

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**  
Институт «Политехнический», факультет «Энергетический»  
Кафедра «Автоматизированный электропривод»

**РАБОТА ПРОВЕРЕНА**

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ**

Рецензент, главный инженер отдела

«Электротранспорт» ООО НПП «Учтех-Профи

\_\_\_\_\_/ А.А. Шевченко/

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

Заведующий кафедрой, к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_/А.Н. Шишков/

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

**ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД АВТОНОМНОГО  
ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ  
КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ**

**ЮУрГУ-13.04.02.2018.259 ВКР**

*Руководитель проекта:*

доцент, к.т.н.

\_\_\_\_\_/Е.В. Белоусов/

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

*Автор проекта*

*студент группы П-286*

\_\_\_\_\_/В.С. Шальков/

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

*Нормоконтролер*

доцент, к.т.н.

\_\_\_\_\_/А.Е. Бычков/

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

Челябинск 2018 г.

## АННОТАЦИЯ

Шальков В.С. Двухканальный дифференциальный электропривод автономного электротранспортного средства . – Челябинск: ЮУрГУ, Э; 2018, 45 с., 23 ил., 4 табл., библиографический список – 19 наим.

В данной выпускной квалификационной научной работе рассмотрена проблема снижения крутящего момента автономного электротранспорта при движении на высокой скорости ввиду физических особенностей работы электрической силовой установки. Данная особенность приводит к ощутимому ухудшению динамики автомобиля, а решение этой проблемы является актуальной для современных производителей автомобилей на электрической тяге.

Для решения данной задачи, рассмотрена возможность использования двухдвигательного дифференциального электропривода. Произведено моделирование данной системы в среде *Matlab–Simulink* в нескольких приближениях. Произведена анализ влияния системы на динамику электротранспортного средства.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дат				
					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ</b>			
Разраб.		Шальков В.С.			Двухканальный дифференциальный электропривод автономного электротранспортного средства	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Белоусов Е.В.					4	45
Реценз		Шевченко А.А.				<b>ЮУрГУ</b>		
Н. Контр.		Бычков А.Е.				<b>Кафедра «АЭП»</b>		
Утверд.		Шишков А.Н.						

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1 ПРОБЛЕМА СНИЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДОРОЖНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ НА ВЫСОКОЙ СКОРОСТИ .....	9
1.1 Анализ аварийности на дорогах России .....	9
1.2 Анализ динамики ускорения автотранспорта с ДВС .....	11
1.3 Анализ динамики ускорения автономного электротранспорта.....	14
2 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХКАНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ.....	16
2.1 Варианты двухдвигательных схем.....	16
2.2 Функциональная схема двухдвигательного электропривода .....	18
2.3 Механические характеристики двухдвигательного электропривода.....	19
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДВУХКАНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В СРЕДЕ MATLAB–SIMULINK.....	21
3.1 Адаптирование функциональной схемы под среду разработки .....	21
3.2 Создание математической модели с использованием идеальных элементов.....	23
4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВУХКАНАЛЬНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ВРЕМЯ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА .....	26
4.1 Анализ устойчивости системы .....	26
4.2 Схема регулирования с фиксацией сигнала по одному из каналов .....	28
4.3 Настройка оптимального порога переключения между каналами.....	31
5 ВЫБОР СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ .....	34

5.1 Выбор электродвигателя.....	34
5.2 Выбор понижающего редуктора .....	37
5.3 Выбор тормоза.....	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	41
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	43

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		6

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие электротранспорта, в том числе и автономного, является мировым трендом в развитии автомобилестроения. К создаваемым сейчас моделям электротранспорта предъявляются новые требования к тяговым характеристикам автомобиля и его эффективности, обусловленные требованиями безопасности дорожного движения и экономичности. Электрический привод автомобиля должен обеспечивать требуемые ускорение, интенсивность торможения и маневренность. Ввиду особенностей работы электрического привода, при движении на высоких скоростях наблюдается существенное снижение крутящего момента двигателя. Если ранее данная проблема, из-за наличия более существенных проблем в плане обеспечения высокого запаса хода, быстрой зарядки, высокой емкости и долговечности аккумуляторных элементов, не являлась проблемой высокой важности, то сейчас, когда электрические автомобили по своим эксплуатационным характеристикам выравниваются с классическим транспортом на базе ДВС, ее актуальность все более возрастает.

Объектом исследования данной работы является автономный электротранспорт. Предметом исследования является система привода автономного электротранспорта.

Целью исследования является создание теоретически обоснованной системы электропривода электромобиля, которая будет обеспечивать более широкий диапазон регулирования скорости. Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

- изучить влияние снижения динамических характеристик автотранспорта на высокой скорости на их эксплуатацию;
- разработать систему электропривода электротранспорта, способную обеспечить более высокий диапазон регулирования скорости;
- исследовать работу разработанной схемы применяя методы математического моделирования;

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		7

– проанализировать влияние работы схемы на динамические характеристики электротранспорта.

Решение поставленных задач основывается на разработке идеи двухдвигательного дифференциального электропривода, предполагающей параллельную работу двух частотно-регулируемых электродвигателей с разными передаточными числами на общий суммирующий редуктор.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						8
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

# 1 ПРОБЛЕМА СНИЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДОРОЖНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ НА ВЫСОКОЙ СКОРОСТИ

## 1.1 Анализ аварийности на дорогах России

По данным Росстата в 2016 году на территории Российской Федерации в результате дорожно-транспортных происшествий (ДТП) погибли 15854 человек (0.9% от общего числа умерших жителей РФ в течение 2016 года). Основные причины, по которым происходят ДТП:

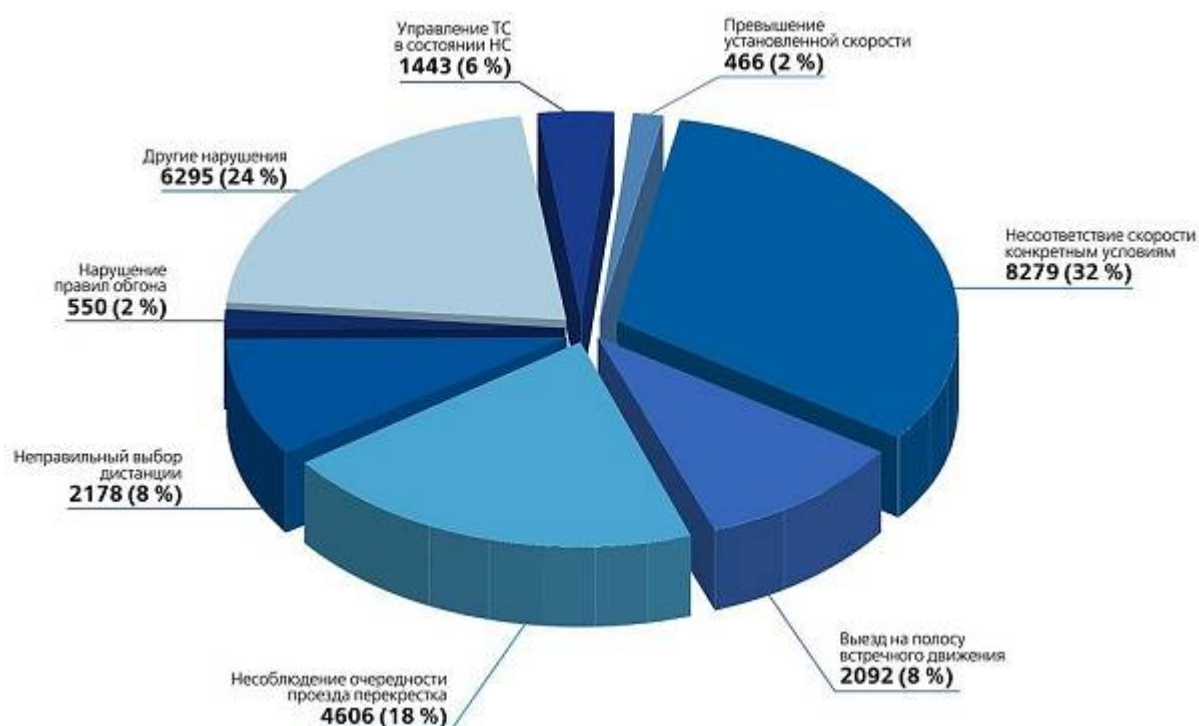


Рисунок 1.1 – Статистика причин ДТП за 2016 год

32% – несоответствие выбранной скорости конкретным дорожным условиям;

24% – другие нарушения

18% – несоблюдение правил приоритета, сигналов светофора при проезде перекрестков;

8% – неправильный выбор дистанции;

менее 8% – выезд на полосу встречного движения;

6% – вождение в состоянии алкогольного опьянения;

2% – несоблюдение правил обгона

Безопасность движения на дороге сегодня определяется множеством факторов. Нужно учитывать правила дорожного движения, опасность и потенциальный исход каждой обстановки, внимательно изучать все ситуации. Нарушение правил обгона - одна из распространенных причин аварии или другого неприятного происшествия на дороге. Зачастую смерть на дороге происходит при столкновении «лоб в лоб», которое возможно только при выезде одного из автомобилей за пределы своей полосы движения. Сегодня большинство трасс устраивают с четырьмя и более полосами с разделителями между разными направлениями потоков. Здесь невозможно нарушить правила обгона, безопасность движения значительно повышается. На таких дорогах статистика фиксирует намного ниже процент смертности при намного меньшем количестве ДТП.

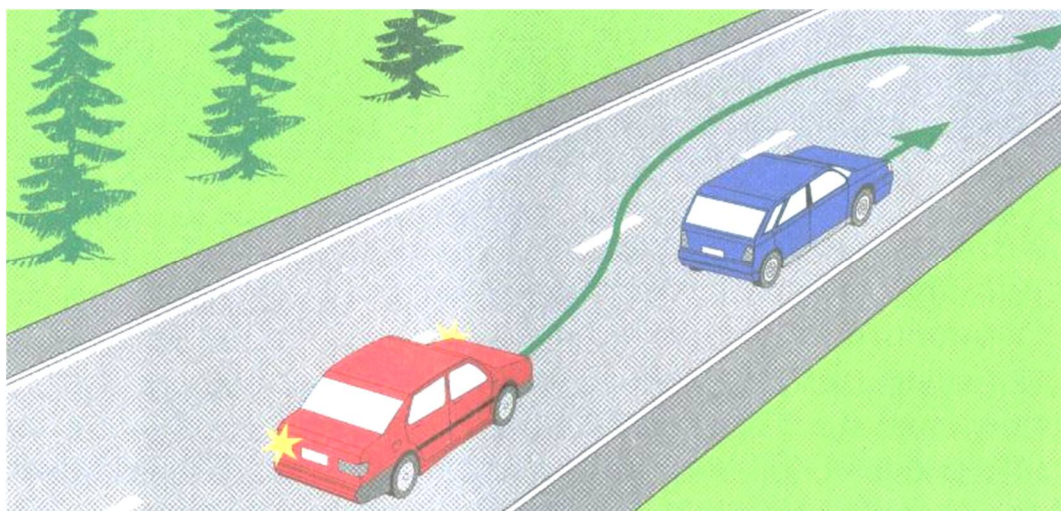


Рисунок 1.2 – Схема совершения обгона

Обгон – один из самых ответственных и частых маневров, связанный с повышенной скоростью и ограниченной обзорностью (рисунок 1.2). Нередко следствием неправильного обгона становится лобовое столкновение. При этом маневре необходимо точно рассчитывать безопасную дистанцию между машинами, учитывать динамические возможности собственного автомобиля, анализировать и прогнозировать поведение других участников дорожного

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		10



движения. Обгонять можно только в том случае, если есть возможность превысить скорость обгоняемого транспортного средства не менее чем на 15 км/ч, а его водитель не собирается менять направление движения.

## 1.2 Анализ динамики ускорения автотранспорта с ДВС

Для обеспечения высокой динамики автомобиля необходимо, чтобы двигатель обеспечивал высокий уровень крутящего момента. Двигатели внутреннего сгорания отличаются непостоянством крутящего момента в зависимости от различных обстоятельств. Момент меняется не только под воздействием нажатия на педаль газа (механической или электронной), но и с изменением скорости вращения двигателя (рисунок 1.3). На различных оборотах процессы, происходящие в камере сгорания мотора, различны. Дополнительные системы, такие как наддув, системы регулировки фаз ГРМ и прочие, еще сильнее изменяют наполнение камеры сгорания, количество топлива и момент зажигания, и в результате качество и сила рабочего хода зависят от оборотов мотора.

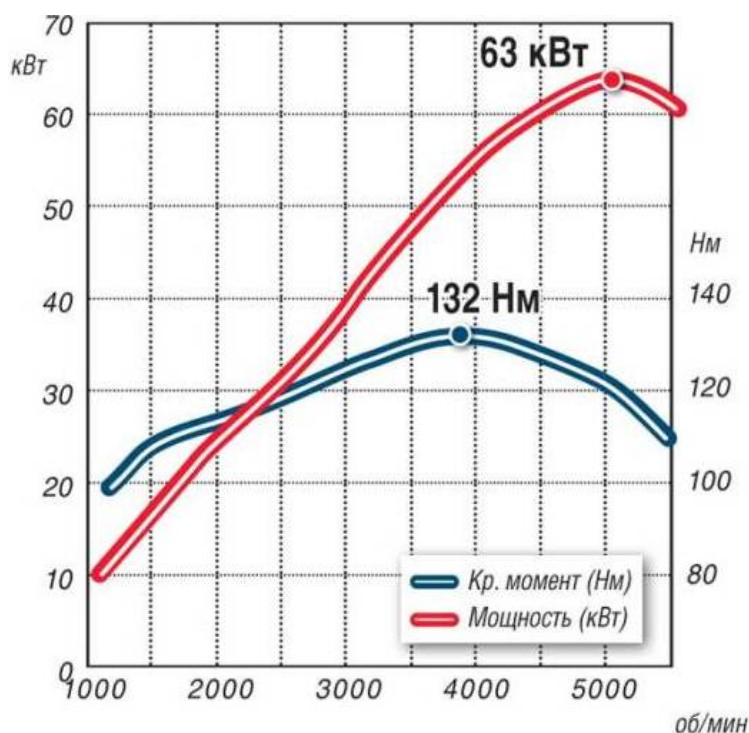


Рисунок 1.3 – Характеристика крутящего момента и мощности ДВС

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Даже если нет никаких систем электронного регулирования, всё равно количество воздуха, попадающего в цилиндр, количество оставшегося выхлопа и оптимальный угол опережения зажигания меняются с оборотами. На самых малых оборотах в цилиндре слишком много остаточных газов или слишком вероятна детонация, потому что крутящий момент на малых оборотах обычно намного меньше максимального.

На средних оборотах крутящий момент мотора увеличивается— за счет пульсаций во впускном трубопроводе больше воздуха поступает в цилиндры, меньше остаточных газов, потому и растет крутящий момент. Если у машины есть турбина или нагнетатель, то они начинают работать в полную силу.

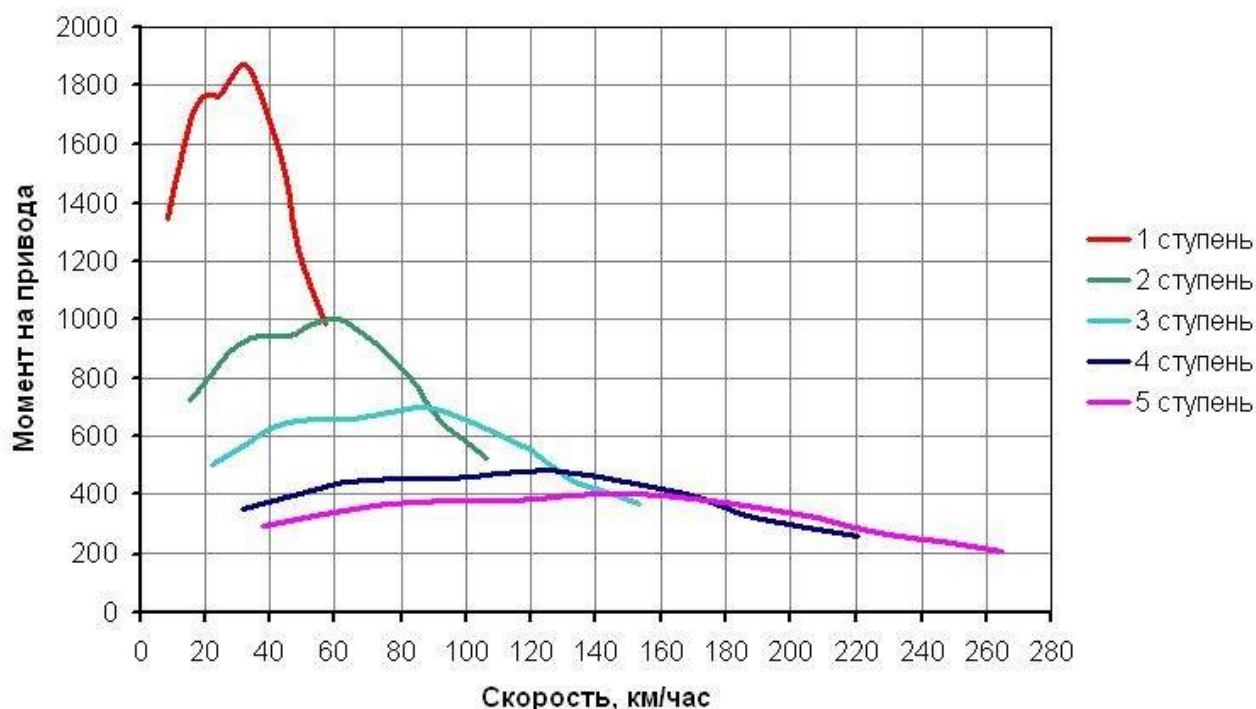


Рисунок 1.4 – Момент переключения передач

Но с ростом оборотов растут и механические потери на трение поршневых колец, трение и инерционные потери в ГРМ, на разогрев масла в подшипниках и прочие, а качество рабочего процесса не улучшается или даже начинает падать. В результате на высоких оборотах момент начинает уменьшаться за счет возрастающих потерь.

Передаточные числа КПП в основном выбираются так, чтобы после достижения максимальной скорости вращения двигателя на какой-либо передаче при переключении на высшую двигатель попадал в точку характеристики, соответствующей пику крутящего момента (Рисунок 1.5). Из этого следует, что для обеспечения наилучшего ускорения следует работать на скоростях вращения двигателя в диапазоне от 3500...4000 об/мин до 6000 ( $n_{max}$ ) об/мин.

Такая особенность в работе при определенных условиях может вызывать трудности в наборе скорости при обгоне. Рассмотрим для примера ускорение автомобиля со скорости 50 км/ч. Для этого, в соответствии с графиком на Рисунок 1.5, лучшим вариантом будет использование 2 передачи. Но в случае, если автомобиль разгонится до 80 км/ч – максимальной скорости для данной передачи, а ее будет недостаточно, будет необходимо переключиться на 3, что приведет к затратам времени на само переключение передач, синхронизацию скорости вращения двигателя под работу с другим передаточным числом, что приведет к снижению общей динамики разгона.

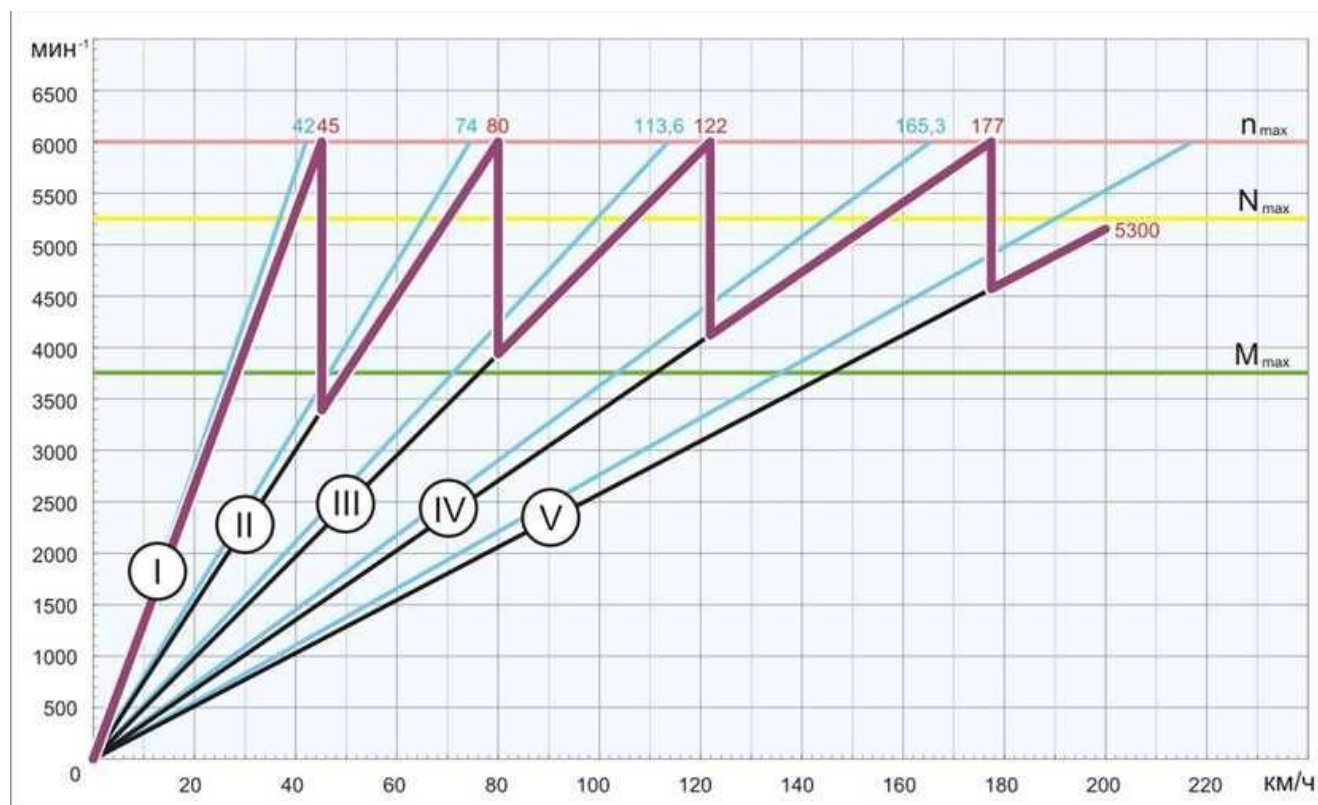


Рисунок 1.5 – Диаграмма оптимального переключения передач ДВС

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

### 1.3 Анализ динамики ускорения автономного электротранспорта

В настоящее время, индивидуальный автономный электротранспорт перспективным видом транспорт, который в будущем заменит традиционные автомобили на основе ДВС. Не смотря на ряд объективных технологических сложностей (небольшой запас хода, долгая зарядка, требовательность к инфраструктуре) и особенностей эксплуатации электротранспорт имеет ряд очевидных преимуществ: отсутствие вредных выхлопов при эксплуатации, надежность, простота обслуживания, высокий КПД, бесшумность.

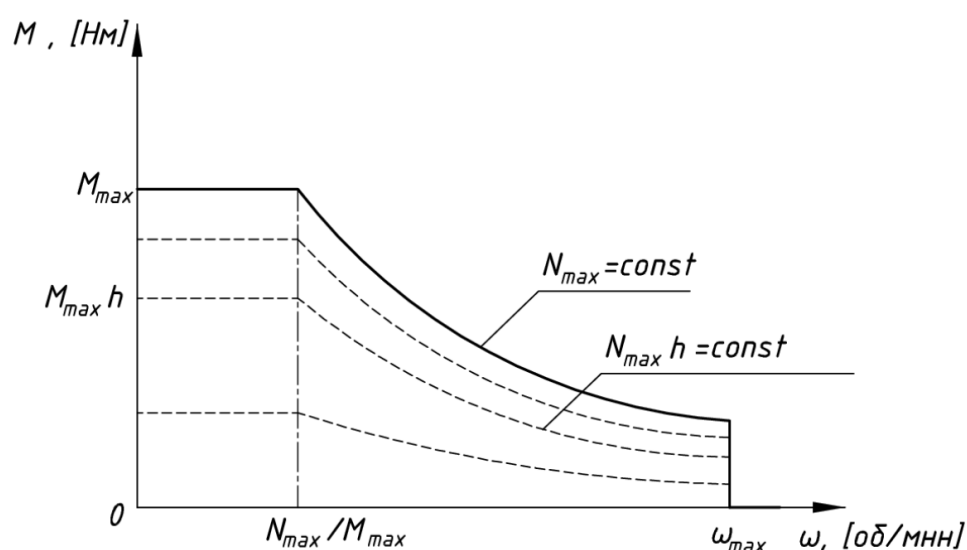


Рисунок 1.6 – Характеристика электродвигателя

Если же рассматривать электромобили со стороны их динамических возможностей, то здесь также имеются как плюсы, так и минусы. К главным достоинствам следует отнести отсутствие КПП и доступность максимального крутящего момента практически в любой момент, что обеспечивает постоянство и высокий уровень ускорения автомобиля без рывков. Минусом является то, что данное обстоятельство справедливо до определённого диапазона скоростей. При достижении точки номинальной скорости вращения двигателя, для работы на более высоких скоростях привод переходит в режим ослабления поля асинхронного

двигателя, в результате чего снижается значение максимального момента  
**(Ошибка! Источник ссылки не найден.)**

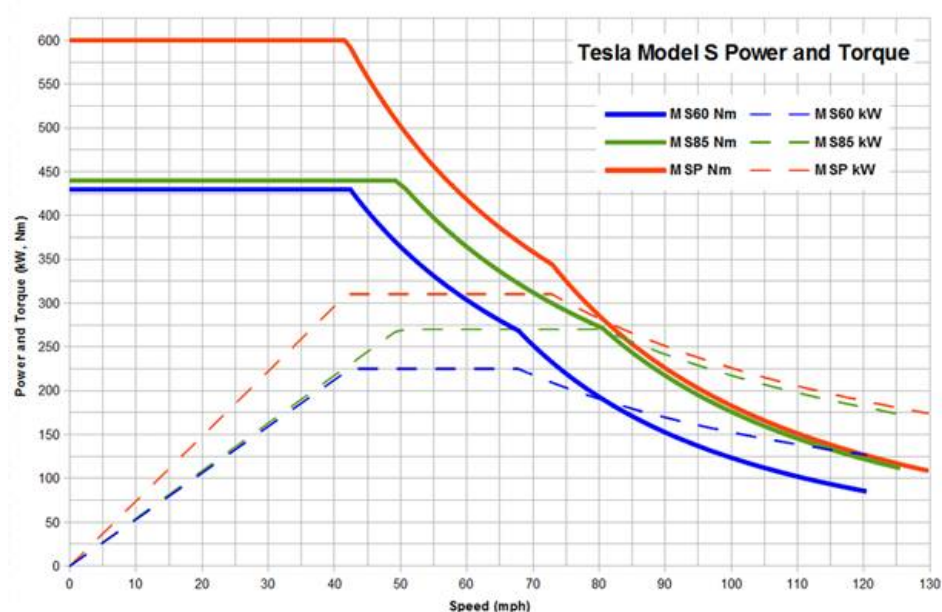


Рисунок 1.7 – Зависимость крутящего момента на колесах электромобиля от скорости его движения на примере серийной модели Tesla Model S

## 2 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХКАНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

### 2.1 Варианты двухдвигательных схем

Перспективное направление развития силового привода транспортных машин к настоящему времени формируется на создании двухдвигательных схем. При наличии в силовой установке автомобиля двух двигателей возможны два способа их связи с ведущими колесами: по независимой схеме (рисунок 2.1, а и б) или схеме с суммирующим редуктором (рисунок 2.1, в).

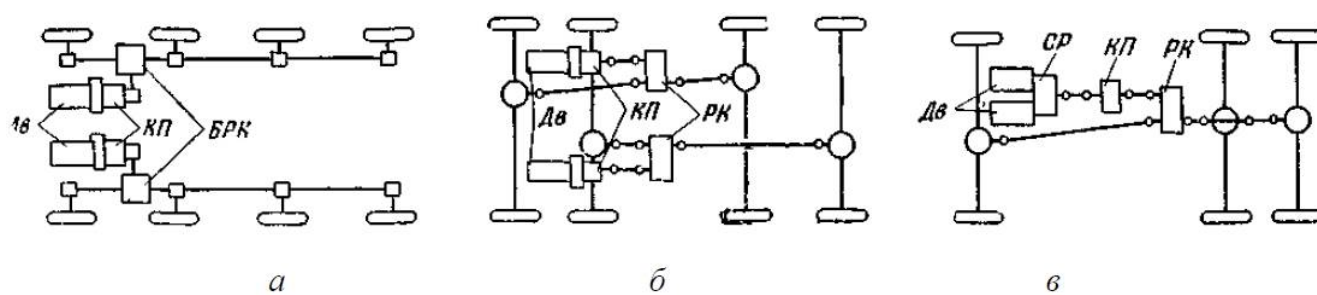


Рисунок 2.1 – Двухдвигательный силовой привод: а – бортовая схема; б – мостовая схема; в – с суммирующим редуктором

В независимой схеме каждый двигатель (Дв) питает энергией свою группу ведущих колес. Причем используются два варианта, когда каждый двигатель питает энергией ведущие колеса одного борта (рисунок 2.1, а) или, когда один двигатель присоединен через агрегаты силовой передачи – коробку передач (КП), раздаточную коробку (РК) к одной группе мостов, а второй – к другой группе (рисунок 2.1, б). При этом бортовая схема силовой передачи значительно упрощается из-за отсутствия межбортовой раздаточной коробки (БРК) и межбортового дифференциала.

В схеме с суммирующим редуктором (рисунок 2.1, в) оба двигателя присоединяются к одному редуктору (СР), от которого суммарный силовой поток распределяется по ведущим колесам так же, как и при наличии одного двигателя в

силовой установке автомобиля. В качестве суммирующего редуктора возможно применение зубчатых, фрикционных, цепных и ременных передач. Конструктивная простота исполнения дифференциала как механизма с двумя степенями свободы предопределяет перспективность его использования в качестве суммирующего редуктора двухдвигательных передач.

Применение двухдвигательных передач в силовом приводе транспортной машины диктуется ужесточением требований к разрабатываемой конструкции, из всего многообразия которых можно выделить три направления.

1. Улучшение показателей эксплуатационных свойств (грузоподъемности, тягово-скоростных характеристик, топливной экономичности, проходимости, управляемости и др.).

2. Соблюдение положений унификации при создании на унифицированных агрегатах различных по типоразмерным параметрам транспортных машин.

3. Создание автоматических силовых приводов.

В зависимости от сформулированных требований к топливной экономичности, экологичности, тягово-скоростным свойствам, компоновке и т. д. можно применить в конструкции колесной машины различные агрегаты и конструктивные схемы двухдвигательных передач. Для разрешения противоречий в вопросах унификации и удовлетворения потребности в различной номенклатуре приводных устройств, имеет место тенденция создания двухдвигательных схем, при которых принимается два мотора, при мощности каждого примерно в два раза ниже расчетной.

В параллельной схеме тяговые электродвигатели, питаемые от аккумуляторной батареи, связаны с ведущими колесами через суммирующий редуктор. В настоящее время в параллельной схеме наиболее распространены шестеренчатые суммирующие редукторы. Применяются также ременные и цепные редукторы, т. е. передачи с гибкой связью. Возможно применение комбинированных типов редукторов, муфт сцепления и даже дифференциалов. Все это приводит к

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		17

усложнению математических моделей, описывающих режимы движения транспортной машины.

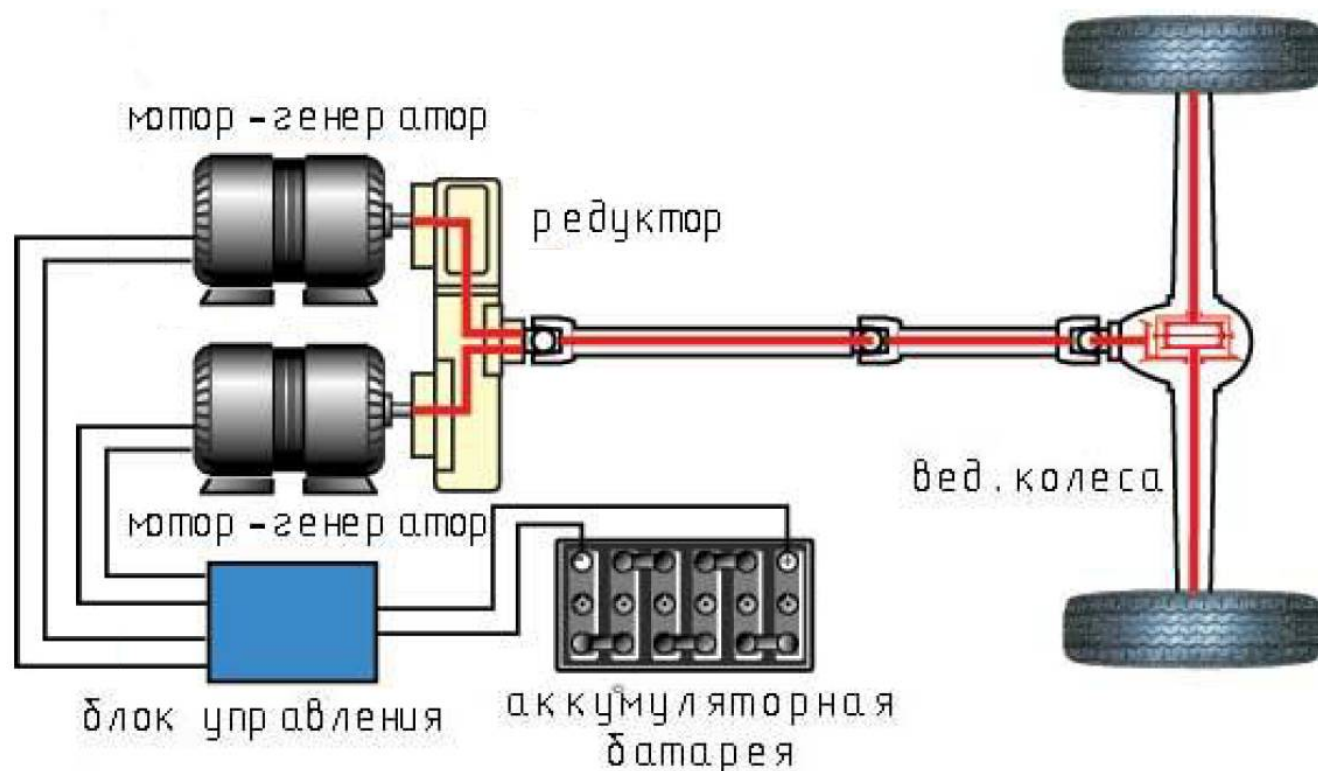


Рисунок 2.2 – Параллельная компоновочная схема силового привода

## 2.2 Функциональная схема двухдвигательного электропривода

Реализация двухдвигательного электропривода (рисунок 2.3), приводящего в движение рабочий орган посредством механической передачи с различными передаточными числами по каналам «Двигатель 1 – Рабочий орган» и «Двигатель 2 – Рабочий орган», позволит обеспечить высокую динамику разгона при работе одного двигателя и высокую скорость – при работе второго. На рисунке 2.3 схематично показано автономное транспортное средство, источником энергии для движения которого является аккумуляторная батарея АКБ. В общем случае двигатели 1 и 2 представляют собой асинхронные двигатели, питание которых осуществляется через преобразователи 1 и 2. Система управления СУ движением контролирует координаты приводов через соответствующие системы управления СУ<sub>1</sub> и СУ<sub>2</sub>. Важно обратить внимание, что двигатели 1 и 2 не приводят в движение



колеса 1 и 2 по отдельности, оба двигателя через трансмиссию и дифференциал приводят в движение колесную пару.

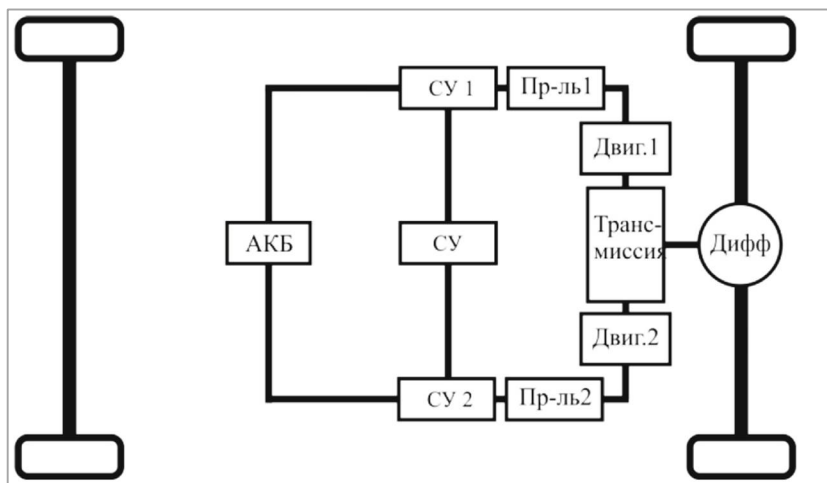


Рисунок 2.3 – Система двухмоторного электропривода электромобиля

### 2.3 Механические характеристики двухдвигательного электропривода

Следует отметить ряд преимуществ такого решения. Во-первых, значительно увеличивается КПД электропривода, так как каждый двигатель работает в режиме, близком к номинальному. Во-вторых, повышается безопасность вождения, так как использование двигателей с меньшим  $M_n$  приводит к уменьшению высоты оси их вращения, что в свою очередь способствует улучшению распределения массы и повышению устойчивости автомобиля на поворотах.

Наконец, в-третьих, использование двухдвигательного электропривода позволяет существенно расширить возможности его работы, как в диапазоне скорости, так и в диапазоне момента (рисунок 2.4). Кривые 1 и 2 – оптимальные кривые момента и мощности двигателей 1 и 2 соответственно. Кривые 3 – оптимальные кривые момента и мощности двухдвигательного электропривода. Точка 4 соответствует номинальному режиму работы второго двигателя. Из рисунка видно, что момент первого двигателя постоянен во всем диапазоне работы, его мощность линейно возрастает в функции скорости. Такой подход позволяет компенсировать падение крутящего момента на высоких скоростях, характерное

для двигателей с ограниченным рабочим напряжением. Суммирование мощностей осуществляется механически. Устройством, выполняющим данную функцию, может быть, например, дифференциальный редуктор.

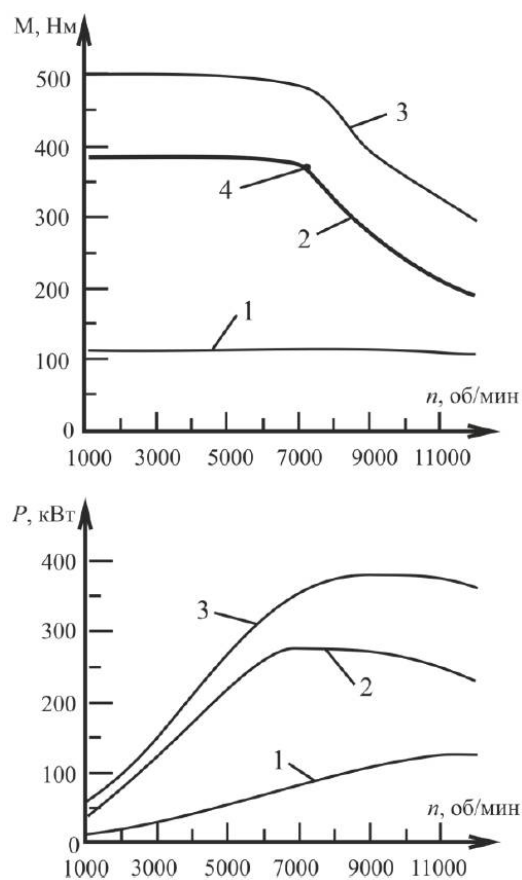


Рисунок 2.4 – Статические характеристики момента и мощности: 1 – первого двигателя, 2 – второго двигателя, 3 – электропривода при совместной работе двух двигателей; 4 – номинальный режим работы второго двигателя

### 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДВУХКАНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В СРЕДЕ MATLAB–SIMULINK

Исследование системы будем производить последовательно в несколько этапов. Для начала на первом этапе предполагается произвести моделирование на так называемых идеальных элементах, то есть с использованием блоков, которые могут просто, но в то же время с достаточной достоверностью, выполнять функции элементов функциональной схемы системы.

#### 3.1 Адаптирование функциональной схемы под среду разработки

На Рисунок 3.1 представлена математическая модель двухдвигательного электропривода автономного электротранспортного средства, выполненная в *Matlab - Simulink*. Особенность данной модели заключается в том, что здесь выполняется комплексный расчет механической и электрической части. Область 1 содержит элементы библиотеки *Simscape*. В данной области сигналы не имеют однозначного направления, элементы имеют многосвязные взаимодействия. Дифференциальный редуктор ДР приводит в движение рабочий орган  $S$ . Момент сопротивления может быть имитирован заданием  $M_c$ , поступающим через преобразователь безразмерного сигнала  $\Pi$  в механическое усилие. Моменты инерции рабочего органа приведены к водилу дифференциальной передачи и на схеме не обозначены. Моменты инерции электродвигателей учтены блоками  $J_1$  и  $J_2$ , соединенными со входными каналами механической части дифференциальной передачи  $S_1$  и  $S_2$ . Механическое соединение первого электродвигателя производится посредством обычного редуктора  $P$  с передаточным соотношением  $j_1$ . Блоки электромеханических преобразователей ЭМП<sub>1</sub> и ЭМП<sub>2</sub>, представленные апериодическими звеньями первого порядка, учитывают конечное быстроедействие электромагнитных процессов в электроприводе.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

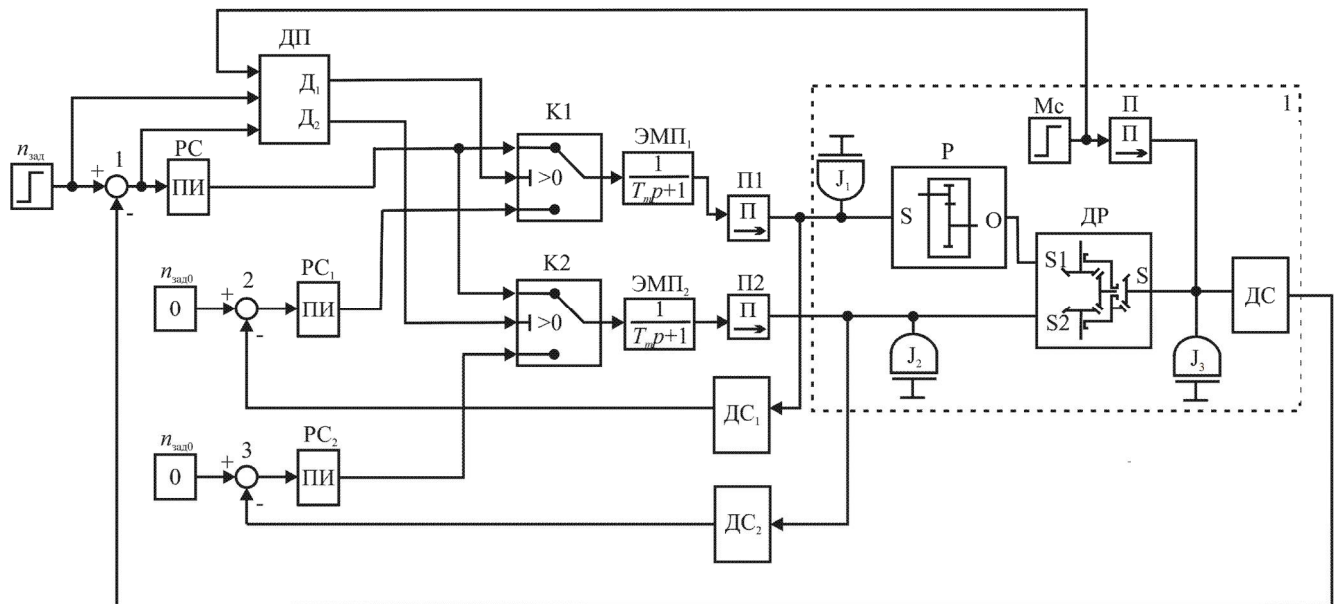


Рисунок 3.1 – Математическая модель двухдвигательного дифференциального электропривода в Matlab-Simulink

Система выполнена замкнутой по скорости. Задание на скорость формируется блоком  $n_{зад}$ . Данный сигнал поступает на вход сумматора 1, где происходит вычитание сигнала текущей скорости рабочего органа, идущего с датчика скорости ДС. Полученный сигнал ошибки поступает на вход регулятора скорости РС, представляющего собой ПИ-регулятор, который формирует сигнал задания на момент. Данный сигнал поступает на верхние входы ключей К1 и К2. Эти ключи представлены функционально, в реальности же являются частью логики работы микропроцессорной техники. На нижние входы ключей К1 и К2 подаются сигналы с регуляторов скорости РС1 и РС2, которые формируют такой момент двигателя, чтобы его скорость была равна нулю. Другими словами, во включенном состоянии ключей К1 и К2 на вход механической части через преобразователи сигнала поступает момент, необходимый для поддержания скорости рабочего органа. Выключенное состояние ключей К1 и К2 имитирует электрическое торможение первого и второго двигателей соответственно.

Коммутация данных ключей производится дискретным переключателем ДП. Логика его работы такова. Второй двигатель Д2 включается только при  $n_{зад} > n_{гр1}$ .

Первый двигатель Д1 включается в двух случаях: первый -  $n_{зад} < n_{гр1}$ , второй -  $n_{гр2} < n_{зад} - n < n_{гр3}$ , где  $n_{гр1}$ ,  $n_{гр2}$  и  $n_{гр3}$  – заданные постоянные скорости.

### 3.2 Создание математической модели с использованием идеальных элементов

Целью данного моделирование ставиться проверка представленной выше схемы на работоспособность без углубления в сложные физические процессы, связанные с работой электрической части электропривода и механических процессов. Сложные элементы, представлены упрощенными элементами, но позволяющих в достаточной мере отразить суть происходящих процессов такие. Двигатели в модели представлены идеальными источниками момента, понижающий и дифференциальный редукторы не являются идеальными преобразователями механической энергии и не учитываю механических потерь.

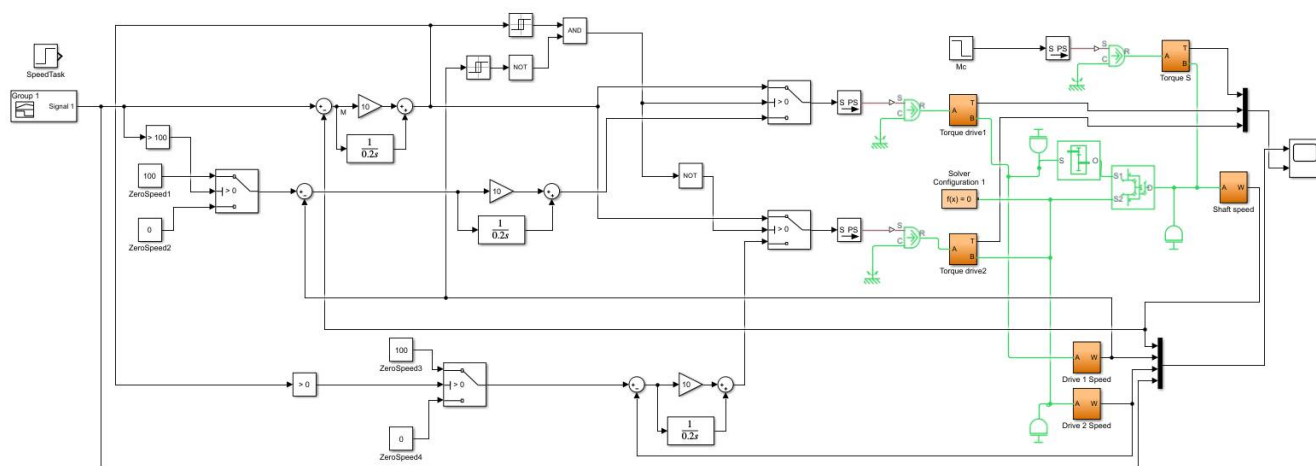


Рисунок 3.2 – Математическая модель двухдвигательного электропривода на идеальных элементах в среде Matlab-Simulink

На Рисунок 3.3 представлены осциллограммы переходных процессов скорости (а) и момента (в). Для наглядности на Рисунок 3.3, б показан результат работы ДП. В начальный момент времени скачком подавался сигнал задания скорости  $n_{зад}=0,6$ . В момент времени, равный 4 с, происходило увеличение сигнала задания скорости с 0,6 до 1, имитирующее разгон автомобиля при движении на скорости, близкой к номинальной. На 8 секунде моделировался наброс нагрузки  $M_c$  с 0,2 до 0,5, условно

имитирующий возросшее аэродинамическое сопротивление, обусловленное процессами, характерными для движения автомобиля на высокой скорости. Данные осциллограммы лишь демонстрируют возможности и логику работы двухдвигательного электропривода. Однако, в силу того, что момент задания распределялся между двумя механическими каналами в равных долях (Рисунок 3.3, 0...1 с), существенного прироста динамики по сравнению с однодвигательным электроприводом достигнуть не удалось.

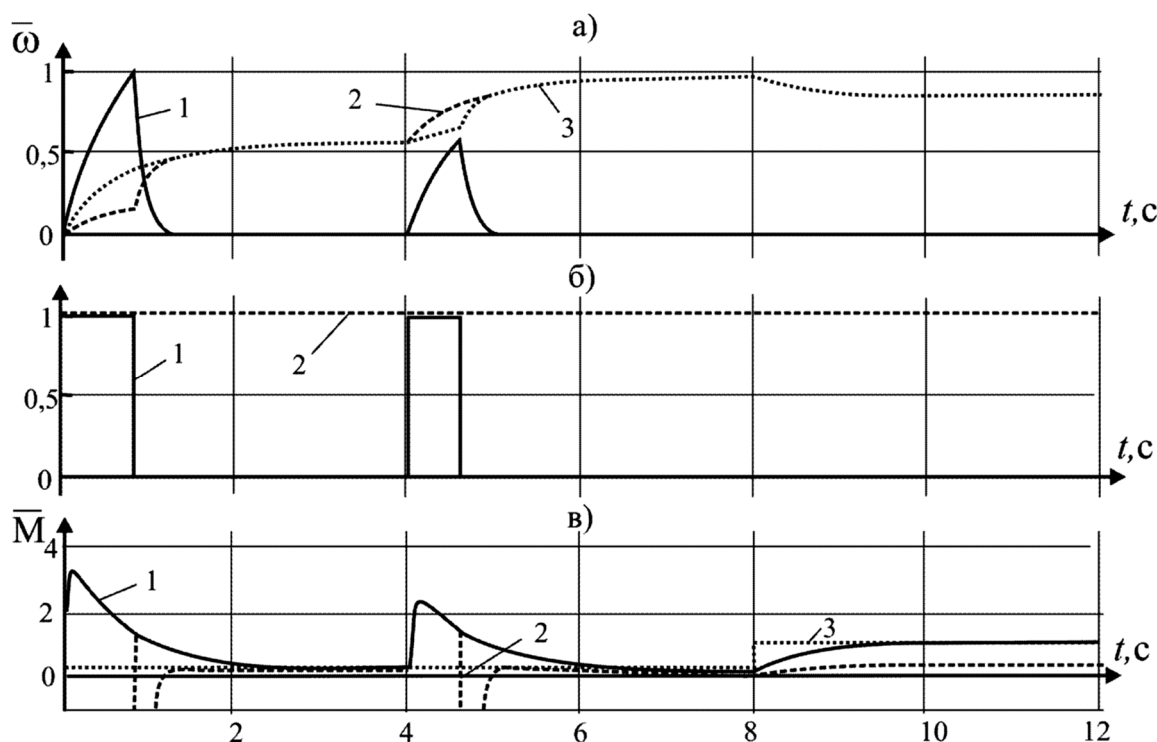


Рисунок 3.3 – Осциллограммы переходных процессов 1 – первого двигателя, 2 – второго двигателя, 3- выходного вала ДР

Очевидным решением данной проблемы явилось независимое формирование моментов двух двигателей. В логику управления электроприводом было добавлено условие, что при совместной работе двигателей  $D_1=D_2=1$  до тех пор, пока  $n_{зад} - n < n_{грз}$ , задание на момент первого двигателя не поступает с РС, а является постоянным значением  $M_1 = const$ . На рисунке 3.4 показаны осциллограммы переходных процессов при данном условии и сигнале задания  $n_{зад}$ , равном сигналу, формируемому в предыдущем эксперименте. Как видно из рисунка, на 1 и 4

секундах эксперимента момент первого двигателя постоянен. Такое решение позволило сократить время переходного процесса на 27 %.

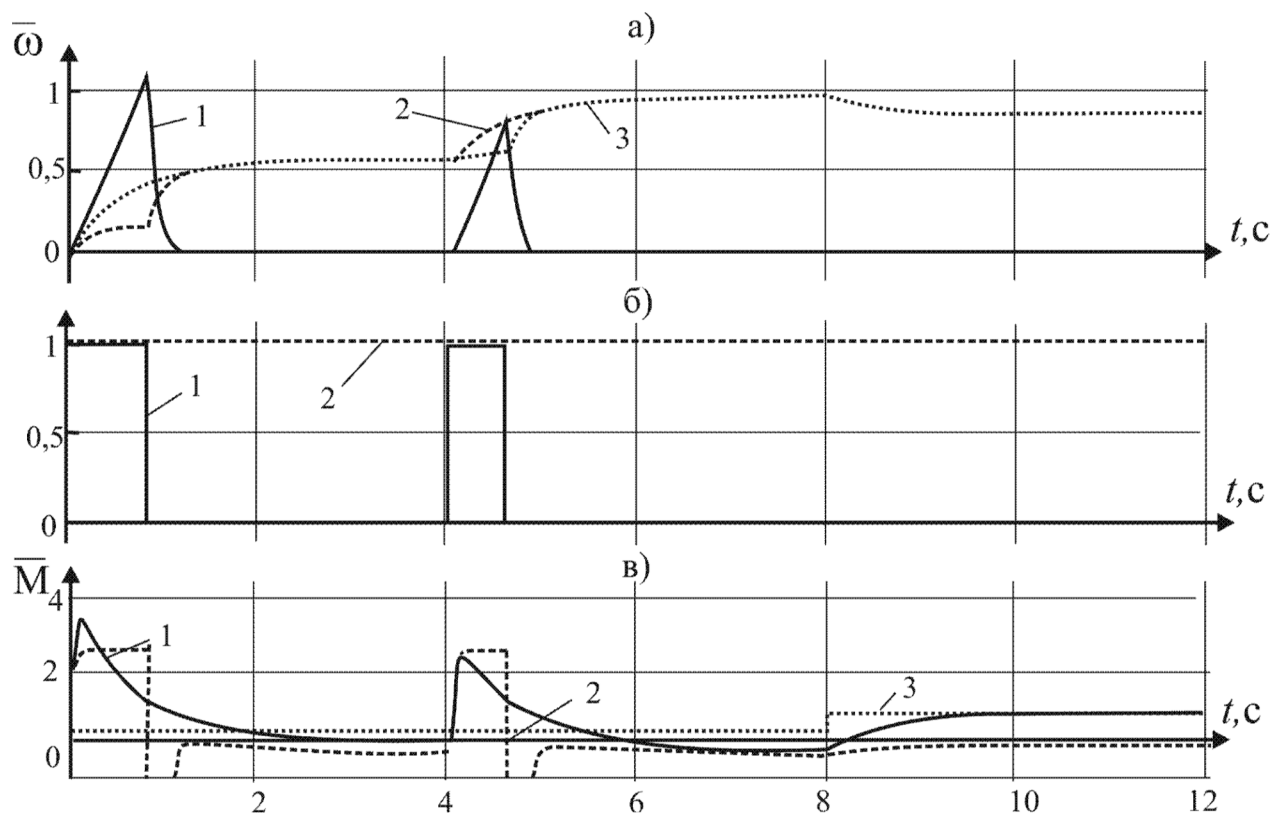


Рисунок 3.4 – Осциллограммы переходных процессов при  $M_1 = \text{const}$  1 – первого двигателя, 2 – второго двигателя, 3- выходного вала ДР

В ходе ряда экспериментов было установлено, что  $n_{гр2}$ , т.е. уставка скорости  $n_{зад} - n$ , при которой происходит отключение первого двигателя, не должна превышать 0,2 о.е. В противном случае достигаемый эффект нивелируется в силу того, что скорость второго двигателя в конце переходного процесса падает до нуля, и при выключении первого двигателя для поддержания текущей скорости второму двигателю необходимо обеспечить высокую динамическую нагрузку, что в конечном итоге только увеличивает общее время переходного процесса.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

## 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВУХКАНАЛЬНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ВРЕМЯ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

### 4.1 Анализ устойчивости системы

В рассматриваемой схеме автомобиль приводится в движение приводом, состоящим из двух двигателей, работающих параллельно на один суммирующий редуктор, от которого суммарный силовой поток распределяется по ведущим колесам так же, как и при наличии одного двигателя в силовой установке.

Для суммирования мощностей двух двигателей может применяться дифференциальный редуктор, принцип работы которого основан на том, что дифференциальная шестерня соединяет вращательное движение вокруг продольной оси с вращательным движением двух боковых осей. В результате этого редуктор имеет три вращательные степени свободы:

$$\omega_B = \frac{1}{2}j(\omega_1 + \omega_2), \quad (4.1)$$

где  $\omega_B$  – скорость вращения вала на выходе редуктора,

$j$  – передаточное число редуктора,

$\omega_1$  – скорость вращения вала 1 на входе редуктора,

$\omega_2$  – скорость вращения вала 2 на входе редуктора.

На выходном валу мощность равна сумме мощностей на входных валах:

$$\omega_B M_B = \omega_1 M_1 + \omega_2 M_2, \quad (4.2)$$

где  $M_B$  – крутящий момент, приложенный к валу на выходе редуктора,

$M_1$  – крутящий момент, приложенный к валу 1 на входе редуктора,

$M_2$  – крутящий момент, приложенный к валу 2 на входе редуктора.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		26



Подставляя формулу 4.2 в 4.1 получим выражение, описывающее распределение мощностных потоков в дифференциальной передаче:

$$M_{вг} = \frac{2(\omega_1 M_1 + \omega_2 M_2)}{\omega_1 + \omega_2}, \quad (4.3)$$

Из формулы 4.3 можно видеть, что крутящий момент на выходном валу одновременно зависит от четырех переменных, что отрицательно влияет на устойчивость регулирования. Осуществляя регулирование по двум параллельным контурам для каждого привода с целью обеспечения единой координаты на выходе, получить качественную стабильно работающую систему является крайне сложной задачей.



Рисунок 4.1 – Шестерни дифференциала

По этой причине следует организовать работу систему таким образом, чтобы сигнал обратной связи замыкался только на один из контуров, а на вход второго контура в это время будет подаваться какой-либо статический сигнал. В таком случае, в любой момент времени регулирование скорости будет осуществляться только одним приводом, что должно обеспечивать стабильность работы системы.

#### 4.2 Схема регулирования с фиксацией сигнала по одному из каналов

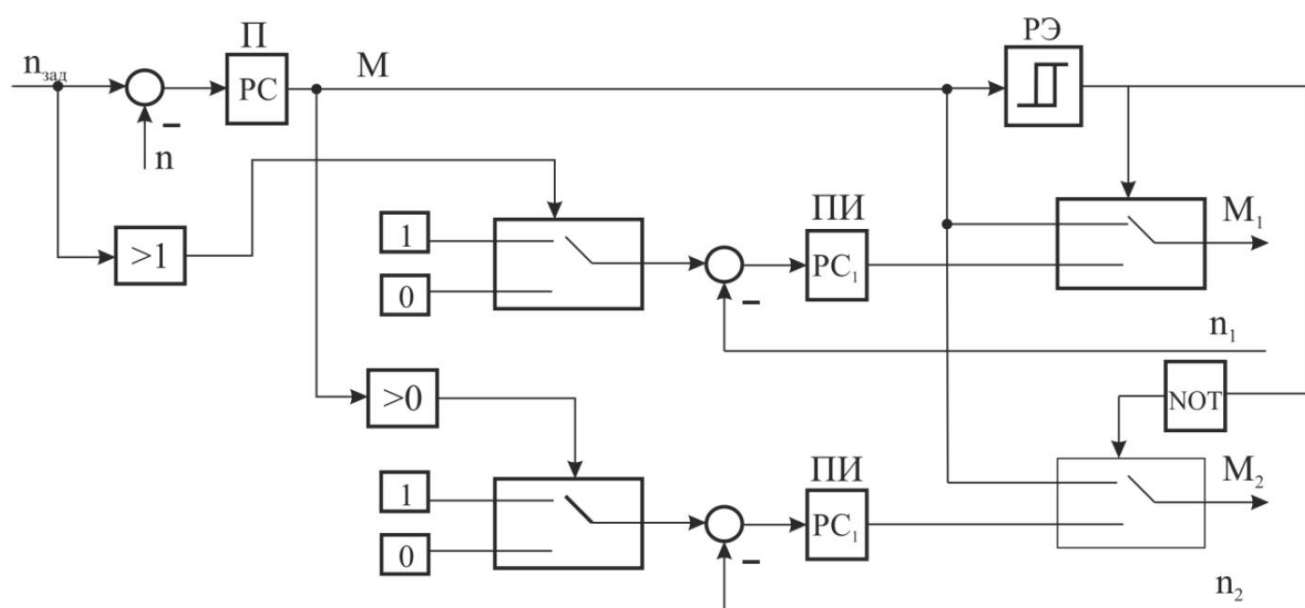


Рисунок 4.2 – Функциональная схема формирования сигналов задания на момент в системе двухканального дифференциального электропривода

В соответствии с представленными выше рассуждениями разработана схема управления двухканальной системой дифференцированного электропривода. На рисунке 4.2 представлена функциональная схема формирования сигналов задания на момент двигателей в двухдвигательной системе тягового электропривода. На схеме  $M_1$  – сигнал задания на момент «высокомоментного» канала, в котором двигатель подключен к дифференциальному редуктору через обычный редуктор с передаточным числом  $j$ .  $M_2$  – сигнал задания на момент «высокоскоростного» канала, в котором двигатель подключен к дифференциальному редуктору напрямую. В каждый момент времени регулирование скорости в функции сигнала задания осуществляется только по одному из каналов – на привод подается сигнал задания на момент  $M$ , поступающий с регулятора скорости РС. Скорость двигателя в другом канале при этом остается фиксированной, равной нулю или «1» (речь идет об относительных единицах. При  $n=1$ ,  $n=n_{\text{хх}}$ ). При фиксированной скорости одного из двигателей, сигнал задания на момент данного канала берется с регулятора РС<sub>1</sub> в случае первого двигателя и с РС<sub>2</sub> в случае второго. Принципиальным является

применение ПИ-регуляторов скорости РС<sub>1</sub> и РС<sub>2</sub>, так как высокая точность перехода в каждом из каналов на фиксированную скорость влияет на отсутствие перерегулирования, и как следствие, корректность работы системы. В качестве регулятора скорости РС может использоваться П-регулятор с коэффициентом усиления  $k_{РС}$ .

Переключение подачи сигнала М между каналами осуществляется посредством релейного регулятора РЭ. Когда сигнал задания на момент  $M > k_{п}(n_{зад}-n)k_{РС}$ , сигнал на выходе РЭ равняется «1»,  $M_1=M$ . Здесь  $k_{п}$  – коэффициент включения «высокомоментного» двигателя во время переходного процесса. Когда же  $M < k_{п}(n_{зад}-n)k_{РС}$ , сигнал на выходе РЭ равняется 0 и сигналом задания  $M_1$  является сигнал с выхода регулятора скорости РС<sub>1</sub>, а  $M_2=M$ . Обратим внимание, что одновременная подача сигнала задания М на оба канала в данной схеме невозможна.

Таблица 4.1 – Состояние сигналов М1 и М2 в зависимости от состояния сигналов  $n_{зад}$  и М

Сигналы входа		Сигналы выхода	
$n_{зад}$	М	М1	М2
$n_{зад} < 1$	$M < k_{п}$	М	0
	$M > k_{п}$	1	М
$n_{зад} > 1$	$M < k_{п}$	М	1
	$M > k_{п}$	1	М
$n_{зад} = 0$		0	0

Выбор фиксированной скорости приводов первого и второго каналов осуществляется по-разному. Для первого канала с «высокомоментным» двигателем скорость будет зафиксирована на скорости идеального холостого хода (1) в случае если, сигнал задания больше 1, в противном случае данный двигатель всегда заторможен и используется только тогда, когда требуется высокая интенсивность разгона.

Фиксированная скорость «высокоскоростного» двигателя второго канала определяется сигналом  $M$ : при положительном равняется 1, при отрицательном или нуле – 0. На рисунке 2 приведены осциллограммы скоростей при исследовании работы данной схемы на математической модели *Matlab- Simulink*.

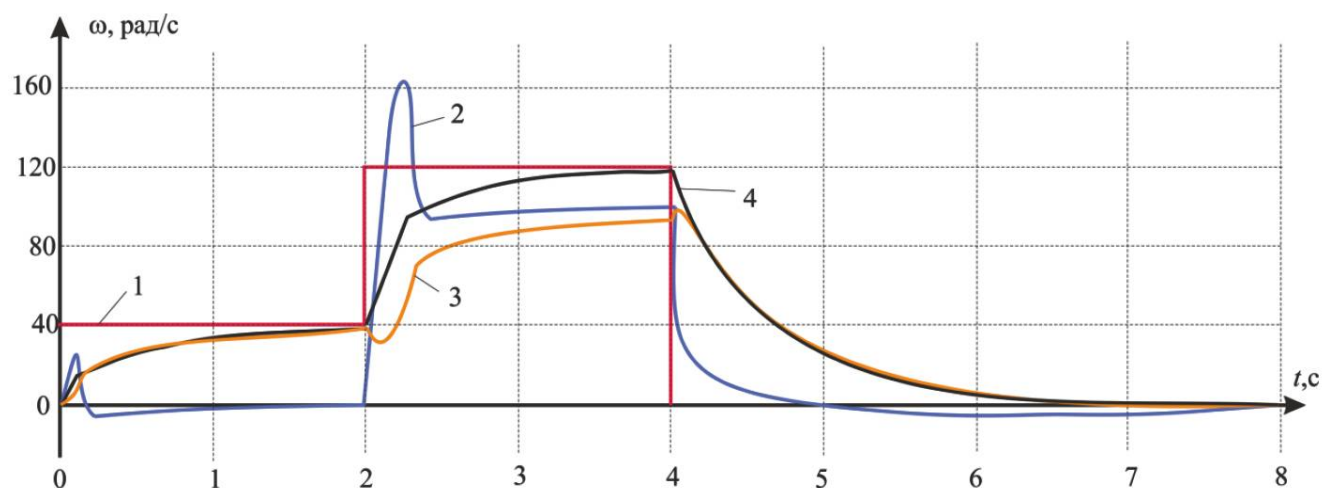


Рисунок 4.3 – Осциллограммы скоростей (2) – «высокомоментного» двигателя, подключенного к дифференциатору посредством передачи с  $j=4$ ; (3) – «высокоскоростного» двигателя, подключенного к дифференциатору напрямую, (4) – выходного вала дифференциатора и (1) – сигнала задания на скорость; при  $k_{п}=0,3$

Как видно из рисунка 4.3, при подаче сигнала задания на скорость равном менее 1 (участок 0-2 с.), в первый момент времени регулирование происходит по каналу 1 с «высокомоментным» двигателем, скорость «высокоскоростного» двигателя при этом фиксируется на 1. Далее первый двигатель отключается, и регулирование производится «высокоскоростным» приводом.

На втором участке (2-4 с.) сигнал задания превышает 1. Этот режим позволяет симулировать режим интенсивного разгона при движении на скорости. В данном случае сигнал задания скорости «высокоскоростного» двигателя остается равным 1. «Высокомоментный» двигатель включается в работу в первый момент, но затем не отключается, а продолжает работать на фиксированной скорости, равной 1.

Наконец, на третьем участке (4-8 с.) имитируется режим торможения. В данном случае сигнал задания «высокомоментного» двигателя устанавливается на нуле и торможение осуществляется высокоскоростным двигателем. Возможен вариант,

когда в начале торможения высокомоментный двигатель начинает вращение в обратную сторону, тем самым увеличивая темп торможения. Для этого достаточно на вход РЭ подавать сигнал  $M$ , взятый по модулю. Другими словами, регулирование скорости первым высокомоментным двигателем при фиксированной скорости второго канала может осуществляться как при  $M < -k_{п}(n_{зад} - n)k_{РС}$ , так и при  $M > k_{п}(n_{зад} - n)k_{РС}$ . Однако, при таком алгоритме работы усложняется настройка работы схемы в связи с возникающим перерегулированием в работе второго канала.

#### 4.3 Настройка оптимального порога переключения между каналами

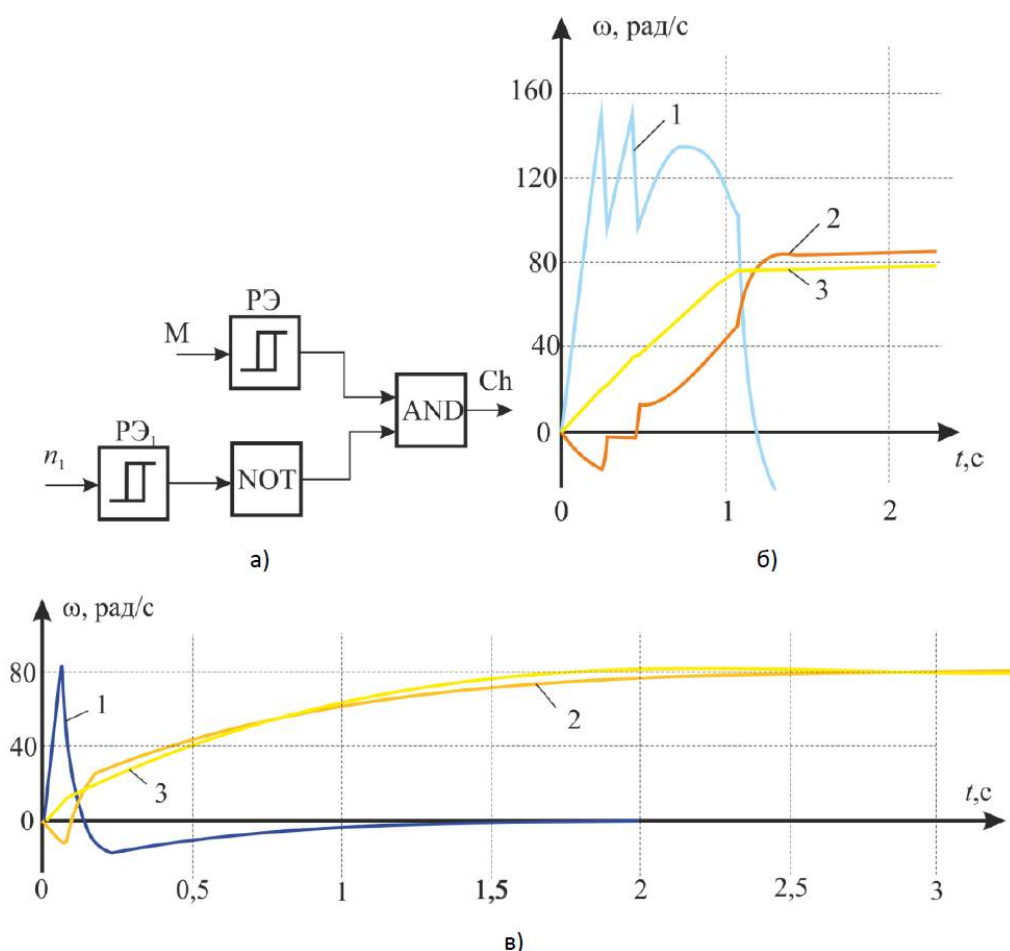


Рисунок 4.4 – Функциональная схема ограничения сигнала задания по скорости высокомоментного двигателя и осциллограммы скоростей первого двигателя (1), второго двигателя (2) и выходного вала дифференциала (3) при разгоне преимущественно на высокомоментном приводе б) и преимущественно на высокоскоростном двигателе в)

Представленные на рисунке 4.3 осциллограммы демонстрируют принцип работы при отсутствии ограничений. Однако при решении задачи поиска оптимального момента переключения регулирования между каналами в данной упрощенной модели необходимо учесть возможность насыщения высокомоментного двигателя по скорости. Для исследования режимов работы схемы, когда задание на скорость высокомоментного двигателя не превышает 1,5 скорости идеального холостого хода в модель, представленную на рис.1 необходимо ввести дополнительные элементы.

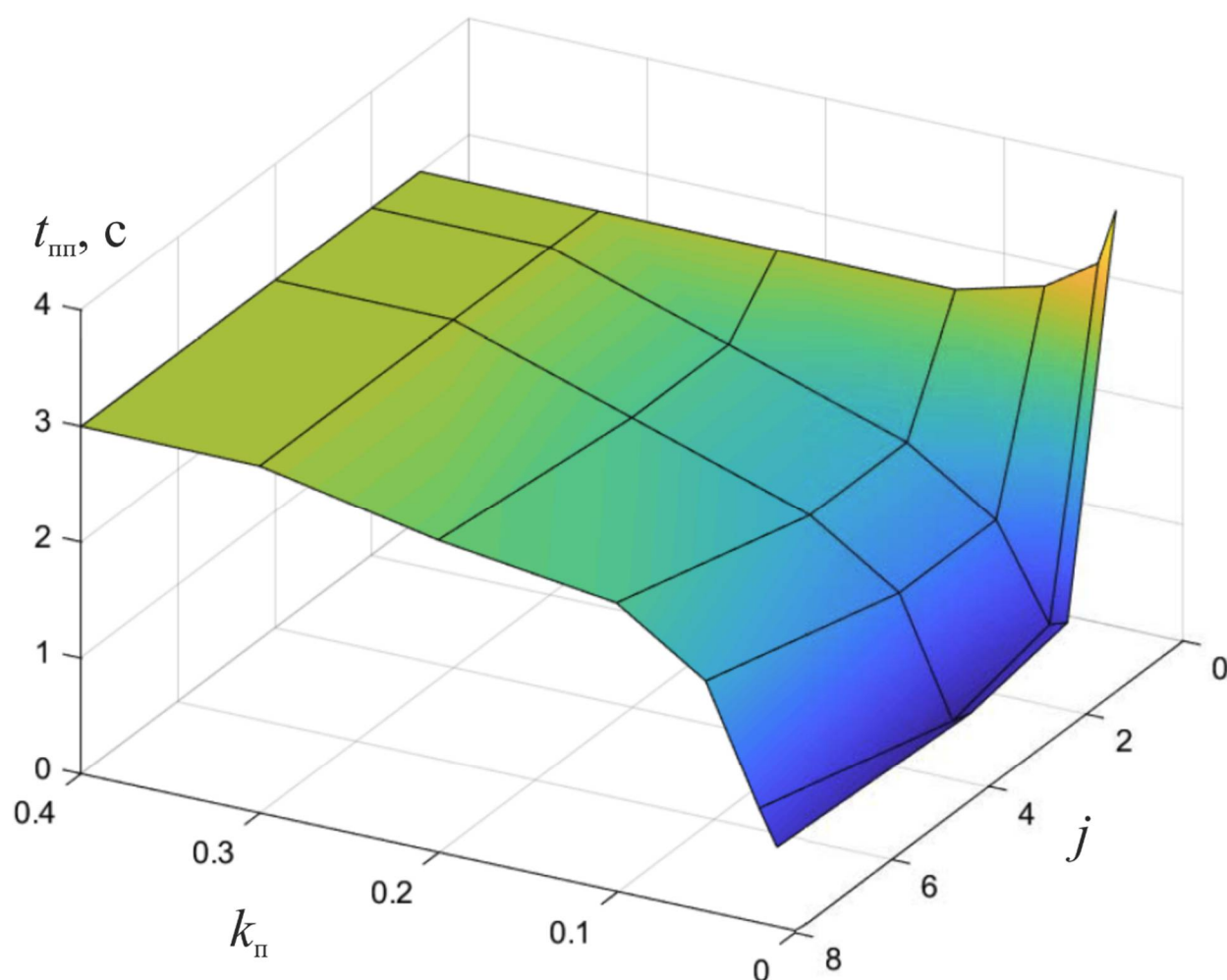


Рисунок 4.5 – Зависимость времени переходного процесса  $t_{шп}$  от передаточного числа редуктора «высокомоментного» привода  $j$  и коэффициента включения «высокомоментного» двигателя  $k_{п}$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Структурная схема ограничения сигнала задания по скорости представлена на рисунке 4.4, а). Здесь  $Ch$  – сигнал выбора канала регулирования, равен единице (то есть регулирование осуществляется по каналу с высокомоментным приводом) тогда и только тогда, когда на выходе РЭ сигнал равен 1, а на выходе РЭ<sub>1</sub> – нулю. Релейный элемент 1 включается при превышении скорости двигателя  $n_1$  скорости, равной 1,5 скорости холостого хода и отключается при  $0,95 n_{хх}$ .

На рисунках 4.4, б), в), представлены осциллограммы крайних случаев выбора  $k_{п}$  и  $j$  при которых разгон происходит подавляющую часть времени только при регулировании по одному из каналов. Варьируя  $k_{п}$  и  $j$  найдем минимум времени переходного процесса (зависимость представлена на рисунке 4).

Как видно из рисунка 4.5, при  $j=1$ , эффект от применения второго двигателя нивелируется, вне зависимости от доли его работы, время переходного процесса не уменьшается, а при кратковременном включении, даже увеличивается. При  $j=8$ , время переходного процесса также выше, чем при  $j=4$  и  $j=2$ . Это обусловлено быстрым насыщением по скорости «высокомоментного» привода. Как и ожидалось, при уменьшении  $k_{п}$ , коэффициента, отвечающего за включение высокомоментного двигателя в зависимости от  $(n-n_{зад})$  время переходного процесса также уменьшается, так

как большую долю времени переходного процесса работает именно высокомоментный двигатель. Однако, как видно из рисунка, дальнейшее уменьшение  $k_{п}$  до значений меньше 0,01 не приводит к уменьшению времени переходного процесса. Это связано с появлением процессов перерегулирования при переключении регулирования на высокоскоростной двигатель. Минимальным время переходного процесса в нашем случае получилось при  $j=4$ ,  $k_{п}=0,02$ . Однако, стоит отметить, что в некоторых случаях, при нестандартном соотношении моментов инерции двигателей и приведенного момента инерции рабочего органа  $J_{дв1}$ ,  $J_{дв2}$  и  $J_{рo}$  точка оптимума может смещаться.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

## 5 ВЫБОР СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для дальнейшего исследования необходимо перейти к созданию более подробной уточненной модели системы, в которой будут более детально и глубоко учитываться физические особенности работы элементов схемы. Перед этим необходимо произвести выбор основных элементов схемы, для того чтобы их параметр и характеристики могли использоваться при создании модели. Целью данной главы не является абсолютно точный расчет механики, целью является получить данные для модели.

### 5.1 Выбор электродвигателя

Чтобы произвести подбор необходимых элементов, прежде всего нужно знать какие нагрузки будут к нему прикладываться.

В начале расчета примем, что он будет приводится для среднестатистического легкового автомобиля. Примем массу автомобиля равной  $m=1700$  кг, а удовлетворяющая нас динамику разгона определим на уровне 6 секунд до 100 км/ч. Для удобства расчета рассчитаем ускорение в СИ

$$a = \frac{100 \frac{\text{км}}{\text{ч}}}{6 \text{ с}} = \frac{100 \cdot 1000}{6 \cdot 3600} = 4.63 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}. \quad (5.1)$$

Теперь рассчитаем радиус колеса. Примем, что на автомобиле штатными шинами 235/50R18, здесь

$d=235$  см – ширина шины;

$D=50\%$  – коэффициент профиля шины, равный отношению ширины шины к высоте ее профиля;

$Rd=18$  дюйм =  $18 \cdot 0,0254 = 0,457$  м – диаметр внутреннего обода шины.

Высота профиля:

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34



$$R_p = d \cdot D = 0.235 \cdot 0.5 = 0.117 \text{ см.} \quad (5.2)$$

Радиус колеса:

$$R_k = \frac{R_d}{2} + R_p = \frac{0.457}{2} + 0.117 = 0.346 \text{ м.} \quad (5.3)$$

По полученным данным можно вычислить крутящий момент на колесах:

$$M_k = a \cdot m \cdot R_k = 4.63 \cdot 1700 \cdot 0.346 = 2724 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (5.4)$$

Примем, что работа двигателя в номинальной точке будет соответствовать скорости движения автомобиля  $v_n = 70$  км/ч. Скорость вращения колеса на этой скорости будет составлять

$$n_k = \frac{v_n \cdot 1000}{60 \cdot 2\pi \cdot R_k} = \frac{70 \cdot 1000}{60 \cdot 2\pi \cdot 0.346} = 536 \frac{\text{об}}{\text{мин}}. \quad (5.5)$$

Мощность  $P_k$  на колесах будет составлять

$$P_k = \frac{n_k \cdot M_k}{9550} = \frac{536 \cdot 2724}{9550} = 153 \text{ кВт.} \quad (5.6)$$

Мощность двигателя с учетом механических потерь при передаче мощности от двигателя на колеса

$$P = \frac{P_k}{0.9} = \frac{153}{0.9} = 170 \text{ кВт.} \quad (5.7)$$

Полученная мощность  $P$  – это мощность энергетической установки целиком, состоящей из двух одинаковых электродвигателей, то мощность одного двигателя  $P_d$  будет в два раза меньше рассчитанной выше

$$P_d = \frac{P}{2} = \frac{170}{2} = 85 \text{ кВт.} \quad (5.8)$$

По каталогу [18] выбран высокоскоростной двигатель CPLS 160S/0607 фирмы Leroy-Somer. Технические характеристики двигателя приведены в таблице

Таблица 5.1 – Технические характеристики двигателя

Модель	P, кВт	U, В	f, Гц	n <sub>1</sub> , об/мин	M, Нм	I, А	cos φ	η, %	n <sub>2</sub> , об/мин	J, кг/м <sup>2</sup>	n <sub>max</sub> , об/мин
160S0607	85.5	480	83.8	2468	331	134	0.82	94	7350	0.188	7000



Рисунок 5.1 – Внешний вид двигателя CPLS 160S/0607 фирмы Leroy-Somer

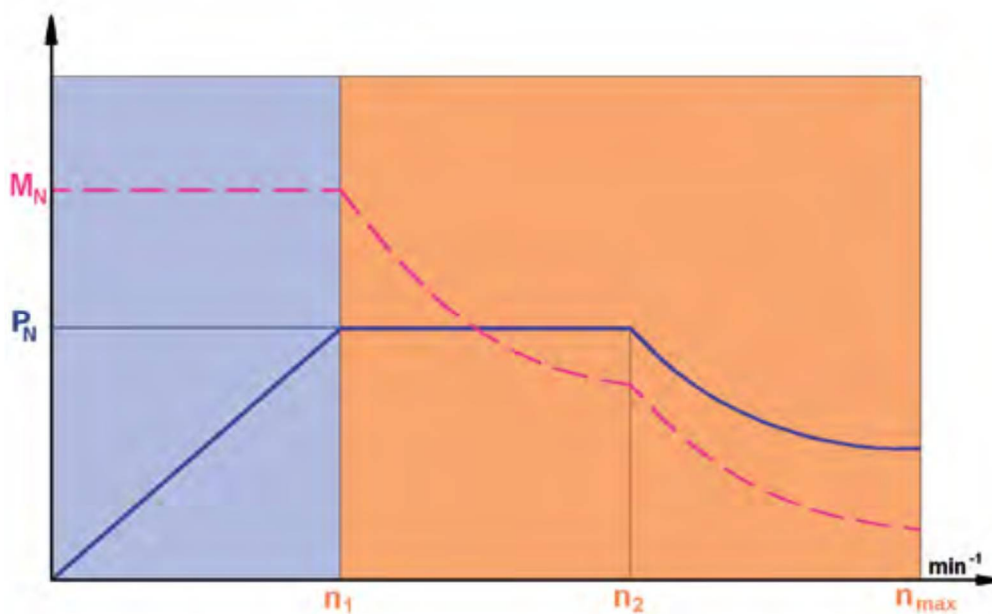


Рисунок 5.2 – Механическая характеристика двигателя

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ

Лист

36

Линейка асинхронных двигателей серии CPLS разработана для применения с постоянной и переменной скоростью в условиях ограниченного пространства или (и) широкого диапазона колебания скорости. Питаемые от частотных преобразователей, двигатели способны работать как в режиме открытого, так и в режиме замкнутого контура. В стандартном исполнении двигатели поддерживают номинальный крутящий момент ( $M_N$ ) вплоть до основной скорости вращения ( $n_1$ ), а затем обеспечивают работу при постоянной мощности  $P_N$  в диапазоне скорости от  $n_1$  до  $n_2$ . Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором хорошо приспособлены для работы в режиме ослабленного поля и благодаря модернизированному магнитопроводу статора в широком диапазоне скорости. Каждый двигатель имеет свой номинальный крутящий момент, который благодаря наличию эффективной радиальной вентиляции поддерживается при непрерывной эксплуатации при скорости ниже основной. По эксплуатационным показателям эти двигатели сравнимы с электродвигателями постоянного тока, а по некоторым характеристикам – с бесщеточными электродвигателями. Благодаря пониженной инерционности эти двигатели демонстрируют отличные динамические показатели.

## 5.2 Выбор понижающего редуктора

Понижающий редуктор для второго высокомоментного двигателя выбирается по значениям скорости вращения вала на входе и максимального момента на выходе редуктора. Расчетный крутящий момент на выходном валу редуктора

$$M_{РАЧС} = M_{ТРЕБ} \cdot K_{РЕЖ} = 1296 \cdot 1.08 = 1400 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (5.9)$$

где  $M_{ТРЕБ}$  – требуемый крутящий момент на выходном валу, Н·м,

$K_{РЕЖ}$  – коэффициент режима работы.

При известной мощности двигательной установки

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

$$M_{\text{ТРЕБ}} = \frac{P_{\text{ТРЕБ}} \cdot j \cdot 9550 \cdot \eta}{n_{\text{ВХ}}} = \frac{85.5 \cdot 4 \cdot 9550 \cdot 0.98}{2468} = 1296 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (5.10)$$

где  $P_{\text{ТРЕБ}}$  – мощность двигательной установки;

$n_{\text{ВХ}}$  – частота вращения входного вала редуктора (при условии, что вал двигательной установки напрямую без дополнительной передачи передает вращение на входной вал редуктора), об/мин;

$j$  – передаточное число редуктора, 0.98 для одноступенчатых цилиндрических редукторов;

$\eta$  – коэффициент полезного действия редуктора.

Коэффициент режима работы для зубчатых редукторов определяется как произведение коэффициентов:

$$K_{\text{РЕЖ}} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_{\text{ПВ}} \cdot K_{\text{РЕВ}} = 1.2 \cdot 1 \cdot 1.2 \cdot 1 \cdot 0.75 = 1.8, \quad (5.11)$$

где  $K_1$  – коэффициент типа и характеристик двигательной установки, для электродвигателей трансмиссионных валов 1.2;

$K_2$  – коэффициент продолжительности работы, 1.0 при использовании < 8 ч/сут;

$K_3$  – коэффициент количества пусков, 1.2 при количестве пусков < 20 в час при  $K_1=1.2$ ;

$K_{\text{ПВ}}$  – коэффициент продолжительности включений, 1 при ПВ=100%;

$K_{\text{РЕВ}}$  – коэффициент реверсивности, при нереверсивной работе  $K_{\text{РЕВ}}=1,0$  при реверсивной работе  $K_{\text{РЕВ}}=0,75$

Параметры выбираемого редуктора должны удовлетворять следующим условиям:

$$M_{\text{НОМ}} > M_{\text{РАСЧ}}, \quad (5.12)$$

где  $M_{\text{НОМ}}$  – номинальный крутящий момент на выходном валу редуктора, приводимый в каталоге в технических характеристиках для каждого редуктора, Н·м

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		38

$M_{расч}$  – расчетный крутящий момент на выходном валу редуктора (формула 5.9), Н·м

На основе расчетных данных выбрана модель редуктора АВ220 фирмы Aris Dynamics. Технические характеристики редуктора представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Технические характеристики редуктора понижающего редуктора АВ220

Передаточное число редуктора	4
Номинальный крутящий момент на выходном валу, $M_{ном}$ , Нм	1700
Номинальная скорость входного вала, об/мин	3000
Максимальная скорость входного вала, об/мин	5500
КПД, %	97

### 5.3 Выбор тормоза

Электромагнитный тормоз предназначен для фиксации вала электродвигателя при отключении от питающей сети и устанавливаются на электродвигатели различных типов на выходной вал. Возможно использование в составе приводов в качестве стояночного тормоза. Используются в механизмах, не имеющих особо жестких требований к быстродействию и ресурсу тормоза. В данной схеме применяются для гарантированной неподвижности вала двигателя и возможности снимать возбуждение с привода, задание которого в данный момент равно нулю.

Основным критерием выбора тормоза является значение тормозного момента, развиваемое тормозом. Так как момент двигателя равен 331 Н·м, был выбран типа 2TE с тормозным усилием 480 Н·м. Тормоза типа 2TE подключаются к независимому источнику питания и могут быть использованы в составе частотно-регулируемого привода, имеют рукоятку ручной расфиксации тормоза (для растормаживания при отсутствии напряжения питания). В таблице 5.3 приведены технические характеристики выбранного тормоза.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

Таблица 5.3 – Технические характеристики тормоза

Габарит	200
Тормозной момент, Н·м	480
Мощность катушки, Вт	210
Время наложения, мс	570
Время снятия, мс	550
Момент инерции, $10^{-3}$ кг·м	31.7
Рабочий зазор S, мм	1.0
Напряжение питания катушки, В	100, 170
Частота вращения, об/мин	4500 max
Масса, кг	32

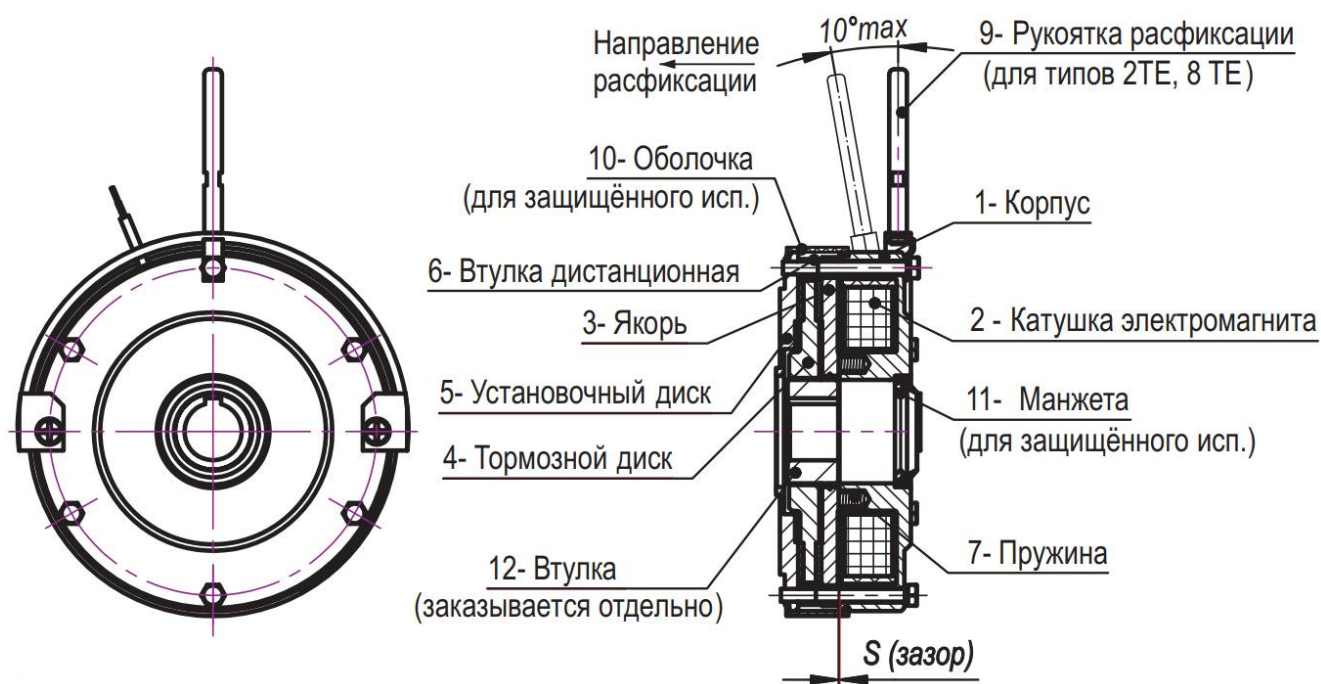


Рисунок 5.3 – Устройство электромагнитного тормоза 2ТЕ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ

Лист

40

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрена проблема снижения динамических характеристик транспортных средств при движении на высоких скоростях. Данное утверждение базируется на анализе статистических данных, проведенном в 1 главе работы, согласно которому около 1% погибших в ДТП на территории России приходится на столкновения (в том числе лобовые) при совершении маневра обгона. Обзор данной проблемы показал, что, ввиду физических особенностей работы двигателей, она актуальна как для традиционных автотранспортных средств на базе ДВС, так и для развивающихся электротранспортных средств.

Обзор решений данной проблемы показал, что в случае с электромобилями традиционные методы применения коробки переключения передач являются неэффективными. Предложена система, позволяющая расширить диапазон регулирования скорости электрического транспортного средства без применения коробки передач благодаря применению двухканального электропривода с двумя электродвигателями, каждый из которых работает на свой редуктор с разными передаточными числами. В свою очередь, выходные валы этих редукторов работают на один дифференциальный редуктор.

Была разработана функциональная схема и проведено математическое моделирование системы в среде *Matlab-Simulink* работы. Результаты моделирования подтверждают работоспособность заявленной гипотезы. Представленная в данной работе упрощенная математическая модель демонстрирует потенциальные возможности применения двухканального электропривода в автономных транспортных средствах. Комбинированное сочетание работы двух приводов позволяет добиться меньшего времени переходного процесса по сравнению с однодвигательной электроустановкой, особенно при разгоне на высокой скорости.

Решена задача устойчивой работы многокоординатного (двухдвигательного) электропривода. В ходе работы было определено оптимальное соотношение

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

передаточных чисел редукторов первого и второго механических каналов, определен оптимальный момент их переключения, оптимальный вариант натурной реализации применения дифференциального редуктора. Полученный результат может быть применен в автомобилестроении, что позволит увеличить безопасность движения на электромобиле и повысит его энергоэффективность.

Можно выделить несколько направлений дальнейших исследований по этой теме:

во-первых, следует уточнить существующую математическую модель каждого из двух асинхронных двигателей с целью расширения возможностей регулирования – индивидуальное задание на момент и поток каждого из двигателей позволит повысить эффективность электропривода в целом, так как появится возможность работы в режиме ослабления поля;

во-вторых, исследовать взаимосвязь эффективности работы энергетической установки, от соотношения мощностей «высокоскоростного» и «высокомомментного» двигателя. Вероятно, можно добиться снижения полной мощности системы, за счет установки двигателей меньшей мощности, без существенного влияния на ее производительность;

в-третьих, совершенствование системы управления – разработка более совершенных алгоритмов переключения сигнала задания между каналами;

в-четвертых, количественная оценка изменения эффективности использования электроэнергии при переходе от классической однодвигательной схемы привода электромобиля к двухдвигательной с суммирующим редуктором.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		42



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мясников Г.В., Моисеенко Е.И. Многоскоростные планетарные механизмы в приводах горных машин. М., «Недра», 1975, 264 с.
2. Марголин Ш.М. Дифференциальный электропривод. М., «Энергия», 1975.
3. *Method of Operating a Dual Motor Drive and Control System for an Electric Vehicle. Patent 20130241445, Tesla Motors, Inc.*
4. Григорьев М.А. Тяговый электропривод электромобиля / Григорьев М.А., Наумович Н.И., Белоусов Е.В. *Электротехника*. 2015. № 12. С. 53-56.
5. Математическая модель электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / А.М. Журавлев, Е.В. Белоусов, Д.А. Сычев // *Фундаментальные проблемы технических наук: науч.-практ. конф.* – Уфа, 2014. – С. 59-63.
6. Виноградов К.М., Белоусов Е.В. Способы повышения энергоэффективности электропривода стана холодной прокатки труб / Виноградов К.М., Белоусов Е.В., Сычев Д.А., Журавлев А.М., Савостеенко Н.В., Хаятов Е.С. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2016. Т. 16. № 1. С. 42-46.
7. Виноградов К.М., Белоусов Е.В. Оптимизация функции управляющего воздействия для электропривода с синхронной реактивной машиной с независимым управлением по каналу возбуждения / Виноградов К.М., Белоусов Е.В., Сычев Д.А., Наумович Н.И., Хаятов Е.С., Грызлов А.А. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2016. Т. 16. № 2. С. 30-34.
8. Динамические показатели активных выпрямителей Григорьев М.А., Горожанкин А.Н., Кинас С.И., Белоусов Е.В. *Электротехника*. 2014. № 10. С. 53-55.
9. Григорьев, М.А. Математическая модель синхронного реактивного электропривода с независимым управлением по каналу возбуждения / М.А. Григорьев, С.И. Кинас // *Электротехника*. – 2014. – №10. – С. 60.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

10. Шишков, А.Н. Тяговый электропривод трактора ДЭТ-400 / А.Н. Шишков, Д.А. Сычев, А.Е. Бычков, Н.Ю. Сидоренко // Электротехника. – 2014. – №10. – С. 24.

11. Усынин, Ю.С. Математическая модель синхронного реактивного электропривода с независимым управлением по каналу возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, Н.Ю. Сидоренко // Электротехнические системы и комплексы. – 2014. – №2(23). – С. 13.

12. Усынин, Ю.С. Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Виноградов К.М. // Электричество. – 2007. – №3. – С. 21–26.

13. Бычков, А.Е. Оптимизация новых типов электромеханических преобразователей в электротехнических комплексах / Бычков А.Е., Кашаев Д.И., Москов Т.Т. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2011. – Т. 15. – №15 – С. 62–66.

14. Григорьев, М.А. Электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Григорьев М.А. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – №4. – С. 32–36.

15. Пат. 2346376 Российская Федерация. Синхронная реактивная машина. Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Виноградов К.М. и др. -Заявл. 12.07.2007; опубл. 10.02.2009.

16. Пат. 2408972 Российская Федерация. Электропривод с синхронной реактивной машиной и способ управления им. Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Виноградов К.М. и др. -Заявл. 24.12.2009; опубл. 10.01.2011.

17. Пат. 2012143554 Российская Федерация. Электропривод с синхронной реактивной машиной. Усынин Ю.С., Горожанкин А.Н., Бычков А.Е и др. -Заявл. 11.10.2012; опубл. 20.04.2014.

18. Каталог Leroy-Somer – Асинхронные двигатели серии CPLS с регулируемой частотой вращения - 4119 ru – 07.2017.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		44

19. Каталог Белробот – Тормоза электромагнитные серии ТЕ  
[http://belrobot.by/sitefiles/1/19/27/41/401/%D0%91%D0%B5%D0%BB%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%20-%20%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B7%D0%B0\\_TE.pdf](http://belrobot.by/sitefiles/1/19/27/41/401/%D0%91%D0%B5%D0%BB%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%20-%20%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B7%D0%B0_TE.pdf)

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.259.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						45
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		