

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.437.14, СОЗДАННОГО  
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 24 декабря 2024 г. № 2024-3

О присуждении Кулёвой Надежде Юрьевне, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка математических моделей и анализ рабочих характеристик вентильных электроприводов с дискретной коммутацией обмотки» по специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы» принята к защите 22 октября 2024 г. (протокол заседания № 2024-01/03) диссертационным советом 24.2.437.14, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 454080, г. Челябинск, пр-т им. В.И. Ленина, 76; приказ о создании диссертационного совета № 507/нк от 24.03.2023.

Соискатель Кулёва Надежда Юрьевна, 12 сентября 1989 года рождения, в 2013 году окончила федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), в 2017 году окончила аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре «Электропривод, мехатроника и электромеханика» федерального государственного автономного образовательного

учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Воронин Сергей Григорьевич, научный сотрудник управления научной и инновационной деятельности федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Официальные оппоненты:

**1. Хакимьянов Марат Ильгизович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования предприятий ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа;

**2. Журавлёв Артем Михайлович**, кандидат технических наук, руководитель группы цифровых решений АО «Диэлектрические кабельные системы», г. Москва  
– дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, в своём положительном отзыве, подписанном заведующим кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники, к.т.н., доцентом Николаевым Александром Аркадьевичем и утверждённом д.т.н., профессором, проректором по научной и инновационной работе Тулуповым О.Н., указала, что диссертационная работа Кулёвой Надежды Юрьевны является законченным научным исследованием, в которой представлены результаты, обладающие научной новизной, теоретической и практической значимостью. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы». Диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с пунктами 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 № 842, в редакции от 25.01.2024), а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы».

Соискатель имеет 14 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 14 работ, из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, опубликовано 5 работ (для спец. 2.4.2), 3 работы в издании, индексируемом базой

Scopus, 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ и 1 патент. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Наиболее значимые публикации по теме диссертации:

1. Воронин, С.Г. Исследование электромагнитного КПД и пульсаций момента вентильного двигателя с дискретной коммутацией обмотки при несинусоидальной форме ЭДС / Воронин С.Г., **Кулёва Н.Ю.**, Шабуров П.О., Чернышев А.Д. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2023. – Т. 23. – № 4. – С. 14-23. (10 с. / 3 с.).

2. Лисов, А.А. Выбор тягового электродвигателя для арктического электротранспорта / Лисов А.А., Возмилов А.Г., **Кулёва Н.Ю.**, Согрин А.И., Закиров Р.А., Илимбетов Р.Ю. // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 44-56. (13 с. / 5 с.).

3. Клиначев, Н.В. Методы отладки и запуска частотных преобразователей для электропривода / Клиначев Н.В., **Кулёва Н.Ю.**, Воронин С.Г., Шабуров П.О. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65. – № 4. – С. 64-71. (8 с. / 4 с.).

4. Воронин, С.Г. Сравнительная оценка способов питания СДПМ в режиме вентильного двигателя / Воронин С.Г., Курносков Д.А., Клиначёв Н.В., **Кулёва Н.Ю.** // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2022. – Т. 22. – № 3. – С. 52-61. (10 с. / 5 с.).

5. Воронин, С.Г. Векторное управление электроприводом на основе вентильного двигателя с дискретной коммутацией обмотки / Воронин С.Г., Клиначёв Н.В., **Кулёва Н.Ю.**, Чернышев А.Д. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2022. – Т. 22. – № 4. – С. 42-52. (11 с. / 3 с.).

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре, отзыв подписан профессором кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», д-ром техн. наук, профессором Соловьевым В.А. Замечания: 1. Из текста автореферата не просматривается обоснование, почему автор при разработке математической модели ВЭП ограничился первыми тремя гармоническими. 2. На рисунках 6-8 размерность оси абсцисс вызывает сомнение.

2. ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, отзыв подписан профессором кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы», д-ром техн. наук, профессором Вольским С.И. Замечания: 1. Автор рассматривает ЭДС путем

разложения несинусоидальной кривой в гармонический ряд, в котором учитывает только первые три гармоники. Насколько достоверно такое представление несинусоидальной ЭДС? 2. Автор указал, что алгоритм с 120-градусной коммутацией имеет лучшие показатели КПД даже по сравнению с синусоидальным питанием обмоток. Как это можно объяснить? 3. В автореферате не приведено выражений для матриц коэффициентов напряжения ( $K_U$ ), коэффициентов тока ( $K_I$ ) и коэффициентов ЭДС ( $K_E$ ).

3. ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара, отзыв подписан зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», д-ром техн. наук, доцентом Зубковым Ю.В. Замечания: 1. В пунктах научной новизны отсутствуют отличительные признаки. 2. Из 4-х положений, выносимых на защиту три – результаты исследований. Что же защищает автор? 3. Указано наличие трех патентов РФ, по факту только один! 4. Стр. 9, формула (5), не ясен физический смысл коэффициентов  $K_{VD}$ ,  $K_{120}$ ,  $K_{180}$ . 5. Каким образом проводились измерения электромагнитного КПД на физической модели двигателя?

4. ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, отзыв подписан д-ром техн. наук, профессором кафедры «Электромеханика» Хайруллиным И.Х. и к.т.н., доцентом кафедры «Электромеханика» Ямаловым И.И. Замечания: 1. В автореферате приведен внешний вид универсального стенда, однако автору следовало бы привести схему электрическую принципиальную. 2. Рисунок 10 плохо читаем, автору следовало при снятии осциллограмм использовать фильтрацию помех, предусмотренных производителем осциллографа Rohde&Schwarz.

5. ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново, отзыв подписан д-ром техн. наук, профессором, профессором кафедры «Электромеханика» Казаковым Ю.Б. Замечания: 1. Почему при 120-градусной коммутации в ВЭП наблюдается наибольший КПД, больший даже по сравнению с синусоидальным питанием? 2. Не пояснено снижение пульсаций момента в трехфазном ВЭП при 150-градусной коммутации по сравнению с 120- и 180-градусными коммутациями. 3. Словосочетание «универсальная модель» режет слух, тем более «линейная» для описания в принципе нелинейных ВЭП. В третьем уравнении системы (1) индекс «а» ошибочен.

6. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, отзыв подписан официальным оппонентом, д-ром техн. наук, доцентом Хакимьяновым М. И. Замечания: 1. Приведенная в автореферате на рисунке 1 последовательность переключения силовых ключей малоинформативна без схемы

соединения ключей, которая в автореферате отсутствует. 2. В главе 5 диссертации приводятся осциллограммы токов фазы, измеренные на стенде. Непонятно, чем вызвана очень значительная шумовая составляющая измеренного сигнала? 3. Рисунок 2.8 диссертации следовало бы назвать «Универсальная компьютерная модель...», а не «Универсальная математическая модель ДК ВЭП». 4. На рисунках 2.23-2.26 представлены графики КПД ВД при различных способах коммутации, полученные при компьютерном моделировании в пакете VisSim. Кривые КПД везде имеют пульсирующий характер, обусловленный резкими скачками момента. Однако реальный двигатель обладает некоторой инерционностью (индуктивность обмоток, инерция ротора). Сохранится ли такой пульсирующий характер КПД в реальном двигателе? 5. На рисунке 3.20 вертикальная ось обозначена как ЭДС, но рисунок называется «Зависимость электромагнитного КПД...»

7. АО «Диэлектрические кабельные системы», г. Москва, отзыв подписан официальным оппонентом, к.т.н. руководителем группы цифровых решений Журавлевым А.М. Замечания: 1. Автор диссертации использует разные термины: вид, способ и алгоритм коммутации, что несколько затрудняет восприятие диссертационной работы. 2. В одном из выводов автор пишет, что ток отличается на 0,03 А, а момент на 0,001, значения указаны в абсолютных единицах, что не позволяет провести оценку с точки зрения количественного показателя. 3. Почему в практическую значимость работы не вынесены разработанные модели? 4. В третьей главе проведены исследования на аналитических моделях, в том числе исследования модели с индуктивностью фазной обмотки равной нулю, можно ли опираться на выводы, полученные на этой модели? 5. Почему не рассматривались тормозные режимы в диссертации?

8. ФГБОУ ВО «МТГУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, ведущей организации, отзыв составлен и подписан к.т.н., доцентом, зав. кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники Николаевым А.А. Замечания: 1. В тексте диссертации не приведено сравнение систем управления с точки зрения стоимости. Для обоснования целесообразности исследования ДК было бы желательно провести оценку стоимости реализации. 2. Развитие ДК начало еще в середине прошлого века, для обоснования актуальности было бы полезно привести сравнение ВЭП с ДК и электропривода с ВУ аналогичной мощности, чтобы показать конкурентное преимущество ВЭП с ДК. 3. Благодаря чему удалось повышение энергетических показателей, расширение рабочего диапазона и улучшение выходных характеристик ВЭП на основе СДПМ с ДК обмотки? 4. Как отражается в разработанной математической

модели для определения профессионального риска изменение условий труда, например, при замене используемого оборудования? 5. Расхождение результатов моделирования универсальной модели и экспериментального исследования достигли 14% с чем это связано и возможно ли уменьшить расхождения в дальнейшем?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается публикациями авторов по заданной тематике. За последние 5 лет имеются публикации: д-ра техн. наук, доцента Хакимьянова М.И. – 5 публикаций в изданиях из перечня ВАК, 4 публикации в изданиях, индексируемых в Scopus; канд. техн. наук Журавлева А.М. – 3 публикации в изданиях из перечня ВАК, 2 публикации в изданиях, индексируемых в Scopus; ведущая организация – 10 публикаций в изданиях из перечня ВАК. Сотрудниками ведущей организации являются ученые и специалисты, научная деятельность которых проходит в области электротехнических комплексов и систем: к.т.н., доцент Николаев А.А., д-р техн. наук, доцент Омельченко Е.Я., д-р техн. наук, доцент Петушков М. Ю., д-р техн. наук, доцент Корнилов Г. П.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработана** обобщенная модель, включающая упрощенную линейную модель, полевою электромагнитную модель и универсальную линейную модель вентильного электропривода с дискретной коммутацией обмотки, которая позволяет рассчитать характеристики и параметры вентильного электропривода с учётом различных алгоритмов коммутации, реальной формы ЭДС и индуктивности обмотки на различных этапах проектирования;

**предложены и обоснованы** рекомендации по выбору алгоритмов коммутации в зависимости от требований, предъявляемых к вентильному электроприводу на основании результатов исследований рабочих и энергетических характеристик:

- 120-градусной коммутация используется в случае необходимости получения максимального КПД привода, что обусловлено нахождением каждого рабочего интервала фазной обмотки на вершине её ЭДС;

- 180-градусная коммутация применяется в случае необходимости расширения рабочего диапазона, что обусловлено приближением электромагнитных процессов в фазной обмотке к процессам при синусоидальном питании, где возможность расширения рабочего диапазона характеристик за счёт изменения угла коммутации доказана;

- 150-градусная коммутация для случая необходимости получения минимальных пульсаций момента в приводе, что обусловлено уменьшением длительности межкоммутационного интервала.

**доказана** эффективность применения метода фазового векторного регулирования для расширения рабочего диапазона механических координат вентильного электропривода при различных алгоритмах коммутации обмотки;

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

**доказана** на основании результатов расчетных и экспериментальных исследований адекватность разработанной универсальной линейной модели электропривода с дискретной коммутацией обмотки;

**применительно к проблематике диссертации результативно использованы** основные положения теории электромеханического преобразования энергии и теории электропривода, а также методы расчёта электромагнитных цепей, метод конечных элементов, методы математического моделирования систем на ЭВМ, методы экспериментального исследования;

**изложена** методика и приведены результаты сравнительной оценки не только двух наиболее распространенных алгоритмов 120-градусной и 180- градусной коммутации обмотки синхронного двигателя с постоянными магнитами, но и относительно слабо изученной 150-градусной коммутации, с точки зрения вида рабочих характеристик, энергетических показателей и пульсаций момента;

**раскрыты** особенности, влияния высших гармоник ЭДС вращения на рабочие характеристики и энергетические показатели вентильного электропривода;

**изучено** влияние относительной индуктивности обмотки с учётом несинусоидальности ЭДС на рабочие и энергетические характеристики вентильного электропривода с дискретной коммутацией обмотки;

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

**разработаны и внедрены** математическое описание, универсальная линейная модель и полевая модель, используемые для расчета при проектировании электропривода и для анализа характеристик уже спроектированного привода при нагрузках, не превышающие номинально значение на предприятиях ООО «МЭЛС», ООО «Станкомаш» и АО «Кургандормаш» (подтверждается справками о внедрении). Материалы диссертационного исследования также используются в учебном процессе кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» при изучении дисциплины

«Системы автоматизированного проектирования», что подтверждено соответствующей справкой;

**создана** математическая модель, которая снижает трудоёмкость процесса анализа компоновки вентильного электропривода, с учетом различных алгоритмов коммутации, реальной формы ЭДС и индуктивности обмотки;

**определены** практические способы повышения энергетических показателей и расширения рабочего диапазона электроприводов с дискретной коммутацией СДПМ;

**представленная** в диссертации универсальная математическая модель позволяет определять параметра привода на эскизном и техническом этапе разработки электропривода.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

**для экспериментальных работ** результаты получены с помощью сертифицированного оборудования и показана повторяемость результатов исследований в различных условиях;

**теория построена** на известных проверяемых результатах, в том числе для электромагнитных процессов, протекающих в синхронных машинах с постоянными магнитами, и согласуется с опубликованными данными, представленными в работах российских и зарубежных ученых;

**использованы** современные компьютерные программы математического моделирования;

**установлено** качественное и количественное совпадение результатов математического моделирования и экспериментальных испытаний вентильного электропривода с разными алгоритмами дискретной коммутации.

**Личный вклад соискателя состоит в:** постановке и обосновании задач исследования, разработке математического описания вентильного электропривода с дискретной коммутацией обмотки, разработке универсальной линейной математической модели, позволяющей рассчитать характеристики и параметры привода с учётом различных алгоритмов коммутации, реальной формы ЭДС и индуктивности обмотки. Все результаты, приведенные в диссертации, получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. Для чего и с какой целью выполнялась работа, поскольку большое число работ выполнено по данному направлению. Насколько актуально применение вентильного электропривода с дискретной коммутацией?

2. Поясните преимущества универсальной математической модели над полевой модели, разработанной в Ansys.

3. В чем особенность системы уравнений, которая была взята за основу при разработке универсальной линейной модели?

Соискатель Кулёва Н.Ю. ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы и привела собственную аргументацию:

1. Используемые ранее методы исследования не позволяли провести анализ и синтез различных алгоритмов коммутации. Применение вентильного электропривода с дискретной коммутацией, находит широкое применение. Например, производители беспилотных летательных аппаратов, самокатов, электромобилей отдают предпочтение вентильному электроприводу с дискретной коммутацией обмотки.

2. Универсальная линейная модель разработана в свободно распространяемом программном комплексе, который не требует значительных вычислительных ресурсов компьютерного оборудования. Кроме того адекватность линейной модели подтверждена экспериментальными исследованиями, следовательно, она может быть использована для решения практических задач.

3. Отличительной особенностью системы уравнений, которая была взята за основу при разработке универсальной линейной модели, является то, что полученные уравнения описывают физические и коммутационные процессы в вентильном электроприводе с различными алгоритмами дискретной коммутацией обмотки, учитывают индуктивность обмотки и реальную форму ЭДС.

На заседании 24 декабря 2024 г. диссертационный совет принял решение: за новое решение научной задачи повышение энергетических показателей, расширения рабочего базы основе синхронного двигателя с постоянными магнитами с дискретной коммутацией обмотки, присудить Кулёвой Н.Ю. учёную степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 8 человек, из них 5 – докторов наук по научной специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы, участвовавших в заседании, из 11 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту НЕТ человек, проголосовали: за – 8, против – НЕТ, недействительных бюллетеней – НЕТ.

Председатель  
диссертационного совета

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
24.12.2024 г.



Коржов Антон Вениаминович

Григорьев Максим Анатольевич