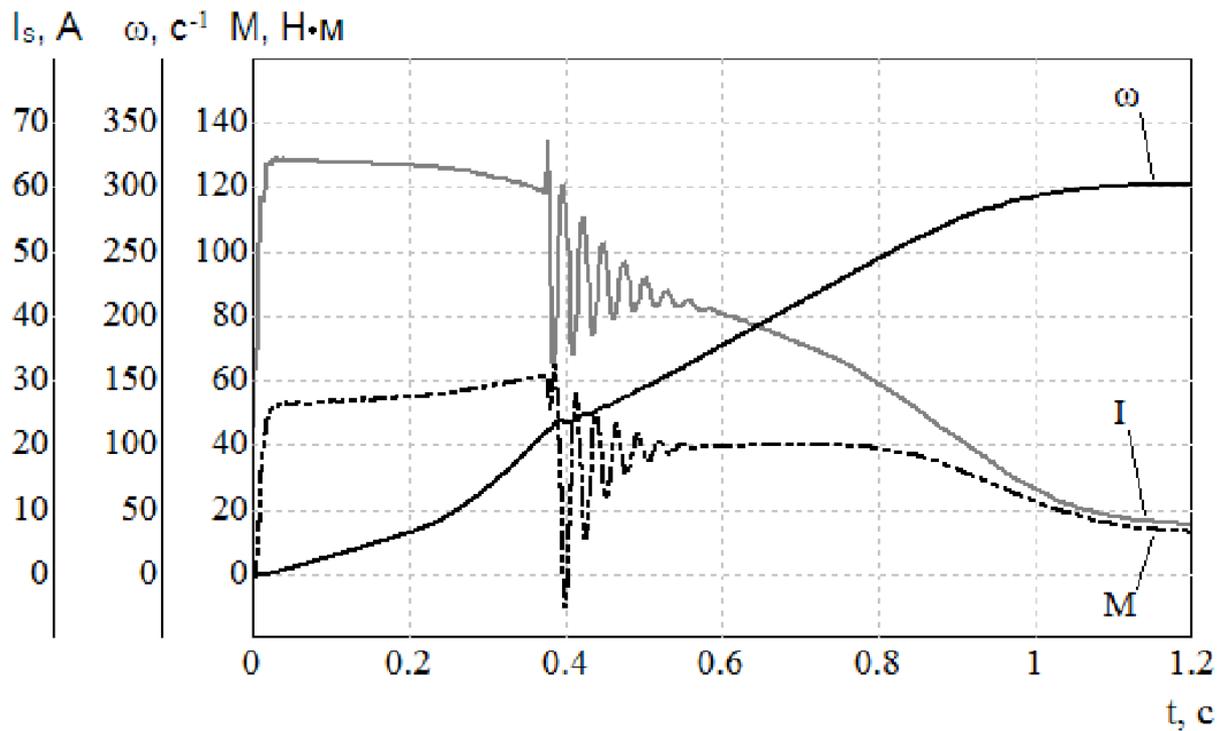


Рис. 3.26 – Графики изменения тока, электромагнитного момента и частоты вращения ротора АД при форсированном пуске ($C=670 \mu\text{F}$) и переключением на сетевое напряжение при $n=1000$ об/мин

По графикам, представленным на рис. 3.24 – 3.26, видно, что при форсированном конденсаторном пуске с переключением АД на сетевое напряжение с нагрузкой на валу при активно-индуктивном характере тока

($X_C < X_{AD}$) не возникает нежелательных переходных процессов, сопровождающихся возникновением тормозного момента на валу АД и скачков тока статора, ток и электромагнитный момент при переключении снижаются до значений, равных значениям при питании обмоток статора электродвигателя номинальным напряжением (рис. 3.24). Связано это с тем, что в момент переключения к обмоткам статора приложено напряжение, действующее значение которого выше действующего значения напряжения сети. При активно-емкостном характере потребляемого тока ($X_C > X_{AD}$) при переключении возникают значительные колебания электромагнитного момента и тока статора (рис. 3.25). С увеличением подключенного емкостного сопротивления колебания электромагнитного момента и тока статора увеличиваются, а также возникает тормозной электромагнитный момент и бросок тока статора (рис. 3.26).

Анализируя графики, представленные на рис. 3.24 – 3.26, также можно сделать вывод, что при активно-индуктивном характере тока ($X_C < X_{AD}$) электромагнитный момент АД максимален в самом начале пуска и по мере разгона снижается незначительно, а при активно-емкостном характере тока ($X_C > X_{AD}$) электромагнитный момент АД увеличивается по мере разгона электродвигателя. Объясняется это тем, что при $X_C < X_{AD}$ полное сопротивление цепи минимально в начальный момент пуска, по мере разгона АД при увеличении индуктивного сопротивления электродвигателя полное сопротивление цепи увеличивается. При $X_C > X_{AD}$ полное сопротивление цепи по мере разгона АД сначала снижается до минимального значения при $X_C = X_{AD}$, а при дальнейшем увеличении индуктивного сопротивления АД полное сопротивление начинает увеличиваться. С изменением сопротивления цепи изменяется значение и характер потребляемого системой ПКУ - АД тока, а, следовательно, изменяется падение напряжения на пусковых конденсаторах, что влечет за собой изменение напряжения, прикладываемого к обмоткам статора АД. Выше сказанное подтверждается результатами моделирования изменения фазного напряжения статора АД при форсированном конденсаторном пуске

электродвигателя с пусковыми конденсаторами различной емкости. Графики фазных напряжений статора представлены на рис. 3.27.

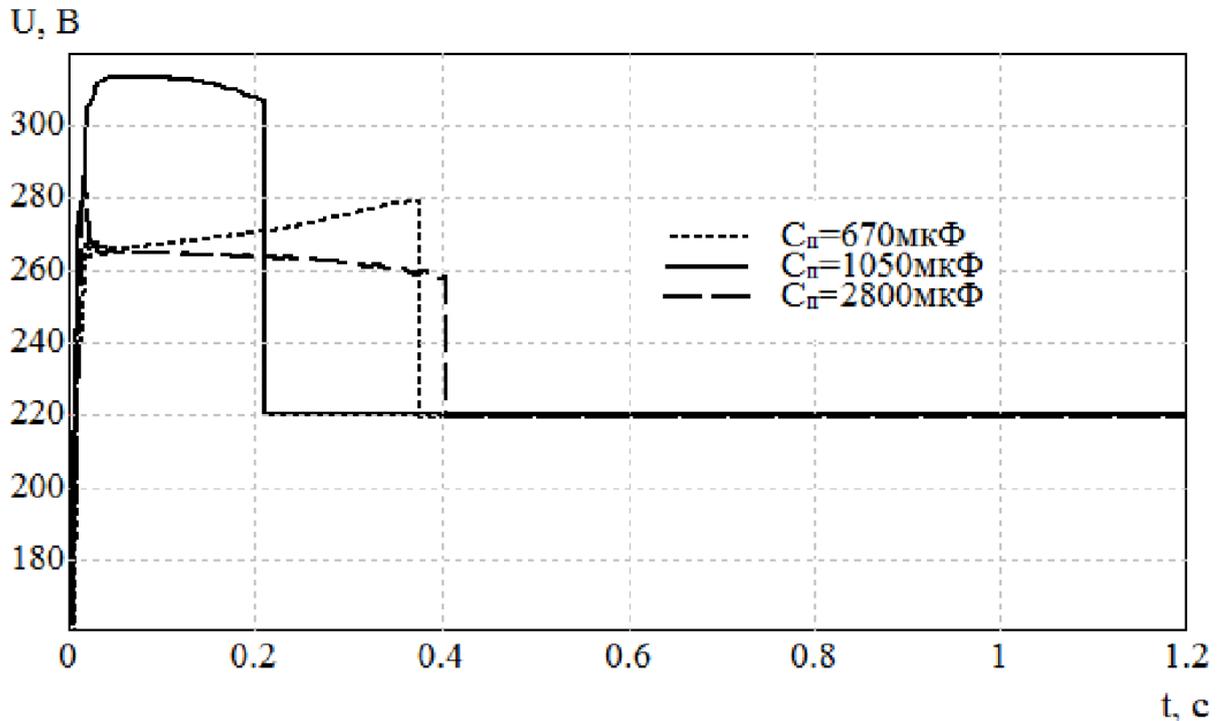


Рис. 3.27 - Фазное напряжение АД при форсированном конденсаторном пуске с пусковыми конденсаторами различной емкости

Таким образом, при одинаковых значениях полного сопротивления цепи при $X_C > X_{\text{АД}}$ за счет повышения в процессе разгона приложенного к статорным обмоткам напряжения ток спадает медленнее и процесс разгона проходит на 10 - 20% более динамично, чем при $X_C < X_{\text{АД}}$, а за счет полной компенсации индуктивного сопротивления отсутствуют колебания тока и электромагнитного момента АД. Более того, для условия $X_C > X_{\text{АД}}$ необходимы конденсаторы меньшей емкости, что с экономической стороны более выгодно. Однако, недостатком является наличие значительных колебаний тока и электромагнитного момента, возникающих при шунтировании конденсаторов, что относится и к случаю плавного конденсаторного пуска АД, актуальным является уменьшение влияния, либо полное исключение возникновения этих негативных процессов. Поэтому для решения этой задачи необходимы дальнейшие исследования переходных процессов при переключении ПКУ с пускового режима на рабочий режим.

Выводы

1. Последовательное подключение конденсаторов в цепь статора АД позволяет уменьшить ударные значения тока на 15-20%, а момента на 30 – 40%.
2. С целью форсирования пуска при конденсаторном способе пуска АД суммарное реактивное сопротивление цепи должно быть ниже индуктивного сопротивления АД, т.е. емкостное сопротивление конденсаторов должно удовлетворять условию: $X_C < 2 \cdot X_{АД}$. Для ограничения пускового тока двигателя при конденсаторном способе пуска емкостное сопротивление конденсаторов должно удовлетворять условию $X_C > 2 \cdot X_{АД}$.
3. При конденсаторном пуске АД существует возможность ограничения тока электродвигателя номинальным значением.
4. Так как ограничение тока при конденсаторном пуске происходит за счет повышенного суммарного сопротивления цепи, и, следовательно, питания статора АД пониженным напряжением, то снижается перегрузочная способность АД при пуске. Поэтому данный режим конденсаторного пуска рекомендуется использовать при пуске механизмов, имеющих нагрузку «вентиляторного» характера.
5. Устойчивая работа АД без шунтирования конденсаторов по окончании разгона и при отсутствии добавочных сопротивлений ($R=0$) возможна при включении в цепь статора емкостных сопротивлений, не превышающих 10–15% пускового индуктивного сопротивления двигателя.
6. Введение в цепь статора АД добавочных активных сопротивлений позволяет повысить степень компенсации реактивной составляющей тока, потребляемого двигателем из сети. Однако, выбор значений активных сопротивлений в каждом случае слишком ограничен и требует учета множества факторов, например, таких как момент инерции нагрузки, колебания напряжения сети.
7. При значениях емкостных сопротивлений, подключаемых к обмоткам АД, больших значения пускового индуктивного сопротивления АД, устойчивая

работа АД без шунтирования конденсаторов невозможна, так как на определенной частоте вращения ротора возникает резонанс напряжений и дальнейшее самовозбуждение АД.

8. При форсированном конденсаторном пуске с переключением АД на сетевое напряжение с нагрузкой на валу при активно-индуктивном характере тока не возникает нежелательных переходных процессов, сопровождающихся возникновением тормозного момента на валу АД и скачков тока статора.

9. При одинаковых значениях полного сопротивления цепи при $X_C > X_{АД}$ за счет повышения в процессе разгона приложенного к статорным обмоткам напряжения ток спадает медленнее и процесс разгона проходит на 10-20% динамичнее, чем при $X_C < X_{АД}$.

10. Для условия $X_C > X_{АД}$ недостатком является наличие значительных колебаний тока и электромагнитного момента АД, возникающих при шунтировании конденсаторов в конце пуска. Для снижения влияния этих негативных переходных процессов необходимо исследование переходных процессов при переключении ПКУ с пускового режима на рабочий режим.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ СИСТЕМЫ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ – КОНДЕНСАТОРНОЕ ПУСКО-КОМПЕНСИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО

В предыдущей главе отмечалось, что при значениях емкостного сопротивления в цепи статора при конденсаторном пуске, удовлетворяющих условию $X_C > X_{АД}$, т.е. при активно-емкостном характере потребляемого системой ПКУ-АД тока, в момент переключения АД на сетевое напряжение развиваются переходные процессы, сопровождающиеся значительными колебаниями электромагнитного момента и тока статора. По мере увеличения значений емкостного сопротивления до $X_C > 2 \cdot X_{АД}$ броски тока увеличиваются, а колебания момента на валу электродвигателя приобретают тормозной характер.

Основной причиной возникновения этих переходных процессов является несовпадение по фазе вектора ЭДС статора АД с вектором напряжения сети в момент подключения АД к сети.

Обеспечить совпадение векторов напряжения сети и ЭДС статора АД возможно, если перед подключением двигателя к сети выдержать бестоковую паузу. В этом случае сначала АД отключается от конденсаторов, происходит торможение выбегом и после выдержки времени двигатель подключается на сетевое напряжение [5, 10, 12, 34, 96].

Такой способ подключения АД к сети, когда подключение происходит с выдержкой бестоковой паузы, фактически является быстрым повторным включением АД. При этом возникают те же составляющие электромагнитного момента, что и в пусковом режиме, но амплитуды его колебаний, а, следовательно, и максимальный пик электромагнитного момента, могут превысить значения кратностей ударного пускового момента (в некоторых случаях вдвое и более). Значения токов при повторном включении также могут значительно превысить величину тока при пуске из неподвижного состояния.

В свою очередь переключение конденсаторов с пускового режима на режим компенсации реактивной мощности приводит к возникновению нежелательных

перенапряжений и бросков тока.

Настоящая глава посвящена исследованиям переходных процессов подключения АД после бестоковой паузы на сетевое напряжение, а также переключения пусковых конденсаторов с пускового режима на режим компенсации реактивной мощности. Целью исследований является снижение негативного влияния, либо полное исключение возникновения рассмотренных переходных процессов. Рассмотрены следующие вопросы:

- определение благоприятного момента подключения АД на сетевое напряжение после выдержки бестоковой паузы;
- исследование переходных процессов подключения АД на сетевое напряжение с помощью тиристорных коммутаторов;
- определение благоприятного момента времени для отключения АД от конденсаторов в конечной стадии разгона;
- исследование переходных процессов при переключении пусковых конденсаторов на режим компенсации реактивной мощности.

Результатом проведенных исследований является новое схемотехническое решение для конденсаторного ПКУ, защищенное патентом РФ на изобретение, обеспечивающее соотношение 1:4 между пусковым и компенсирующим емкостными сопротивлениями, что позволяет наиболее полно использовать конденсаторы, исключая перекомпенсацию в режиме компенсации реактивной мощности, а для подключения АД к сети и коммутации конденсаторов в благоприятные моменты времени схема дополнена тиристорными коммутаторами.

Исследования переходных процессов проводились путем их моделирования на основе электропривода с АД марки Siemens 1LA7113-2AA60 и вентиляторной нагрузкой на валу.

Параметры АД Siemens 1LA7113-2AA60: $P_n=4 \text{ кВт}$, $n_n=2905 \text{ об/мин}$, $R_1=1,57 \text{ Ом}$, $L_1=0,0061 \text{ Гн}$, $R'_2=1,02 \text{ Ом}$, $L_2=0,0084 \text{ Гн}$, $L_m=0,25 \text{ Гн}$, $J_d=0,0055 \text{ кг/м}^2$. Пусковые свойства АД: $M_{II}=2,6M_{ном}$, $M_{кр.}=2,9M_{ном}$, $I_{II}=7,2I_{ном}$, где $M_{ном}=13 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $I_{ном}=7,8 \text{ А}$.

4.1 Исследование переходных процессов подключения АД на сетевое напряжение

Возникновение колебаний электромагнитного момента, а вместе с ними и бросков тока при подключении АД на сетевое напряжение можно объяснить тем, что потокосцепление, а значит ЭДС, наведенная на зажимах статора, за время бестоковой паузы не успевает затухнуть. Вместе с этим частота ЭДС уменьшается в соответствии со снижением скорости ротора, и напряжение на зажимах статора может иметь любой фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ по отношению к вновь подведенному напряжению, и, помимо переходных процессов пускового режима, происходит короткое замыкание через источник напряжения [92].

На рис. 4.1 изображен график изменения фазового сдвига $\Delta\varphi$ между вектором напряжения непосредственно на зажимах статора АД и обобщенным вектором напряжения сети при моделировании конденсаторного пуска АД и последующего его выбега.

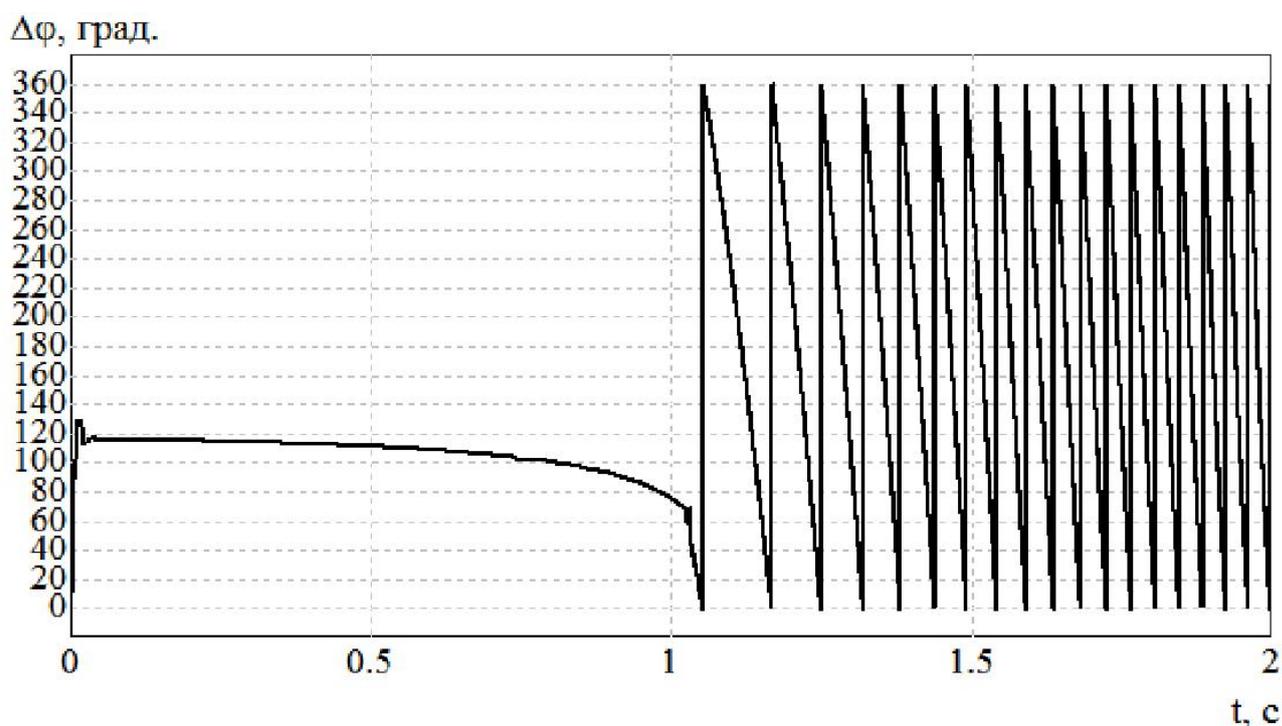


Рис. 4.1 – График изменения фазового сдвига между вектором напряжения на зажимах статора и обобщенным вектором напряжения сети при выбеге АД Siemens 1LA7113-2AA60 после конденсаторного пуска

По графику рис. 4.1 видно, что при конденсаторном пуске по мере увеличения приложенного к статорным обмоткам напряжения фазовый сдвиг $\Delta\varphi$

снижается, так как по мере разгона АД уменьшается падение напряжения на конденсаторах, а вместе с этим и влияние конденсаторов на фазовый сдвиг $\Delta\varphi$. Также график подтверждает вышесказанное о том, что при выбеге АД фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ изменяется, наблюдаются многократные совпадения и расхождения векторов, изменение фазового сдвига между ними $\Delta\varphi$ происходит тем быстрее, чем ниже скорость АД.

Наиболее благоприятным моментом подключения выбегающего АД на сетевое напряжение является момент, когда вектор ЭДС \bar{E}_s , наведенной на зажимах статора АД, равен обобщенному вектору напряжения сети \bar{u}_s :

$$\bar{E}_s = \bar{u}_s. \quad (4.1)$$

Характер протекания переходного процесса при подключении выбегающего АД на сетевое напряжение однозначно зависит в момент включения от начального значения модуля вектора $|\bar{E}_s|$, его углового положения относительно вектора \bar{u}_s и скорости ротора ω_r . Наиболее существенное влияние в количественном и качественном отношении на переходный процесс оказывает мгновенное положение вектора ЭДС статора относительно обобщенного вектора напряжения сети. Чем меньше в момент включения фазовый сдвиг между этими векторами, тем меньше изменение магнитного потока АД и, следовательно, меньше переходные составляющие момента [95]. Тогда условием выбора наиболее благоприятного момента времени для подключения АД после выбега на сетевое напряжение является равенство нулю фазового сдвига между вектором ЭДС и обобщенным вектором напряжения сети:

$$\Delta\varphi = 0. \quad (4.2)$$

На рис. 4.2 и 4.3 представлены графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при моделировании конденсаторного пуска с вентиляторной нагрузкой на валу, имеющей момент инерции $J = 0,24 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и $J = 0,03 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{II}=280 \text{ мкФ}$ и выдержкой бестоковой паузы при переключении на сетевое напряжение.

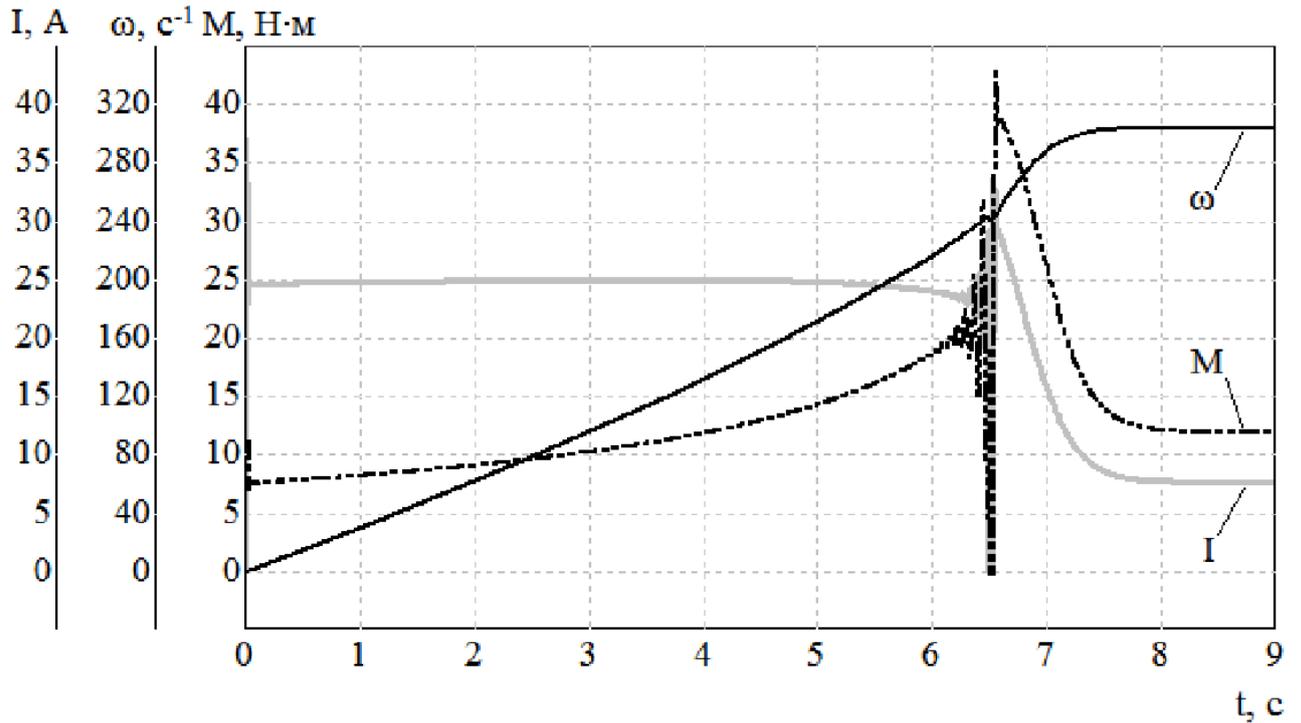


Рис. 4.2 – Графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске с вентиляторной нагрузкой на валу ($J = 0,24 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{IT}=280 \text{ мкФ}$ (переключение при достижении напряжением номинального значения)

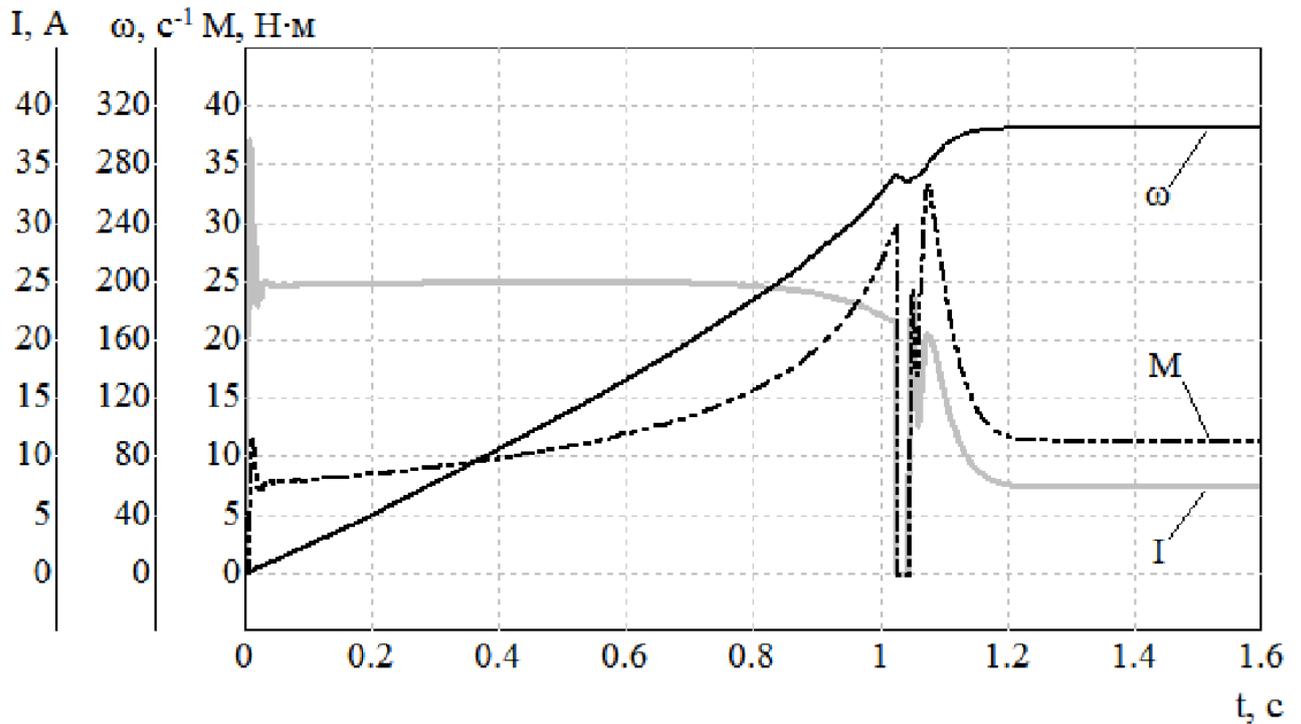


Рис. 4.3 – Графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске с вентиляторной нагрузкой на валу ($J = 0,03 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{IT}=280 \text{ мкФ}$ (переключение при достижении напряжением номинального значения)

Анализируя графики, можно сделать вывод, что переключение на сетевое напряжение проходит более благоприятно при малом моменте инерции

нагрузки. Это объясняется, прежде всего, тем, что при малоинерционной нагрузке переключение АД на сетевое напряжение происходит на более высокой частоте вращения ротора по причине более позднего развития процессов самовозбуждения и самораскачивания.

Для определения момента времени, в который совпадают по фазе вектор напряжения сети и вектор ЭДС статора АД находятся проекции фазного напряжения сети и ЭДС статора на неподвижную систему координат α - β с помощью формул:

$$\begin{cases} u_{\alpha} = u_A; \\ u_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(u_A + 2 \cdot u_B), \end{cases} \quad (4.3)$$

где u_A, u_B – значения фазных напряжений.

Угол между векторами выражается через арккосинус следующим образом:

$$\Delta\varphi = \arccos \frac{u_{\alpha 1} \cdot u_{\alpha 2} + u_{\beta 1} \cdot u_{\beta 2}}{|\bar{u}_1| \cdot |\bar{u}_2|}. \quad (4.4)$$

В момент времени, когда выполняется условие (4.2), АД подключается к сети.

4.2 Конденсаторное пуско-компенсирующее устройство с тиристорными коммутаторами в силовой цепи

В первой главе в результате расчета необходимой мощности компенсирующих емкостей установлено, что для исключения перекомпенсации реактивной мощности компенсирующее емкостное сопротивление должно быть выше пускового емкостного сопротивления в 1 – 2 раза для схемы соединения батареи компенсирующих конденсаторов «звездой» и в 3,5 – 6 раз для схемы соединения батареи компенсирующих конденсаторов «треугольником». Предлагается схмотехническое решение для конденсаторного ПКУ, в котором в режиме компенсации реактивной мощности батарея компенсирующих конденсаторов имеет схему соединения «треугольником» и для исключения явления перекомпенсации обеспечивается соотношение 1:4 между пусковым и компенсирующим емкостными сопротивлениями. Схема ПКУ защищена

патентом РФ № 2537955, кл. H02P 1/26, 2015. Принципиальная схема предлагаемого ПКУ представлена на рис. 4.4 [10].

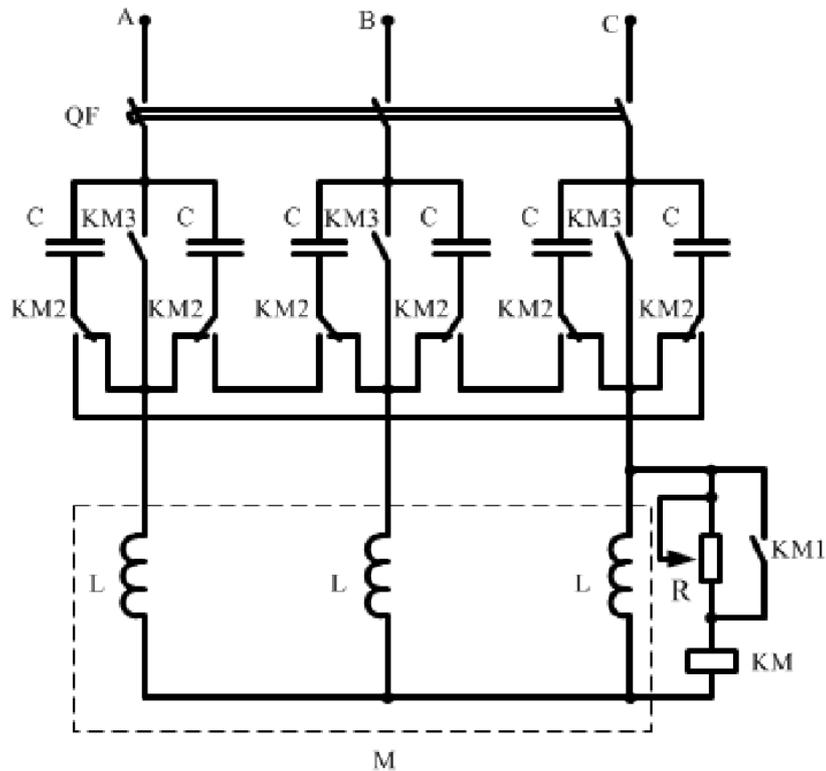


Рис. 4.4 – Принципиальная схема системы ПКУ – АД
[патент РФ № 2537955, кл. H02P 1/26, 2015]

В предлагаемом ПКУ при пуске контакты $KM3$ разомкнуты, а переключающие контакты $KM2$ находятся в положении, показанном на рис. 4.4, конденсаторы при этом оказываются включенными параллельными парами последовательно со статорными обмотками АД. Напряжение, приложенное к статорным обмоткам, при этом уменьшено на величину падения напряжения на сопротивлениях конденсаторов, что, в свою очередь, ограничивает пусковой ток. По мере увеличения частоты вращения двигателя напряжение, приложенное к статорным обмоткам, увеличивается и при достижении его определенного значения происходит срабатывание катушки KM магнитного пускателя. В результате этого посредством контакта $KM1$ шунтируется резистор R , что увеличивает напряжение на катушке KM до номинального и обеспечивает надежное срабатывание магнитного пускателя. Кроме того, замыкание контакта $KM1$ исключает потери на резисторе R в рабочем режиме. Одновременно замыкаются контакты $KM3$ магнитного пускателя, включая обмотки статора АД

напрямую на фазы сети, а также переключаются контакты $KM2$, при этом конденсаторы оказываются включенными попарно последовательно и параллельно фазам сети. В конечном итоге в режиме компенсации реактивной мощности конденсаторная батарея подключена по схеме «треугольник» [10].

При использовании в схеме конденсаторного ПКУ в качестве коммутаторов электромагнитных пускателей (контакторов) не гарантируется подключение АД к сети в момент совпадения по фазе векторов ЭДС статора и обобщенного вектора напряжения сети, т. к. по своей конструкции и принципу действия электромагнитные пускатели обладают сравнительно большой инерционностью и непостоянством времени срабатывания. В качестве недостатка можно также отметить тот факт, что замыкание контактов происходит не одновременно, а с небольшим разбросом, который со временем эксплуатации только увеличивается. Отключение цепи происходит с возникновением электрической дуги.

Из-за присущих электромагнитным контакторам недостатков возможно переключение ПКУ в неблагоприятные моменты времени, наиболее худшим из которых является подключение АД контактором к сети при переключении ПКУ с пускового режима на режим компенсации реактивной мощности в момент времени, когда ЭДС статора и напряжение сети находятся в противофазе.

На рис. 4.5 представлены результаты моделирования переходного процесса наиболее неблагоприятного переключения АД с питания от ПКУ на питание от сети с вентиляторной нагрузкой на валу АД.

По графикам, изображенным на рис. 4.5, видно, что в момент подключения АД на сетевое напряжение возникает отрицательный электромагнитный момент, значение которого превышает значение пускового момента АД в 2 раза. Также, соответственно, возникает скачок тока АД, превышающий значение пускового тока АД при прямом пуске. Все это отрицательно сказывается как на самом двигателе, так и на приводе с нагрузкой в целом.

Для переключения конденсаторного ПКУ с пускового режима на режим компенсации реактивной мощности с минимальными бросками

электромагнитного момента и тока АД в целесообразный момент времени предлагается применять тиристорные коммутаторы.

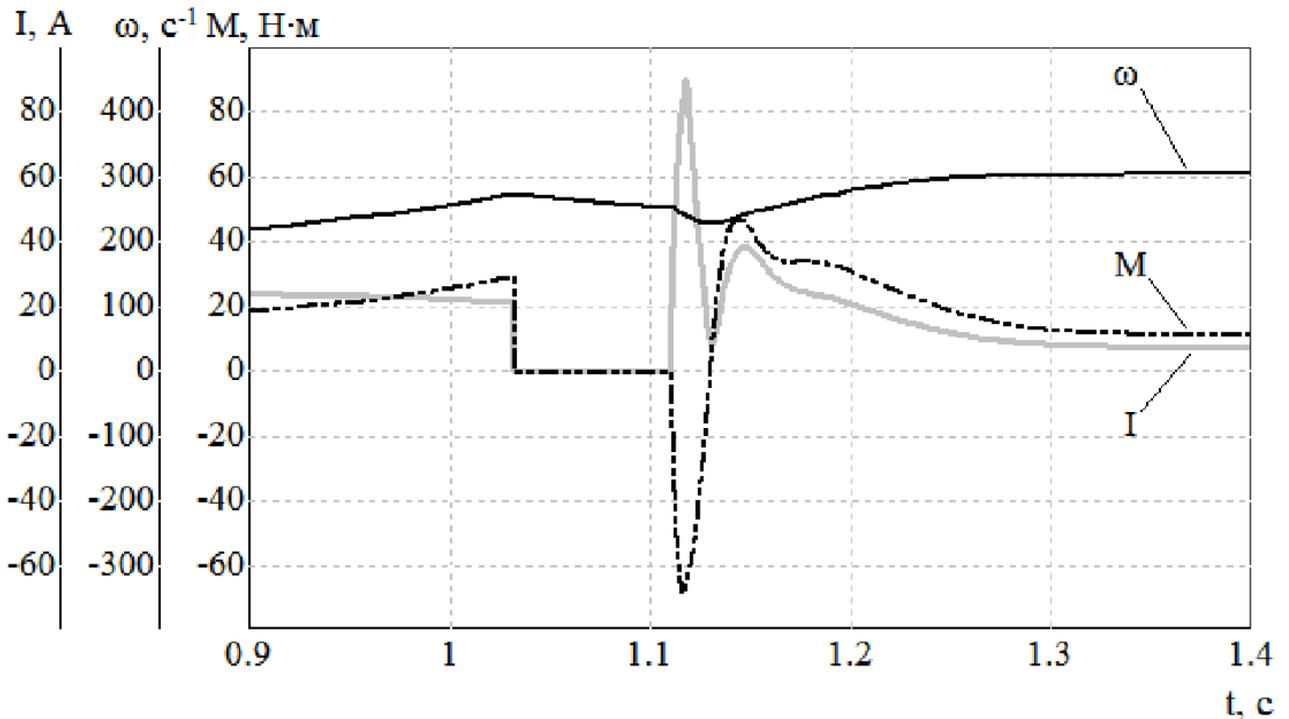


Рис. 4.5 – Результаты моделирования наиболее неблагоприятного подключения АД к сети

Достоинства тиристорных коммутаторов:

- практически неограниченный срок службы, т.к. эти коммутаторы допускают до 1 миллиона включений (по сравнению с 200...300 тысячами включений у электромагнитных контакторов);

- высокое быстродействие, т.к. тиристорные коммутаторы включаются практически мгновенно, в то время как собственное время включения электромагнитных контакторов составляет сотые и даже десятые доли секунды;

- малая мощность управления, необходимая для включения коммутатора – до 3 Вт, эта же мощность у электромагнитных контакторов доходит до 30 Вт;

- простота обслуживания, т.к. при выходе из строя коммутатора он заменяется новым.

На рис. 4.6 представлена принципиальная схема конденсаторного ПКУ на основе схемы, представленной на рис. 4.4, которая для подключения АД к сети в благоприятный момент времени дополнена тиристорными коммутаторами.

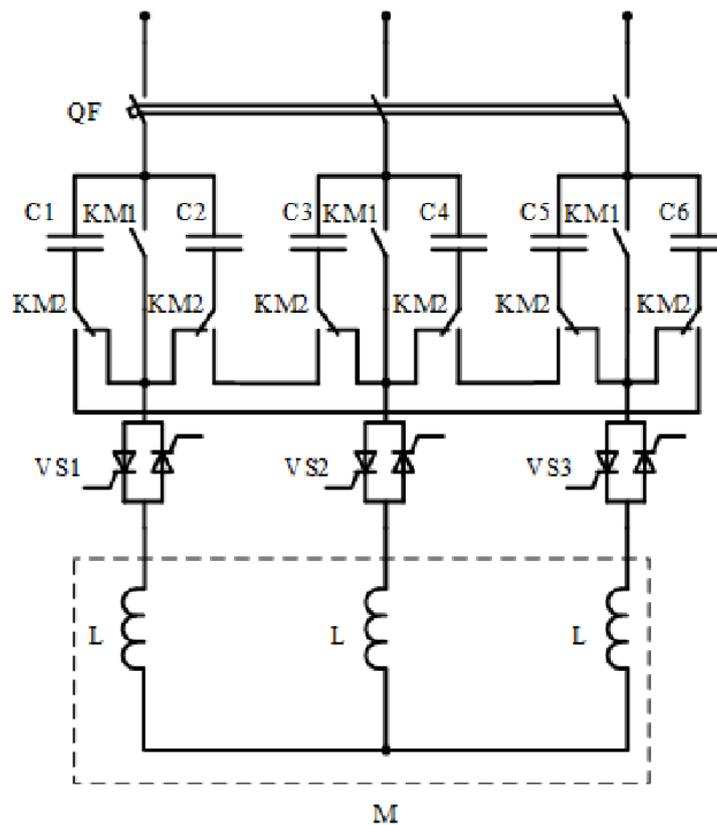


Рис. 4.6 – Принципиальная схема асинхронного ЭП с ПКУ

Схема работает следующим образом. В исходном положении автомат QF разомкнут, контакты KM1 разомкнуты, контакты KM2 находятся в положении, изображенном на рис. 4.6. При включении автомата QF конденсаторы C1-C6 параллельными группами подключаются последовательно с сетью и после подачи управляющих сигналов на тиристорные коммутаторы VS1, VS2, VS3 двигатель начинает плавно разгоняться. В определенный заданный момент времени с тиристорных коммутаторов снимаются управляющие сигналы, тиристоры при снижении тока через них до нуля закрываются, после закрытия всех тиристоров замыкаются контакты KM1 и переключаются контакты KM2, конденсаторы подключаются последовательными группами параллельно сети, выполняя роль компенсаторов реактивной мощности. После выдержки необходимой паузы, во время которой двигатель тормозится выбегом, подаются управляющие сигналы на тиристорные коммутаторы и электродвигатель получает питание напрямую от сети.

При отключении АД от сети электромагнитный пускатель разрывает контакты мгновенно, при этом значение тока в фазах не равно нулю. При

коммутации больших значений тока это вызывает возникновение между контактами в момент размыкания электрической дуги, которая вызывает их нагрев, оплавление и, как следствие, выход аппарата из строя.

При использовании тиристорных коммутаторов статорные обмотки АД отключаются от сети закрытием тиристоров при снижении протекающего через них тока до нуля – имеет место так называемая естественная коммутация тиристоров. Такой способ коммутации является самым благоприятным, так как обеспечиваются минимальные помехи и потери при переключении.

Введение в схему ПКУ тиристорных коммутаторов VS1, VS2, VS3 позволяет гарантированно подключать выбегающий АД на сетевое напряжение в благоприятный момент времени, когда выполняется условие (4.2). На рис. 4.7 представлены результаты моделирования переходного процесса благоприятного переключения АД с питания от ПКУ на питание от сети с вентиляторной нагрузкой на валу АД.

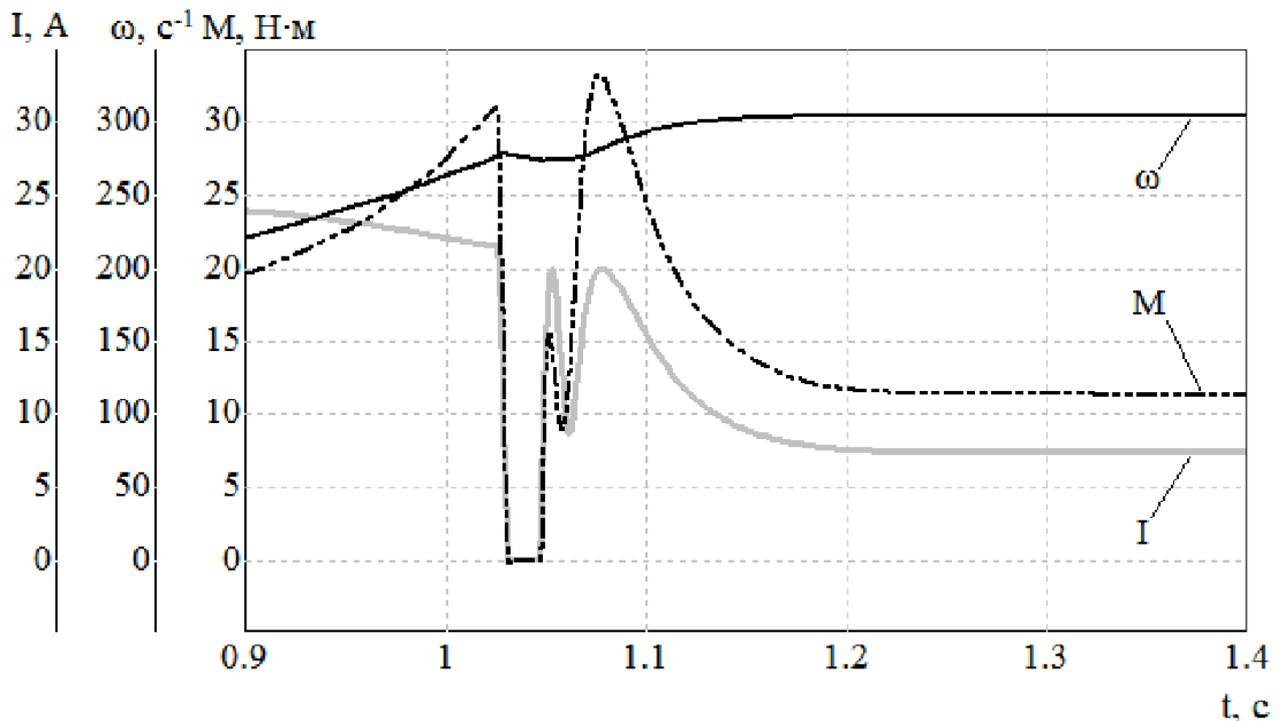


Рис. 4.7 – Результаты моделирования благоприятного подключения АД к сети

По рис. 4.7 видно, что броски тока и электромагнитного момента АД в момент подключения к сети не превышают значений тока и электромагнитного момента в пусковом режиме. При сравнении данных графиков с графиками тока

и электромагнитного момента АД при подключении к сети в наиболее неблагоприятный момент (Рис. 4.5) видно, что амплитуда колебания тока снизилась в 4,5 раза, а также отсутствует тормозной момент.

4.3 Определение благоприятного момента времени для отключения АД в конечной стадии разгона

При пуске АД с последовательно подключенными с обмотками статора конденсаторами с емкостным сопротивлением, удовлетворяющим условию $X_C > X_{АД}$, ток, потребляемый из сети, имеет активно-емкостной характер, емкостное сопротивление конденсаторов в процессе пуска остается неизменным. Так как индуктивное сопротивление электродвигателя в процессе пуска с увеличением частоты вращения ротора увеличивается, то на определенной частоте вращения ротора его значение становится равным значению емкостного сопротивления пусковых конденсаторов. Возникает резонанс напряжений, сопровождающийся резким повышением напряжений на конденсаторах и обмотках АД, а вместе с ним потребляемого из сети тока, который имеет только активную составляющую, развивается самовозбуждение и самораскачивание электродвигателя.

При конденсаторном пуске АД при условии $X_C > X_{АД}$ в результате самовозбуждения происходит торможение ротора электродвигателя. В зависимости от емкости пусковых конденсаторов и характера нагрузки ротор АД может либо колебаться относительно значения частоты самовозбуждения (Рис. 4.8), либо возникает процесс периодического разгона АД до резонансной частоты и последующее торможение в результате самовозбуждения (Рис. 4.9). В обоих случаях к обмоткам АД прикладывается повышенное напряжение, в несколько раз превышающее номинальное (Рис. 4.10).

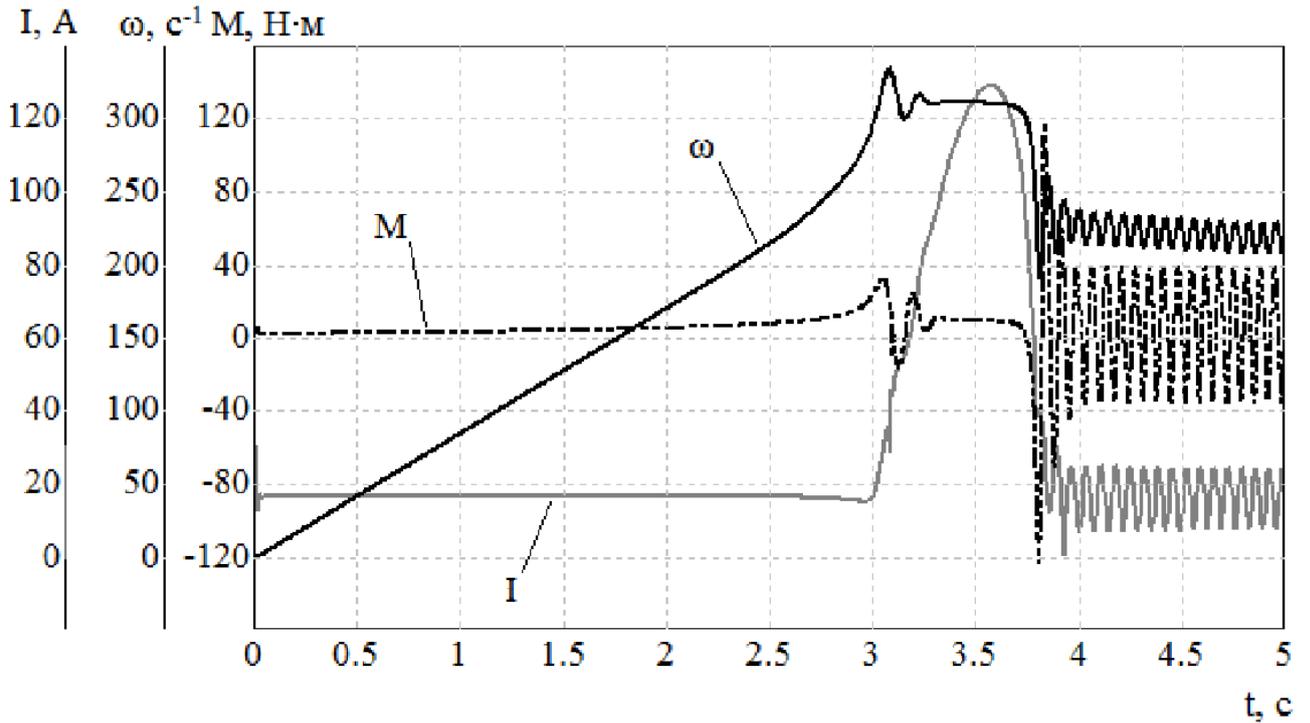


Рис. 4.8 – Конденсаторный пуск без отключения конденсаторов
($J = 0,03 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $C_{\Pi}=200 \text{ мкФ}$)

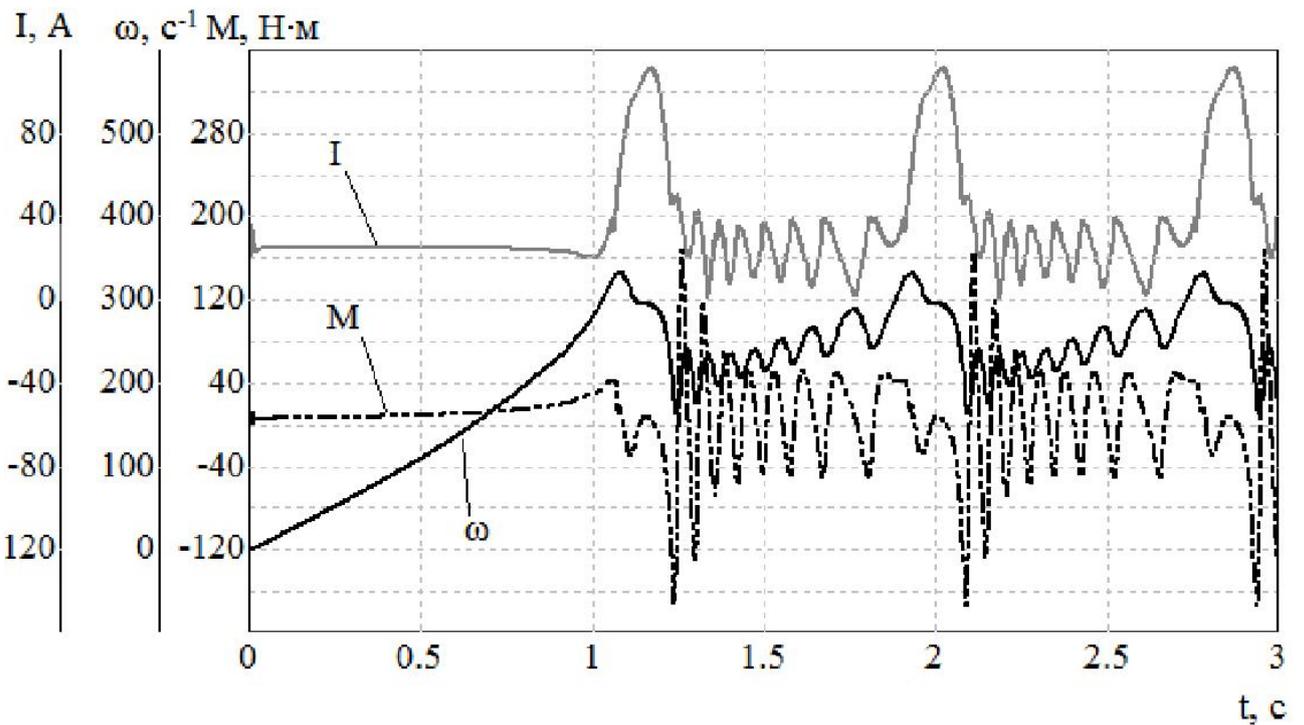


Рис. 4.9 – Конденсаторный пуск без отключения конденсаторов
($J = 0,03 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $C_{\Pi}=280 \text{ мкФ}$)

Анализируя рис. 4.8 – 4.10 следует отметить, что по мере увеличения скорости АД пусковой ток начинает снижаться. При приближении частоты вращения ротора АД к резонансной напряжению, приложенное к обмоткам статора, резко увеличивается, в цепи возникает резонанс напряжений, и в

дальнейшем его колебания превышают напряжение сети, также с повышением напряжения возрастает ток.

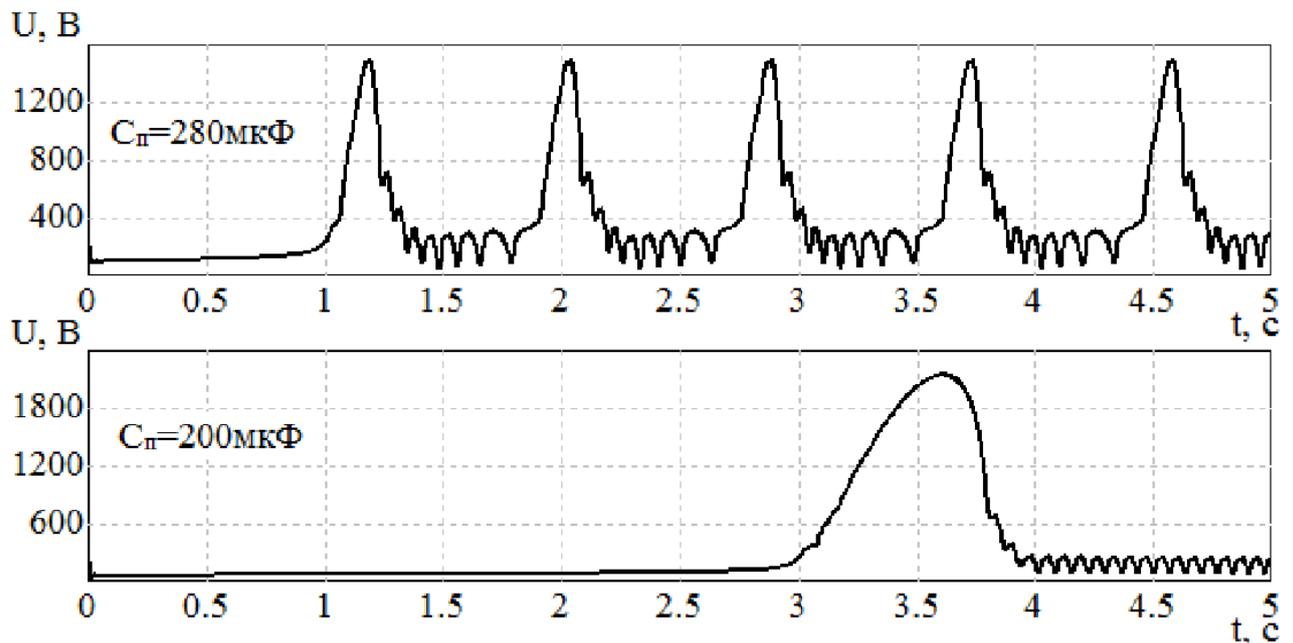


Рис. 4.10 – Приложенное к обмоткам статора действующее значение напряжения при конденсаторном пуске без отключения конденсаторов ($J = 0,03 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$)

Данные негативные процессы могут привести к выходу электродвигателя из строя, поэтому необходимо отключать конденсаторы до возникновения резонанса и переключать АД на сетевое напряжение.

Ранее в данной работе при исследованиях плавного конденсаторного пуска АД отключался от конденсаторов при достижении двигателем скорости, равной 90% от синхронной. Однако в ряде случаев, в частности при относительно большом моменте инерции, процессы самораскачивания и самовозбуждения начинают развиваться раньше, в момент времени, когда АД разогнался до скорости, равной 70-80% от синхронной. При этом дальнейшее увеличение скорости прекращается.

Стоит отметить, что увеличение напряжения, приложенного к обмоткам статора, сверх номинального можно использовать в качестве форсирования АД для его дальнейшего более мягкого переключения на сетевое напряжение. Так, если переключение АД на рабочий режим производить при увеличении напряжения на обмотках статора на 20-30% от номинального с последующей выдержкой бестоковой паузы, то векторы напряжения сети и ЭДС в обмотках

статора в момент подключения АД к сети будут совпадать как по величине, так и по фазе, что минимизирует переходные токи и момент АД. Например, увеличение порогового значения напряжения переключения для исследуемого АД с 220В до 280В, практически исключает появление повышенных значений переходных токов (рис. 4.11).

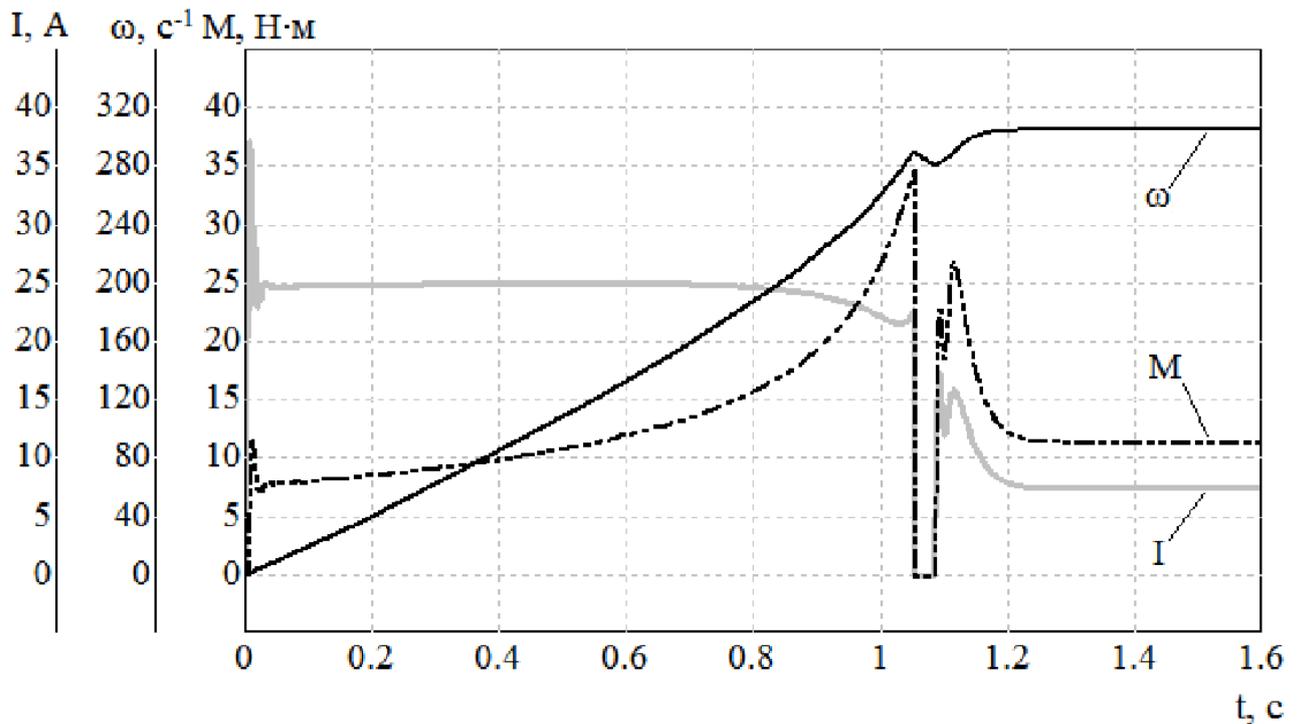


Рис. 4.11 – Графики изменения тока статора, частоты вращения и электромагнитного момента АД при пуске с вентиляторной нагрузкой на валу ($J = 0,03 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) с емкостью конденсаторов в цепи статора $C_{\pi}=280 \text{ мкФ}$ (переключение при $U=280 \text{ В}$)

Из сказанного выше можно сделать вывод, что более целесообразным является отключение АД от питания через конденсаторы, контролируя ток статора. В частности, одним из критериев переключения может быть превышение током статора начального значения пускового тока при данной емкости пусковых конденсаторов.

На рис. 4.12 представлены графики тока статора и напряжения, приложенного к обмоткам статора, при моделировании конденсаторного пуска АД с переключением на сетевое напряжение при увеличении тока в конечной стадии разгона. По рис. 4.12 видно, что величина пускового тока равна $I_{\Pi}=25 \text{ А}$, т.е. приблизительно трехкратному значению номинального тока АД ($I_{\text{ном}}=7,8 \text{ А}$), по мере разгона величина тока снижается до 20А, а затем с повышением

напряжения резко увеличивается и при значении тока, превышающем 25А АД отключается от конденсаторов. При этом напряжение кратковременно увеличивается до 400В, а в конце бестковой паузы ЭДС, наводимая в обмотках статора, равна напряжению сети, что позволяет уменьшить бросок тока и электромагнитного момента при подключении АД на сетевое напряжение.

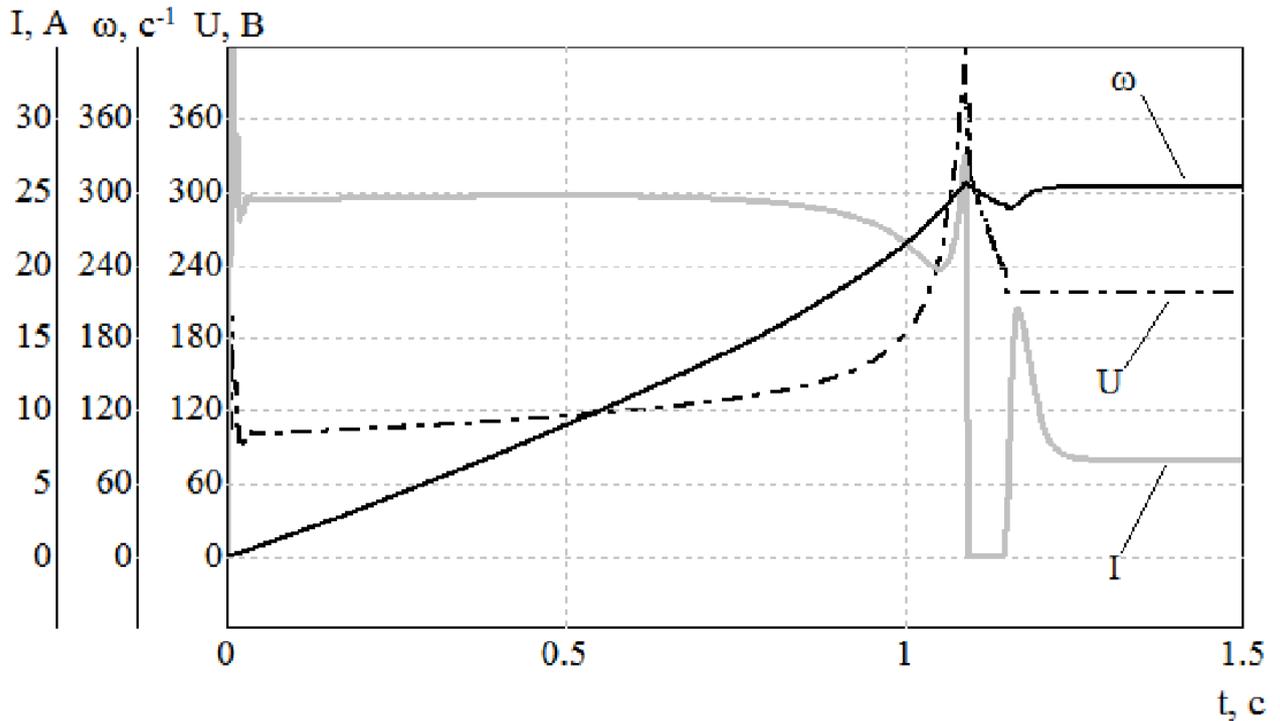


Рис. 4.12 – Конденсаторный пуск с переключением по току
($J = 0,03 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $C_{\Pi} = 280 \text{ мкФ}$)

Конденсаторный пуск АД с отключением по току статора позволяет полностью исключить возможность развития самовозбуждения и уже на ранней стадии его проявления отключить АД. Это в большей мере характерно для электропривода с нагрузкой, имеющей относительно большой момент инерции, когда процессы самораскачивания и самовозбуждения развиваются до достижения напряжением, приложенным к обмоткам статора АД, номинального значения.

Так, на рис. 4.13 представлены графики фазного тока и напряжения статора и угловой частоты вращения ротора АД при конденсаторном пуске с вентиляторной нагрузкой на валу, имеющей момент инерции $J = 0,24 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, без отключения конденсаторов в момент начала развития самораскачивания и самовозбуждения.

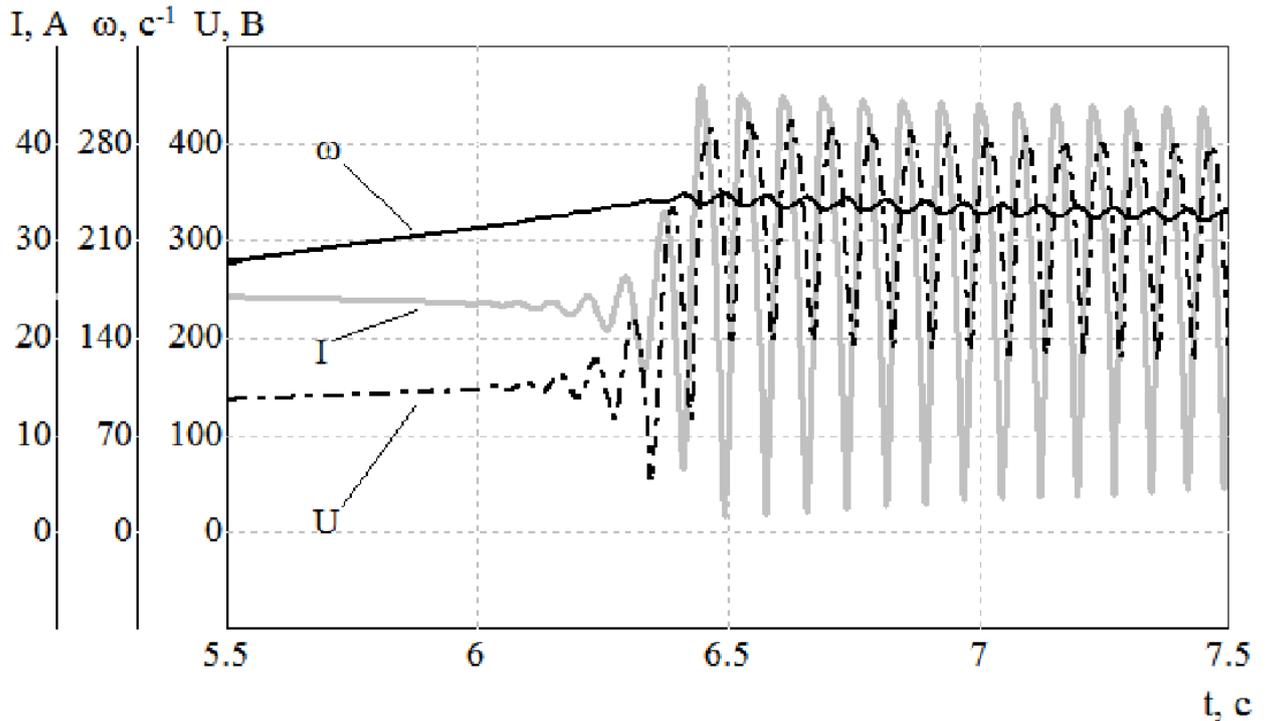


Рис. 4.13 – Конденсаторный пуск без отключения конденсаторов
($J = 0,24 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $C_{\text{П}}=280 \text{ мкФ}$)

По графикам видно, что колебания тока и напряжения на статоре АД начинаются уже при $U=150\text{В}$. При этом АД продолжает некоторое время разгоняться, а на скорости равной 80% от номинальной разгон прекращается. Все это сопровождается значительными колебаниями тока, напряжения, приложенного к статорным обмоткам, и момента на валу АД.

На рис. 4.14 представлены графики фазного тока и напряжения статора и угловой частоты вращения ротора при отключении АД от конденсаторов при достижении напряжения на статорных обмотках номинального значения ($U=220\text{В}$). Стоит отметить, что в данном случае колебательный процесс самовозбуждения уже начинает развиваться и АД отключается от конденсаторов в момент, когда равно номинальному ($U=220\text{В}$) значение амплитуды колебаний действующего напряжения на обмотках статора.

На рис. 4.15 представлены графики фазного тока и напряжения статора и угловой частоты вращения ротора при отключении АД от конденсаторов при увеличении тока статора. По рисунку видно, что колебания полностью исключены, так как АД отключен от конденсаторов в первый же период их возникновения, при этом частота вращения ротора АД ниже, чем в случае

отключения АД от конденсаторов по достижению номинального напряжения на статоре (Рис. 4.14).

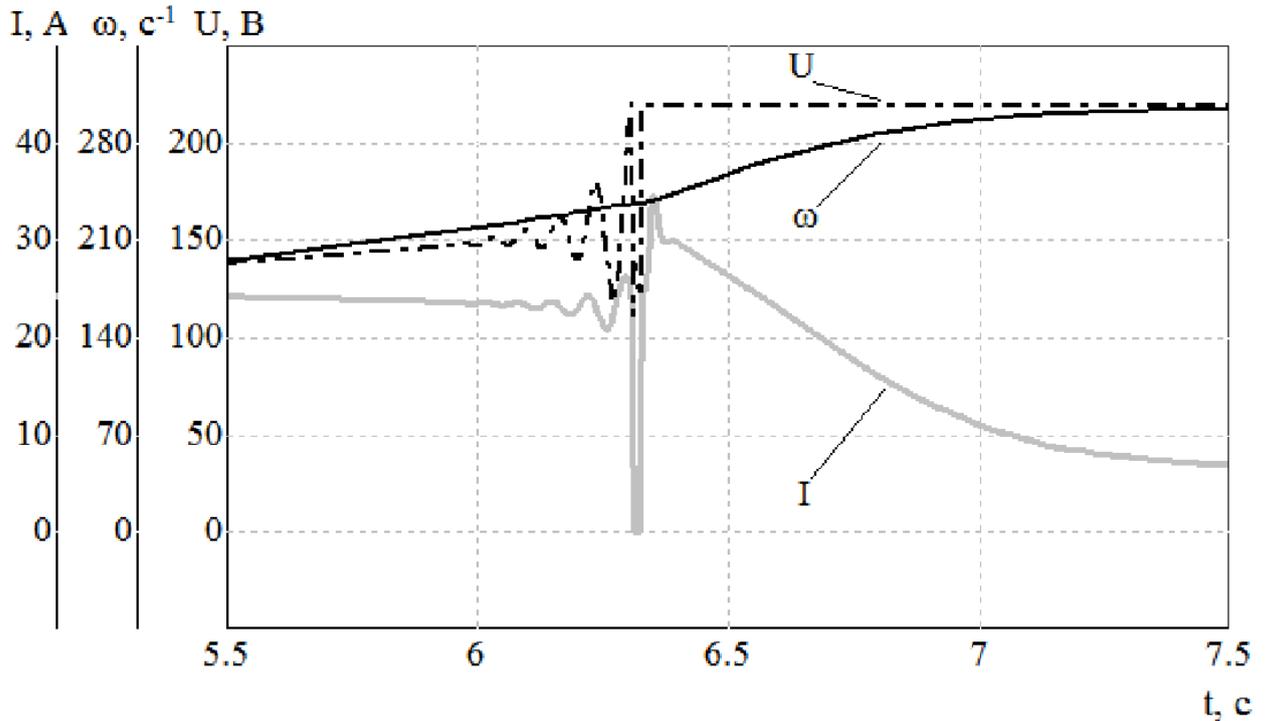


Рис. 4.14 – Конденсаторный пуск с отключением конденсаторов при напряжении на статоре равном 220В ($J = 0,24 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $C_{II}=280 \text{ мкФ}$)

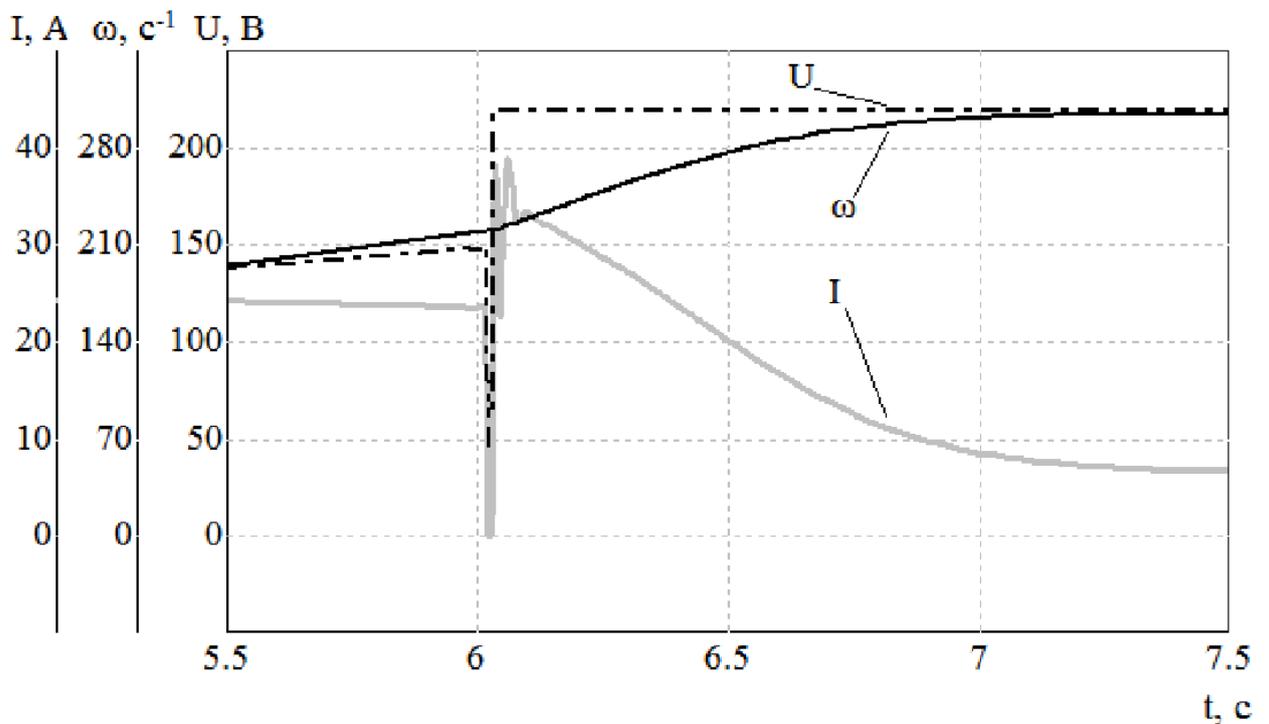


Рис. 4.15 – Конденсаторный пуск с отключением конденсаторов при увеличении тока статора ($J = 0,24 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $C_{II}=280 \text{ мкФ}$)

Поэтому при подключении на сетевое напряжение наблюдается незначительное увеличение броска тока и электромагнитного момента по

сравнению со случаем, когда АД отключается от конденсаторов по достижению напряжением на статоре номинального значения.

Для ПКУ, работающего по схеме, представленной на рис. 4.6, структурная схема системы управления, реализующей алгоритм отключения АД от конденсаторов, контролируя ток статора, и благоприятного подключения АД к сети, представлена на рис. 4.16.

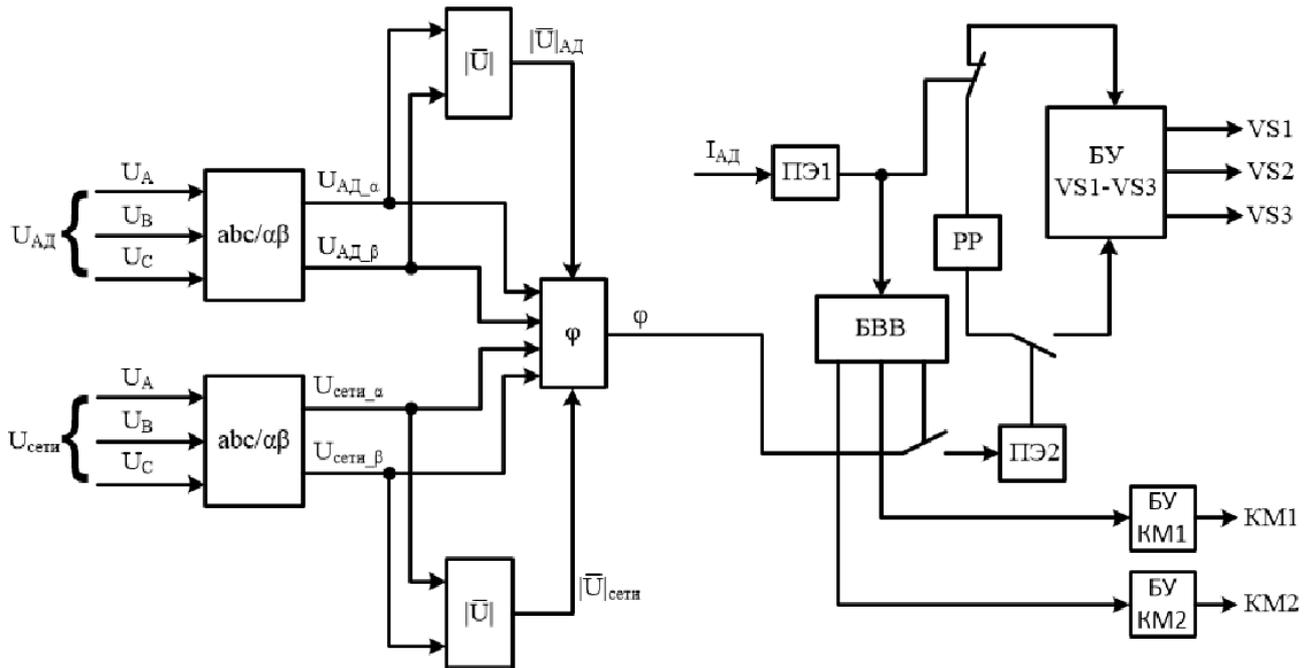


Рис. 4.16 – Структурная схема системы управления ПКУ

Система управления работает следующим образом. Сигнал разрешения работы с блока «PP» подается на блок управления тиристорными коммутаторами VS1, VS2, VS3 «БУ VS1-VS3», который в свою очередь посылает управляющие сигналы на открытие тиристорных коммутаторов VS1, VS2, VS3. Измеренные мгновенные значения фазных напряжений сети и статора электродвигателя в блоках «abc/αβ» преобразуются в проекции обобщенных векторов напряжений на оси α–β неподвижной системы координат, после чего определяются модули обобщенных векторов $|\overline{U}|_{АД}$ и $|\overline{U}|_{сети}$, а также угол φ между векторами. Действующее значение тока статора $I_{АД}$ подается на пороговый элемент «ПЭ1», на котором сравнивается с пороговым значением. При превышении порогового значения блок «ПЭ1» отключает сигнал разрешения работы с блока «PP» на блок «БУ VS1-VS3» и подает сигнал на блок выдержки времени «БВВ». Блок «БВВ»

после выдержки времени, необходимой для закрытия тиристорных коммутаторов VS1, VS2, VS3, посылает сигналы на блоки управления коммутационными аппаратами КМ1 «БУ КМ1» и КМ2 «БУ КМ2», а также включает подачу сигнала угла между обобщенными векторами напряжений сети и статора электродвигателя на пороговый элемент «ПЭ2». При достижении порогового значения блок «ПЭ2» включает подачу сигнала разрешения работы с блока «РР» на блок «БУ VS1-VS3».

Таким образом, отключение АД от конденсаторов в конечной стадии конденсаторного пуска контролируя ток статора, когда критерием отключения считается начало нарастания тока статора, является наиболее целесообразным. Такой критерий переключения позволяет избежать резонанса напряжений, исключить развитие явлений самораскачивания и самовозбуждения, а также в ряде случаев форсировать АД в конце разгона для более плавного переключения на сетевое напряжение.

4.4 Исследование переходных процессов при переключении пусковых конденсаторов на режим компенсации реактивной мощности

Рассмотрим подробно переходные процессы, происходящие в конденсаторах при переключении их с пускового режима на режим компенсации реактивной мощности по схеме конденсаторного ПКУ, представленной на рис. 4.6.

В пусковом режиме к каждой фазе статора АД подключена пара из двух параллельно соединенных конденсаторов одинаковой емкости (C_1 и C_2 к фазе А, C_3 и C_4 к фазе В, C_5 и C_6 к фазе С), вследствие чего результирующая емкость, подключенная последовательно к обмоткам статора АД равна сумме емкостей каждого конденсатора ($C_{рез1} = C_1 + C_2$, $C_{рез2} = C_3 + C_4$, $C_{рез3} = C_5 + C_6$). При этом через каждый конденсатор протекает ток, равный половине пускового тока АД, а падения напряжения на каждом конденсаторе равны падению напряжения на результирующей суммарной емкости.

При закрытии тиристорных коммутаторов VS1, VS2, VS3 конденсаторы начинают разряжаться каждый на свое разрядное сопротивление (на схеме не показаны). При этом значение напряжения на конденсаторах в момент закрытия тиристоров равно амплитудному значению напряжения соответствующей фазы. Если тиристорный коммутатор закрылся при снижении до нуля условной положительной полуволны тока, то конденсатор заряжен положительно, иначе конденсатор заряжен отрицательно.

На рис. 4.17 представлены результаты моделирования процесса разряда конденсаторов C_1 , C_3 и C_5 после закрытия тиристорных коммутаторов. Здесь емкость конденсаторов $C_1 = C_3 = C_5 = 140$ мкФ, значение разрядных сопротивлений $R_{\text{раз}} = 750$ Ом, масштаб тока выбран 10:1.

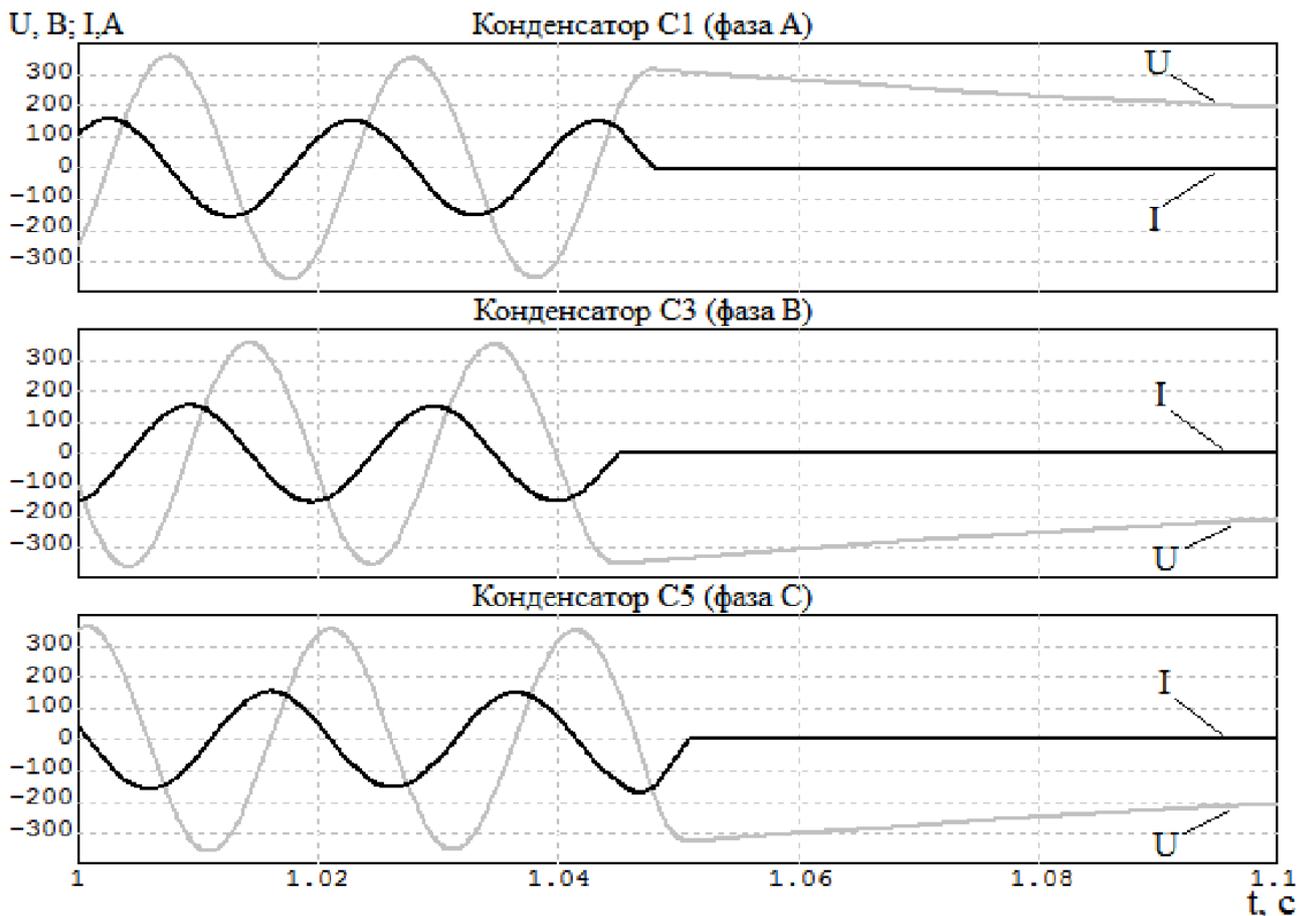


Рис. 4.17 – Графики мгновенных значений тока и напряжения на конденсаторах C_1 , C_3 и C_5

После замыкания контактов КМ2 и переключения контактов КМ3 заряженные конденсаторы подключаются последовательными парами на

линейное напряжение сети (C_2 и C_3 на напряжение U_{AB} , C_4 и C_5 на напряжение U_{BC} , C_6 и C_1 на напряжение U_{CA}). При этом в установившемся режиме напряжения равны:

$$\begin{cases} U_{AB} = U_{C_2} - U_{C_3}, \\ U_{BC} = U_{C_4} - U_{C_5}, \\ U_{CA} = U_{C_6} - U_{C_1}. \end{cases} \quad (4.5)$$

В результате значение напряжения на конденсаторах устанавливается на уровне половины соответствующего линейного напряжения сети:

$$\begin{cases} U_{C_2} = -U_{C_3} = \frac{U_{AB}}{2}, \\ U_{C_4} = -U_{C_5} = \frac{U_{BC}}{2}, \\ U_{C_6} = -U_{C_1} = \frac{U_{CA}}{2}. \end{cases} \quad (4.6)$$

Как видно из рис. 4.17 при одновременном снятии управляющих сигналов с тиристорных коммутаторов закрытие их происходит не одновременно, а при снижении тока в фазах до нуля, то есть со сдвигом в 60° между фазами, поэтому на двух фазах напряжение на конденсаторах будет одинаковой полярности, а на третьей фазе противоположной полярности. В связи с этим, при переключении конденсаторов на компенсацию реактивной мощности по схеме, представленной на рис. 4.6, согласно (4.5) в одной из трех пар последовательно соединенные конденсаторы будут разряжаться друг на друга.

На рис.4.18 представлены графики моделирования мгновенных значений токов и напряжений на конденсаторах в момент переключения ПКУ с пускового режима на режим компенсации реактивной мощности. При моделировании значение емкости равно: $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 140$ мкФ, разрядное сопротивление: $R_{раз} = 750$ Ом, масштаб тока выбран 1:1.

Анализ графиков на рис. 4.18 показывает, что при переключении возникают большие значения свободной составляющей тока.

Величина свободного тока тем больше, чем больше разница между суммарным напряжением на паре последовательных конденсаторов и линейным напряжением, на которое эта пара подключается.

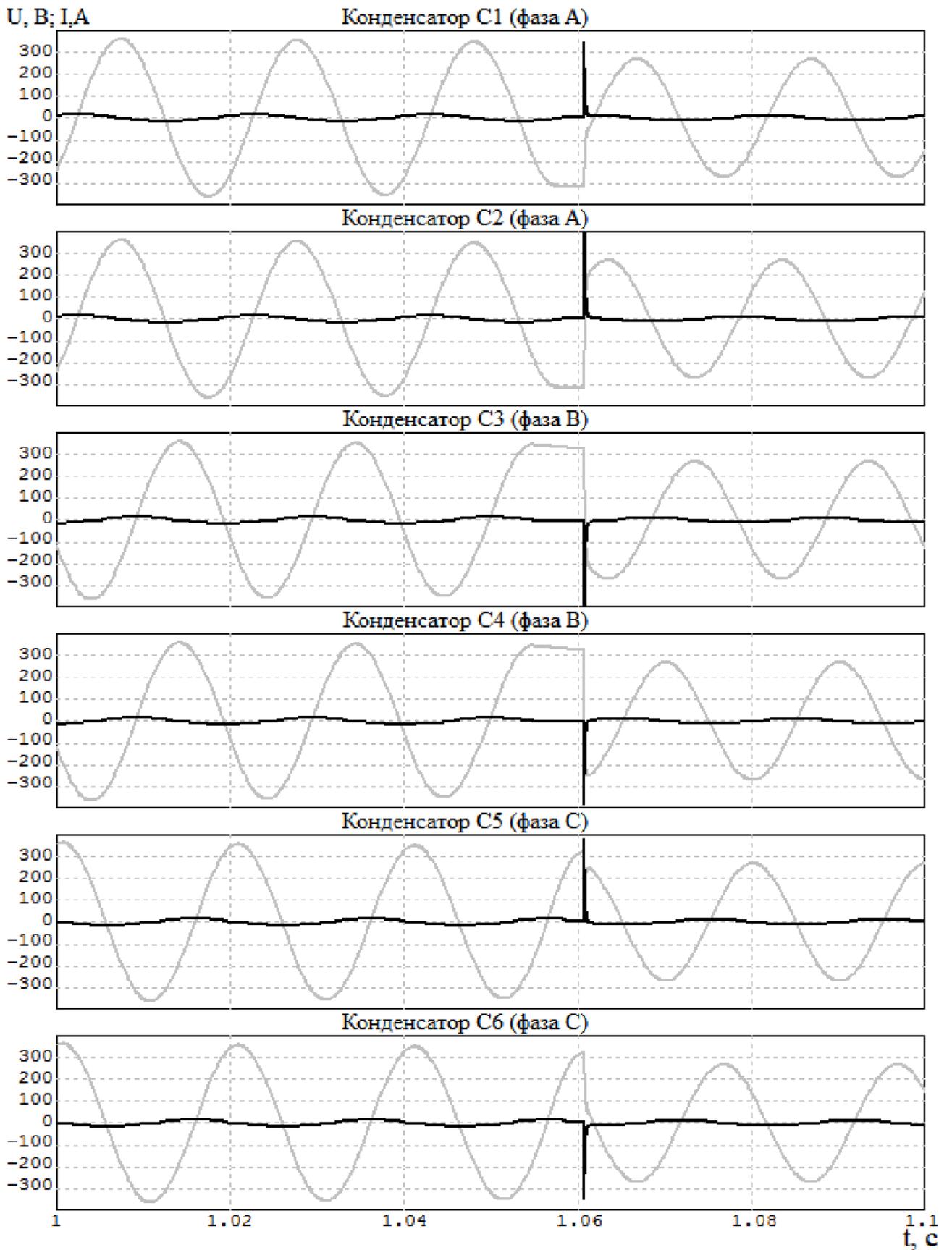


Рис. 4.18 – Графики мгновенных значений на конденсаторах в момент переключения:
 — - токов; — - напряжений

Также стоит отметить, что при данном способе переключения напряжения

на конденсаторах, подключенных к фазам В и С имеют одинаковую полярность и примерно одинаковы, поэтому при переключении происходит разряд конденсаторов C_4 и C_5 друг на друга.

Возникновение при подключении конденсаторов большого скачка тока можно объяснить тем, что в момент включения конденсаторов цепь замыкается практически накоротко и ток в ней достаточно велик.

Значение тока определяется величиной переменного напряжения, остаточного напряжения на конденсаторах, импедансом выводов конденсаторов, соединяющих кабелей, и обмоток силового трансформатора. Разряд конденсаторов перед подключением позволяет исключить влияние остаточного напряжения на конденсаторах на пиковое значение броска тока.

В случае разряда конденсаторов перед подключением значение тока будет зависеть в большей степени от мгновенного значения напряжения сети в момент подключения конденсаторов, так как параметры конденсаторов, соединяющих кабелей и обмоток силового трансформатора не изменяются.

Так, на рис. 4.19 представлены графики моделирования мгновенных значений токов и напряжений на конденсаторах в момент переключения ПКУ с пускового режима на режим компенсации реактивной мощности после разряда конденсаторов. Значение подключенной емкости равно: $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 140$ мкФ, разрядное сопротивление: $R_{\text{раз}} = 750$ Ом, масштаб тока выбран 1:1.

По рис. 4.19 видно, что броски тока на конденсаторах C_1 и C_6 отсутствуют, так как мгновенное значение линейного напряжения, на которое они подключаются, в данный момент времени равно нулю. В этом случае в цепи возникает только лишь принужденная составляющая тока, равная току в установившемся режиме. На остальных конденсаторах помимо принужденной составляющей возникают свободные составляющие токов, пропорциональные значению приложенного мгновенного значения напряжения.

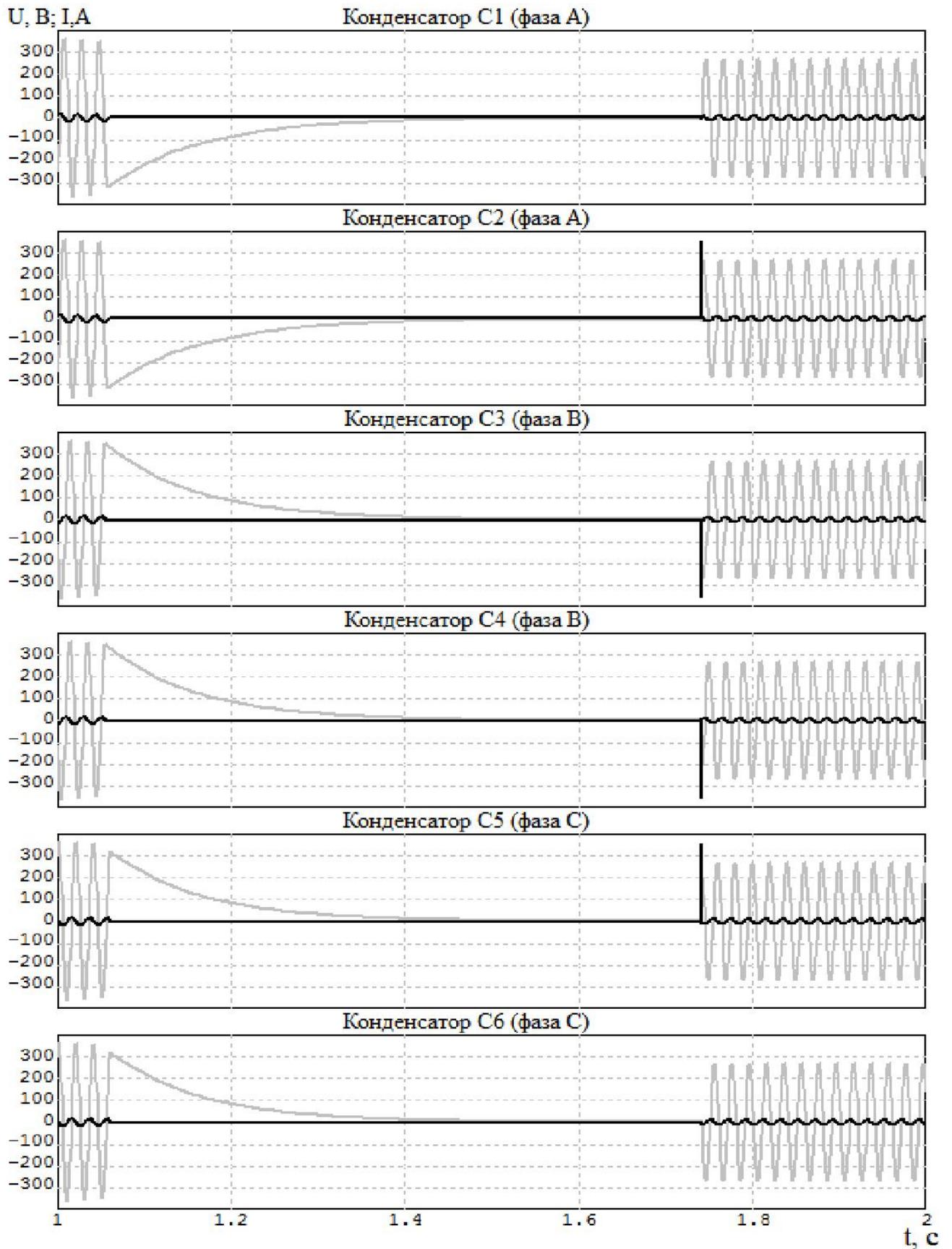


Рис. 4.19 – Графики мгновенных значений на конденсаторах в момент переключения:

— - токов; — - напряжений

Для ограничения бросков тока при подключении конденсаторов

существуют специальные контакторы коммутации емкостной нагрузки. Такие контакторы оснащаются гасящими резисторами, ограничивающими величину пускового тока конденсатора, что приводит к увеличению их коммутационного ресурса. Токоограничивающие резисторы включаются параллельно основным контактам и замыкаются на несколько миллисекунд раньше при замыкании основных контактов и размыкаются на несколько миллисекунд позже при размыкании основных контактов. Это позволяет существенно ограничить выброс напряжения, который происходит при коммутации конденсатора.

Полностью исключить броски тока при коммутации конденсаторов возможно используя для коммутации конденсаторов тиристорные коммутаторы. В работе [54] проведены исследования и установлено, что свободная составляющая тока при подключении конденсатора на напряжение переменного тока не возникает, если в момент подключения напряжение на конденсаторе равно мгновенному значению напряжения, на которое он подключается. При этом отпадает необходимость в разряде конденсаторов, а самым благоприятным моментом подключения конденсатора будет момент времени, когда напряжение на конденсаторе и мгновенное значение напряжения сети равны амплитудному значению напряжения сети. В этом случае свободная составляющая тока отсутствует, а мгновенное значение принужденной составляющей тока в момент подключения равно нулю.

Таким образом, с учетом вышесказанного, схема конденсаторного ПКУ, представленная на рис. 4.6, дополняется еще тремя тиристорными коммутаторами, а для исключения разряда конденсаторов друг на друга конденсатор C_5 подключается инверсно. При этом в установившемся режиме напряжения равны:

$$\begin{cases} U_{AB} = U_{C_2} - U_{C_3}, \\ U_{BC} = U_{C_4} + U_{C_5}, \\ U_{CA} = U_{C_6} - U_{C_1}. \end{cases} \quad (4.7)$$

Окончательно конденсаторное ПКУ примет вид, представленный на рис. 4.20.

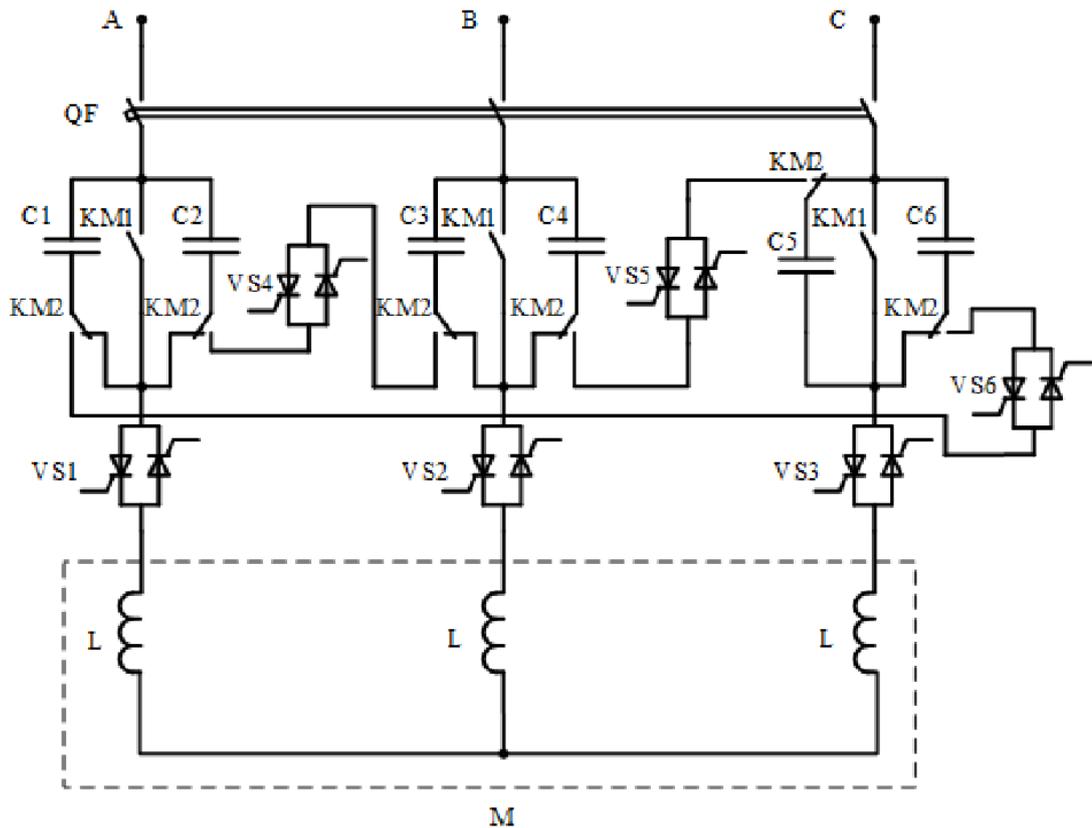


Рис. 4.20 – Принципиальная схема асинхронного ЭП с ПКУ

В режиме пуска схема работает аналогично схеме, представленной на рис. 4.6. Отличия работы схемы заключаются в следующем. В определенный заданный момент времени с тиристорных коммутаторов VS1, VS2, VS3 снимаются управляющие сигналы в момент перехода через нуль тока фазы В, таким образом, тиристоры при снижении тока через них до нуля закрываются в последовательности В-А-С, при этом напряжения на конденсаторах C₃, C₄, C₅ и C₆ имеют одинаковую полярность. После закрытия всех тиристоров замыкаются контакты KM1 и переключаются контакты KM2. В момент равенства разности напряжений на конденсаторах C₂ и C₃ мгновенному значению линейного напряжения сети U_{AB} подаются управляющие сигналы на тиристорный коммутатор VS4, в момент равенства суммы напряжений на конденсаторах C₄ и C₅ мгновенному значению линейного напряжения сети U_{BC} подаются управляющие сигналы на тиристорный коммутатор VS5, в момент равенства разности напряжений на конденсаторах C₆ и C₁ мгновенному значению линейного напряжения сети U_{CA} подаются управляющие сигналы на тиристорный коммутатор VS6. В итоге, конденсаторы подключаются

последовательными группами параллельно сети, выполняя роль компенсаторов реактивной мощности. После выдержки необходимой паузы, во время которой двигатель тормозится выбегом, подаются управляющие сигналы на тиристорные коммутаторы VS1, VS2, VS3 и электродвигатель получает питание напрямую от сети.

На рис. 4.21 представлены графики мгновенных значений напряжений и токов на конденсаторах при переключении ПКУ, работающей по схеме рис. 4.20, с режима пуска на режим компенсации реактивной мощности. Значение емкости равно: $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 140 \text{ мкФ}$, разрядное сопротивление: $R_{\text{раз}} = 750 \text{ Ом}$. Масштаб токов равен 10:1.

По графикам видно, что в момент подключения конденсаторов на линейное напряжение сети в оптимальный момент времени отсутствуют свободные составляющие токов, а через конденсаторы течет ток, соответствующий току в установившемся режиме.

Таким образом, конденсаторное ПКУ, работающее по схеме рис. 4.20, позволяет ограничить пусковой ток АД на требуемом уровне за счет выбора значения емкости пусковых конденсаторов, исключить возникновение явлений самораскачивания и самовозбуждения АД при конденсаторном пуске, переключить электродвигатель на сетевое напряжение с минимальными бросками тока и электромагнитного момента, а также переключить пусковые конденсаторы на компенсацию реактивной мощности АД в рабочем режиме также без возникновения переходных бросков тока.

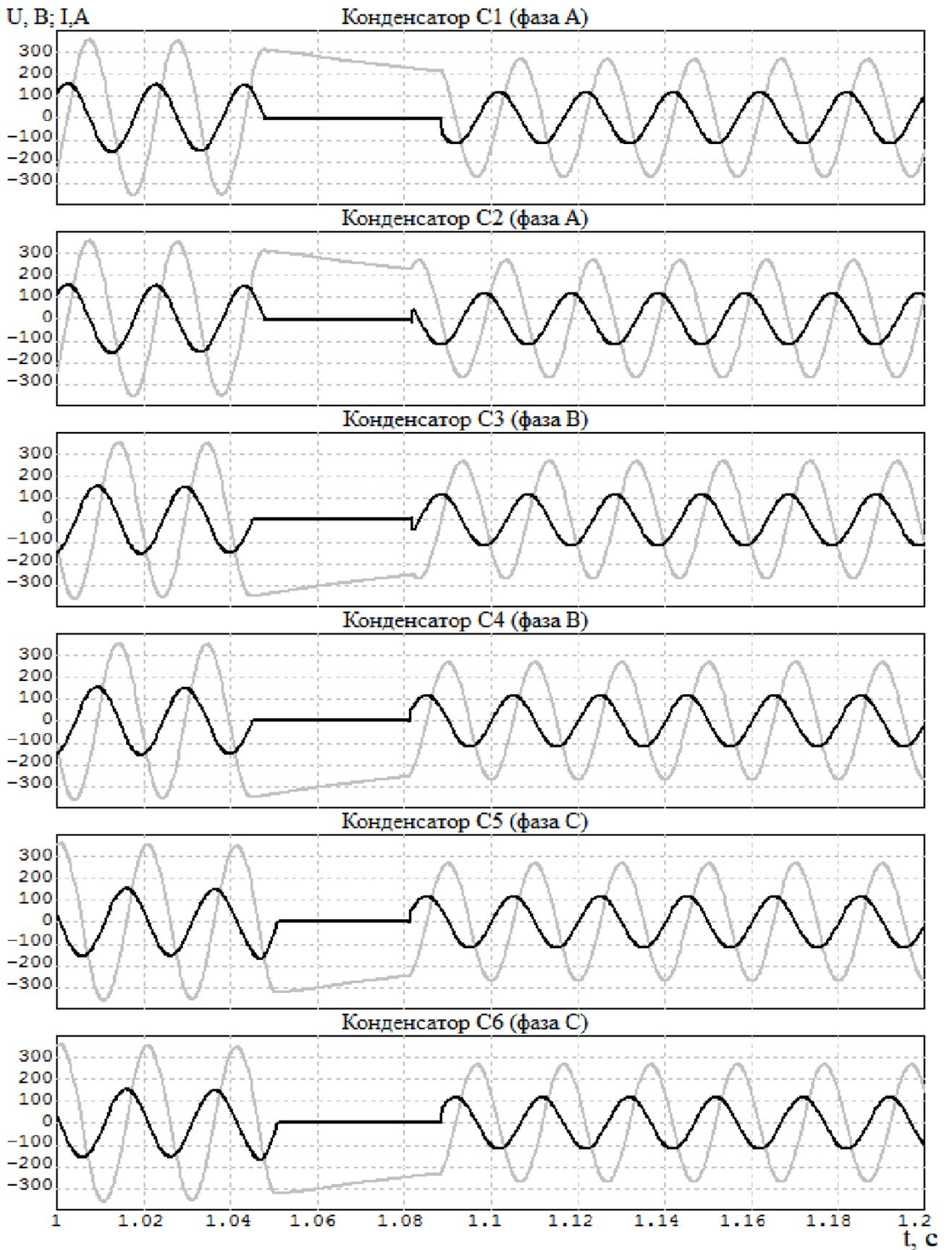


Рис. 4.21 – Графики мгновенных значений на конденсаторах в момент переключения:

— - токов; — - напряжений

4.5 Работа АД при несимметрии емкости подключаемых конденсаторов

Конденсатор, как и любой активный и реактивный элемент, имеет класс точности, указывающий допустимое отклонение емкости в процентах от номинальной величины. Конденсаторы широкого применения выпускают трех классов точности. Согласно ГОСТ 9661 – 73: I класс – с допустимым отклонением $\pm 5\%$, II класс – $\pm 10\%$, III – $\pm 20\%$. Таким образом, конденсаторы даже одного класса обладают разбросом в номинальных параметрах, который может привести к возникновению несимметричных режимов работы системы. Следовательно, возникает необходимость провести исследования влияния отклонения емкости конденсаторов от номинальных значений на процесс пуска и переключения на рабочий режим системы ПКУ – АД [29].

Проведено моделирование форсированного и плавного конденсаторного пуска для наиболее неблагоприятного случая несимметрии, в частности, когда на фазе А отклонение емкости конденсатора от номинального значения равно $+20\%$, на фазе В отклонение равно 0% , на фазе С отклонение равно -20% . Осциллограммы результатов моделирования представлены на рис. 4.22 – 4.24.

Сравнивая рис. 4.22 с рис. 4.12, рис. 4.23 с рис. 3.4 и рис. 4.24 с рис. 3.6 можно отметить, что отклонение значений емкости конденсаторов привело к возникновению колебаний действующего значения потребляемого из сети тока. В свою очередь амплитуда колебаний электромагнитного момента при активно-индуктивном характере тока увеличилась незначительно, а при активно-емкостном характере тока, как при форсированном, так и при плавном пуске с ростом частоты вращения АД наблюдается значительное увеличение амплитуды колебаний электромагнитного момента. Увеличение указанных амплитуд колебаний связано с электромагнитными и соответственно электромеханическими процессами, происходящими в электродвигателе.

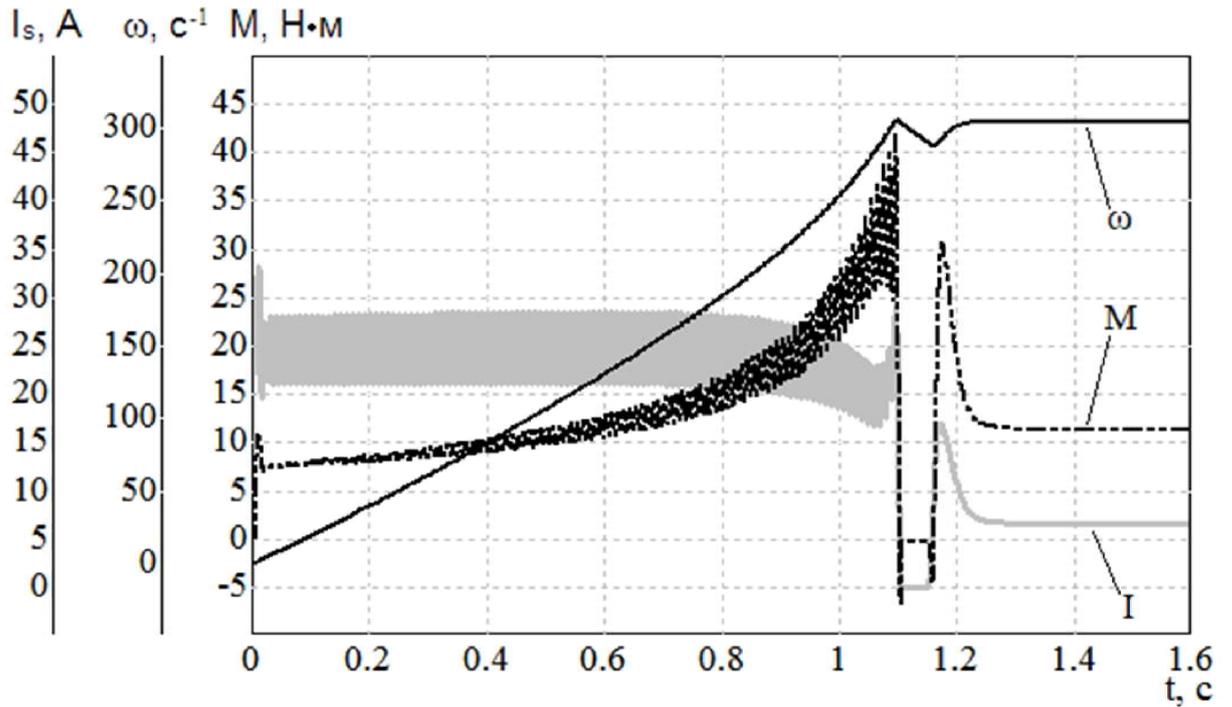


Рис. 4.22 – Результаты моделирования плавного конденсаторного пуска при несимметрии подключаемых конденсаторов ($C=280$ мкФ, переключение при увеличении тока)

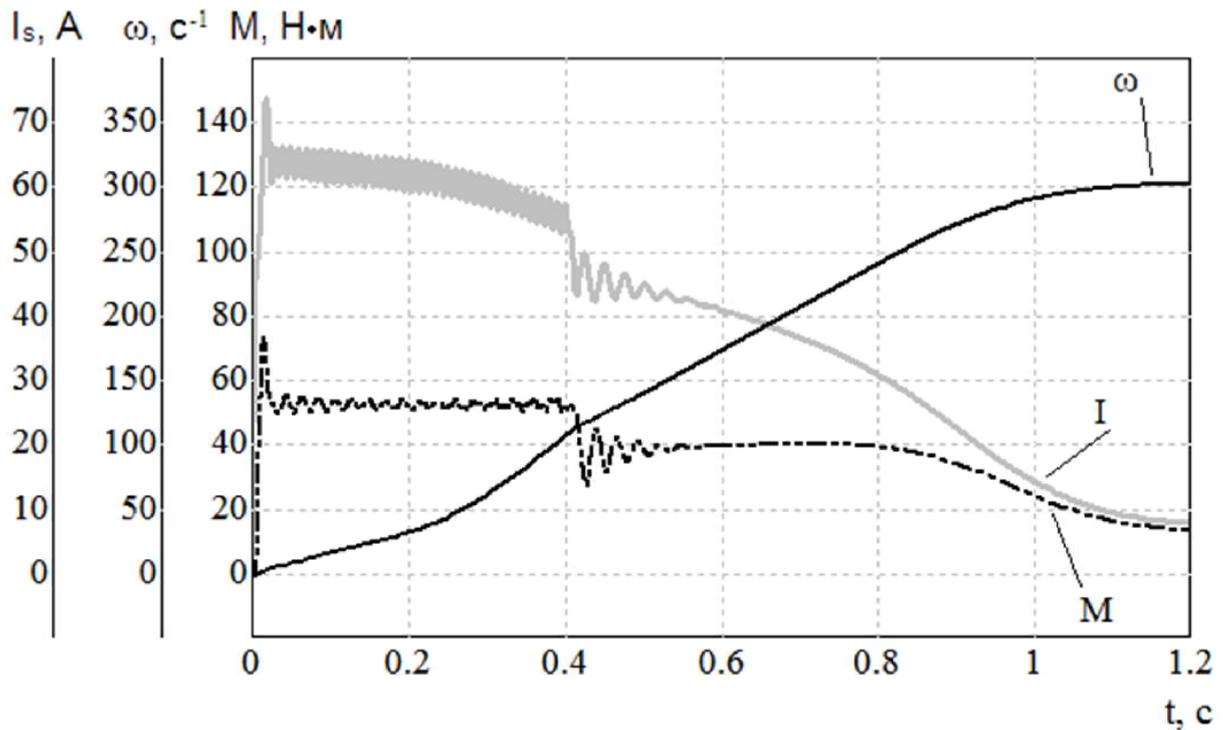


Рис. 4.23 – Результаты моделирования форсированного конденсаторного пуска с активно-индуктивным характером тока при несимметрии подключаемых конденсаторов ($C=2800$ мкФ, переключение при $n=1000$ об/мин)

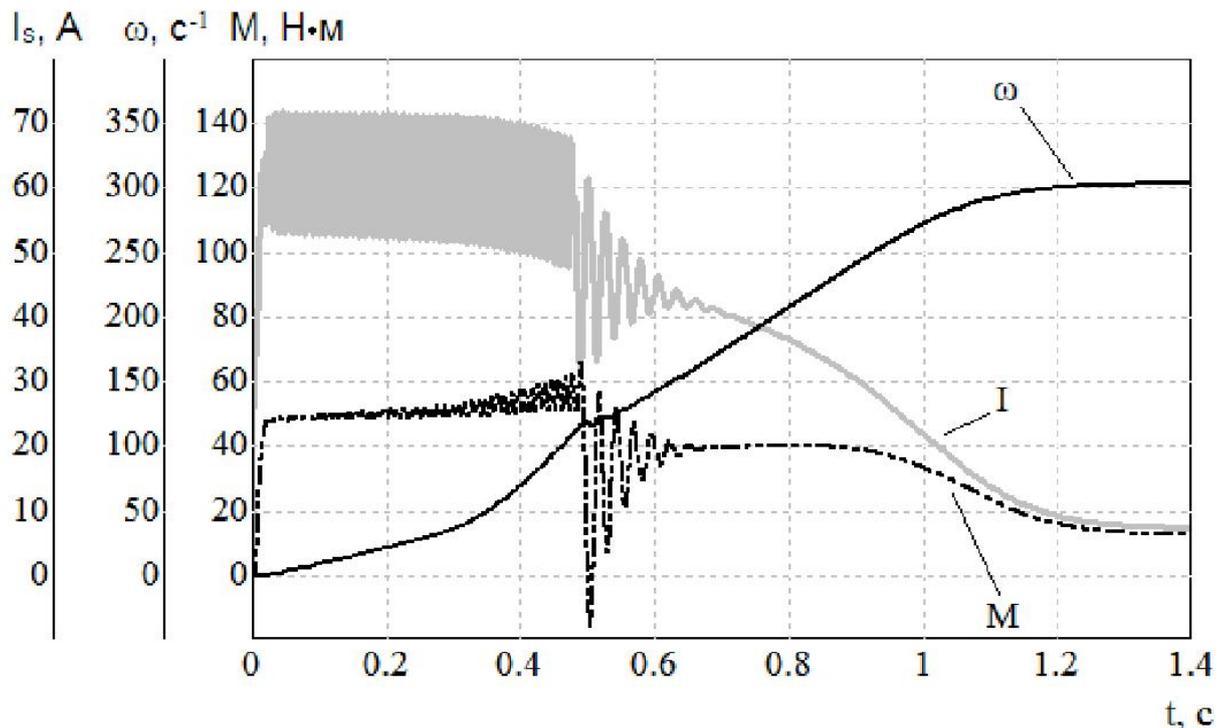


Рис. 4.24 – Результаты моделирования форсированного конденсаторного пуска с активно-емкостным характером тока при несимметрии подключаемых конденсаторов ($C=670$ мкФ, переключение при $n=1000$ об/мин)

Незначительное влияние несимметрии емкостей конденсаторов на процесс форсированного пуска с активно-индуктивным характером тока объясняется малым значением подключаемого емкостного сопротивления.

При помощи математической модели установлено, что при форсированном пуске с активно-емкостным характером тока несимметрия емкостей конденсаторов оказывает также влияние на динамику разгона. Так, несимметрия емкостей во всех трех фазах увеличивает время разгона до 20% по сравнению с симметричным режимом. Поэтому форсированный пуск с активно-индуктивным характером имеет в этом отношении преимущество.

При плавном конденсаторном пуске на динамику разгона несимметрия емкостей значительного влияния не оказывает. Однако по причине возникновения значительных колебаний электромагнитного момента можно рекомендовать для осуществления эффективного конденсаторного плавного пуска АД использование конденсаторов высокого класса точности и предварительной проверки значений емкости конденсаторов.

Выводы

1. Благоприятным моментом подключения АД на сетевое напряжение после выбега при незатухшем потокосцеплении является момент времени, когда сдвиг фаз между вектором ЭДС статора АД и вектором напряжения сети равен нулю. При этом наблюдаются минимальные броски тока, и отсутствует тормозной электромагнитный момент, а его значение не превышает своего пускового значения.

2. Установлено, что с целью исключения явления самораскачивания целесообразно отключать АД от сети при заданном значении тока статора на заключительном этапе пуска, при этом ЭДС статора превышает величину напряжения сети.

3. При использовании в качестве контактора электромагнитного пускателя возможно возникновение условий, при которых АД после выбега подключается электромагнитным контактором на сетевое напряжение в самый неблагоприятный момент, когда ЭДС статора и напряжение сети находятся в противофазе. При этом возникает значительный тормозной момент, пиковое значение которого превышает пусковой момент АД в 2 раза, сопровождающийся соответственно броском тока, пик которого превышает значение номинального тока АД более чем в 7 раз.

4. Для переключения конденсаторного пуско-компенсирующего устройства с пускового режима на режим компенсации реактивной мощности с минимальными бросками электромагнитного момента и тока АД электродвигатель предлагается коммутировать с помощью тиристорных коммутаторов, позволяющих гарантированно подключать АД к сети в момент совпадения фаз вектора ЭДС статора и вектора сетевого напряжения.

5. Целесообразным является включение АД на сеть производить при увеличении напряжения на обмотках статора на 20-30% от номинального с последующей выдержкой бестоковой паузы, когда векторы напряжения сети и ЭДС в обмотках статора в момент подключения электродвигателя к сети будут

совпадать как по величине, так и по фазе, что минимизирует переходные токи и момент АД

6. Наиболее благоприятным способом подключения конденсаторов на линейное напряжение сети является способ, при котором заряженные конденсаторы подключаются к сети в момент равенства напряжений на конденсаторах мгновенному значению линейного напряжения сети между соответствующими фазами. В этом случае свободные составляющие тока не возникают. Для реализации данного способа коммутации конденсаторов предлагается применять тиристорные коммутаторы.

7. Разработана схема конденсаторного ПКУ, в которой для благоприятного переключения конденсаторов с пускового режима на режим компенсации реактивной мощности, а также благоприятного подключения АД на сетевое напряжение применены тиристорные коммутаторы.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАЗРАБОТАННОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С КОНДЕНСАТОРНЫМ ПУСКО-КОМПЕНСИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

В настоящей главе представлены результаты экспериментального исследования системы «Асинхронный двигатель – Конденсаторное пуско-компенсирующее устройство», приведено описание схемы системы управления, основных узлов пуско-компенсирующего устройства, проведена оценка экономической эффективности.

5.1 Схема системы управления конденсаторным пуском АД

В приточных вентиляционных камерах (ПВК), обслуживающих здания производства полипропилена завода Полиолефинов ПАО «Нижекамскнефтехим», электродвигатели вентиляторов питаются от преобразователей частоты. Однако в процессе работы ПВК производительность вентилятора не регулируется, а частота и уровень выходного напряжения преобразователей частоты равны номинальным значениям: 380В, ~50Гц. Фактически преобразователи частоты применяются лишь в качестве устройств плавного пуска электродвигателей вентиляторов. Поэтому после выхода из строя одного из преобразователей частоты, мощность которого составляла 4 кВт, была проведена реконструкция системы управления плавным пуском электропривода вентилятора на микропроцессорную систему управления с конденсаторным пуско-компенсирующим устройством и проведены необходимые экспериментальные исследования.

Акт внедрения микропроцессорной системы управления с конденсаторным устройством представлен в приложении настоящей работы.

Реализованное конденсаторное устройство для пуска и компенсации реактивной мощности служит для ограничения тока статора асинхронного двигателя во время пуска, а также повышения коэффициента мощности электропривода во время работы.

Сущность устройства поясняется его принципиальной схемой, представленной на рис. 5.1.

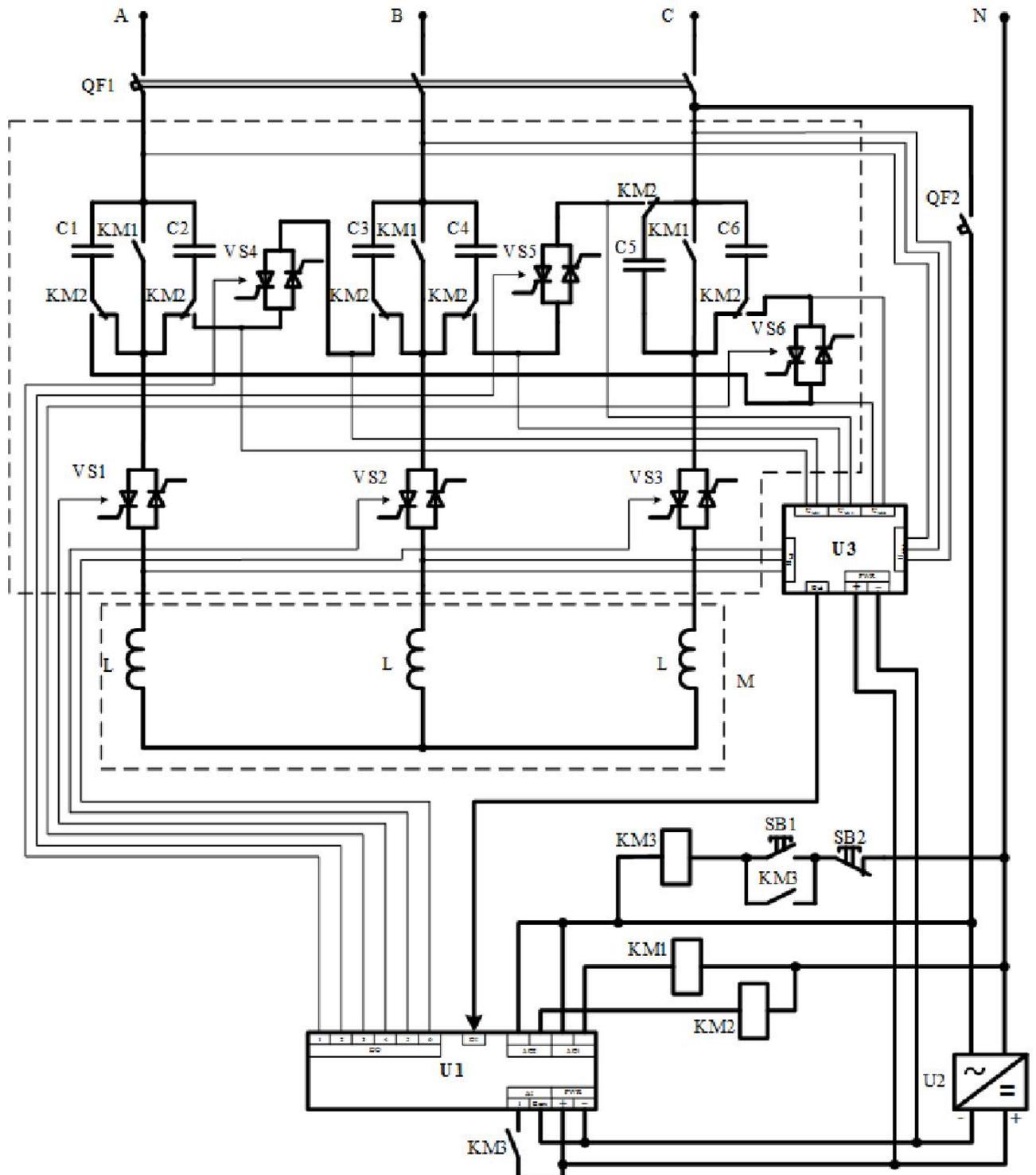


Рис. 5.1 – Принципиальная схема ПКУ

Устройство содержит: трехфазный выключатель QF1, клеммы которого подключаются к первым клеммам конденсаторов C1, C2, C3, C4, C6 и через контакт коммутационного аппарата KM2 к первому клемме конденсатора C5,

вторые зажимы конденсаторов C1, C2, C3, C4, C6 через контакты коммутационного аппарата KM2, а второй зажим конденсатора C5 напрямую, подключаются к первым зажимам тиристорных коммутаторов VS1, VS2, VS3; коммутационный аппарат KM1, который присоединен к первым зажимам тиристорных коммутаторов VS1, VS2, VS3 и вторым зажимам трехфазного выключателя QF1, коммутационный аппарат соединяет электродвигатель напрямую к сети в рабочем режиме; тиристорные коммутаторы VS1, VS2, VS3, вторые зажимы которых подключены к обмоткам статора электродвигателя; коммутационный аппарат KM2 и тиристорные коммутаторы VS4, VS5, VS6, которые переключают параллельные группы конденсаторов C1-C2, C3-C4, C5-C6 в последовательные группы C1-C6, C2-C3, C4-C5; контроллер U1, блок питания U2, измерительную плату U3 и однофазный выключатель QF2.

Для пуска электродвигателя включается трехфазный и однофазный выключатели QF1 и QF2, после этого через блок питания U2 подается напряжение на контроллер U1. Нажатием кнопки пуск SB1 замыкается контакт KM3 и на контроллер подается сигнал, разрешающий работу. Контроллер подает управляющие сигналы на открытие тиристорных коммутаторов VS1, VS2, VS3, которые подключают параллельные группы конденсаторов C1-C2, C3-C4, C5-C6 к обмоткам статора с приложенным к ним напряжением, за счет падения напряжения на конденсаторах происходит пуск двигателя с ограничением приложенного напряжения. Через промежуток времени, за который приложенное к обмоткам статора напряжение достигает номинального значения, контроллер U3 снимает управляющие сигналы с тиристорных коммутаторов VS1, VS2, VS3 в порядке VS2->VS1->VS3 и после выдержки времени, за которую при снижении тока через них до нуля тиристорные коммутаторы закрываются, подает питание на катушки коммутационных аппаратов KM1, KM2, подключая конденсаторы последовательными группами C1-C6, C2-C3, C4-C5 параллельно обмоткам статора, и после выдержки бестоковой паузы снова подает управляющие сигналы на открытие тиристорных коммутаторов VS1, VS2, VS3, при этом электродвигатель подключается напрямую к сети и

разгоняется до номинальной частоты вращения. Одновременно с этим контроллер следит за напряжением на тиристорных коммутаторах VS4, VS5, VS6 и в оптимальный момент подает на них управляющие сигналы. Тиристорные коммутаторы VS4, VS5, VS6 открываются и подключают группы конденсаторов C1-C6, C2-C3, C4-C5 на компенсацию реактивной мощности электродвигателя. Самоподхват кнопки пуск SB1 производит катушка KM3 и контакты коммутационного аппарата KM3.

Как показали испытания, предложенное изобретение обеспечивает плавный пуск асинхронных двигателей вентиляторов и компенсирует реактивную мощность в рабочем режиме. Микропроцессорная система управления осуществляет быстрое и эффективное управление пуском, переходными режимами и компенсацией реактивной мощности.

5.2 Реализация микропроцессорной системы управления конденсаторным пуско-компенсирующим устройством

Основой системы управления разработанного пуско-компенсирующего устройства является плата U1, собранная из набора для разработчиков STM32VLDISCOVERY фирмы ST Microelectronics на базе микроконтроллера STM32F100RBT6B этой же фирмы.

Фирма ST Microelectronics для продвижения на рынке своих устройств для каждого семейства выпускает отладочную плату Discovery для быстрого знакомства с ними и освоения.

Платы Discovery содержат встроенный отладчик/программатор, работающий по протоколу STLINK и позволяющий программировать и отлаживать, как внутренний (смонтированный на плате) микроконтроллер, так и внешний, подключаемый при помощи расположенной на плате штыревой линейки. Подключение отладчика ST-LINK к персональному компьютеру осуществляется через USB интерфейс, также через него происходит питание всей платы [52].

По периметру плат Discovery расположены штыревые линейки с шагом

2,54 мм, каждый вывод которой соединён с одноименным выводом микроконтроллера, что позволяет вставлять эту плату в свои устройства.

Внешний вид отладочной платы представлен на рис. 5.2.

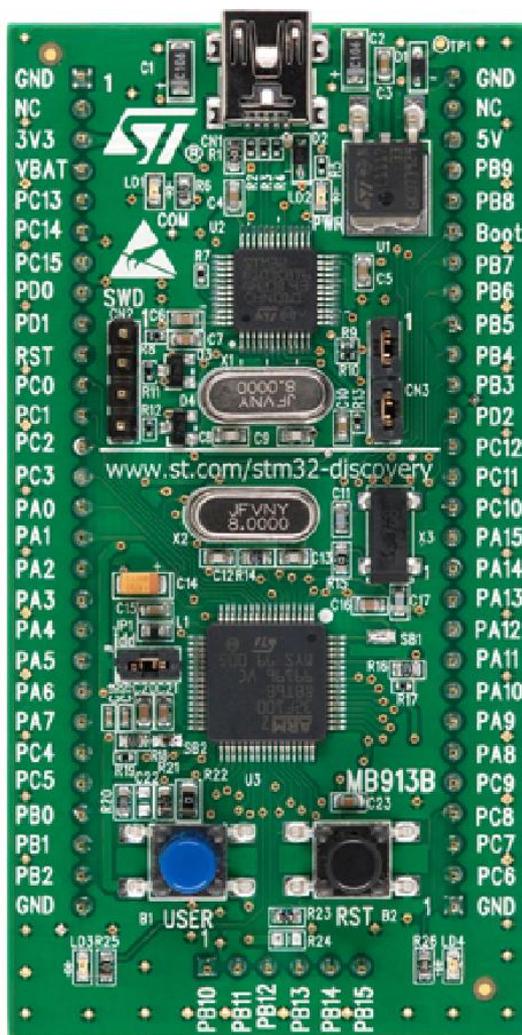


Рис. 5.2 – Внешний вид отладочной платы STM32VLDISCOVERY

Данная плата STM32VLDISCOVERY помимо общих для Discovery элементов содержит: два кварцевых резонатора: на 8 МГц (является заменяемым) и часовой (32768 Гц), две кнопки: сброса и пользовательскую (помеченную как USER), два светодиода (LD3 и LD4) и переключку JP1 для измерения тока потребления по цифровой цепи питания микроконтроллера. Питание платы может осуществляться как через разъем USB mini, так и через линии 5 вольт и 3,3 вольта выведенные на выводы штыревой линейки (5 вольт промаркирован «5V», 3,3 вольта - «3V3»).

Отличительные особенности набора STM32VLDISCOVERY:

1. микроконтроллер STM32F100RBT6B:
 - 32-битное ядро Cortex-M3;
 - Flash-память программ 128 Кбайт;
 - RAM 8 Кбайт;
 - таймер с расширенными функциями;
 - шесть таймеров общего назначения;
 - коммуникационные интерфейсы: 2xSPI, 2xI2C, 3xUSART;
 - 16-канальный 12-битный АЦП;
 - двухканальный 12-битный ЦАП;
 - напряжение питания 2,0...3,6 В;
2. внутрисхемный отладчик/программатор ST-Link:
 - интерфейс USB;
 - переключатель для использования платы в качестве отдельного устройства ST-Link;
3. питание возможно от USB интерфейса или от внешнего источника;
4. два светодиода индикации состояния;
5. два пользовательских светодиода, пользовательская кнопка, кнопка "Сброс";
6. все линии ввода/вывода микроконтроллера выведены на разъем расширения.

Измерительная плата U3 непрерывно измеряет мгновенные значения линейных напряжений сети, линейных напряжений обмоток статора и напряжений между силовыми зажимами тиристорных коммутаторов VS4, VS5, VS6. С этой целью на ней установлены согласующие трансформаторы напряжения, уровни сигналов с которых преобразуются до рабочих уровней входов микроконтроллера. Согласованные по уровню сигналы посылаются на входы микроконтроллера.

Логика работы программы микроконтроллера поясняется структурной схемой, представленной на рис. 5.3.

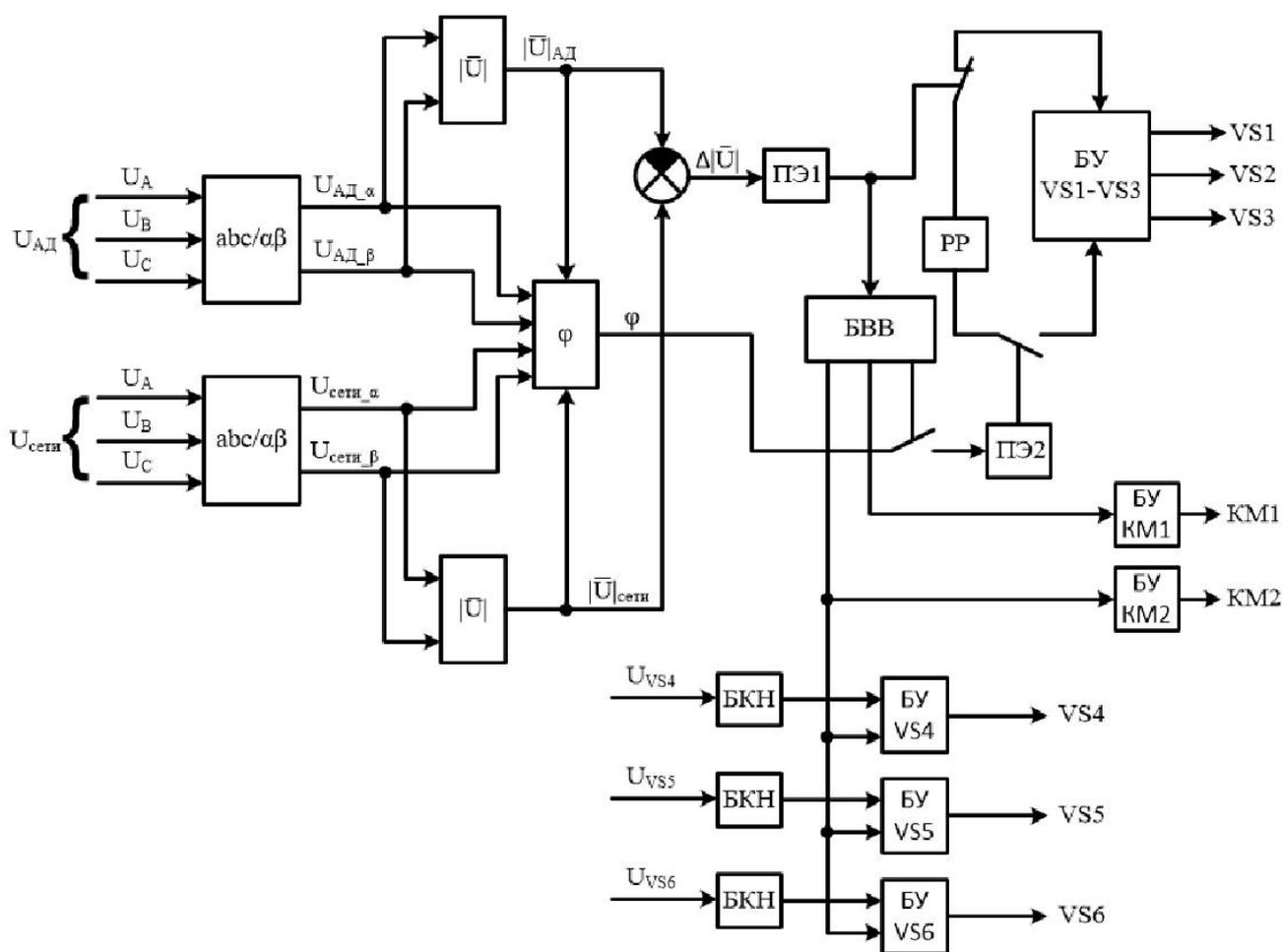


Рис. 5.3 – Структурная схема работы логики ПКУ

Логика контроллера работает следующим образом. После нажатия кнопки пуск на аналоговый вход контроллера подается напряжение, что соответствует сигналу разрешения работы с блока «PP», который подается на блок управления тиристорными коммутаторами VS1, VS2, VS3 «БУ VS1-VS3», который в свою очередь посылает управляющие сигналы на открытие тиристорных коммутаторов VS1, VS2, VS3. Измеренные мгновенные значения фазных напряжений сети и статора электродвигателя в блоках «abc/αβ» преобразуются в проекции обобщенных векторов напряжений на оси α-β неподвижной системы координат, после чего определяются модули обобщенных векторов $|\overline{U}|_{АД}$ и $|\overline{U}|_{сети}$, а также угол φ между векторами. Разница модулей обобщенных векторов $|\overline{U}|_{АД}$ и $|\overline{U}|_{сети}$ подается на пороговый элемент «ПЭ1», на котором сравнивается с пороговым значением. При достижении порогового значения блок «ПЭ1» отключает сигнал разрешения работы с блока «PP» на блок «БУ VS1-VS3» и

подает сигнал на блок выдержки времени «БВВ». Блок «БВВ» после выдержки времени, необходимой для закрытия тиристорных коммутаторов VS1, VS2, VS3, посылает сигналы на блоки управления коммутационными аппаратами КМ1 «БУ КМ1» и КМ2 «БУ КМ2», блоки управления тиристорными коммутаторами VS4-VS6 «БУ VS4», «БУ VS5», «БУ VS6», а также включает подачу сигнала угла между обобщенными векторами напряжений сети и статора электродвигателя на пороговый элемент «ПЭ2». При достижении порогового значения блок «ПЭ2» включает подачу сигнала разрешения работы с блока «РР» на блок «БУ VS1-VS3». Мгновенные значения напряжений на между силовыми жимами тиристорных коммутаторов VS4-VS6 подаются на блоки контроля нуля «БКН». При определении нулевого значения напряжения блоки «БКН» посылают сигналы на соответствующие блоки управления тиристорными коммутаторами VS4-VS6 «БУ VS4», «БУ VS5», «БУ VS6», которые в свою очередь посылают управляющие сигналы на открытие соответствующих тиристорных коммутаторов VS4-VS6.

Таки образом, основными возложенными на микропроцессорную систему управления функциями являются:

- отключение электродвигателя от конденсаторов по достижении порогового значения напряжения на обмотках статора;
- переключение параллельных групп конденсаторов на завершающем этапе плавного пуска электродвигателя на последовательные группы конденсаторов с целью компенсации реактивной мощности в процессе работы в целесообразный момент времени;
- благоприятное подключение электродвигателя на сетевое напряжение после выбега;
- учет необходимых временных задержек для выдачи управляющих сигналов.

5.3 Результаты экспериментальных исследований

Для подтверждения теоретических результатов полученных с помощью

математической модели системы ПКУ-АД проведено экспериментальное исследование пускового, переходного и рабочего режимов работы ПКУ действующего электропривода вентилятора приточной вентиляционной камеры (ПВК), обслуживающей здание хроматографии производства полипропилена завода Полиолефинов ПАО «Нижекамскнефтехим». При проведении экспериментальных исследований в целях получения и архивирования значений измеряемых параметров были использованы токовый пробник LEM~flex RR3030 и цифровой осциллограф-мультиметр типа Fluke 123.

Гибкий токовый пробник LEM~flex применяется совместно с осциллографами и другими регистрирующими приборами. Идеален для измерения тока в кабелях большого диаметра, к которым затруднен доступ.

Основные характеристики:

- диапазоны измерения тока: 30/300/3000 А;
- выходная чувствительность: 100 мВ/А / 10 мВ/А / 1 мВ/А;
- точность: $\pm 1\%$ (от диапазона) (45 – 65 Гц);
- частотный диапазон: от 10 Гц до 50 кГц (-3дБ);
- погрешность фазы: $<\pm 1^\circ$ (45 – 65 Гц), $\pm 10^\circ$ (20 кГц);
- подключается через стандартный BNC-разъем;
- длина измерительной головки: 610 мм;
- максимальный диаметр кабеля: 178мм.

Fluke 123 – это двухканальный цифровой осциллограф с полосой пропускания 20 МГц и двухканальный цифровой мультиметр. Осциллограф предназначен для регистрации и архивирования измеряемых параметров АД. Основные технические характеристики цифрового осциллографа-мультиметра представлены в табл. 5.1.

Результаты исследования приведены ниже в виде графиков изменения мгновенных значений фазных токов и напряжений статора АД.

Таблица. 5.1. Технические данные цифрового осциллографа Fluke 123

Параметры	Значения
Канал вертикального отклонения	
Полоса пропускания (-3 дБ)	0 – 20 МГц
Коэффициент отклонения ($K_{откл}$)	5 мВ/дел – 500 В/дел
Погрешность установки	$\pm(1\% + 0,05 \times K_{откл})$
Время нарастания	<17,5 нс
Входной импеданс	1 Мом/20 пФ
Макс. входное напряжение	600 В ср. кв
Режим работы	Канал 1(2), канал 1(2) инвертированный, каналы 1 и 2
Канал горизонтального отклонения	
Коэф. развертки ($K_{разв}$)	20 нс/дел – 5 с/дел
Погрешность установки $K_{разв}$	$\pm(0,1\% + 0,04 \times K_{разв})$
Режимы работы	Основной, медленная развертка (1 – 60 с/дел)
Синхронизация	
Источники синхросигнала	Канал 1, канал 2, внешний
Режим запуска развертки	Авто, автоколебательный, ждущий, однократный, ТВ
Фильтры синхронизации	Связь по перем. или пост. току
Вход внешней синхронизации	Оптически изолированный вход
Сбор данных	
Разрешение по вертикали	8 бит
Макс. частота дискретизации	25 МГц (однокр. сигнал); эквив. 1,25 ГГц (период. сигнал)
Режимы сбора данных	Выборка, пик. детектор (> 40 нс), сглаживание, накопление
Автоматические измерения	
Функции по вертикали	U(I) переменное, постоянное, переменное со смещением, пик, дБ, коэф. амплитуды
Функции по горизонтали	Частота, +/- коэф. Заполнения, +/- ширина импульса, фаза

Мультиметр	
Макс. пределы измерений	1250 В, 10 МА (с датчиком), 30 Мом, 50/70 МГц, 500 мкФ
Макс. разрешение	0,1 мВ; 10 мкА; 0,1 Ом; 1 Гц; 10 пФ
Базовая погрешность	±0,5 %
Дополнительные функции	Автоудержание
Регистратор TREND PLOT	
Режимы работы	График мин/макс/ср. с метками даты и времени
Источник сигнала	Канал 1 (2), 1 и 2
Длительность записи	120 с (15 с/дел) – 16 суток (48 ч/дел)

На рис. 5.4 изображены экспериментальные и расчетные огибающие напряжения на обмотках статора АД в режиме конденсаторного пуска с ограничением приложенного напряжения. Емкости конденсаторов равны $C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=100 \text{ мкФ}$.

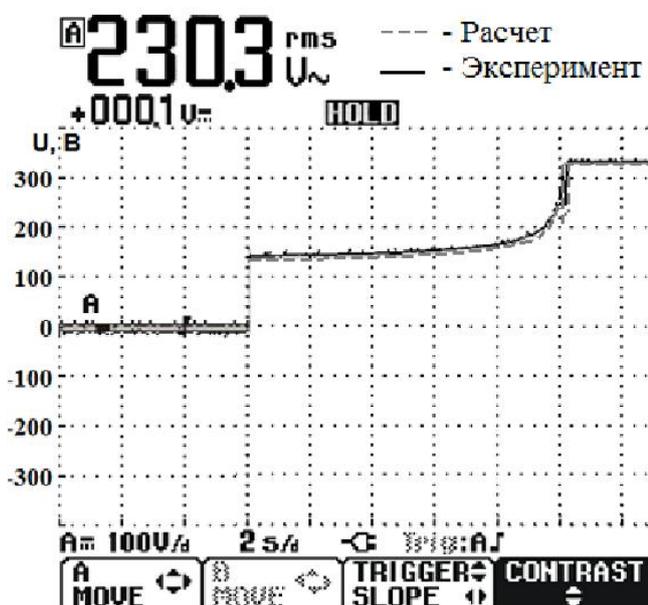


Рис. 5.4 – Расчетная и экспериментальная огибающие напряжения на обмотках статора АД при пуске через ПКУ ($C=100 \text{ мкФ}$)

На рис. 5.5 изображены экспериментальные и расчетные огибающие тока фазы статора АД в режиме конденсаторного пуска с ограничением приложенного напряжения. Емкости конденсаторов равны $C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=100 \text{ мкФ}$.

$$C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=100 \text{ мкФ}.$$

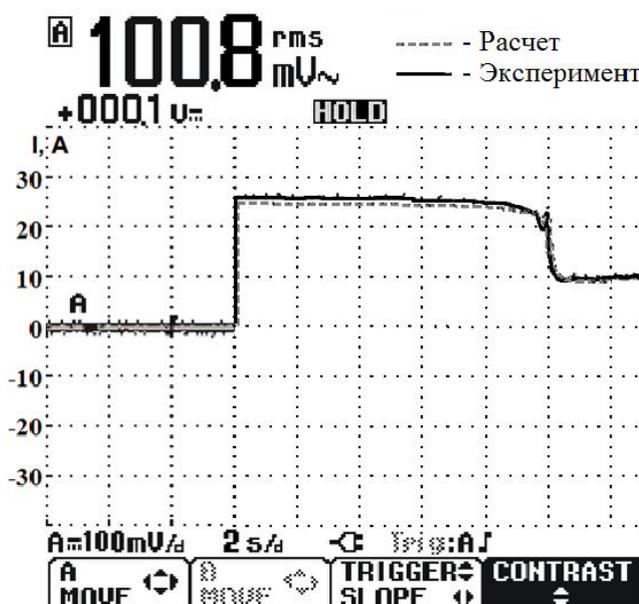


Рис. 5.5 – Расчетная и экспериментальная огибающие тока фазы статора АД при пуске через ПКУ ($C=100 \text{ мкФ}$)

На рис. 5.6 изображены экспериментальные и расчетные огибающие тока фазы статора АД в момент переключения ПКУ с режима конденсаторного пуска на режим компенсации реактивной мощности.

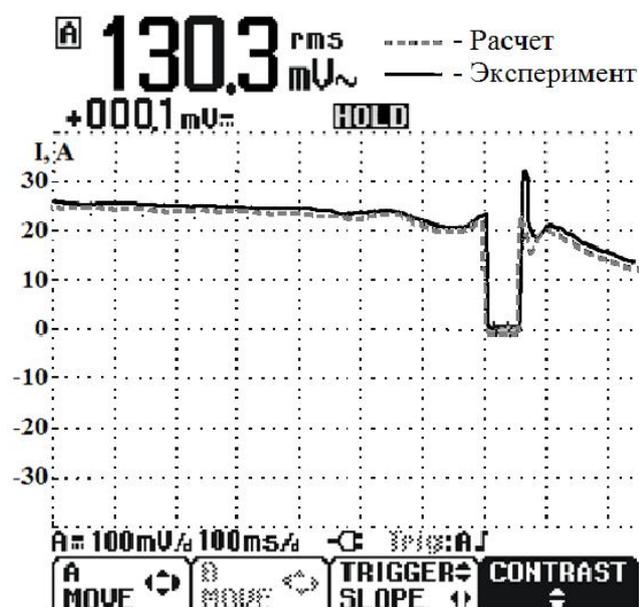


Рис. 5.6 – Расчетная и экспериментальная огибающие тока фазы статора АД в переходном режиме

Из осциллограмм экспериментального исследования можно заключить, что конденсаторный пуск АД позволяет снизить значение пускового тока за счет снижения приложенного к обмоткам статора напряжения, однако это приводит к

увеличению времени пуска. Также контролируемое переключение АД с питания от конденсаторов на питание от сети приводит к исключению возникновения значительных переходных амплитуд тока и соответственно электромагнитного момента АД. Полученный результат подтверждает теоретические положения работы, полученные при математическом моделировании пуско-компенсирующих режимов работы ПКУ.

Для определения адекватности математической модели ПКУ оценивается погрешность математического эксперимента.

Выделяют четыре источника погрешности математического эксперимента: математическая модель, исходные данные, численный метод и округления в процессе вычислений.

Выявлено, что для данных экспериментов основная составляющая погрешности – погрешность математической модели, так как исходные данные получены на основе паспортных, для численных вычислений используется стандартный метод Рунге-Кутты с регулируемой погрешностью, а погрешность округления при этом пренебрежимо мала.

Погрешность математической модели связана с приближенностью математического описания физического явления, обусловленной как сознательной его схематизацией в целях упрощения задачи, так и относительностью и ограниченностью существующих знаний об окружающем мире. Количественно оценить эту составляющую погрешности результатов математического эксперимента можно лишь путем их прямого сопоставления с данными натурального эксперимента. Однако провести такое сопоставление часто не представляется возможным. В этой связи условием достоверности математической модели следует считать ее удовлетворение критерию практики, при этом требование критерия практики – это не только соответствие полученных результатов прямому эксперименту, но и то, что полученные с помощью данной модели результаты способствуют достижению целей, стоящих перед исследователем.

Определение погрешности результатов математического эксперимента

выполняется путем сравнения их с результатами физического эксперимента. Для сравнения выбраны следующие параметры: I_{II} – значение фазного тока статора электродвигателя; U_{II} – начальное значение напряжения, приложенного к обмоткам статора электродвигателя; t_{mn} – время переходного процесса (время, за которое напряжение, приложенное к обмоткам статора электродвигателя, достигает номинального значения); $t_{выбега}$ – время выбега электродвигателя при переключении его на сетевое напряжение. Расчет относительной погрешности δ произведен по известной формуле:

$$\delta = (x - X) / X, \quad (5.1)$$

где x – результат эксперимента, а X – истинное значение искомой величины.

В качестве истинного значения приняты значения физического эксперимента.

Получены следующие значения относительных погрешностей: $\delta(I_{II})=3,5-5\%$, $\delta(U_{II})=4,9-7,5\%$, $\delta(t_{mn})=3,9-6,5\%$, $\delta(t_{выбега})=5,5-7,5\%$, что позволяет сделать вывод об адекватности разработанной математической модели системы пуско-компенсирующее устройство – асинхронный двигатель и пригодности для исследования пускового и рабочего режимов работы установок данного типа. Результаты экспериментальных исследований подтвердили основные выводы, полученные при помощи математического моделирования.

5.4 Экономическая оценка использования ПКУ

После выхода из строя преобразователя частоты, питающего электродвигатель вентилятора приточной вентиляционной камеры (ПВК), обслуживающей здания производства полипропилена завода Полиолефинов ПАО «Нижекамскнефтехим», появилась возможность трех вариантов замены:

- замена на преобразователь частоты аналогичной мощности;
- замена преобразователя частоты устройством плавного пуска;
- замена преобразователя частоты конденсаторным пуско-компенсирующим устройством.

Поэтому для определения экономической эффективности возникла необходимость сравнения затрат для нескольких вариантов устройства

ограничения пусковых токов асинхронного электропривода, в числе которых тиристорное устройство плавного пуска, преобразователь частоты и исследуемое пуско-компенсирующее устройство.

Расчет затрат производится по следующим статьям:

- материалы и комплектующие изделия;
- энергия на внутреннее потребление;
- амортизация оборудования;

Считаем, что экономический эффект пускового режима для всех трех устройств одинаков. Экономия для конденсаторного ПКУ достигается за счет компенсации реактивной мощности в рабочем режиме.

5.4.1 Методика расчета экономического эффекта

Расчет экономической эффективности производится путем сравнения затрат:

$$\mathcal{E}_r = \mathcal{Z}_1 - \mathcal{Z}_2,$$

где \mathcal{Z}_1 – затраты базового варианта, \mathcal{Z}_2 – затраты после модернизации.

Общие затраты:

$$\mathcal{Z} = \mathcal{E}_{кр} + E_n \cdot \Delta K,$$

где ΔK – капиталовложения, $E_n=20\%$ – нормативный коэффициент окупаемости, $\mathcal{E}_{кр}$ – эксплуатационные расходы, определяемые по формуле:

$$\mathcal{E}_{кр} = \mathcal{E}_л + A + P_m,$$

где $\mathcal{E}_л$ – затраты на электричество, A – затраты на амортизацию, P_m – затраты на ремонт и обслуживание.

5.4.2 Расчет капиталовложений

В качестве капиталовложений используется стоимость устройства ограничения пускового тока асинхронного электропривода. Стоимость устройства рассчитываем исходя из его цены.

Цена проектируемого изделия

$$C_n = C + P_p,$$

$$P_p = (0,2 \div 0,25) \cdot C.$$

где P_p – прибыль; C – полная себестоимость изделия.

Расчет себестоимости производится по технологии, которая включает в себя следующие затраты:

$$C = M + Z_{пл} + N_p$$

где M – затраты на комплектующие, $Z_{пл}$ – затраты на заработную плату, N_p – накладные расходы.

Рассчитаем стоимость покупных комплектующих изделий по данным таблицы 5.2. В таблице 5.3 представлены цены на комплектующие детали конденсаторного пуско-компенсирующего устройства.

Таблица 5.2 Стоимость покупных комплектующих изделий

№ п/п	Наименование	Кол-во, шт.	Цена, руб.	Итого
1	Преобразователь частоты Schneider-Electric Altivar ATV212 4КВТ 480В IP21	1	13056,21	13056,21
2	Устройство плавного пуска Siemens SIRIUS 3RW3016-1BB14	1	11114,64	11114,64
3	Конденсаторное пуско-компенсирующее устройство (таблица 5.3)	1	12902,27	12902,27

По данным таблицы 5.2:

Затраты варианта с преобразователем частоты $K_1 = 13056,21$ руб.

Затраты варианта с тиристорным устройством плавного пуска $K_2 = 11114,64$ руб.

Затраты варианта с конденсаторным пуско-компенсирующим устройством $K_3 = 12902,27$ руб.

Таблица 5.3 Стоимость комплектующих деталей ПКУ

№ п/п	Наименование	Кол-во, шт.	Цена, руб.	Итого
1	Конденсатор СВВ60, 50мкФ, 450В	12	458,66	5503,87
2	Блок питания 220АС/5DC 2А	1	880	880
3	Микропроцессорная плата управления STM32VLDISCOVERY фирмы ST Microelectronics	1	1824	1824
4	Симистор ВТА40-600В, 40А 600В	3	592	1776
5	Симистор ВТА208-800В, 8А 800В	3	108,8	326,4
6	Трансформатор напряжения ТПК-0.7 (220/12В, 0.06А)	9	288	2592
		Итого		12902,27
7	Прочее оборудование (25% от стоимости деталей)	1	3195,46	3225,57
		Итого		16127,84

Заготовительно-транспортные расходы составляют 25% от стоимости покупных изделий:

$$ЗТР_1 = 0,25 \cdot K_1 = 0,25 \cdot 13056,21 = 3264,05 \text{ руб.}$$

$$ЗТР_2 = 0,25 \cdot K_2 = 0,25 \cdot 11114,64 = 2778,66 \text{ руб.}$$

$$ЗТР_3 = 0,25 \cdot K_3 = 0,25 \cdot 12902,27 = 3225,57 \text{ руб.}$$

Стоимость материалов и комплектующих

$$M_1 = K_1 + ЗТР_1 = 13056,21 + 3264,05 = 16320,26 \text{ руб.}$$

$$M_2 = K_2 + ЗТР_2 = 11114,64 + 2778,66 = 13893,3 \text{ руб.}$$

$$M_3 = K_3 + ЗТР_3 = 12902,27 + 3225,57 = 16127,84 \text{ руб.}$$

Общая заработная плата в расчете не учитывается, так как монтаж производится штатными сотрудниками предприятия:

$$З_{пл} = 0 \text{ руб.}$$

Затраты на накладные расходы составляют 10% от стоимости материалов и комплектующих:

$$H_{p1} = 0,1 \cdot M_1 = 0,1 \cdot 16320,26 = 1632,03 \text{ руб.}$$

$$H_{p2} = 0,1 \cdot M_2 = 0,1 \cdot 13893,3 = 1389,33 \text{ руб.}$$

$$H_{p3} = 0,1 \cdot M_3 = 0,1 \cdot 16127,84 = 1612,78 \text{ руб.}$$

Общая себестоимость

$$C_1 = M_1 + Z_{пл} + H_{p1} = 16320,26 + 0 + 1632,03 = 17952,29 \text{ руб.}$$

$$C_2 = M_2 + Z_{пл} + H_{p2} = 13893,3 + 0 + 1389,33 = 15282,63 \text{ руб.}$$

$$C_3 = M_3 + Z_{пл} + H_{p3} = 16127,84 + 0 + 1612,78 = 17740,62 \text{ руб.}$$

Величина капиталовложений равна себестоимости

$$\Delta K_1 = C_1 = 17952,29 \text{ руб.}$$

$$\Delta K_2 = C_2 = 15282,63 \text{ руб.}$$

$$\Delta K_3 = C_3 = 17740,62 \text{ руб.}$$

В таблице 5.4 представлены результаты расчетов себестоимости устройств ограничения пусковых токов асинхронного электропривода.

Таблица 5.4 – Калькуляция себестоимости вариантов устройства ограничения пусковых токов АД

Калькуляционные статьи расходов	1-ый вариант, руб	2-ой вариант, руб	3-ий вариант, руб
Покупные комплектующие изделия	16320,26	13893,3	16127,84
Затраты на накладные расходы	1632,03	1389,33	1612,78
Полная себестоимость	17952,29	15282,63	17740,62

5.4.3 Расчет эксплуатационных расходов

Эксплуатационные расходы

$$\mathcal{E}_{кр} = \mathcal{E}_л + A + P_m + O_б$$

Отчисления на оплату стоимости годового потребления электроэнергии (тарифная ставка 1 кВт/ч равна 1,91 руб., P – мощность, потребляемая из сети, t – время работы электродвигателя $t = 8700$ ч):

$$\mathcal{E}_л = P \cdot t \cdot 1,91 = 4 \cdot 8700 \cdot 1,91 = 66468 \text{ руб.}$$

Затраты на амортизацию составляют 5% от ΔK

$$A_1 = 0,05 \cdot \Delta K_1 = 0,05 \cdot 17952,29 = 897,61 \text{ руб.}$$

$$A_2 = 0,05 \cdot \Delta K_2 = 0,05 \cdot 15282,63 = 764,13 \text{ руб.}$$

$$A_3 = 0,05 \cdot \Delta K_3 = 0,05 \cdot 17740,62 = 887,03 \text{ руб.}$$

Затраты на ремонт составляют 2% от ΔK

$$P_{M1} = 0,02 \cdot \Delta K_1 = 0,02 \cdot 17952,29 = 359,05 \text{ руб.}$$

$$P_{M2} = 0,02 \cdot \Delta K_2 = 0,02 \cdot 15282,63 = 305,65 \text{ руб.}$$

$$P_{M3} = 0,02 \cdot \Delta K_3 = 0,02 \cdot 17740,62 = 354,81 \text{ руб.}$$

Затраты на обслуживание составляют 18% от ΔK

$$O_{б1} = 0,18 \cdot \Delta K_1 = 0,18 \cdot 17952,29 = 3231,41 \text{ руб.}$$

$$O_{б2} = 0,18 \cdot \Delta K_2 = 0,18 \cdot 15282,63 = 2750,87 \text{ руб.}$$

$$O_{б3} = 0,18 \cdot \Delta K_3 = 0,18 \cdot 17740,62 = 3193,31 \text{ руб.}$$

Таким образом, эксплуатационные расходы

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{кр.1} &= \mathcal{E}_л + A_1 + P_{M1} + O_{б1} = 66468 + 897,61 + 359,05 + 3231,41 \\ &= 70956,07 \text{ руб.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{кр.2} &= \mathcal{E}_л + A_2 + P_{M2} + O_{б2} = 66468 + 764,13 + 305,65 + 2750,87 \\ &= 70288,65 \text{ руб.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{кр.3} &= \mathcal{E}_л + A_3 + P_{M3} + O_{б3} = 66468 + 887,03 + 354,81 + 3193,31 \\ &= 70903,15 \text{ руб.} \end{aligned}$$

5.4.4 Расчет экономии расходов за счет компенсации реактивной мощности

Определим экономию от уменьшения платы за реактивную мощность, уменьшения потерь в подводящих проводах после компенсации реактивной мощности.

Годовая экономия от уменьшения платы за реактивную энергию $\mathcal{E}_{гр}$:

$$\mathcal{E}_{гр} = C_{г1} - C_{г2} = (PP_1 - PP_2) \cdot T_p,$$

где $C_{г1}$ – годовая оплата за реактивную энергию до внедрения конденсаторной установки;

$C_{Г2}$ – годовая оплата за реактивную энергию после внедрения конденсаторной установки;

$ПР_1$ – годовое потребление реактивной энергии до внедрения конденсаторной установки;

$ПР_2$ – годовое потребление реактивной энергии после внедрения конденсаторной установки;

T_p – тариф на реактивную энергию, 0,15 руб./квар·час (8% от тарифа на активную энергию).

Годовое потребление реактивной энергии до и после внедрения конденсаторной установки определяется по формулам:

$$ПР_1 = P \cdot tg\varphi_1 \cdot 8700,$$

$$ПР_2 = P \cdot tg\varphi_2 \cdot 8700,$$

где $tg\varphi_1$, $tg\varphi_2$ – коэффициенты реактивной мощности до и после внедрения конденсаторной установки.

До внедрения $\cos\varphi_1=0,75$, следовательно $tg\varphi_1=0,88$, а после внедрения $\cos\varphi_2=0,97$, следовательно $tg\varphi_2=0,25$. Тогда:

$$ПР_1 = P \cdot tg\varphi_1 \cdot 8700 = 4 \cdot 0,88 \cdot 8700 = 30624 \text{ квар} \cdot \text{час},$$

$$ПР_2 = P \cdot tg\varphi_2 \cdot 8700 = 4 \cdot 0,25 \cdot 8700 = 8700 \text{ квар} \cdot \text{час},$$

$$\mathcal{E}_{rp} = (ПР_1 - ПР_2) \cdot T_p = (30624 - 8700) \cdot 0,15 = 3288,6 \text{ руб.}$$

Экономия от снижения потерь в подводящих проводах, если отсутствуют данные прямых измерений потерь мощности, можно оценить, используя показатель коэффициента потерь, отражающего потери в линии при доставке энергии потребителю. В среднем на действующих объектах в подводящих кабелях теряется 10...15% расходуемой активной энергии. Для расчетов примем коэффициент потерь: $K_{п}=12\%$.

В общем случае для действующего объекта годовое снижение потребления активной энергии за счет увеличения коэффициента мощности $\cos\varphi$ составит:

$$W_c = W_1 \cdot \left[1 - \frac{\cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2} \right] \cdot K_{п}$$

где: $\cos\varphi_1$ – коэффициент мощности до компенсации;

$\cos\varphi_2$ – коэффициент мощности после компенсации;

K_{Π} – коэффициент потерь, $K_{\Pi}=0,12$;

W_1 – годовое потребление энергии до компенсации.

Годовая экономия $\mathcal{E}_{\text{гп}}$ в оплате энергии составит:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{гп}} &= W_c \cdot T_a = W_1 \cdot T_a \cdot \left[1 - \frac{\cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2}\right] \cdot K_{\Pi} = \mathcal{E}_{\text{л}} \cdot \left[1 - \frac{\cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2}\right] \cdot K_{\Pi} = \\ &= 66468 \cdot \left[1 - \frac{0,75^2}{0,97^2}\right] \cdot 0,12 = 3207,8 \text{ руб.}\end{aligned}$$

где T_a – тариф на активную энергию.

Экономия в расчете на год после внедрения конденсаторной установки составит за счет снижения потребления реактивной энергии и уменьшения активных потерь в линии:

$$\mathcal{E}_{\text{г}} = \mathcal{E}_{\text{гп}} + \mathcal{E}_{\text{гр}} = 3207,8 + 3288,6 = 6496,4 \text{ руб.}$$

5.4.5 Расчет общих затрат и экономической эффективности

Общие затраты

$$З_1 = \mathcal{E}_{\text{кр.1}} + E_{\text{Н}} \cdot \Delta K_1 = 70956,07 + 0,2 \cdot 17952,29 = 74546,53 \text{ руб.}$$

$$З_2 = \mathcal{E}_{\text{кр.2}} + E_{\text{Н}} \cdot \Delta K_2 = 70288,65 + 0,2 \cdot 15282,63 = 73345,18 \text{ руб.}$$

$$\begin{aligned}З_3 &= \mathcal{E}_{\text{кр.3}} - \mathcal{E}_{\text{г}} + E_{\text{Н}} \cdot \Delta K_3 = 70903,15 - 6496,4 + 0,2 \cdot 17740,62 \\ &= 67954,87 \text{ руб.}\end{aligned}$$

Экономическая эффективность замены преобразователя частоты устройством плавного пуска составляет

$$\mathcal{E}_{\text{г1}} = З_1 - З_2 = 74546,53 - 73345,88 = 1200,65 \text{ руб.}$$

Экономическая эффективность замены преобразователя частоты разработанным конденсаторным пуско-компенсирующим устройством составляет

$$\mathcal{E}_{\text{г2}} = З_1 - З_3 = 74546,53 - 67954,87 = 6591,66 \text{ руб.}$$

Таким образом, замена преобразователя частоты, используемого в качестве УПП, разработанным конденсаторным пуско-компенсирующим устройством в

5,5 раз экономически более эффективна по сравнению с тиристорным устройством плавного пуска.

Срок окупаемости затрат равен

$$T_{\text{оз}} = \frac{\Delta K_3}{\text{Э}_r} = \frac{17740,62}{6496,4} = 2,7 \text{ года}$$

Выводы

1. Проведена реконструкция системы управления плавным пуском электропривода вентилятора приточной вентиляционной камеры (ПВК), обслуживающей здание хроматографии производства полипропилена завода Полиолефинов ПАО «Нижекамскнефтехим», на микропроцессорную систему управления с конденсаторным пуско-компенсирующим.

2. Проведено исследование пусковых и рабочих режимов АД при помощи действующей установки, что подтвердило основные положения, полученные путем математического моделирования, а также адекватность разработанной математической модели системы пуско-компенсирующее устройство – асинхронный двигатель и ее пригодность для исследования режимов работы устройства.

3. Замена преобразователя частоты, используемого в качестве УПП, разработанным конденсаторным пуско-компенсирующим устройством в 5,5 раз экономически более эффективна по сравнению с тиристорным устройством плавного пуска.

4. Расчет экономического эффекта показывает, что применение разработанного конденсаторного пуско-компенсирующего устройства позволяет обеспечить экономию денежных средств на оплату электроэнергии за счет компенсации реактивной мощности в рабочем режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача, связанная с повышением технико-экономических показателей эксплуатации асинхронных электроприводов на основе разработки конденсаторных пуско-компенсирующих устройств.

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить следующие результаты и выводы:

1. В ходе исследований выявлено, что алгоритмы переключения известных схем конденсаторных ПКУ на компенсацию реактивной мощности не совершенны и могут привести к:

а) самораскачиванию АД в режиме пуска;

б) возникновению значительных переходных амплитуд колебания тока и электромагнитного момента при переключении ПКУ с пускового режима на рабочий режим;

в) перекомпенсации реактивной мощности в рабочем режиме;

2. Установлено, что емкостное сопротивление конденсаторов, подключенных последовательно с обмотками статора, должно удовлетворять условию $X_C > 2 \cdot X_{АД}$ для плавного пуска АД и должно удовлетворять условию $X_C < 2 \cdot X_{АД}$ для форсированного пуска АД.

3. Разработана обобщенная математическая модель АД в фазовых координатах, которая учитывает насыщение магнитопровода статора и эффект вытеснения тока ротора, наличие конденсаторов в цепи статора и возможную асимметрию их емкостей, состояния полупроводниковых коммутационных элементов. Разработанная математическая модель позволяет определить момент времени переключения ПКУ с пускового режима на режим выбега АД в функции тока статора, момент времени переключения ПКУ с режима выбега АД на режим питания АД от сети в функции угла между вектором ЭДС статора и обобщенным вектором сети и момент времени подключения конденсаторов ПКУ на компенсацию реактивной мощности в функции напряжения на конденсаторах.

4. Установлено, что с целью исключения явления самораскачивания целесообразно отключать АД от питания через конденсаторы при заданном значении тока статора на заключительном этапе пуска.

5. Исследован режим повторного подключения АД к сети после конденсаторного пуска с учетом требуемого положения векторов ЭДС статора и сетевого напряжения. Установлено, что для включения АД в благоприятный момент времени с минимальными бросками электромагнитного момента и тока электродвигатель целесообразно коммутировать с помощью тиристорных коммутаторов. Установлено, что после отключения АД от конденсаторов существует возможность подключать выбегающий АД к сети в момент совпадения векторов ЭДС статора и сетевого напряжения, как по фазе, так и по величине.

6. Для конденсаторного пуска с ограничением пускового тока АД предложена новая схема конденсаторного ПКУ, защищенная патентом на изобретение Российской Федерации, с целесообразным соотношением 1:4 между пусковым и компенсирующим емкостными сопротивлениями. Для подключения АД к сети и коммутации конденсаторов в благоприятные моменты времени схема дополнена тиристорными коммутаторами.

7. Проведена реконструкция системы управления плавным пуском электропривода вентилятора приточной вентиляционной камеры завода Полиолефинов ПАО «Нижекамскнефтехим», с использованием микропроцессорной системы управления с конденсаторным пуско-компенсирующим устройством. Эксплуатационные испытания опытного образца подтвердили основные положения, полученные путем математического моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверьянова, К.С. Влияние корреляционной функции графиков электрической нагрузки на расчетные потери электроэнергии / К. С. Аверьянова, Н. В. Безменова, В. П. Степанов, А. К. Танаев // Инновационные технологии в энергетике: сборник статей II Международной научно-практической конференции. Под редакцией В. Я. Горячева – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2014. – С. 6–13
2. Аверьянова, К.С. Оценка технических потерь электроэнергии в электрических сетях, питающих специальные промышленные установки / К.С. Аверьянова, Н.В. Безменова, Н.Д. Голубева, В.М. Мякишев, А.К. Танаев // Вестник Самарского государственного университета. Самара: СамГТУ, 2015, № 1, С. 85 – 91
3. Аверьянова, К.С. Теоретические и экспериментальные исследования реверсивных перетоков активной мощности по системообразующей электрической сети / К.С. Аверьянова, Р.Ф. Идиатулин, В.П. Степанов, А.К. Танаев // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. Москва: «Электрозавод», 2015, № 4, С.11 – 13
4. Андреев, В.П. Основы электропривода / В.П. Андреев, Ю.А. Сабинин. –М.: Госэнергоиздат, 1963. – 772с.
5. Андриющенко, О.А. Анализ процессов отключения от сети и выбега асинхронного двигателя / О.А. Андриющенко, А.А. Бойко // Электромашиностроение и электрооборудование. Одесса: Одесский национальный политехнический университет, 2007, № 69, С. 28 – 31
6. Андриющенко, О.А. Требования к асинхронному двигателю и тиристорному преобразователю в электроприводе ТПН-АД / О. А. Андриющенко // Электромашиностроение и электрооборудование. Одесса: Одесский национальный политехнический университет, 1998, № 50
7. Архипцев, Ю.Ф. Асинхронные двигатели / Ю.Ф. Архипцев, Н.Ф. Котельнец. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 104с.

8. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / Под ред. А.Э. Кравчика, М.М. Шлафа, В.И. Афолина, Е.А. Соболенской. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504с.
9. Афлятунов, И.Ф. Анализ пусковых характеристик асинхронного двигателя при пуске с помощью конденсаторного пуско-компенсирующего устройства / И. Ф. Афлятунов // Материалы докладов VIII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / Под общ. Ред. Ректора КГЭУ Э. Ю. Абдуллазянова. В 4 т.; Т. 3. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. – С. 83.
10. Афлятунов, И. Ф. Динамические режимы асинхронного двигателя с пуско-компенсирующим устройством / И.Ф. Афлятунов, В.Н. Дмитриев // Проблемы энергетики: известия высших учебных заведений. Казань.: КГЭУ, 2013, № 11 - 12.
11. Афлятунов, И.Ф. Оптимизация пусковой диаграммы асинхронного двигателя посредством включения конденсаторов в цепь статора / И. Ф. Афлятунов // Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах: сборник статей III Международной научно-практической конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2012. – С. 3–6.
12. Афлятунов, И.Ф. Форсированный пуск асинхронного двигателя с последовательно включенными в цепь статора конденсаторами / И.Ф. Афлятунов, М.М. Мухитов, В.Н. Дмитриев // Электротехнические комплексы и системы управления. Воронеж.: 2015, № 4, с.52 – 56
13. Афлятунов, И.Ф. Энергосбережение средствами электропривода в нефтехимической отрасли / И.Ф. Афлятунов // Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах: сборник статей II Международной научно-практической конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2011. – С. 53 – 55.
14. Бауман, В. Г. Самовозбуждение асинхронных двигателей с последовательными конденсаторами / В. Г. Бауман, О. В. Иванов, Б. И. Комаров // Электричество. – 1961. – №5. – С. 38 – 44.

15. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л.А. Бессонов: Учебник. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – 638с.
16. Браславский, И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением / И.Я. Браславский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.: ил.
17. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков// Под ред. И.Я. Браславского. – М.: АСАДЕМА., 2004. – 202 с.: ил.
18. Брускин, Д.Э. Электрические машины / Д.Э. Брускин и др. – М.: Высшая школа, 1987. – 318с.
19. Брускин, Д.Э. Электрические машины и микромашины: Учеб. для электротехн. спец. вузов/ Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 528 с.: ил.
20. Важнов, А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А.И. Важнов. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. – 256 с.
21. Важнов, А.И. Электрические машины / А.И. Важнов. – Л.: Энергия, 1969. – 768с.
22. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В.А. Веников. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1970. – 472с.
23. Веников, В.А. Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах / В.А. Веников, Н.Д. Анисимова, А.И. Долгинов, Д.А. Федоров. – М.: Высшая школа, 1964. – 199 с.
24. Вешеневский, С.П. Расчет характеристик и сопротивлений для электродвигателей / С.П. Вешеневский. – М.: Энергоиздат, 1955. – 336с.
25. Вешеневский, С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С.Н. Вешеневский. – 6-е изд., исправ. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.: ил.
26. Виноградов, А. Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А. Б. Виноградов // Электротехника. – 2005. –

№5. – С. 57 – 61.

27. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. - Л.:Энергия, 1974. – 839с.

28. Выровчикова, Ю.С. Использование метода упорядоченных диаграмм для выбора мощности компенсирующего устройства / Ю. С. Выровчикова, О. В. Соляков, В. П. Степанов, А. К. Танаев // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. Москва: «Электрозавод», 2014, № 2, С. 28 – 30

29. Гаврилов, Е.Н. Разработка и исследование асинхронного электропривода зарезонансных вибрационных транспортирующих машин: дис. канд. техн. наук: 05.09.03 / Е.Н. Гаврилов. – Ульяновск, 2012. – 177 с.: ил.

30. Гандин, Б. Д. Пуск асинхронных двигателей / Б. Д. Гандин, Г. Р. Гревнин, Н. А. Лазаревский. – Л.: Судостроение, 1980. – 192 с.: ил.

31. Ганиев, Р.Н. Частотно-токовый электропривод экструдера на основе запираемых клапанов / Р. Н. Ганиев, И. Ф. Афлятунов // Современные техника и технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 1 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С. 427 – 429.

32. Гейлер, Л.Б. Электропривод в тяжелом машиностроении / Л.Б. Гейлер. – М.: Машгиз, 1965. – 349с.

33. Голован, А.Т. Работа асинхронного генератора в режиме самовозбуждением / А.Т. Голован, И.Н. Барабаш // Электричество. – 1944. – №3. С12-17.

34. Голоднов, Ю. М. Самозапуск электродвигателей / Ю.М. Голоднов.– 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985, 136 с.: ил.

35. Гольдберг, О.Д. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования / О.Д. Гольдберг, О.Б. Буль, И.С. Свириденко, С.П. Хелемская. – М.: Высш. шк., 2001. – 512с.

36. Горбачевский, Н. И. Исследование пуска асинхронного двигателя с

последовательно включенными в цепь статора конденсаторами / Н. И. Горбачевский, И. Ф. Афлятунов // Вестник Казанского технологического университета. Т. 16. – Казань: Изд-во КНИТУ. - 2013. - № 12. – С. 112 – 114.

37. Горбунов, А. А. Пакет MBTU – реальная альтернатива коммерческому ПО в области математического моделирования / А. А. Горбунов // Тезисы докладов 42 научно-технической конференции УлГТУ. – Ульяновск, 2008. – С. 14.

38. Горковенко, Л.Г. Повышение энергетических показателей асинхронного электропривода / Л.Г, Горковенко, Б.В. Глазков, А.Н, Камышников, А.В. Сомов, Ф.С. Филипов// Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2001. №10. – С.22-24.

39. Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники: Учебник для ВУЗов. В 3-х томах. Том 1. Изд. 4 / К.С. Демирчян. – М.: Изд-во СПб Питер, 2004. – 463 с.

40. Дмитриев, В.Н. Асинхронный двигатель с конденсаторным пуско-компенсирующим устройством / В.Н. Дмитриев, С.Н. Жирнов, И.Ф. Афлятунов // Сборник «Труды VIII международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП -2014, Саранск, 2014, Т.2, с. 96 – 99.

41. Дмитриев, В. Н. Асинхронный электропривод с конденсаторами в цепи статора / В. Н. Дмитриев, А. В. Дмитриев, М. М. Мухитов, И. Ф. Афлятунов // Вопросы теории и проектирования электрических машин. Параметры и характеристики электрических машин статических и динамических режимов: сборник научных трудов / Ульяновский гос. техн. ун-т. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – С. 123 – 127.

42. Дмитриев, В.Н. Выбор конденсаторов пуско-компенсирующего устройства для асинхронного двигателя / В.Н. Дмитриев, И.Ф. Афлятунов, М.М. Мухитов, С.Н. Жирнов // Вопросы теории и проектирования электрических машин: сборник научных трудов. г. Ульяновск.: УлГТУ, 2013. – с.164 – 168.

43. Дмитриев, В.Н. Исследование асинхронного двигателя с пуско-

компенсирующим устройством / В.Н. Дмитриев, А.А. Горбунов, М.М. Мухитов, И.Ф. Афлятунов // Электрические аппараты и электротехнические комплексы и системы. Международная научно-практическая конференция. (Россия, г. Ульяновск, 22–25 мая 2012 года), Том 2, с. 146 – 152.

44. Дмитриев, В.Н. Конденсаторное пуско-компенсирующее устройство для асинхронного двигателя / В.Н. Дмитриев, М.М. Мухитов, И.Ф. Афлятунов // Материалы Международной научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах», 23-27 сентября 2013, Украина, г. Севастополь 2013, с. 36 - 37.

45. Дмитриев, В.Н. Математическая модель вибрационного электропривода / В. Н. Дмитриев, Е. Н. Гаврилов, Н. А. Хахалева, А. В. Галкин // Тезисы докладов 45-й научно-технической конференции УлГТУ «Вузовская наука в современных условиях». – Ульяновск, 2011. – С. 3 – 4.

46. Дмитриев, В.Н. Моделирование динамических режимов асинхронного электропривода / В. Н. Дмитриев, Е. Н. Гаврилов, Р. Н. Ганиев // Тезисы докладов 44-й научно-технической конференции УлГТУ «Вузовская наука в современных условиях». – Ульяновск, 2010. – С. 89 – 90.

47. Дмитриев, В. Н. Определение характеристик асинхронных двигателей по методу двух испытаний / В. Н. Дмитриев, Ф. Р. Калимуллин, И. Ф. Афлятунов // Вопросы теории и проектирования электрических машин. Моделирование электромеханических процессов: сборник научных трудов / Ульяновский гос. техн. ун-т. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – С. 124 – 130.

48. Дмитриев, В.Н. Оптимизационное проектирование асинхронных электроприводов с конденсаторами в цепи статора / В.Н. Дмитриев, М.М. Мухитов, И.Ф. Афлятунов // Материалы Международной научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах» 17-20 сентября 2012, Украина, г. Севастополь 2012, с. 198 - 199.

49. Дмитриев, В.Н. Пуско-компенсирующее устройство для асинхронного

двигателя / В.Н. Дмитриев, А.М. Крицштейн, Д.М. Мансуров, И.Ф. Афлятунов // Материалы Международной научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах», Севастополь, 2014, с. 37 - 38.

50. Дмитриев, В.Н. Пуско-компенсирующее устройство для асинхронного двигателя / В.Н. Дмитриев, М.М. Мухитов, И.Ф. Афлятунов, О.В. Исаев // Сборник материалов 48 – й научно-технической конференции «Вузовская наука в современных условиях» (27 января – 1 февраля 2014 г.), Ульяновск, 2014, с. 3 – 5.

51. Долгинов, А.И. Резонанс в электрических цепях и системах / А.И. Долгинов. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 329 с.

52. Ескин, А.В. STM32VLDISCOVERY — средство для быстрой разработки опытных образцов цифровых систем управления / А.В. Ескин, В.А. Жмудь, В.Г. Трубин – Новосибирск: ФГБОУ ВПО НГТУ. URL: <http://kba-ai.ru/wp-content/uploads/2013/12/КВА-STM32VLDISCOVERY.pdf>

53. Железко, Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю.С. Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1985 – 224 с.

54. Жуков Л.А. Дискретное быстродействующее регулирование мощности батарей статических конденсаторов с помощью тиристорных выключателей / Л. А. Жуков, И. И. Карташев, Ю. П. Рыжов, А. И. Дорошенко // Электричество, 1977. – №7. – С. 68-71.

55. Змиева, К. А. Применение автоматических компенсаторов реактивной мощности для повышения энергоэффективности управления электроприводом металлообрабатывающих станков / К. А. Змиева // Электротехника. – 2009. – №11. – С.26 – 31.

56. Иванов, В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С Иванов, В.И. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987 – 336 с.

57. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины: учебник для вузов. В двух томах / А. В. Иванов-Смоленский. – 3-е изд. стереот. – М.: Издательский

дом МЭИ, 2006. – Т. 1. – 652 с.: ил.

58. Ильинский, Н.Ф. Автоматизированный электропривод / Н.Ф. Ильинский, М.Г. Юнькова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 544 с.

59. Ильинский, Н.Ф. Основы электропривода / Н.Ф. Ильинский. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 224 с.

60. Ильинский, Н.Ф. – Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н.Ф. Ильинский, В.В. Москаленко. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 208 с.

61. Ионкин, П.А. Основы теории линейных цепей / П.А. Ионкин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1976. – 544с.

62. Казовский, Е.Я. Некоторые вопросы переходных процессов в машинах переменного тока / Е.Я. Казовский. – М.: Гоэнергоиздат, 1953. – 206с.

63. Казовский, Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока / Е.Я. Казовский. – М.-Л.: Издательство академии наук СССР, 1962.-624 с.

64. Кац, А. М. Вынужденные колебания при прохождении через резонанс / А.М. Кац // Инженерный сборник. – 1947. – № 2. – С. 100 – 125.

65. Кацман, М.М. Электрические машины / М.М. Кацман. – М.: Высшая школа, 1990. – 462с.

66. Кашкалов, В. И. Конденсаторное торможение асинхронных двигателей / В. И Кашкалов. – М.: Энергия, 1977. – 120 с.

67. Китаев, А. В. О физическом механизме самовозбуждения асинхронной машины / А. В. Китаев, И. Н. Орлов // Электричество. – 1978. – №4. – С. 47 – 51.

68. Ключев, В. И. Теория электропривода: Учеб. для вузов / В. И Ключев. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.: ил.

69. Ковач, К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И Рац. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

70. Ковчин, С. А. Теория электропривода: Учебник для вузов / С. А. Ковчин, Ю. А. Сабинин. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.: ил.

71. Козий, Б. И. Самовозбуждение насыщенного асинхронного двигателя с

последовательными конденсаторами / Б. И. Козий, Р. В. Фильц // Электричество. – 1972. – №5. – С. 57 – 61.

72. Кононенко, В. О. О прохождении через резонанс колебательной системы, содержащей двигатель / В. О. Кононенко // Тр. семинара по прочности АН СССР. – М., 1958. – № 5. – С. 112 – 118.

73. Копылов, И. П. Математическое моделирование асинхронных машин / И. П. Копылов, Ф. А. Мамедов, В. Я Беспалов. – М.: Энергия, 1969. – 96 с.

74. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов / И. П. Копылов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.: ил.

75. Коренев, Б. Г. О пусковом резонансе / Б. Г. Коренев // Исследования по динамике сооружений. – М.: Госстройиздат. – 1957. – С. 162 – 184.

76. Костенко, М.П. Электрические машины / М.П. Костенко, Л.М. Пиатровский. – В 2-х ч. Ч.2 – Машины переменного тока. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1973. – 648с.

77. Лазарев, С.А. Анализ совместимости преобразователя частоты с двигателем и сетью / С.А. Лазарев // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск, 2014. – С. 70-74

78. Лазарев, С.А. Силовая преобразовательная техника в высоковольтном электроприводе для энергосбережения и ресурсосберегающих технологий / С.А. Лазарев // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сборник научных трудов. – Чебоксары, 2012. - Вып. 8. - С. 176 – 188

79. Масандилов, Л.Б. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей / Л.Б. Масандилов, В.В. Москаленко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 96 с.: ил.

80. Мжельский, И. Составление моделей анализа систем, методическое пособие / И. Мжельский, Е.Б. Мжельская. – М.: МЭИ, 2000. – 17 с.

81. Москаленко, В.В. Автоматизированный электропривод / В.В. Москаленко: Учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1986. – 416с.

82. Москаленко, В. В. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. Заведений / В. В. Москаленко. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 368с.
83. Мощинский, Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А.А. Кирякин // Электричество. - №4/98. – 1998. – С. 38-42
84. Онищенко, Г.Б. Электропривод турбомеханизмов / Г.Б. Онищенко, М.Г. Юньков. – М.: «Энергия», 1972. – 240 с.
85. Осипов, О.И. Асинхронный тихоходный электропривод шахтной подъемной машины / О.И. Осипов, А.Г. Иванов, П.С. Игнатьев, А.В. Гусев // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск, 2014. – С. 367 – 369
86. Осипов, О.И. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод / О.И. Осипов. – М.: МЭИ, 2004. – 80 с.
87. Осипов, О.И. Электромеханический комплекс для испытания силовой трансмиссии вертолетов / О.И. Осипов, А.Е. Наживин, П.А. Жарков // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск, 2014. – С. 205 – 206
88. Папин, Б.Д. Емкостной пуск асинхронного двигателя от источника соизмеримой мощности / Б.Д. Папин, А.В. Сомов. // 1-я Российская научно-практическая конференция. «Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе». – Том 1. – Ставрополь, 2001. – С. 78-79.
89. Папин, Б.Д. Исследование емкостного пуска асинхронного двигателя от источника соизмеримой мощности при помощи дифференциального уравнения / Б.Д. Папин, И.Я. Сомов А.В. Сомов. // Материалы международной научно-практической конференции ВГСХА. – Волгоград, 2001. – С.266 -268.
90. Папин, Б.Д. Теоретическое обоснование возможности плавного регулирования частоты вращения асинхронного привода вентилятора при изменении величины емкостных и активных сопротивлений в цепи статора /

Б.Д. Папин, Л.Г. Горковенко, А.В. Восков // Вестник ЧГАУ. – 1998. №29 – С.67-68.

91. Пат. 2537955 Российская Федерация, МПК H02P1/26, G05F1/70. Устройство для пуска и компенсации реактивной мощности асинхронного двигателя / Дмитриев В. Н., Афлятунов И. Ф.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет». – №2013131897/07; заявл. 09.07.2013; опубл. 10.01.2015, Бюл. №1. – 5с.

92. Петров, И.И. Специальные режимы работы асинхронного электропривода / И. И. Петров, А. М. Мейстель. – М.: Энергия, 1968. – 264 с.

93. Петров, Л. П. Нелинейная модель для исследования динамики асинхронных электроприводов/ Л. П. Петров // Электричество. – 1973. – №8. – С. 61 – 65.

94. Петров, Л.П. Ограничение переходных моментов при пуске асинхронных двигателей / Л.П. Петров, В.А. Ладензон, М.П. Обуховский // Электричество. – 1967. – №5. – С. 45 – 48.

95. Петров Л. П. - Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода / Л.П. Петров, О.А. Андрющенко, В.И. Капинос и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.: ил.

96. Петров, Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей / Л.П. Петров. – М.: Энергоиздат, 1981. – 184 с.: ил.

97. Петров, Л. П. Учет насыщения и несимметрии статорных цепей при исследовании динамики асинхронных электроприводов / Л.П. Петров // Электричество. –1970. – №10. – С. 11 – 16.

98. Петров, Л.П. Формирование пусковых процессов асинхронных двигателей включением сопротивлений в цепь статора / Л.П. Петров, В.А. Ладензон // Электричество. – 1967. – №12. – С. 58 – 62.

99. Радин, В. И. Электрические машины: Асинхронные машины: Учеб. для электромех. спец. вузов / В. И. Радин и др. // Под ред. И. П. Копылова. – М.: Высш. шк., 1988. – 328 с.: ил.

100. Розанов, Ю.К. Основы силовой электроники / Ю.К. Розанов. – М.:

Энергоатомиздат, 1992. – 296 с.

101. Руководство по подбору радиальных вентиляторов «Центримастер» [Электронный ресурс]. Сайт ЗАО «ЛАДА-ФЛЕКТ», URL: <http://www.lada-flakt.ru/site/upload/file/centrimaster-gt.pdf> (дата обращения: 09.10.2016).

102. Синева, Г.Н. Теоретический анализ механических и электромеханических характеристик асинхронного двигателя при последовательном включении конденсаторов в цепь статора / Г.Н. Синева, В.Н. Данилов, Б.Д. Папин, И.М.Печенкин, И.В. Шинкаренко // Вестник ЧГАУ. – 1995. – №16. – С.117-127.

103. Синева, Г.Н. Уточнение уравнения механических и электромеханических характеристик асинхронного двигателя при последовательном включении конденсаторов в цепь статора / Г.Н. Синева, А.И. Соколов // Вестник ЧГАУ, 1997. – №22. – С.59-68.

104. Соколов, М. М. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / М.М. Соколов, Л.П. Петров, Л.Б. Масандилов, В.А. Ладензон. – М.: Энергия, 1967. – 200 с.: ил.

105. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением / Г. Г. Соколовский. – М.: Академия, 2006. – 265 с.

106. Сомов, А.В. Исследование времени емкостного пуска асинхронного электродвигателя от источника соизмеримой и неограниченной мощности / А.В. Сомов. // Материалы VI региональной конференции молодых исследователей Волгоградской области / ВГСХА. – Волгоград, 2002. – С.136 - 137.

107. Сомов, А. В. Расширение возможностей пуска при неизменной частоте тока асинхронного привода сельскохозяйственных машин включением конденсаторов в цепь статора: дис. канд. техн. наук. / А. В. Сомов. – Волгоград, 2003. – 154 с.

108. Сомов, А.В. Теоретическое обоснование конденсаторного пуска асинхронного двигателя от источника соизмеримой мощности / А.В. Сомов. // Материалы V региональной конференции молодых исследователей

Волгоградской области / ВГСХА. – Волгоград, 2001. – С.80 - 81.

109. Спиваковский, А. О. Транспортирующие машины: Учеб. пособие для машиностроительных вузов/ А. О Спиваковский, В. К. Дьяков. – 3-е изд., перераб.– М.: Машиностроение, 1983. – 487 с.: ил.

110. Страхов, С.В. Переходные процессы в электрических цепях, содержащих машины переменного тока / С.В. Страхов. – М. - Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 247 с.

111. Супронович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок / Г. Супронович. Пер. с польского под ред. В.А. Лабунцова – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.

112. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов // Под ред. В.М. Терехова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.

113. Томчин, Д. А. Управление прохождением ротора через зону резонанса на основе метода скоростного градиента / Д. А. Томчин, А. Л. Фрадков // Проблемы машиностроения и надежность машин. – 2005. – №5. – С. 66 – 71.

114. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А. Ульянов. – М.: Энергия, 1970. – 518 с.

115. Фильц, Р.В. Характеристики асинхронного двигателя с последовательно включенными конденсаторами / Р.В. Фильц, М.В. Бурштынский, Б.И. Козий // Электромеханика. – 1976. – №1. – С. 64 – 70.

116. Фролов, К.В. Об автоколебаниях с учетом свойств источника энергии / К.В. Фролов // Механика и машиностроение. – 1962. – № 1. – С. 18 – 23.

117. Фролов, К.В. Уменьшение амплитуды колебаний резонансных систем путем управляемого изменения параметров / К. В. Фролов // Машиноведение. – 1965. – № 3. – С. 38 – 42.

118. Хрисанов, В.И. Анализ переходных процессов пуска асинхронного короткозамкнутого двигателя. Стадия разгона / В.И. Хрисанов // Электротехника. – 2010. – №8.

119. Хрисанов, В.И. Анализ переходных процессов пуска асинхронного

короткозамкнутого двигателя. Стадия трогания / В.И. Хрисанов // Электротехника. – 2010. – №3.

120. Чернышев, А.Ю. Экспериментальные исследования равномерности вращения электрических машин / А.Ю. Чернышев, В.Н. Дмитриев // Изв. ТПИ. – 1974. – С. 301.

121. Чиликин, М.Г. Основы автоматизированного электропривода / М.Г. Чиликин, В.М. Соколов и др. – М.: Энергия, 1979. – 616с.

122. Чиликин, М.Г. Теория автоматизированного электропривода / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – 616с.

123. Шубенко, В. А. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением / В.А. Шубенко, И.Я. Браславский. – М.: Энергия, 1972. – 200с.: ил.

124. Электрические и электронные аппараты: Учебник для ВУЗов / под ред. Ю. К. Розанова – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Информэлектро, 2001 – 421 с.

125. Электротехнический справочник: В 4 т. / под. ред. Герасимова В. Г. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – Т. 2. – 518 с.

126. Blekhnman I. I. Synchronization in science and technology. New-York[^] ASME Press, 1988.

127. Blekhnman I. I., Landa P. S., Rosenblum M. G. Synchronization and chaotization in interacting dynamical system // Applied Mechanics reviews. 1995. Vol. 48, №11. Part I. P. 733-752.

128. Fradkov A. L., Tomchina O. P., Nagibina O. L. Swing Control of Rotating Pendulum // Proc. of 3th IEEE Mediterranean Control Conf., Limassol, 1995. – Vol. I – p/ 347-351.

129. Mohan N., Underland T. M., Robbins W. P. Power Electronics Converters, application and design - New York: John Wiley and Sons, 1995 - 820 p.

130. Skvarenina T. Power Electronics Handbook- Boca Raton: CRC Press, 2002.- 664 p.

131. Sabin D., Sundaram A. Quality Enhances Reliability // Spectrum IEEE-1996.- №2.-P. 38-44.

132. Redl R., Tend P., Van Wyk J.D. Power electronics' polluting effects //

Spectrum IEEE.- 1997.- №5.- P. 32-39.

133. N 50160. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems - D.: Standards, 1999 - 38 p.

134. Gyugyi L., Stricula E. C. Active AC Power Filters // IAS annual meeting: Тез. докл.- В., 1976.-P. 529-535.

135. Stacey E. J., Strycula E. C. Hybrid power filters // IAS annual meeting: Тез. докл.-W., 1977.-P. 1133-1140.

«НИЖНЕКАМСКНЕФТЕХИМ»
ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
г. Нижнекамск, Республика
Татарстан, 423574



«НИЖНЕКАМСКНЕФТЕХИМ»
АЧЫК АКЦИОНЕРЛЫК ЖАМГЫЯТ
Түбән Кама шәһәре, Татарстан
Республикасы, 423574

ЗАВОД ПОЛИОЛЕФИНОВ

АКТ

«17» 04 2015 г.

о внедрении результатов диссертационной работы
Афлятунова Ильдара Фаатовича,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

«УТВЕРЖДАЮ»
Главный инженер
завода Полиолефинов
ПАО «Нижнекамскнефтехим»
Датфуллин В.Р.
«17» 04 2015 г.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы Афлятунова И. Ф., посвященные разработке и исследованию конденсаторных пуско-компенсирующих устройств, нашли применение в цехе №5205 завода Полиолефинов ПАО «Нижнекамскнефтехим», при модернизации электропривода вентиляции здания Хроматографии, тит. 001.

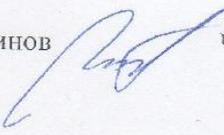
На основании результатов испытания опытно-промышленной установки – пуско-компенсирующего устройства, приведенных в протоколе технического совещания от «19» 01 2015г., внедрение результатов исследовательской работы привело к увеличению рабочего ресурса электропривода вентилятора, позволило снизить потребление электроэнергии и исключить критические режимы работы оборудования.

При внедрении новых систем управления электроприводом насосов были использованы следующие результаты научно-исследовательской работы по теме диссертации:

- система управления пуском и компенсацией реактивной мощности асинхронного электропривода вентилятора с применением конденсаторов.

На основании протокола считать целесообразным рекомендовать дальнейшее применение данных систем при модернизации аналогичных электроприводов вентиляторов предприятия.

Основание: Протокол технического совещания от «19» 01 2015г.

Главный энергетик завода Полиолефинов  Четыркин Ю. А.