

На правах рукописи



Белоусов Алексей Сергеевич

ЧАСТОТНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ ДВУХФАЗНОГО
АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Липецк – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Мещеряков Виктор Николаевич.

Официальные оппоненты:

Саушев Александр Васильевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривода и электрооборудования береговых установок» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова».

Плехов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО».

Защита диссертации состоится «07» октября 2022 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.108.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет» по адресу: 398055, г. Липецк, Московская 30, первый корпус, ауд. 601.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.stu.lipetsk.ru при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Автореферат разослан «09» июля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



В.В. Телегин

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Одним из способов повышения энергоэффективности оборудования, выполняющего сложные технологические операции, является применение регулируемых электроприводов. Электроприводы на базе двухфазного асинхронного двигателя находят применение на сверлильных и намоточных станках, широко используются в бытовой технике, где также применяются и другие системы электропривода. Перспективной областью применения двухфазных частотно-регулируемых асинхронных электроприводов являются промышленные и мобильные роботы, а также мехатронные системы. Следует отметить, что большое количество применяемых в настоящее время электроприводов переменного тока средней и малой мощности, все еще являются нерегулируемыми, и они выполняются в основном на базе однофазных конденсаторных двигателей. На механизмах, где регулирование скорости является неотъемлемой задачей, часто применяются двигатели постоянного тока, имеющие ненадежный щеточно-коллекторный узел. Переход к использованию частотно регулируемых электроприводов на базе двухфазного асинхронного двигателя требует разработки специализированных преобразователей частоты и систем управления.

Известны схемы силовой части тиристорных преобразователей, в том числе непосредственных преобразователей частоты, а также преобразователей частоты со звеном постоянного тока и транзисторным инвертором напряжения. В этом случае возможны три варианта конструкции инвертора: с двумя, тремя и четырьмя стойками. Перспективным для управления двухфазным двигателем является применение широко используемого в трехфазных электроприводах трехстоечного инвертора, выпускаемого промышленностью в виде скомпонованного модуля, который при его работе в двухфазном электроприводе должен иметь специализированный алгоритм управления. Именно создание эффективного алгоритма управления преобразователем является важнейшей задачей при разработке частотно-регулируемого электропривода на базе двухфазного двигателя с векторным управлением. При построении системы векторного управления двухфазным электроприводом не требуются координатные преобразования, выполняемые в системах векторного управления трехфазным асинхронным двигателем, что упрощает алгоритм управления.

Степень разработанности темы исследования. Проблемам разработки преобразователя частоты и системы управления для двухфазного электропривода посвящены труды российских ученых Е.В. Качалиной, В.Я. Беспалова, М.И. Стальной, А.В. Аристова, а также многих зарубежных, таких как D. Jang, M. Popescu, L.C. Tomaselli, B. Dobrucky, M. Prazenica, S. Ziaeinejad, Y. Kumsuwan и др. Ими отмечались сферы применения регулируемых двухфазных приводов в тяговых механизмах, электротранспорте, а также в качестве замены нерегулируемых однофазных двигателей. Основное направление их исследований заключалось в улучшении алгоритмов управления широтно-импульсной модуляции для минимизации коммутаций. Системы управления на основе релейных регуляторов тока ранее не исследовались.

Объектом исследования является система электропривода малой мощности с двухфазным асинхронным двигателем, применяющаяся в станкостроительной промышленности и бытовых механизмах.

Цель диссертационной работы. Создание энергоэффективной системы управления маломощным электроприводом на базе двухфазного асинхронного двигателя с низкой частотой коммутации ключей инвертора и малых гармонических искажениях, вносимых преобразователем в электрическую сеть.

Идея работы заключается в создании регулируемых частотных электроприводов на базе двухфазных асинхронных двигателей, применяемых в маломощных бытовых и промышленных механизмах, с векторным и скалярным управлением, позволяющим осуществлять регулирование скорости двигателя в широком диапазоне, при малых гармонических искажениях и сниженной чистоте коммутаций за счет применения релейных регуляторов токов статора.

Задачи исследований:

1. Провести анализ применения двухфазных асинхронных двигателей и регулируемых электроприводов на их основе, выявить основные требования, предъявляемые к ним, их недостатки и особенности известных систем управления для данного типа двигателей.

2. Разработать систему управления электроприводом с двухфазным асинхронным двигателем, позволяющую снизить частоту коммутаций и улучшить гармонический состав токов статора во всем диапазоне регулирования по сравнению с известными системами управления.

3. Разработать способ управления двухфазным электроприводом переменного тока за счет регулирования частоты и амплитуды тока в двух обмотках с помощью трехфазного инвертора.

4. Разработать преобразователь частоты для двухфазного электропривода, выполненный на основе известной конструкции трехфазного инвертора, предназначенный для питания регулируемым напряжением двухфазного асинхронного двигателя, а также однофазного двигателя, с обеспечением широкого диапазона регулирования скорости двигателей.

5. Разработать векторную систему управления двухфазным электроприводом, не требующую координатных преобразований из трехфазной системы в двухфазную и наоборот, и позволяющую с максимальной эффективностью использовать активную мощность однофазного или несимметричного двухфазного двигателя.

Методы исследования

Для решения поставленных задач применялись теория электрических цепей, автоматического управления, методы спектрального анализа. Для исследований было использовано компьютерное моделирование в специализированных программных оболочках MATLAB/Simulink и EMBED SolidThinking. Оценка адекватности компьютерных моделей выполнялась постановкой экспериментальных опытов.

Научная новизна работы:

1. Разработана система электропривода с двухфазным асинхронным дви-

гателем и векторным частотно-токовым управлением, обеспечивающим регулирование момента и скорости двигателя, отличающаяся непосредственным управлением мгновенными значениями тока статора двигателя и отсутствием блоков координатных преобразований переменных двигателя из трехфазной системы координат в неподвижную ортогональную систему координат и наоборот.

2. Разработан алгоритм управления преобразователем частоты с трехстоечным инвертором напряжения, питающим двухфазный асинхронный двигатель, на основе релейных регуляторов тока, отличающийся поддержанием синусоидальной формы токов статора на низких скоростях и снижением числа коммутаций силовых транзисторов за счет поддержания протекания токов двух фаз статора по наиболее оптимальному пути в цепи инвертора и обмотках двигателя в зависимости от текущих мгновенных значений.

3. Разработан электропривод на базе асинхронного двигателя с основной и вспомогательной однофазными обмотками, позволяющий осуществлять регулирование скорости, отличающийся отсутствием фазосмещающего конденсатора и применением преобразователя частоты с нерегулируемым выпрямителем и трехстоечным инвертором, к двум стойкам которого подключаются начала основной и вспомогательной обмоток двигателя, а к третьей – концы обмоток двигателя, соединенные в общую точку.

Теоретическая значимость работы:

– представлено исследование математического описания двухфазного асинхронного двигателя, а также влияния допущений, связанных с несимметричностью, неортогональностью обмоток статора и учетом потерь в стали магнитопровода, в котором итоговые математические уравнения двухфазного двигателя выводятся из исходных уравнений, характерных для всех двигателей переменного тока, что позволяет выводить новые уравнения двухфазного двигателя, связанные с учетом неучитывавшихся ранее допущений;

– выполнено сравнение результатов моделирования известных ранее алгоритмов управления электроприводом с двухфазным асинхронным двигателем на основе синусоидальной широтно-импульсной модуляции (ШИМ), пространственно-векторной модуляции для двух-, трех- и четырехстоечных инверторов, прерывистой пространственно-векторной модуляции;

– разработан алгоритм коммутации ключей трехстоечного инвертора в составе преобразователя частоты двухфазного электропривода на основе релейных регуляторов токов, позволяющий поддерживать синусоидальную форму токов статора двигателя в области низких частот и имеющий меньшую частоту коммутации транзисторов инвертора по сравнению с прочими системами управления, что доказано в ходе математического моделирования и проведения экспериментов.

Практическая значимость работы:

– разработана система векторного управления двухфазным асинхронным двигателем с релейными регуляторами тока, в которой доля высокогармонических составляющих в спектре токов статора на 6,3 % ниже, чем в системе с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией;

– разработан преобразователь частоты с эффективной системой управления, обеспечивающий расширенный диапазон регулирования скорости двигателя от 10% до 100 % от номинального значения, заменяющий систему конденсаторного управления однофазным двигателем с двумя обмотками, применяемым на вертикально-сверлильном станке.

Достоверность результатов и выводов подтверждается путем проведения экспериментальных исследований, доказывающих возможность широкого регулирования скорости двигателя под нагрузкой при сохранении синусоидальной формы токов статора и малой доли гармонических искажений и совпадением этих результатов с теоретическими прогнозами.

Положения, выносимые на защиту:

– структурные схемы двухфазного асинхронного двигателя и основные закономерности, характеризующие его работу с учетом допущений, имеющие наглядный и удобный вид для выполнения структурных преобразований, результаты их анализа, имитационные модели и результаты компьютерного моделирования систем электропривода с релейно-контакторным, векторным и скалярным частотным управлением;

– основные закономерности, зависимости и графики, характеризующие работу скалярных и векторных систем асинхронного электропривода с преобразователями частоты, реализующими алгоритмы коммутации двух-, трех-, четырехстоечного инверторов напряжения на основе синусоидальной ШИМ, пространственно-векторной ШИМ, релейных регуляторов токов в результате аналитических исследований и компьютерного моделирования;

– способ управления двухфазным электроприводом переменного тока с помощью трехфазного мостового инвертора, защищенный патентом на изобретение;

– разработанный алгоритм управления трехстоечным инвертором двухфазного электропривода на основе релейных регуляторов токов, эффективность которого была доказана в результате компьютерного моделирования и экспериментальных исследований;

– результаты экспериментальных исследований пуска и работы под нагрузкой однофазного двигателя, подключенного напрямую к сети, а также пуска и регулирования под нагрузкой двухфазного двигателя, подключенного к преобразователю частоты, реализующему алгоритмы синусоидальной ШИМ и релейного регулирования токов, в виде электромеханических, рабочих характеристик двигателя и графиков синусоид токов статора.

Реализация результатов работы. Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (ЛГТУ). Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены на АО «РИФ» г. Воронеж.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует следующим пунктам Паспорта научной специальности 05.09.03:

1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.

2. Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и ее результаты представлялись и обсуждались на XII Международной научно-практической конференции «Современные сложные системы управления» (Липецк, 2017); Международной научно-практической конференции «Технические науки: современный взгляд на изучение актуальных проблем» (Астрахань, 2017); XXVII Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» ИСТ-2021 (Нижний Новгород, 2021); 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA) (Russia, Lipetsk, 2019); 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA) (Russia, Lipetsk, 2020); 20th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED) (Russia, Ekaterinburg, 2021); 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA) (Russia, Lipetsk, 2021).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 19 печатных работ, из которых 4 – в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 4 статьи в электронном издании IEEE, рецензируемом наукометрической базой Scopus, 5 тезисов докладов на конференциях, 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка, включающего 101 наименование, и 9 приложений. Общий объем работы – 173 страницы. Основная часть изложена на 158 страницах текста, содержит 95 рисунков, 95 формул, 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведенных в рамках диссертационной работы исследований, определен объект исследований, сформулированы цель, идея и задачи работы, отражено соответствие тематике специальности, отмечена теоретическая и практическая значимость работы, представлены научная новизна работы и основные защищаемые положения, результаты апробации и реализации работы.

В первой главе рассмотрены этапы развития двухфазного асинхронного двигателя (ДАД) и наиболее распространенные системы электропривода на базе данного типа двигателя с адаптированными для них преобразователями частоты. Описаны конструкции инверторов для ДАД. Представлены основные направления улучшения отдельных аспектов работы электроприводов на базе ДАД для различных применений. Подчеркивается, что ДАД имеет больший пусковой момент и меньшую скорость вращения поля по сравнению с аналогичным по мощности трехфазным двигателем за счет большего числа пар полюсов, приходящихся на одну фазу статора.

Анализ мирового опыта применения регулируемых электроприводов показал путь развития ДАД от раннего нерегулируемого двигателя переменного

тока до электропривода, управляемого нейронными сетями. Исследования электропривода на базе ДАД показали возможность применения для них нескольких типов преобразователей частоты (ПЧ), в том числе непосредственных ПЧ. Для ПЧ со звеном постоянного тока существуют три конструкции инвертора напряжения: двух-, трех- и четырехстоечный (рисунок 1). Наиболее предпочтительным считается трехстоечный инвертор, поскольку конструктивно он ничем не отличается от распространенных инверторов трехфазного двигателя и совмещает в себе достоинства двух- и четырехстоечных вариантов. При наличии системы векторного управления регулируемым электроприводом на базе ДАД обеспечивается выполнение современных требований, предъявляемых к электроприводам станков, бытовых электроприборов.

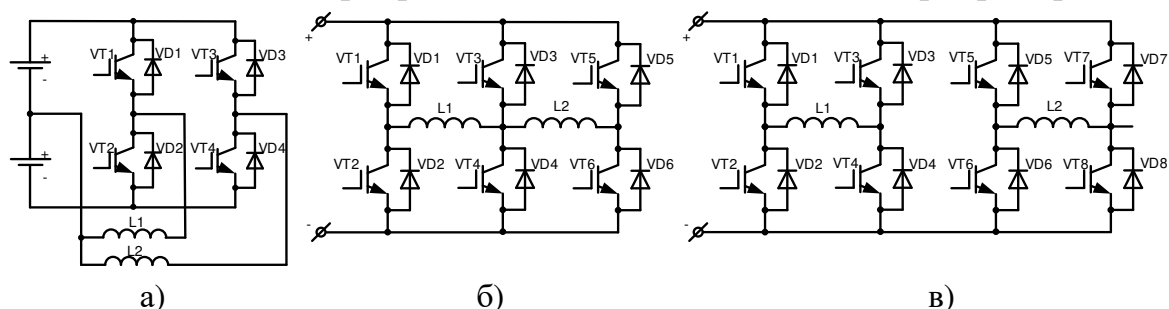


Рисунок 1 – Конструкции инвертора для электропривода с ДАД:
а) двухстоечный; б) трехстоечный; в) четырехстоечный

Основные исследования электроприводов с ДАД направлены на разработку алгоритмов систем управления (СУ) на базе пространственно-векторной ШИМ (ПВШИМ), целью которых являются снижение пульсаций момента, уменьшение частоты коммутации и улучшение гармонического состава токов статора. Однако, научных трудов по этим темам для ДАД сравнительно мало, поэтому регулируемые электроприводы на базе ДАД встречаются достаточно редко. Необходимо продолжение работ по совершенствованию алгоритмов коммутации трехстоечного инвертора для ДАД, в том числе при использовании алгоритма на основе релейных регуляторов тока.

Во второй главе рассматривается математическое описание ДАД с учетом ряда допущений: ортогональности обмоток статора, отсутствия потерь в сердечнике, учет только основной гармонической составляющей распределения потока в воздушном зазоре, синусоидальной формы токов и напряжений в установившемся режиме и тд., без учета поверхностного эффекта глубоких стержней ротора и емкостного сопротивления обмоток. В этой главе рассматриваются также результаты моделирования прямого пуска ДАД в Matlab Simulink на базе стандартной модели двигателя, построенной по выведенному математическому описанию.

Уравнения, описывающие ДАД, были выведены из общих уравнений напряжения статора и ротора, известных из теории двигателей переменного тока для произвольной прямоугольной системы координат. На основе этих уравнений была построена T-образная схема замещения ДАД, показанная на рисунке 2. Ее отличием от уравнений трехфазной машины является раздельность контуров, соответствующих двух обмоткам и осям прямоугольной системы координат, связанных между собой через эдс ротора.

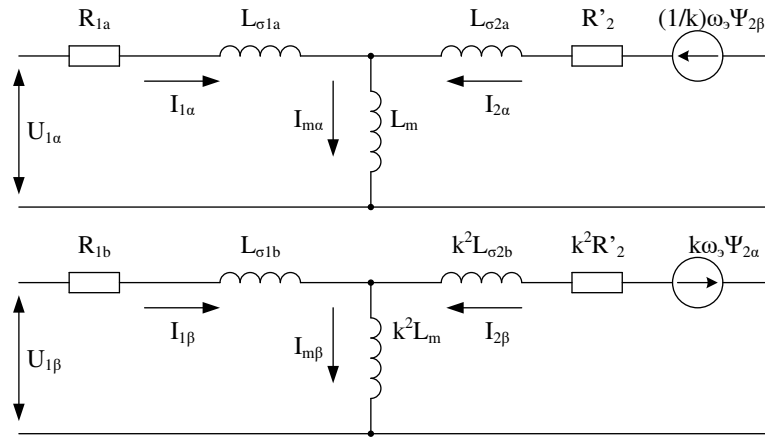


Рисунок 2 – Схема замещения двухфазного асинхронного двигателя

Отличием многих ДАД является несимметричность обмоток статора, вызванная неравенством числа их витков, в результате чего обмотки двух фаз оказывают разное влияние на магнитное поле ротора. Зависимость выражается через коэффициент k , равный отношению числа витков первой обмотки ко второй. Ниже представлена система математических уравнений ДАД, на основе которой была построена модель ДАД, показанная на рисунке 3.

$$\begin{cases}
 u_{1\alpha} = R_{1a}i_{1\alpha} + p\psi_{1\alpha}; \\
 u_{1\beta} = R_{1b}i_{1\beta} + p\psi_{1\beta}; \\
 0 = R'_2i'_{2\alpha} + p\psi_{2\alpha} - \frac{1}{k}\omega_s\psi_{2\beta}; \\
 0 = k^2R'_2i'_{2\beta} + p\psi_{2\beta} + k\omega_s\psi_{2\alpha}; \\
 \psi_{1\alpha} = L_{1\alpha}i_{1\alpha} + L_m i'_{2\alpha}; \\
 \psi_{1\beta} = L_{1b}i_{1\beta} + k^2L_m i'_{2\beta}; \\
 \psi_{2\alpha} = L_{2\alpha}i'_{2\alpha} + L_m i_{1\alpha}; \\
 \psi_{2\beta} = L_{2\beta}i'_{2\beta} + k^2L_m i_{1\beta}; \\
 L_{1\alpha} = L_{\sigma 1a} + L_m; \\
 L_{1b} = L_{\sigma 1b} + k^2L_m; \\
 L_{2\alpha} = L_{\sigma 2} + L_m; \\
 L_{2\beta} = k^2L_{\sigma 2} + k^2L_m; \\
 i_{m\alpha} = i_{1\alpha} + i'_{2\alpha}; \\
 i_{m\beta} = i_{1\beta} + i'_{2\beta}; \\
 M = p_n \cdot \left[k\psi_{2\alpha} \cdot i'_{2\beta} - \frac{1}{k}\psi_{2\beta} \cdot i'_{2\alpha} \right]; \\
 M - M_c = Jp\omega_s,
 \end{cases}
 \quad (1)$$

где $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$ – напряжения обмоток статора а, б в неподвижной прямоугольной системе координат α , β ;

$i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$, $i'_{2\alpha}$, $i'_{2\beta}$, $\psi_{1\alpha}$, $\psi_{1\beta}$, $\psi_{2\alpha}$, $\psi_{2\beta}$ – токи и потокосцепления статора и ротора обмоток а, б в неподвижной системе координат α , β соответственно;

R_{1a} , R_{1b} , R'_2 – сопротивления обмоток статора и ротора;

$L_{1\alpha}$, L_{1b} , $L_{2\alpha}$, $L_{2\beta}$ – полные индуктивности обмоток статора и ротора;

L_m – взаимная индуктивность статора;

$L_{\sigma 1a}$, $L_{\sigma 1b}$, $L_{\sigma 2}$ – индуктивности рассеивания обмоток статора и ротора;

$i_{m\alpha}$, $i_{m\beta}$ – проекции тока намагничивания;

ω_s – угловая скорость вращения ротора;

p_n – число пар полюсов;

M – электромагнитный момент;

M_c – момент нагрузки;

J – приведенный момент инерции;

$p = d/dt$ – оператор Лапласа.

Помимо математического описания для общего случая были выведены уравнения для ДАД с учетом потерь в магнитопроводе и учетом неортогональности обмоток статора, на основе которых также были составлены схемы замещения и векторная диаграмма. Для математической модели было проведено моделирование прямого пуска симметричного и несимметричного ДАД, полу-

чены графики переходных процессов токов статора, угловой скорости и электромагнитного момента. Было доказано, что магнитное поле несимметричного ДАД имеет эллипсоидную форму, а симметричного – круговую.

Для осуществления реверса при питании ДАД непосредственно от сети была разработана релейная СУ пуском и реверсом, позволяющая ограничивать пусковые токи и колебания момента. Питание второй обмотки в этом случае проводилось от единой сети, но через фазосмещающие пусковой и рабочий конденсаторы. Была выявлена проблема смены направления вращения работающего двигателя без применения дополнительных схемных решений, обеспечивающих слежение за скоростью двигателя и вновь подключающих пусковой конденсатор к пусковой обмотке. Тем самым была доказана актуальность применения ПЧ в электроприводах с ДАД даже на небольших технологических установках, требующих смены направления вращения.

В третьей главе были рассмотрены основные известные СУ электроприводом с ДАД на базе широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и разработана принципиально новая система управления с релейными регуляторами тока (РРТ), позволяющая проводить глубокое регулирование скорости без ухудшения гармонического состава токов и снижением частоты коммутации ключей инвертора по сравнению с известными аналогами.

Было выполнено сравнение результатов моделирования электроприводов на базе ДАД со скалярной СУ и синусоидальной ШИМ для преобразователей частоты с двух-, трех- и четырехстоечными инверторами. Оно показало, что наименьшие колебания момента и мгновенных значений токов статора возникают в системе с четырехстоечным инвертором. Весьма близки к ним результаты в системе трехстоечного инвертора, но в этом случае из-за общей стойки перекося фаз статора сказывается сильнее. Устранить его возможно в СУ с обратной связью. Доказано, что ДАД может запускаться с нулевой скорости под номинальной нагрузкой при всех вариантах инвертора, это свойство является универсальным из-за повышенного пускового момента ДАД.

По принципам ПВШИМ трехфазного двигателя были разработаны три варианта ПВШИМ для каждой конструкции инвертора электропривода с ДАД, и выявлены их характерные особенности. ПВШИМ двухстоечного инвертора осуществляется без нулевых векторов, при этом возможны 4 активных вектора. Пространственные векторы трехстоечного инвертора ДАД образуют вытянутый шестиугольник с неравными углами секторов, а не правильный как у трехфазных приводов. Особенностью ПВШИМ четырехстоечного инвертора является равенство нескольких пространственных векторов, одновременно действующих в одном секторе. Таким образом, в одном секторе действуют 2 нулевых и 3 активных пространственных вектора напряжения, что повышает частоту коммутации, но при этом позволяет получить наилучший гармонический состав токов статора и наименьшую амплитуду колебаний момента. Оптимальным решением следует считать все же конструкцию трехстоечного инвертора, для которого, как было доказано, возможно максимальное снижение частоты коммутаций при использовании комбинированной прерывистой ПВШИМ, сочетающей равные области максимальной и минимальной ШИМ.

Вольт-секундный принцип для подобной ПВШИМ следующий:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_s = t_a + t_b + t_0, \\ \overline{v_s} T_s = \overline{V_1} t_a + \overline{V_2} t_b + \overline{V_0} t_0, \quad | 1 \text{ сектор} \\ \overline{v_s} T_s = \overline{V_3} t_a + \overline{V_2} t_b + \overline{V_0} t_0, \quad | 2 \text{ сектор} \\ \overline{v_s} T_s = \overline{V_3} t_a + \overline{V_4} t_b + \overline{V_0} t_0, \quad | 3 \text{ сектор} \\ \overline{v_s} T_s = \overline{V_5} t_a + \overline{V_4} t_b + \overline{V_0} t_0, \quad | 4 \text{ сектор} \\ \overline{v_s} T_s = \overline{V_5} t_a + \overline{V_6} t_b + \overline{V_0} t_0, \quad | 5 \text{ сектор} \\ \overline{v_s} T_s = \overline{V_1} t_a + \overline{V_6} t_b + \overline{V_0} t_0, \quad | 6 \text{ сектор} \end{array} \right. \quad (2)$$

где T_s – период коммутации;
 t_a, t_b, t_0 – время действия активных и нулевых векторов;
 $\overline{v_s}'$ – вращающийся опорный вектор;
 $\overline{V_1}, \dots, \overline{V_6}$ – активные пространственные векторы напряжения;
 $\overline{V_0}$ – нулевой вектор.

Пространственные векторы напряжения определяются как:

$$\overline{V_1} = U_{dc} e^{j0}, \quad \overline{V_2} = \sqrt{2} U_{dc} e^{j\frac{\pi}{4}}, \quad \overline{V_3} = U_{dc} e^{j\frac{\pi}{2}}, \quad \overline{V_4} = U_{dc} e^{j\pi}, \quad \overline{V_5} = \sqrt{2} U_{dc} e^{j\frac{5\pi}{4}}, \quad \overline{V_6} = U_{dc} e^{j\frac{3\pi}{4}}. \quad (3)$$

Временные интервалы были рассчитаны следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_a = -|v_s'| \cdot (\sin(\alpha) - \cos(\alpha)) \cdot T_s / U_{dc}, \\ t_b = |v_s'| \cdot \sin(\alpha) \cdot T_s / U_{dc}, \end{array} \right\} 1 \text{ с.} \quad \left\{ \begin{array}{l} t_a = |v_s'| \cdot (\sin(\alpha) - \cos(\alpha)) \cdot T_s / U_{dc}, \\ t_b = |v_s'| \cdot \cos(\alpha) \cdot T_s / U_{dc}, \end{array} \right\} 2 \text{ с.}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} t_a = |v_s'| \cdot \sin(\alpha) \cdot T_s / U_{dc}, \\ t_b = -|v_s'| \cdot \cos(\alpha) \cdot T_s / U_{dc}, \end{array} \right\} 3 \text{ с.} \quad \left\{ \begin{array}{l} t_a = -|v_s'| \cdot \sin(\alpha) \cdot T_s / U_{dc}, \\ t_b = |v_s'| \cdot (\sin(\alpha) - \cos(\alpha)) \cdot T_s / U_{dc}, \end{array} \right\} 4 \text{ с.} \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} t_a = -|v_s'| \cdot \cos(\alpha) \cdot T_s / U_{dc}, \\ t_b = -|v_s'| \cdot (\sin(\alpha) - \cos(\alpha)) \cdot T_s / U_{dc}, \end{array} \right\} 5 \text{ с.} \quad \left\{ \begin{array}{l} t_a = |v_s'| \cdot \cos(\alpha) \cdot T_s / U_{dc}, \\ t_b = -|v_s'| \cdot \sin(\alpha) \cdot T_s / U_{dc}, \end{array} \right\} 6 \text{ с.}$$

Векторная СУ электроприводом на базе ДАД (рисунок 3) существенно упрощается по сравнению с векторной СУ трехфазным двигателем за счет отсутствия блоков дополнительных координатных преобразований.

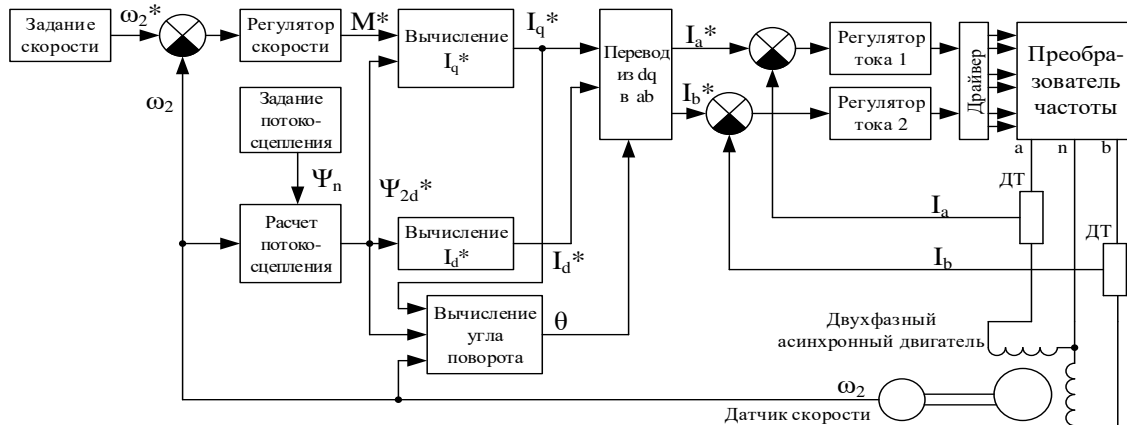


Рисунок 3 – Система векторного управления электроприводом на базе ДАД

В этой системе векторного управления регулирование фазных токов выполнялось косвенно, поскольку управляющие сигналы формировались для поддержания необходимых векторов напряжения. Обеспечить точное управление мгновенными значениями фазных токов в данной системе возможно при замене ПИ-регуляторов тока на релейные регуляторы тока (РРТ) и изменениях в блоке драйверов. При этом, в отличие от трехфазного двигателя, для ДАД необходимо разработать довольно сложный алгоритм коммутаций, поскольку у двух обмоток статора ДАД, подключенного к трехфазному инвертору, есть только одна общая точка, что значительно ограничивает пути протекания токов при различных возможных состояниях ключей инвертора.

Структурная схема электропривода ДАД с РРТ показана на рисунке 4.

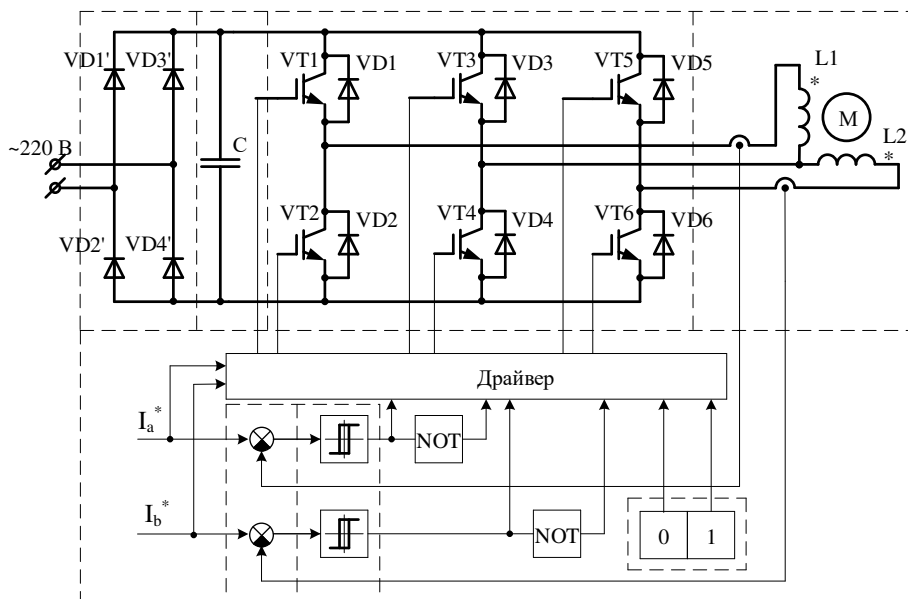


Рисунок 4 – Структурная схема электропривода на базе ДАД с РРТ

Для СУ на основе РРТ в диссертационной работе был разработан алгоритм коммутаций, основанный на разделении одного периода синусоид фазных токов на четыре равных участка, по 90 электрических градусов. На каждом из этих участков ключи коммутируются по своим правилам в соответствии с текущим и заданным значениями токов и принципам РРТ, важной особенностью которых является то, что на определенных участках ключи не меняют свое состояние, что существенно снижает суммарное число коммутаций.

Поскольку мгновенные значения двух токов независимо друг от друга колеблются в коридорах задания, то возможны 4 комбинации мгновенных токов в зависимости от их роста и спада. С учетом, что на каждом из участков синусоид эти комбинации обеспечиваются разными наборами ключей, то для всего периода синусоид становятся возможны шестнадцать схем протекания токов по стойкам инвертора и обмоткам двигателя. Существуют комбинации, при которых оба ключа на стойке разомкнуты. Этот метод представляет собой дальнейшее совершенствование способа управления двухфазным двигателем, по которому ранее был получен патент на изобретение [5], но в нем были устранены причины выпадения мгновенных значений токов статора из зоны гистерезиса. После определения наиболее оптимальных путей протекания токов двух фаз создающие их комбинации ключей инвертора были записаны в таблицу 1, для которой значения выходов гистерезисных блоков Δh_a , Δh_b определяются как:

$$\begin{cases} I_{1a}^* - I_{1a} \geq h/2, & \Delta h_a = 1, \\ I_{1b}^* - I_{1b} \geq h/2, & \Delta h_b = 1, \end{cases} \quad (5)$$

где h – устанавливаемая ширина зоны гистерезиса; Δh_a , Δh_b – значения на выходах релейных регуляторов токов фаз a и b , соответственно.

На основе гистерезисных функций, определяющих состояние каждого ключа инвертора на разных участках синусоид заданных токов, был составлен алгоритм коммутаций трехстоечного инвертора ДАД (рисунок 5).

Таблица 1 – Состояния ключей инвертора при РРТ

Выход РРТ \ Номер участка	1			2			3			4		
$\Delta h_a = 1, \Delta h_b = 1$	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1
	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
$\Delta h_a = 1, \Delta h_b = 0$	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0
	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1
$\Delta h_a = 0, \Delta h_b = 0$	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1
$\Delta h_a = 0, \Delta h_b = 1$	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1
	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0

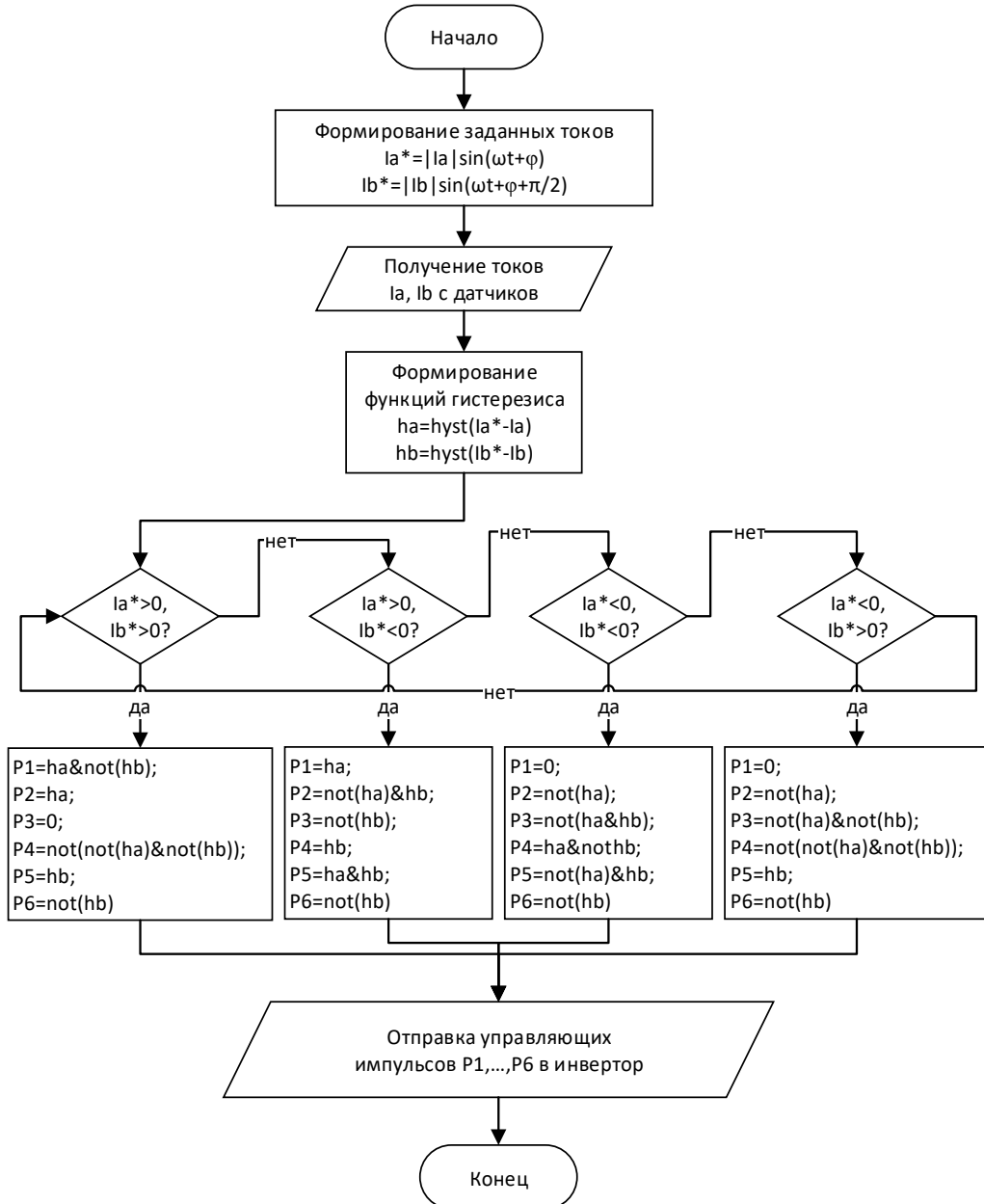


Рисунок 5 – Алгоритм управления трехстоечным инвертором ДАД на основе РРТ

Результаты моделирования электропривода ДАД с СУ на основе разработанного алгоритма РРТ подтвердили его работоспособность и показали близкую к синусоидальной форму токов (рисунок 6). Для способа управления на основе данного алгоритма был получен патент на изобретение.

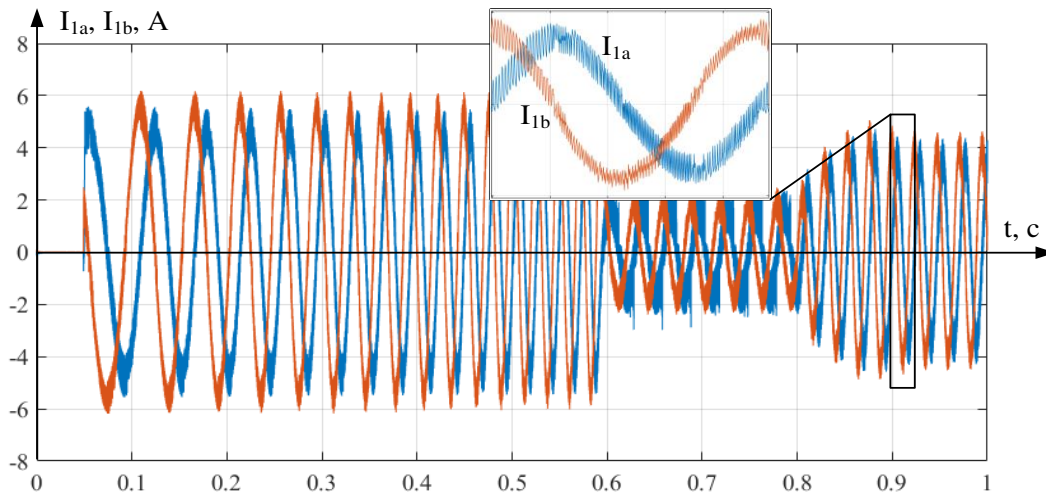


Рисунок 6 – Переходные процессы токов статора электропривода с РРТ

Сравнение разработанного алгоритма РРТ ДАД с известным алгоритмом прерывистой комбинированной ПВШИМ проводилось по двум характеристикам: частоте коммутаций ключей инвертора и анализу гармонического состава токов статора, показатель которого – коэффициент гармонического искажения рассчитывался как:

$$THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}{I_1}} = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1}, \quad (6)$$

Гармонический анализ показал, что у электропривода с алгоритмом на основе РРТ коэффициент гармонического искажения THD равен 9,7%, что в относительных единицах на 6,3% меньше, чем у электропривода с прерывистой ПВШИМ, у которого THD оказался равен 10,4%.

При анализе частоты коммутации при моделировании ДАД во время разгона, работы на холостом ходу и под нагрузкой был сделан вывод, что алгоритмы РРТ и комбинированной прерывистой ПВШИМ для ДАД дают примерно одинаковый результат. Однако, в реальных преобразователях опорная частоты ПВШИМ часто устанавливается значительно большей, чем в исследуемой модели (4 кГц), в этом случае гармонический состав токов двигателя улучшается, но и возрастает частота коммутаций. Разработанный алгоритм РРТ не зависит от опорной частоты, и при том же качестве токов может иметь существенно меньшую частоты коммутаций. На основе этого факта был сделан вывод о его преимуществе над ПВШИМ, который был проверен в ходе экспериментов.

В четвертой главе разработан экспериментальный стенд (рисунок 7) на базе ПЧ с трехстоечным инвертором и двухфазного асинхронного двигателя вертикально-сверлильного станка мощностью 550 Вт. Данный стенд использовался для сравнения работы ДАД при прямом пуске от сети, при питании от ПЧ с синусоидальной ШИМ (СШИМ) и при питании от ПЧ с разработанным алгоритмом на основе РРТ. Для исследований был взят ПЧ от трехфазного электропривода, состоящий из диодного мостового выпрямителя, накопительного конденсатора, транзисторного инвертора, драйверов, датчиков тока и

микроконтроллера TMDX28069USB Piccolo control STICK.

По результатам прямого пуска двигателя были получены графики рабочих характеристик ДАД: зависимости от полезной мощности скорости, тока статора, коэффициента мощности, коэффициента гармонических искажений.

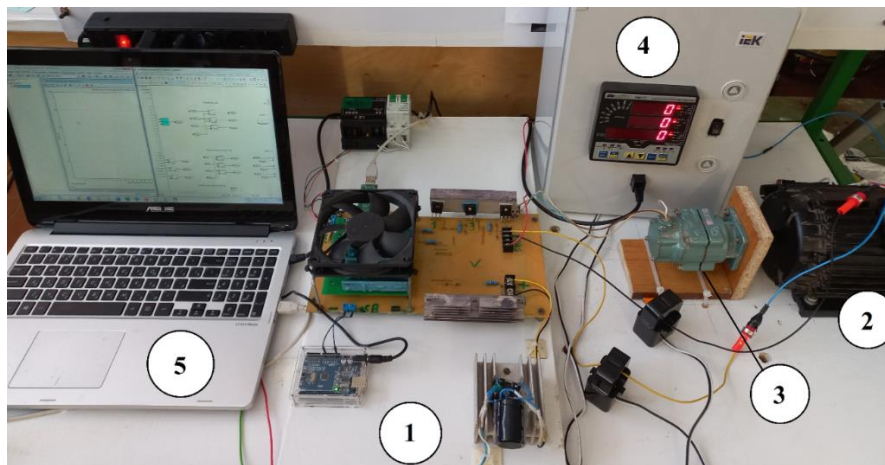


Рисунок 7 – Внешний вид экспериментального стенда

По результатам эксперимента прямого пуска двигателя были получены графики рабочих характеристик ДАД: зависимости от полезной активной мощности скорости, тока статора, коэффициента мощности, коэффициента гармонических искажений. Алгоритмы ШИМ и PPT были выполнены в программном обеспечении EMBED SolidThinking в виде блочных моделей, по каждой из которых был сгенерирован программный код, который записывался в микроконтроллер. Основу для моделей представляли блоки ePWM стандартной библиотеки для данного типа микроконтроллеров. Для СШИМ эти блоки настраивались для работы верхнего и нижнего ключей одной стойки инвертора в противофазе, а частота коммутаций устанавливалась 4 кГц. На них поступали синусоиды задания токов с регулируемыми значениями частоты и амплитуды. В СУ с PPT блоки ePWM настраивались для отдельных управляющих сигналов нижнего и верхнего ключей инвертора. Они определялись через гистерезисные функции по формулам из таблицы 2. На вход гистерезисных регуляторов поступала разность заданных и измеренных токов двух фаз.

Сравнение работы ДАД с двумя СУ выполнялось при работе на разных частотах от 5 до 50 Гц, то есть в диапазоне от 10% до 100% номинальной скорости. Для частот 50, 40, 30, 20, 10 и 5 Гц были построены электромеханические характеристики и сняты графики токов, показанные на рисунках 8 и 9.

Эксперимент показал, что ПЧ трехфазного электропривода при подключении к ДАД точно поддерживает заданные частоты при каждом специализированном алгоритме управления. В случае СШИМ на частотах ниже 30 Гц заметно искажение синусоидальной формы токов и увеличение доли высоких гармоник. При частоте ниже 10 Гц у ПЧ с СШИМ токи несинусоидальны, их отдельные участки «срезаются», в результате чего повышаются искажения, вносимые преобразователем в сеть. У ПЧ с PPT таких недостатков нет. Хотя мгновенные значения токов изменяются в больших пределах, чем у СШИМ (это зависит от заданной ширины зоны гистерезиса), общая синусоидальная форма сохраняется даже на низких частотах, без роста высоких гармоник.

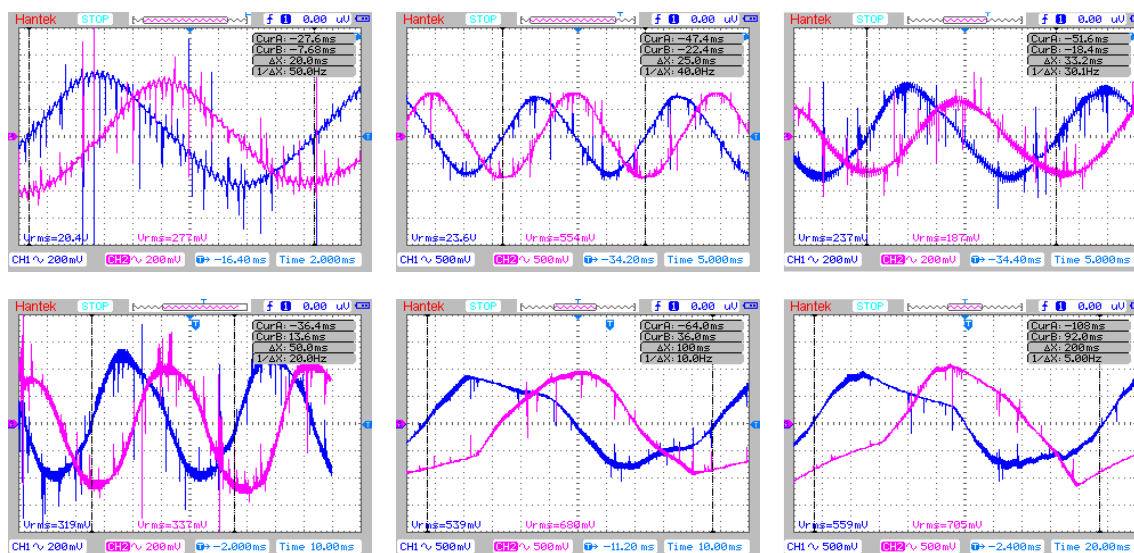


Рисунок 8 – Токи статора ДАО в СУ с синусоидальной ШИМ

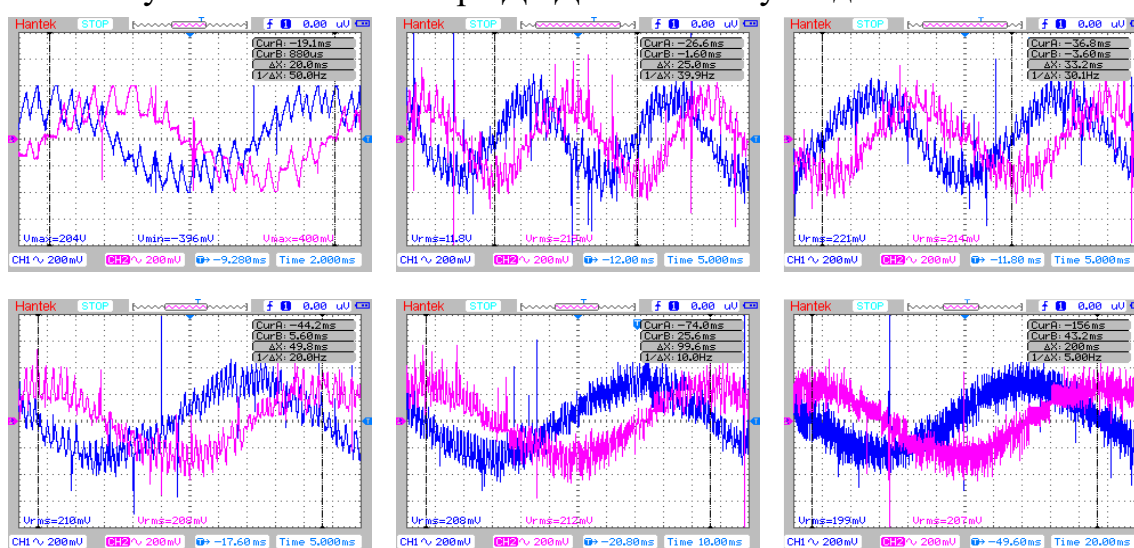


Рисунок 9 – Токи статора ДАО в СУ с релейными регуляторами тока

Можно заметить, что со снижением частоты питающего напряжения повышается частота коммутации ключей инвертора. Это связано с ограничением роста мгновенных значений меньшей амплитудой задания. При этом у синусоид с алгоритмом РРТ частота коммутаций на низких частотах все же меньше, чем у синусоид с алгоритмом СШИМ. Таким образом, по совокупности большинства параметров, алгоритм на основе РРТ лучше подходит для работы в зоне низких частот, чем СШИМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ применения двухфазных асинхронных двигателей и регулируемых электроприводов на их основе, выявлены основные требования, предъявляемые к ним, и их недостатки. Выполненный анализ показал, что наиболее перспективным можно считать способ регулирования двухфазным двигателем от преобразователя частоты со звеном постоянного тока и трехстоичным транзисторным инвертором напряжения.

2. Разработана система управления электроприводом с двухфазным асинхронным двигателем на основе релейных регуляторов тока, позволяющая снизить среднюю частоту коммутаций ключей инвертора на 20% по сравнению с

известной ранее системой управления на основе комбинированной прерывистой ПВШИМ, при которой средняя частота коммутаций была наименьшей. При использовании разработанной системы управления по сравнению с известной ранее доля высокогармонических составляющих в спектре токов статора снижается на 6,3% и остается на том же уровне при работе в зоне низких частот.

3. Разработан способ управления двухфазным электроприводом переменного тока за счет регулирования частоты и амплитуды тока в двух обмотках с помощью трехфазного инвертора, отличающийся тем, что заданные синусоиды токов двух фаз статора сравнивают с мгновенными значениями токов в обмотках двигателя и поддерживают сигналы отклонения в заданных пределах с помощью изменения состояний ключей трехфазного инвертора в зависимости от текущего участка периода синусоид для осуществления минимального числа переключений без применения методов широтно-импульсной модуляции.

4. Разработан преобразователь частоты двухфазного электропривода на основе известного ранее преобразователя для трехфазного электропривода с принципиально новой системой и алгоритмом управления, позволяющий питать регулируемым напряжением двухфазный асинхронный двигатель, а также однофазный электрический двигатель от электросети без использования фазосмещающего конденсатора и осуществлять плавное регулирование скорости двигателей в диапазоне от 10% до номинального значения.

5. Разработана векторная система управления двухфазным электроприводом, которая не требует координатных преобразований из трехфазной системы координат в двухфазную и наоборот, и позволяет максимально использовать активную мощность однофазного или несимметричного двухфазного двигателя за счет отдельного управления токами обмоток статора при поддержании постоянного электрического угла между ними.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Белоусов А.С., Мещеряков В.Н., Баранов Д.С. Моделирование системы управления электропривода намоточного станка для последующей наладки // Электротехнические системы и комплексы, 2022. № 1 (54). С. 11-18. Doi: 10.18503/2311-8318-2022-1(54)-11-18.

2. Белоусов А.С., Мещеряков В.Н. Снижение пусковых токов и моментов двухфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя за счет задержки фазных напряжений // Электротехнические системы и комплексы, 2020. № 4(49). С. 42-48. Doi: 10.18503/2311-8318-2020-4(49)-42-48.

3. Мещеряков В.Н., Белоусов А.С. Разработка алгоритма управления трехфазным инвертором двухфазного электропривода для снижения числа коммутаций ключевых элементов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета, 2019. № 3. С. 49-61. Doi: 10.17588/2072-2672.2019.3.049-061.

4. В.Н. Мещеряков, Белоусов А.С. Модель двухфазного электропривода // Вести высших учебных заведений Черноземья, № 4 (50), 2017, с. 21-30.

Патенты на изобретение:

5. Способ управления двухфазным электроприводом переменного тока с помощью трехфазного мостового инвертора: пат. 2682242 Рос. Федерация № 2018109635 / Мещеряков В.Н., Белоусов А.С.; заявл. 19.03.2018; опубл. 18.03.2019. Бюл. 8. 15 с.

Публикации в изданиях, рецензируемых наукометрической базой Scopus:

6. Belousov A.S., Meshcheryakov V.N., Valtchev S., Kryukov O.V. Start and revers of single-phase and two-phase induction motors // 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk, 2021. P. 1135-1140. Doi: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632128.

7. Meshcheryakov V., Belousov A. Development of a method for reducing starting currents and electromagnetic torque of a two-phase induction motor by delaying voltage supply // XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). Ekaterinburg, 2021. P. 1-5. Doi: 10.1109/ACED50605.2021.9462269.

8. Valtchev S., Meshcheryakov V.N., Kryukov O.V., Belousov A.S. Comparative Analysis of Electric Drives Control Systems Applied to Two-phase Induction Motors // 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk, 2020. P. 918-922. Doi: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280637.

9. Belousov A.S., Meshcheryakov V.N., Valtchev S., Kryukov O.V. Development of a Control Algorithm for Three-Phase Inverter in Two-Phase Electric Drives Reducing the Number of Commutations // 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk, 2019. P. 444-449. Doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947487.

Публикации в других изданиях:

10. Мещеряков В.Н., Белоусов А.С. Система снижения пусковых токов и момента однофазного асинхронного двигателя // «Информационные системы и технологии – 2021»: сборник материалов XXVII Международной научно-технической конференции. Н. Новгород, 2021. С. 251-256.

11. Белоусов А.С. Способы управления двухфазным асинхронным двигателем // «Тенденции развития современной науки»: сборник трудов науч.-практ. конф. студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета: в 2 ч. часть 1, Липецк, 2021. С. 32-37.

12. Белоусов А.С. Минимально-максимальная пространственно-векторная модуляция для управления двухфазным электроприводом // «Завалишинские чтения'20»: XV Международная конференция по электромеханике и робототехнике: сб. докл. СПб., 2020. С. 17-20.

13. Белоусов А.С., Мещеряков В.Н. Пространственно-векторная модуляция преобразователя частоты с двухплечевым инвертором для двухфазного электропривода // «Инженерные технологии для устойчивого развития и интеграции образования, науки и производства»: сборник междунар. науч.-практ. конф. имени В.И. Вернадского. Тамбов, 2019. С. 240-245.

14. Белоусов А.С. Пространственно-векторная модуляция двухфазного электропривода, управляемого от преобразователя с трехплечевым инвертором

// «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий»: материалы IV междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2019. С. 13-17.

15. Белоусов А.С. Мировые тенденции разработки систем управления двухфазного электропривода // сборник статей междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2018. С. 4124-4128.

16. Белоусов А.С., Кокорев А.В. Моделирование системы управления двухфазным тяговым электроприводом // «Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте»: материалы I международной научно-практической конференции в 2 томах. Липецк, 2018. Т.1. С. 175-182.

17. Белоусов А.С., Мещеряков В.Н. Модель преобразователя частоты с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией для двухфазного электропривода // «Булатовские чтения»: материалы II Международной научно-практической конференции. Краснодар, 2018. Т.6. С. 122-127.

18. Белоусов А.С. Вопрос разработки двухфазного электропривода // «Энергетика. Проблемы и перспективы развития»: тезисы докладов Третьей Всероссийской студенческой научной конференции. Тамбов, 2017. С. 169-171.

19. Белоусов А.С., Кокорев А.В., Муравьев А.А. Алгоритм управления инвертором двухфазного тока // В сб.: Современные сложные системы управления: НТCS'2017 Материалы XII междунар. науч.-практ. конф. в 2 ч. Ч. 2. Липецк, 2017. С. 91-96.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [1] – разработал модель электропривода с адаптивной системой управления на основе двухфазного асинхронного двигателя натяжного устройства намоточного станка; [2, 6, 7, 10] – разработал систему снижения пусковых токов и колебаний момента однофазных и двухфазных двигателей при прямом пуске от сети за счет задержки фазных напряжений; [3, 8] – выполнил сравнение известной ранее системы управления двухфазным электроприводом на основе пространственно-векторных регуляторов с разработанной системой управления на базе релейных регуляторов тока, предназначенной для снижения числа коммутаций ключей инвертора; [4, 5, 9] – разработал алгоритм коммутации ключей инвертора двухфазного электропривода на основе релейных регуляторов тока, основанный на сравнении мгновенных значений токов фаз статора двухфазного асинхронного двигателя.