

На правах рукописи



Доан Нгок Ши

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМИ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ С КОМБИНИРОВАННОЙ ОБМОТКОЙ ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ КПД ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ МАГНИТНОГО
ПОТОКА**

2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Казань – 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Цветков Алексей Николаевич

Официальные оппоненты: Колпахчян Павел Григорьевич, профессор
кафедры «Электрическая тяга» ФГБОУ ВО
«Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I», д.т.н., доцент.

Копырин Владимир Анатольевич, доцент
кафедры «Электроэнергетика» ФГБОУ ВО
«Тюменский индустриальный
университет», к.т.н., доцент.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технический
университет имени А. Н. Туполева – КАИ»
г. Казань

Защита состоится «24» сентября 2024 г. в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.310.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д-224, тел./факс (843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.02.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/273?idDiss=153>

Автореферат разослан «___» _____ 2024 -

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ш.Г. Зиганшин

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Современное развитие техники ориентировано на повышение энергоэффективности электроприводов механизмов. В связи с этим проводятся исследования по нахождению путей повышения коэффициента полезного действия и коэффициентов мощности как электродвигателей, так и преобразователей частоты и электроприводов в целом.

Одним из путей повышения энергоэффективности асинхронных электродвигателей, как наиболее распространенных в настоящее время, является применение многослойных обмоток статора. Данные двигатели зарекомендовали себя с лучшей стороны в плане улучшения коэффициента полезного действия, коэффициента мощности, уровня шума и вибраций.

Область применения асинхронных электродвигателей с комбинированной обмоткой (АДКО) очень широка: от различных производственных механизмов промышленности до приводов станков-качалок нефтедобывающей отрасли. При этом, существует проблема тяжелого пуска станка-качалки нефти в холодное время после долгого простоя и образования эффекта запарафинивания напорной трубы скважины. Для решения данной проблемы чаще всего станки-качалки проектируются с электродвигателями завышенной мощности для создания достаточного пускового момента. Применение такого двигателя вызывает, в нормальном режиме работы станка-качалки, повышенный расход реактивной мощности и увеличение потерь активной, что ведет к снижению энергоэффективности.

Применение АДКО, имеющих повышенный пусковой момент, позволяет снизить типоразмер и вывести его на работу в нормальном режиме с большей энергоэффективностью по сравнению с асинхронными двигателями с традиционной обмоткой статора.

Однако электродвигатель с комбинированной обмоткой имеет все преимущества по сравнению с традиционным асинхронным двигателем только при прямом пуске и работе от сети. При необходимости регулирования частоты вращения вала, разработчики электроприводов сталкиваются с рядом проблем. Вызваны данные проблемы тем, что обмотки смещены относительно друг друга на 30 градусов. Особенно сильные затруднения вызывает применение самого прогрессивного и эффективного принципа векторного управления.

Процесс нефтедобычи требует от электроприводов станков-качалок нефти регулирования скорости вращения и скорости качания в широком диапазоне частот, эта необходимость наблюдается и в других отраслях, например в насосном оборудовании при регулировании производительности установки. Особенно востребованными режимами работы являются режимы с низкими скоростями вращения вала.

Поэтому возникает необходимость разработки алгоритмов управления частотными преобразователями для эффективного управления электродвигателями с комбинированной обмоткой особенно на низких скоростях. Одним из путей решения данной проблемы является раздельное управление каждым слоем обмотки, сдвинутым на 30 градусов, что ведет к

существенному усложнению конструкции инвертора и его удорожанию, кроме этого исчезает возможность быстрой замены электродвигателя при выходе из строя. Производители преобразователей частоты не предусматривают возможности управления электродвигателями с комбинированной обмоткой, что повлечет трудности применения электроприводов в ближайшем будущем.

Для реализации разрабатываемых алгоритмов управления электродвигателями с комбинированной обмоткой требуется построение универсальных систем управления и систем контроля АДКО. Данные системы позволяют улучшить такие характеристики, как энергоэффективность, крутящий момент и снизить уровень помех за счет перестраиваемых способов управления и смещения результирующего вектора управления.

Задачи конструирования, испытания и исследования электрических машин с комбинированной обмоткой и методы управления рассмотрены в работах Д.А. Дуюнова, В.С. Дейнего, В.А. Иванова, К.А. Змиевой, А.П. Яковлева, Ю.А. Мощинского, Е.М. Соколовой, В.Ю. Корнилова, M. Chomat, L. Schreier, J. Bendl, H. Kasten, W. Hofmann, Y. Lei, Z. Zhao, S. Wang, D. G. Dorrell, W. Xu и других. В известных работах анализ и контроль энергоэффективных электродвигателей производился при прямом включении в сеть без применения электроприводов с регулированием производительности объектов исследования. Разработка систем контроля и управления на основе преобразователей частоты, предназначенных для работы с электродвигателями с комбинированной обмоткой позволит существенно снизить потребление электроэнергии и повысить крутящий момент двигателя на низких скоростях вращения.

Объект исследования: электропривод на основе преобразователя частоты и асинхронного электродвигателя с комбинированной обмоткой.

Предмет исследования: система эффективного управления асинхронным электродвигателем с комбинированной обмоткой.

Целью работы является создание системы эффективного управления и контроля для улучшения энергетических характеристик электроприводов (энергоэффективности, крутящего момента и снижения уровня помех) на основе асинхронных электродвигателей с комбинированной обмоткой (АДКО).

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**.

1) анализ электроприводов на основе двигателей с комбинированной обмоткой, как объекта контроля и управления;

2) разработка математической модели асинхронного электродвигателя с комбинированной обмоткой для реализации энергоэффективных алгоритмов управления асинхронными электродвигателями с комбинированной обмоткой с оптимизацией магнитного потока;

3) разработка электротехнической системы эффективного управления и контроля энергетических характеристик асинхронных электродвигателей с комбинированной обмоткой;

4) экспериментальное подтверждение работоспособности и эффективности разработанной системы эффективного управления электродвигателями.

Методология и методы диссертационного исследования определялись характером поставленных задач и опирались на положения теории электроприводов, теории электрических цепей, теории вероятностей и математической статистики. Исследования и расчеты выполнялись на персональной ЭВМ с применением стандартных и специально разработанных алгоритмов и программ. При разработке программного обеспечения системы эффективного управления и контроля применялась среда разработки VisualStudio, при отладке алгоритмов управления использовалась среда имитационного моделирования Simulink, а при проектировании электронных блоков аппаратуры – среда моделирования и программирования Multisim.

Обоснованность и достоверность выводов и результатов работы достигается использованием при решении поставленных задач математических методов, экспериментальной обоснованностью принятых допущений, непротиворечивостью результатов с общеизвестными, опубликованными в научно-технической литературе исследованиями.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель асинхронного электродвигателя с комбинированной обмоткой, позволяющая определить оптимальный магнитный поток для снижения уровня потерь мощности.

2. Электротехническая система управления с алгоритмами эффективного управления, оптимизирующая магнитный поток асинхронного электродвигателя с комбинированной обмоткой.

3. Электротехническая система контроля энергетических характеристик электродвигателей для корректировки и отладки алгоритмов эффективного управления асинхронными электродвигателями с комбинированной обмоткой с системой удаленного мониторинга.

4. Результаты экспериментальных исследований работоспособности и эффективности разработанной системы эффективного управления.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Разработана математическая модель асинхронного электродвигателя с комбинированной обмоткой, позволяющая формировать управляющее воздействие на двигатель для получения оптимального магнитного потока и минимизации потерь мощности.

2. Разработана усовершенствованная система эффективного управления с универсальным преобразователем частоты и алгоритмом на основе математической модели асинхронного электродвигателя с комбинированной обмоткой, отличающаяся улучшенными характеристиками электропривода за счет оптимизации магнитного потока, снижения потерь мощности и смещения результирующего вектора управления.

3. Разработана электротехническая система для контроля энергетических характеристик асинхронного электродвигателя с комбинированной обмоткой на основе системы эффективного управления.

Практическая и теоретическая значимость.

Теоретическая значимость результатов работы состоит в дальнейшем развитии теории методов управления электродвигателями с нетрадиционной конструкцией обмотки статора.

Практическая значимость результатов работы состоит в возможности практического использования разработанной системы контроля и управления, а также рекомендаций по синтезу систем управления электроприводов на основе электродвигателей с комбинированной обмоткой, требующих корректировки алгоритмов управления.

Реализация результатов работы. Полученные теоретические и практические результаты работы использованы:

- в процессе опытно-промышленных испытаний на станке-качалке нефти АО «ГРИЦ», расположенной в Черемшанском районе Республики Татарстан с целью повышения энергоэффективности управления асинхронным электродвигателем с комбинированной обмоткой с применением частотного регулирования при работе на пониженных скоростях вращения (акт приведен в приложении диссертации).

- в учебном процессе кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ» при подготовке магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на XIV Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские Чтения» (Казань, 23 – 26 апреля 2019 г.), VI Международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» (Альметьевск 16-18 октября 2019 г.), V Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве» (Казань, 12–13 декабря 2019 г.), Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские Чтения – 2020 «Энергетика и цифровая трансформация» (Казань, 28–29 апреля 2020 г.), XXV Всероссийском аспирантско-магистерском научном семинаре, посвященном дню энергетика (Казань, 7-8 декабря 2021 г.), VII Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве» (Казань, 9-10 декабря 2021 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 11 печатных работах, из них 1 статья в рецензируемом научном издании, индексируемом в международной базе данных SCOPUS, 2 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК (в том числе 2 статьи в журнале, входящем в перечень ВАК по специальности диссертации), 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ и 7 публикаций в материалах всероссийских, национальных и международных научных конференций.

Личный вклад автора. Результаты, представленные в диссертации и отраженные в публикациях, получены при непосредственном участии соискателя. Автор принимал участие в разработке метода управления

электродвигателем с комбинированной обмоткой, создании электротехнического комплекса для контроля характеристик, реализующего возможность корректировки алгоритмов управления, в разработке системы эффективного управления и контроля, обсуждении результатов, написании статей и представлении докладов на конференциях.

Соответствие диссертации научной специальности.

Диссертация соответствует научной специальности 2.4.2. – «Электротехнические комплексы и системы».

Полученные в работе научные результаты соответствуют следующим пунктам паспорта специальности:

п.3. «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления», в диссертационной работе представлена разработанная математическая модель асинхронного электродвигателя с комбинированной обмоткой, позволяющая определить оптимальный магнитный поток для снижения уровня потерь мощности, усовершенствованная система эффективного управления и электротехническая система контроля энергетических характеристик;

п.4. «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов», в диссертационной работе представлены результаты экспериментальных исследований работоспособности алгоритмов эффективного управления асинхронными электродвигателями с комбинированной обмоткой с применением системы эффективного управления и электротехнической системы контроля.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 116 наименований, и 3 приложений. Содержит 175 страниц машинописного текста, 66 рисунков и 6 таблиц.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, выявлена степень разработанности, сформулированы цель, решаемые задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснованность и достоверность выводов и результатов, апробация, внедрение и структура работы.

В первой главе определены конструктивные особенности АДКО, проведен анализ преимуществ использования по сравнению с электродвигателями с традиционной обмоткой. Выполнен обзор известных исследовательских стендов для определения энергетических характеристик электродвигателей, рассмотрены существующие методы и средства контроля, рассмотрены системы сбора данных на основе встраиваемых устройств общего назначения, указан их основной недостаток, заключающийся в отсутствии

возможности корректировки алгоритмов управления, используемых в комплектных преобразователях частоты и неэффективная работа с электродвигателями АДКО.

Вторая глава посвящена рассмотрению основных принципов управления асинхронными электродвигателями и системам передачи данных.

Рассмотрены основные принципы управления: скалярный и векторный. Оба принципа управления предназначены для работы в составе преобразователей частоты с типовой конструкцией инвертора. Инвертор имеет в своем составе источник напряжения и 6 силовых ключей, включенных по мостовой схеме по два к каждой формируемой выходной фазе, что дает возможность формирования переменного напряжения на выходных клеммах.

Принцип скалярного управления широко используется на протяжении уже многих лет в управляемых асинхронных электроприводах, к которым предъявляются заниженные требования в плане точности управления по скорости. Этот принцип можно использовать в приложениях, которые не требуют высоких динамических характеристик, а нуждаются только в эффективном изменении скорости во всем ее диапазоне. При этом величина магнитного потока поля статора прямо пропорциональна отношению амплитуды приложенного напряжения обмотки статора к частоте напряжения. Если это отношение сохраняется на постоянном уровне, то поток статора остается постоянным, поэтому крутящий момент зависит только от частоты скольжения. Точнее, он основан на общей модели асинхронного двигателя.

$$\frac{d\phi_s}{dt} + R_s I_s = V_s; \frac{d\phi_r}{dt} - j\omega_m \phi_r + R_r I_r = 0; \quad (1)$$

$$\phi_s = L_s I_s + L_m I_r; \phi_r = L_r I_r + L_m I_s; \quad (2)$$

$$M_e = \frac{2p}{3} L_m I_m (I_s I_r^*); \Omega_m = \frac{\omega_m}{p} \quad (3)$$

где - $V_s, \phi_s, \phi_r, I_s, I_r$ напряжение статора, магнитные потоки статора и ротора, токи статора и ротора, соответственно, а $R_s, R_r, L_s, L_r, L_m, \omega_m$ - общее сопротивление статора, сопротивление ротора, индуктивность статора, индуктивность ротора, общая индуктивность рассеяния и угловая частота вращения, соответственно.

Использование метода векторного управления вместо скалярного, позволяет более экономично расходовать энергию и улучшить переходные процессы. В данном принципе управления соответствующие каждой фазе верхний и нижний ключи могут находиться только в двух состояниях: верхний открыт, а нижний закрыт и наоборот. В результате получается всего восемь состояний ключей инвертора, позволяющих сформировать результирующий вектор магнитного поля статора электродвигателя. При этом шесть состояний ключей приводят к формированию ненулевых фазных напряжений.

Рассмотренные принципы управления наиболее эффективно работают с электродвигателями с традиционной конструкцией обмотки, принцип векторного управления, как самый эффективный, однако плохо работает с АДКО из за особенностей конструкции, представляющей собой две обмотки, смещенные относительно друг друга на 30 градусов. А значит, реализация

векторного управления для АДКО требует применения новой математической модели.

Электромагнитные расчеты асинхронных двигателей (АД) обычно проводятся на основе эквивалентных схем замещения. Эквивалентная принципиальная схема АДКО показана на рисунке 1.

Математическая модель для расчета характеристик получена методом наложения расчетов, выполненных для схем соединения обмотки звездой и треугольником.

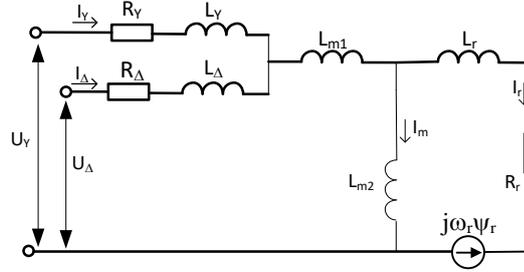


Рисунок 1. Схема замещения АДКО

Из эквивалентной схемы получим систему уравнений напряжения на обмотках статора, записанную следующим образом:

$$\begin{cases} \bar{u}_Y = R_Y \cdot \bar{i}_Y + \frac{d\bar{\psi}_Y}{dt} \\ \bar{u}_\Delta = R_\Delta \cdot \bar{i}_\Delta + \frac{d\bar{\psi}_\Delta}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

Точно так же мы можем построить уравнение напряжения ротора. Поскольку используемый ротор представляет собой короткозамкнутую клетку, можно записать:

$$\bar{u}_r = \bar{0} = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} - j\omega_r \psi_r \quad (5)$$

Где в уравнениях выше векторы тока и напряжения:

$$\bar{u}_Y = \begin{bmatrix} u_{1Y} \\ u_{2Y} \\ u_{3Y} \end{bmatrix}; \bar{\psi}_Y = \begin{bmatrix} \psi_{1Y} \\ \psi_{2Y} \\ \psi_{3Y} \end{bmatrix}; \bar{i}_Y = \begin{bmatrix} i_{1Y} \\ i_{2Y} \\ i_{3Y} \end{bmatrix}; \bar{u}_D = \begin{bmatrix} u_{1D} \\ u_{2D} \\ u_{3D} \end{bmatrix}; \bar{\psi}_D = \begin{bmatrix} \psi_{1D} \\ \psi_{2D} \\ \psi_{3D} \end{bmatrix}; \bar{i}_D = \begin{bmatrix} i_{1D} \\ i_{2D} \\ i_{3D} \end{bmatrix}; \quad (6)$$

Магнитный поток и ток в приведенных выше уравнениях представлены в синхронно вращающейся системе отсчета. Предполагается, что составной поток ротора ψ_r , также известный как фаза потокосцеплений статора, лежит на прямой оси, а фаза потокосцепления ротора является переменной. Следовательно, необходимо выполнить совмещение оси координат d с фазой потока ротора.

$$\psi_r = \psi_{dr}, \psi_{qr} = 0, \frac{d\psi_r}{dt} = 0 \quad (7)$$

Тогда уравнение напряжения ротора будет:

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_r}{dt}, 0 = R_r i_{qr} + \omega_{sl} \psi_r \quad (8)$$

Ток ротора рассчитывается по току статора:

$$i_{qr} = -\left(\frac{L_m}{L_r}\right)(i_{q1} + i_{q2}), i_{dr} = \frac{\psi_r}{L_r} - \frac{L_m}{L_r}(i_{d1} + i_{d2}) \quad (9)$$

Крутящий момент двигателя определяется выражением:

$$M = \frac{3P}{2} \frac{L_m}{L_r} (i_{q1} + i_{q2})\psi_{dr} - (i_{d1} + i_{d2})\psi_{qr} \quad (10)$$

Модель привода с АДКО была смоделирована в среде Simulink, которая сочетает в себе управление FOC (поле ориентированное управление) и LMT (методы минимизации потерь) с каналом управления характеризующимся блоком минимизации потерь мощности. Как показано на блок-схеме на рисунке 2, в верхнем канале управления измеряются фазы тока статора, затем он преобразуется в пространственно-векторную систему координат А, В, С. Преобразуется ток в системе координат А, В, С к системе координат α, β , а затем далее преобразуется в систему координат вращения d-q по системе отсчета оси вращения ротора, мы можем определить значения токов i_d и i_q во времени.

Более конкретно, ω^* изменялся от 30 рад/с до 150 рад/с с шагом 30 рад/с, и для каждого режима скорости крутящий момент нагрузки менялся от 0 Нм до 2,7 Нм с каждым шагом 0,3 Нм. Для каждой комбинации оценивался тренд потерь мощности при оптимальном ΔP_{LMT} и сравнивается с потерями ΔP_{FOC} , рассчитанными с использованием традиционного векторного управления FOC.

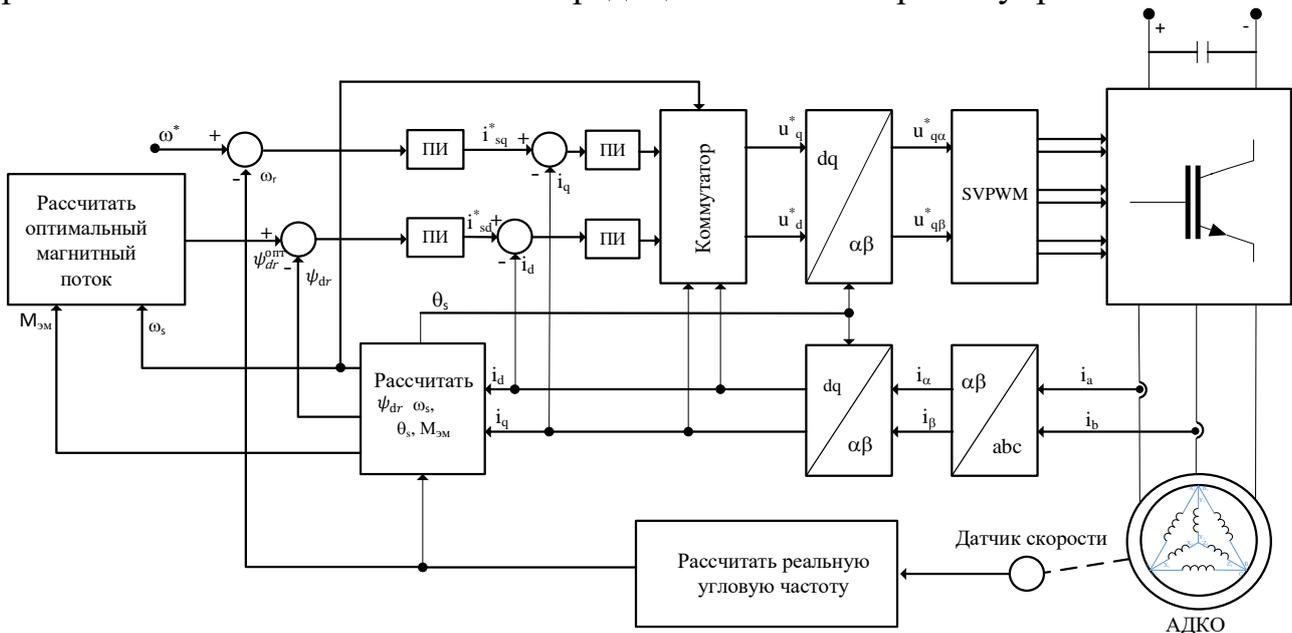


Рисунок 2. Блок-схема контроллера с оптимальной производительностью для АДКО, построенная в среде Simulink

На рисунках 3а и 3б показано сравнение между ΔP_{FOC} и ΔP_{LMT} для ω^* равного 90 рад/с и 150 рад/с соответственно. Из этих результатов моделирования становится ясно, что предлагаемое применение алгоритма снижения потерь более эффективно для низких или средних нагрузок.

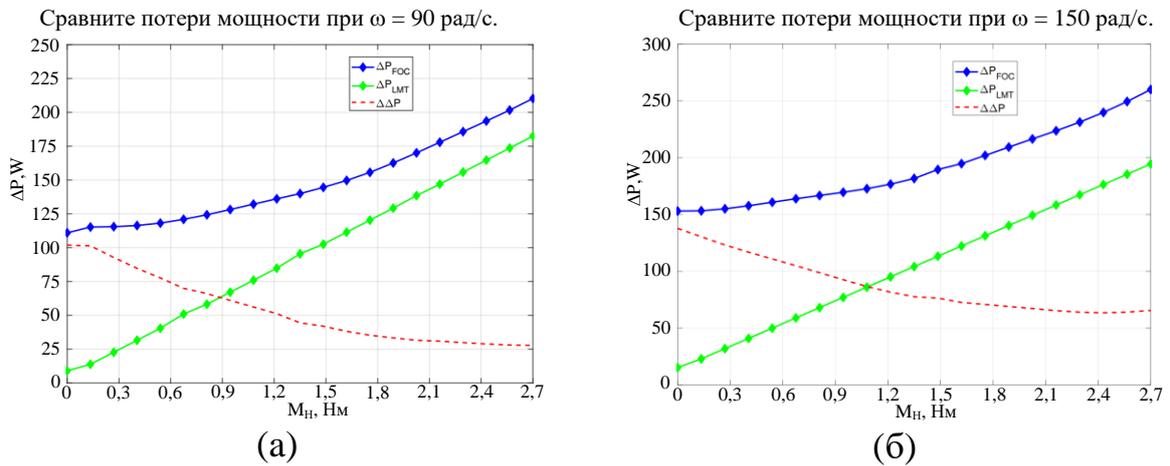


Рисунок 3. Сравнение потерь мощности с применением метода LMT и традиционного FOC. (а) $\omega = 90$ [рад/с] и (б) $\omega = 150$ [рад/с]

Современная тенденция развития оборудования для проведения исследований подразумевает внедрение информационных систем. Это в свою очередь требует применения цифровых систем сбора, обработки и передачи информации для ее дальнейшей обработки и хранения.

В качестве примера построения такой системы можно привести схему передачи данных от системы контроля в вычислительную машину с возможностью удаленной передачи данных, что позволяет проводить длительные исследования с возможностью удаленного накопления и хранения данных (рисунок 4).

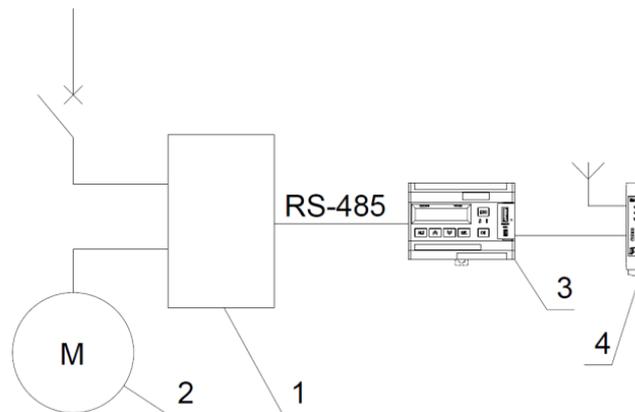


Рисунок 4. Схема мониторинга системы эффективного управления и контроля.

1 – система контроля, 2 – исследуемый электродвигатель, 3 – микроконтроллер накопления и передачи данных, 4 – система передачи данных

Третья глава посвящена разработке электротехнической системы эффективного управления на основе преобразователя частоты с гибким программным обеспечением и системы контроля энергетических характеристик асинхронных электродвигателей с улучшенными характеристиками по сравнению с прототипами, для экспериментального исследования электроприводов на основе двигателей с короткозамкнутым ротором с традиционной обмоткой и двигателей с комбинированной обмоткой.

Кроме того, в главе приведен расчет основных элементов, представлен алгоритм работы системы эффективного управления, описана работа системы

контроля. Естественно, управлять такой системой вручную затруднительно, поэтому возникла необходимость разработки аппаратно-программного комплекса, для организации сбора данных, обработки и формирования воздействий на исполнительные механизмы системы.

Для разработки алгоритма эффективного управления АДКО необходимо выполнить расчет положения результирующего вектора магнитного поля при питании комбинированной обмотки. Из конструкции статора АДКО известно, что результирующие векторы катушек расположены под углом 30 градусов. На рисунке 5 показано положение вектора обмотки «звезда» i_Y и обмотки «треугольник» i_Δ .

Вектор тока обмотки «треугольник» имеет модуль $\sqrt{3}i_Y$ и отстает по фазе на 30 градусов относительно вектора тока обмотки звезды. Учитывая, что обе обмотки подключены к одному и тому же источнику напряжения, на основании теоремы косинусов для любого треугольника мы можем определить длину вектора суммы результирующего вектора комбинированной обмотки и угол разности фаз.

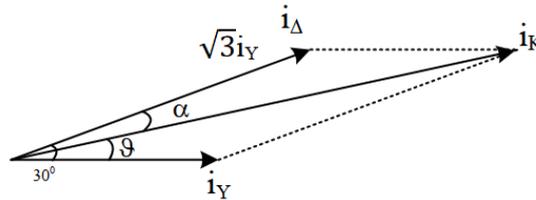


Рисунок 5. Положение результирующего вектора управления для комбинированной обмотки

Амплитуда результирующего вектора определяется длиной вектора i_K :

$$|i_K|^2 = i_Y^2 + i_\Delta^2 - 2i_Y^2\sqrt{3} \cos(\pi - \frac{\pi}{6}); |i_K|^2 = i_Y^2; |i_K| = \sqrt{7}i_Y.$$

Величина угла ϑ :

$$(\sqrt{3}i_Y)^2 = (i_Y)^2 + (\sqrt{7}i_Y)^2 - 2 \cdot (i_Y) \cdot (\sqrt{7}i_Y) \cos \vartheta; \cos \vartheta = \frac{5i_Y^2}{2\sqrt{7}i_Y^2} = 0,945;$$

$$\vartheta = 19^\circ$$

В результате расчета получено, что положение результирующего вектора должно находиться со смещением на 19 градусов с отставанием от вектора обмотки «звезда» и с опережением на 11 градусов вектора обмотки треугольник.

Для реализации системы эффективного управления с понижением потерь и увеличения КПД и крутящего момента АДКО в процессорный модуль системы управления загружается программное обеспечение на основе алгоритма, показанного на рисунке 6.

Данный алгоритм реализует принципы энергоэффективного управления электродвигателем с целью снижения потерь и повышения крутящего момента, особенно на низких скоростях вращения.

Алгоритм управления разработан для инвертора векторного управления с бездатчиковым управлением FOC. Выполнение программы включает в себя основные задачи: бездатчиковое управление FOC асинхронного двигателя, выполнение команд пользователя и обработку информации.

Основная программа включает в себя процесс инициализации, включая запуск процесса управления. Программа не сможет работать на нулевой скорости; следовательно, система должна запускаться в разомкнутом контуре и использовать простой метод управления V/F. Когда двигатель начинает вращаться, параметры обратной связи используются для бездатчикового энергоэффективного управления, при этом происходит переключение векторного управление с разомкнутым контуром на векторное управление, ориентированное на поле, с замкнутым контуром. Затем к потоку выполнения добавляется регулятор скорости, и начинается оценка угла положения ротора θ .

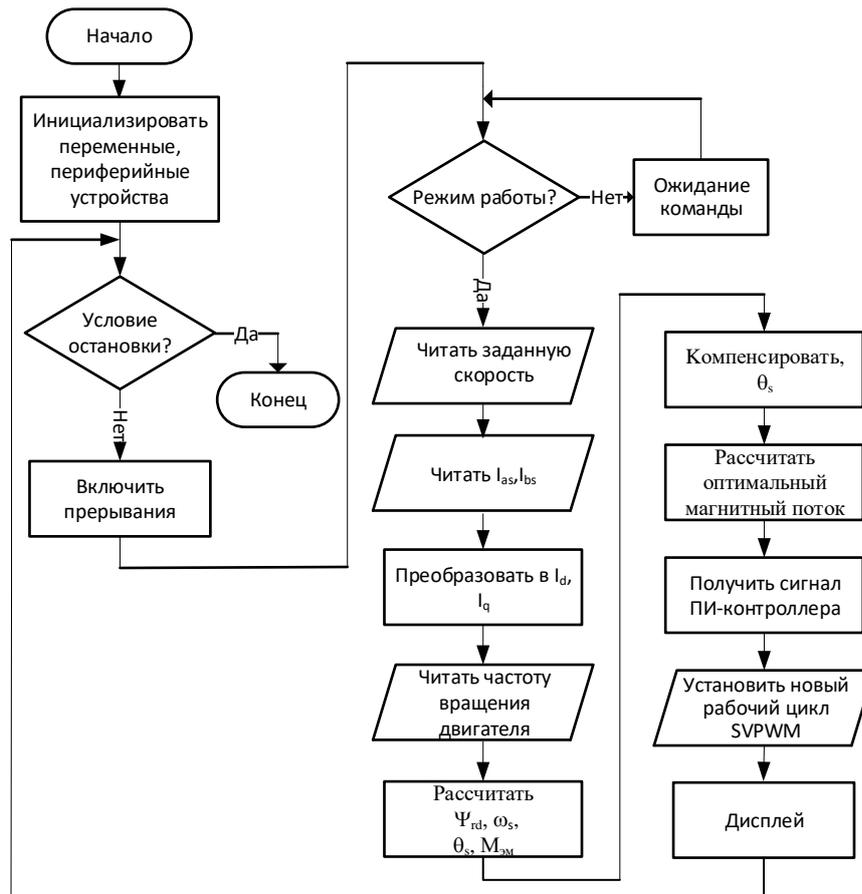


Рисунок 6. Алгоритм работы программного обеспечения системы эффективного управления

Алгоритм управления состоит из процессов обслуживания прерываний, которые запускаются таймерами, а также управлением оператора. Программа обслуживания прерывания считывает входные параметры и параметры обратной связи с двигателя, выполняет расчет таких параметров, как Ψ_{rd} , ω_s , θ_s , $M_{эм}$, обрабатывает алгоритм оптимального потока, преобразование пространственно-векторной системы координат, ПИ-управление и формирует точный управляющий импульс управления для ключей инвертора.

Функциональная схема электротехнической системы контроля для определения энергетических характеристик АДКО в сравнении с традиционными асинхронными электродвигателями, показанная на рисунке 7, состоит из основных блоков – М1 – нагрузочный электродвигатель, М2 –

исследуемый электродвигатель, ПЧ-1 – преобразователь частоты нагрузочного электродвигателя М1, СЭУ – система эффективного управления, ИК – измерительный комплекс, ПК – персональный компьютер, ПИ – преобразователь интерфейсов, ДТ – датчики тока, ДН – датчики напряжения, ДП – датчик положения вала двигателя, RS-485 – цифровая шина передачи МС – модуль удаленной связи. Система эффективного управления АДКО на основе применяемого алгоритма и данных, полученных от датчиков, вырабатывает управляющие сигналы для силовой части комплекса, осуществляет сбор и хранение информации о параметрах, развитых объектом исследования.

Измерительный комплекс ИК применяется для определения энергетических характеристик электропривода СЭУ-М2 в различных режимах работы. ИК позволяет определить токи, напряжения, мощности, коэффициент мощности, гармонические составляющие и другие параметры, представляет собой систему управления и сбора информации с возможностью формирования управляющих воздействий на ПЧ-1, СЭУ, а также получения от них измеренной и рассчитанной информации о энергетических характеристиках электродвигателей и электроприводов в целом.

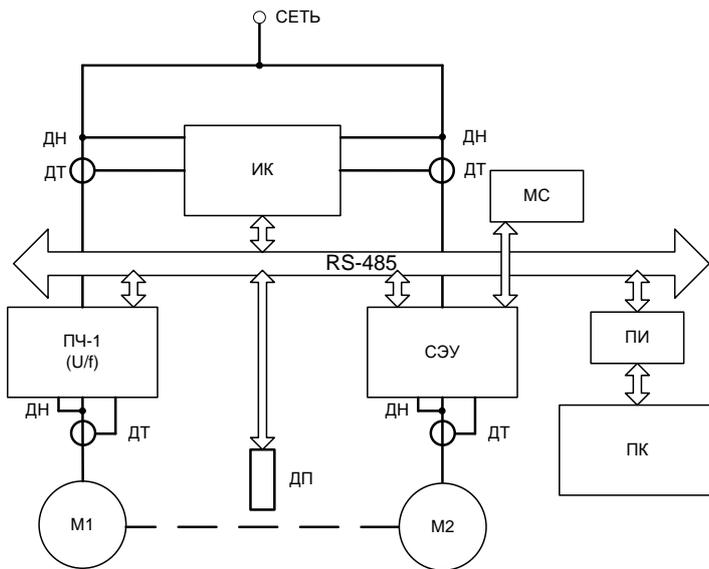


Рисунок 7. Функциональная схема системы контроля



Рисунок 8. Внешний вид системы контроля для исследования электродвигателей с комбинированной обмоткой.

Для передачи данных в системе контроля реализована цифровая шина на основе интерфейса RS-485 с различными протоколами обмена информацией. ПК подключен к цифровой шине через преобразователь интерфейсов ПИ. Модуль связи МС представлен устройством с преобразователем интерфейсов, осуществляющим преобразование сигналов, полученных по цифровой шине управления RS-485 в значения параметров внутреннего протокола для отправки их по каналам беспроводной связи. Основой вычислительной системы исследовательского преобразователя частоты служит микроконтроллер на базе процессора ATmega2560, имеющий связь с ПК через цифровую шину, дающую

возможность корректировки алгоритмов управления исследуемым электродвигателем. Внешний вид системы контроля показан на рисунке 8, где 1 – нагрузочный электродвигатель, 2 – исследуемый электродвигатель, 3 – промышленный преобразователь частоты, 4 – измерительный комплекс, 5 – система эффективного управления, 6 – регулятор напряжения.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию АДКО на разработанной системе контроля энергетических характеристик электродвигателей и выработке практических рекомендаций по синтезу систем управления электроприводов на основе асинхронных двигателей с комбинированной обмоткой.

Применение разработанной системы эффективного управления и контроля позволило экспериментально подтвердить работоспособность предлагаемого метода управления на основе новой математической модели АДКО. В качестве исследуемого объекта выбран АД с комбинированными обмотками 4А80А4, разработанный группой ученых под руководством Корнилова В.Ю. профессора кафедры ПМ ФГБОУ ВО «КГЭУ» в рамках проведения НИОКР по договору №381-РР от 15.06.2015г. по теме «Разработка энергоэффективного асинхронного электродвигателя» заключенного между ООО «Ремстрой – Энергосервис» и ФГБОУ ВПО «КГЭУ».

В результате проведения процесса компьютерного моделирования системы управления трехфазным инвертором, было разработано и реализовано программное обеспечение для микроконтроллерных систем на базе процессоров Atmega (свидетельство №2021681983 от 15.01.2022). По результатам реализации алгоритмов проведены исследования на разработанной системе контроля энергетических характеристик электродвигателей и получены результаты, подтверждающие правильность реализации. Простая и гибкая реализация системы управления возможна благодаря применению микроконтроллера Atmega2560, который представляет собой хороший баланс между техническими и экономическими характеристиками.

Проведен метрологический анализ каналов измерения системы эффективного управления (СЭУ) и системы контроля, который показал, что максимальная погрешность каналов измерения составила 1,29 % в соответствии с МИ-222, РД-153.

Изначально исследования были направлены на настройку и отладку схемы эффективного управления. После калибровки схемы и корректировки алгоритмов управления, в частности при смещении результирующего вектора магнитного поля статора на 19 градусов относительно положения ротора, при этом учитывались формы напряжения, питающего электродвигатель, с применением спектральной оценки величины высокочастотных составляющих. Результаты исследования показаны на рисунке 9.

Форма волны напряжения электродвигателя на рисунке 9 показывает, что выходное напряжение инвертора, подаваемого на двигатель с частотой 10 Гц, 25 Гц и 50 Гц, имеет аналогичную форму. Однако можно заметить, что при низкочастотном регулировании скорости двигателя форма волны является однородной и циклически подобной, что косвенно указывает на то, что общее

содержание гармоник тока, потребляемого инвертором (THD), имеет небольшое значение на низкой частоте, что подтверждается исследованиями, проведенными многими учеными при проведении экспериментов с прямым подключением АДКО.

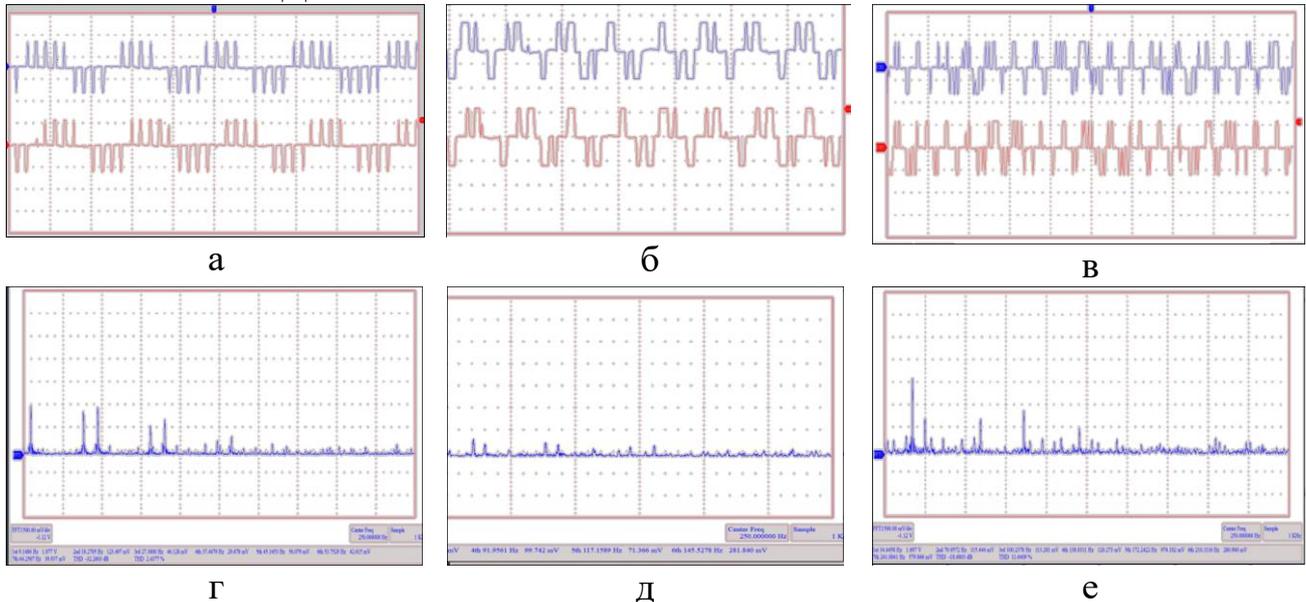


Рисунок 9. Форма выходного напряжения (а, б, в) и гармонического состава тока (г, д, е) преобразователя частоты СЭУ в фазе А и фазе В: а,г - выходное напряжение и гармонический состав тока при 10 Гц; б,д - при 25 Гц; в,е- при 50 Гц

Для получения недостающих данных, таких как крутящий момент на валу электродвигателя, его КПД, применялись методики косвенного расчета, рекомендуемые ГОСТ 11828.

Дальнейшие исследования проводились с применением электромашинного агрегата на основе традиционного АД, подключенного к промышленному преобразователю частоты и АДКО подключенному к преобразователю частоты в составе системы эффективного управления с возможностью отключения системы оптимизации магнитного потока. Все исследования проводились по разработанной методике в соответствии с ГОСТ 11828, ГОСТ 53472, ГОСТ 25941, МИ-222, РД-153.

Полученные данные показывают эффективность применения векторного управления асинхронным электродвигателем с комбинированной обмоткой с оптимизацией магнитного потока по сравнению с управлением от промышленного преобразователя частоты, а также правильность выбора угла смещения результирующего вектора магнитного поля статора.

Опытным путем благодаря разработанной СЭУ удалось достичь увеличения КПД в среднем на 6 % в диапазоне малых нагрузок (рисунок 10) и на 2,29 % в диапазоне низких скоростей вращения (рисунок 11), коэффициента мощности на 8 % (рисунок 12), крутящего момента приблизительно на 15 % во всем диапазоне скоростей (рисунок 13), что существенно больше погрешности измерения канала момента – 1,29 %, по сравнению с промышленным преобразователем частоты, работающим на АДКО. При этом были выявлены пути дальнейшего совершенствования алгоритмов управления для достижения

максимальной энергоэффективности АДКО при работе в составе электроприводов с векторным управлением. При этом был достигнут спектральный состав управляющего напряжения на уровне не ниже, чем при питании АД с комбинированной обмоткой напрямую от сети.

Все результаты экспериментов проанализированы на предмет отличия численных результатов на значимость, то есть превышение уровня случайных погрешностей. Анализ проводился методом сравнения дисперсий при помощи F-распределения Фишера и модифицированным тестом Стьюдента, который показал значимость расхождения между результатами испытаний.

В завершении исследований был проведен сравнительный анализ данных, полученных при моделировании процесса управления с оптимизацией магнитного потока и данных, полученных при исследованиях, проводимых с применением электромашинного агрегата, системы эффективного управления и контроля для скорости вращения вала 859 об/мин. Результаты показаны на рисунке 14.

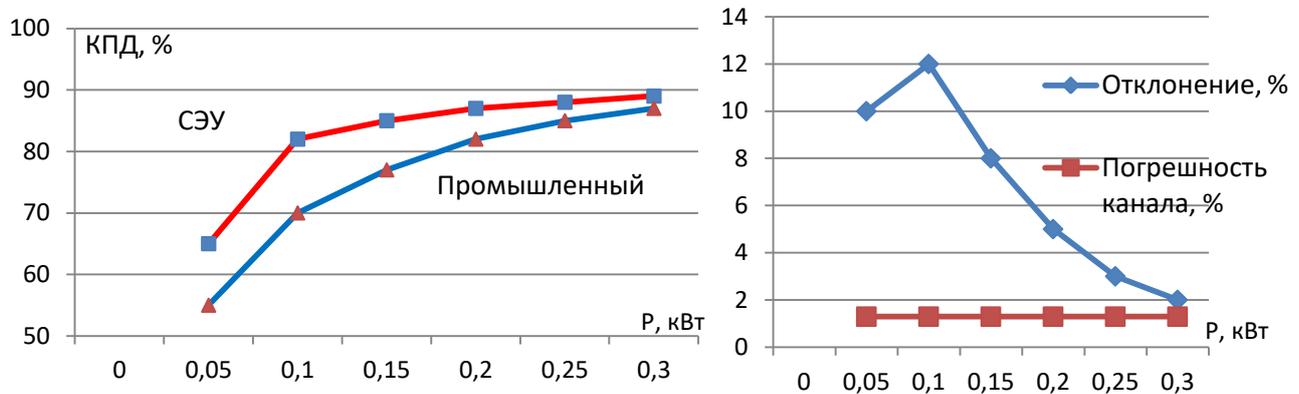


Рисунок 10. График изменения КПД исследуемого АД 4А80А4 в зависимости от отдаваемой полезной мощности при питании от промышленного преобразователя частоты и СЭУ

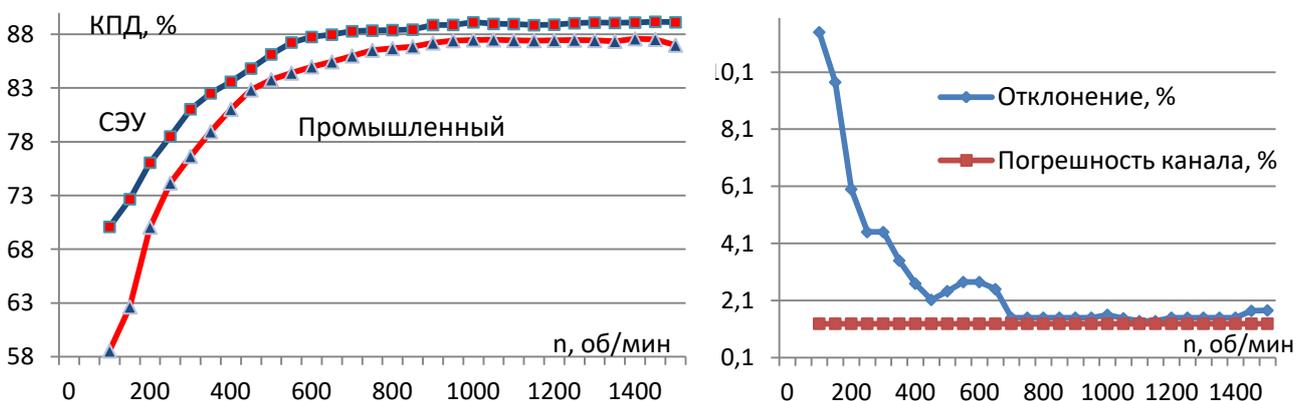


Рисунок 11. График изменения КПД исследуемого АД 4А80А4 в зависимости от скорости вращения при питании от промышленного преобразователя частоты и СЭУ

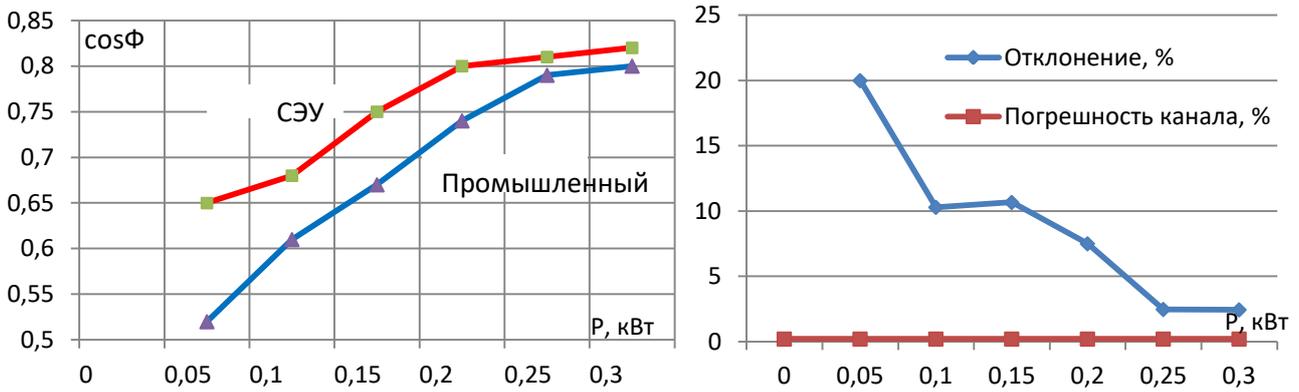


Рисунок 12. График изменения значения коэффициента активной мощности исследуемого АД 4А80А4 в зависимости от отдаваемой полезной мощности при питании от промышленного преобразователя частоты и СЭУ

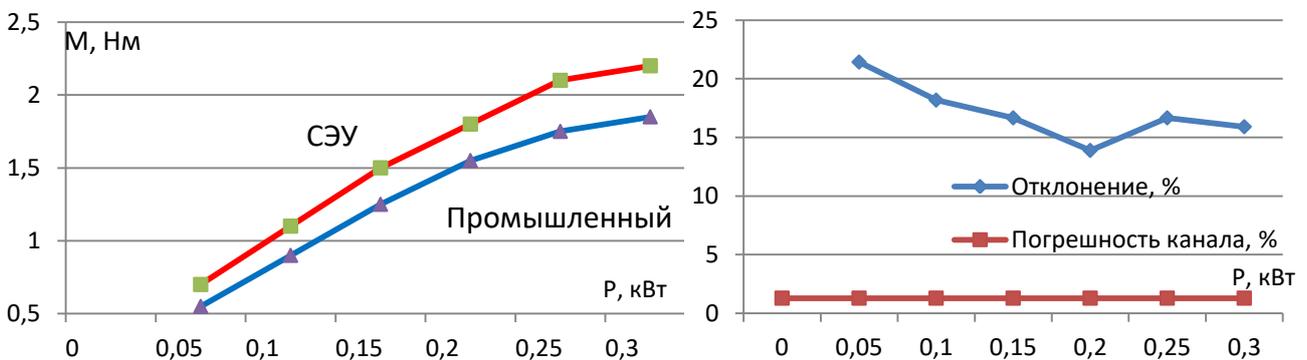


Рисунок 13. График изменения значения момента исследуемого АД 4А80А4 в зависимости от отдаваемой полезной мощности при питании от промышленного и преобразователя частоты и СЭУ

Анализ проводился на основе графиков, приведенных на рисунке 3, где показаны зависимости потерь мощности от момента нагрузки на валу двигателя, полученные при моделировании системы в среде Simulink, приведенные к потребляемой мощности всей системы и на основе графиков, приведенных на рисунке 13, где показаны зависимости полезного момента нагрузки на валу в зависимости от полезной мощности электропривода, являющейся рабочей характеристикой АДКО.

Как можно увидеть из графиков (рисунок 14), величина потерь мощности при испытаниях несколько больше потерь мощности, полученных при моделировании. Объясняется это тем, что при моделировании не учитывались механические потери и потери на трение. Кроме этого, из графика видно, что при больших нагрузках разница между результатом моделирования и результатом испытаний больше, чем при небольшой нагрузке, это объясняется тем, что при увеличении нагрузки увеличивается ток питания статора, увеличивается наведенный магнитный поток, в результате чего увеличиваются потери в меди и железе.

В среднем отклонение экспериментальных данных от данных, полученных при моделировании составило 2 %.

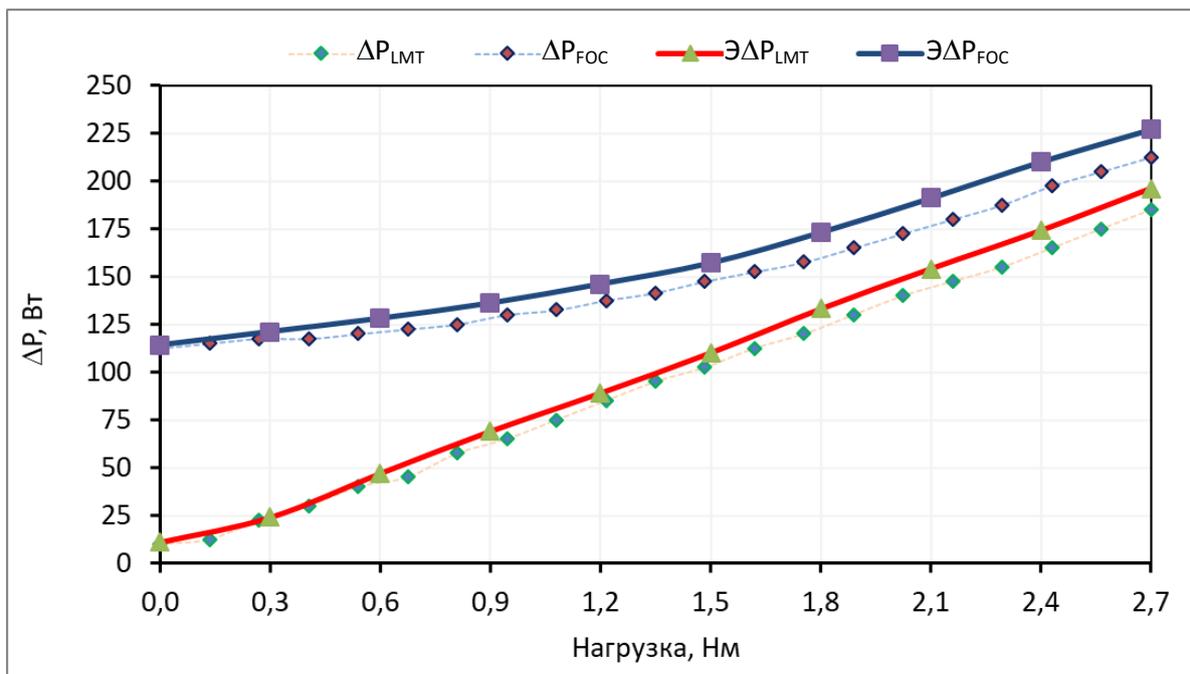


Рисунок 14. Сравнительный анализ результатов, полученных при моделировании (ΔP_{LMT} и ΔP_{FOC}) и испытаниях системы эффективного управления с оптимизацией магнитного потока ($\text{Э}\Delta P_{LMT}$) и без оптимизации ($\text{Э}\Delta P_{FOC}$)

В настоящее время ни один промышленный преобразователь частоты не имеет специальных настроек для работы с АДКО, кроме этого их программное обеспечение имеет закрытый характер и отсутствует возможность корректировки алгоритмов для тонкой настройки. Для практической реализации методов управления АДКО с помощью промышленно выпускаемых преобразователей частоты можно сформулировать перечень следующих мероприятий:

1. Введение в программное обеспечение преобразователей частоты алгоритмов для эффективной работы с АДКО.
2. Построение алгоритмов для работы с АДКО должно вестись на основе предложенной математической модели.
3. Формировать результирующий вектор магнитного поля статора смещенным на 19 градусов относительно положения ротора.
4. Ввести возможность корректировки результирующего вектора магнитного поля обмотки статора для более точной настройки электропривода под выполняемые задачи в автоматическом режиме.

Выполнение предложенных практических рекомендаций позволит производителям преобразователей частоты расширить функциональные возможности своей продукции и повысить энергоэффективность электроприводов на основе АДКО как перспективных энергоэффективных двигателей.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В соответствии с задачами исследований в диссертационной работе получены следующие результаты:

1) проанализированы конструктивные особенности традиционных асинхронных электродвигателей и двигателей с комбинированной обмоткой, показаны преимущества АДКО и трудности в управлении от частотных преобразователей, рассмотрены существующие системы управления и контроля электроприводами, выявлены их недостатки;

2) разработана математическая модель электродвигателя с комбинированной обмоткой, позволяющая использовать традиционные методы управления двигателем с корректировкой настраиваемых коэффициентов;

3) разработан образец системы эффективного управления и контроля, позволяющая исследовать электродвигатели различных типов, имеющая гибкое программное обеспечение, позволяющее применять различные методы управления двигателями и повышающая эффективность управления двигателями за счет корректировки ориентации магнитного поля и снижения потерь мощности;

4) проведены экспериментальные исследования, подтверждающие работоспособность и эффективность разработанной системы управления и контроля, разработаны практические рекомендации по внедрению алгоритмов управления электродвигателями с комбинированной обмоткой с целью расширения функциональных возможностей промышленно выпускаемых преобразователей частоты и более широкого внедрения в системы электропривода энергоэффективного электродвигателя АДКО.

Дальнейшим развитием предпринятых нами исследований может быть применение метода прямого управления моментом электродвигателя с комбинированными обмотками для более эффективной работы в составе электроприводов, предназначенных для широкой сферы применения как в машиностроительной, так и в нефтяной промышленности.

Основные материалы диссертации опубликованы в работах:

Статья в рецензируемом научном издании, индексируемом в международной базе данных Web of Science и SCOPUS

1. Doan, N. S. Study and implementation of space vector pulse width modulation inverter on an Arduino / N. S. Doan, A. N. Tsvetkov, T. H. Nguyen // E3S Web of Conferences 288 – 2021- 01059. [Исследование и реализация инвертора пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции на ардуино].

Статьи в рецензируемом научном издании, входящем в перечень ВАК

2. Доан, Н. Ш. Аппаратно-программный комплекс для экспериментального исследования электроприводов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с традиционной обмоткой и двигателей с комбинированной обмоткой / А. Н. Цветков, Н. Ш. Доан // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики – 2021. – Т.23. - № 6. – С.157-165.

3. Доан, Н. Ш. Исследования по оптимизации векторного управления асинхронным двигателем с применением системы аналитического контроля/ А.

Н. Цветков, Н. Ш. Доан, Д. А. Ярославский // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики – 2022. - Т.24. - № 3. – С.144-157.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

4. Свидетельство № 2021681983 Рос. Федерация. Управление макетным образцом аналитического контроля электродвигателей с комбинированной обмоткой с возможностью корректировки модели. / Цветков Алексей Николаевич, Доан Нгок Ши, Манахов Валерий Александрович. – № 2021681236; заявл. 21.12.2021; зарегистр. 28.12.2021; опубл. 15.01.2022. – 1 с.

Публикации в материалах докладов международных и всероссийских научных конференций

5. Доан Нгок Ши, Исследования по созданию модели системы сбора, контроля и мониторинга данных для систем электроснабжения / Доан Нгок Ши, А. Н. Цветков // XIV Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские Чтения» Казань, 23 – 26 апреля 2019 г. - Т.1, Ч.1 - С. 195-199.

6. Доан Нгок Ши, Использование элементов системы электроснабжения в качестве датчиков параметров в системах автоматизированного управления / Доан Нгок Ши, А. Н. Цветков // VI Международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» Альметьевск 16-18 октября 2019 г. - С.389-393.

7. Доан Нгок Ши, Промышленная система управления и контроля энергопотребления / Доан Нгок Ши, А. Н. Цветков // V Национальная научно-практическая конференция «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве» Казань, 12–13 декабря 2019 г. - Т.1 – С. 242-246.

8. Доан Нгок Ши, Разработка устройства для управления и мониторинга систем электроснабжения / Доан Нгок Ши, Нгуен Тхи Хоа, А. Н. Цветков // Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские Чтения – 2020 «Энергетика и цифровая трансформация» Казань, 28–29 апреля 2020 г. - Т.1- С. 166 - 168.

9. Доан Нгок Ши, Исследование асинхронных двигателей с совмещенными обмотками для усовершенствования методов управления / Доан Нгок Ши, А. Н. Цветков // XXV Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика. Казань, 7-8 декабря г. –, 2021.- Т.1- С.95 - 98.

10. Доан Нгок Ши, Исследование и разработка векторного инвертора для управления асинхронным двигателем / Доан Нгок Ши // VII Национальная научно-практическая конференция «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве» Казань, 9-10 декабря 2021 г.- С.162-165.

11. Доан Нгок Ши, Управление асинхронными двигателями с комбинированной обмоткой методом прогноза напряжения / Доан Нгок Ши, А. Н. Цветков // Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские Чтения – 2022. «Энергетика и цифровая трансформация». Казань, 27–29 апреля 2022 г. - Т.1. - С.187 - 190.

Подписано в печать 03.07.2024.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Формат 60x84 1/16. Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 1,16.
Уч.-изд. л. 1,44. Тираж 100 экз. Заказ 10/7

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии Издательства Казанского университета

420008, г. Казань, ул. Профессора Нужи́на, 1/37
тел. (843) 206-52-14 (доп. 1705), 206-52-14 (доп. 1704)