

На правах рукописи



АЛЕЙНИКОВ Алексей Владимирович

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВИБРОУСИЛИЙ В МНОГОФАЗНОМ
МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования (ФГБОУ ВО) «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» на кафедре «Теоретические основы электротехники и электротехнологии».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Голубев Александр Николаевич**

Официальные оппоненты:

Сафин Альфред Робертович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»;

Хватов Олег Станиславович, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта».

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» г. Екатеринбург.

Защита состоится «13» мая 2022 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru .

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.064.02,
канд. техн. наук, доцент



Копылова
Лариса Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время электроприводы на основе синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) получают все большее распространение. Это связано как с рядом преимуществ, в числе которых улучшенные массогабаритные показатели, отсутствие щеточно-коллекторного узла, высокий КПД, низкий момент инерции ротора, отсутствие скольжения, так и с тем, что развитие технологий изготовления высококоэрцитивных постоянных магнитов привело к значительному снижению их стоимости. Кроме того, данные двигатели могут работать в бездатчиковых системах управления с помощью лишь одного преобразователя частоты.

Развитие техники и технологии производства постоянно диктует все более жесткие требования к электроприводам, в том числе и к их виброшумовым характеристикам. Вибрации возникают из-за переменных сил, действующих на различные элементы электрической машины и вызывающих их деформацию. По характеру возникновения их можно разделить на механические, аэродинамические и электромагнитные. Вибрации первой группы могут быть вызваны дисбалансом ротора, технологией изготовления и износом подшипников, несосным соединением двигателя с нагрузкой, низкой температурой масла (при его принудительной циркуляции). Во вторую группу входят, в основном, вибрации, определяемые конструкцией вентиляторов и вентиляционных каналов. К третьей группе относятся вибрации, вызванные электромагнитными силами, возникающими между различными частями электрической машины. Условно они делятся на радиальные, тангенциальные и осевые. Пульсации электромагнитного момента (тангенциальных сил) приводят к неравномерности вращения двигателя, что может снижать качество обработки деталей и увеличить нагрузку на элементы креплений и подшипниковые узлы. Радиальные силы, приложенные к зубцам, вызывают деформации статорного кольца и являются основной причиной возникновения магнитных шумов.

Вибрации в техническом плане приводят к преждевременному износу механизмов и их выходу из строя. При низких частотах вращения двигателя частота шумов может совпадать с частотой колебаний внутренних органов человека, таких как: глаза (40-100 Гц), мозг (8-35 Гц), кровеносная система (6-15 Гц) и другие. Воздействие колебаний на таких частотах могут оказывать неблагоприятное влияние на организм человека. Поэтому с шумом борются как на стадии проектирования электродвигателей, так и активным путем, посредством применения интерференционного метода, суть которого заключается в противофазном наложении колебаний. Однако наилучших результатов можно добиться только при использовании специальных алгоритмов управления двигателем, конструкция которого разрабатывалась с учетом требований по снижению вибраций и шумов.

В настоящее время существуют различные системы управления СДПМ. Например, при помощи полупроводникового преобразователя, в котором ком-

мутация ключей фаз жестко привязана к положению ротора, при помощи датчика угла поворота ротора, векторного управления, прямого управления моментом и др. Перспективными считаются системы, основанные на нейронных сетях, генетических алгоритмах, наблюдателях состояния и алгоритмах с нечеткой логикой.

Кроме того, поскольку в большинстве случаев питание электродвигателя в приводах осуществляется от инвертора, все большее распространение получают многофазные системы, обладающие более высокой отказоустойчивостью и лучшими энергетическими и виброшумовыми характеристиками.

Большой вклад в развитие алгоритмов управления и изучение вибраций и шумов, возникающих в электродвигателях, внесли ученые: Войтицкий С.А., Корельский Д.В., Васильева Е.В., Иванов-Смоленский А.В., Seok J.K., Kim J.S., Sul S.K., Umamaheshwar K. и др.

В настоящее время математическое описание СДПМ основано либо на уравнениях Парка-Горева, которые применяются уже около ста лет и обладают рядом существенных допущений, либо на полевых моделях, которые требуют значительных вычислительных ресурсов и, как следствие, не могут быть использованы непосредственно в системах управления. По этой причине требуется разработать математическую модель, которая обладала бы точностью полевой, но позволяла бы вести расчеты в реальном времени, что позволит реализовать на ее основе систему управления в микропроцессоре.

Объектом исследования является многофазный синхронный магнитоэлектрический электропривод.

Предметом исследования являются модели, методы, алгоритмы и системы управления многофазным магнитоэлектрическим электроприводом.

Цель и задачи диссертационной работы. Целью диссертационной работы является разработка и исследование системы автоматического управления многофазным СДПМ, обеспечивающей снижение пульсации электромагнитных виброусилий в двигателе за счет целенаправленного формирования величины и формы фазных токов.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель многофазного СДПМ, учитывающую конструктивные особенности, дискретное распределение обмоток по пазам, насыщение магнитной цепи, позволяющую в режиме реального времени определять электромагнитный момент и радиальные силы, действующие на зубцы статора двигателя.

2. Разработать метод задания формы фазных токов СДПМ, обеспечивающий снижение пульсаций радиальных сил и переменной составляющей электромагнитного момента с учетом заданных ограничений по амплитудным и среднеквадратичным значениям напряжений и токов.

3. Создать систему управления многофазным электроприводом, позволяющую питать двигатель фазными токами, величиной и формой снижающими пульсации электромагнитных виброусилий.

4. Провести физическое и имитационное исследование разработанного многофазного магнитоэлектрического электропривода.

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности ВАК 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» в части:

формулы специальности – «... исследования по общим закономерностям преобразования ... электрической энергии, ... принципы и средства управления объектами, определяющие функциональные свойства ... электротехнических комплексов. ... объектами изучения являются электротехнические комплексы ... электропривода...», так как исследуется многофазный магнитоэлектрический электропривод со сниженными пульсациями электромагнитных виброусилий.

области исследования:

п. 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», так как выполнено математическое моделирование СДПМ, работающего в составе многофазного электропривода, позволяющее в режиме реального времени определять электромагнитный момент и радиальные силы, действующие на зубцы статора;

п. 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления», так как разработан алгоритм управления электроприводом на основе многофазного СДПМ, снижающий пульсации электромагнитных виброусилий.

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель в фазных координатах многофазного СДПМ, работающего в составе электропривода, отличающаяся возможностью в режиме реального времени на основе анализа магнитного поля в активной зоне, определять электромагнитный момент и радиальные силы, действующие на зубцы статора.

2. Предложен алгоритм управления многофазным электроприводом, отличающийся возможностью целенаправленно задавать в СДПМ токи по величине и форме, обеспечивающие снижение пульсаций электромагнитных виброусилий и электромагнитного момента с целью улучшения виброшумовых показателей.

3. Разработана система управления многофазным электроприводом, реализующая предложенный алгоритм формирования фазных токов, обеспечивающих снижение электромагнитных виброусилий.

Теоретическая значимость работы заключается в следующем:

1. Изложен метод моделирования многофазного СДПМ, позволяющий на основе численного анализа магнитного поля в активной зоне проводить исследование работы СДПМ в статических и динамических режимах работы электропривода.

2. Исследовано влияние конструктивного исполнения индуктора СДПМ и количества фаз на электромагнитные виброусилия.

3. Разработан способ управления СДПМ, позволяющий задавать токи специально синтезируемых величины и формы, обеспечивающих снижение пульсаций электромагнитных сил в многофазном электроприводе.

Практическая значимость работы

1. Предложена математическая модель СДПМ, позволяющая без использования понятия пространственных и временных гармонических проводить анализ мгновенных значений электромагнитного момента и радиальных сил, действующих на зубцы статора многофазных СДПМ в статических и динамических режимах работы электропривода с учетом распределения магнитного поля в активной зоне, обеспечивающая повышение точности расчетов и ее использование в режиме реального времени в электромеханической системе.

2. Выводы и результаты, могут быть использованы при разработке систем управления многофазными синхронными магнитоэлектрическими электроприводами с улучшенными показателями по вибрациям и шумам.

3. Теоретические и практические результаты использованы в учебном процессе ИГЭУ в дисциплине «Моделирование в электротехнике» по профилю подготовки «Электротехнологические установки и системы».

Методы исследования. Теоретические исследования основаны на использовании методов теории магнитного поля, теории электрических цепей, в частности методы численного моделирования в специализированных программных обеспечениях ElCut и Matlab Simulink, теории автоматического управления и автоматизированного электропривода. Экспериментальные исследования проводились на базе инвертора, позволяющего поддерживать заданную форму токов.

Обоснованность научных положений, изложенных в диссертации, обеспечивается использованием общеизвестных положений теории электропривода и теории автоматического управления, аналитических и численных методов математического моделирования.

Достоверность полученных результатов подтверждается сопоставлением расчёта по разработанным моделям с существующими методиками при одинаковых с ними условиях проведения модельного и физического эксперимента.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель электропривода в фазных координатах на основе синхронного многофазного электродвигателя с постоянными магнитами, позволяющая в режиме реального времени определять электромагнитный момент и радиальные силы, действующие на зубцы статора с учетом конструкции машины, дискретного распределения обмоток по пазам, насыщения магнитной цепи.

2. Алгоритм расчета мгновенных значений фазных токов в многофазном электроприводе, обеспечивающих постоянство электромагнитного момента и

снижение пульсаций радиальных электромагнитных сил, действующих на зубцы синхронного электродвигателя с постоянными магнитами.

3. Система управления многофазным электроприводом, обеспечивающая питание синхронного магнитоэлектрического двигателя фазными токами синтезируемой величины и формы, снижающими пульсации электромагнитных виброусилий.

Апробация и реализация результатов исследований. Основные результаты работы доложены и обсуждены на следующих международных и российских конференциях: Международная конференция «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения)» (Иваново, 2015, 2017, 2019 гг.), Международная конференция «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2015-2017 гг.), Международная конференция «Тинчуринские чтения» (Казань, 2015 -2016гг.), Международная конференция «Энергия» (Иваново, 2014-2017 гг.), Международная конференция «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты» (Крым, Алушта 2014), Международная конференция по автоматизированному электроприводу АЭП (Новочеркасск, 2018), Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электроэнергетики-2021» (Нижний Новгород, 2021).

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 20 печатных работах, в том числе 5 работ в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в действующий перечень ВАК; 1 работа в журнале, индексируемом в базе данных SCOPUS.

Личный вклад. Автором сформулированы основные принципы моделирования и разработаны математические модели для исследования электромагнитных процессов в многофазном синхронном двигателе в реальном времени с учетом активной зоны машины и насыщения магнитной цепи. Разработан алгоритм управления многофазным синхронным двигателем, позволяющий питать двигатель фазными токами требуемой формы, которая позволяет улучшить вибросиловые характеристики. Автор провёл анализ и обобщение результатов, подготовил основные публикации по проделанной работе.

Структура работы. Диссертация включает в себя: введение, четыре главы, заключение, список литературы из 113 наименований и 10 приложений общим объёмом 136 страниц печатного текста. Основной текст диссертации изложен на 102 страницах и содержит 60 рисунок, 59 формул и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели работы, положения, выносимые на защиту, обусловлен выбор методов исследования, отмечена научная новизна и теоретическая значимость работы.

В первой главе описываются основные преимущества и недостатки современных синхронных СДПМ. Перечисляются перспективные направления и особенности использования СДПМ. Рассматриваются преимущества использования многофазных систем. Приводятся основные разновидности существующих

щих систем автоматического управления синхронными магнитоэлектрическими электроприводами, их основные преимущества и недостатки. Отмечается, что активно развиваются бездатчиковые системы управления, основанные на использовании настраиваемых математических моделей СДПМ и позволяющие отказаться от применения дополнительных механических устройств, устанавливаемых на валу двигателя. Рассматриваются системы управления с применением скользящих режимов, наблюдателей состояния и интеллектуальных подходов, таких как нейронные сети, генетические алгоритмы и другие.

На основе рассмотрения современных систем управления делается вывод о том, что актуальным приоритетом развития электроприводов является уменьшение пульсаций электромагнитного момента, точность отработки программного задания (скорости или положения ротора), снижение вычислительной нагрузки на микропроцессор, улучшение вибро-акустических показателей.

В конце главы формулируются основные задачи, решаемые в работе.

Во второй главе представлено математическое описание многофазного СДПМ и разработаны подходы к определению фазных токов, электромагнитного момента и радиальных сил при известных значениях фазных или линейных напряжений.

В реальных электрических машинах возникающая при работе противо-ЭДС имеет несинусоидальную форму, что приводит к тому, что в каждый момент времени режим работы цепи несимметричный. В большинстве конструкций СДПМ не предусмотрена установка нейтрального провода, что приводит к возникновению напряжения смещения нейтрали и сложности определения напряжения непосредственно на фазах двигателя. В таком случае возможно вести расчет через линейные напряжения. Тогда в матричной форме уравнение переменных состояния будет иметь вид:

$$[u_{л}] = [B][R][i] + [B] \frac{d[\Psi]}{dt}, \quad (1)$$

где: $[u_{л}]$ – матрица линейных напряжений; $[B]$ – матрица контуров; $[R]$ – диагональная матрица активных сопротивлений фазных обмоток; $[i]$ – матрица-столбец мгновенных фазных токов; $[\Psi]$ – матрица-столбец мгновенных значений потокосцеплений фаз обмотки статора.

Относительные магнитные проницаемости высококоэрцитивных ПМ близки к единице и гораздо меньше магнитных проницаемостей стали статора. Поэтому вполне корректным представляется допущение о том, что в двигателях, у которых большую часть поверхности ротора занимают постоянные магниты, насыщение магнитной цепи статора обусловлено действием только постоянных магнитов ротора. Следует отметить, что СДПМ такой конструкции обладают относительно низким влиянием реакции якоря. В работе показано, что в пределах номинальной нагрузки насыщение магнитной цепи статора практически не меняется по сравнению с режимом холостого хода. Следовательно, потокосцеп-

ления фаз обмотки статора $[\Psi]$ можно представить в виде суммы потокосцеплений от ПМ ротора и фазных токов статора.

$$[\Psi] = [\Psi_0] + [L][i], \quad (2)$$

где $[\Psi_0]$ – матрица-столбец потокосцеплений фаз, обусловленных ПМ ротора; $[L]$ – матрица само- и взаимоиндуктивностей фаз обмотки статора.

С учетом (2) уравнения переменных состояния многофазной обмотки статора СДПМ примут вид:

$$\frac{d[i]}{dt} = [L]^{-1} \left([u] - \Omega \frac{d[\psi_0]}{d\alpha} - \Omega \frac{d[L]}{d\alpha} [i] - [R][i] \right), \quad (3)$$

где: $[u]$ – матрица-столбец мгновенных напряжений, приложенных к фазам обмотки статора; $[R]$ – диагональная матрица активных сопротивлений фазных обмоток; Ω – угловая частота вращения ротора; α – угол поворота ротора относительно статора в момент времени t .

В случае, если нейтральный провод отсутствует, будут известны только линейные напряжения, а ток одной из ветвей всегда может быть выражен через токи всех остальных. В связи с этим количество уравнений, необходимых для расчета электрической цепи, будет на одно меньше количества фаз ($m-1$). С учетом этого данную схему можно рассчитать матричным методом контурных токов. Тогда уравнение (3) преобразуется к виду:

$$\frac{d[i]}{dt} = B^T \cdot ([u_L] - B[R]B^T [i_K] - \Omega B \frac{d[L]}{d\alpha} [i_K] - \Omega B \frac{d[\Psi]}{dt}) / (B \cdot [L] \cdot B^T). \quad (4)$$

Электромагнитный момент СДПМ можно найти, исходя из изменения энергии в линейной модели нелинейной системы, которое происходит в условиях сохранения постоянными значений токов фаз обмоток статора при малом перемещении ротора. Проведенные исследования показали, что насыщение магнитной цепи в СДПМ обусловлено только действием постоянных магнитов. Учитывая вышесказанное электромагнитный момент можно определить по формуле (5).

$$M_{\mathcal{E}} = [i]^T \frac{d[\psi_0]}{d\alpha} + \frac{1}{2} [i]^T \frac{d[L]}{d\alpha} [i]. \quad (5)$$

Кривые изменения потокосцеплений фаз статора, обусловленные действием ПМ $[\Psi_0]$, и индуктивностей матрицы само- и взаимоиндуктивностей $[L]$ от угла поворота ротора α не зависят от режима работы СДПМ и могут быть определены методами теории поля. Элементы матрицы $[\Psi_0]$ могут быть найдены из полевой модели в режиме холостого хода с учетом насыщения магнитной цепи, дискретного распределения многофазной обмотки по пазам, зубчатости статора. Для определения элементов матрицы $[L]$ при известном угле поворота ротора α необходимо произвести расчет полевой модели в линеаризованной активной зоне ($\mu = const$) при возбуждении произвольным значением тока в одной из фаз, при этом области, занятые ПМ, заменяются средами без источников поля, маг-

нитные проницаемости которых равны магнитным проницаемостям ПМ. Предварительно определив эти зависимости и найдя их производные, можно определять текущее значение электромагнитного момента, зная угол поворота ротора α и мгновенные значения фазных токов.

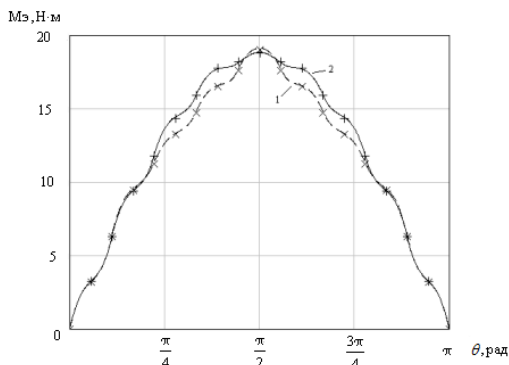


Рис. 1. Зависимости электромагнитного момента от угла нагрузки θ трехфазного (1) и девятифазного (2) СДПМ.

Как следует из сопоставления полученных результатов погрешность не превышает 3%

Значение радиальной силы, действующей на зубцы статора, будет пропорционально квадрату величины магнитного потока, силовые линии которого входят в соответствующий зубец со стороны зазора. Источниками МДС магнитной цепи СДПМ являются постоянные магниты и токи статорной обмотки. При принятых допущениях можно считать, что магнитный поток наконечника зубца будет равен сумме магнитного потока от постоянных магнитов и от токов статорной обмотки. Однако на границе между полюсами из ПМ будет иметь место ситуация, когда часть магнитного потока от постоянных магнитов будет замыкаться через один зубец. Данный эффект будет наблюдаться, если часть зубца будет находиться над одним полюсом, а вторая - над другим. В этом случае направление магнитного потока от постоянных магнитов будет менять свой знак в пределах одного зубца. Тогда целесообразно разбить данный зубец на два участка и находить алгебраическую сумму магнитных потоков на каждом участке отдельно. В итоге радиальную силу, действующую на зубец можно будет находить по формуле:

$$F_r(\alpha) = \frac{\left(\left| \Phi_{ПМ+}(\alpha) + \lambda(\alpha) \cdot i_{3К} \frac{S_{Z+}(\alpha)}{S_Z} \right| + \left| \Phi_{ПМ-}(\alpha) - \lambda(\alpha) \cdot i_{3К} \frac{S_{Z-}(\alpha)}{S_Z} \right| \right)^2}{2\mu_0 S_Z}, \quad (6)$$

где $\Phi_{ПМ+}$ – магнитный поток, обусловленный действием ПМ от южного полюса; $\Phi_{ПМ-}$ – магнитный поток, обусловленный действием ПМ от северного полюса; S_Z – площадь наконечника зубца; S_{Z+} – площадь наконечника зубца, через

Для проверки адекватности принятых допущений были проведены расчеты электромагнитных моментов соответственно трехфазного (1) и девятифазного (2) СДПМ при токах, соответствующих номинальным, для различных углов нагрузки θ (рис. 1).

На рис. 1 значения момента, определенные при принятых допущениях по (5) обозначены линиями, а определенные методом конечных элементов в программном комплексе Elcut с учетом кривой намагничивания стали статора представлены от-

которую проходят силовые линии потока $\Phi_{ПМ+}$; S_{Z-} – площадь наконечника зубца, через которую проходят силовые линии потока $\Phi_{ПМ-}$; i_{3K} – ток рассматриваемого зубцового контура, который определяется как разность мгновенных токов двух соседних пазов; $\lambda(\alpha)$ – магнитная проводимость зубцового контура.

Токи зубцовых контуров (МДС) [i_{3K}] могут быть выражены через значения токов ветвей машины [i] с помощью матрицы преобразования, которая зависит от распределения обмоток по пазам.

Для уменьшения пульсаций электромагнитного момента предлагается изменять амплитуду питающих токов для первой гармоники таким образом, чтобы в любой момент времени электромагнитный момент, создаваемый двигателем, был равен заданному. При этом зависимости токов от угла поворота ротора для каждой фазы статора будут определяться следующим образом:

$$i_k(\alpha) = I_m(\alpha) \sin\left(\alpha + \theta - \frac{2\pi(k-1)}{m}\right), \quad (7)$$

где $I_m(\alpha)$ – модулированная амплитуда тока; θ – угол нагрузки; m – число фаз.

Для примера на рис. 2 представлены кривые изменения мгновенных фазных токов при установившемся режиме соответственно трехфазного (рис. 2,а) и девятифазного (рис. 2,б) СДПМ, соответствующие постоянному номинальному моменту исследуемого двигателя, а также изменение модулированной амплитуды этих токов $I_m(\alpha)$ по (7).

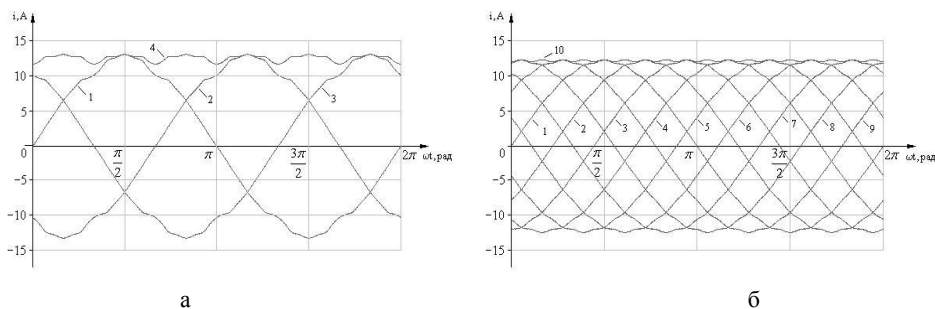


Рис. 2. Кривые изменения фазных токов для поддержания постоянного момента: а) трехфазного; б) девятифазного СДПМ.

Из полученных результатов следует, что при использовании амплитудной модуляции токов для исключения пульсаций электромагнитного момента СДПМ токи всех фаз трехфазного, также, как и токи всех фаз девятифазного СДПМ, будут иметь одинаковую форму, зависящую от конструкции двигателя, и гармонический состав. При снижении токов относительная амплитудная модуляция тока у девятифазного двигателя гораздо меньше, чем у трехфазного.

Проведенные исследования показали, что полностью устранить пульсации радиальной силы не представляется возможным. Причиной этого является то, что изменение токов практически не изменяет радиальную силу зубца, через который происходит замыкание магнитного потока от разных полюсов магнита,

до тех пор, пока магнитный поток полностью не перестанет замыкаться через данный зубец, что происходит при токах, значительно превышающие допустимые. При этом на эти зубцы действует минимальная радиальная сила. Из этого следует вывод, что целесообразнее уменьшать силу, действующую на остальные зубцы. Основываясь на данной логике, был разработан алгоритм формирования токов статорной обмотки (см. рис. 3), снижающий величину деформации статора, посредством уменьшения разницы между максимальной и минимальной радиальными силами, действующими на зубцы.



Рис. 3. Алгоритм формирования формы фазных токов, обеспечивающих улучшение вибросиловых характеристик многофазного СДПМ.

Алгоритм работает следующим образом: для текущего угла поворота ротора, определенного посредством датчика положения, рассчитываются токи статорной обмотки, необходимые для создания заданного электромагнитного момента, магнитное поле которых будет ортогонально полю ПМ ротора. После этого программа входит в цикл уменьшения пульсаций радиальных сил.

Программа в цикле по разработанной модели определяет радиальные силы, действующие на зубцы, при данных токах и положении ротора. Выбирается

зубец с наибольшим значением силы, для которого определяется градиент зависимости радиальной силы от контурных токов, согласно которому изменяется значение тока зубцового контура выбранного зубца. По текущим значениям токов зубцовых контуров посредством обратной матрицы преобразования определяются фазные токи. После этого проверяется, удовлетворяют ли текущие значения фазных токов заданным ограничениям. Цикл повторяется до тех пор, пока не произойдет выход за ограничения по амплитудному или среднеквадратичному значению тока. Разложив токи в ряд Фурье и оставив только нечетные гармоники с порядковыми номерами, меньшими числа фаз, получаем функцию тока, снижающую пульсации сил, действующих на зубцы при заданных ограничениях на максимальное и среднеквадратичное значения фазного тока.

В качестве примера ниже представлены кривые изменения фазного тока и радиальной силы для девятифазного синхронного двигателя. Приняв ограничение по амплитудному по среднеквадратичному значению токов в 130% от номинальных, удалось при помощи системы управления получить форму токов (рис. 4,а), обеспечивающую постоянство электромагнитного момента и уменьшающую на 15% амплитуду колебаний зависимости радиальной силы, действующей на зубец, от угла поворота ротора (рис. 4,б).

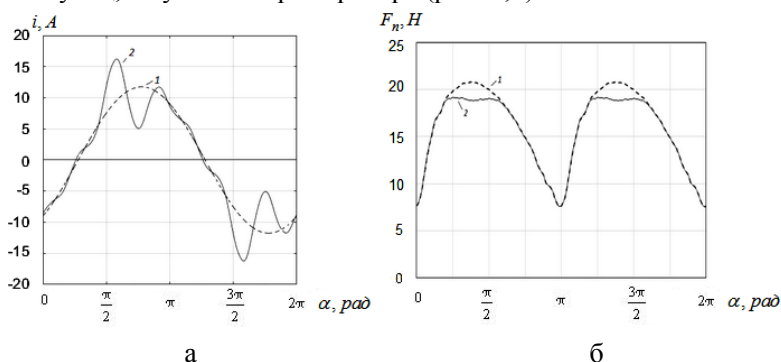


Рис. 4. Графики изменения фазного тока (а) и радиальной силы (б), действующей на зубец: 1 – при питании от синусоидального источника напряжения, 2 – при питании от регулятора, формирующего кривые изменения токов.

При питании двигателя такой формой токов практически исчезают пульсации электромагнитного момента многофазного двигателя ($m > 3$) и снижаются пульсации радиальной силы, что обеспечивает значительное улучшение вибросиловых характеристик привода.

В третьей главе предложена обобщенная структура САУ, снижающая вибрации и соответственно шумы, возникающие при работе СДПМ, посредством изменения формы фазных токов. Рассмотрены различные варианты алгоритмов управления, приведены их преимущества и недостатки.

Предлагается два пути решения задачи питания двигателя определенной формой фазных токов. Первый способ заключается в использовании системы подчиненного регулирования с тем отличием, что задание на регуляторы тока

определяется согласно формуле (7). Такой способ имеет два серьезных недостатка. Во-первых, он подходит для приводов с низкой частотой вращения, где быстродействия регуляторов хватит для обработки задания. Во-вторых, таким способом можно компенсировать только пульсации электромагнитного момента, пульсации же радиальных сил останутся практически незатронутыми. Однако преимуществом данного варианта является простота исполнения, поскольку он легко встраивается в существующие системы управления m -фазным СДПМ. Второй способ заключается в питании двигателя от источников тока. В этом случае в системе управления возникает высокий коэффициент усиления, что может привести к неустойчивой работе всей системы. Избежать этого возможно, ограничивая максимальное напряжение на источнике тока и используя современные микропроцессоры, которые позволяют управлять силовыми ключами с высокой частотой. Реализовать это можно на основе релейного регулятора тока, работающего по следующему алгоритму

$$\begin{cases} u_k = \varphi_k - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \varphi_k; \\ \varphi_k = U_d \text{ if } (i_k < i_{k_3AD}) \text{ and } (i_{k_3AD} > -I_M / 3); \\ \varphi_k = -U_d \text{ if } (i_k > i_{k_3AD}) \text{ and } (i_{k_3AD} < I_M / 3); \\ \text{else } \varphi_k = 0, \end{cases} \quad (8)$$

где u_k – мгновенное значение фазного напряжения; U_d – значение постоянного напряжения на входе инвертора; i_k – мгновенное значение фазного тока; i_{k_3AD} – мгновенное значение задания на ток; i_M – текущее амплитудное значение тока; φ_k – мгновенное значение потенциала на выходе с инвертора.

Для проверки данных положений разработанная уточненная математическая модель СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе была реализована в программе MATLAB (Simulink). Основываясь на результатах ее работы, был сделан вывод, что использование основанного на разработанной математической модели алгоритма корректировки задания для регуляторов тока позволяет снизить пульсации электромагнитного момента только на низких скоростях вращения, поскольку регулятор не успевает обрабатывать постоянно меняющееся задание, однако ее преимуществом являются простота исполнения и легкая интеграция в уже существующую систему управления. При питании двигателя от источника тока с ограниченным напряжением подобных проблем нет. Пульсации электромагнитного момента значительно ниже, поскольку на двигатель подаются токи, соответствующие заданию. На рис. 5 представлены зависимости электромагнитного момента 3-фазного СДПМ при питании его синусоидальным напряжением (рис. 5 (а)), с алгоритмом расчета задания на ток по поперечной оси ротора (рис. 5 (б)) и с релейным регулятором тока (рис. 5 (в)). В системе подчиненного регулирования постоянная времени настройки конту-

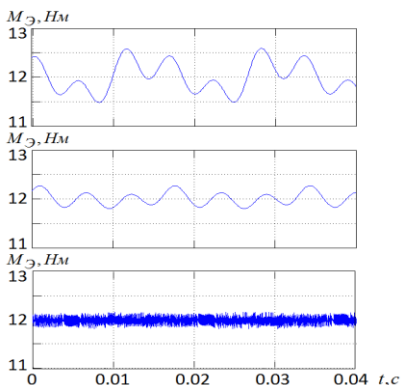


Рис. 5. Графики электромагнитного момента 3х-фазного СДПМ с разными системами управления:
 а) подчиненного регулирования;
 б) подчиненного регулирования с блоком расчета задания на ток;
 в) с релейным регулятором тока

нием на входе в 311 В. Данного значения напряжения недостаточно, чтобы обеспечить форму тока, точно повторяющую заданную на участках с высокими значениями тока и его производной. Это не позволяет обеспечить полное устранение пульсаций как радиальной силы, так и электромагнитного момента. Для сравнения на рис. 6 (б) представлены результаты расчета этого же двигателя, с системой управления с питанием от синусоидального источника.

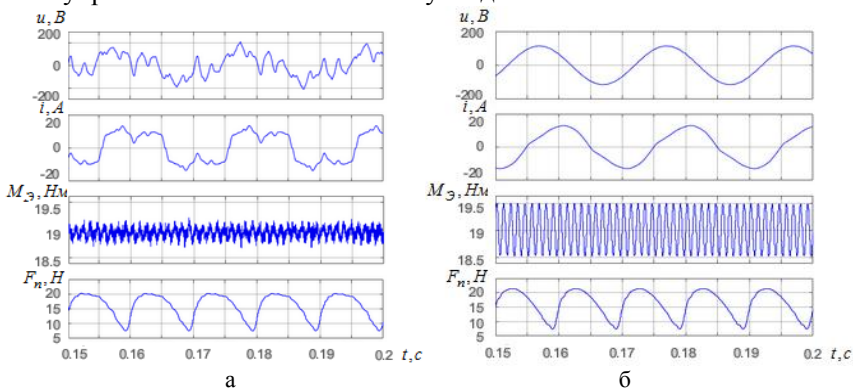


Рис. 6 Результаты расчета установившегося режима работы девятифазного СДПМ
 а) с системой управления, улучшающей вибросиловые характеристики; б) с источником синусоидального напряжения.

ров тока $T_f=0.0002$ с, а максимальная частота коммутаций ключей релейного регулятора тока была ограничена 7 кГц.

Для того, чтобы управлять силой на каждый зубец отдельно необходим многофазный двигатель с числом катушек на одну фазу, равным 1. Последнее, кроме того, являясь следствием увеличения числа фаз, улучшает использование статорной обмотки, не приводя при этом к ухудшению энергетики.

На рис. 6 (а) представлены результаты расчета математической модели девятифазного СДПМ с системой управления уменьшающей пульсации электромагнитных сил при ограничении по действующему и амплитудному значениям тока в 130% от номинального. Питание двигателя моделировалось от инвертора с номинальным напряжением

Результаты проведенного исследования показали, что возможно добиться снижения пульсаций радиальной силы и электромагнитного момента, при этом оставаясь в рамках заданных ограничений по напряжению и току.

В четвертой главе проводится сопоставление результатов исследования разработанной модели с физическим объектом и результатами полевого моделирования, описывается разработанная физическая модель однофазного релейного регулятора тока, реализованного для проверки работы алгоритма управления ключами инвертора с целью обеспечения заданной формы фазных токов. Приводится проверка адекватности разработанной математической модели для различного исполнения индуктора двигателя, проводится анализ влияния форм магнитов и числа фаз на вибросиловые характеристики.

Для проверки адекватности разработанной математической модели СДПМ проводились сопоставления результатов ее расчета с известными интегральными параметрами двигателя, а также с мгновенными значениями напряжения и электромагнитного момента, полученными посредством полевого моделирования. Проведенные исследования показали высокую степень достоверности разработанной модели.

Исследование работоспособности алгоритма управления ключами инвертора для формирования заданной формы тока, осуществлялось на однофазной схеме реализованной на базе микропроцессора Atmel mega328r с опорной частотой кварцевого генератора 16 МГц. В качестве нагрузки использовалась катушка индуктивности с постоянной времени переходного процесса 27 мс. Для стабильной работы микропроцессора максимальная частота коммутаций ключа ограничена значением в 5 кГц. На рис. 7 представлены осциллограммы работы данного инвертора.

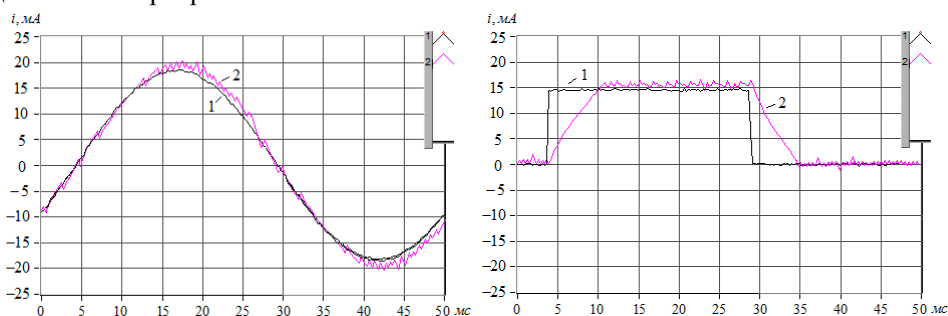


Рис. 7 Осциллограммы работы физической модели инвертора, поддерживающего заданное значение тока: 1- задание на ток, 2- ток через нагрузку.

Результаты эксперимента показывают, что алгоритм работает устойчиво и обрабатывает задание с максимально возможным быстродействием при заданных ограничениях. С учетом того, что у реальных двигателей постоянная времени переходного процесса на порядок выше чем у катушки, использованной в эксперименте, пульсации тока при питании двигателя, будут значительно ниже.

Все это свидетельствует о целесообразности данного подхода для формирования заданной формы токов.

Исследование влияния формы магнитов на вибросиловые характеристики проводилось для четырехполюсного двигателя с номинальным электромагнитным моментом $M_{\Sigma}=24 \text{ Нм}$, номинальным фазным током $I_H=29,2 \text{ А}$, номинальным напряжением $U_H=220 \text{ В}$. Были рассмотрены различные способы расположения магнитов. По результатам исследований можно сделать вывод, что увеличение толщины магнита приводит лишь к незначительному увеличению электромагнитного момента, набор индуктора из отдельных магнитов приводит к ощутимому, но не критичному снижению электромагнитного момента, но к значительному снижению пульсаций радиальных сил, действующих на зубцы.

Верификация разработанной модели осуществлялась сопоставлением результатов расчета электромагнитного момента и радиальных сил, действующих на зубцы статора, рассчитанных по разработанной модели с результатами, полученными путем расчета полевой модели в программном комплексе ElCut. Максимальная погрешность составила 4% в различных режимах работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предложен подход к реализации системы автоматического управления многофазным синхронным двигателем с постоянными магнитами, обеспечивающей улучшение вибросиловых характеристик электропривода.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Разработана уточненная математическая модель многофазного СДПМ в фазных координатах, которая позволяет вести расчет электромагнитного момента и радиальных сил, действующих на зубцы статорного кольца, в реальном времени с учетом детального распределения магнитного поля в активной зоне машины, насыщения магнитной цепи, дискретного распределения многофазной обмотки статора по пазам и перемещения зубчатого сердечника статора относительно ротора с постоянными магнитами. Погрешность расчёта разработанной модели не превышает 4% по сравнению с полевыми моделями. Входными сигналами для данной модели могут служить значения фазных или линейных напряжений на выходе инвертора, что позволит использовать ее в системах управления в случае отсутствия доступа к нейтральной точке двигателя.

2. Предложен подход определения формы фазных токов многофазного электропривода, обеспечивающий снижение пульсаций электромагнитного момента и радиальных сил в СДПМ для заданных пределов ограничений по энергетическим показателям.

3. Разработанный алгоритм управления многофазным электроприводом, позволяет поддерживать заданную несинусоидальную форму фазных токов, обеспечивающую снижение пульсаций электромагнитного момента и радиальных сил, действующих на зубцы статорного кольца.

4. Разработанная модель системы управления многофазным СДПМ и проведенное на ее основе имитационное исследование разработанного многофазно-

го магнитоэлектрического электропривода подтвердили эффективность предложенного метода, обеспечивающего снижение электромагнитных виброусилий путем предложенного воздействия на форму фазных токов двигателя. При ограничении амплитудного и действующего значения токов в 130% от номинальных удалось добиться снижения пульсаций радиальной силы на 17%, а электромагнитного момента на 50% при увеличении потребления активной мощности на 9%.

5. Проведен анализ влияния количества фаз и конструктивного исполнения индуктора СДПМ на пульсации электромагнитного момента и радиальных сил, действующих на зубцы, показавший, что:

- увеличение числа фаз ведет к снижению пульсаций электромагнитного момента при прямо пропорциональном росте их частоты;
- использование многофазной обмотки с числом катушек на полюс и фазу, равным единице, позволяет управлять величиной силы на каждый зубец в отдельности, что необходимо для реализации наиболее эффективных форм фазных токов, улучшающих вибросиловые характеристики;
- распределение магнитов по ротору при сохранении фазных токов приводит к уменьшению электромагнитного момента и снижению пульсации электромагнитного момента и радиальных сил, действующих на зубцы.

Результаты работы имеют теоретическую основу, подтвержденную экспериментальными исследованиями, и могут быть использованы при разработке систем автоматического управления СДПМ для улучшения вибросиловых, а, следовательно, и виброшумовых показателей электропривода.

Основные публикации, в которых отражены результаты диссертации **Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК**

1. Мартынов В.А. Математическое моделирование режимов работы многофазных синхронных двигателей с постоянными магнитами / Мартынов В.А., Голубев А.Н., **Алейников А.В.** // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 2 – С. 62-66 <http://vestnik.ispu.ru/taxonomy/term/55>
2. Ананьев С.С. Построение электроприводов переменного тока с пониженным уровнем шумов / Ананьев С.С., Голубев А.Н., Мартынов В.А., Карачев В.Д., **Алейников А.В.** // Электротехника. 2015. – N 5. - С. 30-35. <https://www.znack.com/app/download/19041010/05-2015.pdf>
3. Мартынов В.А. Математическая модель для расчета электромагнитных сил в синхронном электроприводе с постоянными магнитами/ Мартынов В.А., Голубев А.Н., **Алейников А.В.** // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 1 – С. 10-13. <http://vestnik.ispu.ru/taxonomy/term/71>
4. Мартынов В.А. Применение метода переменных состояния к анализу стационарных и динамических режимов нелинейных электромагнитных устройств/ Мартынов В.А., Голубев А.Н., **Алейников А.В.** // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 4. – С. 27-32. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.4.027-032 http://vestnik.ispu.ru/sites/vestnik.ispu.ru/files/published/4-15_str_27-32.pdf
5. Мартынов В.А. Разработка уточненной математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами для расчетов в реальном времени/ Мартынов В.А., Голубев А.Н., **Алейников А.В.** // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 5. – С. 37-43. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.5.037-043 http://vestnik.ispu.ru/sites/vestnik.ispu.ru/files/published/5-17-str_37-43.pdf
6. Голубев А.Н. Алгоритм управления, улучшающий вибросиловые характеристики синхронного многофазного магнитоэлектрического электропривода/ Голубев А.Н., **Алейников А.В.** // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 6. – С. 38-44. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.6.038-044

7. S. S. Anan'ev Designing of Alternating-Current Drive with Reduced Noise Level / S. S. Anan'ev, A. N. Golubev, V. A. Martynov, V. D. Karachev, **A. V. Aleinikov** // Russian Electrical Engineering, 2015, vol.86, no.5, pp. 264-269. DOI: 10.3103/S106837121505003X.
<https://link.springer.com/article/10.3103/S106837121505003X>

Публикации в других изданиях

8. Алейников А.В. Расчет радиальных электромагнитных сил, действующих на зубцы синхронного двигателя с постоянными магнитами / А.В. Алейников, В.А. Мартынов, А.Н. Голубев // Девятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014»: материалы конференции. В 7 т. Т. 3. Ч.2 – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2014. – С. 66-69 http://ispu.ru/files/Energiya-2014_2.pdf

9. Алейников А.В. Математическая модель расчета радиальных электромагнитных сил, действующих на зубец синхронного двигателя с постоянными магнитами / А.В. Алейников, А.Н. Голубев, В.А. Мартынов // Материалы докладов X Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения», В. 3 т.; Т.1. – Казань: Казан.гос.энерг.ун-т, 2015. – С. 156-157. <https://kgeu.ru/Document/GetDocument/530dbfe0-1dc0-431d-b6fd-30e68a49eebd>

10. Алейников А.В. Математическая модель расчета радиальных электромагнитных сил синхронного двигателя с постоянными магнитами / А.В. Алейников, А.Н. Голубев, В.А. Мартынов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать первая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. Т.2. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – С. 195. <http://reepe.mpei.ru/abstracts/Documents/ree-2015-book-2.pdf>

11. Алейников А.В. К вопросу уменьшение вибраций многофазного синхронного двигателя с постоянными магнитами / А.В. Алейников, В.А. Мартынов, А.Н. Голубев // Десятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2015»: материалы конференции. В 7 т. Т. 3. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2015. – С. 177-178.
http://ispu.ru/files/Tom_3_Elektroenergetika.pdf

12. Алейников А.В. Математическая модель определения радиальных сил, действующих на зубцы синхронного двигателя с постоянными магнитами / А.В. Алейников, А.Н. Голубев, В.А. Мартынов // Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XVIII Бенардосовские чтения): материалы конференции. Т. 1. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2015. – С. 82-85. http://ispu.ru/files/Elektroenergetika_0.pdf

13. Алейников А.В. Формирование токов многофазного магнитоэлектрического электропривода с улучшенными виброшумовыми характеристиками / А.В. Алейников, В.А. Мартынов, А.Н. Голубев // Электроэнергетика // Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2016»: материалы конференции. В 7 т. Т. 3. – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2016. – С. 198-200. http://ispu.ru/files/Tom_3.pdf

14. Алейников А.В. Формирование токов, улучшающих виброшумовые характеристики многофазного магнитоэлектрического электропривода / А.В. Алейников, А.Н. Голубев, В.А. Мартынов // Материалы докладов XI Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. В. 3 т.; Т.1. – Казань: Казан.гос.энерг.ун-т, 2016. – С. 161-162.
<https://kgeu.ru/Document/GetDocument/244720e0-ba2e-47ca-8848-aa3eeaa5dfd9>

15. Алейников А.В. Алгоритм управления синхронным магнитоэлектрическим электроприводом, снижающим уровень вибраций и шумов / А.В. Алейников, А.Н. Голубев, В.А. Мар-

тынов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать вторая международная науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (25-26 февраля 2016 г., Москва): Тез. докл. В 3 т. Т.2. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. – С. 96-97.

<http://reepe.mpei.ru/abstracts/Documents/ree-2016-book-2.pdf>

16. Алейников А.В. Алгоритм формирования задания фазных токов синхронного электропривода с улучшенными виброшумовыми характеристиками / А.В. Алейников, А.Н. Голубев, В.А. Мартынов // Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XIX Бенардосовские чтения): материалы конференции. Т. 1. – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2017. – С. 19-22.

http://ispu.ru/files/Benardos2017_tom_1-elektroenergetika.pdf

17. Алейников А.В. Алгоритм управления синхронным электроприводом с улучшенными показателями по вибрациям/ А.В. Алейников, В.А. Мартынов, А.Н. Голубев // Электроэнергетика // Двенадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2017»: материалы конференции. В 7 т. Т. 3. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2017. – С. 170-171 <http://ispu.ru/files/Tom3.pdf>

18. Алейников А.В. Алгоритм управления синхронным электроприводом с улучшенными виброшумовыми характеристиками / А.В. Алейников, В.А. Мартынов, А.Н. Голубев // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать третья междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (2-3 марта 2017 г., Москва): Тез. докл. В 3 т. Т.2. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – С. 94 - 95. <http://reepe.mpei.ru/abstracts/Documents/ree-2017-book-2.pdf>

19. Мартынов В.А. Уточненная математическая модель реального времени многофазного синхронного электродвигателя с постоянными магнитами/, В.А. Мартынов, А.Н. Голубев, **А.В. Алейников** // Труды X Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2018, г. Новочеркасск, 3–6 октября 2018 г.: Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск : ЛИК, 2018. – С. 72-75. [http://science.npi-tu.ru/storage/app/media/2018/docs/Sbornik_AEP_2018_Novocherкасск\(РУС\) - в печать.pdf](http://science.npi-tu.ru/storage/app/media/2018/docs/Sbornik_AEP_2018_Novocherкасск(РУС) - в печать.pdf)

20. Алейников А.В. Исследование влияния форм постоянных магнитов на виброшумовые характеристики синхронного двигателя / А.В. Алейников, А.Н. Голубев, В.А. Мартынов // Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XX Бенардосовские чтения): материалы конференции. Т. 1. – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2019. – С. 15-17. http://ispu.ru/files/Benardos2019_tom_1-elektroenergetika.pdf

21. Алейников А.В. Разработка алгоритма управления, уменьшающего вибрации многофазного синхронного электродвигателя / А.В. Алейников, А.Н. Голубев // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. ст. науч.-техн. конф./ Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2021. – С. 69-75 <https://elibrary.ru/item.asp?id=47355565>

Алейников Алексей Владимирович

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВИБРОУСИЛИЙ В МНОГОФАЗНОМ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 09.03.2022 Формат 60x84¹/₁₆.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № _____

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГУЭ