

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ITMO University**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
GRADUATION THESIS**

**Разработка системы управления бездатчиковым бесколлекторным двигателем
постоянного тока**

Обучающийся / Student Сухих Даниил Андреевич

Факультет/институт/клластер/ Faculty/Institute/Cluster факультет систем управления и
робототехники

Группа/Group R34403

Направление подготовки/ Subject area 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

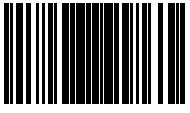
Образовательная программа / Educational program Цифровые системы управления 2020

Язык реализации ОП / Language of the educational program Русский

Квалификация/ Degree level Бакалавр

Руководитель ВКР/ Thesis supervisor Власов Сергей Михайлович, доцент, кандидат
технических наук, Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,
доцент (квалификационная категория "ординарный доцент")

Обучающийся/Student

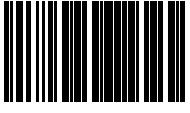
Документ подписан	
Сухих Даниил Андреевич	
09.05.2024	

(эл. подпись/ signature)

Сухих Даниил
Андреевич

(Фамилия И.О./ name
and surname)

Руководитель ВКР/
Thesis supervisor

Документ подписан	
Власов Сергей Михайлович	
09.05.2024	

(эл. подпись/ signature)

Власов Сергей
Михайлович

(Фамилия И.О./ name
and surname)

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ITMO University**

**ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ /
OBJECTIVES FOR A GRADUATION THESIS**

Обучающийся / Student Сухих Даниил Андреевич

Факультет/институт/клластер/ Faculty/Institute/Cluster факультет систем управления и робототехники

Группа/Group R34403

Направление подготовки/ Subject area 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Образовательная программа / Educational program Цифровые системы управления 2020

Язык реализации ОП / Language of the educational program Русский

Квалификация/ Degree level Бакалавр

Тема ВКР/ Thesis topic Разработка системы управления бездатчиковым бесколлекторным двигателем постоянного тока

Руководитель ВКР/ Thesis supervisor Власов Сергей Михайлович, доцент, кандидат технических наук, Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, доцент (квалификационная категория "ординарный доцент")

Характеристика темы ВКР / Description of thesis subject (topic)

Тема в области фундаментальных исследований / Subject of fundamental research: нет / not

Тема в области прикладных исследований / Subject of applied research: да / yes

Основные вопросы, подлежащие разработке / Key issues to be analyzed

Объектом исследования является бесколлекторный двигатель постоянного тока без установленных датчиков Холла, имеющий трапециoidalный характер противо-ЭДС. Требуется разработать алгоритм для управления скоростью двигателей такого класса и реализовать полученный алгоритм на конечном устройстве с использованием микроконтроллера.

Известные параметры двигателя: сопротивление обмоток статора в диапазоне 50 % - 200 % от действительного значения; индуктивность обмоток статора в диапазоне 90 % -110 % от действительного значения; число пар полюсов.

Измеряемые сигналы: токи и напряжения фаз двигателя.

Требования, предъявляемые к алгоритму:

- а) максимальное перерегулирование - 30 %;
- б) максимальное время переходного процесса - 0,2 с;
- в) максимальная установившаяся ошибка - 1 %.

Требования, предъявляемые к разрабатываемой схеме устройства:

- а) напряжение питания двигателя - 12 В;
- б) максимальный ток силовой части - 5 А;
- в) регулирование напряжения на обмотках двигателя с использованием ШИМ с максимальной частотой - 20 кГц;
- г) наличие на плате управления двигателем контактов для подключения выходов микроконтроллера.

Основной целью работы является разработка алгоритма для управления скоростью бесколлекторных бездатчиковых двигателей постоянного тока.

Для достижение цели поставлены следующие задачи:

- а) исследование алгоритмов и обзор существующих технических решений;
- б) разработка модели и синтез алгоритма управления;
- в) моделирование полученной системы;
- г) разработка стенда для проведения экспериментальных исследований;
- д) экспериментальные исследования.

Форма представления материалов ВКР / Format(s) of thesis materials:

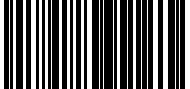
Презентация

Дата выдачи задания / Assignment issued on: 01.12.2023

Срок представления готовой ВКР / Deadline for final edition of the thesis 31.05.2024

СОГЛАСОВАНО / AGREED:

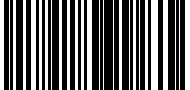
Руководитель ВКР/
Thesis supervisor

Документ подписан	
Власов Сергей Михайлович	
12.04.2024	

Власов Сергей
Михайлович

(эл. подпись)

Задание принял к
исполнению/ Objectives
assumed BY

Документ подписан	
Сухих Даниил Андреевич	
12.04.2024	

Сухих Даниил
Андреевич

(эл. подпись)

Руководитель ОП/ Head
of educational program

(эл. подпись)

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ITMO University**

**АННОТАЦИЯ
ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ
SUMMARY OF A GRADUATION THESIS**

Обучающийся / Student Сухих Даниил Андреевич

Факультет/институт/клластер/ Faculty/Institute/Cluster факультет систем управления и робототехники

Группа/Group R34403

Направление подготовки/ Subject area 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Образовательная программа / Educational program Цифровые системы управления 2020

Язык реализации ОП / Language of the educational program Русский

Квалификация/ Degree level Бакалавр

Тема ВКР/ Thesis topic Разработка системы управления бездатчиковым бесколлекторным двигателем постоянного тока

Руководитель ВКР/ Thesis supervisor Власов Сергей Михайлович, доцент, кандидат технических наук, Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, доцент (квалификационная категория "ординарный доцент")

**ХАРАКТЕРИСТИКА ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ
DESCRIPTION OF THE GRADUATION THESIS**

Цель исследования / Research goal

Разработка алгоритма для управления скоростью бесколлекторных бездатчиковых двигателей постоянного тока

Задачи, решаемые в ВКР / Research tasks

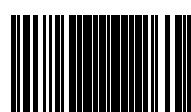
а) исследование алгоритмов и обзор существующих технических решений; б) разработка модели и синтез алгоритма управления; в) моделирование полученной системы; г) разработка стенда для экспериментальных исследований; д) экспериментальные исследования.

Краткая характеристика полученных результатов / Short summary of results/findings

В квалификационной работе была разработана система управления бесколлекторными двигателями постоянного тока. Был произведён обзор существующих алгоритмов управления, выбран наиболее подходящий: метод прямого управления моментом. Была составлена модель в программном комплексе Matlab/Simulink, и проведены модельные исследования. Был разработан и собран стенд для экспериментальных исследований, и проведены сами экспериментальные исследования.

Обучающийся/Student

Документ подписан
Сухих Даниил Андреевич

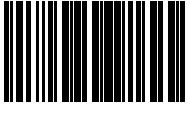


Сухих Даниил

09.05.2024
(эл. подпись/ signature)

Андреевич
(Фамилия И.О./ name
and surname)

Руководитель ВКР/
Thesis supervisor

Документ подписан	
Власов Сергей Михайлович	
09.05.2024	

(эл. подпись/ signature)

Власов Сергей
Михайлович
(Фамилия И.О./ name
and surname)

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Управление бесколлекторным двигателем.....	4
1.1 Устройство двигателя и принцип работы.....	4
1.2 Управление на основе датчиков Холла	5
1.3 Особенности бездатчикового управления	8
2 Обзор алгоритмов управления скоростью	11
2.1 ПИ (ПИД) регулятор.....	11
2.2 Векторное управление (FOC).....	13
2.3 Прямое управление моментом (DTC)	15
3 Обобщённая постановка задачи	17
4 Разрабатываемое техническое решение	18
4.1 Определение принципа работы двигателя и выбор алгоритма управления	18
4.2 Необходимые узлы для реализации технического решения	18
5 Проектирование модели системы.....	19
5.1 Математическая модель двигателя.....	19
5.2 Наблюдатель скользящего режима (SMO)	19
5.3 Прямое управление моментом.....	22
5.4 Модель системы в Simulink	23
5.5 Результаты моделирования	28
6 Разработка экспериментального стенда	32
6.1 Выбор компонентов и устройств для реализации узлов системы .	32
6.2 Реализация драйвера двигателя.....	34
6.2.1 Инвертор	34
6.2.2 Измерительная часть	36

6.2.3 Подключение входов и выходов платы	38
6.2.4 Общий вид платы	38
6.3 Экспериментальный стенд	40
7 Экспериментальные исследования.....	41
7.1 Алгоритм работы устройства.....	41
7.2 Результаты эксперимента	42
Заключение	44
Список использованных источников	45

ВВЕДЕНИЕ

Бесколлекторные двигатели постоянного тока – это тип двигателей постоянного тока, которые обладают большей эффективностью, надежностью и меньшими габаритами по сравнению с традиционными двигателями постоянного тока [1]. В связи с этим они сейчас обретают всё большую популярность, когда речь идёт о компактности, энергоэффективности и уменьшении веса и используются в большинстве современных электронных устройств, в том числе в робототехнике, медицинских приборах и инструментах.

Однако стоит отметить и один недостаток: необходимость специального драйвера для обеспечения его вращения и регулирования. В связи с чем усложняются конструкция и эксплуатация (появляется больше необходимых для обслуживания узлов). Но с развитием полупроводниковых компонентов эта проблема уходит на второй план и компенсируется преимуществами таких двигателей, которые были описаны ранее.

Поэтому главной задачей и целью данной работы является разработка системы управления такого рода двигателями для обеспечения заданных показателей качества. В ходе работы будет синтезирован алгоритм коммутации обмоток двигателя и управления им в программной среде Matlab/Simulink. После чего будет разработано и изготовлено готовое устройство для проверки полученного алгоритма на практике.

Далее будут рассмотрены существующие алгоритмы управления бесколлекторными двигателями и технические реализации алгоритмов функционирования подобных устройств с целью формирования собственного технического решения.

1 Управление бесколлекторным двигателем

1.1 Устройство двигателя и принцип работы

В основе коллекторных двигателей постоянного тока лежит механический механизм коммутации обмоток с использованием щёток, изменяющим направление тока в обмотках якоря для формирования постоянного момента. Из-за этого возникают электромагнитные и акустические шумы, появляется потребность в довольно часто обслуживании щеточно-коллекторного узла из-за износа, возникающего в следствии трения механических частей и искрения в процессе коммутации. [2]

Чтобы преодолеть эту проблему, были разработаны бесколлекторные двигатели (БДПТ). По своей структуре они являются синхронными двигателями с сосредоточенным распределением и магнитоэлектрическим возбуждением обмоток статора, но которые питаются от постоянного тока. В данном типе двигателей коммутация обмоток происходит не механическим способом (как в коллекторных двигателях), а электрическим. Для электрической коммутации зачастую используются датчики положения ротора и специализированные управляющие схемы на основе управляемых ключей (транзисторов). [1, 2]

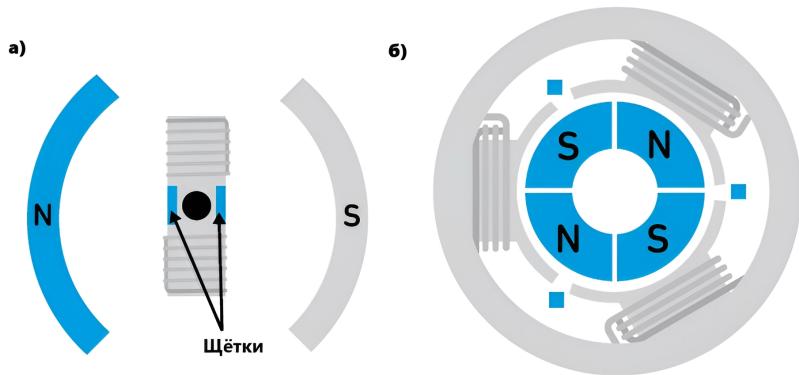


Рисунок 1.1 – Структура двигателей постоянного тока: а - коллекторный ДПТ, б - бесколлекторный ДПТ [3]

В итоге, бесколлекторные двигатели постоянного тока обладают большей эффективностью из-за меньших затрат на коммутацию, большей надёжностью из-за отсутствия щеточно-коллекторного узла, меньшими габаритами

при сравнимой мощности (большей плотностью мощности) и меньшей стоимостью из-за более простой конструкции в сравнении с традиционными двигателями постоянного тока.

Также данные двигатели часто сравнивают с синхронными машинами с постоянными магнитами (также называются вентильными двигателями или синхронными машинами с постоянными магнитами). Однако последние имеют распределённую обмотку статора и питаются от переменного тока, из-за чего имеют синусоидальный характер противо-ЭДС в обмотках. Тогда как в БДПТ она имеет трапециoidalный характер. Ввиду этих особенностей к этим двигателям применяются разные алгоритмы управления и разные драйверы. Для вентильных двигателей алгоритмы управления зачастую имеют более сложный характер.

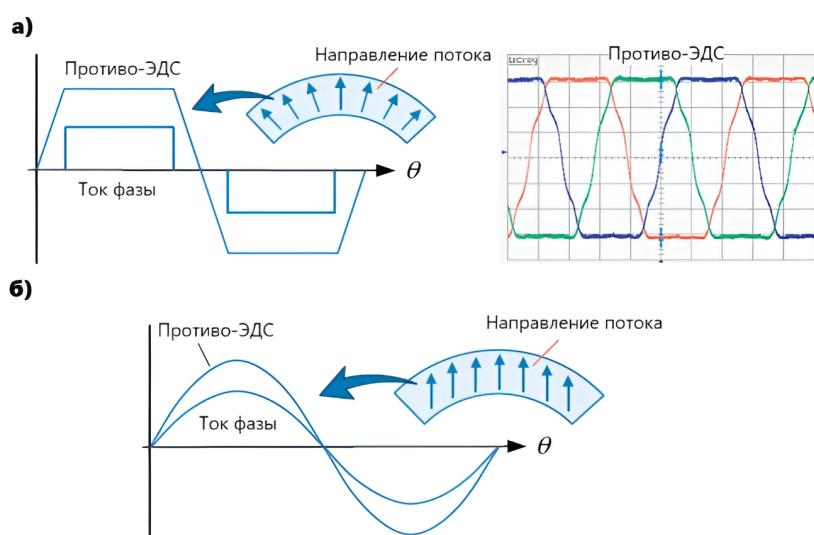


Рисунок 1.2 – Вид противо-ЭДС: а - бесколлекторный дпт, б - вентильный двигатель [2]

1.2 Управление на основе датчиков Холла

БДПТ можно представить в виде трёх соединенных между собой обмоток. Одновременно можно пропускать ток через 2 из 3 обмоток, что позволяет создать 6 направлений вектора магнитного поля статора, изображенных на Рисунке 1.3.

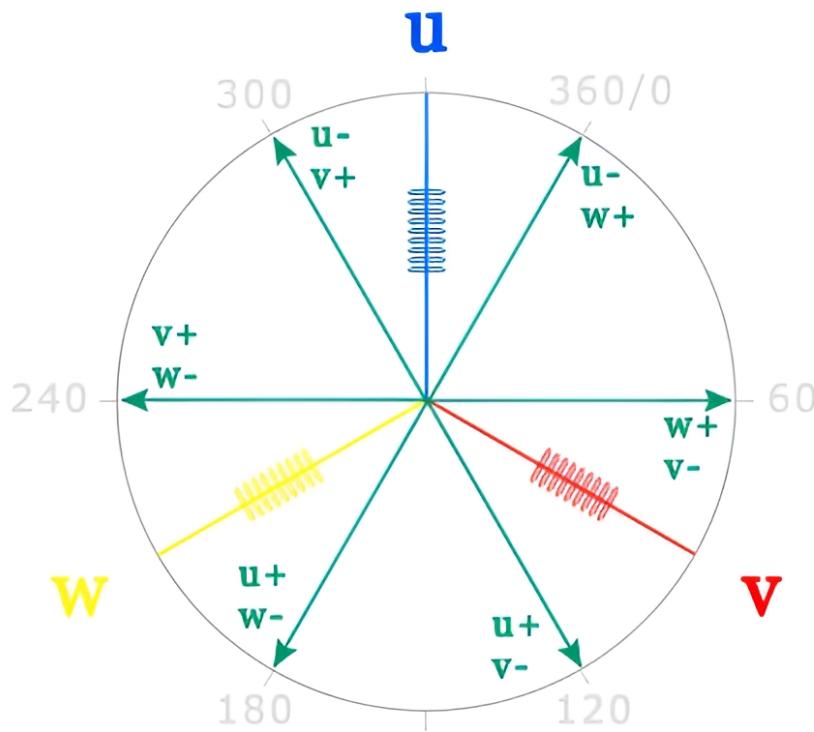


Рисунок 1.3 – Возможные направления векторов магнитного поля, создаваемого статором bldc двигателя (U, W, V – выходы обмоток двигателя) [4]

Таким образом, для управления необходимо вовремя коммутировать фазы обмоток, создавая круговое магнитное поле. Из этого можно получить закон коммутации из 6 шагов (число которых соответствует числу возможных комбинаций протекания тока через обмотки). Возможная последовательность коммутации обмоток приведена в Таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Возможная таблица коммутации обмоток (U, W, V – выходы обмоток двигателя)

DC +	DC -	Не подключена
W	U	V
W	V	U
U	V	W
U	W	V
V	W	U
V	U	W

Но как можно определить момент, в который необходимо изменить направление протекания тока в обмотках (перейти к следующему шагу цикла)? Самое простое в плане реализации системы управления является установка специальных датчиков, работающих на эффекте Холла. Они обычно располагаются под 120 электрических градусов друг от друга, чтобы за один цикл коммутации получить все возможные комбинации состояний датчиков (кроме состояний, когда все сработали или ни один не сработал, что невозможно в работающем двигателе из-за их расположения). Стоит отметить, что 360 электрических градусов соответствуют одному периоду магнитного поля или одному проходу по таблице коммутации.

Для определения механических градусов (то есть расположения на самом статоре) необходимо знать число пар полюсов двигателя (N) и воспользоваться формулой: $\frac{360}{3N}$. Например, в однополюсном двигателе датчики располагаются под углом в 120° , в двухполюсном — 60° и т. д. Из этого следует, что для одного механического оборота двигателя необходимо выполнить количество циклов коммутации, равное числу пар полюсов двигателя.



Рисунок 1.4 – Возможное расположение датчиков Холла

1.3 Особенности бездатчикового управления

Можно ли определить позицию ротора без использования специальных датчиков, которые удорожают конструкцию и образуют ещё один узел, который надо обслуживать, и который может выйти из строя? Для этой цели используется бездатчиковое управление, которое сейчас набирает всё большую популярность в связи с развитием микроконтроллерной техники.

Самым популярным способом для организации такого управления является использование обратной связи по противо-ЭДС. Т. к. одновременно ток протекает только через две обмотки, то на третьей обмотке индуцируется напряжение, возникающее при взаимодействии с магнитным полем, по которому можно определить положение ротора. После чего можно использовать таблицу коммутации, рассмотренную в 1.2.

Как было отмечено в 1.1, противо-ЭДС в бесколлекторных двигателях имеет трапециoidalную форму, но это не сильно важно, ведь зачастую нужно отслеживать только точки пересечения характеристикой нуля. Моменты переключения фаз показаны на Рисунке 1.5.

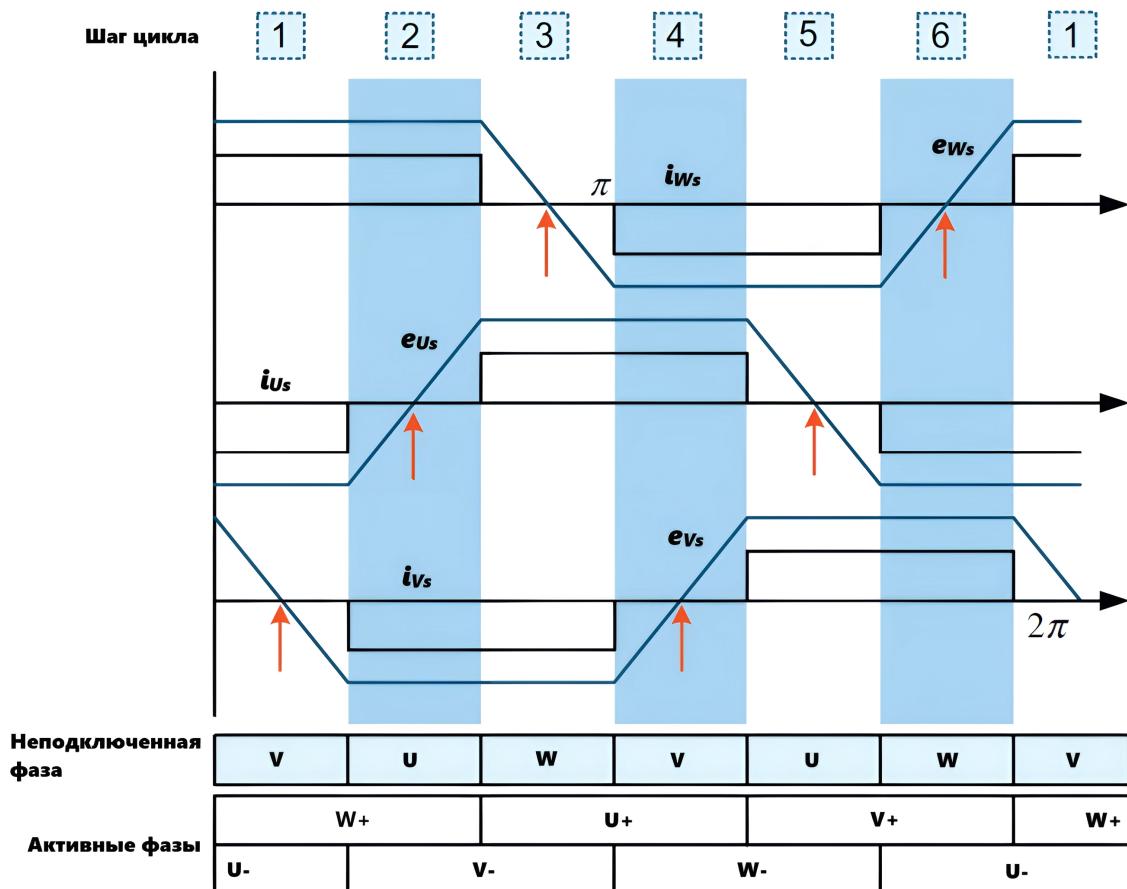


Рисунок 1.5 – Переключение фаз в точках пересечения нуля противо-ЭДС (е — противо-ЭДС фазы, i — ток фазы)

Но не всё так гладко: на практике особенно на низких скоростях бывает сложно засечь точку пересечения нуля, т. к. уменьшается амплитуда противо-ЭДС, что делает данный метод неработоспособным при необходимости управления на околонулевых скоростях, тем более в условиях шумов. В этом случае обычно цикл коммутации выполняют просто с каким-то интервалом до тех пор, пока не выйдут на скорость, достаточную для точного определения положения по противо-ЭДС (выполняется «слепой» старт).

Другие методы для определения позиции ротора без использования датчиков [5]:

- a) расчёт потокосцепления из уравнения двигателя по известным величинам тока, напряжения и сопротивления ($V = Ri + \frac{d}{dt}\Psi$) и соотнесения его величины с позицией ротора;
- б) построение наблюдателя противо-ЭДС и последующее вычисление положения и скорости ротора (например, использование наблюдателя Люенбергера или наблюдателя на основе скользящих режимов).

2 Обзор алгоритмов управления скоростью

2.1 ПИ (ПИД) регулятор

В качестве простейшего регулятора скорости может быть использован одноконтурный ПИ или ПИД регулятор по скорости. Схема реализации приведена на Рисунке 2.1.

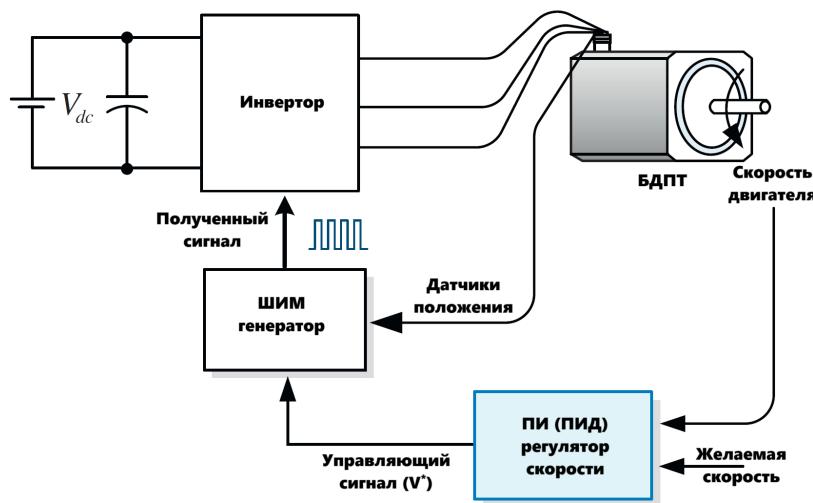


Рисунок 2.1 – Одноконтурная система регулирования скорости [2]

Данная реализация требует наличия только показаний с датчиков положения двигателя. Однако, использование системы без регулирования тока может вызвать его скачки, что может вызвать выход из строя системы, не рассчитанной на высокий ток. Для исправления этого можно добавить второй контур регулирования по току. Схема реализации приведена на Рисунке 2.2

Для этого подхода необходимо в систему помимо датчиков положения ротора добавить датчик тока.

Использование второго контура позволяет ограничить пульсации тока во время старта и коммутации (смены питаемых обмоток), тем самым ограничив пульсации момента (ведь ток и момент связаны). Однако на практике у нас они всё равно остаются. Пульсации момента могут быть вызваны несколькими причинами: особенностями структуры двигателя (несинусоидальный ток и противо-ЭДС из-за питания от постоянного тока и 6-шаговой алгоритмом управления), неэффективной коммутацией во время смены фаз. Особенно они

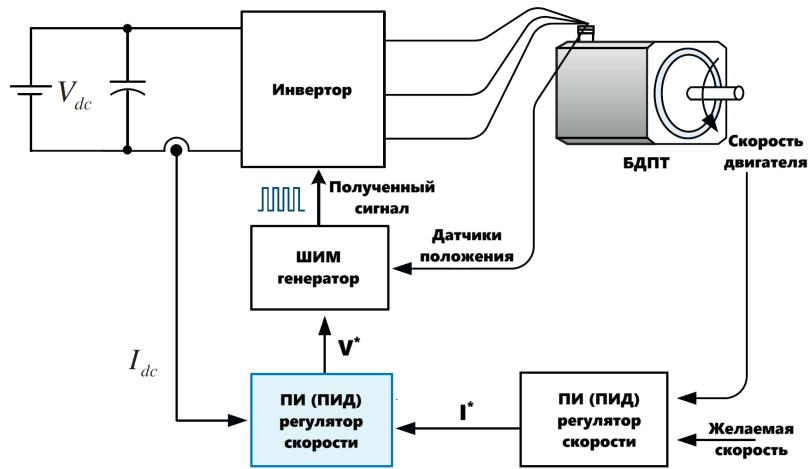


Рисунок 2.2 – Двухконтурная система регулирования скорости [2]

наблюдаются во время переменной нагрузки. На Рисунке 2.3 приведены графики изменения момента во время коммутации на различных скоростях.

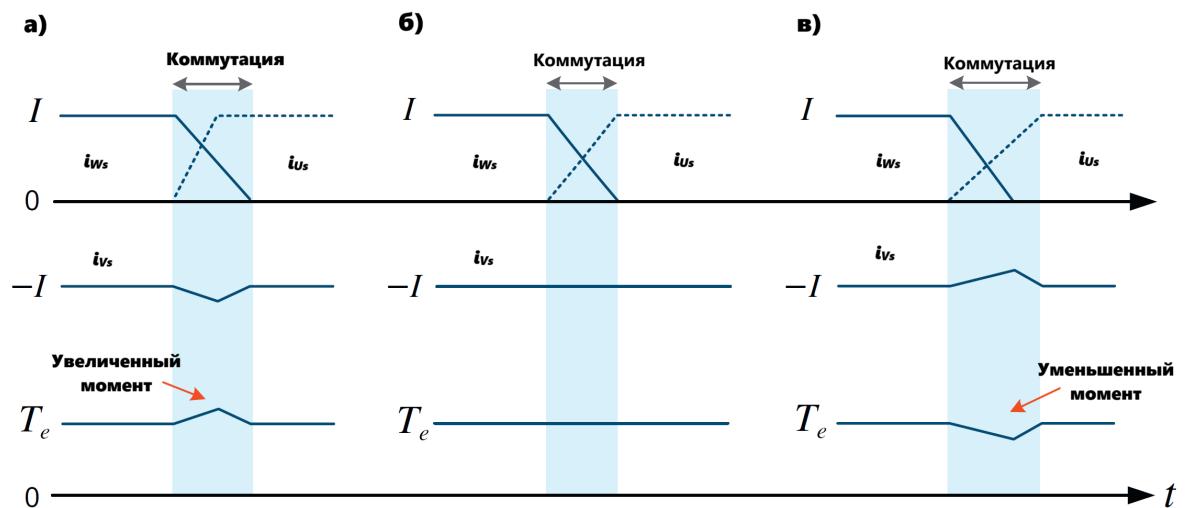


Рисунок 2.3 – Пульсации момента БДПТ на различных скоростях (а — малые скорости ($V_{dc} > 4E$), б — средние скорости ($V_{dc} = 4E$), в — высокие скорости ($V_{dc} < 4E$) (E — амплитуда противо-ЭДС)) [2]

Для решения этой проблемы применяются более современные алгоритмы, рассмотренные далее.

2.2 Векторное управление (FOC)

Одной из самых ранних техник для уменьшения пульсаций момента является векторное управление или field orientation control (FOC). Данный алгоритм используется для независимого управления тремя параметрами двигателя (скоростью, потокосцеплением и моментом) и помогает получить форму тока статора, приближенную к синусоидальной (из-за использования синусоидального алгоритма коммутации вместо 6-шагового алгоритма), что позволяет достичь максимальный момент, располагая постоянно магнитные поля ротора и статора перпендикулярно друг другу. Возможная схема реализации этого алгоритма приведена на Рисунке 2.4.

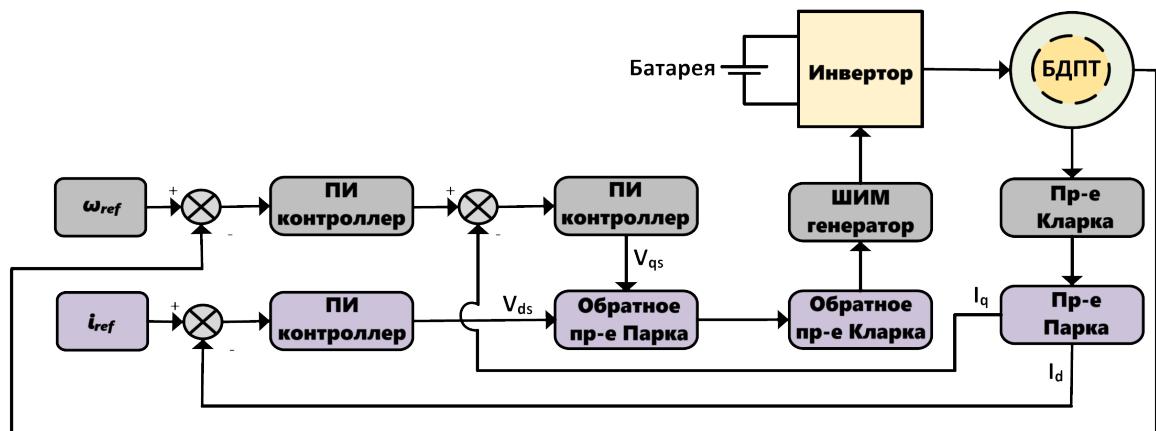


Рисунок 2.4 – Система регулирования для векторного управления [6]

Возможный алгоритм функционирования данного типа управления [7]:

- a) определение токов фаз двигателя с использованием соотношения:

$$i_W + i_V + i_U = 0$$

- б) приведение трёх фазного тока к двухкоординатной системе с использованием преобразования Кларка:

$$i_\alpha = i_W$$

$$i_\beta = (i_W + 2i_V)/\sqrt{3}$$

в) двухкоординатная система преобразуется для согласования с потокосцеплением ротора (вращаем для совпадения с потоком ротора на основе его угла поворота θ), т. е. выполняется преобразование Парка (или преобразование во вращающуюся систему координат):

$$I_d = i_\alpha \cos \theta + i_\beta \sin \theta$$

$$I_q = -i_\alpha \sin \theta + i_\beta \cos \theta$$

г) использование полученных векторов как входов двух ПИ регуляторов для формирования на выходе векторов напряжений — V_{dc} и V_{qs} . I_d составляющая относится к току или потокосцеплению и в качестве референсного значения используется 0 для уменьшения пульсаций момента. I_q относится к моменту.

д) выполнение обратного преобразования Парка:

$$V_\alpha = V_{dc} \cos \theta - V_{qs} \sin \theta$$

$$V_\beta = V_{dc} \sin \theta + V_{qs} \cos \theta$$

е) выполнение обратного преобразования Кларка:

$$V_W = V_\beta$$

$$V_V = (-V_\beta + \sqrt{3}V_\alpha)/2$$

$$V_U = (-V_\beta - \sqrt{3}V_\alpha)/2$$

ж) полученные напряжения используются для генерации ШИМ сигнала на основе алгоритма SVPWM (пространственно-векторная широтно-импульсная модуляция) или SPWM (синусоидальная широтно-импульсная модуляция).

Хоть данный метод и позволяет уменьшить пульсации момента, но для его нормального функционирования необходимо наличие датчиков положения ротора. Конечно, можно управлять и бездатчиковым методом, но обычно это выполняется с использованием наблюдателей положения и скорости на основе оценки противо-ЭДС, что требует больше вычислительных мощностей, больше информации о двигателе и является менее надёжным.

2.3 Прямое управление моментом (ДТС)

В основе данного метода лежит оценка электромагнитного момента на основе тока и напряжения фаз статора и электрического положения ротора, и его последующее регулирование. Возможная схема реализации этого алгоритма приведена на Рисунке 2.5.

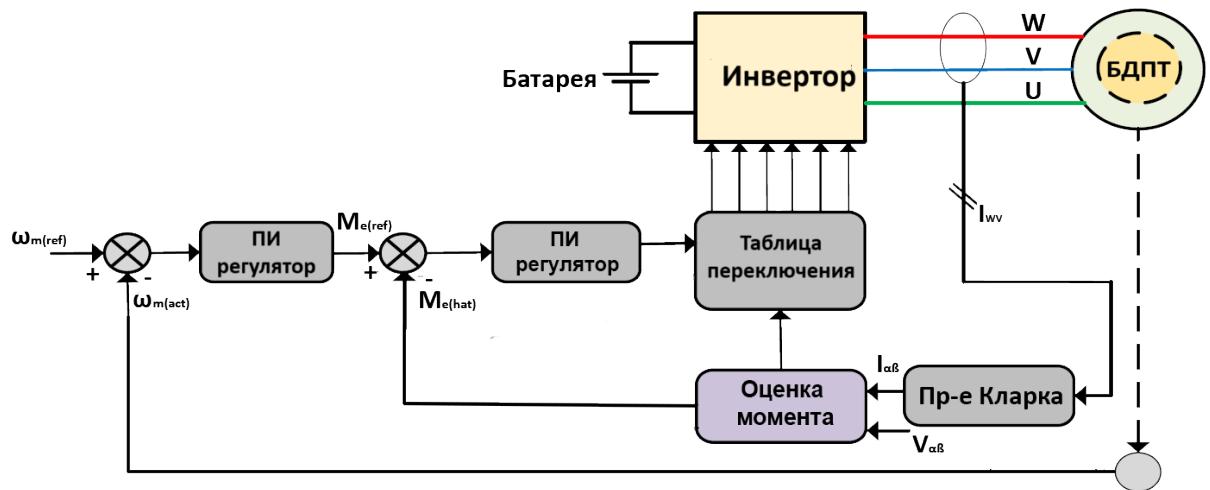


Рисунок 2.5 – Система регулирования для прямого управления моментом [6]

Возможный алгоритм работы следующий:

- выполнить переход к двумерной системе координат для тока и напряжения фаз путём выполнения преобразования Кларка, определить угол положения ротора в электрических градусах;
- оценить на основе полученных данных электромагнитный момент двигателя;
- получить ошибки по моменту, взяв за желаемое значение выход ПИ регулятора контура скорости;
- пропустить ошибки через ПИ или гистерезисные контроллеры (последние представляют в самом простом случае функцию переключения с гистерезисом, которые на выходе имеют 1 при превышении верхнего порога и -1 при выходе за нижний порог);

д) на основе полученных значений выходов и текущего положения ротора получить новые состояния ключей инвертора согласно специальной таблице коммутации.

Этот метод является менее требовательным в плане вычислительных мощностей, обладает большей рабочей способностью по отношению к параметрам двигателя и обладает лучшими динамическими свойствами по сравнению с векторным управлением. Однако для его нормального функционирования необходима большая частота работы регулятора (большой период дискретизации), особенно при использовании гистерезисных регуляторов, отчего зависят напрямую амплитуды пульсаций момента и скорости. Также он обладает меньшей эффективностью по сравнению с векторным управлением, но его простота позволяют просто реализовать и настроить (нужно найти подходящие параметры ПИ регуляторов и/или выставить пороги гистерезисных регуляторов).

3 Обобщённая постановка задачи

Задача состоит в том, чтобы разработать алгоритм управления скоростью бесколлекторными бездатчиковыми двигателями постоянного тока для достижения заданных в техническом задании показателей качества: максимальное перерегулирование — 30 %, максимальное время переходного процесса — 0,2 с, максимальная установившаяся ошибка — 1 %.

Важными аспектами алгоритма являются возможность работы в условиях неточно (с какой-то погрешностью) известных параметров двигателя (сопротивление и индуктивность статора), т. е. обладать рабочестью по отношению к этим параметрам); иметь низкие затраты в плане вычислительной мощности для реализации на низкопроизводительном оборудовании (например, на микроконтроллере); использовать только значения токов и напряжений фаз двигателя для определения параметров регулирования. Также полезным свойством будет простота и гибкость настройки при работе с различными двигателями.

4 Разрабатываемое техническое решение

4.1 Определение принципа работы двигателя и выбор алгоритма управления

Для исследования был выбран двигатель без установленных датчиков Холла, поэтому необходимо использовать один из приёмов определения положения ротора, рассмотренных в 1.3. Был выбран метод на основе наблюдателя противо-ЭДС, из которого можно получить положение ротора и скорость.

Что касается выбора алгоритма управления скоростью, то предпочтение отдаётся методу на основе прямого управления моментом в силу его простоты, робастности и меньшей вычислительной нагрузки по сравнению с другими рассмотренными методами.

Из-за того, что выбранный алгоритм не так ресурсозатратен, нежели другой метод на основе прямого управления моментом — векторное управление, в условиях ограниченных вычислительных ресурсов можно позволить увеличить частоту измерений и расчётов, что также положительно скажется на динамических свойствах и позволит увеличить точность регулирования.

4.2 Необходимые узлы для реализации технического решения

На основе выбранных принципов функционирования устройства и алгоритма управления система должна включать в себя следующие узлы:

- а) блок с логикой управления;
- б) инвертор, служащий для преобразования ШИМ сигнала и сигнала с системы регулирования в сигналы для управления фазами двигателя;
- в) механизм определения тока и напряжения фаз для функционирования алгоритма;
- г) блок питания двигателя;
- д) БДПТ без установленных датчиков положения.

5 Проектирование модели системы

5.1 Математическая модель двигателя

Трёхфазный БДПТ может быть описан следующей системой уравнений[8]:

$$\begin{cases} v_{WV} = R_s i_{WV} + L_s \frac{d}{dt} i_{WV} + e_{WV} \\ v_{VU} = R_s i_{VU} + L_s \frac{d}{dt} i_{VU} + e_{VU}, \\ v_{UW} = R_s i_{UW} + L_s \frac{d}{dt} i_{UW} + e_{UW} \end{cases} \quad (5.1)$$

где W, V, U — фазы двигателя; v_{WV}, v_{VU}, v_{UW} — напряжения между соответствующими фазами; i_{WV}, i_{VU}, i_{UW} — разница токов соответствующих фаз; e_{WV}, e_{VU}, e_{UW} — противо-ЭДС между соответствующими фазами; R_s — сопротивление статора; L_s — индуктивность статора

Уравнение динамики описывается следующим образом:

$$M_e = M_L + B\omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt},$$

где T_e — электромагнитный момент; M_L — момент нагрузки; B — коэффициент трения; J — момент инерции ротора; ω_m — механический момент ротора

Противо-ЭДС может быть выражена следующей зависимостью от скорости:

$$e_{WVU} = k_e \omega_m,$$

где k_e — постоянная по противо-ЭДС

5.2 Наблюдатель скользящего режима (SMO)

Для определения положения и скорости ротора необходимо использовать наблюдатель, ведь прямому измерению эти величины недоступны. Можно рассмотреть классический наблюдатель Люенбергера [9], но его устойчивость сильно зависит от параметров, используемых при построении, что не подходит под требования технического задания. Поэтому был выбран наблю-

датель на основе скользящего режима, т. к. он работает при вариации параметров двигателя во время работы, т. е. обладает большей рабочей способностью. Также он требует меньше вычислительных мощностей, что критически важно в нашей системе. Далее представлено его математическое описание.

Формула 5.1 может быть представлено в двумерной $\alpha - \beta$ системе:

$$\begin{cases} v_\alpha = R_s i_\alpha + L_s \frac{d}{dt} i_\alpha + e_\alpha \\ v_\beta = R_s i_\beta + L_s \frac{d}{dt} i_\beta + e_\beta \end{cases} \quad (5.2)$$

Или в матричной форме: [10]

$$\dot{i}_{\alpha\beta} = \Phi i_{\alpha\beta} + \Gamma v_{\alpha\beta} - \Gamma e_{\alpha\beta} \quad (5.3)$$

$$\text{где } i_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \end{bmatrix}, \quad v_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \end{bmatrix}, \quad e_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} 0 & 1/L_s \\ -R_s/L_s & 0 \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 1/L_s & 0 \\ 0 & 1/L_s \end{bmatrix}$$

Также поведение противо-ЭДС может быть выражено в следующей форме:

$$\dot{e}_{\alpha\beta} = \omega_e J e_{\alpha\beta}, \quad (5.4)$$

где ω_e — электрическая скорость двигателя ($\omega_e = \omega_m \cdot p$ (p — количество пар полюсов двигателя)); $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$

Выражения 5.3 и 5.4 могут быть представлены в дискретной форме: [10]

$$i_{\alpha\beta(k+1)} = A i_{\alpha\beta(k)} + B v_{\alpha\beta(k)} - B e_{\alpha\beta(k)} \quad (5.5)$$

$$e_{\alpha\beta(k+1)} = e_{\alpha\beta(k)} + T_s \omega_e J e_{\alpha\beta(k)}, \quad (5.6)$$

$$\text{где } T_s \text{ — период дискретизации; } A = e^{\Phi T_s}; \quad B = \int_0^{T_s} e^{\Phi \tau} \Gamma d\tau = \begin{bmatrix} b & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix}$$

$$\left(b = \frac{1 - e^{-R_s T_s / L_s}}{R_s} \right)$$

Тогда наблюдатель на основе скользящего режима задаётся следующими уравнениями:

$$\hat{i}_{\alpha\beta(k+1)} = A\hat{i}_{\alpha\beta(k)} + Bv_{\alpha\beta(k)} - B\hat{e}_{\alpha\beta(k)} - \eta sign(\tilde{i}_{\alpha\beta(k)}) \quad (5.7)$$

$$\hat{e}_{\alpha\beta(k+1)} = \hat{e}_{\alpha\beta(k)} + B^{-1}g(\tilde{i}_{\alpha\beta(k)} - A\tilde{i}_{\alpha\beta(k-1)} + \eta sign(\tilde{i}_{\alpha\beta(k-1)})) \quad (5.8)$$

$$\tilde{i}_{\alpha\beta(k)} = \hat{i}_{\alpha\beta(k)} - i_{\alpha\beta(k)} \quad (5.9)$$

$$\tilde{e}_{\alpha\beta(k)} = e_{\alpha\beta(k)} - \hat{e}_{\alpha\beta(k)}, \quad (5.10)$$

где η — коэффициент усиления по противо-ЭДС; g — коэффициент усиления по току

Выбор коэффициентов осуществляется из следующих условий:

- a) Если $|e_{\alpha\beta(k+1)} - e_{\alpha\beta(k)}| \leq m$ и коэффициент $g \in (0, 1)$ тогда существует k_0 такое, что при $k \geq k_0$ выполняется:

$$\tilde{e}_{\alpha\beta(k)} < \frac{m}{g}$$

- б) Если $|e_{\alpha\beta(k+1)} - e_{\alpha\beta(k)}| \leq m$, коэффициент $g \in (0, 1)$ и $\eta > b\frac{m}{g}$ тогда существует k_0 такое, что при $k \geq k_0$ выполняется:

$$|\tilde{i}_{\alpha\beta(k)}| \leq \eta + b\frac{m}{g}$$

Таким образом, при правильном выборе параметров наблюдателя обеспечивается ограниченность векторов невязки по противо-ЭДС и току.

Главным недостатком такого вида наблюдателя, как и любых систем на основе скользящих режимов, является чаттеринг (дребезг) при приближении к поверхности скольжения, что уменьшает точность регулирования и увеличивает частоту переключений фаз, внося дополнительные потери и понижая срок службы электрических компонентов. Для уменьшения его влияния может применяться фильтр низких частот на выходе оценок противо-ЭДС [10] и/или замена функций знакового переключения на функции переключения с насыщением [8].

Оценка электрического положение ротора может быть найдено из 5.8 по следующей формуле:

$$\hat{\theta}_{e(k)} = \arctan \left(-\frac{\hat{e}_{\alpha(k)}}{\hat{e}_{\beta(k)}} \right) + \pi \quad (5.11)$$

Из чего легко можно найти скорость вращения ротора, зная число пар полюсов двигателя (p):

$$\hat{\omega}_m = \frac{\hat{\theta}_{e(k)} - \hat{\theta}_{e(k-1)}}{T_s}$$

5.3 Прямое управление моментом

Для реализации этого алгоритма управления необходимо знание электромагнитного момента (M_e), который может быть найден следующим образом[8]:

$$M_e = \frac{3p}{4} \left(\frac{d\Psi_{r\alpha}}{d\theta_e} i_\alpha + \frac{d\Psi_{r\beta}}{d\theta_e} i_\beta \right), \quad (5.12)$$

где $\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$ — поток ротора в $\alpha - \beta$ координатах.

Производные потока ротора от электрического положения ротора могут быть представлены следующими соотношениями:

$$\frac{d\Psi_{r\alpha}}{d\theta_e} = \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} \frac{dt}{d\theta_e} = \frac{1}{\omega_e} \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{e_\alpha}{\omega_e} \quad (5.13)$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{d\theta_e} = \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} \frac{dt}{d\theta_e} = \frac{1}{\omega_e} \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = \frac{e_\beta}{\omega_e} \quad (5.14)$$

С учётом 5.13 и 5.12 получается:

$$M_e = \frac{3p}{4} \left(\frac{e_\alpha}{\omega_e} i_\alpha + \frac{e_\beta}{\omega_e} i_\beta \right)$$

Из этого уравнения и оценки противо-ЭДС рассчитывается значение оценки электромагнитного момента:

$$\hat{M}_e = \frac{3p}{4} \left(\frac{\hat{e}_\alpha}{\omega_e} i_\alpha + \frac{\hat{e}_\beta}{\omega_e} i_\beta \right) = \frac{3}{4} \left(\frac{\hat{e}_\alpha}{\omega_m} i_\alpha + \frac{\hat{e}_\beta}{\omega_m} i_\beta \right) \quad (5.15)$$

5.4 Модель системы в Simulink

На основе рассмотренных математических формул, была построена модель системы, приведённая на рисунке 5.1.

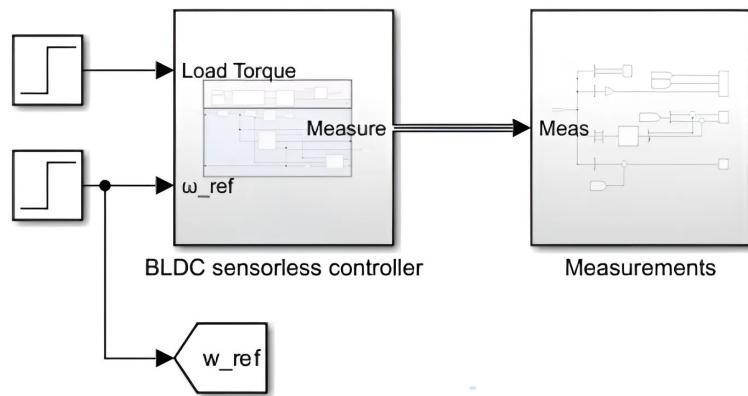


Рисунок 5.1 – Общая модель системы

Она состоит из двух основных блоков. Первый из них приведён на рисунке 5.2 и содержит силовую часть из инвертора, двигателя и источника питания, систему управления, которая представляет из себя двухконтурный регулятор (первый контур по скорости, второй по моменту). Электромагнитный момент находится по формуле 5.15 на основе параметров, получаемых при оценке с помощью наблюдателя скользящего режима, описанного в 5.2.

Инвертор представляет собой 6 ключей на основе Mosfet транзисторов (Рисунок 5.3) и питается от источника постоянного напряжения (Рисунок 5.4)

Переключение ключей происходит по текущему электрическому положению ротора с использованием ШИМ, скважность которого регулируется в зависимости от модуля значения выхода значения, получаемого на выходе ПИ регулятора контура момента, выход которого ограничен диапазоном от -1 до 1 (Рисунок 5.5).

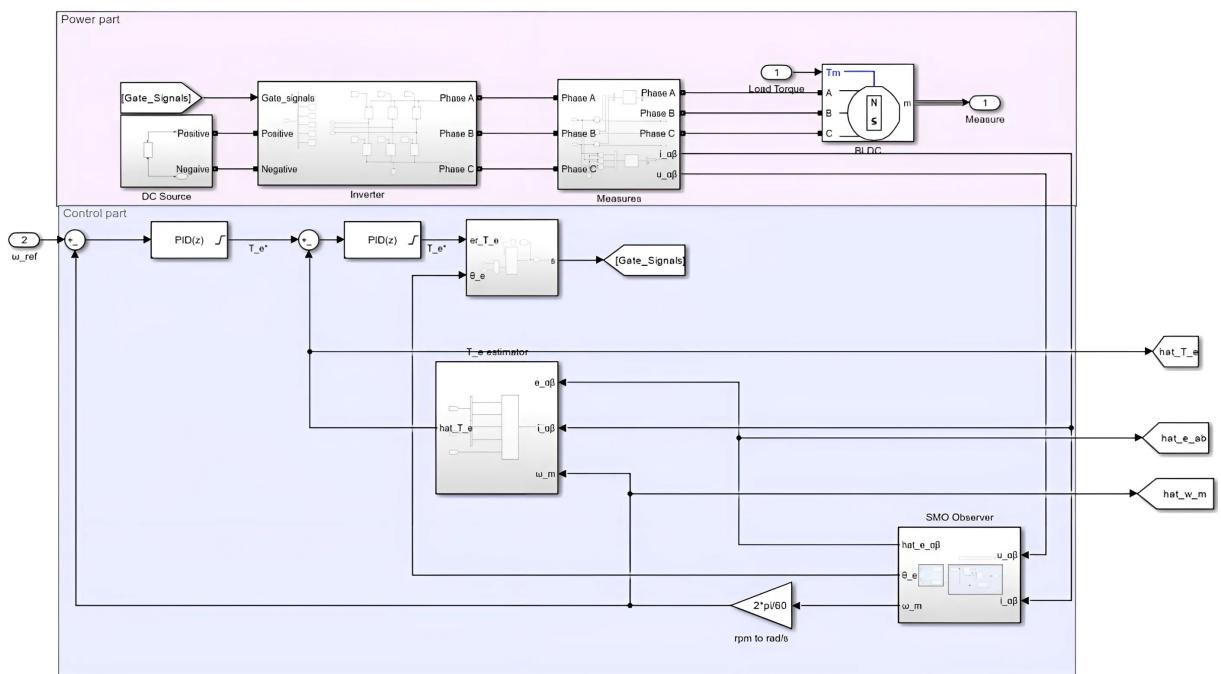


Рисунок 5.2 – Блок с системой управления и силовой частью

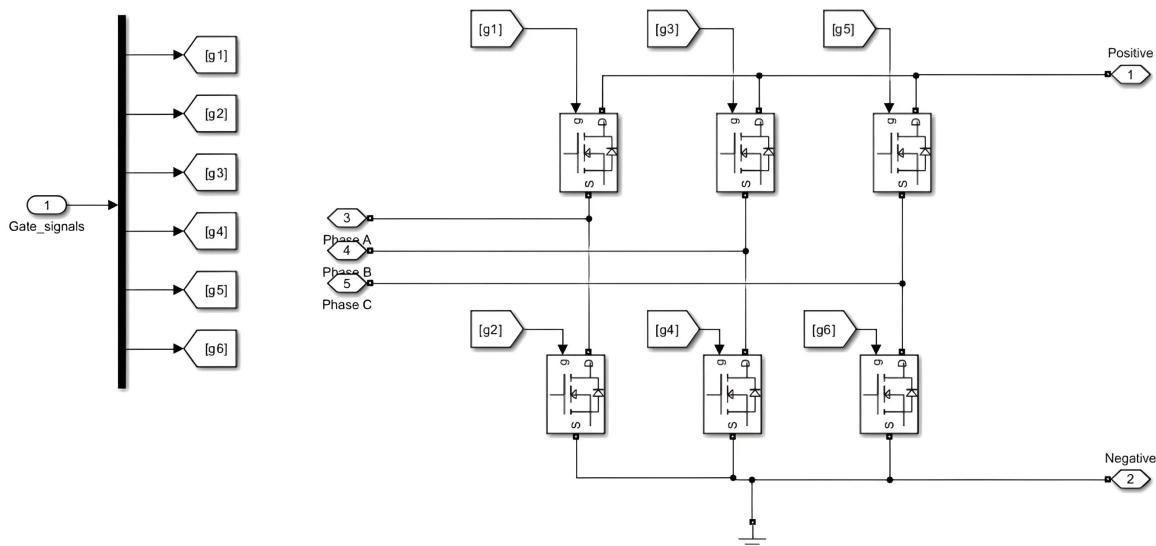


Рисунок 5.3 – Трёхфазный инвертор

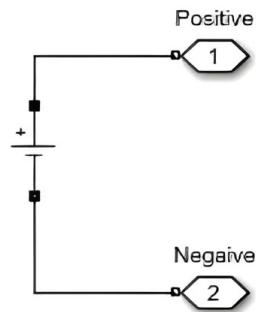


Рисунок 5.4 – Источник постоянного тока

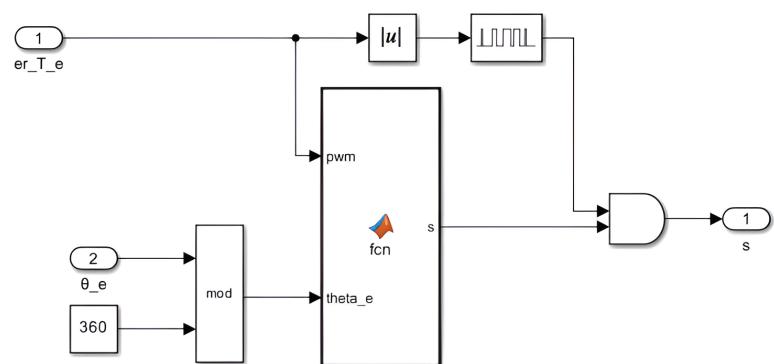


Рисунок 5.5 – Система переключения ключей инвертора

Возможные состояния в $\alpha - \beta$ системе с состояниями ключей приведены на Рисунке 5.6 и таблица коммутации в зависимости от электрического положения ротора и выхода ПИ регулятора момента приведены в Таблице 5.1. Общая схема модели приведена на Рисунке 5.7.

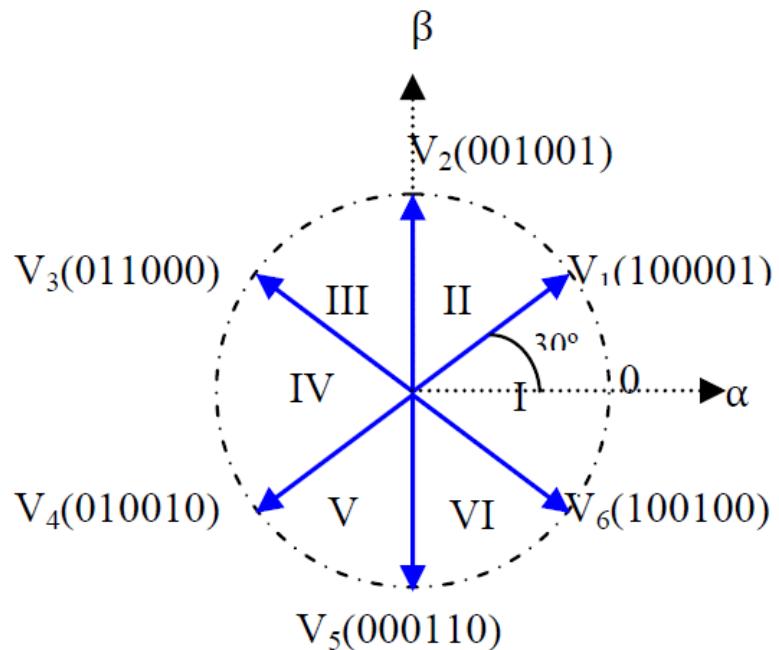


Рисунок 5.6 – Векторы переключения и состояния ключей [8]

Таблица 5.1 – схема коммутации от выхода регулятора

Выход ПИ регулятора	Электрическое положения ротора, рад					
	$\frac{11\pi}{6} - \frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{6} - \frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2} - \frac{5\pi}{6}$	$\frac{5\pi}{6} - \frac{7\pi}{6}$	$\frac{7\pi}{6} - \frac{3\pi}{2}$	$\frac{3\pi}{2} - \frac{11\pi}{6}$
[0-1]	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
[-1-0)	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

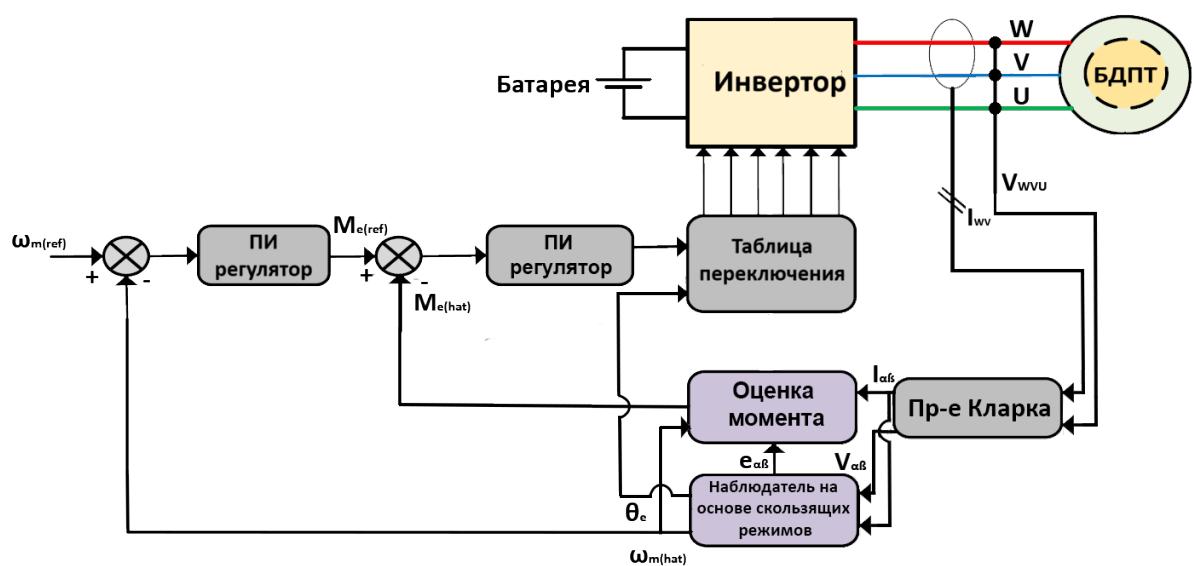


Рисунок 5.7 – Схема полученной системы управления

5.5 Результаты моделирования

Для моделирования использовались следующие параметры:

- а) параметры двигателя (значения взяты от реального двигателя (6.1)):

$$R_s = 0,1 \text{ Ом}$$

$$L_s = 0,0225 \text{ Гн}$$

$$p = 4$$

$$k_e = 0,909 \text{ В}^*\text{мин}/\text{об}$$

- б) параметры наблюдателя:

$$g = 0,9$$

$$\eta = 7,8821e - 4$$

$$f_{\text{среза}} = 1200 \text{ Гц},$$

где $f_{\text{среза}}$ — частота среза для фильтра нижних частот на выходе оценки противо-ЭДС для уменьшения чаттеринга

- в) параметры ПИ регулятора контура скорости:

$$K_p = 2,39$$

$$K_i = 0,05$$

- г) параметры ПИ регулятора контура момента:

$$K_p = 0,01$$

$$K_i = 0,09$$

- д) период дискретизации:

$$T_s = 1e - 5 \text{ с}$$

Моделирования проводилось в трёх отрезках задачи скорости ($0 - 400$ рад/с, $400 - 600$ рад/с и $600 - 300$ рад/с) и каждый раз двигателю задавалось некоторая начальная скорость, ведь иначе при низких скоростях наблюдателю

не получалось получить достаточно точную оценку противо-ЭДС для достижения желаемой скорости.

По техническому заданию неизвестны действительные значения сопротивления и индуктивности статора, известны лишь значения с погрешностью (в реальной работе двигателя эти параметры также могут варьироваться, например, из-за нагрева двигателя в ходе работы или других факторов), поэтому проводились моделирования также на граничных их значениях.

По результатам моделирования можно сказать, что вариация сопротивления практически не оказывает влияния на результаты работы наблюдателя и на переходные процессы в целом (Рисунки 5.9-5.10) в сравнении с эталонными параметрами (Рисунок 5.8), тогда как изменение индуктивности уменьшает скорость сходимости наблюдателя, что сказывается на времени переходного процесса и требует большего значения начальной скорости для достижения цели регулирования. Однако в пределах вариации параметров во всех экспериментах были выполнены требования, предъявляемые к алгоритму в техническом задании.

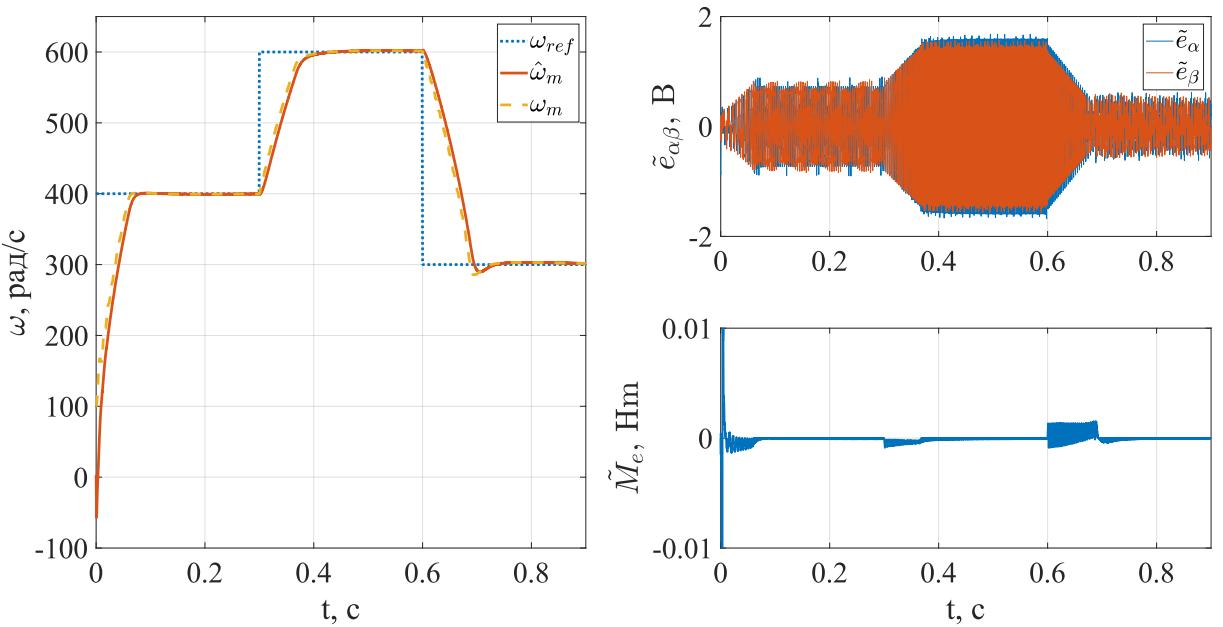


Рисунок 5.8 – результаты моделирования без вариации параметров (слева — заданная, оцененная и действительная скорость ротора, справа сверху — вектор невязки по противо-ЭДС, справа снизу — вектор невязки по электромагнитному моменту)

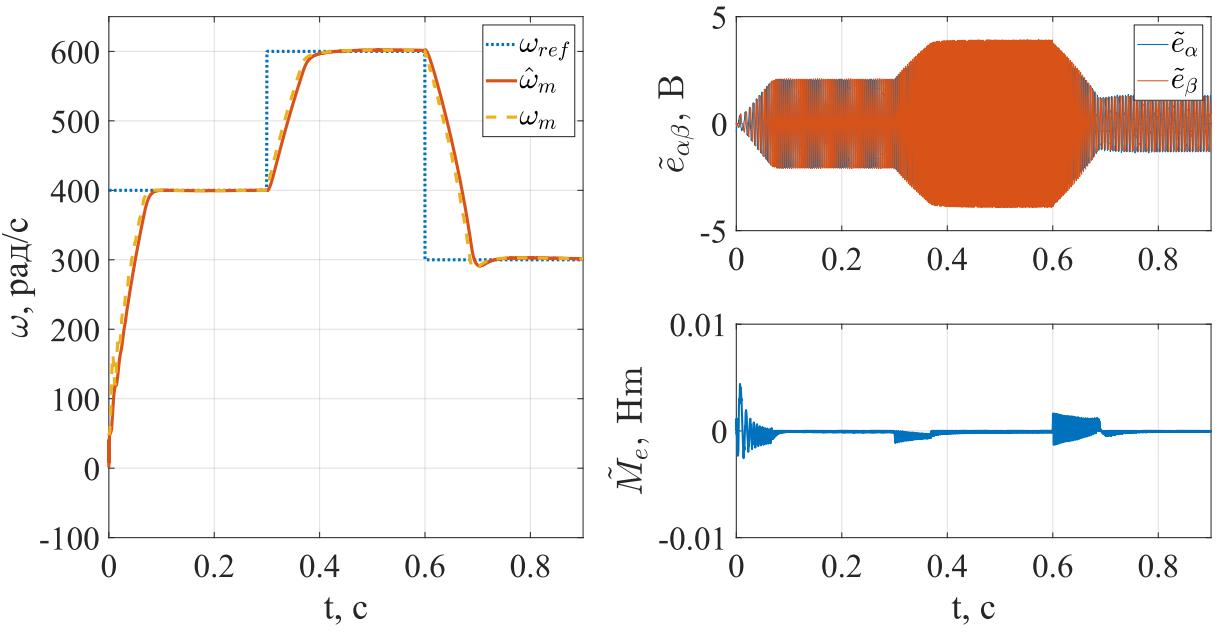


Рисунок 5.9 – результаты моделирования при уменьшении R_s на 100 %
 (слева — заданная, оцененная и действительная скорость ротора, справа
 сверху — вектор невязки по противо-ЭДС, справа снизу — вектор невязки
 по электромагнитному моменту)

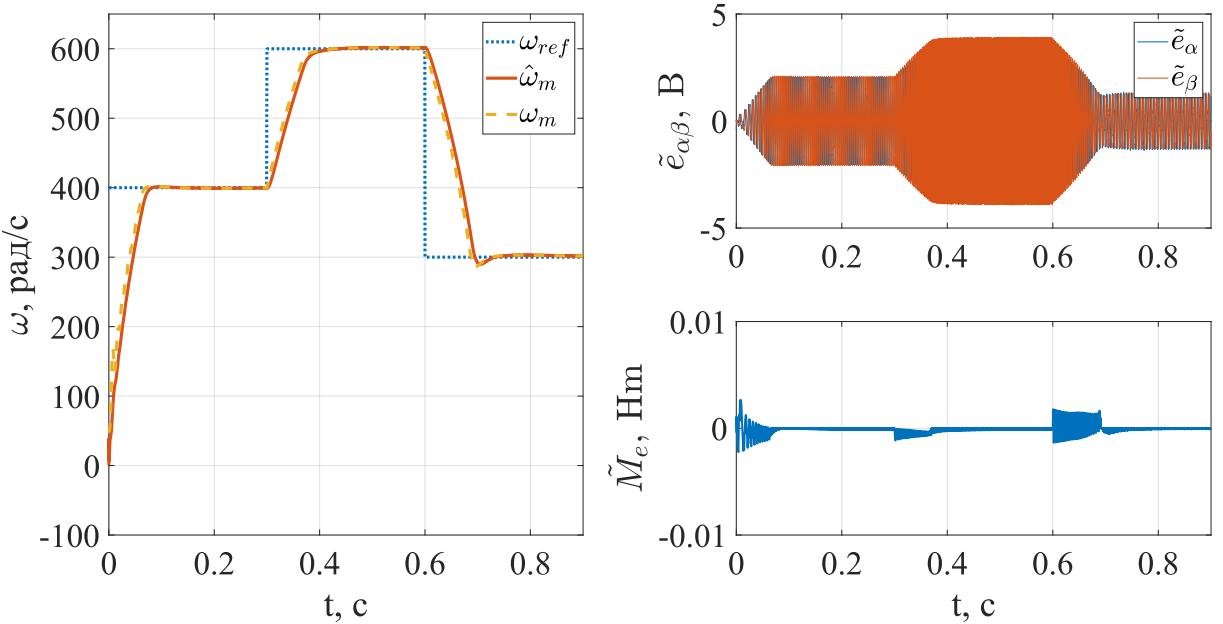


Рисунок 5.10 – результаты моделирования при увеличении R_s на 100 %
 (слева — заданная, оцененная и действительная скорость ротора, справа
 сверху — вектор невязки по противо-ЭДС, справа снизу — вектор невязки
 по электромагнитному моменту)

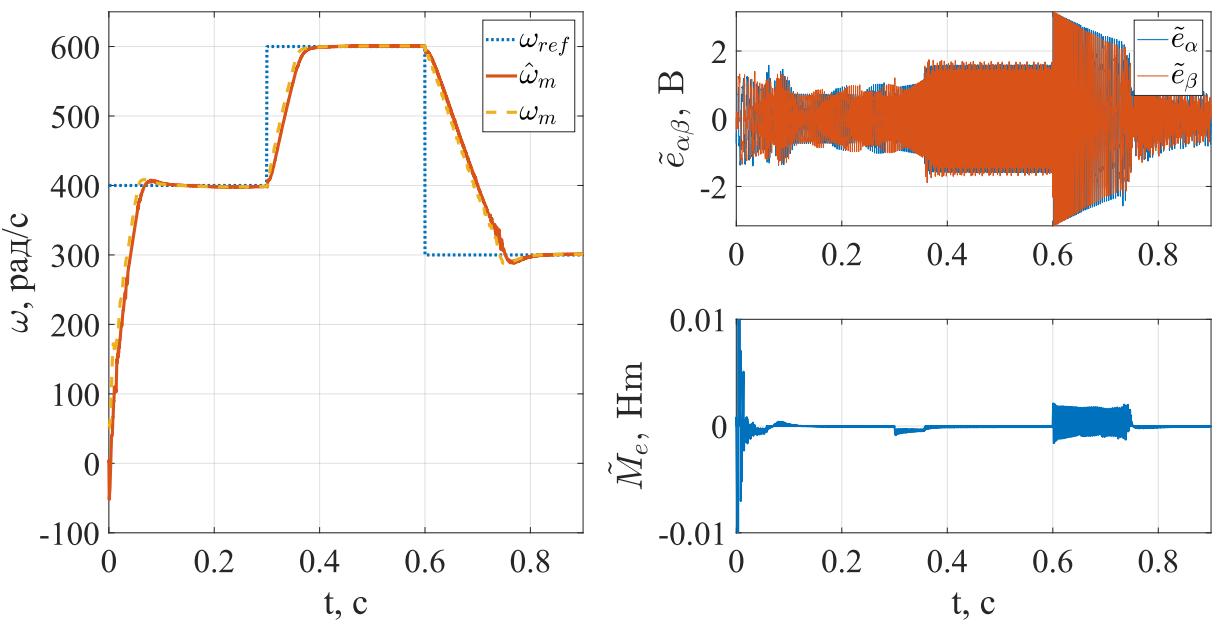


Рисунок 5.11 – результаты моделирования при уменьшении L_s на 10 %
 (слева — заданная, оцененная и действительная скорость ротора, справа
 сверху — вектор невязки по противо-ЭДС, справа снизу — вектор невязки
 по электромагнитному моменту)

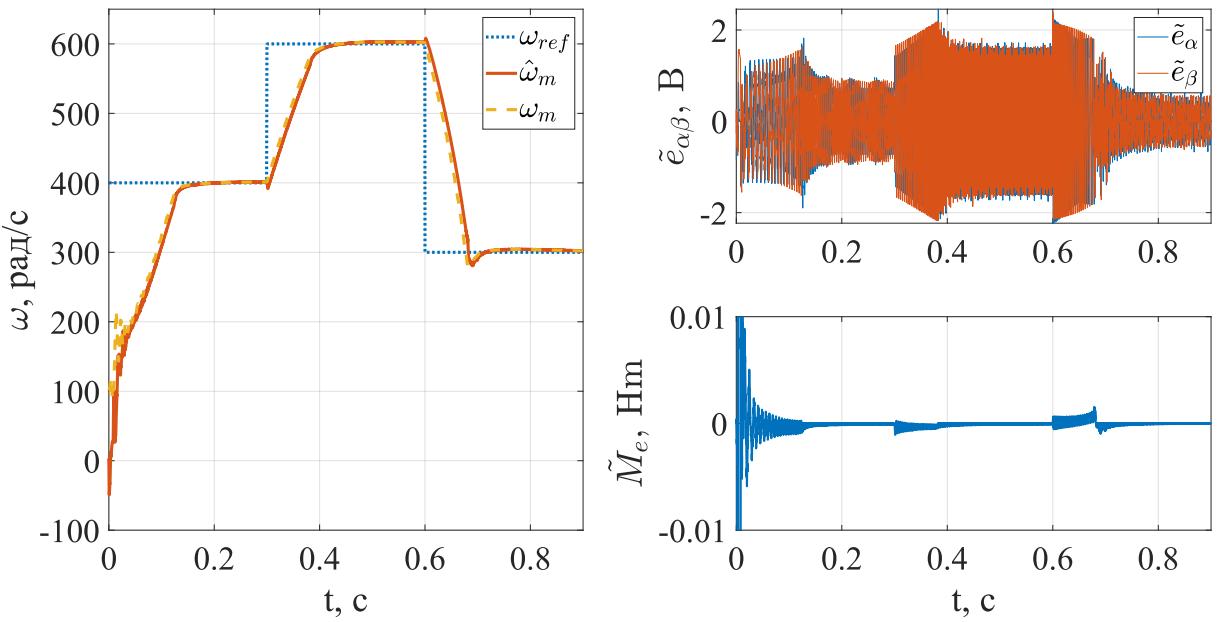


Рисунок 5.12 – результаты моделирования при увеличении L_s на 10 %
 (слева — заданная, оцененная и действительная скорость ротора, справа
 сверху — вектор невязки по противо-ЭДС, справа снизу — вектор невязки
 по электромагнитному моменту)

6 Разработка экспериментального стенда

6.1 Выбор компонентов и устройств для реализации узлов системы

После проверки алгоритма на модели началась разработка экспериментального стенда. В данном разделе будут определены элементы и устройства для реализации узлов, определённых в 4.2.

В качестве «мозга» для реализации алгоритма управления был выбран микроконтроллер STM32F411RET (Рисунок 6.1), который содержит всю необходимую периферию (поддерживает генерацию ШИМ, имеет аналого-цифровой преобразователь (АЦП), таймеры и имеет возможность передачи информации по последовательный протоколу связи).

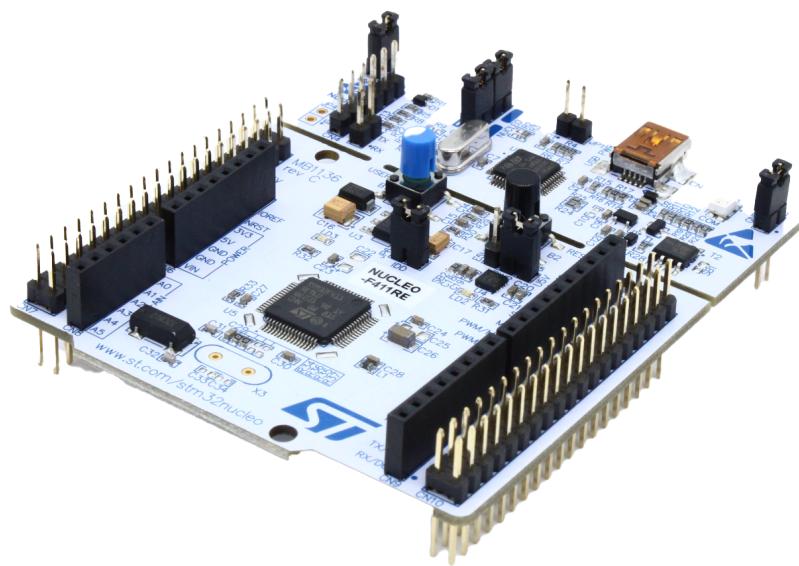


Рисунок 6.1 – Микроконтроллер STM32F411RET на базе Nucleo64

Инвертор, датчики для определения напряжения и тока фаз реализованы на отдельной печатной плате, рассмотренной в 6.2.

За объект управления взят двигатель Racerstar BR2208 1100KV (Рисунок 6.2), параметры которого были перечислены при моделировании в 5.5.



Рисунок 6.2 – БДПТ Racestar BR2208 1100KV

Для питания двигателя был выбран блок питания на 12 В/5 А (Рисунок 6.3), которого будет достаточно для питания двигателя в условиях работы без нагрузки или в условиях малых нагрузок и который обеспечит сохранность всей электрической схемы в случае короткого замыкания.



Рисунок 6.3 – Блок питания двигателя

6.2 Реализация драйвера двигателя

Для реализации силовой части был спроектирован собственный драйвер БДПТ в среде проектирования Altium Designer.

6.2.1 Инвертор

Для 3-фазного инвертора были использованы полумостовые драйверы IR2104STRPBF для каждой фазы, которые служат для преобразования управляющих сигналов микроконтроллера в сигналы для управления ключами инвертора, в качестве которых выступают mosfet транзисторы IRLR2705PBF. Также выбранные драйверы транзисторов исключают возможность одновременного открытия верхнего и нижнего ключей, исключая возникновение короткого замыкания в этом случае.

Драйверы транзисторов имеют два входа для регулирования (IN и \overline{SD}) и два выхода к транзисторам (HO и LO). Зависимость сигналов выхода от значений входа изображена на Рисунке 6.4. В нашем случае нижний вход будет служить для подачи на него ШИМ сигнала, а с помощью верхнего будет регулироваться, какой выход и, соответственно, какой транзистор открыть (при $IN = 1$ открывается верхний ключ, при $IN = 0$ открывается нижний ключ).

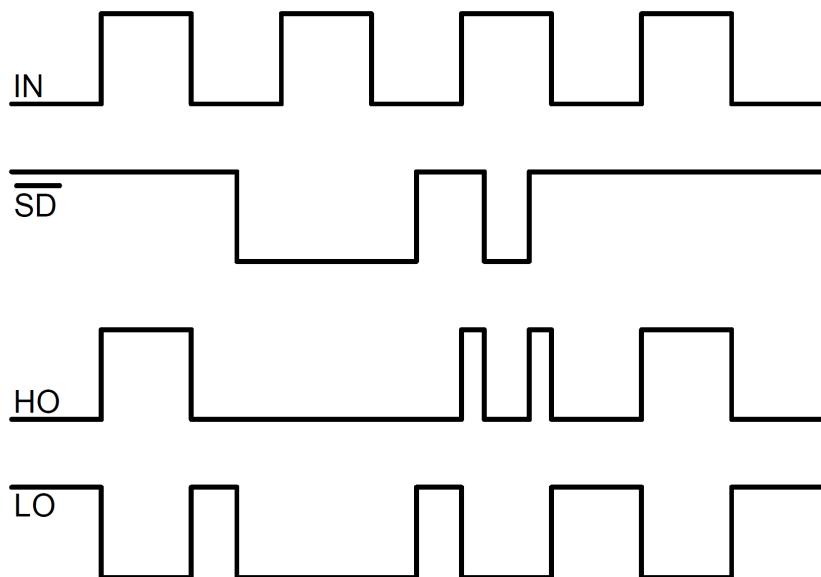


Рисунок 6.4 – Зависимость значений входов/выходов для IR2104STRPBF

Также параллельно фазам двигателя установлены диоды, которые препятствуют протеканию обратного тока катушек, которыми являются фазы двигателя, во время смены состояния ключей.

Общая схема силовой части изображена на Рисунке 6.5.

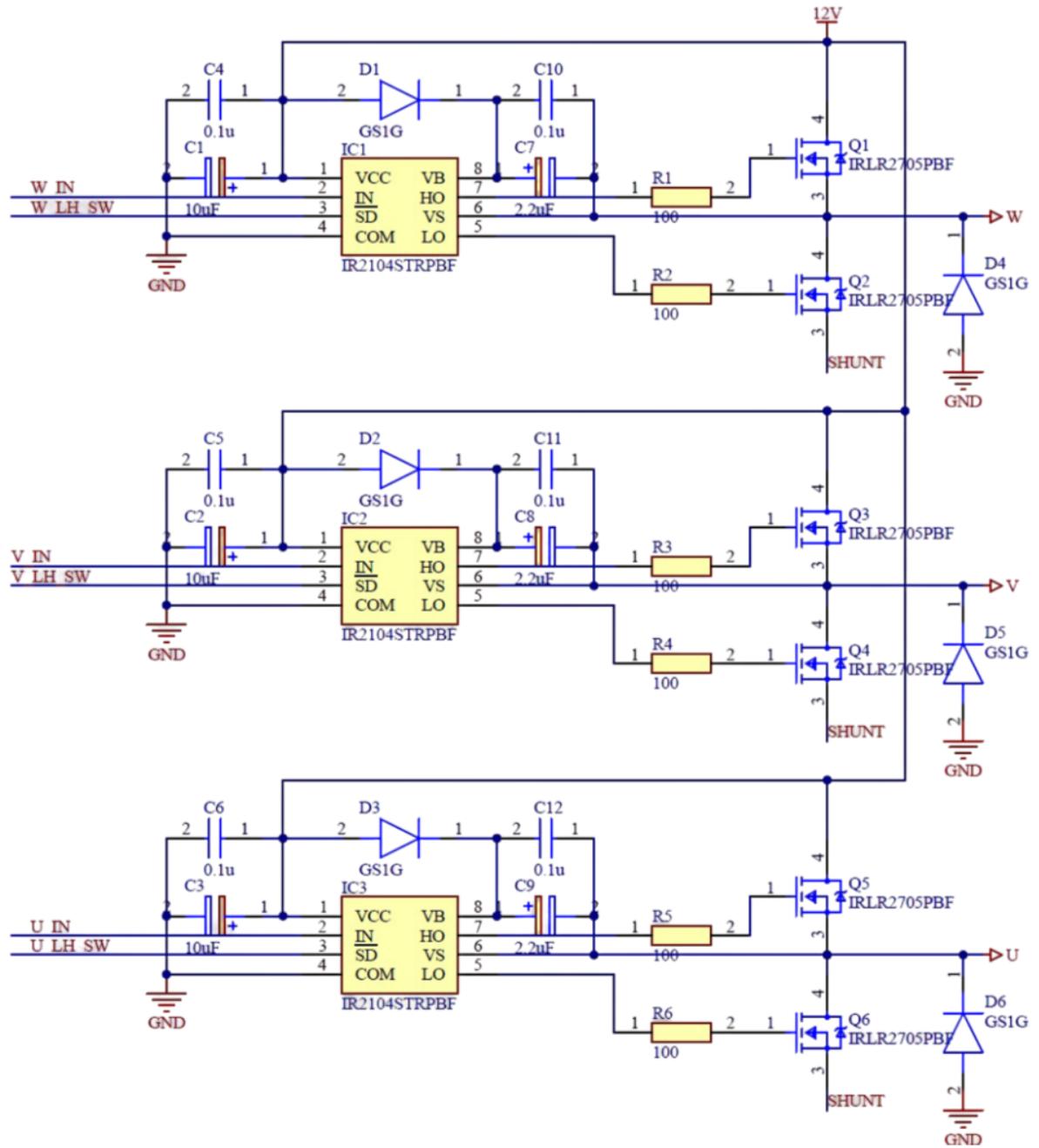


Рисунок 6.5 – Схема силовой части (W, V, U – фазы двигателя, $SHUNT$ – сигнал, уходящий к датчику тока, $12V$ – питание 12 В, WVU_{IN} , WVU_{LH_SW} – входы для управления ключами драйвера)

6.2.2 Измерительная часть

Для измерения тока используется датчик тока на основе ACS712ELCTR-05B-T, позволяющий преобразовать ток, текущий через него в напряжение в диапазоне от 0 до 5 В. Схема измерения тока изображена на Рисунке 6.6.

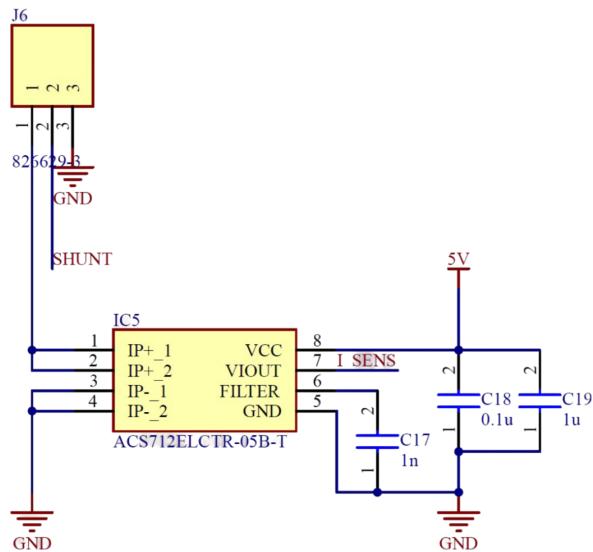


Рисунок 6.6 – Схема с датчиком тока (*SHUNT* — сигнал с фазы двигателя, 5V — питание 5 В, I_{SENS} — сигнал выхода датчика тока)

Для измерения напряжения на фазах необходимо использовать делители напряжения для преобразования из диапазона 0 – 12 В в диапазон 0 – 5 В. Также устанавливается конденсатор для избавления от высокочастотных шумов. Схема изображена на Рисунке 6.7.

Также на плате предусмотрен компаратор для сравнения напряжения на фазах с половиной питающего напряжения[4], служащий для определения точек пересечения нуля. Он служит для определения положения ротора (1.3).

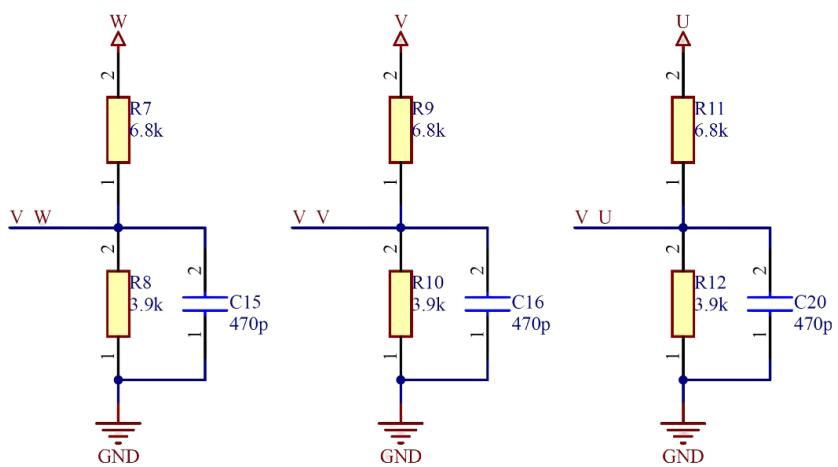


Рисунок 6.7 – Схема с делителями напряжения (WVU – фазы двигателя,
 V_{VWU} – сигналы с напряжениями фаз))

6.2.3 Подключение входов и выходов платы

Питание платы осуществляется двумя уровнями напряжений — 12 и 5 В. Первое идёт на питание двигателя и формируется блоком питания, второе служит для питания датчика тока и компаратора и идёт от микроконтроллера. От микроконтроллера также идут сигналы для управления драйверами транзисторов.

От платы на входы АЦП микроконтроллера идут сигналы с датчика тока и делителей напряжения. Однако на плате напряжения выходных сигналов приведены в диапазоне 0 – 5 В, а АЦП выбранного микроконтроллера работает с напряжениями 0 – 3,3 В, поэтому нельзя напрямую подключить сигналы с платы и необходимо использовать дополнительные делители напряжения.

Подключение фаз двигателя осуществляется через 2-х контактный клеммник, как и напряжения питания 12 В. Остальные сигналы подключаются посредством штыревых разъёмов.

6.2.4 Общий вид платы

На Рисунке 6.8 приведён вид платы, сгенерированный в редакторе, а на Рисунке 6.9 изображена уже изготовленная и распаянная плата.

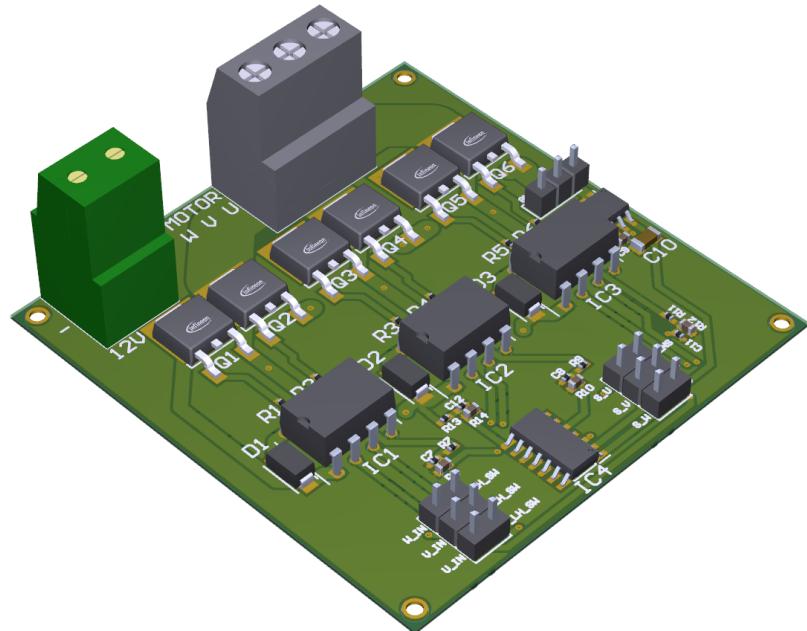


Рисунок 6.8 – Вид платы из Altium Designer

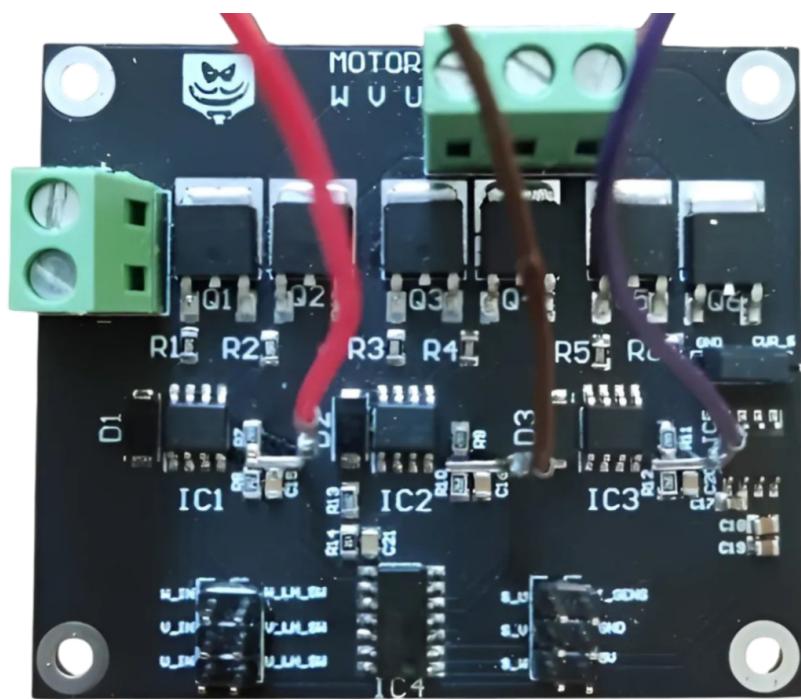


Рисунок 6.9 – Вид изготовленной платы

6.3 Экспериментальный стенд

На основе выбранных компонентов и узлов был собран стенд для экспериментальных исследований, представленный на Рисунке 6.10.

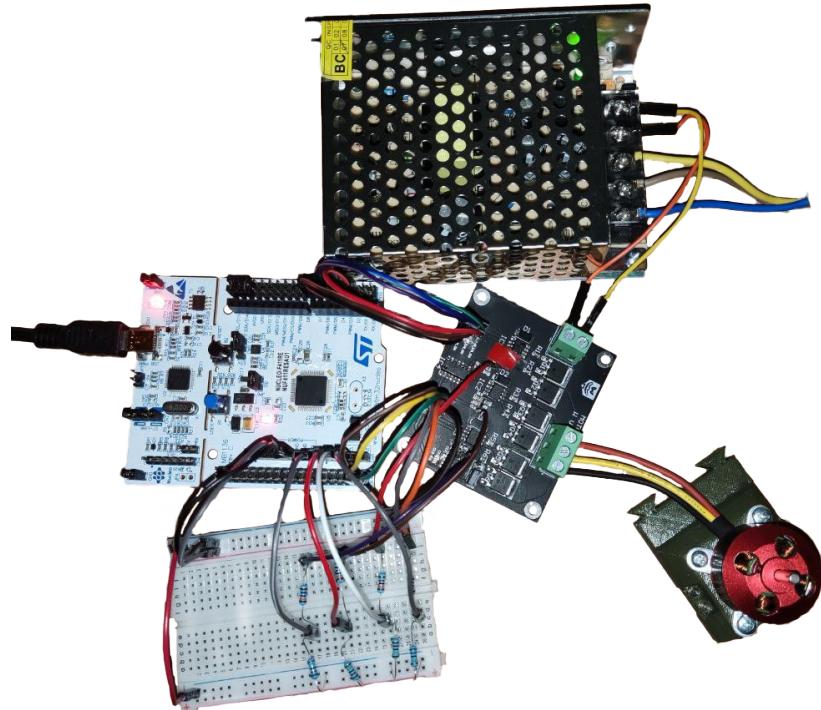


Рисунок 6.10 – Экспериментальный стенд

7 Экспериментальные исследования

7.1 Алгоритм работы устройства

Последовательность действий функционирования устройства аналогична с представленной в 5, не считая особенности работы с периферией микроконтроллера, и может быть описана следующими шагами:

- а) «слепой» пуск двигателя с фиксированным интервалом смены коммутирующих фаз двигателя;
- б) смена коммутирующих обмоток (выполняется по таймеру, работающему с периодом дискретизации)
 - 1) представление с помощью АЦП выхода датчика тока и напряжений на фазах в численной форме (т. к. у нас одно значение силы тока, то чтобы определить ток по фазам необходимо знать текущее состояние ключей инвертора);
 - 2) выполнение преобразования Парка для токов и напряжений фаз;
 - 3) оценка тока и противо-ЭДС по формулам 5.5 и 5.8;
 - 4) фильтрация противо-ЭДС фильтром низких частот первого порядка с частотой среза $f_{\text{среза}}$;
 - 5) оценка положения ротора по формуле 5.11 и скорости вращения ротора;
 - 6) оценка электромагнитного момента по формуле 5.15;
 - 7) получение выхода двухконтурной системы с ПИ регуляторами в диапазоне от -1 до 1 , на основе чего определение новой скважности ШИМ и нового состояния ключей инвертора;
 - 8) смена состояний ключей через драйверы, логика работы которых описана в 6.2.1;
- в) получение текущего положения ротора по сигналам с компаратора, описанного в 6.2.2;

г) отправка данных с значениями текущей, оценённой скорости и заданной скоростей, силы тока по фазам по протоколу USART через DMA.

7.2 Результаты эксперимента

На основе экспериментального стенда, разработанного в 6 были проведены экспериментальные исследования.

Параметры, используемые при моделировании:

а) параметры ПИ регуляторов контуров скорости и момента, а также параметры двигателя были взяты из 5.5

б) параметры наблюдателя:

$$g = 0,95$$

$$\eta = 7,8821e - 6$$

$$f_{\text{реза}} = 30 \text{ Гц}$$

в) период дискретизации:

$$T_s = 1e - 4 \text{ с}$$

г) параметры передаваемых через UART данных:

Скорость передачи = 40000 бит/с

Длина пакета = 40 бит

Результаты работы стенда приведены на Рисунке 7.1. Получилось, что из-за шумов и погрешности в измерении тока и напряжений действительное значение скорости не сходится полностью к заданному, а остаётся в некотором небольшом диапазоне, который, однако, соответствует 1 % зоне, определённой в техническом задании. Также перерегулирование и время переходного процесса соответствует желаемым показателям.

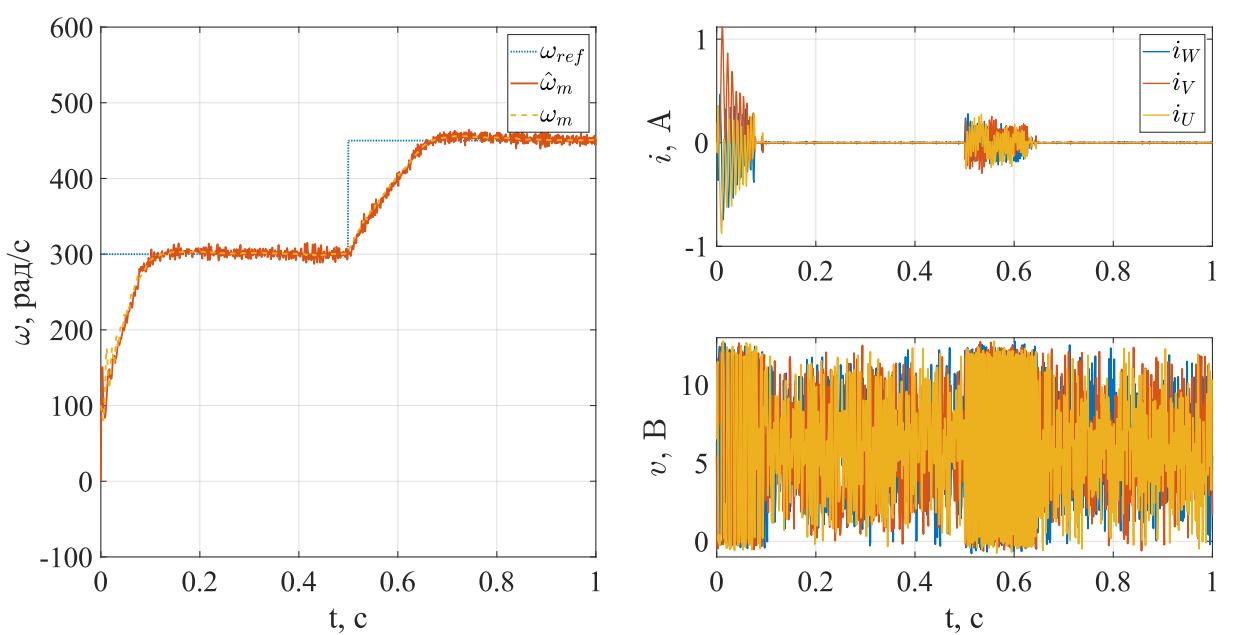


Рисунок 7.1 – результаты эксперимента (слева — заданная, оцененная и действительная скорость ротора, справа сверху — токи по фазам, справа снизу — напряжения по фазам)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был разработан алгоритм управления скоростью бесколлекторных бездатчиковых двигателей постоянного тока.

Была составлена модель с использованием выбранного алгоритма в программном комплексе Matlab/Simulink и проведено моделирование. Моделирование проводилось при исходных параметрах двигателя, а также при вариации сопротивления и индуктивности статора для проверки рабочих свойств. Во всех случаях получилось добиться желаемых показателей качества.

На основе модели был разработан экспериментальный стенд с учётом требований, предъявляемых в техническом задании, и проведено исследование его работы. В итоге, также получилось достичь желаемых показателей качества, что говорит об эффективности алгоритма в практической среде.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А. Усольцев А. Электрические машины/Учебное пособие. – СПб : НИУ ИТМО, 2013. – 416 с.
2. Kim Sang-Hoon. Electric Motor Control: DC, AC, and BLDC Motors. – Elsivier, 2017. – 438 p.
3. Motor Control Fundamentals For Dum / Schnaufer David, Briggs David, Sousa Marc, and Quinones Jose. – John Wiley & Sons, Inc., 2020. – 23 p.
4. Мишин Святослав. Управление бесколлекторным двигателем по сигналам обратной ЭДС – понимание процесса. – 2016. – Фев. – <https://habr.com/ru/articles/390469/>.
5. Kim T., Lee H.-W., Ehsani M. Position sensorless brushless DC motor/generator drives: review and future trends // IET Electr. Power. – 2007.
6. A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications / Mohanraj Deepak, Aruldavid Ranjeev, Verma Rakesh, Sathiyasekar K., Barnawi Abdulwasa B., and Chokkalingam Bharatiraja // IEEE Access. – 2022.
7. Kumar B. Pavan, M. Krishnan C. Comparative Study of Different Control Algorithms on Brushless DC Motors // Biennial International Conference on Power and Energy Systems. – 2016.
8. K. Girija P. Robustness Evaluation of SMO in Sensorless Control of BLDC Motor under DTC Scheme // International Conference on Power, Signals, Controls and Computation (EPSCICON). – 2014.
9. A New Approach to Sensorless Control Method for Brushless DC Motors / Kim Tae-Sung, Park Byoung-Gun, Lee Dong-Myung, Ryu Ji-Su, and Hyun Dong-Seok // International Journal of Control, Automation, and Systems. – 2008.
10. Discrete-time Sliding Mode Observer for Sensorless Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Machine / Bernardes Thiago, Montagner Vinícius Foleto, Gründling Hilton Abílio, and Pinheiro Humberto // IEEE TRANS-

ACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS. – 2014.