

На правах рукописи



Хафизов Глеб Тагирович

**ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЬНЫМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ УГЛА
КОММУТАЦИИ**

Специальность 05.09.03 — «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)" на кафедре "Летательных аппаратов".

Научный руководитель –
д-р. техн. наук, проф. **Воронин Сергей Григорьевич**.

Официальные оппоненты:

Мугалимов Риф Гарифович, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры "Электроснабжения промышленных предприятий" федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» г. Магнитогорск;

Хакимьянов Марат Ильгизович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехники и электрооборудования промышленных предприятий» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Защита состоится 30 июня 2017г., в 12 часов, в ауд. 1007 на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, пр-т Ленина, 76, ауд. 1007.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на сайте ЮУрГУ по адресу <https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229805/hafizov-bleb-tagirovich>.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс: +7 (351) 267-91-23.

E-mail: grigorevma@susu.ac.ru.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д212.298.05

д-р. техн. наук, доц.

М.А. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Вентильный электропривод (ВЭП) находит все большее применение в различных сферах деятельности человека. Он применяется и в строительстве (например, приводы силовых установок бетононасосов, мощностью до 150 кВт), и в различных производствах (привода запорной арматуры, мощностью до 5 кВт), и в медицине (приводы систем вентиляции легких, мощностью до 1 кВт), и в бытовой и оборонной технике (приводы стартер-генераторов, мощностью до 1 МВт), и т.д.. Под ВЭП принято понимать вентильный электропривод, использующий в качестве электромеханического преобразователя (ЭМП) - синхронный электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов. С каждой новой областью применения к ВЭП предъявляют все более жесткие требования:

- снижение стоимости всего привода и его комплектующих;
- расширение диапазона регулирования;
- повышение качества управления;
- повышение энергетической экономичности;
- повышение надежности не только вновь создаваемых, но и уже находящихся в эксплуатации электроприводов.;

Список требований продолжает расширяться, а требования к значениям показателей – ужесточаться.

В этих условия возникла потребность более глубокого анализа процессов в ВЭП с целью поиска оптимальных путей удовлетворения растущих требований. В частности, известные способы увеличения диапазона регулирования частоты вращения не позволяют получить требуемый результат. Известные методы оценки надежности технических систем не позволяют оценить надежность ВЭП в условиях одновременного воздействия разрушающих факторов разной физической природы. Используемые динамические математические модели дают ощутимую погрешность определения численных показателей при работе ВЭП на высоких и существенно малых частотах вращения.

Исследованиям ВЭП посвящено много работ различных авторов. В области создания алгоритмов расчета и использования их в исследованиях можно выделить работы В.А. Неганова, Я. Туровского, Э.А. Мееровича, Б.Э. Мейеровича, А.В. Иванова-Смоленского, Р.А. Лютера. Практически все авторы, занимающиеся анализом и расчетом электромагнитных полей в ЭМП, записывают дифференциальные уравнения в инерциальной системе отсчета. Но это допустимо лишь для установившегося и квазистационарного режимов работы ЭМП. Описание процессов в динамических режимах требует более обобщенного подхода и использования иных систем отсчета. Корректный анализ, электромагнитных процессов в динамических режимах является важным и неотвратимым этапом анализа вентильных электроприводов.

Среди авторов, занимающихся вопросами оптимального управления ВЭП, можно назвать следующих ученых: С.Г. Воронин, Д.А. Курносков, А.С. Кульмухаметова, А.Б. Виноградов, А.С. Анучин, В.Ф. Самосейко. Среди зарубежных авторов выделяется Томас А. Липо. К сожалению, их

исследованиями охвачены не все практически важные режимы работы ВЭП. Кроме того, для выполнения постоянно возникающих новых требований приходится использовать и новые, еще не изученные режимы управления. В частности, слабо изучен режим векторного управления с регулированием угла коммутации.

Вопросам применения и синтеза фильтров оценивания посвящены работы А.А. Красовского. В этом направлении работали и В.С. Булыгин, М.Ф. Росин, Э.П. Сейдж, Дж. Л. Мелс, Д. Гроп и др. Чаще всего большинство авторов выбирают готовый фильтр, который может оказаться неподходящим для типа уравнений математической модели, используемой для описания ВЭП. В этой связи возникла задача создания наиболее подходящего фильтра оценивания применительно к задаче моделирования ВЭП и его системы цифровой обработки управляющей информации.

В технической литературе имеются сведения по оценке надежности ВЭП в условиях негативных импульсных воздействий. Это, например, работы: Д.А. Курносова, А.А. Кочкарова, Г.Г. Малинецкого, А.И. Перроте, Л.П. Леонтьева. Все авторы рассматривают случай, когда на ВЭП приходит одно либо несколько импульсных воздействий одной физической природы. На практике же совокупность внешних воздействий на ВЭП имеет различную физическую природу. Вопрос оценки надежности работы ВЭП в таких условиях пока остается неизученным.

Таким образом, *остается актуальной необходимость решения следующих вопросов научного исследования ВЭП:*

- построение динамической модели и уточнение алгоритмов расчета электромагнитных процессов в динамических режимах работы ВЭП;
- поиск и анализ оптимальных режимов управления ВЭП, позволяющих улучшить динамические показатели, расширить диапазон регулирования частоты вращения и вращающего момента, повысить КПД и энергетическую эффективность;
- построение оценивающих устройств и создание алгоритмов работы программного ДПР;
- поиск путей снижения стоимости и повышения надежности ВЭП;
- развитие методов оценки надежности в условиях комплексного воздействия внешних факторов различной физической природы.

На основании всего выше изложенного **целью работы** является: *Развитие теории вентильного электропривода в части: анализа электромагнитных процессов в динамических режимах; расширения диапазона регулирования выходных координат; повышения энергетических показателей; создания алгоритмов вычисления положения ротора по косвенным данным; методики проектирования привода с программным датчиком положения ротора; поиска путей обеспечения заданных показателей надежности привода.*

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

1. Провести анализ известных методик расчета электромагнитных полей в вентильных двигателях при динамических режимах; выявить наиболее общие связи между электродинамическими величинами и параметрами в разных системах отсчета вентильного двигателя (ВД); построить алгоритм расчета и анализа картины электромагнитных полей ЭМП при произвольном движении ротора; дать инженерные выражения, рекомендации методики для применения разработанного алгоритма.

2. Проанализировать известные способы и средства управления ВЭП применяемые для расширения диапазона регулирования выходных координат и повышения энергетических показателей, и найти в них ограничения и недостатки, в том числе отсутствие регулирования угла коммутации. Получить аналитические выражения для значений угла коммутации, оптимальные для разных режимов работы ВЭП.

3. Разработать цифровую систему программного определения углового положения ротора ЭМП на базе предложенной динамической модели электромагнитных процессов в нем, создать структуру наблюдателя, использующего возможности оценивающих фильтров (ОФ), предложить реализацию нелинейного ОФ.

4. Оценить возможности модификации известных модели в теории надежности ВЭП с целью учета воздействий разной природы; произвести выбор математического аппарата для расширения возможностей существующей модели; синтезировать новую математическую модель надежности ВЭП и провести её полный анализ; перечислить её возможности и рамки применения; дать практические рекомендации для применению данной модели.

Объект исследования. В работе исследуется вентильный электропривод с векторным управлением и цифровым программным устройством вычисления информации о текущем угловом положении ротора и о частоте вращения.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались теоретические и эмпирические методы исследования. Исследования базируются на фундаментальных разделах физики, электротехники электродинамики; общей теории относительности; механики. Используются методы статистики и теории надежности, а также методы математического моделирования с применением вычислительных пакетов Vissim.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждается следующим:

- при математическом описании и моделировании ЭМП использованы общепринятые допущения, справедливость которых подтверждена и теоретическими исследованиями, и практическими разработками;

- адекватность используемых математических моделей, достоверность полученных результатов моделирования и теоретических выводов подтверждены полученными автором экспериментальными данными.

- основные положения диссертации обсуждены на научно-технических конференциях различного уровня, опубликованы в печати, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК, и получили одобрение специалистов.

Научное значение работы:

Развитие и дополнение теории, практики, проектирования, анализа и надежности ВЭП в части: анализа электромагнитных процессов при динамических режимах ЭМП, обеспечения заданной надежности ВЭП, расширения диапазона регулирования выходных координат, повышения эффективности и энергетических показателей, проектирование и апробация нелинейных фильтров оценивания для бездатчиковых ВЭП.

Научные положения выносимые на защиту:

- метод и алгоритм расчета картины электромагнитных полей ВД при произвольном движении ротора.

- полная и упрощенная математическая модель оценивающего фильтра для программного датчика положения ротора, использующая метод инвариантного погружения.

- аналитические выражения для вычисления значений угла коммутации, оптимальных по различным критериям оптимизации.

- модель надежности ВЭП распространения по системе разнотипных импульсных воздействий и её практическая реализация.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- впервые предложен метод, позволяющие получать соотношения между электродинамическими величинами и параметрами в произвольно движущихся системах отсчета.

- дана методика по выбору фильтра оценивания для построения бездатчикового вентильного электропривода.

- впервые получен фильтр инвариантного погружения пониженного порядка, который позволяет получать оцениваемые значения ненаблюдаемых механических величин, таких как скорость, момент, угол поворота ротора вентильного двигателя путем получения их из фазных токов.

- предложены уточненные выражения для вычисления значений угла коммутации, оптимальных по различным критериям, например, максимума вращающего момента, минимума потерь и т.п.;

- синтезирована модель надежности ВД распространения по системе разнотипных импульсных воздействий, позволяющая учитывать ситуации, когда на испытываемую систему приходят разрушительные воздействия разной природы.

Практическое значение работы заключается в следующем:

- выведенные связи между электродинамическими величинами и параметрами в разных системах отсчета ВД позволят выйти на новый уровень точности при численных расчетах поля и анализе вентильных двигателей; даны практические рекомендации использования и применения выведенных соотношений.

- использование предложенных оценивающих фильтров позволяет строить системы программных ДПР, отличающиеся пониженной стоимостью при повышенной точности и надежности.

- синтезированные выражения для оптимальных углов коммутации ВД, позволяют реализовать следующие режимы работы ВЭП: максимальной скорости, максимальной скорости холостого хода, максимального

электромагнитного момента, минимума активных потерь, минимума реактивных потерь, минимума полных потерь и т.д.

- разработанная модель распространения по системе ВЭП разнотипных импульсных воздействий, позволяет структурировать импульсные воздействия и рассматривать распространение воздействия в своей природе, но и устанавливать корреляционные связи между орграфами одной системы но разной природы.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения о предоставлении субсидии № 4.577.21.0154 от 28 ноября 2014 года (Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57714X0154)

Реализация результатов работы. Спроектированный оценивающий фильтр реализован на экспериментальном комплекте и двигателе привода искусственной вентиляции легких ДБ-72_40_1000. На базе производства ООО "Зеленая энергия" была внедрена система регулятора угла коммутации. За счет коррекции номинальный момент привода бетононасоса РС 907/612 повысился на 80 Нм, что составляет примерно 10%. На базе предприятия СКБ Турбина был внедрен регулятор угла коммутации. За счет коррекции была повышена скорость холостого хода турбогенератора с 30000 до 40000 об/мин и уменьшено время разгона на пять секунд, что составляет примерно 30%.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на конференциях:

- VIII международной молодежной научной конференции "Тинчуринские чтения" (г. Казань 2013 г.)

- XXXIV Всероссийской конференции посвященной 90-летию со дня рождения академика В.П. Макеева "Наука и технологии" (г. Миасс 2014 г.)

- LXVI научной конференции профессорско-преподавательского состава секции "Технических наук" (г. Челябинск 2014 г.)

- LIII международной научной конференции МНСК-2015 "Мехатроника и автоматизация" (г. Новосибирск 2015 г.)

- научно-технической выставке творчества молодежи (НТТМ) изобретателей, рационализаторов, конструкторов "Евразийские ворота России - Шаг в будущее" (г. Челябинск 2015 г.)

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 7 печатных работ, из них 3 работы опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста объемом 236 страниц, заключения, списка литературы из более 200 наименований, тринадцати приложений. Общий объем диссертации 323 страницы, включая 346 формул, 58 рисунков и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы и поставлена цель работы, определены объект и предмет исследования, выделены задачи необходимые для достижения цели, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе «Состояние вопроса» исследованы и проанализированы вопросы вентильного привода, управления, наблюдения и его надежности.

Структурная схема ВЭП, обычно включает в себя полупроводниковый коммутатор (ПК), электромеханический преобразователь (ЭМП) и датчик положения ротора (ДПР). Однако, в данной работе, мы будем рассматривать функциональную схему бездатчикового ВЭП:

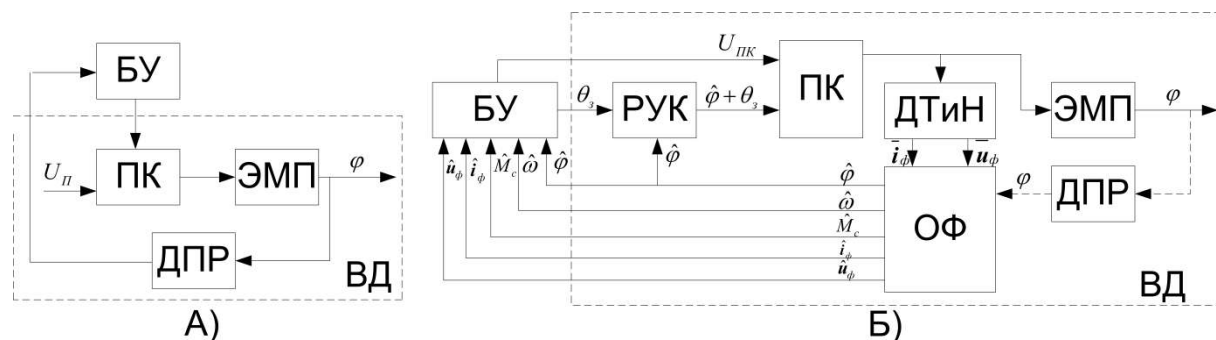


Рисунок 1 - Функциональные схемы ВЭП

На рисунке №1: А) классическая схема ВД; Б) схема ВД с регулированием по углу коммутации. Введены следующие обозначения: РУК - регулятор угла коммутации θ_s ; ДТиН - датчик фазных токов \bar{i}_ϕ и напряжений \bar{u}_ϕ ; ОФ - оценивающий фильтр. Бездатчиковая схема обладает двумя существенными достоинствами по сравнению с ВЭП с ДПР: она может работать в бездатчиковом режиме; ОФ позволяет получать значения таких ненаблюдаемых величин как момент сопротивления \hat{M}_c , угол и скорость поворота ротора $\hat{\varphi}, \hat{\omega}$, в условиях помех.

Все математические модели ВД, основаны на уравнениях Максвелла. При расчете картины электромагнитного (ЭМ) поля, необходимо рассматривать поля принадлежащие различным подвижным частям ЭМП, в одной системе отсчета, связанной с какой либо частью ЭМП ВД. Под системами отсчета (СО) принято понимать - совокупность тела отсчета, связанной с ним системы координат (СК) и системы отсчета времени, по отношению к которым рассматривается движение каких-либо тел. Исторически сложилось так, что при расчете ЭМ полей, требовались высокие вычислительные ресурсы, и в методике расчета закрепилась особенность: расчет ведется по формулам выведенным для постоянной скорости вращения или движения якоря ЭМП. И уже в эти значения, не правомерно вводят мгновенное значение скорости движения якоря ЭМП и производят расчет. В связи с ростом доступных вычислительных мощностей, стала актуальна задача о формализации процедуры расчета ЭМ поля при произвольно движущихся частях ЭМП и составлении подробного алгоритма применения процедуры. Вся сложность формализации процедуры заключается в определении элементов матрицы Якоби перерасчета величин из одной СО в другую СО, движущуюся по произвольному закону.

Бездатчиковое векторное управление ВЭП подразумевает собой, сложную замкнутую систему (рис. 1б), которая может выполнять задачи позиционирования, поддержания скорости, заданного момента, или другие. Синтез векторного

управления, для систем с датчиками - хорошо проработанный вопрос, однако синтез бездатчиковых систем векторного управления ВЭП, является открытым и крайне важным вопросом. ВЭП описывается нелинейной системой дифференциальных уравнений. Для синтеза ОФ величин ВЭП, используются линеаризованные модели ВЭП, что негативно отражается на их точности при оценивании в переходных процессах. В связи с этим, возникает необходимость проектирования ОФ основанных на исходных уравнениях ВЭП. Методика проектирования ОФ для нелинейных систем основывается на уравнении Стратоновича для апостериорной плотности вероятности, с помощью интегралов Ито, выводятся системы из которых строятся субоптимальные ОФ для ВЭП.

К ВЭП предъявляется требование ортогональности вектора тока и потока. Однако наложив иные требования, можно изменять характеристики ВЭП, с помощью угла коммутации - фазового сдвига между сигналами напряжения и ЭДС. В ряде работ уже выведены некоторые точные и приближенные значения угла коммутации, для разных режимов работы ВЭП. В связи с этим, задачей становится вывод и уточнение аналитических выражений для значений углов коммутации, которые обеспечивают режимы максимальной скорости, максимальной скорости холостого хода, максимального электромагнитного момента, минимума реактивных потерь, минимума полных потерь, минимума активных потерь и т.д. Вывод и уточнение, должен основываться на методах дифференциальной геометрии, вариационного исчисления и электромеханики относительно вышеуказанных режимов работы ВЭП.

Современный ВЭП как система, имеет огромное количество составных элементов. В процессе функционирования ВЭП, каждый элемент привода находится в постоянном взаимодействии. Нормативные воздействия не должны вызывать снижение надежности элементов, только кратковременные и мощные воздействия приведут к резкому снижению надежности. Исследование надежности ВЭП в условиях внешних разрушительных импульсных воздействий - сравнительно новое направление в теории надежности. Однако в известных моделях надежности, разрушительные воздействия не разделяются на классы и системы, они не коррелируют между собой. На практике, возникают ситуации с несколькими одновременными внешними воздействиями разной природы на один элемент системы. Исходя из этого становится задача: «модифицировать методику моделирования надежности ВЭП для учета одновременных, разрушительных импульсных воздействий разной природы». Предлагается использовать тензорный математический аппарат, для расширения возможностей исходной модели и учета предъявляемых требований.

В второй главе «Исследовательская и инженерные модели вентильного двигателя» проведено исследование методик расчета ЭМ полей ЭМП ВДв динамических режимах. В известных методиках используются преобразования Лоренца, в основе которых лежит условие, о постоянстве скорости движения якоря ВД. Но при расчетах это условие заведомо не выполняются. С помощью электродинамики и теории относительности, была получена уточненная методика расчета картины ЭМ поля ВДв динамике, позволяющая учитывать произвольное

движение его составных частей. Методика повышает точность расчетов ЭМ поля в динамике, основываясь на более фундаментальных понятиях и включает в себя общепринятую методику как частный случай.

Разработанная методика состоит в следующем:

1) По топологии ВД в состоянии покоя, относительно каждой его движущейся части, выбирается удобная СК и СО.

2) По топологии ВД в выбранных СК, составляются карты распределений электрической проницаемости ε_{ij} , магнитной проницаемости μ_{ij} , электрической проводимости σ_{ij} , для каждой точки пространства ВД.

3) По составленным картам заполняются карты тензоров ЭМ проницаемости λ_{ab}^{km} и проводимости $\sigma^{\beta km}$, для каждой точки пространства ВД.

4) Выбирается СО, относительно которой будет произведен расчет всех токов, полей и зарядов. Допустим, СО ротора или СО статора.

5) Для выбранной СО, и той СК, которую мы выбрали, записываются уравнения Максвелла, с начальными данными Коши и полевые уравнения распределенной силы (1), также механические уравнения динамики движения ротора ВД.

$$\bar{f} = \nabla(\bar{\mathbf{I}} \cdot \bar{\mathbf{B}}_e) + [\bar{\mathbf{J}} \times \bar{\mathbf{B}}_e] + \nabla(\bar{\mathbf{P}} \cdot \bar{\mathbf{D}}_e) + \rho \bar{\mathbf{E}}_e, \quad (1)$$

где $\bar{\mathbf{I}}$ - вектор намагниченности; $\bar{\mathbf{B}}_e$ - вектор магнитной индукции внешнего поля; $\bar{\mathbf{J}}$ - вектор плотностей тока; $\bar{\mathbf{P}}$ - вектор электрической поляризации; $\bar{\mathbf{D}}_e$ - вектор электрической индукции внешнего поля; $\bar{\mathbf{E}}_e$ - вектор электрической напряженности; ρ - объемная плотность зарядов.

6) Производится расчет метрического тензора g_{ij} , исходя из инвариантности пространственно-временного интервала $ds^2 = g_{ik} dx^i \otimes dx^k$ в разных СО ВД. Приравнивая квадрат интервала в разных СО, скажем неподвижной и движущейся, записывая функциональную взаимосвязь между ними определяются компоненты тензора g_{ij} .

7) Производится расчет дифференциалов «собственной длины» $d\ell$ и «собственного времени» $d\tau$ определенной СО ВД по значениям компонент метрического тензора g_{ij} .

$$d\tau = \sqrt{g_{00}} dt + \left[c \sqrt{g_{00}} \right]^{-1} g_{0\alpha} dx^\alpha; \quad d\ell^2 = \left(g_{0\alpha} g_{0\beta} (g_{00})^{-1} - g_{\alpha\beta} \right) dx^\alpha dx^\beta, \quad (2)$$

где $d\ell, d\tau$ - значения измеряемые внутри СО ВД, наблюдателем связанным с ней; dt, dx^α - значения измеряемые из другой СО ВД, наблюдателем связанным с ней.

8) Исходя из определения «дифференциала сложной функции» и аналитических значений собственной длины $d\ell$ и времени $d\tau$ в разных СО ВД, производится заполнение матриц Якоби J_{PC}, J_{CP} (3). Матрицы Якоби заполняются частными производными, которые являются элементами сложных дифференциалов собственной длины и времени (2).

$$J_{PC} = \frac{\partial z^j}{\partial x^i}; \quad J_{CP} = \frac{\partial x^i}{\partial z^j}, \quad (3)$$

где z^j - это координаты в СО движущейся части; x^i - это координаты в другой СО.

9) Для карт тензоров ЭМ проницаемости λ_{ab}^{km} и проводимости $\sigma^{βkm}$ ВД, относительно разных СО ВД, необходимо произвести перерасчет значений тензоров в выбранную СО ВД по полученным матрицам Якоби J_{PC}, J_{CP} и исходя из выражений (4). Это необходимо, для корректного учета движущихся частей при расчете поля в них, так как их характеристики меняются в выбранной СО.

$${}^S \lambda_{gh}^{ef} = {}^R \lambda_{cd}^{ab} \frac{\partial z^d}{\partial x^h} \otimes \frac{\partial z^c}{\partial x^g} \otimes \frac{\partial x^f}{\partial z^b} \otimes \frac{\partial x^e}{\partial z^a}; \quad {}^S \sigma^{fed} = {}^R \sigma^{ykm} \frac{\partial x^f}{\partial z^y} \otimes \frac{\partial x^e}{\partial z^k} \otimes \frac{\partial x^d}{\partial z^m}, \quad (4)$$

где ${}^R \sigma^{ykm}, {}^R \lambda_{cd}^{ab}$ - объекты в СО ВД движущихся элементов; ${}^S \lambda_{gh}^{ef}, {}^S \sigma^{fed}$ - элементы в той СО где производится расчет поля ЭМП.

10) Производится перерасчет в выбранную СО ВД собственных полей и токов движущихся частей из их СО ВД. Преобразование производится по значениям матриц Якоби и выражениям (5).

$$F_{ij}^S = F_{km}^R \frac{\partial z^k}{\partial x^i} \otimes \frac{\partial z^m}{\partial x^j}; \quad D_{ij}^S = D_{km}^R \frac{\partial z^k}{\partial x^i} \otimes \frac{\partial z^m}{\partial x^j}; \quad J_S^k = J_R^n \frac{\partial x^k}{\partial z^n}, \quad (5)$$

где F_{km}^R - тензор электромагнитного поля вентильного двигателя; D_{ij}^R - тензор индукции ВД; J^k - вектор плотности тока ВД или 4-ток; элементы с индексом «R» - объекты в СО ВД движущихся элементов; элементы с индексом «S» - объекты в той СО ВД где производится расчет поля ЭМП ВД.

11) Производится численный расчет полевой задачи по уравнениям Максвелла вкупе с (1), (4), (5). Рекомендуется производить расчет либо многомерным методом Галеркина, либо многомерными методами «взвешенных невязок», либо более мощными методами для нестационарных задач.

На основании полученной методики, было выведено семейство инженерных моделей ВД учитывающих полевые эффекты. Инженерные модели выведены по принципу от сложного к простому - от учета в динамике магнитных цепей и полевых эффектов связанных с движением ротора ВД, до безразмерной модели ВД для вращающейся СК d-q в домене Лапласа.

В третьей главе «Наблюдатели и оптимальные углы коммутации» исследованы ОФ применяемые для построения бездатчиковых ВЭП, также получены и уточнены выражения для оптимальных углов коммутации.

В электромеханике в основном применяются линейные ОФ первого порядка, такие как Калмана-Бьюси, Люенбергера, и др. Однако ВЭП представляет собой нелинейный объект, и применение линейных ОФ некорректно. Поэтому, был произведен анализ известных ОФ, способных производить идентификацию в условиях переходных процессов ВЭП. Среди нелинейных ОФ был выбран субоптимальный фильтр инвариантного погружения (ФИП), на основании низкого порядка уравнений и высокой практической реализуемости.

ФИП в применении к мат. модели ВЭП основанном на двухфазном синхронном двигателе с возбуждением от постоянных магнитов представлен в выражении (6):

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\hat{\mathbf{X}}} = \begin{bmatrix} \dot{\hat{i}}_{\alpha}^s \\ \dot{\hat{i}}_{\beta}^s \\ \dot{\hat{\omega}} \\ \dot{\hat{\varphi}} \\ \dot{\hat{M}}_c \end{bmatrix} \\ \dot{\hat{\mathbf{P}}} = \mathbf{V} \end{array} \right. = \begin{bmatrix} P_{11}(\hat{i}_{\alpha}^s - \hat{i}_{\alpha}^s) + P_{21}(\hat{i}_{\beta}^s - \hat{i}_{\beta}^s) \\ P_{21}(\hat{i}_{\alpha}^s - \hat{i}_{\alpha}^s) + P_{22}(\hat{i}_{\beta}^s - \hat{i}_{\beta}^s) \\ P_{31}(\hat{i}_{\alpha}^s - \hat{i}_{\alpha}^s) + P_{32}(\hat{i}_{\beta}^s - \hat{i}_{\beta}^s) \\ P_{41}(\hat{i}_{\alpha}^s - \hat{i}_{\alpha}^s) + P_{42}(\hat{i}_{\beta}^s - \hat{i}_{\beta}^s) \\ P_{51}(\hat{i}_{\alpha}^s - \hat{i}_{\alpha}^s) + P_{52}(\hat{i}_{\beta}^s - \hat{i}_{\beta}^s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{U}{L^{s''}} \cos(\hat{\varphi} + \theta) - \frac{R^s}{L^{s''}} \hat{i}_{\alpha}^s - \frac{\kappa}{L^{s''}} \hat{\omega} \cos(\hat{\varphi}) \\ \frac{U}{L^{s''}} \sin(\hat{\varphi} + \theta) - \frac{R^s}{L^{s''}} \hat{i}_{\beta}^s - \frac{\kappa}{L^{s''}} \hat{\omega} \sin(\hat{\varphi}) \\ \frac{\kappa}{J^r} \hat{i}_{\alpha}^s \cos(\hat{\varphi}) + \frac{\kappa}{J^r} \hat{i}_{\beta}^s \sin(\hat{\varphi}) - \frac{\hat{M}_c}{J^r} \\ \hat{\omega} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $\hat{i}_{\alpha}^s, \hat{i}_{\beta}^s, \hat{\omega}, \hat{\varphi}, \hat{M}_c$ - оцениваемые токи, скорость, угол, момент сопротивления ВЭП; $i_{\alpha}^s, i_{\beta}^s$ - наблюдаемые токи; $R^s, L^{s''}, \kappa, J^r$ - параметры ВД; U - амплитуда напряжения; P_{ij} - динамические коэффициенты функции штрафа; \mathbf{V} - матричное уравнение коэффициентов функций штрафа, содержащее 15 уравнений.

ФИП получился двадцатого порядка, в связи с этим *было проведено понижение порядка фильтра*. На основании предположения, что измеряемые токи оценивать не нужно, был синтезирован новый ОФ. ФИП пониженного порядка в применении к двухфазной мат. модели ВЭП, представлен выражением:

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}} = \begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}} \\ \dot{\hat{\varphi}} \\ \dot{\hat{M}}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\kappa}{J^r} \hat{i}_{\alpha}^s \cos(\hat{\varphi}) + \frac{\kappa}{J^r} \hat{i}_{\beta}^s \sin(\hat{\varphi}) - \frac{\hat{M}_c}{J^r} \\ \hat{\omega} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\hat{i}_{\alpha}^s - \tilde{h}_1](P_{11}r_1 + P_{21}r_2) + [\hat{i}_{\beta}^s - \tilde{h}_2](P_{11}r_3 + P_{21}r_4) \\ [\hat{i}_{\alpha}^s - \tilde{h}_1](P_{21}r_1 + P_{22}r_2) + [\hat{i}_{\beta}^s - \tilde{h}_2](P_{21}r_3 + P_{22}r_4) \\ [\hat{i}_{\alpha}^s - \tilde{h}_1](P_{31}r_1 + P_{32}r_2) + [\hat{i}_{\beta}^s - \tilde{h}_2](P_{31}r_3 + P_{32}r_4) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\dot{\hat{\mathbf{h}}} = \begin{bmatrix} \dot{\hat{h}}_1 \\ \dot{\hat{h}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (U/L^s) \cos(\hat{\varphi} + \theta) - (R^s/L^s) \tilde{h}_1 - (\kappa/L^s) \hat{\omega} \cos(\hat{\varphi}) \\ (U/L^s) \sin(\hat{\varphi} + \theta) - (R^s/L^s) \tilde{h}_2 - (\kappa/L^s) \hat{\omega} \sin(\hat{\varphi}) \end{bmatrix}$$

$$\dot{\hat{\mathbf{P}}} = \mathbf{C}$$

где $\dot{\hat{\mathbf{h}}}$ - вектор оценки токов, получаемый из оцениваемых углов, скоростей и моментов; r_j - дополнительные динамические коэффициенты; \mathbf{C} - матричное уравнение коэффициенты функции штрафа, содержащее 6 уравнений.

Редуцированный ФИП (7) получился одиннадцатого порядка, что на 9 порядков ниже чем у системы (6). Полученные системы (6) и (7), а также дополнительные, позволяют реализовывать бездатчиковый ВЭП и определять положение ротора, скорость, момент сопротивления в условиях внешних гауссовских помех, по значениям измеримых фазных токов и напряжений питания.

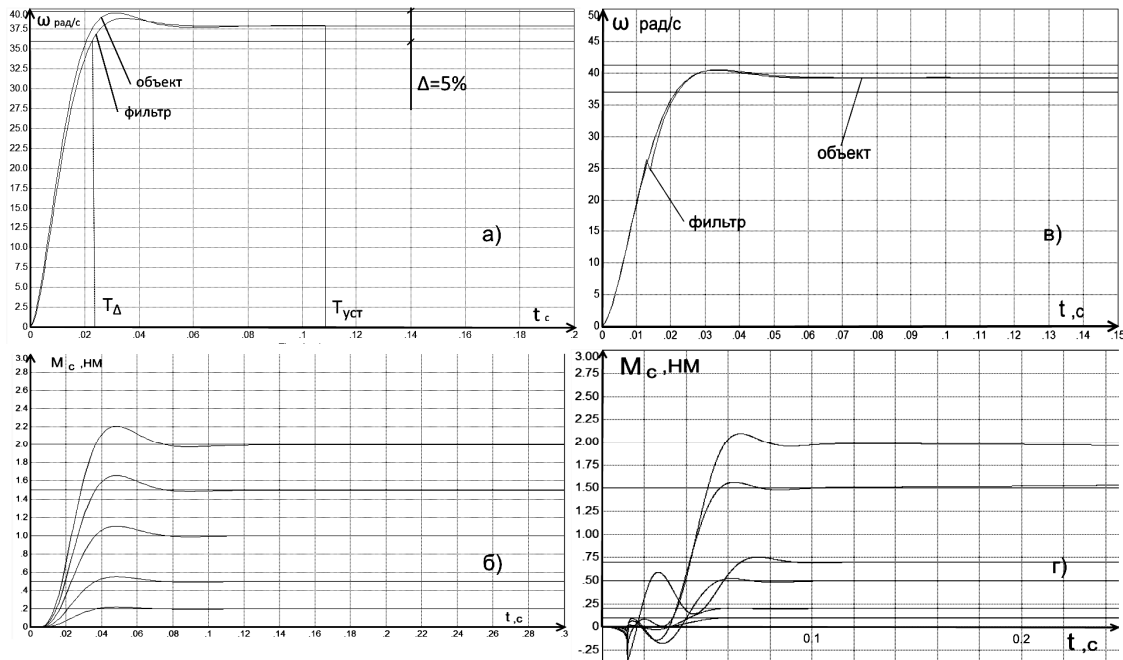


Рисунок 2 - Осциллограммы восстановленных скоростей и моментов сопротивления: а,б - ФИП относительно системы (6); в,г - редуцированный ФИП по системе (7).

Проведено моделирование работы фильтров (6-7) в составе ВЭП. ФИП (6-7), работают без статических ошибок (рис. 2а,в), и работают с малым перегуливанием (рис. 2а-г) при переходных процессах. Однако, колебательность у редуцированного ФИП (рис. 2г) выше и нелинейно зависит от входных значений.

II) На основе структурной схемы (рис.3) ВД были выведены и исследованы выражения значений оптимальных углов коммутации, относительно режимов максимальной скорости, момента, минимумов различных потерь мощности.

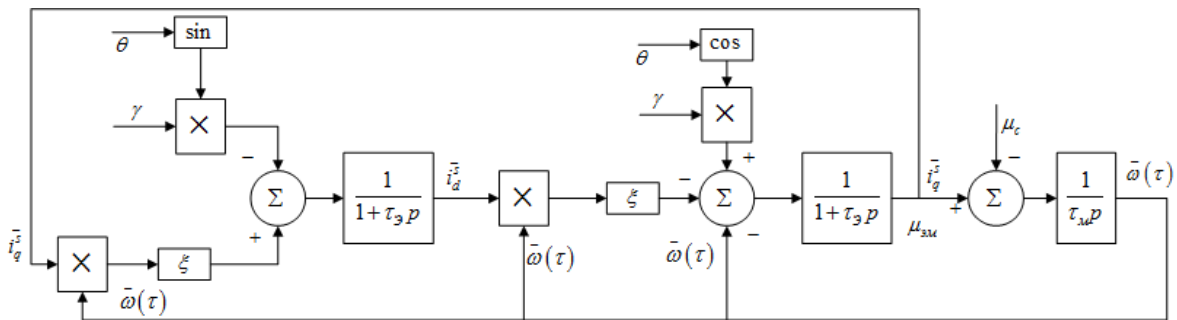


Рисунок 3 - Структурная схема вентильного двигателя в СК dq.

Режим максимальной скорости ВД при нагрузке:

$$\theta_M^e = \arccos \left[\frac{\text{sign}(f)C}{6B^{1/6}} + \frac{\sqrt{F + \text{sign}(f)6\sqrt{12}\mu_c\tau_3^2\gamma E}}{\text{sign}(g)6\sqrt{C}B^{1/6}} \right] + 2\pi\zeta, \quad \zeta \in \mathbb{Z}, \quad (8)$$

где f, C, g, B, E, F - функции зависящие от характеристик двигателя τ_3 , а также безразмерных моментов μ_c и напряжения γ .

Режим максимальной скорости холостого хода ВД:

$$\theta_M^{e,xx} = \arctg(\gamma\tau_3) + \pi n; \quad n \in \mathbb{Z}, \quad (9)$$

Режим максимального электромагнитного момента ВД:

$$\theta_M^\mu = \arctg(\bar{\varepsilon}\tau_\gamma) + \pi n; \quad n \in \mathbb{Z}, \quad (10)$$

где $\bar{\varepsilon}$ - безразмерная скорость вращения ротора ВД.

Режим минимума активных потерь ВД:

$$\theta_{\text{ЭЛМ}}^{PM} = 2\arctg \left[\frac{\left(-1 + \sqrt{1 + \tau_\gamma^2 \bar{\varepsilon}^{-2}} \right)}{\tau_\gamma \bar{\varepsilon}} \right] + \pi n; \quad n \in \mathbb{Z}, \quad (11)$$

Режим минимума реактивных потерь ВД:

$$\theta_{\text{ЭЛМ}}^{QM} = \pm 2\arctg \left[\frac{\tau_\gamma \bar{\varepsilon}^{-2} - \gamma^2 \tau_\gamma + \sqrt{-\langle (\gamma\tau_\gamma - 1)(\gamma\tau_\gamma + 1)(\bar{\varepsilon} - \gamma)(1 + \tau_\gamma^2 \bar{\varepsilon}^{-2})(\bar{\varepsilon} + \gamma) \rangle}}{(\bar{\varepsilon} + \gamma)(\gamma\tau_\gamma^2 \bar{\varepsilon} - 1)} \right] + \pi n; \quad n \in \mathbb{Z}, \quad (12)$$

Режим минимума полных потерь ВД:

$$\theta_{\text{ЭЛМ}}^{SM} = \begin{cases} \pm 2\arctg \left(\frac{\sqrt{(\bar{\varepsilon} - \gamma)(\bar{\varepsilon} + \gamma)}}{\bar{\varepsilon} + \gamma} \right) + \pi n; \quad n \in \mathbb{Z} \\ \pm 2\arctg \left(\frac{\sqrt{\gamma^2 - \tau_\gamma^2 \bar{\varepsilon}^{-4} + \gamma^2 \tau_\gamma^2 \bar{\varepsilon}^{-2} \mp \gamma}}{\tau_\gamma \bar{\varepsilon} (\bar{\varepsilon} + \gamma)} \right) + \pi k; \quad k \in \mathbb{Z} \end{cases}, \quad (13)$$

В силу сложности выражений (3-8) и с учетом закона Мура, предлагается два варианта применения оптимального угла θ в практике:

- В случае удовлетворительной вычислительной мощности микроконтроллера, предлагается непосредственный расчет значений оптимальных углов коммутации ВД самим микроконтроллером.

- В случае малой вычислительной мощности контроллера электропривода строится трех-пятимерный тензор-массив типа $\Theta = \theta_{\mu_c \tau_\gamma \gamma \bar{\varepsilon}}(\mu_c, \tau_\gamma, \gamma, \bar{\varepsilon})$, где индексы обозначают координаты-параметры, по которым ищется предварительно посчитанное оптимальное значение угла коммутации.

В четвертой главе «Надежность вентильного электропривода с векторным управлением» произведено дополнение теории надежности ВЭП.

Привод как комплексное и законченное техническое устройство, подвергается различным разрушительным импульсам, как со стороны окружающей среды, так и из-за внутренних сбоев. В известных моделях надежности, рассматриваются разрушительные импульсные воздействия одной природы или из одного энергетического домена (ЭнД), что не позволяет рассматривать случаи одновременных воздействий разной природы. Эта проблема решается введением тензорного математического аппарата, что расширяет возможности существующей модели надежности. На основании вышесказанного был разработан «Алгоритм моделирования распространения по системе разнотипных импульсных воздействий».

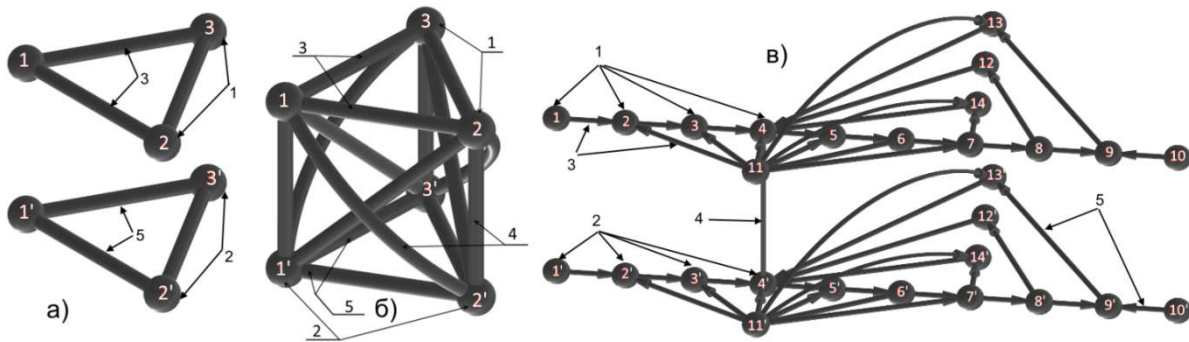


Рисунок 4 - Орграфы разных систем: а) одной системы из трех элементов с двумя не взаимодействующими Энд; б) одна система с взаимодействующими Энд; в) орграф ВЭП с двумя взаимодействующими Энд, через микроконтроллер или элемент «4».

На рисунке №4 стрелками с номерами обозначены: 1 - элементы первого Энд; 2 - элементы второго Энд; 3 - дуги связей между элементами первого Энд; 4 - корреляционные дуги связей элементов систем из разных Энд; 5 - дуги связей между элементами второго Энд. В части №3в введены следующие обозначения: 1 - система верхнего уровня; 2- интерфейс RS-485; 3 - гальваническая развязка; 4 - микроконтроллер; 5 - драйвер; 6 - полупроводниковые ключи; 7 - датчик тока; 8 - обмотка; 9 - ротор; 10 - нагрузка; 11 -источники питания; 12 - датчик температуры обмотки; 13 - датчик положения ротора; 14 -усилитель тока.

Разработанный алгоритм состоит в следующем:

1) Задается «m» блочных структур-систем (рис. 4а) с «n» элементами в каждой и по ним строятся «p» орграфов $G_j = (V, E)$, $j \in [1, p] \in \mathbb{N}$ с вершинами $V = \{v_c^j\}$, $c \in [1, n] \in \mathbb{N}$, причем эти структуры могут быть связаны между собой и быть большой полиструктурой (рис 4б).

2) Задается полилинейная форма A с тензором смежности A_{im}^{jk} :

$$A = A_{im}^{jk} \underline{k}^i \otimes \underline{k}^m \otimes \overline{k}_j \otimes \overline{k}_k, \quad (14)$$

где $i \in [1, p]$, $j \in [1, p]$, $k \in [1, n]$, $m \in [1, n]$, $m, k, i, j \in \mathbb{N}$.

Элементы тензора A_{im}^{jk} задаются по правилу №1:

Правило №1: если на орграфе $G_j = (V, E)$ в полиструктуре есть дуга (v_f^j, v_g^j) то $a_{fg}^{jg} = 1$ или есть дуга (v_g^j, v_f^j) то $a_{fg}^{jf} = 1$, если дуга (v_z^j, v_x^j) отсутствует то $a_{zx}^{jz} = 0$ или если дуга (v_x^j, v_z^j) отсутствует то $a_{zx}^{jx} = 0$, причем «j» -здесь определяет номер системы. В случае учитывания междоменных взаимодействий (рис 4б,в 4), $a_{if}^{jg} = 1$ если дуга (v_f^j, v_g^i) полиструктуры существует (или есть корреляция) и $a_{ix}^{jz} = 0$ если дуга (v_z^j, v_x^i) отсутствует, причем для дуг обратно направленных действует тоже правило. Если корреляционные элементы не учитываются, то $a_{im}^{jk} = 0 \forall i, i \neq j$.

3) Задается полилинейная форма \mathcal{E} с тензором весов дуг \mathcal{E}_{im}^{jk} :

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{im}^{jk} \underline{k}^i \otimes \underline{k}^m \otimes \overline{k}_j \otimes \overline{k}_k, \quad (15)$$

где $i \in [1, p]$, $j \in [1, p]$, $k \in [1, n]$, $m \in [1, n]$, $m, k, i, j \in \mathbb{N}$.

Элементы тензора \mathcal{E}_{im}^{jk} задаются по следующему правилу №2 :

Правило №2: эксперт по физическим взаимосвязям выбирает долю передаваемого воздействия ε_{jf}^{ig} от вершины v_f^j к вершине v_g^i дуги (v_f^j, v_g^i) , при чем $0 < \varepsilon_{jf}^{ig} \leq 1$. В случае учитывания междоменных взаимодействий эксперт выбирает долю передаваемого воздействия ε_{ig}^{jf} от вершины v_f^j структуры или орграфа «j» к вершине v_g^i орграфа «i» дуги (v_f^j, v_g^i) полиструктуры. Причем для обратно направленных дуг действует тоже правило. Если корреляционные элементы (рис. 4б, в -4) не учитываются, то $\varepsilon_{im}^{jk} = 0, \forall i, i \neq j$.

4) Рассчитывается полилинейная форма A_ε с взвешенным тензором смежности ${}_\varepsilon A_{im}^{jk}$ по выражению:

$$A_\varepsilon = {}_\varepsilon A_{im}^{jk} \underline{k}^i \otimes \underline{k}^m \otimes \overline{k}_j \otimes \overline{k}_k = [A_{im}^{jk} \cdot \mathcal{E}_{im}^{jk}] \underline{k}^i \otimes \underline{k}^m \otimes \overline{k}_j \otimes \overline{k}_k, \quad (16)$$

где $i \in [1, p], j \in [1, p], k \in [1, n], m \in [1, n], m, k, i, j \in \mathbb{N}$

5) Задается полилинейная форма Θ с тензором импульсного воздействия Θ^{jk} :

$$\Theta = \Theta^{jk} \overline{k}_j \otimes \overline{k}_k, \quad (17)$$

где $j \in [1, p], k \in [1, n], j, k \in \mathbb{N}$

Причем полилинейная форма Θ определена в дискретном времени и эволюционная зависимость определяется выражением:

$$\Theta(t+1) = (\Theta^{im}(t) \otimes {}_\varepsilon A_{im}^{jk}) \overline{k}_i \otimes \overline{k}_m \otimes \underline{k}^i \otimes \underline{k}^m \otimes \overline{k}_j \otimes \overline{k}_k = (\Theta^{im}(t) \otimes {}_\varepsilon A_{im}^{jk}) \overline{k}_j \otimes \overline{k}_k, \quad (18)$$

Процедура изменения весов вершин орграфа в дискретном времени называется «распространения импульсного воздействия».

Причем в начальный момент времени тензор Θ^{jk} полилинейной формы Θ задается по правилу №4:

Правило №4: $\theta^{fg}(0) = \theta^{fg}$, если в системе с номером «f» на вершину v_g^f орграфа $G_f = (V, E)$ приходит импульсное воздействие. И $\theta^{rq} = 0$, если в системе с номером «r» на вершину v_q^r орграфа $G_r = (V, E)$ не приходит импульсное воздействие.

6) Определяется свертка-вектор Ξ полилинейной формы Θ :

$$\Xi = \Xi^k \overline{k}_k, \quad (19)$$

где $k \in [1, n], k \in \mathbb{N}$, а координаты Ξ^k определяется как:

$$\forall j; \Xi^k = \sum_{j=1}^p \Theta^{jk}, \quad (20)$$

где $j \in [1, p], k \in [1, n], j, k \in \mathbb{N}$

Выражение (15) обозначает: суммирование всех импульсных воздействий на каждую вершину в целом.

7) Определяется вектор W весов вершин системы с координатами W^k :

$$W = W^k \overline{k}_k, \quad (21)$$

где $k \in [1, n], k \in \mathbb{N}$

Причем вектор W определен в дискретном времени и эволюционная зависимость определяется выражением:

$$W(t+1) = W^k(t+1) \overline{k_k} = \left[\text{sat} \left(W^k(t) - W^k(t) \cdot \Xi^k(t) \right) \right] \overline{k_k}, \quad (22)$$

8) Производится расчет эволюции надежности системы в дискретном времени, согласно полученным зависимостям (14-22) и правилам.

Дополним правила заполнения тензоров A_{im}^{jk} и \mathcal{E}_{im}^{jk} , методикой заполнения по предварительно заданным матрицам смежности и весов дуг:

Правило №3:

Часть 1: Четырехмерные тензоры в условиях данной задачи заполняются относительно заданных матриц как: номер строки матрицы A или \mathcal{E} записывается в индекс «m» тензора A_{im}^{jk} или \mathcal{E}_{im}^{jk} , номер столбца матрицы записывается в индекс «k», номер Энд записывается сразу в два индекса «j» и «i».

Часть 2: Остальные элементы являются элементами корреляционных связей, и воздействие Энд с номером «R» на Энд с номером «L» будет выражаться в элементе с индексами принимающими значения $j=L, i=R, k=k, m=m$, причем «m» будет выражать номер вершины орграфа Энд «R» на которую приходит импульс в этом домене, а «k» будет выражать номер вершины орграфа Энд «L» на которую должен воздействовать импульс из домена «R», причем в одностороннем порядке.

По полученному алгоритму была написана программа на языке JavaScripti получено свидетельство о регистрации, которая позволяет проводить расчеты надежности сложных систем таких как ВЭПв условиях множества разнородных импульсных воздействий. Было проведено численное моделирование по структуре (рис. 3в), с учетом импульсного воздействия на источник питания (11 элемент). При одном домене, за 10 единиц времени, надежность процессора ВЭП упала с 0.999 до 0.6998; при двух доменах: с 0.999 до 0.4814; при двух доменах и одном корреляционном элементе 4-4: с 0.999 до 0.4606. Результаты моделирования при однотипных воздействиях совпали с результатами других, ранее опубликованных исследований моделей надежности вентильного привода, сделанных другими авторами.

Представленный алгоритм, не имеет аналогов на западе, он позволяет производить расчет изменения надежности многоэлементной системе, при разнотипных импульсных воздействиях, что, в свою очередь, позволяет заблаговременно выявлять «слабые» места и производить их дублирование, для повышения их надежности.

В пятой главе «Практическая реализация и экспериментальные исследования» с использованием теоретико-практических исследований, проведенных в предыдущих главах, и принципов относительно них разработанных, были проведены практическая реализация и экспериментальные исследования.

Для практической реализации был выбран синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов ДБ-72 (рис. 5а), производства ОАО "Миассэлектроаппарат". Для реализации цифровой системы управления, был

выбран «Комплект разработчика устройств управления электродвигателями» (рис. 5б) спроектированный на основе микроконтроллера STM32F303CBT6 с тактовой частотой 72 МГц, что позволяет выбрать малый шаг дискретизации.

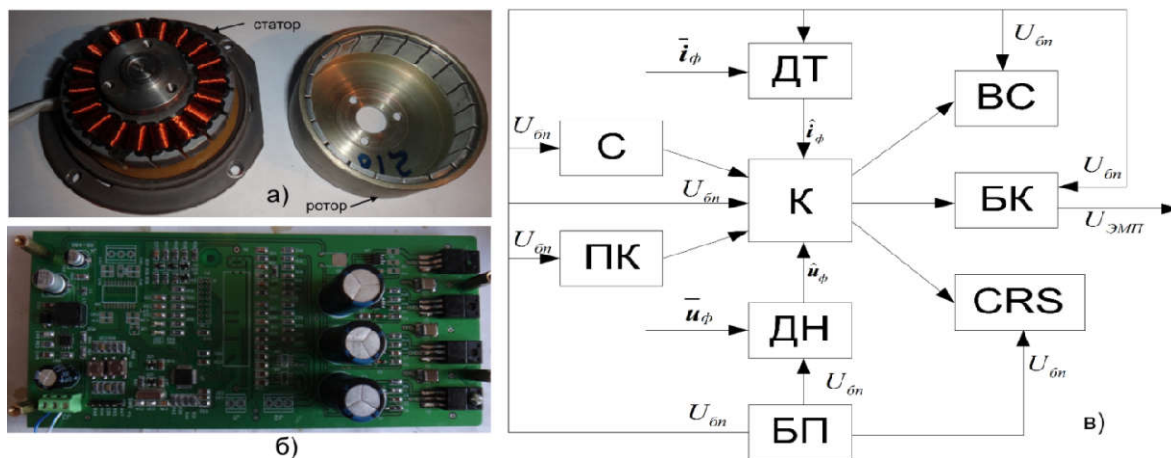


Рисунок 5 - Экспериментальный комплект

На рисунке №5 а) ДБ-72; б) Комплект разработчика; в) Структурная электрическая схема комплекта разработчика. На рис 3б введены следующие обозначения: БК - блок силовых ключей; ВС - блок выходных сигналов; К - блок контроллера; ПК - программатор контроллера; БП - блок питания; ДТ - датчики тока; ДН - датчики напряжения; CRS - блок связи RS-485; С - блок синхронизации.

II) В основе реализации ВЭП была взята функциональная схема рис. 1б. Для реализации ФИП, были сравнены различные виды его дискретизации, включая предлагаемую разработчиком самого фильтра. «Предлагаемая» схема дискретизации обладает существенным недостатком - она имеет структурную неустойчивость в виде знаменателя, который может принимать нулевые значения, что в свою очередь может привести к неисправности ВЭП. Был выбран - метод Эйлера, как вид дискретизации. Это привело к 20 разностным уравнениям, описывающих ФИП (6), которые согласно теореме Котельникова, устойчивы при шаге дискретизации равном 0.001с. По уравнениям был написан программный фрагмент кода, для «Комплекта разработчика».

III) Для проверки теоретических положений были поставлены эксперименты, сняты механические характеристики и осциллограммы переходных процессов.

1) Проверка работоспособности ВЭП при использовании ФИП:

В бездатчиковом режиме, без коррекции по углу коммутации, электропривод на базе комплекта и ДБ-72 справляется с поставленной задачей. При прямом пуске наблюдается малая колебательность (рис. 6б), по сравнению с теоретической моделью. При последовательном нагружении наблюдается апериодический переходный процесс (рис. 6г).

При проведении статистических замеров, случайная погрешность в статических режимах составила 0.008 об/с. Среднее отклонение составляет 0.111 ± 0.008 об/с, что выше приборной погрешности и вызвано как случайными помехами, так и погрешностью при настройке самого привода.

2) Опыт по увеличению скорости холостого хода ВЭП ДБ-72.

Для проверки максимальной скорости холостого хода, был изменен параметр #defineteta, на посчитанный оптимальный угол по формуле (9), который в градусах соответствует значению 1.138. Микроконтроллером были записаны восстановленные значения скорости вращения ротора, в двух режимах на холостом ходу: с коррекцией и без.

Приращение скорости, зафиксированное микроконтроллером при изменении угла коммутации, составляет:

$$\Delta_{\omega} = 2.02347 - 2.02316 = 0.00031 \text{ об/с}, \quad (23)$$

Путем регистрации значений скорости фототахометром DT3334В в течении 100 секунд с шагом в 2 секунды, были зафиксированы два режима: с коррекцией и без (рис б в), также представлены теоретические значения скоростей (рис ба).

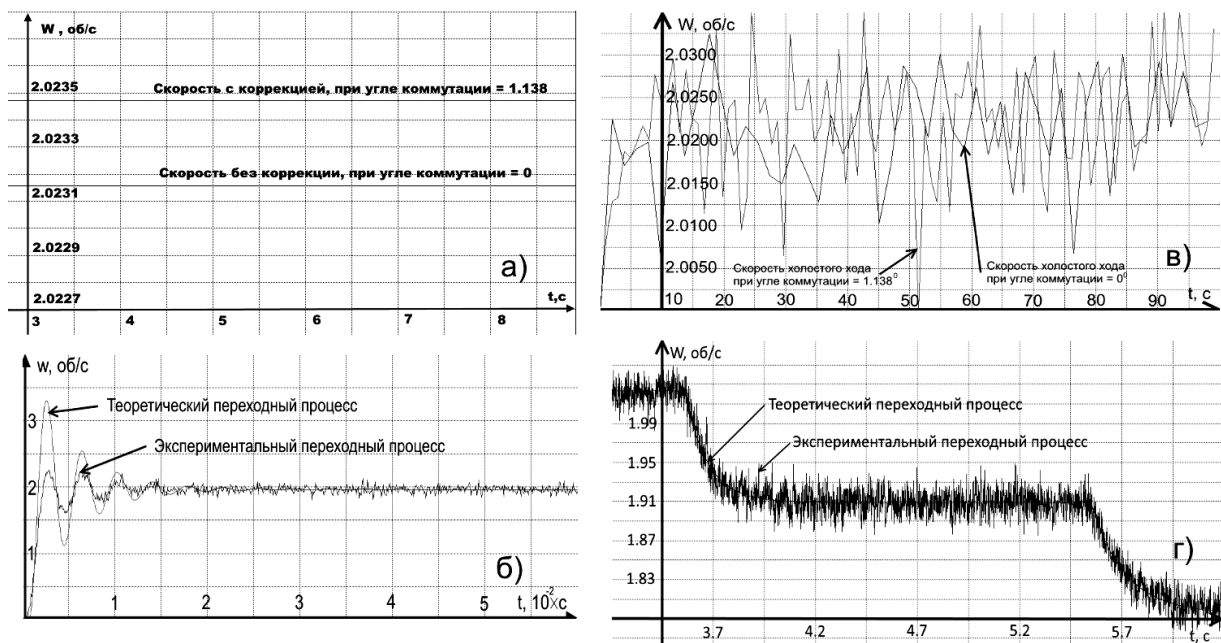


Рисунок 6 - Осциллограммы сравнительные, скорости вращения ВД

По рисунку бв явно не видно приращения скорости холостого хода. Однако если определить среднеарифметические значения за 100 секунд, то будут получены следующие значения:

$$\omega_{cp}(\theta = 0) = 2.02113 \text{ об/с}; \quad \omega_{cp}(\theta = 1.138^0) = 2.02146 \text{ об/с}, \quad (24)$$

Среднее квадратичное отклонение составляет:

$$\sigma_{\omega} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\omega_i - \omega_{cp})^2}{N(N-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{50} (\omega_i - \omega_{cp})^2}{50(50-1)}} = 8.347 \times 10^{-4} \text{ об/с}, \quad (25)$$

Тогда приращение скорости при изменении угла коммутации, составляет:

$$\Delta_{\omega} = \omega_{cp}(\theta = 1.138^0) - \omega_{cp}(\theta = 0) \pm \sigma_{\omega} = 0.00033 \pm 8.347 \times 10^{-4} \text{ об/с}, \quad (26)$$

Истинное значение приращения скорости определено в интервале $\pm 8.347 \times 10^{-4} \text{ об/с}$ среднеквадратичного отклонения с вероятностью 68 процентов.

Как видно из (26) и (23), теоретическое и практическое приращение скорости отличаются на 6%, что с достаточной точностью подтверждает положение о повышении скорости холостого хода. Малость приращения связана с малостью $\gamma\tau_3 \approx 0.0178$, что значительно ниже теоретического максимума $\gamma\tau_3 \approx 1.27$, необходимого для увеличения приращения скорости.

На базе предприятия СКБ Турбина разрабатывается привод турбогенератора, который должен осуществлять две функции: стартерную и генераторную. Для ускорения запуска двигателя была использована коррекция по оптимальному углу коммутации для достижения максимальной скорости холостого хода. За счет регулирования углом коммутации, удалось понизить время разгона на 5 секунд, и добиться скорости холостого хода 40000 об/мин.

3) Опыт повышения приращения электромагнитного момента.

Для проверки максимального электромагнитного момента был изменен параметр #defineteta на посчитанный оптимальный угол по формуле (10).

Исследована теоретическая и экспериментальная зависимость приращения момента при нагружении двигателя, в зависимости от скорости вращения ротора двигателя.

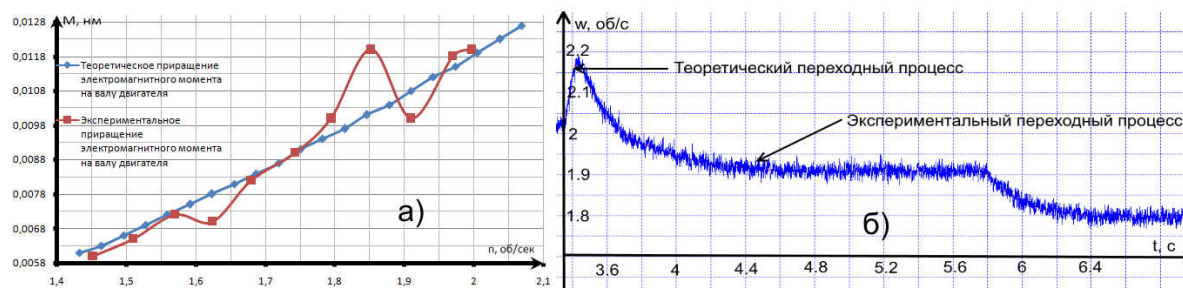


Рисунок 7 - а) Графики приращения электромагнитного момента на валу двигателя, в зависимости от скорости при оптимальных углах коммутации б) Осциллограмма переходного процесса скорости ВД в режиме макс. момента.

Абсолютная погрешность полученных значений для графика (рис. 7а) будет определяться максимальным отклонением:

$$\Delta_{\mu_{эм}} = \pm 0.002 \text{ Нм}, \quad (27)$$

Также необходимо заметить, что переходные процессы скорости (рис. 7б) происходят нелинейно, при первичном нагружении наблюдается перерегулирование, когда при вторичном наблюдается апериодический переходный процесс. Малость приращения связана с значением $\tau_3 \bar{\varepsilon} \approx 0.0182$ что значительно ниже теоретического максимума $\tau_3 \bar{\varepsilon} \approx \sqrt{3}$, необходимого для увеличения приращения момента.

На основании приращений, полученных теоретически и косвенно измеренными, также рассмотрев анализ величины приращения как зависимости от характеристик двигателя, можно прийти к выводу: что положение, о повышении электромагнитного момента - подтверждено

Теоретические положения, связанные с углом коммутации для режима максимального электромагнитного момента, были внедрены в силовой привод

Бетононасоса, что позволило повысить номинальный момент на 80 Нм, что было зафиксировано на испытательном стенде ООО Зеленая энергия.

Приложения к диссертационной работе. В приложении А находятся Свидетельство регистрации программы. В приложении Б находится листинг программы по управлению электроприводом. В приложениях В и Г находятся справки о внедрении результатов работы на производстве. В приложениях с Д по П размещены экспериментальные данные, необходимые для статистического анализа привода в разных режимах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дополнена теория ВЭП в части: анализа электромагнитных процессов в динамических режимах; расширения диапазона регулирования выходных координат; повышения энергетических показателей; создания алгоритмов вычисления положения ротора по косвенным данным; методики проектирования привода с программным датчиком положения ротора; поиска путей обеспечения заданных показателей надежности привода.

Конкретные научные и практические результаты работы выражаются в следующем:

1. Проанализированы существующие соотношения СО в электромеханике. Выявлено, что СО в электромеханике используются условно, взаимосвязи между ними устанавливаются из геометрических соображений, и простейшей механики. Однако для расчета ЭМ полей в динамике, целесообразно ужесточить связи между СО. Составлен алгоритм расчета аналитических выражений для любых СК и произвольно движущихся СО.

2. Составлена уточненная методика расчета полевой задачи, которая использует новые аналитические выражения соотношений между произвольно движущимися СО. Данная методика позволяет корректно поставить краевую задачу для нахождения полей в сложных ЭМП.

3. Синтезирована методика преобразований системы дифференциальных уравнений в частных производных Максвелла к системе обыкновенных дифференциальных уравнений.

4. Исследован спектр ОФ, в теории наблюдателей. Был выбран оптимальный ОФ, для восстановления не измеряемых координат и параметров с помощью которых и решается задача синтеза бездатчикового ВЭП. Выявлено: наиболее оптимальным для нелинейных, стохастических, непрерывных, сосредоточенных дифференциальных уравнений синхронного двигателя является - фильтр инвариантного погружения. Выбранный ФИП оказался 20 порядка, поэтому было произведено редуцирование, которое в итоге привело к созданию фильтра 11 порядка.

Проведено математическое моделирование работ полученных фильтров, произведено их сравнение. Выявлено: ФИП полностью справляется с поставленными задачами как в динамике, так и в статике; редуцированный ФИП,

удовлетворительно справляется с задачами в динамике и отлично справляется в статике.

5. Произведен аналитический вывод выражений оптимальных углов коммутации для следующих режимов: минимальные активные потери; минимальные реактивные потери; минимальные полные электрические потери; максимальный электромагнитный момент; максимальная скорость вращения вала двигателя. Даны рекомендации по реализации полученных выражений.

6. Разработан алгоритм моделирования распространения по системе разнотипных импульсных воздействий, основан на тензорно-дискретном математическом аппарате, который позволяет учесть корреляционные междоменные связи, между элементами системы в разных Энд. Междоменные корреляционные связи технически позволяют рассчитывать надежность системы, при взаимодействии импульсных воздействий разной природы в одной системе.

Дополнена соответствующая теория и разработана методика расчета распространения по системе разнотипных импульсных воздействий, проведены расчеты на основе графа ВЭП с синхронным двигателем.

Разработана программа на языке JavaScript, позволяющая производить расчет по алгоритму моделирования распространения по системе разнотипных импульсных воздействий.

7. Проведен анализ существующего дискретного фильтра универсального относительно периода дискретизации, показано: что, при применении к ВЭП, он имеет структурные неустойчивости, вызванные появлением нуля в знаменателе переменных коэффициентов. На основании этого, рассмотрены различные виды дискретизации. Выявлено: что для фильтра инвариантного погружения наиболее эффективен метод Эйлера.

8. Разработан программный фрагмент на языке C, для программного комплекса комплекта разработчика устройств управления электродвигателями. Данная программа реализует дискретную формулировку ФИП, который позволяет оценивать такие не измеряемые значения, как момент, скорость, угол вращения вала двигателя. При написании программы использован целочисленный стандарт чисел I12Q20, позволяющий отказаться от чисел с плавающей точкой, что, в свою очередь, увеличивает производительность микроконтроллера на каждом шаге дискретизации.

9. Были проведены эксперименты по проверке работоспособности ВД на базе ДБ-72_40_1000 в условиях замыкания по оцениваемому углу поворота ротора. Выявлен: уверенный пуск и работоспособность алгоритма в условиях сложного задания. Также проведен эксперимент по использованию оптимального угла коммутации, повышающего скорость холостого хода. Выявлено: повышение скорости холостого хода. Значение приращения мало в связи с малым $\gamma\tau_3$ по сравнению с максимальными. Проведен эксперимент по повышению электромагнитного момента, зафиксировано приращение момента. Выявлено: повышение электромагнитного момента, приращение мало в связи с малым $\tau_3\epsilon$ по сравнению с максимальными теоретическим.

ПУБЛИКАЦИИ

В журналах рекомендованных ВАК России:

1. Хафизов Г.Т. Некоторые способы регулировки выходных параметров электропривода с вентильным двигателем при векторном управлении / Г.Т. Хафизов, С.Г. Воронин // Электротехнические системы и комплексы - 2016.- №1 - С. 10-13

2. Хафизов Г.Т. Моделирование процесса пуска двигателя внутреннего сгорания электрическим стартером // Г.Т. Хафизов, С.Г. Воронин, Н.В. Клиначев, А.И. Согрин, Д.В. Коробатов, Н.Ю. Кулева, А.С. Кульмухаметова // Вестник Южно-уральского государственного университета серия "Энергетика" - 2015. - №2(15).- С. 41-49

3. Хафизов Г.Т. Использование фильтров инвариантного погружения в бездатчиковой системе векторного управления вентильным двигателем // Г.Т. Хафизов, Д.А. Курносков, С.Г. Воронин, // Известия Уральского государственного горного университета - 2016. - №4(44).- С. 60-68

В других изданиях

4. Хафизов Г.Т. Индетификация угла коммутации синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов / Г.Т. Хафизов, С.Г. Воронин // Материалы XXXIV Всероссийской конференции посвященной 90-летию со дня рождения академика В.П. Макеева - М.: - 2014.- С. 163-169.

5. Хафизов Г.Т. Регулирование скорости электропривода с вентильным двигателем при векторном управлении / Г.Т. Хафизов, Н.С. Архипова // Материалы 53-й международной конференции Мехатроника и автоматизация - 2015.- С. 46-47.

6. Хафизов Г.Т. Стабилизация скорости вращения коллекторного двигателя переменного тока в условиях девиации амплитуды и частоты напряжения сети питания / Г.Т. Хафизов, С.Г. Воронин // Материалы VIII международной научной конференции "Тинчуринские Чтения" - К.: -2013. - С. 110-111.

7. Хафизов Г.Т. Программа расчета распространения разнотипных импульсных воздействий в теории надежности. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016663032, 28 ноября 2016 г.

Хафизов Глеб Тагирович
ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОМОМ С
РЕГУЛИРОВАНИЕМ УГЛА КОММУТАЦИИ

Специальность 05.09.03
«Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного
университета

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1. Тираж 80 экз. Заказ

Отпечатано в типографии издательства ЮУрГУ. 454080, г. Челябинск,
пр. им. В.И.Ленина, 76.