

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по научной и инновационной работе

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

д-р техн. наук, профессор

О.Н. Тулупов

« 05 » 12 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Кулёвой Надежды Юрьевны

«Разработка математических моделей и анализ рабочих характеристик вентильных электроприводов с дискретной коммутацией обмотки», представленную на соискание ученой степени кандидата отрасли наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Актуальность темы работы

Синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) широко и эффективно используются в составе электроприводов с обратной связью по положению ротора. При этом возможно плавное вращение поля статора двигателя, когда фазные напряжения и токи изменяются по синусоидальному закону или дискретное переключение обмоток с помощью полупроводникового коммутатора (ПК) по сигналам обратной связи датчика положения ротора (ДПР). Электропривод, где СДПМ управляется путем дискретного переключения обмоток или дискретной коммутацией (ДК), называют вентильными электроприводом (ВЭП). В случае ВЭП отсутствуют высокие требования к форме ЭДС. Также для ВЭП может быть использован дискретный датчик углового положения ротора с разрешающей способностью 30 или 60 эл. градусов. В этом случае нет необходимости в использовании датчика тока, а управление обмотки с использованием простейших алгоритмов может быть реализовано даже на жёсткой логике.

Недостатком существующих способов управления ВЭП на базе СДПМ является наличие пульсаций момента, дискретный характер электромагнитных процессов и, как следствие, сложность применения в высокоточных приводах следящих систем. Между тем, имеется ряд электроприводов, где перечисленные недостатки оказываются несущественными - это тяговые электроприводы наземных, водных и воздушных транспортных средств, электроприводы некоторых подъёмных механизмов, транспортёров, насосов, вентиляторов и др. Следует отметить, что СДПМ с зубчатой конструкцией статора, являющейся наиболее технологичной и дешёвой, имеет, как правило, несинусоидальную форму ЭДС, близкую к трапецеидальной. В случае применения алгоритмов управления двигателем, нечувствительных к форме ЭДС, конструктивная реализация двигателя упрощается. По этой причине использование таких двигателей в ВЭП оказывается весьма

рациональным. Накоплен большой опыт использования таких двигателей, хорошо разработана их теория. Таким образом, несмотря на широкое применение ВЭП с СДПМ, имеется ряд вопросов, которые до настоящего времени или не рассматривались, или рассмотрены недостаточно. В частности, не проведена сравнительная оценка возможных способов или алгоритмов ДК обмотки ВЭП с точки зрения качества выходных характеристик и энергетических показателей, абсолютно не рассмотрена возможность фазового векторного управления (ФВУ) и других способов расширения диапазона реализуемых механических координат приводов с этими двигателями. Кроме того, все предыдущие теоретические исследования предполагали синусоидальную форму ЭДС двигателя, хотя, как отмечалось, в реальных двигателях она не синусоидальна. Очевидно, что без решения перечисленных вопросов невозможно эффективное и обоснованное применение электроприводов указанного типа, поэтому представленная диссертационная работа Кулевой Н.Ю. является актуальной.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Объем диссертации составляет 160 страниц, список литературы содержит 110 наименований.

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

В первой главе выполнен анализ существующих методов реализации ВЭП. Проведен анализ систем управления ВЭП. Проведен анализ способов исследования электромагнитных процессов ВЭП с ДК. Отмечено, что ВЭП с ДК мощностью до 10 кВт имеют широкую область применения, могут работать с несинусоидальной формой ЭДС, кроме того, реализация ВЭП с ДК мощностью до 10 кВт возможна на отечественной элементной базе. Обосновывается положение, согласно которому ни один из известных подходов не позволяет построить универсальную модель ВЭП с ДК, которая бы одинаково достоверно отражала процессы внутри одного межкоммутационного интервала, давала удобные для анализа характеристики интегральные соотношения, позволяла решить задачи анализа и синтеза ВЭП с учетом несинусоидальной формы ЭДС. На основе проведенного анализа сформулированы цель и основные задачи исследования.

Во второй главе выполнен анализ дискретных коммутационных процессов ВЭП с ДК для различных алгоритмов коммутации. Обосновывается математическое описание физических процессов ВЭП с ДК. Обосновывается система уравнений, описывающая ЭДС несинусоидальной формы, где описание ЭДС ограничивается первыми тремя гармониками. Показана система уравнений для определения потокосцепления фаз, электромагнитного момента, система уравнений механики электропривода. В результате анализа дискретных коммутационных процессов получено уравнение для определения тока статорной обмотки, учитывающее коммутацию ключей полупроводникового преобразователя ВЭП и справедливо для различных алгоритмов ДК.

На основании полученных выражений составлена универсальная линейная модель ВЭП с ДК, позволяющая рассчитывать характеристики и параметры привода с учётом различных алгоритмов коммутации, реальной формы ЭДС и индуктивности обмотки.

В заключительной части главы проведена оценка адекватности универсальной линейной модели ВЭП путем сравнения результатов моделирования СДПМ ДВМ100.22 с его паспортными данными. Установлено, что отличия результатов моделирования от паспортных данных не превышают 5%. Таким образом, подтверждена адекватность модели.

В третьей главе проведен анализ возможности и эффективности расширения рабочего диапазона механических координат и повышения энергетических показателей при различных способах организации питания статорной обмотки ВЭП. На основе аналитической модели проведена сравнительная оценка выходных характеристик ВЭП при различных способах организации питания. В результате исследования рабочих и энергетических характеристик ВЭП с ДК с различными алгоритмами коммутации, сформулированы рекомендации по выбору алгоритма коммутации в зависимости от требований, предъявляемых к ВЭП.

Проведено исследование возможности увеличения максимального электромагнитного момента и энергетических показателей ВЭП при нулевой и ненулевой индуктивности СДПМ при различных способах организации питания ВЭП. Обоснована целесообразность применения режима ФВУ для различных алгоритмов ДК. Для 120-градусной коммутации максимальный из всех способов КПД обеспечивается при нейтральной коммутации ($\theta = 0$), а изменение θ ведёт к существенному уменьшению КПД без расширения диапазона рабочих координат. Для 180-градусной коммутации и при больших значениях относительной индуктивности обмотки режим ФВУ весьма эффективен и позволяет расширить диапазон механических координат и повысить КПД.

Проведено исследование влияния высших гармоник ЭДС на возможности расширения рабочего диапазона механических координат и повышения энергетических показателей ВЭП. В результате обосновано, что наличие второй гармоники способствует повышению КПД до 8% для 120- и до 4% для 150-градусной ДК. Также наличие второй гармоники повышает пульсации момента более чем в 2 раза для всех алгоритмов коммутации. Обосновано, что ДК нечувствительна к наличию третьей гармоники.

В четвертой главе проведено качественное и количественное исследование коммутационных процессов ВЭП с ДК на полевой модели с точки зрения возможности управления и качества выходных характеристик с учетом процессов электромагнитного преобразования энергии. Разработана полевая модель ВЭП с ДК на основе СДПМ ДВМ100.22 в программном комплексе ANSYS Electronics Desktop. Анализ результатов моделирования полевой модели показал, что они отражают приведенные в паспорте значения параметров с точностью не менее 3%.

Проведено сравнение результатов моделирования с использованием универсальной линейной модели и полевой модели. Среднее значение тока фазы отличается менее чем на

0,03 А, среднее значение электромагнитного момента отличается менее чем на 0,06 Нм, электромагнитный КПД отличается менее чем на 1%, сравнение величины пульсаций показало разницу в 4%. Расхождение количественных результатов объясняется тем, что полевая модель позволяет оценить распределение магнитной индукции в воздушном зазоре, благодаря чему выходные характеристики можно оценить с высокой точностью.

Отмечено преимущество использования универсальной линейной модели, которая разработана в программном комплексе VisSim, который свободно распространяется. Полевая модель разработана в программном комплексе, требующем значительные вычислительные ресурсы и лицензионный доступ. Таким образом, обоснована рекомендация по использованию универсальной линейной модели для оценки характеристик ВЭП с ДК для разных алгоритмов коммутации.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований. Проведено экспериментальное исследования при условии, что значение скорости вращения на валу двигателя такие же, как и при моделировании на универсальной линейной модели. Результаты анализа показывают, что расхождение результатов моделирования и аналитического исследования экспериментальных данных для тока фазы «А» не превышают 11%, для механической характеристики не превышают 4,16%, для электромагнитного КПД не превышают 14,28%. Обоснована причина расхождения результатов: универсальная модель не позволяет оценить распределение магнитной индукции в воздушном зазоре, что непосредственно влияет на количественную оценку тока, и, следовательно, электромагнитного момента и электромагнитного КПД. Также причиной расхождения являются постоянные потери в ПК, которые не учитываются в модели.

Обоснована рекомендация по применению универсальной линейной модели, основанная на полном качественном совпадении результатов моделирования и незначительном количественном расхождении.

Заключение содержит три общих вывода, отражающих новизну работы и полученные результаты.

Теоретическая и практическая значимость

1. Сформулированы практические рекомендации по выбору и использованию способа ДК ВЭП, достоверность которых подтверждается результатами моделирования электромагнитных процессов ВЭП.

2. Оценено влияние высших гармоник на рабочие характеристики и энергетические показатели ВЭП.

3. Дана сравнительная оценка различных способов дискретной коммутации обмотки СДПМ- 120-градусной, 180-градусной, и слабо изученной 150-градусной коммутации, с точки зрения вида рабочих характеристик, энергетических показателей и пульсаций момента.

4. Разработанные модели ВЭП с СДПМ (универсальная линейная и полевая), позволяющие рассчитывать ожидаемые рабочие характеристики привода на предварительном этапе проектирования, а также исследовать рабочие процессы спроектированного привода в режимах, близких к номинальному и при перегрузках.

Результаты диссертации могут быть использованы на профильных предприятиях по производству перспективных электроприводов на базе ВЭП с СДПМ с ДК, а также на промышленных предприятиях, где применяются ВЭП с СДПМ с ДК в составе тяговых электроприводов, электроприводов подъёмных механизмов, транспортёров, насосов, вентиляторов и т.д.

Вопросы и замечания по тексту диссертации

1. В тексте диссертации не приведено сравнение стоимости существующих и усовершенствованных систем управления ВЭП. Для обоснования целесообразности исследования ДК было бы полезно провести оценку стоимости реализации.

2. Развитие ДК происходило 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 обеспечить повышение энергетических показателей, расширение рабочего диапазона и улучшение выходных характеристик ВЭП на основе СДПМ с ДК обмотки?

4. Расхождение результатов математического моделирования на разработанной модели ВЭП и экспериментальных исследования составляет более 10% (глава 4, табл. 4.3). Чем обусловлена повышенная величина расхождения и возможно ли уменьшить ее значение за счет дальнейшего совершенствования компьютерной модели ВЭП с СДПМ?

Приведенные замечания носят дискуссионный характер и не снижают научный уровень диссертации, а также значимость полученных в ней результатов.

Выводы о полноте опубликования и апробации результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 6 конференциях и семинарах. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе: 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 3 статьи в изданиях, индексируемых наукометрической системой Scopus. Получен 1 патент РФ на изобретение, а также 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Автореферат диссертации правильно отражает ее основное содержание, научную новизну, выводы и другие ключевые моменты.

Заключение

Диссертационная работа Кулёвой Н.Ю. «Разработка математических моделей и анализ рабочих характеристик вентильных электроприводов с дискретной коммутацией

обмотки» является законченным научным исследованием. В работе представлены результаты, обладающие научной новизной, теоретической и практической значимостью. Диссертационная работа 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» (постановление Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г. в редакции от 25.01.2024), а её автор, Кулёва Надежда Юрьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Диссертационная работа заслушана и обсуждена на заседании кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» протокол № 3 от 19.11.2024 г.

Заведующий кафедрой
автоматизированного электропривода
и мехатроники
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
канд. техн. наук, доцент

 А.А. Николаев



Сведения об организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»
455000, Челябинская область, г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38. Телефон: +7 (3519) 29-84-02, e-mail: mgtu@mgtu.ru