

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им.А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой «Энергетика»
НАО «КазНТУ им.К.И.Сатпаева» Р.И.Сарсенбаев
Институт энергетики и машиностроения Е. А. Сарсенбаев
« 06 » 20__ г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

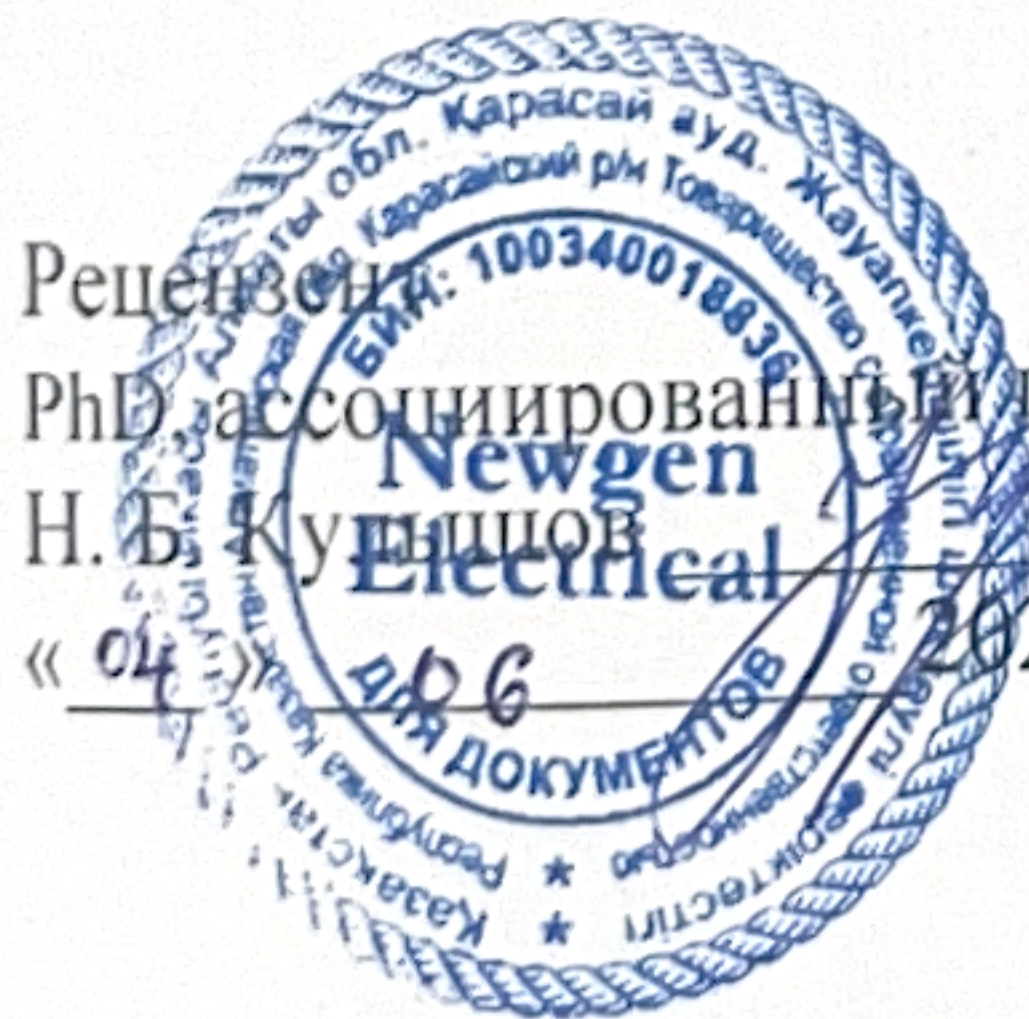
На тему: «Эффективность автоматизированного электропривода с независимыми колесными
электромоторами в динамических режимах»

6B07101– Энергетика

Выполнил:

Удовин Я. Е.

Рецензент
PhD, ассоциированный профессор
Н. Б. Кушницов
« 04 » 2025 г.



Научный руководитель
магистр, старший преподаватель
« 05 » 06 2025 г.
А.О. Бердибеков

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им.А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

6B07101– Энергетика

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой «Энергетика»

PhD, ассоциированный профессор

Е. А. Сарсенбаев

«30» 01 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающемуся Удовину Якову Евгеньевичу

Тема: Эффективность автоматизированного электропривода с независимыми колесными электромоторами в динамических режимах

Утверждена приказом Проректора по академическим вопросам №26–п от "29" января 2025г.

Срок сдачи законченной работы «31» мая 2025г.

Исходные данные к дипломной работе: регламент Formula Student

Краткое содержание дипломной работы: расчет и выбор электродвигателей

а) Изучение регламента

б) Выбор и расчет электродвигателей

в) Выбор конфигурации размещения двигателей

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

представлены 15 слайдов презентации работы

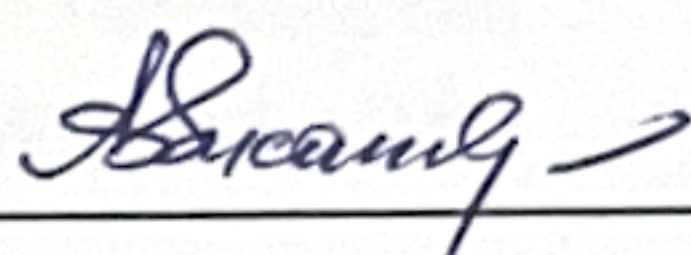
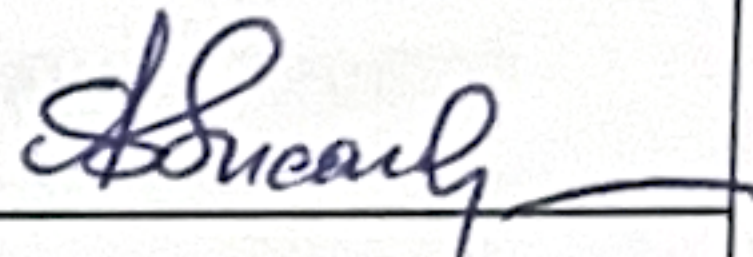
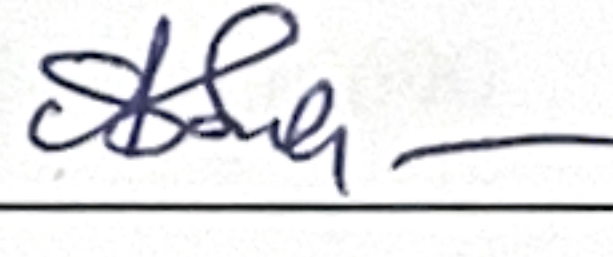
Рекомендуемая основная литература: из 9 наименований учебных материалов

ГРАФИК подготовки дипломной работы

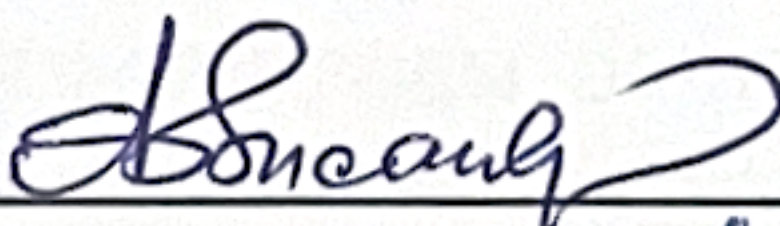
Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Изучение регламента	23.01.2025	
Выбор и расчет электродвигателей	21.03.2025	нет
Выбор конфигурации размещения двигателей	21.05.2025	нет

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

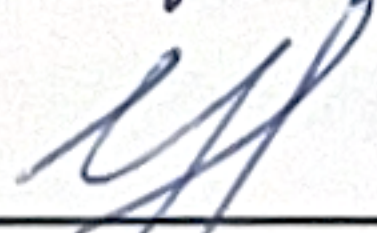
Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Изучение регламента	А.О. Бердибеков, магистр, старший преподаватель	23.01.2025	
Выбор и расчет электродвигателей	А.О. Бердибеков, магистр, старший преподаватель	21.03.2025	
Выбор конфигурации размещения двигателей	А.О. Бердибеков, магистр, старший преподаватель	21.05.2025	
Нормоконтролер	А.О. Бердибеков, магистр, старший преподаватель	28.05.2025	

Научный руководитель



А.О. Бердибеков

Задание принял к исполнению обучающийся



Я. Е. Удовин

Дата

" 23 " 01 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им.А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
научный сотрудник кафедры «Энергетика»
НАО «КазНТУ им. К.И.Сатпаева» ассоциированный профессор
Институт энергетики и машиностроения Е. А. Сарсенбаев
« 06 » 20__ г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Эффективность автоматизированного электропривода с независимыми колесными
электромоторами в динамических режимах»

6B07101– Энергетика

Выполнил:

Удовин Я. Е.

Рецензент
PhD, ассоциированный профессор
Н. Б. Кулешов
« 04 » 2025 г.

Научный руководитель
магистр, старший преподаватель

А.О. Бердибеков
« 05 » 06 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им.А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

Удовин Яков Евгеньевич

Эффективность автоматизированного электропривода с независимыми колесными
электромоторами в динамических режимах

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

6B07101– Энергетика

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им.А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой «Энергетика»
PhD, ассоциированный профессор
_____ Е. А. Сарсенбаев
«__» _____ 20__ г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Эффективность автоматизированного электропривода с независимыми колесными
электромоторами в динамических режимах»

6B07101– Энергетика

Выполнил:

Удовин Я. Е.

Рецензент
PhD, ассоциированный профессор
Н. Б. Кулышов _____
«__» _____ 2025 г.

Научный руководитель
магистр, старший преподаватель
_____ А.О. Бердибеков
«__» _____ 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

6B07101– Энергетика

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой «Энергетика»

PhD, ассоциированный профессор

_____ Е. А. Сарсенбаев

«__» _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающемуся Удовину Якову Евгеньевичу

Тема: Эффективность автоматизированного электропривода с независимыми колесными электромоторами в динамических режимах

Утверждена приказом Проректора по академическим вопросам №26–п от "29" января 2025г.

Срок сдачи законченной работы «__» _____ 2025г.

Исходные данные к дипломной работе: регламент Formula Student

Краткое содержание дипломной работы: расчет и выбор электродвигателей

а) Изучение регламента

б) Выбор и расчет электродвигателей

в) Выбор конфигурации размещения двигателей

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):
представлены 15 слайдов презентации работы

Рекомендуемая основная литература: из _____ наименований учебных материалов

ГРАФИК

подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Изучение регламента	23.01.2025	
Выбор и расчет электродвигателей	21.03.2025	
Выбор конфигурации размещения двигателей	21.05.2025	

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Расчетная часть	А.О. Бердибеков, магистр, старший преподаватель		
Экономическая часть	А.О. Бердибеков, магистр, старший преподаватель		
Нормоконтролер	А.О. Бердибеков, магистр, старший преподаватель		

Научный руководитель _____ А.О. Бердибеков

Задание принял к исполнению обучающийся _____ Я. Е. Удовин

Дата " ____ " _____ 20 ____ г.

АННОТАЦИЯ

Данная дипломная работа посвящена расчету электрических и механических характеристик различных электродвигателей для использования в международных соревнованиях Formula Student. В первой части работы рассматривается сводка правил для постройки болида и регламент проведения гонок Formula Student.

Вторая часть дипломной работы направлена на выбор и расчет подходящих двигателей для использования системы, позволяющей независимо подключить каждое колесо болида к отдельному электродвигателю. В этой части вычисляются и рассматриваются все необходимые характеристики электродвигателей, такие как скорость вращения ротора, вес, максимальная мощность, напряжение, ток, крутящий момент и т.д. Для каждого выбранного двигателя проведены расчеты этих величин для трех разных номинальных напряжений от 100 до 690 Вольт.

В третьей части работы рассматривается структурная схема подключения двигателей к батарее, различные конфигурации расположения электродвигателей и необходимое оборудование для передачи энергии и размещения двигателей.

АННОТАЦИЯ

Бұл дипломдық жұмыс халықаралық Formula Student жарыстарында қолдану үшін әртүрлі электр қозғалтқыштарының электрлік және механикалық сипаттамаларын есептеуге арналған. Жұмыстың бірінші бөлімінде жарыс машинасын жасау ережелері және Formula Student жарыстарын өткізу ережелері қарастырылады.

Дипломдық жұмыстың екінші бөлімі автомобильдің әрбір дөңгелегін жеке электр қозғалтқышына дербес қосуға мүмкіндік беретін жүйені пайдалану үшін қолайлы қозғалтқыштарды таңдауға және есептеуге бағытталған. Бұл бөлімде электр қозғалтқыштарының барлық қажетті сипаттамалары, мысалы, ротордың жылдамдығы, салмағы, максималды қуаты, кернеуі, ток, момент және т.б. есептелген және қарастырылған. Әрбір таңдалған қозғалтқыш үшін бұл мәндердің есептеулері 100-ден 690 Вольтқа дейінгі үш түрлі номиналды кернеу үшін жүргізілді.

Жұмыстың үшінші бөлігінде қозғалтқыштарды батареяға қосудың құрылымдық схемасы, электр қозғалтқыштарының орналасуының әртүрлі конфигурациялары және энергияны тасымалдау және қозғалтқыштарды орналастыру үшін қажетті жабдықтар қарастырылады.

ANNOTATION

This thesis is devoted to the calculation of electrical and mechanical characteristics of various electric motors for use in international Formula Student competitions. The first part of the work examines a summary of the rules for building a racing car and the regulations for holding Formula Student races.

The second part of the thesis is aimed at the selection and calculation of suitable engines for using a system that allows each wheel of the car to be independently connected to a separate electric motor. In this section, all the necessary characteristics of electric motors are calculated and considered, such as rotor speed, weight, maximum power, voltage, current, torque, etc. For each selected motor, these values are calculated for three different nominal voltages from 100 to 690 Volts.

The third part of the work examines the structural diagram of connecting motors to the battery, various configurations of the location of electric motors and the necessary equipment for energy transmission and placement of motors.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1 Общие сведения о соревнованиях и болиде	9
1.1 Международное соревнование Formula Student	9
1.2 Основные аспекты Formula Student	9
1.3 Идея подключения моторов к каждому колесу	10
2 Общие требования к проектированию болида	12
2.1 Конфигурация болида	12
2.2 Дорожный просвет	13
2.3 Подвеска	13
2.4 Колеса	14
2.5 Колесная база	14
2.6 Тяговая система	14
2.7 Электроника	15
2.8 Двигатели	15
2.9 Ограничение мощности	15
3 Расчет, сравнение и выбор электродвигателей	16
3.1 Предварительный выбор двигателей	16
3.2 Расчет характеристик EMRAX 208	16
3.3 Расчет характеристик Plettenberg Nova 30	31
4 Конфигурации размещения моторов	42
4.1 Выбор системы передачи энергии	42
4.2 Варианты расположения двигателей	44
Заключение	49
Список использованной литературы	50
Приложение А	51
Приложение Б	52

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе будет исследована технология использования электродвигателей в качестве приводов для каждого колеса в гоночном автомобиле. За основу для работы был взят проект созданный немецкой гоночной командой HofSpannung в университете прикладных наук города Хоф, Германия. В рамках этого проекта был создан гоночный болид для участия в соревнованиях Formula Student. Каждый отдел данной команды прикладывает усилия для продвижения своего проекта во всех сферах маркетинга, IT, бизнеса и в первую очередь инженерии. Автор данной работы провел шесть месяцев практики в данной команде с целью расчета и выбора подходящего электродвигателя в качестве привода для каждого колеса по отдельности. В этой работе представлены расчеты и характеристики электрооборудования выбранного для проекта и то, как они влияют на результативность болида в разных аспектах.

1 Общие сведения о соревнованиях и болиде

1.1 Международное соревнование Formula Student

Formula Student или (FSAE) — это международное инженерное соревнование, в котором студенты проектируют, создают и соревнуются на собственноручно разработанных гоночных автомобилях (Рисунок 1.1). Оно организуется с целью дать будущим инженерам практический опыт работы в многопрофильной команде, совмещая технические и управленческие навыки.



Рисунок 1.1 – Болид команды HofSpannung

1.2 Основные аспекты Formula Student

Соревнования проводятся в формате, где команды университетов со всего мира проектируют автомобиль с нуля, включая шасси, подвеску, двигатель, аэродинамику, электрические системы и программное обеспечение. Команды представляют автомобили в различных категориях: с двигателями внутреннего сгорания (Internal Combustion), с электрической тягой (Electric), а также автономные машины с системами самоуправления (Driverless).

Состязания делятся на статические и динамические испытания. В статических испытаниях судьи оценивают инженерную конструкцию автомобиля (Engineering Design), анализируют затраты и производственные процессы (Cost and Manufacturing) и рассматривают бизнес-план команды (Business Plan). В динамических испытаниях команды соревнуются в тесте ускорения на короткой дистанции (Acceleration), прохождении восьмёрки для

проверки управляемости (Skid Pad), гонке на трассе с конусами для оценки маневренности (Autocross) и гонке на выносливость с акцентом на экономию энергии и долговечность конструкции (Endurance and Efficiency).

Цель соревнований заключается в создании лёгкого, мощного и управляемого автомобиля, который сочетает в себе инновации и экономическую эффективность, а также в привлечении молодых специалистов в автопромышленность, мехатронику, электротехнику и программирование.

Formula Student — это не только про скорость и победу, но и про развитие инженерных, организационных и коммуникативных навыков, которые помогают создавать продукты, способные впечатлить как техническую комиссию, так и зрителей.

1.3 Идея подключения моторов к каждому колесу

Для электрических болидов Formula Student начинают использовать компоновку с четырьмя мотор-колесами или *In-wheel hub motors* (по одному двигателю на каждое колесо). Этот подход имеет несколько особенностей и преимуществ

Моторы и контроллеры. На каждом колесе устанавливается свой электромотор (обычно безредукторный). Мощность и крутящий момент контролируются индивидуально через инверторы, которые управляют подачей энергии.

Тяговое управление (Torque Vectoring) позволяет динамически распределять крутящий момент между колесами, улучшая сцепление и управляемость. Это особенно полезно в поворотах и на скользких покрытиях, например в условиях дождя, когда асфальт мокрый.

Преимуществами данной технологии является уменьшение веса трансмиссии, так как отпадает необходимость в дифференциалах, карданах и других компонентах. Повышенная эффективность благодаря минимальным потерям на передачу энергии и большая гибкость в управлении автомобилем.

К сожалению, существуют некоторые сложности в использовании этой технологии, требуются сложные системы управления, которые учитывают множество параметров (скорость, угол поворота, сцепление и т. д.), высокая стоимость компонентов, включая моторы, инверторы и датчики а так же проблемы с охлаждением из-за ограниченного пространства вокруг колес.

В командах Formula Student индивидуальный привод колес часто разрабатывается с использованием двигателей типа Axial Flux Motor из-за их компактности и высокой плотности мощности. О них будет подробно рассказано позже в данной работе.

Задачей поставленной в рамках гоночного проекта являлось решение нескольких задач. Было необходимо:

А) Собрать данные об оборудовании, которое теоретически подходит для проекта;

Б) Связаться с производителями подходящих по принципу действия электродвигателей и запросить заявленные характеристики этих моторов.

В) Провести более точный расчет для выбранных двигателей.

Г) Выбрать подходящий вариант как по характеристикам, так и по стоимости, удовлетворяющей спонсора команды.

Д) Подобрать идеальную компоновку трансмиссии выбранных двигателей.

2 Общие требования к проектированию болида

Далее будут приведены только те правила из регламента, которые затрагивают аспект подключения электродвигателей к колесам.

2.1 Конфигурация болида

Согласно регламенту на 2024 и 2025 год, болиды всех команд должны соответствовать следующим конструктивным нормам:

2.1.1 Транспортное средство должно быть спроектировано и изготовлено в соответствии с надлежащей инженерной практикой.

2.1.2 Транспортное средство должно быть с открытыми колесами, одним сиденьем и открытой кабиной (кузов типа «формула») с четырьмя колесами, не расположенными на одной прямой.

2.1.3 Транспортные средства с открытыми колесами должны соответствовать следующим требованиям (рисунок 2.1):

- Колесо/шина должны быть свободны при осмотре сбоку.
- Ни одна часть транспортного средства не должна входить в запретную зону, определяемую двумя линиями, проходящими вертикально от позиций 75 мм спереди и 75 мм сзади внешнего диаметра передних и задних шин при боковом осмотре транспортного средства, с рулевым управлением прямо вперед. Эта запретная зона простирается вбок от внешней плоскости колеса/шины до внутренней плоскости колеса/шины.

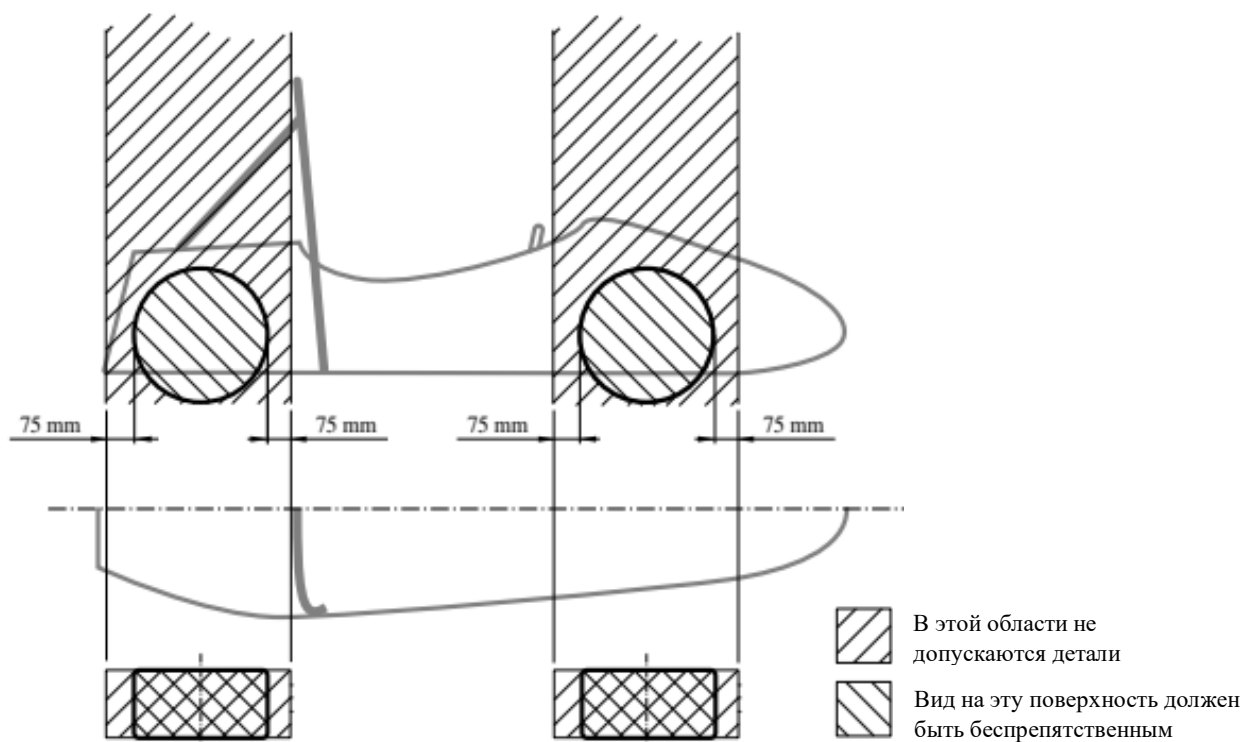


Рисунок 2.1 - Зоны запрета для определения транспортных средств с открытыми колесами

2.2 Дорожный просвет

2.2.1 Минимальный статический дорожный просвет любой части транспортного средства, кроме шин, включая водителя, должен составлять 30 мм. Если установлена активная система подвески, статический дорожный просвет измеряется в самом нижнем регулируемом положении.

2.2.2 Скользящие юбки или другие аэродинамические устройства, которые по своей конструкции, изготовлению или вследствие движения контактируют с поверхностью трассы, запрещены.

Пункты 2.1.3, 2.2.1 и 2.2.2 означают, что двигатель Для каждого колеса должен быть меньше чем диаметр колеса, что значительно сокращает вариации размещения и типов электродвигателей.

2.3 Подвеска

2.3.1 Транспортное средство должно быть оборудовано полностью работоспособными системами передней и задней подвески, включая

амортизаторы, и иметь полезный ход колес не менее 50 мм и минимальный толчок 25 мм при нахождении водителя на сиденье.

2.3.2 Все точки крепления подвески должны быть видны при техническом осмотре, либо прямым взглядом, либо путем снятия любых крышек.

Описание правил установки подвески делает необходимым расположение моторов таким образом, чтобы они не закрывали обзор на ступицу колеса и точки присоединения к подвеске.

2.4 Колеса

2.4.1 Любая система крепления колеса, использующая одну стопорную гайку, должна включать устройство, предотвращающее ослабление гайки и колеса. Вторая гайка («контргайка») не соответствует этим требованиям.

2.4.2 Колесные болты, приводные штифты и шпильки должны быть изготовлены из стали или титана. Команда должна продемонстрировать хорошую инженерную практику и обеспечить достаточную прочность расчетами. Колесные болты, приводные штифты и шпильки не должны быть полыми.

2.4.3 Можно использовать алюминиевые колесные гайки, но они должны быть твердо анодированными и в идеальном состоянии.

Данный пункт не сильно влияет на форму и расположение двигателя, так как двигатель подключается к обратной стороне ступицы колеса. Данный пункт лишь усложняет работу техническому отделу по созданию максимально легких колес для компоновки с двигателем.

2.5 Колесная база

2.5.1 Колесная база транспортного средства должна быть не менее 1525 мм.

2.6 Тяговая система

2.6.1 Тяговая система (ТС) — каждая часть, которая электрически соединена с двигателями и аккумуляторами ТС.

2.6.2 Корпуса ТС — каждый корпус или корпус, который содержит части ТС.

2.7 Электроника

2.7.1 Гальваническая развязка — две электрические цепи определяются как гальванически изолированные, если выполняются все следующие условия:

Сопротивление между обеими цепями составляет ≥ 500 Ом/В относительно максимального напряжения ТС транспортного средства при испытательном напряжении максимального напряжения ТС или 250 В, в зависимости от того, что выше.

Испытательное напряжение изоляции, переменного тока в течение 1 мин, между обеими цепями превышает в три раза максимальное напряжение ТС или 750 В, в зависимости от того, что выше.

Рабочее напряжение изоляционного барьера, если указано в техническом паспорте, выше максимального напряжения ТС.

2.8 Двигатели

2.8.1 Разрешены только электродвигатели.

2.8.2 Двигатель(и) должны быть подключены к аккумулятору через контроллер двигателя.

2.9 Ограничение мощности

2.9.1 Мощность ТС на выходе не должна превышать 80 кВт.

2.9.2 Рекуперация энергии разрешена и не ограничена.

2.9.3 Колеса не должны вращаться в обратном направлении.

Из пункта правил 3.4 можно сделать вывод, что двигатели могут иметь функцию рекуперации энергии. То есть в моменты когда колеса вращаются без помощи аккумулятора, а при торможении или вхождении в поворот по инерции, вращение колес будет рекуперировать некоторую часть энергии обратно в батарею.

Так же у двигателей не должно быть режима реверса и полная мощность ТС лимитирована 80 кВт.

3 Расчет, сравнение и выбор электродвигателей

3.1 Предварительный выбор двигателей

Перед началом расчетов необходимо проанализировать рынок электродвигателей. Одними из лучших производителей электрооборудования для авиации и автомобилестроения в Европе являются компании Plettenberg и EMRAX.

Связавшись с этими производителями, были получены данные о теоретически подходящих двигателях, таковыми оказались: Plettenberg Nova 30, и EMRAX 208.

3.2 Расчет характеристик EMRAX 208

EMRAX 208 (рисунок 3.2.1) - это компактный синхронный электродвигатель с постоянными магнитами осевого потока и высокой плотностью мощности/крутящего момента. Модель 208 была первым двигателем, разработанным компанией EMRAX. Его разработка началась еще в 2005 году и первоначально использовалась в основателе компании планерных самолетах. В настоящее время развитие мотора продолжается и он нашел множество различных применений за пределами авиации, например в соревнованиях Formula Student. Его популярность обусловлена сочетанием высокой мощности, надёжности и гибкости применения.

В таблице 3.2.1 указаны механические параметры этого двигателя, которые предоставляет производитель. Чертеж двигателя EMRAX 208 показан на рисунке 3.2.2.

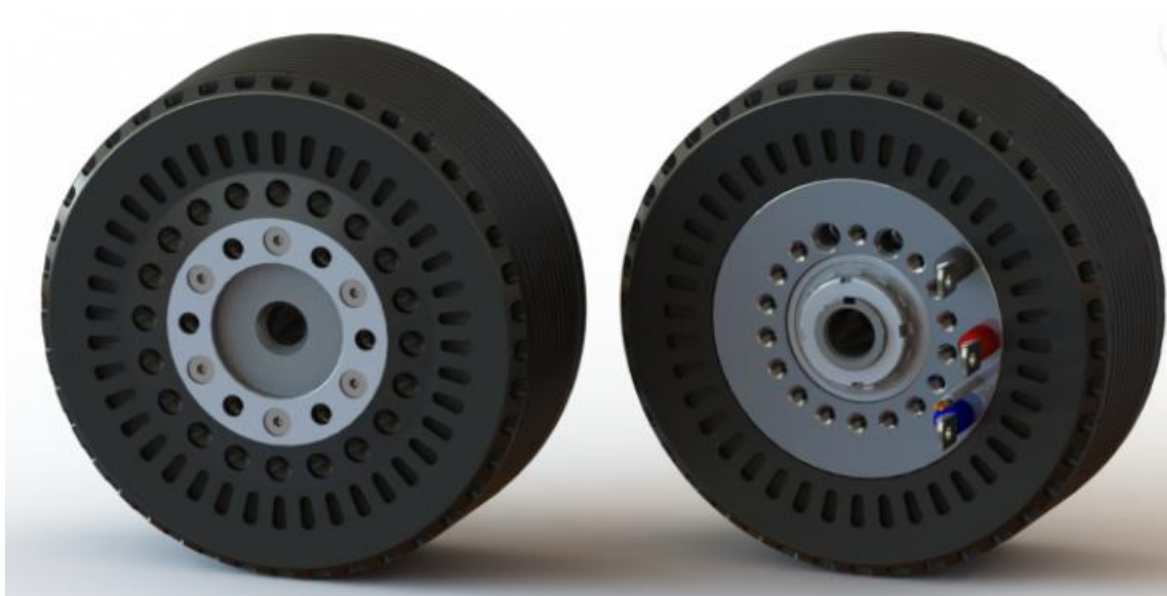


Рисунок 3.2.1 – EMRAX 208

Таблица 3.2.1 – Механические характеристики ЭД EMRAX 208

Тип двигателя	Axial flux motor Двигатель с осевым магнитным потоком
Диаметр корпуса	208 мм
Осевая длина	85 мм
Масса	От 9,4 до 10,3 кг в зависимости от охлаждения
Охлаждение	Воздушное, жидкостное или комбинированное
Крепление	Спереди: 6 резьбовых отверстий М8. Сзади: 6 резьбовых отверстий М8.
Stacking (Сложение)	Два двигателя можно соединить вместе, чтобы удвоить мощность/крутящий момент.

Далее в таблице 3.2.2 предоставлены электрические характеристики двигателя

Таблица 3.2.2 - Электрические характеристики ЭД EMRAX 208

Максимальное напряжение аккумулятора	690 (ВН) / 420 (СН) / 170 (НН) В постоянного тока
Пиковая мощность (при 6000 об/мин)	86 кВт
Продолжительная мощность	До 56 кВт
Максимальное число оборотов	6000 об/мин
Максимальный крутящий момент	150 Нм
Непрерывный крутящий момент	До 90 Нм
КПД	92-98%

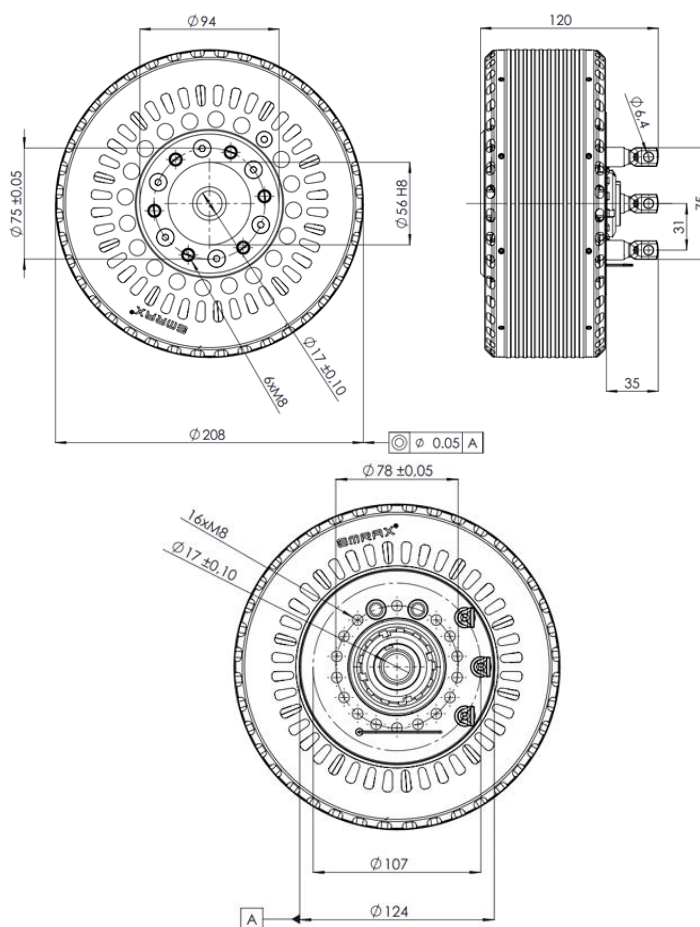


Рисунок 3.2.2 – Чертеж EMRAX 208

Используя исходные данные, предоставленные производителем двигателя, можно сделать более подробный расчет.

Для начала нужно рассчитать постоянную K_V без нагрузки (формула 1.1). « K_V » относится к постоянной скорости двигателя. Она измеряется числом оборотов в минуту (об/мин), которые совершает двигатель при подаче 1 В (один вольт) без нагрузки, подключенной к этому двигателю. Номинал K_V бесщеточного двигателя — это отношение числа оборотов двигателя без нагрузки к пиковому напряжению на проводах, подключенных к катушкам.

Знание номинала K_V двигателя поможет вам определить, как быстро этот двигатель будет вращаться при подаче на него заданного напряжения.

Количество оборотов при разных напряжениях известно благодаря тестам проведенным производителем.

$$K_V = \frac{\omega_{\text{об/мин}}}{U_{\text{ном}}/2} \quad (1.1)$$

Необходимо разделить номинальное напряжение на 2, так как необходимо посчитать K_V с 50% нагрузкой на двигатели. (по регламенту это считается отсутствием нагрузки).

Так как расчет ведется для ВН/СН/НН, значений K_V будет 3, но необходимо рассчитать K_V с разной нагрузкой для каждого типа напряжения.

Постоянная K_V без нагрузки:

$$K_{V_1} = \frac{3000}{690 \div 2} = 8,6 \frac{\text{об/мин}}{\text{В}};$$

$$K_{V_2} = \frac{1600}{420 \div 2} = 7,6 \frac{\text{об/мин}}{\text{В}};$$

$$K_{V_3} = \frac{650}{170 \div 2} = 7,6 \frac{\text{об/мин}}{\text{В}}.$$

Для вычисления K_V с номинальной нагрузкой, необходимо разделить максимальное число оборотов при заданном напряжении (не пиковое) на номинальное напряжение (формула 1.2)

$$K_V = \frac{\omega_{\text{об/мин}}}{U_{\text{ном}}} \quad (1.2)$$

Постоянная K_V с номинальной нагрузкой:

$$K_{V_1} = \frac{6000}{690} = 8,69 \frac{\text{об/мин}}{\text{В}};$$

$$K_{V_2} = \frac{3300}{420} = 7,8 \frac{\text{об/мин}}{\text{В}};$$

$$K_{V_3} = \frac{1300}{170} = 7,6 \frac{\text{об/мин}}{\text{В}}.$$

Для вычисления K_V с максимальной нагрузкой, необходимо разделить максимально число оборотов при заданном напряжении на номинальное напряжение увеличенное на 10%. (формула 1.3)

$$K_V = \frac{\omega_{\text{об/мин}}}{U_{\text{ном}} \times 1,1} \quad (1.3)$$

Постоянная K_V с максимальной нагрузкой:

$$K_{V_1} = \frac{7000}{690 \times 1,1} = 9,2 \frac{\text{об/мин}}{\text{В}};$$

$$K_{V_2} = \frac{4000}{420 \times 1,1} = 8,6 \frac{\text{об/мин}}{\text{В}};$$

$$K_{V_3} = \frac{1600}{170 \times 1,1} = 8,5 \frac{\text{об/мин}}{\text{В}}.$$

Далее необходимо построить график зависимости мощности от числа оборотов (рисунок 3.2.3)

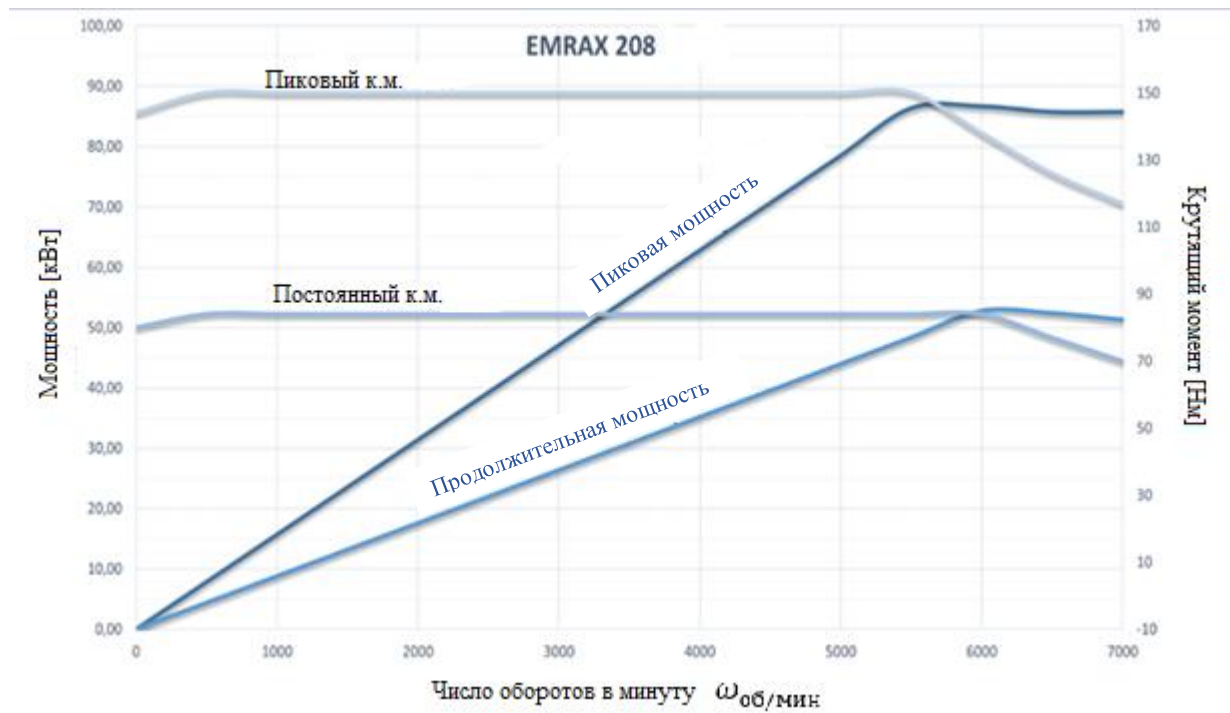


Рисунок 3.2.3 - График зависимости мощности и момента от числа оборотов

Постоянная момента K_T определяет отношение крутящего момента к току двигателя и измеряется в $\frac{Нм}{А}$. Постоянные двигателя и крутящего момента связаны формулой 2.1, где:

J —. Максимальный крутящий момент (вычислено производителем);
 $I_{с.кв}$ —. Максимальный среднеквадратичный ток.

$$K_T = \frac{J}{I_{с.кв}} \quad (2.1)$$

Но сперва необходимо рассчитать максимальный среднеквадратичный ток по формуле 2.2.

$$I_{с.кв} = \frac{P_m}{U_H \times \eta_{\varepsilon}} \quad (2.2)$$

где η_{ε} —.коэффициент эффективности равный примерно 0,51.

Максимальный среднеквадратичный ток:

$$I_{с.кв1} = \frac{86 \times 10^3}{690 \times 0,51} \approx 240 \text{ A};$$

$$I_{с.кв2} = \frac{86 \times 10^3}{420 \times 0,51} \approx 400 \text{ A};$$

$$I_{с.кв3} = \frac{86 \times 10^3}{170 \times 0,51} \approx 1000 \text{ A}.$$

После чего можно построить зависимость крутящего момента среднеквадратичного тока при высоком напряжении (рисунок 3.2.4)

Графики типа двигателя среднего и низкого напряжения EMRAX 208:

Графики низкого напряжения EMRAX 208 и среднего напряжения EMRAX 208 аналогичны графикам высокого напряжения EMRAX 208. Единственными отличиями являются постоянное напряжение и ток двигателя. Эти два параметра можно прочесть из таблицы технических данных для двигателя низкого и среднего напряжения EMRAX 208.

Двигателю низкого напряжения требуется в 4 раза больший ток двигателя и в 4 раза меньшее напряжение постоянного тока для той же мощности/крутящего момента и оборотов в минуту, по сравнению с двигателем высокого напряжения EMRAX 208.

Двигателю среднего напряжения требуется в 1,52 раза больший ток двигателя и на 1/3 меньшее напряжение постоянного тока для той же мощности/крутящего момента и оборотов в минуту, по сравнению с двигателем высокого напряжения EMRAX 208.

Постоянная K_T :

$$K_{T_1} = \frac{150}{240} = 0,62;$$

$$K_{T_2} = \frac{150}{400} = 0,38;$$

$$K_{T_3} = \frac{150}{1000} = 0,15.$$

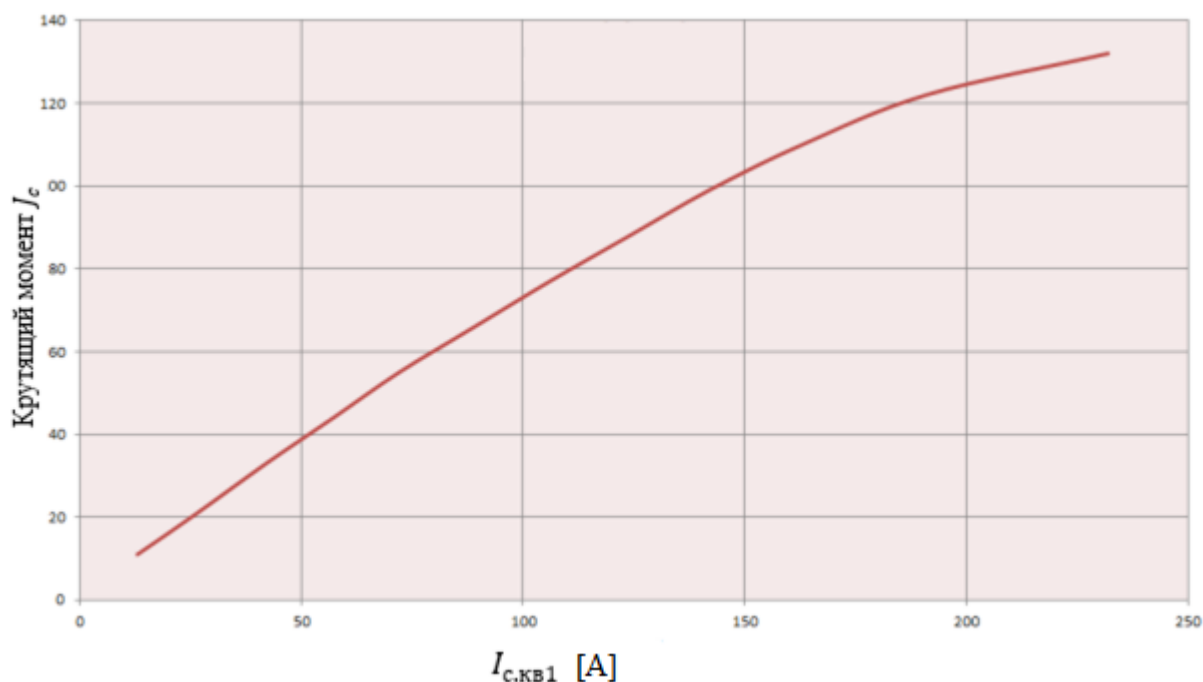


Рисунок 3.2.4 - Зависимость крутящего момента среднеквадратичного тока при высоком напряжении

Продолжительный среднеквадратичный ток составляет вычисляется при мощности 55-58% от максимальной, что эквивалентно мощности с комбинированным охлаждением, либо охлаждением за счет потока воздуха вдоль корпуса болида. Для расчета взято значение мощности 49 кВт.

$$I_{п.с.кв1} = \frac{49 \times 10^3}{690 \times 0,51} \approx 140 \text{ A};$$

$$I_{п.с.кв2} = \frac{49 \times 10^3}{420 \times 0,51} \approx 220 \text{ A};$$

$$I_{п.с.кв3} = \frac{49 \times 10^3}{170 \times 0,51} \approx 560 \text{ A}.$$

Двигатель с комбинированным охлаждением (КО) требует способов охлаждения от двигателей с воздушным и жидкостным охлаждением, чтобы соответствовать своим спецификациям. Его нельзя охлаждать только как двигатель с жидкостным охлаждением. Каждый двигатель EMRAX требует достаточной циркуляции воздуха. Моторы не должны быть полностью закрыты ни в каком состоянии. Эта проблема решается тем, что болид, двигаясь на большой скорости, создает воздушный поток вокруг двигателей с большей скоростью, чем требуемые 20 м/с.

Связавшись с производителем EMRAX 208, удалось выяснить величины, выявленные в результате тестов и симуляций для этого двигателя. Известны следующие величины:

Внутреннее фазное сопротивление при 25 °C:

$$r_{\phi 1} = 12,27 \text{ мОм}$$

$$r_{\phi 2} = 5,51 \text{ мОм}$$

$$r_{\phi 3} = 0,9 \text{ мОм}$$

Индуктивность 1 фазы:

$$L_{D1} = 175,5 \text{ мкГн}$$

$$L_{D2} = 73,5 \text{ мкГн}$$

$$L_{D3} = 7,5 \text{ мкГн}$$

Используя значения индуктивности необходимо вычислить магнитный поток по формуле 3.1:

$$\Phi = L \times I_{\text{с.кв}} \quad (3.1)$$

Магнитный поток:

$$\Phi_1 = 175,5 \times 10^{-6} \times 240 = 0,04212 \text{ Вб};$$

$$\Phi_2 = 73,5 \times 10^{-6} \times 400 = 0,0294 \text{ Вб};$$

$$\Phi_3 = 7,5 \times 10^{-6} \times 1000 = 0,0075 \text{ Вб}.$$

Далее рассчитываются значения фазного напряжения, индуцируемого напряжения.

Фазное напряжение вычисляется по формуле 4.1 (подключение звездой).

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \quad (4.1)$$

Фазное напряжение:

$$U_{\phi 1} = \frac{690}{\sqrt{3}} = 398,37 \text{ В};$$

$$U_{\phi 2} = \frac{420}{\sqrt{3}} = 242,4 \text{ В};$$

$$U_{\phi 3} = \frac{170}{\sqrt{3}} = 98,1 \text{ В}.$$

После чего необходимо вычислить индуцированное напряжение.

Индуцированное напряжение – это напряжение, которое генерируется в обмотках статора электродвигателя из-за влияния тока ротора. Используется как метод контроля состояния для обнаружения сломанных стержней ротора в двигателе.

Для расчета этой величины необходимо знать среднеквадратичное напряжение, которое вычисляется по формуле 4.2.

$$U_{\text{с.кв}} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{2}} \quad (4.2)$$

Среднеквадратичное напряжение:

$$U_{\text{с.кв}1} = \frac{690}{\sqrt{2}} = 488 \text{ В};$$

$$U_{\text{с.кв}2} = \frac{420}{\sqrt{2}} = 297 \text{ В};$$

$$U_{\text{с.кв}3} = \frac{170}{\sqrt{2}} = 120,2 \text{ В}.$$

Для нахождения индуцируемого напряжения необходимо разделить среднеквадратичное напряжение на максимальное число оборотов $U_L = \frac{U_{с.кв}}{\omega_{об/мин}}$, в результате чего получаются следующие значения:

$$U_{L1} = \frac{488}{6000} = 0,0813 \text{ В};$$

$$U_{L2} = \frac{297}{6000} = 0,0495 \text{ В};$$

$$U_{L3} = \frac{120,2}{6000} = 0,02 \text{ В}.$$

Все рассчитанные, предоставленные производителем и полученные в результате симуляций характеристики внесены в таблицу 3.2.3 - *Характеристики электродвигателя EMRAX 208*.

После проведения всех расчетов, тестирований и симуляций можно составить карту эффективности двигателя (рисунок 3.2.5). По этой карте можно понять в каком диапазоне двигатель работает с максимальной эффективностью, практически без потерь. Так же для наглядности будет приведен график потерь мощности при увеличении числа оборотов (рисунок 3.2.6).

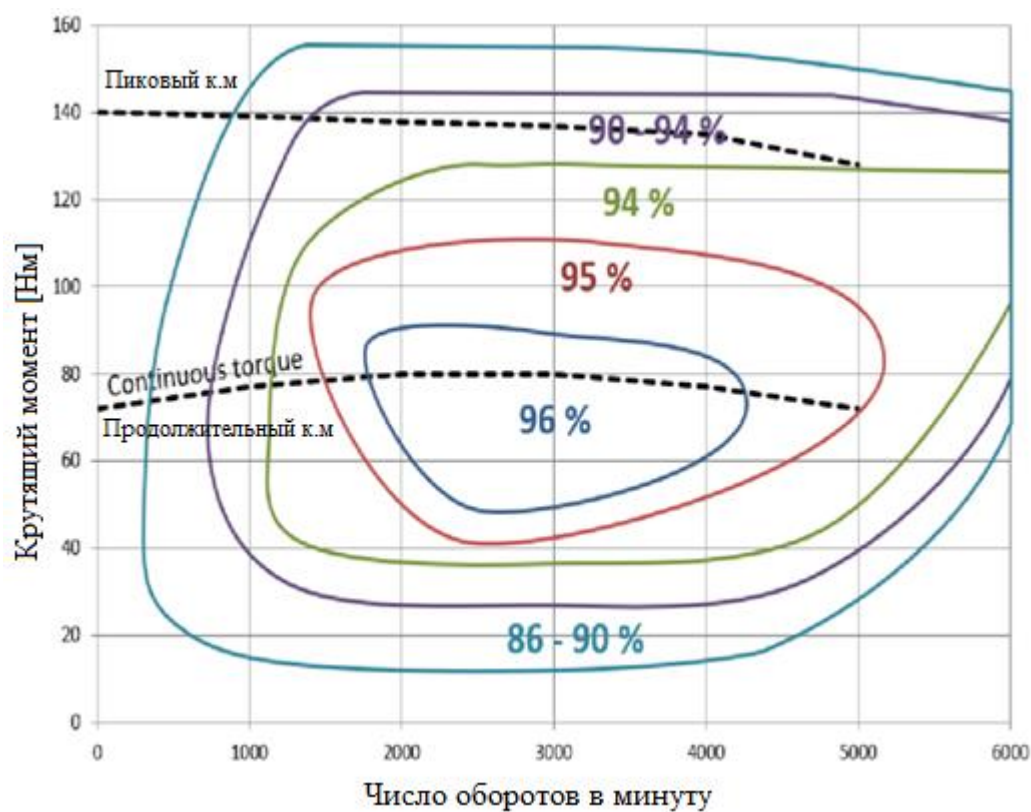


Рисунок 3.2.5 – Карта эффективности. Отношение крутящего момента к количеству оборотов в минуту

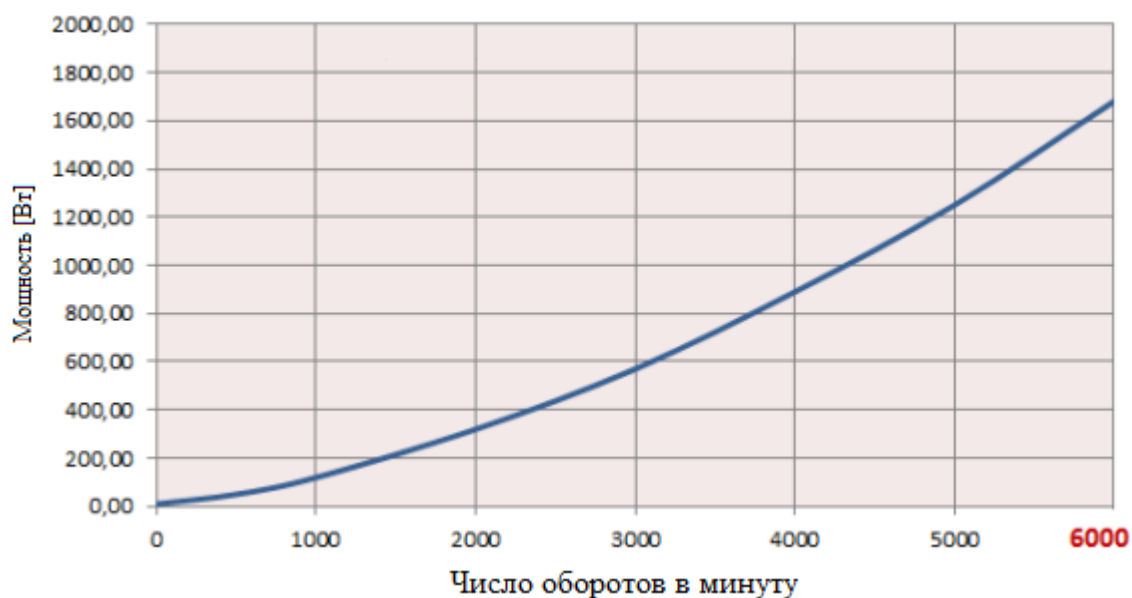


Рисунок 3.2.6 – График потерь мощности

Примечание: График потерь мощности (рисунок 3.2.6) был сделан в результате симуляций пуска двигателя с высоким напряжением.

Таблица 3.2.3 – Характеристики электродвигателя EMRAX 208

	Высокое напряжение			Среднее напряжение			Низкое напряжение		
Охлаждение	ВО	ЖО	КО	ВО	ЖО	КО	ВО	ЖО	КО
Защита от проникновения внутрь	IP21	IP66	IP21	IP21	IP66	IP21	IP21	IP66	IP21
Характеристики охлаждения	Обдуваю- щий воздух 20°C 20 м/с	Мин. 6 л/мин Макс. 50°C	ВО + ЖО	Обдуваю- щий воздух 20°C 20 м/с	Мин. 6 л/мин Макс. 50°C	ВО + ЖО	Обдуваю- щий воздух 20°C 20 м/с	Мин. 6 л/мин Макс. 50°C	ВО + ЖО
Максимальная температура двигателя [°C]	120								
ВН/СН/НН [В] постоянного тока необходимые для работы на максимальной скорости ($U_{ном}$)	690			420			170		
КПД двигателя	92-98%								
Пиковая мощность [кВт] при 6000 об/мин	86								
Постоянная мощность [кВт]	33	52	56	33	52	56	33	52	56
Максимальный крутящий момент J [Нм]	150								
Постоянный крутящий момент J_c [Нм]	54	84	90	54	84	90	54	84	90
Предельная скорость [об/мин]	7000								

Продолжение таблицы 3.2.3

	Высокое напряжение			Среднее напряжение			Низкое напряжение		
Охлаждение	ВО	ЖО	КО	ВО	ЖО	КО	ВО	ЖО	КО
Постоянная K_V без нагрузки $\left[\frac{\text{об/мин}}{U_{\text{ном}}} \right]$	8,6			7,6			7,6		
Постоянная K_V с номинальной нагрузкой $\left[\frac{\text{об/мин}}{U_{\text{ном}}} \right]$	8,69			7,8			7,6		
Постоянная K_V с макс. нагрузкой $\left[\frac{\text{об/мин}}{U_{\text{ном}}} \right]$	9,2			8,6			8,2		
Постоянная момента $K_T = \frac{J}{I_{\text{с.кв}}} \left[\frac{\text{Нм}}{\text{А}} \right]$	0,62			0,38			0,15		
Максимальный среднеквадратичный ток $I_{\text{с.кв}} [\text{А}]$	240			400			1000		
Продолжительный среднеквадратичный ток $I_{\text{с.кв}} [\text{А}]$	140			220			560		
Внутреннее фазное сопротивление при 25 °С [мОм]	12,27			5,51			0,9		
Индукция 1 фазы L_D [мкГн]	175,5			73,5			7,5		
Среднеквадратичное напряжение [В]	488			297			120,2		

Продолжение таблицы 3.2.3

	Высокое напряжение			Среднее напряжение			Низкое напряжение		
Охлаждение	ВО	ЖО	КО	ВО	ЖО	КО	ВО	ЖО	КО
Индукцируемое напряжение $\left[\frac{U_{с.кв}}{\text{об/м}}\right]$	0,0813			0,0495			0,02		
Магнитный поток – осевой [Вб]	0,04212			0,0294			0,075		
Датчик температуры на обмотках статора	КТУ 81/210								
Число пар полюсов	10								
Конфигурация обмотки	Звезда								
Инерция ротора	0,01569								
Конфигурация подшипников	6206 3206								
Вес [кг]	9,4	10,3	10	9,4	10,3	10	9,4	10,3	10

Примечание: ВО – воздушное охлаждение, ЖО – жидкостное, КО - комбинированное

3.3 Расчет характеристик Plettenberg Nova 30

NOVA 30 (рисунок 3.3.1) — представитель сверхпрочных двигателей, специально разработанных для критически важных приложений. Прочный закрытый корпус со стандартной степенью защиты IP 53 (максимально возможной) позволяет использовать его в самых суровых условиях окружающей среды, таких как космические, пустынные и морские миссии. По сравнению с открытыми двигателями он обеспечивает увеличенное время безотказной работы при значительно сниженной общей стоимости владения. В то же время двигатель разработан сверхлегким и обеспечивает наилучшее соотношение мощности к весу и прочности на рынке. Двигатель NOVA 30 доступен в версиях с воздушным или водяным охлаждением.



Рисунок 3.3.1 – Электродвигатель Plettenberg Nova 30

В таблице 3.3.1 приведены механические, а в таблице 3.3.2 – электрические параметры этого двигателя которые предоставляет производитель. Чертеж двигателя Plettenberg Nova 30 показан на рисунке 3.3.2.

Таблица 3.3.1 – Механические характеристики ЭД Plettenberg Nova 30

Тип двигателя	Вентильный двигатель (бесколлекторный синхронный двигатель постоянного тока на постоянных магнитах).
Диаметр корпуса	198 мм
Осевая длина	93 мм
Масса	От 5,6 до 7,5 кг в зависимости от охлаждения
Охлаждение	Воздушное, жидкостное или комбинированное
Крепление	Спереди: 12 резьбовых отверстий М6. Сзади: 12 резьбовых отверстий М6.
Stacking (Сложение)	Два двигателя можно соединить вместе, чтобы удвоить мощность/крутящий момент.

Таблица 3.3.2 - Электрические характеристики ЭД Plettenberg Nova 30

Максимальное напряжение аккумулятора	350 (ВН) / 220 (СН) / 100 (НН) В постоянного тока
Пиковая мощность (при 5000 об/мин)	30 кВт
Продолжительная мощность	До 22 кВт
Максимальное число оборотов	5000 об/мин
Максимальный крутящий момент	80 Нм
Непрерывный крутящий момент	До 50 Нм
КПД	92-98%

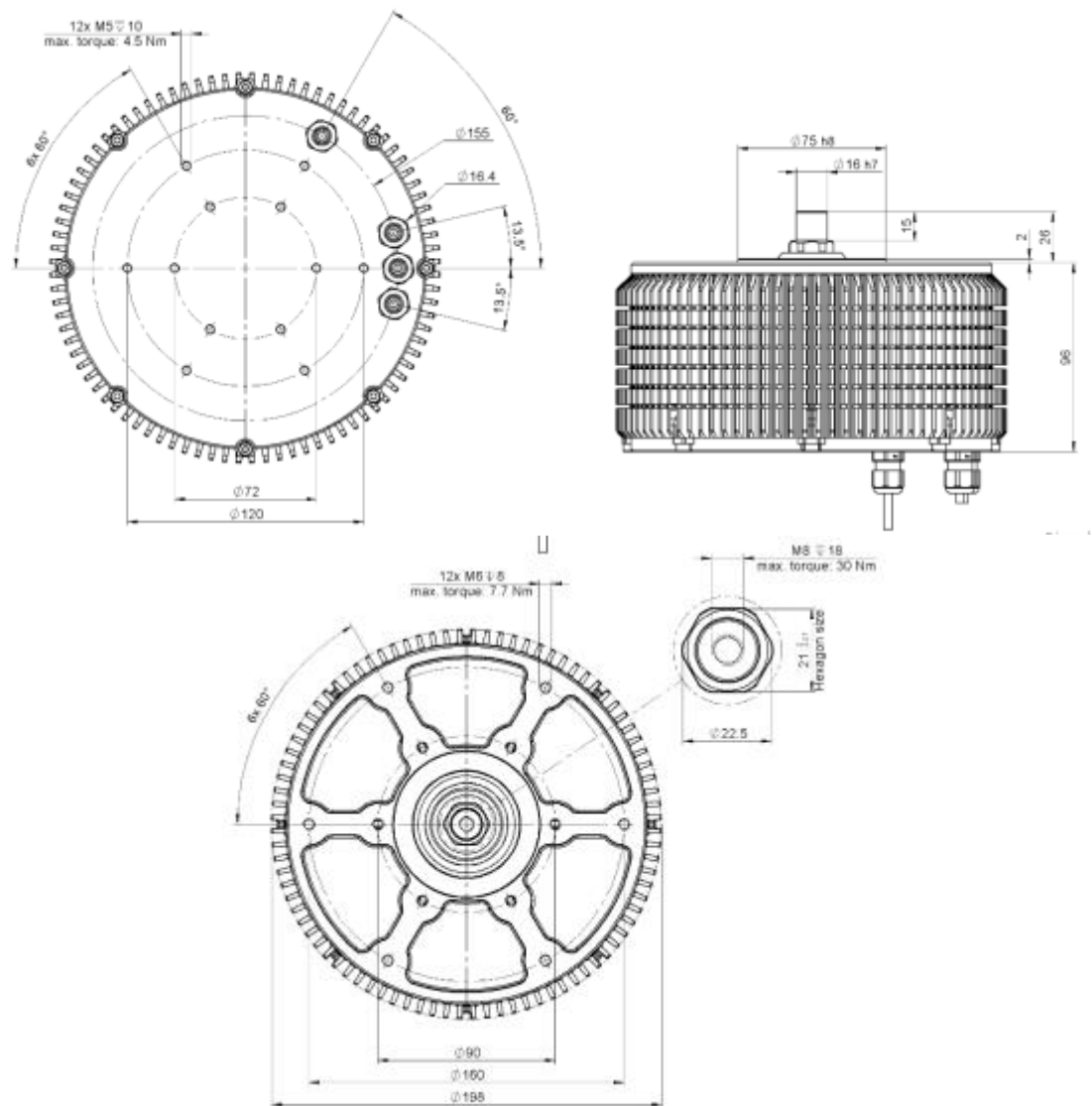


Рисунок 3.3.2 – Чертеж электродвигателя Plettenberg Nova 30

Необходимо повторить процедуру расчета для этого двигателя, также как и для EMRAX 208.

Для начала рассчитывается постоянная K_V без нагрузки (формула 1.1).

$$K_V = \frac{\omega_{об/мин}}{U_{ном}/2} \quad (1.1)$$

Необходимо разделить номинальное напряжение на 2, так как необходимо посчитать K_V с 50% нагрузкой на двигатели. (по регламенту это считается отсутствием нагрузки).

Так как расчет ведется для ВН/СН/НН, значений K_V будет 3, но необходимо рассчитать K_V разной нагрузкой для каждого типа напряжения.

Постоянная K_V без нагрузки:

$$K_{V_1} = \frac{2,500}{350 \div 2} = 14,6 \frac{\text{об/мин}}{\text{В}};$$

$$K_{V_2} = \frac{1200}{220 \div 2} = 11 \frac{\text{об/мин}}{\text{В}};$$

$$K_{V_3} = \frac{500}{100 \div 2} = 10 \frac{\text{об/мин}}{\text{В}}.$$

Для вычисления K_V с номинальной нагрузкой, необходимо разделить максимальное число оборотов при заданном напряжении (не пиковое) на номинальное напряжение (формула 1.2)

$$K_V = \frac{\omega_{\text{об/мин}}}{U_{\text{ном}}} \quad (1.2)$$

Постоянная K_V с номинальной нагрузкой:

$$K_{V_1} = \frac{5000}{350} = 14,3 \frac{\text{об/мин}}{\text{В}};$$

$$K_{V_2} = \frac{3100}{220} = 14 \frac{\text{об/мин}}{\text{В}};$$

$$K_{V_3} = \frac{1450}{100} = 14,5 \frac{\text{об/мин}}{\text{В}}.$$

Для вычисления K_V с максимальной нагрузкой, необходимо разделить максимально число оборотов при заданном напряжении на номинальное напряжение увеличенное на 10%. (формула 1.3)

$$K_V = \frac{\omega_{\text{об/мин}}}{U_{\text{ном}} \times 1,1} \quad (1.3)$$

Постоянная K_V с максимальной нагрузкой:

$$K_{V_1} = \frac{5500}{350 \times 1,1} = 14,2 \frac{\text{об/мин}}{\text{В}};$$

$$K_{V_2} = \frac{3900}{220 \times 1,1} = 16,5 \frac{\text{об/мин}}{\text{В}};$$

$$K_{V_3} = \frac{2000}{100 \times 1,1} = 18,8 \frac{\text{об/мин}}{\text{В}}.$$

Постоянная момента K_T определяет отношение крутящего момента к току двигателя и измеряется в $\frac{\text{Нм}}{\text{А}}$. Постоянные двигателя и крутящего момента связаны формулой 2.1, где:

J —. Максимальный крутящий момент (вычислено производителем);

$I_{\text{с.кв}}$ —. Максимальный среднеквадратичный ток.

$$K_T = \frac{J}{I_{\text{с.кв}}} \quad (2.1)$$

Но сперва необходимо рассчитать максимальный среднеквадратичный ток по формуле 2.2.

$$I_{\text{с.кв}} = \frac{P_m}{U_H \times \eta_{\text{э}}} \quad (2.2)$$

где $\eta_{\text{э}}$ —.коэффициент эффективности равный примерно 0,51.

Максимальный среднеквадратичный ток:

$$I_{\text{с.кв1}} = \frac{30 \times 10^3}{350 \times 0,51} \approx 170 \text{ А};$$

$$I_{\text{с.кв2}} = \frac{30 \times 10^3}{220 \times 0,51} \approx 270 \text{ А};$$

$$I_{\text{с.кв3}} = \frac{30 \times 10^3}{100 \times 0,51} \approx 590 \text{ А}.$$

Продолжительный среднеквадратичный ток составляет вычисляется при мощности 55-58% от максимальной, что эквивалентно мощности с комбинированным охлаждением, либо охлаждением за счет потока воздуха вдоль корпуса болида. Для расчета взято значение мощности 17 кВт.

$$I_{\text{п.с.кв1}} = \frac{17 \times 10^3}{350 \times 0,51} \approx 95 \text{ A};$$

$$I_{\text{п.с.кв2}} = \frac{17 \times 10^3}{220 \times 0,51} \approx 152 \text{ A};$$

$$I_{\text{п.с.кв3}} = \frac{17 \times 10^3}{100 \times 0,51} \approx 333 \text{ A}.$$

После чего можно построить зависимость крутящего момента и других величин от тока при высоком напряжении (рисунок 3.3.3). Благодаря тестированиям предоставленным производителями двигателей Plettenberg, для этого есть подробная таблица с проведенными замерами различных величин при высоком напряжении (таблица 3.3.3).

Таблица 3.3.3 – Результаты тестирований Plettenberg Nova 30 при 350 В

Напряжение [В]	Ток [А]	Скорость [об/мин]	Мощность входящая [Вт]	Мощность на выходе [Вт]	Крутящий момент [Нм]	Эффективность [%]
349,8	10,0	5046,7	3498,0	2073,3	392,3	59,27
349,8	12,0	5012,5	4197,6	2618,1	545,2	62,38
349,7	14,0	4979,2	4895,8	3640,0	698,1	74,35
349,7	16,0	4946,7	5595,2	4407,8	850,9	78,78
349,7	18,0	4915,0	6294,6	5166,5	1003,8	82,08
349,7	20,0	4884,1	6994,0	5916,1	1156,7	84,59
349,7	22,0	4854,0	7693,4	6656,8	1309,6	86,53
349,7	24,0	4824,6	8392,8	7389,0	1462,5	88,04
349,7	26,0	4796,0	9092,2	8113,1	1615,4	89,22
349,7	28,0	4768,1	9791,6	8829,4	1768,3	90,17
349,7	30,0	4740,8	10491,0	9537,4	1921,1	90,91
349,7	32,0	4714,3	11190,4	10238,9	2074,0	91,48
349,7	34,0	4688,3	11889,8	10933,1	2226,9	91,95
349,6	36,0	4663,1	12585,6	11621,0	2379,8	92,36
349,6	38,0	4638,4	13284,8	12302,1	2532,7	92,60
349,6	40,0	4614,3	13984,0	12977,0	2685,6	92,80
349,6	42,0	4590,8	14683,2	13646,0	2838,5	92,94
349,6	44,0	4567,9	15382,4	14308,9	2991,3	93,03

Продолжение таблицы 3.3.3

Напряжение [В]	Ток [А]	Скорость [об/мин]	Мощность входящая [Вт]	Мощность на выходе [Вт]	Крутящий момент [Нм]	Эффектив- ность [%]
349,6	46,0	4545,4	16081,6	14966,2	3144,2	93,04
349,6	48,0	4523,5	16780,8	15618,4	3297,1	93,07
349,6	50,0	4502,1	17480,0	16265,3	3450,0	93,07
349,6	52,0	4481,2	18179,2	16907,3	3602,9	92,96
349,6	54,0	4460,7	18878,4	17544,2	3755,8	92,93
349,5	56,0	4438,0	19577,6	18176,2	3908,7	92,55
349,5	58,0	4421,0	20271,0	18803,4	4061,5	92,74
349,5	60,0	4401,7	20970,0	19426,1	4214,4	92,64
349,5	62,0	4382,8	21669,0	20044,4	4367,3	92,50
349,5	64,0	4364,3	22368,0	20658,6	4520,2	92,30
349,5	66,0	4346,1	23067,0	21268,3	4673,1	92,60
349,5	68,0	4328,1	23766,0	21873,2	4826,0	92,04
349,5	70,0	4310,5	24465,0	22474,5	4978,9	91,86
349,5	72,0	4293,2	25164,0	23071,7	5131,8	91,68
349,5	74,0	4276,1	25863,0	23664,0	5284,6	91,50
349,5	76,0	4259,2	26562,0	24252,5	5437,5	91,31
349,5	78,0	4242,6	27261,0	24837,3	5590,4	91,11
349,4	80,0	4226,1	27952,0	25417,3	5743,3	90,93
349,4	82,0	4209,8	28650,8	25993,4	5896,2	90,51
349,4	84,0	4193,7	29349,6	26565,4	6049,1	90,51
349,4	86,0	4177,7	30048,4	27133,0	6202,0	90,31
349,4	88,0	4161,8	30747,2	27695,7	6354,8	90,10
349,4	90,0	4145,9	31446,0	28253,7	6507,7	89,85
349,4	92,0	4130,2	32144,8	28808,0	6660,6	89,59
349,4	94,0	4114,5	32843,6	29357,3	6813,5	89,39
349,4	96,0	4098,8	33542,4	29901,6	6966,4	89,18
349,4	98,0	4083,2	34241,2	30444,1	7119,3	88,89
349,3	100,0	4067,5	34930,0	30975,8	7272,2	88,64
349,3	102,0	4051,8	35628,6	31504,5	7425,0	88,45
349,3	104,0	4036,0	36327,2	32027,9	7577,9	88,17
349,3	106,0	4020,2	37025,8	32546,2	7730,8	87,88
349,3	108,0	4004,3	37724,4	33058,7	7883,7	87,63
349,3	110,0	3,988,2	38,423,0	33,564,3	8,036,6	87,35

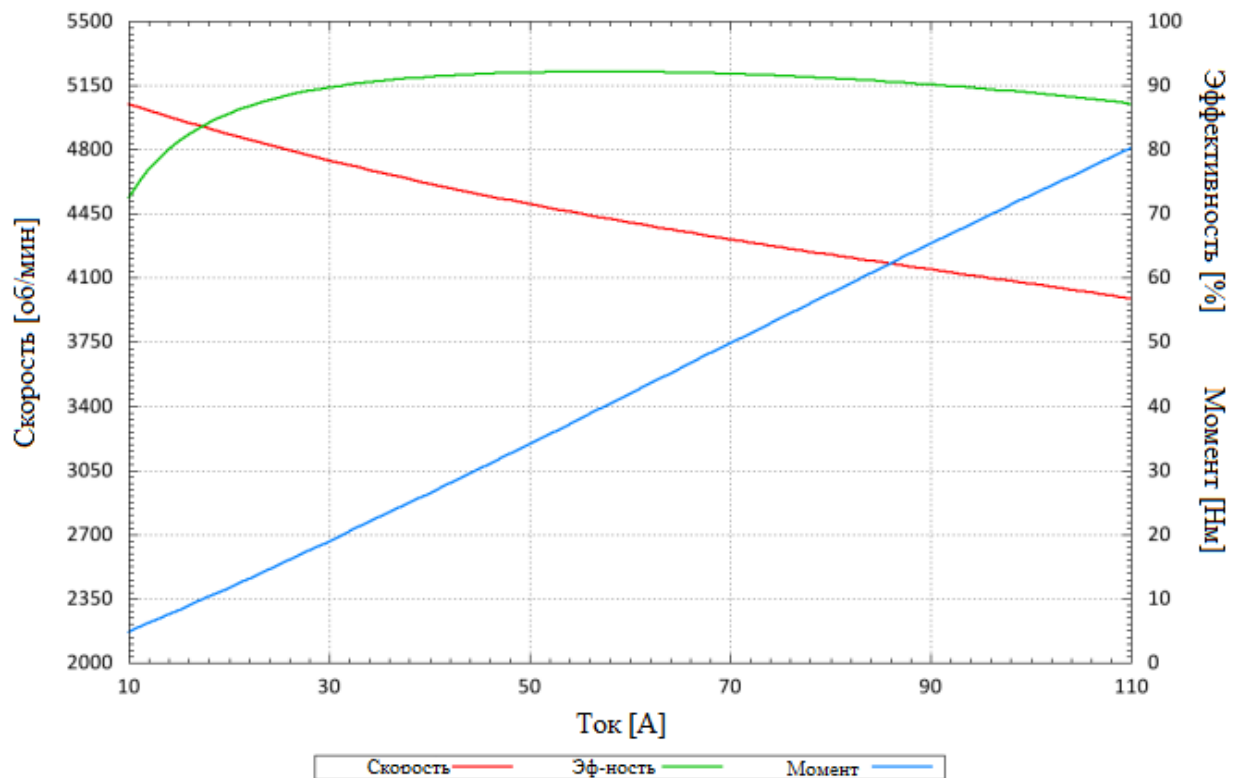


Рисунок 3.3.3 – График зависимости Скорости, эффективности и момента от тока при 350 В

Постоянная K_T :

$$K_{T_1} = \frac{80}{170} = 0,47;$$

$$K_{T_2} = \frac{80}{270} = 0,29;$$

$$K_{T_3} = \frac{80}{590} = 0,135.$$

Далее рассчитываются значения фазного напряжения, индуцируемого напряжения.

Фазное напряжение вычисляется по формуле 4.1 (подключение звездой).

$$U_{\phi} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} \quad (4.1)$$

Фазное напряжение:

$$U_{\phi 1} = \frac{350}{\sqrt{3}} = 202 \text{ В};$$

$$U_{\phi 2} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В};$$

$$U_{\phi 3} = \frac{100}{\sqrt{3}} = 57,7 \text{ В}.$$

После чего необходимо вычислить индуцированное напряжение.

Для расчета этой величины необходимо знать среднеквадратичное напряжение, которое вычисляется по формуле 4.2.

$$U_{\text{с.кв}} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{2}} \quad (4.2)$$

Среднеквадратичное напряжение:

$$U_{\text{с.кв}1} = \frac{350}{\sqrt{2}} = 247,4 \text{ В};$$

$$U_{\text{с.кв}2} = \frac{220}{\sqrt{2}} = 155,5 \text{ В};$$

$$U_{\text{с.кв}3} = \frac{100}{\sqrt{2}} = 70,7 \text{ В}.$$

Для нахождения индуцируемого напряжения необходимо разделить среднеквадратичное напряжение на максимальное число оборотов

$U_L = \frac{U_{\text{с.кв}}}{\omega_{\text{об/мин}}}$, в результате чего получаются следующие значения:

$$U_{L1} = \frac{247,4}{5000} = 0,04948 \text{ В};$$

$$U_{L2} = \frac{155,5}{5000} = 0,0311 \text{ В};$$

$$U_{L3} = \frac{70,7}{5000} = 0,01414 \text{ В}.$$

Все рассчитанные, предоставленные производителем и полученные в результате симуляций характеристики внесены в таблицу 3.3.4 - *Характеристики электродвигателя Plettenberg Nova 30*

Таблица 3.3.4 - Характеристики электродвигателя Plettenberg Nova 30

	Высокое напряжение	Среднее напряжение	Низкое напряжение
Охлаждение	Комбинированное		
Защита от проникновения внутрь	IP67/IP53		
Характеристики охлаждения	Воздушное + жидкостное охлаждение при температуре окружающей среды 25°C и скорости воздушного потока 10 м/с		
Максимальная температура двигателя [°C]	100		
ВН/СН/НН [В] постоянного тока необходимые для работы на максимальной скорости ($U_{ном}$)	350	220	100
КПД двигателя	92-98%		
Пиковая мощность [кВт] при 5000 об/мин	30		
Постоянная мощность [кВт]	22	22	22
Максимальный крутящий момент J [Нм]	80		
Постоянный крутящий момент J_c [Нм]	50	50	50
Предельная скорость [об/мин]	5000		
Постоянная K_V без нагрузки $\left[\frac{\text{об/мин}}{U_{ном}}\right]$	14,6	11	10
Постоянная K_V с номинальной нагрузкой $\left[\frac{\text{об/мин}}{U_{ном}}\right]$	14,3	14	14,5
Постоянная K_V с макс. нагрузкой $\left[\frac{\text{об/мин}}{U_{ном}}\right]$	14,2	16,5	18,8

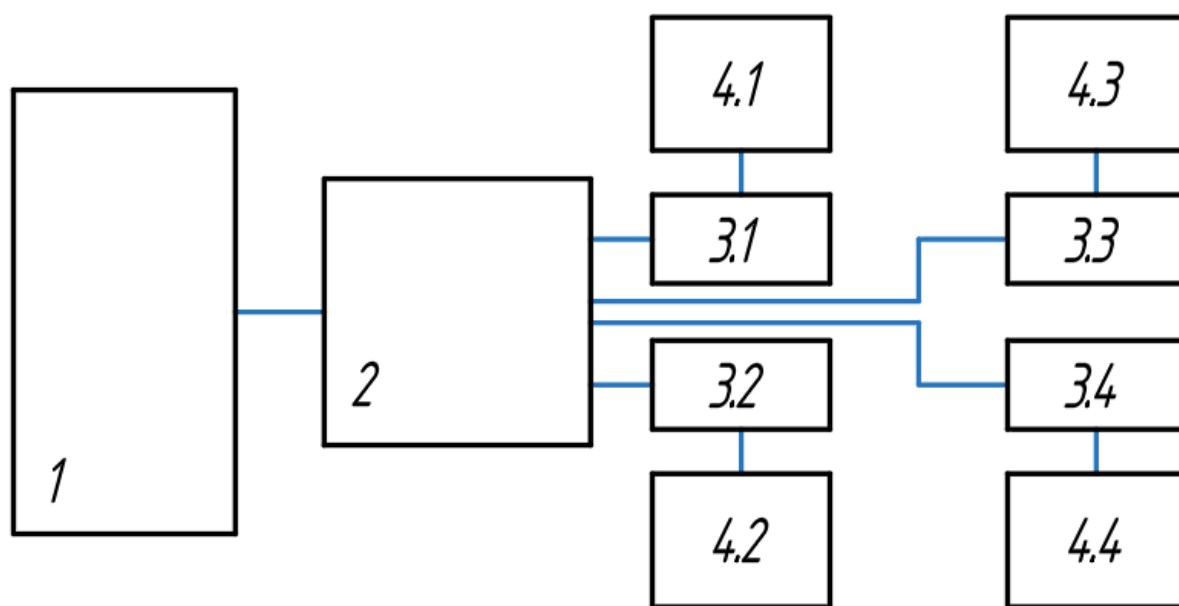
Продолжение таблицы 3.3.4

	Высокое напряжение	Среднее напряжение	Низкое напряжение
Постоянная момента $K_T = \frac{J}{I_{с.кв}} \left[\frac{\text{Нм}}{\text{А}} \right]$	0,47	0,29	0,135
Максимальный среднеквадратичный ток $I_{с.кв}$ [А]	170	270	590
Продолжительный среднеквадратичный ток $I_{с.кв}$ [А]	95	152	333
Среднеквадратичное напряжение [В]	247,7	155,5	70,7
Фазное напряжение [В]	202	127	57,7
Индукцируемое напряжение $\left[\frac{U_{с.кв}}{\omega_{об/м}} \right]$	0,04948	0,0311	0,01414
Датчик температуры на обмотках статора	NTC 47 кОм		
Число пар полюсов	25		
Конфигурация обмотки	Звезда		
Конфигурация подшипников	6206 3206		
Вес [кг]	5,6 - 7,5		

4 Конфигурации размещения моторов

4.1 Выбор системы передачи энергии

После проведения расчетов, инженерам команды HofSpannung необходимо выбрать самую эффективную конфигурацию для расположения моторов, учитывая их мощность, вес, охлаждение в котором нуждается мотор и цену на установку. Для наглядности на рисунке 4.1 показана структурная схема подключения двигателей к батарее согласно правилу 2.8.2: «Двигатель(и) должны быть подключены к аккумулятору через контроллер двигателя». Так мы получаем четыре отдельных мотора, каждый из которых по отдельности управляется электронным контроллером скорости. Батареи в машинах Formula Student чаще всего секционные и изготовлены вручную, что позволяет изменять входное напряжение и вес болида в зависимости от требований пилота или конфигурации трассы.



1 – Батарея; 2 – Главный контроллер; 3 – Электронный контроллер скорости (ESC). 4 – Электродвигатель.

Рисунок 4.1 – Структурная схема подключения двигателей.

Каждый из контроллеров скорости позволяет точно регулировать число оборотов каждого двигателя, благодаря чему достигается максимальное сцепление с дорогой и ни одно из колес не проскальзывает в результате отсутствия дифференциала. Сложность такой схемы заключается в правильном программировании всех контроллеров, так как необходимо учитывать все параметры: давление в шинах, угол поворота колеса, углы развала, углы

схождения, радиус поворота и вес болида. Также необходимо выбрать правильный способ передачи вращения с двигателей на колеса, в случае если их расположить в монококе.

В трансмиссиях обычных транспортных средств используются три основных метода. Это цепной привод, ременной привод и зубчатый привод. Каждое устройство передает крутящий момент с выходного вала движительного механизма и передает его на второй вал, увеличивая или уменьшая крутящий момент и скорость.

Formula Student с двигателями внутреннего сгорания в значительной степени использует архитектуру цепного привода из-за распространенной реализации двигателей мотоциклов, предварительно спроектированных для цепных звездочек. Система цепного привода очень проста и гораздо более недорога по сравнению с шестернями. Однако, если требуется большое передаточное число шестерни, как в электродвигателях, размер вторичной звездочки резко увеличивается. Система цепного привода также страдает от удлинения цепи, требуя постоянного обслуживания для устранения провисания цепи. Наконец, система цепного привода также имеет люфт на порядок больше, чем у зубчатой передачи. Этот люфт приводит к снижению производительности транспортного средства из-за небольших задержек в реакции транспортного средства на действия водителя. Еще более важно то, что люфт в системе будет создавать «ударные» нагрузки на зубья звездочки и цепь. Эти ударные силы возникают каждый раз, когда привод включает и выключает дроссель, что приводит к усталости компонентов трансмиссии - это особый вопрос, поскольку большинство команд используют алюминиевую звездочку.

Система ременного привода испытывает почти все те же негативные эффекты, что и цепной привод, с небольшим уменьшением величины люфта и ударной нагрузки. Рабочий шум ременного привода также ниже, чем у системы с цепным приводом.

Окончательная архитектура — это архитектура зубчатой передачи. Для редуктора могут использоваться как прямозубые, так и косозубые шестерни. Хотя косозубая шестерня может передавать более высокие крутящие моменты, чем прямозубая шестерня с прямыми зубьями, они имеют более высокие потери из-за повышенного трения. Шестерни могут быть объединены в несколько комбинаций для увеличения передаточного отношения. Недостатком архитектуры зубчатой передачи является то, что система становится намного сложнее, а стоимость существенно возрастает.

Даже при возросшей сложности и стоимости, шестерни являются оптимальным выбором для многих автомобильных применений из-за их точности. Коробка передач также обеспечивает почти бесперебойную передачу крутящего момента, уменьшая время задержки крутящего момента на колесо от воздействия водителя. Шестерни были выбраны для использования в передних

двигателях в ступице, поскольку цепной или ременной привод особенно нецелесообразен, а уменьшение люфта и большой вычет на небольшой площади являются необходимыми. Шестерни также были выбраны для задней трансмиссии по аналогичным причинам.

4.2 Варианты расположения двигателей

Из-за геометрических ограничений конструкции ступицы необходима планетарная конструкция (рисунок 4.2) или составная планетарная ступень. Сперва необходимо провести полное исследование возможных конфигураций трансмиссии.

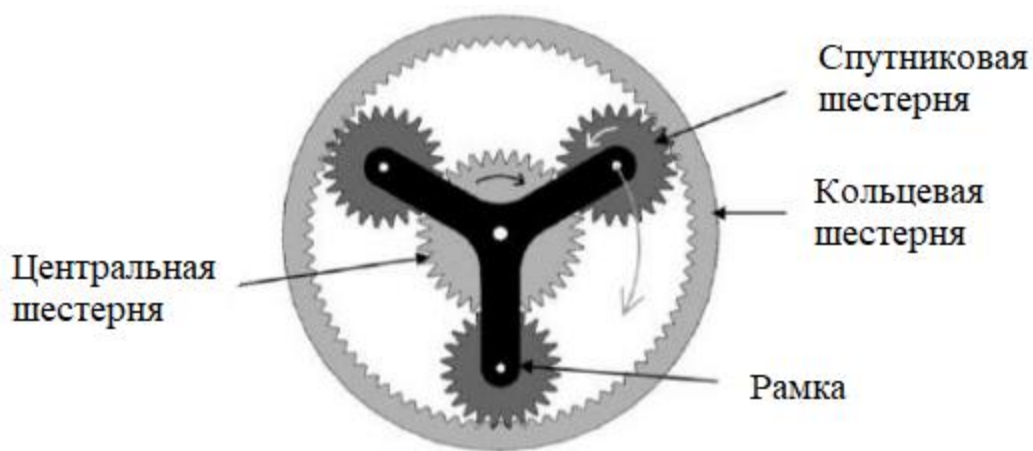


Рисунок 4.2 – Планетарная конструкция передачи энергии



Рисунок 4.3 - Составная планетарная ступень

Для расчета передаточного числа такой системы используется формула 5.1, а для расчета передаточного числа планетарной ступени формула 5.2.

$$i = \frac{N_{\text{кольца}}}{N_{\text{центр}}} \quad (5.1)$$

$$i = \left(\frac{N_{\text{б.спутник}}}{N_{\text{солн}}} \times \frac{N_{\text{кольца}}}{N_{\text{м.спутник}}} \right) + 1 \quad (5.2)$$

где N — количество зубьев шестерни

Первая конфигурация (рисунок 4.1.1, 4.1.2), исследованная для системы полного привода, размещает два двигателя EMRAX 208 внутри сзади с двухступенчатым одноступенчатым редуктором скорости, использующим триподы и полуоси. Спереди используются два двигателя Plettenberg Nova 30 внутри с коробкой передач под углом девяносто градусов, установленной сбоку монокока, вместе с полуосями и триподами для передачи крутящего момента на колеса.

Эта конфигурация оптимизирует распределение мощности между передними и задними колесами во время ускорения, чтобы максимизировать предел тяги. Архитектура также сохраняет массу внутри, что улучшает динамику автомобиля по сравнению с добавлением внешней массы. Недостатком системы являются геометрические ограничения под монококом, вызывающие изменение конструкции шасси для размещения двигателя под ногами водителя.

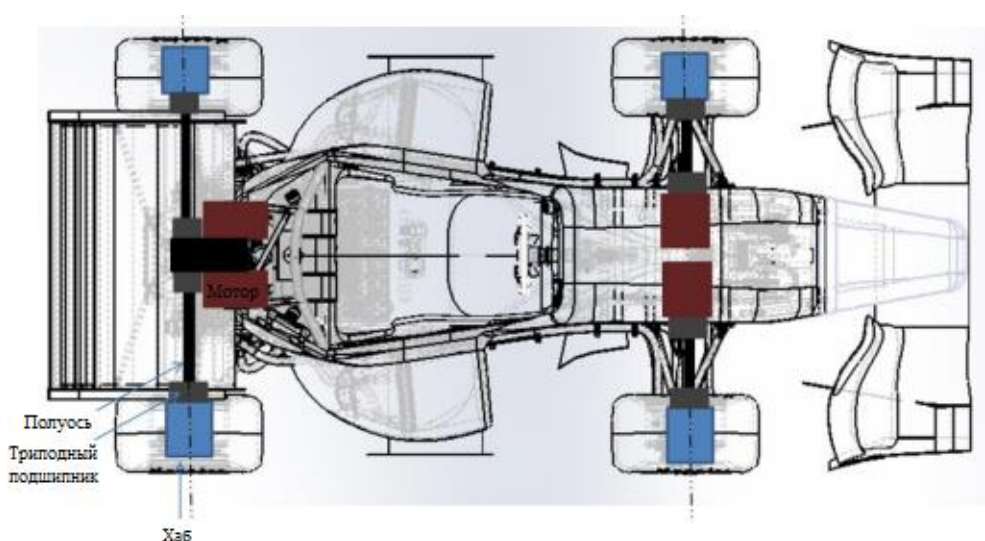
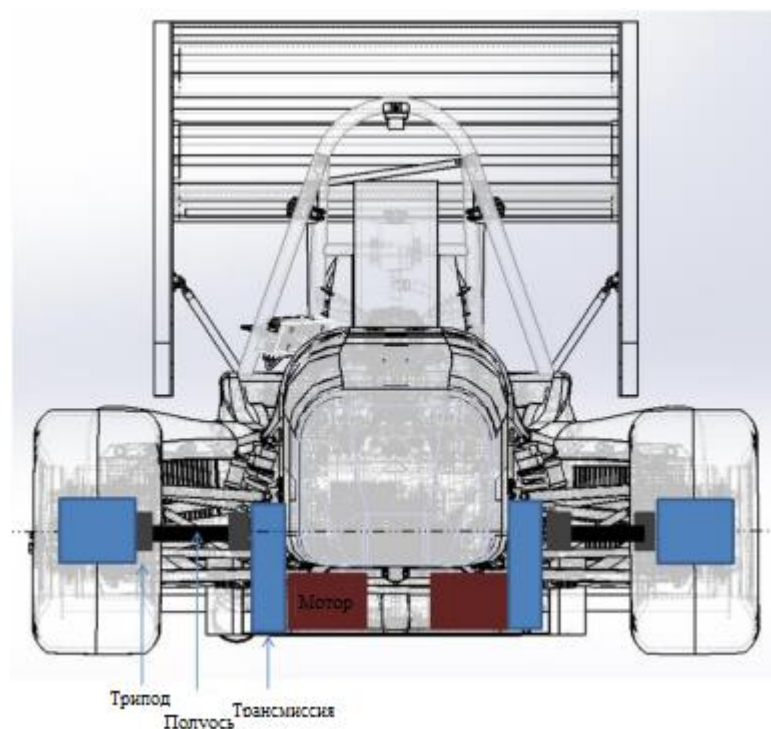


Рисунок 4.1.1 - Четыре встроенных мотора, вид сверху



4.1.2 - Четыре встроенных мотора, вид спереди

Вторая конфигурация (рисунок 4.2.1, 4.2.2) исследует противоположный подход и использует четыре двигателя Plettenberg Nova 30. Такой подход минимизирует массу транспортного средства, а также уменьшает необходимую работу по проектированию и анализу примерно на половину из-за использования одной и той же конструкции двигателя In-Hub для каждого угла (см. приложение А).

Эта система значительно снижает стоимость за счет исключения корпус коробки передач, ШРУСов (см. приложение А), полуосей и необходимого материала. Уменьшение количества компонентов также увеличит эффективность системы.

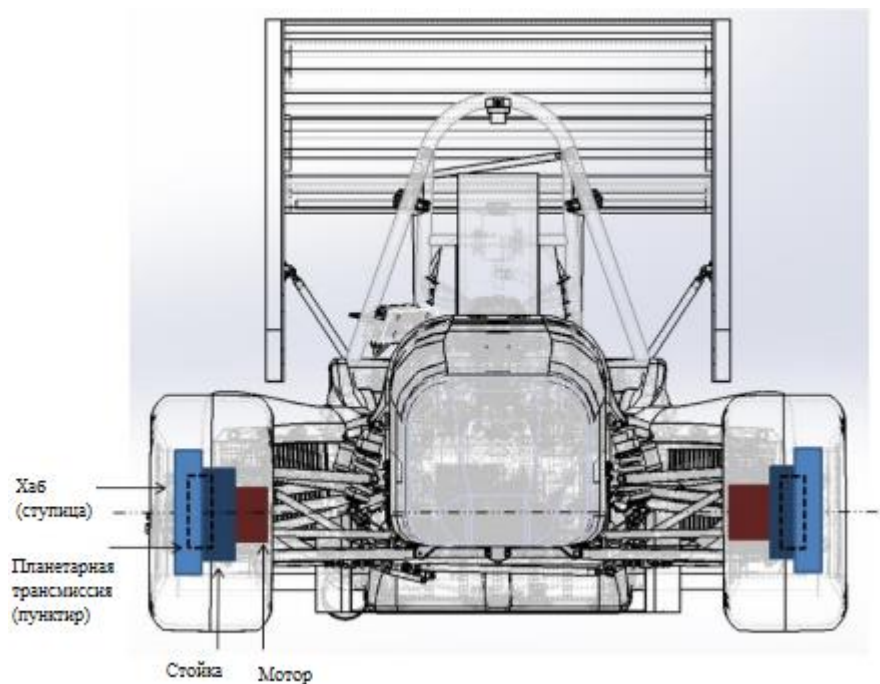


Рисунок 4.2.1 - Четыре подвесных мотора, вид спереди

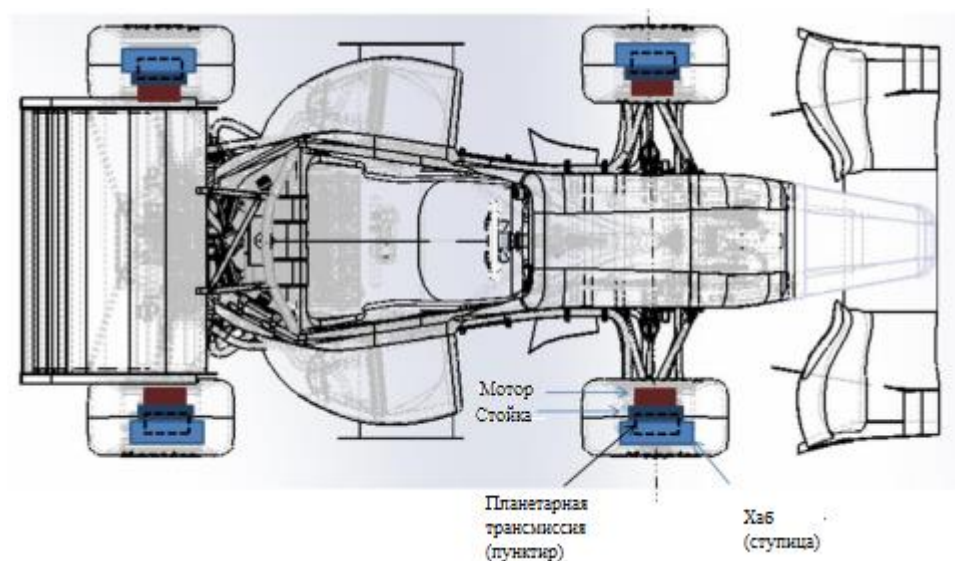


Рисунок 4.2.2 - Четыре подвесных мотора, вид сверху

Третья конфигурация (рисунок 4.3.1, 4.3.2) использует преимущества обеих систем, минимизируя недостатки каждой из них. Конструкция переднего двигателя в ступице позволяет внедрить двигатели Plettenberg Nova 30 в передние колеса, исключая ШРУСы, коробку передач, триподы и полуоси, что повышает эффективность.

Задняя часть автомобиля включает двигатели EMRAX 208 с симметричной двухступенчатой однокоростной коробкой передач с параллельной осью. Коробка передач выводит крутящий момент через два ШРУСа. Затем крутящий

момент передается через полуоси на колеса. Эта конфигурация позволяет приспособить большие двигатели, которые достигают желаемой 75% мощности на задние колеса, сохраняя подрессоренную массу и уменьшая количество сложных компонентов, которые должны быть изготовлены. Инерция системы также сведена к минимуму, поскольку масса расположена низко в автомобиле и вдоль осевой линии.

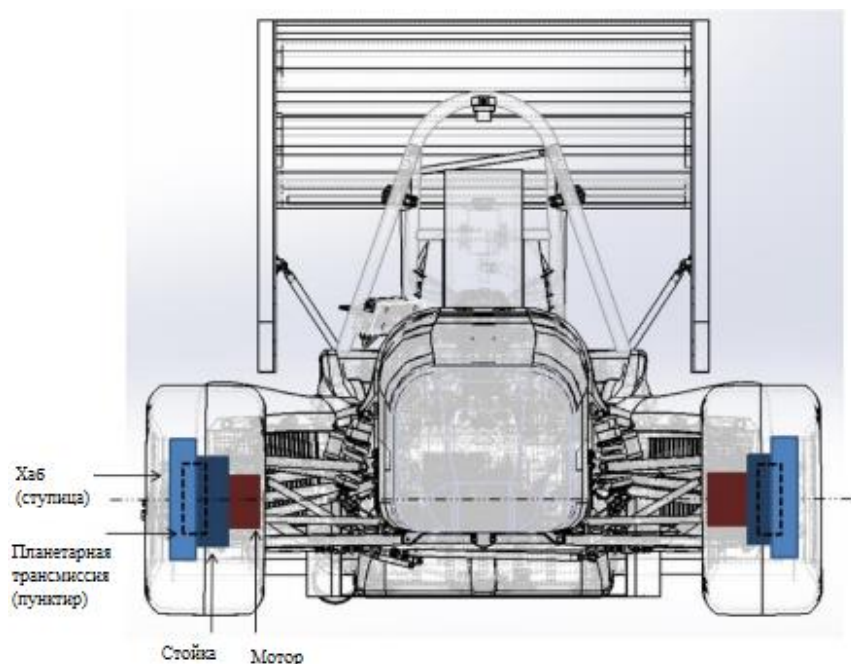


Рисунок 4.3.1 - Подвесные передние, встроенные задние моторы, вид спереди

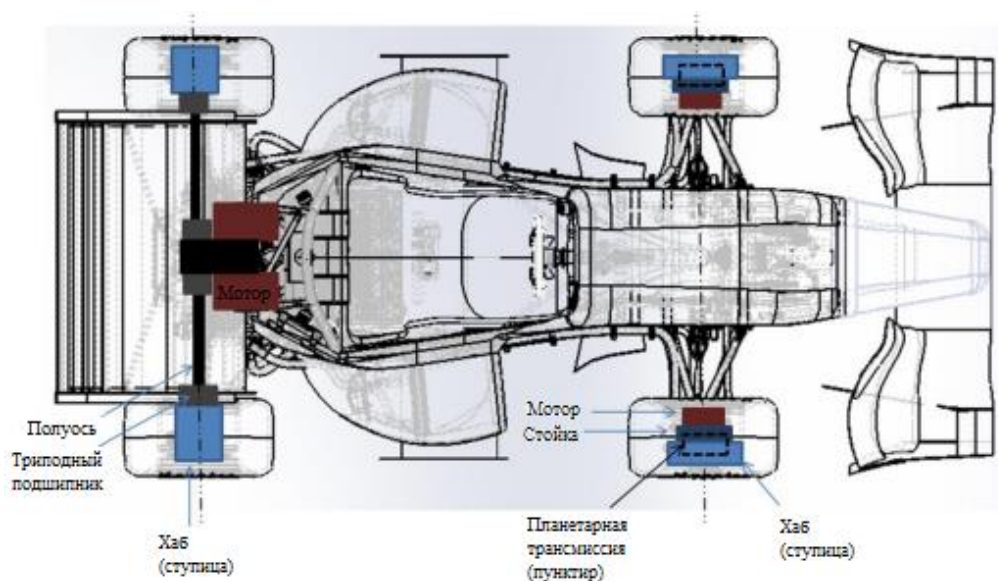


Рисунок 4.3.2 - Подвесные передние, встроенные задние моторы, вид сверху

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная дипломная работа стала заключающим этапом практики, пройденной ее автором в рамках проекта HofSpannung.

Эта работа объясняет что автоспорт – это не только физическое состязание между пилотами, но и техническое соперничество между командами и инженерами. Работа описывает то, как важен точный и правильный выбор оборудования и как это может сказаться на поведении автомобиля и его управляемости.

Результатом двух первых этапов этапа этой работы является изучение регламента, правил постройки болида и полная документация проведенных расчетов для двух электродвигателей компаний EMRAX и Plettenberg. Были определены мощности и скорости этих двигателей в разных динамических режимах, что является крайне важным аспектом при выборе конфигурации их расположения на шасси болида.

Разбор всех оптимальных способов размещения двигателей, помог команде HofSpannung заранее оценить сложность и стоимость каждой из конфигураций, задолго до начала сборки автомобиля.

Таким образом в ходе данной дипломной работы были проведены и задокументированы необходимые расчеты механических и электрических характеристик двигателей, подобраны 3 разных способа их расположения и описано необходимое оборудование для их размещения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Formula Student Rules 2024, Version: 1.1, Rev-aef3d92 / Правила 1 Formula Student 2024, Версия: 1.1, Rev-aef3d92
- 2 Техническое описание EMRAX 208 версия 1.6
- 3 Техническое описание NOVA 30-50-B10 P50
- 4 Wisconsin Racing 218e сборка двигателя в ступице
- 5 СТ КазННТУ 09–2023. Работы учебные. Общие требования к построению, изложению, оформлению и содержанию текстового и графического материала. Издательство «КазННТУ», Алматы, 2019. – 49 с.
- 6 Техническая документация HofSpannung 2023г.
- 7 Техническая документация HofSpannung F-SAE electric 2024г.
- 8 Фединцев В. Е., Ф. Маняхин. Расчёт мощности и выбор электродвигателей приводов общепромышленных механизмов и прокатных станов. — Москва, 2016. — 60 с.
- 9 Лифанов В. А, Помогаев Г. В, Ермолин Н. П. Расчёт электрических машин малой мощности: учебное пособие — Челябинск: ЮУрГУ, 2017. — 127 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

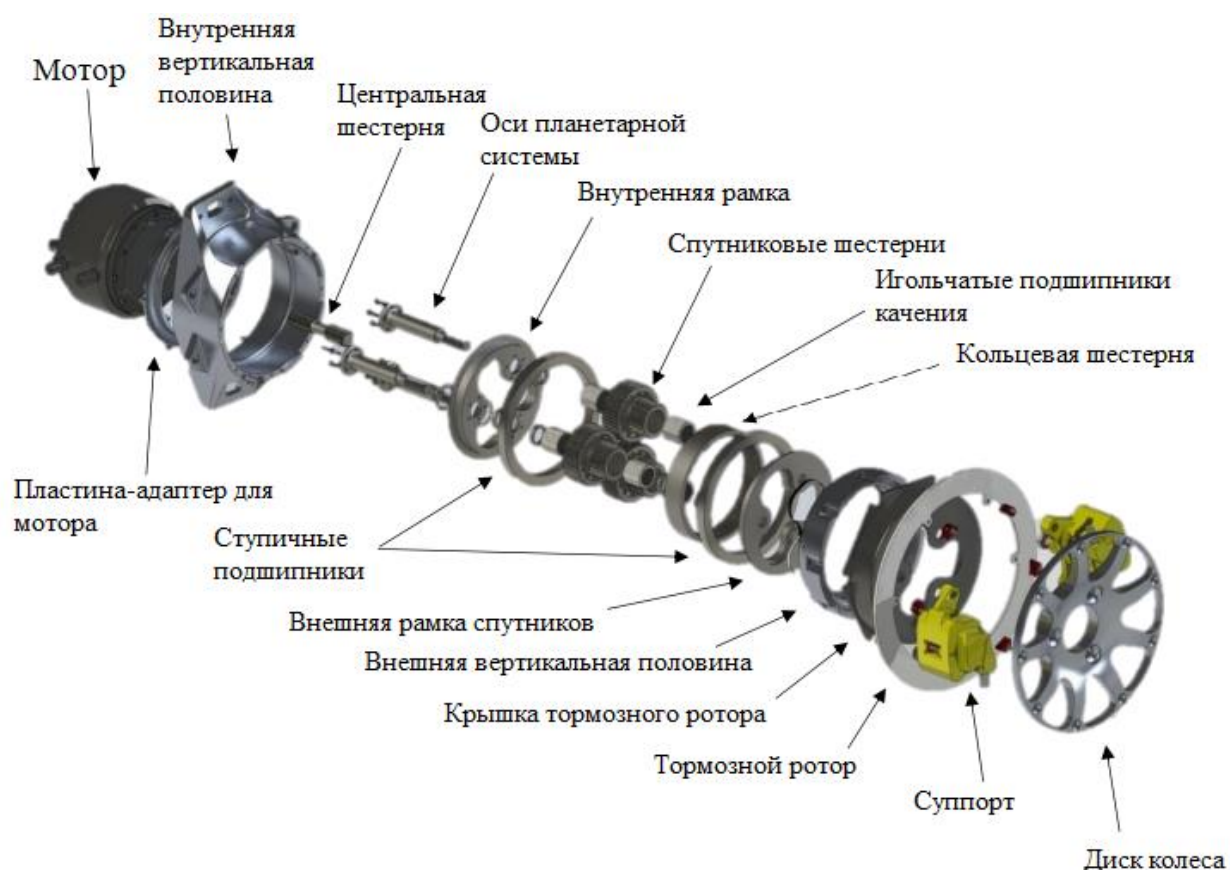


Рисунок А1 – Сборка встроенного в колесо двигателя Plettenberg Nova 30



Рисунок А2 – Конструкция автомобильного ШРУСа

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

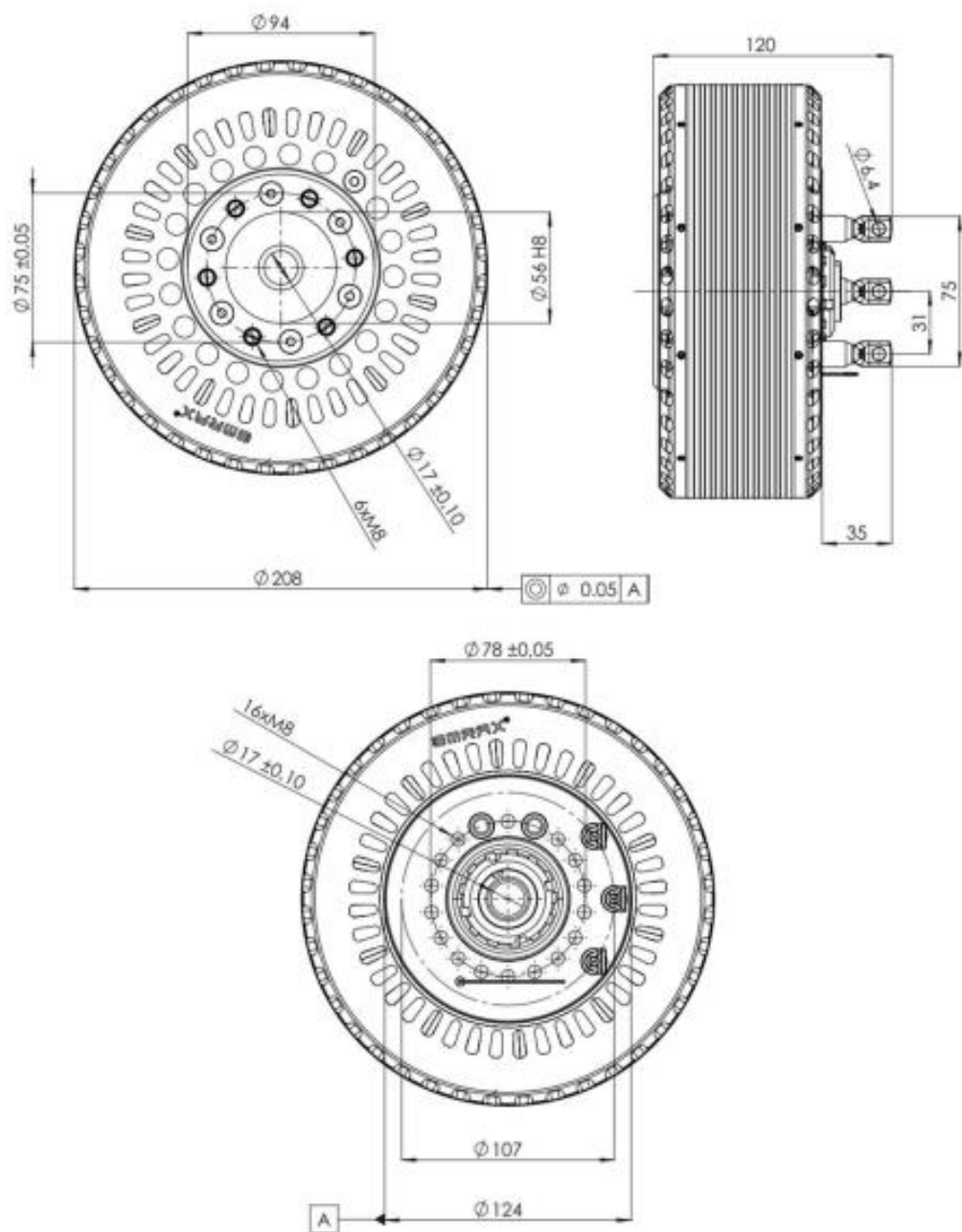


Рисунок Б1 – Чертеж EMRAX 208

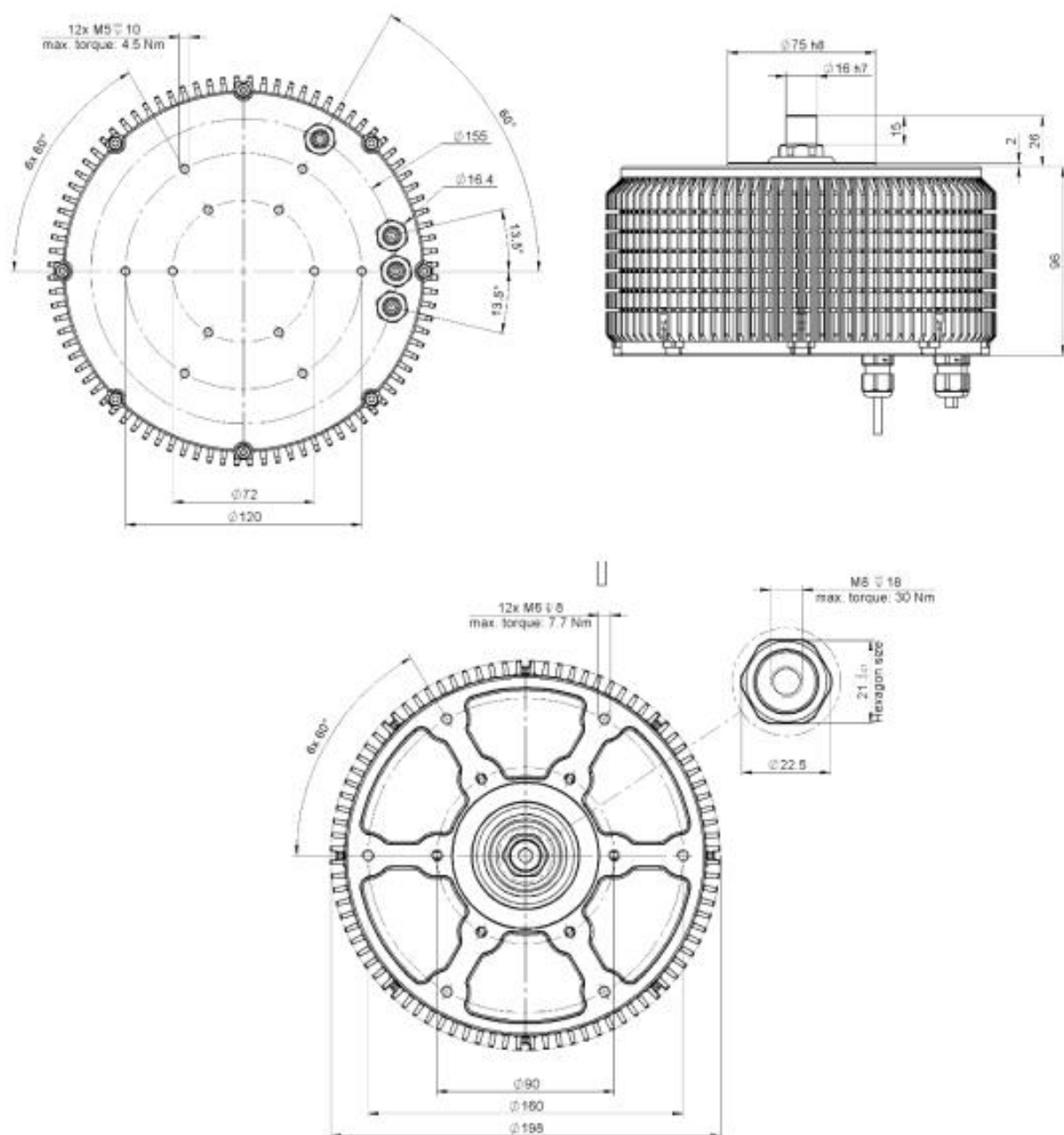


Рисунок Б2 – Чертеж Plettenberg Nova 30