

*На правах рукописи*



**КУЛЁВА Надежда Юрьевна**

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АНАЛИЗ  
РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ  
С ДИСКРЕТНОЙ КОММУТАЦИЕЙ ОБМОТКИ**

Специальность 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2024

Работа выполнена на кафедре «Электропривод, мехатроника и электромеханика» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель –

**Воронин Сергей Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, научный сотрудник Управления научной и инновационной деятельности ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Официальные оппоненты:

**Хакимьянов Марат Ильгизович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (ФГБОУ ВО «УГНТУ»), г.Уфа;

**Журавлев Артем Михайлович**, кандидат технических наук, руководитель группы цифровых решений АО «ДКС», г. Москва.

Ведущая организация –

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»), г. Магнитогорск.

Защита состоится 24 декабря 2024 г., в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.437.14 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1007.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на официальном сайте ЮУрГУ по адресу: <https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243714/kulyova-nadezhda-yurevna>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76, гл. корпус, Учёный совет ЮУрГУ, тел./факс: +7 (351)-272-30-30, доб. 7, e-mail: [grigorevma@susu.ru](mailto:grigorevma@susu.ru)

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.437.14  
д-р техн. наук, профессор



М.А. Григорьев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) наиболее эффективно используются в составе электропривода 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). Первый способ формирования поля получил наиболее широкое распространение и используется во многих случаях, когда требуется отсутствие пульсаций момента, высокая плавность вращения, точность позиционирования и широкий диапазон регулирования. В случае использования классического векторного управления (ВУ) двигателем его недостатком является относительная сложность реализации, предполагающая синусоидальную форму фазных ЭДС, наличие датчика углового положения ротора относительно статора с высокой разрешающей способностью для точного формирования синусоидальных фазных токов и наличие датчиков для измерения этих токов. Кроме того, необходимо использование быстродействующих стандартных, как правило, импортных контроллеров для многократного преобразования информации при формировании токов.

Электропривод, где СДПМ управляется путем дискретного переключения обмоток или дискретной коммутацией (ДК), называют вентильными электроприводом (ВЭП). Такое управление реализуется значительно проще и не так чувствительно к форме ЭДС. Здесь может быть использован дискретный датчик углового положения ротора с разрешающей способностью 30 или 60 электрических градусов, нет необходимости в использовании датчика тока, а управление обмотки с использованием простейших алгоритмов может быть реализовано даже на жёсткой логике. Их недостатком 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 электроприводы относительно небольшой мощности, в пределах десятков кВт, например, 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. Это обусловлено тем, что магнитная индукция поля, создаваемого постоянным магнитом, имеет примерно постоянное значение на всём полюсном делении, и для того, чтобы получить синусоидальную ЭДС приходится использовать специальную обмотку с

укороченным шагом. В случае применения алгоритмов управления двигателем, нечувствительных к форме ЭДС, конструктивная реализация двигателя упрощается, так как обмотку в этом случае можно мотать на зубец. Поэтому использование таких двигателей в ВЭП оказывается весьма рациональным. Накоплен большой опыт использования таких двигателей, хорошо разработана их теория.

Однако несмотря на то, что приводы подобного типа разработаны и широко применяются ещё с середины прошлого века, 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 решение их и составляет основу данной диссертационной работы.

**Степень научной разработанности проблемы.** Наибольший вклад в развитие теории и практики ВЭП на основе вентильных двигателей с ДК внесли следующие российские учёные: Вевюрко И.А., Овчинников И.Е., Лебедев Н.И., Лозенко В.Н., Лифанов В.А., Воронин С.Г., Вигриянов П.Г. и зарубежные учёные: Брейлсфорд Н., Хайсерман В. – США, Каварадо Матасаро – Япония, Б. Цаубитцер, Х. Моцала – Германия. В работах этих учёных были описаны особенности электромагнитных процессов в двигателях при различном числе фаз, получены уравнения для электромеханических характеристик по усреднённым значениям координат, разработаны методы электромагнитного расчёта двигателя, а также возможные варианты схем ПК. Но осталось достаточно много нерешённых задач, о которых говорилось выше.

**Целью** диссертационной работы является повышение энергетических показателей, расширение рабочего диапазона и улучшение выходных характеристик ВЭП на основе СДПМ с ДК обмотки.

Для достижения указанной цели необходимо решить ряд научных **задач**:

1. Провести систематизацию возможных способов ДК обмотки для трёхфазных двигателей, дать сравнительную оценку этих способов с точки зрения возможности управления и качества выходных характеристик.

2. Разработать математические модели, позволяющие исследовать влияние способа коммутации и формы ЭДС на характеристики ВЭП при ДК.

3. Оценить влияние несинусоидальности ЭДС двигателя на характеристики ВЭП для различных способов ДК.

4. Оценить возможность и эффективность различных способов расширения рабочего диапазона механических координат привода при ДК.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались основные положения теории электромагнитного преобразования энергии, теории расчета электрических цепей, теории электропривода, методы математического моделирования систем на ЭВМ, методы экспериментального исследования.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается удовлетворительным для инженерной методики совпадением основных результатов моделирования математических моделей и экспериментальных данных, полученных на универсальном стенде, аргументированностью исходных положений, вытекающих из основ электротехники, и корректным использованием теории.

**Научные положения и результаты, выносимые на защиту:**

– универсальная линейная модель ВЭП с ДК позволяет рассчитывать характеристики и параметры привода с учётом различных алгоритмов коммутации, реальной формы ЭДС и индуктивности обмотки;

– результаты исследования рабочих и энергетических характеристик ВЭП с ДК с различными видами коммутации, позволяющие сформулировать рекомендации по выбору вида коммутации в зависимости от требований, предъявляемых к ВЭП;

– результаты исследования влияния высших гармоник ЭДС вращения на характеристики ВЭП;

– результаты расчетных и экспериментальных исследований на универсальном стенде, подтверждающие адекватность разработанной универсальной линейной модели.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Разработана универсальная линейная математическая модель ВЭП с ДК, позволяющая исследовать влияние способа коммутации и формы ЭДС на характеристики привода при дискретной коммутации.

2. Проведено детальное исследование влияния формы ЭДС двигателя на выходные характеристики привода.

3. Дана оценка эффективности применения метода фазового регулирования для расширения рабочего диапазона механических координат привода.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

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 не только двух наиболее распространённых способов дискретной коммутации обмотки СДПМ- 120-градусной, 180-градусной, но и относительно слабо изученной 150-градусной коммутации, с точки зрения вида рабочих характеристик, энергетических показателей и пульсаций момента.

#### **Реализация выводов и рекомендаций работы.**

Разработанное математическое описание, универсальная математическая и полевая модель, а также разработанный универсальный стенд ВЭП с ДК приняты для использования:

– в учебном процессе Южно-Уральского государственного университета на кафедре «Электропривод, мехатроника и электромеханика» при чтении лекций и проведении лабораторных работ по курсу «Системы автоматизированного проектирования»;

– в производстве перспективных электроприводов ООО «Мэлс» и ООО «Станкомаш» и в работе предприятия по производству коммунальных машин АО «Кургандормаш».

**Апробация работы.** В полном объеме работа докладывалась на расширенном заседании кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-Уральского государственного университета.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах, таких как:

– Международная научная конференция «Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития» (г. Челябинск, ЮУрГУ, 3–15 ноября 2018 г);

– Международная научно-техническая конференция "Автоматизация" (г. Адлер, г. Сочи, 9–16 сентября 2018);

– 73 научных конференций профессорско-преподавательского состава ЮУрГУ (г. Челябинск, ЮУрГУ, 20–22 апреля 2021 г.);

– I Всероссийская конференция по электрическим машинам (г. Уфа, 15 декабря – 16 декабря 2022 г.);

– Международная научно-техническая конференция "Пром-Инжиниринг" (г. Сочи, 15–19 мая 2023);

– Международная научно-техническая конференция «Электротехнические комплексы и системы» (г. Магнитогорск, 2023–2024).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 3 патента РФ. Пять печатных работ опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 160 страницах машинописного текста, содержит 120 рисунков, 18 таблиц, список используемой литературы из 110 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**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** проведен анализ существующих методов реализации ВЭП. Приводятся данные по основным функциональным элементам ВЭП и их особенности реализации в зависимости от области применения.

Проведен анализ систем управления ВЭП. Показаны этапы развития систем управления ВЭП, сформулированы особенности, достоинства, недостатки и рекомендации по применению систем управления в зависимости от технических требований электропривода. 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.

Проведен анализ способов исследования электромагнитных процессов ВЭП с ДК. Приводятся достоинства и недостатки основных подходов для исследования электромагнитных процессов. 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 характеристик интегральные соотношения, позволяла решить задачи анализа и синтеза ВЭП с учетом несинусоидальной формы ЭДС. На основе проведенного анализа сформулированы цель и основные задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена анализу дискретных коммутационных процессов ВЭП с ДК для различных алгоритмов коммутации. Обосновывается математическое описание физических процессов ВЭП с ДК.

Обосновывается система уравнений (1), описывающая ЭДС несинусоидальной формы, где описание ЭДС ограничивается первыми тремя гармониками:

$$\begin{cases} e_a(\theta_s) = e_m [a_1 \sin(\theta_s) + a_2 \sin(2\theta_s) + a_3 \sin(3\theta_s)] \\ e_b(\theta_s) = e_m \left[ a_1 \sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) + a_2 \sin\left(2\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) + a_3 \sin\left(3\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ e_c(\theta_s) = e_m \left[ a_1 \sin\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) + a_2 \sin\left(2\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) + a_3 \sin\left(3\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \end{cases} \quad (1)$$

где  $e_m$  – амплитуда ЭДС,  $a_1, a_2, a_3$  – коэффициенты первой, второй и третьей гармоники соответственно,  $\theta_s$  – угол поворота ротора в электрических градусах.

Показана система уравнений (2) для определения потокосцепления фаз. В выражении (2)  $\Psi_m$  – максимальное потокосцепление фазы с учетом потока ротора,  $a_{\psi 1}, a_{\psi 2}, a_{\psi 3}$  – коэффициенты первой, второй и третьей гармоник потокосцепления фазы.

$$\begin{cases} \Psi_a(\theta_3) = \Psi_m [a_{\psi 1} \sin(\theta_3) + a_{\psi 2} \sin(2\theta_3) + a_{\psi 3} \sin(3\theta_3)] \\ \Psi_b(\theta_3) = \Psi_m \left[ a_{\psi 1} \sin\left(\theta_3 - \frac{2\pi}{3}\right) + a_{\psi 2} \sin\left(2\theta_3 - \frac{2\pi}{3}\right) + a_{\psi 3} \sin\left(3\theta_3 - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ \Psi_c(\theta_3) = \Psi_m \left[ a_{\psi 1} \sin\left(\theta_3 + \frac{2\pi}{3}\right) + a_{\psi 2} \sin\left(2\theta_3 + \frac{2\pi}{3}\right) + a_{\psi 3} \sin\left(3\theta_3 + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \end{cases} \quad (2)$$

Показано уравнение (3) для определения электромагнитного момента, как сумма моментов фаз, где  $i_a, i_b, i_c$  – мгновенное значение тока фазы «А», «В» и «С» соответственно.

$$m = \Psi_a(\theta_3) \cdot i_a + \Psi_b(\theta_3) \cdot i_b + \Psi_c(\theta_3) \cdot i_c \quad (3)$$

Показана система уравнений (4) механики электропривода, определяющая механическую часть вентильного двигателя и нагрузки (4):

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (m - M_c) \\ \frac{d\Theta}{dt} = \omega \\ \Theta_3 = p\Theta \end{cases} \quad (4)$$

где  $J$  – приведенный момент инерции вращающихся частей механической системы ВЭП,  $\omega$  – частота вращения,  $m$  – масса вращающихся частей механической системы ВЭП,  $M_c$  – момент нагрузки на валу СДПМ,  $p$  – число пар полюсов вентильного двигателя,  $\theta$  – угол поворота ротора в геометрических градусах.

Проведен анализ дискретных коммутационных процессов ВЭП с ДК для различных алгоритмов коммутации, учитывающее последовательность переключения силовых ключей и обратных диодов для каждого этапа коммутации (рисунок 1).

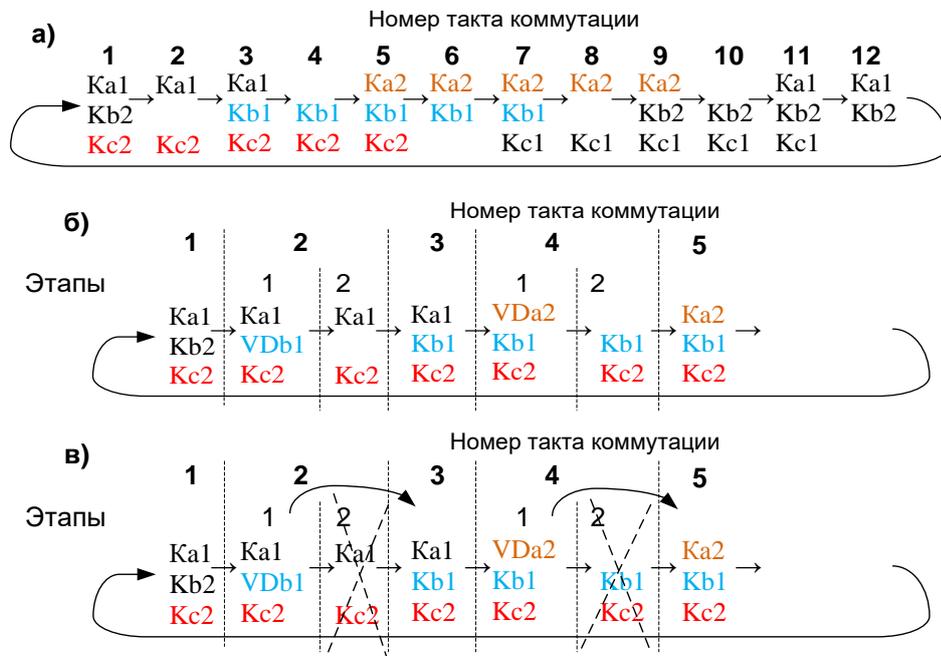


Рисунок 1 – Последовательность переключения силовых ключей при 150-градусной коммутации

В результате анализа дискретных коммутационных процессов получено уравнение (5) для определения тока статорной обмотки ВЭП с ДК:

$$I = \frac{K_U U - K_I R I + K_E E}{[(2 + K_{VD})K_{120} + 3K_{180}]L} \quad (5)$$

где  $R = R_a = R_b = R_c$  и  $L = L_a = L_b = L_c$  – активное сопротивление и индуктивность фаз, соответственно, а  $I$ ,  $E$ ,  $K_U$ ,  $K_I$ ,  $K_E$  – матрицы тока, ЭДС, коэффициентов напряжения, коэффициентов тока и коэффициентов ЭДС соответственно, определяемые как указано ниже:

$$I = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}, K_U = \begin{bmatrix} k_{Ua}K_{120} + K_{180}k_a \\ k_{Ub}K_{120} + K_{180}k_b \\ k_{Uc}K_{120} + K_{180}k_c \end{bmatrix}$$

$$K_I = \begin{bmatrix} (2 + K_{VD})K_{120} + 3K_{180} & 0 & 0 \\ 0 & (2 + K_{VD})K_{120} + 3K_{180} & 0 \\ 0 & 0 & (2 + K_{VD})K_{120} + 3K_{180} \end{bmatrix}$$

$$K_E = \begin{bmatrix} (1 + K_{VD})K_{120} + 2K_{180} & k_{Eb}K_{120} + K_{180} & k_{Ec}K_{120} + K_{180} \\ k_{Ea}K_{120} + K_{180} & (1 + K_{VD})K_{120} + 2K_{180} & k_{Ec}K_{120} + K_{180} \\ k_{Ea}K_{120} + K_{180} & k_{Eb}K_{120} + K_{180} & (1 + K_{VD})K_{120} + 2K_{180} \end{bmatrix}$$

Полученное выражение учитывает 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.

Результаты моделирования универсальной линейной модели ВЭП с ДК (рисунок 2–4) показали, что:

- при 150-градусной коммутации наименьшее значение пульсаций выходных координат, а наибольшее при 180-градусной коммутации;
- при 120-градусной коммутации наибольшее значение электромагнитного момента, а наименьшее при 180-градусной коммутации;
- при 120-градусной коммутации наибольшее значение электромагнитного КПД, а наименьшее при 180-градусной коммутации;
- графики выходных характеристик при 150-градусной коммутации располагаются между графиками выходных характеристик при 120-градусной коммутации и 180-градусной коммутации.

В заключительной части главы проведена оценка адекватности универсальной линейной модели ВЭП путем сравнения результатов моделирования СДПМ ДВМ100.22 с его паспортными данными (таблица 1).

Установлено, что отличия результатов моделирования от паспортных данных не превышают 5%. Таким образом, подтверждена адекватность модели.

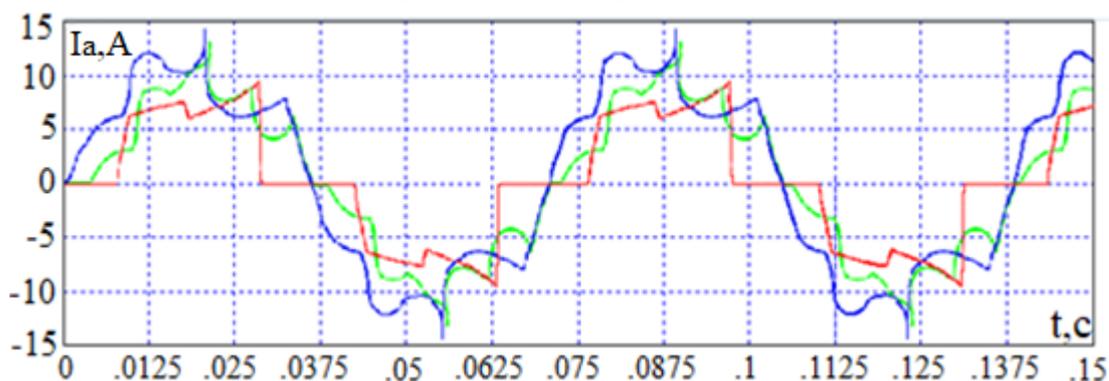


Рисунок 2 – График тока фазы «А» в установившемся режиме для 120 – (красный цвет), 180 – (синий цвет) и 150 – (зеленый цвет) градусной коммутации

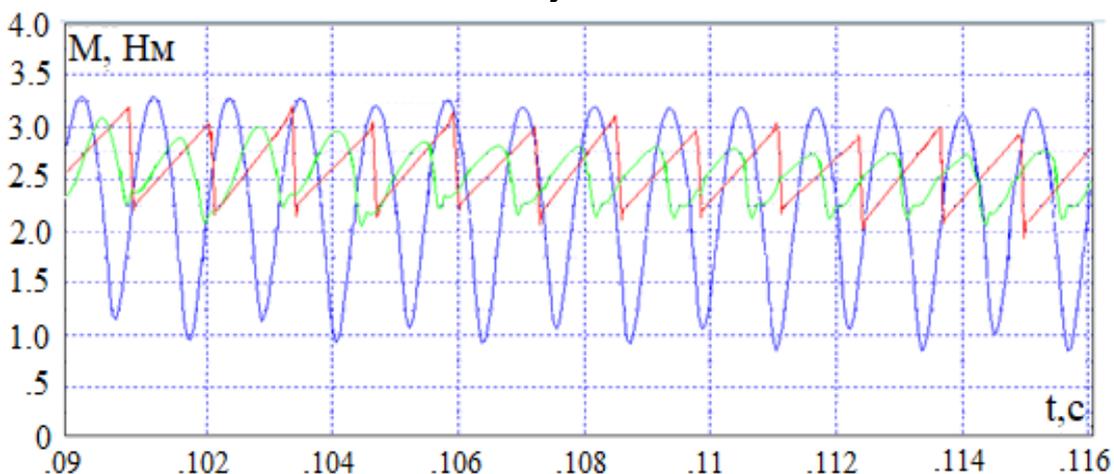


Рисунок 3 – График электромагнитного момента в установившемся режиме для 120 – (красный цвет), 180 – (синий цвет) и 150 – (зеленый цвет) градусной коммутации

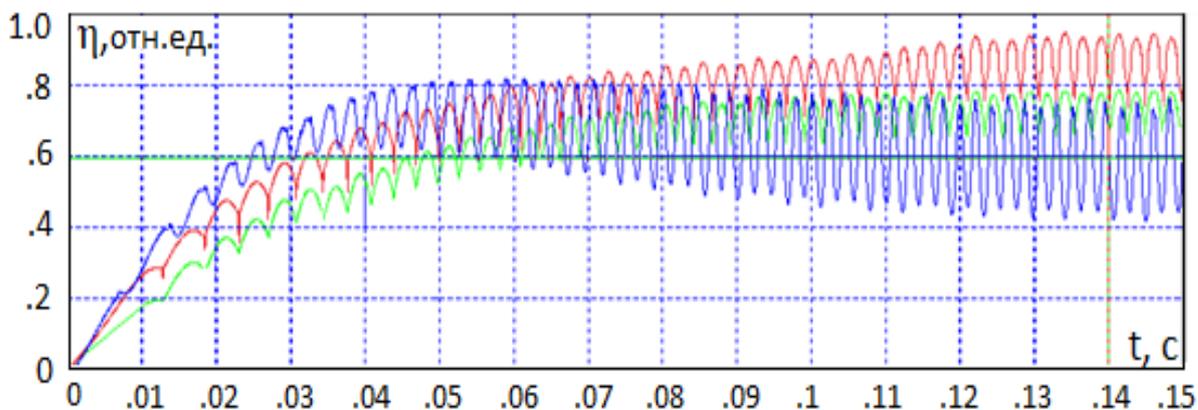


Рисунок 4 – График сравнения электромагнитного КПД для 120 – (красный цвет), 180 – (синий цвет) и 150 – (зеленый цвет) градусной коммутации

Таблица 1. Сравнение результатов моделирования и параметров двигателя

Параметры	Универсальная математическая модель	Паспортные данные
$U_n$ , В	23,9	24
$n$ , об/мин	351,6	350
$I_n$ , А	31,2	32
$I_n$ , А	5,1	5
$M_n$ , Нм	15,3	16
$M_n$ , Нм	2,4	2,5

**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 статорной обмотки, где критериями определены вид механических характеристик, электромагнитный КПД и пульсации электромагнитного момента. 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:

- если требуется обеспечить максимальный электромагнитный КПД и пульсации момента допустимы, рекомендуется использовать дискретную 120-градусную коммутацию;

- если пульсации момента недопустимы, то необходимо использовать синусоидальное питание;

- если имеются ограничения по пульсациям момента на уровне не более 5%, рекомендуется применять двенадцатитактную 150-градусную коммутацию.

Проведено исследование возможности увеличения максимального электромагнитного момента и энергетических показателей ВЭП при нулевой и ненулевой индуктивности СДПМ при различных способах организации питания ВЭП. Исследования подтверждают, сформулированные ранее рекомендации по выбору алгоритма коммутации. Кроме того, обоснована целесообразность применения режима ФВУ для различных алгоритмов ДК. Так для 120-градусной коммутации максимальный из всех способов КПД обеспечивается при нейтральной коммутации ( $\theta=0$ ), изменение  $\theta$  ведёт к существенному уменьшению КПД без расширения диапазона рабочих координат, а в случае 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. Для оценки влияния на характеристики привода каждой высшей гармоники отдельно были проведены

расчёты, где содержание одной из них принимали равным нулю ( $a_2=0$  или  $a_3=0$ ), а амплитуду другой меняли при неизменном относительном значении амплитуды первой гармоники (рисунок 5). 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.

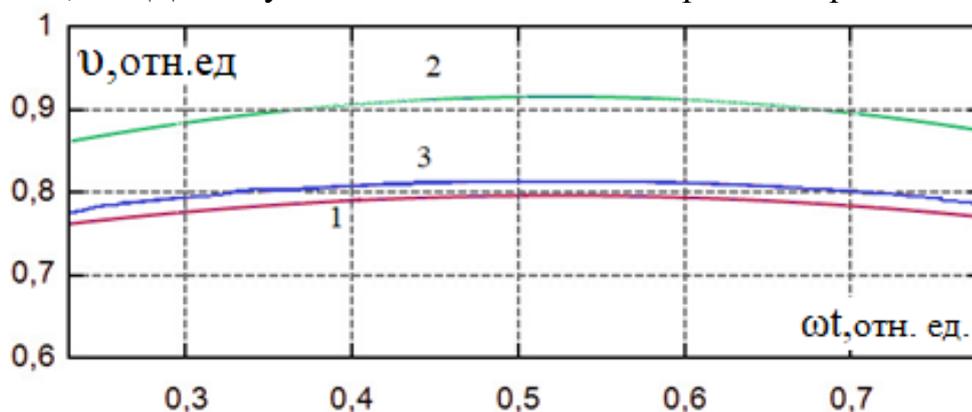


Рисунок 5 – Линейная ЭДС двигателя ДВМ100.22:

( $a_1$  – кривая 1;  $a_2=0,15$ ,  $a_3=0$  – кривая 2;  $a_2=0$ ;  $a_3=0,15$  – кривая 3)

В **четвертой** главе 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 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. Результаты исследования подтверждают выводы, полученные в третьей главе.

Проведено сравнение результатов моделирования с использованием универсальной линейной модели и полевой модели. Среднее значение тока фазы (рисунок 6) отличается менее чем на 0,03 А, среднее значение электромагнитного момента (рисунок 7) отличается менее чем на 0,06 Нм, электромагнитный КПД (рисунок 8) 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.

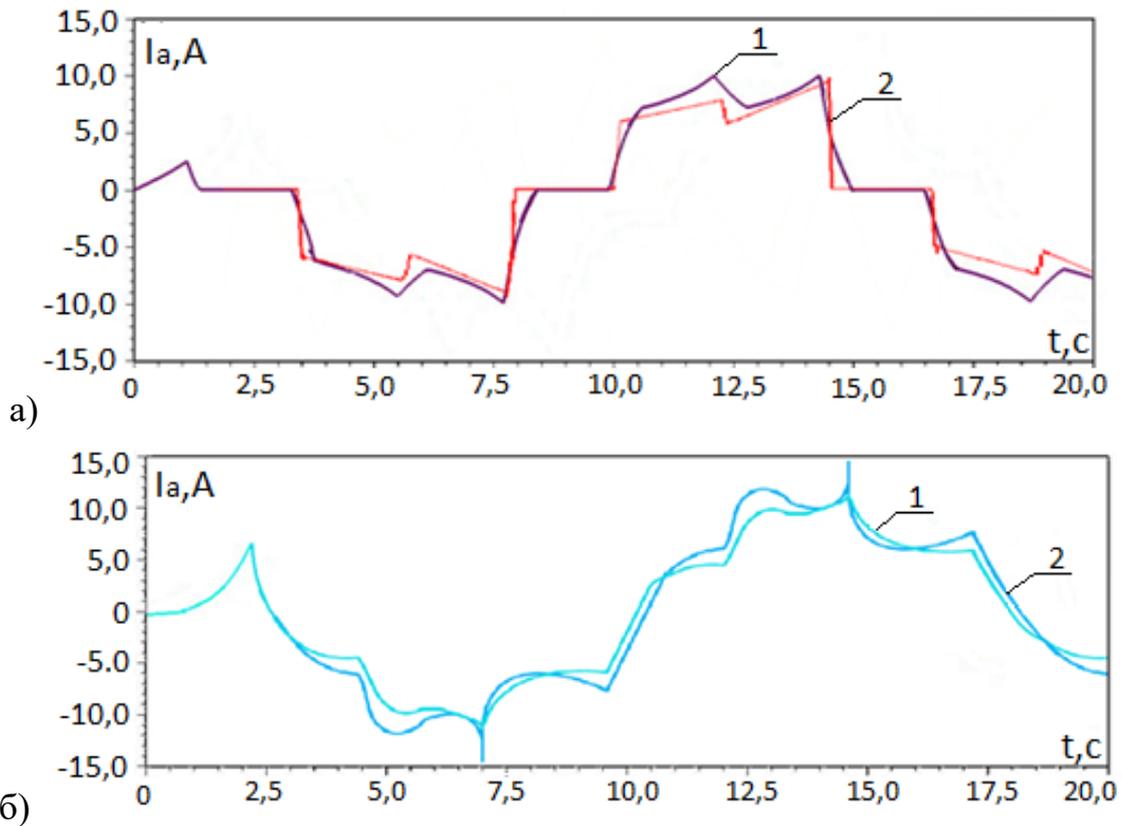


Рисунок 6 – Временная диаграмма сравнения тока фазы СДПМ ВЭП с ДК (1 – полевая модель, 2 – универсальная модель):

а) при 120-градусной коммутации, б) при 180-градусной коммутации

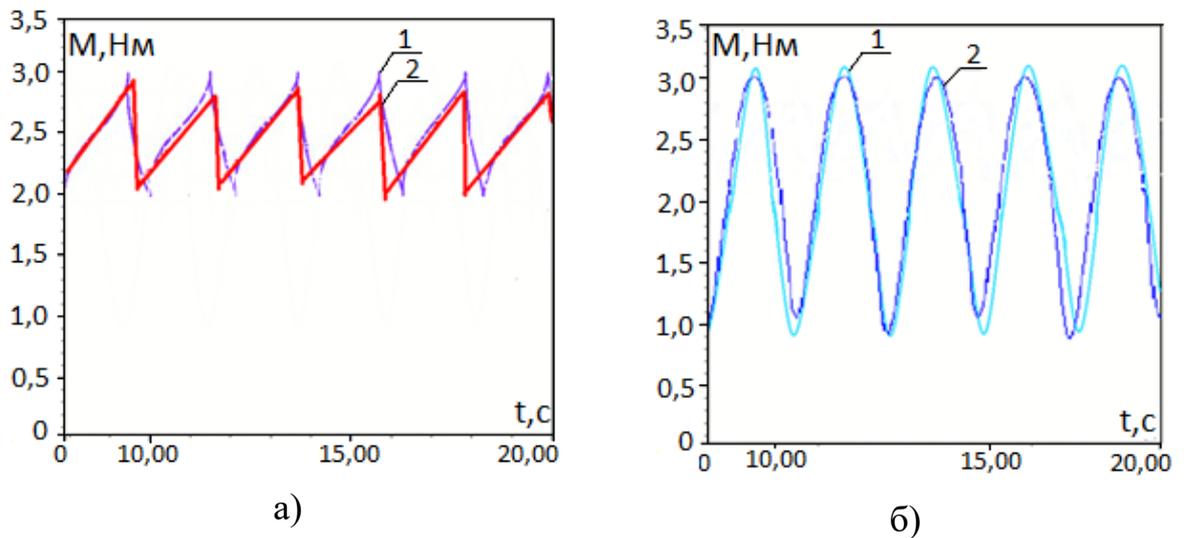


Рисунок 7 – Временная диаграмма сравнения электромагнитного момента СДПМ ВЭП с ДК (1 – полевая модель, 2 – универсальная модель):

а) при 120-градусной коммутации, б) при 180-градусной коммутации

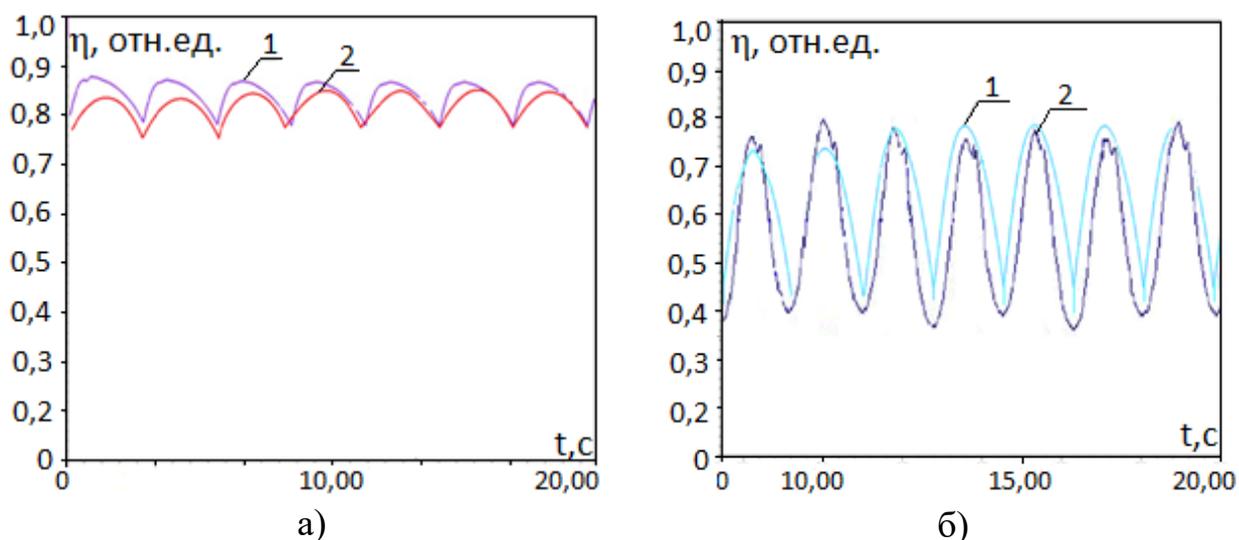


Рисунок 8 – Временная диаграмма сравнения электромагнитного момента СДПМ ВЭП с ДК (1 – полевая модель, 2 – универсальная модель):  
 а) при 120-градусной коммутации, б) при 180-градусной коммутации

Отмечено преимущество использования универсальной линейной модели, которая разработана в программном комплексе VisSim, который свободно распространяется. Кроме того, модель может полноценно работать в версии, не требующей установки на персональный компьютер. Полевая модель разработана в программном комплексе, требующем значительные вычислительные ресурсы и лицензионный доступ. Также отмечена возможность моделировать различные алгоритмы коммутации с помощью универсальной линейной модели, при этом полевая модель, разработанная в ANSYS Electronics Desktop, позволяет моделировать только 180- и 120-градусную коммутацию.

Таким образом, обоснована рекомендация по использованию универсальной линейной модели для оценки характеристик ВЭП с ДК для разных алгоритмов коммутации.

В главе 5 проведено экспериментальное исследование, направленное на оценку адекватности универсальной линейной модели ВЭП с ДК при различных алгоритмах коммутации.

Разработан универсальный стенд, позволяющий провести исследование коммутационных, динамических и механических процессов в ВЭП с ДК, получить реальную картину фазных токов, оценить его рабочие и энергетические характеристики и, следовательно, подтвердить с практической точки зрения рекомендации по применению алгоритмов коммутации в ВЭП в различных видах механизмах и системах.

Проведена доработка СДПМ ДВМ100.22 путем установки дополнительного комплекта ДПР для возможности реализации двенадцатитактной коммутации. Разработана печатная плата для реализации полупроводникового коммутатора ВЭП (рисунок 9). Разработана программа для микроконтроллера, где реализованы алгоритмы 120-, 180- и 150-градусной коммутации ВЭП.

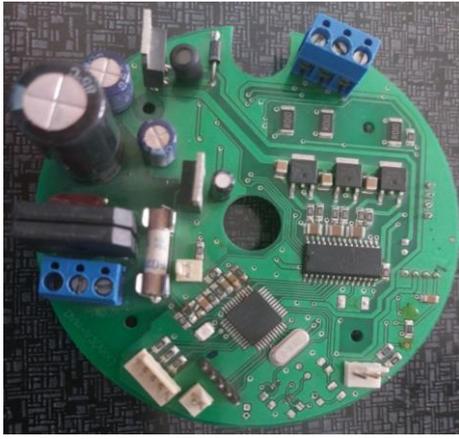


Рисунок 9 – Внешний вид ПК универсального стенда для исследования ВЭП с ДК

Проведено экспериментальное исследование при условии, что значение скорости вращения на валу двигателя такие же, как и при моделировании на универсальной линейной модели. В ходе эксперимента получены осциллограммы фазного тока на универсальном стенде и в результате моделирования универсальной линейной модели при установившейся скорости для 120-, 180- и 150- градусной коммутации ВЭП (рисунок 10 и 11). 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%.

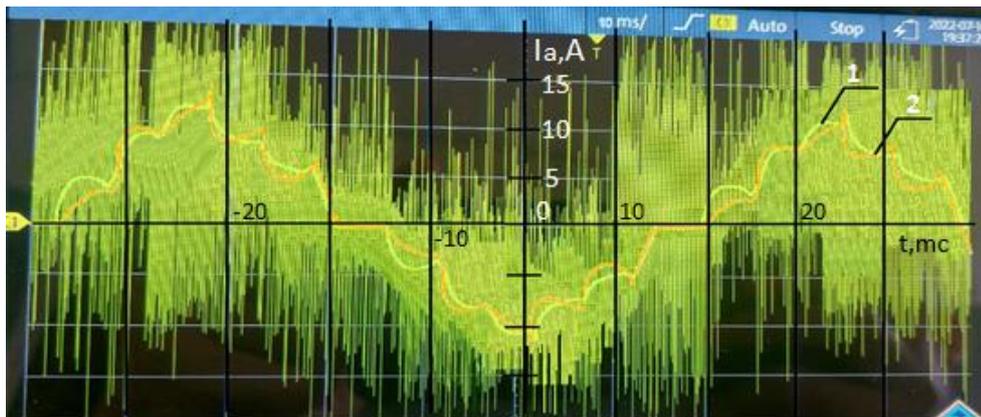


Рисунок 10 – Сравнение осциллограммы и графика тока фазы 1 – универсальная стенд (зеленый график),

2 – универсальный математическая модель (оранжевый график)

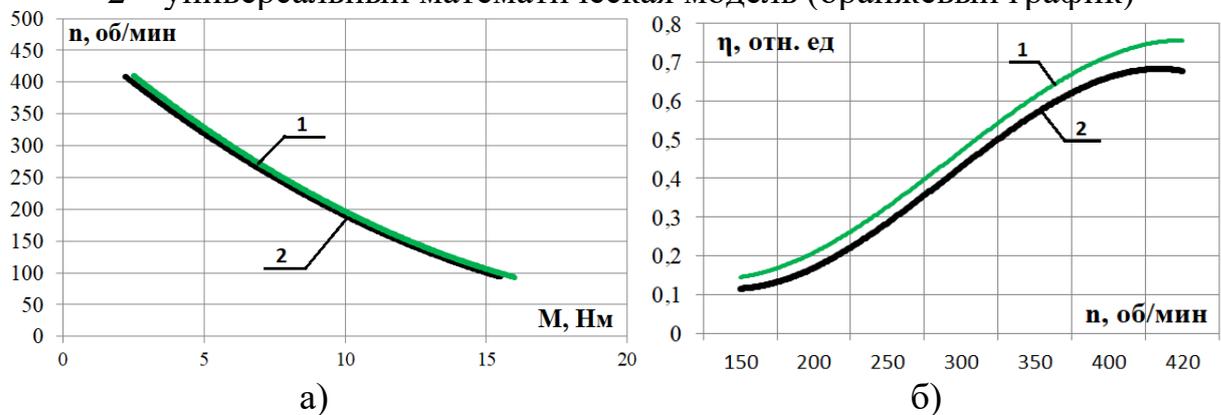


Рисунок 11 – Сравнение а) механических и б) энергетических характеристик

1 – универсальная математическая модель (зеленый график),

2 – универсальный стенд (черный график)

Таблица 2. Сравнение результатов экспериментального исследования и моделирования линейной модели

Наименование параметра	Максимальное отклонение		
	120-ком.	180-ком.	150-ком.
Ток фазы «А» ( $i_a$ )	10,00%	11,00%	9,00%
Электромагнитный момент ( $M$ )	3,22%	4,16%	3,12%
Электромагнитный КПД ( $\eta$ )	6,25%	14,00	14,28

Обоснована причина расхождения результатов (таблица 2): универсальная модель не позволяет оценить распределение магнитной индукции в воздушном зазоре, что непосредственно влияет на количественную оценку тока  $i_a(t)$ , и, следовательно, электромагнитного момента  $M(\omega)$  и электромагнитного КПД  $\eta(\omega)$ . 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

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача – повышение энергетических показателей, расширение рабочего диапазона и улучшение выходных характеристик ВЭП на основе СДПМ с ДК обмотки. Выполненные аналитические и экспериментальные исследования позволяют выделить следующие основные результаты и сделать выводы:

1. Проведен анализ возможных алгоритмов коммутации обмотки в ВЭП, основанных на трехфазных СДПМ, была дана сравнительная оценка алгоритмов коммутации с точки зрения возможности управления и качества выходных характеристик, который показал:

– дискретная 120-градусная коммутация превосходит как случай синусоидального питания, так и другие алгоритмы коммутации по КПД при всех значениях относительной индуктивности. Однако, векторное управление приводом путём изменения угла коммутации  $\theta$  в этом случае даёт слабый эффект с точки зрения, как регулирования момента, так и регулирования скорости. Следовательно, при 120-градусной коммутации нецелесообразно использовать режим ФВУ, а проще и достаточно эффективно работать при нейтральной коммутации ( $\theta=0$ ).

– дискретная 180-градусная коммутация в общем случае по энергетическим показателям проигрывает как случаю синусоидального питания, так и другим алгоритмами коммутации. Однако при больших значениях относительной индуктивности разница между синусоидальным питанием и 180-градусной коммутацией в режиме ФВУ как по виду регулировочных характеристик, так и по КПД нивелируется и при относительной индуктивности большей единицы ( $\xi > 1$ ). Таким образом, для 180-градусной коммутации режим ФВУ может быть эффективно использован.

– пульсации момента являются основным недостатком дискретной коммутации, в том числе и в режиме ФВУ, их наличие должно учитываться в первую очередь при выборе способа управления приводом с учётом специфики его применения. Наименьшее значение пульсаций при 150-градусной коммутации, которая по энергетическим показателям выигрывает в сравнении со 180-градусной коммутацией.

2. Представлены три вида математических моделей для расчёта режимов работы и характеристик ВЭП с ДК. Первая, наиболее упрощённая модель, позволяет рассчитывать характеристики привода при нулевой индуктивности обмотки и позволяет наглядно выявить влияние на выходные характеристики привода алгоритма коммутации обмотки и формы ЭДС вращения, например, для принятия решения по выбору алгоритма коммутации на первоначальном этапе проектирования.

Вторая, универсальная линейная модель, позволяет рассчитывать характеристики и параметры привода с учётом алгоритмов коммутации, реальной формы ЭДС и индуктивности обмотки оказывается удобной для расчёта и анализа характеристик уже спроектированного привода при нагрузках, не превышающих номинальное значение.

Третья, полевая модель, позволяет исследовать параметры и характеристики привода при нагрузках, превышающих номинальное значение, с учётом нелинейностей магнитных цепей двигателя и оказывается удобной для исследования критических режимов работы с перегрузкой.

3. Проведена оценка влияния несинусоидальности ЭДС двигателя на характеристики ВЭП для различных алгоритмов ДК:

– шеститактная 180-градусная коммутация оказывается наиболее чувствительной к содержанию высших гармоник, как с точки зрения энергетических показателей, так и с точки зрения пульсаций момента в приводе. Увеличение, их содержания ведёт к ухудшению указанных выходных параметров. Особенно способствует увеличению пульсаций момента наличие второй гармоники в ЭДС.

– шеститактная 120-градусная коммутация, с точки зрения электромагнитного КПД, нечувствительна к содержанию третьей гармоники в фазной ЭДС, а вторая гармоника способствует увеличению электромагнитного КПД двигателя. Однако, наличие второй гармоники в ЭДС также, как и при 180-градусной коммутации приводит к существенному увеличению пульсаций момента.

– двенадцатитактная коммутация, по сравнению с шеститактной, оказывается менее чувствительной к содержанию высших гармоник в ЭДС. Хотя и здесь наличие второй гармоники способствует повышению КПД и увеличению пульсаций момента.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

### Статьи, входящие в перечень рецензируемых научных изданий:

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., Курносов 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.)

### Публикации, включённые в систему цитирования Scopus:

6. Shaburov, P.O. Universal Model for Studying Characteristics of a Brushless DC motor with Descrete Switchind / Shaburov P.O., Kuleva N.Y. // Proccedings – 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2023. – 2023. – P. 278–282. (5 с. / 3 с.)

7. Kurnosov, D.A. Mathematical Modeling of the Control System of a Municipal Electric Machine / Kurnosov D.A., Kuleva N.Y., Zakirov R.A. // Proccedings – 2023 International Russian Automation Conference, RusAutoCon. – 2023. – P. 1146–1151. (6 с. / 2 с.)

8. Klinachev, N.V. Asynchronous Vector Drive Status Monitor / Klinachev N.V., Kuleva N.Y., Shaburov P.O. // Proccedings – 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2023). – 2023. – P. 426–431. (6 с. / 3 с.)

### Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и патент:

9. Пат. 2790625 Российская Федерация. Способ и устройство для расширения скоростного диапазона и обеспечения живучести трехфазного вентильного электродвигателя № 2022129611; заявл. 15.11.2022; опубл. 28.02.2023 / Шабуров Павел Олегович, Воронин Сергей Григорьевич, Кулёва Надежда Юрьевна, Закиров Рамиль Агзамович, Федулов Михаил

Владимирович, Сунгуров Илья Владимирович, Харлов Андрей Владимирович, заявитель АО «Курганский завод дорожных машин».

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024613618 Российская Федерация. Цифровая модель цифрового двойника электромеханического преобразователя силовой установки с электровинтовым двигателем № 2024611884; заявл. 02.02.2024; опублик. 14.02.2024 / **Кулёва Надежда Юрьевна**, Закиров Рамиль Агзамович, Астахов Александр Викторович, заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)».

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666653. Система управления спецтехникой УКМЭ-5000 № 2023665281; заявл. 20.07.2023; опублик. 02.08.2023 / Закиров Рамиль Агзамович, **Кулёва Надежда Юрьевна**, Сунгуров Илья Владимирович, Харлов Андрей Владимирович, заявитель АО «Курганский завод дорожных машин».

#### **Другие научные публикации:**

12. Курносков, Д.А. Фазовое управление вентиляльным электроприводом / Курносков Д.А., Воронин С.Г., **Кулёва Н.Ю.** // Электротехнические комплексы и системы. Материалы I Всероссийской конференции по электрическим машинам в рамках Международной научно-практической конференции. В 2-х томах. – 2022. – Т. 2. – С. 466–479. (14 с. / 4 с.)

13. Шабуров, П.О. Математическая модель трехфазного вентиляльного двигателя с несинусоидальной формой ЭДС вращения при 120-градусной коммутации / Шабуров П.О., **Кулёва Н.Ю.**, Согрин А.И., Ерпалов А.В. // Электротехнические комплексы и системы. Материалы I Всероссийской конференции по электрическим машинам в рамках Международной научно-практической конференции. В 2-х томах. – 2022. – Т. 2. – С. 714–725. (12 с. / 6 с.)

14. Клиначёв, Н.В. Система управления движением космического аппарата для полёта к удалённым объектам солнечной системы / Клиначёв Н.В., **Кулёва Н.Ю.**, Курносков Д.А. // 73 научная конференция профессорско-преподавательского состава ЮУрГУ: сборник докладов. – 2021. – С. 322–330. (9 с. / 3 с.)

В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежит 70% от общего объёма научных публикаций, а именно: в работах [1–4, 6] личный вклад автора состоит в разработке математических моделей, анализе результатов моделирования, а также систематизации и анализе материала; в работе [5] – анализе и систематизации материала; в работах [7, 8] – в разработке математической модели, выполнении расчётов и анализе полученных результатов; в работах [10, 11] – разработке математической модели и анализу результатов их моделирования.

**КУЛЁВА Надежда Юрьевна**

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АНАЛИЗ  
РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ  
С ДИСКРЕТНОЙ КОММУТАЦИЕЙ ОБМОТКИ**

Специальность 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

---

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 23.10.2024. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ 305/392.

---

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, пр. им. Ленина, 76.