

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Лысьвенский филиал федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Факультет: Профессионального образования

Направление: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль: Автоматизированный электропривод и робототехнические комплексы

Кафедра: Общенаучных дисциплин

Доцент с и.о. зав кафедрой ОНД

_____ К.В. Кондратьева

« 19 » июня 2026 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

на тему:

«Модернизация БПЛА летательного типа посредством внедрения
рекуперационных технологий в схему электропитания»

Студент: _____ Ю.М. Кузьминых
(подпись, дата)

Группа: АЭП-21-1бз ЛФ

Состав ВКР:

1. Пояснительная записка на _____ стр.
2. Графическая часть на _____ листах
3. Электронный носитель с материалами ВКР

Руководитель: _____ ст. преподаватель В.Г. Лопатин
(подпись, дата)

Проверено

на наличие

заимствования: _____ канд. экон. наук, доцент, К.В. Кондратьева
(подпись, дата)

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Лысьвенский филиал федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Факультет: Профессионального образования

Направление: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль: Автоматизированный электропривод и робототехнические комплексы

Кафедра: Общенаучных дисциплин

Доцент с и.о. зав кафедрой ОНД

_____ К.В. Кондратьева

« 03 » марта 2026 г.

ЗАДАНИЕ **на выпускную квалификационную работу**

Фамилия, имя, отчество Кузьминых Юрий Михайлович

Группа: АЭП-21-1бзЛФ

Начало выполнения работы: 05 февраля 2026 г.

Срок предоставления на кафедру: 11 июня 2026 года

Защита работы на заседании ГЭК: 24 июня 2026 года

1. Выпускная квалификационная работа на тему: «Модернизация БПЛА летательного типа посредством внедрения рекуперационных технологий в схему электропитания».

2. Исходные данные к работе: технические характеристики установки (оборудования), электропривода, устройств, входящих в состав проекта. Учебная и техническая литература, сайты по автоматизированному электроприводу типовых производственных механизмов и технологических комплексов, автоматизации технологических процессов.

3. Содержание пояснительной записки:

а) Введение. Отразить состояние и актуальность представляемой темы, сформулирована цель и конкретные задачи исследований. Также конкретизировать объект и предмет исследований, принцип его работы. Определить методы исследований и значимость работы для теории и практики, непосредственно для конкретного производства. В краткой форме сформулировать необходимость разработки данной темы, указать текущее состояние разрабатываемой темы, к какой области науки и техники относится выполняемая работа. Описать требования, предъявляемые к безопасности труда.

Общий объём до 5 страниц.

б) Основная часть:

Исследовательский раздел. Изучение и анализ нормативно-правовых документов и теоретических вопросов, состояние дел в избранной предметной области на основе анализа литературных источников, обоснование принятых решений. В данный раздел включить:

- 1) Определение круга решаемых задач, связанных с регулированием технологических параметров;
- 2) Работу полупроводниковых преобразовательных устройств.,
- 3) Детальное рассмотрение особенностей схемы электропитания,
- 4) Подходы к построению современной системы регулирования: управление, контроль параметров, поддержание безопасных условий работы;
- 5) Задачи и функции рассматриваемых устройств.

Объем от 15 до 30 страниц. В конце раздела должны быть сделаны краткие выводы.

в) Технологический (конструкторский) раздел. В данном разделе выполнить сам проект, а именно:

- 1) Построение алгоритма работы схемы электропитания;
- 2) Разработка функциональной схем электропитания;
- 3) Разработка схемы и изучение принципа работы схемы электропитания
- 4) Расчёт и выбор элементов схемы;
- 5) Разработка связи между отдельными элементами, связь с электроприводом, соединение с ПК;
- 6) Сделать описание работы рекуперации в схеме электропитания Полученные результаты сравнить с известными техническими решениями;
- 7) Сделать выводы о проделанной работе.

Объём от 15 до 30 страниц.

Заключение. Краткое изложение решаемых в рамках ВКР задач и полученных результатов, практическая значимость работы для исследуемого объекта, соответствие полученных результатов теме и заданию ВКР. Определить значимость проделанной работы для дальнейшего её использования. Объем до 1,5 страниц.

4. Перечень графического материала.
 - 4.1.Схема электрическая функциональная;
 - 4.2.Схема электрическая структурная;
 - 4.3.Схема электрическая принципиальная;
 - 4.4.Схема электрическая соединений.

5. Дополнительные указания: нет

6. Основная литература

6.1 ГОСТ 7.32-2017 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

6.2 Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: Учебник для вузов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.

6.3 Белоус, А.И. Полупроводниковая силовая электроника / А.И. Белоус, С.А. Ефименко, А.С. Турцевич. – Москва: Техносфера, 2013. – 216 с. – ISBN 978-5-94836-367-7.

6.4 Билоус О.А., Иванов А.П. Электронные преобразовательные устройства. Электрон. версия учебного пособия. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2010. – 212 с. – Режим доступа: <http://elibrary.pstu.ru/docview/?id=486.pdf>, свободный.

6.5 Зиновьев, Г.С. Силовая электроника: учебное пособие для бакалавров / Г.С. Зиновьев. – М.: Юрайт, 2014. – 667 с.

6.6 Лыков, А.Н. Автоматизация технологических процессов и производств: учеб. пособие / А.Н. Лыков. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 423 с.

6.7 Мышляева, И.М. Цифровая схемотехника: Учебник для сред. проф. образования. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 400с.

6.8 Палагута, К.А. Микроконтроллерное управление электроприводом: Учебное пособие. - М.: МГИУ, 2008. – 298 с.

6.9 Попков, О.З. Основы преобразовательной техники. Учебное пособие – М.: изд-во МЭИ, 2010. – 200с.

6.10 Розанов, Ю.К., Лепанов, М.Г. Силовая электроника Учебник и практикум для вузов; под ред. Розанова Ю.К. Москва: Изд. Юрайт – 2021 – 206 с.

6.11 Силовая полупроводниковая элементная база. Технология производства. Конструктивные решения: учебное пособие / В.Я. Фролов, А.М. Сурма, К.Н. Васерина, А.А. Черников. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 228 с. – ISBN 978-5-8114-3507-4.

6.12 Электротехнический справочник: В 4 т. /Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. – 8-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 1998, 2002.

Руководитель выпускной квалификационной работы студента

Руководитель ВКР _____ ст. преподаватель В.Г. Лопатин
(подпись, дата)

Задание получил _____ Ю.М. Кузьминых
(подпись, дата)

КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ БАКАЛАВРА

№ п/п	Содержание разделов	Объем этапа, в %	Срок выполнения		Подпись научного руководителя
			начало	конец	
	Введение	5/5	10.02.2026	03.03.2026	
1.	Исследовательский раздел	35/40	23.02.2026	24.04.2026	
1.1.	Постановка задачи проектирования	5/10	23.02.2026	13.03.2026	
1.2.	Проектирование схемы рекуперации энергии	20/25	13.03.2026	24.03.2026	
1.3	Выбор комплектующих изделий	35/40	24.03.2026	04.04.2026	
2.	Технологический (конструкторский) раздел	50/90	24.04.2026	14.06.2026	
2.1.	Разработка структурной и функциональной схем	10/50	24.04.2026	08.05.2026	
2.2.	Разработка принципиальной электрической схемы	25/65	08.05.2026	18.05.2026	
2.3	Реализация поставленных задач и сравнение полученных результатов с известными техническими решениями	50/90	18.05.2026	05.06.2026	
	Заключение	2/92	06.06.2026	07.06.2026	
	Список использованных источников	1/93	08.06.2026	09.06.2026	
	Оформление ВКР	2/95	09.06.2026	10.05.2026	
	Представление ВКР на проверку и отзыв научному руководителю		09.06.2026	10.06.2026	
	Представление ВКР на проверку заведующему кафедрой		09.06.2026	10.06.2026	
	Защита ВКР на заседании ГЭК	5/100	24.06.2026	25.06.2026	

Руководитель ВКР

ст. преподаватель В.Г. Лопатин

«10» июня 2026 г.

Задание получил _____ Ю.М. Кузьминых

«05» февраля 2026 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	9
1.1 Исследование типов БПЛА, определение и классификации	9
1.2 Ключевые компоненты силовой установки БПЛА	13
1.3 Рекуперация, определение, применение в настоящее время.....	14
1.4 Принципы работы рекуперации в БПЛА	15
2. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	17
2.1 Двигатели-генераторы, принципы работы, обозначение	17
2.2 Диод Шоттки	23
2.3 Контроллеры двигателей ESC	26
2.4 Полётный контроллер	31
2.5 Датчики Холла.....	35
2.6 Балластный резистор.....	37
3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	39
3.1 Физический принцип рекуперации в БПЛА	39
3.2 Расчёт средней силы тока и мощности рекуперации	45
3.3 Оптимизация получаемой энергии.....	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	54
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	57

ВВЕДЕНИЕ

В нынешнее время довольно сильно выделилась одна из отраслей, которая в процессе стала одной из основной в жизни человечества. Данная отрасль – робототехника. Из неё можно выделить следующий подвид, а именно беспилотные летательные аппараты – робототехническая аппаратная система с различной степенью автономности: от управляемых до автономных. Данная аппаратура уже сыскала популярность во многих сферах, как пример: сельскохозяйственная промышленность (использование летательных аппаратов в качестве мониторинга полей для исследования урожайности), гражданская промышленность (перевоз грузов, съёмка с видеокамер), исследовательская сфера (изучение труднодоступных мест), а также в разведывательных целях (использование летательных аппаратов сотрудниками МЧС и другими спецслужбами), и в военных целях.

Задача: предложить модернизацию для беспилотного летательного аппарата, в целях улучшения системы электропитания. В качестве варианта, включить в объект рекуперацию.

Объект для изучения: аэростатный беспилотный летательный аппарат на электродвигателе: T-Motor MN1005 V2.0.

Задачи проекта делятся на следующие пункты:

1. Исследование рекуперационных технологий.
2. Исследование типов летательных аппаратов.
3. Разбор практической составляющей: создание электрических схем, а также проведение дополнительных расчётов для вычисления накопленной мощности электроэнергии за определённый цикл времени.

Разрабатываемый модуль должен содержать четыре основных пункта надёжности [1]:

1. Безотказность – непрерывное сохранение работоспособности объекта в течение определённого промежутка времени.

2. Долговечность – свойство сохранения работоспособности объекта до наступления предельного момента.

3. Ремонтопригодность – возможность объект восстановить для последующей его эксплуатации.

4. Сохраняемость – свойство объекта сохранять свои характеристики в процессе его хранения.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Исследование типов БПЛА, определение и классификации

БПЛА (беспилотно-летательный аппарат) – это специализированное дистанционное оборудование летательного типа, которым имеется возможность управлять дистанционно [2].

В наше время БПЛА можно разделить на несколько классификаций: по назначению, по типу, по принципу полёта [3].

Классификация по назначению – в данной классификации БПЛА будут распределены по основным сферам. Каждый БПЛА в данной классификации распределён в таком положении, чтобы их конструкция была полезна в той или определённой работе. Классификация по назначению имеет три основных сферы: военная, гражданская, научная.

В данной классификации БПЛА могут использоваться как одной конструкции, так и совершенно разной. Самое важное чтобы БПЛА смогли выполнить ту или иную функции в определённой сфере, благодаря чему их конструкции могут быть совершенно разными.

Пример: для разведывательных и геолокационных миссий должен использоваться летательный аппарат способный провести в воздухе длительное время. Использовать в таком случае дроны с низкой летательной способностью и небольшой дальностью полёта – неэффективно. В другом случае для использования дронов в исследовании горных пород в труднодоступных местах – лучше брать подвижные и небольшие.

Для каждого случая используются свои БПЛА с определённой конструкцией, которые являются следующей классификацией – классификация по типу:

1. БПЛА самолётного типа — по конструкции больше всего похожи на самолёты (см. рисунок 1.1.1). Используют в качестве аэродинамического компонента неподвижные крылья, создающие подъёмную силу. Обладают наибольшей дальностью и скоростью полёта [4].



Рисунок 1.1.1 — Первый прототип БПЛА 9М62 «Типчак». БПЛА самолётного типа

2. БПЛА вертолётного (коптерного) типа — данные аппараты являются оснащёнными одним или несколькими винтами, которые помогают выполнять подъём, а также регулируют скорость и движение БПЛА. Данные аппараты часто являются небольшими и компактными устройствами. Самый распространённый пример данного типа: квадрокоптер (см. рисунок 1.1.2) [5].

3. Гибридные БПЛА — аппараты совмещаю в себе летательный тип, для долгого полёта и вертолётный тип для быстрого подъёма и изменении траектории (см. рисунок 1.1.3) [15]. Практически аннулирую слабости вертолётного типа и летательного, но дорогие в изготовлении.



Рисунок 1.1.2 — Syma X5HW Wi-Fi FPV с видеокамерой



Рисунок 1.1.3 — Irbis 432

4. Аэростатические БПЛА — данные БПЛА используется больше для метеорологии, поэтому известны своей продолжительностью полёта, которая может достигать недель/месяцев/лет. Используют в качестве топлива гелий или водород. По своей технической структуре напоминает больше воздушный шар или дирижабль (см. рисунок 1.1.4) [16].



Рисунок 1.1.4 — Беспилотный дирижабельный комплекс ДП-29

Это основные типы БПЛА, которые полностью отличаются друг от друга по конструкции. Однако это не единственная классификация, по которым можно распределять летательные аппараты.

Классифицировать можно также по весу и грузоподъёмности. По способу автономности. По каналу управления и т.д.

1.2 Ключевые компоненты силовой установки БПЛА

Силовая установка — это энергетический комплекс, который служит двигательной силой, получаемой из механической или электрической энергии, а также вспомогательное оснащение для получения энергии. [6]

Основные компоненты силовой установки аэростатического БПЛА:

- Двигатели — ключевой компоненты БПЛА, необходим для создания крутящего момента винтов (пропеллеров);
- Винты (пропеллеры) — необходимы для преобразования крутящего момента в движение объекта;
- Системы управления вектором тяги — рулевые лопасти, для изменения вектора направления БПЛА;
- Контроллеры двигателей — необходимы для регулирования скорости вращения винтов (пропеллеров);
- Источники питания — в основном используются литиевые аккумуляторы с постоянным током;
- Системы охлаждения — необходима для предотвращения от перегрева электрических компонентов;
- Системы мониторинга и датчики;
- Бортовой компьютер / полётный контроллер — является «мозгом» аппарата, обрабатывает поступающие сигналы от датчиков и контроллеров;
- Рули и стабилизаторы — обеспечивают устойчивость и управляемость (вертикальные и горизонтальные рули, кили, стабилизаторы).

1.3 Рекуперация, определение, применение в настоящее время

Рекуперация — это процесс преобразования части затрачиваемой энергии в дополнительную энергию для повторного использования её в той или иной сфере [7].

В качестве примера можно использовать пример с автомобилем. При торможении, колёса автомобиля продолжают вращаться в соответствии с первым законом Ньютона (объект продолжает двигаться, пока силы воздействующие на него полностью не пропадут). При этом вращении двигатель переключается в генераторный режим, создающий дополнительное количество энергии для последующего хранения в аккумуляторах и использовании для дальнейших нужд. Более подробнее с данным процессом можно ознакомиться на рисунке ниже (см. рисунок 1.3.1) [17].

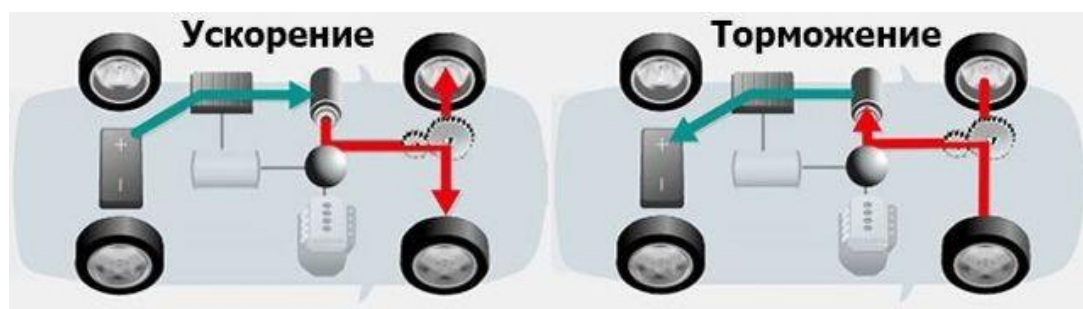


Рисунок 1.3.1 – Процесс рекуперации в электроавтомобилях

Также данная технология может использоваться в других сферах: например использование отходов в качестве вторсырья. Также по принципу рекуперации работает и вентиляция, отдавая тёплый воздух, забирая холодный и наоборот.

В данном проекте мы затронем лишь рекуперацию связанную с электрической частью, а именно преобразование кинетической силы в электрическую энергию.

1.4 Принципы работы рекуперации в БПЛА

Основной принцип работы рекуперации в БПЛА состоит в движении винтов. При торможении или снижении летательного аппарата, двигатель прекращает работать на некоторое время. В этот момент начинает работать дополнительная сила приводящая винты в движение и создающая обратную ЭДС — она же и является первопричиной создания обратного тока, которую преобразует генератор.

Создание дополнительной энергии состоит из нескольких ключевых этапов:

1. При торможении двигатель переходит в генераторный режим;
2. Посредством воздействия кинетической энергии на винты, образуется обратный ток;
3. Энергия резервируется в дополнительные накопители для дальнейшего использования энергии в собственных целях.

Тем самым полученная энергия может распределяться между электрическими модулями БПЛА.

Ключевые компоненты в рекуперационном модуле:

- Двигатели-генераторы — выполняют двойную функцию: приводят аппарат в движение и генерируют ток при торможении;
- Контроллеры двигателей (ESC) — регулируют режим работы (двигатель/генератор), управляют передачей энергии;
- Диоды Шоттки — обеспечивают однонаправленный ток, предотвращают повреждение системы обратным напряжением;
- Накопители энергии (в качестве накопителей можно использовать аккумуляторы или суперконденсаторы);
- Балластные резисторы — поглощают избыточную энергию, преобразуя её в тепло (защита от перенапряжения);
- Датчики (на эффекте Холла и др.) — отслеживают параметры работы двигателя (скорость, ток, напряжение);

- Полётный контроллер — анализирует данные и управляет процессом рекуперации.

В данном проекте необходимо ознакомиться с каждым компонентом отдельно, проведя технический анализ, а также выяснить насколько эффективно можно их работу изменить, для дальнейшей модернизации БПЛА.

2. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Двигатели-генераторы, принципы работы, обозначение

Двигатели-генераторы в БПЛА — это устройства, которые могут выполнять двойную функцию: обеспечивать тягу для движения аппарата и генерировать электроэнергию для зарядки аккумуляторов или питания бортовых систем. Чаще всего они используются в гибридных силовых установках (ГСУ), сочетающих двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и электродвигатель.

Основной принцип работы такого двигателя заключается в следующем: в гибридных системах ДВС обычно обеспечивает основную тягу, а электродвигатель может работать в режиме генератора, заряжая аккумуляторы во время горизонтального полёта с устоявшимися параметрами. В других режимах электродвигатель может добавлять мощность при взлёте или наборе высоты, а также использоваться при отказе основного двигателя.

Пример такой работы:

1. При взлёте или наборе высоты ДВС и электродвигатель работают вместе, создавая повышенную тягу. Электродвигатель при этом получает энергию от батареи.

2. В горизонтальном полёте ДВС продолжает работать, обеспечивая движение, а электродвигатель переходит в режим генератора, заряжая аккумуляторы.

3. При необходимости (например, для экономии топлива или снижения шума) можно отключить ДВС и перейти на электрическую тягу за счёт заряда аккумулятора.

В некоторых системах возможно плавное переключение между режимами в зависимости от плана полёта, потребления энергии и других факторов.

Таким образом гибридный двигатель имеет возможность генерировать дополнительную электроэнергию не только для переключения на

электродвигатель, но и для использования дополнительного электрооборудования. Позволяют увеличить длительность полёта.

Однако данные двигатели имеют определённые трудности в массовом изготовлении. Основные из них: сложность в конструкции, дороговизна изготовления. Также двигатели используются лишь на определённых летательных аппаратах.

В основном в обозначениях двигателей выделяют следующие категории [9]:

1. Размер стартора: первые две цифры обозначают диаметр статора в миллиметрах, последние две — его высоту. Например, в маркировке 2207 диаметр статора — 22 мм, высота — 7 мм.

Широкий стартор (23xx, 24xx) даёт больше крутящего момента на низких или средних оборотах, из-за чего даёт более повышенную управляемость. В ином случае высокий стартор (xx07, xx08) обеспечивает большую мощность на высоких оборотах, но уменьшает управляемость объекта.

2. K_u : специальный коэффициент, показывающий частоту вращения в минуту (N), которую двигатель выдаёт за один вольт напряжения без дополнительной нагрузки (пропеллера). Высокий K_u означает высокую скорость вращения, но меньший крутящий момент, низкий K_u — медленную скорость, но больший крутящий момент.

Для расчёта частоты вращения в минуту используется следующая формула (см. формула 2.1):

$$N = K_u * U \quad (2.1)$$

где, N — частота вращения в минуту;

K_u — коэффициент частоты вращений в минуту;

U — напряжение аккумулятора.

Формула необходима для расчёта приблизительного значения частоты вращения в минуту, без учёта воздействия дополнительных сил (трения о

воздух). Важная пометка: частота вращения в минуту не должно превышать минимального значения (45000 об/мин), иначе возможны повреждения механизма.

В гибридных системах также могут использоваться обозначения, связанные с характеристиками ДВС (мощность, тип топлива) и параметрами всей установки (общая мощность, удельная мощность, масса).

Основные типы генераторов в БПЛА:

1. Синхронные генераторы с постоянными магнитами (PMSG) (см. рисунок 1.1.1) [18]:

- Наиболее распространённый вариант для БПЛА.
- Отличаются высоким КПД и компактностью.
- Не требуют внешнего возбуждения — магнитное поле создаётся постоянными магнитами на роторе.
- Хорошо подходят для гибридных силовых установок, где генератор приводится во вращение двигателем внутреннего сгорания (ДВС).

2. Шестифазные генераторы (см. рисунок 2.1.1):

- Специальная разработка для бортовых гибридных установок БПЛА (патент RU213638U1) [19].
- Включают ротор с постоянными магнитами и статор с шестью обмотками.
- Обмотки статора подключены к диодному выпрямителю по схеме двух треугольников, смещённых на 60°
- Основные преимущества: снижение пульсаций выходного напряжения (по сравнению с трёхфазными схемами); уменьшение массы энергетической установки; повышение надёжности системы питания.

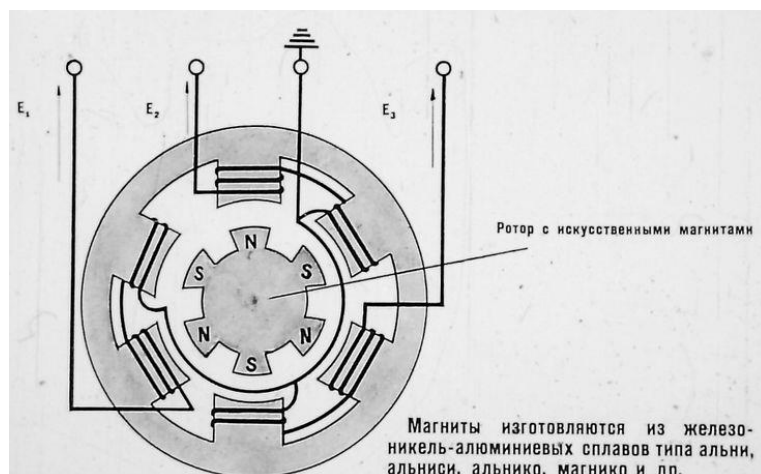


Рисунок 2.1.1 — Синхронный генератор

3. Трёхфазные генераторы переменного тока:

- Традиционное решение, часто используемое с ДВС.
- Обмотки статора коммутируются по схеме «звезда» или «треугольник».
- Ток выпрямляется с помощью диодного моста (6 или 12 диодов).
- Недостаток: высокий коэффициент пульсаций (до 14 %), что требует дополнительных сглаживающих элементов.

4. Стартер-генераторы:

- Комбинированные устройства, выполняющие две функции: запуск ДВС (в режиме стартера) и генерация электроэнергии (в режиме генератора).
- Позволяют сэкономить массу и место в конструкции БПЛА.

5. Асинхронные генераторы:

- Реже используются в БПЛА из-за необходимости внешнего возбуждения.
- Требуют сложных систем управления.
- Могут применяться в крупных БПЛА с мощными силовыми установками.

На электрических схемах условные графические обозначения электрических машин (двигателей, генераторов и других устройств) регламентируются ГОСТ 2.722-68 «ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Машины электрические» [12].

Электрическая схема двигателя-генератора в БПЛА (беспилотном летательном аппарате) обычно включает несколько ключевых компонентов, обеспечивающих преобразование механической энергии в электрическую и управление этим процессом. Такие системы часто используются в гибридных силовых установках, где двигатель может работать как мотор для привода винтов, а затем переключаться в режим генератора для зарядки аккумуляторов или питания бортовых систем.

В данной работе будет исследоваться следующий электродвигатель: T-Motor MN1005 V2.0, который имеет соединение обмоток типа: «звезда» (см. рисунок 2.1.2).

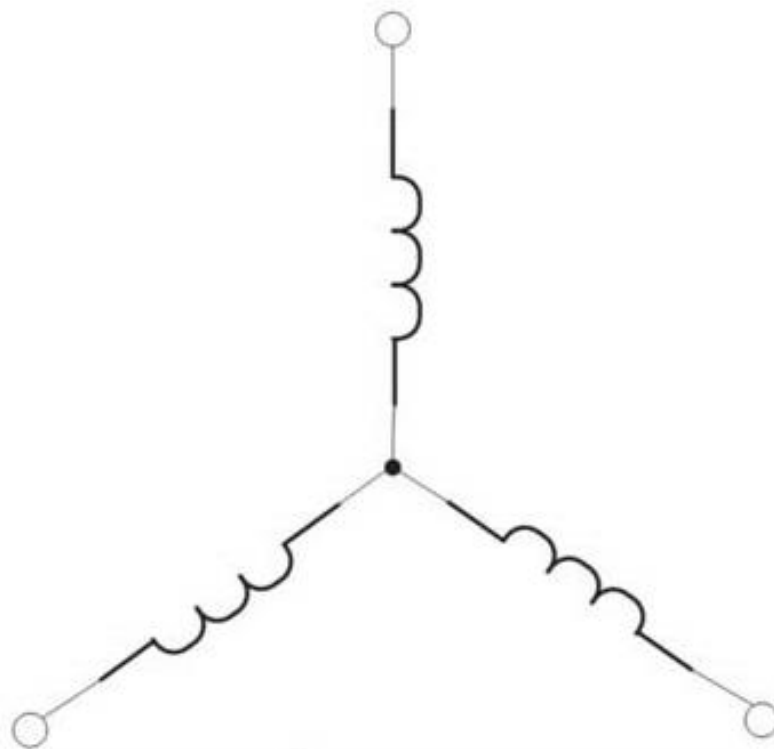


Рисунок 2.1.2 — Соединение обмоток электродвигателя тип «звезда»

Принцип такого соединения заключается в том, что ток имеет три фазы и одну нейтраль. Данный тип соединения распространён во многих электродвигателях, из-за простоты конструкции, плавного пуска, и стабильного равномерного электроснабжения цепи.

Разберём как будет течь ток по фазам в двигательном и генераторном режиме, построив таблицу (см. таблица 2.1.3), где 0 — фаза отключена, +I ток втекает в фазный вывод двигателя, -I ток вытекает из двигателя:

Таблица 2.1.3 — Движения тока по фазам в режиме «двигателя»

Шаг	Угол, °	Фаза А	Фаза В	Фаза С
1	0-60	+I	-I	0
2	60-120	+I	0	-I
3	120-180	0	+I	-I
4	180-240	-I	+I	0
5	240-300	-I	0	+I
6	300-360	0	-I	+I

В генераторном режиме ток меняется местами, тем самым вытекающий ток заряжает аккумулятор и втекающий уже будет с обратным потенциалом (см. таблица 2.1.4).

Таблица 2.1.4 — Движения тока по фазам в режиме «двигателя»

Шаг	Угол, °	Фаза А	Фаза В	Фаза С
1	0-60	-I	+I	0
2	60-120	-I	0	+I
3	120-180	0	-I	+I
4	180-240	+I	-I	0
5	240-300	+I	0	-I
6	300-360	0	+I	-I

2.2 Диод Шоттки

Диод Шоттки — это полупроводниковый диод с переходом металл-полупроводник вместо традиционного р-п-перехода (см. рисунок 2.2.1). Он назван в честь немецкого физика Вальтера Шоттки, который открыл квантовую зависимость, лежащую в основе его работы [20].

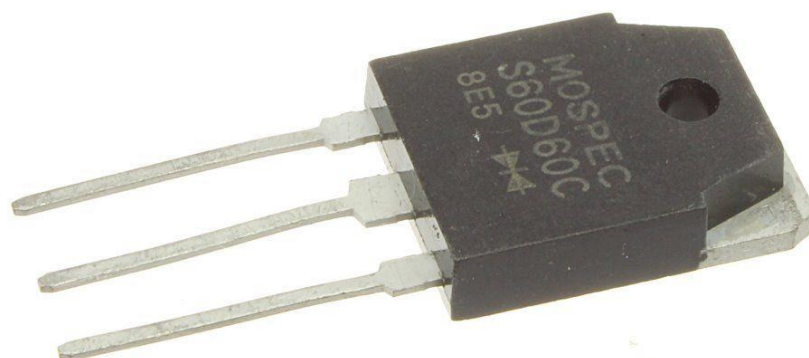


Рисунок 2.2.1 — Диод Шоттки, внешний вид

Основной принцип работы:

В диодах Шоттки используется контакт между металлом и полупроводником (обычно кремнием, карбидом кремния или арсенидом галлия). В контактной области полупроводника образуется слой, обеднённый электронами, который обладает вентильными свойствами. Этот слой создаёт барьер для носителей заряда, что позволяет диоду пропускать ток только в одном направлении — от анода к катоду.

Ключевые особенности принципа работы:

1) Низкое прямое падение напряжения (обычно от 0,2 до 0,4 В для кремниевых диодов Шоттки). Это связано с малым сопротивлением переходного участка между металлом и полупроводником.

2) Отсутствие диффузии и рекомбинации неосновных носителей заряда в переходной зоне. В обычных диодах с р-п-переходом происходят процессы инжекции неосновных носителей, что увеличивает время переключения и

ёмкость. В диодах Шоттки работают только основные носители заряда, что повышает скорость переключения.

3) Малый заряд обратного восстановления. Из-за отсутствия неосновных носителей заряда время обратного восстановления практически равно нулю, что делает диоды Шоттки подходящими для высокочастотного выпрямления.

4) Большой ток утечки по сравнению с обычными диодами. Это связано с отсутствием области истощения, которая в p-n-переходах ограничивает обратный ток.

По ГОСТ 2.730-73 диод Шоттки обозначается так же, как и обычный диод, но с некоторыми отличиями. Наконечник стрелки указывает на катод (сторону с металлическим контактом). Горизонтальная линия на стороне катода короче, чем на стороне анода, что символизирует переход металл-полупроводник (см. рисунок 2.2.2) [13].

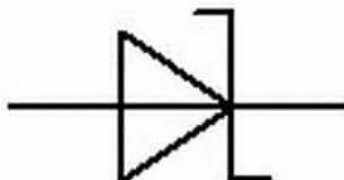


Рисунок 2.2.2 — Диод Шоттки обозначение на электрической схеме

Преимущества:

- Высокое быстродействие и малые ёмкости перехода, что позволяет работать на высоких частотах.
- Низкая рассеиваемая мощность при прямом токе, поэтому диод меньше нагревается.

- Широкое применение в компьютерной технике, силовых выпрямителях, солнечных батареях, радиоаппаратуре, стабилизаторах напряжения и блоках питания.

Недостатки:

- Чувствительность к статическому электричеству.
- Необратимость пробоя при кратковременном превышении максимального обратного напряжения.

2.3 Контроллеры двигателей ESC

ESC — это электронный регулятор скорости, которое может управлять не только скоростью, но и направлением вращения и торможением электродвигателя. Оно является главным звеном между источником питания и двигателем. Является преобразователем сигналов от управляющего устройства в команды для мотора (см. рисунок 2.3.1) [8].

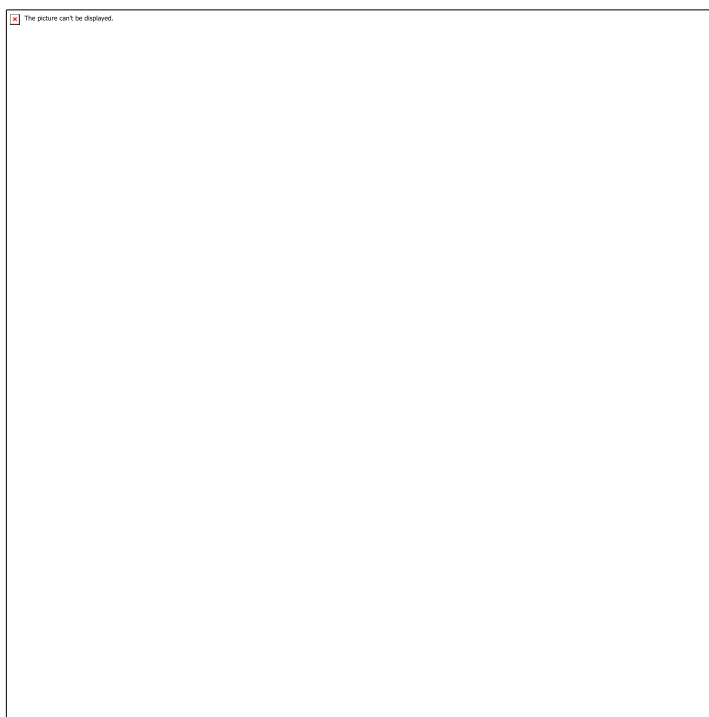


Рисунок 2.3.1 — Контроллер ESC BLHeli_32

Переключение ESC между режимами генератора и двигателя — это одна из основных функций в современных высокопроизводительных БПЛА. Данная технология не является отдельным классом устройств, а устроен, как специальный алгоритм управления электропитанием, «вшитый» в сам контроллер.

Чтобы понять, как контроллер бесколлекторного двигателя (ESC) переключается между режимом двигателя и генератора, полезно сначала представить общую картину. Это не простое переключение рубильника, а высокочастотный, динамический процесс, управляемый микропроцессором

ESC. Он основан на фундаментальном принципе работы любого электромотора.

В основе работы любого бесколлекторного двигателя (BLDC) лежит явление противоэлектродвижущей силы (противо-ЭДС). Когда ротор с постоянными магнитами вращается внутри статора с обмотками, он индуцирует в этих обмотках напряжение, направленное навстречу приложенному. Это и есть противо-ЭДС.

Контроллер ESC является главным звеном в переключении между двумя режимами: генератором и двигателем:

- Режим двигателя: ESC подает на обмотки напряжение, которое больше противо-ЭДС. В результате ток течет от ESC к мотору, создавая вращающее магнитное поле и крутящий момент.

- Режим генератора: Чтобы превратить мотор в генератор, ESC должен создать условия, при которых ток потечет в обратном направлении — от мотора к аккумулятору. Для этого нужно сделать так, чтобы напряжение, генерируемое в обмотках, стало выше, чем напряжение в силовой сети. Это достигается искусственно, путем особого управления силовыми ключами (транзисторами).

При этом необходимо учитывать важный фактор: Противо-ЭДС прямо пропорциональна скорости вращения ротора. На низких оборотах она мала, поэтому эффективность рекуперации на малом газу невелика. Именно поэтому активное торможение наиболее заметно и полезно при резком сбросе газа с высоких оборотов. Это может происходить при спуске БПЛА или использовании гибридного двигателя (использование ДВС с электродвигателем) [10].

Процесс перехода от двигательного режима к генераторному можно представить в виде следующей схемы (см рисунок 2.3.2):



Рисунок 2.3.2 — Диаграмма перехода с режима «двигателя» на режим «генератора»

Сердце ESC — это три полумоста, состоящих из шести MOSFET-транзисторов (по два на фазу). Для простоты мы разберем логику на примере

одной фазы (одного полумоста), так как на других фазах происходят аналогичные процессы со сдвигом по времени (см рисунок 2.3.3) [21].

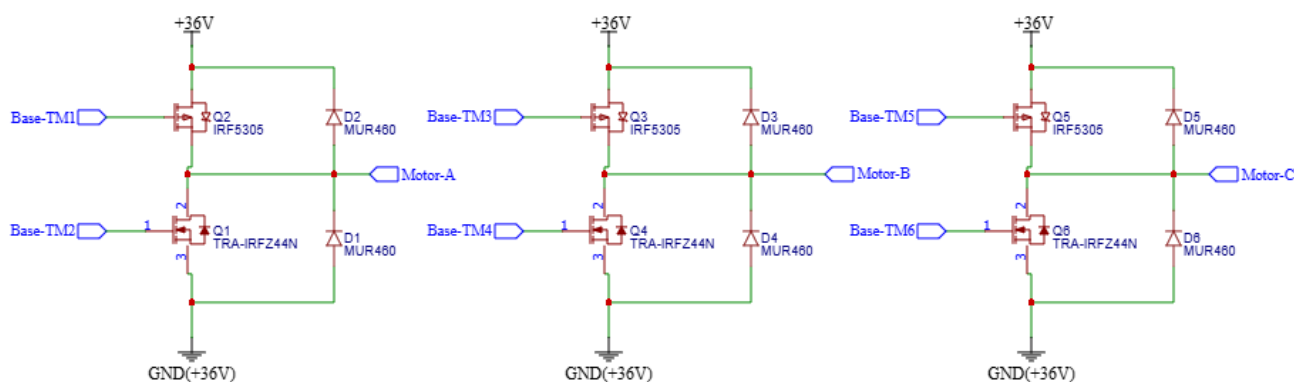


Рисунок 2.3.3 — Чертёж мостовой схемы ESC на каждую фазу (Motor-A, Motor-B, Motor-C), где Q1-6 — это ключи нижнего и верхнего моста, а Base TM1-6 — микросхемы включения и отключения данных ключей

Компоненты:

- Верхний ключ (High-Side FET): Соединяет фазу с плюсом аккумулятора (+Bat). В электрической схеме является верхним мостом.
- Нижний ключ (Low-Side FET): Соединяет фазу с минусом аккумулятора (землей, GND). В электрической схеме является нижним мостом.
- Драйверы (Gate Drivers): Микросхемы, управляющие затворами MOSFET-транзисторов по команде микроконтроллера.

Алгоритм переключения режима двигателя в режим генератора:

1) Вращение мотора по инерции. Мотор вращается, и в его обмотках генерируется противо-ЭДС. На этом этапе все ключи могут быть закрыты, и ток не течет.

2) Фаза накопления энергии (Magnetic Field Build-up). Чтобы инициировать генерацию, микроконтроллер ESC на короткий промежуток времени открывает пару нижних ключей на разных фазах (например, Lower FET Фазы А и Lower FET Фазы В). Обмотки этих двух фаз закорачиваются на землю. Возникающее при этом короткое замыкание через низкое

сопротивление создает путь для тока, индуцируемого противо-ЭДС. Этот ток нарастает, запасая энергию в магнитном поле индуктивностей обмоток (ЭДС самоиндукции).

3) Фаза возврата энергии (Energy Return). Как только ток в обмотках достигает нужного значения, нижние ключи резко закрываются. В соответствии с законом электромагнитной индукции, индуктивность обмоток пытается поддержать ток. На выводах обмоток возникает всплеск напряжения, который по величине превышает напряжение батареи. Этот высокий потенциал открывает паразитные диоды верхних ключей (либо сами верхние ключи принудительно открываются микроконтроллером), и энергия в виде электрического тока «сливается» обратно в аккумулятор через шину +Bat.

4) Возврат к шагу 2. Этот цикл повторяется на очень высокой частоте, синхронно с вращением ротора. Такой процесс и называется активным торможением с рекуперацией.

Этот процесс происходит полностью под управлением микроконтроллера (MCU) на борту ESC, который работает в режиме реального времени.

2.4 Полётный контроллер

Полетный контроллер (ПК) (см. рисунок 2.4.1) — является одним из ключевых компонентов беспилотного летательного аппарата, включающий в себя функции управления датчиками и средствами мониторинга системы, а также являющийся основным ядром для работы системы «двигатель-генератор», управляя мостами (драйверами затворов), для создания рекуперации. Также анализирует электродвигатель и управляет им вплоть до изменения скорости движения [21].

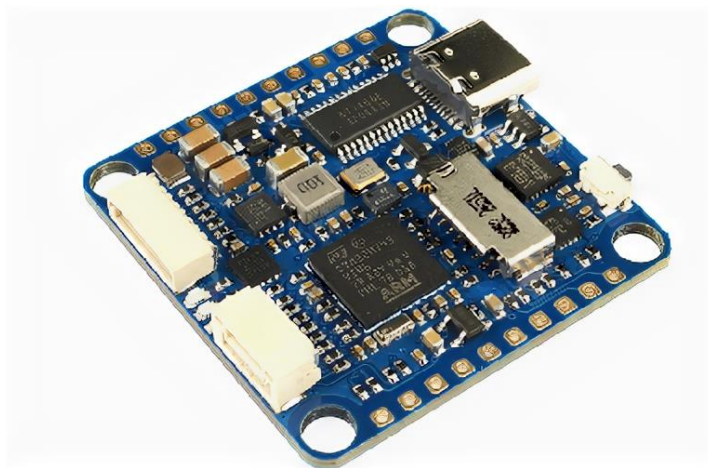


Рисунок 2.4.1 — Полётный контроллер matek 405

Переключение между режимами двигателя и генератора не происходит с помощью одной команды, а является одним из алгоритмов от полетного контроллера (ПК) к ESC. Разберём детально этот процесс в системе БПЛА.

Полётный контроллер непрерывно анализирует, как дрону необходимо двигаться в пространстве, и определяет перед системой определённые задачи: ускориться или замедлиться.

Эти действия происходят в несколько шагов:

- 1) Получение задачи: полётному контроллеру задают желаемое положение дрона, после чего он определяет его реальное положение (с датчиков). Разница между этими двумя процессами является ошибкой управления.

2) Расчет усилия: PID-регулятор в полётном контроллере преобразует полученную ошибку в необходимую тягу для двигателя. Стоит учесть, что он считает не только необходимость ускорить вращение ротора двигателя, но и замедлить его.

3) Отправка команды на тягу: полётный контроллер отправляет на ESC цифровой пакет данных с закодированным значением тяги — от 0 до 100%.

PID-регулятор — это алгоритм, который удерживает дрон в воздухе и делает его послушным для ваших команд. Алгоритм непрерывно сравнивает желаемое положение дрона с его реальным положением, в процессе чего генерирует команды для моторов, чтобы в процессе свести эту разницу к нулю [23].

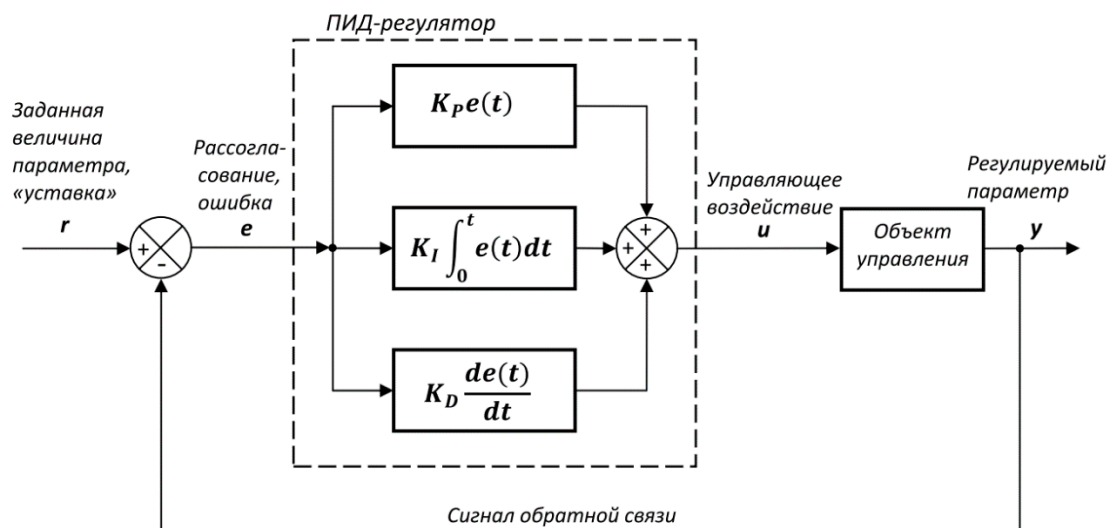


Рисунок 2.4.2 — Схематическая архитектура PID-регулятора, где $K_p K_i K_d$ — это коэффициенты усиления определённых составляющих

Аббревиатура PID обозначается, как: P — пропорциональный, I — интегральный, D — дифференциальный.

Выходной сигнал регулятора $u(t)$ в каждый момент времени t вычисляется как сумма трех слагаемых. Расчёт предоставлен в формуле ниже (см. формула 2.2):

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (2.2)$$

где, $e(t)$ — это ошибка управления: разность между заданным значением и текущим значением.

K_p , K_i , K_d — коэффициенты усиления для определённых составляющих.

Разберём основные составляющие аббревиатуры PID подробнее:

1) П-составляющая — это сила реакции. Например: чем сильнее ветер отклонил дрон, тем мощнее составляющая раскручивает моторы, чтобы вернуть его обратно в исходную позицию.

2) И-составляющая — память об ошибке, её основная задача — убрать статическую ошибку, с которой не справляется П-составляющая. Например: если центр тяжести дрона смещен по техническим причинам, П-составляющая будет постоянно чуть-чуть «недокручивать», и дрон будет висеть с небольшим наклоном. И-составляющая, видя, что ошибка сохраняется, будет постепенно наращивать усилие до тех пор, пока дрон не выровняется идеально.

3) Д-составляющая — предвидение и демпфер (глушитель), она реагирует не на саму ошибку, а на скорость ее изменения. Например: если дрон быстро летит к определённой заданной точке, то ошибка быстро уменьшается, и Д-составляющая, отдаёт приказ о торможении.

В этой составляющей и проявляется критическая важность активного торможения (рекуперации), о котором говорилось ранее. Д-составляющая очень часто выдает команды на резкое снижение тяги. Например, чтобы быстро погасить колебание после резкого крена.

Таким образом, быстродействие системы «ПК-ESC-мотор» напрямую определяет максимально возможные значения PID-коэффициентов и, как следствие, общее качество полета. Для данной алгоритма используют специальные протоколы Bidirectional DShot которые позволяют БПЛА вывести на новый уровень [24].

В нынешних реалиях рекуперация в БПЛА может использоваться в нескольких сценариях. Рассмотрим таблицу ниже (см. таблица 2.4.3)

Таблица 2.4.3 — Сценарии использования рекуперации при торможении и при переключение на ДВС

Сценарий	Рекуперация при торможении (Regenerative Braking)	Управление ДВС-генератором (Hybrid Generator)
Применение	Стандартные электрические мультироторные дроны.	Гибридные БПЛА с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) или большие аппараты с отдельным генератором.
Задача	Временное повышение маневренности и возврат малой доли энергии от инерции винтов при их торможении.	Переключение мотора (стартер-генератора) в полноценный, непрерывный режим генерирования электроэнергии для питания бортовых систем и зарядки батарей.
Управление	Полностью автоматическое. ПК отдает команду газа, а ESC сам реализует микро-циклы рекуперации.	Прямое. Пилот (или автопилот) с помощью отдельного канала на пульте подает явную команду, например: «Перейти в режим генерации».

Важное уточнение: переключение из одного режима в другой — это сложная задача, где в момент старта необходимо «поймать» положение ротора. Именно для этого используются специальные датчики Холла.

2.5 Датчики Холла

Датчики на эффекте Холла — одни из важных электронных компонентов, которые позволяют полётному контроллеру точно определять положение ротора электродвигателя. В контексте БПЛА они обеспечивают максимально плавную и эффективную рекуперацию энергии, особенно в критические моменты старта и остановки, что напрямую влияет на управляемость и безопасность [14].



Рисунок 2.5.1 — Аналоговые и цифровые датчики Холла

В бесколлекторных двигателях (BLDC), которые используются в БПЛА, датчики Холла берут на себя роль, которую в старых коллекторных моторах выполняли щетки — синхронизацию.

Стандартная конфигурация: В трехфазном BLDC-двигателе обычно устанавливаются три датчика Холла. Они размещены на статоре со смещением в 120 электрических градусов друг относительно друга.

Абсолютный энкодер (кодировщик) положения: Когда магнитный ротор вращается, его полюса (N/S) проходят мимо датчиков. Датчик, напротив которого находится, например, северный полюс, выдает сигнал высокого уровня, а напротив южного — низкого. Таким образом, комбинация сигналов с трех датчиков (например, HIGH, LOW, LOW) однозначно указывает на текущий сектор, в котором находится ротор.

Коммутация: За полный оборот двигателя комбинация сигналов с датчиков меняется 6 раз, проходя через 6 уникальных состояний («State 1», «State 2», ...). Контроллер (ESC) использует эту информацию, чтобы точно знать, в какой момент и на какую пару обмоток статора нужно подать напряжение, чтобы создать вращающееся магнитное поле. Каждое изменение сигнала — это точка коммутации.

Эти точные данные о положении являются фундаментом для реализации режима рекуперативного торможения. Датчики Холла обеспечивают те самые точные данные о положении ротора, которые необходимы для плавного ускорения, эффективного рекуперативного торможения и высокой общей эффективности системы.

Главные преимущества датчиков Холла в отличии от других:

1) Идеальный старт: В бессенсорных системах ESC вынужден «вслепую» подавать сигналы на обмотки, чтобы хоть немного раскрутить ротор. Только после этого появляется достаточно сильная обратная ЭДС, по которой можно определить положение. Это приводит к хорошо знакомому многим пилотам дрожанию или рывкам мотора при запуске. Датчики Холла сообщают точное положение ротора еще до начала вращения, обеспечивая идеально плавный и мощный старт с нуля без каких-либо вибраций.

2) Плавная работа на малых оборотах: С датчиками двигатель работает предсказуемо и плавно на любых, даже самых низких оборотах, тогда как бессенсорная система на малом газу может работать нестабильно.

3) Эффективная рекуперация с низких скоростей: В процессе рекуперативного торможения мотор замедляется. Бессенсорное управление становится неэффективным, как только обороты падают ниже определенного порога (обычно 5-10% от номинальных), так как сигнал обратной ЭДС становится слишком слабым. Датчики Холла продолжают предоставлять точную информацию о положении ротора вплоть до полной остановки, позволяя ESC управлять процессом рекуперации максимально эффективно во всем диапазоне скоростей.

2.6 Балластный резистор

Балластный резистор (см. рисунок 2.6.1) в системах рекуперации — это, по сути, предохранительный клапан для электрической энергии. Его главная задача — не производить полезную работу, а безопасно рассеять избыточную энергию в виде тепла, защищая электронику от повреждения высоким напряжением. В технической литературе его зачастую называют тормозной резистор [26].

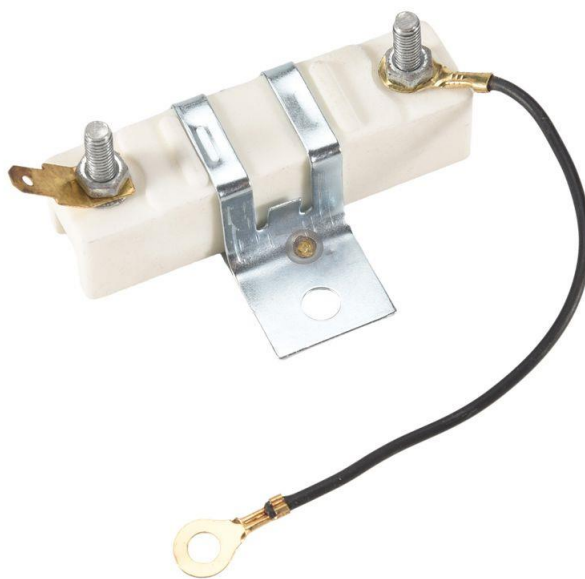


Рисунок 2.6.1 — Тормозной резистор модель SI-AT50005

Давайте разберем, какую роль он играет, особенно в сравнении с уже знакомой вам системой активного торможения в БПЛА. Зачем в таких системах нужен такой резистор?

Проблема возникает в системах, где мотор, работая как генератор, вырабатывает больше энергии, чем может быть использовано или сохранено. В таких случаях напряжение в силовой цепи постоянного тока (DC link) быстро растет, угрожая пробить изоляцию и уничтожить электронику. Балластный резистор здесь действует как предохранительный клапан: он подключается к этой цепи через специальный ключ (тормозной прерыватель

или "чоппер"), который автоматически открывается при превышении критического порога напряжения. Энергия сливается в резистор и рассеивается в виде тепла, а напряжение падает до безопасного уровня (см. рисунок 2.6.2).

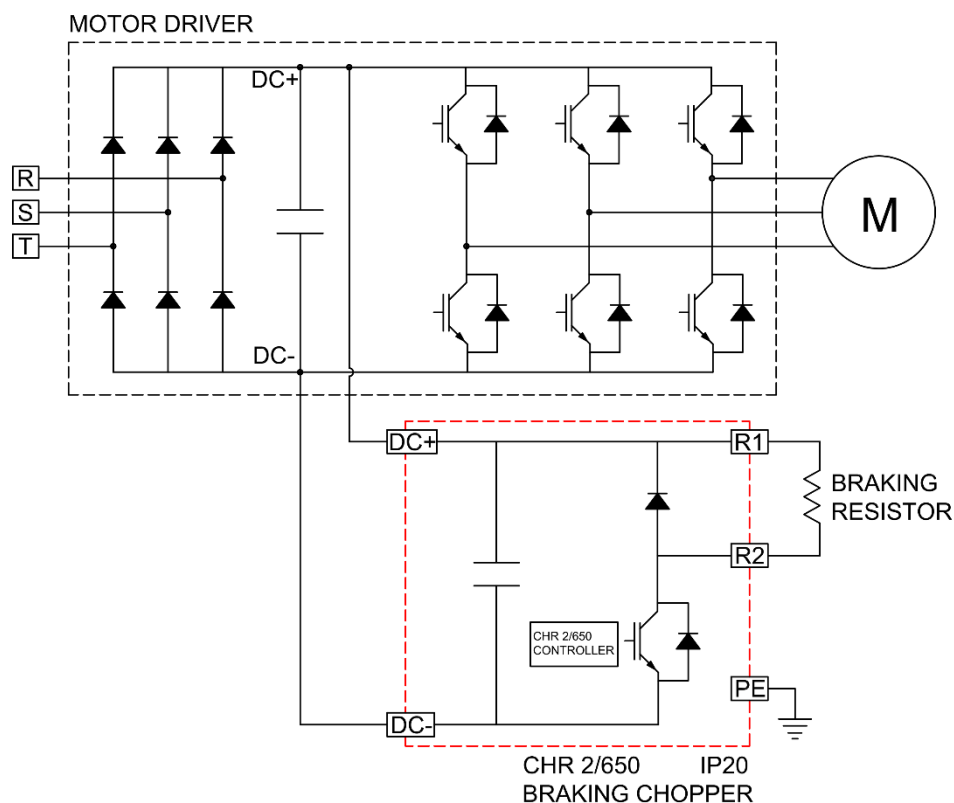


Рисунок 2.6.2 — Добавление тормозного прерывателя с тормозным резистором в электрическую цепь с электродвигателем

Для чего такой резистор необходим в БПЛА, когда электроэнергия в генераторном режиме служит для подпитки накопителей энергии. Резистор необходим в качестве предохранителя, чтобы исключить возможность нагрева аккумулятора или переизбытка электроэнергии, а также при аварийном отказе систем рекуперации.

3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1 Физический принцип рекуперации в БПЛА

При рекуперативном торможении двигатель работает генератором. На его обмотках присутствует противо-ЭДС, который преобразуется в напряжение U_{emf} , пропорциональная оборотам. Если U_{emf} меньше напряжения батареи U_{bat} , ток сам по себе в батарею не потечёт — напряжение генератора «не дотягивает». Чтобы заряжать аккумулятор, нужно повысить напряжение, используя индуктивность обмоток и управляемые ключи. Именно это и делает ESC: он включает обмотки двигателя как дроссель в схеме повышающего (boost) преобразователя.

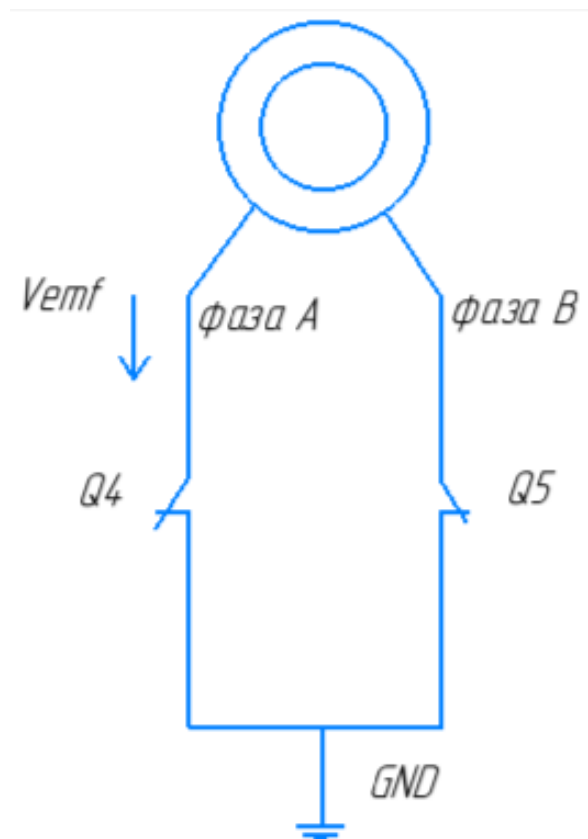


Рисунок 3.1.1 — Замкнутая цепь (режим накопления энергии в примере работы на фазе А и В), где Q4 и Q5 — это два нижних транзистора, а обмотки двигателя используются в качестве дросселя

Трёхфазный инвертор состоит из трёх полумостов. Каждый полумост образован верхним и нижним MOSFET-транзисторами. Нижний ключ

соединён стоком с фазным выводом, а истоком — с общей землёй (GND). Когда микроконтроллер открывает два нижних MOSFET'а (например, фаз А и В), он закорачивает эти две обмотки на GND (см. рисунок 3.1.1).

В этой цепи единственным источником энергии является противо-ЭДС, наведённая в обмотке вращением магнитов. Нижний ключ даёт току путь с очень низким сопротивлением: от обмотки через открытый канал MOSFET-транзистора прямо на землю. Поскольку сопротивление открытого MOSFET составляет единицы миллиом, ток начинает быстро нарастать, ограничиваясь в основном индуктивностью обмотки (и её активным сопротивлением).

Формула нарастания тока (см. формула 3.1):

$$I(t) = \frac{U_{emf}}{2L} * t \quad (3.1)$$

где, t — это время открытого канала.

Энергия, запасённая в магнитном поле катушки, растёт. Именно этот этап накопления энергии в индуктивности абсолютно необходим: без него напряжение не поднялось бы выше V_{bat} .

Через несколько микросекунд ESC резко закрывает оба нижних MOSFET'а. Ток в индуктивности не может мгновенно упасть до нуля — это фундаментальное свойство катушки индуктивности. Индуктивность будет создавать любую необходимую ЭДС, чтобы поддержать ток в прежнем направлении.

Когда нижний ключ размыкается, путь через него исчезает. Но ток должен продолжаться. Единственный оставшийся путь от фазного вывода — это уйти вверх, к положительной шине питания ($+U_{bat}$). Однако верхний MOSFET в этот момент закрыт (на его затвор не подан управляющий сигнал). Но в структуре MOSFET существует встроенный (паразитный) диод, катод которого подключён к стоку (к $+U_{bat}$), а анод — к истоку (к фазному выводу). Когда на фазном выводе напряжение становится выше, чем на $+U_{bat}$ плюс прямое падение диода, этот диод открывается, и ток течёт в батарею (см. рисунок 3.1.2).

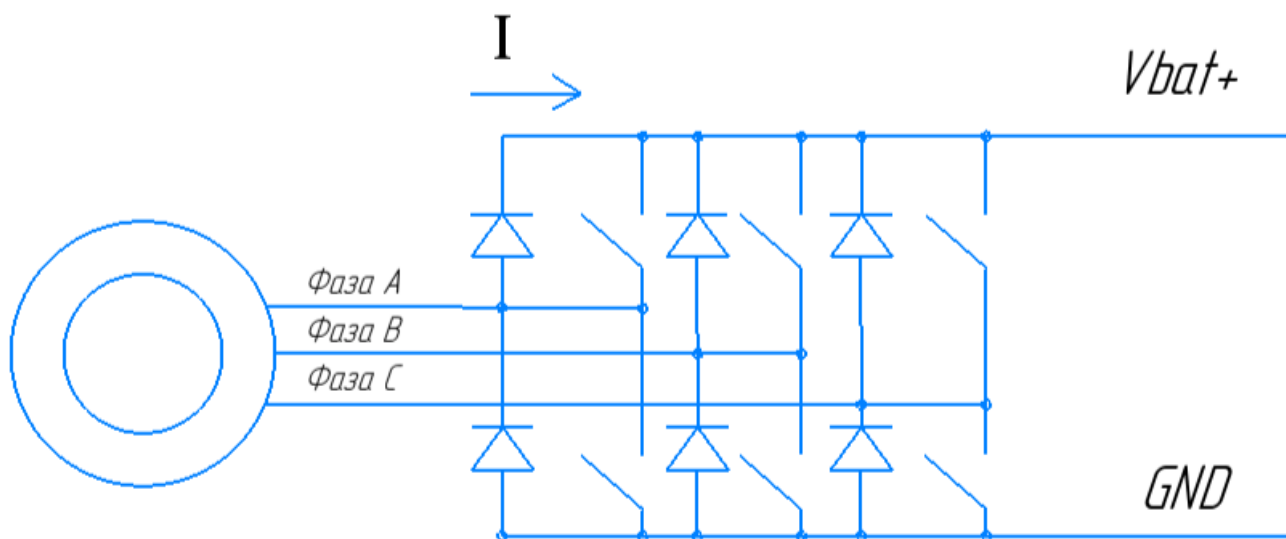


Рисунок 3.1.2 — Протекание тока через паразитные диоды в батарее

Таким образом рекуперация имеет следующий цикл:

- 1) Стадия накопления: закорачивание обмоток на землю, нарастание тока до пикового значения, при котором напряжение батареи будет ниже, чем генерируемое напряжение.
- 2) Dead time: короткая пауза (обычно ~ 1 мкс), в течение которой все MOSFET закрыты, чтобы избежать сквозных токов.
- 3) Стадия возврата: индуктивность генерирует выброс напряжения, открывающий паразитный диод верхнего MOSFET (или сам транзистор при синхронном выпрямлении), и энергия магнитного поля перетекает в батарею.
- 4) Стадия спада: ток постепенно падает, напряжение батареи вновь возрастает по сравнению с генерируемым напряжением.
- 5) Dead time: новая пауза, для избежания сквозных токов.

Процесс повторяется до тех пор, пока поступает напряжение противо-ЭДС генерируемая кинетической силой пропеллера при торможении БПЛА.

Во время процесса рекуперации применяются также следующие законы [25]:

1. Закон Ома (см. формула 3.2):

$$I = \frac{U}{R} \quad (3.2)$$

Данный закон будет использоваться в качестве вычисления тока протекающего через обмотки при рекуперации.

2. Формула напряжения при выработке противо-эдс бесколлекторного двигателя (см. формула 3.3):

$$U_{emf} = \frac{N}{Ku} \quad (3.3)$$

Основная формула, которая преобразует механические величины скорости, в электрические величины скорости. В основе формулы лежит закон электромагнитной индукции Фарадея — физический закон, который количественно описывает, как изменение магнитного поля порождает электрическое поле.

Согласно закону Фарадея, в обмотках возникает ЭДС. Её мгновенное значение пропорционально скорости изменения потока, а усреднённая амплитуда — частоте вращения ротора. Отсюда и выводится следующая формула, где K_u — константа, определяемая конструкцией двигателя (число витков, магнитный поток). Константа выводится из следующих вычислений (см. формула 3.4):

$$K_u = \frac{1}{\frac{N\Phi_{max}\pi p}{30}} \quad (3.4)$$

где, N — число витков;

Φ_{max} — максимальный магнитный поток;

p — число пар полюсов ротора.

3. Формула энергии магнитного поля катушки индуктивности (см. формула 3.5):

$$E = \frac{1}{2}LI^2 \quad (3.5)$$

Формула позволяет вычислить энергию накопленную в катушке индуктивности.

4. Формула энергии возвращённой в батарею (см. формула 3.6):

$$E_{bat} = U_{bat} \int_0^t I dt \quad (3.6)$$

где, t — это время спада энергии, или время при котором все каналы закрыты и ток протекает через паразитные диоды;

Формула позволяющая вычислить энергию переданную в батарею за один цикл.

5. Уравнение переходного процесса в RL-цепи (см. формула 3.7):

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{V}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (3.7)$$

Данную формулу возможно упростить, в случае если R используется при малых временах. Упрощённая версия исключает из себя экспоненту, но она должна выполнять обязательное условие: $t < \tau = L/R$, где τ — это постоянная времени.

Таким образом если соблюдается условие, формула упрощается до линейной (см. формула 3.8):

$$I(t) = \frac{\Delta U}{R} * \frac{t}{\tau} = \frac{\Delta U}{R} * \frac{R}{L} t = \frac{\Delta U}{L} t \quad (3.8)$$

где, ΔU — это суммарное напряжение (где в нашем случае U_{emf} взято со знаком минус, так как является противоположной величиной);

t — это время накопления энергии (время закорачивания обмоток на землю).

Формула является для рекуперации одной из основных, ведь она входит в основу накопления тока, с последующим возвратом энергии в батарею.

6. Время спада энергии (см. формула 3.9):

$$t_{off} = \frac{2L * I}{\Delta U} \quad (3.9)$$

где, I — это пиковый ток, накопленный за время открытия двух каналов.

Формула полностью идентична с верхней, именно по ней мы сможем выяснить сколько по времени ток может протекать через паразитный диод, и через сколько необходимо будет снова открывать два канала для нового цикла.

7. Общее время за которое происходит один цикл (см. формула 3.10):

$$t_{\text{цикл}} = t_{on} + t_{dead} + t_{off} + t_{dead} \quad (3.10)$$

где, t_{on} — это время накопления энергии;

t_{fall} — это время передачи энергии в батарею;

t_{dead} — это время переключения между режимами.

8. Средняя мощность рекуперации за один цикл (см. формула 3.11):

$$P_{\text{ср}} = \frac{E_{bat}}{t_{\text{цикл}}} \quad (3.11)$$

9. Средний ток рекуперации за один цикл (см. формула 3.12):

$$I_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{ср}}}{V_{bat}} \quad (3.12)$$

3.2 Расчёт средней силы тока и мощности рекуперации

В качестве образца возьмём двигатель аэростатического БПЛА, так как для данного аппарата процесс рекуперации является более важным, нежели для БПЛА другого вида.

В качестве примера используем следующую комплектацию с определёнными параметрами:

Электродвигатель: T-Motor MN1005 V2.0, $K_u = 90$ об/мин/В

Батарея: $U_{bat} = 50.4$ В (12S Li-Po, полный заряд)

Сопротивление на одной фазе: $R_{ph} = 84$ мОм = 0.084 Ом

Прямое падение на диоде MOSFET: $U_f \approx 1.4$ В

Индуктивность на одной фазе: 50 мкГн (50×10^{-6} Гн)

Имеется важное условие при котором двигатель переключается на режим генератора, при котором и происходит сам процесс рекуперации (см. формула 3.12). Данное условие является обязательным, чтобы ток смог пройти через диод для дальнейшего преобразования тока в постоянный.

$$U_{emf} > U_{bat} \quad (3.12)$$

где, U_{emf} — напряжение выработанное противозлектродвижущей силой.

U_{emf} электродвигателя можно рассчитать из следующей формулы (см. формула 3.13):

$$U_{emf} = \frac{N}{K_u} \quad (3.13)$$

где, N — частота вращения ротора электродвигателя.

Для расчёта частоты вращения, необходимо использовать следующую формулу (см. формула 3.14):

$$N_{max} = V_{bat} * KV \quad (3.14)$$

Соответственно исходя из данной формулы можно использовать мы можем использовать и более малые обороты двигателя, для расчёта рекуперационного периода.

Согласно формулам рассчитаем возможность рекуперации для двух случаев: при 75% работы оборотов двигателей и при максимальном значении, подставив в формулы вышеперечисленные значения.

Рассчитаем обороты двигателя при 100% и 75%:

$$N_{max} = 50.4 * 90 = 4536 \text{ об/мин}$$

$$N_{75\%} = 4536 * 0.75 = 3402 \text{ об/мин}$$

Рассчитаем возможность рекуперации для RPM 75%:

$$U_{emf} = \frac{3402}{90} = 37.8 \text{ В}$$

37.8 В < 50.4 — условие рекуперации не выполнено.

Рассчитаем возможность рекуперации для RPM max:

$$U_{emf} = \frac{4536}{90} = 50.4 \text{ В}$$

50.4 В = 50.4 — условие рекуперации не выполнено.

Согласно полученным данным, напряжение противо-эдс и напряжение батареи в одном из случаев ниже, а в другом случае равен. Рассмотрим ситуацию с током при максимальной частоте вращений. В данном случае нам не хватает дополнительной энергии, которая позволила бы использовать паразитный диод в качестве зарядки батареи.

Для этого в первую очередь нам необходимо сложить две последовательные катушки индуктивности, т.к. каждая катушка индуктивности использует обмотку лишь одной фазы. Таким образом $2L=50*2=100 \text{ мкГн}$.

Также необходимо рассчитать межфазовое сопротивление. Т.к. сопротивление одной фазы равняется 0,084 Ом, то сопротивление на двух фазах будет равняться 0,168 Ом.

После расчёта индуктивности и межфазового сопротивления, необходимо вычислить постоянную времени:

$$\tau = \frac{2L}{R} = \frac{100 * 10^{-6}}{0.168} = 595 \text{ мкс}$$

Согласно данному вычислению $\tau \approx 595$ мкс.

Теперь включим режим накопления используя стандартный интервал открытия двух нижних MOSFET каналов в 10 мкс. $t < \tau$, согласно этому условию мы можем использовать упрощённую линейную формулу для накопления энергии (см. формула 3.15):

$$I(t) = \frac{U_{emf}}{2L} * t_{on} \quad (3.15)$$

где, $t_{on} = 10$ мкс.

Рассчитаем пиковый ток за t_{on} время:

$$I_{\text{пик}} = \frac{50.4 * 10 * 10^{-6}}{100 * 10^{-6}} = 5.04 \text{ А}$$

За 10 мкс ток в обмотках нарастает примерно до 5.04 А. В магнитном поле индуктивностей запасена энергия:

$$E_L = \frac{1}{2} * 100 * 10^{-6} * 5.04^2 = 1.27 * 10^{-3} \text{ Дж}$$

ESC резко закрывает оба нижних ключа. Пиковый ток ≈ 5.04 А в индуктивности не может мгновенно прекратиться. Индуктивность стремится поддержать ток в том же направлении, и на её выводах возникает ЭДС самоиндукции такой величины, чтобы «продавить» этот ток через любую доступную цепь.

Цепь замыкается через паразитные диоды верхних MOSFET'ов. Напряжение на обмотках практически мгновенно подскакивает до необходимой величины (см. формула 3.16):

$$U_{\text{общ}} = U_{emf} + U_f + I_{\text{пик}} * R \quad (3.16)$$

$$U_{\text{общ}} = 50,4 + 1,4 + 5,04 * 0,168 = 52,65 \text{ В}$$

Данное напряжение выше, чем напряжение батареи, поэтому ток протекает через паразитный диод и попадает в батарею, тем самым выполняя роль аккумулятора.

По истечению времени ток прекращает течь в батарею, напряжение общее падает по экспоненте и становится ниже напряжения батареи, и для того, чтобы ток вновь протекал сквозь паразитный диод необходимо снова повторить цикл накопления энергии.

Рассчитаем полученную мощность, аккумулируемую батареей во время протекания через паразитный диод.

Для этого необходимо вычислить энергию возвращённую батареей за один такт. Используем стандартное время закрытия всех MOSFET каналов в 20мкс.

Воспользуемся формулой энергии возвращённой в батарею (см. формула 3.17):

$$E_{bat} = U_{bat} \int_0^t I dt \quad (3.17)$$

Вычисление интеграла требует решения дифференциального уравнения RL-цепи, которое приводит к экспоненциальному спаду тока. Но во многих случаях, особенно когда ΔU достаточно велико (в нашем случае $\Delta U = U_{bat} + U_f - U_{emf} = 50.4 + 1.4 - 50.4 = 1.4 \text{ В}$), спад тока становится практически линейным, превращаясь в треугольник. Это происходит из-за того, потому что активное сопротивление R мало по сравнению с напряжением на индуктивности.

В нашем случае напряжение не достаточно велико, но формулу допускается упростить, учитывая погрешность в 10-15%.

В качестве упрощённой формулы вычисляется площадь треугольника, где $I_{\text{пик}}$ — ордината, а t_{off} — абсцисса. Таким образом получается следующая формула (см. формула 3.18):

$$E_{bat} = U_{bat} * \frac{1}{2} I_{\text{пик}} * t_{off} \quad (3.18)$$

Подставим значения в формулу расчёта энергии возвращённой за один такт:

$$E_{bat} = 50,4 * 0,5 * 5,04 * 20 * 10^{-6} = 2,52 * 10^{-3}$$

Для расчёта полученной мощности за один полный цикл, нам необходимо высчитать время полного цикла с учётом времени переключения между режимами ($t_{\text{dead}} = 1$ мкс).

Проведём расчёт (см. формула 3.10):

$$t_{\text{цикл}} = 10 + 1 + 20 + 1 = 32 \text{ мкс}$$

Согласно полученным результатам, теперь мы можем рассчитать среднее значение мощности полученной во время зарядки батареи (см. формула 3.11):

$$P_{\text{ср}} = \frac{2,52 * 10^{-3}}{32 * 10^{-6}} = 78,7 \text{ Вт}$$

Проведём расчёт среднего тока отдаваемого в аккумулятор за один цикл (см. формула 3.12):

$$I_{\text{ср}} = \frac{78,7}{50,4} = 1,56 \text{ А}$$

Таким образом за один цикл в 32 мкс, средняя мощность накопленной энергии равняется 78,7 Вт, а средний ток отдаваемый в аккумулятор равен 1,56 А.

3.3 Оптимизация получаемой энергии

При расчёте мы выяснили, что аккумулировать дополнительную энергию мы можем только при максимальной скорости вращения ротора. В данной ситуации развить такую скорость не всегда удаётся, поэтому необходимо оптимизировать систему, чтобы позволить аккумулировать ток при меньших оборотах.

Одна из таких оптимизаций — это увеличение времени открытых нижний двух MOSFET каналов. Согласно формуле расчёта пикового значения тока (см. формула 3.1) мы получаем, что при увеличении значения U_{emf} или t_{on} , мы получаем увеличения и тока, а значит мы сможем увеличить электродвижущую силу, воздействующую на паразитный диод. Так как напряжение против ЭДС невозможно изменить, единственная величина остаётся — это время открытия двух MOSFET каналов.

Возьмём в качестве примера t_{on} равное 50 мкс.

Проведём новые расчёты для пикового значения тока для N 75%:

$$I_{\text{пик}} = \frac{37,8}{100 * 10^{-6}} * 50 * 10^{-6} = 18,9 \text{ A}$$

Согласно полученному результату сила тока для N 75% при 50 мкс больше силы тока для N 100% при 10 мкс, а значит условие $U_{\text{общ}} > U_{\text{bat}}$, соблюдается и поэтому вычислениями $V_{\text{общ}}$ можно пренебречь.

Так как время спада неизвестно, то применяем формулу для вычисления времени спада аккумулируемой энергии (см. формула 3.9).

Вычисления суммарного напряжения на всём участке сети от электродвигателя до аккумулятора происходит по следующей формуле (см. формула 3.19):

$$\Delta V = V_{\text{bat}} + V_f - V_{\text{emf}} \quad (3.19)$$

$$\Delta V = 50.4 + 1.4 - 37.8 = 14 \text{ В}$$

Найдём время спада аккумулируемой энергии:

$$t_{off} = \frac{100 * 10^{-6} * 18,9}{14} = 135 \text{ мкс}$$

Согласно полученным данным, теперь мы можем рассчитать полученную энергию за один цикл (используя упрощённую формулу):

$$E_{bat} = 50.4 * 0,5 * 18.9 * 135 * 10^{-6} = 0.0643 \text{ Дж}$$

Вычислим длительность полного цикла, с учётом времени переключения на режимы:

$$t_{\text{цикл}} = 50 + 1 + 135 + 1 = 187 \text{ мкс}$$

Найдём средний ток и среднюю мощность:

$$P_{\text{ср}} = \frac{0,0643}{187 * 10^{-6}} = 343 \text{ Вт}$$

$$I_{\text{ср}} = \frac{343}{50,4} = 6,8 \text{ А}$$

Согласно нашим вычислениям, средний ток и средняя мощность полученная в режиме рекуперации для N 75% при t on 50 мкс выше, чем средний ток и мощность полученная в режиме рекуперации для N 100% при t on 10 мкс, в шесть раз. Таким образом полученная мощность выше, хоть и требует больше времени для одного цикла.

Считаю данную оптимизацию успешной, ведь теперь энергию можно аккумулировать при N 75%.

Также стоит обговорить недостаток данной оптимизации — электродвигатель рассчитан на 32 А, а значит бесконечно увеличивать время накопления не получится.

Рассчитаем N 100% при t on 50 мкс, после чего построим диаграмму зависимости $P_{\text{ср}}$ от t on.

Рассчитаем пиковое значение:

$$I_{\text{пик}} = \frac{50,4}{100 * 10^{-6}} * 50 * 10^{-6} = 25,2 \text{ A}$$

Вычислим ΔU :

$$\Delta U = 50.4 + 1.4 - 50,4 = 1,4 \text{ В}$$

Рассчитаем время спада аккумулируемой энергии:

$$t_{\text{off}} = \frac{100 * 10^{-6} * 25,2}{1,4} = 1800 \text{ мкс}$$

Рассчитаем полученную энергию за один цикл:

$$E_{\text{bat}} = 50.4 * 0,5 * 25,2 * 1800 * 10^{-6} = 1,143 \text{ Дж}$$

Вычислим длительность полного цикла, с учётом времени переключения на режимы:

$$t_{\text{цикл}} = 50 + 1 + 1800 + 1 = 1852 \text{ мкс}$$

Найдём средний ток и среднюю мощность:

$$P_{\text{ср}} = \frac{1,143}{1852 * 10^{-6}} = 617 \text{ Вт}$$

$$I_{\text{ср}} = \frac{617}{50,4} = 12.2 \text{ A}$$

Построим диаграмму зависимости средней мощности полученной при рекуперации от времени накопления энергии (индукции) (см. рисунок 3.3.1):

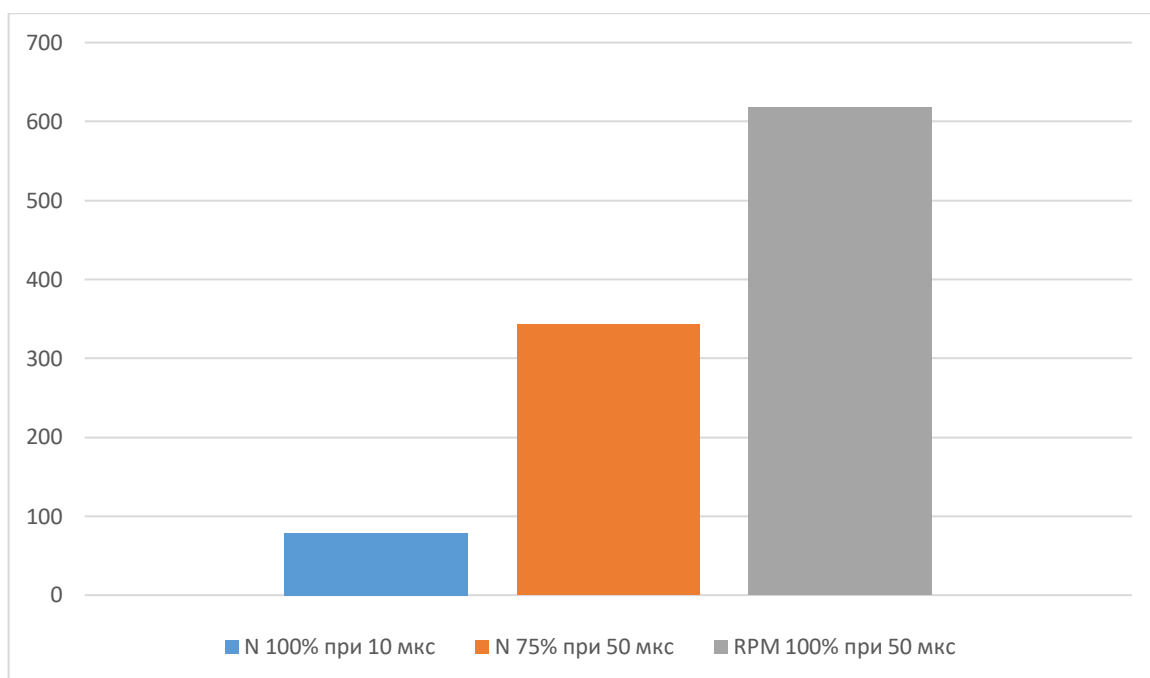


Рисунок 3.3.1 — Диаграмма зависимости мощности средней от времени самоиндукции при N 75% и N 100%

Таким образом, согласно графику, мы видим, что благодаря оптимизации увеличилось значение получаемой мощности в 7 раз за один цикл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью работы было теоретическое моделирование аэростатного БПЛА (дирижабля) с акцентом на режим рекуперативного торможения — процесс возврата кинетической энергии вращающегося пропеллера обратно в электрическую энергию батареи. В качестве базовых компонентов рассматривались двигатель T-Motor MN1005 V2.0, литиевая батарея 12S LiPo (50.4 В) и современный ESC с алгоритмом активного торможения.

Работа опиралась на строгие физические законы, которые последовательно применялись на всех этапах:

1) Закон электромагнитной индукции Фарадея и правило Ленца — объясняют возникновение напряжения противо-ЭДС в обмотках при вращении ротора, а также направление индукционного тока, который создаёт тормозной момент.

2) Закон Ома — использовался для вычисления токов через активные сопротивления обмоток, в качестве дополнительной энергии.

3) Уравнение переходного процесса в RL-цепи — формула для нарастания и последующего спада тока в индуктивностях обмоток; в данном задании в условии малости времени по сравнению с постоянной времени $\tau=L/R$ — применялось линейное приближение.

4) Закон сохранения энергии — кинетическая энергия вращения $\rightarrow$ энергия магнитного поля индуктивности $\rightarrow$ электрическая энергия, возвращённая в батарею.

5) Формула энергии магнитного поля $E = \frac{1}{2}LI^2$ и уравнение электрической работы $E_{bat} = U_{bat} \int_0^t I dt$ — использовались для количественной оценки передаваемой энергии и проверки непротиворечивости расчётов.

Подробно разобраны все ключевые элементы:

1) Двигатель — трёхфазный бесколлекторный, обмотки соединены звездой (все расчёты велись для двух последовательных фаз: $2L \approx 100 \text{ мкГн}$, $R_m = 168 \text{ мОм}$).

2) ESC — трёхфазный мост на MOSFET с драйверами, бустрепными конденсаторами, токовыми шунтами, защитными диодами и конденсаторами. Алгоритм активного торможения реализует циклы «накопление–возврат», превращая инвертор в повышающий преобразователь.

3) Батарея — и источник, и приёмник энергии; её напряжение служит порогом, который необходимо превысить для начала рекуперации.

4) Пассивные компоненты — C_{bulk} (сглаживание пульсаций), TVS-диоды (защита от перенапряжений), диоды Шоттки (защита от переплюсовки и развязка), тормозной резистор (опционально, для рассеяния избытка энергии при полностью заряженной батарее).

Также в процессе были получены следующие значения при различном времени накопления электроэнергии:

1) N 100% при 10 мкс: $P_{\text{ср}} = 78,7 \text{ Вт}$, $I_{\text{ср}} = 1,56 \text{ А}$ (за один цикл) — данные вычисления проводились без оптимизации процесса рекуперации. При другой скорости оборотов, процесс рекуперации невозможен.

2) N 75% при 50 мкс: $P_{\text{ср}} = 343 \text{ Вт}$, $I_{\text{ср}} = 6,8 \text{ А}$ (за один цикл) — был оптимизирован процесс накопления энергии, благодаря чему количество получаемой мощности увеличилось в три раза, по сравнению с прошлым разом.

3) N 100% при 50 мкс: $P_{\text{ср}} = 617 \text{ Вт}$, $I_{\text{ср}} = 12,2 \text{ А}$ (за один цикл) — максимальное оптимизированное значение. При дальнейшем увеличении времени накопления энергии возможен перегрев электродвигателя.

В процессе работы были выявлено следующее:

1) Для эффективной рекуперации следует выбирать двигатели с низким межфазным сопротивлением и достаточной индуктивностью.

2) ESC должен поддерживать Bidirectional DShot, FOC и активное торможение с регулируемым временем накопления.

3) Необходимо контролировать напряжение батареи во избежание перезаряда; при полностью заряженной батарее избыток энергии должен рассеиваться на тормозном резисторе или ограничиваться алгоритмически.

Проведённое исследование показало, что система электропитания аэростатического БПЛА с рекуперацией — это сложный электромеханический комплекс, эффективность которого определяется точным взаимодействием двигателя, ESC и батареи. Разработанная методика расчёта, основанная на фундаментальных физических законах, позволяет прогнозировать энергетические характеристики и выбирать компоненты под конкретные задачи. Рекуперация способна заметно увеличить продолжительность полёта при циклических манёврах со снижением и торможением, а понимание происходящих процессов открывает путь к дальнейшей оптимизации — от настройки PID-регулятора до применения гибридных накопителей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баженов, Ю.В., Баженов, М.Ю. «Основы надежности и работоспособности технических систем Учебное пособие»; Изд-во ВлГУ, 2017 г – 16 стр.
2. Фетисов, В.С., Неугодникова, Л.М. «Беспилотные авиационные системы: терминология, классификация, структура»; Изд-во Лань, 2025 г – 11 стр.
3. Чернопятков, А.М. «Беспилотные авиационные системы»; Изд-во Директ-Медиа, 2024 г. – 17-19 стр.
4. Гребников, А.Г., Мялица, А.К., Парфенюк, В.В., Парфенюк, О.И., Удовиченко, С.В. «Общие виды и характеристики беспилотных летательных аппаратов»; Нац. аэрокос. ун-т «Харьк. авиац. Ин-т, 2008 г. - 115 стр.
5. Суомалайнен, А. «Беспилотники: автомобили, дроны, мультикоптеры»; Изд-во ДМК Пресс, 2018 г. – 49 стр.
6. Кравченко, И.В. Христофоров, И.Л. «Силовые установки летательных аппаратов»; Изд-во МАИ, 2003 г. – 6 стр.
7. Ваньков, Ю.В., Плотникова, Л.В., Зиганшин, Ш.Г., Загретдинов, А.Р. «Рекуперация и аккумулирование вторичных энергетических ресурсов на предприятиях нефтеперерабатывающего комплекса»; Изд-во Монография, 2024 г. – 10 стр.
8. Вишневский, В.М., Целикин, Ю.В., Ахобадзе, Г.Н. «Патент на устройство для использования энергии рекуперации при питании двигателей привязного высотного беспилотного летательного аппарата»; ИПУ РАН, патентный отдел, 2023 г. —1-9 стр.
9. Балагуров, В.А., Галтеев, Ф.Ф. «Электрические генераторы с постоянными магнитами»; – Москва, Изд-во Энерготомиздат, 1988 — стр. 29.
10. Горячев, Н.В., Ергалиев, Д.С., Полтавский, А.В., Кошелев, Н.Д., Юрков, Н.К.. «Беспилотные летательные аппараты. Проблемы

проектирования и эксплуатации : монография» – Пенза, Изд-во ПГУ, 2023. - 310-315 стр.

11. Патент № RU213638U1 Российская Федерация «Шестифазный генератор для бортовых гибридных силовых установок беспилотных летательных аппаратов»; заявл. 2022-09-21; опубликовано 2022-09-21 / Барбасов В.К., Черницкий Р.О., Омелько В.В.; заявитель: Общество с ограниченной ответственностью "ДРОН СОЛЮШНС" — стр. 1-4.

12. ГОСТ 2.722-68. «ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Машины электрические» – Взамен ГОСТ 7624-62 – Москва; Изд-во стандартов, 1967 г.

13. ГОСТ 2.730-73. «Обозначения условные графические в схемах. Приборы полупроводниковые». – Взамен ГОСТ 2.730-68, ГОСТ 2.747-68 – Москва; Изд-во стандартов, 1974 г.

14. Сивухин, Д.В. «Общий курс физики. Том 3. Электричество и магнетизм.» – изд-во МФТИ, 2004 г.

15. Primorsky.ru: [Электронный ресурс] «Новейшие беспилотники заступят на дежурство в Приморье» https://primorsky.ru/news/271108/?special_version=Y&bitrix_include_areas=N; дата обращения: 29.03.2026.

16. Go Artic: [Электронный ресурс] «Конструктор авиационных двигателей и президент академии авиации и воздухоплавания предложил использовать в Арктике дирижабли» <https://goartic.ru/work/konstruktor-aviatsionnykh-dvigatelay-i-prezident-akademii-aviatsii-i-vozdukhoplavanija-predlozhit-is/>; дата обращения: 29.03.2026.

17. На токе: [Электронный ресурс] «Что такое рекуперация торможения в электромобиле?» <https://natoke.ru/razvitie/tehnology/184-chto-takoe-rekuperacija-tormozhenija-v-elektromobile.html>; дата обращения: 29.03.2026.

18. Военное обозрение: [Электронный ресурс] «Гибридный двигатель для беспилотных летательных аппаратов» URL: <https://topwar.ru/277123->

gibridnyj-dvigatel-dlja-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov.html, дата обращения: 09.05.2026.

19. Djistor: [Электронный ресурс] «Что означает KV на двигателе дрона: полный гайд по выбору мотора для FPV квадрокоптера» URL: <https://djistor.ru/blogs/blog/chto-oznachaet-kv-na-dvigatele-drona-polnyy-gayd-po-vyboru-motora-dlya-fpv-kvadrokoptera>, дата обращения: 09.05.2026.

20. Радиоэлемент [Электронный ресурс] «Диоды Шоттки: что это такое, чем отличается, как работает» URL: <https://www.radioelementy.ru/articles/diody-shottki-chto-eto-takoe-chem-otlichaetsya-kak-rabotaet/>, дата обращения: 09.05.2026

21. Rscopter: [Электронный ресурс] «Что такое электронный регулятор скорости (ESC) для дронов? Как его выбрать?» URL: <https://rccopter.ru/blogs/knowledge/chto-takoe-elektronnyy-regulyator-skorosti-esc-dlya-dronov-kak-ego-vybrat>, Дата обращения: 09.05.2026

22. Github: [Электронный ресурс] «ESC-Controller-Esp32_NodeMCU /schematic.png» URL: https://github.com/carloterzaghi/ESC-Controller-Esp32_NodeMCU/blob/main/schematic.png, дата обращения: 09.05.2026

23. Technobee: [Электронный ресурс] «Настройка прошивки Betaflight 4.5.1 для FPV дронов» <https://technobee.ru/index.php/soft/betaflight/item/nastrojka-proshivki-betaflight-dlya-fpv-dronov-2.html>, дата обращения: 09.05.2026

24. Виктор Денисенко: [Электронный ресурс] «ПИД регуляторы: принципы построения и модификации» URL: <https://www.cta.ru/cms/f/342946.pdf>, дата обращения: 10.05.2026

25. В. О. Воронова, В. А. Гриневич, С. А. Крейдич [Электронный ресурс] «Датчики холла» URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/139099/32-36.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, дата обращения: 10.05.2026

26. ОВЕН: [Электронный ресурс] «Резисторы балластные» URL: https://owen-prom.ru/files/re_rbh_1-ru-78862-1.9.pdf, дата обращения: 10.05.2026