

На правах рукописи



Табачинский Алексей Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И СНИЖЕНИЕ ИХ
МЕТАЛЛОЕМКОСТИ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
СТРУКТУРЫ ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ ОБМОТКИ СТАТОРА**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Самара 2020

Работа выполнена на кафедре «Теоретическая и общая электротехника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» (СамГТУ).

Научный руководитель: **Грачев Павел Юрьевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Теоретическая и общая электротехника» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Ганджа Сергей Анатольевич**, доктор технических наук, доцент, декан энергетического факультета, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет», г. Челябинск

Вавилов Вячеслав Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры «Электромеханика» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа

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

Защита диссертации состоится 22 декабря 2020 г. в 9 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.217.04 по адресу: 443100, Самара, ул. Первомайская, 18, Самарский государственный технический университет, корпус 1, ауд. 4а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета (ул. Первомайская, 18) и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» <https://samgtu.ru>.

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.04; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru

Автореферат разослан « » _____ 2020 г.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.217.04

кандидат технических наук



Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Настоящая диссертационная работа посвящена разработке и исследованию машин переменного тока с новой конструкцией обмотки статора, отличающейся структурой лобовых частей. Такая конструкция, названная в работе «компактной», отличается уменьшенной металлоёмкостью и повышенной эффективностью. Данные положительные эффекты достигаются применением в компактной обмотке проводников с циклически меняющимся прямоугольным сечением.

Традиционно, обмотки статора электрических машин низкого и высокого напряжения малой и средней мощности выполняют из проводников круглого сечения из-за небольших фазных токов. Фазные токи увеличиваются при увеличении мощности либо уменьшении напряжения обмотки статора. В этом случае обмотки целесообразно выполнять из прямоугольного провода — например, обмотки зарядных генераторов или тяговых электродвигателей, работающих при пониженном напряжении.

В последнее время, в связи с развитием возобновляемой энергетики и автономного электрического и гибридного транспорта, научными коллективами по всему миру предложены новые перспективные конструкции электрических машин. В результате патентного поиска были обнаружены патенты, описывающие машины переменного тока с короткозамкнутой обмоткой статора, также с фазным статором и прямоугольными стержнями, соединёнными плоскими лобовыми кольцами. Конструкции статора упомянутых машин позволяют значительно улучшить массо-габаритные показатели за счёт снижения вылета лобовых частей обмотки статора — снижение до 70 %. Однако, машины с такими обмотками работают только при очень низких напряжениях.

Существует тенденция к увеличению энергоэффективности электрических машин. Класс энергоэффективности задаётся международными стандартами ИЕК. С целью соответствия стандартам энергоэффективности IE4 и IE5, производители зачастую прибегают к увеличению объёма меди и стали, что увеличивает габариты и стоимость машин. Согласно мнению специалистов ПАО «НИПТИЭМ», отсутствие учёта дополнительно затраченных материалов в методике

расчёта показателей энергетической эффективности приводит к искажению результатов расчёта.

Критический обзор публикаций по теме работы выявил, что в СамГТУ проводились исследования электрических машин, направленные на снижение габаритов при одновременном увеличении энергоэффективности. Однако, они учитывают неравномерное распределение плотности тока в проводниках обмотки статора приближенно, не учитывают изменение температуры в проводниках, а также потери от вихревых токов, наводимых полями лобовых частей. Требуют уточнения методики расчёта активных и индуктивных сопротивлений обмотки статора. Данная диссертация посвящена исследованию особенностей конструкции, установившихся процессов и особенностей проектирования машин переменного тока с компактной обмоткой статора (МКОС), отличающихся структурой лобовых частей обмотки статора и позволяющих добиться увеличения энергетической эффективности при снижении металлоёмкости. Актуальность темы подтверждается тем, что результаты исследования направлены на решение задачи проектирования машин переменного тока с улучшенными энергетическими и массо-габаритными показателями и широким освещением темы в научной и технической литературе.

Степень разработанности проблемы. Инновационные конструкции машин переменного тока для возобновляемой энергетики и автономного электрического транспорта исследуются по всему миру. Среди отечественных учёных в этом направлении можно выделить основополагающие работы Бертинова А.И., Беспалова В.Я., Браславского И.Я., Бута Д.А., Вавилова В.Е., Вольдека А.И., Кобелева А.С., Копылова И.П., Козярук А.Е., Костырева М.Л., Красовского А.Б., Сарапулова Ф.Н., Соломина В.А., Фризена В.Э., Шрейнера Р.Т., а за рубежом — F. Blaabjerg, D. Gerling, R. Kato, M. Rahman, L. Szabo, Wenchuan Wu и др. Теоретические исследования процессов в электрических машинах усовершенствованных конструкций для установок возобновляемой энергетики и автономного транспорта представлены также в работах Ганджи С.А., Грачева П.Ю., Гуляева И.В., Доманова В.И., Зубкова Ю.В., Казакова Ю.Б., Лукутина Б.В., Татевосяна А.С., Торопцева Н.Д., Харитоновна В.П., Хватова С.В., Хватова О.С. и др. Отличительной особенностью предмета данной диссертации является исследование процессов в машинах с

усовершенствованной структурой лобовых частей, позволяющей оценить и дать рекомендации по снижению металлоёмкости машины при одновременном увеличении эффективности.

Объект исследования: трёхфазные машины переменного тока с компактной двухслойной волновой обмоткой статора, состоящей из нескольких ветвей, включающих проводники изменяющегося сечения.

Предмет исследования: электрические, электромагнитные и тепловые процессы в активных и лобовых частях машин переменного тока с усовершенствованной структурой лобовых частей.

Цель диссертационной работы: улучшение массо-габаритных и энергетических показателей машин переменного тока за счёт совершенствования структуры лобовых частей обмотки статора.

Задачи исследования:

1. Критический обзор исследований в области машин переменного тока уменьшенной металлоёмкости и высокими энергетическими показателями.

2. Определение особенностей конструкции МКОС с несколькими проводниками в слое компактной обмотки.

3. Моделирование электрических, электромагнитных и тепловых процессов в торцевых частях МКОС с применением метода конечных элементов (МКЭ) и применение результатов моделирования для исследования установившихся процессов и оценки энергоэффективности МКОС.

4. Разработка методик расчёта конструктивных параметров обмоток статора МКОС, их активных и индуктивных сопротивлений, учитывающих особенности усовершенствованной структуры лобовых частей.

Методы исследования. Исследование проведено с помощью методов общей теории электрических машин. Математическое моделирование электрических, электромагнитных и тепловых процессов выполнено с использованием аналитических, а также численных методов, реализованных в пакетах компьютерных программ конечно-элементного анализа.

Научная новизна.

1. Разработаны конечно-элементные модели электрического, электромагнитного и теплового полей в торцевых частях МКОС, учитывающие особенности структуры лобовых частей.

2. Предложена методика расчёта конструктивных параметров МКОС, учитывающая расположение лобовых проводников обмотки относительно сердечника статора.

3. Предложена методика расчёта активного и индуктивного сопротивления фаз компактной обмотки статора, базирующаяся на МКЭ с применением предложенной кусочно-плоскопараллельной аппроксимации поля витка, учитывающая неравномерную плотность тока в проводниках обмотки и особенности распределения электромагнитного поля лобовых частей МКОС.

Практическая значимость работы:

1. Построены твердотельные модели электромагнитного ядра МКОС, ориентированные на проектирование машины, определение металлоёмкости и применение для МКЭ-моделирования процессов в МКОС.

2. Даны рекомендации по размещению лобовых проводников обмотки статора МКОС для снижения максимальной температуры лобовых частей.

3. Даны рекомендации по применению МКОС в качестве зарядных генераторов микро-ГЭС и ветроустановок, а также тяговых двигателей электрического и гибридного транспорта.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты конечно-элементного моделирования электрических, электромагнитных и тепловых процессов в торцевых частях статора МКОС, отличающиеся учётом неравномерного распределения плотности тока в обмотке и нагрева торцевых частей, а также вихревых токов в крайних листах сердечника.

2. Методика расчёта параметров обмотки статора МКОС, учитывающая особенности расположения лобовых проводников и распределение электромагнитного поля в активных и торцевых зонах машины.

3. Рекомендации по совершенствованию конструкций МКОС, позволяющие уменьшить металлоёмкость машин и увеличить их энергоэффективность.

Диссертация соответствует паспорту специальности в части формулы: «специальность, объединяющая исследования по физическим и техническим принципам создания и совершенствования силовых и информационных устройств для взаимного преобразования

электрической и механической энергии», в части области: «Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов», «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии».

Обоснованность и достоверность результатов и выводов диссертации обеспечена использованием общепринятых допущений, применением известных выражений общей теории электрических машин, применением сертифицированных пакетов программ конечно-элементного анализа для расчёта полей. Корректность результатов и выводов согласуется с аналогичными результатами и выводами, опубликованными другими авторами.

Апробация работы. Положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: «Студенческая научно-техническая конференция «Дни науки» (Самара, СамГТУ, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019), «Международная научно-техническая конференция «Бенардосовские чтения» (Иваново, ИГЭУ, 2015, 2017, 2019), «Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (Челябинск, Санкт-Петербург, ЮУрГУ, 2016, 2017), «Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (Саратов, СГТУ, 2016, 2019), «Международная научно-техническая конференция «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, МЭИ, 2017), «Международная IEEE научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, ОмГТУ, 2017), «Международная конференция «Актуальные проблемы электромеханики и электротехнологий АПЭЭТ» (Екатеринбург, УрФУ, 2017), «Международная научно-техническая конференция «Электроприводы переменного тока – ЭППТ» (Екатеринбург, УрФУ, 2018), «Международная научно-техническая конференция «Автоматизация – RusAutoCon» (Сочи, ЮУрГУ, 2018), «IEEE Power Electronics, Drives and Energy Systems Conference – PEDES-2018» (Ченнаи, Индия, Indian Institute of Technology Madras, 2018). Также выставочный макет асинхронного генератора с компактной обмоткой был представлен на Международной выставке-форум «Энергетика» (Самара, 2019), промышленной выставке «Hannover Messe 2019»

(Ганновер, Германия, 2019) и международной выставке-конференции «CoilTech 2019» (Порденоне, Италия, 2019).

Личный вклад автора состоит в построении численных моделей установившихся электрических и электромагнитных процессов в торцевых зонах МКОС, анализе результатов расчётов электрических, электромагнитных и тепловых процессов в торцевых и активной зонах МКОС, а также в применении результатов моделирования при расчёте конструктивных и электрических параметров обмотки, согласно предложенным соискателем методикам. Соискатель предложил в новом техническом решении – электромеханический преобразователь с жидкостным охлаждением и электронным управлением – взаимное расположение лобовых проводников обмотки статора, блоков электронного управления и каналов охлаждения. Соискателем предложена методика построения развёрнутых торцевых схем обмоток статора МКОС, учитывающая усовершенствованную структуру лобовых частей.

Внедрение результатов работы. Научно-технические результаты данной диссертационной работы использованы на ООО «Тольяттинский трансформатор» в процессе автоматизированного проектирования специальных электротехнических устройств.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 работы, в том числе 3 в журналах, рекомендованных ВАК, 12 в изданиях, индексируемых наукометрическими базами Scopus и Web Of Science, 1 патент на изобретение.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка. Основная часть изложена на 154 страницах, которая содержит 67 рисунков, 18 таблиц. Библиографический список содержит 113 ссылок.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены актуальность, цель и задачи работы, перечислены методы исследований, научная новизна и практическая значимость, научные публикации автора по теме диссертации. Предметом исследований являются электрические, электромагнитные и тепловые процессы в активных и лобовых частях машин переменного тока с усовершенствованной структурой лобовых частей обмотки статора.

В первой главе представлен обзор существующих исследований и разработок в области повышения эффективности и уменьшения металлоёмкости электромеханических преобразователей. Выделены разработки и исследования отечественных и иностранных учёных, направленные на увеличение удельной мощности электрических машин автономных энергоустановок.

Одним из перспективных направлений работ по снижению металлоёмкости электрических машин являются исследования инновационных конструкций обмоток статоров и роторов, в частности, с уменьшенным вылетом лобовых частей. Эти конструкции обмоток включают стержневые обмотки или обмотки из прямоугольных проводников. В СамГТУ разработаны машины переменного тока с обмоткой статора, включающей перемычки уменьшенного сечения, позволяющие снизить металлоёмкость. Однако, для данной конструкции не разработаны точные методики проектирования и не исследованы распределения полей в торцевых зонах.

Исходя из критического анализа современных научных работ по теме, объектом исследования настоящей диссертации была выбрана машина переменного тока с компактной обмоткой статора (МКОС). Выбраны методы моделирования электрических, электромагнитных и тепловых процессов в активной и торцевых зонах МКОС.

Вторая глава посвящена описанию конструктивных особенностей МКОС. Рассматриваемая машина имеет двухслойную волновую обмотку статора с проводниками изменяющегося сечения, отличающуюся конструкцией лобовых частей, позволяющей выполнить несколько ветвей в фазе. При этом лобовые проводники параллельны торцам сердечника, и соединяются с активными проводниками перемычками уменьшенного сечения. Показано, что

данное техническое решение позволяет увеличить фазное напряжение обмотки статора.

В то же время, вылет лобовых частей обмотки статора МКОС уменьшен относительно традиционных машин переменного тока. Лобовые проводники одного слоя обмотки объединены в группы и расположены друг над другом, исключая взаимное перекрещивание. Эти группы лобовых проводников также не перекрещиваются и параллельны торцам сердечника статора. Вид одного торца сердечника с лобовыми частями обмотки со стороны выводов фаз изображён на рис. 1. На нём обозначены лобовые проводники 1, соединяющие ветви, выводы фаз 2, лобовые проводники 3, соединяющие полуветви фаз, перемычки 4 уменьшенного сечения, лобовые проводники 5 витков обмотки.

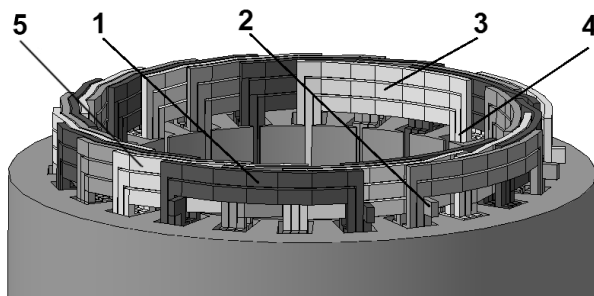


Рисунок 1 — Торце МКОС

Уменьшенное сечение перемычек освобождает пространство над частями активных проводников, в котором размещают группы лобовых проводников. Таким образом, лобовые проводники, принадлежащие разным виткам, не перекрещиваются. На рис. 2. приведён вид части витков одной фазы обмотки.

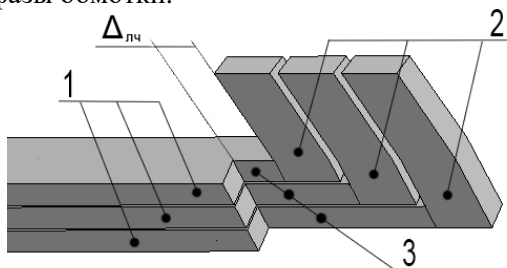


Рисунок 2 — Часть витков одной фазы компактной обмотки

На рис. 2 цифрами обозначены: 1 – активные проводники, 2 – лобовые проводники, 3 – перемычки уменьшенного сечения. Здесь перемычки 3 имеют сечение, равное половине сечения активных проводников. Обозначена величина немагнитного зазора лобовых частей $\Delta_{лч}$ между торцом сердечника статора и лобовыми проводниками. Перемычки имеют различную длину, зависящую от положения активного проводника в слое. Эти особенности необходимо учитывать при расчёте параметров и размеров компактных обмоток.

Во второй главе приводится предложенная методика расчёта конструктивных параметров компактной обмотки:

1. Определяется ширина лобового проводника через высоту перемычки и шаг обмотки.
2. Определяется высота лобового проводника исходя из равенства поперечного сечения активного и лобового проводника.
3. Определяется длина перемычек через высоту лобового проводника и число проводников в слое обмотки и вылет лобовых частей обмотки.
4. Определяется длина лобового проводника через ширину катушки и расстояние между пазами.
5. Определяется масса лобовых частей.

В методике используются следующие предложенные соискателем формулы расчёта вылета (1), длины (2) и массы (3) лобовых частей компактной обмотки:

$$l_{\text{выл}} = n_1 h_{\text{лп}} + \Delta_{\text{лч}}; \quad (1)$$

$$l_{\text{лоб}} = \sqrt{\left(h_{\text{п}} + \left[\frac{D_1}{2} + h_{\text{ш}} \right] \left[1 - \cos \frac{2\pi y}{Z_1 t_{z1}} \right] \right)^2 + \left(2b_{\text{п}} \left[\frac{D_1}{2} + h_{\text{ш}} \right] \sin \frac{2\pi y}{Z_1 t_{z1}} \right)^2}; \quad (2)$$

$$Q_{\text{лоб}} = 2Z_1 n_1 \rho S_{\text{лп}} \left(\frac{\pi(D_1 + h_{\text{п}})}{2p} + \left[\frac{(n_1 - 1)}{2} h_{\text{лп}} + \Delta_{\text{лч}} \right] \right). \quad (3)$$

где: $\Delta_{\text{лч}}$ — зазор между лобовыми частями и торцами сердечника; $h_{\text{лп}}$ и $S_{\text{лп}}$ — высота и площадь изолированных лобовых проводников; n_1 — количество проводников в слое; y — шаг обмотки.

Для проектирования МКОС, предлагается строить схемы последовательности соединения проводников фазы, а также развёрнутые торцевые схемы, предложенные соискателем (рис. 3).

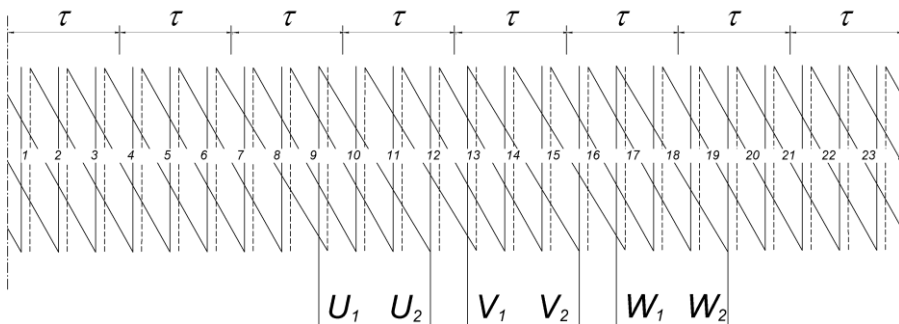


Рисунок 3 — Развёрнутая торцевая схема обмотки статора МКОС

Торцевые схемы позволяют проиллюстрировать расположение лобовых проводников относительно друг друга и пазов сердечника и входят в методику проектирования МКОС. На рис. 3 изображена торцевая схема статора асинхронной машины с 24 пазами, где $q=1$, $2p=8$, шаг обмотки диаметральный. Сплошные вертикальные отрезки иллюстрируют активные проводники нижнего слоя обмотки, штриховые отрезки — активные проводники верхнего слоя обмотки. Сплошные наклонные отрезки иллюстрируют группы лобовых проводников. Выводы фаз обозначены $U_1..W_2$. Группы лобовых проводников витков соединяют сплошные отрезки с штриховыми, и имеют три лобовых проводника (рис. 1). Группы лобовых проводников, соединяющих полуветви фаз обмотки, имеют по три проводника и на торцевой схеме соединяют штриховые отрезки со штриховыми, например, между активными проводниками пазов 10 и 13. Группы лобовых проводников, соединяющих ветви фаз обмотки, имеют по два проводника и на торцевой схеме соединяют сплошные отрезки со сплошными, например, между активными проводниками пазов 9 и 12. В пазах 9 и 12 также находятся активные проводники, соединённые с выводами фазы.

Сокращение вылета лобовых частей и массы обмотки важно в машинах переменного тока автономных объектов. Поэтому рассмотрены возможности применения МКОС в ветроэнергетических установках малой и средней мощности, микро-ГЭС и электрическом и гибридном транспорте.

С участием соискателя предложен электромеханический преобразователь с электронным управлением и жидкостными

охлаждением, позволяющий разместить блоки электронного управления в корпусе машины. Здесь личный вклад соискателя заключается в предложенном расположении лобовых проводников обмотки статора, блоков электронного управления и каналов охлаждения.

В третьей главе приведены результаты исследования электрических, электромагнитных и тепловых процессов в активной и торцевых частях асинхронной МКОС. Показано, что в участках обмотки статора с переменным сечением наблюдается неравномерное распределение плотности тока по объёму проводника. Для того, чтобы построить двухмерную МКЭ-модель растекания тока в части витка с изменяющимся сечением, был предложен способ кусочно-плоскопараллельной аппроксимации поля витка обмотки. Способ заключается в представлении 3D электрического поля тока объёмного поля витка со ступенчато меняющимся сечением, в виде суммы 2D электрических полей токов отдельных участков витка с неравномерной и равномерной плотностью тока. Распределение плотности тока описывается системой уравнений Лапласа в частных производных:

$$\begin{cases} -\bar{j} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \\ -\bar{j} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \\ \iint_{S_{\text{пер}}} \bar{j} dx dy = 0 \end{cases} \quad (4)$$

где: $S_{\text{пер}}$ — сечение в середине длины переключки, \bar{j} — вектор плотности тока, φ — вектор электрического потенциала. Первое уравнение системы описывает растекание тока в участке соединения активного проводника с переключкой. Второе уравнение системы описывает растекание тока в участке соединения лобового проводника с переключкой. Третье уравнение описывает значение плотности тока в сечении, которое является границей между описанными участками.

Получены результаты моделирования растекания тока в витках компактной обмотки с помощью кусочно-плоскопараллельной аппроксимации, соответствующие результатам 3D-моделирования (рис. 4), полученным в *Elcut 6.3*.

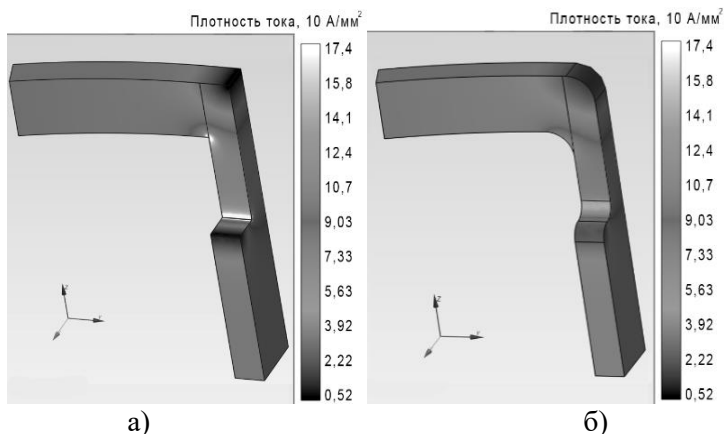


Рисунок 4 — Картины растекания тока в проводниках обмотки МКОС

В результате моделирования выявлено, что наибольшая плотность тока наблюдается в области внутренних рёбер проводников, в то время, как в области внешних рёбер наблюдается наименьшая плотность тока. Поэтому предлагается увеличивать радиусы сопряжения проводников обмотки, как показано на рис. 4б. По сравнению с картиной рис. 4а, относительная разность плотности тока снижается с 4,39 до 2,27 раз.

Исследование скин-эффекта в обмотке статора МКОС на высших гармониках показывает, что в активной части витка компактной обмотки сечением $3,4 \times 1,7$ мм относительная разность плотности тока на частоте 50 Гц составляет 0,03, а на частоте 1000 Гц относительная разность плотности тока вырастает до 0,833.

Проведённые в разделе 3.2 исследования показали, что картина магнитного поля в поперечном сечении активной части МКОС не отличается от картин поля стандартных машин. Следовательно, магнитную проницаемость пазового и дифференциального рассеяния в МКОС следует рассчитывать по известным методикам. На рис. 5 изображена картина магнитного потенциала в торцевой части МКОС в плоскости, перпендикулярной направлению токов в лобовых проводниках. Как видно, силовые линии магнитного поля лобового рассеяния замыкаются по стали сердечника статора, что влияет на магнитную проницаемость лобового рассеяния фаз и приводит к возникновению вихревых токов в стали и дополнительному тепловыделению.

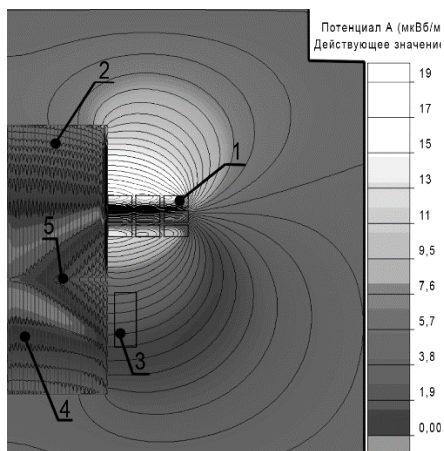


Рисунок 5 — Потенциал поля лобового рассеяния

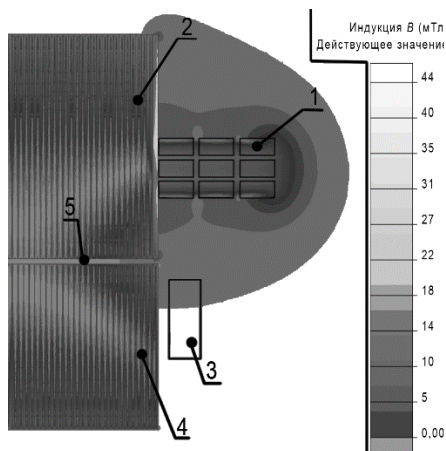


Рисунок 6 — Индукция поля лобового рассеяния

На рис. 5 и 6 обозначены 1 – лобовые проводники, 2 – листы сердечника статора, 3 – короткозамыкающее кольцо, 4 – листы сердечника ротора, 5 – воздушный зазор. Наибольшая индукция (рис. 6) наблюдается в крайнем торцевом листе стали сердечника статора и достигает $76,1$ мТл. Среднее значение индукции в верхнем листе – 14 мТл.

Расчёты показали, что средняя мощность тепловыделения токами, индуцируемыми полем лобового рассеяния, в верхнем листе стали сердечника всего $0,16$ мВт и пренебрежимо мала в других листах.

В разделе 3.3 приведены результаты численного моделирования тепловых процессов в торцевой зоне статора МКОС при фазном токе обмотки 36 А. Результаты моделирования показали равномерное повышение температуры от активных к лобовым проводникам, изображённое на рис. 7. Таким образом, локального перегрева перемычек уменьшенного сечения не возникает. Это можно объяснить высокой теплопроводностью медных проводников витков.

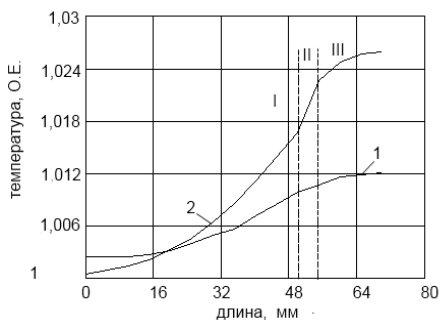


Рисунок 7 — Диаграмма температур проводника фазы

На рис. 7 римскими цифрами I обозначена область активного проводника, II — область перемычки, III — область лобового проводника. Диаграмма 1 построена для обмотки с постоянным сечением, диаграмма 2 — для обмотки с перемычками вдвое уменьшенного сечения длиной 4 мм. Перемычки уменьшенного сечения в компактной обмотке несколько увеличивают

значение максимальной температуры. В частности, для исследуемой асинхронной МКОС с немагнитным зазором лобовых частей $\Delta_{лч} = 2,5$ мм максимальная температура лобовой части увеличивается на 22 %. Разница между температурой в активном и лобовом проводнике при этом достигает 13 %. Для снижения температуры и активных потерь в проводниках компактной обмотки статора рекомендуется уменьшить немагнитный зазор $\Delta_{лч}$ до величины изоляции групп лобовых проводников, а также связать группы лобовых проводников общей изоляцией для улучшения теплообмена между лобовыми проводниками обмотки и сердечником статора МКОС.

В четвёртой главе приведён расчёты параметров асинхронного генератора с компактной обмоткой и тягового асинхронного двигателя (ТАД), иллюстрирующие преимущества заявляемой конструкции.

МКЭ-моделирование участков витков с неравномерной плотностью тока способом кусочно-плоскопараллельной аппроксимации поля витка позволяет определить ток участков витка, задавая разницу потенциалов на концах участков, и рассчитать значение активного сопротивления.

Предложена уточнённая методика расчёта активного сопротивления фазы обмотки статора МКОС:

1. Определяются размеры четверти витка с усреднённой длиной перемычки.

2. Четверть витка разбивается на участки с постоянной и переменной плотностью тока согласно способу кусочно-плоскопараллельной аппроксимации.
3. С помощью МКЭ-моделирования определяется активное сопротивление участков с переменной плотностью тока.
4. Активное сопротивление участков постоянного сечения определяется через геометрические размеры и электрические свойства проводника.
5. Значение активного сопротивления четверти витка складывается из суммы значений активных сопротивлений участков. Затем определяется активное сопротивление витка и фазы обмотки.

Рассчитанные с помощью МКЭ-моделирования значения активных сопротивлений участков витка входят в выражение (5) для уточнённого расчёта активного сопротивления фазы обмотки с учётом неравномерного распределения плотности тока по объёму проводников. Упрощённое выражение (6) не учитывает это неравномерное распределение:

$$r_1 = w_1 4 \left[\frac{\rho_{\text{медн}}}{S_{\text{ак}}} [0,5(l_a - 4h_{\text{ак}}) + 0,5(l_l - 5h_{\text{лп}}) + 2(l_{\text{пер}} - b_{\text{ак}} - b_{\text{лк}})] + \tilde{r}_1 + \tilde{r}_2 \right]; \quad (5)$$

$$r_1 = \frac{w_1 \rho}{S_{\text{ак}}} \left(2l_{\delta} + \frac{\pi(D + h_{\text{п}})}{p} + 8 \frac{2A_{\text{лч}} + (n_l - 1)h_{\text{лп}}}{2} \right); \quad (6)$$

где: \tilde{r}_1 и \tilde{r}_2 — сопротивления участков витка пазовой и лобовой части, полученные по результатам моделирования способом кусочно-плоскопараллельной аппроксимации поля витка компактной обмотки.

Даны рекомендации по учёту неравномерной плотности тока в витках для МКОС с разными размерами сердечников.

Исследовано расхождение результатов расчёта по уточнённому и упрощённому выражениям. Показано, что для «коротких» МКОС необходим учёт неравномерного распределения плотности тока в витках обмотки статора. Для машин средней длины $0,4 < l_a/D_a < 1,3$ предложено использовать известный способ трапецеидальной аппроксимации изменения плотности тока в витках, а для машин $l_a/D_a > 1,3$ учёт неравномерного распределения плотности тока можно опустить при расчёте активного сопротивления фазы.

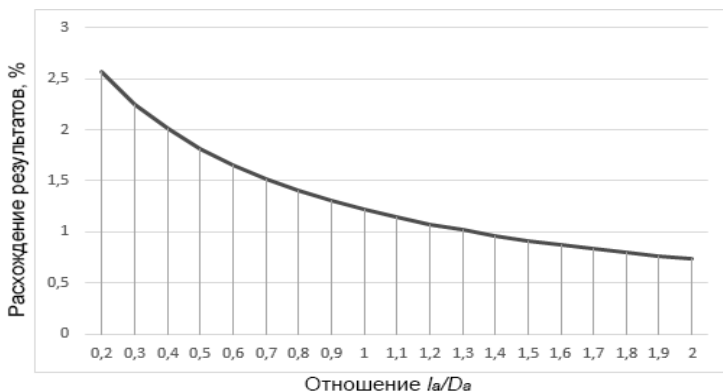


Рисунок 8 — Расхождение результатов расчёта активного сопротивления по уточнённом и упрощённом выражениям

На основании результатов моделирования магнитного поля в торцевой зоне МКОС сделан вывод о том, что определение магнитной проводимости лобового рассеяния обмотки статора с достаточной точностью можно рассчитать по выражению, подобному выражению для магнитной проводимости рассеяния короткозамкнутого кольца ротора асинхронной машины. Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния МКОС:

$$\lambda_{\text{лоб}} = \frac{2,3(D_1 + h_{\text{п}})}{Z_1} \lg \frac{4,7(D_1 + h_{\text{п}})}{h + 2m(b_{\text{лп}} + \Delta) + \Delta_{\text{лч}}}; \quad (7)$$

Увеличение немагнитного зазора $\Delta_{\text{лч}}$ приводит к уменьшению магнитной проводимости лобового рассеяния и некоторому увеличению электромагнитного момента МКОС. Определено, что зависимость индуктивности лобового рассеяния зависит от величины зазора $\Delta_{\text{лч}}$ и монотонно убывает.

Потери от вихревых токов, создаваемых полем лобового рассеяния, определяются на основе результатов МКЭ-моделирования (8):

$$P_{\text{ст.лоб}} = \rho_{1/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^{\beta} \left(1 + \frac{B_{\text{лоб}}}{B_{\text{лобmax}} - B_{\text{лоб}}} \right) B_{\text{лоб}}^2 \frac{2b_{\text{ст}}}{l_{\delta}} [m_z + m_a]; \quad (8)$$

Показано, что дополнительные потери в стали МКОС, обусловленные этими вихревыми токами, на порядок меньше основных потерь в стали сердечника статора.

Расчёт энергоэффективности зарядных асинхронных генераторов мощностью 650 Вт показал, что применение компактной обмотки позволило увеличить КПД на $0,6 \%$ с $83,4 \%$ до 84% за счёт сокращения активных потерь в обмотке статора на $8,5 \%$. Расчёт металлоёмкости показал экономию активных материалов: сокращение вылета лобовых частей на 75% , сокращение длины лобового проводника на 30% и снижение массы меди обмотки на 24% .

Расчёт параметров МКОС показал, что применение компактной обмотки статора в асинхронном генераторе позволяет уменьшить активное сопротивление на $8,5 \%$ и индуктивное сопротивление фазы обмотки на $5,4 \%$, и несколько увеличить электромагнитный момент. Для рассчитанного генератора максимальный момент увеличился на $5,5 \%$, а номинальный — на $4,5 \%$. Выработка электрической мощности на номинальной частоте вращения увеличилась с 588 Вт до 643 Вт на $9,3 \%$. На рис. 9 приведены зависимости КПД рассмотренных генераторов от коэффициента загрузки. Эти зависимости отражают КПД генератора в режимах до номинального. Сплошной линией изображена зависимость для генератора с традиционной обмоткой, штриховой — с компактной обмоткой с немагнитным зазором $\Delta_{лч} = 2,5 \text{ мм}$, а штрихпунктирной — с компактной обмоткой с минимальным зазором. Из графиков следует, что для асинхронной МКОС максимум КПД в $84,15 \%$ достигается при мощности на валу $0,86 \cdot P_n$.



Рисунок 9 — Рабочая характеристика асинхронного генератора

Таким образом, на основании результатов исследования различных структур лобовых частей даны следующие рекомендации. Для

снижения вылета лобовых частей, уменьшения металлоёмкости и повышения энергоэффективности МКОС предлагается выполнять лобовые части обмотки статора с минимальным зазором между лобовыми частями и сердечником статора. Применение такой конструкции позволяет снизить температуру обмотки статора, уменьшить длину и активное сопротивление фаз при незначительном увеличении потерь от вихревых токов в стали сердечника статора.



Рисунок 10 — Статор макетного образца МКОС

Для демонстрации заявленных особенностей конструкции обмотки был создан макетный образец МКОС, представленный на промышленных выставках в России, Германии и Италии и изображённый на рис. 10.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В результате критического обзора технической литературы в области машин переменного тока с уменьшенной металлоёмкостью обмоток, выявлены недостатки технических решений, описанных в патентах США и РФ — возможность их использования только при низких значениях номинального напряжения. В техническом решении, разработанном в СамГТУ, описана конструкция машины переменного тока с компактными лобовыми частями обмотками статора и уменьшенной металлоёмкостью, позволяющая повысить номинальное напряжение статора. Однако, в таких машинах недостаточно изучены процессы в торцевых частях статора и отсутствуют уточнённые методики расчёта параметров.

2. Разработаны методики расчёта конструктивных параметров обмоток МКОС и построения торцевых схем, отличающиеся учётом структуры лобовых частей.

3. Предложены конечно-элементные модели электрических, электромагнитных и тепловых процессов в активной и торцевых зонах МКОС. Результаты моделирования были использованы при разработке методик расчёта активного сопротивления и индуктивного сопротивления рассеяния фаз обмотки статора.

4. Результаты МКЭ-моделирования неравномерного растекания тока по объёму проводников фазы обмотки статора МКОС, полученные с помощью предложенного способа кусочно-плоскопараллельной аппроксимации поля витка, были положены в основу методики уточнённого расчёта активного сопротивления фазы обмотки статора.

5. Моделирование электромагнитного поля в торцевой зоне МКОС выявило, что распределение поля лобового рассеяния обмотки статора по форме аналогично полю рассеяния короткозамыкающих колец беличьей клетки ротора асинхронной машины, а распределение электромагнитного поля в поперечном сечении активной зоны статора МКОС аналогично машине с традиционной обмоткой. Выявлено, что вихревые токи в крайних листах сердечника статора вызывают потери, на порядок меньшие основных потерь в стали сердечника статора.

6. Моделирование теплового поля в статоре МКОС показало, что перегрева перемычек уменьшенного сечения компактной обмотки не возникает. Результаты исследований теплового поля позволили рекомендовать для улучшения теплового режима МКОС связывать лобовые проводники общей изоляцией, а также располагать группы лобовых проводников вплотную к сердечнику статора.

7. Разработана методика расчёта параметров обмотки статора МКОС, учитывающая неравномерное распределение плотности тока в проводниках, а также расположение лобовых проводников в торцевом пространстве машины. Оценена погрешность использования стандартных методик при расчёте указанных параметров.

8. Проведён расчёт асинхронного генератора мощностью 650 Вт с компактной обмоткой, который показал увеличение КПД по сравнению с традиционной машиной на $0,6 \%$ за счёт снижения активных потерь в обмотке статора на $8,5 \%$, сокращение вылета лобовых частей на 75% и массы меди обмотки статора на 24% . Результаты расчёта многополюсного тягового двигателя для троллейбуса мощностью 60 кВт показали, что применение компактной обмотки статора позволяет сократить вылет лобовых частей на 60% , длину лобовых проводников

на 38 %, их массу — на 35 %, при снижении активных потерь в лобовых частях на 13,4 %.

Перспективы дальнейших исследований. В рамках продолжения работ по тематике МКОС целесообразно исследование машин средней с обмоткой статора из нескольких частей. Нуждается в разработке технология изготовления МКОС, которая будет экономична и реализуема с применением современных производственных процессов. Разработка такой технологии является мультидисциплинарной задачей и может включать автоматизированную сборку МКОС с операцией лазерного спекания, механической и электротермической обработкой отдельных частей.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК:

1. **Грачев, П.Ю.** Энергоэффективные асинхронные машины с нетрадиционным электромагнитным ядром / П.Ю. Грачев, В.Я. Беспалов, Е.В. Стрижакова, А.С. Табачинский // *Электротехника*. №2 – 2018. С. 7-12.
2. **Табачинский А.С.** Построение схем и особенности расчёта компактных обмоток машин переменного тока / А.С. Табачинский, П.Ю. Грачев // *Вестник Самарского Государственного Технического университета*. Серия: Технические науки. №1(61) – 2019. С. 98-109.
3. **Грачев П.Ю.** Применение метода конечных элементов для расчёта активного сопротивления обмоток электрических машин / П.Ю. Грачев, А.С. Табачинский // *Электричество*. №12 – 2019. С. 35-41.

Статьи, индексированные в международных базах цитирования Web of Science и Scopus:

4. **P.Yu. Grachev.** Power converter with compact winding SCIGs for HEVs, micro hydroelectric power stations and wind turbines / P.Yu. Grachev, E.E. Gorbachev, A.S. Tabachinskiy // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), IEEE, 2016, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911521.
5. **P.Yu. Grachev.** Compact windings design for traction induction motors and SCIGs / A.A. Bazarov, P.Yu. Grachev, A.S. Tabachinskiy // 2017

International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), IEEE, 2017, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076322.

6. **P.Yu. Grachev.** Starter-generator design and analysis of start/stop processes for HEVs / P.Yu. Grachev, E.V. Stizhakova, A.S. Tabachinskiy // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), IEEE, 2017, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076325.

7. **P.Yu. Grachev.** Starter-generator design and dynamic processes simulation for HEVs / P.Yu. Grachev, E.V. Stizhakova, A.S. Tabachinskiy // Procedia Engineering, vol. 206, Elsevier, 2017, pp. 386-391. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.490.

8. **P.Yu. Grachev.** Electrical and thermal processes of HEV induction machines taking into account stator winding form / A.A. Bazarov, P.Yu. Grachev, A.S. Tabachinskiy // 2017 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), IEEE, Nov. 2017, pp. 1-6. DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239455.

9. **P.Yu. Grachev.** Influence of winding construction on starter-generator thermal processes / P.Yu. Grachev, A.A. Bazarov, A.S. Tabachinskiy // Journal of Physics Conference Series vol. 944 issue 1, art. №012041; DOI:10.1088/1742-6596/944/1/012041.

10. **P.Yu. Grachev.** Variable cross-section windings for efficiency improvement of electric machines / P.Yu. Grachev, A.A. Bazarov, A.S. Tabachinskiy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering vol. 313 issue 1, art. №012004; DOI: 10.1088/1757-899X/313/1/012004.

11. **P.Yu. Grachev.** An energy-efficiency induction motor with an unconventional electromagnetic core / P.Yu. Grachev, V.Ya. Bespalov, E.V. Strizhakova, A.S. Tabachinskiy // Russian Electrical Engineering 89(2), c. 80-84; DOI: 10.3103/S1068371218020062.

12. **P.Yu. Grachev.** Improved efficiency machines with integrated control and protection system for AC drives / A.S. Tabachinskiy, P.Yu. Grachev // 2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives, ACED 2018, 2018-April, c. 1-5; DOI: 10.1109/ACED.2018.8341709.

13. **P.Yu. Grachev.** Features of innovative AC generator simulation for autonomous power units / P.Yu. Grachev, A.S. Tabachinskiy // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), DOI: 10.1109/RUSAU TOCON.2018.8501655.

14. **P.Yu. Grachev.** Integrated power converters for innovative wind turbine generators / P.Yu. Grachev, A.S. Tabachinskiy, P. Kanagavel // 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), DOI: 10.1109/PEDES. 2018.8707509.

15. **P.Yu. Grachev.** New stator construction and simulation of high efficiency wind turbine generators / P.Yu. Grachev, A.S. Tabachinskiy, P. Kanagavel // IEEE Transactions of Industry Applications, March-April 2020, vol. 5, issue 2. с. 1389-1396, DOI: 10.1109/TIA.2020.2964231.

Другие издания:

16. **Грачев П.Ю.** Перспективы применения инновационных генераторов переменного тока в автономных ВЭУ / П.Ю. Грачев, Е.Е. Горбачев, А.С. Табачинский // Инновации в сельском хозяйстве №5 (20) — М.: ВИЭСХ, 2016. — 356-364 с.

17. **Табачинский А.С.** Метод кусочно-плоскопараллельной аппроксимации поля витка с током в приложении к электромеханике / А.С. Табачинский, П.Ю. Грачев // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ — Саратов: СГТУ им. Гагарина Ю.А., 2016. № 12 (94). С. 305-307.

Патенты:

18. **Грачев П.Ю.** Электромеханический преобразователь с жидкостным охлаждением и электронным управлением / П.Ю. Грачев, В.Я. Беспалов, А.С. Табачинский // Патент РФ №2711084, МПК Н02К3/12. Опубликовано 15.01.2020. Бюл. №2. Заявка №2018134690 от 1.10.2018.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета

Д 212.217.04 ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет»

(протокол № 12 от 19.10.2020)

Заказ № ___ Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический
университет»

Отдел типографии и оперативной полиграфии
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244