

На правах рукописи



Шишов Дмитрий Михайлович

ТРАНЗИСТОРНЫЙ РЕГУЛЯТОР БЕЗДАТЧИКОВОГО БЕСКОЛЛЕКТОРНОГО
ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА БАЗЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЯ
ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЙ

Специальность 05.09.03 Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2014 г.

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» ФГБОУВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель:

Пенкин Владимир Тимофеевич
доктор технических наук, с.н.с. кафедры
«Электроэнергетические,
электромеханические и биотехнические
системы» МАИ (НИУ).

Официальные оппоненты:

Геча Владимир Яковлевич
Доктор технических наук, зам. генерального
директора по научной работе ОАО
«Корпорация ВНИИЭМ»

Коняхин Сергей Федорович
Кандидат технических наук, зам. гл.
конструктора ОАО «Аэроэлектромаш»

Ведущая организация:

ФГБОУВПО «Ивановский государственный
энергетический университет имени В.И.
Ленина», г. Иваново

Защита состоится «25» декабря 2014 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 при ФГБОУВПО «МАИ (НИУ)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское ш., д.4, Ученый совет МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Отзывы на автореферат в количестве двух экземпляров, заверенных печатью, просим направлять по указанному адресу.

Автореферат разослан «__» _____ 2014 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 212.125.07
к.т.н.



Степанов В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Объектом исследования данной работы является система, состоящая из синхронной машины с постоянными магнитами (ПМ) на роторе и электронного регулятора, осуществляющего коммутацию фаз (секций) обмотки якоря, в соответствии с определенным законом. Регулятор состоит из инвертора напряжения, выполняющего роль коммутатора, и системы управления его полупроводниковыми ключами. Такая система получила наименование бесколлекторного двигателя постоянного тока (БДПТ).

Благодаря своим высоким эксплуатационным характеристикам, БДПТ являются наиболее перспективными электрическими машинами в диапазоне малых и средних мощностей, особенно – для моментных систем электропривода.

Электропривод на основе БДПТ все более широко используется в таких областях техники и промышленности, как приборная автоматика, станкостроение и робототехника, аэрокосмическая техника, насосное и компрессорное оборудование, медицинская техника и др.

Особенно актуальна эта проблема для электрических беспилотных аппаратов, а также при реализации проекта полностью электрифицированного самолета.

В 70-х годах начали появляться идеи создания систем управления БДПТ без использования датчиков положения ротора (ДПР). Это направление исследований возникло в связи с тем, что наличие узла ДПР существенно ограничивает область применения такого привода. Датчики не могут использоваться при высокой температуре окружающей среды (свыше 125 °С), сильной вибрации. Кроме того, они занимают дополнительное место в конструкции двигателя и увеличивают его стоимость. Так же существуют технические задачи, предполагающие значительную удаленность электродвигателя от его блока управления. В таких условиях ДПР использовать либо крайне сложно, либо совсем невозможно. При использовании бездатчиковой системы снижается сложность монтажа системы из-за отсутствия дополнительных электрических связей. В приводах средней мощности необходимо выносить провода, по которым проходят сигналы от датчиков, в отдельный жгут для устранения влияния электромагнитных помех от силовых линий.

Несмотря на значительные успехи в область разработки методов бездатчикового управления БДПТ, остается достаточно много проблем, связанных в первую очередь со сложностью управления двигателем на низких частотах вращения. Предлагаемые подходы зачастую требуют существенного усложнения конструкции двигателя или системы управления, что негативно сказывается на показателях экономической эффективности. Актуальность решения данной задачи состоит в возможности отказа от использования понижающих редукторов, что приводит к снижению массы и габаритов электропривода.

Таким образом, решение задачи бездатчикового управления БДПТ на низких частотах вращения и разработка регулятора позволит создать

электропривод с хорошими перспективами по внедрению его в качестве исполнительного механизма в области авиационной и космической техники.

Цель диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование способа бездатчикового управления БДПТ с ПМ на основе анализа противо-ЭДС фаз якоря, вычисленных через потокосцепления, позволяющего управлять двигателем на низких частотах вращения.

Задачи исследований.

1. Разработка алгоритма, позволяющего определить моменты коммутации фаз путем анализа противо-ЭДС трехфазной обмотки якоря при 120-градусной и 180-градусной коммутации.

2. Разработка способа вычисления противо-ЭДС фаз якоря с помощью измеряемых электрических параметров статора.

3. Разработка способов регулирования частоты вращения бездатчикового БДПТ.

4. Разработка структурных, функциональных и схемотехнических решений для транзисторного регулятора на базе разработанного бездатчикового метода управления БДПТ.

5. Разработка имитационных моделей отдельных блоков регулятора и устройства в целом для моделирования с применением пакета программ OrCad 9.2.

6. Компьютерное моделирование отдельных блоков и всей системы в целом при различных параметрах питания и типах нагрузки.

Научная новизна теоретических положений и результатов экспериментальных исследований, полученных автором.

1. Предложен способ определения моментов коммутации фаз БДПТ на основе анализа вычисленных противо-ЭДС.

2. Разработан способ вычисления потокосцеплений фаз якоря БДПТ с помощью измеряемых потенциалов и токов в трехфазной системе без вывода средней точки.

3. Предложено использовать апериодическое звено в качестве интегратора для вычисления потокосцеплений фаз.

4. Предложен способ вычисления противо-ЭДС фаз якоря БДПТ на основе вычисленных потокосцеплений фаз с использованием частотного корректирующего коэффициента.

5. Предложен способ вычисления частоты вращения ротора БДПТ с использованием вычисленных сигналов потокосцеплений фаз на основе 18-ти импульсной схемы выпрямления.

6. Предложен способ вычисления частотного корректирующего коэффициента на основе аналоговых перемножителей сигналов.

7. Получены аналитические соотношения для задания закона изменения частоты вращения электромагнитного поля якоря при разгоне БДПТ.

8. Разработаны имитационные модели блоков регулятора и устройства в целом для моделирования с применением пакета программ OrCad 9.2.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Разработанный в диссертационной работе метод бездатчикового определения положения ротора БДПТ с ПМ позволяет создать электропривод малой мощности с возможностью работы на низких частотах без использования механического редуктора, что снижает массогабаритные показатели. Такой электропривод может найти применение в ряде отраслей промышленности и прежде всего в авиастроении.

Разработанные схемотехнические решения позволяют решить ряд вопросов при проектировании систем электропривода на базе БДПТ.

Разработанная имитационная модель транзисторного регулятора БДПТ на основе вычислителя потокосцеплений фаз якоря может быть использована при проведении экспериментальных исследований в области управления электроприводом.

Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов.

При решении поставленных задач использовались методы теоретической электротехники, электромеханики, теории автоматического управления и электроники. Для проведения экспериментальных исследований были применены методы теории моделирования процессов и систем. Для создания имитационных моделей блоков регулятора, а также для проверки схемотехнических решений был применен пакет программ *OrCad 9.2*.

Положения, выносимые на защиту.

1. Сравнительный анализ достоинств и недостатков существующих бездатчиковых методов управления БДПТ.
2. Теоретическое обоснование бездатчикового метода определения положения ротора БДПТ на основе вычислителя потокосцеплений фаз якоря.
3. Способ определения моментов коммутации фаз якоря по вычисленным противо-ЭДС.
4. Способы регулирования частоты вращения бездатчикового БДПТ.
5. Способы стабилизации частоты вращения бездатчикового БДПТ.
6. Структурные, функциональные и схемотехнические решения транзисторного регулятора на базе разработанного метода.
7. Имитационные модели блоков регулятора и устройства в целом в программе PSpice Schematics.

8. Результаты компьютерного моделирования переходных и установившихся режимов для различных типов нагрузки двигателя.

Реализация результатов.

Результаты диссертационной работы использованы в НИОКР по договору №41230-03100/НТ-25/08/10 по теме «Разработка конструкции плат блоков статических преобразователей и проведение испытаний электроприводов медицинского и промышленного назначения» и НИОКР по договору № 41490-03100/10-Н/10 по теме «Экспериментальные исследования модулей электромеханических, статических конверторных и световых энергосберегающих преобразователей, с последующей разработкой конструкции и топологии плат». Отдельные результаты использовались в работах по государственному контракту № 16.518.11.7009, шифр «2011-1.8-518-002-128».

Разработанные автором отдельные схемотехнические решения применялись при разработке и производстве бездатчиковых регуляторов БДПТ в ООО «КОРСИ», а также статических полупроводниковых преобразователей в ООО «ТРАНСКОНВЕРТЕР» что подтверждается соответствующими актами.

Материалы диссертации используются в курсах лекций по дисциплинам «Динамика и регулирование преобразователей энергии», а также «Моделирование динамических процессов и систем».

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались автором на следующих российских конференциях:

1. Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике-2012»;
2. Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике-2014».

По теме диссертации автором опубликовано 3 статьи в отечественных научных журналах, рекомендованных ВАК.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определен объект исследования, его признаки, область использования, сформулированы цель работы, направления исследований, актуальность. Описаны методы исследований, показаны достоверность, научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Приведены сведения о реализации результатов и апробации работы.

В первой главе рассмотрены основные особенности конструкции БДПТ с ПМ и проведен сравнительный анализ достоинств и недостатков существующих бездатчиковых методов управления. Условно их можно разбить на два больших класса:

1. Методы, основанные на измерениях и анализе электрических и электромагнитных параметров электрической машины.
2. Методы, основанные на использовании математической модели синхронной машины для задания и корректировки режима питания фаз якоря.

К первому классу относятся неадаптивные методы:

- основанные на измерении противо-ЭДС отключенной фазы;
- на основе анализа тока через обратные диоды инвертора;
- основанные на вычислении потокосцеплений фаз.

Так же можно включить в данный класс методы, основанные на периодических изменениях параметров двигателя вследствие анизотропии магнитных свойств ротора.

Ко второму классу относятся адаптивные методы:

- с адаптивной базовой моделью;
- на основе различных наблюдателей состояния;
- на основе нейронных сетей и нечеткой логики.

Методы, относящиеся к первому классу, характеризуются относительной простотой алгоритмов определения моментов коммутации, однако имеют ряд недостатков, главными из которых являются:

- отсутствие возможности реализации 180-градусного закона коммутации ключей инвертора в связи с тем, что одна из фаз используется для измерения противо-ЭДС;
- необходимость в ведении временной задержки на включение очередного состояния инвертора, которая зависит от текущей частоты вращения ротора, что приводит к росту величины ошибки в определении угла поворота ротора и, как следствие, ошибки формирования сигналов управления инвертором при динамических режимах работы привода;
- для некоторых методов характерна необходимость в наличии дополнительных источников питания: постоянного напряжения, гальванически развязанных с источником питания инвертора, либо высокочастотных переменного напряжения, что приводит к усложнению и удорожанию конструкции.

Второй класс способов бездатчикового управления характеризуется высокой точностью определения положения ротора и хорошими динамическими характеристиками. К недостаткам можно отнести следующие:

- зависимость ошибки формирования сигналов управления от точности определения параметров обмотки якоря, используемых в математической модели;
- сложность и трудоемкость расчетов моментов переключения в связи с необходимостью преобразования координат.

Общими недостатками всех бездатчиковых методов управления БДПТ с ПМ являются:

- относительная сложность определения угла поворота ротора, так как для этого необходимо применять специальные алгоритмы обработки измеряемых электрических сигналов;
- отсутствие информации о положении ротора в состоянии покоя;
- сложность определения моментов коммутации в связи с воздействием помех;
- сложность управления БДПТ на низких и сверхнизких частотах вращения.

На основе анализа достоинств и недостатков известных методов бездатчикового управления был сделан вывод, что наиболее перспективным для определения моментов коммутации является метод на основе вычисления противо-ЭДС фаз. Сформулирован ряд задач, которые необходимо решить, чтобы иметь возможность управлять бездатчиковым БДПТ с ПМ в диапазоне низких частот вращения.

Во второй главе приводится теоретическое обоснование метода бездатчикового управления БДПТ с ПМ на основе анализа вычисленных противо-ЭДС.

Для обеспечения максимального значения среднего электромагнитного момента необходимо формировать сигналы переключения, соответствующие определенному углу поворота ротора. Информация о моментах переключения может быть получена из значений противо-ЭДС фаз, которые связаны с потокосцеплениями следующим соотношением:

$$e_{\phi} = -\frac{d\Psi_{\phi}}{dt} \quad (1)$$

На Рисунке 1 представлена схема силовой части инвертора и фаз якоря БДПТ, которая может работать как 120-градусный, так и 180-градусный законах коммутации. На Рисунках 2 и 3 показано как по сигналам противо-ЭДС определяются моменты переключения транзисторов.

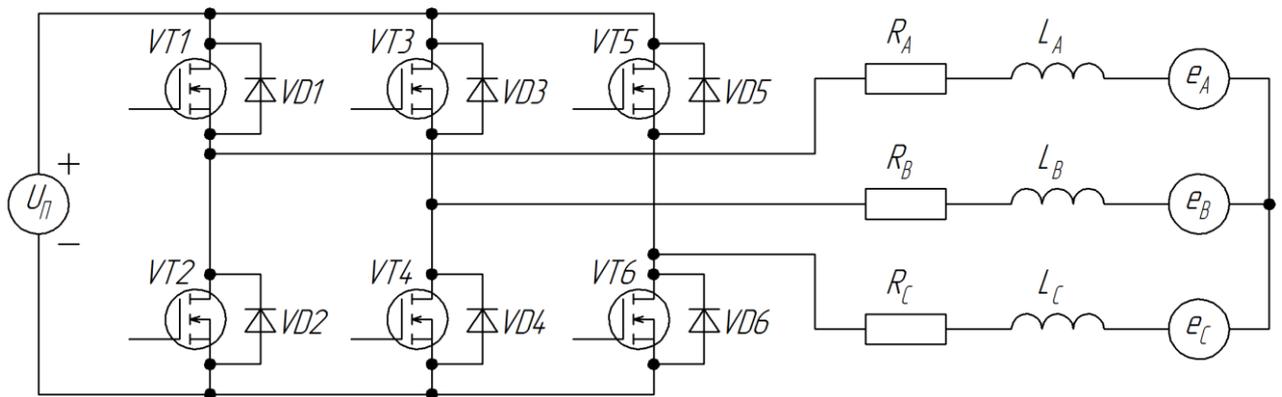


Рисунок 1 – Схема силовой части инвертора и фаз якоря.

Важной особенностью этих способов является независимость точности определения моментов коммутации от амплитуды противо-ЭДС. Это значит, что вычисленные противо-ЭДС должны соответствовать реальным только по фазе. Сигналы такого рода предложено называть псевдо-ЭДС.

Рассмотрены два способа вычисления псевдо-ЭДС по измеряемым фазным потенциалам и токам при известных значениях индуктивности и активных сопротивлений фаз:

- использующий операцию дифференцирования;
- использующий операцию интегрирования.

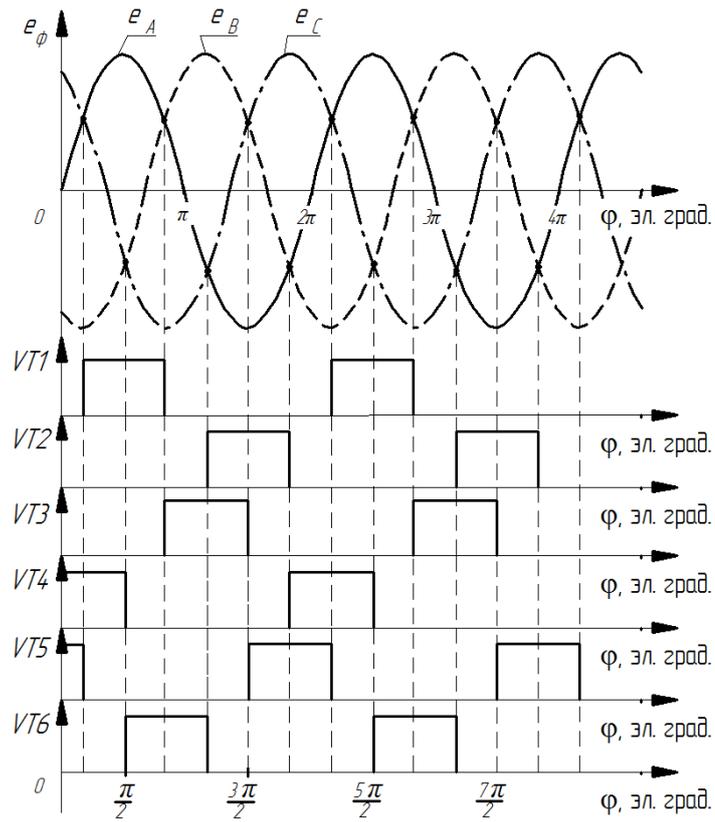


Рисунок 2 - Формирование 120-градусного закона управления ключами инвертора по сигналам противо-ЭДС фаз.

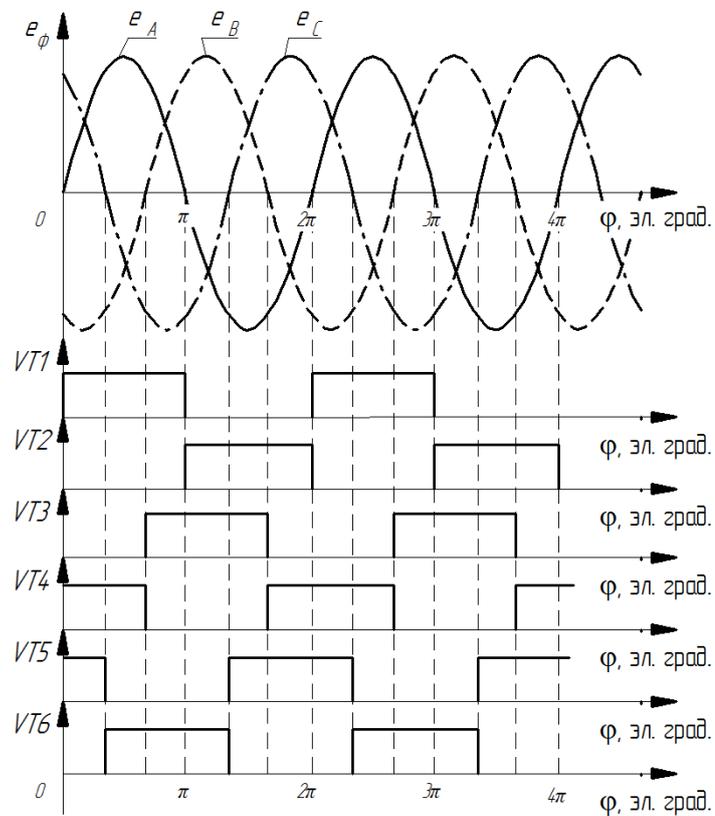


Рисунок 3 - Формирование 180-градусного закона управления ключами инвертора по сигналам противо-ЭДС фаз.

Оба способа основываются на решении дифференциальных уравнений, записанных на основании законов Кирхгофа для трех фаз якоря, соединенных по схеме «звезда»:

$$\begin{cases} i_A + i_B + i_C = 0 \\ u_A = i_A R_A + L_A \frac{di_A}{dt} + e_A \\ u_B = i_B R_B + L_B \frac{di_B}{dt} + e_B \\ u_C = i_C R_C + L_C \frac{di_C}{dt} + e_C \end{cases}, \quad (2)$$

где i_A, i_B, i_C – токи фаз;

u_A, u_B, u_C – фазные напряжения;

R_A, R_B, R_C – активные сопротивления фаз;

L_A, L_B, L_C – индуктивности рассеяния фаз.

Для вычисления псевдо-ЭДС сначала необходимо знать фазные напряжения u_A, u_B, u_C , которые предложено вычислять через измеренные фазные потенциалы $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$. При этом были приняты следующие допущения:

$$E_{mA} + E_{mB} + E_{mC} = 0, \quad (3)$$

где E_{mA}, E_{mB}, E_{mC} – амплитуды противо-ЭДС фаз;

$$L_A = L_B = L_C = L, \quad (4)$$

$$R_A = R_B = R_C = R. \quad (5)$$

Согласно экспериментальным исследованиям, проводившимся на реальных БДПТ малой мощности (до 100 Вт) с цилиндрическим ПМ на роторе (производства ООО «РЭЛМА-СТАРТ», РФ), было установлено, что индуктивность фазы в зависимости от положения ротора меняется относительно среднего значения на 7,5%.

С учетом (3) - (5), фазные напряжения могут быть вычислены следующим образом:

$$\begin{cases} u_A = \frac{2\varphi_A - \varphi_B - \varphi_C}{3} \\ u_B = \frac{2\varphi_B - \varphi_A - \varphi_C}{3} \\ u_C = \frac{2\varphi_C - \varphi_A - \varphi_B}{3} \end{cases}, \quad (6)$$

Зная фазные напряжения, можно вычислить фазные противо-ЭДС следующим образом, используя операцию дифференцирования:

$$\begin{cases} e_A = u_A - i_A R_A - L_A \frac{di_A}{dt} \\ e_B = u_B - i_B R_B - L_B \frac{di_B}{dt} \\ e_C = u_C - i_C R_C - L_C \frac{di_C}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

Однако, реализация на практике операции дифференцирования нежелательна по следующим причинам.

1. Идеальное дифференцирующее звено физически нереализуемо.
2. Дифференцирующее звено усиливает высокочастотные помехи, ухудшая соотношение сигнал/шум.
3. Использование дифференцирующего звена накладывает ограничение на уровень входного сигнала из-за возможности насыщения.

Кроме того, проведенные автором исследования показали, что использование операции дифференцирования приводит к относительно большой ошибке определения моментов коммутации, при относительно небольших отклонениях параметров модели от параметров двигателя.

Для устранения описанных недостатков, было предложено вычислять псевдо-ЭДС через потокосцепления фаз с помощью операции интегрирования. Вычисления потокосцеплений производятся согласно следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} \Psi_A = \int (u_A - i_A R_A) dt - L_A i_A \\ \Psi_B = \int (u_B - i_B R_B) dt - L_B i_B \\ \Psi_C = \int (u_C - i_C R_C) dt - L_C i_C \end{cases} \quad (8)$$

При этом псевдо-ЭДС, на основании закона электромагнитной индукции однозначно связаны с потокосцеплениям, как показано на векторной диаграмме, приведенной на Рисунке 4.

Достоинства применения операции интегрирования заключаются в следующем.

1. Интегратор легко реализуем на практике.
2. Интегратор мало чувствителен к ВЧ помехам.

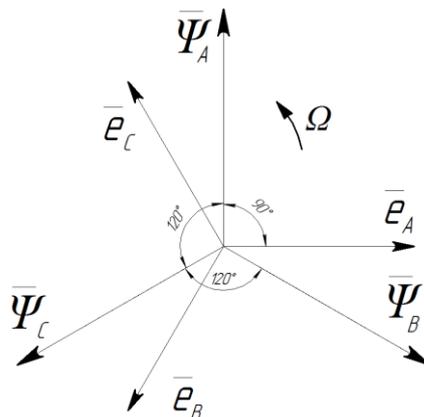


Рисунок 4 – Векторная диаграмма потокосцеплений и псевдо-ЭДС.

Однако, при интегрировании необходимо знать начальное положение ротора, определение которого является сложной задачей. Кроме того, наличие паразитных сигналов смещения может привести к недопустимой ошибке.

Для решения этих проблем предложено использовать вместо интегратора апериодическое звено, выполняющее роль псевдоинтегратора. На Рисунке 5 показаны ЛАЧХ и ЛФЧХ интегрирующего и апериодического звеньев. Видно, что после частоты $\omega_{гр}$ их частотные характеристики идентичны, а, следовательно, и фазовые сдвиги между потокосцеплениями и псевдо-ЭДС вычисленные с помощью интегратора и псевдоинтегратора будут одинаковыми. Однако, в диапазоне частот меньше $\omega_{гр}$ ФЧХ интегратора и апериодического звена отличаются. При этом ФЧХ апериодического звена определяется выражением:

$$\varphi(\omega) = -\arctg(\omega T) \quad (9)$$

Это значит, что фазовый угол вычисленного с помощью псевдоинтегратора сигнала будет отличаться от реального.

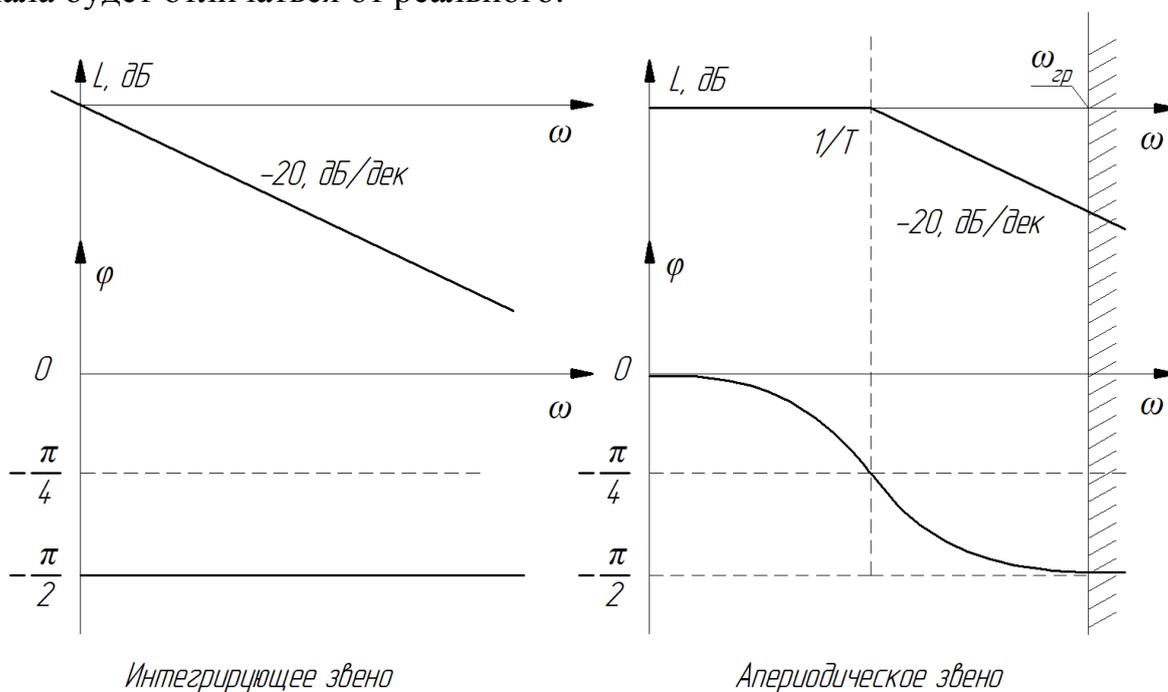
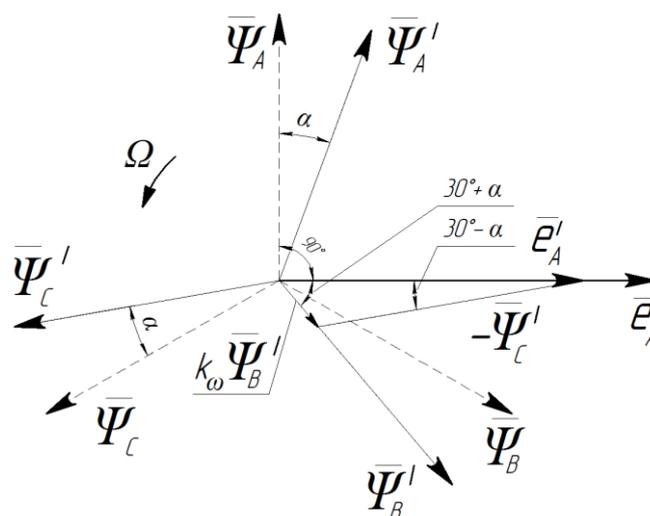


Рисунок 5 – ЛАЧХ и ЛФЧХ интегрирующего и апериодического звеньев.

Для решения этой проблемы при вычислении псевдо-ЭДС было предложено вводить корректирующий коэффициент k_ω . На Рисунке 6 показано на примере фазы А, как с помощью вычисленных потокосцеплений можно перейти к сигналам псевдо-ЭДС.

$$\begin{cases} \bar{e}'_A = k_\omega \bar{\Psi}'_B - \bar{\Psi}'_C \\ \bar{e}'_B = k_\omega \bar{\Psi}'_C - \bar{\Psi}'_A \\ \bar{e}'_C = k_\omega \bar{\Psi}'_A - \bar{\Psi}'_B \end{cases} \quad (10)$$



$\Psi_{A,B,C}$ – вектора реальных потокоцеплений фаз; $\Psi'_{A,B,C}$ – вычисленные потокоцепления фаз; e'_A – вектор псевдо-ЭДС фазы А; e_A – вектор реальной противо-ЭДС фазы А; α – угол между реальными векторами потоков фаз и вычисленными.

Рисунок 6 – Вычисление фазных псевдо-ЭДС.

При этом, k_ω находится по теореме синусов из треугольника, образованного векторами: e'_A ; $-\Psi'_C$; $k_\omega \Psi'_B$.

$$k_\omega = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{6} - \alpha\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right)}, \quad (11)$$

где $\alpha = \frac{\pi}{2} - \arctg(\omega T)$ – угол, на который вычисленные сигналы опережают реальные.

Недостаток предложенного метода заключается в том, что псевдо-ЭДС могут быть вычислены только при вращающемся роторе. Поэтому при запуске двигателя сигналы на инвертор необходимо подавать от внешнего задающего генератора, а затем переходить на режим самокоммутации по вычисленным сигналам.

Для вычисления потокоцеплений и псевдо-ЭДС фаз применяются линейные операции сложения и умножения на число, которые достаточно просто реализуются на практике. Наибольшую сложность представляет собой разработка схемотехнического решения для вычисления корректирующего коэффициента. В работе предложено использовать для этой цели аналоговые перемножители сигналов.

Можно показать, что выражение вида:

$$y = \sin(\arctg(x)), \quad (12)$$

к которому сводится формула (11), можно заменить следующим:

$$y = \sqrt{\frac{x^2}{1+x^2}}, \quad (13)$$

где $x = \omega T$. На Рисунке 7 приведены схемотехнические решения, комбинируя которые, можно составить схему, производящую вычисления согласно (13).

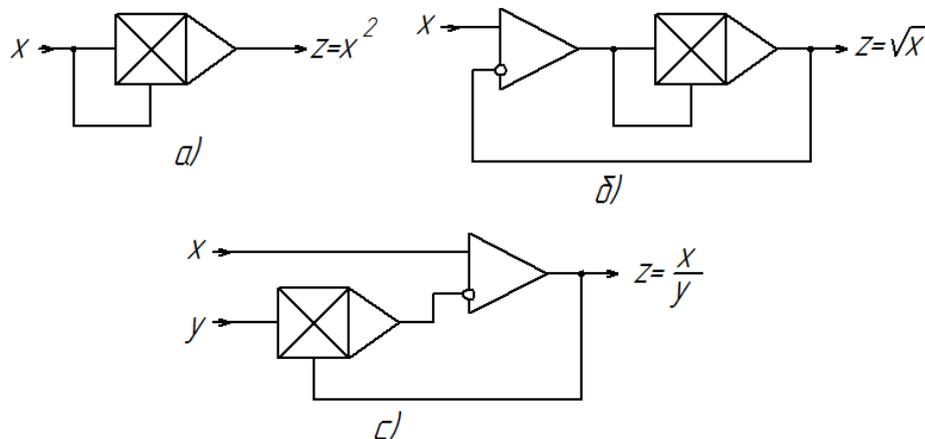


Рисунок 7 – Схемы на базе перемножителей аналоговых сигналов.

Третья глава посвящена разработке функциональных и схемотехнических решений для блоков регулятора, а также их моделированию в ППП OrCad 9.2.

Рассмотрена проблема пуска бездатчикового БДПТ и предложены функциональные и схемотехнические решения для пускового блока. Получены аналитические зависимости закона изменения частоты пусковых импульсов для различных типов нагрузки.

На Рисунке 8 представлен разработанный автором алгоритм управления бездатчиковым БДПТ с ПМ, обеспечивающий регулирование и стабилизацию частоты вращения ротора.

Регулирование частоты вращения производится путем изменения среднего значения напряжения питания фаз двигателя. Достигается это за счет управления скважностью выходных импульсов ШИМ-модуля.

Предложенный алгоритм обеспечивает стабилизацию частоты вращения двигателя при изменении напряжения питания и момента нагрузки. Для этого вырабатываются компенсирующие сигналы, суммирующиеся с напряжением $U_{упр}$, задающим скважность импульсов ШИМ.

На Рисунке 9 представлена структурная схема регулятора БДПТ на базе вычислителя потокосцеплений реализующая выше приведенный алгоритм.

При пуске БДПТ, когда информация о положении ротора отсутствует, набор частоты вращения происходит за счет коммутации фаз по сигналам с пускового блока. При достижении двигателем некоторой пороговой частоты вращения, ОПП формирует сигнал на переход к режиму самокоммутации по

информации с ВБ. Пороговое значение определяет минимальную рабочую частоту вращения.

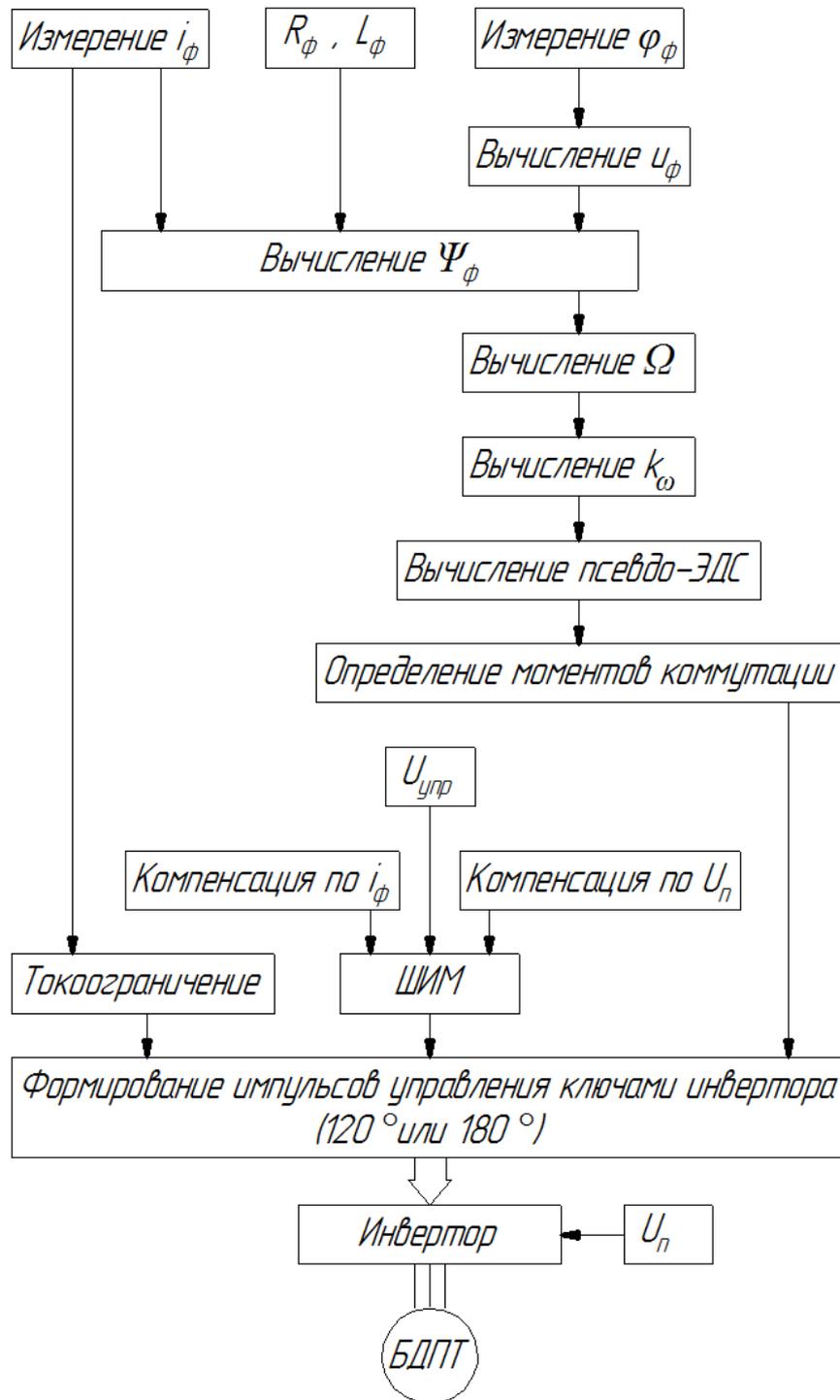
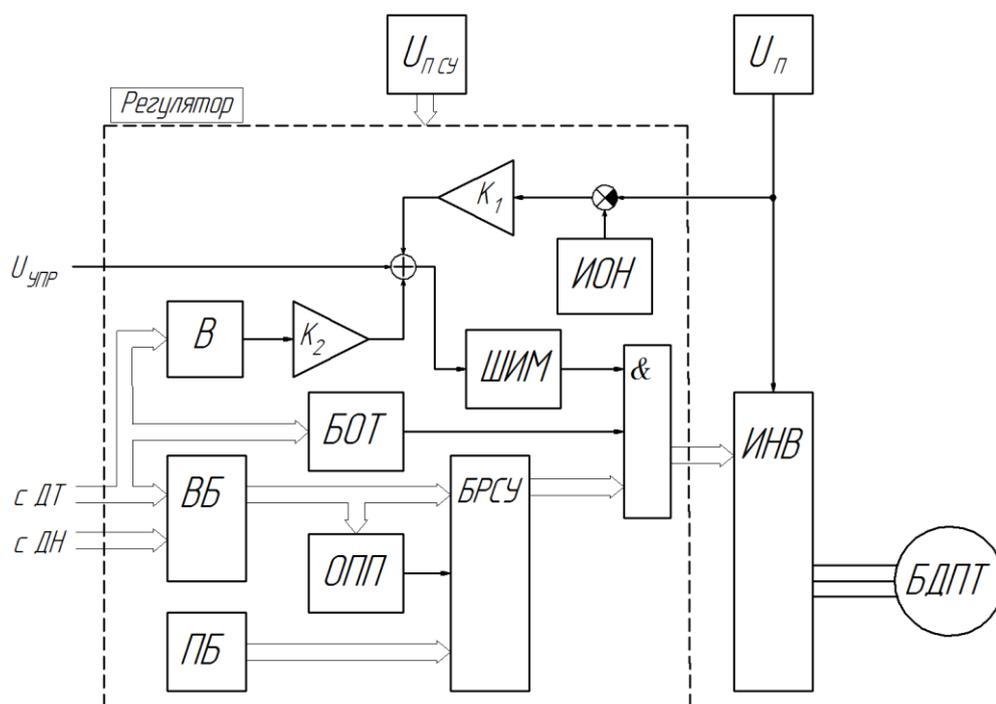


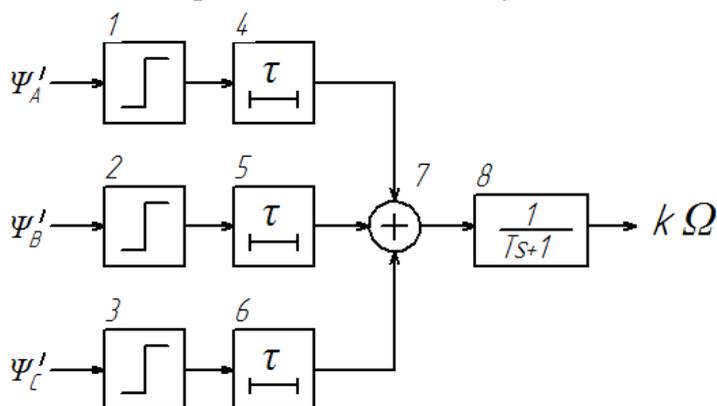
Рисунок 8 – Алгоритм формирования импульсов управления бездатчикового БДПТ.



ВБ – вычислительный блок; ПБ – пусковой блок; БОТ – блок ограничения тока; ОПП – определитель параметра переключения; БРСУ – блок распределения сигналов управления; ИНВ – инвертор напряжения; $U_{п\ сч}$ – источник питания системы управления; $U_{п}$ – источник питания инвертора; ДТ – датчики тока; ДН – датчики напряжения; В – выпрямитель; ИОН – источник опорного напряжения; K_1 , K_2 – усилительные звенья

Рисунок 9 – Структурная схема регулятора бездатчикового БДПТ.

Функциональная схема вычислителя частоты вращения (ВЧВ) по сигналам вычисленных потокосцеплений представлена на Рисунке 10.



1,2,3 – компараторы; 4,5,6 – формирователь импульсов; 7 – сумматор; 8 – ФНЧ.

Рисунок 10 – Функциональная схема ВЧВ.

Для расширения диапазона регулирования БДПТ в области низких частот, ВЧВ может быть спроектирован с использованием 12-ти или 18-ти импульсных схем. Это может быть реализовано за счет применения фазосдвигающих устройств для векторов вычисленных потокосцеплений.

Для проверки и подтверждения работоспособности предложенных функциональных и схемотехнических решений было проведено компьютерное моделирование в ППП OrCad 9.2 результаты которого представлены в диссертации.

В четвертой главе разработана имитационная модель регулятора БДПТ с электродвигателем в ППП OrCad 9.2. Модели функциональных блоков представлены на Рисунках 11, 12.

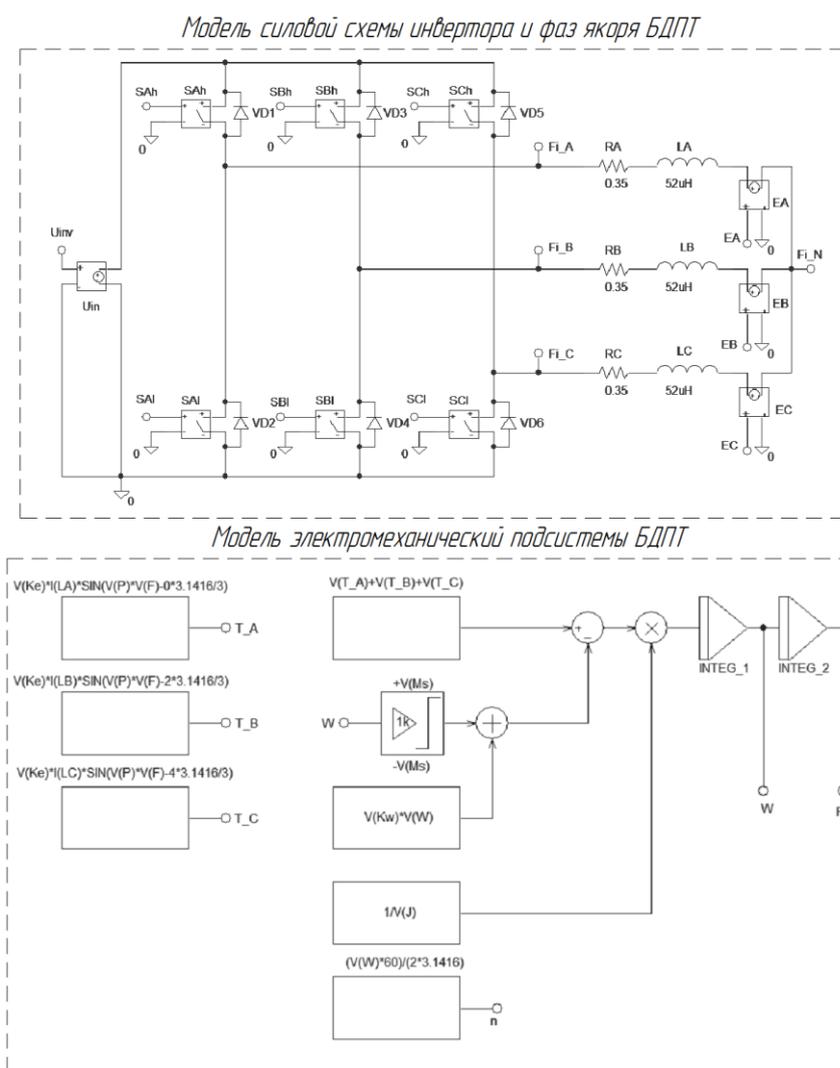


Рисунок 11 – Модели силовой части инвертора, якоря двигателя и электромеханической подсистемы БДПТ в ППП OrCad 9.2.

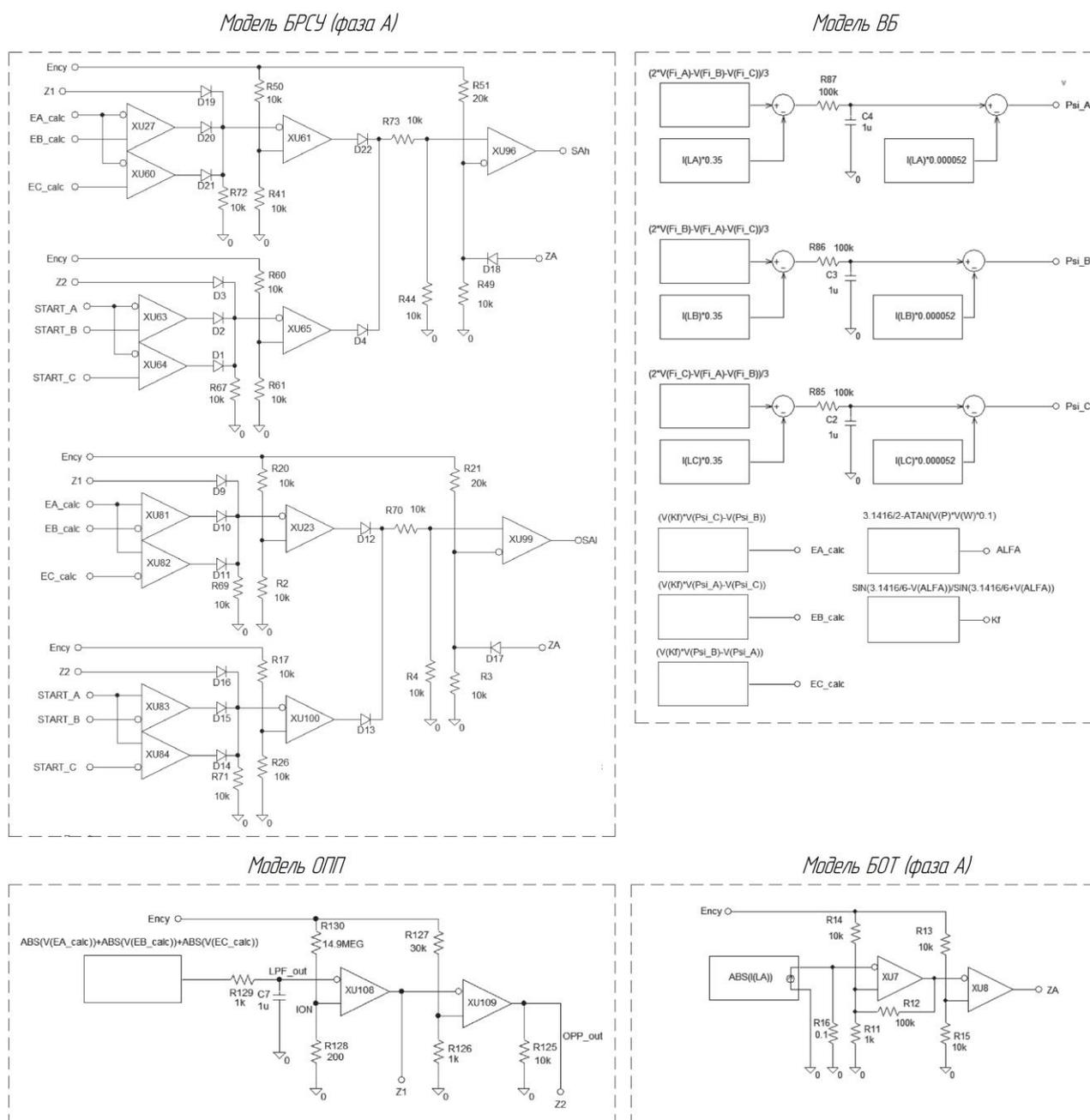


Рисунок 12 – Модели функциональных блоков регулятора бездатчикового БДПТ на базе вычислителя потокосцеплений в ППП OrCad 9.2.

Проведено компьютерное моделирование при 120-градусном законе коммутации и $U_{\Pi} = 27$ В для различных типов нагрузки:

- холостой ход;
- инерционная нагрузка;
- постоянный момент;
- вязкое трение;
- вентиляторная нагрузка;
- комбинированная нагрузка.

Результаты моделирования режима пуска представлены на Рисунках 13-18.

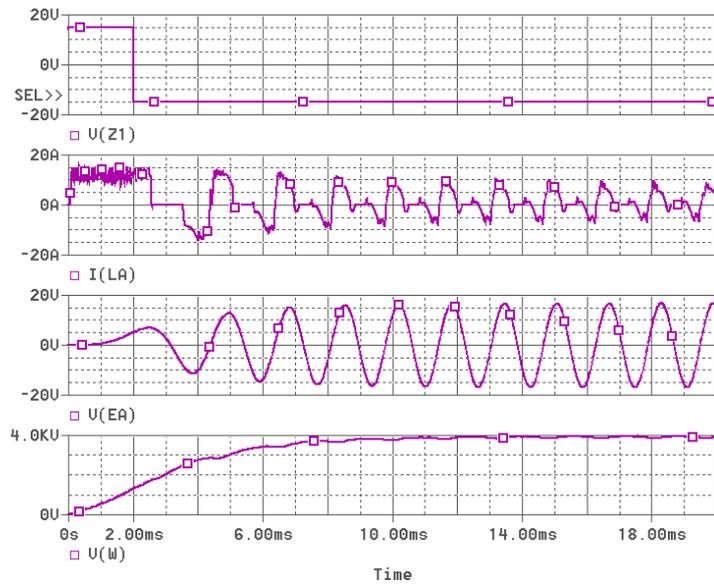


Рисунок 13 – Пуск на холостом ходу.

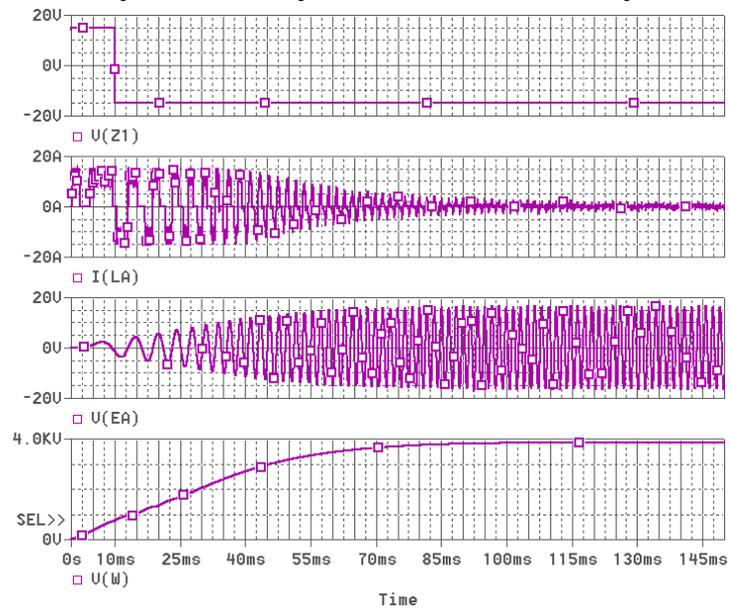


Рисунок 14 – Пуск при воздействии инерционной нагрузки.

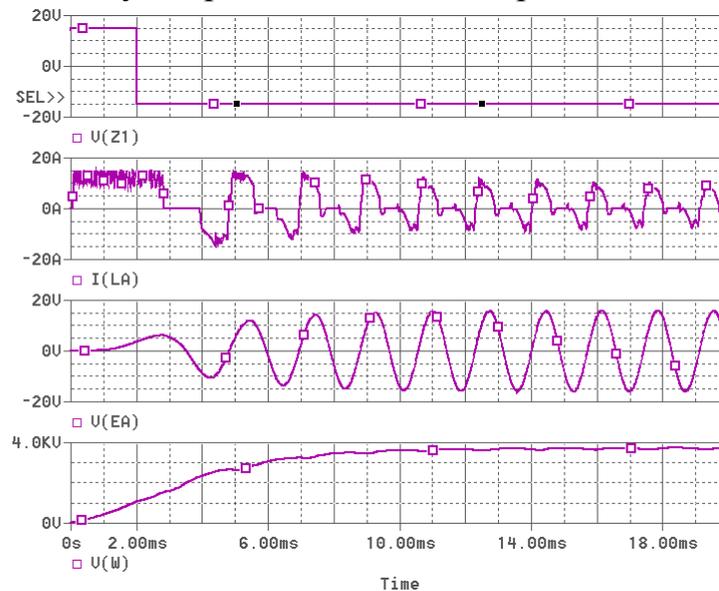


Рисунок 15 – Пуск при воздействии постоянного момента.

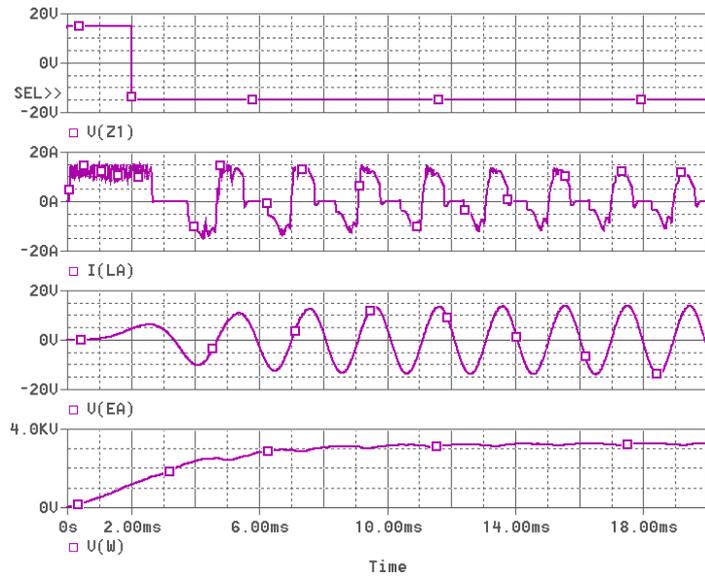


Рисунок 16 – Пуск при воздействии момента вязкого трения.

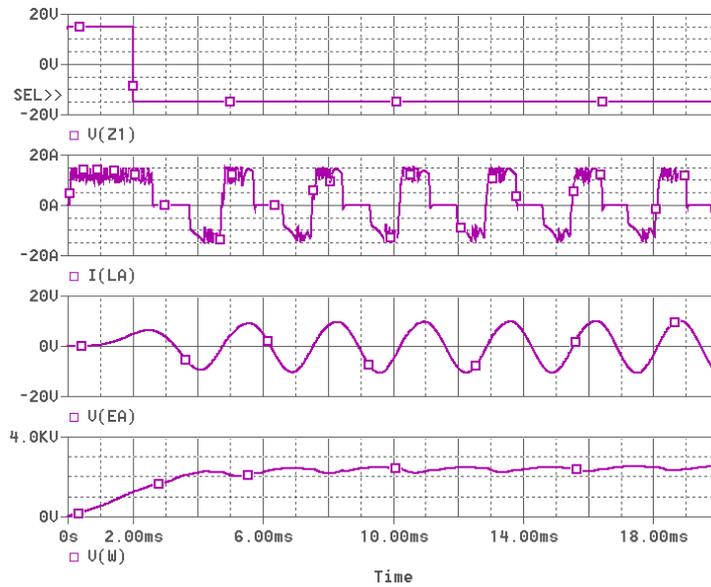


Рисунок 17 – Пуск при воздействии вентиляторной нагрузки.

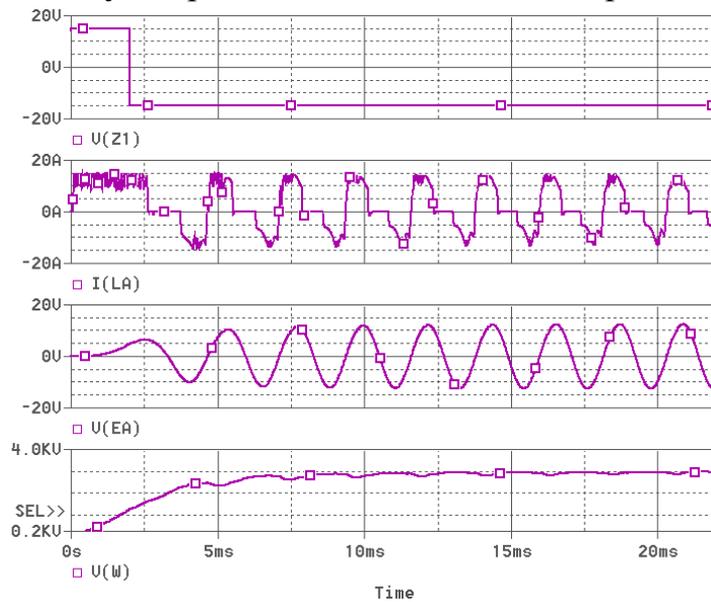


Рисунок 18 – Пуск при воздействии комбинированной нагрузки.

Для каждого случая приведены графики сигнала перехода на режим самокоммутации, токов и противо-ЭДС фазы А, частоты вращения ($1В = 1\text{рад}\cdot\text{с}^{-1}$). Параметры БДПТ, использованные при моделировании представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

Параметры БДПТ.

Параметр	Значение
Мощность, Вт	80
Максимальный продолжительный ток фазы, А	3
Максимальный пусковой ток, А	15
Количество пар полюсов ПМ	1
Потокосцепление фазы якоря, Вб	0,0043
Индуктивность фазы, мкГн	52
Активное сопротивление фазы, Ом	0,35
Момент инерции ротора, кг·м ²	0,0000001
Масса, кг	0,135

Полученные результаты подтвердили работоспособность разработанного бездатчикового метода управления БДПТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По работе можно сформулировать следующие основные результаты.

1. Проведен сравнительный анализ достоинств и недостатков известных методов бездатчикового управления, показавший, что наиболее целесообразным и простым является метод на основе вычисления противо-ЭДС фаз.

2. Предложены алгоритмы формирования сигналов переключения по вычисленным противо-ЭДС, позволяющие организовать как 120-градусную, так и 180-градусную коммутацию силовых транзисторных ключей инвертора.

3. Дано теоретическое обоснование метода бездатчикового управления на основе анализа противо-ЭДС фаз, полученных с помощью вычислителя потокосцеплений.

4. Предложена методика вычисления псевдо-ЭДС через потокосцепления фаз для определения моментов коммутации.

5. Предложен способ вычисления корректирующего коэффициента с использованием аналоговых перемножителей сигналов.

6. Предложен способ определения частоты вращения ротора, позволяющий обеспечить регулирование низких частотах вращения БДПТ за счет использования многопульсных схем.

7. Показано, что алгоритм формирования сигналов переключения, использующий операцию интегрирования, менее чувствителен к неточности задания параметров двигателя, чем алгоритм с использованием операции дифференцирования.

8. Разработан алгоритм формирования управляющих импульсов инвертора по измеряемым фазным потенциалам и токам, позволяющий реализовать 120-градусный и 180-градусный законы коммутации.

9. Предложена структурная схема регулятора БДПТ, обеспечивающая стабилизацию частоты вращения за счет введения компенсирующих сигналов по напряжению питания и току фаз двигателя.

10. Разработаны структурные, функциональные и схемотехнические решения для блоков регулятора БДПТ.

11. Разработана имитационная модель регулятора БДПТ и электродвигателя на базе вычислителя потокосцеплений в среде OrCad 9.2.

12. Получены аналитические соотношения для задания частоты вращения поля якоря БДПТ при пуске для различных типов нагрузки.

13. Проведено компьютерное моделирование, результаты которого подтверждают работоспособность предложенного метода бездатчикового управления БДПТ.

В качестве рекомендаций и перспектив дальнейшей разработки темы можно предложить следующие задачи.

14. Реализация предложенных алгоритмов управления с помощью микропроцессорных средств.

15. Исследование возможности дальнейшего расширения диапазона регулирования бездатчикового БДПТ в области низких частот.

16. Разработка принципов построения реверсивных регуляторов бездатчиковых БДПТ.

17. Разработка бездатчиковых регуляторов БДПТ со стабилизацией частоты вращения по отклонению.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации.

1. Шишов Д.М. Биротативный электропривод воздушных винтов беспилотного электролета / С.Ю. Занегин, В.Н. Калугин, Д.В. Сухов, Д.М. Шишов // Вестник Московского Авиационного Института. – Том 19. – 2012 г. – №1. – С. 49-57.

2. Шишов Д.М. Обзор бездатчиковых методов определения положения ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами / Д.В. Сухов, Д.А. Шевцов, Д.М. Шишов // Практическая силовая электроника. – 2014 г. – №53. – С. 50-56.

3. Шишов Д.М. Бездатчиковый регулятор бесколлекторного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами на роторе / В.Т. Пенкин, Д.В. Сухов, Д.А. Шевцов, Д.М. Шишов // Практическая силовая электроника. – 2014 г. – №55. – С. 46-51.