

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Электротехнических комплексов
(полное название кафедры)

Утверждаю

Зав. кафедрой Н.И. Щуров

(подпись, инициалы, фамилия)

« » 2020 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Бублик Алексей Николаевич

(фамилия, имя, отчество студента – автора работы)

Исследование тягового электропривода электромобиля

(тема работы)

Факультет мехатроники и автоматизации

(полное название факультета)

Направление подготовки 13.03.02. Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки бакалавра)

**Руководитель
от НГТУ**

Спиридонов Егор Александрович

(фамилия, имя, отчество)

к.т.н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

(подпись, дата)

**Автор выпускной
квалификационной работы**

Бублик Алексей Николаевич

(фамилия, имя, отчество)

ФМА, ЭМ-66

(факультет, группа)

(подпись, дата)

Новосибирск 2020

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Электротехнических комплексов
(полное название кафедры)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой Щуров Николай Иванович
(фамилия, имя, отчество)

(подпись, дата)

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ БАКАЛАВРА**

студенту Бублику Алексею Николаевичу
(фамилия, имя, отчество)

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки бакалавра)

Факультет мехатроники и автоматизации
(полное название факультета)

Тема Исследование тягового электропривода электромобиля
(полное название темы выпускной квалификационной работы бакалавра)

Исходные данные (или цель работы) Проектирование тягового электропривода
электромобиля на базе автомобиля

Структурные части работы анализ тягового электрического привода, расчёт
необходимой мощности тягового электродвигателя, исследование влияния
исходных данных на требуемую мощность тягового электродвигателя,
экономический раздел, охрана труда

Задание согласовано и принято к исполнению.

**Руководитель
от НГТУ**

Спиридонов Егор Александрович
(фамилия, имя, отчество)

к.т.н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

(подпись, дата)

Студент

Бублик Алексей Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

ФМА, ЭМ-66
(факультет, группа)

(подпись, дата)

Тема утверждена приказом по НГТУ № 1447/2 от « 13 » 03 2020 г.
изменена приказом по НГТУ № _____ от « _____ » _____ 2020 г.

ВКР сдана в ГЭК № _____, тема сверена с данными приказа

(подпись секретаря государственной экзаменационной комиссии по защите ВКР, дата)

(фамилия, имя, отчество секретаря государственной
экзаменационной комиссии по защите ВКР)

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемых источников из 33 наименований. Общий объём работы составляет 66 страниц машинописного текста, 40 рисунков, 9 таблиц и 24 формулы.

Ключевые слова: ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, ЭЛЕКТРОМОБИЛЬ, СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ, ЦИКЛ ДВИЖЕНИЯ, ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ.

Объектом исследования является тяговый электропривод электромобиля, проектируемого на основе автомобиля *Mazda CX-5*.

Цель работы – проектирование тягового электропривода электромобиля на базе автомобиля.

В первой главе работы исследуются тяговый электропривод и его элементы. Анализируются тяговые электродвигатели, способы управления ими с помощью силовых преобразователей на базе тиристоров и IGBT-транзисторов, а также импульсные системы управления. Рассматриваются принципы их работы. Выбираются типы электродвигателя и электрического преобразователя.

Во второй главе рассчитывается требуемая электрическая мощность электродвигателя аналитическим методом, а также по циклам движения. Анализируются результаты расчётов, и выбираются модели тягового электродвигателя с силовым преобразователем.

В третьей главе исследуется влияние изменения исходных данных, к которым относятся циклы движения, масса транспорта, профиль пути, на параметры электромобиля. Производится анализ полученных значений потребляемой выбранным электродвигателем электрической мощности.

В четвёртой главе определяется стоимость тягового электродвигателя и силового преобразователя.

В пятой главе рассматриваются опасные факторы, которые могут возникнуть при работе с электрооборудованием, а также способы защиты от них.

ABSTRACT

Final qualification work consists of introduction, five chapters, conclusion, list of sources used from 33 items. The total amount of work is 66 pages of typewritten text, 40 figures, 9 tables and 24 formulas.

Key words: TRACTION ELECTRIC DRIVE, ELECTRIC CAR, SYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR, MOTION CYCLE, SIMULATION MODEL.

The object of research is the traction electric drive of an electric vehicle designed on the basis of the Mazda CX-5.

The purpose of the work is the design of a traction electric drive of an electric vehicle based on a car.

The first chapter of the work examines the traction electric drive and its elements. Traction electric motors are analyzed, their control methods using power converters based on thyristors and IGBT transistors, as well as pulse control systems. The principles of their work are considered. The types of electric motor and electric converter are selected.

In the second chapter, the required electric power of the electric motor is calculated by the analytical method, as well as by motion cycles. The results of calculations are analyzed, and models of a traction motor with a power converter are selected.

The third chapter examines the effect of changes in the source data, which include driving cycles, mass of vehicles, track profile, on the parameters of an electric vehicle. The analysis of the obtained values of the electric power consumed by the selected electric motor is carried out.

The fourth chapter defines the cost of the traction motor and power converter.

The fifth chapter discusses the hazards that may arise when working with electrical equipment, as well as ways to protect against them.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 АНАЛИЗ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА.....	8
1.1 Тяговый электрический привод.....	8
1.2 Привод постоянного и переменного токов	9
1.3 Электрический преобразователь в приводе постоянного и переменного тока. 16	
1.4 Выводы.....	27
2 РАСЧЁТ НЕОБХОДИМОЙ МОЩНОСТИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ 28	
2.1 Аналитический метод	29
2.2 Определение требуемой мощности тягового электрического двигателя по заданному циклу движения	33
2.3 Расчёт номинальной мощности электродвигателя и силового преобразователя	39
2.4 Выводы.....	41
3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ НА ТРЕБУЕМУЮ МОЩНОСТЬ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ.....	43
3.1 Исследование различных циклов движения	45
3.2 Исследование влияния массы электромобиля	48
3.3 Исследование влияния профиля пути	50
3.4 Выводы.....	55
4 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....	56
4.1 Определение стоимости комплекта «ОРИОН-18-2М-02» и «DTI-100H»	56
4.2 Выводы.....	57
5 ОХРАНА ТРУДА	59
5.1 Анализ вредных и опасных факторов, меры защиты от них	59
5.2 Выводы.....	61
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	62
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	63

ВВЕДЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы, производятся исследования электропривода электромобиля, проектируемого на базе автомобиля *Mazda CX-5*.

Рассматривается электропривод как в общем, так и в частности, то есть взаимодействие элементов привода, как единой системы, и их отдельная работа. Среди различных типов электромеханических и электрических преобразователя производится выбор определённого тягового электрического двигателя и силового преобразователя.

Для определения электрической мощности привода проводятся расчёты аналитическим методом и с помощью циклов движения. По рассчитанным значениям определяются реальные модели тягового электродвигателя и силового преобразователя.

После происходит исследование влияния исходных данных на параметры электромобиля, таким как, например, потребляемая электрическая мощность. К изначальным данным можно отнести циклы движения, массу электромобиля и профиль пути.

Затем рассчитывается стоимость электродвигателя с силовым преобразователем.

Исследуются вредные и опасные производственные факторы, которые могут возникнуть при работе с электрооборудованием, а также меры по обеспечению безопасности человека.

По окончанию работы производится обобщение всех полученных результатов исследований и расчётов.

1 АНАЛИЗ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА

1.1 Тяговый электрический привод

Тяговый электрический привод – это совокупность электрических и механических элементов, позволяющая преобразовывать электрическую энергию в механическую и наоборот и обеспечивать движение или торможение транспортного средства. Структурно схему тягового электропривода можно представить как показано на рисунке 1.1:

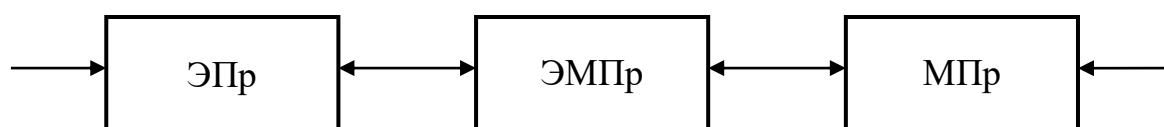


Рисунок 1.1 – Структурная схема тягового электропривода

Основные элементы тягового электропривода:

1) ЭПр – *электрический преобразователь* – комплекс устройств, позволяющий подать на электромеханический преобразователь (ЭМПр) или на источник питания (например АКБ) необходимую величину электроэнергии (далее ЭЭ). В отличие от других элементов схемы, ЭПр состоит из двух элементов, которые требуют отдельного внимания – система управления (далее СУ) и силовой преобразователь (далее СПр). СПр преобразователь позволяет подавать на ЭМПр или источник питания электрический ток необходимых параметров, а то, какие именно параметры должна иметь ЭЭ, задаёт СУ;

2) ЭМПр – *электромеханический преобразователь* (тяговый электрический двигатель) – машина, преобразовывающая электрическую энергию в механическую (прямое движение транспорта) или механическую в электрическую (принцип рекуперативного торможения);

3) МПр – *механический преобразователь* – система, которая производит передачу механической энергии от ЭМПр до движителя (пневмоколёса, гусеничная лента, конвейерная лента и др.) или от последнего к ЭМПр. Примером МПр может служить трансмиссия.

Как видно из структурной схемы и описания элементов тягового электропривода, основное преимущество использования на транспорте является возможность работы системы в двух направлениях – возможность тратить запасённую электрическую энергию на механическую работу, а также, при определённых условиях, преобразовывать механическую энергию в электрическую и запасать её. Поэтому взаимодействие элементов на рисунке 1.1 указано в обоих направлениях.

1.2 Привод постоянного и переменного токов

Разобравшись с основными элементами тягового электрического привода, необходимо рассмотреть две различные системы привода, а именно электропривод постоянного и переменного токов.

Различие данных типов касается только устройства ЭПр и ЭМПр, а особое значение представляет собой именно электромеханический преобразователь (ТЭД).

В приводе постоянного тока в роли ТЭД на транспорте выступают *двигатели постоянного тока* (далее ДПТ). Среди ДПТ классификация происходит по типу магнитной системы статора [1]:

- 1) с постоянными магнитами;
- 2) с электромагнитами:
 - a) с независимым возбуждением;
 - b) с последовательным возбуждением;
 - c) с параллельным возбуждением;
 - d) со смешанным возбуждением.

Принцип работы двигателя постоянного тока основан на законе Ампера (действие силы на проводник с током, находящимся в магнитном поле). Простейший вид ДПТ представлен на рисунке 1.2. В роли проводника с током выступает катушка (обмотка ротора), по которой протекает ток, подающийся с помощью щёточно-коллекторного узла [2]. При протекании тока через катушку, находящейся в постоянном магнитном поле, происходит её вращение. Из-за того, что на кольце чередуется полярность, получается однонаправленное вращение

катушки (ток левой стороны всегда будет от нас, а правой на нас). Однако при такой работе катушка будет неравномерно вращаться, так как при её вертикальном положении сила не будет направлена перпендикулярно вращению. Для обеспечения равномерной работы необходимо добавить несколько дополнительных катушек со своими парами коллекторных колец (пластин). Равномерность движения пропорциональна числу катушек.

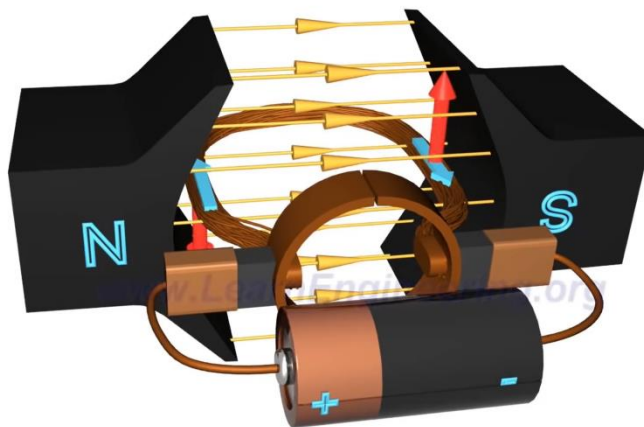


Рисунок 1.2 – Простейший вид двигателя постоянного тока

Для привода переменного тока основными типами ТЭД являются *синхронный* (далее СД) и *асинхронный* (далее АД) *электродвигатели*. В свою очередь АД делится на два основных типа: двигатель с короткозамкнутым и с фазным роторами. СД также можно разделить на две большие группы: контактные и бесконтактные синхронные машины.

Принцип работы асинхронного двигателя основан на законе Фарадея. Его работу можно наблюдать на рисунке 1.3.

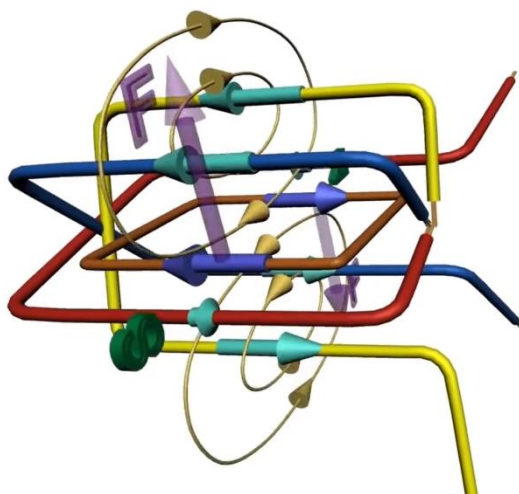


Рисунок 1.3 – Представление статора и ротора асинхронной машины

На данном рисунке красный, синий и жёлтый проводники представляют собой обмотку статора, а замкнутый контур представляет собой ротор. Данный рисунок изображает работу АД с короткозамкнутым ротором. Из-за того, что по обмотке статора протекает переменный трёхфазный ток, образуется вращающееся магнитное поле. В связи с тем, что поле вокруг неподвижного контура непостоянно, в последнем наводится ЭДС индукции согласно закону Фарадея. Наличие ЭДС создаст в замкнутом контуре протекание тока. Из исследования принципа работы ДПТ наблюдалось образование силы Ампера, в результате нахождения контура с током в магнитном поле, что в свою очередь обеспечит вращение рамки. Разгоняясь, скорость вращения ротора будет стремиться к скорости вращения магнитного поля статора, но не будет равна ему. Это связано с тем, что при одинаковых скоростях вращения, контур будет находиться в неподвижном магнитном поле, относительно этого самого контура, что приведёт к спадаанию ЭДС. Но при замедлении вновь образуется разность скоростей вращения магнитного поля статора и ротора (эта разность называется скольжением) [3]. Наличие скольжения и объясняет название этого двигателя асинхронным.

Принцип работы синхронной машины переменного тока основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора и постоянного магнитного поля ротора [4]. Разбор работы произведём на примере рисунке 1.4.

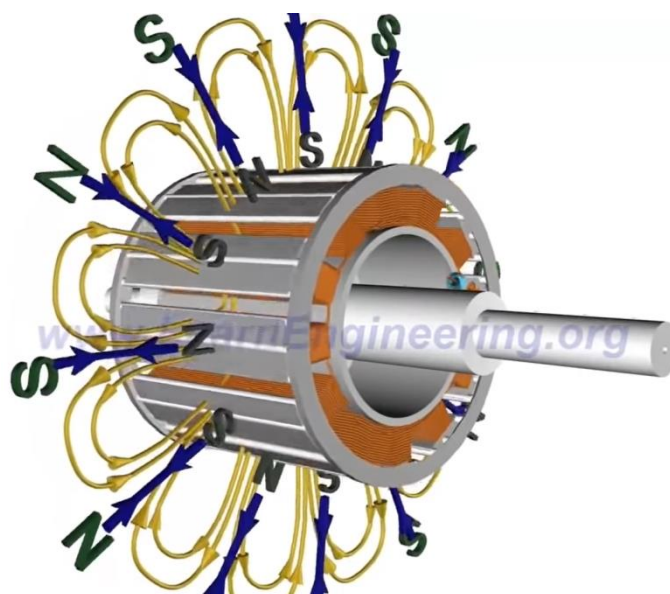


Рисунок 1.4 – Представление статора и ротора синхронной машины

Для лучшего вида обмотка статора на рисунке не изображена, но имеется вращающееся магнитное поле, которое образуется статором. Постоянное магнитное поле образуется при подаче на обмотку ротора тока. Синхронная машина является электродвигателем без самозапуска. Это объясняется тем, что при начале вращения ротора, которое образуется «зацеплением» разноимённые полюсов переменного и постоянного магнитных полей, происходит быстрая смена полюсов статора. Ротор не успевает быстро набрать скорость и вместо разноимённых полей появляется взаимодействие одноимённых полей, что приводит к отталкиванию магнитных полей. Вследствие этого ротор тормозится. Поэтому из начального положения запустить машину просто не получится. Однако это решается следующим способом. Из-за наличия в обмотке дополнительно «беличьей» клетки происходит запуск машины по принципу асинхронного двигателя. Таким способом удаётся разогнать ротор до скоростей близких к синхронным. При достижении максимальной скорости вращения на обмотку ротора подаётся ток и происходит «зацепление» с последующей фиксацией магнитных полей ротора и статора. В результате скорость вращения ротора совпадает со скоростью вращения магнитного поля статора, то есть - синхронной. Поэтому данный тип двигателя и называется синхронным.

При выборе тягового электрического двигателя необходимо ориентироваться на достоинства и недостатки каждого из типов двигателей. При этом необходимо учитывать влияние выбора ТЭД на весь электропривод в целом.

Большинство городского электрического транспорта в России оснащено двигателями постоянного тока. Но, несмотря на это, они имеют больше отрицательных характеристик, чем положительных:

- наличие щёточно-коллекторного узла (далее ЩКУ) подразумевает относительно частое обслуживание, а также более бережное отношение к двигателю в целом. Около 50% [5] всех неисправностей ДПТ в транспорте основано на частых отказах ЩКУ. При этом, срок службы узла в среднем составляет около 15000 часов;
- в вопросе цены ДПТ перестал быть намного более дешёвым вариантом, чем АД с короткозамкнутым ротором, так как основной проблемой двигателей переменного тока являлась сложность в управлении электрической машиной. Однако с появлением и развитием импульсных систем управления привод постоянного тока (ТЭД и ЭПр) на данный момент не имеет такого преимущества. Более сложный и дорогой тяговый электрический преобразователь для привода переменного тока, но более дешёвый тяговый электродвигатель для него же;
- более низкие перегрузочные показатели. В то время как ДПТ позволяет двукратные перегрузки, двигатели переменного тока могут выдержать трёх- и более кратные;
- в технологическом исполнении тяговый электрический двигатель постоянного тока имеет более сложную конструкцию, а, соответственно, и более технологически сложный процесс производства;
- ДПТ имеет более низкий КПД, средняя величина которого примерно равна 85...90 % (для машин средних мощностей).

Однако двигатель постоянного тока имеет так же достоинства. Двигатель регулируется относительно проще, вследствие более простого исполнения силовой и управляющих электрических схем. ДПТ, в большинстве своём, имеют более

низкий момент инерции, из-за чего транспорт лучше себя показывает в высокودинамичном исполнении. Данный ТЭД хуже, чем АД, нагревается, в результате чего вполне достаточна для двигателя естественная вентиляция. Расчёты двигателя производить проще, так как работы производятся при постоянном токе.

По сравнению с ДПТ и синхронными двигателями, асинхронные двигатели имеют ряд значительных преимуществ [6]:

- отсутствие узла коммутации ротора с питающей цепью (контактные кольца синхронной машины или щёточный узел ТЭД постоянного тока);
- меньшая стоимость асинхронного двигателя и в сравнении с СД, и в сравнении с ДПТ, обусловленная, прежде всего, устройством ротора (для АД с короткозамкнутым ротором);
- более простая технология производства двигателя;
- более высокий КПД, в сравнении с ДПТ (равный примерно 90...94 %).
- Но также асинхронный двигатель имеет и несколько немаловажных отрицательных характеристик, к которым, в основном, относятся:
- большее выделение теплоты в двигателях малых и средних мощностей, что может привести к использованию дополнительной охлаждающей системы;
- работа с переменным трёхфазным током, из-за которого усложняется возможность регулирования, т. е. усложнение силового преобразователя и системы управления;
- расчётные задачи из-за переменного тока производятся сложнее.

Данные особенности были выделены для АД с короткозамкнутым ротором, так как использование с фазным ротором создаст больше минусов, чем принесёт плюсов. Асинхронный ТЭД с фазным ротором изначально задумывался для возможности относительно плавной регулировки скорости в широких пределах. Но данную работу в импульсной системе управления (далее ИСУ) выполняет инвертор, а дополнительно выходят: большие массогабаритные показатели (далее МГП); меньшие значения $\cos\varphi$ и КПД; наличие щёточного узла. Исходя из этого, лучшим вариантом является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Синхронные машины, в зависимости от типа, также неоднозначны. Но главными преимуществами данных двигателей являются [7,8]:

- возможность работы при более высоких значениях $\cos \varphi$, которые могут достигать 1, что в свою очередь означает большее значение КПД (стандартные синхронные машины имеют КПД от 80 до 90 % при мощности до 100 кВт, однако СД с постоянными магнитами имеют КПД 95...99 %);
- большая удельная мощность;
- меньшее (чем у АД) значение тепловых потерь, поэтому большинство синхронных двигателей может работать на собственном воздушном охлаждении;
- у СД на постоянных магнитах отсутствует щёточный узел.

Однако, хоть синхронная машина и оказывается изначально лучше асинхронной, у СД имеются недостатки. Тот же ЩКУ имеется на стандартной машине. Стоимость постоянных магнитов довольно велика. В результате, получается, что синхронная машина на вид и может быть лучшим вариантом двигателей по таким характеристикам, как МГП и КПД, но это более затратный и в плане времени (производство дольше и сложнее асинхронных двигателей), и в плане стоимости. И, выбирая между контактной (электромагнит) и бесконтактной (постоянные магниты) электрическими машинами, лучшим вариантом будет являться синхронный двигатель с постоянными магнитами.

Исследовав положительные и отрицательные черты каждого типа электродвигателя, построим таблицу 1.1, где представлены некоторые модели электрических машин [9-14].

Таблица 1.1 – Электрические двигатели

Вид ТЭД	Название ТЭД	Ном. мощность, кВт	Напряжение, В	КПД, %	$\cos\varphi$	Масса, кг	Изготовитель
ДПТ	П-92У4	75	440	88,5	-	705	-***
	4ПН200М	75	440	91,5	-	340	«Электроаппаратура»
АДКР*	1LE1501-3AC03-4AB4	75	400/690	93,7	0,84	660	«Siemens»
	Y2-280S2	75	380/690	93,4	0,9	535	«Mosca Motori»
	GM2E 280S 2	75	400	93,9	0,91	512	«ГАМАК»
СДПМ**	ОРИОН-18-1-08	75	380	97,9	1	112	«ОРИОН-МОТОР»
	LSRPM 200 L	85	380	96,2	1	175	«Leroy-Somer»

*- асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;

** - синхронный двигатель с постоянными магнитами;

***- данная серия двигателей в настоящее время не выпускается

После того, как был выбран определённый тип тягового электродвигателя, необходимо определиться, каким образом будет происходить регулирование скорости вращения двигателя.

1.3 Электрический преобразователь в приводе постоянного и переменного тока

На данный момент, большинство систем управления двигателем транспорта представлено *импульсной системой управления*, взамен *реостатно-контактной системе управления* (далее РКСУ). Данный переход на ИСУ основывается на множестве важных проблемах, которые удалось решить, используя в импульсном регулировании силовые полупроводниковые приборы (далее СПП):

- удалось сократить элементную базу всего ЭПр, благодаря чему не только произошло уменьшение габаритов данного модуля привода, но и значительно упростились электрические схемы;

- использование реостатов приводило к большим тепловым потерям, из-за гашения энергии на них;
- «отклик» такой системы управления происходит намного быстрее, ведь в РКСУ участвуют механические связи контактов контакторов (для контакторов время замыкания и размыкания составляет в среднем несколько десятков миллисекунд, а для, например, тиристоров время отпирания и запираания - от нескольких десятых долей до нескольких сотен микросекунд);
- использование СПП позволяет достигнуть плавного регулирования скорости двигателя, что в свою очередь приносит (например, для транспорта) более комфортное вождение.

Импульсное регулирование тягового электродвигателя основано на подаче питающего напряжения, на этот самый двигатель, отдельными импульсами, которые образуются за счёт использования силовых полупроводниковых приборов (электронных ключей) [15]. Для исследования принципа работы импульсного преобразователя рассмотрим рисунок 1.5.

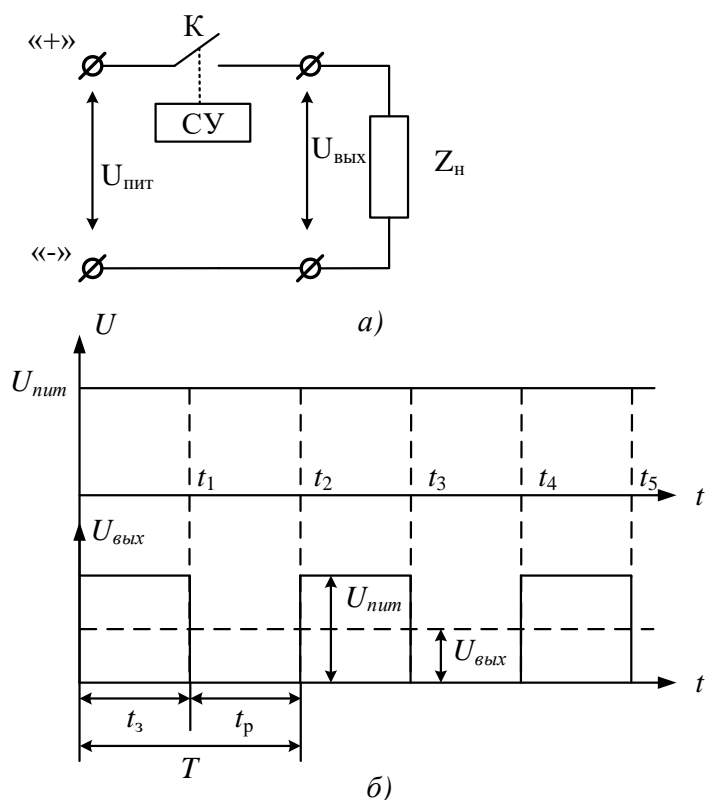


Рисунок 1.5 – Принципиальная электрическая схема импульсного преобразователя (а) и диаграмма напряжений (б)

На схеме и диаграмме указаны:

- СУ – система управления;
- К – силовой полупроводниковый прибор (ключ);
- Z_n – нагрузка (в нашем случае можно представить ДПТ);
- $U_{пит}$ – питающее напряжение;
- $U_{вых}$ – напряжение на выходе преобразователя (напряжение на нагрузке);
- $t_3 = t_1$ – время замкнутого состояния ключа;
- $t_p = t_2 - t_1$ – время разомкнутого состояния ключа;
- $T = t_p + t_3$ – период импульсного регулирования.

Принцип работы схемы заключается в том, что через ключ K , управляемый СУ, на нагрузку Z_n подаётся напряжение. На K поступает напряжение питания U_{num} , а на выходе ключа (на нагрузку) получается напряжение $U_{вых}$, которое автоматически регулируется с помощью изменения времени разомкнутого t_p или замкнутого t_3 состояния СПП. Определяется величина $U_{вых}$ как среднее напряжение за период регулирования по формуле:

$$U_{вых} = \frac{1}{T} \int_0^{t_p} U_{num} dt = \frac{1}{T} \cdot U_{num} \cdot t_p = \frac{t_3}{T} \cdot U_{num}. \quad (1.1)$$

Для упрощения формулы, отношение t_3/T заменяют на величину λ , которая называется коэффициентом заполнения.

Силовой преобразователь для управления ТЭД чаще всего изготавливается на базе тиристоров или биполярных транзисторов, а именно IGBT-транзисторов (БТИЗ – биполярный транзистор с изолированным затвором). То есть в работе импульсных регуляторов используются либо полностью управляемые (транзисторы), либо частично управляемые полупроводниковые ключи (тиристоры). Но, не смотря на их различия, принципиально их можно одинаково рассматривать в управлении приводами как постоянного, так и переменного тока.

Принцип работы импульсного полупроводникового регулятора в силовой цепи для управления двигателем постоянного тока можно наблюдать на рисунке ниже.

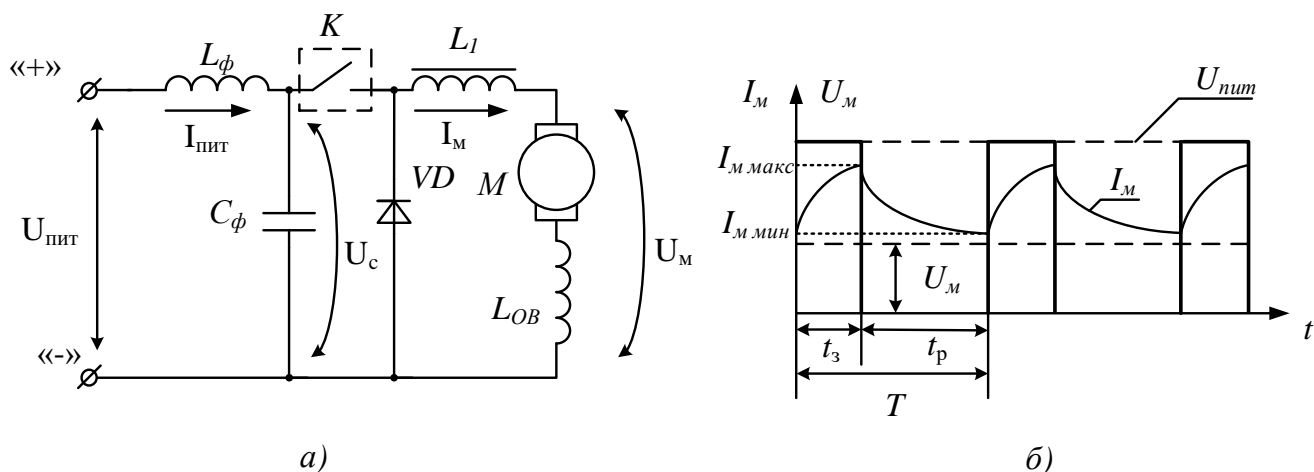


Рисунок 1.6 – Принципиальная электрическая схема импульсного регулятора (а) и диаграмма токов и напряжений (б)

Схема на рисунке 1.6 (а) включает в себя: входной Г-образный LC-фильтр (дроссель L_ϕ и конденсатор C_ϕ), импульсный прерыватель K , выходной фильтр (дроссель L_1 и обратный диод VD), двигатель постоянного тока M и его обмотка возбуждения L_{OB} . Входной фильтр служит для сглаживания пульсаций тока и ограничения перенапряжения на ключе K , из-за скачкообразного возрастания тока. Выходной фильтр служит также для сглаживания пульсаций (L_1), но, помимо этого, создаёт дополнительно контур (через обратный диод VD), по которому происходит протекание тока через двигатель при заперении ключа K . Наличие обратного диода обусловлено активно-индуктивным характером нагрузки (помимо индуктивностей цепи и электродвигатель). Вследствие её наличия, а именно индуктивности, в цепи невозможно моментальное падение значения тока, в результате чего на СПП может произойти перенапряжение.

Прикладываемое напряжение к ДПТ, в течение времени замкнутого состояния ключа $t_з$, определяется величиной U_c , которое приблизительно равняется величине питающего напряжения $U_{пит}$, если пренебречь сравнительно малым сопротивлением дросселя входного фильтра. За этот промежуток времени ток I_M нарастает от значения $I_{M \text{ мин}}$ до $I_{M \text{ макс}}$. При этом, кроме питания двигателя, происходит запасание энергии в индуктивностях цепи, которая затем будет тратиться при отпирании полупроводникового ключа K (время $t_п$). В этот промежуток периода происходит

падение тока I_M с величины $I_{M \text{ макс}}$ до $I_{M \text{ мин}}$, так как образуется контур « $M - L_{OB} - VD - L_I - M$ », и, соответственно, происходит снижение электрической энергии на механическую работу двигателя и преодоление потерь.

Среднее значение напряжения U_M определяется тем же образом, что определялось для схемы рисунка 1.5 (а), и является напряжением $U_{\text{вых}}$. Величину тока, потребляемого от источника питания $I_{\text{пит}}$, можно найти по уравнению баланса подводимой и используемой энергии.

$$U_{\text{пит}} \cdot I_{\text{пит}} \cdot \eta_{\text{ир}} = U_M \cdot I_M, \quad (1.2)$$

$$I_{\text{пит}} = \frac{I_M \cdot U_M}{\eta_{\text{ир}} \cdot U_{\text{пит}}}, \quad (1.3)$$

а отношение выходного напряжения преобразователя к напряжению на входе преобразователя равно величине коэффициента заполнения λ . Тогда

$$I_{\text{пит}} = \frac{I_M}{\eta_{\text{ир}}} \cdot \lambda, \quad (1.4)$$

где $\eta_{\text{ир}}$ – КПД импульсного прерывателя.

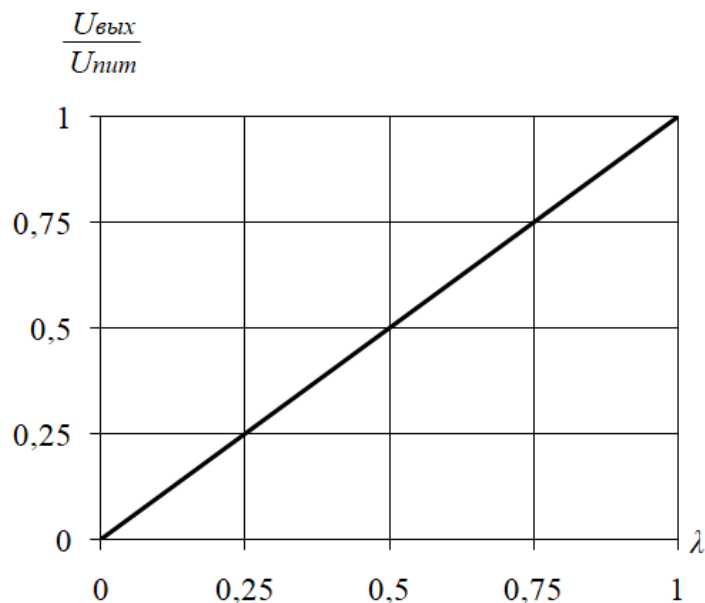


Рисунок 1.7 – Зависимость отношения выходного и питающего напряжения от коэффициента заполнения

Зависимость изменения напряжения на нагрузке от коэффициента заполнения можно представить с помощью графика, изображённого на рисунке 1.7. Как видно

на данном графике, зависимость является линейной, а значит, будет изменяться линейно и скорость транспортного средства.

В связи с этим регулировать величину напряжения можно несколькими способами:

- 1) изменяя величину длительности разомкнутого состояния ключа при неизменном периоде, т. е. $t_3 = \text{var}$, $T = \text{const}$. Такой способ называется широтно-импульсным регулированием (далее ШИР);
- 2) изменяя величину периода импульса без изменения длительности t_3 , т. е. $t_3 = \text{const}$, $T = \text{var}$. Такой способ называется частотно-импульсным регулированием (далее ЧИР);
- 3) изменяя величину T и t_3 , т. е. $t_3 = \text{var}$, $T = \text{var}$. Такой способ называется широтно-частотным или комбинированным регулированием.

Рассмотренный выше принцип регулирования двигателем постоянного тока справедлив и для двигателей переменного тока, за исключением того, что постоянный ток, который подаётся источником питания, необходимо преобразовать в переменный трёхфазный ток. Для постоянного тока силовой электрический преобразователь называется импульсным регулятором (прерывателем), а для переменного тока – инвертором.

Рассмотрим принцип работы инвертора, принципиальная схема которого изображена на рисунке 1.8.

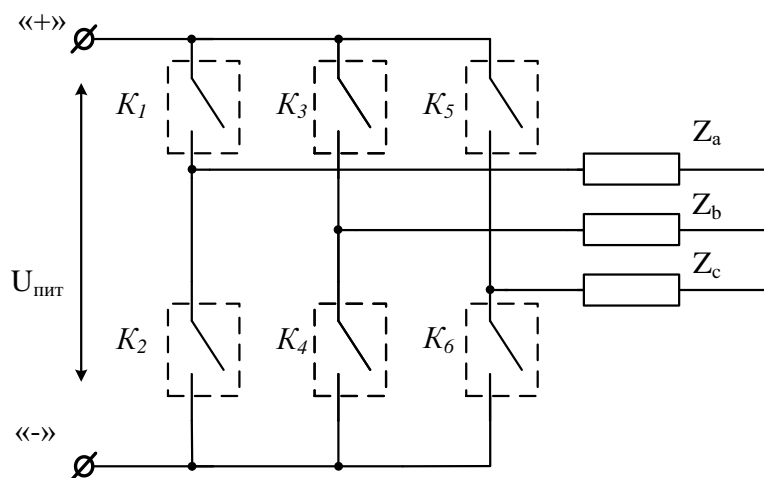


Рисунок 1.8 – Принципиальная электрическая схема трёхфазного инвертора

Данный преобразователь при питании от источника постоянного тока с помощью шести СПП ($K_1 - K_6$) производит преобразование постоянного тока в переменный трёхфазный, который подаётся на обмотки статора, соединённые в «звезду» [16].

Работа инвертора происходит по следующему принципу: в интервале времени от 0 до $T/6$ подаются управляющие сигналы на ключи K_2 , K_3 и K_6 (Рисунок 1.9), благодаря чему происходит замыкание соответствующих СПП и протекание тока по цепи «+" - $K_3 - Z_b - Z_a (Z_c) - K_2 (K_6) - "-"$ ».

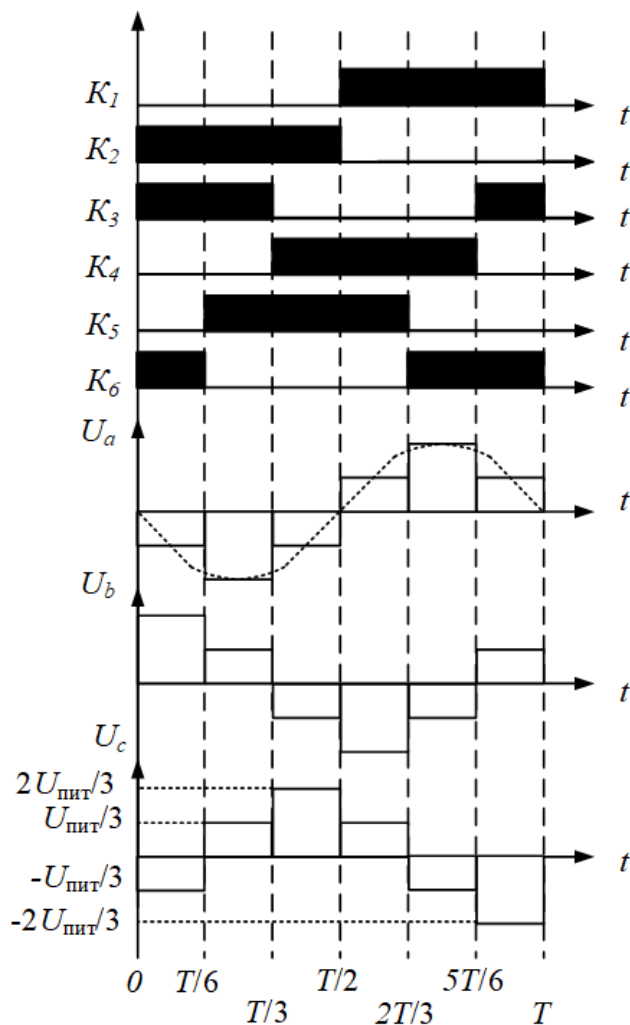


Рисунок 1.9 – Диаграмма управляющих импульсов и фазных напряжений

В результате, на обмотке фаз A и C получается напряжение, значение которого составляет $-\frac{U_{num}}{3}$, фазы B при этом будет равно $\frac{2 \cdot U_{num}}{3}$. В ходе следующей части

периода (от $T/6$ до $T/3$) происходит снятие управляющего импульса с ключа $K6$ и замыкание прибора $K5$, из-за чего фазы B и C получают напряжение $\frac{U_{num}}{3}$, а фаза A - $-\frac{2 \cdot U_{num}}{3}$. Таким образом, в каждую часть периода, составляющую $T/6$, ключи замыкаются так, чтобы напряжение в каждой фазе изменялось от величины от $\frac{2 \cdot U_{num}}{3}$ до $-\frac{2 \cdot U_{num}}{3}$ с шагом $\frac{U_{num}}{3}$. В итоге, происходит преобразование постоянного тока в переменный трёхфазный, где кривая среднего напряжения каждой фазы будет представлять собой форму синусоиды, со сдвигом фаз на 120 электрических градусов друг от друга.

Как говорилось выше, силовой преобразователь может быть разработан на основе как транзисторов, так и тиристоров. Однако предпочтение отдаётся IGBT-транзисторам, которые в силовых преобразователях обладают несколькими важными достоинствами, в сравнение с тиристорами [17,18]:

- время запираания тиристоров измеряется десятками и сотнями микросекунд, в то время как для IGBT-транзисторов эта величина составляет десятки и сотни наносекунд;
- IGBT-транзисторы могут работать при более высоких температурах;
- схематическое решение задачи (например, построение принципиальной схемы трёхфазного инвертора) легче представить с помощью IGBT-транзисторов. Это можно наблюдать на рисунке 1.10 при сравнении схемы (а) и схемы (б). Схемы на базе тиристоров сложнее построить, так как тиристоры требуют наличия узлов принудительной коммутации, состоящие из конденсаторов C_1 - C_6 , и диодов VD_1 - VD_6 , которые устраняют влияние данных узлов друг на друга. Эти узлы нужны для запираания тиристоров, ведь, в отличие от транзисторов, тиристоры нельзя закрыть простым снятием управляющего сигнала с управляющего электрода. Помимо этого необходимо приложить обратное напряжение.

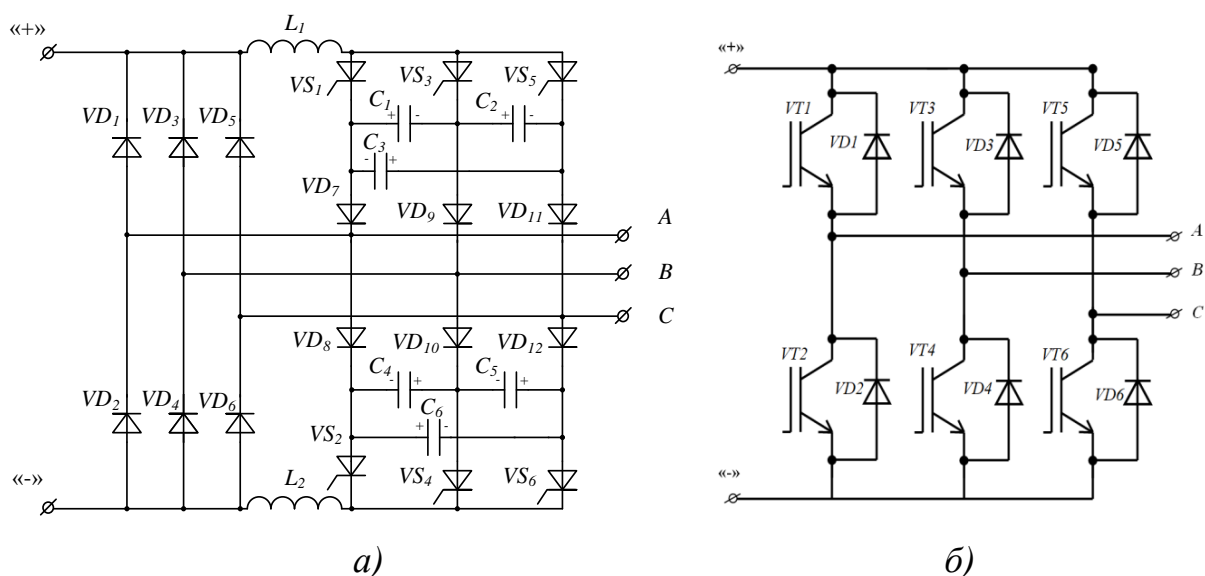


Рисунок 1.10 – Принципиальная электрическая схема инвертора на базе тиристоров (а) и IGBT-транзисторов (б)

Основным из важных недостатков IGBT-транзисторов в сравнении с тиристорами является цена первых.

Применение в качестве электронных ключей транзисторов позволяет осуществлять широтную модуляцию напряжения, что важно при осуществлении частотного пуска двигателя. Ведь в данном процессе необходимо соблюдать известное соотношение между величинами питающего напряжения и его частотой.

Выше уже были рассмотрены основы широтно- и частотно-импульсного регулирования для управления двигателем постоянного тока. В отличие от ДПТ, для управления двигателем переменного тока форма кривой среднего напряжения, питающего двигатель, должна являться синусоидой. На диаграммах ниже изображены под рисунками [19]:

- а) необходимая форма кривой напряжения;
- б) необходимая форма импульсов при широтно-импульсной модуляции (далее ШИМ), для получения кривой среднего напряжения, заданной по рисунку 1.11 (а);
- с) необходимая частота импульсов при частотно-импульсной модуляции (далее ЧИМ), для получения кривой среднего напряжения, заданной по рисунку 1.11 (а).

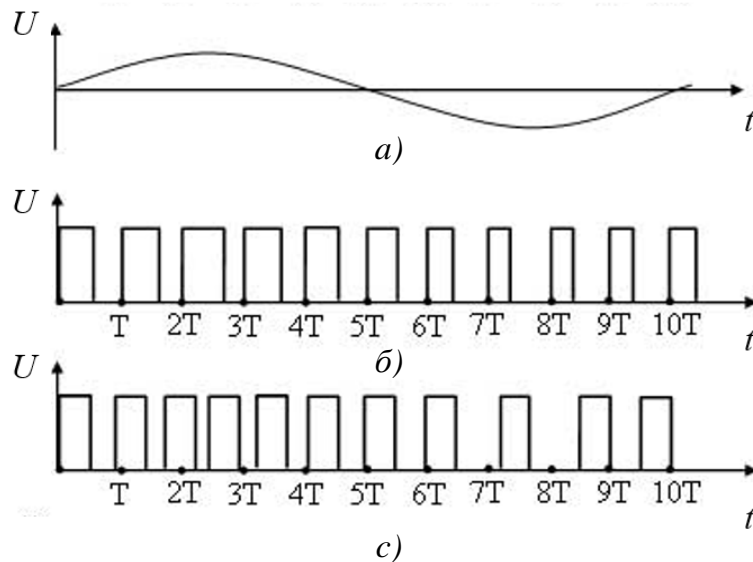


Рисунок 1.11 – Диаграммы напряжения (а) и импульсов ШИМ (б) и ЧИМ (с)

Как видно из рисунка 1.11, величина коэффициента заполнения λ и частоты импульсов f прямопропорциональны величине среднего напряжения. А изменение длительности импульса и момента его появления позволяет регулировать как величину, так и частоту выходного напряжения инвертора. Однако данное соотношение (напряжение/частота) должно быть строго соблюдено. Для слежения за данным аспектом существует два основных метода управления бесщёточными электродвигателями переменного тока: скалярное и векторное.

Скалярное управление ТЭД основано на поддержании постоянной отношении величины напряжение/частота (далее $V/Гц$), которое можно наблюдать на рисунке 1.12, во всём рабочем диапазоне скоростей. Контроль осуществляется только за величиной и частотой питающего напряжения [20].

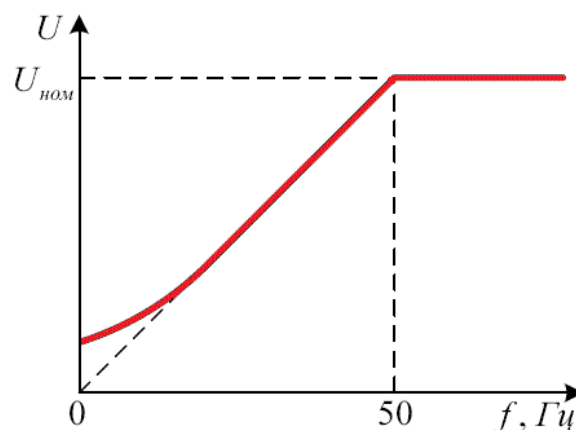


Рисунок 1.12 – Отношение питающего напряжения к его частоте

Отношение V/ω вычисляется на основе номинальных значений контролируемого электродвигателя. Поддерживая постоянным значение отношения, можно удерживать относительно постоянный магнитный поток в зазоре двигателя. Если контролируемое соотношение растёт, тогда электродвигатель становится перевозбужденным, и наоборот, если оно уменьшается - двигатель находится в недо возбужденном состоянии, что может привести к дополнительным потерям или сбоям [21].

На низких оборотах необходимо компенсировать падение напряжения на сопротивлении статора, поэтому отношение напряжение к частоте на низких оборотах устанавливаются выше, чем номинальное значение.

Метод скалярного управления часто применяют для управления асинхронными ТЭД, так как данный метод имеет очень простую схему управления и, одновременно с этим, очень дешёв. Однако имеется несколько очень существенных минусов, из-за которых данный способ управления крайне редко применяется на транспорте:

- 1) низкий диапазон регулирования скоростей (1:10);
- 2) возможные погрешности скорости до 10%;
- 3) медленный отклик при изменении нагрузки, из-за чего при использовании для управления синхронным двигателем с постоянными магнитами возможен выход из синхронизма.

Именно из-за этих недостатков на замену скалярному для электромобилей лучше подойдёт векторное управление.

Данный метод, в отличие от предыдущего, помимо контроля над величиной и частотой питающего напряжения дополнительно следят за его фазой [22]. Эта особенность позволяет оборудованию рассчитать скорость вращения ротора и момент на валу, благодаря чему возможно независимое и практически безынерционное регулирование вышеперечисленных величин. Данный аспект позволяет обладать более высокой производительностью: высокая точность регулирования скорости (погрешности практически равны 0); плавное регулирование во всём диапазоне частот; очень быстрое реагирование на изменение

нагрузки (скорость практически постоянна); диапазон регулирования скоростей на порядок выше (до 1:200).

Вышеперечисленные достоинства векторного управления очень важны для электромобиля, как высокодинамичного транспортного средства. Но и данный метод имеет свои недостатки, среди которых основными можно назвать более сложное схематическое строение, необходимость знания параметров конкретного ТЭД, а также высокую стоимость оборудования.

1.4 Выводы

По итогам исследований различных типов электромеханических, а также электрических преобразователей, было выяснено, что выбор элементов тягового электропривода ограничивается условиями, которые стоят перед инженерами.

Для решения одной из наших задач, а именно определение типа тягового электродвигателя и силового преобразователя с системой управления для электромобилей, решено использовать синхронный двигатель с постоянными магнитами, регулирование которого происходит с помощью трёхфазного инвертора на IGBT-транзисторах, с векторным управлением. Данный подбор ЭМПр и ЭПр основан на следующих важных особенностях для заданного вида ЭПС:

- 1) максимальный КПД;
- 2) минимальные МГП всего привода;
- 3) меньшие тепловые мощности;
- 4) высокодинамичные режимы работы.

2 РАСЧЁТ НЕОБХОДИМОЙ МОЩНОСТИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Второй задачей работы является определение реальной модели электрического двигателя для заданного электромобиля. Это необходимо, так как реальная электрическая машина характеризуется наличием нескольких номинальных параметров. Одной из важнейших таких величин является номинальная мощность тягового электродвигателя, ведь значение мощности определяет динамические показатели транспортного средства, а, помимо этого, с её помощью происходит расчёт электрооборудования ЭПС. Данную величину можно найти различными методами, поэтому в работе будет производиться расчёт мощности ТЭД аналитическим методом и по циклам движения транспорта.

Аналитический метод расчёта предполагает нахождение величины требуемой мощности двигателя на основе требуемых динамических и заданных массогабаритных показателей. Через вычисления необходимой механической мощности для движения при заданных условиях происходит расчёт требуемой электрической мощности электродвигателя.

Нахождение величины требуемой мощности двигателя по циклам движения предполагает построение математической модели в среде MatLAB, где по заданным кривым возможно определить большинство необходимых параметров, таких как ускорение, скорость, мощность, энергия, в любой момент времени.

Прототипом же исследуемого электромобиля является автомобиль *Mazda CX-5*, характеристики которого представлены в таблице 2.1 [23]. Данные характеристики принадлежат комплектации *Active 2.5 AT*. Выбор такого варианта основан на приемлемом для электромобилей кроссоверов разгона, который должен составлять не более 10 с.

Таблица 2.1 – Характеристики автомобиля *Mazda CX-5* комплектации *Active 2.5 AT*

Характеристика	Единица измерения	Значение
Разгон	<i>c</i>	9
Максимальная скорость	<i>км/ч (м/с)</i>	195 (54,2)
Длина	<i>мм</i>	4550
Ширина		1840
Высота		1675
Ширина передней/задней колеи		1595/1595
Клиренс		192
Масса снаряжённая	кг	1598
Передачное число главной передачи	-	4,624

2.1 Аналитический метод

Определение номинальной мощности тягового электродвигателя переменного тока для электроподвижного состава будет определяться согласно [15]:

$$P_{\text{дв.ном}} = \frac{P_m}{k_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{дв}}}; \quad (2.1)$$

где P_T - требуемая на ободу колеса мощность, *Вт*;

$\eta_{\text{пер}} = 0,95$, $\eta_{\text{дв}} = 0,95$ – значения КПД элементов механической передачи и самого двигателя (данные значения являются предварительными и после требуют уточнений);

$k_{\text{пер}}$ - перегрузочный коэффициент (для синхронного двигателя с постоянными магнитами производства «ОРИОН» принимается равным 3...4).

В формуле (2.1) неизвестна величина требуемой мощности P_T . Она рассчитывается по формуле:

$$P_m = F_m \cdot V_{\text{пуск}}^2, \quad (2.2)$$

где F_T – тяговое усилие на ободу колеса, *Н*;

$V_{\text{пуск}} = 100 \text{ км/ч} = 27,8 \text{ м/с}$ – скорость пуска, которая принимается равной конечной скорости разгона.

Требуемая сила тяги F_T :

$$F_m = (1 + \gamma) \cdot m \cdot a_{\text{пуск}} + W_o. \quad (2.3)$$

В данной формуле используются следующие величины:

$I+\gamma = 1,03\dots 1,07$ – коэффициент инерции вращающихся частей автомобиля (для прямой передачи [24]);

m – масса подвижного состава, кг;

$a_{\text{пуск}}$ – пусковое ускорение транспорта, м/с^2 ;

W_o – основные силы сопротивления движению транспорта.

Величина основного сопротивления движению W_o для легкового транспорта является составляющей слагаемых силы качения $W_{\text{кач}}$ и аэродинамического сопротивления $W_{\text{аэр}}$:

$$W_o = W_{\text{кач}} + W_{\text{аэр}}. \quad (2.4)$$

В свою очередь, эти составляющие определяются как

$$W_{\text{кач}} = m \cdot g \cdot f_{\text{удск}}; \quad (2.5)$$

$$W_{\text{аэр}} = S \cdot \alpha \cdot V_{\text{пуск}}^2, \quad (2.6)$$

где $f_{\text{удск}}$ – коэффициент удельного сопротивления качению;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

S – площадь миделевого сечения, м^2 ;

α – коэффициент обтекаемости, $\text{Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$.

Для проведения начальных расчётов необходимо найти массу электромобиля, коэффициент удельного сопротивления качению, площадь миделевого сечения и коэффициент обтекаемости.

Определить точные значения массы изначально не является возможным. Эта величина будет зависеть от массы оборудования, которое изначально требуется убрать из бензинового варианта автомобиля (ДВС, коробка передач, бензопак и пр.) и затем поставить для работы его электрического аналога (ТЭД, электрический силовой преобразователь, батарея и др.), а также комплектации электромобиля. Однако на данном этапе расчётов можно взять приближённое значение массы автомобиля, которая будет зависеть от МГП аналогичных электрокроссоверов. Некоторые из технических характеристик электромобилей [25-28] представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Технические характеристики электромобилей

Марка	Mercedes-Benz EQC	Hyundai Kona Electric	Audi e-tron	Nissan Leaf
Длина, мм	4761	4165	4901	4490
Ширина, мм	1884	1800	1935	1788
Высота, мм	1624	1550	1629	1530
Снаряжённая масса, кг	2495	1610	2565	1580

Предположим, что искомая масса будет равна средней массе электромобилей, ведь по габаритам и комплектации кузовов кроссоверы достаточно близки.

$$m_1 = m_{cp} = \frac{m_2 + m_3 + m_4 + m_5}{4}; \quad (2.7)$$

$$m = \frac{2495 + 1610 + 2565 + 1580}{4} \approx 2060 \text{ кг.}$$

Коэффициент удельного сопротивления качению зависит от типа дорожного покрытия и скорости автомобиля. Рассчитать его значение для легкового автомобиля при движении по асфальту можно с помощью формулы:

$$f_v = (0,01...0,02) \cdot \left(1 + \frac{V^2}{20000} \right); \quad (2.8)$$

$$f_v = 0,015 \cdot \left(1 + \frac{27,8^2}{20000} \right) = 0,0156.$$

Зная массу электромобиля и коэффициент $f_{удск}$, определим одну из составляющих сил сопротивления формулы (2.5):

$$W_{кач} = 2060 \cdot 9,81 \cdot 0,0156 = 315 \text{ Н.}$$

Для решения формулы (2.6) необходимо определить величину миделевого сечения и коэффициента обтекаемости.

Площадь миделевого сечения автомобиля определяется как произведение коэффициента площади миделя $0,9$ на наибольшую колею B электромобиля и на его высоту H .

$$S = 0,9 \cdot B \cdot H; \quad (2.9)$$

$$S = 0,9 \cdot 1595 \cdot 1675 \cdot 10^{-6} = 2,404 \text{ м}^2.$$

Коэффициент обтекаемости примем равным как для электрокроссовера *Audi e-Tron*, как близкого по комплектации кузова к заданному электромобилю, то есть $\alpha = 0,3 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{М}^4$. Тогда, по формуле (2.6):

$$W_{\text{аэп}} = 2,404 \cdot 0,3 \cdot 27,8^2 = 557 \text{ Н},$$

и, соответственно,

$$W_o = 315 + 557 = 872 \text{ Н}.$$

Для дальнейшего расчёта необходимо найти величину пускового ускорения $a_{\text{пуск}}$. Его значение определим по формуле:

$$a = \frac{V_{\text{кон}} - V_{\text{нач}}}{t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}}. \quad (2.10)$$

В данной формуле указаны соответственно конечные и начальные значения скоростей и времени. Начальные значения времени $t_{\text{нач}}$ и скорости $V_{\text{нач}}$ равны 0 (начало движения). Разгон – время достижения транспортом 100 км/ч (27,8 м/с). Примем, что электромобилю удаётся поддерживать постоянным значение ускорения на всём промежутке разгона. Тогда:

$$a = \frac{27,8 - 0}{9 - 0} = 3,09 \text{ м / с}^2.$$

Теперь можно с помощью формулы (2.3) определить необходимое тяговое усилие на ободе колеса:

$$F_m = 1,05 \cdot 2060 \cdot 3,09 + 872 = 7556 \text{ Н}.$$

А требуемая мощность будет равна:

$$P_m = \frac{7556 \cdot 27,8}{1000} = 210,1 \text{ кВт}.$$

Тогда необходимая для нашего электромобиля номинальная мощность двигателя должна быть более:

$$P_{\text{ов.ном}} \geq \frac{210100}{3 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 1000} = 77,6 \text{ кВт}.$$

В результате расчёта данным способом выяснилось, что необходимая величина номинальной мощности тягового электродвигателя должна составлять более $77,6 \text{ кВт}$.

После определения необходимой номинальной мощности ТЭД аналитическим методом приступим к расчёту мощности электрической машины с помощью заданных циклов движения.

2.2 Определение требуемой мощности тягового электрического двигателя по заданному циклу движения

Данный расчёт позволяет по заданным циклам движения при дополнительно заданных массогабаритных показателях отслеживать требуемую динамику движения ЭПС, то есть ускорения, а благодаря его значению определять необходимую мощность. Изначально, полученным результатом является механическая мощность, однако, с учётом КПД тягового электродвигателя и механического преобразователя (трансмиссии), можно получить величину требуемой электрической тягового электродвигателя (двигателей для многодвигательного транспорта).

Для расчётов воспользуемся городским европейским циклом движения US06, который указан на рисунке 2.1 [29].

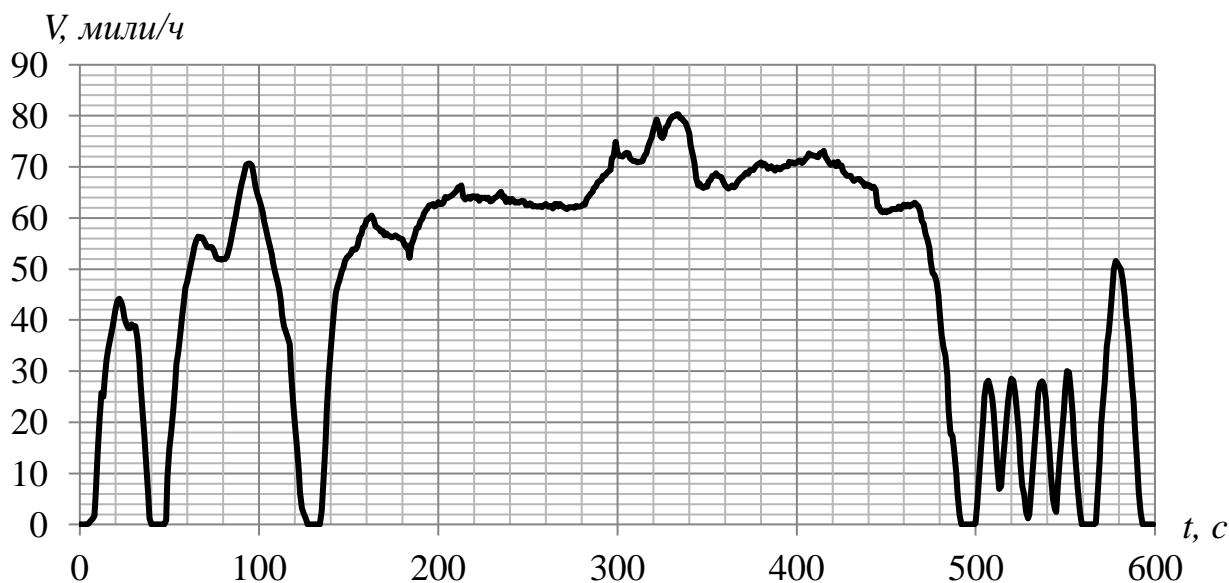


Рисунок 2.1 – Цикл движения US06

Характерной особенностью данного цикла является высокие значения скоростей и ускорений.

Как видно из кривой движения рисунка 2.1, изначальными данными являются значения скорости в различные моменты времени, а результатом расчётов должна стать электрическая мощность ТЭД, то есть из *мили/ч* получить *Вт*.

Если взять за основу аналитический метод, то получается, что для определения требуемой механической мощности P_m необходимо знать значение требуемой действующей силы тяги F_m , в которой, помимо заданной скорости и МГП, необходимо знать величину ускорения. Её можно определить, как производную от скорости, то есть:

$$a = \frac{dV(t)}{dt}, \frac{м}{с^2}. \quad (2.11)$$

При этом значения скорости поступают от самого цикла. Однако, её величина представлена в единицах *мили/ч*, а необходимо получить *м/с*. В среде MatLAB расчёт ускорения будет выглядеть следующим образом.

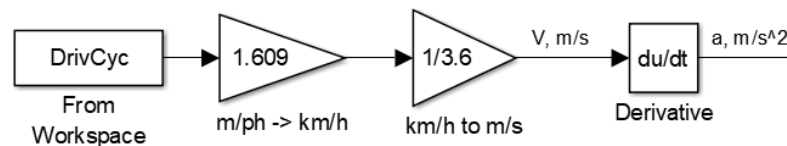


Рисунок 2.2 – Расчёт ускорения

Как видно из рисунка 2.2, с помощью блока *From Workspace* происходит считывание значений скорости. Затем *мили/ч* переводят сначала в *км/ч*, умножением заданной скорости на *1.609*, а после в *м/с*, делением на *3.6*. Ускорение является результатом дифференцирования.

Далее необходимо смоделировать формулу (2.3).

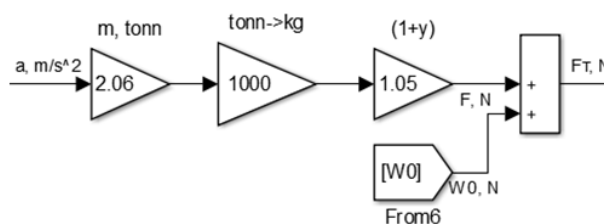


Рисунок 2.3 – Расчёт требуемой силы тяги

На рисунке 2.3 множители 2.06 и 1000 представляют собой массу m , а 1.05 – коэффициент инерции вращающихся частей $1+\gamma$. Совместно с ускорением, данное произведение представляют собой требуемую силу F , а в сумме с W_0 происходит расчёт F_m (необходимое тяговое усилие). При этом модель расчёта основного сопротивления W_0 представлена на рисунке 2.4.

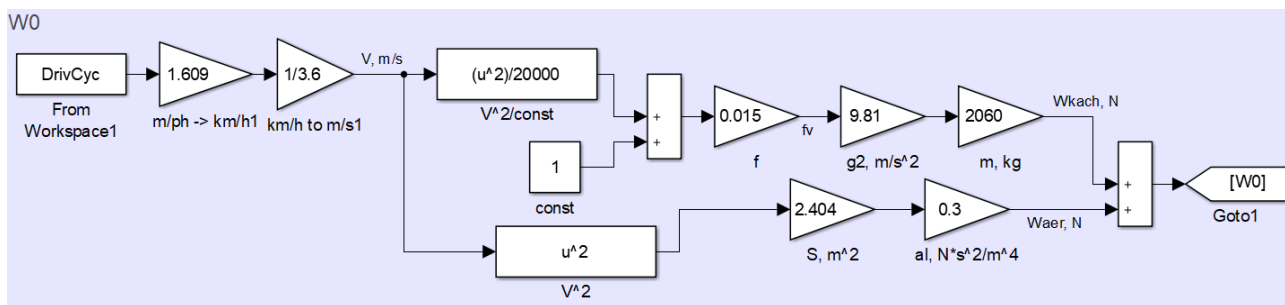


Рисунок 2.4 – Расчёт основного сопротивления движению

Как и для расчёта ускорения, данная часть модели с помощью блока *From Workspace* считывает значения скорости в значении *мили/ч* и переводится в *м/с* (умножение на 1.609 и деление на 3.6). Далее идёт разветвление: верхняя ветвь моделирует формулы (2.5) и (2.8), а нижняя - (2.6), то есть сопротивления качению $W_{кач}$ и аэродинамическое $W_{аэр}$ соответственно. А результатом суммирования становится основное сопротивление W_0 .

Использование блоков *From* и *Goto* позволяет разграничить отдельные части модели, а также уменьшить число ветвей для более простого и компактного представления принципа работы модели в целом.

После определения требуемого усилия F_m можно с помощью умножения на скорость V получить необходимую механическую мощность P_m , то есть нужно смоделировать формулу (2.2). С учётом КПД двигателя и механического преобразователя результатом станет значение электрической мощности.

Совместным результатом расчётов станет часть модели, представленная на рисунке 2.5.

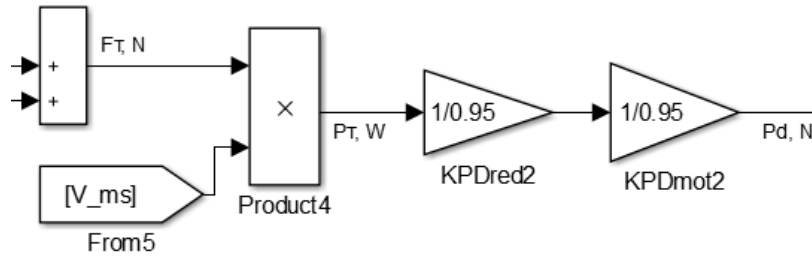


Рисунок 2.5 – Расчёт электрической мощности

Как видно из рисунка, модель не учитывает коэффициент перегрузки. Это связано с тем, что в отличие от аналитического метода подбор двигателя по мощности и его проверка будут производиться методом среднеквадратичной мощности, основанного на методе среднеквадратичного тока [30]. Основная формула данного метода

$$I_{\infty} \geq I_{ср.кв} \cdot \sqrt{\frac{B_{\infty}}{B_0} \cdot K_n \cdot K_{\theta} \cdot K_3} \quad (2.12)$$

А в нашем случае:

$$P_{\infty} \geq P_{ср.кв} \cdot \sqrt{\frac{B_{\infty}}{B_0} \cdot K_n \cdot K_{\theta} \cdot K_3} \quad (2.13)$$

где $P_{ср.кв}$ – среднеквадратичное значение мощности, *Вт*;

B_{∞}/B_0 – отношение теплоотдач (для двигателей с независимой или самовентиляцией равно *единице*);

K_n – коэффициент неравномерности распределения нагрузки между двигателями (при одном двигателе на поезде равен *1*);

K_{θ} – температурный коэффициент;

K_3 – коэффициент запаса, который в нашем случае принимается равным коэффициенту перегрузки, то есть *3*.

Температурный коэффициент K_{θ} рассчитывается как

$$K_{\theta} = \frac{\tau_{ндл}}{\tau_{ндл} + 25 - \theta_0}, \quad (2.14)$$

где θ_0 – температура окружающей среды;

$\tau_{н\text{дл}}$ – допустимый нормируемый перегрев, соответствующий классу изоляции.

Однако значение температуры θ_0 не оговаривается в расчётах, поэтому принимаем K_θ равным единице.

Среднеквадратичное значение мощности будет рассчитываться следующим образом:

$$P_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 \cdot \Delta t_i}{T}}, \quad (2.15)$$

или

$$P_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (P(t))^2 dt}, \quad (2.16)$$

где T – время цикла, с.

В среде MatLAB данная часть расчётов будет выглядеть как показано на рисунке ниже.

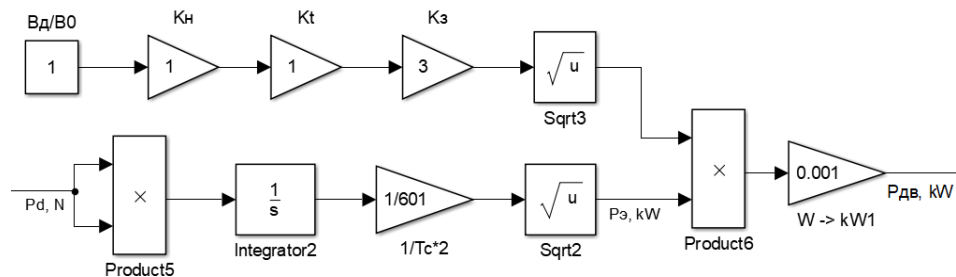


Рисунок 2.6 – Расчёт номинальной мощности двигателя

В результате, модель для расчёта мощности тягового электродвигателя по циклам движения методом среднеквадратичной мощности представлена на рисунке 2.7.

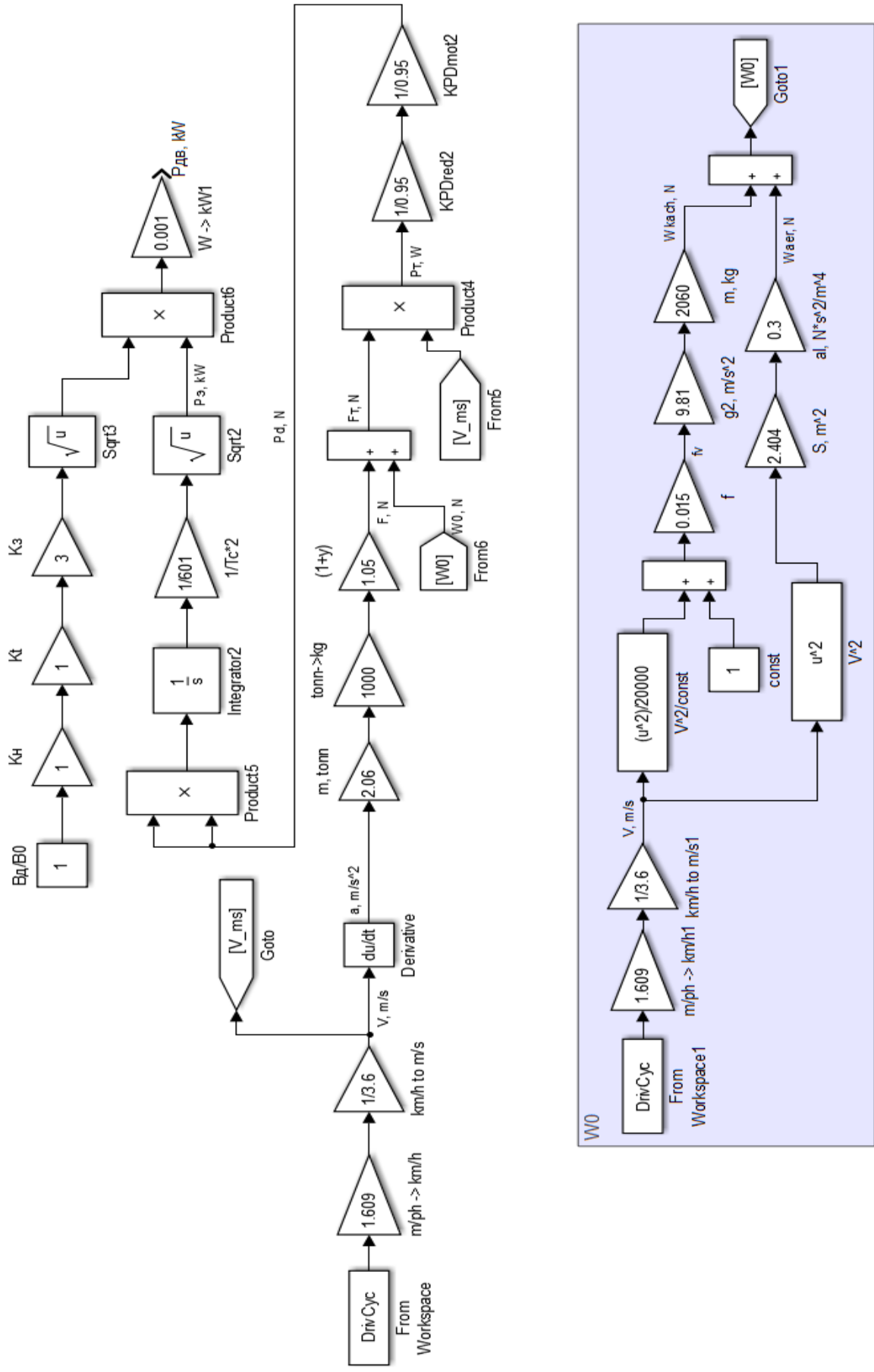


Рисунок 2.7 – Расчёт номинальной мощности двигателя

2.3 Расчёт номинальной мощности электродвигателя и силового преобразователя

Расчёт мощности производится по модели, представленной на рисунке 2.7. Цикл *US06*, который будет использоваться, позволит получить максимальную необходимую величину, так как, как описывалось ранее, данный цикл характеризуется большими значениями скоростей и ускорений и, соответственно, большими величинами мощности двигателя.

В среде MatLAB принцип работы модели заключается в следующем. С помощью блока *From Workspace* происходит считывание данных цикла. Эти данные представлены таблицей, изображённой на рисунке 2.8.

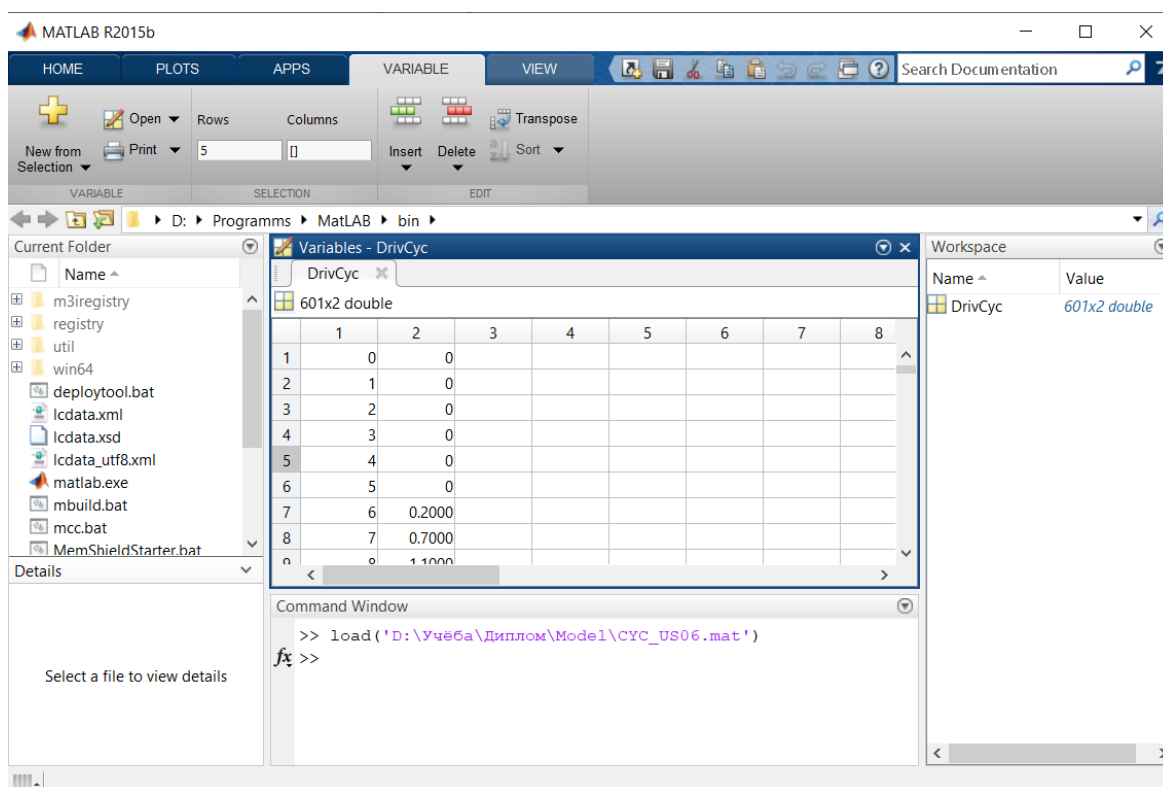


Рисунок 2.8 – Таблица данных цикла движения US06

Как видно из рисунка, в таблице первый столбец представляет собой значения оси времени цикла в *с*; второй столбец – значения скорости в *мили/ч*. Название таблицы *DrivCyc* предполагает, что блоку *From Workspace* необходимо ссылаться на это название. Настройки блока представлены на рисунке 2.9.

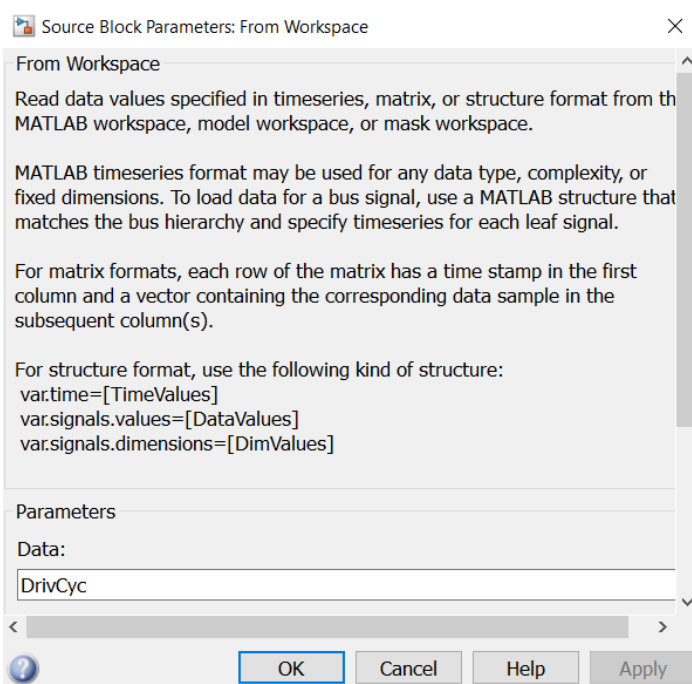


Рисунок 2.9 – Настройки параметров блока From Workspace

Установив время окончания моделирования равное времени протекания цикла движения (601 с), дисплей, который отобразит результат моделирования, а также связь между моделью и таблицей данных цикла, на дисплее отобразится результат моделирования цикла, который можно наблюдать на рисунке 2.10.

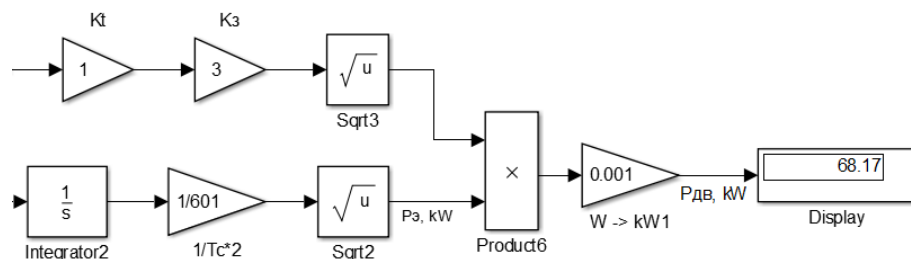


Рисунок 2.10 – Дисплей с результатом расчёта модели

Как видно из рисунка, среднеквадратичная требуемая номинальная электрическая мощность двигателя $P_{\text{дл}}$ должна быть более 68,17 кВт. Данное значение соответствует расчёту по циклам движения, в то время как аналитическим методом необходимая электрическая мощность равна 77,6 кВт. Значения относительно друг друга близки, однако предпочтение отдаётся методу среднеквадратичной мощности, используемому в расчётах по циклам. Данный выбор обоснован тем, что последний имеет ограничение в динамических

показателях, которые задаются наиболее «тяжёлым» циклом (с максимально возможными значениями скоростей и ускорений), в то время как для аналитического метода динамика ограничивается требованиями проектировщика.

Условию требуемой номинальной мощности тягового электродвигателя по методу среднеквадратичной мощности удовлетворяют синхронные двигатели с постоянными магнитами производства «ОРИОН-МОТОР». Характеристики двигателя серии «ОРИОН-18-2М» представлены в таблице 2.3 [31].

Таблица 2.3 – Характеристики двигателя «ОРИОН-18-2М-02»

Параметры двигателя	Единица измерения	Значение
Номинальная мощность	<i>кВт</i>	69
Часовая мощность	<i>кВт</i>	83
КПД	%	98,05
Тепловая мощность	<i>Вт</i>	527
Номинальное напряжение питания (3фазы)	<i>В</i>	380/690
Максимальная частота напряжения питания	<i>Гц</i>	500
Номинальный/пусковой момент	<i>Н·м</i>	329/987
Максимальная температура обмотки/ротора	<i>°С</i>	180/100
Диаметры ротора/статора	<i>мм</i>	289/390
Масса двигателя	<i>кг</i>	94,7

А управлять данным ТЭД будет тяговый инвертор производства «Диада Групп», параметры которого представлены в таблице 2.4 [32].

Таблица 2.4 – Параметры тягового инвертора «DTI-100H»

Параметры преобразователя	Единица измерения	Значение
Номинальная мощность	<i>кВт</i>	100
Номинальный/максимальный выходной ток	<i>А</i>	125/250
Диапазон напряжения питания	<i>В</i>	48-700
КПД	%	97-98,4
Габаритные размеры	<i>мм</i>	260x110x330
Масса	<i>кг</i>	8,8
Управление	-	векторное

2.4 Выводы

В ходе расчётов необходимой электрической мощности тягового электродвигателя для электромобиля на основе автомобиля *Mazda CX-5* использовались аналитический метод и расчёт по кривым движения, предпочтение которому было предоставлено в ходе сравнения решений.

По результатам последнего удалось определить необходимую электрическую мощность двигателя (68,17 кВт), определить модели синхронного ТЭД («ОРИОН-18-2М-02» с номинальной мощностью 69 кВт), который удовлетворяют заданному по методу требованию, и тягового инвертора («DTI-100Н» с номинальной мощностью 100 кВт) и их характеристики.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ НА ТРЕБУЕМУЮ МОЩНОСТЬ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Третьей задачей работы является определение, исследование и анализ того, каким образом изменение исходных данных повлияют на параметры электромобиля, к которым можно отнести:

- скорость;
- ускорение;
- потребляемая тяговым электродвигателем электрическая мощность (с учётом коэффициента перегрузки);
- среднеквадратичная электрическая мощность.

К изменяемым данным, которые могут различаться в течение движения ЭПС, относятся:

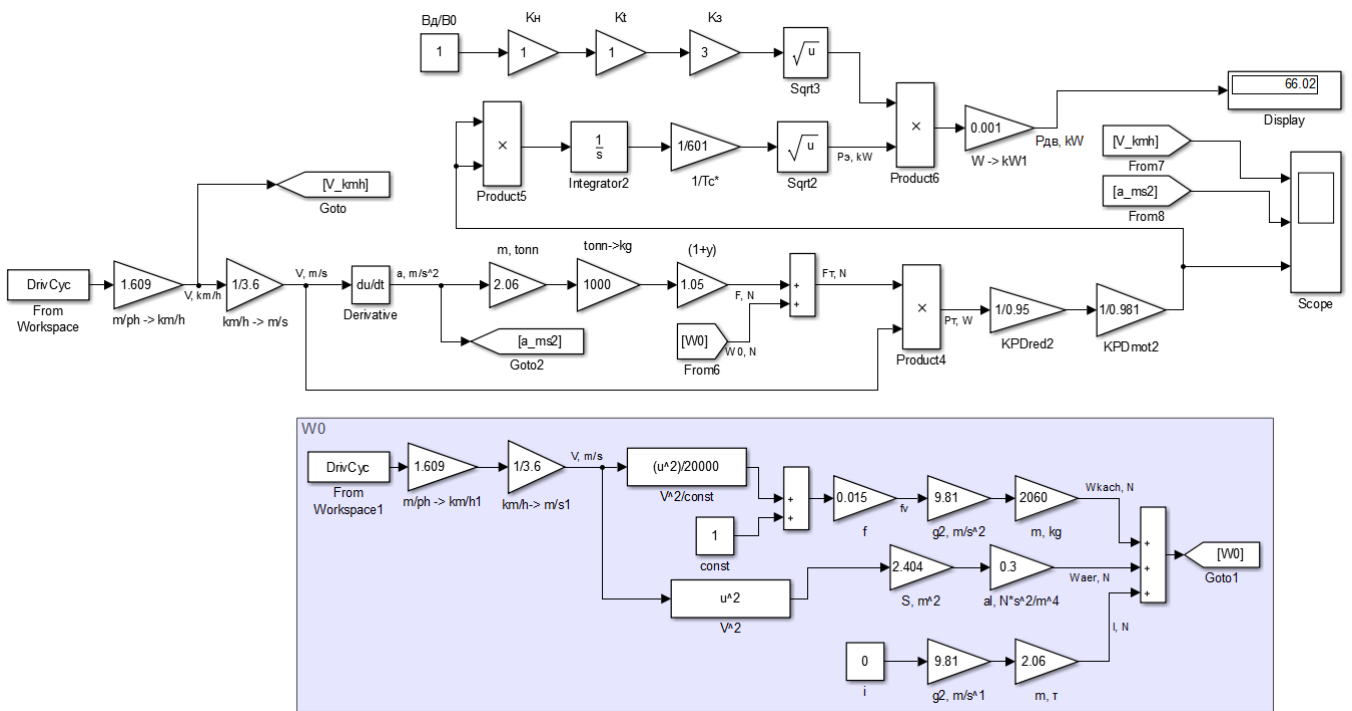
- 1) цикл движения;
- 2) масса электромобиля;
- 3) профиль пути.

Первое может изменяться в результате смены территории передвижения. Цикл *US06*, например, может характеризовать движение за городом, где поток машин меньше, а значит можно добиться высоких показателей скоростей и ускорения. Однако цикл *UDC* соответствует уже перемещению по городу, в котором, из-за более высокого потока транспорта, попросту невозможно добиться уже высокой динамики.

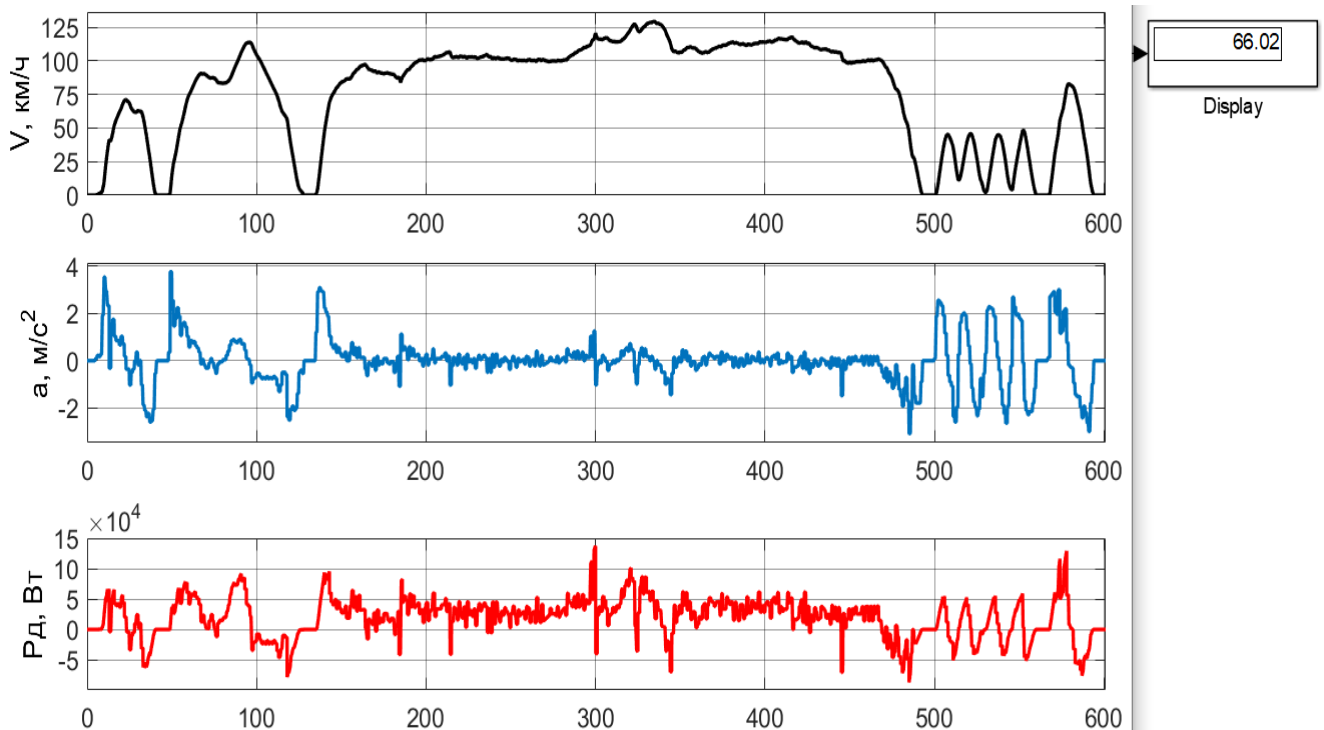
Изменение массы электромобиля обусловлено возможностью в ходе движения смены количества пассажиров и/или добавлении дополнительного груза.

Третий пункт обусловлен неравномерностью дорожного покрытия, а точнее его уклона. Изменение основного сопротивления движению вследствие добавления новой составляющей повлечёт за собой увеличение затрат мощности (на преодоление пути в уклон) или же их уменьшение (при движении на спуске).

Для исследования поведения параметров потребуется немного изменить модель. Её вид (для цикла *US06*) представлен на рисунке 3.1 (а), а параметры электромобиля можно наблюдать на рисунке 3.1 (б).



а)



б)

Рисунок 3.1 – Модель расчёта (а) и диаграмма параметров *Scope* с *Display* (б)

Как видно из рисунка 3.1 (а), в модели изменено значение КПД двигателя на паспортное значение и добавлены новая ветвь в расчётах сопротивления W_0 , которая учитывает профиль пути, блок *Scope*, позволяющий считывать значения скорости, ускорения и электрической мощности двигателя, и блок *Display*, отображающий среднеквадратичное значение электрической мощности двигателя.

3.1 Исследование различных циклов движения

Помимо исходного цикла движения *US06*, который изображён на рисунке 2.1, дополнительно будут рассмотрены циклы *EUDC* и *ECE (UDC)*. В отличие от загруженного первого цикла, последние два представляют собой циклы движения внутри города, а также характеризуются более низкими значениями скоростей и ускорений. Для начала рассмотрим цикл *EUDC*, представленный на рисунке 3.2.

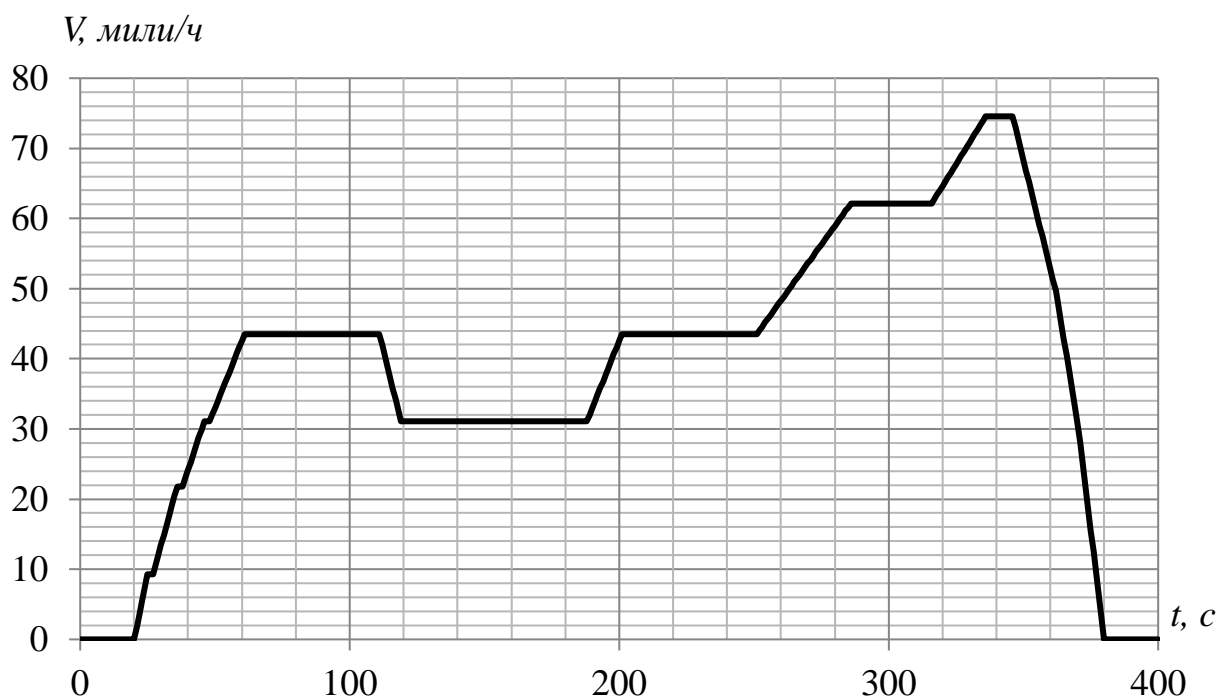


Рисунок 3.2 – Цикл движения *EUDC*

Длительность данного цикла составляет 400 секунд. Данный фактор необходимо учесть при расчётах внутри модели.

Смоделированные параметры электромобиля по данному циклу представлены на рисунке 3.3.

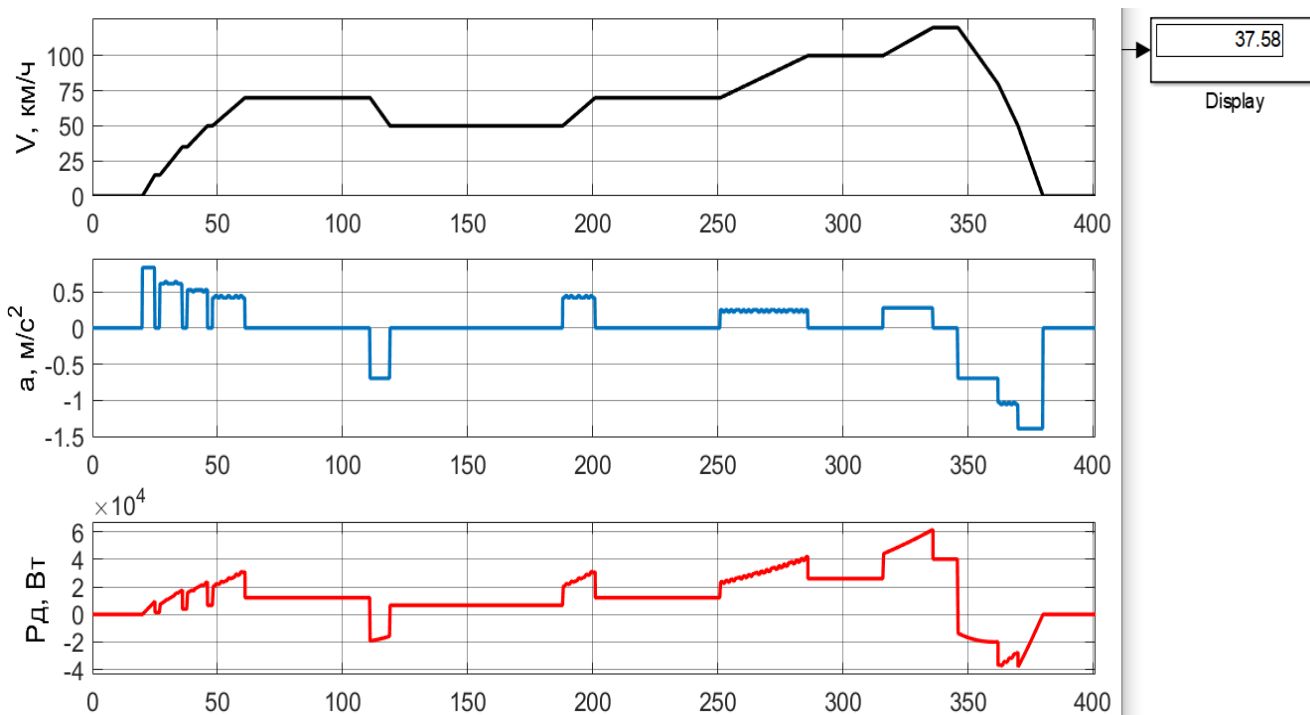


Рисунок 3.3 – Диаграмма цикла движения *EUDC*

Следующий исследуемый цикл движения – *ECE*. Его вид можно наблюдать на рисунке 3.4.

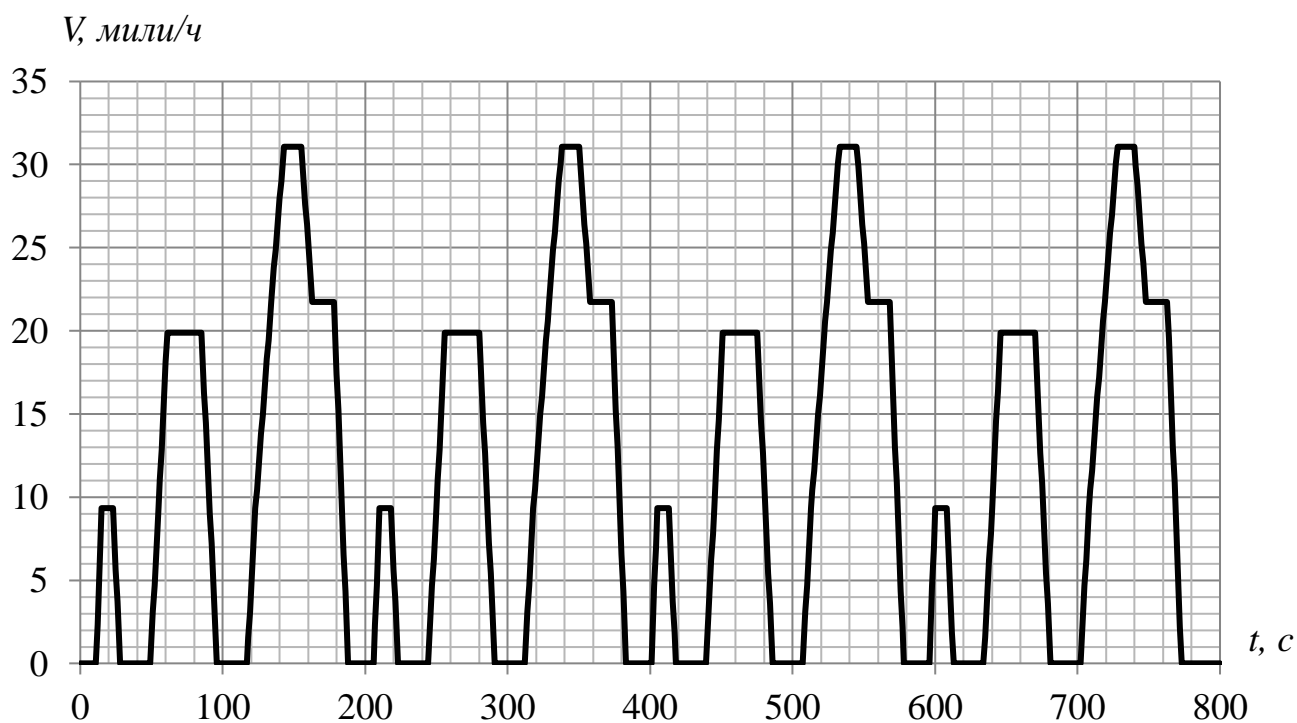


Рисунок 3.4 – Цикл движения *ECE*

Длительность цикла *ECE* равна 800 секундам. Скорость и ускорение, развиваемые электромобилем, а также абсолютные и среднеквадратичное значения электрической мощности показаны на рисунке 3.5.

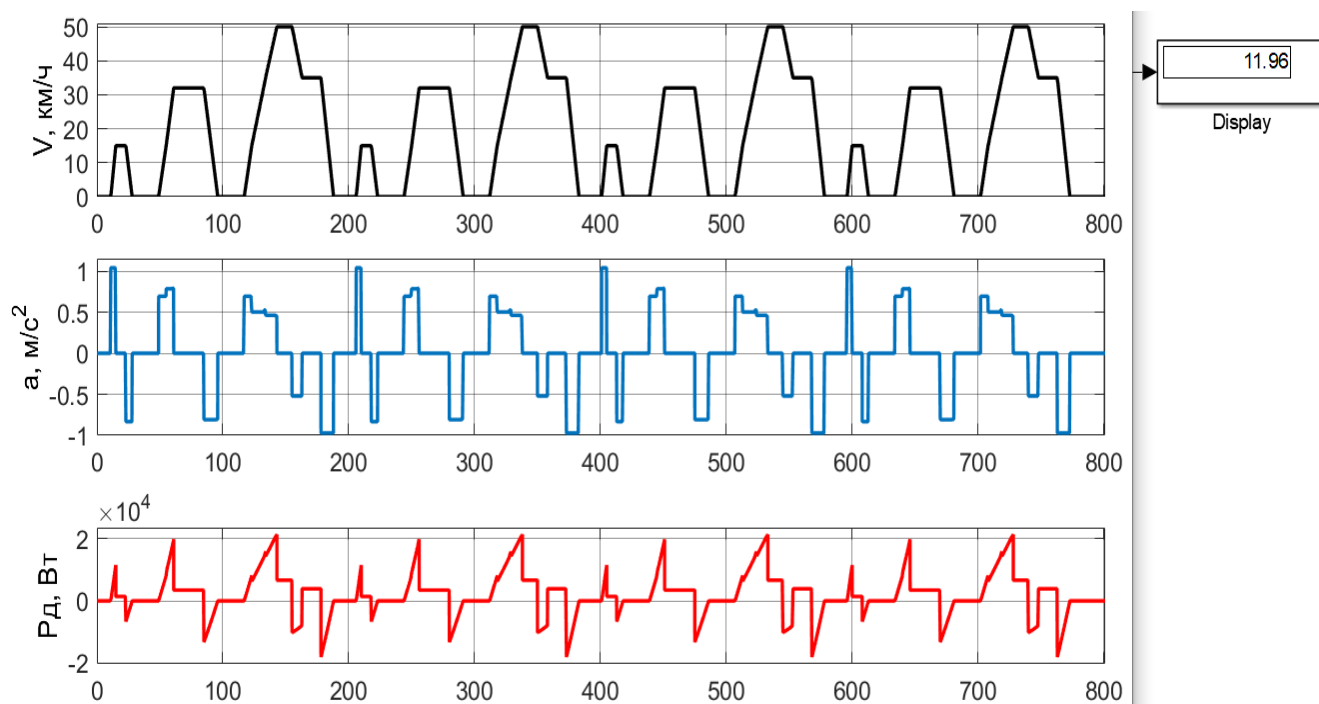


Рисунок 3.5 – Диаграмма цикла движения *ECE*

Для удобства анализа данных построим таблицу 3.1, в которой распишем некоторые параметры циклов.

Таблица 3.1 – Параметры циклов

Исследуемая величина	Единица измерения	Значение		
		US06	EUDC	ECE
Максимальная скорость	км/ч	129	120	50
Максимальное ускорение	м/с ²	3,75	(-)1,34	1,04
Максимальная электрическая мощность	кВт	137,4	61,52	21,3
Длительность цикла	с	600	400	800
Среднеквадратичная мощность	кВт	66,02	37,58	11,96

По данным таблицы 3.1 можно увидеть, что среди трёх сравниваемых циклов *US06* обладает максимальными показателями скорости и силы (соответственно максимальной и среднеквадратичной электрической мощностями). Из-за этого данный цикл и использовался для определения необходимой мощности ТЭД.

Цикл *EUDC* обладает средними показателями, но с большой максимальной скоростью. Такой цикл характерен для движения по автомагистралям.

Третий цикл *ECE* характеризуется самыми низкими показателями максимальной скорости и максимального ускорения. Такие параметры соответствуют городскому движению, где допустимая скорость относительно низкая, а плотность транспортных средств не позволяет динамично передвигаться транспорту.

То есть по циклам движения можно сделать следующий вывод: чем выше максимальная скорость в цикле движения и чем существеннее её изменения за наименьший промежуток времени (ускорение), тем больше величина максимальной электрической мощности. А чем больше происходит таких перепадов скоростей, тем выше значение среднеквадратичной мощности.

3.2 Исследование влияния массы электромобиля

Как было описано выше, масса электромобиля может меняться в зависимости от количества пассажиров, а также дополнительной нагрузки в виде багажа. Для сравнения, со снаряжённой массой электромобиля (принятой равной 2060 кг) рассмотрим случаи полной комплектации пассажирами (дополнительно 4 пассажира) и достижения допустимой полной массы машины. Тогда

$$m_1 = m + m_{дон}, \quad (3.1)$$

где $m_{дон}$ – дополнительная масса.

В первом случае прибавим к массе электромобиля массу четырёх пассажиров. С учётом 4 пассажиров, у которых масса в среднем составляет 70 кг, получим:

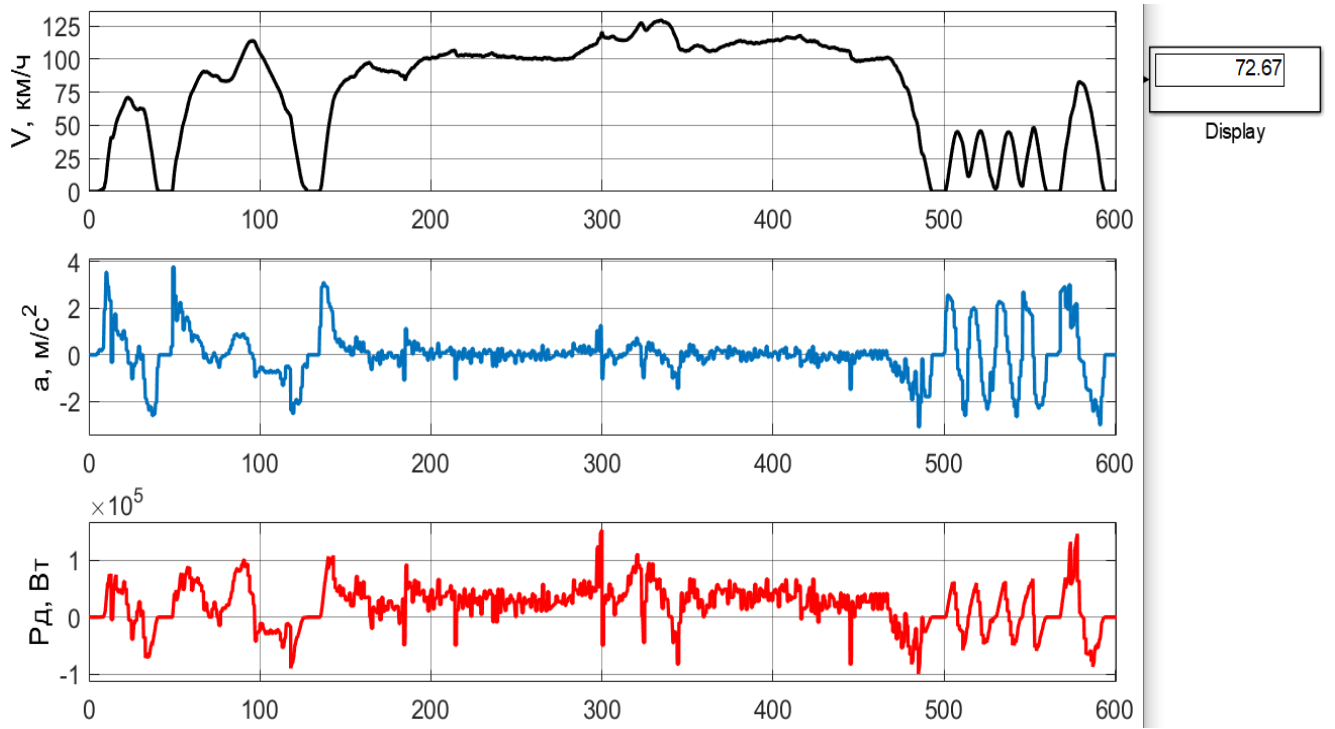
$$m_1 = 2060 + 4 \cdot 70 = 2340 \text{ кг.}$$

Во втором случае учитывается максимальная грузоподъёмность автомобиля, которая по паспортным данным составляет 542 кг. Тогда

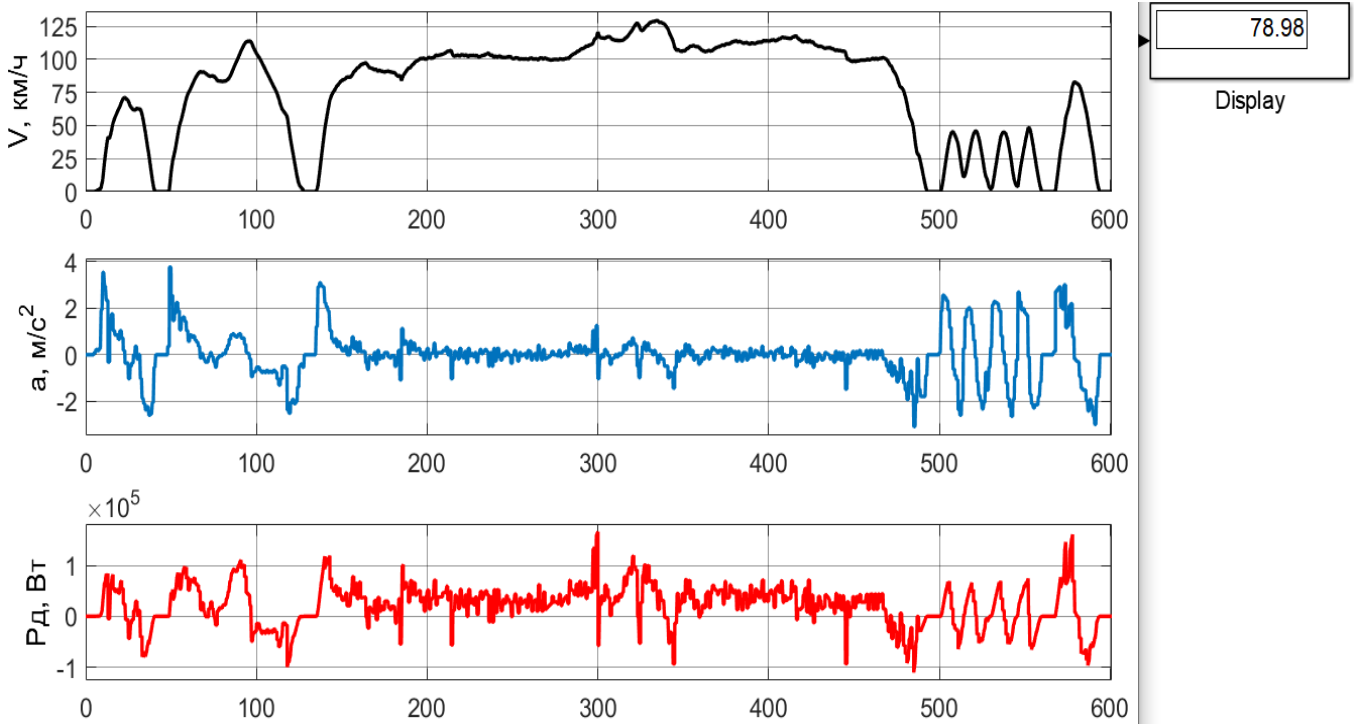
$$m_1 = 2060 + 542 = 2602 \text{ кг.}$$

Исследования будут проводиться для цикла *US06*, так как при больших значениях параметров, которые исследовались при разных циклах движения, разница будет нагляднее отображена.

Диаграммы цикла при разных массах отображены на рисунках 3.6 (а) и 3.6 (б).



a)



б)

Рисунок 3.6 – Диаграммы цикла движения при 2340 кг (а) и 2602 кг (б)

Как и в случае циклов, для удобства создадим таблицу 3.2, где сравним некоторые исследуемые параметры.

Таблица 3.2 – Параметры цикла

Исследуемая величина	Единица измерения	Значения при массе m , кг		
		2060	2340	2602
Максимальная скорость	км/ч	129	129	129
Максимальное ускорение	м/с ²	3,75	3,75	3,75
Максимальная электрическая мощность	кВт	137,4	152,2	166,1
Среднеквадратичная мощность	кВт	66,02	72,67	78,98

По данным таблицы видно, что изменения массы приводит к практически прямо пропорциональному изменению максимальной и среднеквадратичной мощностей. То есть:

$$\frac{2340}{2060} = 1,136 \neq \frac{152,2}{137,4} = 1,108 \neq \frac{72,67}{66,02} = 1,101.$$

Полной пропорциональности препятствует аэродинамическая составляющая сил сопротивления движению, в которой нет прямого учёта массы электромобиля.

При этом при полной загруженности электромобиля (2602 кг) требуемая мощность двигателя среднеквадратичная составляет 78,98 кВт. Эта величина больше номинальной и меньше часовой мощности ТЭД «ОРИОН-18-2М-02», равные соответственно 69 и 83 кВт и меньше номинальной мощности «DTI-100H», равной 100 кВт. Это означает, что в случае максимальной загруженности электромобиль не может бесконечно долго работать по циклу US06. Однако поддерживать движение в течение продолжительного времени вполне возможно.

3.3 Исследование влияния профиля пути

Хоть уклон, как составляющая сил сопротивления, и является слагаемым, он, в отличие от массы, в течение всего цикла движения может быть как положительной величиной, так и отрицательной. Поэтому по мере прохождения цикла затраты по мощности на преодоление какого-либо участка пути могут быть как больше значения, которое учитывалось без уклона, так и меньше его.

Отрицательные значения уклона понизят потребляемую мощность двигателя. А поэтому лучше рассмотреть случай, когда профиль пути увеличивает силы

сопротивления, чтобы исследовать зависимость между этим самым уклоном и электрическими мощностями.

Однако, как говорилось ранее, величина уклона в течение всего цикла может быть и чаще всего бывает величиной не постоянной. Из-за этого необходимо знать среднее значение уклона, которое можно использовать уже ко всему циклу.

Для нахождения этой величины воспользуемся программой *Google Earth Pro*. С её помощью, можно выделить участки пути, по которым происходит передвижение, и рассмотреть рельеф, который соответствует заданному участку.

Так как в ходе исследования влияния массы электромобиля на требуемую мощность ТЭД использовался цикл *US06*, для анализа влияния уклона используем этот же цикл. Это также позволит узнать о возможности движения электромобиля при максимальной «сложности» с выбранным оборудованием, то есть по самому «тяжёлому» циклу, при полной загрузке транспорта и при подъёме. Так как исходный цикл является загородным, то и путь, по которому будет передвигаться электромобиль, стоит взять за городом.

В течение цикла *US06* транспорт преодолевает путь, длиной 12890 м. Значит, для исследования необходимо также прокладывать в программе *Google Earth* дороги той же длины. Эти дороги представим выездами из города Новосибирск. В программе измерения будут выглядеть так, как представлено на рисунке 3.7.

Среди исследуемых автомобильных дорог сравнения проводились между участками:

- 50К-19Р (выезд: Новосибирск – Журавлёво);
- Р254 (выезд: Новосибирск – Мошково и Новосибирск - Чулым);
- 50К-17Р (выезд: Новосибирск – Ордынское);
- Р256 (выезд: Новосибирск – Бердск).

Из перечисленных участков наибольшим средним уклоном обладает 50К-19Р. Участок имеет следующие параметры:

- 1) Длина: 12890,5 м;
- 2) Минимальная/средняя/максимальная высота: 175/219/246 м;
- 3) Максимальный уклон в прямом/обратном направлении: 75/126 $^{\circ}/_{00}$;

4) Средний уклон: 23 ‰.

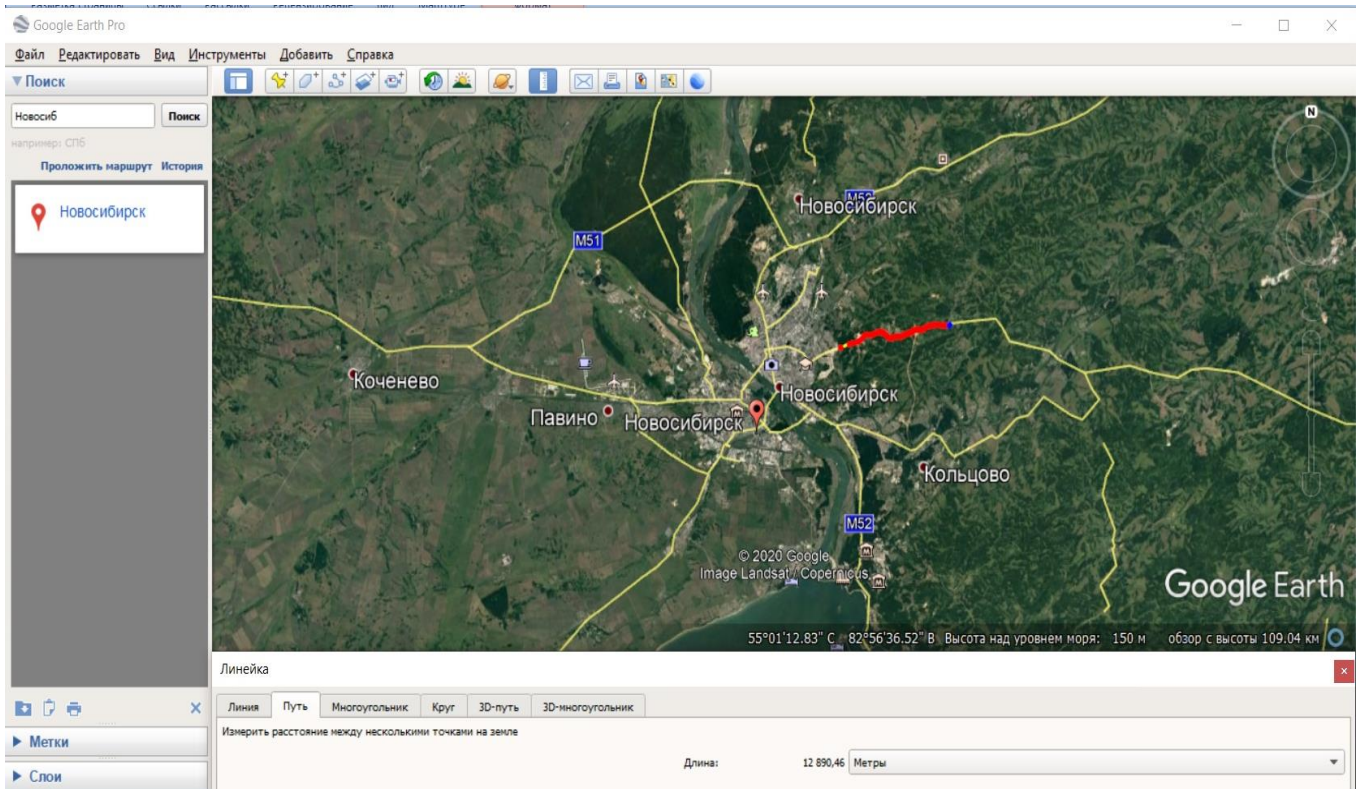


Рисунок 3.7 – Интерфейс *Google Earth Pro*

Участок пути и график рельефа подробнее можно наблюдать на рисунке 3.8.

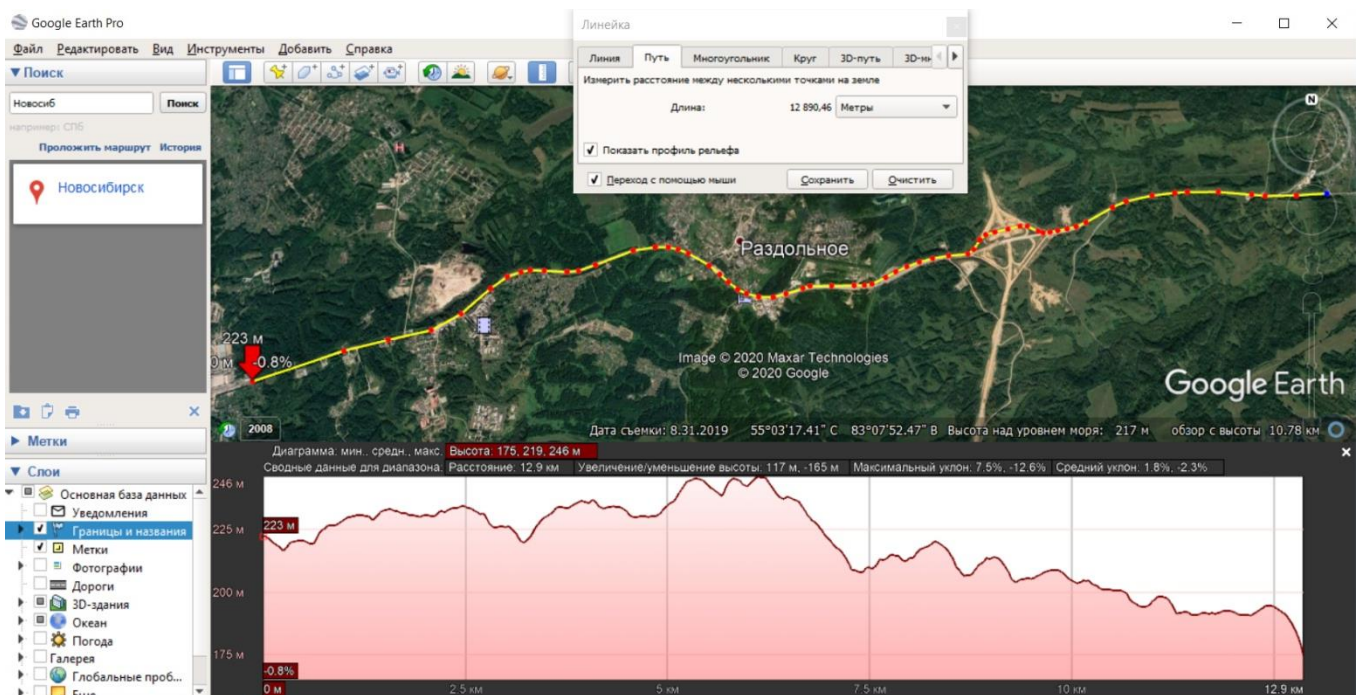
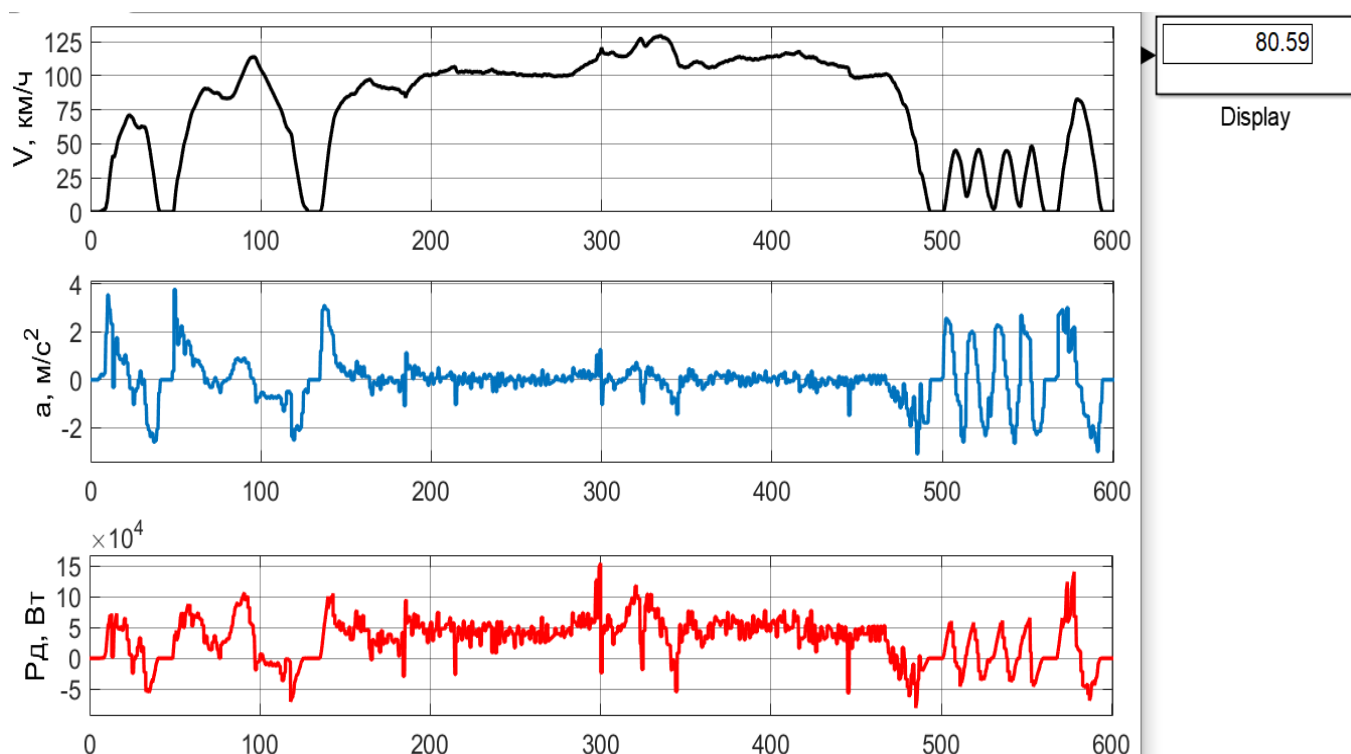
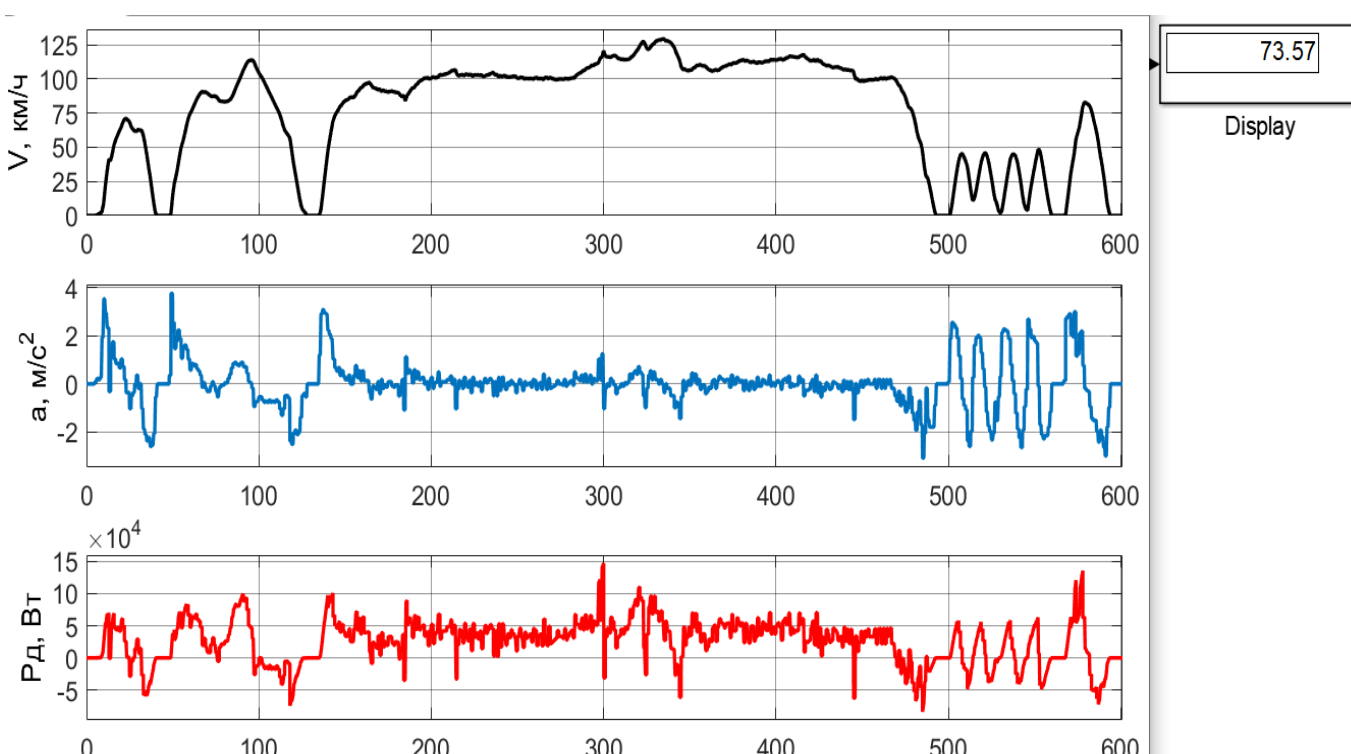


Рисунок 3.8 – Участок автомобильной дороги 50К-19Р

С учётом профиля пути, а также при массах электромобиля 2060 кг и 2602 кг получим диаграммы с дисплеем, представленные на рисунках 3.9 (а), 3.9 (б) и 3.10.



а)



б)

Рисунок 3.9 – Диаграммы цикла движения при массе 2060 кг и уклонах 23 (а) и 12,5 ‰ (б)

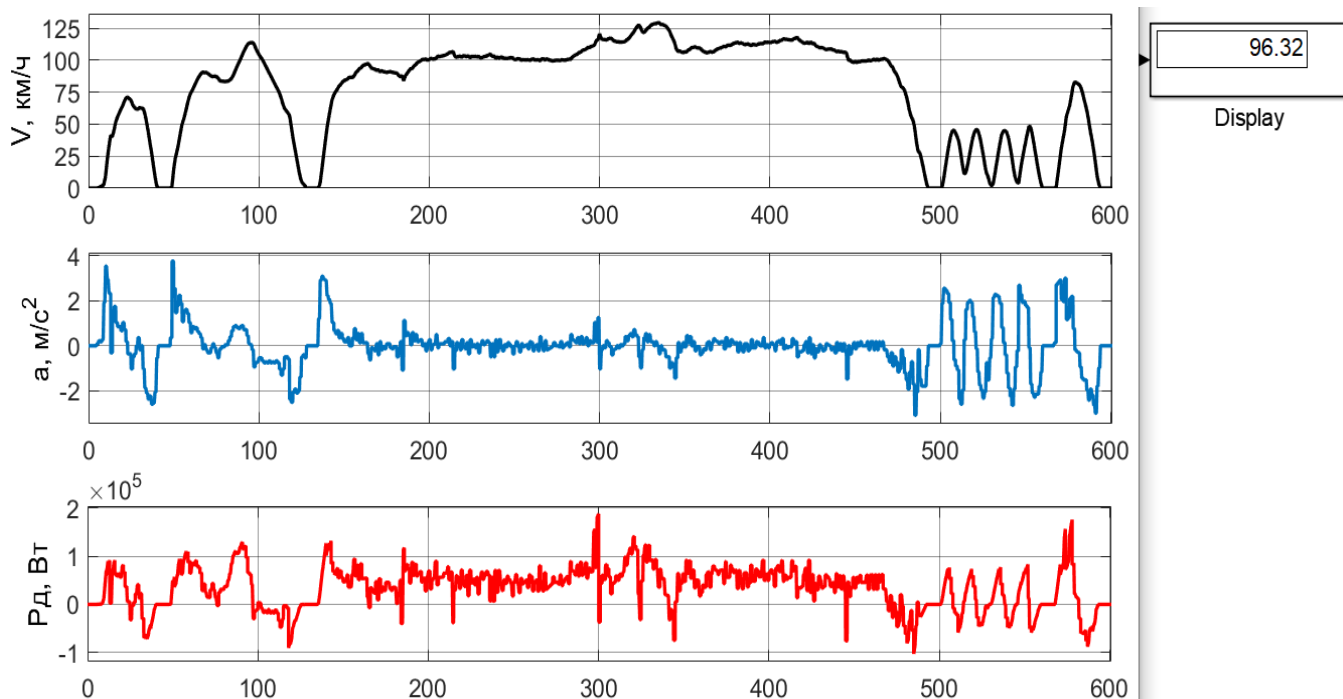


Рисунок 3.10 – Диаграмма цикла движения при массе 2602 кг и уклоне 23 ‰.

Как видно из рисунков, величина уклона может существенно повлиять на величину требуемой электрической мощности тягового двигателя. Проанализируем полученные параметры с помощью таблицы 3.3.

Таблица 3.3 – Параметры цикла

Исследуемая величина	Единица измерения	Значения при уклоне i , ‰			
		0	12,5	23	23
Масса	кг	2060	2060	2060	2602
Максимальная скорость	км/ч	129	129	129	129
Максимальное ускорение	м/с ²	3,75	3,75	3,75	3,75
Максимальная электрическая мощность	кВт	137,4	146,8	154,4	187,3
Среднеквадратичная мощность	кВт	66,02	73,57	80,59	96,32

Расчет модели показал, что в случае полной загрузки электромобиля и при движении в подъём возникает возможность перегрева двигателя – величина среднеквадратичной мощности составляет 96,32 кВт, что больше часовой мощности двигателя «ОРИОН-18-2М-02», которая равна 83 кВт. Это говорит о том, что требуется увеличение мощности ТЭД (тяговый инвертор имеет номинальную мощность в 100 кВт и поэтому продолжит безаварийную работу). В ином случае это приведет к невозможности сохранять заданную динамику транспортного средства.

Скорее следует допустить некоторое снижение динамических параметров в реальных условиях эксплуатации, нежели увеличивать мощность привода. Ведь в городских условиях движения эта мощность будет избыточна, что приведет к низкой загрузке электрооборудования и, как следствие, к снижению энергетической эффективности всего привода.

3.4 Выводы

В ходе исследования влияния исходных данных на величины электрической мощности тягового электродвигателя были выявлены следующие результаты:

- 1) для удовлетворения заданной по циклам *US06*, *EUDC*, *ECE* динамики требуемая номинальная мощность электродвигателя и силового преобразователя должна быть больше расчётных среднеквадратичных значений, то есть 66,02; 37,58 и 11,96 *кВт* соответственно;
- 2) загруженный электромобиль (и в случае нагрузки только пассажирами, и в случае максимальным весом) бесконечно долго ездить не сможет, однако в таком режиме можно передвигаться достаточно долгое время – превышения часовой мощности двигателя нет;
- 3) при движении в уклон с массой более снаряжённой (2060 *кг*) необходимо ограничение в динамике цикла, что более рационально, чем увеличение мощности синхронного двигателя.

4 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

4.1 Определение стоимости комплекта «ОРИОН-18-2М-02» и «DTI-100H»

Определение стоимости тягового электрического двигателя и тягового инвертора является непростой задачей. Всё дело в том, что наиболее часто, при попытке узнать цену силового электрооборудования, это самое оборудование попросту её не имеет. И наиболее это заметно при поисках именно *тягового* электрооборудования с относительно большой номинальной мощностью (более 50 кВт).

Чаще всего пользователь попросту не может узнать стоимость той или иной комплектующей на сайте производителя, так как приходится узнавать цену через связь с менеджерами. При этом связь эта ещё чаще запрашивается как для юридического лица, что в свою очередь требует заполнения определённой контактной информации.

Поэтому, для решения этой проблемы, рассчитаем возможные затраты на покупку комплекта «ОРИОН-18-2М-02» и «DTI-100H». Производить расчёт стоимости будем относительно электромобиля *Nissan Leaf*, так как этот электрокроссовер имеет близкие габаритные показатели и похожую комплектацию кузова. А установленный на него синхронный электродвигатель *EM57* имеет максимальную мощность в 160 кВт.

К сожалению, даже для этого двигателя тяжело найти стоимость заказа от производителя. Поэтому воспользуемся данными, где продаётся б/у модель. На одном из сайтов продажи запчастей для различных транспортных средств *QX9.ru* удалось найти двигатель в наилучшем из предложенных вариантов. Имеет хорошее внешнее и «внутреннее» (двигатель от 2019 года) состояние [33]. Стоимость двигателя в полной сборке (с инвертором) 150 000 руб. Представим, что двигатель в хорошем состоянии, но бывший в употреблении. Тогда его стоимость от производителя составляет около 70%. Соответственно полная цена новой модели будет равна:

$$P_{зав} = P_{б/у} \cdot \frac{100\%}{70\%}, \quad (4.1)$$

где $P_{зав}$ – заводская стоимость, руб;

$P_{б/у}$ - стоимость б/у, руб.

Подставив значения в формулу (4.1) получим:

$$P_{зав} = 150000 \cdot \frac{100\%}{70\%} = 214286 \text{ руб.}$$

Это полная стоимость всего комплекта.

Цена инвертора для двигателя *EM57* под заказ составляет 72817 руб. Тогда стоимость двигателя составит:

$$P_{дв} = P_{зав} - P_{инв}, \quad (4.2)$$

$$P_{дв} = 214286 - 72817 = 141469 \text{ руб.}$$

Из всего этого следует, что ориентировочная стоимость комплекта «ОРИОН-18-2М-02» и «DTI-100H» равна примерно 214286 руб., из которой стоимость электродвигателя составит около 141469 руб, а инвертора 72817 руб. При этом процентное отношение элементов ко всему комплекту равно:

$$P_{i,\%} = \frac{P_i}{P_{зав}} \cdot 100\%; \quad (4.3)$$

$$P_{инв,\%} = \frac{72817}{214286} \cdot 100\% \approx 34 \%;$$

$$P_{дв,\%} = \frac{141469}{214286} \cdot 100\% \approx 66 \%.$$

4.2 Выводы

По итогам экономического раздела было выявлено, что напрямую рассчитать стоимость силового тягового электрооборудования для электромобиля является сложной задачей. Поэтому был произведён косвенный расчёт, через комплектующие электромобиля *Nissan Leaf*. Ориентировочные значения цен, которые были определены в главе, представим в виде таблицы 4.1.

Таблица 4.1 – Стоимость электрооборудования

Элемент электрооборудования	Модель	Стоимость	
		<i>руб.</i>	<i>%</i>
Тяговый электродвигатель	ОРИОН-18-2М-02	141469	66
Тяговый инвертор	ДИ-100Н	72817	34
Комплект	-	214286	100

5 ОХРАНА ТРУДА

5.1 Анализ вредных и опасных факторов, меры защиты от них

Вредный производственный фактор – это производственный фактор, воздействие которого на работающего человека в определённых условиях приводит к заболеванию или снижению работоспособности. *Опасный производственный фактор* – фактор среды и трудового процесса, который может быть причиной острого заболевания или внезапного резкого ухудшения здоровья, а также смерти.

В зависимости от интенсивности и продолжительности действия, отдельные вредные производственные факторы могут стать опасными. Наиболее опасным производственным фактором, при эксплуатации и ремонте электрооборудования, является поражение электрическим током. При прохождении через тело человека электрический ток производит электролитическое и термическое действия. Первое проявляется в электролитическом разложении крови и других органических жидкостей, вызывая нарушения их физико-химических свойств, а второе – в нагреве кровеносных сосудов и ожогах участков тела.

При общем воздействии электрического тока (электрическом ударе) возможны потеря сознания, судороги и остановка дыхания. В зависимости от характера проявления различают четыре степени электрического удара:

- первая, при которой наблюдаются судорожные сокращения мышц без потери человеком сознания;
- вторая, вызывающая потерю сознания, но происходящая без нарушения работы дыхания и сердца;
- третья, характеризуется тем, что помимо потери сознания она вызывает нарушение сердечной деятельности или дыхания, или того и другого одновременно;
- четвертая – сопровождается параличом дыхательного центра или прекращением работы сердца, вызывая клиническую смерть; при не оказанной своевременно доврачебной помощи человек погибает.

Местное воздействие сопровождается появлением ожогов, электрических знаков и электрометаллизацией кожи. При этом в большинстве случаев эти травмы не приводят к смертельному исходу (за исключением ожогов большой площади). Работоспособность пострадавшего человека зачастую восстанавливается полностью или частично.

Электрические знаки представляют собой не возвышающиеся пятна кожных отвердений желтого или желтовато-серого цвета диаметром 3-10 мм и появляются при контакте тела человека с токоведущей частью в результате химического и механического воздействия электрического тока. Болезненных явлений при появлении электрических знаков не наблюдается.

Электрометаллизация кожи возникает при проникновении в нее частиц расплавленного и испарившегося под воздействием высокой температуры электрической дуги металла. Пострадавший при этом ощущает присутствие инородного тела, а поверхность кожи в этом месте становится жесткой и шероховатой.

Вследствие того, что при прохождении через организм не отпускающего тока происходит резкое произвольное судорожное сокращение мышц, человек может получить механические повреждения. При этом возможны вывихи суставов, переломы костей, а также разрывы тканей кожи, кровеносных сосудов и нервных тканей.

Для защиты человека от поражения электрическим током применяются меры, которые называют защитными мерами электробезопасности. Выделяют восемь основных способов защиты:

- 1) заземление – преднамеренное электрическое соединение какой-либо точки сети, оборудования или электроустановки с заземляющим устройством;
- 2) зануление – преднамеренное электрическое соединение открытых проводящих частей электроустановок, не находящихся в нормальном режиме работы под напряжением, в сетях трёхфазного тока – с глухозаземлённой нейтральной точкой трансформатора или генератора; однофазного тока – с

глухозаземлённым выводом источника; постоянного тока – с заземлённой точкой источника;

- 3) выравнивание потенциалов – снижение разности потенциалов на поверхности земли или пола при помощи защитных проводников, проложенных в земле или полу и присоединенных к заземляющему устройству;
- 4) малые напряжения – снижение значений тока проходящих через тело человека при попадании его под напряжение;
- 5) изоляция – элемент конструкции оборудования, препятствующий прохождению через него электрического тока;
- 6) защитное отключение – вид защиты, обеспечивающей автоматическое отключение всех источников электрического тока аварийного участка сети;
- 7) разделяющие трансформаторы – обеспечивают разделение питающих и потребляющих цепей, тем самым повышая электробезопасность;
- 8) ограждения – конструкции, исключают возможность прямого контакта человека с токоведущими частями оборудования.

Так же, целям улучшения электробезопасности служат индивидуальные защитные средства и приспособления, такие как диэлектрические перчатки, галоши, коврики, а также индикаторы электрического поля.

5.2 Выводы

В разделе охраны труда были исследованы вредные и опасные производственные факторы, которые могут возникнуть при эксплуатации и ремонте электрооборудования.

Рассмотрены меры электробезопасности, позволяющие защититься от поражения электрическим током, как наиболее опасного производственного фактора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы, проводились исследования электропривода электромобиля, проектируемого на базе автомобиля *Mazda CX-5*.

Рассмотрение электропривода производилось как в общем, так и в частности, то есть взаимодействие элементов привода, как единой системы, и их отдельная работа. По итогам сравнительного анализа среди различных типов тяговых электрических двигателей и электрических преобразователей, произведён выбор в пользу синхронного электродвигателя с постоянными магнитами и тягового инвертора на IGBT-транзисторах с векторным управлением.

Для определения электрической мощности привода проводились расчёты аналитическим методом и с помощью циклов движения. По результатам последнего определена предварительная требуемая мощность, значение которой составляет $68,17 \text{ кВт}$. Данному условию соответствуют синхронный двигатель «ОРИОН-18-2М-02» (69 кВт) и тяговый инвертор «DTI-100Н» (100 кВт).

При проведении влияния исходных данных было выявлено, каким образом форма цикла движения, масса транспортного средства и профиль пути влияют на параметры электромобиля. Определено, что при максимальной загрузке электромобиля возникает опасность перегрева электродвигателя. В таком случае, дана рекомендация ограничения динамических параметров транспорта.

По результатам экономического раздела рассчитана ориентировочная стоимость электродвигателя с тяговым инвертором. Косвенный расчёт указал предварительную цену комплекта, равную 213286 руб.

В разделе охраны труда указаны опасные производственные факторы, которые могут возникнуть при работе с электрооборудованием. Рассмотрены возможные последствия при поражении человека электрическим током, а также способы защиты от этих последствий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Википедия. Электродвигатель постоянного тока [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Электродвигатель_постоянного_тока (дата обращения 2020-04-20).
2. YouTube. Электродвигатель постоянного тока. Принцип работы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=uPdv719zx2c> (дата обращения 2020-04-20).
3. YouTube. Принцип работы асинхронного электродвигателя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=uXwamyaiUKo> (дата обращения 2020-04-20).
4. YouTube. Принцип работы синхронного электродвигателя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=xGMwGiPy2aI&t=204s> (дата обращения 2020-04-20).
5. Википедия. Щёточно-коллекторный узел [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Щёточно-коллекторный_узел (дата обращения 2020-04-20).
6. Википедия. Асинхронная машина [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Асинхронная_машина (дата обращения 2020-04-20).
7. Википедия. Синхронная машина [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Синхронная_машина (дата обращения 2020-04-20).
8. ООО «ОРИОР-МОТОР». Электродвигатели «ОРИОН-18» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://orionmotor.narod.ru/trans.htm> (дата обращения 2020-04-20).
9. Электро-двигатели.ру. Электродвигатели постоянного тока серии П [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elektro-dvigateli.ru/postoyannogo-toka/elektrodvigateli-serii-p.html> (дата обращения 2020-04-23).
10. Электропроект. Электродвигатели постоянного тока серии 4ПН200 - 4ПН280 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.elp.ru/digest/Elektrodvigateli-Elektricheskie-mashiny-Generatory/Elektrodvigateli-postoyannogo-toka->

Generatory-postoyannogo-toka/Elektrodivigateli-postoyannogo-toka-serii-4P/
Elektrodivigateli-postoyannogo-toka-serii-4PN200-4PN280 (дата обращения 2020-04-23).

11. ООО «ЭЛРЕ». Электродвигатель Siemens 1LE1501-3AC03-4AB4 с алюминиевым корпусом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.электродвигатели-редукторы.рф/product/siemens-1le1501-3ac03-4ab4/> (дата обращения 2020-04-23).

12. ООО «ЭЛРЕ». Электродвигатель Mosca Y2 280S2 75 кВт чугунный [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.электродвигатели-редукторы.рф/product/mosca-y2-280s2/> (дата обращения 2020-04-23).

13. ООО «ЭЛРЕ». Электродвигатель Gamak GM2E 280S 2 75 кВт чугунный IE2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.электродвигатели-редукторы.рф/product/gamak-gm2e-280s-2/> (дата обращения 2020-04-23).

14. Синхронные электродвигатели с постоянными магнитами в алюминиевом корпусе, 0.75 to 400 kW. Технический каталог [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.privodsys.ru/upload/medialibrary/f2b/f2bac939df10493e151b2be2ae152eee.pdf> (дата обращения 2020-04-23).

15. Конструкция и расчёт электрического оборудования электроподвижного состава: учебник / В.В. Бирюков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 328 с.: ил. (Серия «Учебники НГТУ»).

16. Blogger. Электротехника. Принцип работы трёхфазного инвертора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://electe.blogspot.com/2012/08/blog-post_12.html (дата обращения 2020-04-25).

17. АС ЭНЕРГИЯ. Тиристор T171-320-12 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://asenergi.com/catalog/tiristory-silovye/t171/t171-320/t171-320-12.html#more> (дата обращения 2020-04-25).

18. IXYS Corporation. Preliminary Technical Information IXYK120N120C3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://alltransistors.com/pdfdatasheet_ixys/ixyk120n120c3.pdf (дата обращения 2020-04-25).

19. Студопедия. Импульсная модуляция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studopedia.org/11-85245.html> (дата обращения 2020-04-26).

20. ElectricalSchool.info. Скалярное и векторное управление асинхронными двигателями – в чем различие? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electricalschool.info/elprivod/1975-skaljarnoe-i-vektornoe-upravlenie.html> (дата обращения 2020-04-26).

21. Инженерные решения. Скалярное управление электродвигателем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://engineering-solutions.ru/motorcontrol/scalar/> (дата обращения 2020-04-26).

22. Инженерные решения. Векторное управление двигателем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://engineering-solutions.ru/motorcontrol/vector/> (дата обращения 2020-04-26).

23. Дром. Mazda CX-5 2.5 AT Active - технические характеристики [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.drom.ru/catalog/mazda/cx-5/184858/> (дата обращения 2020-04-30).

24. road-project.okis.ru. Основы расчетов движения автомобилей по дорогам [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://road-project.okis.ru/file/road-project/LecturesOsnovy/Tema_2.pdf/ (дата обращения 2020-04-30).

25. Дром. Nissan Leaf 40kWh 3.Zero (02.2018 – н.в.) - технические характеристики [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.drom.ru/catalog/nissan/leaf/239291/> (дата обращения 2020-04-30).

26. АвтоРЕВЮ. Паспортные данные Audi e-tron 55 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://autoreview.ru/articles/pervaya-vstrecha/audi-e-tron/> (дата обращения 2020-04-30).

27. Дром. Mercedes-Benz EQC 80 kWt EQC 400 4MATIC - технические характеристики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.drom.ru/catalog/mercedes-benz/eqc/279784/> (дата обращения 2020-04-30).

28. auto.ru. Hyundai Kona I Электро AT - характеристики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://auto.ru/catalog/cars/hyundai/kona/21019360/21019461/specifications/> (дата обращения 2020-04-30).

29. Образовательный портал «ZiyoNet». Оценка нормативных ездовых циклов автомобилей по энергетическому балансу [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://library.ziynet.uz/ru/book/66732/> (дата обращения 2020-05-05).

30. Штанг А. А., Щуров Н. И., Пантелеев В. И., Сизганова Е. Ю., Прокушев Ю. А. Основы электрического транспорта: Методические указания к выполнению курсовой работы для бакалавров техники и технологии. Красноярск. 2008. - 90с.

31. ООО «ОРИОН-МОТОР». Синхронные тяговые электродвигатели «ОРИОН-18-2М» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://orionmotor.narod.ru/orion_18_2M.pdf (дата обращения 2020-05-05).

32. ООО «Диада Групп». Тяговый инвертор для электротранспорта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://diadagroup.com/traction_inverter/ (дата обращения 2020-05-08).

33. QX9.RU. Продажа автозапчастей по всей России. Nissan. Leaf. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.qx9.ru/partsAuto/list?mark=2&model=104928> (дата обращения 2020-05-14).