



## Аннотация

В данной выпускной квалификационной работе разработан тяговый электродвигатель для автомобиля.

Был проведен анализ использования тяговых электродвигателей на поездах, в автомобилях и электромобилях.

Был разработан тяговый электродвигатель, который приводит в движение автотранспорт. Получены технические характеристики проектируемого двигателя.

Пояснительная записка представлена на 45 листах. Графическая часть - 6 чертежей А1.

## Abstract

This thesis consists of the explanatory note on 45 pages, the introduction of 2 pages, including 6 figures, list 25 sources, including 5 sources in a foreign language, and drawing on 6 sheets of A1 format.

The object of the thesis is the development of traction motor for the car.

The main goal is to analyze the prospects for the development of hybrid and electric technologies in road transport, as well as the development of a traction motor.

The work concerns the question of high prices for gasoline nowadays and low prices for electricity. The need to change gasoline and diesel fuel to cheaper fuels increases more and more.

Both parts of the thesis do not aim to increase development effectiveness and skills in solving specific technological and production tasks.

The first part of the thesis gives details on the conducted analysis of the use of traction motors on trains, in cars and electric vehicles.

In the second part of the thesis traction motor that drives the vehicle was developed. Technical characteristics of the designed motor were obtained.

As a result, the main purpose was achieved - using of acquired knowledge for the development of skills in solving specific technological and production tasks.

## Содержание

Введение.....	5
1 Перспективы применения гибридных и электро-технологий в автомобилестроении.....	7
1.1 Развитие гибридных технологий.....	7
1.2 Развитие электромобилей.....	16
2 Расчёт тягового электродвигателя.....	25
2.1 Тяговые электродвигатели, общие положения и конструкции .....	25
2.2 Модуль расчёта линейной нагрузки якоря.....	27
2.3 Модуль расчёта размеров зубцов пазов и проводов обмотки якоря..	28
2.4 Модуль расчёта магнитной системы машины.....	32
2.5 Определение размеров полюса.....	32
2.6 Модуль расчёта поперечного сечения корпуса.....	33
2.7 Модуль расчёта размеров магнитной системы машины .....	34
2.8 Модуль расчёта характеристики холостого хода.....	35
2.9 Модуль расчёта МДС реакции якоря.....	36
2.10 Модуль расчёта электромеханических характеристик.....	38
Заключение.....	42
Список использованных источников.....	43

## Введение

Тяговый электродвигатель – это двигатель, преобразующий электрическую энергию в механическую. Тяговый электродвигатель применяется в гибридных автомобилях, в электромобилях и электрокарах, в тепловозах и электропоездах.

Актуальность использования электродвигателя очень высока. Бензин в наше время дорожает, а стоимость электроэнергии мала. Все больше и больше повышается необходимость перехода от бензина и дизельного топлива, к более дешевым видам топлива.

Тяговый электродвигатель в гибридном автомобиле, позволяет использовать два вида топлива: бензин и электричество. Из практики известно, большой расход топлива в автомобиле происходит в момент пуска и при трогании автомобиля с места. Чтобы его уменьшить, можно как раз применять электродвигатель. Автомобиль трогается на электродвигателе, бензин в это время не расходуется, а как только автомобиль наберет необходимую скорость, электродвигатель отключится, и мы поедем на ДВС. Экономия в топливе составит порядка 30-50%.

При использовании электродвигателя в электромобиле, весь процесс движения осуществляется от двигателя. В автомобиле установлены мощные аккумуляторные батареи, необходимые для питания электродвигателя. Заряд этих аккумуляторов, зачастую осуществляется от сети 220 Вольт. Запас хода составляет до 300 км.

Главной целью является провести анализ перспектив развития гибридных и электротехнологий в автомобильном транспорте, а также разработка тягового электродвигателя.

Главные задачи разработки:

1. Анализ перспектив гибридов и электромобилей
2. Расчет тягового электродвигателя

Предметом исследования является анализ и проработка процесса применения тягового электродвигателя на легковом автотранспорте.

# 1 Перспективы применения гибридных и электро-технологий в автомобилестроении

## 1.1 Развитие гибридных технологий

Гибридный автомобиль является высокоэкономичным автомобилем, схема работы направлена от двигателя внутреннего сгорания к приводу, через генератор и аккумулятор. В этой схеме используется электрический аккумулятор, существуют и другие схемы.

В отличие от обычных автомобилей, мощность ДВС обычно снижена на 30-50%.

Благодаря приводу при режиме разгона энергия переходит от аккумулятора к колесам и наоборот от колес к аккумулятору при режиме рекуперативного торможения.

Основными свойствами оптимального режима работы ДВС являются такие свойства как максимум КПД, экономичности, но минимум вреда для окружающей среды.

Механическая передача управляемого крутящего момента на колеса довольно таки мощных транспортных средств составляла большие сложности, что в свою очередь привело к появлению организации принципа «Электрической коробки передач». Этот процесс представляет собой процесс, когда осуществляется замена механической коробки передач на электрические провода. В железнодорожном транспорте и большегрузных самосвалах эта идея нашла свое применение и вскоре была осуществлена.

Новизна данной идеи заключается в том, чтобы с помощью двигателя, который работает на обычном топливе, передавать нужное количество электроэнергии на электродвигатель, что приводит к движению транспортного средства. Менее ёмкая и более легкая аккумуляторная батарея сделала аналогичную схему работы гибридного автомобиля более модифицированной.

Существуют разные методы подключения к приводу двигателя и накопителя. Одним из них является параллельный метод (рисунок 1.1.). Соединен двигатель и накопитель дифференциалом, который в свою очередь соединен с приводом колес. Достоинствами данного соединения является простота (возможность применения вместе с МКПП) и низкая стоимость.

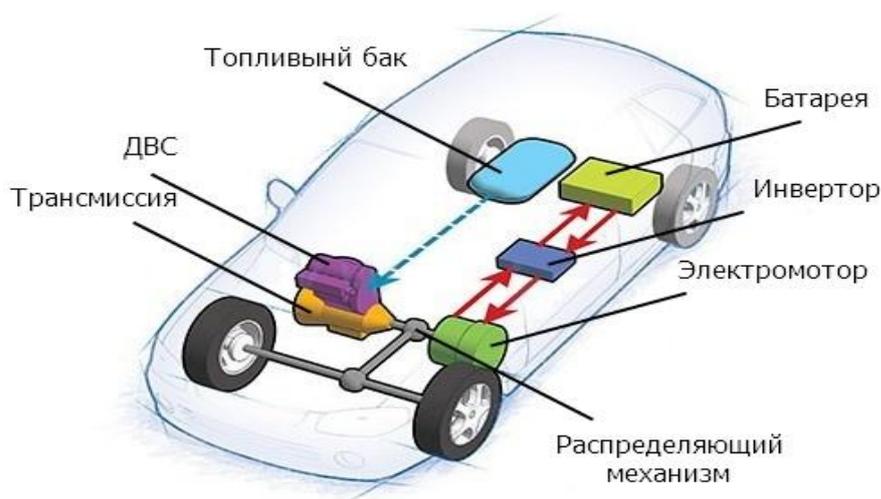


Рисунок 1.1 – Параллельный метод включения двигателя и накопителя к приводу

Последовательный метод (рисунок 1.2) в свою очередь отличается тем, что двигатель соединен только с накопителем, и так же соединен с приводом колес. Из-за низкого КПД в легковых автомобилях такой метод почти не используется. К примеру, в железнодорожном транспорте или карьерных самосвалах используется близкий принцип в электрической трансмиссии, которая необходима в случаях, когда необходимо передать большой момент с ДВС на колеса.

Существует еще один метод смешанный (рисунок 1.3.). Система работает в зависимости от режима работы, как последовательно, так и параллельно. Реализовано в автомобилях с Hybrid Synergy Drive (Toyota), например, Toyota Prius.

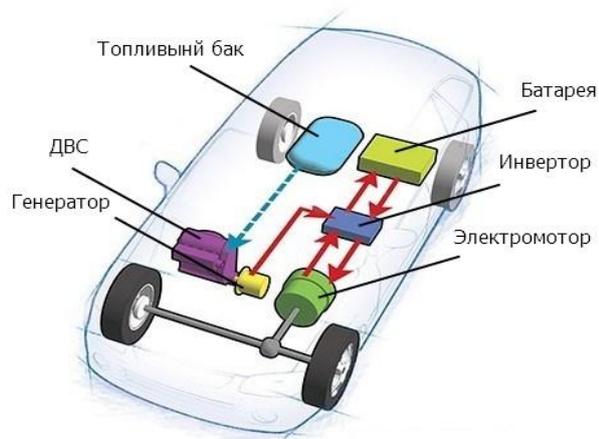


Рисунок 1.2 – Последовательный метод включения двигателя и накопителя к приводу

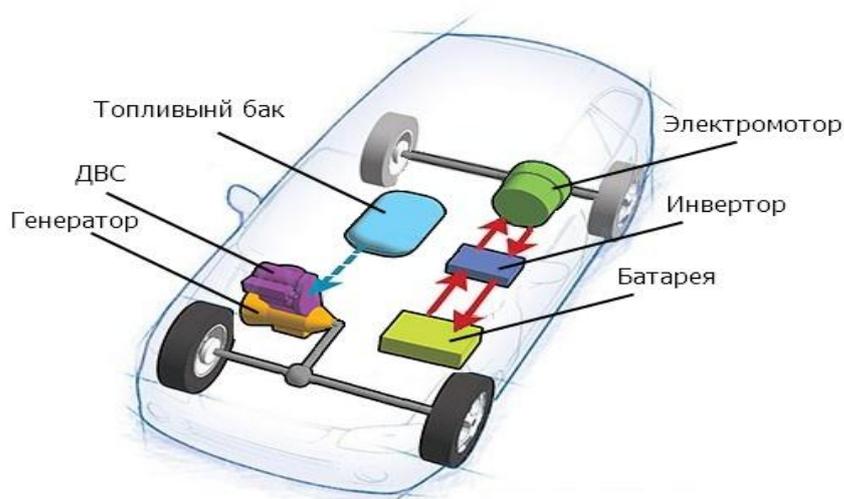


Рисунок 1.3 – Смешанный метод включения двигателя и накопителя к приводу

Широко используется схема «Двигатель внутреннего сгорания — электрический аккумулятор — электродвигатель». Если рассмотреть последний случай, то в нем используется питание, как с помощью горючего, так и с помощью заряда электрического аккумулятора. Гибридный автомобиль имеет свое главное достоинство в виде заметного снижения достаточно вредных

выхлопов и уменьшение затрат на топливо, так как расход меньше. Автоматическое управление режим работы системы двигателей осуществляется с помощью бортового компьютера, в момент, когда автомобиль останавливается в транспортном потоке происходит своевременное прекращение работы двигателя, но сохраняется возможность ехать дальше, не осуществляя запуск двигателя. Использование электродвигателя как генератора электрического тока для пополнения заряда аккумуляторов, от одной обычной энергии аккумуляторной батарейки до сложнейшего механизма рекуперации.

После того как цена на нефть начала расти в цене, как и требования к экологичности автомобилей, сразу увеличился спрос легковых гибридных автомобилей на рынке. Производство было налажено, в некоторых странах даже начали освобождать от налогов владельцев автомобилей. Гибридные автомобили имели много преимуществ, но существовали и существенные недостатки, такие как длительная зарядка, достаточно тяжелые аккумуляторы и отсутствие близко расположенных заправочных станций.

Разработка первого автомобиля с гибридным приводом была произведена в 1900-1901годах.

Виктор Воук был первым кто начал разработку гибридных автомобилей в США.

Компания Volvo проводила эксперименты с маховиком, но было принято решение отказаться от этого проекта в пользу гидравлических аккумуляторов.

Ученым Нурбея Гулиа тоже велись разработки, он создал прототип гибридного автомобиля. Советский ученый разработал первый автомобиль, который являлся первым «гибридом». В разработке данного автомобиля была достигнута экономия топлива до 50%.

Испытания городских автобусов с маховичными гибридными агрегатами и вариаторами были проведены в Курске. Так же были испытаны и построены основанные на гидроприводе гибридные силовые агрегаты. Роль накопителя энергии в последних использовались баллоны со сжатым воздухом.

Эффективность «гибридов» оказалась почти одинаковой, хотя принципы работы совершенно отличаются. Расход топлива снижался почти вдвое, и в несколько раз снижалась токсичность выхлопа. Но, к сожалению, советская промышленность так и не начала использовать данные технологии.

Для достижения экономной эксплуатации, необходимо сделать равными технические показатели машины и сохранить важные параметры обычного автомобиля: мощность, скорость, быстрый разгон и многих другие полезные показатели. Проблема экономии была решена за счет снижения объема и мощности двигателя, остановкой работы двигателя при необходимости, движения только на электродвигателях.

Из-за сильной сложности этой системы, она стала возможной в полном объеме только с помощью применения бортового компьютера в современных условиях.

Расчет пиковых нагрузок выявил способность не устанавливать двигатель. При резком усилении тяговой нагрузки в работу могут включаться три вида двигателей: обычный, электродвигатель, в некоторых случаях и дополнительный электродвигатель. Все это дает возможность сэкономить за счет установки менее мощного двигателя внутреннего сгорания, который работает в экономном и благоприятном для себя режиме.

За счет того, что гибридные установки хорошо распределяют, могут накапливать и быстро использовать мощность их чаще всего используют во внедорожниках и автомобилях, относящихся к спортивному классу. В перерасчете на массу и габариты электродвигатели обладают достаточно большим крутящимся моментом, по сравнению с другими электродвигателями. Но все-таки существует ряд моделей, в которых разработчики приняли решение не использовать не сильно мощные электродвигатели, и даже стараются по возможности уменьшать их габариты.

Чтобы суммировать мощности используют комбинированную схему передачи, в которой происходит прямая передача механического крутящего

момента от двигателя. Данная схема называется «гибридно-совместный привод».

Исключение составляют половина заездов на заправочные станции, и большую часть заездов при езде по городу, а это освобождает у автовладельцев некоторое количество времени.

Невозможность возврата энергии обратно в углеродное топливо являлось главным недостатком двигателя, работающего на углеродном топливе, который вскоре был устранен.

Инженеры давно работали над устранением этого недостатка. Для того, чтобы сохранить энергию при торможении и повторно ее использовать, были применены специальные конструкции с большим маховиком. Но удалось сохранить только гидравлическую и энергетическую, получая при этом минимальные потери и достаточно дешевый процесс, что касается накопителей, используются аккумуляторы, специальные конденсаторы и гидроаккумуляторы.

Большим недостатком электромобилей является необходимости постоянной зарядки аккумулятора. Для зарядки аккумулятора необходим специально оборудованный пункт и достаточно много времени.

В наше время уже были произведены разработки, позволяющие заряжать до 80% емкости литий-ионные аккумуляторы за небольшой период времени.

Что касается гибридного автомобиля, у него этот недостаток устранен. Для решения этой проблемы необходимо углеводородное топливо и заправка аккумулятора осуществляется по стандартной схеме, после чего дальнейшее движение может быть продолжено.

Аккумуляторы гибридных автомобилей подвержены саморазряду, но по сравнению с традиционными автомобилями имеющие двигатель внутреннего сгорания они тяжелее и дороже.

Ремонт гибридных автомобилей дороже, чем у традиционных автомобилей.

Из-за невозможности создания адаптивных трансмиссий, которые могли бы работать в большом диапазоне передаточных отношений. Все это в свою очередь является основной проблемой, из-за которой, наиболее перспективные, механические, гибриды не имеют возможности на этом этапе составить конкуренцию электрическим гибридам.

Электромобили в большей степени сталкиваются с проблемой утилизации аккумуляторов, чем гибридные аккумуляторы.

Исследования выбросов, производимых аккумуляторами на окружающую среду, скорее всего, произведены не были.

Малую побочную генерацию бросового тепла определяют с помощью высокого КПД. Это тепло в обычном автомобиле в зимнее время используют для обогрева салона, а в гибридных автомобилях ДВС не глохнет до определенной температуры, до полного обогрева салона, за счет этого увеличивается расход топлива. Электрические ТЭНы, питающиеся от высоковольтной батареи, используются в некоторых американских моделях.

Они могут производить тепло, не тратя при этом лишней работы ДВС, а также могут нагревать салон после старта автомобиля.

Лидерами по количеству выпусков гибридных автомобилей с 1997 года стала Toyota, модификация была как в обычных автомобилях серии Prius, так и автомобилей люкс-класса.

Во всем мире по итогам 2006 года продано было около полумиллиона моделей Prius. Ford (Escape Hybrid) и Nissan (Altima Hybrid) получили лицензирование на технологию гибридного привода.

Из-за дефицита никель-металл-гидридных аккумуляторов зачастую сдерживалось производство гибридных автомобилей.

В начале 20 века за один год в Японии было продано на 47,6% больше гибридных автомобилей.

В США так же за один год продажи гибридных автомобилей выросли на 38%. На рынке среди новых легковых автомобилей в США гибридные

автомобили занимают 2,15% всего рынка. Если не считать продажи корпорации GM, всего за один год в США было продано 350000 гибридных автомобилей.

Из-за технических регламентов гонок, которые не позволяют в полной мере увеличивать эффективность гоночных машин, все чаще конструктора обращают внимание на нетрадиционные методы. Одним из таких методов является – гибридная силовая установка. Впервые разработками такой системы занимались три команды «Формулы-1» в 90-х гг.

Благодаря зарядке аккумулятора при торможении, данная система может выдать энергию в виде дополнительного разгонного импульса.

Из-за опасения роста расходов, которые могли выйти из-под контроля, ФИА вскоре запретила работу над этими системами. Но реалии современного мира опять привлекли внимание этих систем, в начале 20 века в гонках Ф1 использование данных систем было разрешено. Применение данных систем имеет много преимуществ такие, как торможение, кратковременное увеличение мощности, которое применяется для обгона соперников, работа двигателя осуществляется наиболее выгодных режимах.

В истории гонок были случаи, когда в Токайчи гонку, длившуюся 24 часа, выиграл гибридный автомобиль Тойота Супра HV-R, но были случаи, когда гибридный автомобиль Гумперт Аполло участвовавший годом ранее в гонке так же длившейся 24 часа, но гибриднему автомобилю не удалось добраться до финиша. Так же, спустя всего два года, гибриднему Порше имеющему механическую систему рекуперации имеющему лидерство над остальными участниками пришлось сойти всего лишь за два часа до финиша, причиной явилось поломка основного мотора.

В гонках на выносливость автомобилей гибридный привод имеет преимущество, заключающееся в виде экономичности автомобиля, который допускает гораздо реже производить дозаправки, что в свою очередь очень хорошо помогает сэкономить время. Регламент LMP1 вскоре разрешит применять гибридный привод, но не для увеличения показателей скорости, а

из-за существенной разницы в использовании топлива, так как автомобиль с гибридным приводом позволяет больше экономить топливо.

В США проводят соревнования на трассе NASCAR New Hampshire Motor Speedway и Формула — 1 Silverstone. В этих соревнованиях впервые в начале 20 века приняли участие и участники из России — команда Формула Гибрид МАДИ(ГТУ). Существует даже целый студенческий класс спортивных гибридных автомобилей, деятельность этого класса заключается в том, что участники, действуя в рамках регламента создают уникальнейшие конструкции.

В России группа ученых под руководством профессора Н. В. Гулия был предложен метод работающий за счет резкого понижения потерь в трансмиссии получить увеличение эффективности гибридного силового агрегата. Поднять КПД бесступенчатой трансмиссии гибрида до 96% и передавать через варьирующее звено не более 15 % от полной мощности позволяет с помощью применения специально для этих целей разработанная система разделения потоков мощности.

Маховик с механическим отбором мощности обязательно должен использоваться в этой системе в качестве накопителя энергии. Его отсутствие может привести к неэффективному разделению потоков мощности в трансмиссии гибрида как при рекуперативном торможении, так и при разгоне автомобиля.

Российский гибридный автомобиль называется Ё-мобиль. Автомобиль работает на электричестве, который получают от генератора с газовым (бензиновым, дизельным) роторно-лопастным двигателем и ёмкостного накопителя энергии.

Компания ЯРОВИТ Моторс начала разработку городского гибридного автомобиля, но вскоре Михаилу Прохорову поступило предложение о совместной деятельности. Само сотрудничество ЯРОВИТ и Михаила Прохорова началось еще до начала работы над легковым гибридом, оно

началось с опытной эксплуатации грузовиков «Яровит» на предприятиях в которых одним из совладельцев являлся Михаил Прохоров.

## 1.2 Развитие электромобилей

Электромобиль-это автомобиль, который приводят в движение с помощью одного или нескольких электродвигателей с питанием от аккумуляторов, топливных элементов и многих других, но не с помощью двигателя внутреннего сгорания. Но электромобиль необходимо различать с автомобилями внутреннего сгорания, электрической передачей, троллейбусов. Существуют подвиды электромобиля, например, электрокар и электробус. Первым электромобиль выглядел как тележка с электромотором и появился он в 1841 году. И получается, что электромобиль появился даже раньше, чем двигатель внутреннего сгорания. Широкое распространение получили электромобили с паровой машиной и электромобили.

Двигатель внутреннего сгорания появился позже, чем электромобиль.

В 1841 году был создан первый электромобиль, он выглядел как тележка с электромотором. Электромобили и автомобили с паровой машиной получили широкое распространение в первой четверти двадцатого века.

В 1900 году около 50% автомобилей в США была на паровом ходу, а через 10 лет в Нью-Йорке до 70 тысяч электромобилей работало в такси. Электрические электробусы и грузовые электромобили в начале века так же получили существенное распространение.

В самом начале у электрических и бензиновых экипажей скорость и запас хода находились наравне. Сложный способ в подзарядке на тот момент являлась самым главным минусом электромобилей. Весь процесс подзарядки очень сильно усложнялся отсутствием в то время преобразователя, который бы мог преобразовывать переменный ток в постоянный. Процесс зарядки являлся достаточно сложным, для его осуществления использовали электромотор,

который работал от переменного тока. Вращение вала осуществлялось с помощью электромотора, и именно к нему батареи электромобиля были подсоединены. Вскоре был изобретен выпрямитель тока, достаточно простой в эксплуатации, но и это сильно не решило проблему подзарядки.

В 1899 году Электромобиль La Jamais Contente установил рекорд скорости на суше. Он был первым в мире кто смог достигнуть скорости 105 км/ч. Скорость 130 км/ч смог получить американский конструктор электромобилей. На одной зарядке удалось проехать 167 км электромобилю фирмы "Борланд Электрик". После перезарядки на следующий же день электромобилю удалось вернуться обратно своим ходом, при этом средняя скорость электромобиля составила 55 км/ч.

Если сравнить эксплуатацию электромобиля в России и США, то можно увидеть, что эксплуатация электромобиля в России выйдет гораздо дешевле, чем в США, из-за того скорее всего в России зарядка будет осуществляться ночью.

Примерный срок службы аккумуляторной батареи около 3 лет, или 85000—100000 км пробега. КПД тягового электродвигателя в среднем составляет 91%. В городском цикле автомобиль задействует около 3 л. с. двигателя. Рассмотрев эти критерии можно сделать вывод, что городской автотранспорт может быть заменен на электромобили.

Имеется мнение о том, что электромобили обладают достаточно низким уровнем шума, и это может создавать проблемы за счет того, что многие пешеходы, переходя дорогу, прислушиваются к шуму производящего автомобилем. Для решения этой проблемы в некоторых странах даже поступило предложение искусственно увеличить уровень шума электромобилей.

Конечно, резкий шум, производящий работающим мощным электродвигателем перепутать очень сложно, такой шум, как от электроприводов троллейбуса, поезда, метро всем давно и хорошо знаком,

поэтому существует потребность в обычном для транспорта шумоподавлении. Современный автомобиль издает очень мало шума на маленькой скорости, чаще всего это шум трения колес об асфальт и другие покрытия. Например, в трамваях, используются маломощные двигатели, из-за чего шум практически отсутствует, в связи с этим некоторые компании начали выпускать электромобили с искусственным увеличением уровня шума.

- в месте, где находится электромобиль, отсутствуют вредные выхлопы.
- высокая экологичность ввиду отсутствия применения нефтяных топлив, антифризов, трансмиссионных и моторных масел, а также фильтров для этих жидкостей;
- простота техобслуживания, большой межсервисный пробег;
- низкая пожаро- и взрывоопасность при аварии;
- по сравнению с обычным автомобилем простота конструкции заключающаяся в простоте электродвигателя и трансмиссии, отсутствие необходимости в переключении передач, простота в управлении, высокая надёжность и долговечность экипажной части (до 20—25 лет) ;
- подзарядка электромобиля, осуществляющаяся от бытовой электрической сети, но этот способ гораздо дольше где-то в 5-10 раз, чем если бы подзарядка осуществлялась бы от специального высоковольтного зарядного устройства;
- электромобиль - это единственный случай, когда на легковом автотранспорте применяется дешевая энергия, вырабатываемой АЭС, ГЭС и электростанциями других типов, если сравнивать с бензином.
- массовое использование электромобилей помогло бы решить проблему «энергетического пика» за счет осуществления подзарядки аккумуляторов в ночное время;
- тэд имеют КПД до 90-95 % по сравнению с 22-42 % у ДВС;
- из-за меньшего количества движимых частей и механических передач происходит уменьшение шума;

- высокая плавность хода с широким интервалом изменения частоты вращения вала двигателя;
- возможность во время рекуперативного торможения осуществлять подзарядку источников энергии;
- возможность торможения самим электродвигателем (режим электромагнитного тормоза) без использования механических тормозов — отсутствие трения и соответственно износа тормозов;
- используя схемы "мотор-колесо" существует простая возможность реализации полного привода и торможения.

Хотя были внесены значительные усовершенствования в конструкции электромобиля за последние полтора века, но аккумуляторы так и не смогли достигнуть таких результатов, чтобы электромобиль мог конкурировать на равных с автомобилем в качествах стоимости и запасу хода. Стоимость высоко энергоемких аккумуляторов достаточно высока из-за использования драгоценных или дорогостоящих металлов, либо температура работы слишком высока. К тому же эти аккумуляторы обладают свойством высокого саморазряда. Разработка никель-металл-гидридных аккумуляторов содержащих в себе оптимальные качества электроемкости и себестоимости стало одним из наиболее перспективных направлений, еще одним перспективным решением было использовать аккумуляторы на основе полипропилена, но это применение не соответствовало патентным ограничениям, и на электромобилях начали применять свинцово-кислотные АКБ. У таких батарей нет надобности в обслуживании в период всего срока работы, а электроемкость таких АКБ за 20 лет увеличилась в 4 раза. После применения электронных систем оперативного контроля, которые контролировали бы состояние и зарядку-разрядку АКБ, удалось существенно увеличить отдачу от аккумулятора. Одним из вариантов выхода из этой ситуации, возможно, станет применение топливных элементов или дешевеющих PEM-элементов.

В момент, когда электромобили работают на постоянных скоростях и при плавных разгонах работа аккумуляторов осуществляется хорошо, но при резких стартах тяговые АКБ теряют большое количество энергии. Чтобы повысить пробег электромобиля нужны определенные стартовые системы, такие как конденсатор, кроме этого еще необходимо использование систем рекуперации энергии, при этом экономия составляет 25%.

Из-за содержания зачастую в аккумуляторах ядовитых компонентов как свинец, литий и различных кислот, большой проблемой является, как производство, так и утилизация аккумуляторов.

Почти 10% энергии теряется в коробке передач и остальных элементах трансмиссии. Чтобы решить эту проблему компания Mitsubishi Motor разработала колесо с встроенным электродвигателем (мотор-колесо). Такое же мотор-колесо было разработано компанией Toyota. Прототип автомобиля Toyota Fine-T может поворачивать колёса перпендикулярно оси автомобиля, за счет этого парковка автомобиля стала значительно легче. Возможно, что решение данной проблемы возможно с помощью отказа от коробки передач и использование обычной цилиндрической передачи или простого карданного вала, как на троллейбусах.

Такие процессы как охлаждение или наоборот обогрев салона автомобиля, потребляют некоторое количество энергии аккумулятора, оно необходимо так же для работы остальных бортовых энергопотребителей, такие как свет или воздушный компрессор. Были предприняты усилия, направленные на устранения этих проблем. Для устранения этих проблем были выбраны такие топливные элементы как, ионисторы и фотоэлементы.

При решении выпускать большое количество электромобилей необходимо создать определенные инфраструктуры, которые осуществляли бы подзарядку аккумуляторов или по-другому («автозарядные» станции);

Если будет использоваться большое количество электромобилей, то возрастает риск перегрузки электрических сетей «последней мили», в момент

их зарядки от бытовой сети, что может привести к уменьшению качества энергоснабжения и увеличивается риск локальной аварии сети.

Если сравнить заправку автомобиля топливом, то время необходимое для зарядки аккумулятора более длительное.

При использовании ТЭД двигателя постоянного тока возникает необходимость более подробного и внимательного обслуживания, включающей в себя так же необходимость проверки щеток коллектора, этот электродвигатель считается «капризным».

В США эксплуатировалось в 2004 году свыше 55000 электромобилей.

Но также в США имеется большое количество самодельных электромобилей. В магазинах можно найти наборы комплектующих, необходимые для конвертации автомобиля в электромобиль. \$1500 составила минимальная стоимость конвертации.

Лидером в мире производящим электрический транспорт является – Китай.

Небольшие электромобили, более простой конструкции нашли свое применение в перевозках грузов на вокзалах и больших магазинах.

Если сравнивать недостатки, выраженные в стоимости, массе и малого запаса хода с преимуществами, выраженными в отсутствии вредных выхлопов и большого шума, что в свою очередь очень важно для закрытых помещениях с большим количеством людей, то в этой ситуации преимущества стали более весомыми. Но из-за специфичности в сфере их применения относить такие машины к электромобилям не принято.

Основным фактором, которое ограничивает большой выпуск электромобилей является малый спрос, который существует из-за высокой стоимости и малым пробегом от одной зарядки электромобиля. Так же существует мнение, что ограничение в широком распространении электромобилей сдерживается из-за нехватки аккумуляторов и их высокой

стоимостью. Чтобы решить эту проблему многие автопроизводители совместно создали предприятия на которых производили аккумуляторы.

В мае 2010 года одно из творений Японского клуба электромобилей переделанная на электротягу малометражка Daihatsu Mira EV проехала 1003 километра и используя один заряд аккумулятора больше 180.

В начале 20 века электромобиль «Venturi Jamais Contente» с литий-ионными аккумуляторами на солёном озере в штате Юта установил рекорд скорости 495 км/ч на дистанции 1 км. Во время заезда автомобиль развивал максимальную скорость 515 км/ч.

Так же в начале 20 века электромобиль «lekker Mobil» конвертированный из микровэна Audi A2 совершил рекордный пробег на одной зарядке из Мюнхена в Берлин длиной 605 км в условиях реального движения по дорогам общего пользования, при этом были сохранены и действовали все вспомогательные системы, включая отопление. Электромобиль с электродвигателем мощностью 55 кВт был создан фирмой «lekker Energie» на основе литий-полимерного аккумулятора «Kolibri» фирмы «DBM Energy». В аккумуляторе было запасено 115 кВт·ч, что позволило электромобилю проехать весь маршрут со средней скоростью 90 км/ч (максимальная на отдельных участках маршрута составляла 130 км/ч) и сохранить после финиша 18% от первоначального заряда. По данным фирмы DBM Energy электропогрузчик с таким аккумулятором смог непрерывно проработать 32 часа, что в 4 раза больше, чем с обычным аккумулятором. Представитель фирмы «lekker Energie» утверждает, что аккумулятор «Kolibri» способен обеспечить суммарный ресурсный пробег до 500 000 км.

Спустя чуть больше месяца победителем конкурса Европейский автомобиль года впервые объявлен электромобиль модели Nissan Leaf, получивший 257 очков.

В конце 19 века был создан первый электромобиль в России (Петербурге) дворянином Ипполит Романовичем. Общую компоновку он заимствовал у

английских кэбов, её суть заключалась в том, что извозчик располагался на высоких козлах позади пассажиров. Экипаж был 4-колесным, состоял он из двух передних колес большего диаметра, чем два задних колеса. Аккумулятор на первом электромобиле использовался свинцовый аккумулятор системы Бари, имевший 36 банок (вольтовых столбов). Первому электромобилю требовалась подзарядка каждые 60 верст. Суммарная мощность автомобиля составляла 4 л/с.

Заимствовалась разработка экипажа у моделей американской фирмы, выпускавшей автомобили с конца 1890 годов. Электромобиль в России первый раз был переоборудован из обычного автомобиля Корховым Игорем Юрьевичем, и даже получил заключение по допуску к участию в дорожном движении, а так же был зарегистрирован в органах ГИБДД в начале 20 века.

Предназначенный для перевозки пассажиров в парковых и выставочных зонах городов электробус «Лужок», может уместить в себе 30 пассажиров, используя при этом максимальную скорость 25 км/ч. Для работы электробуса используют аккумуляторную, либо конденсаторную батареи, которые питают двигатель постоянного тока ДПТ-45, мощность которого составляет 45 кВт. При торможении имеет способность рекуперировать энергию обратно в батареи. Этой зарядки ему хватает для того, чтобы проехать еще 15км.

Электромобиль ГАЗ 330 21Е «Газель-Электро» был изобретен для того, чтобы перевозить грузы в городе. Без подзарядки способен проехать 20км на максимальной скорости в 75 км/ч и грузоподъемности в 1000 кг. Для работы автомобиля используют аккумуляторную либо конденсаторную батарею. В качестве двигателя используется ДПТ-45 или асинхронный АЧТ 160 М4.

Электромобиль ГАЗ 330 21Е «Газель-Электро» был изобретен для того, чтобы перевозить грузы в городе. Без подзарядки способен проехать 20км на максимальной скорости в 75 км/ч и грузоподъемности в 1000 кг.

В начале 20 века вышло распоряжение мэра о начале опытной эксплуатации электромобилей. Было закуплено несколько грузовиков и 2

автобуса. После подведения итогов эксплуатации техники Департаментом транспорта и связи Москвы должен был предоставить правительству Москвы проект для дальнейшего рассмотрения. Проект распорядительного документа содержит в себе информацию о использовании электромобильной техники, которое могло бы обеспечить внутригородских грузовых, а также пассажирских перевозок.

Студентами Политехнического университета был сконструирован первый солнечный автомобиль в России. Его питание осуществлялось днем от солнечных батарей, а ночью с помощью обычной розетки.

## 2 Расчет тягового электродвигателя

### 2.1 Тяговые электродвигатели, общие положения и конструкции

Тяговый электродвигатель (ТЭД) — электрический двигатель, предназначенный для приведения в движение транспортных средств (электровозов, электропоездов, тепловозов, трамваев, троллейбусов, электромобилей, электроходов, гибридных автомобилей большегрузных автомобилей с электроприводом, танков и машин на гусеничном ходу с электропередачей, подъемно-транспортных машин, самоходных кранов и т. п.).

ТЭД от обычных электродвигателей большой мощности отличается в условиях монтажа двигателей и их размещение, которое ограничивается местом. Все это привело к тому что, была создана специфичная конструкция (своеобразные размеры, специальные устройства и т.п.).

Тяговых двигатели городского, железнодорожного транспорта и двигатели мотор-колес автомобилей предназначены для работы в разных сложных погодных условиях, как во влажном, так и при пыльном воздухе. Режимы работы так же отличаются у ТЭД от электродвигателей общего назначения, они могут работать как в кратковременных, так и повторно-кратковременных с частыми пусками. Режимы сопровождаются широким изменением частоты вращения ротора и нагрузки по току, иногда может достигать при движении с места в 2 раза от номинального. Тяговые электродвигатели относят к машинам предельного использования из-за тяжелых условий работы и жестких габаритных ограничений.

Тяговые электродвигатели классифицируют по:

а) роду тока:

-постоянного тока (в том числе пульсирующего),

-переменного тока;

б) типу:

-ДПТ,

-синхронные,

-асинхронные;

в) системе передачи вращающего усилия от вала двигателя к движущему механизму:

- индивидуальный электропривод,

- групповой электропривод;

д) системе вентиляции:

- принудительная,

- самовентиляция;

е) существующим различным типам подвешивания ТЭД:

- опорно-осевое,

- опорно-рамное;

ж) различным методам питания электроэнергией:

- от контактной сети,

- от бортового источника питания (аккумулятор, дизель-генератор, топливный элемент и др.);

и) способам конструкции:

- коллекторные и бесколлекторные (бесконтактные, вентильные),

- вращающиеся (цилиндрические и торцевые) и линейные (цилиндрические и плоские);

к) различным режимам работы:

- работающие в продолжительном режиме,

- работающие в кратковременном режиме (рабочий период 15-90 минут),

- работающие в повторно-кратковременном режиме (продолжительность включения 15-60%);

л) способах охлаждения:

- с независимой вентиляцией,

- с самовентиляцией,

- обдуваемые,
- с естественным охлаждением.

Сферы применения:

- локомотивы (электровозы, тепловозы с электропередачей);
- электропоезда и высокоскоростной наземный транспорт (ВСНТ);
- бронетехника и другие машины на гусеничном ходу;
- электромобили и большегрузные автомобили с электроприводом (в том числе подъемно-транспортные машины и самоходные краны);
- теплоходы с электроприводом (дизель-электроходы), атомоходы, подводные лодки;
- городской электротранспорт: трамваи, троллейбусы;
- беспилотные самолёты и вертолёты;

Дизель начинает вращать генератор, питающий ТЭД, который приводит в движение гребные винты или колеса напрямую, либо посредством механической передачи, все это происходит в случаях с использованием электрической передачи на теплоходах, тепловозах тяжёлых грузовиках и гусеничных машинах.

ТЭД так же может встраиваться и в само колесо, происходит это на тяжёлых грузовиках. Эта конструкция получила название мотор-колесо. На автобусах, трамваях и даже легковых автомобилях осуществлялись попытки применения этой конструкции.

## 2.2 Модуль расчета линейной нагрузки якоря

Полюсный шаг, см:

$$\tau_2 = \pi \cdot \frac{D_{p2}}{2p} = 3.14 \cdot \frac{20}{4} = 15,7 \quad (2.1)$$

где  $2p=4$  — число полюсов машины.

Длина расчетной полюсной дуги  $b_0$ , см:

$$b_0 = \alpha \cdot \tau_2 = 0,75 \cdot 15,7 = 16,45 \quad (2.2)$$

где  $\alpha$  — коэффициент полюсного перекрытия.

Полезное магнитное поле полюса в воздушном зазоре при нагрузке машины  $\Phi_\delta$ , Вб:

$$\Phi_\delta = b_0 \cdot B_\delta \cdot L_0 \cdot 10^{-4} = 16,45 \cdot 0,55 \cdot 16,5 \cdot 10^{-4} = 0,0149 \quad (2.3)$$

где  $B_\delta$  — индукция в воздушном зазоре под полюсом (Тл).

Линейная нагрузка якоря  $A_2$ , А/см:

$$A_2 = N_2 \cdot \frac{I_A}{(\pi \cdot D_{p2})} = 102 \cdot \frac{57,5}{(3,14 \cdot 20)} = 93,4 \quad (2.4)$$

где  $N_2$  — число проводников обмотки якоря;

$I_a$  — ток параллельной ветви (А).

### 2.3 Модуль расчета размеров зубцов пазов и проводов обмотки якоря

Удельная тепловая нагрузка якоря (Вт/см<sup>2</sup>):

$$q = \alpha \cdot \theta_m \cdot \frac{(1 + 0,1 \cdot v_2)}{\left( f \cdot \left( \frac{t_p}{T_p} \right) \right)} = 969 \cdot 10^{-6} \cdot 80 \cdot \frac{(1 + 0,1 \cdot 16,74)}{0,22} = 0,94 \quad (2.5)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи поверхности якоря в спокойной среде при нормальном давлении воздуха 760 мм рт. ст. при закрытом вентиляторе (Вт/см<sup>2</sup>град);  $\theta_m$  — предельно допустимое превышение температуры якоря над температурой окружающей среды по ГОСТ 183-66 (°С);  $t_p = t_{\max}$  рабочий период работы электродвигателя (с);  $v_2$  - окружная скорость вращения якоря (м/с);  $T_p$  — постоянная времени нагревания вращающегося якоря (с):

$$T_p = 0,9 \cdot \frac{D_{p2}}{(\alpha \cdot (1 + 0,1 v_2))} = 0,9 \cdot \frac{20}{(969 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 0,1 \cdot 16,74))} = 6947 \quad (2.6)$$

$$f \cdot \left( \frac{t_p}{T_p} \right) = 1 - e^{-\frac{t_p}{T_p}} = 1 - e^{-\frac{15}{115}} = 1 - 0,9978 = 0,022 \quad (2.7)$$

Средняя допустимая плотность тока в обмотке якоря  $j_2$ , Вт/мм<sup>2</sup>:

$$j_2 = 1300 \cdot \frac{q}{A_2} = 1300 \cdot \frac{0,94}{93,4} = 13,1 \quad (2.8)$$

Сечение диаметра провода обмотки якоря  $q_2$ , мм<sup>2</sup>

$$q_2 = \frac{I_2}{2a} \cdot j_2 = \frac{114}{2} \cdot 1 \cdot 13,1 = 4,35 \quad (2.9)$$

где,  $I_2$  - ток якоря при нагрузке (А);  $a$  - число параллельных ветвей обмотки

Далее производим окончательный выбор сечения и диаметра провода ( $d_2$ ).

Сопротивление обмотки якоря в нагретом состоянии  $r_2$ , Ом:

$$r_2 = k_\theta \cdot \rho \cdot N_2 \cdot l_{cp2} \cdot \frac{10^{-2}}{((2a)2 \cdot q_2 \cdot 10^{-6})} = 1,23 \cdot 0,017 \cdot 10^{-6} \cdot 102 \cdot 33 \cdot \frac{10^{-2}}{(4 \cdot 4,35 \cdot 10^{-6})} = 0,04 \quad (2.10)$$

где  $k_\theta$  – коэффициент, учитывающий сопротивление обмотки при нагревании ее от 20 до 120<sup>0</sup> С:

$$k_\theta = 1 + 0,004 \cdot (v - 20) = 1 + 0,004 \cdot (70 - 20) = 1,23 \quad (2.11)$$

$\rho$  - плотность меди (Ом·м),

Средняя длина одного проводника обмотки якоря (см):

$$l_{cp2} = L_0 + L_p = 16,5 + 16,5 = 33 \quad (2.12)$$

Падение напряжения при полной нагрузке в обмотке якоря (В):

$$\Delta U = I_a \cdot r_2 = 57,47 \cdot 0,04 = 2,29 \quad (2.13)$$

Удельная магнитная проводимость полей рассеяния обмотки якоря  $\lambda_2$ , Вб/(А·см):

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= \left[ 0,921 \log \left( \pi \cdot \frac{t_2}{a_{paza}} \right) + \frac{l_{p2}}{L_0} + 0,6 \cdot \frac{h_{paza}}{(d_{paza} \cdot 10^{-1})} \right] \cdot 10^{-8} = \\ &= \left( 0,92 \cdot 5,87 + \frac{13,2}{16,5} + 0,6 \cdot \frac{0,955}{0,2} \right) \cdot 10^{-8} = 5,4 + 0,96 + 2,865 = 9,225 \cdot 10^{-8} = \\ &= 0,00000009225 \end{aligned} \quad (2.14)$$

где  $t_2$  - зубцовые шаги по вершинам зубцов якоря (см),

$$l_{p2} = 0,8 \cdot D_{p2}$$

Среднее значение реактивной ЭДС в короткозамкнутой секции якоря  $e_p$ , В:

$$e_p = 2 \cdot v_{c2} \cdot \lambda_2 \cdot L_0 \cdot A_2 \cdot v_2 \cdot 10^2 = 2 \cdot 1 \cdot 9,225 \cdot 10^{-8} \cdot 16,5 \cdot 93,4 \cdot 16,74 \cdot 10^2 = 0,4 \quad (2.15)$$

где  $v_{c2}$  - число витков в секции обмотки якоря

ЭДС поля якоря  $e_a$ , В:

$$\begin{aligned} e_a &= 0,4 \cdot \pi \cdot v_{c2} \cdot \lambda_2 \cdot L_0 \cdot A_2 \cdot v_2 \cdot 10 \cdot \frac{\tau_2}{\delta_0} = \\ &= 0,4 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 9,225 \cdot 10^{-8} \cdot 16,5 \cdot 93,4 \cdot 16,74 \cdot 10 \cdot \frac{15,7}{0,375} = 1,25 \end{aligned} \quad (2.16)$$

где  $\delta_0$  - средняя длина силовой линии поперечного поля якоря в межполюсном пространстве машины (см):

$$\delta_0 = \frac{(\tau_2 - b_0)}{2} = \frac{(15,7 - 16,45)}{2} = 0,375 \quad (2.17)$$

Среднее значение результирующей ЭДС в короткозамкнутой секции якоря  $e$ , В:

$$e = e_p + e_a = 0,4 + 1,25 = 1,65 \quad (2.18)$$

Коэффициент воздушного зазора

$$k_\delta = t_2 + 10 \cdot \frac{\delta}{(b_{z2} + 10 \cdot \delta)} = 14,8 + 10 \cdot \frac{0,5}{(14,642 + 10 \cdot 0,5)} = 1,01 \quad (2.19)$$

где  $\delta$  - воздушный зазор под полюсом (см);  $b_{z2}$  - размер зуба (см):

$$b_{z2}' = t_2 - a_{\text{паза}} = 14,8 - 0,158 = 14,642 \quad (2.20)$$

МДС в воздушном зазоре

$$F_\delta = 1,6 \cdot B_\delta \cdot k_\delta \cdot \delta \cdot 10^4 = 1,6 \cdot 0,55 \cdot 1,01 \cdot 0,5 \cdot 10^4 = 4444 \quad (2.21)$$

Предварительный диаметр коллектора, см:

$$D_k = (0,5 \div 0,9) \cdot D_{p2} = 0,8 \cdot 20 = 15 \quad (2.22)$$

Ширина коллекторной пластины:

$$\beta_k = (2 \div 5) \text{ см} = 1,25 \quad (2.23)$$

Коллекторное деление, см:

$$t_k = \pi \cdot 10 \cdot \frac{D_k}{K} = 3,14 \cdot 10 \cdot \frac{15}{105} = 4,48 \quad (2.24)$$

где  $K$  - число коллекторных пластин.

Окончательное коллекторное деление, см:

$$t_k = \beta_k + 2 \cdot \beta_{\text{и}} = 1,25 + 2 \cdot 1,2 = 3,65 \quad (2.25)$$

где  $\beta_{\text{и}}$  – ширина пластмассовой изоляции между коллекторными пластинами, см.

Окончательный диаметр коллектора (см) и его окружная скорость (м/с):

$$D_k = K \cdot \frac{t_k}{\pi} = 105 \cdot \frac{3,65}{3,14} = 122 \quad (2.26)$$

$$v_k = \pi \cdot D_k \cdot n \cdot \frac{10^{-2}}{60} = 3,14 \cdot 122 \cdot 1600 \cdot \frac{10^{-3}}{60} = 63,93 \quad (2.27)$$

Выбор щеток и плотность тока под щетками.

Площадь сечения щетки, см<sup>2</sup>;

$$S_{\text{sh}} = \frac{I_2}{p} \cdot j_{\text{sh}} = \frac{114}{2} \cdot 13,1 = 4,35 \quad (2.28)$$

где  $j_{\text{sh}}$  – предварительное значение допустимой плотности тока А/см<sup>2</sup> (в зависимости от марки щеток);  $I_2$  – ток якоря при нагрузке машины, А;  $p$  – число полюсов машины.

Ширина щетки по дуге окружности, см:

$$b_{\text{sh}} = (1 \div 3) \cdot \beta_k = 2,5 \quad (2.29)$$

Длина щетки до оси коллектора, см:

$$a_{\text{sh}} = \frac{S_{\text{sh}}}{b_{\text{sh}}} = \frac{4,35}{2,5} = 1,74 \quad (2.30)$$

Высота щетки, см:

$$h_{\text{sh}} = (1,5 \div 2,0) \cdot a_{\text{sh}} = 1,75 \cdot 1,74 = 3,04 \quad (2.31)$$

Окончательная плотность тока, А/см<sup>2</sup>:

$$j_{\text{sh}} = \frac{I_2}{(p \cdot a_{\text{sh}} \cdot b_{\text{sh}})} = \frac{114}{(2 \cdot 1,74 \cdot 2,5)} = 13,1 \quad (2.32)$$

Длина коллектора по оси вращения, см:

$$l_k' = (1,5 \div 3,0) a_{\text{sh}} = 2 \cdot 1,74 = 3,48 \quad (2.33)$$

Полная длина коллектора по оси вращения вала, см:

$$l_k = l_k' + (3 \div 5) \cdot d_2 = 3,48 + 4 \cdot 2,3 = 12,68 \quad (2.34)$$

Ширина коммутационной зоны, см:

$$b_k = b_{sh}' + (U_k + |(\frac{K}{2p}) - y_1| - \frac{a}{p}) \cdot t_k'' = 0,325 + (3 + |\frac{105}{4} - 26,5| - \frac{1}{2}) \cdot 4,87 = 13,71 \quad (2.35)$$

где  $b_{sh}' = b_{sh} \cdot (\frac{D_{p2}}{D_k} \cdot 10^{-1}) = 2,5 \cdot (\frac{20}{15} \cdot 10^{-1}) = 0,325$ ;  $t_k'' = t_k \cdot (\frac{D_{p2}}{D_k}) = 3,65 \cdot (\frac{20}{15}) = 4,87$ ;

$$U_k = \frac{K}{Z_2} = \frac{105}{35} = 3 \text{ -число секционных сторон в одном слое паза;}$$

$Z_2$  -число пазов якоря.

## 2.4 Модуль расчёта магнитной системы машины

Длина воздушного зазора под полюсом, см:

$$\delta = 0,15 \cdot \tau_2 \cdot \frac{A_2 \cdot 10^{-4}}{B_\delta} = 0,15 \cdot 15,7 \cdot \frac{93,4 \cdot 10^{-4}}{0,55} = 0,04 \quad (2.36)$$

Высота сердечника якоря, см:

$$h_{c2} = \frac{(D_{p2} - (2h_{паза} + d_{вала}))}{2} = \frac{(20 - (2 \cdot 0,955 + 6,66))}{2} = 5,17 \quad (2.37)$$

где  $d_{вала}$  -диаметр вала, см:

$$d_{вала} = (0,18 \div 0,4) \cdot D_{p2} = 0,33334 \cdot 20 = 6,66$$

Проверка индукции в сердечнике якоря

$$B_{c2} = \frac{(\Phi_\delta \cdot 10^4)}{(2 \cdot 0,93 \cdot h_{c2} \cdot l_0)} \leq B_{c2max} = \frac{0,0149 \cdot 10^4}{(2 \cdot 0,93 \cdot 5,17 \cdot 16,5)} = 0,93 \leq (1,3 \div 1,5) \quad (2.38)$$

где 0,93-коэффициент, учитывающий лаковую изоляцию;  $B_{c2max} = (1,3 \div 1,5)$

$l_0$  – максимально допустимая индукция в сердечнике якоря

## 2.5 Определение размеров полюса

Осевая длина, см:

$$l_p = l_0 = 16,5 \quad (2.39)$$

Высота сердечника, см:

$$h_p = (0,25 \div 0,4) \cdot D_{p2} = 0,3 \cdot 16,5 = 4,95 \quad (2.40)$$

Ширина сердечника полюса, см:

$$b_p = \frac{(\Phi_\delta \cdot \sigma \cdot 10^4)}{(B_r \cdot l_p)} = \frac{0,0149 \cdot 1,1 \cdot 104}{(1,2 \cdot 16,5)} = 8,28 \quad (2.41)$$

где  $B_r = 1,2$  Тл – остаточная индукция сердечника полюса

Сопротивление последовательной обмотки возбуждения, Ом:

$$R_c = L_c / (57 \cdot 106 \cdot q_b) = 65,52 / (57 \cdot 106 \cdot 3,7) = 3,1 \cdot 10^{-7} \quad (2.42)$$

где  $L_c$  - 65,52 (приблизит) полная длина последовательной обмотки возбуждения (м);  $q_b$  - сечение провода последовательной обмотки возбуждения ( $m^2$ ).

Сопротивление параллельной обмотки в холодном состоянии, Ом:

$$R_{sh} = \frac{L_{sh}}{57 \cdot 106 \cdot q_{sh}} = 3,1 \cdot 10^{-7} \quad (2.43)$$

где  $L_{sh}$  - полная длина параллельной обмотки возбуждения (м);  $q_{sh}$  - сечение провода параллельной обмотки возбуждения ( $m^2$ )

## 2.6 Модуль расчёта поперечного сечения корпуса

Поперечное сечение корпуса конструкторское,  $cm^2$ :

$$Q_{cl} = \pi \cdot D_{cor} \cdot b_{cor} = 3,14 \cdot 42,8 \cdot 2,4 = 322,54 \quad (2.44)$$

где  $b_{cor}$  - толщина стенки корпуса (см);  $D_{cor}$  - внешний диаметр корпуса, (см).

Проверка поперечного сечения корпуса,  $cm^2$ :

$$Q_{cl} = \Phi_\delta \cdot \sigma \cdot \frac{104}{(2 \cdot B_{cl})} = 0,0149 \cdot 1,1 \cdot \frac{104}{(2 \cdot 1,5)} = 54,6 \quad (2.45)$$

где  $B_{cl} = (1,0 \div 1,5)$  Тл – индукция в корпусе для машин кратковременного режима работы;  $\sigma = 1,08 \div 1,12$  - коэффициент магнитного рассеяния.

## 2.7 Модуль расчёта размеров магнитной системы машины

Длина полюса, см:

$$L_p = 2h_p = 2 \cdot 4,95 = 9,9 \quad (2.46)$$

Длина воздушного зазора, см:

$$L_\delta = 2\delta = 2 \cdot 0,04 = 0,08 \quad (2.47)$$

Длина зубцов якоря, м:

$$L_{z2} = 2 \cdot h_{\text{paza}} \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 0,955 \cdot 10^{-2} = 0,02 \quad (2.48)$$

Длина сердечника якоря, см:

$$L_{c2} = \pi \cdot \frac{(D_{p2} - 2 \cdot h_{\text{paza}} - h_{c2})}{2p} = 3,14 \cdot \frac{(16,5 - 2 \cdot 0,955 - 5,17)}{4} = 7,4 \quad (2.49)$$

Индукция по трем сечениям зубцов якоря:

$$B_{32\text{min}} = B_\delta \cdot \frac{t_2}{0,93} \cdot b_{z2} = 0,55 \cdot \frac{14,8}{0,93} \cdot 14,642 = \frac{8,14}{13,61} = 0,59 \quad (2.50)$$

$$B_{32\text{cp}} = B_\delta \cdot \frac{t_2}{0,93} \cdot b_{z2\text{cp}} = \frac{8,14}{0,93} \cdot 13,646 = 0,64 \quad (2.51)$$

$$B_{32\text{max}} = B_\delta \cdot \frac{t_2}{0,93} \cdot b_{z2}'' = \frac{8,14}{0,93} \cdot 12,786 = 0,68 \quad (2.52)$$

где  $b_{z2\text{cp}}$ ,  $b_{z2}''$  размеры зуба (см)  $b_{z2}'' = t_2' - b_{\text{paza}} =$ ,  $b_{z2\text{cp}} = t_{\text{cp}} - b_{\text{paza}}$ ,  $b_{z2} = t_{\text{cp}} - b_{\text{paza}}$

$$H_{32} = \frac{(H_{32\text{min}} + 4 \cdot H_{32\text{cp}} + H_{32\text{max}})}{6} = \frac{(500 + 4 \cdot 566 + 600)}{6} = 560 \quad (2.53)$$

Длина зубцов якоря  $L_{z2}$ , м:

$$L_{z2} = 2 \cdot h_{\text{paza}} \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 0,955 \cdot 10^{-2} = 0,02 \quad (2.54)$$

МДС в зубцах якоря  $F_{32}$ , А:

$$F_{32} = H_{32} \cdot L_{z2} = 560 \cdot 0,02 = 11,21 \quad (2.55)$$

Индукция в сердечнике якоря  $B_{c2}$ , Тл:

$$B_{c2} = \Phi_\delta \cdot \frac{104}{(0,93 \cdot 2 \cdot h_{c2} \cdot L_0)} = 0,0149 \cdot \frac{104}{(0,93 \cdot 2 \cdot 5,17 \cdot 16,5)} = 0,94 \quad (2.56)$$

где  $h_{c2}$  - высота сердечника якоря (см)

Длина сердечника якоря  $L_{c2}$ , см:

$$L_{c2} = \pi \cdot \frac{(D_{p2} - 2 \cdot h_{паза} - h_{c2})}{2p} = 3,14 \cdot \frac{(16,5 - 2 \cdot 0,955 - 5,17)}{4} = 7,4 \quad (2.57)$$

МДС в сердечнике якоря  $F_{c2}$ , А:

$$F_{c2} = H_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-2} = 666 \cdot 7,4 \cdot 10^{-2} = 49,28 \quad (2.58)$$

Индукция в корпусе  $B_{c1}$ , Тл:

$$B_{c1} = \Phi_{\delta} \cdot 10^2 \cdot \frac{\sigma}{(2 \cdot k_2 \cdot b_{cor} \cdot L_{cor})} = 0,0149 \cdot 10^2 \cdot \frac{1,1}{(2 \cdot 1 \cdot 2,4 \cdot 18,8)} = 0,018 \quad (2.59)$$

где  $\sigma$ -коэффициент магнитного рассеяния;  $L_{cor}=18,8$

МДС в корпусе  $F_{c1}$ , А:

$$F_{c1} = H_{c1} \cdot L_{c1} = 16,66 \cdot 0,15 = 2,5 \quad (2.60)$$

Коэффициент насыщения магнитной системы  $k_H$ :

$$k_H = F_{c1} + F_{c2} + F_{32} + 1,6 \cdot B_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot \frac{\delta \cdot 10^4}{(1,6 \cdot B_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot \delta \cdot 10^4)} =$$

$$= 2,5 + 49,28 + 11,21 + 1,6 \cdot 0,55 \cdot 1,01 \cdot 0,5 \cdot \frac{104}{(1,6 \cdot 0,55 \cdot 1,01 \cdot 0,5 \cdot 104)} = 1,01 \quad (2.61)$$

МДС в сердечниках полюсов  $F_M$ , А

$$F_M = 1,6 \cdot B_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot k_H \cdot \delta \cdot 10^4 = 4488,44 \quad (2.62)$$

Индукция в зазоре стыка между корпусом и полюсами  $B_{c\delta}$ , Тл:

$$B_{c\delta} = B_r = 1,2 \quad (2.63)$$

где  $B_r$  - остаточная индукция магнитного материала (Тл)

МДС воздушного зазора в стыке между корпусом и полюсами  $F_{c\delta}$ , А

$$F_{c\delta} = 1,6 \cdot B_{c\delta} \cdot \delta_c \cdot 10^4 = 1,6 \cdot 1,2 \cdot 0,0035 \cdot 104 = 672 \quad (2.64)$$

Суммарная МДС на холостом ходу  $F$ , А:

$$F_{hh} = F_{\delta} + F_{32} + F_{c2} + F_{c1} + F_M + F_{c\delta} = 4444 + 11,21 + 49,28 + 2,5 + 4488,44 + 672 = 9667,43 \quad (2.65)$$

## 2.8 Модуль расчёта характеристики холостого хода

Расчёт ХХХ (рисунок 2.1) производится по формулам (4.1-4.65), при изменении ЭДС якоря от (0,5-1,4) Ен

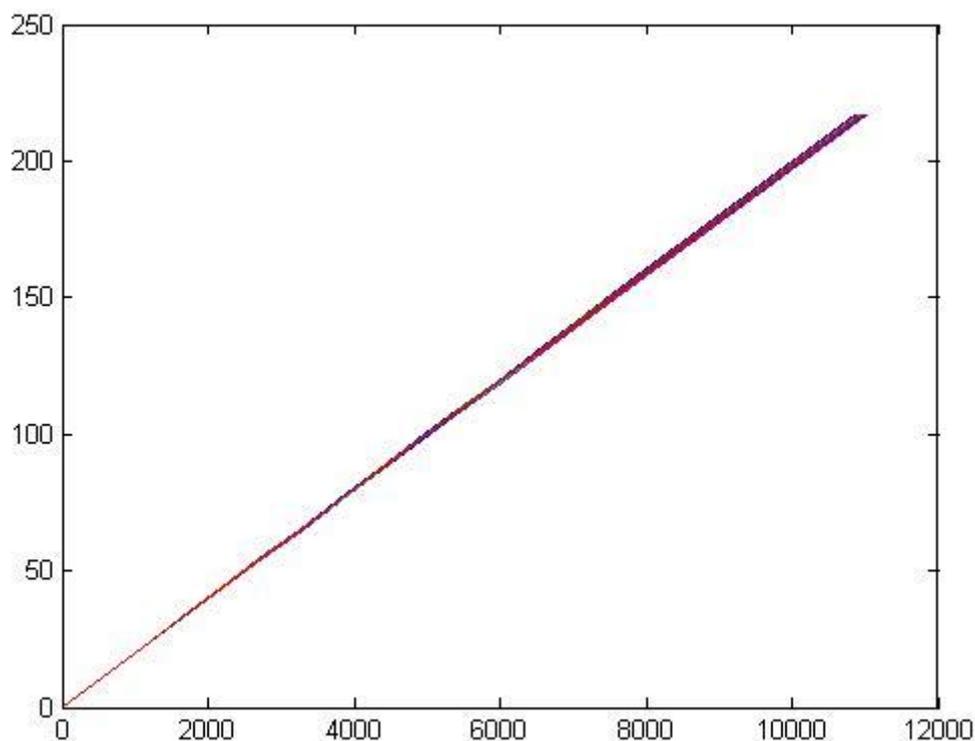


Рисунок 2.1 – Характеристика холостого хода

## 2.9 Модуль расчёта МДС реакции якоря

Реакция якоря в машине постоянного тока, оказывающая влияние на рабочие свойства машины, может появиться в виде:

- поперечной составляющей МДС якоря  $F_q$
- продольной составляющей  $F_\beta$
- продольной МДС добавочных коммутационных токов короткозамкнутых секций при ускоренной или замедленной коммутации тока в них.

Поперечная МДС якоря  $F_q$ , А, определяется по переходной характеристике машины. Поиск  $F_q$  в программе расчёта коэффициентов влияния автоматизирован.

Продольная составляющая МДС якоря  $F_\beta$ ,  $A$ , возникает вследствие самопроизвольного сдвига щёток с геометрической нейтрали, механических причин и неточности установки.

$$F_\beta = 2 \cdot \beta \cdot A_2 = 2 \cdot 0,02 \cdot 93,4 = 3,74 \quad (2.66)$$

где  $\beta$  – величина смещения щеток с геометрической нейтрали

Продольная коммутационная МДС якоря  $F_k$  возникает благодаря смещению нейтральной точки обмотки с геометрической нейтрали при замедленной коммутации тока в короткозамкнутых секциях:

$$\begin{aligned} F_k &= (b_k \cdot A_2 \cdot i_2^2 \cdot \omega \cdot \frac{(1 + 0,2\pi \cdot \frac{\tau^2}{(\delta_0 \cdot \lambda_2) \cdot 10^{-8}})})}{(a_0 + b_0 \cdot i_2 + \omega \cdot i_2)} = \\ &= (13,71 \cdot 93,4 \cdot 12 \cdot 1 \cdot \frac{(1 + 0,2 \cdot 3,14 \cdot \frac{15,7}{(0,375 \cdot 0,000000025) \cdot 10^{-8}})})}{(0,06 + 0,04 \cdot 1 + 1 \cdot 1)} = \\ &= 4436,91 \end{aligned} \quad (2.67)$$

где  $i_2 = \frac{I}{I_2} = 1$  – относительная величина тока якоря в долях номинального значения;  $\omega = \Omega/\Omega_2 = 1$  – относительная величина угловой скорости вращения якоря в долях номинального значения;  $a_0$ ,  $b_0$  – составляющие переходного падения напряжения в контакте щеток:

$$a_0' = 1,7a' \cdot \frac{A}{\Delta U_{щ}} = 1,7 \cdot 0,6 \cdot \frac{0,012}{0,2} = 0,06 \quad (2.68)$$

$$b_0' = 1,7b' \cdot \frac{A}{\Delta U_{щ}} = 1,7 \cdot 0,4 \cdot \frac{0,012}{0,2} = 0,04 \quad (2.69)$$

при этом

$$A = R_{щ} \cdot \frac{T_k}{L_\sigma} = 0,002 \cdot \frac{0,00039}{0,000062} = 0,012 \quad (2.70)$$

$$R_{щ} = \frac{\Delta U_{щ}}{I_2} = \frac{0,2}{114} = 0,002 \quad (2.71)$$

$$T_k = \frac{b_{sh} \cdot 10^{-2}}{v_k} = \frac{2,5 \cdot 10^{-2}}{63,93} = 0,00039 \quad (2.72)$$

$$L_{\sigma} = v_{c2} \cdot \lambda_2 \cdot A_2 \cdot L_0 \cdot \frac{b_{sh}}{I_a} = 1 \cdot 0,0000000925 \cdot 93,4 \cdot 16,5 \cdot \frac{2,5}{57,5} = 0,000062 \quad (2.73)$$

где  $L_{\sigma}$  – средняя эквивалентная индуктивность секции якоря;  $\Delta U_{ш}$  – переходное падение напряжение в контакте двух разноименных щеток

Полная МДС возбуждения машины при нагрузке  $F_2$ , А

$$F_2 = F + F_R \quad (2.74)$$

## 2.10 Модуль расчёта электромеханических характеристик

Расчёт электромеханических характеристик производится при изменении тока якоря от минимального до максимального значения (ток короткого замыкания) по десяти точкам.

Для оценки влияния емкости, состояния аккумуляторной батареи и сопротивления стартерной сети на рабочие характеристики расчет производим исходя из расчётной вольтамперной характеристики источника питания:

$$U = U_n \cdot \left(1 - \alpha_n \cdot \frac{I_2}{C_{20}}\right) = 120 \cdot \left(1 - 0,05 \cdot \frac{114}{55}\right) = 108 \quad (2.75)$$

где  $C_{20}$  – номинальная емкость аккумуляторной батареи в 20-часовом режиме разряда, А<sub>х</sub>ч;  $\alpha_n$  – коэффициент равный 0,05, для батарей емкостью до 100 А<sub>х</sub>ч.

Падение напряжения обмотки якоря, В:

$$\Delta U_2 = I_2 \cdot r_2 = 114 \cdot 0,04 = 4,56 \quad (2.76)$$

Суммарное падение напряжения в обмотке якоря и щеточно-коллекторном узле, В:

$$\Delta U = \Delta U_2 + \Delta U_{ш} = 4,56 + 0,2 = 4,76 \quad (2.77)$$

ЭДС якоря, В:

$$E = U - \Delta U = 120 - 4,76 = 115,24 \quad (2.78)$$

Частота вращения якоря  $n$ , мин<sup>-1</sup>:

$$n = 60 \cdot a \cdot \frac{E}{(p \cdot N_2 \cdot \Phi_{\delta})} = 60 \cdot 1 \cdot \frac{115,24}{(p \cdot N_2 \cdot \Phi_{\delta})} = 2274,48 \quad (2.79)$$

Потери в обмотках якоря  $P_{M2}$ , Вт:

$$P_{M2} = I_2^2 \cdot r_2 = 1142 \cdot 0,04 = 740,5 \quad (2.80)$$

Переходные потери на контактах щеток и коллектора  $P_{sh}$ , Вт:

$$P_{sh} = I_2 \cdot \Delta U_{sh} = 114 \cdot 0,2 = 228 \quad (2.81)$$

Магнитные потери на гистерезис и вихревые токи в стали якоря:

- масса стали  $G_{c2}$ , кг:

$$G_{c2} = 5,5 \cdot (D_{p2} - 2h_{paza}) \cdot L_0 \cdot 10^{-3} = 5,5 \cdot (20^2 \cdot 0,955)^2 \cdot 16,5 \cdot 10^{-3} = 29,7 \quad (2.82)$$

- масса стали зубцов якоря  $G_{z2}$ , кг:

$$G_{z2} = 7,8 \cdot z_2 \cdot b_{z2} \cdot h_{paza} \cdot L_0 \cdot 10^{-4} = 7,8 \cdot 35 \cdot 12,786 \cdot 0,955 \cdot 10^{-4} = 0,3 \quad (2.83)$$

- потери на гистерезис и вихревые токи в стали сердечника якоря  $P_{c2}$ , Вт:

$$P_{c2} = p_{c2} \cdot B_{c2}^2 \cdot G_{c2} = 7,94 \cdot 0,932 \cdot 29,7 = 203,95 \quad (2.84)$$

где  $p_{c2}$  – коэффициент, зависящий от частоты перемагничивания, учитывающий дефекты при механической обработке;

- потери на гистерезис и вихревые токи в стали зубцов якоря  $P_{z2}$ , Вт:

$$P_{z2} = p_{z2} \cdot B_{z2}^2 \cdot G_{z2} = 8,65 \cdot 0,642 \cdot 0,3 = 1,06 \quad (2.85)$$

где  $p_{z2}$  – коэффициент, зависящий от частоты перемагничивания марки и толщины стали, учитывающий дефекты при механической обработке;

- полные потери на гистерезис и вихревые токи  $\Sigma P_c$ , Вт:

$$\Sigma P_c = P_{c2} + P_{z2} = 203,95 + 1,06 = 205,01 \quad (2.86)$$

потери в последовательной обмотке возбуждения  $P_{p0}$ , Вт:

$$P_{p0} = I_{p0}^2 \cdot R_c = 1,17 \quad (2.87)$$

где  $I_{p0}$  – ток в последовательной обмотке возбуждения (А)

Потери в параллельной обмотке возбуждения  $P_{sh}$ , Вт:

$$P_{sh} = I_{sh}^2 \cdot R_{sh} = 504,08 \quad (2.88)$$

где  $I_{sh}$  – ток в параллельной обмотке возбуждения (А)

Механические потери в машине:

- потери на трение щеток о коллектор  $P_{tsh}$ , Вт:

$$P_{tsh} = \mu \cdot p_{щ} \cdot S_{sh} \cdot v_k = 0,2 \cdot 2 \cdot 4,35 \cdot 63,93 = 111,24 \quad (2.89)$$

где  $p_{щ}$  – удельное нажатие,  $\mu$  – коэффициент трения;

- масса (вес) якоря  $G_a$ , кг:

$$\begin{aligned} G_a &= \frac{\pi}{4} \cdot (D_{p2}^2 \cdot L_0 \cdot \gamma_a + (D_k \cdot 10^{-1})^2 \cdot l_{ksh} \cdot \gamma_k) \cdot 10^{-3} = \\ &= \frac{3,14}{4} \cdot (20^2 \cdot 16,5 \cdot 8,5 + (15 \cdot 10^{-1})^2 \cdot 2,4 \cdot 8,5) \cdot 10^{-3} = 44,1 \end{aligned} \quad (2.90)$$

где  $\gamma_k$ ,  $\gamma_a$  – средняя удельная масса якоря и коллектора соответственно

- потери на трение в подшипниках  $P_{tp}$ , Вт:

$$P_{tp} = k_m \cdot G_a \cdot n \cdot 10^{-3} = 1 \cdot 44,1 \cdot 1600 \cdot 10^{-3} = 70,56 \quad (2.91)$$

- потери на трение якоря о воздух  $P_{tv}$ , Вт:

$$P_{tv} = 2 \cdot D_{p2}^3 \cdot n^3 \cdot L_0 \cdot 10^{-14} = 2 \cdot 20^3 \cdot 1600^3 \cdot 10^{-14} = 0,65 \quad (2.92)$$

- полные механические потери в машине  $P_{meh}$ , Вт:

$$P_{meh} = P_{tp} + P_{tv} + P_{tsh} = 0,65 + 70,56 + 111,24 = 182,45 \quad (2.93)$$

Общие потери в машине при полной нагрузке  $P_{sum}$ , Вт, для ЭП с электромагнитным возбуждением:

$$P_{sum} = 1,08 \cdot (P_{M2} + P_{sh} + P_{p0} + P_{tsh} + P_c + P_{meh}) = 192,5 \quad (2.94)$$

КПД при номинальной нагрузке  $\eta$

$$\eta = \frac{(U \cdot I_2 - P_{sum})}{(U \cdot I_2)} = \frac{(108 \cdot 114 - 192,5)}{(108 \cdot 114)} = 0,92 \quad (2.95)$$

Полезный момент на валу в номинальном режиме  $M_2$ , Н·м:

$$M_2 = \frac{(9,55 \cdot U \cdot I_2 - P_{sum})}{n} = \frac{(9,55 \cdot 108 \cdot 114 - 192,5)}{1600} = 76,4 \quad (2.96)$$

На рисунке 2.2, 2.3 представлены электромеханические характеристики, зависимости тока якоря от частоты вращения и рабочего момента вала ротора.

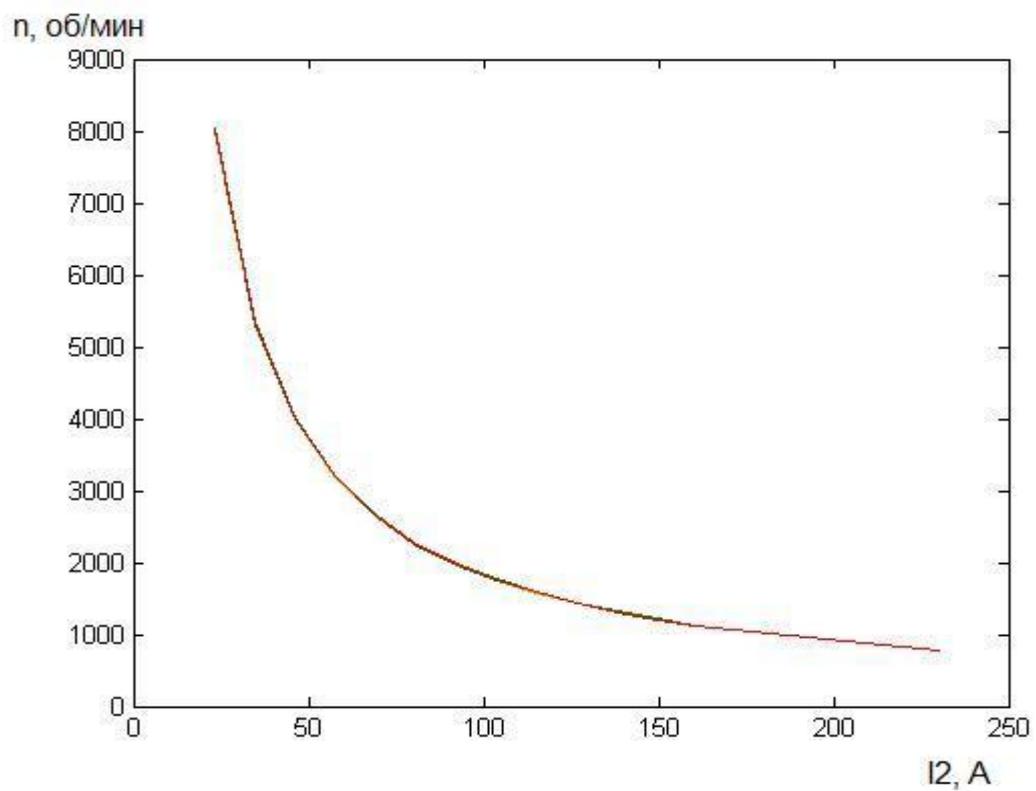


Рисунок 2.2 – Зависимость тока якоря от частоты вращения

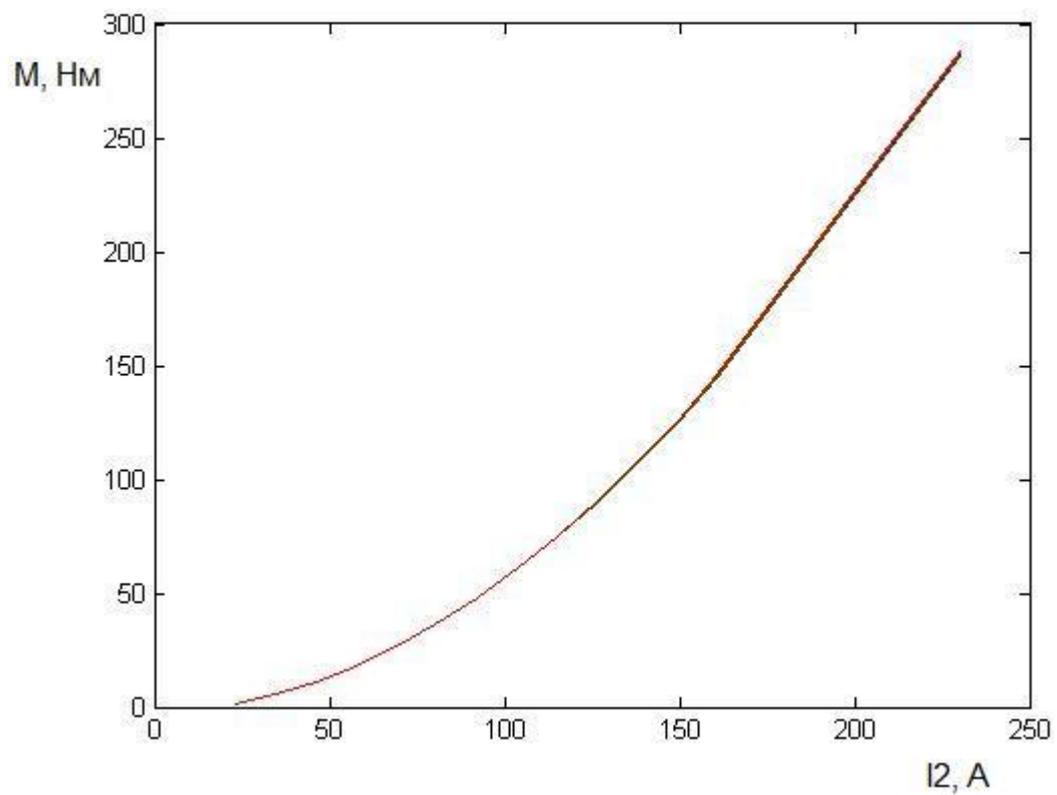


Рисунок 2.3 – Зависимость тока якоря от рабочего момента вала

## Заключение

Данная бакалаврская работа выполнена на тему «Тяговый электродвигатель автомобиля». Представлены конструкция и расчёт тягового электродвигателя, построены характеристики. Проведен анализ использования электродвигателя в различных сферах.

В результате работы достигнута основная его цель – использование полученных знаний для развития навыков и умений при решении конкретных научно-технических и производственных задач.

## Список использованных источников

1. Акимов, С.В. Макромодель системы электроснабжения автомобиля /С.В. Акимов, И.В. Сенькин, Л.С. Ходош. – М.,2014. – 75с.
2. Астафьев, В.Е. Экономика электротехнического производства / В.Е. Астафьев – М., 2015.–С.302.
3. Гурьянов, Д.И. Имитационная модель зарядного баланса автомобильного электрооборудования / Д.И. Гурьянов, В.Н. Козловский, А.Д. Немцев // Автотракторное электрооборудование. – 2014 - №5-6.- С 5-6.
4. Адволоткина, Н.П. Управляемые бесконтактные двигатели постоянного тока/Под ред. Адволоткина Н.П. – Л., 2015. – 189 с.
5. Бычков, М.Г. Элементы теории вентильно-индукторного электропривода/ М.Г. Бычков– Электричество, 2013.- №8.- С. 35-44.
6. Козловский, В.Н. Математическое и имитационное моделирование системы пуска автомобиля / В.Н. Козловский, Р.А. Малеев // Грузовик. – 2012. - №3. – М., 2015.-26 с.
7. Козловский, В.Н. Метод Монте-Карло прогнозирование поведения сложной системы при оценке стабильности характеристик автомобильного электростартера / В.Н. Козловский, Р.А. Малеев // Грузовик. – 2012. - №5. – М.,2013.-45с.
8. Козловский, В.Н. Влияние размерных параметров активной зоны автомобильного электростартера на его технические характеристики / В.Н. Козловский, Р.А. Малеев, А.Д. Немцев // Грузовик. – 2012. - №2. – М.: Машиностроение, 2012. -155с.
9. Копылова, Л.В. Теория, конструкция и расчет автотракторного электрооборудования: Учебник для техникумов / Л.В. Копылова, В.И. Коротков; Под. Ред. М.Н. Фесенко.- М.: Машиностроение, 2012.- 344 с.
10. Морозов, А.Г. Расчёт электрических машин постоянного тока / А.Г. Морозов. – М., 2013. – 264 с.

11. Сергеев, П.С. Проектирование электрических машин /П.С. Сергеев, Н.В. Виноградов, Ф.А. Горяинов. – М., 2015. – 632 с.
12. Ютт, В.Е. Электрооборудование автомобилей / В.Е. Ютт.- М.: Транспорт 2013. – 287 с., ил.
13. Брускин, Д.Э. Электрические машины и микромашины / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов – М.: Высшая школа, 2012. – 528 с.
14. Копылов, И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2015. – 608 с.
15. Гольдберг, О.Д. Инженерное проектирование и САПР электрических машин: Учебник для вузов / Под ред. О. Д. Гольдберга. – М.: Академия, 2015. – 560 с., ил.
16. Ермаков, В.В. IGBT транзистор в системе зажигания / В.В. Ермаков, М.А. Пьянов // Материалы международного научного симпозиума. – М.: МГТУ МАМИ, 2012. -181с.
17. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев. – М.: Юрайт, 2012. – 768 с.
18. Коуфман, М.М. Практическое руководство по расчетам схем в электронике: Справочник. В 2-х т. Т. 1: Пер. с англ. / Под ред. Ф.Н. Покровского. – М.: Энергоатомиздат, 2014. – 368 с., ил.
19. Ютт, В.Е. Электрооборудование автомобилей / В.Е. Ютт. – М.: Горячая Линия - Телеком, 2013. - 287с.
20. Смирнов, Ю.В. Электромагнитный вентильно-индукторный двигатель / Ю.В. Смирнов // Электротехника, 2015, №3. С. 20-22.
21. Paul Scherz. Practical Electronics for Inventors. / Paul Scherz, Simon Monk. – Fourth Edition - New York, N.Y.: McGraw-Hill Education, 2016.
22. Electric Motors for Electric Vehicles 2017-2027// [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.idtechex.com/research/reports/electric-motors->

- [for-electric-vehicles-2017-2027-000506.asp](#). – (Дата обращения: 5.06.2017).
23. Traction Motors and Vehicle Electrification// [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nidec-motor.com/Industry-Applications/Traction-Motors>. – (Дата обращения: 5.06.2017).
24. Traction motor // [электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.upcscavenger.com/wiki/traction\\_motor/#page=wiki](http://www.upcscavenger.com/wiki/traction_motor/#page=wiki)– (Дата обращения: 5.06.2017).
25. Traction motor// [электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://simple.wikipedia.org/wiki/Traction\\_motor](https://simple.wikipedia.org/wiki/Traction_motor)– (Дата обращения: 5.06.2017).