

УТВЕРЖДАЮ

проректор по научной работе ВГТУ  
доктор технических наук, профессор

Дроздов Игорь Геннадьевич

«20» ноября 2018 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации ~~федерального государственного~~ бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ВГТУ», ВГТУ) на диссертацию Корнеева Вячеслава Викторовича «Расчетные коэффициенты и добавочные потери синхронных машин с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01- «Электромеханика и электрические аппараты»

### Актуальность

Современный период развития электромеханики и электроэнергетики связан с совершенствованием технических показателей и характеристик электрических машин, таких как коэффициент полезного действия, повышение надежности и увеличения ресурса работы, расширением области применения и функциональных возможностей для работы при различных условиях (температура, динамические нагрузки, автономные источники электроэнергии и т.д.). Одним из перспективных путей решения вышеперечисленных задач является применение электрических машин с постоянными магнитами. Несмотря на все более широкое применение синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов и дробными зубцовыми обмотками вопросы их проектирования недостаточно освещены в научно-технической литературе. Особенности конструкций и режимов работы специальных синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов и дробной зубцовой обмоткой для систем автономного электроснабжения и добычи нефти, проектируемые на кафедре электромеханики НГТУ, потребовали как модификации теории и методов проектирования, так и решения ряда задач по уточнению используемых при проектировании коэффициентов.

Традиционная методика проектирования и расчета геометрии зубцово-пазовой зоны и обмоточных данных синхронных машин базируется на расчетных коэффициентах, зависящих от конфигурации активного объема электрической машины. От выбора данных коэффициентов зависит качество расчета.

Одним из важных для расчетных методик коэффициентов является обмоточный. В классических методиках проектирования обмоточный коэффициент рассчитывается при допущениях идеализированной электрической машины. Наличие сложной формы магнитного поля в воздушном зазоре электрических машин с дробными зубцовыми обмотками, является причиной возникновения вихревых токов в элементах его конструкции. Количественный состав и амплитуда пульсаций индукции будет увеличиваться при работе синхронной машины с постоянными магнитами и дробной зубцовой обмоткой на выпрямитель (или от выпрямителя), так как токи становятся менее синусоидальными.

Автор в работе предлагает уточненную методику определения обмоточных коэффициентов и дополнительных потерь в электрических машинах с постоянными магнитами, что для повышения качества создания конструкторской документации новых изделий является актуальным.

В работе автор, **в соответствии с поставленной целью**, проводит исследования в направлении совершенствования методики проектирования синхронных машин с постоянными магнитами, а именно – уточняет обмоточные коэффициенты обмоток для ряда основных соотношений пазов и полюсов, а также уточняет дополнительные потери в постоянных магнитах на основе численного и физического эксперимента.

Работа представлена в виде диссертации на 144 страницах; в тексте имеется 76 рисунков 10 таблиц. Список литературных источников содержит 86 наименований. Приложение включает в себя результаты определения обмоточных коэффициентов и коэффициентов их уточняющих.

#### **Полнота опубликованных основных результатов диссертации.**

Основные положения работы опубликованы в достаточном количестве: 14 работ по теме диссертации, в том числе 2 статьи в изданиях по перечню ВАК РФ. Результаты работы докладывались и обсуждались на ряде Всероссийских и международной конференции.

Автореферат и опубликованные работы отражают основные положения диссертации.

**В диссертации** автор последовательно раскрывает поставленную цель.

Во введении отражена актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, описаны методы исследования. Приведены основные положения работы, выносимые на защиту, изложены сведения о научной значимости и практической ценности, апробации работы.

В первой главе выполнен обзор применяемых технических решений в электрических машинах с постоянными магнитами и дробной зубцовой обмоткой. Описаны важные свойства постоянных магнитов на примере различных материалов и преимущества постоянных магнитов на базе редкоземельных материалов NdFeB (неодим-железо-бор) и SmCo (самарий-кобальт). Также в главе представлено описание различных конструкций роторов и статоров машин с возбуждением от постоянных магнитов.



Постоянные магниты, обладающие электрической проводимостью, являются элементами конструкции, подверженными действию полей реакции якоря, которые наводят в теле постоянных магнитов вихревые токи. Одна из составляющих добавочных потерь имеет место при нагрузке и наличии токов в обмотке статора, который возникает как в проводниках обмоток, так и в отдельных стальных частях магнитопровода под воздействием потоков рассеяния, связанных с проводниками обмотки и вызванных током нагрузки. Другая составляющая добавочных потерь имеет место при холостом ходе, не меняются при нагрузке машины и вызваны неравномерностью воздушного зазора из-за зубчатости. Первый вид называют добавочными потерями при нагрузке, второй – добавочными потерями холостого хода. Представлен обзор существующих методов и способов определения расчетных коэффициентов и добавочных потерь в машинах с дробной зубцовой обмоткой.

Во второй главе проведено исследование и определение расчетного обмоточного коэффициента для синхронных машин с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками с наиболее применяемыми числами пазов на полюс и фазу  $q$ , а также рассматриваются возможности применения результатов исследований при проектировании машин данного класса.

В третьей главе получено соотношение для расчета обмоточного коэффициента синхронных машин с постоянными магнитами и дробной зубцовой обмоткой на статоре. Проведенные исследования показали, что потери на вихревые токи в постоянных магнитах ротора образуются как при использовании конструкций с внешним расположением магнитов, так с внутренним расположением магнитов. По результатам численного моделирования активного объема синхронных машин с различными конструкциями роторов с постоянными магнитами и дробной зубцовой обмоткой на статоре можно отметить, что большее влияние на величину потерь на вихревые токи в постоянных магнитах оказывают гармоники, вызванные полем реакции якоря, чем пространственные гармоники, обусловленные зубчатостью статора. Гармоники, вызванные зубцово-пазовой структурой рассматриваемых электрических машин, имеют значительно меньшую амплитуду пульсаций по сравнению с гармониками от поля реакции якоря.

В третьей главе работы рассматривались аналитические способы определения добавочных потерь на вихревые токи. Данный способ основан на использовании каскадных схем замещения. В третьей главе рассмотрено синтезирование каскадных схем замещения для определения пульсаций магнитной индукции в объеме постоянных магнитов от поля реакции якоря.

В четвертой главе рассмотрено моделирование работы синхронных машин с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками на примере генератора аварийного динамического торможения грузоподъемного механизма, разработанного на кафедре электромеханики НГТУ. Особенности проектируемых электрических машин и конкретного

образца потребовали моделирования генератора совместно с выпрямителем для определения рабочих характеристик. В результате моделирования получены временные гармоники тока, вызванные выпрямителем и рассмотрено влияние данных гармоник на потери от вихревых токов. Результаты испытаний подтвердили правильность принятых решений.

**В заключении** представлены основные результаты работы, направленные на решение вопросов проектирования синхронных машин с дробными отмотками статора и постоянными магнитами. Выводы и результаты, приведенные в заключении, соответствуют поставленной цели и содержанию глав.

#### **Научная новизна диссертационной работы:**

1. Исследовано, подтверждено и количественно оценено влияние ряда соотношений открытия паза статора, геометрических соотношений зубцово-пазовой зоны, величины воздушного зазора и насыщения магнитной системы на величину обмоточного коэффициента.
2. Получена зависимость величины обмоточного коэффициента от ширины открытия паза статора и величины воздушного зазора для машин с различным числом пазов на полюс и фазу.
3. Разработана аналитическая модель и выражение для определения добавочных потерь на вихревые токи в постоянных магнитах для различных конструкций ротора.

**Достоверность результатов и выводов диссертации:** Достоверность полученных результатов подтверждается параллельными расчетами различными методами, сравнением результатов решения с результатами других авторов, сопоставлением расчетных и экспериментально полученных зависимостей.

#### **Практическая значимость работы**

1. Предложены рекомендации по выбору расчетных коэффициентов синхронных машин с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками.
2. Предложено выражение для расчета обмоточного коэффициента для машин с различным числом пазов на полюс и фазу.
3. Предложена инженерная модель и соотношение для определения добавочных потерь на вихревые токи в постоянных магнитах для различных конструкций ротора.

#### **Рекомендации по использованию результатов работы**

Результаты диссертационной работы могут быть использованы на предприятиях, разрабатывающих электрические машины с постоянными магнитами, пониженной частотой вращения без использования понижающих редукторов, а также в ВУЗах электротехнического профиля.



### **Замечания**

1. На стр.8 диссертации автор говорит о гармониках поля реакции якоря и зубцовых гармониках поля. Мы согласны с тем, что Фурье-анализ в электрических машинах применим, но только в части, которая касается качественных иллюстраций некоторых вопросов. Для количественной оценки этот метод в насыщенных электрических машинах и зубчатым магнитопроводом использовать нецелесообразно.
2. Формула (2.1) стр. 43 столь приближительна, что уточнять ее обмоточным коэффициентом нерационально.
3. Допущение 2) стр. 44 опровергается расчетом поля МКЭ, когда ясно видно, что уровни магнитной индукции весьма неравномерны на коронках зубцов, а значит, проводимость стали даже на локальных участках магнитопровода непостоянна.
4. В таблице 2.1 стр. 51 приводятся результаты расчетов обмоточных коэффициентов для ряда значений  $q$ . В чем состоит закономерность этого ряда?
5. В таблице 3.2 стр.95 приведен КПД генератора равный 48,5%. Не будет ли в этом случае энергоэффективный генератор с двухступенчатым редуктором явным конкурентом исследуемому генератору?
6. Ссылки на литературу удобнее читать, по мере цитирования, чем по алфавиту.
7. Работа имеет ряд опечаток: стр.27, стр. 29, стр. 37, стр. 99.

### **Заключительная оценка**

1. Содержание диссертационной работы соответствует научной специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты».
2. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.
3. Основные научные результаты работы достаточно полно отражены в публикациях автора, они неоднократно обсуждались на различных конференциях и получили одобрение специалистов.
4. Наличие замечаний не носит принципиальный характер и не влияет на качество работы. Диссертация «Расчетные коэффициенты и добавочные потери синхронных машин с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками» соответствует специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты», является законченной научной работой и соответствует требованиям, установленным пунктом 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением

Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней».

Диссертационная работа «Расчетные коэффициенты и добавочные потери синхронных машин с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками» Корнеева Вячеслава Викторовича соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 - "Электромеханика и электрические аппараты", а автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Отзыв подготовлен доктором технических наук, профессором по кафедре электромеханических систем и электроснабжения Кононенко Константином Евгеньевичем (научная специальность 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»), обсужден и одобрен на научном семинаре кафедры электромеханических систем и электроснабжения Воронежского государственного технического университета 12 ноября 2018 г., протокол №3.

Председатель научного семинара,  
заведующий кафедрой ЭМСЭС ВГТУ,  
кандидат технических наук, доцент

7

Шелякин Валерий Петрович

e-mail: [emses@list.ru](mailto:emses@list.ru)

тел.: 8 (473) 243-77-12

394066, г. Воронеж, Московский проспект, 179, каб.232

Отзыв получен 29.11.2018 г. / Дубинин М.А.  
С отзывом ознакомлен 30.11.2018 г. Корн- / Корнеев В.В.