

## ОТЗЫВ

официального оппонента по диссертационной работе Кулёвой Надежды Юрьевны «Разработка математических моделей и анализ рабочих характеристик вентильных электроприводов с дискретной коммутацией обмотки», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы.

### 1. Актуальность работы

В настоящее время во всем мире наблюдается активное развитие электротранспорта, которое обуславливает потребность в разработке новых электроприводов, обладающих повышенными характеристиками эффективности и надежности. Объектом исследования диссертационной работы является вентильный электропривод (ВЭП) на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) с дискретной коммутацией обмотки (ДК), который должен обеспечивать высокий крутящий момент или тяговое усилие в широком диапазоне скоростей и обладать высокой энергоэффективностью. Кроме того, ВЭП на основе СДПМ с ДК трёхфазной обмотки нашел свое применение в системах управления летательных и космических аппаратов, в промышленном оборудовании, в электроприводе насосов, в медицинском оборудовании, в тяговых приводах воздушных, водных и автономных транспортных средств.

В связи с этим можно отметить, что диссертация Кулёвой Надежды Юрьевны, направленная на повышение энергетических показателей, расширение рабочего диапазона и улучшение выходных характеристик ВЭП на основе СДПМ с ДК обмотки выполнена на актуальную тему.

### 2. Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 110 наименований. Диссертация изложена на 160 страницах и содержит 147 страниц основного текста, 120 иллюстраций, 18 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены цель, задачи и методы исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость, основные научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ ВЭП с точки зрения реализации и анализ наиболее часто используемых систем управления. Проведен обзор литературных источников и обоснована причина отсутствия адекватной универсальной модели ВЭП с ДК, позволяющей учитывать коммутационные процессы, различные алгоритмы ДК и реальную форму ЭДС.

**Во второй главе** проведен анализ дискретных коммутационных процессов и получено полное математическое описание ВЭП для различных алгоритмов ДК. Математическое описание учитывает коммутацию ключей полупроводникового преобразователя, реальную форму ЭДС и индуктивность фазных обмоток. Показана универсальная линейная модель, построенная на базе полученного ранее математического описания ВЭП. Подтверждена адекватность универсальной модели.

**В третьей главе** проведено исследование возможности увеличения скоростного диапазона и увеличения электромагнитного КПД на аналитической модели ВЭП. Представлены рекомендации по выбору алгоритма ДК для практического применения при проектировании ВЭП.

Представлены результаты исследования влияния угла коммутации на характеристики ВЭП с различными алгоритмами ДК. Доказано, что при 120-градусной коммутации для обеспечения высокого электромагнитного момента и КПД, а также требуемого диапазона регулирования скорости оптимальной является нейтральная коммутация. А при 180-градусной коммутации угол коммутации является инструментом позволяющим регулировать и электромагнитный КПД, и механические координаты.

Проведено исследование влияния высших гармоник ЭДС на характеристики ВЭП. Показано, что увеличение второй гармоники способствует увеличению КПД до 8%, но при этом в 2 раза увеличиваются пульсации момента.

**В четвертой главе** проведена оценка адекватности универсальной модели с помощью полевой модели, для чего была разработана полевая модель в программном комплексе ANSYS Electronics Desktop. Подтверждена адекватность универсальной модели.

Проведённые экспериментальные исследования **в пятой главе** стали завершающим этапом обоснования возможности применения универсальной линейной модели на этапах эскизного и технического проекта при проектировании ВЭП.

**В заключении** сформулированы три вывода по результатам исследований и рекомендации по использованию результатов.

### **3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Автор выносит на защиту четыре научных положения, которые отражают задачи исследования и поставленную цель работы: повышение энергетических показателей, расширение рабочего диапазона и улучшение выходных характеристик ВЭП на основе СДПМ с ДК обмотки.

Автором в достаточной мере обоснованы научные положения, выводы и рекомендации, которые подтверждаются удовлетворительным для инженерной методики совпадением основных результатов аналитических расчётов, моделирования и экспериментальных данных, полученных на универсальном стенде, аргументированностью исходных положений, вытекающих из основ электротехники, и корректным использованием теории.

Автором разработана универсальная линейная модель ВЭП с ДК, которая позволяет рассчитывать характеристики и параметры привода с учётом различных алгоритмов коммутации, реальной формы ЭДС и индуктивности обмотки.

Автором проведен анализ рабочих и энергетических характеристик ВЭП с ДК для различных алгоритмов коммутации, на основе которого сформулированы рекомендации по выбору алгоритма ДК.

Проведено детальное исследование влияния несинусоидальности ЭДС вращения двигателя на его рабочие и энергетические характеристики.

Особенно следует отметить, что автор разработал и использует для обоснования научных выводов три различных модели - упрощенную аналитическую модель в виде уравнений для расчёта момента, мощности и КПД,

универсальную линейную модель в виде дифференциальных уравнений и коммутационных функций, учитывающую коммутационные процессы в обмотке и полевою модель, учитывающую реальные электромагнитные процессы в железе и зазоре электрической машины. Сравнение результатов, полученных при расчётах на всех перечисленных моделях, подтверждает правильность сформулированных научных положений.

Кроме того, проведенные экспериментальные исследования подтвердили, возможность использования универсальной линейной модели ВЭП с ДК на этапе эскизного и технического проекта при разработке электропривода.

Основные научные положения, сформулированные в диссертационной работе и выносимые на защиту, в целом раскрыты и доказаны, а представленные выводы и рекомендации адекватно отражают суть представленных научных исследований.

#### **4. Достоверность и научная новизна полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

В диссертационной работе отражен ряд научных достижений автора. Наиболее значимыми являются следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

- разработана универсальная линейная математическая модель ВЭП с ДК, позволяющая исследовать влияние способа коммутации и формы ЭДС на характеристики привода при дискретной коммутации;

- проведено детальное исследование влияния формы ЭДС двигателя на выходные характеристики привода;

- дана оценка эффективности применения метода фазового регулирования для расширения рабочего диапазона механических координат привода.

Сформулированные в диссертации научные результаты исследованы с достаточной глубиной проработки.

Достоверность выносимых на защиту положений и полученных в работе результатов подтверждается:

- корректным применением основных положений теории электромагнитного преобразования энергии, теории расчета электрических цепей, теории электропривода, методами математического моделирования систем на ЭВМ, методами экспериментального исследования;

- удовлетворительным для инженерной методики совпадением основных результатов моделирования математических моделей и экспериментальных данных, полученных на универсальном стенде, аргументированностью исходных положений.

Практическая и научная ценность представленной к рассмотрению работы не вызывает сомнений. Выявленные автором зависимости и разработанная на их основе универсальная линейная математическая модель ВЭП с ДК позволяет проводить анализ компоновки на этапе эскизного и технического проекта при разработке электропривода.

Результаты диссертационной работы используются ООО «Мэлс», ООО «Станкомаш» и в работе предприятия по производству коммунальных машин АО «Кургандормаш».

Основные результаты обсуждались и получили одобрение на шести научных конференциях, из которых четыре являются международными.

Таким образом, подтверждаются логическая последовательность выполнения работы, достоверность и научная новизна разработанных решений, полученных результатов, выводов и рекомендаций.

## **5. Замечания по диссертационной работе и дискуссионные положения**

По диссертации имеются следующие замечания и дискуссионные положения:

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 вызвано наличие значительной шумовой составляющей 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...»

6. В работе производится моделирование в программах VisSim и ANSYS. Полученные зависимости имеют схожий характер. Было бы более наглядно, если бы автор произвел наложение полученных в разных системах моделирования кривых на одних графиках.

## **6. Заключение о соответствии диссертационной работы критериям Положения о присуждении ученых степеней**

Считаю, что несмотря на приведенные замечания, диссертация Кулёвой Надежды Юрьевны является законченной научно-квалификационной работой, обладающей признаками актуальности, новизны и практической значимости. В ней изложены новые научно обоснованные технические решения по повышению энергетических показателей, расширению рабочего диапазона и улучшению выходных характеристик ВЭП на основе СДПМ с ДК обмотки.

Анализ диссертационной работы в целом позволяет сделать вывод о том, что содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы. Автореферат диссертации правильно и полно отражает ее содержание.

Диссертационная работа «Разработка математических моделей и анализ рабочих характеристик вентильных электроприводов с дискретной коммутацией обмотки» удовлетворяет требованиям, предъявляемым к научно-квалификационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук согласно п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 №842, ред. от 16.10.2024), а ее автор Кулёва Надежда Юрьевна заслуживает присуждения ученой

степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент  
д-р. техн. наук, доцент,  
заведующий кафедрой электротехники  
и электрооборудования предприятий  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»

*M. Ibragimov*  
28.11.2024

Хакимьянов Марат Ильгизович

Адрес: 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1 тел.: (347) 2420759;  
e-mail: joss-22@yandex.ru

Докторская диссертация Хакимьянова М.И. защищена по специальности 05.09.03 –  
Электротехнические комплексы и системы.

Подпись Хакимьянова М.И. заверяю  
проректор по научной  
и инновационной работе,  
доктор технических наук, профессор



И. Г. Ибрагимов