

На правах рукописи



Мартынов Кирилл Владимирович

МЕТОД СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЁМ ПРИМЕНЕНИЯ СОВМЕЩЁННЫХ
ОБМОТОК

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат
диссертации на соискателя учёной степени
кандидата технических наук

Ижевск – 2022

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Ижевская государственная сельскохозяйственная академия» на кафедре «Электротехника, электрооборудование и электроснабжение»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Пантелеева Лариса Анатольевна

Официальные оппоненты: **Немировский Александр Емельянович**
профессор кафедры «Электрооборудование»
ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», д.т.н., профессор
Синюкова Татьяна Викторовна
доцент кафедры электропривода ФГБОУ ВО
«Липецкий государственный технический университет», к.т.н.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет»

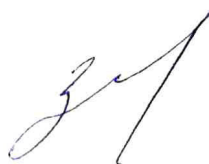
Защита состоится «17» мая 2022 г. в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.082.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д-225, тел./факс (843) 519-42-55.

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 Д 212.082.06.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/273?idDiss=131>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ш.Г. Зиганшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности.

Ежегодное наращивание производственных мощностей сопровождается увеличением потребления электроэнергии, а учитывая повсеместный рост тарифов на электроэнергию и повышение стоимости электрооборудования вопрос энергосбережения является весьма актуальным. Энергосбережение не менее актуально и для сельского хозяйства. В зависимости от производства доля энергозатрат в себестоимости продукции может составлять от 30 до 40% с учётом кормопроизводства. По данному показателю отечественная продукция значительно уступает соответствующей продукции западноевропейских стран.

В качестве привода промышленных и сельскохозяйственных установок широкое распространение получили трёхфазные асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором. На их долю, по данным различных источников, приходится от 60 до 80% всего электропотребления. В агропромышленном комплексе потребление электроэнергии АД также высоко, и составляет более 50%.

Несмотря на высокую надёжность АД, нередки случаи их отказов. Так, для сельского хозяйства ежегодный выход электродвигателей из строя составляет 25–30% от всего имеющегося парка. Наиболее распространённой причиной является повреждение обмотки статора, что составляет 85–95% всех случаев отказов. При этом АД выводится в капитальный ремонт с заменой обмотки, при котором существует риск ухудшения его энергетических характеристик и как следствие рост потребления электрической энергии установок с приводом от отремонтированных двигателей. Поэтому целесообразно применение способов и методов, способствующих улучшению энергетических характеристик электродвигателей, не только при их изготовлении, но и при ремонте.

Мероприятия, направленные на достижение данной цели, должны, по возможности, иметь низкую трудоёмкость, невысокую стоимость и доступность. Одним из таких возможных направлений повышения КПД и коэффициента мощности двигателя является использование в нём совмещённой 12-зонной обмотки статора вместо стандартной 6-зонной.

Разработкой и исследованиями совмещённых обмоток за рубежом занимались такие учёные, как W. Kothals-Altes, H. Auinger, H. Kasten, M. Gwozdziwicz, S. Gawron, H. Vansompel, В.Д. Лушик, В.К. Титюк и другие. Среди российских и советских деятелей науки можно встретить исследования таких обмоток в работах: В.И. Попова, Ю.В. Гаинцева, Е.П. Бойко, В.Н. Андрианова, Д.Н. Быстрицкого и других. Несмотря на массу исследований, тема совмещённых обмоток по-прежнему остаётся недостаточно изученной.

Целью работы является совершенствование энергетических характеристик асинхронных двигателей за счёт применения совмещённых 12-зонных обмоток статора.

Для достижения цели работы поставлены следующие **задачи**:

1. Анализ существующих схем совмещённых обмоток и разработка схемы, которая обладает более высокой технологичностью конструкции;
2. Исследование МДС совмещённой обмотки и разработка схемы, имеющей большую эффективность и позволяющая снизить потери в двигателе, которые вызваны высшими пространственными гармониками (ВПГ);
3. Разработка методики определения изменения электрических потерь в статоре при применении в нём совмещённой обмотки вместо стандартной и проведение соответствующего исследования для серийных электродвигателей;

4. Разработка методики перерасчёта стандартной обмотки статора на совмещённую;

5. Изготовление экспериментального образца двигателя с совмещённой обмоткой статора и исследование его характеристик;

6. Оценка экономической эффективности применения совмещённой обмотки в асинхронном электроприводе.

Объект исследования: асинхронный электродвигатель с совмещённой обмоткой.

Предмет исследования: энергетические характеристики асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой статора.

Научная новизна:

1. Разработана одно-двухслойная схема совмещённой обмотки, имеющая простую технологию изготовления;

2. Определено изменение содержания ВПП в кривой распределения МДС двигателей с совмещённой обмоткой в сравнении со стандартной;

3. Разработана схема совмещённой обмотки с пониженным содержанием ВПП;

4. Предложена методика определения изменения электрических потерь в статоре при замене его стандартной обмотки на совмещённую;

5. Разработана методика перерасчёта стандартной обмотки статора на совмещённую.

Теоретическая значимость работы заключается в возможности анализа различных конструкций совмещённых обмоток и исследовании содержания ВПП в МДС, создаваемой такой обмоткой. Теоретическая проработка вопросов, посвящённых исследованию асинхронного двигателя, расширяет область знания в теории электрических машин, используется в учебном процессе при подготовке бакалавров, инженеров и магистров по электротехническим специальностям.

Практическая значимость работы:

1. Предложена одно-двухслойная схема совмещённой обмотки, МДС которой имеет такой же гармонический состав, как и МДС двухслойной обмотки, но при этом обладающая более простой технологией изготовления (патент на ПМ RU 197319 U1);

2. Разработана двухслойная схема совмещённой обмотки с пониженным содержанием высших пространственных гармоник в МДС (патент на изобретение RU 2735288 C1);

3. Разработана методика определения изменения электрических потерь в статоре при замене его стандартной обмотки на совмещённую, которая позволяет оценить эффективность применения такой обмотки для конкретного двигателя по данному критерию;

4. Предложена методика перерасчёта стандартной обмотки статора на совмещённую и разработана программа для ЭВМ (Свидетельство 2020663515).

Работа проведена в соответствии с планом НИР ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА по теме «Повышение эффективности работы технологических установок в сельском хозяйстве Удмуртской Республики», рег. №11601151005.

Методология и методы исследования. При проведении исследований применялись методы теорий электрических цепей и машин переменного тока. Для оценки содержания ВПП в кривой распределения МДС использовались диаграммы Гёргеса, а также гармонический анализ.

Обработка результатов и теоретические исследования проводились на ПК с использованием программ Microsoft Excel, Maple.

Положения, выносимые на защиту:

- разработанные схемы совмещённой обмотки имеют более простую технологию укладки, чем аналогичные им известные совмещённые обмотки;

- методика, позволяющая определить изменения электрических потерь в статоре при замене его стандартной обмотки на совмещённую и повысить эффективность произведённой замены для АД по данному критерию;

- в МДС предложенной схемы совмещённой обмотки с расширенными фазными зонами амплитуды ВПП меньше, чем в МДС аналогичных стандартной и совмещённой укороченной обмотках;

- результаты экспериментальных исследований, подтверждают эффективность применение совмещённых обмоток вместо стандартных при ремонте АД, с целью повышения их энергетических показателей.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация выполнена по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты. Результаты исследования соответствуют паспорту специальности, а именно пункту 2 «Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов», пункту 3 «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии» и пункту 5 «Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надёжность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов».

Степень достоверности результатов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным использованием общепринятых методов исследований, а также повторяемостью полученных результатов.

Внедрение результатов.

Результаты диссертационной работы используются ООО «Восточный» на участке перемотки электродвигателей. Предложенная одно-двухслойная совмещённая обмотка реализована при ремонте АД, которые работает в качестве привода насоса на участке очистительных сооружений.

Апробация работы. Результаты и выводы диссертационной работы доложены и обсуждены на: Всероссийской научно-практической конференции «Роль молодых ученых-инноваторов в решении задач по ускоренному импортозамещению сельскохозяйственной продукции» (г. Ижевск, 2015); Всероссийской научно-практической конференции «Научное и кадровое обеспечение АПК для продовольственного импортозамещения» (г. Ижевск, 2016); Международной молодёжной научно-практической конференции «Наука молодых – инновационному развитию АПК» (г. Уфа, 2016); Международной научно-практической конференции «Научно обоснованные технологии интенсификации сельскохозяйственного производства» (г. Ижевск, 2017); Всероссийской научно-практической конференции «Инновационный потенциал сельскохозяйственной науки XXI века» (г. Ижевск, 2017); Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные направления развития энергетики АПК» (г. Ижевск, 2017); Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии для реализации программы научно-технического развития сельского хозяйства» (г. Ижевск, 2018); Международной научно-практической конференции «Развитие энергосистем АПК: перспективные технологии» (г. Челябинск, 2018); Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов «Агроинженерные инновации в сельском хозяйстве» (г. Москва,

2018); Национальной научно-практической конференции молодых ученых «Интеграционные взаимодействия молодых ученых в развитии аграрной науки» (г. Ижевск, 2019); Международной научно-практической конференции «Научные инновации в развитии отраслей АПК» (г. Ижевск, 2020); Международной научно-практической конференции «Технологические тренды устойчивого функционирования и развития АПК» (г. Ижевск, 2021).

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 22 печатные работы, в том числе 4 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК, 2 из которых в журналах рекомендованных ВАК по специальности 05.09.01, 1 статья, индексируемая в реферативной базе Scopus, 1 патент на полезную модель, 1 патент на изобретение, 1 свидетельство на программу для ЭВМ и 13 работ в других журналах и сборниках материалов конференций.

Личный вклад автора. Автором получены основные результаты исследований, которые отражены в статьях и диссертации.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы из 112 наименований. Работа изложена на 182 страницах, включающих в себя 40 таблиц, 84 рисунка и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе «Методы совершенствования энергетических характеристик асинхронных электродвигателей» рассмотрены классификации электроприводов и распределение АД в промышленности и сельском хозяйстве, а также проведён анализ методов совершенствования энергетических характеристик АД. Одним из таких методов является использование на статоре совмещённой 12-зонной обмотки вместо стандартной 6-зонной. Такая обмотка состоит из двух обмоток, соединённых по схеме: одна – «звездой», другая – «треугольником» (рисунок 1).

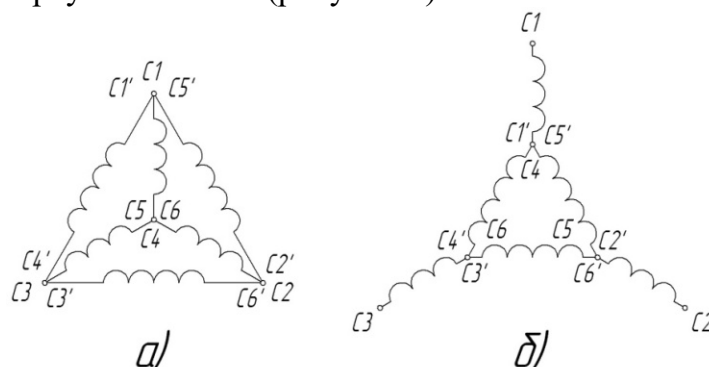


Рисунок 1 – Совмещённая обмотка статора, состоящая из двух трёхфазных обмоток, соединённых: а) параллельно; б) последовательно

Анализ исследований машин с совмещённой обмоткой позволил выявить их возможные преимущества перед стандартными: снижение содержания ВПГ в МДС и больший обмоточный коэффициент.

Во второй главе «Теоретическое исследование асинхронного двигателя с 12-зонной обмоткой» разработаны схемы, упрощающие укладку укороченных совмещённых обмоток. На рисунке 2 изображена конструкция одной из таких обмоток для статора с числом пазов $z=48$ и числом полюсов $2p=4$.

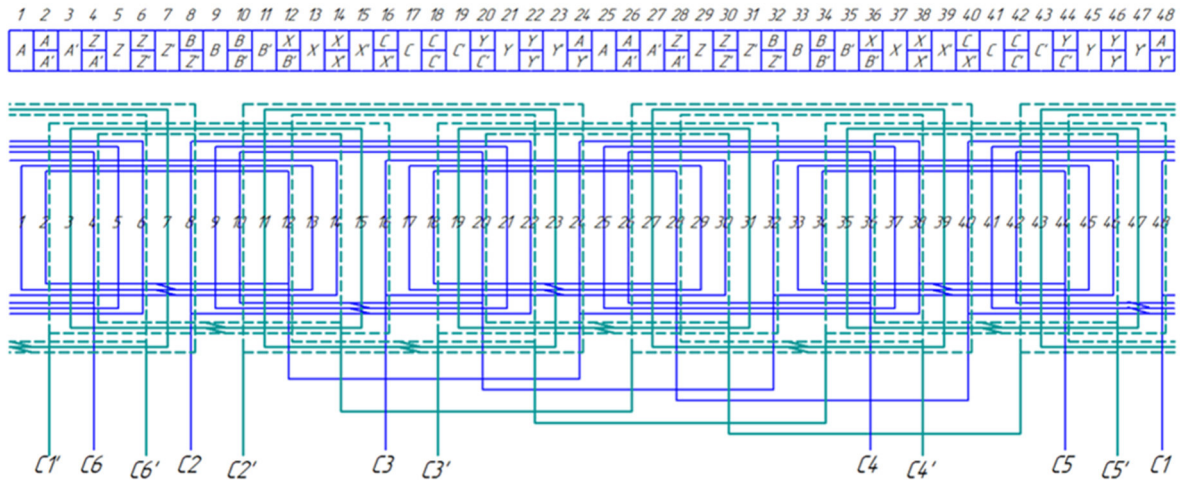


Рисунок 2 – Совмещённая 12-зонная одно-двухслойная обмотка при $2p=4$, $z=48$

Известно, что высшие гармоники приводят к возрастанию добавочных потерь, доля которых составляет от 0,4 до 6% от потребляемой машиной мощности. По этой причине снижение содержания высших гармоник в МДС обмотки может способствовать улучшению энергетических характеристик двигателя.

Проведено исследование относительного содержания ВПГ в кривой распределения МДС двигателя с совмещёнными однослойными обмотками. Для этого с помощью диаграмм Гёргеса определялись коэффициенты дифференциального рассеяния $\sigma_{d\%}$:

$$\sigma_{d\%} = \left(\frac{R_d^2}{R^2} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где R_d^2 – полярный момент инерции междупазовых точек диаграммы Гёргеса в относительных единицах; R – радиус окружности основной гармоники в относительных единицах.

Между собой сравнивались обмотки со сплошным и несплошным чередованием фазных зон. Было установлено, что совмещённая обмотка со сплошными фазными зонами имеет наименьшее относительное содержание ВПГ по сравнению со стандартной обмоткой и совмещённой с несплошными фазными зонами. Рисунок 3 показывает значения $\sigma_{d\%}$ при различных числах пазов, приходящихся на пару полюсов для однослойных совмещённой и стандартной обмоток.

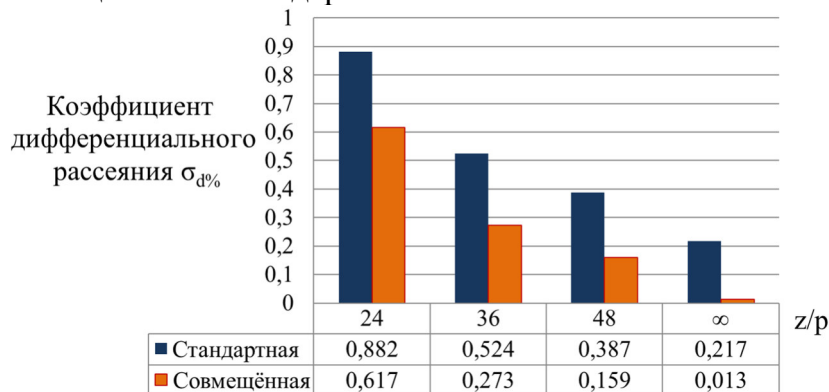


Рисунок 3 – Коэффициенты дифференциального рассеяния однослойных обмоток при различных числах пазов, приходящихся на пару полюсов

Из рисунка 3 видно, что с ростом числа пазов, приходящихся на пару полюсов, коэффициент дифференциального рассеяния совмещённой обмотки снижается быстрее, чем для стандартной.

Был проведён гармонический анализ МДС совмещённой обмотки. При этом в рассматриваемых случаях вводится допущение, что к обмотке подводится синусоидальное напряжение. С целью упрощения анализа при определении амплитуды МДС вводились коэффициенты распределения k_{pv} и укорочения k_{yv} для v -гармоники. Решение производилось с помощью программного пакета Maple, что позволяет.

Установлено, что в МДС совмещённой обмотки количественно содержится меньше ВПГ, чем в МДС стандартной обмотки. При этом амплитуда оставшихся ВПГ по отношению к амплитуде основной гармоники не изменяется. В МДС стандартной обмотки первыми наиболее значимым ВПГ, являются 5 и 7 гармоники, а в МДС совмещённой обмотки первыми наиболее значимыми будут 11 и 13. Поэтому выбор относительного шага $5/6$, который получил распространение для двигателей со стандартной обмоткой для снижения влияния ВПГ, не является оптимальным. Для этой цели в совмещённой обмотке рекомендуется относительный шаг $11/12$.

Предложена оригинальная конструкция совмещённой обмотки (рисунок 4), имеющая наименьшее содержание ВПГ в кривой распределения МДС.

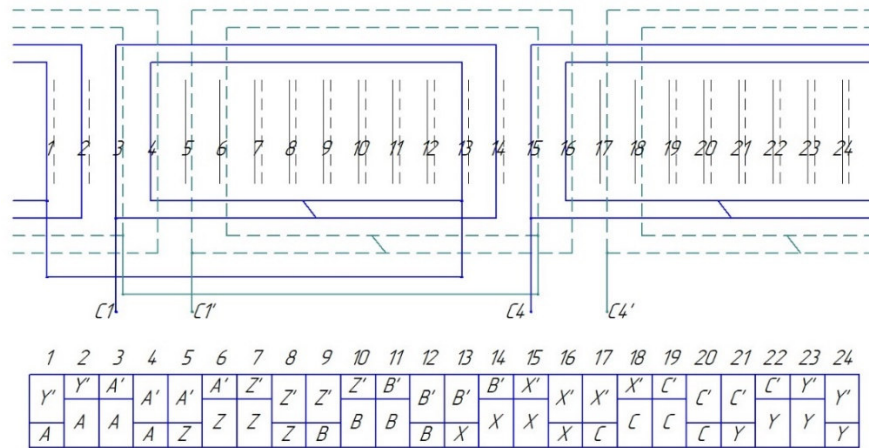


Рисунок 4 – Схема одной фазы «звезды» C1-C4 (сплошные линии) и «треугольника» C1'-C4' (пунктирные линии) совмещённой двухслойной обмотки с расширенными фазными зонами при $2p=2, z=24$

Заявленный эффект достигается увеличением распределения обмотки так, что в пазу статора находятся две части разных фаз обмотки, которые занимают неодинаковый объём паза. Причём доля содержания той или иной фазы в пазу подбиралась так, чтобы форма пространственной волны МДС была наиболее приближенной к синусоиде, то есть с минимальным коэффициентом дифференциального рассеяния. Для этого были получены уравнения с помощью диаграммы Гёргеса, которая изображена на рисунке 5.

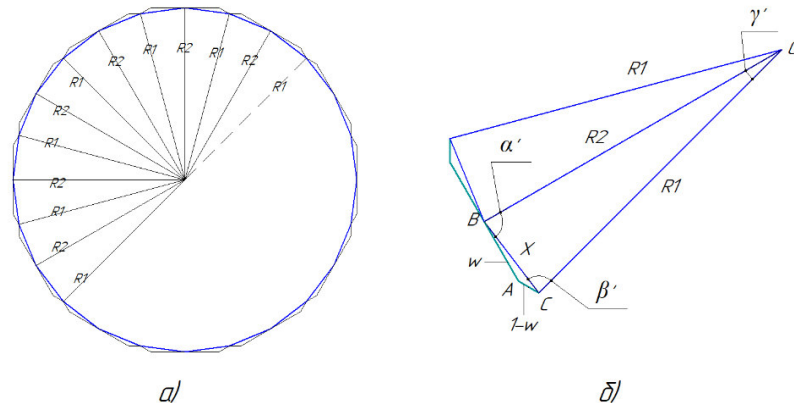


Рисунок 5 – Диаграмма Гёргеса совмещённой 12-зонной двухслойной обмотки с расширенными фазными зонами при $2p=2, z=24$ (а) и повторяющийся сегмент диаграммы (б)

Для нахождения полярного момента инерции междупазовых точек необходимо найти радиусы инерции пазовых точек:

$$\begin{cases} R_1^2 = R_2^2 + X^2 - 2 \cdot R_2 \cdot X \cdot \cos \alpha'; \\ R_2^2 = R_1^2 + X^2 - 2 \cdot R_1 \cdot X \cdot \cos \beta'; \\ X^2 = R_1^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \cos \gamma', \end{cases} \quad (2)$$

где R_1 и R_2 – радиусы инерции пазовых точек в относительных единицах; X – длина грани многоугольника диаграммы в относительных единицах; α' , β' и γ' – углы из диаграммы Гёргеса, град.

Переменная X является функцией от количества эффективных проводников или числа витков катушек:

$$X^2 = w^2 + (1 - w)^2 - 2 \cdot w \cdot (1 - w) \cos 150^\circ \quad (3)$$

где $w = w_{\text{к.внеш}}$ – доля проводников внешних катушек в пазу.

Для определения радиуса окружности основной гармоники была получена формула обмоточного коэффициента:

$$k_{\text{об}} = \frac{2 \cdot (1 - w) \cdot \cos\left(\gamma \cdot \frac{q - 1}{2}\right) + 2 \cdot w \cdot \cos\left(\gamma \cdot \frac{q - 1}{2} - \gamma\right)}{2 \cdot (1 - w) + 2 \cdot w}, \quad (4)$$

где γ – угол, характеризующий сдвиг ЭДС катушек по пазам, рад; q – число пазов, приходящихся на полюс и фазу.

С помощью полученных уравнений (2), (3), (4) была решена задача по определению оптимального соотношения числа проводников в пазу, при котором коэффициент дифференциального рассеяния принимает минимальное значение. При анализе числа витков «треугольника» были приведены к числу витков «звезды». В результате получена зависимость коэффициента дифференциального рассеяния от относительного числа витков внешних катушек $w_{\text{к.внеш}}$ (рисунок 6).

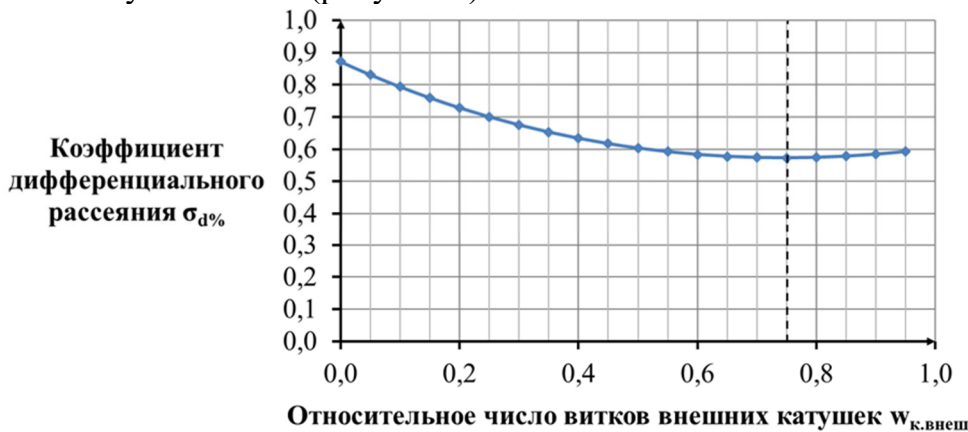


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента дифференциального рассеяния от относительного числа витков внешних катушек

Наименьшим коэффициентом дифференциального рассеяния обладает распределённая обмотка, в которой 75% пазов принадлежит внешним катушкам, а 25% внутренним. Как видно из рисунка 5, небольшое отклонение от оптимального распределения катушек не сильно сказывается на увеличении коэффициента дифференциального рассеяния, что облегчает применение такой совмещённой обмотки на практике.

Результаты исследования показывают, что исполнение обмотки статора в виде предложенной двухслойной совмещённой обмотки с расширенными фазными зонами позволяет практически полностью устранить 11 и 13 гармоники МДС. Причём амплитуды

11 и 13 гармоник в МДС такой обмотки в 60 и 50,5 раз соответственно меньше, чем в МДС стандартной обмотки.

В третьей главе «Расчёт изменения электрических потерь в статоре при применении совмещённой обмотки» проведено сравнительное исследование изменения электрических потерь в статоре АД при замене его стандартной обмотки на совмещённую. Предполагается, что из-за увеличения обмоточного коэффициента $k_{об}$, фазы совмещённой обмотки изготавливаются из меньшего числа витков, что может привести как к экономии обмоточного провода, так и к снижению потерь активной мощности. Кроме того, увеличение обмоточного коэффициента позволяет при сохранении коэффициента заполнения паза k_z увеличить сечение провода, в этом случае стоит ожидать большего снижения потерь, но за счёт изменения расхода материала. Однако переход от одной конструкции обмотки к другой может приводить к увеличению, либо уменьшению ширины катушки.

В работе были рассмотрены двигатели серии АИР основного исполнения с целым числом пазов, приходящихся на полюс и фазу q . Проведено сравнение стандартной обмотки, соединённой по схеме «звезда», с однослойной совмещённой обмоткой при параллельном соединении фаз «звезды» и «треугольника», лобовые части, которой, где это возможно, выполнены «в развалку».

Для удобства анализа совмещённая обмотка была приведена к эквивалентной ей обмотке, соединённой по схеме «звезда» (рисунок 7).

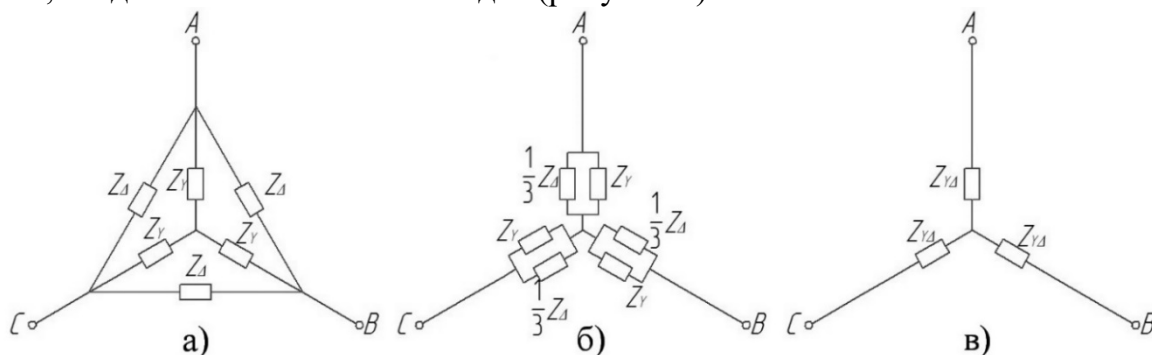


Рисунок 7 – Преобразование схемы соединения совмещённой обмотки: а) исходная схема; б) промежуточная схема; в) преобразованная эквивалентная схема

При этом её приведённое активное сопротивление определяется по формуле:

$$r_{Y\Delta} = \frac{r_Y}{2} = \frac{r_{\Delta}}{6}, \quad (5)$$

где r_Y и r_{Δ} – активные сопротивления фазы «звезды» и «треугольника» соответственно, Ом.

В качестве критерия выбрана разница Δr в процентах между эквивалентными активными сопротивлениями стандартной и совмещённой обмотки, которая характеризует изменение электрических потерь в статоре:

$$\Delta r = \frac{r_0 - r_{Y\Delta}}{r_0} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где r_0 – активное сопротивление одной фазы стандартной обмотки, Ом.

При $\Delta r > 0$ – совмещённая обмотка предпочтительней стандартной ($r_0 > r_{Y\Delta}$);

$\Delta r = 0$ – совмещённая и стандартная обмотки имеют равные эквивалентные активные сопротивления;

$\Delta r < 0$ – совмещённая обмотка имеет эквивалентное активное сопротивление больше, чем стандартная.

Двигатели мощностью от 0,55 до 11 кВт с однослойными обмотками были разбиты на две группы. К первой группе относятся 27 двигателей с обмоткой «в развалку», для

которых при переходе от стандартной обмотки к совмещённой изменялась длина катушки. При этом сопротивление обмотки будет зависеть от значения коэффициента λ , характеризующего отношение главных размеров машины:

$$\lambda = \frac{l_1}{\tau}, \quad (7)$$

где l_1 – длина сердечника статора, м; τ – полюсное деление, м.

Упрощённая зависимость разницы эквивалентных активных сопротивлений от λ , пренебрегающая длиной вылета катушки B и высотой паза h_n , описывается следующей формулой:

$$\Delta r = \left(1 - \frac{k_{об0}^2 \cdot (\lambda + K_l \cdot \beta_{кты\Delta})}{k_{об\gamma\Delta}^2 \cdot (\lambda + K_l \cdot \beta_{к\tau 0})} \right) \cdot 100\%, \quad (8)$$

где K_l – коэффициент, зависящий от числа полюсов $2p$ и изоляции лобовых частей; $\beta_{кты\Delta}$ и $\beta_{к\tau 0}$ – относительные шаги катушек совмещённой и стандартной обмотки соответственно; $k_{об\gamma\Delta}$ и $k_{об0}$ – обмоточные коэффициенты совмещённой и стандартной обмотки соответственно.

При анализе двигателя из первой группы были разделены на шесть подгрупп, в которых стандартные обмотки имеют одинаковую конструкцию, равное число полюсов $2p$ и число пазов, приходящихся на полюс и фазу q .

На рисунке 8 представлены зависимости разницы эквивалентных активных сопротивлений стандартной и совмещённой обмотки при различных значениях λ – сплошными линиями. Точками рядом показаны значения Δr для конкретных двигателей рассчитанных с учётом B и h_n .

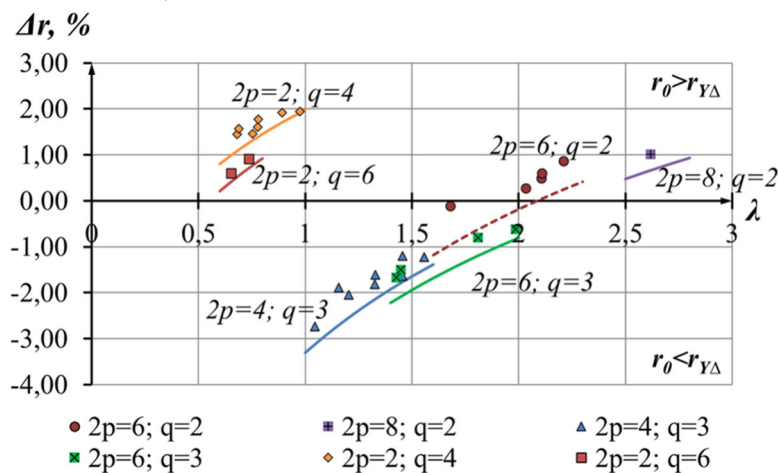


Рисунок 8 – Сравнение эквивалентных активных сопротивлений обмоток в зависимости от λ при минимальной изоляции лобовых частей

Установлено, что применение совмещённых обмоток вместо стандартных не во всех двигателях приводит к снижению активного сопротивления. Однако для всех рассмотренных шести подгрупп двигателей с ростом длины сердечника статора по отношению к длине его полюсного деления, наблюдается тенденция изменения Δr в пользу совмещённых обмоток.

Ко второй группе относятся 10 двигателей, у которых стороны лобовых частей направлены в одну сторону и укорочение шага катушки не происходит $\beta_{к\tau}=1$. Для таких двигателей применение совмещённой обмотки позволяет уменьшить эквивалентное активное сопротивление независимо от λ :

$$\Delta r = \left(1 - \frac{k_{об0}^2}{k_{об\gamma\Delta}^2} \right) \cdot 100\%. \quad (9)$$

Применение однослойных совмещённых обмоток наиболее выгодно, если при замене не увеличивается относительный шаг катушки β_{kt} .

Оценка изменения электрических потерь в статоре была проведена и для АД серии АИР мощностью от 11 кВт и выше с двухслойными обмотками. Результаты исследования показали, что применение в них совмещённой обмотки, теоретически может привести к снижению электрических потерь.

Четвёртая глава «Экспериментальное исследование асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой» посвящена подготовке и проведению сравнительных экспериментальных исследований АД с совмещённой обмоткой.

Для создания опытного образца АД была составлена методика перерасчёта со стандартной на совмещённую обмотку и разработана программа на языке программирования Python. В методике учитывается изменение обмоточного коэффициента при переходе к новой обмотке.

Экспериментальные исследования проводились на двух двигателях типа АИР71В4. Оба двигателя были перемотаны на Удмуртском электроремонтном заводе: один двигатель с сохранением обмоточных данных на стандартную обмотку, второй на совмещённую. Получившийся АД с совмещённой обмоткой имеет меньшее эквивалентное активное сопротивление, чем двигатель со стандартной обмоткой. Отклонение рассчитанного значения эквивалентного активного сопротивления от реального составило менее 4%.

Опыт холостого хода проводился для обоих двигателей при различных значениях приложенного напряжения. В ходе опыта с помощью комплекта измерительных приборов К505 измерялись потери холостого хода P_0 , ток холостого хода I_0 и подводимое напряжение U . Данные для каждой точки снимались пять раз. На рисунке 9 приведены характеристики холостого хода.

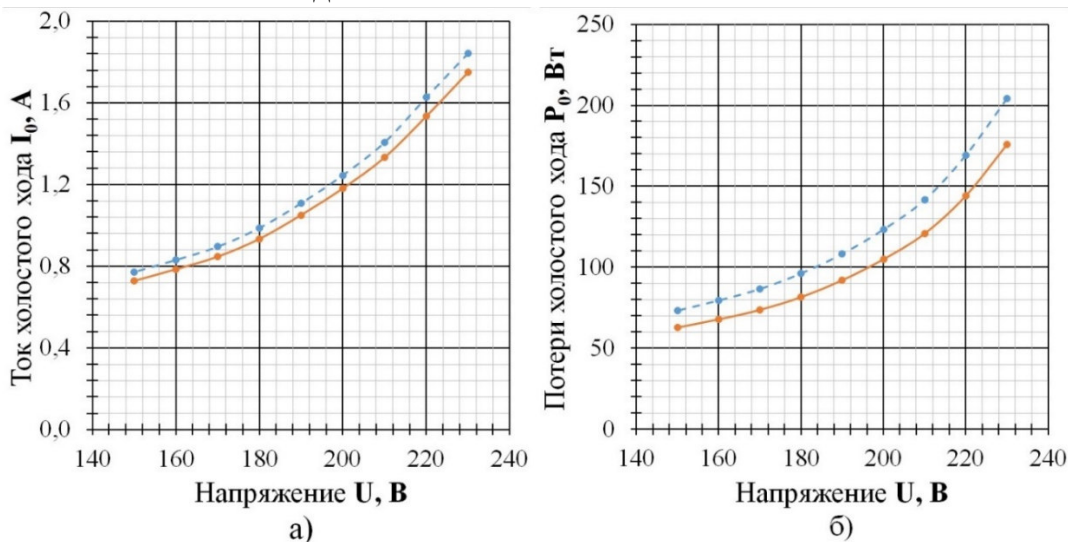


Рисунок 9 – Опыт холостого хода: зависимости потребляемого тока (а) и потребляемой активной мощности (б) от приложенного напряжения: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

Из полученных опытных данных следует, экспериментальный АД с совмещённой обмоткой потребляет меньший ток и мощность при работе без нагрузки, чем двигатель со стандартной обмоткой. При номинальном напряжении ток холостого хода ниже на 5,7%, а потери холостого хода на 14,8%.

В испытании под нагрузкой, тормозящий момент на валу двигателей создавался электромагнитным тормозом с противовесом, за счёт которого определялся момент

нагрузки. В ходе испытания по приборам К505 измерялись значения силы тока в питающих линиях, потребляемые активные мощности по фазам и подводимое напряжение к двигателям. Частота вращения ротора замерялась с помощью механического тахометра. Одними из наиболее важных зависимостей для оценки эффективности работы двигателя являются зависимости КПД и потребляемых мощностей от нагрузки на валу (рисунок 10).

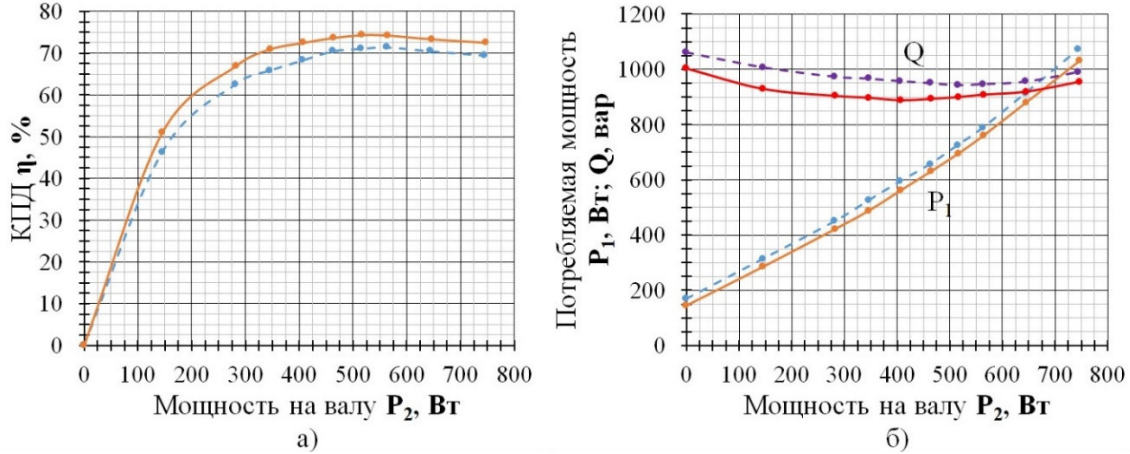


Рисунок 10 – Испытания под нагрузкой: зависимости КПД (а) и потребляемых мощностей (б) от мощности на валу двигателя: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

Результаты исследования показывают, что АД с совмещённой обмоткой обладает большим КПД, чем двигатель со стандартной обмоткой на всём диапазоне рассматриваемых мощностей. Причём наибольшая разница проявляется при недогрузке двигателя. При номинальной мощности разница КПД составляет 3,1%. Коэффициент мощности испытываемых двигателей практически не отличается несмотря на меньшее потребление реактивной мощности АД с совмещённой обмоткой.

Для выбора схемы подключения теплового реле в работе проведено исследование по определению распределения токов по фазам обмоток. Были получены уравнения в случае обрыва одного из линейных проводников:

$$\begin{cases} I_{Y\Delta} = \frac{U_{\text{л}}}{\frac{2 \cdot z_Y \cdot z_{\Delta}}{3 \cdot z_Y + z_{\Delta}}} = 3 \cdot \frac{U_{\text{л}}}{z_{\Delta}}; \\ I_Y = \frac{U_{\text{л}}}{2 \cdot z_Y} = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_{\text{л}}}{z_{\Delta}}; \\ I_{\Delta 1} = \frac{U_{\text{л}}}{2 \cdot z_{\Delta}}; \\ I_{\Delta 2} = \frac{U_{\text{л}}}{z_{\Delta}}, \end{cases} \quad (10)$$

где $I_{Y\Delta}$ – линейный ток двигателя с совмещённой обмоткой, А; $U_{\text{л}}$ – линейное напряжение, В; z_Y и z_{Δ} – сопротивления фазы «звезды» и «треугольника» соответственно, Ом; I_Y – действующее значение тока, протекающего по фазам «звезды», А; $I_{\Delta 1}$ – ток в фазах «треугольника», для которых оборван один из линейных проводников, А; $I_{\Delta 2}$ – ток в фазе «треугольника», для которой оба из линейных проводников не оборваны, А.

По результатам теоретического исследования установлено, что при обрыве одного линейного провода в режиме короткого замыкания линейный ток и ток в двух фазах «звезды» отличается в 0,866 раза от тока при питании от трёхфазной сети. В одной из фаз

«треугольника» ток принимает такое же значение, как и при работе от трёхфазного напряжения, в двух других фазах значение токов в два раза меньше. При этом отклонение экспериментальных значений от расчётных составило не более 2%. Поэтому для защиты АД с совмещённой обмоткой предлагается использовать трёхполюсное тепловое реле с включением его нагревательных элементов в фазы «треугольника».

В пятой главе «Расчёт технико-экономических показателей применения совмещённой обмотки в асинхронном двигателе» проведена экономическая оценка применения совмещённой обмотки вместо стандартной при ремонте АД электропривода вентилятора. Капитальные затраты на перемотку двигателя с совмещённой обмоткой составили 2236,20 руб., а со стандартной 2036,24 руб. Однако, несмотря на возросшую стоимость при ремонте, вентилятор с двигателем с совмещённой обмоткой, потребляет меньше энергии и срок окупаемости применения такой обмотки вместо стандартной составил 0,22 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ схем совмещённых обмоток позволил выявить их потенциальные преимущества по сравнению со стандартными: снижение содержания ВПГ в МДС и увеличение обмоточного коэффициента. Предложены новые схемы совмещённых обмоток, обладающие более простой технологией укладки, чем известные варианты двухслойных и трёхслойных обмоток, но при этом имеющие те же электромагнитные свойства, что и их аналоги.

2. Показано, что в МДС совмещённой обмотки содержится меньше ВПГ, чем в МДС стандартной. Причём с увеличением числа пазов, приходящихся на пару полюсов, относительное содержание ВПГ в МДС совмещённой обмотки снижается быстрее. Первыми наиболее значимыми ВПГ в МДС таких обмоток являются 11 и 13 гармоники, а значит относительный шаг 11/12 является предпочтительным для двухслойных укороченных обмоток. Разработана схема двухслойной совмещённой обмотки с расширенными фазными зонами, применение которой практически полностью устраняет 11 и 13 гармонику МДС, уменьшая их амплитуды в 60 и 50,5 раз соответственно по сравнению со стандартной обмоткой, а также 8 и 6,5 раз по сравнению с двухслойной укороченной совмещённой обмоткой.

3. Разработана методика определения изменения электрических потерь в статоре при использовании в нём совмещённой обмотки вместо стандартной, которая основана на определении разницы эквивалентных активных сопротивлений. Наибольшее потенциальное снижение электрических потерь для статора с однослойной обмоткой стоит ожидать, если при переходе на совмещённую обмотку не увеличивается длина лобовой части катушек. Так, было установлено, что для таких статоров, у которых чётное число пазов, приходящихся на полюс и фазу, наибольшее снижение составляет 6,7%, если же это число нечётное, тогда 5,3%. Для двухслойных обмоток данный показатель зависит от габаритов двигателя и может быть больше, чем для однослойных ввиду большей разницы обмоточных коэффициентов. Если при переходе от стандартной обмотки к совмещённой происходит изменение длины катушки, то с увеличением длины сердечника статора по отношению к длине его полюсного деления применение совмещённой обмотки становится более выгодным.

4. Разработана методика перерасчёта стандартной обмотки статора на совмещённую, которая учитывает изменение обмоточного коэффициента и позволяет получить несколько возможных вариантов обмоток для разного числа параллельных

ветвей и сечений обмоточных проводов. По данной методике составлена программа для ЭВМ, что позволяет упростить использование совмещённых обмоток при ремонте АД.

5. Проведены сравнительные экспериментальные исследования двигателя с совмещённой обмоткой для режимов холостого хода, короткого замыкания и при работе под нагрузкой. Двигатель с совмещённой обмоткой потребляет меньший ток и имеет меньшие потери на всём исследуемом диапазоне нагрузок. При нагрузке 46% от номинальной двигатель с совмещённой обмоткой обладает большим на 5,1% КПД, чем стандартный двигатель. При номинальной нагрузке разница КПД составляет 3,1%. Коэффициент мощности исследуемых машин практически не отличается, однако потребление реактивной мощности двигателем с совмещённой обмоткой ниже, чем у образца со стандартной обмоткой.

6. Техничко-экономическая оценка показала эффективность применения совмещённой обмотки при ремонте АД, используемых в качестве привода вентиляторов с продолжительным режимом работы. Благодаря небольшой разнице капитальных вложений и возросшему КПД срок окупаемости предлагаемой технологии составил 0,22 года.

Результаты диссертационной работы рекомендуются использовать при перематке и изготовлении АД. Двигатели с совмещённой обмоткой целесообразно применять для снижения затрат электрической энергии приводов с продолжительным режимом работы.

Дальнейшими направлениями изучения АД с совмещённой обмоткой могут быть исследования их динамических режимов работы, работы совместно с частотным регулятором, а также применение совмещённой обмотки с переключением между параллельным и последовательным соединением «звезды» и «треугольника» с целью регулирования частоты вращения, либо улучшения пусковых характеристик.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК по группе научных специальностей диссертации:

1. Исследование распределения токов по фазам в асинхронном электродвигателе с совмещённой обмоткой / К. В. Мартынов, Л. А. Пантелеева, Д. А. Васильев, Е. В. Дресвянникова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 5. – С. 150-159.

2. Мартынов, К. В. Оценка энергетических характеристик асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой / К. В. Мартынов, Л. А. Пантелеева, И. А. Благодатских // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 6. – С. 109-118.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК по другим группам научных специальностей:

3. Мартынов, К. В. Совершенствование конструкции обмотки статора асинхронного двигателя / К. В. Мартынов, В. А. Носков, Л. А. Пантелеева // Вестник ВИЭСХ. – 2017. – № 1 (26). – С. 5-12.

4. Мартынов, К.В. Перспективы применения совмещённой обмотки для снижения электрических потерь в статоре / К. В. Мартынов, В. А. Носков, Л. А. Пантелеева, Д. А. Васильев // АгроЭкоИнфо. – 2020. №1 (39). – С. 18.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе Scopus:

5. Noskov, V. A. Improving the Efficiency of Alternating-Current Machine Windings / V. A. Noskov, L. A. Panteleeva, K. V. Martynov // Russian Electrical Engineering. – 2018. – Т. 89. – № 1. – С. 32-35.

Другие издания:

6. Мартынов, К. В. Методика перерасчёта асинхронного двигателя на совмещённую обмотку статора / К.В. Мартынов, В.А. Носков // Инновации в сельском хозяйстве. – 2018. – № 3 (28). – С. 71-77.

7. Мартынов, К. В. Определение пусковых характеристик асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой / К. В. Мартынов // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 3(67). – С. 62-68.

8-19. В материалах научно-практических конференций: 11 работ.

Патенты и свидетельства

20. Пат. 197319 РФ, МПК Н02К 3/28. Трёхфазная 12-зонная одно-двухслойная обмотка статора / К. В. Мартынов, В. А. Носков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА. – №2020102866; заявл. 23.01.2020, опубл. 21.04.2020, Бюл. №12. – бс.

21. Пат. 2735288 РФ, МПК МПК Н02К 3/28. Трёхфазная 12-зонная двухслойная обмотка статора с пониженным содержанием высших пространственных гармоник в составе магнитодвижущей силы / К. В. Мартынов, В. А. Носков ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА. – № 2019140789; заявл. 09.12.2019, опубл. 29.10.2020, Бюл. № 31.

22. Свидетельство 2020663515. Программа перерасчёта обмотки статора машины переменного тока со стандартной 6-зонной на совмещённую 12-зонную : программа для ЭВМ / К. В. Мартынов, В. А. Носков, И. А. Благодатских (RU) ; правообладатель ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА. – № 2020662822 ; заявл. 22.10.2020 ; опубл. 28.10.2020, Бюл. № 11. – 48,7 Мб.

Подписано в печать 10.03.2022

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 1,0. Заказ № 8408.

Тираж 100 экз.

ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА

426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 11

Тел.: 8(3412) 77-16-45. Факс: 58-99-48. e-mail: rio.isa@list.ru