## Министерство сельского хозяйства Российской Федерации ФГБОУ ВО Горский государственный аграрный университет

На правах рукописи

Asser

Аджиманбетов Султанхан Багатович

## РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ АВТО-ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант: доктор технических наук, доцент М.С. Льянов

#### ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение
1.СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ДЛЯ АВ-
<b>ТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ (АТС)</b> 16
1.1 Предпосылки развития электрических приводов для АТС16
1.2 Гибридные и электрические приводы <i>ATC</i> 21
1.3 Привод пуска традиционных автомобилей с $\mathcal{A}BC$ и средства повышения
его эффективности45
1.4 Стартер-генераторные установки ( <i>СГУ</i> ) автомобилей
1.5 Постановка задач исследования71
Выводы по первой главе76
2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И СОЗДАНИЕ ОСНОВ ПРОЕКТИРОВА-
ния привода электромобиля87
2.1Обоснование выбора способа управления скоростью автомобиля
2.2 Особенности методики концептуального проектирования привода элек-
тромобилей92
2.3 Разработка <i>Excel</i> -формуляра для расчета привода электромобиля с вариа-
торной трансмиссией
2.4 Имитационное моделирование тягового привода электромобиля98
2.5 Результаты моделирования привода электромобиля с вариаторной транс-
миссией
2.6 Моделирование привода электромобиля с широтно-импульсным преобра-
зователем (ШИП)103
2.7 Результаты моделирования приводов электромобилей109
Выводы по второй главе
3.СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И СОЗДАНИЕ ОСНОВ ПРОЕКТИРОВА-
НИЯ ПРИВОДА ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ112
3.1 Разработка функциональной схемы тягового привода гибридного АТС.112
3.1.1 Обоснование выбора типа накопителя энергии гибридного АТС112

3.1.2 <b>Дополнительные</b> соооражения по структуре гиоридной двигатель-	-
ной установки	114
3.1.3 Функциональная схема привода гибридного автомобиля	116
3.2 Методика проектирования тягового привода гибридного АТС	121
3.2.1 Определение параметров привода гибридного автомобиля на основ	ве
разработанной типовой схемы	122
3.2.2 Разработка динамической имитационной модели привода гибридно	ого
автомобиля	128
3.2.3Результаты моделирования привода гибридного автомобиля	135
3.2.4 Собственно методика проектирования привода гибридного АТС	141
Выводы по третьей главе	142
4.ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИВОДОВ ПУСК	ζA
<b>ДВС</b> И СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ	143
4.1 Обоснование системы двухэтапного пуска $ДВС$	143
4.2 Двухэтапный пуск $ДВС$ и варианты его технических решений	152
4.2.1 Двухэтапный пуск $ДВС$ через электромагнитную муфту	153
$4.2.2~$ Двухэтапный пуск $\@ifnextchar[{\it ДВC}$ через сцепление транспортного	
средства	156
4.2.3 Двухэтапный пуск с маховиком	158
4.2.4 Двухрежимный пуск <i>ДВС</i>	160
4.2.5 Предлагаемая компоновка СГУ	164
4.3 Совершенствование элементов системы пуска ДВС	167
4.3.1 Одноконтактное пусковое устройства стартера	167
4.3.2 Система бесконтактного включения стартера	170
4.3.3 Защита аккумуляторной батареи от перезаряда	173
4.3.4 Привод вентилятора системы охлаждения	176
4.4 Повышение энергоэффективности привода стартер-генераторной уст	га-
новки (СГУ) автомобиля	180
4.4.1Работа $C\Gamma V$ в процессе торможения автотранспортного средства	180
4.4.2 Усовершенствование привода рекуперативного торможения АТС	184

Выводы по четвертой главе	193
5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННЫХ ЭЛЕКТРО	ME-
ХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТ	<b>B</b> 195
5.1 Эффективность разработанных приводов для гибридных и электр	ических
автотранспортных средств	195
5.1.1 Результаты моделирования и оценка эффективности привода гибр	идного
автомобиля	195
5.1.2 Результаты моделирования и оценка эффективности привода эле	ектро-
мобиля	196
5.2 Эффективность разработок для системы пуска ДВС	198
5.2.1 Экспериментальные исследования двухэтапного пуска ДВС	198
5.2.2 Анализ результатов эксперимента и оценка эффективности разр	аботан-
ной системы пуска	201
5.2.3 Эффективность разработок для <i>АТС</i> со <i>СГУ</i>	210
Выводы по пятой главе	210
Основные выводы по диссертационной работе	211
Список источников использованной литературы	213
Список иллюстративных материалов	228
ПРИЛОЖЕНИЯ	234

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Совершенствование и эффективное функционирование всех систем и механизмов автомобилей, тракторов, самоходных сельскохозяйственных машин и другой специализированной мобильной техники является важным условием социального и экономического развития нашей страны и улучшения экологической ситуации. Тенденции развития автотранспортных средств показывают, что улучшение их эксплуатационных показателей может быть достигнуто преимущественно все более широким применением электрического привода не только для отдельных механизмов и агрегатов, но и для главного транспортного процесса — передвижения использовать электрическую тягу, а также режим генераторного торможения с рекуперацией энергии. В настоящее время состояние и направление развития электрических приводов установок автотранспортных средств (АТС) можно охарактеризовать так:

- 1. Электрические транспортные средства (ЭТС), которые пока в полной мере не могут конкурировать с обычными автомобилями из-за большого веса и стоимости аккумуляторных батарей, относительно малой их удельной емкости, не позволяющих обеспечить достаточный пробег до зарядки. У электромобиля много преимуществ по сравнению с автомобилем.
- 2. Транспортные средства с комбинированной энергоустановкой ( $K\Im V$ ) или гибридные ( $\Gamma TC$ ), имеющие преимущественно два разных вида взаимно дополняющих движителя как  $\mathcal{L}BC$  и электродвигатель. Такое сочетание позволяет сокращать энергетические потери (расход топлива), обеспечивает возврат и повторное использование энергии за счет рекуперативного торможения, электродвигатель помогает  $\mathcal{L}BC$  при больших нагрузках и наборе скорости и оптимизирует работу  $\mathcal{L}BC$ , создавая условия для его работы в наиболее экономных режимах. Рекуперативное торможение снижает проскальзывание колес, что повышает безопасность движения, уменьшает износ

шин и тормозных накладок.  $\Gamma TC$  должны стать мостом для перехода от ATC к электромобилям ( $\Im TC$ ).

- 3. ATC с приводом от  $\mathcal{A}BC$ , отдельной системой стартерного пуска и генераторной установкой для электроснабжения, которым все труднее соответствовать возрастающим экологическим требованиям за счет усложнений систем и механизмов  $\mathcal{A}BC$ .
- 4. ATC с  $\mathcal{A}BC$ , но с интеграцией стартера и генератора в одной электрической машине и образование стартер-генераторной установки  $(C\Gamma Y)$ , а также с генераторной установкой со специальным управлением, позволяющим кинематически отключать генератор от  $\mathcal{A}BC$  при разгоне автомобиля, а при торможении, движении накатом, под уклон вращать генератор кинетической энергией торможения.

Повышение эксплуатационных показателей автотранспортных средств, экономия расхода топлива и снижение выбросов отработавших газов являются важными задачами, позволяющими решить проблемы увеличения производительности труда и улучшения экологической ситуации.

Это может быть достигнуто повышением эффективности функционирования электрических приводов установок и систем ATC: гибридных автомобилей (TTC), электромобилей (TTC), стартер-генераторных установок (TTC) и стартерного пуска TBC.

Транспортные средства с комбинированной энергоустановкой  $(K\Im Y)$  – это полные гибридные автомобили, обеспечивающие дополнительно полноценные режимы движения на электрической тяге, значительное снижение требуемой мощности основного двигателя и оптимизацию его работы. Традиционному  $\mathcal{ABC}$  все труднее отвечать тем требованиям, которые потребитель предъявляет к современным транспортным средствам: они должны быть динамичными, иметь высокую максимальную скорость и вместе с тем быть экономичными и отвечать жестким нормам экологических требований. Средний легковой автомобиль на 100 км пути расходует примерно 8 л топли-

ва (32кВт·ч), а такой же автомобиль на электрической тяге расходует на том же расстоянии примерно 15-20 кВт-ч электроэнергии, т.е. вдвое меньше. Это происходит из-за того, что мощность установленного ДВС на автомобиле заранее завышена для получения необходимой максимальной скорости и динамики его разгона.  $K\Pi \square$  двигателя тем выше, чем больше он загружен, но такие режимы при эксплуатации автомобиля встречаются редко. Наиболее применяемые режимы движения автомобиля требуют значительно меньших мощностей. От загруженности  $\mathcal{A}BC$  изменяется его удельный расход топлива. Минимальный удельный расход топлива современных бензиновых двигателей равен 240-250 г/кВт·ч, а максимальный составляет 700-750 г/кВт·ч. Кроме того, зона минимального удельного расхода топлива располагается в очень узкой области многопараметровой характеристики, и может быть достигнута при режиме близком максимальной мощности двигателя, который на практике используется крайне мало. Поэтому, если на автомобиль установить более мощный двигатель (другая модификация), то его топливная экономичность обязательно уменьшится, т.к. будет недогружен. Чтобы как-то уменьшить расход топлива применяют многоступенчатую коробку передач (лучше вариатор), но она не позволяет приблизиться к зоне минимального удельного расхода топлива при малых и средних нагрузках. Для достижения оптимального режима работы двигателю, при невысоких мощностях движения, необходимо дать полезную дополнительную нагрузку, например электрический генератор, который превращает излишнюю для данного режима движения механическую энергию ДВС, в электрическую и отдает ее в накопитель (аккумуляторную или конденсаторную батарею). Таким образом, в двигатели обычных автомобилей заложен большой потенциал, который практически не используется, необходимо оптимизировать его работу, снабдив его комбинированной энергоустановкой. Это позволит также использовать более эффективное рекуперативное торможение, которое снижает расход топлива, повышает ресурс тормозной системы и снижает износ шин, благодаря отсутствию их проскальзывания. В работе предлагается устройство рекуперативного генераторного торможения гибридного транспортного средства с использованием вариатора, которое используется как для торможения, так и для движения, расширяя диапазон действия этих режимов.

Гибридные транспортные средства ( $\Gamma TC$ ) должны стать мостом для перехода от автотранспортных средств (ATC) к электрическим транспортным средствам ( $\mathcal{I}TC$ ), которые пока не могут в полной мере конкурировать с обычными автомобилями из-за аккумуляторных батарей, имеющих относительно малую удельную емкость, не позволяющих обеспечить достаточный пробег до зарядки. У электромобиля много преимуществ по сравнению с автомобилем:

- электромобили значительно эффективнее используют энергию по сравнению с другими транспортными средствами: средний *КПД* обычного автомобиля 16%, гибридного (*Тойота «Приус»*) 37%, электромобиля на топливных элементах 50%;
- *ЭТС* проще по конструкции, обходится несложной трансмиссией, т.к. у заторможенного электродвигателя на валу высокий крутящий момент и динамика разгона;
- Электромобиль не выбрасывает вредные газы в атмосферу, а *ДВС* необходимо постоянно усложнять для соответствия возвращающим экологическим требованиям;
- Трудоемкость технического обслуживания электромобиля значительно ниже, чем у обычного автомобиля, практически ничего не надо менять.

Разработка стартер-генераторных установок ( $C\Gamma V$ ) это перспективная тенденция развития автотранспортного электрооборудования, способствующая ускорению перехода к активной разработке гибридных транспортных сред в стране. Необходимость разработки  $C\Gamma V$  также продиктована растущей от модели к модели энерговооруженностью бортовых потребителей транспортных средств, требующих генераторов большей мощности. Поэтому стар-

тер с генератором заменяются одной мощной электрической машиной. Главное —  $C\Gamma V$  оптимизирует режим работы  $\mathcal{L}BC$  и автомобиля в целом. Объединение в одной электрической машине и стартера, и генератора имеет большие преимущества в силу следующих факторов:

- избавление от стартера, который работает кратковременно, т.е. имеет низкий коэффициент использования, а также низкий *КПД*;
- -обеспечивается снижение веса оборудования, его стоимости, экономится место под капотом;
- обеспечивается рекуперация энергии при торможениях транспортного средства;
- надежно обеспечивается режим «старт-стоп» при движении автомобиля в городских условиях;
- необходимо обслуживать и обеспечивать надежность только одной электрической машины.

При разработке  $C\Gamma V$ , учитывая ее многофункциональность, важным вопросом является место установки и компоновка с трансмиссией транспортного средства. От этого во многом зависит эффективность её работы, доступность обслуживания. Отечественные разработчики рекомендуют и проектируют устанавливать  $C\Gamma V$  в картере сцепления, между  $\mathcal{A}BC$  и сцеплением, при этом вал ротора стартер-генератора жестко соединяется с коленчатым валом  $\mathcal{A}BC$ . При такой компоновке она не может быть просто добавлена или подключена к уже существующим  $\mathcal{A}BC$ , поэтому потребуется вносить значительные конструктивные изменения в существующие модели двигателей или разрабатывать новые. Кроме того, такая компоновка не позволяет в полной мере использовать режим генераторного торможения транспортного средства, т.к. при этом часть энергии расходуется на вращение кривошипношатунного, газораспределительного механизмов и навесного оборудования  $\mathcal{A}BC$ . Эта компоновка сужает возможности  $\mathcal{C}\Gamma V$ , для более эффективного использования, ее необходимо установить после сцепления и совместить с ко-

робкой передач, тогда она приобретает автономность и становиться многофункциональной. Этой компоновки придерживается автор работы.

Проблемы пуска в зимних условиях, обычно, решают повышением пусковых качеств двигателя — тепловым воздействием на его системы и механизмы, что требует значительных временных и материальных затрат. Имеются различные устройства по облегчению пуска ДВС в зимний период, но для большинства из них требуется надежная система стартерного пуска. Необходимо повысить эффективность самого процесса пуска совершенствованием функционирования его привода.

**Актуальность работы**. Устойчивой тенденцией последнего времени в автомобилестроении является все более широкое применение электрического привода в конструкции автомобилей, все шире используют электрические и гибридные силовые установки. Гибридные автомобили при рациональном проектировании экономичнее, экологичнее традиционных, способствуют значительному снижению установленной мощности двигателя внутреннего

сгорания, оптимизируют его работу за счет использования электродвигателя. Они являются мостом к созданию экологичных ATC на чисто электрической тяге.

Рынок электрических и гибридных автомобилей неуклонно растет. Эксперты считают, что к 2030 году в мире будет продано более 20 миллионов машин на электрическом ходу, а к 2040 году 35 – 47 % машин будет оснащено электродвигателями. Электрический привод по сравнению с двигателем внутреннего сгорания имеет преимущества: высокий *КПД*, большую перегрузочную способность по моменту.

В настоящее время ведутся разработки и исследования схем приводов электрических и гибридных автомобилей. Так, распространение получила электромеханическая трансмиссия, в которой тяговый электродвигатель механически встроен в колеса (мотор-колеса) и получает энергию от аккумулятора или генератора. Такая схема предполагает изменение скорости вращения двигателя для управления скоростью движения машины. Другим её недостатком является рост неподрессоренной массы *АТС* и более тяжелые условия эксплуатации основных элементов самого мотор-колеса.

Известна также схема привода гибридного автомобиля, в которой двигатель внутреннего сгорания, генератор и электродвигатель механически связаны друг с другом и с колесами посредством планетарного редуктора, что позволяет изменять потоки мощности между этими узлами. Такая схема позволяет обеспечить невысокий расход топлива в городских условиях движения, однако отличается высокой сложностью электрической части, требующей компьютерного управления, и повышенным расходом топлива при равномерном движении по трассе.

Все приведенные схемы силовых установок предполагают для управления скоростью движения автомобиля регулирование частоты вращения электродвигателей. При этом неизбежна работа электродвигателей в нежелательном для них режиме перегрузки (разгон-торможение, пониженные скорости движения). Разработка вариантов электромеханической трансмиссии с

альтернативными способами управления скоростью движения, ограничивающими работу электродвигателей на режимах перегрузки и обеспечивающими снижение потерь энергии в приводах, является актуальной и практически значимой проблемой для автотранспортной отрасли страны.

**Цель работы** — Снижение расхода энергии в приводах транспортных средств с электрическими и гибридными силовыми установками за счет бесступенчатого управления скоростью движения.

**Объект исследования** — электромеханические приводы гибридного автомобиля и электромобиля, стартер-генераторной установки ДВС.

**Предмет исследования** – процесс управления режимами работы электромеханических приводов гибридных автомобилей, электромобилей и пуска ДВС.

**Методика исследований** — базировалась на фундаментальных положениях теории движения автомобиля, теории электропривода, теории автоматического управления, методах аппроксимации экспериментальных данных, методах математического и компьютерного моделирования процессов функционирования электромеханических приводов электромобиля, гибридного автомобиля и стартер-генераторной установки. Экспериментальные исследования процессов пуска *ДВС* проводились физическим моделированием: стендовыми испытаниями натурных образцов.

#### Научную новизну работы составляют:

- обоснование энергетической целесообразности управления скоростью транспортного средства с электрическими и гибридными силовыми установками бесступенчатым изменением передаточного числа трансмиссии без изменения угловой скорости вращения тяговых двигателей;
- метод расчета привода электромобиля с вариатором для управления скоростью движения, позволяющий ограничивать в заданных пределах продолжительности работы тяговых электродвигателей электромобиля в режимах перегрузки;

- теоретическое обоснование метода расчета бесступенчатой трансмиссии автомобилей с гибридными силовыми установками, учитывающего ограничения по перегрузке тяговых электродвигателей как на режимах разгона, так и на установившихся режимах движения с максимальной нагрузкой;
- способ двухэтапного пуска автомобильного ДВС с помощью стартергенераторной установки, позволяющей осуществлять частичную рекуперацию энергии при торможении транспортного средства.

#### Практическую ценность работы представляют:

- разработанные схемы приводов гибридного автомобиля и электромобиля с бесступенчатым регулированием скорости автотранспортного средства прямым управлением передаточным числом вариатора;
- методики расчетов параметров бесступенчатых приводов и компьютерные модели таких приводов для гибридных автомобилей и электромобилей;
- система двухэтапного стартерного пуска ДВС с вариантами новых технических решений стартер-генераторной установки;
  - устройство контактов пускового реле стартера;
- устройство для рекуперации энергии при торможении автотранспортного средства со стартер-генераторной установкой.

**Новизна разработанных технических решений** подтверждена 11 патентами России на изобретения и 1 патентом на полезную модель.

Достоверность результатов исследований по совершенствованию и созданию основ проектирования электромеханических приводов гибридного автомобиля, электромобиля и стартер-генераторной установки подтверждается апробированными методами компьютерного моделирования с использованием программы «Matlab Simulink», экспериментальными исследованиями привода двухэтапного пуска ДВС.

**Личное участие автора в получении результатов.** . Автор является исполнителем всех этапов данной работы. Теоретический анализ проблемы, разработка конструктивных решений, компьютерное моделирование, экспе-

риментальные исследования, изготовление опытного образца системы двухэтапного пуска ДВС проведены при непосредственном участии автора.

Реализация результатов работы. Результаты исследований по диссертационной работе внедрены на «Осетинском заводе автотракторного электрооборудования» (ОАО «ОЗАТЭ») г. Владикавказ для изготовления экспериментальных образцов стартеров с усовершенствованной конструкцией контактов, переданы для внедрения в Научно-производственное внедренческое предприятие «Наука», используются в учебном процессе по подготовке бакалавров, магистров и инженеров по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство» в ФГБОУ Горском ГАУ, Дагестанском ГАУ им. М.М. Джамбулатова.

#### Основные положения, выносимые на защиту:

- обоснование параметрического принципа управления скоростью автотранспортного средства бесступенчатым изменением передаточного числа трансмиссии, отличающегося тем, что изменение скорости вращения двигателя для управления скоростью движения автомобиля не применяется;
- функциональные схемы привода электромобиля и гибридного автомобиля на основе параметрического принципа управления скоростью движения;
- методика концетуального проектирования тягового привода электромобиля, включающая расчет основных параметров привода на базе учета допустимого времени работы тягового электродвигателя в трёх режимах: номинальной, двух- и трехкратной перегрузки с последующим уточнением эксплуатационных показателей на компьютерной модели в основных режимах движения;
- методика концептуального проектирования привода и трансмиссии гибридного автомобиля, включающая расчет основных параметров привода по двум ключевым режимам работы его двигателей с последующим уточнением эксплуатационных показателей на компьютерной модели в основных режимах движения;

- обоснование эффективности схемы привода двухэтапного стартерного пуска  $\ensuremath{\mathcal{ABC}}$  с вариантами новых технических решений.

Апробация работы. Основные результаты исследований и положения диссертационной работы доложены, обсуждены и получили одобрение на: Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные тенденции развития автомобилестроения в России» (г. Тольятти, ТГУ 2004-2008 г.г.); Международной научно-практической конференции «Научные проблемы автомобильного транспорта» (г. Москва *МГАУ*, 2010г.); конференциях профессорскоежегодных научных преподавательского состава  $\Phi \Gamma EOV$  ВО  $\Gamma \Gamma AV$  (г. Владикавказ, 2003-2021 гг.); семинарах кафедр ВолГТУ (г.Волгоград 2019 - 21гг.); на международной конференции Русавтокон (IEEE) Сочи, 2019 г.; на международной конференции промышленных инженеров (ІСІЕ) Сочи, 2020 г., 2021 г., МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2021г. и Нижегородский ГТУ, 2021г.

**Публикации**. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 40 научных работах, в том числе: 14 статей — в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ; 2 статьи — в журналах, входящих в базу Scopus; 11 патентов на изобретения; 1 патент на полезную модель; 1 монография; 11 публикаций — в других изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных выводов и результатов, библиографического списка литературы из 158 наименований и приложений. Работа изложена на 250 страницах основного текста, содержит 87 рисунков, 6 таблиц, приложения на 17 страницах.

### 1. СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ДЛЯ АВ-ТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

# 1.1Предпосылки развития электрических приводов для автотранспортных средств.

Автомобиль является одним из самых массовых видов транспорта, производство которого интенсивно развивается и расширяется, а сам он всесторонне усовершенствуется, повышая свои потребительские качества.

Традиционному ДВС всё труднее отвечать тем требованиям, которые потребитель предъявляет к современным транспортным средствам: они должны быть динамичными, иметь высокую максимальную скорость и вместе с тем быть экономичными и отвечать жёстким нормам экологических требований. Средний легковой автомобиль на 100 км пути расходует примерно 8 л топлива (32 кВт·ч), а такой же автомобиль на электрической тяге расходует на том же расстоянии примерно 15 - 20 кВт·ч электроэнергии, т.е. почти вдвое меньше [103]. Это происходит из-за того, что мощность установленного ДВС на автомобиль заранее завышена для получения необходимой максимальной скорости и динамики его разгона.  $K\Pi II$  двигателя тем выше, чем больше он загружен, но такие режимы при эксплуатации автомобиля встречаются редко. Наиболее применяемые режимы движения автомобиля требуют значительно меньших мощностей. От загруженности ДВС изменяется его удельный расход топлива. Минимальный удельный расход топлива современных бензиновых двигателей равен 240 - 250 г/кВт·ч, а максимальный составляет 700 - 750 г/кВт·ч [109]. Кроме того, зона минимального расхода топлива располагается в очень узкой области многопараметровой характеристики, и может быть получен при режиме близкой максимальной мощности двигателя, который на практике используется крайне редко. Поэтому, если на автомобиль установить более мощный двигатель, то его топливная экономичность обязательно уменьшится, т.к. будет недогружен. Чтобы как-то уменьшить расход топлива применяют многоступенчатую коробку передач (лучше вариатор), но она не позволяет приблизиться к зоне минимального

удельного расхода топлива при малых и средних нагрузках. Для этого двигателю, при невысоких мощностях движения, необходимо дать полезную дополнительную нагрузку, например электрический генератор, который превращает излишнюю для данного режима движения механическую энергию ДВС в электрическую и отдаёт её в накопитель (аккумуляторную или конденсаторную батарею). Таким образом, в двигатели обычных автомобилей заложен потенциал, который практически не используется, необходимо оптимизировать его работу. Кроме того, при разработке транспортных средств с ГСУ, необходимо использовать эффективное рекуперативное торможение, позволяющее снизить расход топлива, повысить ресурс тормозной системы и снизить износ шин.

ДВС присущи серьезные недостатки: 1) падение и так низкого КПД при работе с неполной нагрузкой, 2) наличие токсичных компонентов в отработавших газах, 3) высокая стоимость, 4) ограниченный ресурс работы из-за множества трущихся деталей, 5) необходимость стартера для пуска, 6) необходимость маховика из-за неравномерной выдачи мощности, 7) дорогое обслуживание из-за замены большого количества расходников, 8) необходимость балансировать и изолировать весь двигатель для уменьшения вибраций кузова при его работе, 9) сильный шум, 10) высокая цена топлива. Устранять эти недостатки одним только совершенствованием конструкции  $\mathcal{A}BC$  и его систем не удается. Важную роль в этом должны сыграть электрические установки автотранспортных средств. Их необходимо использовать не только для быстрого пуска ABC и электроснабжения, но и для создания электрической тяги при трогании транспортного средства с места и движении, т.к. у заторможенной электрической машины очень высокий момент на валу, который ограничивается только возможностями питающей силовой электроники. ДВС имеет относительно высокую топливную эффективность и малый уровень вредных выбросов в ограниченном диапазоне частот вращения коленчатого вала. Поэтому его целесообразно нагружать только после того, как транспортное средство наберет некоторую скорость. Развитию и совершенствованию электрических установок автотранспортных средств во многом способствуют всё возрастающие нормы экологических требований к отработавшим газам.

Транспортные средства с комбинированной энергоустановкой ( $K\Im V$ ) — это разработка полных гибридных автомобилей, обеспечивающих дополнительно режимы движения на электрической тяге, значительное снижение требуемой мощности  $\mathcal{L}BC$ , работу  $\mathcal{L}BC$  в режиме высокого КПД, рекуперацию энергии торможения, режима старт-стоп, повышение общего КПД двигательной установки. Они обеспечат плавный переход к транспортным средствам на электрической тяге — электромобилям.

Автотранспортные средства с традиционной системой стартерного пуска ( $CC\Pi$ ) и генераторной установкой ( $\Gamma Y$ ) не вполне соответствуют современным тенденциям развития экологически направленного автомобилестроения по следующим основным причинам:

- 1. При отрицательных температурах окружающего воздуха стартер не всегда обеспечивает надежный пуск  $\mathcal{A}BC$ , и поэтому используются различные средства и способы облегчения пуска, учитывая климатические условия нашей страны. Действие этих устройств, в основном, направлено на повышение пусковых качеств  $\mathcal{A}BC$ , а в деле улучшения эффективности функционирования самой системы пуска ощутимых успехов не наблюдается.
- 2. Не используются возможности генератора одновременно выполнять две функции рекуперировать энергию торможения и тормозить автомобиль без скольжения колес.
- 3. Любое снижение скорости автомобиля осуществляется исключительно гашением его кинетической энергии тормозной системой, которая неотвратимо изнашивается.

Основное требование к системе стартерного пуска, гарантирующее успешный пуск  $\mathcal{L}BC$  – это обеспечение минимальной пусковой частоты вращения коленчатого вала  $\mathbf{n}_{\min}$  при данных климатических условиях. Этот параметр оп-

ределяет пусковые качества ДВС и повышается с понижением температуры окружающего воздуха. Поле минимальной пусковой частоты вращения коленчатого вала бензинового двигателя в зависимости от температуры окружающего воздуха представлено в приложении «А» [112].

Все способы и устройства, предназначенные для облегчения пуска ДВС при отрицательных температурах окружающего воздуха можно разделить на два основных вида:

- Облегчение пуска повышением пусковых качеств самого двигателя. Это достигается, в основном тепловым воздействием на ДВС и его системы: разогревом масла в картере и снижением момента сопротивления вращению коленчатого вала [64]; разогревом охлаждающей жидкости в блоке цилиндров[106]; разогревом топлива в камере сгорания и воздуха во впускном трубопроводе свечами накаливания для улучшения условий смесеобразования и воспламенения топливно-воздушной смеси [124]. Эффективность различных способов и устройств, для облегчения пуска зависит от типа двигателя, его конструктивных особенностей и условий эксплуатации.
- Облегчение пуска  $\mathcal{A}BC$  за счёт улучшения функционирования самой системы стартерного пуска, что приемлемо для любого типа двигателя.

Первый вид облегчения пуска достаточно прост, хорошо изучен, но требует значительных дополнительных затрат и времени. Облегчение пуска двигателя с использованием свечей накаливания для подогрева топлива и воздуха, а также легковоспламеняющихся жидкостей предъявляют достаточно высокие требования к системе пуска. Поэтому совершенствование самой системы стартерного пуска является первостепенной задачей для окончательного решения данной проблемы. В этом направлении необходимо отметить разработки по облегчению пуска ДВС использованием обычных конденсаторных установок на разное напряжение [121], суперконденсаторных блоков [37,59], применение маховика на валу якоря стартера [125], для снижения колебаний частоты вращения коленчатого вала при пуске.

Учитывая вышеизложенное, в традиционных автомобилях с ДВС необходимо объединить стартер и генератор в одну электрическую машину стартер-генераторную установку (СГУ) с повышенной установленной мощностью. Тогда отпадают трудности пуска ДВС при низких температурах. Снижение скорости автомобиля будет осуществляться рекуперативным торможением в генераторном режиме с одновременным возвратом энергии в аккумуляторную батарею, без использования штатной тормозной системы, которая используется в экстренных случаях. Эта идея интеграции стартера и генератора была оригинально разработана и воплощена фирмой «Кадиллак» давно, еще на заре автомобилестроения, но тогда у СГУ было всего две функции[140]. Нынешняя СГУ, кроме рекуперативного торможения, также приобретает дополнительные функции: реализация режима старт-стоп благодаря перегрузочной способности (и чтобы не обременять ДВС работой в неэффективных режимах), а также помощь ДВС при перегрузках. Автомобили, оснащенные СГУ – это малые гибридные транспортные средства и поэтому являются мостом для перехода от традиционных автомобилей к полноценным гибридным транспортным средствам (ГТС). Также СГУ могут быть востребованы в связи с необходимостью модернизации существующих серийных моделей автомобилей, что положительно повлияет на экологическую обстановку.

Все эти направления по применению электроустановок на транспорте тесно взаимосвязаны между собой и требуют общего подхода и совместного решения. Активный переход к  $\Gamma TC$ , а также  $\Im TC$  уже начался, он становится реальностью. Эта тенденция отражает влияние жестких норм экологических требований на автотранспорт и изменений в связи с этим функций и режимов работы его основного электрооборудования.

Для повышения эксплуатационных показателей ATC и соблюдения экологических требований необходимо:

- 1. Разработка и производство автомобилей, мобильных средств с гибридными силовыми установками ( $\Gamma C V$ ) и на электрической тяге (электромобилей);
- 2. Совершенствование функционирования электрооборудования (стартера и генератора) традиционных автомобилей с ДВС, разработка стартергенераторных установок ( $C\Gamma V$ ) и расширение её функциональных возможностей до малых и средних гибридных установок.

#### 1.2 Гибридные и электрические тяговые приводы АТС.

Актуальность гибридизации транспортных средств и мобильных установок обусловлено тем, что чистые электромобили пока не могут в полной мере конкурировать с обычными автомобилями на ДВС из-за высокой стоимости и большого удельного веса химических источников автономного электроснабжения. Поэтому на данном переходном этапе на передний план выходят гибридные автомобили, которые более экологичны и экономичны, особенно в городском цикле. Разнообразие гибридных силовых установок для транспортных средств требует тщательного анализа и систематизации с целью обеспечения возможности выбора в зависимости от специализации автомобиля.

Ухудшение экологической ситуации на нашей планете требует повсеместного внедрения технологий, практически не влияющих на окружающую среду. Прежде всего, необходимо внедрять эти технологии в автомобильном транспорте, который давно уже стал одним из главных загрязнителей окружающей среды. Автомобилям с традиционными ДВС все труднее преодолевать ужесточающиеся нормы экологических требований. По мощностным характеристикам и рабочему диапазону, ДВС, как источник энергии превосходит все другие автономные источники механической энергии. Но присущие ему недостатки: относительно низкий КПД и его падение при работе в условиях неполной нагрузки; выбросы токсичных веществ с отработавшими газами, диктуют необходимость создания более экологичных и экономичных

двигателей. С усовершенствованием технологий автомобили постепенно заменятся электромобилями, но эта замена будет поэтапной, сначала будет переходный период, где будут, в основном, использоваться автомобили с комбинированными силовыми установками — гибридные автомобили.

Обычно, привод классического гибридного автомобиля состоит из ABC, электрической машины и накопителя энергии – электрического или механического. Главное преимущество гибридных автомобилей – это экономия топлива и сокращение выбросов вредных веществ в атмосферу. При торможениях гибридного автомобиля его кинетическая энергия не теряется, как в обычном автомобиле, а возвращается, с учетом потерь, в накопитель энергии для дальнейшего использования. Гибридные автомобили позволяют с меньшими затратами выполнять требования экологических норм «Eвро-4», «Eвpo-5» и даже более жестких норм, позволяют снизить расход топлива до 40%, выбросы токсичных веществ на 35...50%, износ тормозов до 70%. В процессе рекуперации энергии торможения уменьшается требуемая мощность тормозов, рекуперативное торможение предельно снижает проскальзывание колес, повышает безопасность движения, снижает износ шин и дорожного покрытия, а также уменьшает выбросы в атмосферу продуктов этого износа. Эффект рекуперации энергии торможения автомобиля будет тем выше, чем больше разгонов и торможений совершает автомобиль на единицу пройденного пути, т.е. в городском режиме работы. Применение рекуперативной системы торможения наиболее эффективно для тяжелых машин, работающих в циклических режимах и прежде всего для городских маршрутных автобусов.

Преимущество гибридного автомобиля заключается не только в возможности использования кинетической энергии торможения ATC, но и в обеспечении возможности работы  $\mathcal{A}BC$  в оптимальном режиме: максимальный  $K\Pi\mathcal{A}$ , минимум токсичных выбросов, т.е. в создании условий для его работы в наиболее экономичных режимах, а значит с меньшим загрязнением атмосферы. Электрический привод на большегрузном автотранспорте используют достаточно давно. В карьерном самосвале  $\mathit{EenA3-75492}$ , грузоподъ-

емностью 80т каждое ведущее колесо приводится во вращение собственным электродвигателем мощностью 368кВт [69]. Тяговые электродвигатели получают питание от генератора мощностью 800кВт, вращаемого дизелем мощностью 1100 л.с. и используются как электродинамические тормоза в генераторном режиме, заряжая аккумуляторные батареи. От батареи питаются вспомогательные электроприводы, а иногда и тяговые двигатели. Такая электромеханическая трансмиссия экономически оправдана для большегрузных автомобилей, когда использование чисто механической трансмиссии приводит к усложнению конструкции и повышению массы ATC. Критерием выбора электромеханической трансмиссии может служить сопоставление, суммарной массы генератора с электродвигателями и массы заменяемой механической трансмиссии (коробка передач, карданный вал, главная передача и т.п.)

Для автономных электрических установок имеется дополнительная возможность снижения массы электрических машин и генератора повышением частоты тока генератора. В обычных грузовиках среднего тоннажа, автобусах, экскаваторах гибридная схема привода пока не нашла массового применения. Главная причина этого — усложнение конструкции, снижении грузоподъемности и повышении цены автомобиля. Совершенствование аккумуляторных батарей, гибридных приводов и систем управления систем постепенно меняет ситуацию. Сочетание государственной поддержки и развитие технологий со временем сделают автомобили с гибридным приводом привлекательными и с экономической точки зрения.

В легковом автотранспорте реальные изменения начались на рубеже *XX* и *XXI* веков с массовым появлением гибридных автомобилей, которые составили конкуренцию классическим автомобилям и даже превзошли их по некоторым показателям. Пионер современного гибридного автомобилестроения компания «*TOYOTA*» представила миру в 1997 году первое поколение серийной модели гибридных автомобилей - «*PRIUS*» (*ДВС*-53кВт, электродвигатель - 33кВт), расход топлива 4,6л на 100км, максимальная скорость 160км/ч [47]. В 2000 году выпустили второе поколение, а в 2003 году свет увидело

третье поколение «*TOYOTA PRIUS*» (*ДВС* - 90л.с., электродвигатель - 34 кВт), расход топлива 3,9л на 100км, максимальная скорость - 180км/ч, которое выпускается по настоящее время. «*PRIUS*» - это большой семейный автомобиль, его третье поколение можно сравнить по параметрам с «*TOYOTA CAMRI*» 2,4 *automatic* 2003года выпуска.

По мнению большинства специалистов крупнейших автомобильных фирм и исследовательских организаций, гибридный автомобиль — это одно из наиболее перспективных направлений ближайшего будущего. Причем на первом месте здесь электрические гибридные автомобили, силовая часть которых состоит из обычного  $\mathcal{A}BC$ , электрической машины и накопителя энергии (аккумуляторов или суперконденсаторов). Динамические характеристики гибридных автомобилей, как правило, лучше, чем у обычных автомобилей, что объясняется более благоприятной формой кривой крутящего момента у электрической машины, чем у  $\mathcal{A}BC$ . Гибридные автомобили различаются между собой по нескольким определяющим показателям, что ведет к различию их основных технических характеристик. Нами произведена классификация гибридных силовых установок автомобилей по шести основным показателям:

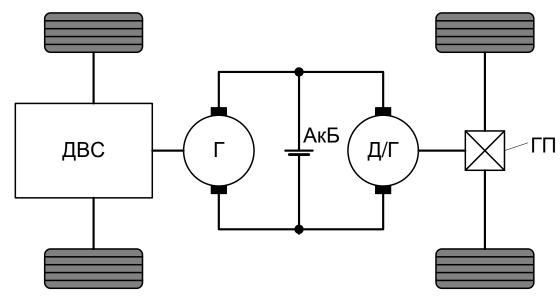
- 1. По приводной схеме.
- 2. По соотношению мощностей основного и вспомогательного двигателей, т.е. по уровню гибридизации.
  - 3. По способу возврата энергии торможения автомобиля.
  - 4. По типу накопителя энергии.
  - 5. По типу используемого ДВС.
  - 6. По типу используемой электрической машины.
  - 7. По типу трансмиссии.

Эта классификация гибридных силовых установок автомобилей приведена на рисунке 1.1 [17]. Анализ различных вариантов гибридных силовых установок автомобилей проведем в следующем порядке.

1. Последовательная схема автомобиля с гибридной силовой установкой (*ГСУ*). Суть этой идеи в том, что берется обычный автомобиль, снимаются с него коробка передач и карданный вал. Вместо коробки передач устанавливается электрический генератор, вал которого стыкуется с коленчатым валом ДВС. Для передвижения автомобиля используется электродвигатель, который получает питание от генератора. Такая схема гибридного автомобиля показана на рис.1.2[35,73]. Здесь ДВС не связан механически с трансмиссией транспортного средства. Поэтому ДВС работает при постоянной скорости вращения коленчатого вала вблизи оптимальных значений КПД и минимальных выбросов токсичных компонентов в выхлопных газах. Такой гибридный автомобиль обходится без коробки передач, т.е. фактически реализуется коробка-автомат благодаря приводному электродвигателю, скорость вращения которого регулируется изменением напряжения питания или его тока возбуждения. ДВС не работает на повышенных оборотах, вследствие чего увеличивается ресурс его работы и снижается шум.

Рисунок 1.1 – Классификация гибридных силовых установок (ГСУ)

В конструкции имеется возможность рекуперации тормозной энергии автомобиля переводом тягового электродвигателя в генераторный режим и зарядкой аккумуляторных батарей. Транспортное средство получает хорошую разгонную динамику, т.к. его ДВС может быстро набрать максимальную мощность, потому что кинематически уже не связан с дорогой. При этом электродвигатель обеспечивает лучшую динамику благодаря своему высокому начальному крутящему моменту.



 $\Gamma$  -генератор; Д/ $\Gamma$  - двигатель-генератор;  $\Gamma\Pi$  - главная передача;  $\Pi BC$  - двигатель внутреннего сгорания.

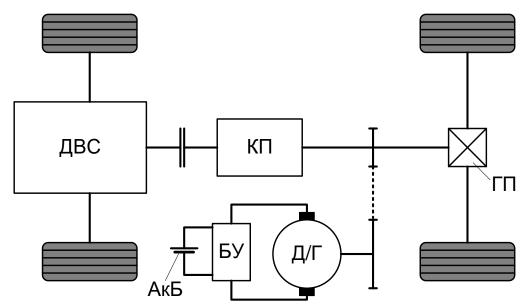
Рисунок 1.2 – Последовательная схема гибридной силовой установки автомобиля.

Недостатки последовательной схемы гибридной силовой установки автомобиля это:

- необходимость двукратного преобразования энергии механическая энергия ДВС превращается в электрическую энергию генератора, а затем электрическая энергия в электродвигателе превращается в механическую энергию вращения колес автомобиля, что снижает КПД установки до 19%.
- необходимость использования электродвигателя с большим крутящим моментом. Примером последовательной схемы гибридного автомобиля является разработанный в России «*ё-мобиль*» М.Прохорова, где в качестве пер-

вичного двигателя будет использоваться роторно-лопастной ДВС. Этот автомобиль прошел предварительные испытания, имеет достаточно высокие заявленные потребительские качества.

2. Параллельная схема автомобиля с гибридной силовой установкой приведена на рис.1.3 [35].

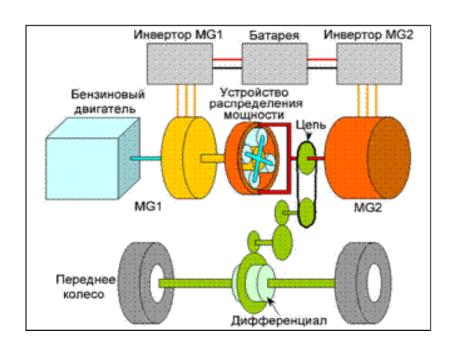


 $\mathcal{A}/\Gamma$  - двигатель-генератор;  $\Gamma\Pi$  - главная передача;  $\mathcal{A}BC$  - двигатель внутреннего сгорания;  $\mathcal{B}V$  - блок управления;  $\mathcal{A}\kappa\mathcal{B}$  - аккумуляторная батарея;  $\mathcal{K}\Pi$  - коробка передач.

Рисунок 1.3 — Параллельная схема гибридной силовой установки автомобиля. Существенным отличием параллельного гибрида является то, что его силовая установка:  $\mathcal{A}BC$  и электродвигатель в процессе эксплуатации автомобиля могут быть абсолютно автономными, т.е. работать независимо друг от друга и именно это отличает параллельный гибрид от последовательного. Возможны несколько характерных режимов работы параллельного гибрида. Если условия движения предполагают серьезные нагрузки, то параллельный гибрид может передвигаться на  $\mathcal{A}BC$  или на электротяге, все зависит от конкретной ситуации и от желания водителя. При избытке мощности на движение электрическая машина переходит в генераторный режим и пополняет накопитель энергии (аккумуляторы или суперконденсаторы), а при недостатке мощности энергия берется из накопителя. Достоинством параллельной схемы является более высокий  $K\Pi\mathcal{A}$ 

передачи энергии от первичного двигателя к колесам по сравнению с последовательной схемой и возможность применения одной электрической машины вместо двух. Недостатками параллельной схемы являются повышение массы силового агрегата, обязательное усложнение трансмиссии для обеспечения отбора мощности электрической машины, отход  $\mathcal{L}BC$  от режима минимального удельного расхода топлива при использовании ступенчатой механической трансмиссии для регулирования скорости автомобиля и определенное усложнение системы управления силовой установкой. Примерами параллельной схемы гибридных автомобилей могут служить модели фирмы «HONDA»: «Insight» u «Civic Hybrid».

3. Смешанная схема электрического гибридного автомобиля. Эта схема задумана как способ избавиться от недостатков как последовательной, так и параллельной схем. Впервые эту схему на практике применила фирма «ТОУОТА» на своем пятиместном седане «Prius» в 1997г. Схема трансмиссии гибридного привода автомобиля «Prius» приведена на рис. 1.4 [145]. Силовой агрегат «Prius» состоит из ДВС и двух электрических машин: мотор-генераторов



MG1 – генератор; MG2 – тяговый электродвигатель

Рисунок 1.4 Смешанная схема гибридного привода автомобиля «*Prius*»

MG1 и MG2, представляющих собой трехфазные синхронные машины с постоянными магнитами в роторе. Мощность MG1 - 18 кВт, MG2 - 50 кВт, ABC - 98 л.с. Мотор-генератор MG1 осуществляет запуск ABC, а затем переходит в режим генератора, заряжает аккумуляторную батарею и питает тяговый двигатель MG2. Крутящий момент и энергия  $\mathcal{A}BC$  и мотор-генераторов объединены в устройстве распределения мощности (УРМ) или power split device~(PSD), представляющий собой планетарный редуктор (рис. 1.4).  $\mathcal{A}BC$ вращает водило с сателлитами планетарного редуктора и через коронную шестерню вращение передается ведущим колесам автомобиля. Моторгенератор MG1 вращается от солнечной шестерни, а MG2 вращает коронную шестерню, связанную с ведущими колесами. Устройство распределения мощности позволяет «Prius» работать и как последовательный гибрид (ДВС + генератор MG1), и как параллельный гибрид ( $\angle IBC$  + электродвигатель MG2) одновременно и получать преимущества каждого режима. Если при вращении колес от ДВС имеется излишек механической энергии, то она электрогенератором MG1 преобразуется в электрическую, которая будет заряжать аккумуляторную батарею или передаваться электромотору MG2, чтобы помогать вращать колеса. Гибкость этого электромеханического распределения энергии позволяет «Prius» улучшать показатели топливной экономичности и снижать уровень вредных выбросов во время движения. Это невозможно при жесткой механической связи между  $\mathcal{A}BC$  и колесами, как в параллельном гибриде, а также без потерь энергии, как в последовательном гибриде.

4. Гибридный автомобиль с электрической машиной двойного вращения (ЭМДВ).

Такая схема очень похожа на последовательный гибрид (рис.1.5) —  $\mathcal{L}BC$  вращает электрический генератор, работая в стационарном режиме, однако генератор здесь используется как электрическая машина двойного вращения, в нем вращаются и статор, и ротор [63,87].  $\mathcal{L}BC$  механически связан с ротором генератора, а ведущие колеса автомобиля — со статором. Эта схема позволяет

передавать на ведущие колеса часть механической энергии  $\mathcal{A}BC$ , точно так же, как в параллельной схеме, но без механической трансмиссии.

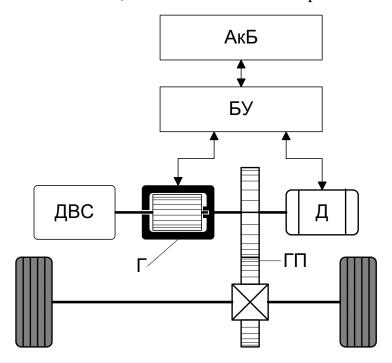


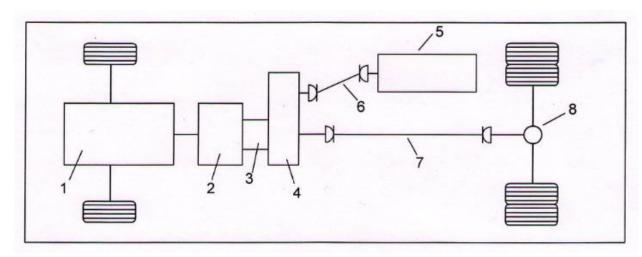
Рисунок 1.5— Гибридный автомобиль с электрической машиной двойного вращения

Конкретно данный режим работы ЭМДВ называется генераторно-передаточным. Регулируя нагрузку генератора, можно изменять и количество механической энергии, преобразованной генератором в электрическую, и количество механической энергии, напрямую передаваемой от ДВС колесам. Такое решение вопроса упрощает конструкцию трансмиссии, позволяет уменьшить емкость аккумуляторной батареи, мощность электродвигателя и их суммарную массу.

Недостаток этой схемы — низкая эффективность использования ДВС при движении транспортного средства в городских условиях, т.е. с частыми и продолжительными остановками.

5. Гибридный автомобиль с механической рекуперацией энергии торможения автомобиля. Механическая рекуперация и аккумулирование энергии торможения автомобиля осуществляется использованием маховиков - инерционных аккумуляторов энергии, называемых часто инерционными маховичными двигателями, которые содержат тело вращения, обладающее значительным

моментом инерции — маховик — и систему для подвода и отведения мощности — трансмиссию. Использование маховичного рекуператора энергии наиболее эффективно для транспортных средств с большой массой и с циклическим режимом работы, т.е. с частыми остановками. В Московском университете *МГИУ* создана гибридная силовая установка с механической рекуперацией энергии торможения для городского автобуса (рис. 1.6) [54].



1 -ДВС; 2 -супервариатор; 3 -стартер-генератор; 4 - коробка отбора мощности; 5 -маховик; 6, 7 - карданные передачи; 8 - главная передача. Рисунок 1.6 -Схема городского автобуса с маховиковым накопителем энергии.

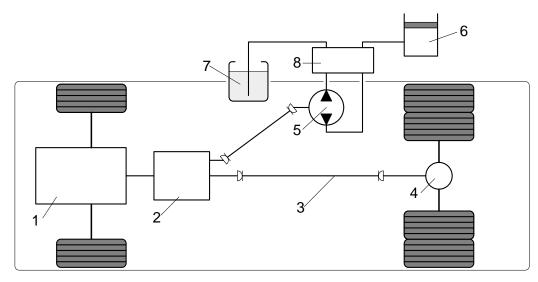
Основными агрегатами его являются ДВС 1, супервариатор 2 и маховичный накопитель энергии 5. ДВС 1 через супервариатор 2, коробку отбора мощности 4 связан кинематически и с главной передачей 8, и с маховиком 5 посредством карданных валов 6 и 7. Для первоначального запуска маховика после длительной стоянки (свыше суток) служит стартер-генератор 3. При движении автобуса с малыми скоростями и во время остановок вспомогательные потребители (усилитель руля, климат-контроль) отбирают энергию у маховика-накопителя. На режимах малых и средних нагрузок (установившееся движение) мощность через супервариатор передается от маховика к ведущим колесам, а ДВС включается лишь периодически, подзаряжая маховик энергией. При этом ДВС работает на режимах с малым удельным расходом топлива. Для кратковременных высоких нагрузок (разгон, преодоление подъемов)

Масса данной гибридной установки 200 кг, из них вес маховика составляет 100 кг. Минусы механической гибридной установки:

- относительно высокая масса установки;
- высокая скорость вращения маховика требует добротных защитных устройств и высокой точности балансировки маховика;
- использование супервариатора с большим передаточным числом усложняет конструкцию системы.

Такая система рекуперации энергии с применением маховикагенератора используется на разработанном гоночном гибридном автомобиле "Porsche 918 RSR", который снабжен ДВС мощностью 563л.с., вращающим задние колеса и двумя электродвигателями по 75кВт, вращающими передние колеса. Общая мощность силовой установки составляет 767л.с. [45]. При торможении гибрида колеса не соединяются с маховиком, а вращают ротор генератора, а тот в свою очередь с помощью электродвигателя раскручивает маховик, чтобы при последующем разгоне использовать эту накопленную энергию. За две секунды маховик раскручивается до максимальных 40 000 об/мин и этой энергии хватает на питание двух электродвигателей мощностью 150 кВт в течение 8с. Такие параметры пока недоступны системам рекуперации с аккумуляторными батареями. Вся система (тяговые электродвигатели, маховик и силовая электроника) весят около 150кг.

6. Гибридный автомобиль с гидропневматической рекуперацией энергии торможения автомобиля. Схема такого гибридного силового агрегата, испытанного на городском автобусе, показана на рис. 1.7 [55].



1 - ДВС; 2 - коробка передач; 3 - карданный вал; 4 - задний мост; 5 – гидродвигатель - насос; 6 - гидропневматический аккумулятор; 7 - бак; 8 - устройство управления.

Рисунок 1.7 – Гидропневматический рекуператор энергии торможения для автотранспорта

Для аккумулирования энергии торможения здесь используется гидросистема, состоящая из гидродвигателя (насоса) 5, масляного бака 7, устройства управления 8, а также из резервуара 6 для сжатого воздуха. При торможениях автобуса, соединенная с его трансмиссией гидродвигатель, работая в режиме насоса, закачивает в энергонакопитель масло, сжимая воздух в резервуаре 6 и накапливает энергию, автобус снижает скорость и останавливается.

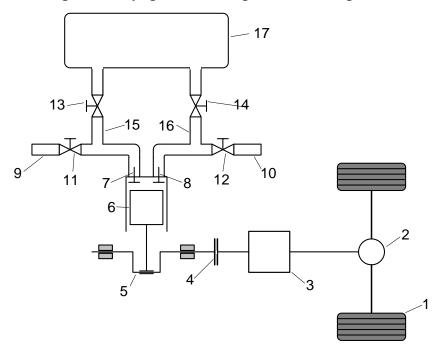
Для последующего разгона масло из накопителя под давлением направляется в гидродвигатель, который теперь работая в режиме двигателя разгоняет автобус. За счет энергии при торможении с 40км/ч многотонный автобус при отключенном двигателе разгонялся до 30км/ч. При испытаниях данного гибридного автобуса использовался бак с маслом емкостью 80л, а мощность гидродвигателя составляла 140 кВт. Данную схему гибридной установки испытывала также фирма «VOLVO» и считает ее слишком сложной для серийной машины.

7. Гибридный автомобиль с использованием энергии торможения автомобиля переводом ДВС в режим компрессора. Некоторые исследователи счи-

тают, что гибридные автомобили имеют существенные недостатки, которые заключаются в следующем:

- *ДВС* работает только в режиме двигателя, хотя любая поршневая машина может работать в режиме и двигателя, и генератора (компрессора);
- из-за наличия электрических элементов значительно увеличиваются ее масса и габаритные размеры;
  - наиболее ненадежным элементом является аккумуляторная батарея.

Поэтому предлагается схема установки, которая позволяет переводить ДВС в режим компрессора при торможениях транспортного средства и накапливать энергию в резервуаре в виде сжатого воздуха (рис. 1.8) [61]. Управляя открытием и закрытием системы клапанов от 7-го до 14-го, ДВС переводится в режим компрессора, и сжатый воздух накапливается в резервуаре 17. В дальнейшем эта энергия используется для движения транспортного средства открытием и закрытием соответствующих клапанов. Основная проблема при создании такой энергоустановки заключается в разработке механизма газораспределения с использованием электромагнитного привода клапанов, который позволяет оперативно управлять открытием и закрытием клапанов.



1 - ведущие колеса; 2- ведущий мост; 3 - коробка передач; 4 - сцепление; 5 - коленчатый вал; 6 - поршень; 7,8 - впускной и выпускной клапаны; 9,10 - впу-

скной и выпускной каналы; 11,12 - клапаны впускных и выпускных каналов; 13,14 - клапаны впускного и выпускного каналов резервуара 17; 15,16 - выпускной и впускной каналы резервуара.

Рисунок 1.8. Перевод ДВС в режим компрессора для рекуперации энергии торможения ATC.

Виды гибридных автомобилей по уровню гибридизации.

Гибридные автомобили различаются не только по приводной схеме и способу рекуперации, но и по соотношению мощностей основного и вспомогательного двигателей, т.е. по уровню гибридизации [47,136]. По этому показателю они условно подразделяются на четыре основных вида (рис.1.1), различающиеся техническими и потребительскими показателями.

- 1.Малый или сверхлегкий гибрид (*Micro* или *Ultra Light Hybrid*). Это обыкновенный автомобиль, но его генератор имеет специальное управление, позволяющее кинематически отключать его от *ДВС* при разгоне автомобиля, а при торможении вращать генератор кинетической энергией торможения. При равномерном движении работа генератора зависит от количества включенных потребителей, если их мало, то достаточно энергии аккумуляторной батареи, генератор не работает. Как только уровень заряда упадет ниже определенного значения, генератор включается снова. Современные автомобили располагают генераторами мощностью 1кВт и более, и как показывает практика использования таких гибридных систем фирмой *BMW*,позволяет снизить расхода топлива до 0,2...0,3 л на 100км.
- 2. Мягкий или легкий гибрид (*Mild* или *Light Hybrid*) это желание превратить обычный автомобиль в гибридный с наименьшими затратами, который, обычно, не способен перемещаться исключительно на электротяге, но имеет много положительных сторон. Это заметное уменьшение расхода топлива в городском режиме движения, который достигает более 20%, и улучшение динамики разгона (*rolling start* и эластичность). Легкий гибрид отличается небольшой мощностью электродвигателя (до 20кВт). Пример легкого

гибрида - это "*Honda Civic Hybrid*" с *ДВС* объемом 1,4л и электродвигателем 15кВт, расположенный между ДВС и коробкой передач. Этот легкий гибрид исключение – может передвигаться на электротяге.

- 3. Умеренный или средний гибрид (Moderate или Medium Hybrid). Это уже полноценный или настоящий гибрид, который может передвигаться, используя ДВС или электродвигатель, а также сочетая их мощности в любой пропорции. Такие гибридные автомобили выпускают фирмы «TOYOTA» и «LEXUS» («Toyota Prius» и «Lexus RX 400h»). Этими фирмами совместно с корпорацией «AJSIN» (трансмиссии) была разработана одна из наиболее удачных гибридных схем для своего времени (рис. 1.4). ДВС приводит генератор через планетарный редуктор и дает выбор ДВС вращать колеса автомобиля или генератор. Далее располагается электродвигатель и редуктор, который изменяет передаточное число между электродвигателем и ведущими колесами. Привычной коробки передач у гибридного автомобиля нет, имеются несколько режимов передвижения (режимы «Hybrid», «Power» и «Snow»).
- 4. Жесткий или бензоудлинительный гибрид (Strong Hybrid или Full Flavour). Гибриды такого класса можно считать электромобилями, оснащенными вспомогательным двигатель-генератором (дизельным или бензиновым), который не имеет механической связи с колесами автомобиля, т.е. ДВС не может работать на тягу совместно с основным тяговым электродвигателем. Тяговые аккумуляторы могут заряжаться либо от внешней сети, либо от маломощного двигателя-генератора, расположенного под капотом. Преимущества такой схемы состоит в том, что вспомогательный зарядный двигатель-генератор работает с максимальным КПД в узком диапазоне скоростей вращения ДВС. Отсутствуют переходные режимы, что многократно снижает токсичность отработавших газов и повышает экономичность на 10...15%. Режим работы зарядной установки (двигатель-генератора) очень напоминает работу холодильника, которая включается при необходимости, подзаряжая

аккумуляторы до нужного уровня и отключается. Такой гибридный автомобиль рекомендуют периодически подзаряжать от сети.

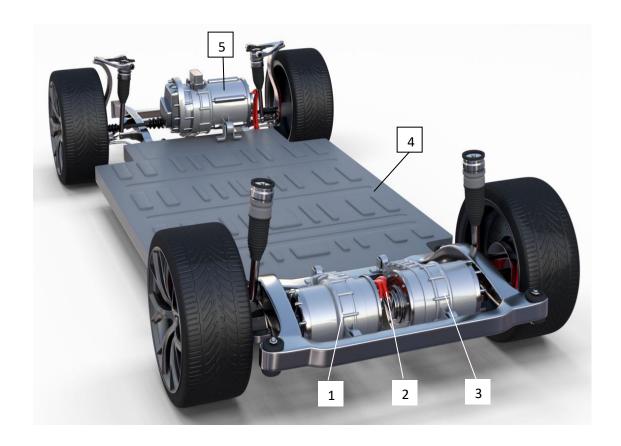
Тенденция развития мирового автомобилестроения свидетельствует о том, что гибридные автомобили должны стать переходным мостом от автомобилей с  $\mathcal{L}BC$  к электромобилям и на них будут отрабатываться многие системы, узлы, приборы, необходимые для транспортных средств абсолютно без вредных выбросов [114].

В настоящее время на серийных гибридных автомобилях и электромобилях массово используются только два типа электродвигателей:  $C\Pi\Pi$  — трёхфазный синхронный с постоянными магнитами на роторе (Toyota "Prius" с гибридным приводом [145], Nissan "Leaf"- электромобиль [147]) и  $A\Pi$  — трёхфазный асинхронный с короткозамкнутым ротором ("Tesla Motors"- электромобили [146], Chevrolet "Volt" с гибридным приводом). По сравнению с классическим приводом ( $\Pi$ BC +  $\Pi$ BC) такие установки имеет следующие очевидные преимущества:

- 1. значительно более высокий КПД;
- 2. возможность рекуперации энергии торможения;
- 3. коробка передач заменяется на планетарную систему распределения мощности (в гибридах) или вообще отсутствует (в электромобилях);
- 4. большая перегрузочная способность (1,8-2,5) по сравнению с ДВС (у которого 1,2), из-за чего номинальная мощность  $\mathcal{L}BC$  бывает существенно завышенной по условиям динамики;
- 5. электродвигатель обеспечивает максимальный крутящий момент уже в начале разгона автомобиля с места и в широком диапазоне частот вращения, что также способствует снижению его номинальной мощности, а ДВС не в состоянии обеспечить достаточный крутящий момент на низких скоростях вращения коленчатого вала.

Можно указать и некоторые недостатки, в частности: 1) частотный преобразователь должен пропускать перегрузочные броски тока электродвигателя, поэтому иметь большую мощность; 2) при глубоком регулировании скорости вращения электродвигателя переменного тока *КПД* и двигателя, и преобразователя существенно снижается; 3) имеют место дополнительные потери из-за искажения форм кривых тока и напряжения.

Управление скоростью гибридных автомобилей и электромобилей осуществляется изменением скорости вращения тяговых электродвигателей регулированием питающего напряжения и частоты реверсивным преобразователем. У серийно выпускаемых электромобилей вал тягового электродвигателя непосредственно соединен с ведущими колесами через главную передачу. При таком регулировании возникают значительные потери энергии (особенно в динамичном городском режиме) из-за появления инерционных сил, которые непосредствнно отражаются на валу тягового электродвигателя. Компоновка привода с асинхронным электродвигателем серийно выпускаемого электромобиля «Tesla» приведена на рис. 1.9.



1 — преобразователь; 2 — главная передача; 3 — асинхронный электродвигатель; 4 — тяговая аккумуляторная батарея; 5 — система охлаждения.

## Рисунок 1.9 - Привод электромобиля «Тесла»

Асинхронный электродвигатель надежен по конструкции и прост при обслуживании, но при регулировании его скорости вращения возникают две существенные проблемы. Первая – это при управлении на низких частотах вследствие относительного увеличения падения напряжения в статоре происходит заметное уменьшение магнитного поля, а, следовательно, и уменьшение критического (максимального) момента электродвигателя. Вторая проблема – это значительные потери в короткозамкнутом роторе при перегрузках большим моментом – повышение температуры беличьей клетки (несмотря на то, что она изготовлена из меди) и необходимость отвода большого количества тепла. Первую проблему «Tesla» в своей «Model S» решила установкой двигателя завышенной мощности более чем в 3 раза, что дало также возможность демонстрировать высокую динамику электромобиля. Вторая проблема решена разработкой оригинальной, но крайне сложной системы охлаждения беличьей клетки ротора жидкостью. Здесь необходимо было решить не только проблему подвода охлаждающей жидкости во вращающийся ротор, но и изолировать её от элементов, по которым проходит электрический ток. Вал двигателя полый, один конец его имеет отверстие, в которое заводится трубка для подвода охлаждающей жидкости. Внешняя поверхность трубки имеет лопасть в несколько витков на всю длину трубки, обеспечивающую турбулентное движение охлаждающей жидкости по внутренней поверхности полого ротора. Такая конструкция позволяет эффективно отводить тепло от ротора, при этом охлаждающая жидкость изолирована от электрических частей. В итоге все эти решения отразились на стоимости и низкой энергоэффективности электромобиля, для которого необходимо было установить тяговую литий-ионную батарею ёмкостью 100 кВт\*ч и весом более 500 кг с отдельной охлаждающей системой [153].

Для транспорта важное значение имеют масса и габариты электропривода. По удельной мощности синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) вне конкуренции, но в них невозможно регулировать магнитный поток возбуждения из-за использования постоянных магнитов, который определяет ЭДС электрической машины. На определённой частоте вращения ЭДС машины достигает величины напряжения питания инвертора и дальнейшее повышение частоты становится затруднительным. То же самое касается регулирования крутящего момента, для повышения которого в СДПМ нужно повышать ток статора – момент возрастает пропорционально. Более эффективно было бы и повысить и поток возбуждения – тогда и магнитное насыщение железа было бы гармоничным, а потери были бы ниже, но с постоянными магнитами это невозможно. Более того, в некоторых конструкциях синхронных машин и ток статора нельзя повышать сверх определённой величины – магниты могут размагнититься. Таким образом, синхронный двигатель с постоянными магнитами хорош лишь в одной точке - номинальной с номинальным моментом  $M_{\rm H}$  и номинальной частотой вращения  $n_{\rm H}$ , для электротяги желательно её использовать с коробкой передач.

Ещё один минус для транспортного средства с тягой на СДПМ в режиме движения выбегом — потери в стали останутся почти номинальными, а в случае использования асинхронного двигателя, то его ротор крутился бы как болванка. Таким образом, при использовании СДПМ необходимо учитывать следующие его особенности[153]:

- 1. При буксировке даже обесточенный синхронный электродвигатель на постоянных магнитах (СДПМ) переходит в генераторный режим, что приводит к перегреву и возгоранию энергосистемы электромобиля.
- 2. При высоких температурах происходит размагничивание постоянных магнитов.

- 3. В случае повреждения ротора СДПМ его ремонт, как правило, осуществляется на заводе изготовителе, т.к. извлечение и безопасная обработка ротора практически невозможно в обычных условиях.
- 4. На максимальной скорости вращения у СДПМ возникают огромные потери в стали.
  - 5. Высокая стоимость СДПМ из-за постоянных магнитов.

Неоднозначным остается вопрос выбора соответствующего вида трансмиссии. К примеру, в серийном гибридном автомобиле «Toyota Prius» и на многих выпускаемых моделях других фирм, вместо коробки передач для регулирования скорости двигательной установки, состоящей из ДВС и двух электродвигателей-генераторов, используется устройство распределения мощности между этими двигателями, представляющий собой планетарный редуктор. Вал тягового электродвигателя соединен с коронной шестерней, вал ABC – с водилом, а вал генератора с солнечной шестерней. В этой трансмиссии скорость к ведущим колесам регулируется плавно за счет изменения электроникой режимов работы этих трех двигателей, но трансформации крутящего момента не происходит, как в обычном вариаторе. Нагрузочные моменты проходят через тяговые двигатели, что сильно сказывается на расходе энергии тяговой батареи, особенно в динамике. Секрет экономичности «Prius» (городской цикл – 4,5 л/100км), в дополнение к сниженному коэффициенту аэродинамического сопротивления ( $C_x = 0.24$ ), низкому центру тяжести и многорычажной подвеске, заключается в удачном применении бензинового двигателя 1,8 л, работающего по циклу Аткинсона ( $\eta = 40\%$ ). Основной минус привода гибридного автомобиля «Prius» - это повышенные потери при управлении передаточным числом планетарной трансмиссии производимое изменением режимов работы ДВС, тягового электропривода и генератора компьютером, а также многократное преобразование одного вида энергии в другой. Система управления приводом интеллектуально чрезвычайно сложна и не способствует высокой надежности.

На традиционных автомобилях с  $\mathcal{A}BC$  также используется обычная вариаторная трансмиссия, как правило, совместно с гидротрансформатором, который используется для повышения общего диапазона регулирования скорости автомобиля (рис.1.10) [150]. Гидротрансформатор не может обеспечить реверс, поэтому для обеспечения реверса и нейтрали в такой коробке установлен дополнительно отдельный планетарный механизм (D-N-R).

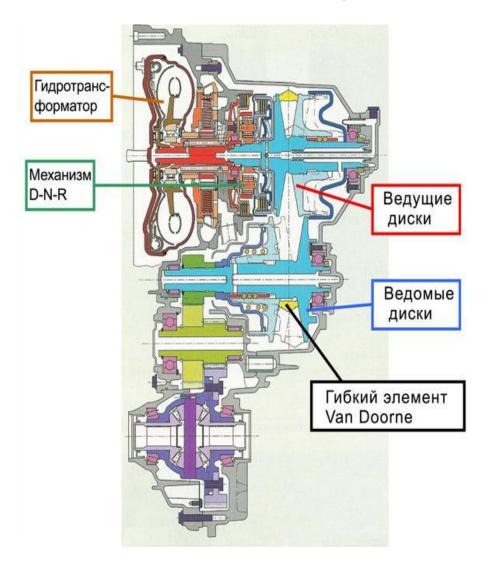


Рисунок 1.10 — Вариаторная коробка передач с гидротрансформатором

Управление скоростью автомобиля осуществляется не только вариатором, но и изменением скорости вращения  $\mathcal{A}BC$ , что не позволяет максимально использовать преимуществ вариаторного управления. Сложность данной коробки передач снижает его КПД и надежность.

На автомобиль бизнес класса «Toyota Camri» впервые установлена но-

вая коробка передач, в котором вариатор совмещен со стартовым редуктором (*«Direct Shift CVT»*), рис.1.11 [158]. Коробка передач имеет два режима работы: 1) режим стартового редуктора и 2) режим клиноременного вариатора. Переключение между этими режимами производится включением и выключением муфт C1, C2 и синхронизатора.

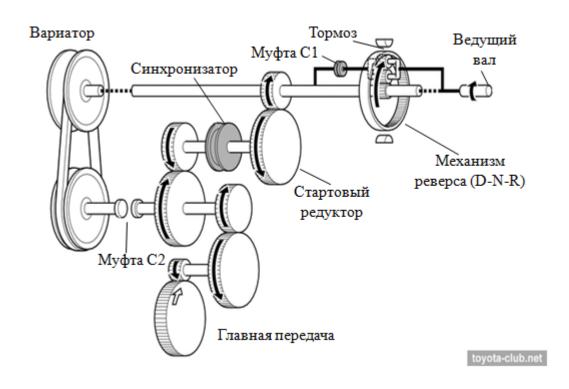


Рисунок 1.11 – Вариаторная коробка передач со стартовым редуктором (*«Direct Shift CVT»*)

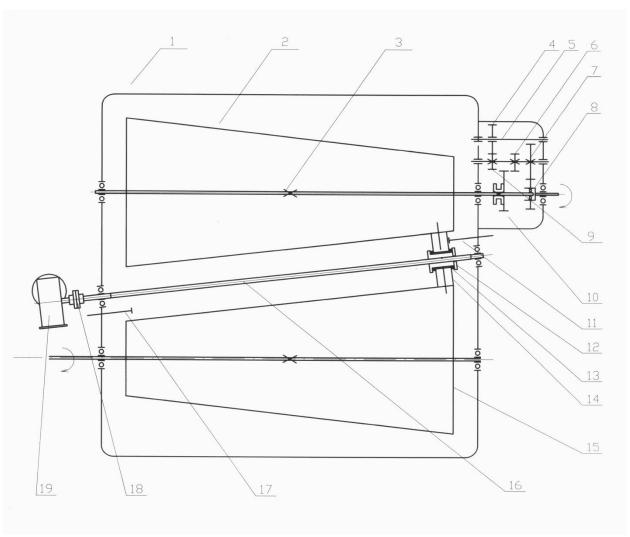
При трогании с места, движении на малой скорости или задним ходом используется стартовый редуктор (с постоянным передаточным числом). Этот режим обеспечивается замыканием муфты С1, размыканием муфты С2 и включением синхронизатора. Вращение передается от ведущего вала к стартовому редуктору, затем к синхронизатору и через промежуточные шестерни к главной передаче. Для перехода в режим движения на вариаторе замыкается муфта С2 и размыкается синхронизатор, муфта С1 и тормоз выключены. Вращение передается от ведущего вала к вариатору, от него через муфту С2 к главной передаче. Режим заднего хода обеспечивается включением тормоза и замыканием синхронизатора, размыканием муфт С1 и С2.

Режим нейтрали устанавливается выключением тормоза, размыканием муфт C1, C2 и синхронизатора.

Такая коробка не в полной мере использует преимущества вариаторного управления и теряет плавность при переключении от стартового редуктора к вариатору и наоборот.

Так же представляет интерес зубчатый вариатор, разработанный сотрудниками автомобильного факультета Горского аграрного университета [89].

Предлагаемый зубчатый реверсный вариатор представляет собой дифференциальный механизм, состоящий из двух валов-шестерен 2 и 15 в виде конусных многозаходных равнонаправленных винтов, валы 3 (оси, образующие) которых расположены параллельно друг к другу (рис. 1.12).



1 — картер вариатора; 2 и 15 — валы — шестерни; 3 — ось вала — шестерни; 4, 6, 7 и 9 - шестерни; 5 — ось; 8 — ведущий вал; 10 — подвижная шестерня; 11и 17 — датчики конечного положения сателлита 14; 12 — ступица; 13 — пружины; 16 — винт; 18 — муфта; 19 — червячный мотор-редуктор.

Рисунок 1.12 – Зубчатый реверсивный вариатор

При этом валы-шестерни вершинами обращены в разные стороны. В зацепление с валами-шестернями входит сателлит 14 одинаковой конфигурации с сопрягаемыми валами. Сателлит свободно сидит на ступице 12. Перемещение сателлита вдоль валов-шестерен осуществляется за счет винтовой пары, которой являются ступица 12 и винт 16. В процессе этого происходит автоматическое изменение передаточного отношения дифференциального механизма. Привод винтовой пары осуществляется посредством червячного мотор-редуктора 19 через муфту 18. Плавность перемещения сателлита 14 вдоль винта 16 (валов-шестерен 2 и 15) обеспечивается пружинами 13. Ограничение в перемещении сателлита 14 вдоль винта 16 осуществляется концевыми выключателями (датчики концевого положения) 11 и 17. Базовой деталью вариатора является картер 1. Изменение направления вращения валовшестерен 2 и 14 (соответствует движению транспортного средства в прямом направлении или задним ходом) осуществляется перемещением шестерни 10 по шлицам вала до вхождения в зацепление с зубьями шестерни 6 или шестерни 4. При этом шестерня 4 и ось 5, на которой она сидит, условно изображены в плоскости чертежа. Для обеспечения передачи крутящего момента от ведущего вала 8 до шестерни 10 (вала-шестерни 2) на промежуточном валу неподвижно посажены шестерни 6, 7 и 9. Для выключения зубчатого реверсивного вариатора необходимо шестерню 10 выставить в нейтральное положение (вывести из зацепления). При этом червячный редуктор перемещает сателлит 14 в исходное положение, соответствующее реализации максимального крутящего момента. Вал-шестерня 2 представляет собой конусную косозубую шестерню в виде конусного многозаходного винта. Углы нарезки

зубьев на валах-шестернях равнонаправленные. Количество витков гребней на валу-шестерни зависит от диаметров его оснований (n=Dmax/Dmin). Сателлит 14 представляет собой часть сопрягаемой с ним вала-шестерни 2, обеспечивающей прочностные качества, зависящие от нагрузок. У сопрягаемых сателлита и вала-шестерни должны совпадать конусность и модуль. Преимущества предлагаемой конструкции зубчатого реверсивного вариатора заключаются в простоте изготовления, повышении надежности, долговечности механизма и технологичности ремонта. Конструкция вариатора позволяет применять его в машинах различных классов мощности благодаря зубчатому зацеплению.

## 1.3 Привод пуска традиционных автомобилей с *ДВС* и средства повышения его эффективности.

Эффективность использования автомобильного транспорта, тракторной и другой моторизованной сельскохозяйственной техники зависит от их приспособленности к различным природно-климатическим условиям эксплуатации. Наибольшее число отказов их ДВС наблюдается при низких температурах, особенно, в процессе пуска. При этом нельзя использовать недопустимые методы эксплуатации автомобиля и двигателя: пуск холодного двигателя буксированием, разогрев двигателя открытым пламенем. Это снижает срок службы двигателя и приводит к серьезным повреждениям транспортного средства. Создать универсальное средство облегчения пуска ДВС, отвечающее всем возможным требованиям практически невозможно. Все устройства и средства, предназначенные для пуска двигателей тракторов и автомобилей при отрицательных температурах можно разделить на два основных вида: 1) устройства обеспечивающие возможность холодного пуска двигателя; 2) устройства, обеспечивающие возможность пуска путем предпускового разогрева двигателя.

Основным параметром при оценке пусковых качеств автотракторных двигателей является предельная температура надежного пуска холодного двигателя — это наиболее низкая температура окружающего воздуха, при ко-

торой осуществляется надежный пуск  $\mathcal{A}BC$ . Система пуска должна вращать коленчатый вал с частотой, которая создает благоприятные условия протеканию рабочих процессов в двигателе. Эта частота называется минимальной пусковой частотой  $n_{min}$  и зависит от температуры окружающего воздуха. Система пуска должна обеспечивать пуск холодного двигателя за три попытки пуска продолжительностью до 10 секунд для бензиновых двигателей и не более 15 с для дизелей. Интервал между попытками — 1мин [112]. Величина  $n_{min}$  и соответствующий ей средний момент сопротивления вращению коленчатого вала  $M_{cos}$  определяют требуемую мощность системы пуска. Энергия стартера тратится на преодоление следующих составляющих сил сопротивления вращению коленчатого вала двигателя

- -сил трения;
- сил на сжатие рабочей смеси;
- сил инерции.

Поэтому для создания  $n_{min}$  стартер должен развивать суммарный момент, равный :

$$M_{cm} = M_m + M_{cxc} + M_J \tag{1.1}$$

где  $M_m$  – момент на преодоления сил трения;

 $M_{cж}$  – момент, затрачиваемый на сжатие рабочей смеси;

 $M_J$  – момент, затрачиваемый на преодоление сил инерции.

Основной составляющей требуемого крутящего момента от стартера является момент на преодоление сил трения в двигателе  $M_m$ , который зависит от температуры окружающего воздуха. При температуре 0°С,  $M_m$  составляет 59%, а при -20°С – 80% от всего момента сопротивления двигателя на вращение коленчатого вала [113]. Моменты  $M_{c,m}$  и  $M_J$ , практически не зависят от температуры окружающего воздуха. Процесс изменения вращающего момента электростартера m и частоты вращения коленчатого вала n при пуске шестицилиндрового двигателя дизеля показан на рис. 1.13 [123]. Как видно из рисунка, момент сопротивления вращению коленчатого вала периодически

изменяется во времени и углу поворота коленчатого вала вследствие чередования тактов сжатия и расширения.

Поэтому для стартерного пуска характерна высокая неравномерность вращения коленчатого вала даже при установившемся режиме с постоянной средней частотой  $n_{cp}$ .

Выделяют четыре стадии традиционного стартерного пуска поршневого ДВС (рис. 1.13). На 1-й стадии частота вращения коленчатого вала увеличивается от 0 до средней частоты вращения в установившемся режиме. В начальный момент подключения электростартера к источнику питания его якорь и коленчатый вал двигателя остаются неподвижными, пока вращающий момент стартера не превысит момент трогания системы стартердвигатель. При этом сила тока в якоре и вращающий момент достигают максимальных значений, затем уменьшаются до значений, соответствующих установившемуся режиму (2-я стадия пуска).

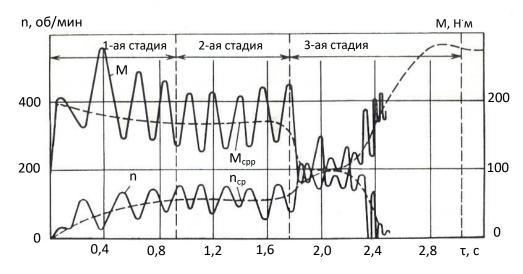


Рисунок 1.13 - Процесс изменения момента стартера (M) и частоты вращения коленчатого вала (n) при пуске шестицилиндрового дизеля

Продолжительность 1-й стадии пуска зависит от вязкости моторного масла, мощности электростартера, момента инерции системы стартер-двигатель и обычно составляет несколько десятых долей секунды.

Воспламенение топлива в цилиндрах при низкотемпературном пуске двигателя начинаются на 2-й стадии. Возможность и продолжительность

пуска зависят от средней частоты вращения коленчатого вала именно на этой стадии. С повышением температуры окружающей среды частота вращения коленчатого вала возрастает, необходимые для воспламенения смеси условия создаются раньше и продолжительность 2-й стадии сокращается. При достаточно высоких температурах воспламенение смеси может произойти на 1-й стадии пуска.

Процесс пуска переходит в 3-ю стадию, когда двигатель начинает развивать мощность за счет теплоты сгорания топлива. Если топливо воспламеняется и сгорает во всех цилиндрах, то 3-стадия характеризуется непрерывным нарастанием частоты вращения коленчатого вала благодаря совместному действию вращающих моментов электростартера и двигателя.

Продолжительность 3-й стадии зависит от числа цилиндров, количества и равномерности чередования пропусков сгорания, равномерности распределения смеси по цилиндрам карбюраторного двигателя, момента инерции системы стартер-двигатель, начальной вязкости масла и интенсивности ее снижения в процессе пуска.

В 4-й стадии двигатель работает самостоятельно, но ее целесообразно относить к процессу пуска. Если мощность двигателя, развиваемая на этой стадии, оказывается недостаточной для преодоления возрастающего с увеличением частоты вращения момента трения, двигатель остановится и для его пуска требуется повторное включение стартера.

В самом  $\mathcal{J}BC$ , при попадании под влияние отрицательных температур, снижаются пусковые качества из-за повышения вязкости моторного масла и возрастания сил трения; снижение температур охлаждающей жидкости  $t_{\text{ож}}$ , воздуха для смеси  $t_{\text{в}}$ , топлива  $t_{\text{т}}$ . Последние ухудшают испаряемость топлива и затрудняют воспламенение топливной смеси. Это приводит к необходимости дополнительных устройств и способов облегчения пуска ( $VO\Pi\mathcal{J}$ ).

При рассмотрении этого вопроса многие исследователи, анализируя различные способы и устройства облегчения пуска, классифицируя их по видам и способам обогрева и, при этом не указывают их зоны действия в температур-

ном диапазоне, а также сравнительная эффективность их работы. Кроме того, мало внимания уделяется усовершенствованию самой системы пуска. На наш взгляд последние два положения необходимо рассмотреть более подробно. Нами предлагается разделить все возможные виды стартерного пуска  $\mathcal{L}BC$ , с учетом требований отраслевого стандарта [112], на четыре группы:

- 1. Обычный стартерный пуск двигателя в диапазоне температур от (+45°C) до (-20°C), когда не используются никакие дополнительные средства по облегчению пуска для бензиновых двигателей, кроме горючего и смазочного материала по сезону. Завод-изготовитель дает гарантию нормальной работы системы стартерного пуска бензинового двигателя при температуре до (-20°C). Здесь необходимо следить за состоянием аккумуляторной батареи и генераторной установки: летом батарея не должна перезаряжаться из-за высокого напряжения генератора, чтобы избежать выкипания электролита, а зимой генератор должен выдавать повышенное напряжение, соответствующее климатическому району эксплуатации автомобиля согласно техническим требованиям для нормальной зарядки батареи [123].
- 2. Использование устройств и средств облегчения пуска двигателя при температуре от (-20°C) до (-30°C) это пуск холодного двигателя путем изменения характеристик его отдельных элементов и параметров эксплуатационных материалов, а также воздействие на их температурное состояние. Сюда также относятся способы рационального и эффективного использования возможностей самой системы стартерного пуска путем усовершенствования и дополнения её необходимыми элементами. В данном случае имеющаяся штатная система пуска может не обеспечить успешный запуск двигателя, поэтому для регионов с такой температурой необходимо предусмотреть эффективные устройства облегчения пуска.
- 3. Обязательное использование индивидуальных предпусковых подогревателей при безгаражном хранении автомобилей при температуре от (-20°C) до (-45°C). Подогреватель обеспечивает горячий воздух, которым по-

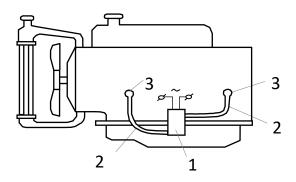
догревается масло в картере, горячую охлаждающую жидкость, которая подогревает стенки цилиндров, головку блока, впускной трубопровод и воздух, поступающий в цилиндры. Такими подогревателями комплектуются автотранспортные средства северного исполнения.

4. Использование индивидуальных предпусковых подогревателей совместно с устройствами облегчения пуска двигателя при температурах от (-45°C) до (-60°C). Такой пуск значительно усложняется ввиду применения комбинации устройств облегчения пуска, поэтому некоторые автотранспортные предприятия на крайнем севере зимой сутками не заглушают двигатели автомобилей и тракторов, резко снижая их возможный ресурс работы. В такой климатической зоне желательно предусмотреть гаражи и боксы, чтобы повысить ресурс *АТС* и тракторов.

Для российских условий эксплуатации автомобилей наименее определенной и оснащенной является второй вид стартерного пуска (-20°C до -30°C), где используются различные способы и устройства облегчения пуска двигателя (УОПД), а остальные виды пуска достаточно ясно определены в используемых средствах. В нашей стране УОПД выпускаются преимущественно для дизельных двигателей, проблемы с пуском у которых начинаются с температуры (-12°C). Для облегчения пуска бензиновых двигателей при температуре ниже (-20°C) преимущественно предлагаются следующие способы и устройства облегчения пуска: разогрев охлаждающей жидкости [3,11,12], разжижение масла бензином[38,42,132], разогрев масла в картере [64], холодный пуск ДВС с использованием легковоспламеняющихся жидкостей [124], использование тепловых аккумуляторов (термосов) с блоком управления, сохраняющих теплоту системы охлаждения от предыдущей работы [41].

Проанализируем предлагаемые средства. Разогрев двигателя горячей водой был одним из самых распространённых способов тепловой подготовки автомобильных и тракторных двигателей на предприятиях и в хозяйствах,

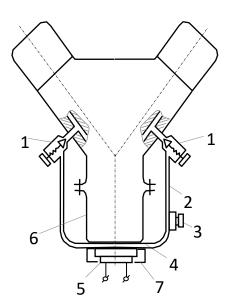
когда для охлаждения преимущественно использовалась вода. При этом двигатель разогревался двумя способами: заливкой горячей воды в систему охлаждения или принудительной циркуляцией её в рубашке двигателя. Второй способ более эффективен, т.к. при движении жидкость быстрее отдаёт теплоту, но для этого требуется дополнительное оборудование. С использованием незамерзающих жидкостей (тосол, антифриз) стали применять другие способы нагрева, преимущественно электрические. При разогреве охлаждающей жидкости наиболее эффективное использование электронагревателя можно обеспечить, если его установить непосредственно вблизи рубашки охлаждения блока цилиндров, как показано на рисунке 1.14[106].



1 — электронагреватель; 2 — шланги; 3 — отверстия в блоке цилиндров Рисунок 1.14 - Схема включения электронагревателя в рубашку охлаждения блока цилиндров

Нагретая в электронагревателе 1 жидкость подводится в нижнюю заднюю часть рубашки охлаждения и забирается она в электронагреватель из передней нижней части рубашки охлаждения. При таком подводе жидкости обеспечивается наилучшая равномерность разогрева двигателя, т.к. нагретая жидкость, поступающая из электронагревателя в рубашку охлаждения двигателя, стремится подняться вверх с учётом наклона двигателя по длине, равномерно нагревая блок цилиндров. В рубашке блока цилиндров большинства грузовых автомобилей предусмотрены отверстия для подключения индивидуальных пусковых подогревателей, работающих на жидком топливе. При разогреве охлаждающей жидкости хуже нагреваются вкладыши

подшипников коленчатого вала, и практически не нагревается масло в поддоне картера двигателя. Но с другой стороны, повышение температуры масла в картере двигателя, на которое уходит много времени и ресурсов, практически не влияет на состояние масляной плёнки во вкладышах коленчатого вала и на стенках цилиндров. Масло на этих поверхностях остаётся загустевшим и запуск двигателя не облегчается. Объясняется это низкой теплопередачей воздуха в картере и слабой теплопроводностью прокладки между картером и блоком цилиндров. Поэтому в последнее время применяют одновременный нагрев одним нагревателем масла и охлаждающей жидкости или устанавливают дополнительный электронагреватель для масла с подводом охлаждающей жидкости, как показано на рис.1.15[106].



1 —вентиль; 2 —трубопровод; 3 — кран; 4 — теплообменник; 5 - электронагреватель; 6 — кронштейн для крепления теплообменника; 7 - защитный кожух

Рисунок 1.15 - Разогрев масла в поддоне картера и охлаждающей жидкости в блоке цилиндров одним нагревателем.

К днищу поддона картера двигателя плотно прикрепляется плоский теплообменник 4, внутренняя полость которого при помощи трубок 2 соеди-

няется с рубашкой охлаждения блока цилиндров. На нижней стенке теплообменника имеется защитный кожух 7 с полозками, расположенными вдоль оси автомобиля, для размещения под днищем электронагревателя и защиты поверхностей нагрева от обдува холодным воздухом. Поверхность электронагревателя 5 плотно прилегает к днищу теплообменника 4. После разогрева электронагреватель можно снять с автомобиля. При использовании воды в качестве охлаждающей жидкости, после выключения электронагревателя, при помощи двух вентилей 1 отключают теплообменник от системы охлаждения и сливают из него воду краном 3. Электроподогрев широко применяется благодаря простоте обслуживания и надёжности оборудования с системой автоматического регулирования подогревом на открытых стоянках всего мира, где используется напряжение 220В. Несмотря на высокую эффективность электронагревательных устройств при низких температурах, они не находят широкого применения в нашей стране. Причина заключается в отсутствии промышленного производства электронагревателей для автомобилей с системой автоматического управления и другого оборудования для стоянок. Разжижение масла топливом, с целью облегчения запуска двигателя в зимнее время, является простым способом, не приносящим вреда двигателю и применяемым в условиях безгаражного хранения автомобилей и тракторов. Проведённые сравнительные испытания на износ двух групп автомобилей с обычным и разжиженным маслом не выявили разницу износа трущихся деталей двигателя в группах [42]. При разжижении масла бензином все зазоры в двигателе заполняются маловязкой смазкой, благодаря чему снижается момент прокручивания коленчатого вала и повышается надёжность работы и срок службы аккумуляторной батареи. Процесс разжижения масла в двигателе производят следующим образом. После окончания работы в картер заливают бензин в количестве 10-15% от ёмкости масла. Затем заводят двигатель, и в течение 3-5 минут дают работать на средних оборотах. Бензин смешивается с маслом, оно разжижается и легко проникает ко всем

трущимся деталям. На следующий день двигатель запускается от электростартера.

Значительно уменьшить затраты времени и средства для пуска холодного двигателя позволяет применение специальных пусковых жидкостей, для бензиновых ДВС выпускается жидкость "Арктика", а для дизелей – "Холод  $\mathcal{I} - 40$ ", " $\mathcal{I} - 50$ " и " $\mathcal{I} - 55K$ ". Жидкость впрыскивается во впускной тракт двигателя в момент вращения стартером коленчатого вала. Основу жидкости составляет этиловый эфир, обладающий, по сравнению с основным топливом, более никой температурой самовоспламенения, очень большой летучестью и поэтому не требующей высоких пусковых частот вращения коленчатого вала. Разработчики утверждают, что износы деталей цилиндро-поршневой группы, шеек и подшипников скольжения коленчатого вала в период холодного пуска с применением пусковой жидкости, практически не отличаются от износов аналогичных деталей разогретого перед пуском двигателя [124]. Пусковые жидкости, кроме этилового эфира, имеют в своем составе до 40% и другие компоненты, необходимые для смазывания деталей цилиндро-поршневой группы и обеспечению ступенчатого нарастания давления внутри цилиндров двигателя при сгорании поступившей пусковой жидкости. Для обеспечения такого холодного пуска нужна надежная и эффективная система стартерного пуска.

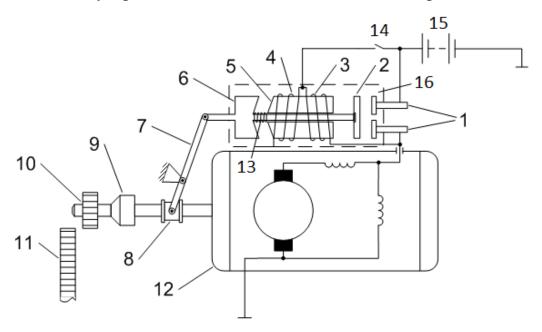
Система охлаждения поглощает около 30% всей тепловой энергии двигателя и это тепло можно сохранить с помощью теплового аккумулятора (термоса). Перед пуском двигателя в холодную погоду горячая жидкость из теплоаккумулятора заменяет холодную в рубашке блока цилиндров, разогревает двигатель и обеспечивает лёгкий пуск. Теплоаккумулятор позволяет снизить расход топлива, уменьшает содержание токсичных веществ в отработавших газах, быстро прогревает кабину автомобиля и он эффективен, когда перерывы между поездками не превышает 2-3 дней [41].

Теперь в отношении использования аккумуляторных батарей в зимних условиях. При низких температурах снижается работоспособность аккумуляторной батареи из-за уменьшения проводимости электролита и повышения внутреннего сопротивления батареи. Это приводит к снижению величины максимальной токоотдачи батареей, что особенно важно при пуске  $\angle BC$  электростартером. К примеру, для полностью заряженной батареи 6CT-90 при температуре +25°Cток короткого замыкания составляет 1500A, а при температуре (-20°C) этот ток составляет всего 800A, снижение возможности батареи почти в 2 раза [123]. Установка батареи в утеплённом ящике значительно замедляет её остывание. Опытные водители зимой, перед запуском двигателя, кратковременно включают фары дальнего света и этим повышают надежность пуска за счет подогрева электролита. Для повышения эффективности такой процедуры предлагаем между уплотнительным ящиком и аккумулятором по периметру расположить электронагревательный элемент мощностью 40 - 50Вт и подключить к клеммам аккумулятора через кнопку. Одна из разработок в этом направлении – аккумуляторная батарея с электронагревателем. Для обеспечения работоспособности в зимнее время при температуре окружающего воздуха (-25...-40)°С в аккумуляторной батарее 6СТ-190ТРН установлен электронагреватель, представляющий собой графитизированный вискозный шнур во фторопластовой изоляции. С целью поддержания температуры электролита в интервале +(10...15)°C электронагреватель с помощью термореле периодически подключается к внешнему источнику тока напряжением 24В. Изолированное от электролита термореле установлено в одной из секций батареи [124].

Для облегчения пуска *ДВС* считаем необходимым полнее и рационально использовать возможности самой системы стартерного пуска. В рассматриваемом диапазоне температур (-20°C до -30°C) эксплуатации *АТС* в большинстве случаев можно обойтись повышением эффективности функционирования и совершенствованием системы пуска.

Схема традиционной системы стартерного пуска двигателя, используемого в настоящее время, представлена на рис.1.16.

Стартер 12 получает питание от аккумуляторной батареи 15 при замыкании неподвижных контактных болтов 1 подвижной контактной пластиной 2. Пуск электростартера осуществляется следующим образом. Замком зажигания включаются контакты выключателя 14, запитываются от аккумуляторной батареи втягивающая 3 и удерживающая 4 обмотки втягивающего реле 16.



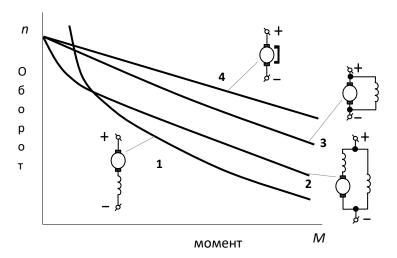
1 - контактный болт; 2 - подвижный контакт; 3,4 - втягивающая и удерживающая обмотки; 5 - сердечник; 6 - якорь реле; 7 - рычаг привода; 8 - поводковая муфта; 9 - муфта свободного хода; 10 - шестерня; 11 - венец маховика; 12 - стартер; 13 — пружина; 14 — выключатель; 15 — аккумуляторная батарея; 16 — втягивающее реле.

Рисунок 1.16 – Традиционная схема включения стартера.

Магнитное поле этих обмоток притягивает к сердечнику 5 реле якорь 6 и с помощью рычага 7 механизма привода вводит шестерню 10 в зацепление с зубчатым венцом 11 маховика двигателя. В конце хода якоря 6 контактная пластина 2 замыкает силовые контактные 1, электростартер получает питание и приводит во вращение коленчатый вал двигателя. После пуска двигателя муфта свободного хода 9 предотвращает передачу вращающего момента от венца ма-

ховика 11 к валу электростартера. При размыкании контактов выключателя 14 втягивающая 3 и удерживающая 4 обмотки втягивающего реле подсоединяются к аккумуляторной батарее последовательно через силовые контактные болты 1, что ведёт к взаимному погашению их магнитных полей. Сердечник 5 втягивающего реле 16 размагничивается, возвратная пружина 13 перемещает якорь 6 реле в исходное положение и выводит шестерню 10 из зацепления с венцом маховика 11 [124]. Здесь необходимо отметить следующее. Во-первых, рассмотренный пуск ДВС производится при полной нагрузке электростартера, т.е. подключение электростартера к аккумуляторной батарее происходит после зацепления шестерни привода 10 с венцом маховика 11. Это усложняет работу стартера и требует выдачи значительной пиковой мощности от аккумуляторной батареи в зимний период, т.к. крутящий момент стартера должен преодолеть не только момент запускаемого двигателя, но и момент инерции самого якоря стартера. Такой старт при отрицательных температурах окружающего воздуха может не обеспечить успешный запуск двигателя. Во-вторых, в конструкции втягивающего реле используемых стартеров силовые неподвижные контакты 1 и подвижная контактная пластина 2 имеют двойной разрыв (рис.1.16). Каждый контакт в электрической цепи – это дополнительное сопротивление, зависящее от состояния контактов. В процессе эксплуатации контакты искрят, обгорают и окисляются, что ухудшает их электропроводность и повышает переходное сопротивление. Это ведёт к увеличению падения напряжения в контактах, ощутимое для низковольтной стартерной цепи, где в момент пуска  $\mathcal{A}BC$  протекают сотни ампер. В зимних условиях это усугубляет ситуацию.

Электростартер — это двигатель постоянного тока (ДПТ) с основной обмоткой на якоре и обмоткой возбуждения на статоре. В зависимости от схемы подключения обмотки возбуждения ДПТ делятся на двигатели с последовательным (сериесные), параллельным (шунтовые) и смешанным возбуждением (компаундные), а также двигатели с возбуждением от постоянных магнитов. Они имеют разные механические характеристики, которые приведены на рисунке 1.17.



1 – последовательное возбуждение; 2 – смешанное возбуждение;

3 – параллельное возбуждение; 4 – возбуждение от постоянных магнитов.

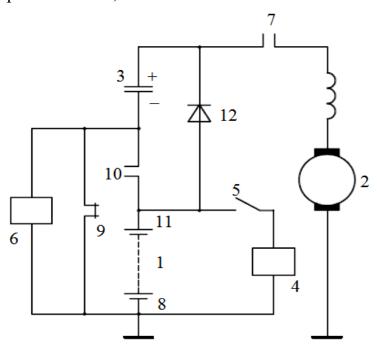
Рисунок 1.17 — Механические характеристики стартеров в зависимости от вида возбуждения

В качестве электростартеров, обычно, используются двигатели с последовательным и смешанным возбуждением, а также в последнее время все больше используются электростартеры с возбуждением от постоянных магнитов мощностью до 2 кВт. Двигатели с параллельным возбуждением как электростартеры пока не используются, а с последовательным возбуждением давно и широко применяются как стартеры и являются классическими. Этот двигатель имеет мягкую характеристику и плавно подстраивается под нагрузку: при малых нагрузках частота вращения якоря повышается, а при высоких нагрузках она падает (рисунок 1.17, кривая 1), т.е. обороты якоря «мягко» сочетаются с механической нагрузкой на валу. Из-за «мягкой» характеристики стартера из такого электродвигателя, колебания моментов сопротивления ABC при пуске приводят к периодическим изменениям угловой скорости коленчатого вала, вызывая появление динамического момента, что отрицательно влияет на процесс пуска. Это особенно важно при пуске ABC в зимнее время. Конструктивным недостатком такого двигателя является громоздкая обмотка возбуждения (из-за большой величины тока возбуждения), которая снижает эффективность работы магнитной системы и  $K\Pi \square$  стартера.

Стартер получается массивным и габаритным. Электродвигатель с параллельным возбуждением (рис. 1.17. кривая 3) в стартерах для  $\mathcal{A}BC$  не очень эффективны, особенно в зимнее время, когда падает напряжение аккумуляторной батареи, намагничивающая сила параллельной обмотки возбуждения, а, следовательно, и крутящий момент стартера значительно уменьшаются, пуск ABC становится невозможным. Кроме того, «жесткой» характеристике такого электродвигателя нужны большие передаточные числа между стартером и коленчатым валом ДВС. Однако жесткость характеристики  $Д\Pi T$  имеет положительную сторону, она обеспечивает стабильность и плавность хода стартера и поэтому обмотка параллельного возбуждения вводится дополнительно к последовательной обмотке. Получается двигатель со смешанным возбуждением, который имеет усредненную механическую характеристику, т.е. умеренно жесткую (рисунок 1.17 кривая 2) и используется в стартерах средней и большой мощности. Применение электродвигателя с независимым возбуждением от постоянных магнитов (рисунок 1.17, кривая 4) является удачным техническим решением для стартера ABC, малые габариты, нет обмотки возбуждения, и падение напряжения в них определяется только сопротивлением обмотки якоря

Возможностью применения конденсаторных батарей для улучшения стартерного пуска ДВС начали заниматься в середине 80-х годов прошлого века в ГТУ МАМИ В.П. Хортов, Ю.П. Чижков под руководством профессора М.Н. Фесенко, которые запатентовали десятки изобретений по этой теме [3]. Первоначальная цель была практически отказаться от аккумуляторной батареи, а для зарядки конденсаторов использовать источник небольшой ёмкости. Принципиальную возможность повышения эффективности системы стартерного пуска применением ёмкостных накопителей энергии впервые обосновал В.П. Хортов. В начале пуска момент сопротивления прокручиванию коленчатого вала двигателя значительно больше его установившегося значения и держится 1 – 2 с [32]. Поэтому, в начале пуска нужен повышенный крутящий момент, который обеспечивается заряженной конденсаторной батареей. С целью получения большого

начального момента были предложены различные схемы включения конденсаторов относительно аккумуляторной батареи. Сначала предлагали подключать ёмкости последовательно с аккумуляторной батареей, чтобы получить повышенное напряжение. Схема последовательного включения конденсаторов представлена на рис. 1.18, она работает следующим образом [3]. В исходном положении, т.е. перед пуском происходит зарядка конденсаторов по цепи: плюсовая клемма 11 аккумуляторной батареи, полупроводниковый вентиль 12, конденсаторная батарея 3, нормально замкнутые контакты 9 и минусовая клемма 8 аккумуляторной батареи. Для пуска стартера замыкаются контакты выключателя 5, и переключатель 4 управления пуском получает питание от аккумуляторной батареи, контакты 9 размыкаются, а контакты 10 замыкаются.

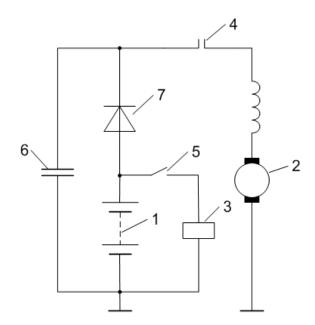


1 — аккумуляторная батарея; 2 —стартер; 3 — конденсаторная батарея; 4 — переключатель управления пуском; 5 — выключатель стартера; 6 — реле с замыкающими контактами 7; 8, 11 — отрицательный и положительный полюсы аккумуляторной батареи; 12 — полупроводниковый вентиль.

Рисунок 1.18 — Схема стартерного пуска  $\mathcal{A}BC$  с последовательным включением конденсаторов.

Таким образом, конденсаторная батарея 3 соединяется с аккумуляторной батареей 1 последовательно, реле 6 оказывается под напряжением аккумуля-

торной батареи и замыкает свои контакты 7 и стартер 2 приходит во вращение, осуществляется пуск ДВС удвоенным напряжением. Однако такое соединение действительно увеличивает напряжение комбинированного источника, но увеличивает и внутреннее сопротивление источника и до стартера доходит пониженное напряжение, поэтому ожидаемого эффекта не получается. Такая схема на практике не нашла применения. Затем было решено использовать параллельное соединение конденсаторов, которое позволяет повысить частоту вращения коленчатого вала в особенно ответственный, начальный период пуска ДВС без дополнительных аккумуляторных батарей и даже при сильно разряженной штатной батарее за счёт уменьшения эквивалентного внутреннего сопротивления комбинированного источника электроэнергии. Схема пуска стартера с параллельным включением конденсаторов представлена на рис. 1.19 [3,126].



1 - аккумуляторная батарея; 2 - стартер; 3 - тяговое реле;

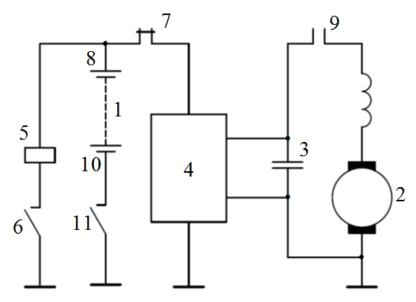
4 - контакты тягового реле; 5 - выключатель электростартера;

6 - конденсаторная батарея; 7 - полупроводниковый вентиль.

Рисунок 1.19 — Схема системы стартерного пуска *ДВС* с параллельным включением конденсаторов.

Перед пуском конденсаторная батарея 6 заряжается до напряжения аккумуляторной батареи 1 через полупроводниковый вентиль 7. Для пуска ДВС замыка-

ются контакты выключателя 5 стартера 2, включается тяговое реле 3 устройства управления пуском, который замыкает свои контакты 4 и подключает стартер 2 к конденсаторной батарее 7, а также через полупроводниковый вентиль 8 – к аккумуляторной батарее 1. Пуск  $\Pi BC$  осуществляется за счёт энергии, запасённой в конденсаторной батарее от энергии аккумуляторной батареи. Рассмотренная схема, хотя и снижает эквивалентное сопротивление источника энергии при использовании обычных конденсаторов, но напряжение в сети не может быть выше напряжения аккумуляторной батареи. Принципиально низковольтная конденсаторная система пуска работоспособна, но для использования в реальных условиях её не выгодно производить. Основная причина – это низкое напряжение бортовой сети, где используются конденсаторы, а их энергия пропорциональна квадрату напряжения. Конденсаторы на низкое напряжение имеют низкую удельную мощность, что приводит к повышению массы и габаритов изделия. После многочисленных опытов и экспериментов сам автор этой идеи и разработок пришёл к выводу, что низковольтные конденсаторные системы пуска  $\mathcal{A}BC$  не имеют перспективы не только для массового, но и даже серийного производства. Он считает, что будущее за высоковольтными системами пуска: они экономичны, т.е. обеспечивают пуск ДВС при значительно меньших, чем низковольтные системы, затратах энергии, а значит и массе конденсаторов [121]. Эти же авторы предлагают систему стартерного пуска  $\mathcal{A}BC$  с высоковольтными конденсаторами, схема которой представлена на рис. 1.20 [3].



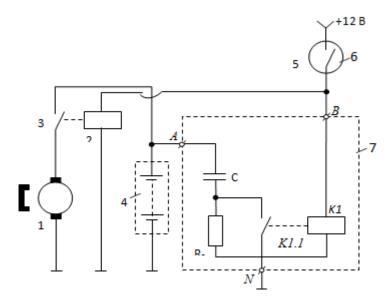
1 — аккумуляторная батарея; 2 —стартер; 3 — высоковольтная конденсаторная батарея; 4 — преобразователь напряжения; 5 — переключатель управления пуском; 6 — выключатель стартера; 7 — размыкающие контакты переключателя управления пуском; 8, 10 — плюсовая и минусовая клеммы аккумулятора; 9 — замыкающий контакт переключателя управления пуском; 11 выключатель заряда конденсаторной батареи.

Рисунок 1.20 — Схема стартерного пуска  $\mathcal{A}BC$  с высоковольтными конденсаторами.

В этой системе конденсаторного пуска дополнительно используется преобразователь напряжения с выпрямителем 4. Система работает следующим образом. При включении выключателя 11 заряда конденсаторной батареи 3 преобразователь напряжения 4 начинает работать, преобразует напряжение аккумуляторной батареи 1 в более высокое, одновременно выпрямляя его. Этим напряжением заряжается конденсаторная батарея 3. Затем замыкается выключатель 6 стартера 2, срабатывает переключатель управления пуском 5 и его контакты 9 замыкаются и стартер 2 приводится во вращение, осуществляется пуск двигателя. При размыкании выключателя 6 стартера схема приходит в исходное положение для заряда конденсаторной батареи. В рассмотренной схеме, благодаря высокому напряжению, более эффективно используется конденсаторная батарея, но дополнительно в системе применяется достаточно сложное устройство — преобразователь с выпрямителем, который сначала преобразует в переменное,

затем повышает его и выпрямляет, что повышает потери энергии в системе. При небольшой мощности преобразователя конденсаторная батарея долго заряжается, а повышение его мощности приводит к увеличению массы и габаритов. Кроме того, стартеры на высокое напряжение пока отсутствуют. Поэтому эта схема не нашла широкого применения в тягово – транспортных системах.

С появлением суперконденсаторов (ионисторов) снова повысился интерес к разработкам систем стартерного пуска  $\mathcal{A}BC$  с ёмкостными накопителями [59,111]. Основное преимущество суперконденсаторов состоит в уникальной способности накапливать заряд высокой плотности, на порядок выше, чем в обычных конденсаторах, благодаря своей большой электрической ёмкости, измеряемой фарадами. По двум основным показателям: удельной энергии и удельной мощности они занимают промежуточное положение между аккумуляторными батареями и обычными конденсаторами. И всему виной такого положения является низкое рабочее напряжение суперконденсаторов, которое не превышает 1,2 – 3 В. Для работы под высоким напряжением они соединяются последовательно в «гирлянды», но это повышает их внутреннее сопротивление и снижает величину максимально возможной снимаемой мощности с них, повышаются потери при заряде и разряде. Кроме того снижается общая ёмкость суперконденсаторной батареи при их последовательном соединении и это ведёт к повышению массы и габаритов ёмкостного накопителя. У суперконденсаторов высокая стоимость, но они имеют большой срок службы, не требуют обслуживания, нормально работают при минусовых температурах и экологически чисты. Они выпускаются опытными партиями в виде конденсаторных модулей для бортовых систем стартерного пуска  $\mathcal{A}BC$ . На рис.1.21 показана схема стартерного пуска ABC с использованием суперконденсатора [87].



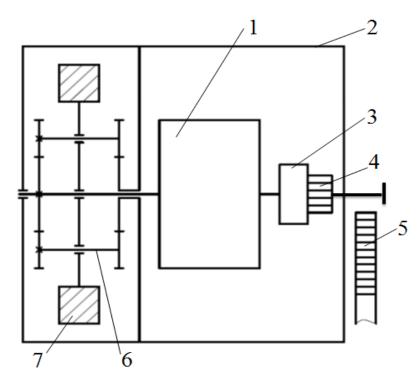
1-стартер; 2,3-втягивающее реле и его контакты; 4-аккумуляторная батарея; 5,6—выключатель зажигания и его контакты; 7-суперконденсаторное пусковое устройство; A,B,N-клеммы для подключения устройства; C- суперконденсатор;  $R_c-$  зарядный резистор; K1,K1.1- электромагнитный пускатель и его контакты.

Рисунок 1.21 — Схема системы стартерного пуска *ДВС* с использованием суперконденсаторов

Конденсаторное пусковое устройство имеет три клеммы для подключения к бортовой сети автомобиля — две силовые клеммы «A» и «N» подключаются соответственно к плюсовой клемме и минусовой клемме аккумуляторной батареи 4, а клемма «B» подключается к контакту 6 замка зажигания 5. При включении зажигания через его замыкающий контакт 6 от аккумуляторной батареи запитываются втягивающее реле 2 и электромагнитный пускатель K1, замыкаются их контакты 3 и K1.1. Силовые контакты K1.1 шунтируют зарядный резистор  $R_c$  суперконденсатора C, а контакты 3 втягивающего реле включают электростартер 1 и вся энергия заряжённого суперконденсатора C и аккумуляторной батареи 4 прикладываются к электростартеру 1. При неработающем двигателе суперконденсатор C, ёмкостью C0 для средних легковых автомобилей, подзаряжается через резистор C0. Исследования, проведённые в институте C1 показали, что наиболее рациональной схемой применения в зимних

условиях суперконденсаторных ёмкостных накопителей энергии в системе стартерного пуска дизельного двигателя является зарядка их от аккумуляторной батареи повышенным напряжением (28 – 30В) через преобразователь - выпрямитель напряжения. Но при этом требуется обязательное применение эффективного средства облегчения воспламенения и сгорания топлива, например пускового приспособления аэрозольного типа с легковоспламеняющейся жидкостью [38]. Таким образом, применение ёмкостных накопителей в системе стартерного пуска ДВС в зимних условиях требуют дополнительных устройств не только для своей нормальной работы, но и устройств для облегчения пуска ДВС.

Улучшить работу *ССП ДВС* предлагают увеличением момента инерции системы «стартер – двигатель» путём установки дополнительной маховой массы на валу якоря стартера. Она должна значительно уменьшить неравномерность вращения коленчатого вала, возникающую из-за циклического изменения момента сопротивления и мягкой механической характеристики электродвигателя стартера. Из-за неравномерного вращения коленчатого вала мощность стартера используется не эффективно. На рис. 1.22 представлена схема стартерного пуска *ДВС* с дополнительным маховиком на валу якоря [125]. Маховик 7 связан с валом якоря через мультипликатор 6, который повышает количество энергии, запасаемое маховиком. Благодаря этому снижается неравномерность вращения коленчатого и потери мощности в системе. Рассматриваемая система стартерного пуска работает следующим образом. Сначала шестерня привода 4 зацепляется с венцом маховика 5, затем запускается электростартер 2, который должен приводить во вращение не только коленчатый вал *ДВС*, но и разгонять маховик 7 через мультипликатор 6 одновременно.



1 – якорь электростартера; 2 –стартер; 3 – муфта свободного хода; 4 – шестерня привода стартера; 5 – зубчатый венец маховика ДВС;

6 – планетарный мультипликатор; 7 – встроенный в стартер маховик.

Рисунок 1.22 – Система стартерного пуска ДВС с планетарным мультипликатором и встроенным маховиком

Такой способ запуска двигателя с маховиком на валу якоря дополнительно нагружает электростартер в момент пуска и не может быть эффективным в зимних условиях. Для полного использования возможностей маховика необходимо отдельно запустить систему «стартер + маховик», а затем всю энергию этой системы приложить для вращения коленчатого вала двигателя, что позволит в зимних условиях преодолеть его начальный максимальный момент сопротивления, который затем быстро снижается.

На основании проведенного обзора и анализа средств облегчения пуска двигателей внутреннего сгорания предлагается следующая их классификация, представленная на рисунке 1. 23, где также указаны разработанные и предлагаемые автором данной работы средства.

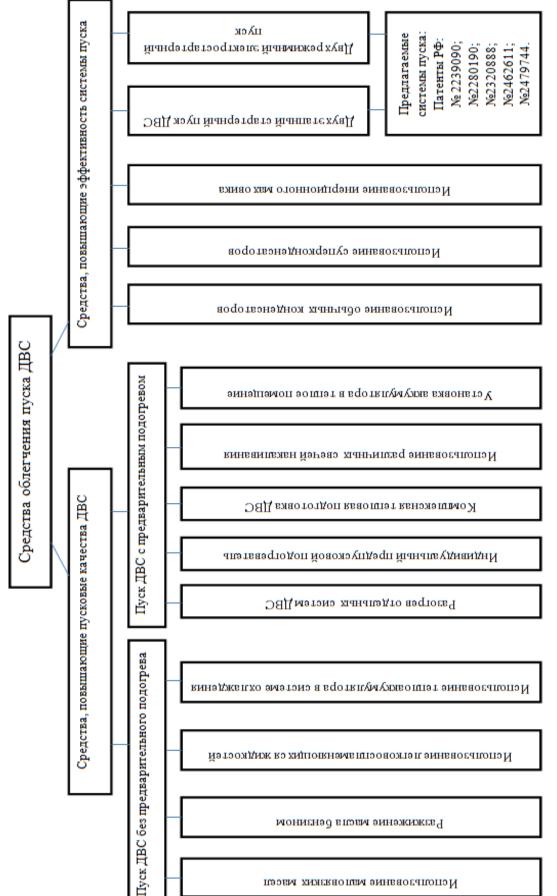


Рисунок 1.23 – Классификация средств облегчения пуска двигателя внутреннего сгорания

## 1.4 Стартер-генераторные установки (СГУ) автомобилей.

Первоначально создание стартер – генераторной установки ( $C\Gamma Y$ ) имело цель избавления автомобиля от стартера, как устройства, имеющего очень низкий коэффициент использования, т.е. его работа имеет эпизодический характер. При таком решении вопроса вместо двух электрических машин используется одна, снижается общий вес электрооборудования, его стоимость и экономится место под капотом. Кроме того при этом облегчается обслуживание и ремонт электрооборудования, т.к. необходимо обеспечить надёжность только одной электрической машины. Установленная мощность бортового электрооборудования современных автомобилей достигает 6 – 8 кВт и имеет тенденцию к повышению. При такой мощности СГУ может принять на себя дополнительные функции, улучшающие режимы работы ДВС. Это значительное снижение времени работы ДВС в неэффективном режиме, с низким  $K\Pi Z$ ; облегчение трогания с места уменьшением числа переключений передач; помощь ABC при больших нагрузках, работая электродвигателем на тягу, улучшая динамику при трогании и разгонах, что даёт возможность использовать ABC меньшей мощности, снижая нагрузку на экологию; снижение расхода топлива за счёт рекуперации энергии торможения; возможность реализации улучшенной системы «стоп – старт», используя режим электрической тяги без частых включений и отключений ДBC. Существующие на современных автомобилях системы «старт-стоп» основаны на частом пуске и выключении ДВС, что отрицательно влияет на его ресурс и создаёт дополнительную нагрузку на экологию.

Первый автомобильный электрический стартер был изобретён в США конструктором Ч. Кеттерингом в 1911году, а в 1912 году он был установлен на автомобиль "Cadillac Model 30 Self- Starter", а в 1915 году на него был получен патент [140] (рис.1.24). Точнее это был патент на стартер — генераторную установку, которая после запуска двигателя автомобиля переводилась в генераторный режим. Для облегчения перевода электрической машины 33 из

## C. F. KETTERING. ENGINE STARTING DEVICE.

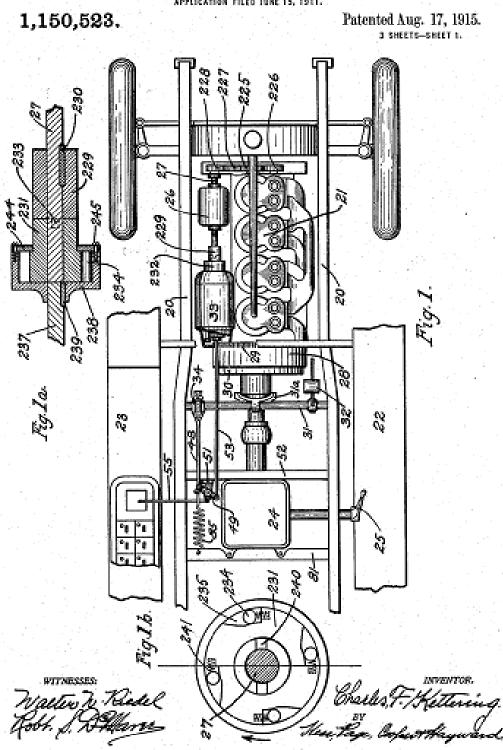


Рисунок 1.24— Первый электростартер автомобиля (1912г.)

стартерного режима в генераторный, её якорь имеет вал с двухсторонним выходом (рис.1.25). Один выход вала якоря через обгонную муфту 232 и кулачковую муфту 229 соединён с валом 27 масленого насоса 26, который приводится во вращение от коленчатого вала  $\mathcal{A}BC$  21 посредством шестерён 225 – 228. Так обеспечивается вращение электрической машины 33 при работе в генераторном режиме. На другом выходе вала якоря, который расположен близко к маховику 28, установлена шестерня привода 74 коленчатого вала (рис.1.25). Для запуска ABC 21 электрическая машина 33 переводится в стартерный режим нажатием на кнопку 67. Срабатывает электромагнит 37 и рычаг 49 посредством тяги 53 соединяет с помощью шестерён 71 и 73 зубчатый венец 29 маховика 28 с шестерней привода 74 электрической машины 33. Одновременно при этом с помощью тяги 55 обеспечивается переключение возбуждения электрической машины 33 с параллельной обмотки 102 для генераторного режима, на последовательную обмотку возбуждения 103 для стартерного режима, а также переключение банок аккумуляторных батарей I - IV в стартерный режим. Это изобретение на много лет опередило своё время, т.к. после этого понадобилось десятки лет, чтобы оснастить другие автомобили просто электрическими машинами, которые работали только в стартерном режиме. Для генератора на автомобиль устанавливается другая электрическая машина, что объясняется большой разницей мощностей стартера и генератора, а со временем эта разница исчезнет, и тогда будет выгодно использовать стартер – генераторные установки.

В нашей стране ведутся разработки по созданию надёжно работоспособных отечественных  $C\Gamma V$ , которые способствуют скорейшему появлению гибридных транспортных средств, приспособленных к местным условиям. В Самарском ГТУ разработан автомобильный стартер – генератор [34]. Разработчиком предложен асинхронный стартер-генератор ( $ACT\Gamma$ ) и устройство управления им, которое позволяет производить регулируемый частотный запуск  $\mathcal{L}BC$  от аккумуляторной батареи с получением значительных пусковых моментов, а также ограничить ток заряда батареи на требуемом уровне в генераторном режиме. Разработана микропроцессорная система управления  $ACT\Gamma$  с цифровым

### C. F. KETTERING. ENGINE STARTING DEVICE. APPLICATION FILED JUNE 15, 1911.

1,150,523.

Patented Aug. 17, 1915.

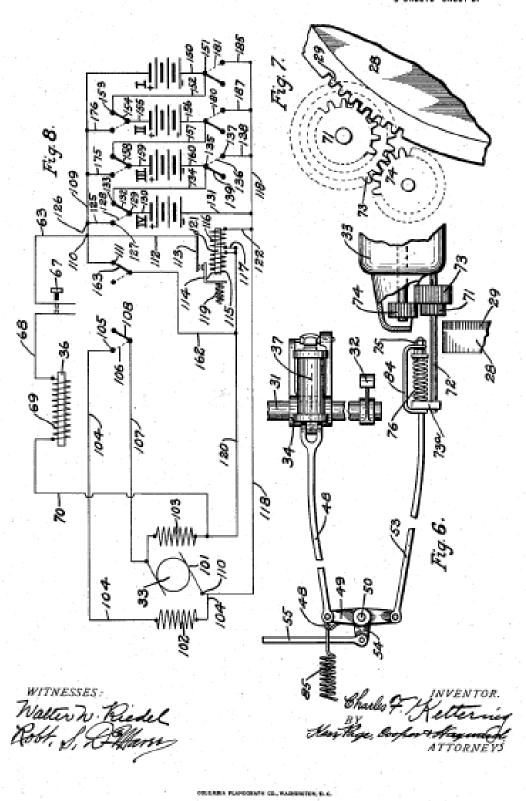
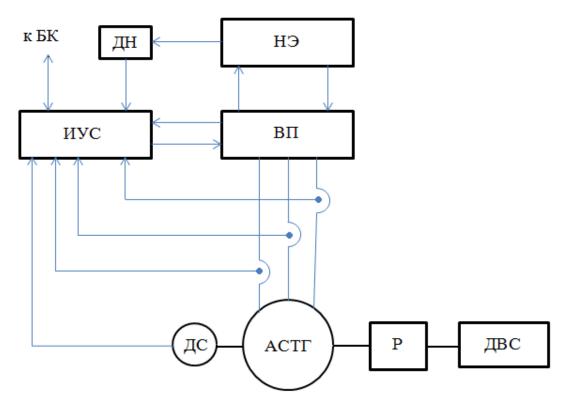


Рисунок 1.25 — Схема переключения стартер-генератора в режим стартера.

датчиком частоты вращения высокой точности для реализации различных законов регулирования электрической машины как в стартерном, так и в генераторном режимах. Блок-схема  $ACT\Gamma$  представлена на рисунке 1.26. Информационно-управляемая система (HYC) получает сигналы от датчика скорости ( $\mathcal{A}C$ ), датчиков тока ( $\mathcal{A}T$ ) и датчика напряжения ( $\mathcal{A}H$ ) и задает режимы работы вентильному преобразователю ( $\mathcal{B}\Pi$ ).

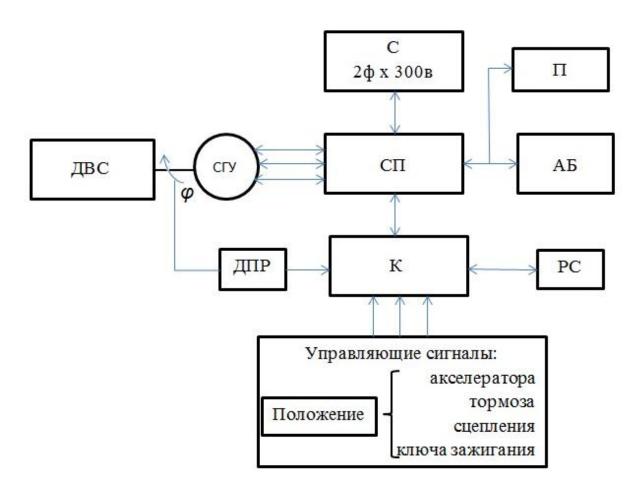


 $ACT\Gamma$  — асинхронный стартер-генератор;  $B\Pi$  — вентильный преобразователь; UVC — информационно-управляющая система; H Э — накопитель энергии; ДH — датчик напряжения; ДT — датчики тока; ДC — датчик угловой скорости; ДBC — двигатель внутреннего сгорания; P — редуктор; EK — бортовой компьютер.

Рисунок 1.26 Блок-схема асинхронного стартер-генератора Самарского  $\Gamma T V$ 

В *СГУ*, разработанном *АвтоВАЗ* совместно с Новосибирским *ГТУ*, используется многополюсная синхронная машина с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками [130]. Разработчики считают, использование других машин нецелесообразно по следующим причинам: асинхронная машина

имеет большие габариты и массу, по сравнению с синхронной, а индукторные машины неэффективны из-за наличия в них большого воздушного зазора. Ротор, он же маховик, расположен снаружи относительно стартера. Вал ротора электрической машины является продолжением коленчатого вала ДВС. Выходная мощность при генераторном режиме составляет 4 кВт. Блок-схема СГУ на базе синхронной электрической машины приведена на рисунке 1.27.



 $C\Gamma V$  — стартер-генератор;  $C\Pi$  — силовой преобразователь; K - коммутатор; C — суперконденсатор;  $Д\Pi P$  — датчики положения ротора; AБ - аккумуляторная батарея;  $\Pi$  — бортовые потребители; ДBC — двигатель внутреннего сгорания; PC — персональный компьютер (для диагностики  $C\Gamma V$ ).

Рисунок 1.27 Блок-схема  $C\Gamma V$  с синхронным электродвигателем, разработка Aвто BA3a и Новосибирского  $\Gamma TV$ .

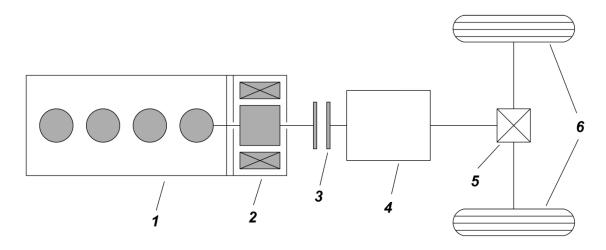
K контроллеру (K)  $C\Gamma V$  подводятся сигналы от датчиков положения ротора электрической машины, датчиков положения педали акселератора, тормоза,

сцепления и ключа зажигания. После запуска  $\mathcal{A}BC$ , контроллер переводит электрическую машину в генераторный режим для зарядки аккумуляторной батареи (AB) и суперконденсатора (C). Для наблюдения за работой  $C\Gamma V$  контроллер может быть подключен к внешнему персональному компьютеру (PC). Рассмотренные  $C\Gamma V$  могут успешно работать в стартерном и генераторном режимах, но работа в режиме рекуперации энергии по такой схеме подключения малоэффективна из-за того, что нельзя механически отключить генератор от коленчатого вала  $\mathcal{A}BC$ . Некоторые ведущие фирмы устанавливают в традиционный автомобиль «управляемый генератор», который имеет специальное устройство, позволяющее отключать генератор от коленчатого вала при разгонах, а при торможении вращать его от колес автомобиля. Это улучшает динамику автомобиля и снижает расход топлива, благодаря режиму рекуперации энергии торможения.

Использование  $C\Gamma V$  в автономных источниках электрического питания (AU- $S\Pi$ ), в которых используются дизель- и бензоэлектрические агрегаты, а также в сварочных агрегатах (CAK), даёт ощутимый технико-эконмический эффект. Существующие  $AUS\Pi$  и CAK содержат две электрические машины: стартер и генератор, а некоторые подобные установки содержат ещё и маломощный генератор для зарядки аккумуляторной батареи. В данных установках, при использовании  $C\Gamma V$ , также исключается массивный маховик дизеля, роль которого будет выполнять ротор стартер-генератора. Благодаря этим изменениям габариты и масса автономных источников снижается до 40% [154].

При разработке  $C\Gamma V$ , учитывая её многофункциональность, важным вопросом является место установки  $C\Gamma V$  и компоновка её с трансмиссией транспортного средства. От этого во многом зависит эффективность работы  $C\Gamma V$ , доступность его обслуживания. Большинство отечественных разработчиков рекомендуют и проектируют установить  $C\Gamma V$  в картере сцепления, между D C V и сцеплением, при этом вал ротора стартер-генератора жёстко соединяется с ко-

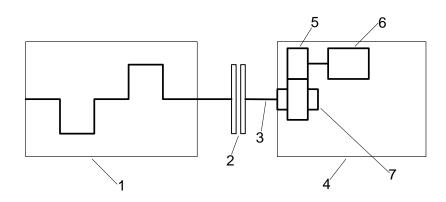
ленчатым валом ДВС [34,67,88,108,130]. Такая компоновка представлена на рисунке 1.28.



 $1-\mathcal{A}BC$ ; 2- стартер-генератор; 3- сцепление; 4- коробка передач; 5- главная передача; 6- ведущие колеса.

Рисунок 1.28 Традиционная схема включения стартера – генератора

При такой компоновке  $C\Gamma V$  не может быть просто добавлен или подключён к уже существующим ДВС, поэтому требуется вносить значительные конструктивные изменения в существующие модели двигателей или разрабатывать новые. Кроме того, такая компоновка не позволяет в полной мере использовать режим генераторного торможения транспортного средства с рекуперацией энергии, т.к. при этом часть энергии расходуется на вращение кривошипношатунного, газораспределительного механизмов и навесного оборудования ABC. Эта компоновка сужает возможности  $C\Gamma V$ . Для более эффективного использования возможностей СГУ её необходимо установить после сцепления и совместить с коробкой передач, тогда она приобретает автономность и становится многофункциональной. Такой точки зрения придерживаются многие зарубежные исследователи [3,100,137]. На рис. 1.29 представлена схема электрической машины, встроенной в коробку передач [3]. Электрическая машина 6 по этой схеме может работать не только стартером, генератором, но и рекуперативным тормозом в генераторном режиме, когда сцепление 2 выключено и ДВС 1 не влияет на этот режим. Кроме того, электрической машине 6 легко



1 - ДВС; 2 - сцепление; 3 - ведомый вал; 4 - коробка передач; 5 - кине-матическая передача; 6 - электрическая машина; 7 - редуктор.
 Рисунок 1.29 — Схема электрической машины встроенной в коробку передач.

перейти на режим чисто электрической тяги через коробку передач 4 при трогании с места, а сцепление 2 выключено. Автор придерживается подобной компоновки  $C\Gamma V$  и имеет свои разработки по этому вопросу [14,91,92]. Рассматриваемый вариант компоновки позволяет раскрыть все возможности СГУ и значительно легче интегрироваться в трансмиссию транспортного средства и будет согласованно функционировать с коробкой передач или с вариатором. В перспективе транспортные средства невозможно представить без СГУ или применения специализированного гибридного привода. Этой актуальной проблемой занимаются ведущие отечественные и зарубежные автомобилестроительные и фирмы добились определённых электротехнические успехов [73,108,134,135,136,137]. Установка  $C\Gamma V$  на транспортные средства является первым шагом перевода их в класс автомобилей с комбинированной энергоустановкой, т.е. малых и средних гибридных автомобилей.

Проведенный обзор стартер-генераторных установок (*СГУ*) позволил произвести их классификацию, представленную на рисунке 1.30.

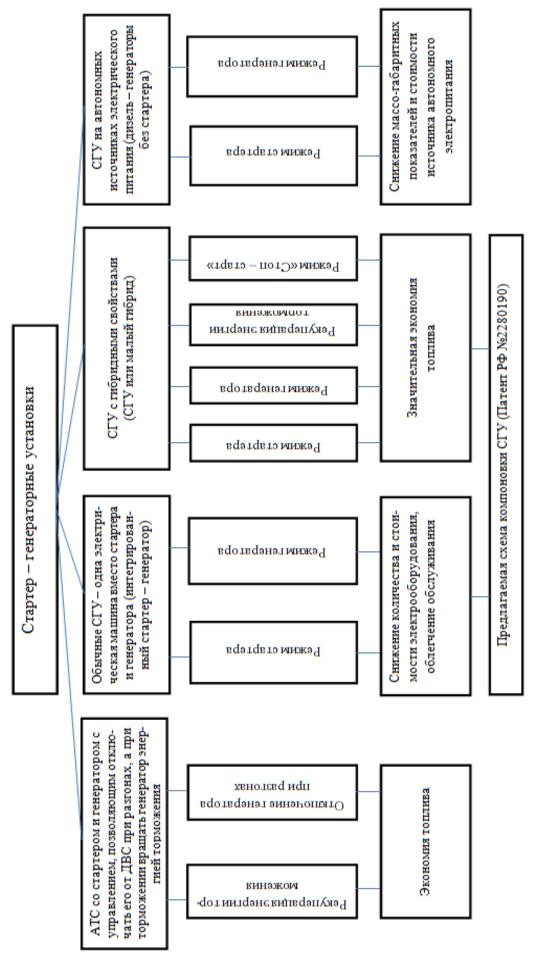


Рисунок 1.30— Классификация стартер-генераторных установок (СГУ)

### 1.5 Постановка задач исследования.

Проведенный анализ тенденций развития электроустановок транспортных средств показывает, что пошатнулась монополия традиционных автомобилей, использующих бензин и дизельное топливо. Обычные ATC пока доминируют, но направление развития ближайших будущих транспортных средств явно просматривается — это автомобили со стартер-генераторными установками ( $C\Gamma V$ ), гибридные транспортные средства (TTC) и электрические транспортные средства (TTC) или электромобили. Основную роль при этих изменениях играет возрастающая роль электроустановок на автотранспортных средствах. Главные проблемы при эксплуатации традиционных TTC следующие:

- 1. Отрицательное влияние транспорта на окружающую среду;
- 2. Низкий эксплуатационный КПД автомобиля в целом;
- 3. Трудности запуска ДВС в зимних условиях;
- 4. Постоянное совершенствование и усложнение и так конструктивно сложного ДВС с целью преодоления все возрастающих требований экологических норм, снижения потребления топлива, разработки различных средств и методов по облегчению пуска ДВС при низких температурах окружающего воздуха.

Отмеченные выше проблемы решаются разработкой и использованием в начальный период гибридных транспортных средств с различным уровнем гибридизации, начиная со стартер-генераторных установок, а затем транспортных средств на электрической тяге, электромобилей.

Перспективным направлением является разработка и использование стартер-генераторных установок ( $C\Gamma Y$ ) на транспортные средства, но они до настоящего времени не получили широкого распространения, т.к. требуют для установки значительных конструктивных изменений в транспортном средстве или разработок совершенно новых  $\mathcal{L}BC$  и трансмиссий. В традиционных автомобилях с приводом колес от  $\mathcal{L}BC$ ,  $\mathcal{L}FY$  устанавливается, как пра-

вило, в картере сцепления, непосредственно соединяется с коленчатым валом двигателя и используется только в двух режимах: стартера и генератора. При рациональной компоновке *СГУ* на транспортном средстве, его функции можно расширить и вывести на уровень малых гибридов, т.е. *СГУ* будет служить переходом от традиционных к гибридным автомобилям. При разработке *СГУ* имеются спорные вопросы, требующие дальнейшего уточнения. В частности, это место установки и стыковки *СГУ* с трансмиссией транспортного средства, а также эффективность ее работы в режиме рекуперативного торможения.

В свою очередь, транспортные средства с гибридной силовой установкой ( $\Gamma CV$ ) являются переходным мостом от традиционных автомобилей к транспортным средствам на электрической тяге, электромобилям. Разработка гибридных автомобилей с  $\Gamma CV$ , где в паре с  $\mathcal{A}BC$  используется электрическая машина ( $\mathcal{A}M$ ), является наиболее перспективным тандемом, хотя предлагаются разработки  $\Gamma CV$  с различными способами возврата энергии торможения. Электродвигатель дополняет  $\mathcal{A}BC$  тем, что выдает высокий крутящий момент при пуске, в момент включения. Благодаря этому  $\Gamma TC$  могут обойтись практически без коробки передач, но наличие последнего значительно повышает возможности гибридной силовой установки, т.к. коробку передач (механическую или автоматическую) можно использовать не только для движения, но и при рекуперативном генераторном торможении. Это позволяет эффективно тормозить и одновременно повышает количество рекуперируемой энергии. В настоящее время это пока не используется.

А что касается проблем пуска *ДВС* зимой, то они должны быть отдельно решены, т.к. традиционные *АТС* еще достаточно продолжительно будут использоваться. Актуальность этого вопроса подчеркивает многообразие методов и устройств по обеспечению пуска ДВС. Большинство из них сводится к тепловой обработке двигателя, и тем самым повышению его пусковых качеств. Это подогрев охлаждающей жидкости, моторного масла, воздуха, поступающего в двигатель, топлива. Все требует больших затрат труда, средств

и времени, наиболее рациональный путь решения проблем пуска – это повышение эффективности функционирования самой системы стартерного пуска ДВС. Для повышения эффективности ее работы предлагали использовать емкостные накопители электрической энергии (обычные конденсаторы) с различными схемными решениями, отдельные из которых хоть и показали принципиальную возможность функционирования, но не нашли практического применения из-за низких технико-экономических показателей (большая масса и габариты, потери энергии, высокая стоимость). Длительный опыт исследований и экспериментов с конденсаторными системами стартерного пуска ДВС показал, что наиболее приемлемыми и перспективными являются варианты с использованием высоковольтных конденсаторных установок, обладающих высокой удельной энергией, т.к. у конденсаторов энергия пропорциональна квадрату напряжения. Но такие установки не согласуются с существующим на транспортных средствах низковольтным бортовым напряжением. Для согласования работы высоковольтных конденсаторов с аккумуляторной батареей необходим не только преобразователь напряжения, но и выпрямитель. Все это усложняет и снижает надежность работы системы стартерного пуска, повышает потери энергии в ней и стоимость системы.

Низкое рабочее напряжение суперконденсаторов не позволяет напрямую использовать их в бортовой цепи автомобилей. Поэтому их подбирают с одинаковыми рабочими напряжениями и соединяют последовательно в «гирлянды» до получения требуемого напряжения. Это, во-первых, повышает внутреннее сопротивление суперконденсатора, во-вторых, кратно снижает общую емкость конденсаторной установки. Первое повышает потери энергии в системы, а второе ведет к увеличению габаритов емкостного накопителя.

Предлагалось также улучшить работу системы стартерного пуска  $(CC\Pi) \ \mathcal{L}BC$  за счет повышения её момента инерции, использованием маховика, соединенного с валом якоря стартера через мультипликатор [125]. Маховик по предлагаемой схеме является дополнительной нагрузкой для стартера при пуске  $\ \mathcal{L}BC$ , и такому приводу трудно будет работать эффективно в зим-

них условиях. Энергию маховика необходимо использовать для преодоления начального максимального момента сопротивления прокручиванию коленчатого вала  $\mathcal{A}BC$ , т.е. сначала необходимо отдельно раскрутить маховик и его энергию дополнительно использовать для пуска  $\mathcal{A}BC$ .

Электрическая тяга в автомобилях массового производства является относительно новым направлением. Ещё не устоялись методы их проектирования, пока отсутствуют общепринятые и обоснованные требования к выбору параметров элементов тягового электропривода с учётом специфики применения на автотранспорте.

Важный вклад в развитие научной базы по разработке приводов гибридных автотранспортных средств, электромобилей и их систем внесли академики И.П. Ксеневич, Д.С. Стребков, доктора наук И.К. Александров, Б.Н. Белоусов, А.А. Благонравов, С.В. Гусаков, Г.О. Котиев, Н.В. Гулиа, В.А. Кузнецов, В.В. Марков, Е.М. Овсянников, В.А. Раков, В.В. Селифонов, Н.М.Филькин, В.П. Хортов, А.А. Эйдинов и др., а также зарубежные исследователи James Larmine, John Lowri, Thomas Bohme, Benjamin Frank и др. Теоретические и экспериментальные исследования по созданию средств и способов оптимизации работы ДВС и эксплуатации АТС за счет эффективного использования силовых электроустановок (СЭП, СГУ и ГСУ) выполнены научно-исследовательскими и производственными организациями НАМИ, МАМИ (ГТУ), МВТУ им. Н.Э. Баумана, МАДИ (ГТУ), ВАЗ, УАЗ, Ижмаш-Авто, Самарский ГТУ, ФГУП НИИАЭ, Новосибирский ГАУ, НПП «Квант» и др.

Анализ результатов этих исследований показал, что в настоящее время подходы к разработке приводов гибридных автомобилей, электромобилей и стартер-генераторных установок, выбору их основных элементов требуют дальнейшего развития и совершенствования для повышения их экологических, топливно-экономических и эксплуатационных показателей. Исходя из этого, были сформулированы следующие основные задачи исследования:

- 1. Анализ традиционной системы управления скоростью ATC, обоснование и разработка альтернативного (параметрического) принципа управления для гибридного автомобиля и электромобиля.
- 2. Разработка рациональных схем приводов электромобиля и гибридного автомобиля на основе предложенного принципа бесступенчатого регулирования передаточного числа трансмиссии.
- 3. Обоснование концептуальной методики выбора основных элементов привода гибридного автомобиля с учетом особенностей параметрического принципа управления; обеспечение эффективной работы ДВС в составе его двигательной установки.
- 4. Обоснование концепции выбора основных элементов привода электромобиля с учетом особенностей параметрического принципа управления и режимов работы электрического двигателя.
- 5. Обоснование и разработка рациональных схем приводов стартерного пуска ДВС и стартер-генераторной установки автомобиля.

### Выводы по первой главе

- 1. Жесткие экологические требования к ATC, необходимость снижения расхода топлива  $\mathcal{L}BC$ , а также рост установленной мощности электрооборудования на автомобилях подталкивают к разработке и использованию транспортных средств с гибридными силовыми установками ( $\Gamma CY$ ), автомобилей на электрической тяге и стартер-генераторными установками ( $C\Gamma Y$ ).
- 2. В традиционных автомобилях с ДВС для снижения расхода топлива применяются коробки передач с вариатором, в котором не в полной мере реализованы преимущества вариаторной трансмиссии.
- 3. На гибридных автомобилях используется планетарная трансмиссия (без коробки передач) со сложным управлением передаточным числом, что приводит к значительным потерям энергии.

- 4. На электромобилях выпускающих разными фирмами управление скоростью движения осуществляется изменением скорости вращения тягового электродвигателя, вал которого непосредственно соединен с главной передачей. В динамическом режиме городского движения энергоэффективность такого управления теряется.
- 5. Традиционные автомобили с ДВС нуждаются в совершенствовании функционирования своего электрооборудования стартера и генератора, которые не соответствуют современным тенденциям развития АТС в силу следующих причин: 1) снижение надежности пуска ДВС в зимнее время; 2) уменьшение скорости движения АТС осуществляется исключительно гашением энергии тормозной системой; 3) отсутствует какая-либо рекуперация энергии торможения. Преобразование стартера и генератора в стартергенераторную установку позволяет расширить функциональные возможности электрооборудования.

### 2.COBEPШЕНСТВОВАНИЕ И СОЗДАНИЕ ОСНОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИВОДА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

### 2.1 Обоснование выбора способа управления скоростью АТС

Во всех современных тяговых приводах изменение продольной скорости движения осуществляется при постоянном (или кусочно-постоянном) передаточном отношении трансмиссии за счет управления скоростью вращения двигателя. Альтернативный вариант: при постоянной (или почти постоянной) частоте вращения двигателя управлять скоростью за счет широкодиапазонного изменения передаточного отношения трансмиссии (параметрическое управление), – не используется, хотя обладает явными достоинствами.

Покажем это, учитывая следующее:

- 1) для корректного рассмотрения сравниваемые машины идентичны во всём, кроме каналов управления скоростью движения;
- 2) частота вращения электродвигателя в альтернативном варианте не регулируется, поэтому меняется слабо (из-за жесткости характеристики электродвигателя).

Его крутящий момент  $M_{\partial s}$  двигательной установки в динамике равен:

$$M_{\partial G} = M_{\partial uH} + \frac{1}{i_{mD}} M_{\kappa} + M_{Mex.nom.}; \tag{2.1}$$

где  $M_{\partial u H}=J_{\partial e}\frac{d\omega}{dt}$  — динамическая составляющая момента двигательной установки;  $J_{\partial e}$  — момент её инерции (якоря у ДПТ или ротора у АД или СД);  $\omega$  — частота вращения вала двигательной установки;  $i_{mp}$  — передаточное отношение трансмиссии;  $M_{\kappa}$  — момент сопротивления движению на колесах;  $M_{{\it Mex.nom.}}$  — момент механических потерь в трансмиссии.

 $M_{\it дин}$  в традиционном варианте составляет существенную величину в динамике, т.к. частота  $\omega$  меняется в полном диапазоне: от нуля до максиму-

ма. В альтернативном же случае даже отрицателен, т.к.  $\omega$  незначительно проседает.

 $M_{\partial u H}$  и  $M_{Mex.nom.}$ , ввиду относительно малых величин ускорений и потерь в обоих вариантах, составляют малую долю по сравнению с  $M_{\kappa}/i_{mp}$ .

Поведение передаточного отношения  $i_{mp}$  (оно во всех случаях равно отношению частоты вращения вала двигателя к частоте вращения ведущих колес) определяет принципиальную разницу между традиционным и предлагаемым подходами.

В первом (традиционном) случае управление скоростью движения осуществляется непрерывным принудительным изменением частоты вращения двигателя, а  $i_{mp1}$  строго постоянно, рис 2.1.

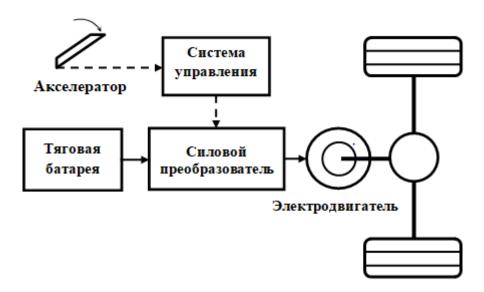


Рисунок 2.1 – Управление скоростью автомобиля изменением скорости вращения двигателя (традиционное управление)

Во втором случае предлагается ровно наоборот: управление скоростью движения осуществлять непрерывным принудительным изменением передаточного отношения трансмиссии  $i_{mp2}$ , а частота вращения двигателя будет почти постоянной и незначительно дрейфующей вокруг значения, заданного текущим напряжением аккумуляторной батареи (рис. 2.2) [1, 2, 99]. Но тогда основная часть крутящего момента двигателя, равная  $M_{\kappa}/i_{mp2}$  будет в любой момент времени на любых скоростях движения (кроме максимальной, когда

 $i_{mp1} = i_{mp2}$ ) в  $(i_{mp2}/i_{mp1})$  раз меньше таковой для традиционного случая  $(M_{\kappa}/i_{mp1})$  при прочих практически равных обстоятельствах.

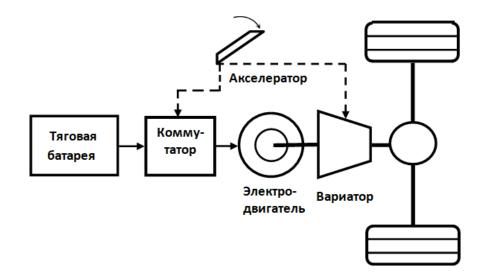
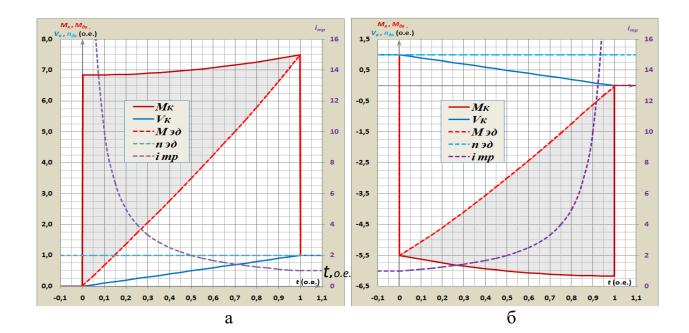


Рисунок 2.2 – Управление скоростью автомобиля бесступенчатым изменением передаточного числа трансмиссии (параметрическое управление)

Чем меньше скорость автомобиля, т.е. чем больше текущее значение  $i_{mp2}$ , тем меньше требуемый крутящий момент от двигателя (по сравнению с традиционным случаем), тем меньше его ток и, соответственно, расход ёмкости батареи. Особенно это проявляется в начале разгонов (а) и конце торможений (б), рис.2.3, где представлены графики разгона (а) и торможения (б) транспортного средства при двух принципах управления скоростью.



 $M_{\kappa}$  — момент сопротивления на колесах (он же момент на валу двигательной установки при традиционном управлении скоростью автомобиля изменением скорости вращения двигательной установки);  $V_{\kappa}$  — скорость автомобиля;  $M_{\rm 9d}$  — момент, требуемый от двигательной установки при альтернативном управлении скоростью автомобиля вариатором;  $n_{\rm 9d}$  — частота вращения двигателя;  $i_{mp}$  — требуемое при этом передаточное отношение трансмиссии.

Рисунок 2.3 - Разгон (a) и торможение (б) транспортного средства при двух принципах управления его скоростью движения.

Здесь по левой ординате в относительных единицах откладываются скорость автомобиля  $V_a$ , момент сопротивления на колесах  $M_{\kappa}$  и момент, требуемый от двигательной установки пр альтернативном управлении скоростью автомобиля вариаторной трансмиссией  $M_{\partial y}$ ; по правой — её передаточное отношение  $i_s$ ; по оси абсцисс — время t (в о.е. от времени разгона).

Пусть при разгоне-торможении автомобиля на ровной дороге его скорость нарастает (спадает) линейно. Момент на колесах:

$$M_{\kappa} = F_{c} \cdot R_{\kappa} = (f \cdot m_{asmo} \cdot g + 0.5 \cdot C_{x} \cdot S_{no6} \cdot \rho \cdot V^{2} + m_{asmo} \cdot \frac{dV}{dt}) \cdot R_{\kappa}, \qquad (2.2)$$

где  $F_c$  — сила сопротивления движению автомобиля;

 $R_{\kappa}$  – радиус качения колес;

f – коэффициент сопротивления качению колес;

 $m_{aemo}$  — полная масса автомобиля;

*g* – ускорение свободного падения;

 $C_x$  — продольная составляющая безразмерного коэффициента полной аэродинамической силы;

 $S_{noo} = 0.78 \cdot B \cdot H$  — лобовая площадь автомобиля; (B и H — наибольшие ширина и высота автомобиля);

 $\rho$  — плотность воздуха;

### V – горизонтальная скорость автомобиля, м/с;

Пусть также на установившейся скорости (например, 100 км/час) суммарная сила сопротивления движению составляет 1 о.е. Известно, что на такой скорости составляющая аэродинамического сопротивления примерно вдвое превышает силу сопротивления качению, т.е. 2/3 о.е. и 1/3 о.е. соответственно. Примем также, что при линейных ускорениях-замедлениях сила инерции машины постоянна и составляет  $\pm 6,5$  о.е.

При неизменном передаточном отношении трансмиссии (традиционное управление) двигательная установка должна обеспечивать линейный рост (спад) частоты вращения на своём выходном валу и преодолевать крутящий момент, прямо пропорциональный суммарному моменту сопротивления движению (кривые  $M_{\kappa}$ ) на колесах.

В случае же параметрического (альтернативного) управления постоянная частота вращения выходного вала двигательной установки делится, а момент умножается на обратно пропорциональное скорости движения передаточное отношение трансмиссии, поэтому на пониженных скоростях он (кривые  $M_{\rm 30}$ ) меньше, чем требуемый в традиционном приводе. Как следствие, имеем:

- 1. При разгонах и движении на любых пониженных скоростях (рис. 2.3a) экономию топлива и, соответственно, уменьшение токсичных выбросов у классических авто, снижение расхода энергии накопителя и увеличение дальности пробега у гибридов и электромобилей.
- 2. На диаграмме рис. 2.36 четко видно, что требуемый тормозной момент (кривая  $M_{\partial y}$ ) существенно меньше, чем на кривой  $M_{\kappa}$ . Примерно вдвое облегчается нагрузка на элементы тормозной системы.
- 3. С другой стороны это *как бы* свидетельствует о снижении эффективности рекуперации при торможениях. Но площадь тонированного криволинейного треугольника на рис. 2.3а больше, чем на рис. 2.3б, т.е. выигрыш на разгонах перекрывает этот проигрыш. Кроме того, для электроаккумуляторных гибридов и электромобилей рекуперация избыточно мощных зарядных токов батареи (по кривой  $M_{\kappa}$ , рис. 2.3б) возможна только за счет наращива-

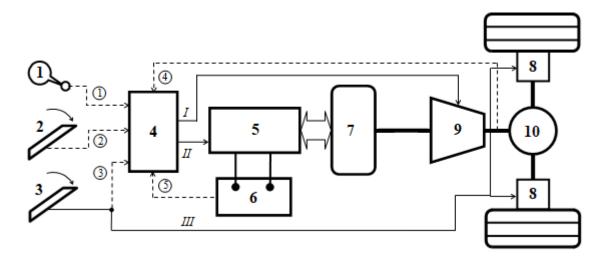
ния дополнительного оборудования и представляет собой отдельную сложную техническую задачу, которая с гораздо меньшими проблемами решается при работе на кривой  $M_{30}$ .

4. КПД трансмиссии сколько-нибудь значимым фактором для энерго- и топливосбережения становится при передаточных отношениях трансмиссии менее 1,2 (т.е. на высоких скоростях движения). КПД известных вариаторов как раз на этих передаточных отношениях близок к максимуму. Кроме того, наибольшая скорость движения практически всегда ограничивается электроникой управления на уровне ниже, чем технически достижимая для машины, и поэтому энергия накопителя (за счет поддержки меньших требуемых моментов) расходуется медленнее, чем в традиционной схеме даже с идеальной трансмиссией.

# 2.2 Особенности методики концептуального проектирования привода электромобилей

Практически все современные серийно выпускаемые электромобили имеют один и тот же [146 - 152] принцип управления скоростью движения машины: по электрическому каналу «преобразователь – двигатель». Схема структурно проста, имеет хорошие тяговые характеристики и управляемость, но её реализация требует разнообразных датчиков и многочисленных подсистем контроля и нормализации работы всех её элементов, особенно – аккумуляторной батареи. В городском цикле движения с его регулярными разгонами, торможениями, троганиями с места и остановками часто имеют место повышенные броски токов. Поэтому во время разгонов динамические токи интенсивно разряжают аккумуляторную батарею, а при торможениях токи рекуперации превышают допустимое значение её тока заряда. Ресурс и жизненный цикл тягового аккумулятора – самого дорогого элемента привода, – сравнительно резко падают.

Известная [56, 91 и др.] идея управления скоростью движения по механическому каналу (вариатор с принудительно управляемым передаточным отношением) имеет свои достоинства и для электромобиля. Привод упрощается: двигателю не требуется регулирование скорости, становится ненужным управляемый преобразователь. Но главное, существенно снижаются крутящие моменты (рис. 2.3), требуемые от двигателя, следовательно, и токи аккумуляторной батареи, как разрядные, так и зарядные. Функциональная схема привода электромобиля с использованием параметрического принципа управления скоростью бесступенчатым изменением передаточного отношения трансмиссии без регулирования скорости вращения электродвигателя показан на рис. 2.4. Пунктирными линиями здесь показаны сигналы от органов управления электромобилем: ①, — положения джойстика, ② акселератора и ③ педали тормоза; сигналы от датчиков: ④ – датчика частоты вращения выходного вала вариатора; ⑤ – датчика напряжения аккумуляторной батареи. Сплошными линиями со стрелками показаны управляющие сигналы: I - передаточным отношением вариатора, II - силовым преобразователем-коммутатором и ІІІ - тормозом.



1 — джойстик режимов работы; 2 — педаль акселератора; 3 — педаль тормоза; 4 — контроллер управления; 5 — силовой преобразователь (или коммутатор) со встроенным блоком управления; 6 — аккумуляторная батарея; 7 — электродвигатель; 8 —тормоз; 9 — бесступенчатая трансмиссия (вариатор) с управляемым передаточным отношением; 10 — главная передача.

Рисунок —2.4 Схема привода электромобиля с бесступенчатой трансмиссией по параметрическому принципу управления скоростью движения без регулирования частоты вращения электродвигателя.

### 2.3 Разработка *Excel*-формуляра для привода электромобиля с вариаторной трансмиссией

Отсутствие *ДВС* вносит существенные изменения в содержание первого из двух этапов методики концептуального проектирования электромобиля: предварительный расчет мощности электродвигателя, ёмкости аккумуляторной батареи и передаточного отношения главной передачи осуществляется с некоторыми нюансами, суть которых состоит в следующем.

Номинальная мощность электродвигателей, как правило, соответствует непрерывному режиму работы. В каталогах приводятся также данные об их допустимой перегрузке: обычно двукратная перегрузка возможна в течение 60 с, а трехкратная — 10 с. Логичным сопоставить этим режимам работы электродвигателя соответствующие режимы движения электромобиля:

- номинальной нагрузке двигателя установившееся движение машины на «эксплуатационной» максимальной скорости  $V_{\max}^{\mathfrak{skcn}}$  ( $V_{\max 1}$ );
- двукратной нагрузке двигателя установившееся движение машины на максимальной (маневровой) скорости  $V_{\max}^{\text{маневр}}$  (  $V_{\max 2}$ );
- трехкратной эквивалентной нагрузке двигателя линейный разгон электромобиля до 100 км/ч. Учитывая, что допустимое время существования такой нагрузки близко вероятному времени разгона машины, а диаграмма изменения нагрузки на валу двигателя при вариаторном управлении имеет вид вогнутого треугольника (рис. 2.3а), максимальное мгновенное значение коэффициента перегрузки электродвигателя (в конце разгона) можно установить равным 7.

Тогда последовательность расчетов на этом «эскизном» этапе выглядит следующим образом:

1. Определяем передаточное отношение главной передачи (учитывая, что  $i_{\text{var}}$  = 1)

$$i_{\scriptscriptstyle \mathcal{E}n} = rac{\omega_{\scriptscriptstyle \mathcal{I}\mathcal{I}}^{\scriptscriptstyle 2I^{\scriptscriptstyle HOM}_{\scriptscriptstyle \mathcal{I}\mathcal{I}}}}{\omega_{\scriptscriptstyle \kappa\sigma\sigma}^{\scriptscriptstyle MAHeB}}\,,$$

где  $\omega_{_{KOJ}}^{_{MAHe8}}=rac{V_{_{\max}}^{^{MAHe8}}}{3,6\cdot R_{_{K}}}$  — угловая скорость вращения колес на маневровой скорости электромобиля,  $\mathbf{c}^{-1}$ ;

 $\omega_{\Im \mathcal{I}}^{2I_{\Im \mathcal{I}}^{hom}}$  — скорость вращения вала электродвигателя при его двукратной нагрузке по току, с $^{-1}(I_{\Im \mathcal{I}}^{hom}$  — номинальный ток электродвигателя). Последнюю можно определить (в предположении, что скорость электродвигателя линейно проседает под нагрузкой) из общего выражения для линейной электромеханической характеристики:

$$\omega_{\mathcal{I}\mathcal{I}}^{2I_{\mathcal{I}\mathcal{I}}^{\mathsf{HOM}}} = \omega_{\mathcal{I}\mathcal{I}}^{\mathsf{XX}} - (\omega_{\mathcal{I}\mathcal{I}}^{\mathsf{XX}} - \omega_{\mathcal{I}\mathcal{I}}^{\mathsf{HOM}}) \frac{2I_{\mathcal{I}\mathcal{I}}^{\mathsf{HOM}}}{I_{\mathcal{I}\mathcal{I}}^{\mathsf{HOM}}} = 2 \cdot \omega_{\mathcal{I}\mathcal{I}}^{\mathsf{HOM}} - \omega_{\mathcal{I}\mathcal{I}}^{\mathsf{XX}}.$$

В Excel-формуляре, как при расчете привода гибридомобиля, предварительно задаются частоты  $n_{\Im \mathcal{I}}^{nom}$  и  $n_{\Im \mathcal{I}}^{xx}$  (с последующим их уточнением после выбора электродвигателя из соответствующего каталога), поэтому окончательное расчетное выражение для этого показателя будет:

$$i_{2n} = 0.12 \cdot \pi R_{\kappa} \frac{(2n_{\Im \Pi}^{HOM} - n_{\Im \Pi}^{xx})}{V_{\text{max}}^{Mahee}}.$$

2. Минимально необходимую номинальную мощность электродвигателя определяем с учётом того, что на максимальной эксплуатационной скорости электромобиля скорость вращения электродвигателя номинальная, а номинальный момент равен половине момента на маневровой скорости движения:

Здесь  $M_{\kappa o \pi}^{V_{\rm max}^{Mahee}}$  — момент (на колесах) сопротивления движению по (2.2) на установившейся (a=0) заданной маневровой скорости  $V_{\rm max}^{Mahee}$  электромобиля.

3. При оценке ёмкости аккумуляторной батареи используем формулу (4.6) для гибридного автомобиля с учётом отсутствия  $\mathcal{L}BC$ :

$$Q_{\delta am} = rac{2}{\eta_{\delta am} \cdot \eta_{mp}} P_{\ni \mathcal{I}}^{\scriptscriptstyle HOM} rac{L_{cc}}{V_{
m max}}, \, {
m KBT}$$
-ч.

4. Максимальную эксплуатационную скорость  $V_{\max}^{\mathfrak{I}_{max}}$ , при которой тяговый электродвигатель работает в номинальном режиме без перегрева, найдем из решения кубического уравнения:

$$[0.5 \cdot C_x \cdot S_{\text{лоб}} \cdot \rho] \cdot (V_{\text{max}}^{\text{эксn}})^3 + [f \cdot g \cdot m_{\text{авто}}] \cdot V_{\text{max}}^{\text{эксn}} - [3.6 \cdot \omega_{\text{ЭД}}^{\text{ном}} \cdot M_{\text{ЭД}}^{\text{ном}}] = 0,$$
 получающегося из (2.1) подстановкой вместо  $a \to 0, \ V \to V_{\text{max}}^{\text{эксn}}$ ,

$$M_{_{\mathit{KO}\mathcal{I}}} \to M_{_{\mathit{KO}\mathcal{I}}}^{V_{_{\mathit{max}}}^{^{\mathit{NC}\mathit{R}}}} = M_{_{\mathcal{I}\mathcal{I}}}^{_{\mathit{HOM}}} \cdot i_{_{\mathit{mp}}} = M_{_{\mathcal{I}\mathcal{I}}}^{_{\mathit{HOM}}} \frac{\omega_{_{\mathcal{I}\mathcal{I}}}^{^{\mathit{HOM}}}}{\omega_{_{\mathit{max}}}^{^{\mathit{NE}\mathit{C}\mathit{R}}}} = \frac{1}{V_{_{\mathit{max}}}^{^{\mathit{NC}\mathit{R}}}} M_{_{\mathcal{I}\mathcal{I}}}^{_{\mathit{HOM}}} \cdot 3,6 \cdot \omega_{_{\mathcal{I}\mathcal{I}}}^{^{\mathit{HOM}}} \cdot R_{_{\mathit{KO}\mathcal{I}}}.$$

Это кубическое уравнение имеет один действительный и два комплексных корня. Действительный корень и даёт искомое  $V_{\rm max}^{^{9KCR}}$ :

$$V_{\max}^{_{\textit{pKCN}}} = x_1 = \frac{\sqrt[3]{108\alpha^2\gamma + 12\alpha\sqrt{12\alpha\beta^3 + 81\alpha^2\gamma^2}}}{6\alpha} - \frac{2\beta}{\sqrt[3]{108\alpha^2\gamma + 12\alpha\sqrt{12\alpha\beta^3 + 81\alpha^2\gamma^2}}} \, .$$

При превышении электромобилем этого значения скорости система управления должна выдавать информационное предупреждение водителю о возможности теплового перегрева тягового электродвигателя.

5. Время  $t_{100}$  разгона машины до 100 км/ч в принятой нами концепции для электромобиля никак не сказывается на расчетном значении номинальной мощности электродвигателя, но меняет, естественно, максимальное мгновенное значение коэффициента его

перегрузки в конце этого разгона 
$$k_{\mathfrak{I}\!\!\mathcal{J}}^{\,\mathrm{max}} = \frac{M_{\,\mathfrak{I}\!\!\mathcal{J}}^{\,V_{100}}}{M_{\,\mathfrak{I}\!\!\mathcal{J}}^{\,\mathrm{nom}}} = \frac{2 \cdot M_{\,\mathfrak{I}\!\!\mathcal{J}}^{\,V_{100}}}{M_{\,\mathfrak{I}\!\!\mathcal{J}}^{\,V_{\mathrm{max}}^{npeo}}}$$
. Поэто-

му в Excel-формуляре электромобиля показатель  $t_{100}$  желательно задавать (подбором) таким, чтобы получать  $k_{\mathfrak{I} \mathcal{I}}^{\max} \approx 7$ .

Соответствующий лист *Excel*-формуляра электромобиля с такой же ходовой платформой, как у ранее рассмотренного гибридного автомобиля, приведен ниже на рис. 2.5

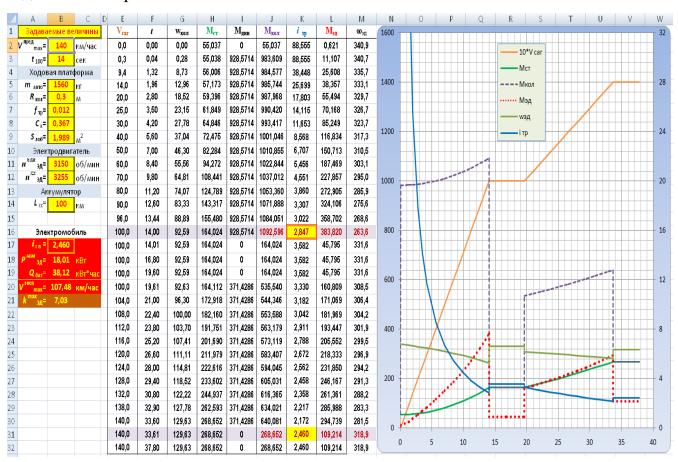


Рисунок – 2.5 Лист *Excel*-формуляра эскизного расчета привода электромобиля с бесступенчатой трансмиссией (вариатор)

### 2.4 Имитационное моделирование тягового привода электромобиля

Пакет *Simulink* компьютерной математической среды *MatLab* является де-факто мощнейшим и удобнейшим инструментом моделирования сложных динамических объектов. С его помощью поэлементно создадим модель

тягового привода проектируемого электромобиля.

В соответствии с полученной по формуляру расчетной мощностью электродвигатель оставляем тот же  $-2\Pi H 160M$  (18 кВт), ёмкость тяговой батареи примем с некоторым запасом -41 кВт·час.

Модель тягового привода проектируемого электромобиля управляемого бесступенчатым изменением передаточного отношения трансмиссии показан на рис. 2.6.

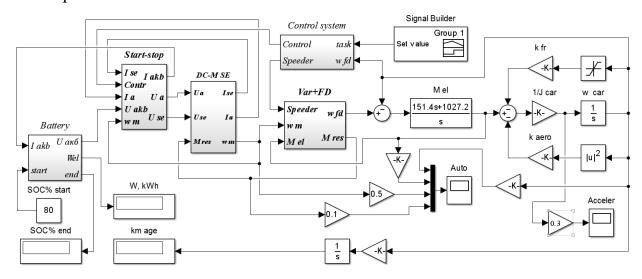


Рисунок – 2.6 *Simulink*-модель привода электромобиля с бесступенчатой трансмиссией (вариатор)

Схемы моделей отдельных элементов проектируемого электромобиля представлены ниже.

Xodoвая nлатформа. В модели учтены упругость и внутреннее трение в шинах (блок  $M_{el}$ ), инерция гибридного автомобиля ( $1/J_{car}$ ), сопротивление качению колёс ( $k_{fr}$ ) и аэродинамическое сопротивление ( $k_{aero}$ ) [70]. Входной сигнал — скорость вращения входного вала главной передачи  $w_{fd}$ , выходной — скорость вращения колес  $w_{car}$ . При необходимости могут быть введены нагрузки, соответствующие движению на подъём-уклон трассы или дополнительному ветровому давлению.

Аккумуляторная батарея (на рис. 2.6 – субсистемный блок **Battery**). Содержимое субблока (рис. 2.7) составлено по математическому описанию

физико-химических процессов в батарее [142,118,107,143] и на основе хорошо себя зарекомендовавшей эквивалентной схемы замещения с постоянными параметрами в диапазоне температур 25-40°С и заряде батареи  $SOC \ge 20\%$  [40]. Допустимый ток разряда современных тяговых Li-Ion аккумуляторов [144] достигает (10-20) С, где С – ёмкость в А·час.

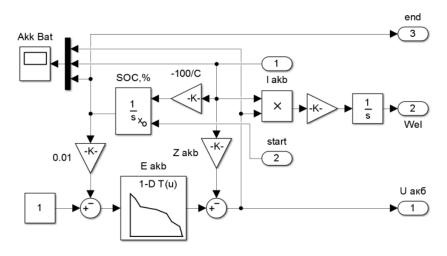


Рисунок 2.7 - Simulink-модель литий-ионной батареи

Величина постоянного тока заряда, по тем же данным, составляет (0,1-1) С, то есть токи рекуперативного торможения свыше 130 А для рассматриваемой батареи нежелательны. В новейших графен-полимерных батареях [144] это ограничение снято.

Входные сигналы схемы: ток  $I_{\rm akb}$  через батарею и начальное значение «start» состояния её заряда в %. Выходные сигналы: напряжение на клеммах батареи  $U_{\rm ak6}$ , отданная энергия  $W_{el}$  (при потреблении от батареи — положительна, в случае рекуперативной зарядки будет отрицательна), конечное значение «end» состояния заряда в %.

Субблок Var+FD на рис. 2.6 имитирует трансмиссию (вариатор и главную передачу); его содержимое приведено на рис. 2.8. Входные сигналы: Speeder — сигнал регулятора скорости движения,  $w_m$  — скорость вращения вала двигательной установки,  $M_{el}$  — момент на колесах. В этом субблоке рассчитываются  $w_{fd}$  — скорость вращения вала главной передачи и  $M_{res}$  — момент сопротивления на валу двигательной установки.

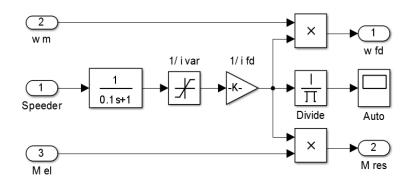


Рисунок 2.8 - *Simulink*-модель трансмиссии: управляемый вариатор и главная передача

Субблок *Control system* на рис. 2.9 состоит из задатчика интенсивности, фильтра Бесселя 3-его порядка и  $\Pi$ -регулятора скорости движения.

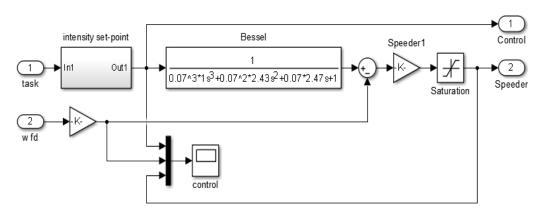


Рисунок 2.9 - *Simulink*-модель формирования сигналов задания и регулирования

Его входами являются: «task» — положение педали акселератора и  $w_{fd}$ ; выходами — сигналы Speeder и Control (сигнал задатчика интенсивности). Субблок DCMel — модель якорной цепи электродвигателя раскрыто представлен на рис. 2.10а; а субблок SE — модель обмотки независимого возбуждения раскрыт на рис. 2.10б.

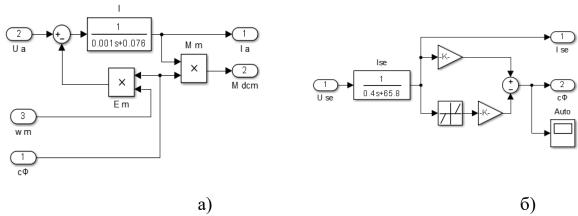


Рисунок 2.10 – Simulink-модели якорной цепи электродвигателя (а) и обмотки его независимого возбуждения (б)

Проанализируем поведение модели в характерных режимах движения электромобиля.

## 2.5 Результаты моделирования привода электромобиля с вариаторной трансмиссией

Модель электромобиля исследовалась в трех режимах движения:

<u>Режим 1 и 3</u> полностью совпадают с таковыми для гибридомобиля;

<u>Режим 2</u>: имитация движения по шоссе на скорости 60 км/час с полным разрядом батареи (от  $SOC_{start}$ = 100% до  $SOC_{end}$ = 0%) — для сравнительной оценки максимальной дальности пробега (например, фирмой *Hyundai* именно в таких условиях заявлен пробег в 280 км её электромобиля *IONIQ electric*).

Результаты вычислительных экспериментов оказались следующие.

### Режим 1.

Осциллограммы изменения потребляемого электродвигателем тока I его скорости вращения  $\omega$  и скорости движения V электромобиля с вариаторной трансмиссией в динамике показаны на рис. 2.11. Времена разгона и торможения (определяющиеся настройками системы управления) — 12 с, тахограммы линейны. Скорость от 100 до 140 км/час растёт также за 20 с, ускорение заметно спадает на скоростях свыше тех же 120 км/ч, интенсивность торможений не меняется.

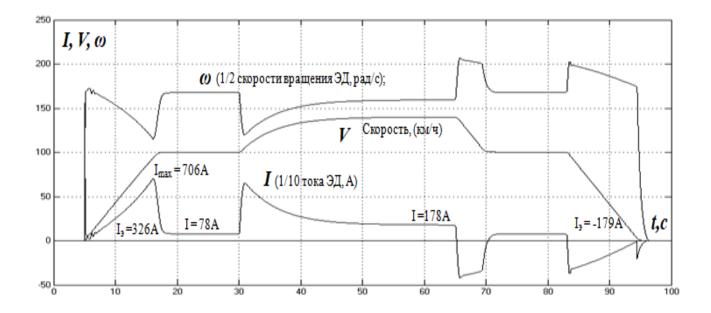


Рисунок — 2.11 Динамика проектируемого электромобиля с вариаторным управлением скорости.

При разгонах вариаторным управлением (рис. 2.11) форма тока электродвигателя имеет вид вогнутого треугольника, поэтому эквивалентный ток «вариатора» -  $I_3$  = 326 A. Это позволяет вариаторному управлению выдержать расчётный динамический режим эквивалентной перегрузки электродвигателя и экономить заряд тяговой батареи. На установившейся скорости движения, меньше номинальной, видно, что при параметрическом управлении через двигатель протекает ток 78 A, это меньше номинального тока электродвигателя. Следовательно, динамика проектируемого электромобиля для городского режима движения вполне удовлетворительна.

### Режим 2

Определение максимальной дальности езды на скорости 60 км/ч с полным расходом всей ёмкости батареи дало следующие результаты: пробег машины составил 315,3 км «шоссе», потребленная электродвигателем за это время энергия — 39,33 кВт·ч. Падение напряжения тяговой батареи компенсировалось автоматическим изменением передаточного отношения вариатора от 2,73 в начале движения до 1,924 в конце (для поддержания скорости на заданном уровне).

#### Режим 3

Результаты моделирования движения электромобиля с вариаторным управлением в интенсивном «городском» режиме (повторяющиеся ездовые циклы ARDC) представлены в таблице ниже.

Таблица № 2.1 - Городской режим движения электромобиля по циклу *ARDC* с вариаторным управлением скорости

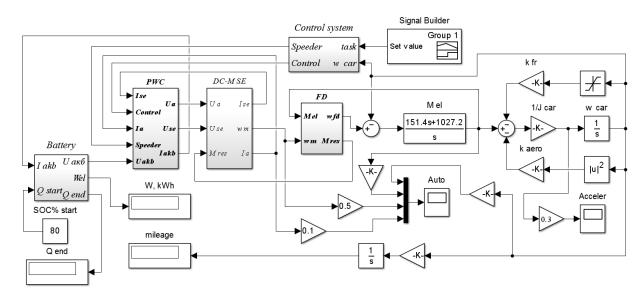
№ цик- ла	Изменение <i>SOC</i> , %	Расход ёмко- сти батареи, кВт·час	Пробег в цикле, км
1	80,0 – 69,48	4,059	22,46
2	69,48 – 58,86	4,050	22,45
3	58,86 – 48,13	4,041	22,44
4	48,13 – 37,17	4,027	22,41
5	37,17 – 30,0	2,598	14,77
	Итого	18,775	104,53

Моделирование прекращалось по достижению нижнего порога эксплуатационного состояния заряда тяговой батареи SOC = 30%, поэтому последний цикл неполный (1790 с, из паспортной длительности 2442 с).

Заданный в формуляре среднесуточный пробег (100 км) электромобиля превзойден: пройдено 104,53 км за 3,21 часа со средней скоростью 32,56 км/ч. Расход энергии составил 18,8 кВт·ч или в пересчете 17,96 кВт·ч/100 км – практически половину расчетной ёмкости батареи по формуляру.

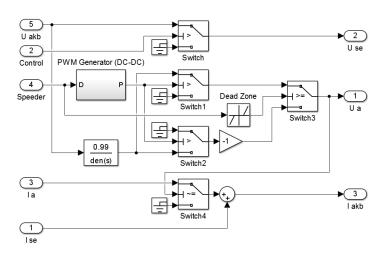
# 2.6 Моделирование привода электромобиля с широтно-импульсным преобразователем (*ШИП*)

Представляет интерес сравнение полученных эксплуатационных показателей с показателями такого же электромобиля, но со стандартной схемой управления скоростью движения путем «электрического» регулирования скорости вращения двигателя изменением его напряжения питания. Для этого в разработанном приводе с вариаторной трансмиссией исключим вариатор, а в цепь питания электродвигателя добавим управляемый преобразователь. В модели (рис. 2.12) появляется субблок преобразователя PWC (вместо субблока Start-stop) и субблок главной передачи FD с постоянным передаточным отношением (вместо субблока вариаторной трансмиссии Var +FD).



Рисунок— 2.12 *Simulink*-модель привода электромобиля с управлением скорости *ШИП(PWC)* 

Поскольку приводной двигатель остаётся тот же, постоянного тока независимого возбуждения, то в качестве источника напряжения для его якоря используем простейший широтно-импульсный преобразователь (ШИП) постоянного напряжения. Применим структуру привода по [101], реализованную в модели с помощью одноквадрантного модулятора *PWM Generator* и силового электронного ключа *Switch1* (рис. 2.13).



### Рисунок – 2.13 Simulink-схема PWM Generator (субблока PWC)

В режиме движения якорь двигателя подключается к аккумуляторной батарее тогда, когда выход модулятора равен «1», а если модулятор выдает «0» – якорь от батареи отключается и закорачивается сам на себя.

В режиме торможения (когда сигнал *Speeder* регулятора скорости периодически становится отрицательным) якорь двигателя также периодически переключается блоком *Switch3* на обратную полярность по питанию (импульсное противовключение). Режим этот возникает на малых скоростях, без него невозможно обеспечить требуемый темп замедления машины при остановках.

В режиме движения при отключенном (а в режиме импульсного торможения — при включенном) электронном силовом ключе *Switch1*, ток якоря через батарею не протекает. Фактически средний ток через батарею равен произведению тока якоря на текущую скважность импульсов модулятора (которая почти всегда меньше 1).

Это снижает расход энергии от аккумулятора, но ухудшает её прибыль при рекуперации. В схеме рис. 2.13 формирование тока, протекающего через батарею, реализуется блоком *Switch 4*.

Результаты моделирования оказались следующими.

#### Режим 1.

Скоростная динамика машины (рис. 2.14 кривая V) идентична рассмотренным ранее: времена разгона и торможения (определяющиеся настройками системы управления) — 12 с, тахограммы линейны.

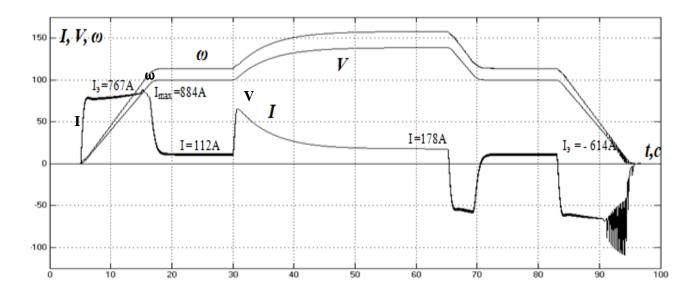


Рисунок – 2.14 Динамика электромобиля с управлением скорости ШИП

Скорость от 100 до маневровой 140 км/ч нарастает за 20 с, ускорение на скоростях более 120 км/ч также ослабевает, интенсивность торможений неизменна. Скорость вращения электродвигателя (рис. 2.14, кривая  $\omega$ ), в отличие от вариаторного управления, прямо пропорциональна скорости электромобиля (рис. 2.11, кривая  $\omega$ ).

Есть и ещё один недостаток: в конце остановок импульсный режим торможения вызывает дискомфортные водителю и пассажирам низкочастотные колебания (дергания) электромобиля (рис. 2.15).

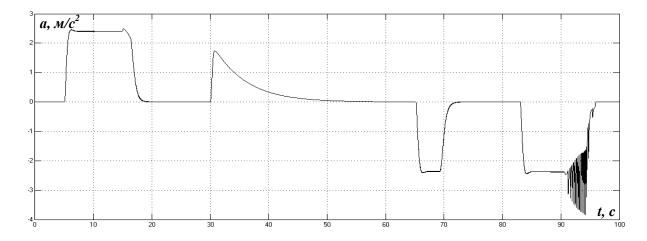


Рисунок – 2.15 Диаграмма продольного ускорения  $\boldsymbol{a}$  (в м/с<sup>2</sup>) электромобиля с управлением  $\boldsymbol{H}\boldsymbol{H}\boldsymbol{H}$  в динамике (режим 1)

Тем не менее, протестируем машину в двух оставшихся режимах.

### Режим 2

Максимальный пробег электромобиля с *ШИП* на скорости 60 км/ч и полным расходом ёмкости батареи составил 339,5 км, при вариаторном управления скоростью - 315,3 км, практически одинаково (в пределах точности моделирования), а потреблённая за это время энергия: с ШИП — 39,07 кВт·ч; с вариатором — 39,33квт\*ч.

Падение напряжения тяговой батареи сопровождалось (для поддержания постоянства скорости 60 км/ч) автоматическим увеличением скважности модулятора *ШИП* от 0,38 в начале движения до 0,55 в конце.

### Режим 3

В 2014 году принят единый для всех континентов тестовый ездовой цикл *WLTC* [43], используемый для оценки расхода топлива бензиновыми, дизельными и гибридными автомобилями. Однако мы воспользуемся единственным из известных «индустриальных» циклов движения, учитывающим стояние в «пробках» и поэтому наиболее приближенном к условиям городской езды в России – *ARDC* (рис. 2.16) [44].

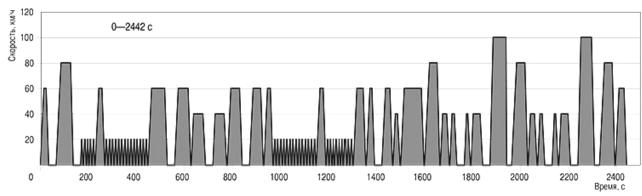


Рисунок 2.16 - Городской ездовой цикл *ARDC* 

Длительность одного цикла ARDC установлена 2442 сек или 40,7 мин. Общее время остановок в цикле  $\approx$ 15 % (в WLTC-13,4 %), т.е. влияние системы автоматического старт-стопа на оценку экономичности будет примерно одинаковым.

Результат моделирования движения электромобиля в «городском» режиме (повторяющиеся ездовые циклы ARDC) представлен в таблице 2.1.

Таблица № 2.1 - Городской режим движения электромобиля по циклу ARDC с управлением скорости IIIIII

№ цик- ла	Изменение <i>SOC</i> , %	Расход ёмко- сти батареи, кВт·ч	Пробег в цикле, км
1	80,0 – 59,69	6,678	22,47
2	59,69 – 38,43	6,804	22,45
3	38,43 – 30,0	2,515	8,64
	Итого	15,997	54,01

Моделирование прекращено по достижению нижнего порога эксплуатационного состояния заряда тяговой батареи SOC = 30%, последний цикл неполный (1094 с).

Пробег электромобиля за время эксплуатационного расхода заряда батареи от SOC = 80% до SOC = 30% составил 54 км за 1,66 часа со средней скоростью 32,53 км/ч. Заданный в формуляре среднесуточный пробег (100 км) может быть выполнен только с дополнительной подзарядкой батареи на

потреблённые 16 кВт·ч. В пересчете на100 км пути это даёт расход энергии батареи 29,62 кВт·ч.

### 2.7 Результаты моделирования приводов электромобилей

Выводы по результатам моделирования можно сделать следующие:

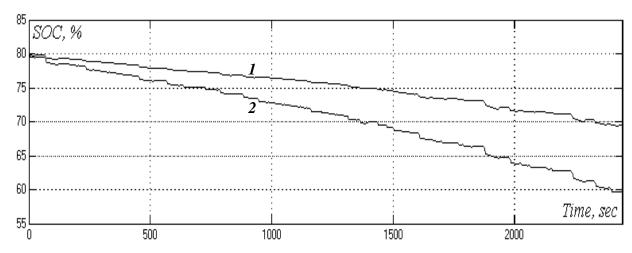
- 1) тахограммы разгонов-остановок (режим 1) в обоих вариантах электромобилей практически идентичны, но эквивалентные токи через тяговый аккумулятор в случае привода с *ШИП* при разгонах в 1,6 раза больше, а при рекуперативных торможениях 1,67 раза больше, чем в случае вариаторного управления;
- 2) максимальный пробег при вариаторном управлении в идеальных условиях движения по «шоссе» (режим 2) практически одинаково (в пределах точности моделирования).
- 3) кардинальные отличия наблюдаются в 3-ем режиме, близком к реальным условиям эксплуатации в городе, которые сведены в таблицу 2.2.

 Таблица 2.2 - Сравнительные показатели электромобилей в городском режиме

Управление	Уровень	Расход	Пробег	Удельный
скоростью	заряда	электроэнер	электромоби	расход
элетромобиля	батареи	гии за 1	ля от	электроэнергии
	после 1-го	цикл, кВт∗ч	<i>SOC</i> =80% до	на 1км, Вт*ч/км
	цикла <i>ARDC</i> ,		<i>SOC</i> =30%,	
	SOC%		КМ	
Вариаторное	69,48	4,059	104,53	180,7
ШИП	59,69	6,678	54	297,2

Здесь вариаторная схема имеет почти двукратное превосходство в итоговом пробеге электромобиля (104,53км против 54км при одинаковом расходе энергии батареи), а в энергетике вариаторное управление в 1,64 раза экономичнее (4,059кВт<sub>\*</sub>ч против 6,678кВт<sub>\*</sub>ч за 1 цикл – 22,5 км).В итоге

обеспечивается лучшее использование ресурса батареи. При вариаторном управлении скоростью электромобиля ёмкость батареи за 1 цикл пробега (22,5 км) снижается с 80% до 70%, а при управлении ШИП – с 80% до 60% (рис. 2.17).



1 – вариаторный привод; 2 –привод с ШИП

Рисунок 2.17 – Уменьшение заряда батареи электромобилей в течении первого ездового городского цикла (режим 3)

4) из пункта 2 следует, что привод с вариаторным управлением в установившемся низкоскоростном движении (60 км/час по «шоссе») так же эффективен как и в городском режиме, практически одинаково с управлением ШИП, кроме того, в динамике городского движения ШИП уступает значительно, что полностью объясняется в пункте 1 соотношениями для эквивалентных токов. На самом деле рекуперация в приводе с ШИП ещё хуже т.к. реально зарядный ток через батарею представляет собой при этом короткие импульсы с недопустимой амплитудой в 550-1100 А.

Одним из основных показателей при сравнении энергоэффективности электромобилей является удельный расход электроэнергии на 1 км пути. При вариаторном управлении электромобилем он составил — 180,7 Вт\*ч/км, при управлении *ШИП* — 297,2 Вт\*ч/км (городской режим, табл. 2.2). Как

показывают широкие исследования института транспорта технического университета Дании энергопотребление электромобилями зависит от температуры окружающего воздуха. В теплое время года среднее потребление составило 168 Вт\*ч/км, а в холодное – 225 Вт\*ч/км. Средний расход составляет – 196,5 Вт\*ч/км [156].

Удельный расход энергии на 1 км пути разработанного электромобиля ниже выпускаемых и эксплуатируемых электромобилей.

### Выводы по второй главе

- 1. Разработана новая типовая схема электромобиля на основе предложенного принципа управления скоростью транспортного средства прямым бесступенчатым регулированием передаточного числа вариатора.
- 2. Разработана методика расчета основных параметров привода электромобиля с учетом перегрузочной способности электродвигателя.
- 3.По результатам моделирования разработанный электромобиль с вариаторным управлением скорости очень эффективен в городском режиме (пробег от SOC = 80% до SOC = 30%: вариатор -104, 53 км; ШИП -54 км).

## 3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И СОЗДАНИЕ ОСНОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИВОДА ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ

### 3.1 Разработка функциональной схемы тягового привода гибридного *ATC*

### 3.1.1 Обоснование выбора типа накопителя энергии гибридного АТС

Проведенный в  $\S$  1.2 обзор показывает, что на ближайшую перспективу в качестве накопителей энергии для осуществления всех основных режимов движения ATC реально могут быть рекомендованы лишь два: механический (маховик) и электрохимический (аккумулятор).

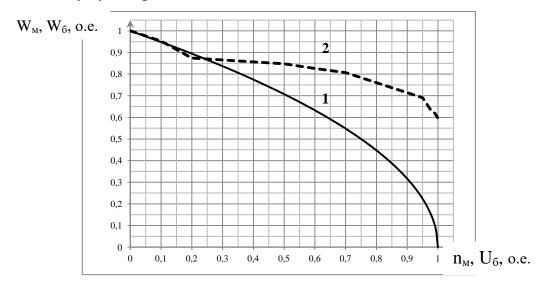
На первый взгляд маховик выглядит предпочтительнее. Он фактически является прямым источником механической энергии без промежуточного преобразования рода энергии, всегда связанного с дополнительными потерями. Запасенная в маховике энергия используется на 80%. Этим он выгодно отличается от применяемых на гибридных автомобилях электрических аккумуляторов, у которых более высокая энергоемкость нивелируется ограниченной глубиной разряда [53,54].

Однако следует отметить особенности работы маховичного накопителя не в его пользу:

- 1. Элементарный расчет показывает, что маховик разумных габаритов и массы (например, 100 кг), обладающий запасом энергии, например 30 кВт-час, должен иметь частоту вращения порядка 40 000 об/мин со всеми вытекающими последствиями, тогда как аккумуляторы являются стационарными устройствами, а конструкции их быстро прогрессируют (уже разрабатываются аккумуляторы с удельной энергоёмкостью 1 кВт-час/кг, т.е. по массогабаритам двойка «аккумулятор электродвигатель» вполне конкурентна маховичной установке).
- 2. В [53] прямо говорится: для эффективного использования преимуществ маховичного накопителя необходима механическая передача с диапа-

зоном варьирования передаточного отношения не менее 20. Известные коммерчески выпускаемые вариаторы обеспечивают реальный диапазон варьирования не более 6-7, поэтому для получения большего диапазона вариатор надо объединять с зубчатыми передачами в сложные схемы с разделением потока мощности – супервариатор.

- 3. Отбор энергии маховика сопровождается существенным и непрерывным снижением скорости его вращения, следовательно, во столько же раз должен быть расширен (и учтен усложнением алгоритма управления) диапазон регулирования передаточного отношения супервариатора, который по конструкции [103] и высокой технологичности производства становится сопоставим современным многоступенчатым *АКП*.
- 4. Действительно, в тяговых батареях реально используют половину номинальной ёмкости, а состояние их заряда во время эксплуатации поддерживают между 80 и 30%. Но при этом характеристики накопителей существенно различаются. На рис. 2.4 представлены внешние характеристики маховичного и аккумуляторного накопителей.



1 — маховичного накопителя, зависимость  $n_{\scriptscriptstyle M} = f(W_{\scriptscriptstyle M}); \ 2$  — аккумуляторного накопителя, зависимость  $U_{\scriptscriptstyle \delta} = f(W_{\scriptscriptstyle \delta}).$ 

Рисунок — 3.1 Внешние характеристики накопителей энергии. По вертикальной оси отложены: для маховичного накопителя — частота

вращения маховика  $n_{\scriptscriptstyle M}$ , для аккумуляторного — напряжение батареи  $U_{\scriptscriptstyle 6}$ ; по горизонтальной оси — отданная энергия маховиком,  $W_{\scriptscriptstyle M}$  или аккумулятором,  $W_{\scriptscriptstyle 6}$ . Все величины относительны, в долях номиналов. Наглядно видно, что в рабочем диапазоне отдаваемой энергии (от 0,2 до 0,7) внешняя характеристика аккумулятора значительно более жесткая. Следовательно, здесь диапазон регулирования передаточного отношения (относительно требуемого для плавного управления скоростью машины) расширять не нужно, тогда как маховичному накопителю для парирования эксплуатационной просадки его скорости необходим вариатор почти с удвоенным диапазоном варьирования.

- 5. В электрическом гибриде(за счет незначительной модификации схемы пуска и остановки электродвигателя), по сравнению с маховичным гибридом, можно уменьшить требуемый диапазон регулирования до значений, реализованных в *современных* вариаторах. Энергоэффективность вариаторного управления при этом ухудшается незначительно (см. рис. 2.3). С другой стороны (на основании п. 3 § 2.1.1), для расширения диапазона можно просто последовательно включить два коммерческих вариатора, хотя это удорожит трансмиссию.
- 6. Частые включения  $\mathcal{L}BC$  в приводах с маховичным накопителем все равно требуют наличия развитой стартер-генераторной установки ( $\mathcal{C}\Gamma\mathcal{Y}$ ) и вспомогательного аккумулятора, которые в электрических гибридах просто не нужны.

Вывод: по сумме технических, экономических, эксплуатационных и прочих преимуществ предпочтение следует отдать электроаккумуляторному накопителю.

# 3.1.2 Дополнительные соображения по структуре гибридной двигательной установки

Если за основу разработки гибридного ATC брать экономический критерий стоимости владения, то при заданных технических требованиях (масса, габариты ATC, динамика разгона, максимальная скорость и пр.) и сервисных характеристиках (степень автономности, удобства пользования и т.д.) надо

минимизировать стоимость элементов привода и эксплуатационные расходы на энергию, топливо, на техобслуживание. Достигается это не только выбором минимально достаточных по мощности (следовательно, стоимости) электродвигателя,  $\mathcal{L}BC$  и батареи, но и идеологией работы элементов системы в комплексе.

Учитывая, что в настоящее время стоимость 1 кВт·час израсходованной на валу электродвигателя энергии почти в 3 раза ниже, чем на валу бензинового  $\mathcal{L}BC$  [Прил. H] (или в 2,3 раза — чем дизель или CVI), очевидно, что движение должно осуществляться в основном на электротяге.  $\mathcal{L}BC$  же должен подключаться в двух случаях:

- 1) автоматически, когда для заданного *темпа* движения мощности одного электродвигателя недостаточно;
- 2) когда заряд аккумуляторной батареи ниже некоторого критического уровня.

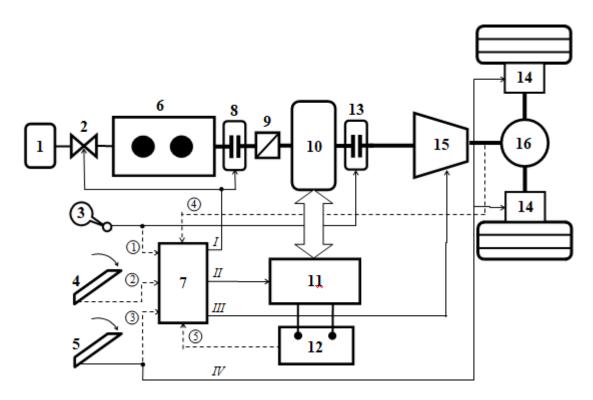
Для повышения автономности машины рационально не только использовать энергию торможений (рекуперацию), но при включенном  $\mathcal{A}BC$  привязать избыток интенсивности его работы (положения дроссельной заслонки) также и к состоянию заряда тяговой аккумуляторной батареи. Разумно предусмотреть два варианта стационарной зарядки батареи: от внешней сети и от собственного  $\mathcal{A}BC$  (режим «стояночная самозарядка»). Так реализуется п. 2 предыдущего абзаца, а как следствие для структурной схемы привода, это означает, что оба двигателя в кинематической цепи привода должны иметь свои сцепления.

Необходимая мощность электродвигателя определяется в немалой степени его перегрузочной способностью  $k_{\scriptscriptstyle M}$  по моменту, т.е. двигатель постоянного тока с  $k_{\scriptscriptstyle M}=5\div7$  и с соответственной номинальной мощностью может оказаться легче и меньше (в том числе, благодаря вариаторному способу управления скоростью) двигателя переменного тока с  $k_{\scriptscriptstyle M}=2,5\div3$  бо́льшей номинальной мощности и выполняющего ту же работу.

### 3.1.3 Функциональная схема привода гибридного автомобиля

На основании изложенного в п.п. 2.1, 3.1.1— 3.1.2 структурнофункциональная схема привода гибридного транспортного средства получается следующей (рис. 3.2).

Пунктирными линиями показаны сигналы от датчиков положения: ①, ②, ③ — соответственно джойстика 3, педали акселератора 4 и педали тормоза 5; ④ — датчика частоты вращения выходного вала вариатора 15; ⑤ — датчика напряжения аккумуляторной батареи 12. Тонкими стрелками показаны сигналы, управляющие: I — контроллером системы впрыска 2 и сцеплением 8; II — силовым преобразователем-коммутатором 11; III — передаточным отношением вариатора 15; IV — тормозом 14.



1 — топливный бак; 2 — контроллер системы впрыска ДВС; 3 — джойстик режимов работы АТС; 4 — педаль акселератора; 5 — педаль тормоза; 6 — ДВС; 7 — контроллер управления; 8 и 13 — сцепления с электроимпульсным переключением; 9 — согласующий редуктор (необязательно); 10 — электродвигатель; 11 — силовой преобразователь (или коммутатор) со встроенным блоком управления; 12 — аккумуляторная батарея; 14 —тормоз; 15 — вариа-

тор с управляемым в широком диапазоне передаточным отношением; 16 – главная передача.

Рисунок - 3.2 Схема привода гибридного АТС с вариаторной трансмиссией

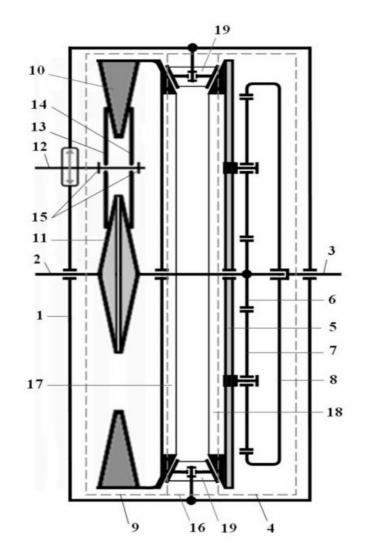
Джойстик 3 режимов работы привода — четырехпозиционный с положениями: исходное, когда всё, кроме сцепления 13, отключено — «нейтраль», а также 1-е — «вперед», 2-е — «назад», 3-е — «парковка» и 4-е — «самозарядка».

Контроллер 7 содержит регулятор положения дроссельной заслонки (выход I), формирователь сигнала желаемой скорости движения (выход II) и регулятор передаточного отношения вариатора (выход III).

Двухпозиционные сцепления 8 и 13 с электромагнитным приводом переключаются встроенными импульсными усилителями; в статике энергию не потребляют.

Тяговый электродвигатель 10 может быть переменного или постоянного тока; от рода его тока зависит, что собой представляет преобразователь 11: либо нерегулируемый (или частично регулируемый) инвертор, либо коммутатор (набор полупроводниковых бесконтактных ключей с логикой управления).

Вариатор 15 должен обладать как можно большим диапазоном плавного изменения передаточного отношения. В настоящее время возможны два варианта реализации предлагаемого принципа параметрического управления. Во-первых, на основе существующих и промышленно выпускаемых вариаторов с диапазоном регулирования до 8, но для этого в схеме управления тягового электропривода необходимо предусмотреть устройство для плавного пуска и плавной остановки электродвигателя. Во-вторых, на основе разрабатываемых в настоящее время нами двухпоточных трансмиссий (патенты РФ 2729847, 2756733), рис. 3.3.



1-корпус; 2-входной вал; 3-выходной вал; 4-дифференциал; 5-водило; 6-солнечная шестерня; 7-сателлиты; 8-эпицикл; 9-базовый дисковый фрикциононный вариатор; 10-внешний фрикцион (эпицикл); 11-внутренний фрикцион (сдвоенный конус); 12-устройство перемещения оси сателлита, состоящего из двух плоских дис-ков 13 и 14 с осевыми ограничителями 15; 16-реверсор, состоящий из зубчатых колёс 17 и 18; 19-зубчатые шестерни, установленные на зафиксированных в корпусе 1 осях.

### Рисунок— 3.3 Широкодиапазонная реверсивная трансмиссия

Она разработана для гибридного автомобиля и электромобиля, обеспечивая регулирование частоты вращения от нуля и отличается повышенной надежностью, небольшими габаритами, простотой конструкции и управления. В ней вращение от ведущего вала 2 к ведомому валу 3 одновременно передается двумя потоками: напрямую с постоянным передаточным числом че-

рез солнечную шестерню 6 и вариатор 9 через водило 5, замкнутых на дифференциал 4. Трансмиссия работает следующим образом. Крутящий момент подается на входной вал 2, который начинает вращаться со скоростью ω₂ совместно с внутренним фрикционом 11. Плоские диски 13 и 14 сателлита, соприкасаясь с поверхностью фрикционов 10 и 11, передают обратное вращательное движение от внутреннего фрикциона 11фрикциону-эпициклу 10. Зубчатое колесо 17, связанное с фрикционом-эпициклом 10 через зубчатые шестерни 19, вращает в противоположном колесу 17 направлении колесо 18 и, соответственно, связанное с ним водило 5. В планетарном дифференциале 4, в результате совмещения вращательных движений солнечной шестерни 6 и водила 5, эпицикл 8 приводит во вращение со скоростью ω<sub>3</sub> выходной вал 3. Передаточное отношение ф дискового фрикционного вариатора 9 определяется положением оси 12 его сателлитных дисков 13 и 14. Фрикцион-эпицикл 10 вращается со скоростью  $\omega_{10} = -\omega_2/\phi$  и момент  $M_{10} = -M_2 \cdot \phi$ . Соответственно в планетарном дифференциале 4 входная солнечная шестерня 6 вращается с окружной скоростью  $\omega_6 = \omega_2$ , а водило 5 со скоростью  $\omega_5 = -\omega_{10} = \omega_2/\phi$ . Известные соотношения для скоростей планетарного механизма определяют угловую выходного вала 3 трансмиссии:

$$\omega_3 - [(z+1)/\phi - z] \cdot \omega_2$$

где  $z=z_6/z_8$  — отношение чисел зубьев солнечной шестерни 6 и эпицикла 8 планетарного дифференциала 4.

Моменты на входном 2 и выходном 3 валах трансмиссии вязаны соотношением:

$$2 \cdot M_2 \cdot \omega_2 = M_3 \cdot \omega_3$$

где  $M_2$  и  $M_3$  — соответственно моменты нагрузки на входном 2 и выходном 3 валах.

Последнее выражение показывает, что трансмиссия обладает важнейшим свойством — адаптивностью, сохраняющейся и при прямом, и реверсивном регулировании скорости выходного вала 3 изменением её передаточного отношения, скорость приводного двигателя при этом может оставаться неизменной, например, на оптимальном для КПД этого двигателя уровне. Кроме того, при  $\phi = 4$  и z = 1/3 скорость  $\omega_3$  и момент  $M_2$  будут равны нулю при любых  $\omega_2$  и  $M_3$ , т.е. такой привод не нуждается в тормозах и сцеплениях и во всем диапазоне регулирования управляется единственным воздействием, определяющим смещение оси 12, например, педалью акселератора.

Сцепление 13 включено во всех положениях, кроме «самозарядка». Во время стоянки (в положении «парковка») сцепление 8 также включено.

Перевод джойстика 3 из «нейтрали» в любое, кроме «парковки» иное активизирует контроллер 7 и преобразователь-коммутатор 11. В положении «вперед» (или «назад») формирователь желаемой скорости движения вырабатывает сигнал II, линейно меняющийся до уровня, соответствующего текущему нажатию педали акселератора (причем с ограничением ускорениязамедления заданными максимальными значениями). Одновременно с малейшим нажатием педали тяговый электродвигатель запускается на номинальную частоту вращения. Разность сигналов II и 4 поступает в регулятор скорости и начинает уменьшать передаточное отношение вариатора (от начального максимума) — машина стартует на одной электротяге.

Сцепление 8 и двигатель внутреннего сгорания 6 включаются в случае, когда текущая скорость вращения электродвигателя (вычисляется в контроллере по соотношению сигналов *II*, *III* и ④) проседает ниже уровня, соответствующего допустимой перегрузке электродвигателя и отключаются, когда эта скорость близка к номинальной. Кроме того, *ДВС* и его сцепление 8 принудительно включаются при превышении сигналом желаемой скорости уровня (например, более 76 км/час), соответствующего так возросшему аэродинамическому сопротивлению машины, что появляется опасность некоторого перегрева одиночно работающего электродвигателя из-за нагружения его сверх номинальной способности.

Интенсивность работы  $\mathcal{A}BC$  определяется регулятором дроссельной заслонки пропорционально положению педали акселератора 4, но с учетом разности желаемого и действительного состояния заряда батареи 12.

Сброс педали акселератора до «нуля» переводит привод в режим рекуперативного торможения с обычным «транспортным» замедлением. При необходимости более интенсивного замедления (вплоть до экстренного) нажимается педаль тормоза; ею же пропорционально сигналу ③ меняется уровень уставки замедления в формирователе желаемой скорости движения, обеспечивая сохранение рекуперации и в этом режиме. Штатный трансмиссионный тормоз 14 (он же стояночный) работает параллельно.

При необходимости буксировки машины джойстик устанавливается в положение либо «нейтраль» (движение без дополнительной нагрузки буксировщика), либо «вперед» при слабом нажатии педали акселератора (тогда, за счет буксировщика, возможна подзарядка батареи на ходу).

### 3.2 Методика проектирования тягового привода гибридного АТС

Несмотря на то, что многие мировые ведущие фирмы серийно выпускают гибридные автомобили, до сих пор не решены вопросы обоснованного выбора соотношения мощностей двигателей привода. Открытым остается вопрос выбора вида трансмиссии. В нашей стране проблема разработки гибридных транспортных средств (ГТС) требует дальнейшего развития, обобщения имеющегося мирового и отечественного опыта разработки и проектирования отдельных функциональных узлов транспортных средств, их систем управления движением [36,76,80,86,116,138,139].

К примеру, один из распространенных гибридных автомобилей «*Toyota Prius*», вместо коробки передач для регулирования скорости машины использует устройство перераспределения мощности между двигателями  $\mathcal{A}Y$  ( $\mathcal{A}BC + \mathcal{A}M1 + \mathcal{A}M2$ ), представляющее собой планетарный редуктор. В этой трансмиссии скорость вращения ведущих колес регулируется абсолютно плавно, но трансформации крутящего момента, как в обычном вариаторе, не проис-

ходит. Сумма моментов двигателей всегда пропорциональна нагрузочному моменту на колёсах с одним и тем же коэффициентом, что сильно сказывается на расходе энергии тяговой батареи, особенно в динамике.

Использование для оптимизации работы гибридного *ATC* метода динамического программирования не дает готовую стратегию управления гибридным автомобилем, лишь выявляет пути её создания [76,139].

Не в последнюю очередь такая ситуация сложилась из-за избыточного многообразия и отсутствия окончательной определенности структурных схем тяговых приводов в известных разработках гибридных транспортных средств. Предложенная нами типовая схема гибридного *ATC* (рис. 3.2) позволяет упорядочить выбор её элементов и автоматизировать процесс концептуального проектирования на базе двухэтапного модельно-ориентированного подхода с использованием широко распространенных средств современной компьютерной математики.

# 3.2.1 Определение параметров привода гибридного автомобиля на основе разработанной типовой схемы

На первом этапе (назовём его «эскизным» проектированием) осуществляется предварительный расчет мощности энергетических элементов привода ( $\mathcal{A}BC$ , электродвигатель, аккумуляторная батарея) и выбор передаточных отношений основных элементов трансмиссии, имея ввиду следующие обстоятельства:

а) момент сопротивления на колесах горизонтальному движению вычисляется как сумма составляющих от сил сопротивления качению, аэродинамического сопротивления и инерции. Ветровое давление и уклон трассы можно не рассматривать, поскольку они будут парироваться автоматикой управления (путем подключения *ДВС* и регулированием положения его дроссельной заслонки при возникновении дополнительной нагрузки). Результат влияния этих факторов может быть найден на втором – «модельном», – этапе проектирования;

- б) для обоснованного выбора каталожной номинальной мощности двигателей гибридного *ATC* требуется решение системы двух уравнений, отражающих баланс энергетики движущих сил и сил сопротивления движению в экстремальных для этих двигателей режимах. Таких режимов именно два:
  - относительно длительное установившееся движение на максимальной (технически достижимой) скорости транспортного средства, которая требует от *ДВС* максимума крутящего момента, при этом электродвигатель (по условиям перегрева) должен работать в режиме не тяжелее номинального;
  - конец относительно короткого, но интенсивного (желательно линейного) разгона до 100 км/час, см. рис. 2.3а), когда от электродвигателя требуется вся его перегрузочная способность, а ДВС работает на той точке своей внешней характеристики, которая определяется текущей частотой вращения его коленчатого вала;
- в) при предварительной оценке ёмкости аккумуляторной батареи имеем ввиду, что:
  - для максимизации жизненного цикла батареи состояние заряда в
  - ней надо поддерживать в пределах  $SOC=30\div80\%$ , т.е. номинал её ёмкости надо удваивать относительно реально затрачиваемой энергии в основном городском, режиме эксплуатации;
  - на предварительном «эскизном» этапе можно использовать упрощенную формулу расчета ёмкости аккумулятора, с последующим уточнением на втором («модельном») этапе проектирования.

Уравнение баланса моментов на выходном валу двигательной установки:

$$k_{\mathcal{I}\mathcal{I}}^{M} \cdot M_{\mathcal{I}\mathcal{I}}^{\text{HOM}} + i_{cp} \cdot M_{\mathcal{I}BC} = \frac{1}{i_{2n} \cdot i_{\text{var}}} \cdot M_{\kappa}^{V}, \qquad (3.1)$$

где  $k_{\Im\!J}^{M} = M_{\Im\!J}/M_{\Im\!J}^{{\scriptscriptstyle HOM}}$  — текущий коэффициент перегрузки электродвигателя по моменту;

 $M_{\it ЭД}$  и  $M_{\it ЭД}^{\it ном}$  — текущий и номинальный моменты [Hм] электродвигателя на текущей  $\omega_{\it ЭД}$  и номинальной  $\omega_{\it ЭД}^{\it ном}$  скорости [c<sup>-1</sup>] его вращения;

 $M_{\it ДBC}$  — момент  $\it ДBC$  на текущей скорости вращения  $\omega_{\it ДBC}$  его коленчатого вала, Нм;

 $i_{cp}$ ,  $i_{en}$  и  $i_{var}$  — передаточные отношения соответственно согласующего редуктора, главной передачи и вариатора;

 $M_{\kappa}^{V}$  — момент сопротивления на колесах при текущей скорости V автомобиля.

Для описания зависимости момента *ДВС* от скорости вращения его коленчатого вала используем рекомендованную в *Simulink MatLab* [122] обобщенную формулу:

$$M_{\mathcal{A}BC} = \frac{N_{\text{max}}}{\omega_{\text{max}}} \cdot \left( k_1 + k_2 \cdot \frac{\omega_{\mathcal{A}BC}}{\omega_{\text{max}}} - k_3 \cdot \frac{\omega_{\mathcal{A}BC}^2}{\omega_{\text{max}}^2} \right), \tag{3.2}$$

где  $N_{\rm max}$  [кВт] и  $\omega_{\rm max}$  [с<sup>-1</sup>] – каталожные мощность и скорость вращения коленчатого вала ДВС;

 $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  — коэффициенты аппроксимирующего полинома (для  $\mathcal{L}BC$  с искровым зажиганием  $k_1=k_2=k_3=1$ , для дизеля  $k_1=0,6526$ ,  $k_2=1,6948$ ,  $k_3=1,3474$ ).

В соответствии со сказанным ранее, в режиме установившегося движения на максимальной (технически достижимой) скорости  $V_{\rm max}$  машины параметры уравнения (2.2) будут следующие:  $k_{\Im J}^M=1$ ;  $i_{\rm var}=1$ ;  $M_{\Im J}=M_{\Im J}^{\rm hom}$ ;  $\omega_{\Im J}=\omega_{\Im J}^{\rm hom}$ ;  $M_{JBC}=M_{JBC}^{\rm max}$  — максимальное значение крутящего момента JBC на соответствующей скорости вращения  $\omega_{JBC}=\omega_{JBC}^{M_{\rm max}}$  коленчатого вала;  $M_{\kappa}^V=M_{\kappa}^{V_{\rm max}}$  — момент сопротивления на колесах по (2.1) на максимальной скорости движения (при ускорении машины a=0 и скорости вращения колес

 $\omega_{\kappa}^{V_{\text{max}}}$ ); тогда передаточные отношения согласующего редуктора и главной передачи определяются однозначно:

$$i_{cp} = \omega_{JBC}^{M_{\text{max}}} / \omega_{\Im J}^{\text{HOM}}; \ i_{\mbox{\tiny $I$}} = \omega_{\Im J}^{\text{\tiny $HOM$}} / \omega_{\mbox{\tiny $K$}}^{V_{\text{max}}}. \tag{3.3}$$

Во втором режиме, в конце разгона на скорости 100 км/час (рис. 2.3а) максимально используется перегрузочная способность электродвигателя, т.е.  $k_{\Im \mathcal{I}}^{M} = k_{\Im \mathcal{I}}^{\max}$ , при этом скорость его вращения  $\omega_{\Im \mathcal{I}}^{paзгон} = \omega_{\Im \mathcal{I}}^{xx} - (\omega_{\Im \mathcal{I}}^{xx} - \omega_{\Im \mathcal{I}}^{hom}) \cdot k_{\Im \mathcal{I}}^{\max}$  проседает ниже номинальной (здесь  $\omega_{\Im \mathcal{I}}^{xx}$  – скорость холостого хода). Однако регулятор передаточного отношения вариатора в системе управления скоростью машины компенсирует эту просадку, задавая

$$i_{\mathrm{var}}^{\; paзгон} = egin{cases} rac{1}{i_{\scriptscriptstyle {\it z}n}} \cdot rac{\omega_{\it 3/\!\!\!\!/}^{\; paзгон}}{\omega_{\scriptscriptstyle {\it K}}^{100}}, \; \mathrm{если} \; \omega_{\it 3/\!\!\!/}^{\; paзгон} \geq i_{\scriptscriptstyle {\it z}n} \cdot \omega_{\scriptscriptstyle {\it K}}^{100}; \ 1, \qquad \mathrm{если} \omega_{\it 3/\!\!\!/}^{\; paзгон} < i_{\scriptscriptstyle {\it z}n} \cdot \omega_{\scriptscriptstyle {\it K}}^{100}, \end{cases}$$

где  $\omega_{\kappa}^{100}=100/(3,6\cdot R_{\kappa})$  – угловая скорость вращения колес на скорости машины 100 км/час. Считаем, что машина разгоняется линейно с постоянным ускорением  $a^{paseoh}=100/(3,6\cdot t_{100})$ , где  $t_{100}$  – время разгона машины (сек) до скорости 100 км/час. Момент сопротивления на колесах по (2.2) в конце разгона  $M_{\kappa}^{V}=M_{\kappa}^{V_{100}}$  (при ускорении машины  $a^{paseoh}$  и скорости вращения колес  $\omega_{\kappa}^{100}$ ).

Получившаяся из (3.1) система двух уравнений баланса моментов для двух указанных режимов движения машины:

$$M_{3\mathcal{I}}^{hom} + i_{cp} \cdot M_{\mathcal{I}BC}^{max} = \frac{1}{\eta_{mp} \cdot i_{cn} \cdot (V_{\text{max2}} / V_{\text{max 1}})} M_{\kappa}^{V_{\text{max 1}}};$$

$$k_{n \max} \cdot M_{3\mathcal{I}}^{hom} + i_{cp} \cdot M_{\mathcal{I}BC}^{paseoh} = \frac{1}{\eta_{mp} \cdot i_{cn} \cdot (V_{\text{max2}} / 100)} \cdot M_{\kappa}^{V=100}$$
(3.4)

- позволяет, с учетом аналитической зависимости (2.4) момента  $\mathcal{L}BC$  от скорости вращения его коленчатого вала, однозначно определить минимально требуемые мощности электродвигателя и  $\mathcal{L}BC$  проектируемого привода.

Для прикидки требуемой ёмкости  $Q_{\textit{бат}}$  аккумуляторной батареи воспользуемся очевидным выражением:

$$Q_{\delta am} pprox rac{2}{\eta_{\delta am}} W_{cc} pprox rac{2}{\eta_{\delta am}} rac{P_{cc} * T_{cc}}{\eta_{mp}}$$
 ,

где 2 — коэффициент использования ёмкости батареи, учитывающий необходимость поддержания SOC в диапазоне от 80 до 30% = 50%;

 $\eta_{\it 6am} \approx 0.75 - \it KПД$  батареи [157];

 $W_{cc}$  – среднесуточный расход ёмкости батареи;

 $\eta_{mp} \approx K\Pi \square$  трансмиссии;

 $P_{cc} = (P_{\it ЭД}^{\it HOM} - \Delta P_{\it ДВC}) rac{V_{\it cc}}{V_{\it max}} -$  среднесуточная мощность, развиваемая электро-

двигателем в городском режиме движения, кВт;

 $\Delta P_{\mathcal{A}BC} \approx \frac{1}{3} P_{\mathcal{A}\mathcal{A}}^{\scriptscriptstyle HOM}$  — часть мощности, покрываемая в гибридомобиле двигателем внутреннего сгорания, кВт;

$$T_{cc} = \frac{L_{cc}}{V_{cc}}$$
 — среднесуточное время работы электродвигателя;

 $V_{cc}$  – среднесуточная скорость перемещения машины в этом режиме;

 $L_{cc}$  – среднесуточный пробег машины в этом же режиме движения, км.

После подстановки и преобразований получаем простую зависимость:

$$Q_{\delta am} = \frac{2}{\eta_{\delta am} \cdot \eta_{mp}} (P_{\mathcal{I}J}^{HOM} - \Delta P_{\mathcal{I}BC}) \frac{L_{cc}}{V_{max}}$$
(3.5)

Уравнения (3.3—3.5) позволяют однозначно определить исходные значения кинематических и энергетических параметров основных элементов принятой схемы проектируемого гибридного привода.

Для их расчета требуется задавать следующие входные данные:

- 1) по разгонной динамике машины
  - $t_{100}$  время разгона до 100 км/час, сек;
  - $V_{\rm max}$  максимальная (технически достижимая) скорость автомобиля, км/час;
- 2) для оценки сил сопротивления движению машины
  - $m_{asmo}$  полная масса, кг;

- $R_{\kappa}$  радиус качения колес, м;
- f коэффициент сопротивления качению колес;
- $C_x$  коэффициент аэродинамического сопротивления машины;
- $S_{no6}$  лобовая площадь автомобиля, м<sup>2</sup>;
- - $n_{\Im J}^{HOM}$  номинальную частоту вращения, об/мин;
  - $n_{\Im \mathcal{I}}^{xx}$  частоту вращения на холостом ходу, об/мин;
  - $k_{\Im I}^{\max}$  перегрузочная способность;
- 4) для расчета мощности  $N_{\mathcal{A}\mathcal{B}\mathcal{C}}^{\max}$  двигателя внутреннего сгорания, кВт
  - $n_{\mathcal{A}BC}^{N_{\text{max}}}$  частоту вращения коленчатого вала при максимальной мощности, об/мин;
  - $n_{\mathcal{A}BC}^{M_{\text{max}}}$  частоту вращения коленчатого вала при максимальном моменте, об/мин;
- 5) для оценки требуемой ёмкости аккумуляторной батареи  $Q_{\textit{бат}}$ , кВт $\cdot$ час
  - $L_{cc}$  среднесуточный пробег машины, км.

Расчет легко реализуется в электронной таблице MS Excel (рис.3.4), при этом для наглядности сопровождается графиками интересующих координат процесса. Фактически это конкретизированная диаграмма рис. 2.3а в натуральных единицах физических величин, отличающаяся только тем, что на участке времени до  $t_{100}$  передаточное отношение трансмиссии (точнее, вариатора) и момент двигательной установки  $M_{\partial y}$  рассчитывается с учетом просадки скорости электродвигателя из-за нарастания нагрузки по мере разгона.

Для удобства пользователей и исключения ошибок лист *Excel*-формуляра защищен от случайного изменения содержимого формульных ячеек: для ввода данных доступны только ячейки задаваемых величин, выделенные желтым цветом. В таблице расчета серым цветом выделены две строки: средняя соответствует концу разгона машины на 100 км/час, предпоследняя —

установившемуся движению на максимальной скорости. Итог «эскизного» расчета выводится в диапазоне ячеек, расположенных в красном прямоугольнике слева внизу листа формуляра. Эти результаты являются исходными для последующего «модельного» этапа проектирования привода.

# 3.2.2 Разработка динамической имитационной модели гибридного автомобиля

В формуляре (рис. 3.4) заложены параметры динамики и ходовой платформы машины, близкие к самому продаваемому российскому автомобилю «Гранма». В соответствии с полученными расчетными мощностями выбираем из каталогов: ДВС от ВАЗ-1111 мощностью 21,5 кВт (29,3 л.с.), общепромышленный электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения 2ПН160М с номинальными данными 18 кВт, 220 В, 3150 об/мин, а также тяговую батарею от электромобиля Hyundai Ionic ёмкостью 28 кВт-час.

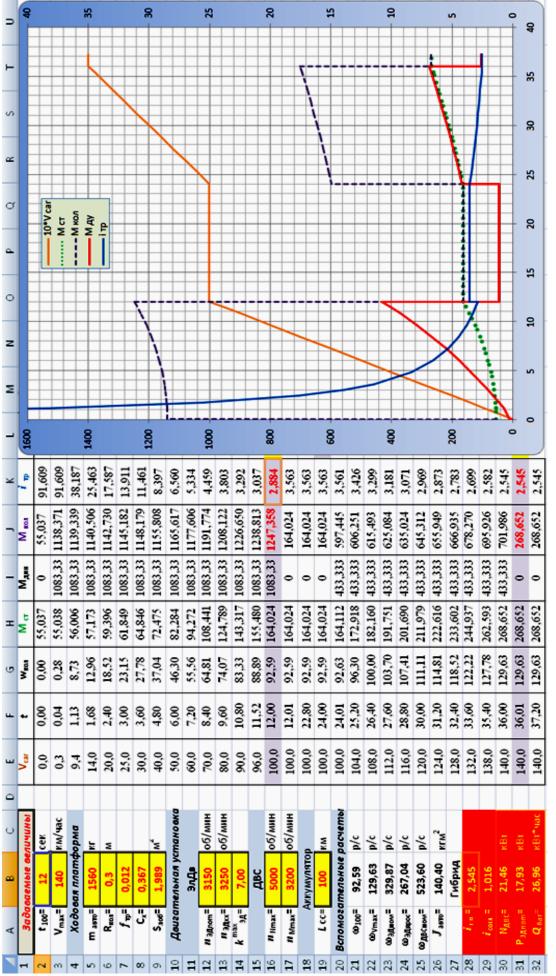


Рисунок — 3.4 Лист Excel-формуляра концетуального расчета привода гибридного автомо-

впио

Модель тягового привода проектируемого гибридного автомобиля создана на базе разработанной модели электромобиля (рис. 2.6) и приведена на рис. 3.5.

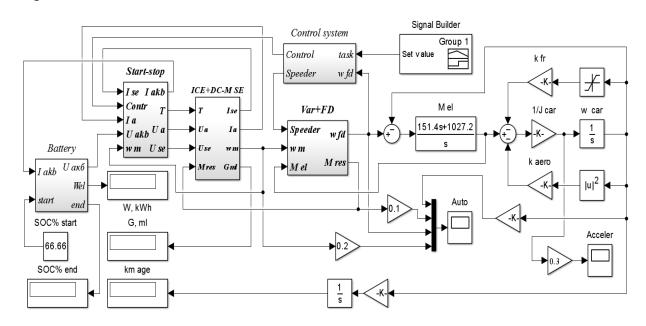


Рисунок 3.5 - Simulink-модель привода гибридного автомобиля Модели дополительные элемент привода гибридного автомобиля приведены ниже.

*Двигательная установка* (на полной модели рис. 3.5 это субблок *ICE+DCM-SE*, он же в раскрытом виде – рис. 3.6) включает в себя

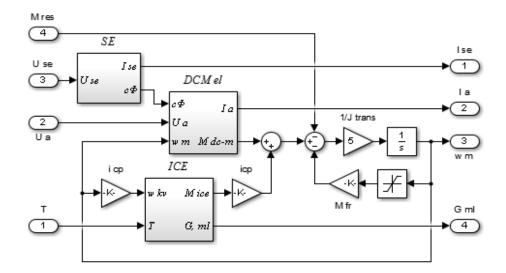


Рисунок 3.6 - Simulink-модель двигательной установки двигатель постоянного тока независимого возбуждения DCMel и ДВС — блок ICE. В модели рис. 3.6 учтены собственные потери на трение  $(M_{fr})$  и переменность потока возбуждения  $(c\Phi)$ . Входами модели являются сигналы:

T — положение дроссельной заслонки (максимально 1 при полном открытии),  $U_a$  — напряжение на якоре,  $U_{se}$  — напряжение на обмотке возбуждения,  $M_{res}$  — момент нагрузки двигательной установки. Выходные сигналы:  $I_{se}$  — ток возбуждения,  $I_a$  — ток якоря,  $w_m$  — скорость вращения вала электродвигателя,  $G_m$  — количество расходуемого топлива,  $M_a$ .

Содержимое субблока *ICE* -двигатель внутреннего сгорания, блока  $i_{cp}$  - согласующий редуктор, и модели механической части установки (блоки  $1/J_{trans}, M_{fr}, \frac{1}{s}$  и блок ограничения) поэлементно расккрыты на рис. 3.7.

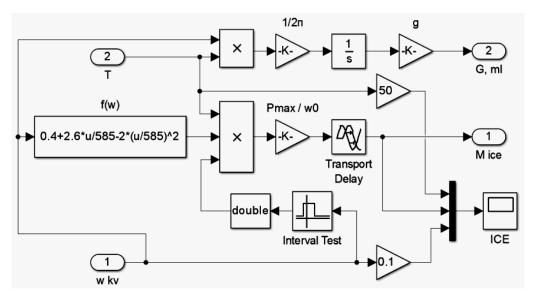


Рисунок 3.7 - Simulink-модель двигателя внутреннего сгорания (*ICE*)

Особенностью модели рис. 3.7 является задание внешней скоростной характеристики ДВС (по моменту) аппроксимирующим полиномом f(w) с коэффициентами, найденными методом наименьших квадратов по минимуму отклонения от экспериментальных данных двигателя BA3-1111 [155,116], рис.3.8.

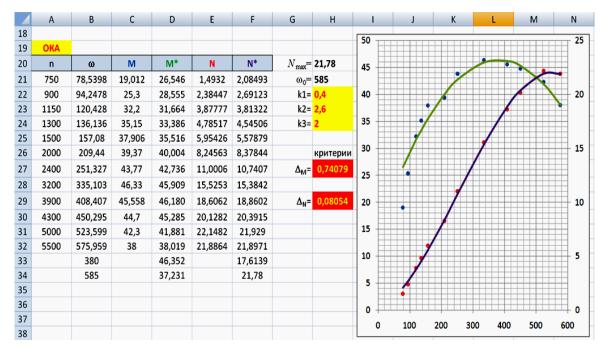


Рисунок 3.8 - Аппроксимация экспериментальных внешних скоростных характеристик *ДВС ВАЗ-1111* 

Соответственно, на рис. 3.9, приведена часть *Excel*-формуляра, пересчитанная в соответствии с уточненной аппроксимацией характеристик *ДВС*.

	Α	В	С	C		
1	Задаваемые величины					
2	t <sub>100</sub> =	12	сек			
3	V <sub>max</sub> =	140	км/час			
4	Хо∂о	вая платф	орма			
5	R <sub>ROJ</sub> =	0,3	м			
6	m <sub>авто</sub> =	1560	KE			
7	k <sub>πp</sub> =	0,012				
8	C <sub>x</sub> =	0,367				
9	S <sub>ac6</sub> =	1,989	m <sup>2</sup>			
10	Двигат	пельная ус		,		
11		ЭлДв				
12	# <sub>ЭДпот</sub> =	3150	об/мин			
13	<i>п</i> <sub>ЭДхх</sub> =	3250	об/мин			
14	<i>k</i> <sup>max</sup> эд=	7,00				
15		двс				
16	# Mmax=	3628,73	об/мин			
17	# Nmax=	5586,34	об/мин			
18	Аккумулятор					
<b>1</b> 9	L cc=	100	KM			
20	Вспомого	тельные	расчеть	,		
21	∞ <sub>100</sub> =	92,59	p/c			
22	∞ <sub>Vmax</sub> =	129,63	p/c			
23	⊛ <sub>ЭДном</sub> =	329,87	p/c			
24	∞ <sub>ЭДпрос</sub> =	267,04	p/c			
25	<b>∞</b> двсном=	585,00	p/c			
26	J <sub>asto</sub> =	140,40	KEM <sup>2</sup>			
27		Гибрид				
28	<i>i</i> , n =	2,545				
29	i cora =	1,152				
30	N <sub>ABC</sub> =	20,63	кВт			
3 <b>1</b>	Рэдпот=	18,14	кВт			
32	<b>Q</b> <sub>бат</sub> =	27,28	кВт*час			

Рисунок 3.9 - Расчетная часть уточненного *Excel*-формуляра

Видно, что передаточное отношение согласующего редуктора, расчетные мощности двигателей и требуемая ёмкость тяговой батареи несколько изменились, но всё равно укладываются в предварительно выбранный вариант.

Субблок *Start-stop* на рис. 3.10 выполняет функции силового коммутатора 11 (см. рис. 3.2) со встроенным блоком управления. Он реализует правильную очередность включения-отключения  $\mathcal{L}BC$ , якорной цепи электродвигателя, его обмотки возбуждения и сопротивления динамического торможения  $R_d$ , а также формирует сигнал «T» управления дроссельной заслонкой не только в функции положения педали акселератора, но с учетом состояния заряда тяговой батареи, рис. 3.10, дополнительным  $\Pi$ -регулятором (блоки «221» и «-K-»).

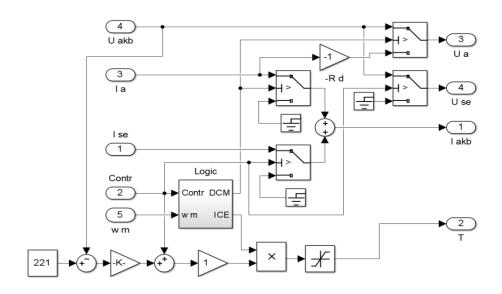


Рисунок 3.10 - Simulink-модель системы Start-stop гибридного автомобиля

В субблоке *Start-stop* имеется субблок *Logic*, назначение которого – выработка логических сигналов управления (рис. 3.11) силовыми коммутаторами двигателей (ключевые блоки на рис. 3.10).

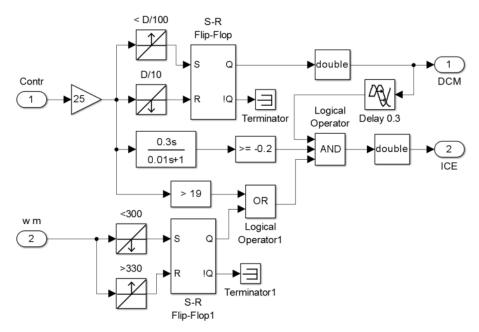


Рисунок 3.11 - *Simulink*-модель блока логики управления гибридного автомобиля

Верхний *S-R триггер* блока логики срабатывает по нарастанию сигнала *Contr* (= *Control*, т.е. сразу по нажатию на педаль акселератора якорь электродвигателя подключается к напряжению батареи) и выключается по спаду этого сигнала до заданного уровня (при котором якорь электродвигателя отключается от батареи и замыкается на сопротивление электродинамического торможения).

Нижний *S-R триггер* блока логики срабатывает при просадке (< 300 рад./с) скорости вращения электродвигателя под нагрузкой во время интенсивного разгона и подключает ему в помощь *ДВС*; когда скорость электродвигателя нарастает почти до номинальной (>330 рад./с, т.е. нагрузка спадает), триггер выключается. Вторым условием включения *ДВС* является достижение сигналом *Contr* уровня, соответствующего движению машины со скоростью более 76 км/час (>19 м/с).

### 3.2.3 Результаты моделирования привода гибридного автомобиля

Модель привода гибридного автомобиля исследовалась в четырех режимах движения, реализуемых соответствующими временными диаграммами сигналов от блока *Signal Builder* (рис. 3.5).

<u>Режим 1</u>: на 5-й сек (при  $SOC_{start}$ =  $2/3SOC_{max}$ ) разгон с места до скорости 100 км/час, затем на 30-й сек доразгон до 140 км/час, на 65-й сек торможение до 100 км/час и с 85-й сек полная остановка — для оценки динамических характеристик машины.

<u>Режим 2</u>: имитация пробега в 100 км по шоссе с различными установившимися скоростями и начальными зарядами аккумуляторной батареи – для оценки эксплуатационных характеристик в условиях длительных перегонов.

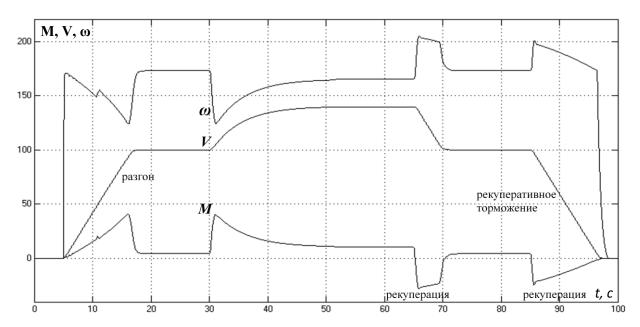
<u>Режим 3</u>: имитация суточного пробега в городском цикле при выработке ресурса батареи от SOC=80% до SOC=30% — для оценки эксплуатационных характеристик в условиях максимальной интенсивности движения.

<u>Режим 4</u>: самозарядка тяговой батареи, когда ДПТ работает в режиме генератора, вращаемый ДВС, при этом сцепление 8 включено, а сцепление 13 выключено (рис. 3.2)

Результаты вычислительных экспериментов оказались следующие.

### <u>Режим 1.</u>

Полученные при моделировании время (рис. 3.12) разгона до скорости 100 км/час и, в конце диаграммы, время торможения до полной остановки одинаковы и равны 12 сек, тахограммы линейны, точно как и задано в *Excel*формуляре. При этом пиковый момент электродвигателя 360 Hm, коэффициент его перегрузки  $k_{2J}^{\max} = 6,6$  даже меньше заданного в формуляре  $k_{2J}^{\max} = 7$ .



M - 1/10-я момента сопротивления на валу двигательной установки,

V – продольная скорость движения машины, км/час;

 $\omega - 1/2$ -я скорости вращения тягового электродвигателя,  $c^{-1}$ .

Рисунок 3.12 - Динамика проектируемого гибридного автомобиля Некоторое отличие поведения момента в начале торможений (от теоретической кривой 3 на рис. 2.3б) объясняется тем, что в модели за счет действия регуляторов системы управления путём автоматической корректировки передаточного отношения вариатора учитываются просадка (при нарастании нагрузки) и превышение сверх номинала (при сбросе нагрузки) скорости вращения электродвигателя (кривая ω, рис. 3.12). Отметим, что это даже несколько увеличивает эффективность рекуперации.

Скорость машины от 100 до технически достижимых 140 км/час нарастает дольше (за 20 с) и нелинейно, но *существенно* ускорение падает только после 120 км/час. Интенсивность торможений при этом совершенно не меняется. Таким образом, требования к динамике, заданные в *Excel*-формуляре на предварительном этапе проектирования удовлетворяются полностью. Некоторое отличие поведения момента в начале торможений (от теоретической кривой  $M_{\partial y}$  на рис. 2.36) объясняется тем, что в модели за счет действия регуляторов системы управления путём автоматической корректировки передаточного отношения вариатора учитываются просадка (при нарастании на-

грузки) и превышение сверх номинала (при сбросе нагрузки) скорости вращения электродвигателя (кривая ω, рис. 3.12). Отметим, что это даже несколько увеличивает эффективность рекуперации.

Скорость машины от 100 до технически достижимых 140 км/час нарастает дольше (за 20 с) и нелинейно, но *существенно* ускорение падает только после 120 км/час. Интенсивность торможений при этом совершенно не меняется. Таким образом, требования к динамике, заданные в *Excel*-формуляре на предварительном этапе проектирования, удовлетворяются полностью.

#### Режим 2

Результаты моделирования «шоссейных» пробегов дальностью ровно в 100 км пути сведены в таблицу 2.1:

Таблица № 2.1- Пробег гибридного транспортного средства по «шоссе»

Таозищат	таблица ж 2.1- пробет тибридного граненортного ередетва но «тибесе»				
Изменение	Расход	Расход* ёмко-			
SOC, %	топлива,	сти батареи,	Примечание		
500, 70	Л	кВт∙час			
		на скорости 7	75 км/час		
80 - 28,96	0	13,96	режим электромобиля,		
20,70	U	13,70	топливо не расходуется		
		на скорости 8	80 км/час		
90 - 78,87	2,60	3,27	при дальней (свыше 200-300 км)		
80 - 78.22	3,23	0,50	езде на скорости 80 км/час сис-		
55 - 69,19	4,25	-3,99	тема управления сама выводит		
			двигательную установку на ре-		
			жим, при котором заряд бата-		
30 - 58,25	5,11	-7,74	реи устанавливается на посто-		
			янном уровне 77,47%, а расход		
			топлива – 3,29 л/100 км		
		на скорости 9	90 км/час		
90 - 76,61	2,78	3,91	при дальней езде на скорости 90		
80 - 75,34	3,36	1,31	км/час система управления вы-		
55 - 65.21	4,32	-2,87	водит двигательную установку		
			на режим, при котором заряд		
20 46 27	1.61	4.40	батареи устанавливается на по-		
30 - 46,27	4,64	-4,40	стоянном уровне 72,57%, а рас-		
			ход топлива – 3,58 л/100 км		
на скорости 100 км/час					
90 - 73,59	2,98	4,75	при дальней езде на скорости 100		
80 - 71,67	3,52	2,34	км/час система управления вы-		
55 – 58,10	4,25	-0,89	водит двигательную установку		

30 – 31,61	4,10	-0,45	на режим, при котором заряд батареи устанавливается на постоянном уровне 65,64%, а расход топлива — 3.77 л/100 км		
		на скорости 1	'10 км/час		
90 - 69,78	3,18	5,81	на скорости 110 км/час и выше		
80 - 67,14	3,67	3,60	система управления при любом		
55 – 44,28	3,81	2,92	заряде батареи не позволяет электродвигателю переходить в генераторный режим и заставляет его		
30 - 14,57	3,54	3,77			
	на скорости 120 км/час				
90 - 62,12	3,20	7,93	помогать ДВС в преодолении		
80 - 56,53	3,50	6,50	возросшего аэродинамического		
55 – 29,71	3,42	6,78	сопротивления, при этом с рос- том скорости расход топлива уменьшается		
30 – (-2,6)	3,09	7,44	после 80 км пробега скорость на- чинает спадать, вплоть до 100 км/час в конце		
на скорости 140 км/час					
80 – 28,74	2,92	13,89	после 50 км трассы скорость медленно спадает до 134 км/час в конце пробега		

<sup>\* –</sup> отрицательные значения расхода ёмкости означают, что батарея заряжается, а электродвигатель работает в генераторном режиме.

Строки таблицы, в которых заряд батареи *SOC* опускается существенно ниже значения 30%, залиты желтым цветом; работа машины в этих режимах нежелательна.

Сравнив первую и последнюю строки таблицы увидим, что из технически достижимой скорости 140 км/час 75 обеспечиваются электродвигателем, а остальные 65 реализуются двигателем внутреннего сгорания, работающим на максимуме развиваемого момента и минимуме потребления топлива (2,92 л/100 км).

На модели выявлена интересная особенность примененного вариаторного (параметрического) способа управления: во всем диапазоне скоростей движения машины частота вращения коленчатого вала  $\mathcal{L}BC$  поддерживается

практически постоянной, соответствующей максимуму момента на его полной и частичных внешних характеристиках.

Из таблицы также видно, что, если двигаться на трассе со скоростями от 80 до 100 км/час, то дальность пробега машины ограничена только ёмкостью её топливного бака, а эксплуатационный расход составляет  $3,2\div5,1$  л/100 км в зависимости от состояния заряда тягового аккумулятора (данные с начальным SOC = 90% не учитываем). Движение с бо́льшей скоростью ( $110\div140$  км/час) возможно, но его желательно периодически чередовать с движением на скорости «быстрой» путевой подзарядки 80 км/час (для сохранения жизненного цикла батареи).

### Режим 3

Результаты моделирования гибридного автомобиля в «городском» режиме движения (повторяющиеся ездовые циклы ARDC) также сводим в таблицу:

Таблица № 2.2 - Городской режим движения гибридного автомобиля по циклу ARDC

<b>№</b> цик- ла	Изменение <i>SOC</i> , %	Расход топлива, л	Расход ёмкости батареи, кВт·час	Пробег за цикл, км
1	80 – 69,98	0,343	2,589	22,89
2	69,98 – 60,72	0,394	2,348	22,88
3	60,72 – 51,99	0,430	2,176	22,87
4	51,99 – 43,77	0,466	2,002	22,86
5	43,77 – 40,52	0,780	0,62	22,85
6	40,52 – 40,50	0,983	-0,257	22,86

7 40,50 – 40,52	0,985	-0,267	22,86
-----------------	-------	--------	-------

В пересчете на 100 км пути в первых 4-х циклах городского режима (что соответствует заданному в формуляре среднесуточному пробегу городского ATC) и расходе заряда батареи от SOC= 80% в начале движения до 43,77% имеем: расходы топлива 1,78 литра и ёмкости батареи 9,96 кВт·час.

6-й и 7-й циклы практически идентичны, заряд батареи устанавливается на уровне SOC= 40,5%, то есть при таком состоянии батареи можно ездить в городском режиме сколь угодно долго без подзарядки аккумулятора, но расход бензина будет 0,984·100/22,86 = 4,3 литра на 100 км. Иначе говоря, хочешь экономичную езду — через каждые 90 км в городе подзаряжай батарею до 80%. Подзарядку можно осуществлять как от внешнего источника электрической энергии (дешевле), так и от собственной двигательной установки (несколько дороже) в режиме стояночной самозарядки.

### Режим 4

Режим «стояночной» самозарядки (джойстик управления в 4-ой позиции) предусматривает отключение трансмиссии сцеплением 13 при включенном сцеплении 8 (рис. 2.3) и подачу сигнала «task», соответствующего заданию скорости 100 км/час, в блок Control system (рис. 2.8).

Машина стоит, электродвигатель как стартер заводит  $\mathcal{A}BC$ , последний разгоняется до своей (около номинальной) скорости, электродвигатель переходит в генераторный режим — батарея заряжается. Набрав нужный заряд, система автоматически отключается, джойстик перебрасывается в положение «нейтраль».

Моделирование этой ситуации с разряженной до SOC= 30% батареей показывает, что подзарядка до SOC= 80% достигается ровно за 1 час работы привода, причем расход топлива составляет 3,816 л, а в батарею закачивается 13,98 кВт·ч энергии.

### 3.2.4 Собственно методика проектирования гибридного автомобиля

Рассмотренный пример концептуального проектирования гибридного автомобиля позволяет его обобщить и на этой основе предложить достаточно автоматизированный и универсальный алгоритм, состоящий из двух этапов.

Первый из них заключается в том, что на базе разработанной типовой структуры тягового привода гибридного ATC осуществляется предварительный обоснованный расчет параметров основных элементов привода: мощности двигателей (внутреннего сгорания и электрического), ёмкости тягового аккумулятора, передаточных отношений главной передачи и согласующего редуктора. Расчет производится мгновенно по занесении начальных исходных данных проектируемого гибридного автомобиля в разработанный нами Excel-формуляр. После выбора из каталогов готовых элементов (или их проектирования) исходные для формуляра данные уточняются, и осуществляется повторный (поверочный) расчет.

На втором этапе создаётся имитационная модель гибридного автомобиля (с конкретными параметрами основных элементов, выбранных на финише первого этапа). С её помощью определяются ожидаемые характеристики машины в интересующих эксплуатационных режимах.

### Выводы по третьей главе

- 1. Предложен и обоснован вариант реализации параметрического принципа управления скоростью гибридного транспортного средства вариатором, без регулирования скорости вращения двигательной установки.
- 2. Разработана типовая схема гибридного автотранспортного средства на основе предложенного принципа управления скорости транспортного средства прямым бесступенчатым регулированием передаточного числа вариатора.

- 3. Разработана методика двухэтапного концептуального проектирования привода гибридного транспортного средства: первый этап обоснованный предпроектный расчет параметров привода; второй этап уточнение эксплуатационных показателей на его компьютерной модели в основных режимах движения.
- 4. Для обеспечения работы *ДВС* гибридного транспортного средства в зоне эффективной отдачи введен дополнительный контур регулирования положения дроссельной заслонки не только от положения педали акселератора, но и от уровня заряда тяговой батареи.
- 5. Результаты моделирования гибридного транспортного средства, разработанного на базе серийного автомобиля *Лада «Гранта»* с предложенным способом регулирования скорости показали: энергетические затраты в городском режиме у гибридного автомобиля на 43% меньше, чем у аналогичного традиционного автомобиля с *ДВС*.

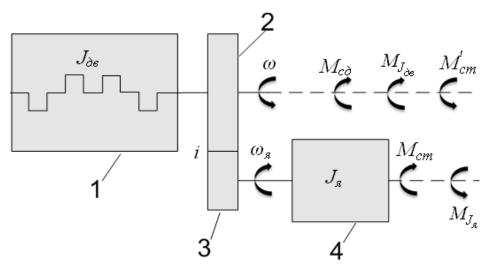
# 4. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИВОДОВ ПУСКА *ДВС* И СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ АВТОМОБИЛЯ

### 4.1 Обоснование системы двухэтапного пуска ДВС

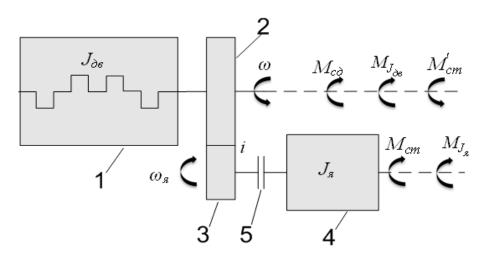
Уровень технической готовности АТС, тракторной и другой моторизованной техники, особенно в зимний период эксплуатации, определяется в основном надежностью работы системы пуска его двигателя. Часто даже незначительное улучшение работы элементов системы «стартер-ДВС» может дать очень значительный эффект. Все упирается, в так называемую минимальную пусковую частоту вращения коленчатого вала двигателя для данной температуры п<sub>тіп</sub>, т.е. частоте вращения, при которой обеспечивается пуск двигателя за две попытки пуска. Продолжительности каждой попытки не более 10с для бензиновых двигателей и не более 15с для дизелей, интервал между попытками — 1...1,5 мин. [88]. С понижением температуры воздуха значение п<sub>тіп</sub> повышается и увеличивается момент сопротивления вращению, который может не преодолеть мощность, развиваемая аккумуляторной батареей. Кроме того, ухудшаются условия испарения, и, следовательно, воспламенения топлива.

Создатели существующих систем пуска это хорошо знают, но тем не менее все нынешние системы подключают электростартер к аккумуляторной батарее после механического соединения шестерни на его валу с венцом маховика  $\mathcal{A}BC$ , как показано на рисунке 4.1. Это требует выдачи значительной пиковой мощности от аккумуляторной батареи, так как крутящий момент стартера должен преодолеть не только момент сопротивления двигателя, но и моменты инерции его вращающихся масс и якоря самого стартера. Учитывая, что электростартер питается от энергоисточника ограниченной мощности, который снижает свою работоспособность с понижением окружающей температуры, целесообразно сначала , произвести запуск электростартера в холостую, а затем уже подключить его, набравшего значительный запас энергии, к маховику  $\mathcal{A}BC$ , т.е. сделать пуск двухэтапным, как показано на рисунке

4.2. Для осуществления такого пуска необходимо иметь муфту сцепления или электромагнитную муфту сцепления (поз. 5 рис. 4.2). При таком запуске снижается нагрузка на электростартер и облегчается режим работы аккумуляторной батареи. Это подтверждается сравнением двух видов стартерного пуска по уравнениям равновесия крутящих моментов при пуске ДВС согласно рисункам 4.1 и 4.2.



1 – ДВС; 2 – маховик ДВС; 3 – шестерня привода; 4 –стартер;
 Рисунок 4.1 – Кинематическая схема традиционной системы стартерного пуска (ТСП)



1-ДВС; 2- маховик ДВС; 3- шестерня привода; 4-стартер; 5- сцепление (электромагнитная муфта)

Рисунок 4.2 — Кинематическая схема двухэтапной системы стартерного пуска (ДСП).

Для традиционного пуска ( $TC\Pi$ ) имеем уравнение:

$$M_{cm} = M_{c\partial e} + M_{J\partial e} + M_{Jg}$$
 (4.1)

а для двухэтапного пуска (ДСП):

$$M_{cm} + M_{Jq} = M_{J\partial e} + M_{c\partial e}$$
 (4.2)

где  $M_{\it cm}^{'}$  — момент создаваемый стартером, приведенный к валу  ${\it ДВC}$   $M_{\it cm}^{'}=i\cdot M_{\it cm}$  (i — передаточное число системы « ${\it ДВC}$ -стартер»);

 $M_{c\partial s}$  – момент сопротивления ДВС при пуске;

 $M_{\it Jos}$  — суммарный инерционный момент вращающихся элементов  $\it I\!BC$ 

$$M_{J\partial s} = J_{\partial s} \frac{d\omega}{dt} \tag{4.3}$$

 $J_{\scriptscriptstyle\partial \mathcal{B}}^{'}$  — момент инерции  $\mathcal{A}BC$ , приведенный к коленчатому валу;

 $\omega$  - угловая скорость коленчатого вала;

$$M'_{J_R} = J'_R \frac{d\omega}{dt}; \quad J'_R = i^2 \cdot J_R$$

ских затрат, равное двукратной величине кинетической энергии вращающегося якоря стартера:

$$\Delta W = 2W_g = J_g \cdot \omega_g^2 \tag{4.4}$$

Увеличение момента инерции системы пуска при двухэтапном пуске значительно повышает ее возможности.

Для выявления возможностей и определения основных параметров, от которых зависит эффективность работы двухэтапного стартерного пуска, необходимо проанализировать его уравнение (4.2). После подстановки в уравнение значений всех его составляющих, имеем:

$$M_{cm} \cdot i - M_{c \partial \theta} + i^2 J_{\theta} \frac{d\omega}{dt} - J_{\partial \theta} \frac{d\omega}{dt} = 0$$
 (4.5)

Это уравнение справедливо с момента включения сцепления 5, которое соединяет запущенный вхолостую электростартер и коленчатый вал.  $\mathcal{L}BC$  имеет кривошипно-шатунные механизмы и его приведенный момент и его приведенный момент инерции имеет переменный характер, зависящий от угла поворота коленчатого вала. Но учитывая то, что динамический момент, создаваемый моментом инерции двигателя в зимних условиях, составляет всего 1-3% от общего момента сопротивления вращению коленчатого вала, то  $J_{\partial \theta}$  в уравнении (4.3) принимаем постоянным [89]. Выражаем из этого уравнения изменение угловой скорости за время пуска:

$$d\omega = \frac{M_{CT} \cdot i - M_{C AB}}{J_{AB} - J_{SI} \cdot i^2} dt$$
 (4.6)

Интегрируем обе части этого уравнения с учетом того, что угловая скорость вращения коленчатого вала двигателя изменяется от  $\omega_{\text{нач}}$  до  $\omega_{\text{min}}$ :

$$\int\limits_{\omega_{ ext{HA}^{ ext{Y}}}}^{\omega_{ ext{min}}}d\omega=\int\limits_{0}^{ ext{t,don}}rac{ ext{M}_{ ext{c}}\cdot i- ext{M}_{ ext{c}} ext{dB}}{J_{ ext{d}^{ ext{B}}}-J_{ ext{f}}\cdot i^{2}}dt$$

 $\omega_{min}$  — наименьшая при данных условиях угловая скорость коленчатого вала, достаточная для обеспечения пуска двигателя;

 $\omega_{nay}$  — начальная скорость вращения коленчатого вала двигателя, равная  $\omega_{xx}/i;$   $\omega_{xx}$  — угловая скорость холостого хода электростартера.

Время при этом изменяется от нуля (момент включения сцепления или муфты 5, рис. 4.2) до допустимого времени  $t_{\text{доп}}$ :

 $t_{\partial on}$  — допустимая по нормативу продолжительность одной попытки пуска двигателя: для бензиновых двигателей не более 10с, для дизельных двигателей — 15...20c [88].

Считая, что  $M_{cm}$ ,  $M_{c \partial b}$ ,  $J_{\partial b}$  и  $J_{g}$  постоянными величинами для конкретных условий пуска  $\mathcal{A}BC$ , после интегрирования обеих частей уравнения и выражая из неё  $\omega_{min}$ , получаем:

$$\omega_{\min} = \omega_{\text{Haq}} - \frac{M_{\text{CT}} \cdot i - M_{\text{C } \text{AB}}}{J_{\text{B}} \cdot i^2 - J_{\text{AB}}} t_{\text{ДO\Pi}}$$
(4.7)

По (4.7) можно рассчитать  $\omega_{min}$  и выяснить возможность запуска  $\mathcal{A}BC$  без дополнительного маховика на валу стартера. Для этого сравниваем рассчитанное значение  $\omega_{min}$  с требуемым  $\omega_{min}^{\mathrm{T}}$  из кривой зависимости  $\omega_{\min} = f(t^{\circ})$  (Приложение «А»). Если  $\omega_{min} < \omega_{min}^{\mathrm{T}}$ , то необходим дополнительный маховик на валу стартера. Момент инерции этого маховика  $J_{\scriptscriptstyle M}$ , который обеспечил бы требуемую угловую скорость вращения коленчатого вала при пуске  $\mathcal{A}BC$ , определяется из выражения (4.8):

$$J_{M} = \frac{1}{i^{2}} \left[ J_{\partial \theta} - \frac{\left( M_{cm}^{"} \cdot i - M_{c \partial \theta}^{'} \right) t_{\partial on}}{\omega_{min} - \omega_{nay}} \right] - J_{g}$$

$$(4.8)$$

где  $M^{''}_{cm}$  - величина сниженного вращающего момента стартера при низких температурах воздуха из-за ухудшения отдачи энергии аккумуляторной батареей,  $H_{\rm M}$ ;

 $M_{c\,\partial s}^{'}$  - величина повышенного момента сопротивления вращению коленчатого вала при низких температурах воздуха из-за повышения вязкости моторного масла,  $H_{\rm M}$ .

Таким образом, для успешного пуска  $\mathcal{A}BC$  в экстремальных условиях необходимо обеспечить следующее соотношение:

$$(M_{\partial u_H c_n} + M_{\partial u_{HM}}) \ge (\Delta M_{c_m} + \Delta M_{c \partial \theta}) \tag{4.9}$$

где  $M_{\partial u h \ cn}$  - динамический момент, создаваемый инерционными массами системы пуска;

 $M_{\partial u H M} = i^2 J_M d\omega/dt$  — динамический момент, создаваемый дополнительным маховиком на валу стартера, приведенный к валу  $\mathcal{L}BC$ , Нм;

 $\Delta M_{cm} = (M_{cm} - M''_{cm})$  — величина снижения вращающего момента стартера при низких температурах воздуха из-за ухудшения отдачи энергии аккумуляторной батареей, Нм;

 $M_{cm}$  и  $M''_{cm}$  — соответственно, номинальный и сниженный крутящие моменты электростартера, Нм;

 $\Delta M_{c \, \partial s} = M'_{\, c \, \partial s}$  -  $M_{c \, \partial s}$  - величина повышения момента сопротивления вращению коленчатого вала в экстремальных условиях, Нм;

 $M_{c \, \partial 6} \, u \, M'_{\, c \, \partial 6}$ — соответственно, моменты сопротивления вращению коленчатого вала при нормальных и экстремальных условиях, Нм.

При расчете момента инерции маховика,  $J_{\scriptscriptstyle M}$  для электростартера необходимо учитывать, что с понижением температуры воздуха, момент стартера  $M_{cm}$  снижается, а момент сопротивления вращению коленчатого вала,  $M_{c\;\partial\theta}$  повышается. Зависимость изменения тока короткого замыкания аккумуляторной батареи от температуры окружающего воздуха, представлена в приложении «В». Крутящий момент стартера,  $M_{\rm cT}$  прямо пропорционален току, выдаваемому батареей. Кривая изменения момента сопротивления вращению коленчатого вала,  $M_{c\;\partial\theta}$  от температуры окружающего воздуха для автомобиля марки  $\Gamma A3$ -53 представлена в приложении «I».

При пуске момент сопротивления вращению коленчатого вала периодически изменяется по времени и углу поворота коленчатого вала из-за чередования тактов сжатия и расширения. Кроме того, используемые на автомобилях и тракторах электростартеры постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения имеют «мягкие» механически характеристики M=f(n), характеризующиеся значительными колебаниями частоты вращения и изменением нагрузочного момента. Поэтому для стартерного пуска характерна высокая неравномерность вращения коленчатого вала даже при установившемся режиме его с постоянной средней частотой вращения [97]. Это отрицательно влияет на процесс пуска, особенно в зимний период.

Применение в качестве электростартера двигателя постоянного тока (ДПТ) с параллельным возбуждением или возбуждением от постоянных магнитов, что можно приравнять к независимому возбуждению, значительно снижает неравномерность вращения коленчатого вала, т.к. они имеют более «жесткие» механические характеристики, т.е. изменение нагрузочного момента мало влияет на их частоту вращения.

Применение двухэтапного пуска ДВС ATC, трактора имеет следующие преимущества перед традиционными системами:

- при пуске электростартер получает дополнительную энергию в виде кинетической энергии своего вращающегося якоря и промежуточных звеньев;
- -она дает возможность использовать двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением, имеющий более «жесткую» механическую характеристику и обеспечивающий более равномерное вращение коленчатого вала;
- стартер и аккумуляторная батарея работают в менее напряженном режиме, чем при традиционном пуске, что повышает их ресурс;
- стартер при таком способе пуска можно использовать в качестве генератора и обойтись одной электрической машиной;

- эту электрическую машину можно использовать в режиме генераторного торможения транспортного средства и использовать возвращенную энергию для подзарядки аккумуляторной батареи.

При низких температурах  $P_{\partial gc}$  значительно возрастает: во-первых, из-за повышения вязкости масла и во-вторых, из-за необходимости повышения угловой скорости вращения коленчатого вала  $\mathcal{A}BC$ . Для обеспечения надежного пуска двигателя необходимо, чтобы угловая скорость вращения коленчатого вала была равна или превышала, так называемую, минимальную пусковую угловую скорость вращения  $\omega_{\min}$ . Она обеспечивает процесс подготовки рабочей смеси в бензиновом двигателе, а для дизельного двигателя создает достаточную температуру в конце такта сжатия при выполнении условия  $\omega_{\kappa g} \geq \omega_{\min}$ . Минимальная пусковая угловая скорость коленчатого вала зависит от температуры окружающего воздуха [97]. На получение требуемой угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя в зимнее время влияет также снижение энергетических возможностей аккумуляторной батареи, которое , в первую очередь, происходит из-за повышения её внутреннего сопротивления. Напряжение на клеммах батареи:

$$U = E - I(R + R_{eu}) (4.10)$$

где: E – электродвижущая сила батареи, B;

I — сила тока, отдаваемая батареей;

*R*– сопротивление цепи питания стартера, Ом;

 $R_{\rm \scriptscriptstyle BH}$  — внутреннее сопротивление батареи.

При понижении температуры  $\mathcal{I}(R)$   $\mathcal{I}(R)$  изменяется незначительно. В то же время, при разряде батареи пусковыми стартерными токами, существенно возрастает произведение I(R) I(R), что происходит не только за счёт увеличения силы разрядного тока, но и за счёт роста внутреннего сопротивления батареи. Сопротивление пластин и перемычек практически не зависит от температуры. С понижением температуры возрастает сопротивление электролита, а также внутреннее сопротивление сепараторов за счёт сужения каналов, в которых нахо-

дится электролит [89]. В связи с изложенным, дополнительная мощность, необходимая для успешного пуска ДВС при низких температурах воздуха определится из выражения:

$$P_{CT}' + \Delta P_{M} \ge P_{JBC} \tag{4.11}$$

где:  $P'_{\text{ст}}$  - мощность, развиваемая стартером в зимних условиях,  $B_{\text{т}}$ ;  $\Delta P_{\text{м}}$  - дополнительная мощность, необходимая для успешного запуска ДВС в зимних условиях,  $B_{\text{т}}$ ;

Р<sub>двс</sub> – мощность необходимая для прокручивания коленчатого вала, Вт;

Мощность, развиваемую стартером определяет аккумуляторная батарея, максимально отдаваемая мощность которой зависит от температуры окружающего воздуха. В выражении (4.11) при снижении температуры первая составляющая снижается, а третья составляющая повышается, что значительно увеличивает величину  $\Delta P_{\scriptscriptstyle M}$ . Кривая зависимости тока короткого замыкания аккумуляторной батареи от температуры окружающего воздуха представлена в приложении «В». При снижении температуры от +25°C до -20°C максимально отдаваемая мощность уменьшается почти в два раза, т.е. для зимнего пуска двигателя требуется дополнительная мощность. Реализация этой дополнительной мощности  $\Delta P_{\scriptscriptstyle M}$  осуществляется применением двухэтапного пуска ДВС, где используются силы инерции вращательного движения. Учитывая, что возможности батареи зимой снижены или она ослаблена, пуск  $\mathcal{A}BC$  происходит в два этапа и переходный процесс, имея две части, с паузой между ними проходит без длительных пиковых нагрузок, равномерным использованием имеющейся энергии и привлечением сил инерции. Энергия вращающегося тела (маховика) определяется по выражению:

$$W_{\scriptscriptstyle M} = J_{\scriptscriptstyle M} \frac{\omega_{\scriptscriptstyle \rm H}^2}{2} \tag{4.12}$$

где:  $J_{M}$ - момент инерции тела вращения (маховика), кг·м<sup>2</sup>;

 $\omega_{H}$ - его набранная (начальная ) угловая скорость, рад/с.

Изменение скорости вращения маховика от начальной  $\omega_{\rm H}$ , до конечной  $\omega_{\rm K}$ , при соприкосновении с другим телом, приводит к отдаче телу части энергии:

$$\Delta W_{\scriptscriptstyle M} = \frac{1}{2} J_{\scriptscriptstyle M} (\omega_{\scriptscriptstyle H}^2 - \omega_{\scriptscriptstyle K}^2) \tag{4.13}$$

Доля отдаваемой энергии определяется из выражения:

$$rac{\Delta W_M}{W_{
m M}} = rac{\omega_{
m H}^2 - \omega_{
m H}^2}{\omega_{
m H}^2} = 1 - rac{\omega_{
m K}^2}{\omega_{
m H}^2};$$
 отсюда: 
$$\Delta W_{
m M} = W_{
m M} (1 - rac{\omega_{
m K}^2}{\omega_{
m H}^2}) \eqno(4.14)$$

Зададимся, при отдаче энергии, расчетным значением снижения скорости тела вращения (маховика) до 50% от начальной, тогда согласно (4.14) отдается 75% энергии:  $\Delta W_{\scriptscriptstyle M} = 0.75 W_{\scriptscriptstyle M}$ . Для перевода этой энергии в требуемую дополнительную мощность при пуске  $\Delta P_{\scriptscriptstyle M}$ , необходимо знать время отдачи энергии системой пуска коленчатому валу при переходном процессе пука  $\mathcal{L}BC$ . Этим временем необходимо задаться, чтобы определить основные параметры элементов системы двухэтапного пуска. Например, при традиционном стартерном пуске каждая попытка не должна превышать 10 с, а время переходного процесса при тяжелом зимнем пуске доходит до 2с. Дополнительная энергия, которым должен обладать маховик, необходимая при двухэтапном пуске определится так:

$$\Delta W_{M} = 0.75 W_{M} = \Delta P_{M} t_{o} = (P_{\partial ec} - P'_{CT}) t_{o}$$
 (4.15)

где:  $t_o$ — время отдачи энергии коленчатому валу запущенной системой стартерного пуска, с.

Зная величину энергии, которую должен аккумулировать маховик, из (4.12) определяем его момент инерции  $J_{\scriptscriptstyle M}$ .

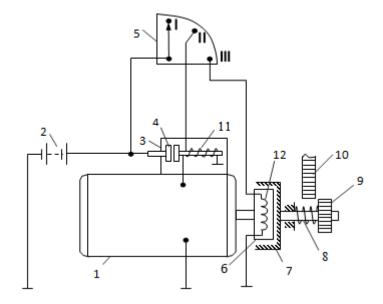
# 4.2 Двухэтапный пуск ДВС и варианты его технических решений.

Варианты технических решений двухэтапного способа пуска двигателя могут быть различными в зависимости от условий эксплуатации автомобилей и тракторов.

### **4.2.1** Двухэтапный пуск *ДВС* через электромагнитную муфту.

Системы двухэтапного стартерного пуска двигателя с использованием электромагнитной муфты (9M) представлена на рисунке 4.3 [51,52]. Она содержит электростартер 1, аккумуляторную батарею 2, электромагнитный включатель питания 3 питания электростартера с замыкающим контактом 4 и обмоткой 11, устройство управления 5 двухэтапным пуском, выполненное в виде переключателя на три положения (І, ІІ, ІІІ), электромагнитную муфту (ЭМ), состоящую из двух полумуфт 6 и 7 с обмоткой 12, возвратную пружину 8 и венец 10 маховика  $\mathcal{A}BC$ . Система двухэтапного пуска работает следующим образом. Для пуска ДВС в два этапа сначала в холостую запускается электростартер 2 приводом переключателя 5 в положение ІІ, запитывается от аккумулятора обмотка 11 электромагнитного выключателя 3, замыкаются его силовой контакт, электростартер получает питание и запускается без нагрузки. Затем переключатель 5 переводится в положение III, при включенном электростартере дополнительно запитывается обмотка 12 ведущей полумуфты 9M, которая втягивает ведомую полумуфту 7, преодолевая сопротивление пружины 8, и вводит в зацепление шестерню 9 с венцом 10 маховика ДВС и одновременно механически соединяет электростартер с шестерней 9, маховик  $10 \ \text{ДВС}$  получает вращение. После запуска двигателя обмотка  $11 \ \text{элек-}$ тромагнитного выключателя 3 и электростартер отключается переводом переключателя 5 в положение І. Пружина 8 разжимается и выводит шестерню 9 из зацепления с венцом 10 маховика  $\mathcal{A}BC$ . Система приходит в исходное состояние. Предложенная конструкция полумуфт 6 и 7 позволяет эффективно использовать магнитное поле создаваемое обмоткой 12 электромагнитной муфты, доведя до минимума воздушные зазоры в магнитной цепи, благодаря этому обеспечивается относительно большой ход подвижной полумуфты 7. Облегчение зацепления шестерни 9 с венцом 10 маховика ДВС обеспечивается за счет придания конусообразной формы краям зубьев шестерни. Двухэтапный пуск облегчает работу электростартера и аккумулятора, повышает

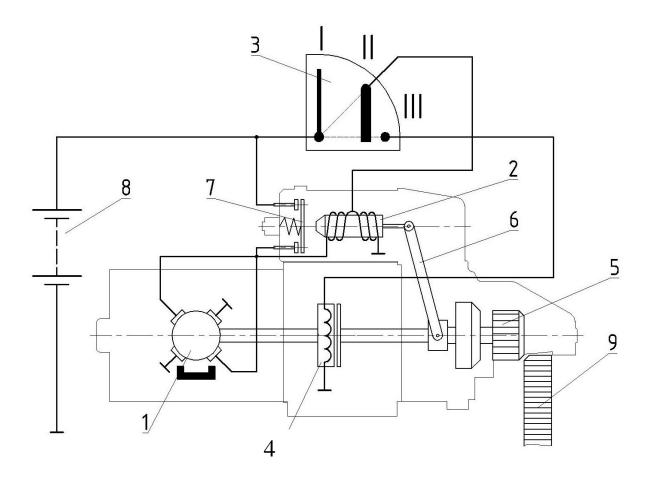
энергетическую возможность системы пуска за счет использования инерционных сил.



1 — стартер; 2 — аккумуляторная батарея; 3 — электромагнитный выключатель; 4 — контакты выключателя; 5 — устройство управления пуском; 6 — ведущая полумуфта; 7 — ведомая полумуфта; 8 — возвратная пружина; 9 — шестерня привода; 10 — зубчатый венец маховика ДВС; 11 — обмотка выключателя; 12 — обмотка электромагнитной муфты.

Рисунок 4.3 – Система двухэтапного стартерного пуска ДВС (патент РФ №2320888).

Предпочтителен вариант установки электромагнитной муфты в корпусе стартера, для обеспечения двухэтапности пуска ДВС. Место расположения электромагнитной муфты влияет на объем конструктивных изменений в элементах и механизмах системы пуска, а также на её надежность. При установке электромагнитной муфты в корпусе стартера его приводная часть остается без изменений, в отличие от внешней установки, когда требуются значительные конструктивные изменения. Внутренняя установка муфты превращает обычный стартер в стартер с двухэтапным пуском, схема которого представлена на рисунке 4.4.



1—стартер; 2— втягивающее реле; 3— переключатель режима работы стартера; 4— электромагнитная муфта; 5— шестерня привода; 6— рычаг включения шестерни; 7— контакты втягивающего реле; 8 - аккумуляторная батарея; 9— венец маховика ДВС.

# Рисунок 4.4 - Двухэтапный стартер ДВС.

Двухэтапный электростартер  $\mathcal{A}BC$  работает следующим образом. Переключатель 3 переводится в положение II, при этом запитывается втягивающее реле 2 и рычагом 6 зацепляет шестерню 5 привода с венцом 9 маховика  $\mathcal{A}BC$ . Одновременно втягивающее реле 2 замыкает свои контакты 7 и запускает вхолостую электростартер 1, при этом вращение к шестерне 5 привода не передается. Для вращения коленчатого вала переключатель 3 переводится в положение III, при этом включается электромагнитная муфта 4 и передает вращение коленчатому валу  $\mathcal{A}BC$ . Осуществляется запуск двигателя, затем

переключатель 3 переводится в положение I, система возвращается в исходное состояние.

Для нашего случая наиболее подходящей является электромагнитная муфта ЭМ-12, которая имеет следующие характеристики:

- 1. Передаваемый момент 16 Нм
- 2. Macca –1,1 кг
- 3. Максимальная частота вращения 3000 об/мин
- 4. Габаритные размеры:

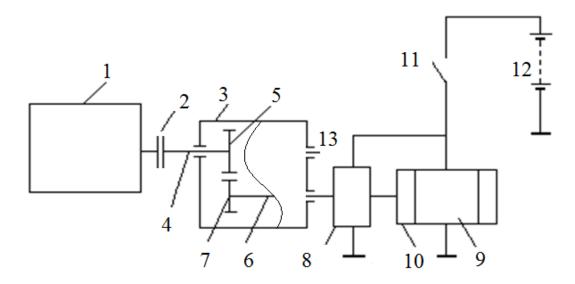
максимальный диаметр – 78 мм

максимальная длина – 33 мм

Для сочленения вала якоря электростартера с его редуктором, между которыми расположена электромагнитная муфта, используется переходник.

## 4.2.2 Двухэтапный пуск ДВС через сцепление транспортного средства.

Схема двухэтапной системы стартерного пуска  $\mathcal{A}BC$  через штатное сцепление автотранспортного средства или трактора представлена на рисунке 4.5 [13,92].



1 — ДВС; 2 — сцепление; 3 — коробка передач; 4 — первичный вал; 5 — шестерня первичного вала; 6 — промежуточный вал; 7 — шестерня промежуточного вала; 8 — электромагнитная муфта; 9 — электростартер; 10 — редуктор

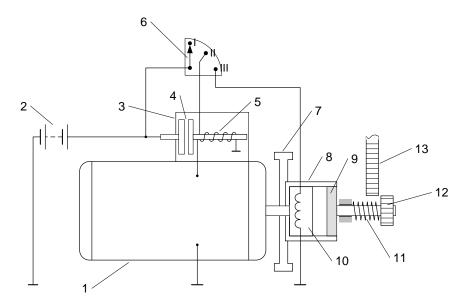
стартера; 11 — выключатель; 12 — аккумуляторная батарея; 13 - вторичный вал.

Рисунок 4.5 – Двухэтапный пуск двигателя автотранспортного средства через сцепление (патент РФ №2280190).

Система содержит ДВС 1, сцепление 2, коробку передач 3, первичный вал 4, шестерню первичного вала 5, промежуточный вал 6, шестерню промежуточного вала 7, электромагнитную муфту 8, электростартер 9 с редуктором 10, выключатель стартера 11, аккумуляторную батарею 12, вторичный вал коробки передач 13. Отличием этой системы пуска двигателя является то, что вал электростартера 7 присоединяется к промежуточному валу 6 коробки передач 3 и это обеспечивает двухэтапный плавный пуск ДВС через сцепление 2 транспортного средства. Работа системы пуска происходит следующим образом. Перед пуском двигателя коробка передач 3 устанавливается в нейтральное положение и выключается сцепление 2. Выключателем 11 от аккумуляторной батареи 12 запитываются электромагнитная муфта 8 электростартер 9, который через редуктор 10, промежуточный вал 6 и шестерни коробки передач вращает первичный вал 4. Затем плавно включается сцепление 2 и вся кинетическая энергия вращающегося стартер с промежуточными звеньями привода передается на коленчатый вал и  $\mathcal{A}BC$  запускается. При тяжелом пуске можно маневрировать педалью сцепления и обеспечить запуск в несколько приемов, т.е. при снижении оборотов стартера выключать сцепление, разогнать стартер без нагрузки и снова включить сцепление. Такая схема интеграции электрической машины с коробкой передач позволяет получить универсальную электрическую трансмиссию автомобиля (УЭМТА), когда ее можно использовать не только как стартер, но и как бортовой генератор, как рекуперативный тормоз, переводя в режим генераторного торможения и используя кинетическую энергию транспортного средства для зарядки аккумулятора, а также как тяговый электропривод для режима «стоп-старт». В конечном счете, мы получаем транспортное средство с комбинированной силовой установкой, т.е. гибридный автомобиль со всеми его положительными качествами по экономичности и экологичности.

## 4.2.3 Система пуска ДВС с маховиком.

Для успешного пуска двигателей автомобилей и тракторов в зимнее время предлагается система двухэтапного пуска с использованием энергии маховика, которая компенсирует влияние отрицательных температур на систему пуска и ДВС. Аккумуляторная батарея обладает достаточной энергией, но в зимних условиях она не может обеспечить пиковых мощностей для того, чтобы стронуть и создать требуемую минимальную пусковую частоту вращения коленчатого вала, особенно дизеля из-за высокого момента сопротивления проворачиванию. Поэтому необходимо рационально использовать имеющуюся энергию батареи, сначала часть энергии батареи надо передать маховику, раскрутив его электростартером, а затем вал стартера соединить с коленчатым валом. При этом маховик также повышает равномерность частоты вращения системы пуска, что способствует успешному запуску ДВС. Схема предлагаемой системы стартерного пуска ДВС с маховиком представлена на рисунке 4.6 [19,25,26,96].



1-стартер; 2-аккумуляторная батарея; 3-втягивающее реле; 4-контакты втягивающего реле; 5-обмотка реле; 6-устройство управления электростар-

тером; 7-маховик стартера; 8, 9 — ведущая и ведомая полумуфты электромагнитной муфты; 10-обмотка электромагнитной муфты; 11-возвратная пружина; 12-шестерня привода; 13-зубчатый венец маховика ДВС.

Рисунок 4.6 – Система двухэтапного стартерного пуска ДВС с маховиком (Патент РФ №2462611)

Она содержит электростартер 1, аккумуляторную батарею 2, электромагнитное реле 3, с замыкающим контактом 4 и обмоткой 5, устройство управления 6, выполненное в виде переключателя на три положения, маховик 7, электромагнитную муфту сцепления, состоящую из двух полумуфт: ведущей 8, ведомой 9 и обмотки муфты 10, возвратную пружину 11, шестерню привода 12 и венец 13 маховика  $\mathcal{A}BC$ . Система пуска работает следующим образом. Сначала без нагрузки запускается электро стартер 1 переводом переключателя 6 в положение ІІ, когда обмотка 5 электромагнитного реле 3 запитывается от аккумуляторной батареи 2, замыкая контакт 4, якорь электростартера получает вращение и маховик 7 электростартера приобретает определенную кинетическую энергию. Затем переключатель переводится в положение ІІІ, при работающем электростартере 1, дополнительно включается обмотка 19 ведущей полумуфты 8, которая втягивает ведомую полумуфту 9, преодолевая сопротивление возвратной пружины 11, и одновременно вводит в зацепление шестерню привода 12 с венцом 13 маховика ABC. После успешного запуска ABC, переключатель 6 переводится в положение I, размыкается контакт 4, и отключаются от питания обмотка 10 полумуфты 8 и электростартер 1, а шестерня привода 12 и ведомая полумуфта 9 под действием пружины 11 возвращаются в исходное положение.

Чтобы эта система обеспечивала пуск  $\mathcal{A}BC$  в экстремальных условиях, маховик должен иметь определенные параметры, которые зависят от величины момента сопротивления проворачиванию коленчатого вала двигателя.

## 4.2.4 Двухрежимный пуск ДВС.

С целью повышения надежности и плавности двухэтапного пуска, а также снижения энергозатрат предлагается система двухрежимного стартерного пуска ДВС, которая может обеспечить две скорости вращения коленчатого вала с использованием планетарного редуктора [24,97]. Благодаря этому рационально используется энергия аккумуляторной батареи в зимнее время и производится успешный запуск ДВС. Первоначально коленчатый вал ДВС вращается электростартером через планетарный редуктор на малой частоте вращения, все вращающиеся и движущиеся элементы ДВС страгиваются с места на этой малой частоте вращения, которая не требует высокой мощности от системы пуска.

. Мощность, затрачиваемая системой пуска, расходуется на преодоление момента сопротивления вращению коленчатого вала и разгон инерционных масс вращающихся частей двигателя, системы пуска. При номинальной угловой скорости вращения системы пуска эта мощность составит:

$$P^{\mu}_{c\partial s} = M_{c\partial s}\omega_{\kappa s} + \omega_{\kappa s}(J_{\partial s} + J_{s})d\omega_{\kappa s}/dt \qquad (4.16)$$

где  $M_{c\partial s}$  — момент сопротивления вращению коленчатого вала, Нм;  $\omega_{\kappa s}$  — скорость вращения коленчатого вала, рад/с;

 $J_{\partial B}$ ,  $J_{g}$  — соответственно, момент инерции двигателя и приведенный момент инерции системы пуска.

При снижении угловой скорости вращения коленчатого вала, например в два раза, мощность на вращение коленчатого вала определится так:

$$P_{c\partial s} = M_{c\partial s} \omega_{\kappa s} / 2 + \omega_{\kappa s} / 2(J_{\partial s} + J_{s})(d\omega_{\kappa s} / 2)dt \qquad (4.17)$$

Из уравнения (4.17) видно, что при этом мощность на преодоление момента сопротивления снижается в два раза, а мощность на преодоление ди-

намического момента снижается в четыре раза. Получаем следующее соотношение мощностей: при снижении скорости в два раза

$$P_{cos} = 1/2P_c + 1/4P_{out}$$
 (4.18)

а при номинальной скорости

$$P^{\mu}_{c\partial b} = P_c + P_{\partial u\mu} \tag{4.19}$$

где  $P_c$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сил сопротивления вращению коленчатого вала, Вт;

 $P_{\it дин}$  — мощность, затрачиваемая на разгон инерционных масс вращающихся частей двигателя и системы пуска, Вт.

Разница мощностей по выражениям (4.19) и (4.18) составит:

$$P_{c\partial s}^{\mu} - P_{c\partial s} = 1/2P_c + 3/4P_{\partial uH}$$
 (4.20)

Эта разница мощностей больше чем мощность  $P_{c\partial s}$ , требуемая при снижении угловой скорости, т.е.:

$$(P^{\scriptscriptstyle H}_{c\partial s} - P_{c\partial s}) > P_{c\partial s} \tag{4.21}$$

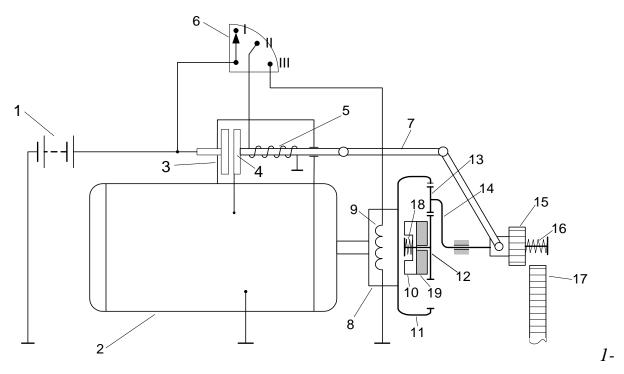
или 
$$(1/2P_c + 3/4P_{\partial uh}) > (1/2P_c + 1/4P_{\partial uh})$$
 (4.22)

Таким образом, при снижении угловой скорости вращения коленчатого вала в два раза, на его вращение требуется меньше 50% от мощности, затрачиваемой при номинальной угловой скорости коленчатого вала.

Снижение угловой скорости приводит к пропорциональному повышению передаваемого крутящего момента при одной и той же требуемой мощности на вращение коленчатого вала. Это благоприятно сказывается на рабо-

те стартера и аккумуляторной батареи, т.к. начальный момент трогания коленчатого вала с нулевой скорости значительно выше среднего момента, оказываемого коленчатым валом. Первоначальное снижение скорости вращения коленчатого вала позволяет преодолевать высокий момент сопротивления трогания при низких температурах окружающего воздуха.

При этом моторное масло разжижается, что приводит к снижению момента сопротивления проворачиванию коленчатого вала  $\mathcal{A}BC$ . Затем планетарный редуктор переключается на более высокую, требуемую для пуска  $\mathcal{A}BC$  частоту вращения коленчатого вала и осуществляется запуск  $\mathcal{A}BC$ . Схема системы двухрежимного пуска  $\mathcal{A}BC$  представлена на рисунке 4.7.Она содержит аккумуляторную батарею 1, электростартер 2, втягивающее реле 3



Аккумулятлеорная батарея; 2-стартер; 3-втягивающее реле с замыкающим контактом 4 и обмоткой 5; 6-устройство управления пуском; 7-рычаг привода шестерни; 8-электромагнитная муфта с обмоткой 9 и подвижной полумуфтой 10; 11-коронная шестерня; 12-солнечная шестерня; 13- сателлит; 14-водило; 15-шестерня привода; 16-возвратная пружина; 17-венец маховика ДВС; 18-прижимная пружина; 19-корпус системы пуска.

Рисунок 4.7 — Система двухрежимного стартерного пуска  $\mathcal{L}BC$  (патент РФ  $N_{2}$ 479744).

с замыкающими контактами 4 и обмоткой 5, устройство 6 управления пуском в виде переключателя на три положения, рычаг 7 привода шестерни, электромагнитную муфту 8 с обмоткой 9 и подвижной полумуфтой 10 на шлицах, планетарный редуктор, состоящий из коронной шестерни 11, сателлита 13 и водила 14, шестерню 15 привода, возвратную пружину 16, венец 17 маховика ДВС, прижимную пружину 18 и корпус 19 системы пуска. Система двухрежимного стартерного пуска ДВС работает следующим образом. Сначала электростартер 2 запускается на пониженной, в 1,5 - 2 раза ниже нормы скорости вращения вала шестерни 15. Для этого устройство 6 управления переводится в положение II, срабатывает втягивающее реле 3 и рычаг 7 привода вводит в зацепление шестерню 15 с венцом 17 маховика ДВС и одновременно своим замыкающим контактом 4 включает электростартер 2, который через коронную шестерню 11, сателлит 13 и водило 14 приводит во вращение с помощью шестерни 15 венец маховика ДВС. При этом солнечная шестерня 12 заторможена полумуфтой 10 усилием прижимной пружины 18 к корпусу 19 системы пуска. В этом режиме электростартер работает в течение 10 -15с, в зависимости от мощности  $\mathcal{A}BC$  и температуры окружающего воздуха, пока не снизится вязкость моторного масла и не активизируется электролит в аккумуляторной батарее. Затем устройство 6 управления переводится в положение III, срабатывает электромагнитная муфта 8 и преодолевая сопротивление прижимной пружины 18 соединяет полумуфту 10 с коронной шестерней 11, происходит блокировка коренной 11 и солнечной 12 шестерён. После этого все элементы планетарного редуктора вращаются как единое целое, передаточное число редуктора становится равным 1:1. Коленчатый вал вращается с номинальной скоростью и производится запуск ABC. После запуска устройство управления 6 переводится в положение І, шестерня 15 возвратной пружиной 16, а полумуфта 10 прижимной пружиной 18 возвращаются в первоначальное состояние и вся система переходит в исходное положение. Такая система пуска более рационально использует энергию аккумуляторной батареи, избегая пиковых нагрузок.

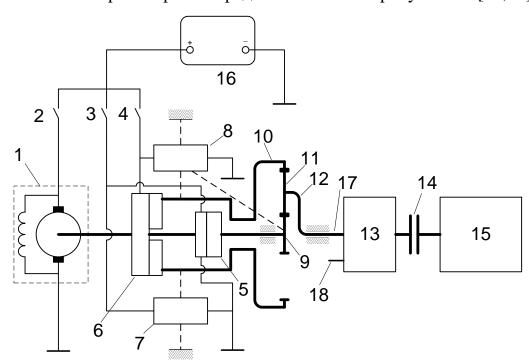
## 4.2.5 Предлагаемая компоновка стартер-генераторной установки.

Идея использовать в транспортном средстве одной электрической машины, стартер генератора вместо двух известна давно [140]. Однако, ее практическое использование затягивают многие факторы, в том числе и стереотип мышления, консерватизм автопроизводителей и то, что проблему необходимо решать на стыке двух наук — механики и электричества. Объединение в одной электрической машине и стартера и генератора имеет большие преимущества в силу следующих факторов:

- избавляемся от стартера, который работает очень кратковременно, т.е. имеет низкий коэффициент использования, а также низкий  $K\Pi \mathcal{I}$ ;
- обеспечивается снижение веса оборудования, его стоимости, экономится место;
- обеспечивается выполнение транспортным средством режима «стопстарт» в городских условиях езды, без включения  $\mathcal{L}BC$  ( $\mathcal{L}BC$  не работает на холостых оборотах при остановке автомобиля);
  - снижается потребная мощность ДВС транспортного средства;
- необходимо обеспечить надежность только одной электрической машины.

Обычно, на автомобилях и тракторах в качестве электростартера , для получения больших пусковых моментов используют электродвигатель с последовательным возбуждением (сериесный) или смешанным возбуждением (компаундный). Такие электродвигатели практически невозможно привести в генераторный режим, для этого нужно использовать электродвигатель параллельного возбуждения (шунтовой) или с возбуждением от постоянных магнитов и необходимо выбрать рациональный способ пуска. Важное значение

при этом имеет определение места установки стартер-генератора, чтобы электрическая машина работала не только стартером и генератором, но и эффективным электромеханическим тормозом с отдачей энергии для зарядки аккумуляторов и емкостных накопителей, а также в необходимых случаях и тяговым электродвигателем. Многие отечественные разработчики стартергенераторной установки ( $C\Gamma Y$ ) склоняются к расположению ее в картере сцепления между ДВС и сцеплением и считают, что такая компоновка является очень удачной с точки зрения гашения вибраций возникающих в  $\mathcal{A}BC$ ,  $C\Gamma V$ работает как маховик [108,115,130]. Такая установка СГУ имеет существенные минусы: во-первых, возникают неудобства из-за трудности доступа для обслуживания и ремонта  $C\Gamma V$ , во-вторых, и это главное, невозможно обеспечить нормальный режим рекуперативного торможения, т.к. нельзя механически отсоединить  $C\Gamma V$  от  $\mathcal{A}BC$  и подключения ее к трансмиссии автомобиля для возврата кинетической энергии торможения в накопитель (аккумулятор, конденсатор). Предлагается для сохранения многофункциональности СГУ совместить ее с коробкой передач автомобиля. Такого решения придерживаются зарубежные разработчики  $C\Gamma V$  [78,79]. Вариант предлагаемой схемы установки на автотранспортном средстве показан на рисунке 4.8 [14,92].



1 - стартер-генератор; 2 - выключатель стартер-генератора; 3 - выключатель стартерного режима; 4 - выключатель генераторного режима; 5 - электромагнитная муфта включения стартерного режима; 6 - электромагнитная муфта включения генераторного режима; 7,8,9 - электромагнитные тормоза стартерного и генераторного режимов; 10 - коронная шестерня; 11 - сателлит; 12 - водило; 13 - коробка передач; 14 - сцепление; 15 — ДВС; 16, 17 — промежуточный и выходные валы коробки передач.

Рисунок 4.8 – Стартер-генератор автотранспортного средства

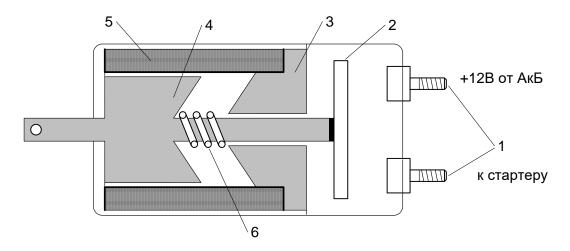
Стартер-генератор 1 через планетарный редуктор (поз. 9,10,11,12) сочленяется с промежуточным валом 17 коробки передач 13. Это обеспечивает двухэтапный плавный пуск ДВС 15 через штатное сцепление 14 транспортного средства. Такой пуск не заменим в зимних условиях эксплуатации АТС. Перед началом пуска выжимается сцепление, коробка передач устанавливается в нейтральное положение. Выключателем 2 без нагрузки запускается стартер-генератор 1. Далее выключателем 3 стартерного режима запитываются электромагнитный тормоз 7, удерживающий коронную шестерню 10 и электромагнитной муфты 5, соединяющей вал якоря стартер-генератора с солнечной шестерней 9. Вращение через сателлит 11 и водило 12 передается промежуточному валу коробки передач 13, затем включается муфта сцепления 14 и запускается ДВС 15. После запуска размыкаются контакты выключателя 3. Для перевода стартер-генератора в генераторный режим замыкаются контакты выключателя 4, запитывается электромагнитный тормоз 8, удерживающий солнечную шестерню 9, а также электромагнитная муфта 6, соединяющая коронную шестерню 10 с валом якоря стартер-генератора 1. Электрическая машина работает в режиме генератора, при этом планетарная передача повышает частоту вращения  $\Pi BC$  15, работает как мультипликатор (i > 0), а в стартерном режиме планетарная передача работает как редуктор, снижает частоту вращения стартера (i > 0). Достаточно выжать сцепление и  $C\Gamma V$  переводится в режим рекуперативного торможения, вращаемый колесами транспортного средства через выходной вал 18 коробки передач. Такая компоновка  $C\Gamma V$  позволяет эффективно использовать ее в различных режимах, включая и тяговый режим.

 $C\Gamma V$  можно считать экономически выгодным проектом усовершенствования способа управления системами транспортного средства, который позволяет снизить расход топлива автомобилем и уменьшить выбросы вредных веществ. Например, используя  $C\Gamma V$  на автомобиле « $\Gamma$ азель» ( $\Gamma$ A3-3221) с двигателем 3M3-405 было достигнуто снижение расхода топлива на 22% и доведение экологических норм до соответствия «Eвро-5» [108].

В перспективе развития автомобилестроения *ATC* не мыслимы без *CГУ* или применения гибридных автомобилей. Здесь важно учесть еще одно техническое обстоятельство, которое подталкивает автомобилестроителей к разработке и применению *CГУ*, гибридных автомобилей — это постоянно растущая из года в год энерговооруженность автомобиля. Установленная мощность электрического оборудования в современных автомобилях составляет от 4 до 10 кВт и имеет тенденцию к росту. Электрическая энергия используется во многих системах автомобиля и дополнительно к ним прибавляются: электроусилитель руля (*ЭУР*), управление торможением, электронасос охлаждающей жидкости, управление газораспределительным механизмом, электропривод компрессора кондиционера и т.д.

# 4.3 Совершенствование элементов системы пуска ДВС4.3.1 Одноконтактное пусковое устройство стартера.

В существующих системах пуска  $\mathcal{A}BC$  транспортных средств, тракторов и другой моторизованной техники, электростартер получает питание от аккумуляторной батареи через силовые контакты втягивающего реле (рис. 4.9) [124].

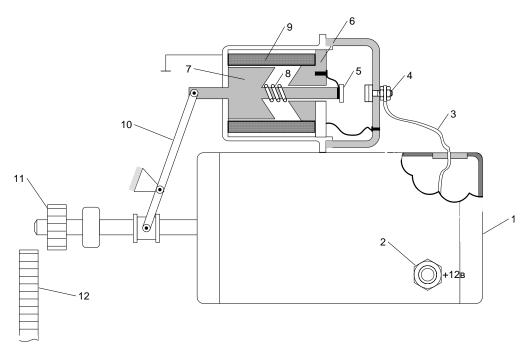


1 - контактные болты реле; 2 - подвижный контактный диск реле; 3 - сердечник реле; 4 - якорь реле; 5 - обмотка реле; 6 - пружина.

Рисунок 4.9 — Существующая (двухконтактная) конструкция втягивающего реле стартера *ДВС*.

Реле имеет два неподвижных контактных болта 1, которые замыкаются подвижным контактным диском 2, изолированным от якоря 4 реле. На верхний контактный болт 1 подается напряжение от плюсовой клеммы аккумулятора, а нижний контактный болт соединяется с плюсовым выводом электростартера. Минусовой вывод электростартера соединяется с его корпусом, который через кузов (раму) транспортного средства соединяется с минусовой клеммой аккумулятора. Конструкцию контактов реле можно значительно упростить, повысить надежность системы пуска, а также снизить расход цветного метала на изготовление контактов. Для этого необходимо изменить конструкцию контактов, уменьшить число контактных разрывов во втягивающем реле, где имеются два контактных разрыва. Большое число разрывов усложняет конструкцию реле, повышает расход цветного металла и главное, увеличивает переходное сопротивление в контактах, где при пуске ДВС стартером протекают значительные токи. Требования к питающей цепи электростартера достаточно высоки, падение напряжения в ней не должно превышать 2В на 1000А, т.е. сопротивление стартерных проводов, контактов и кузова автомобиля в сумме не должно превышать 0,002Ом [112]. В связи с этим предлагается измененная конструкция силовых контактов втягивающего реле стартера, отличием которых является наличие только одного контактного разрыва в цепи питания стартера.

На рисунке 4.10 представлено конструктивное исполнение предлагаемого втягивающего реле и его подключение к электростартеру 1 [7,15,94].



1 - стартер; 2 - плюсовой выводной болт стартера; 3 - минусовая выводная клемма стартера; 4 - контактный болт втягивающего реле; 5 - подвижный контакт втягивающего реле; 6 - сердечник втягивающего реле; 7 - якорь втягивающего реле; 8 - пружина; 9 - обмотка втягивающего реле; 10 - рычаг перемещения шестерни привода; 11 - шестерня; 12 - венец маховика ДВС.

Рисунок 4.10 – Одноконтактная конструкция втягивающего реле стартера ДBC (патент РФ №2350774).

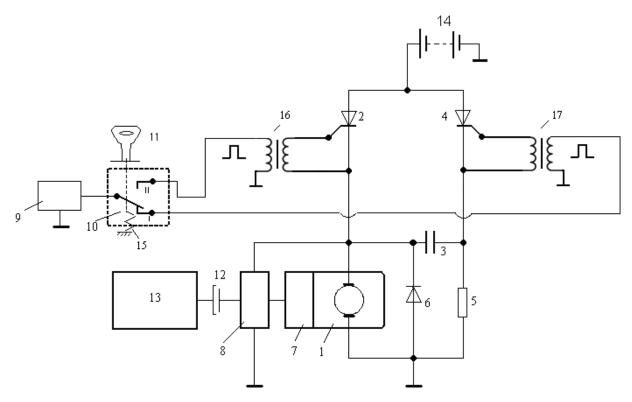
Контактная пара втягивающего реле состоит из неподвижного контактного болта 4 и подвижного контакта 5, который соединен с якорем 7 реле. Стартер 1 имеют два вывода: выводной болт 2 стартера соединяется с плюсовой клеммой аккумулятора, а минусовая выводная клемма 3 стартера не присоединяется к корпусу стартера, а подключается непосредственно к контактному болту 4 реле, а подвижный контакт 3 реле присоединяется через корпус реле и стартера к кузову автомобиля. При подаче напряжения на обмотку 9

втягивающее реле, оно своими контактами 4 и 5 замыкает на массу (кузов) и электростартер получает питание от аккумуляторной батареи. Благодаря такому подключению стартера и втягивающего реле нет необходимости изолировать подвижный контакт 5 реле от якоря 7, что значительно упрощает конструкцию контакта.

Предлагаемая конструкция контактов втягивающего реле и предлагаемая схема подключения реле и стартера значительно снижает расход цветного металла, упрощает конструкцию контактов и уменьшает переходное сопротивление в контактах и, в конечном счете, повышает надежность работы системы пуска транспортного средства, по сравнению с существующей системой пуска. Конструкция и масса традиционных и предлагаемых контактов втягивающего реле электростартера представлены в приложении «Б».

### 4.3.2 Система бесконтактного включения стартера ДВС.

Тенденция развития автотракторного электрооборудования показывает, что контактные элементы коммутационных устройств систем и механизмов транспортных средств заменяются бесконтактными электронными полупроводниковыми устройствами и это позволяет значительно повысить их надежность. Особенно это касается силовых контактов, через которые протекают большие токи и из-за них возникают частые отказы. Поэтому предлагается вместо втягивающего реле для включения электростартера использовать бесконтактный полупроводниковый элемент — тиристор, которым можно управлять большими токами. Система бесконтактного включения электростартера при двухэтапном пуске ДВС через штатное сцепление транспортного средства показана на рисунке 4.11 [20,95].



1 - стартер; 2 - основной тиристор; 3 - конденсатор; 4 - вспомогательный тиристор; 5 — резистор; 6 — обратный диод; 7 — редуктор; 8 — электромагнитная муфта; 9 — источник импульсов; 10 — переключатель; 11 — ключ замка зажигания; 12 — сцепление; 13 — ДВС; 14 — аккумуляторная батарея; 15 — пружина; 16 и 17 — импульсные трансформаторы.

Рисунок 4.11 – Схема тиристорного включения стартера при двухэтапном пуске *ДВС* (патент РФ №2418974).

При двухэтапном пуске ДВС [13], когда стартер 1 конструктивно устанавливается после сцепления 12, совместно с коробкой передач, можно обойтись без втягивающего реле, т.к. зацепление стартера с коленчатым валом осуществляется с помощью сцепления, а замыкается стартер от аккумулятора 14 через тиристор 2. Система состоит из электростартера 1, основного тиристора 2, конденсатора 3, вспомогательного тиристора 4, резистора 5, обратного диода 6, редуктора 7, электромагнитной муфты 8, источника импульсов 10, ключа замка зажигания 11, сцепления 12 транспортного средства, аккумуляторной батареи 14, пружины 15, импульсных трансформаторов 16 и 17. Система пуска работает следующим образом. Перед включением электро-

стартера необходимо выключить сцепление 12 (нажать на педаль сцепления) и установить переключатель коробки передач в нейтральное положение. Затем ключом 11 зажигания переводим переключатель 10 в положение II и на управляющий электрод тиристора 2 через импульсный трансформатор 16 передается положительный импульс. При этом тиристор 2 отпирается и напряжение аккумуляторной батареи 14 прикладывается к стартеру 1 и электромагнитной муфте 8. Одновременно через открытый тиристор 2 и резистор 5 конденсатор 3 заряжается до напряжения аккумуляторной батареи. После запуска электростартера 1 и включения электромагнитной муфты 8 вращение от стартера подается к коленчатому валу  $\angle BC$  13 включением сцепления 12. Когда ДВС транспортного средства запускается, для выключения электростартера на управляющий электрод вспомогательного тиристора 4 через импульсный трансформатор 17 подается положительный импульс переводом переключателя 10 в положение І. Тиристор 4 отпирается и прикладывает напряжение заряженного конденсатора 3 на основной тиристор 2, который запирается отрицательным напряжением конденсатора 3 и ток в цепи электростартера прерывается. После заряда конденсатора 3 тиристор 4 самопроизвольно запирается, и схема возвращается в исходное состояние. Положительной стороной такого способа запуска  $\mathcal{A}BC$  является то, что при трудном пуске в зимнее время или ослабленной аккумуляторной батарее можно осуществить пуск в несколько этапов, не отключая стартер от питания, а только выключая сцепление. При этом стартер освобождается от нагрузки и как только он наберет обороты и приобретает кинетическую энергию, снова включается сцепление.

Предлагаемая система стартерного пуска транспортного средства позволяет повысить надежность работы электростартера за счет исключения из конструкции втягивающего реле, его силовых контактных соединений и при этом экономится цветной металл (медь) до 385г на каждый электростартер мощностью 1,5кВт (два контактных болта — 32г, контактная пластина 8,4г, обмотка втягивающего реле 345г).

### 4.3.3 Защита аккумуляторной батареи от перезаряда.

Срок службы аккумуляторной батареи зависит от условий эксплуатации: интенсивности эксплуатации, температуры воздуха, значения и колебания регулируемого напряжения генератора, величины и относительной продолжительности разрядного тока, но главная причина преждевременного выхода из строя батареи — это ее перезаряд.

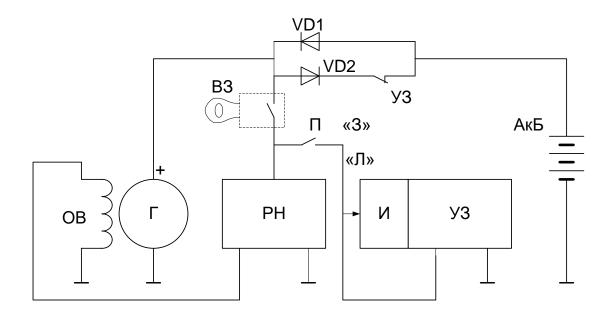
Анализ кривой зависимости срока службы батареи на автомобилях от значения регулируемого напряжения генератора показывает, что имеется четко выраженный максимум роста срока ее службы при напряжении 13,8...14В, работающих в условиях умеренного климата [131]. Дело в том, что при плотности электролита до 1,3г/см<sup>3</sup>, когда его электрическая проводимость максимальна, ЭДС одной заряженной банки батареи составляет 2,15В или 12,9В для всей батареи [49]. Для полной зарядки одной банки до такой ЭДС, с учетом ее внутреннего сопротивления, необходимо напряжение заряда 2,3В или 13,8В для всей батареи. При таком напряжении активные материалы батареи восстанавливаются и дальнейший заряд, повышение напряжения ведут к перезаряда. Энергия перезаряда тратится на разложение воды на водород и кислород, который выделяется в виде пузырьков газа. Основной признак перезаряда батареи — это понижение уровня электролита в банках вследствие выкипания воды с последующими отрицательными последствиями разрушения пластин.

При напряжении ниже 13,8В может наблюдаться систематический недозаряд батареи, приводимый к необратимой сульфатации пластин. На процесс зарядки влияет не только напряжение, но и пониженная температура электролита: холодная батарея заряжается медленнее и поэтому в условиях подзаряда от бортового генератора часто остаются недозаряженными. Чтобы этого не происходило, зимой напряжение заряда желательно увеличить. Норма зарядного напряжения для холодной климатической зоны со средней

температурой января ниже -15°C должна быть14,2...15В [123], но не более, иначе электронные устройства и осветительные лампы могут выйти из строя.

Результаты испытаний электронных регуляторов напряжения показывают, что их уровень регулируемого напряжения находится в пределах 14,1...14,6 В при требуемой норме 13,5...14,6 В [68], что предопределяет перезаряд батарей в летнее время. Эти регуляторы напряжения: 361.3702 (г. Калуга), 46.3702 (г. Владимир), 54.3702 (г. Пенза) выдают одно и тоже напряжение, как летом, так и зимой. Однорежимность регуляторов напряжения привела к тому, что срок службы аккумуляторных батарей стал зависеть от климатических условий регионов. Так, в регионах со средней температурой окружающего воздуха, равной 14...15°C, этот срок службы на грузовых автомобилях оказывается на 20% меньше (большее влияние перезаряда), чем в районах со среднегодовой температурой 3...4°C, а в районах со среднегодовой температурой -10...-12°C он на 10% ниже (меньшее влияние перезаряда), чем при среднегодовой температуре 3...4°С. Анализ эксплуатационных данных батарей по количеству различных неисправностей показывает, что наибольшее их число, до 42% от общего числа неисправностей приходится на перезаряд батарей [131].

Из всего изложенного можно сделать вывод: чтобы исключить саму возможность перезаряда, нужно в момент, когда батарея полностью восстановила энергию, затраченную в межпусковой период (работа радиоаппаратуры, освещение и т.п.) и при пуске двигателя энергию, отключить ее от генератора. Именно схема такой разработки представлена на рисунке 4.12 — это устройство защиты аккумуляторной батареи от перезаряда [8].



Г – генератор; ОВ – обмотка возбуждения; РН – регулятор напряжения; УЗ – устройство защиты; И – измерительная часть УЗ; VD1и VD2 – разрядный и зарядный диоды; «З» – положение зима; «Л» – положение лето; ВЗ – выключатель зажигания.

Рисунок 4.12 – Устройство защиты аккумуляторной батареи от перезаряда

В этой схеме новшество состоит в том, что разделяется цепь разряда и заряда батареи для того чтобы отдельно управлять зарядкой. Для этого между генератором « $\Gamma$ » и батареей « $A\kappa E$ » включены встречно-параллельно два диода: разрядный диод VD1 и зарядный диод VD2, с которым последовательно соединен размыкающий контакт «V3» устройства защиты, управляя которым можно регулировать уровень заряженности батареи. Цепь управления схемы состоит из устройства защиты «V3», представляющего собой транзисторное реле, состояние которого зависит от величины сигнала его измерительного устройства «II», контролирующего напряжение генератора. Также имеется переключатель «II» на два положения: «3» — зима и «II» — лето. устройство работает следующим образом. Выключателем зажигания «II3» запускается двигатель. Переключатель «II4» переводится в положение «II7», устройство «II3» получает питание от генератора, измеритель «II4» контролирует его напряжение. При напряжении до 13,8В происходит зарядка батареи от

генератора через диод VD2 и замкнутый контакт «V3». При увеличении напряжения генератора выше 13,8 В устройство защиты «V3» размыкает свой контакт в цепи «V3» в цепи диода VD2, но при этом аккумуляторная батарея может использоваться в режиме разряда и питать бортовые потребители через диод VD1. При снижении напряжения ниже 13,8В устройство защиты V3 замыкает свой контакт в цепи диода VD2, батарея снова получает зарядный ток.

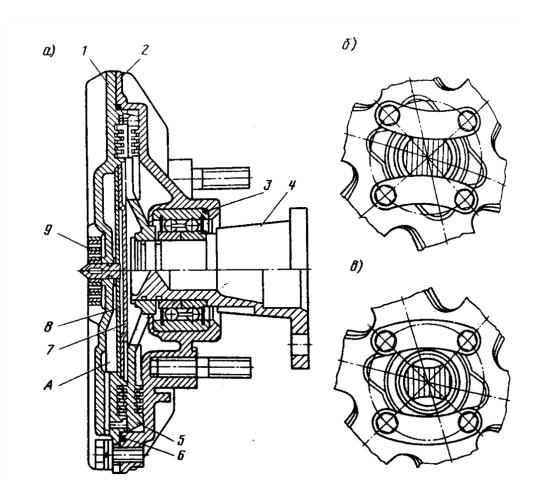
### 4.3.4 Привод вентилятора системы охлаждения.

Конструкция, исполнение механизма привода вентилятора, способ управления им влияют на топливную экономичность двигателя транспортного средства, а также на работу системы стартерного пуска  $\mathcal{A}BC$ . На многих грузовых транспортных средствах, тракторах и самоходных с.х. машинах вентилятор охлаждения получает вращение напрямую через клиноременную передачу от коленчатого вала двигателя [113]. При этом, режим работы привода вентилятора постоянный, независимо от того, какова температура охлаждающей жидкости. Это приводит к неоправданному расходу топлива, а также вентилятор отбирает часть энергии аккумуляторной батареи во время пуска  $\mathcal{A}BC$ . Для привода вентилятора расходуется значительная мощность, которая может повлиять на успешный пуск  $\mathcal{A}BC$  в зимних условиях.

Применение электродвигателя для привода вентилятора позволяет снизить расход топлива и улучшить режим работы  $\mathcal{L}BC$  за счет автоматизации процесса регулирования температуры охлаждающей жидкости, что повышает точности её поддержания. Однако, такая схема привода имеет низкий  $\mathcal{K}\Pi\mathcal{L}$  изза двойного преобразования передаваемой на вентилятор энергии. Сначала часть механической энергии  $\mathcal{L}BC$  с помощью генераторной установки превращается в электрическую энергию, где теряется до половины поступающей механической энергии, т.к.  $\mathcal{K}\Pi\mathcal{L}$  автомобильного генератора не превышает 50% [124]. Выработанную электрическую энергию электродвигатель вентилятора снова превращает в механическую энергию.  $\mathcal{K}\Pi\mathcal{L}$  электродвигателя авто-

мобильного вентилятора составляет не более 65%, а с учетом  $K\Pi \square$  клиноременной передачи общий  $K\Pi \square$  такого привода не превышает 30%, т.е. теряется до 70% подаваемой энергии.

На дизельных автомобилях семейства КамАЗ в приводе вентилятора установлена гидромуфта, передающая крутящий момент от коленчатого вала к вентилятору, рисунок 4.13а [113]. Она предназначена для обеспечения работы вентилятора в автоматическом режиме и состоит из корпуса 2, крышки 1, термосилового датчика-регулятора 9, соединенного через шток с пластинчатым клапаном 8, крышки 7 резервной камеры.



a — продольный разрез гидромуфты; b — схема заблокированного положения муфты; b — схема разблокированного положения муфты; b — крышка муфты; b — корпус муфты; b — подшипник; b — фланец муфты; b — ведущий диск; b — уплотнение; b — крышка камеры; b — пластинчатый клапан; b — термосиловой датчик-регулятор; b — резервная камера.

Рисунок 4.13 - Гидромуфта вентилятора системы охлаждения двигателей семейства КамА3.

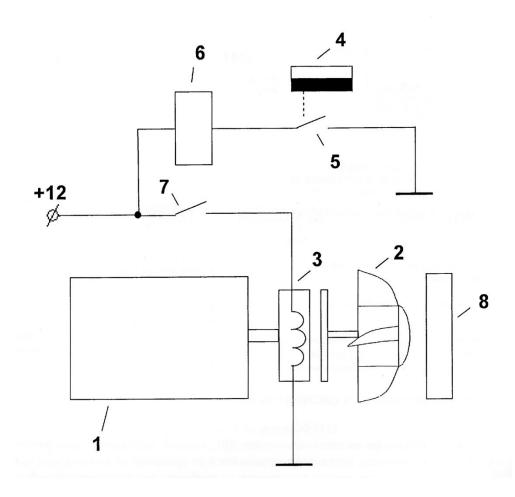
Вал водяного насоса жестко связан с фланцем муфты. Вентилятор крепится к корпусу муфты шпильками, под которые установлены пластины для блокировки муфты при выходе её из строя, рисунок 4.13 б. В этом положении пластин вращение на вентилятор подается напрямую, минуя муфту. Разблокированное состояние муфты, т.е. работа её в автоматическом режиме показано на рисунке 4.13в. Включение и выключение муфты в автоматическом режиме осуществляется термосиловым датчиком-регулятором 9 в зависимости от теплового режима работы двигателя, температура которого передается через корпус. При низкой температуре корпуса (до 80°C), датчик-регулятор 9 устанавливает клапан в такое положение, при котором закрывается проход рабочей жидкости в полость между ведущей и ведомыми частями муфты. В этом случае рабочая жидкость находится в резервной камере «А», и за счет зазоров между ведущей и ведомой частями муфты они могут вращаться относительно друг друга. При повышении температуры двигателя датчик - терморегулятор поворачивает пластинчатый клапан 8, открывая тем самым отверстия, соединяющие резервную и рабочую полости. Под действием центробежных сил рабочая жидкость заполняет зазоры между ведущими и ведомыми частями муфты. При этом, вследствие высокой вязкости жидкости, происходит включение муфты. В зависимости от теплового состояния двигателя изменяется перемещение клапана 8, а, следовательно, количество подаваемой жидкости в гидромуфту, что в свою очередь влияет на частоту вращения вентилятора.

Эта система регулирования работы вентилятора имеет следующие недостатки:

1.Сложную конструкцию, что снижает её надежность, поэтому здесь при отказах автоматики предусмотрена блокировка гидромуфты, но она создает трудности процессу пуска  $\mathcal{A}BC$ ;

- 2. Регулирование производится по косвенному параметру, вместо температуры охлаждающей жидкости используется температура корпуса двигателя, что снижает его точность;
  - 3. Возникают значительные потери из-за скольжения в гидромуфте.

Предлагается рациональный привод вентилятора системы охлаждения с устройством регулирования его работы, который представлен на рисунке 4.14.



1 - двигатель; 2 — вентилятор; 3 — электромагнитная муфта; 4 - температурный датчик; 5 — контакт температурного датчика; 6 — обмотка катушки промежуточного реле; 7 — контакт промежуточного реле; 8 — радиатор.

Рисунок 4.14 - Привод вентилятора системы охлаждения от коленчатого вала с электромагнитной муфтой (патент РФ на полезную модель №97174).

Вентилятор 2 приводится во вращение от коленчатого вала  $\mathcal{ABC}$  1, а его включение и отключение осуществляется с помощью электромагнитной

муфты 3, которая соединяет вал вентилятора с валом, приводимым во вращение от коленчатого вала ДВС. Управление электромагнитной муфтой производится по сигналу температурного датчика 4 охлаждающей жидкости. При повышении температуры жидкости выше нормы, датчик 4 замыкает свои контакты 5 в цепи реле 6. Реле получает питание и включает контактами 7 электромагнитную муфту 8, вентилятору 2 передается вращение. При снижении температуры охлаждающей жидкости до нормы вентилятор отключается. Предложенный привод вентилятора системы охлаждения позволяет повысить надежность системы охлаждения, снизить расход топлива ДВС, без применения электродвигателя и не влияет при пуске ДВС на работу системы стартерного пуска.

# 4.4 Повышение энергоэффективности привода стартер-генераторной установки (СГУ) автомобиля

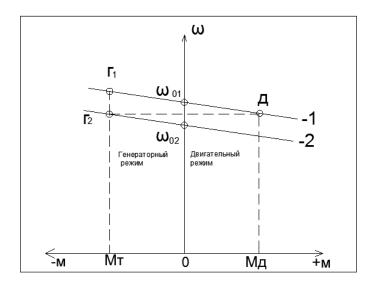
### 4.4.1 Работа СГУ в процессе торможения автотранспортного средства

Если в двигательном режиме под нагрузкой повысить каким-либо способом скорость вращения вала электродвигателя так, чтобы:

- в случае двигателя постоянного тока (ДПТ) разность ЭДС его якоря и напряжения питающей сети, —
- в случае асинхронного  $(A \mathcal{I})$  двигателя разность скоростей вращения полей статора и ротора, —
- в случае синхронного (CД) двигателя угол сдвига синхронно вращающихся полей статора и ротора, —

стали равными нулю, то двигатель будет вращаться на скорости идеального холостого хода и перестанет создавать движущий момент. При дальнейшем увеличении скорости вращения разности становятся отрицательными, соответствующий двигатель переходит в генераторный режим, на его валу создаётся тормозной электромагнитный момент, а ток изменяет направление.

Механическая характеристика в генераторном режиме (рис. 4.15, точка  $\Gamma_I$ ) является продолжением характеристики в двигательном режиме (точка  $\mathcal{I}$ ) в область отрицательных моментов.



1 и 2 — соответственно, естественная и искусственная характеристики двигателя;  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  — соответственно, генераторные режимы на естественной и искусственной характеристиках;  $\mathcal{A}$  — двигательный режим на естественной характеристике.

Рисунок 4.15 - Механические характеристики электродвигателя постоянного тока в двигательном и генераторном режимах.

Переход из двигательного режима в генераторный происходит всегда, когда якорь (ротор) начинает вращаться со скоростью выше скорости идеального холостого хода ( $\omega > \omega_0$ ).

Поэтому любой электродвигатель можно ввести в генераторный режим и без внешнего привода, если его мгновенно перевести с естественной характеристики на искусственную с меньшей скоростью холостого хода  $\omega_{02}$ . В этом случае (рис. 4.15) одной и той же текущей скорости вращения на естественной характеристике 1 (точка  $\mathcal{I}$ ) соответствует двигательный режим, а на искусственной характеристике 2 (точка  $\Gamma_2$ ) – режим генераторного торможения.

Итак, получение режима торможения возможно двумя способами:

- 1) принудительным повышением скорости  $\omega$  вращения вала двигателя сверх скорости холостого хода  $\omega_0$ ;
- 2) наоборот, понижением собственной скорости холостого хода (в случае  $\mathcal{Д}\Pi T$  за счет роста потока (тока) возбуждения либо уменьшения величины постоянного напряжения питания; в случае  $A\mathcal{J}$  или  $C\mathcal{J}$  за счет уменьшения частоты переменного напряжения питания).

Чтобы оценить возможности СГУ в режиме рекуперативного торможения автомобиля, проанализируем поведение машины при самовыбеге, когда её кинетическая энергия гасится силами сопротивления движению: сопротивлением качению колес и аэродинамическим сопротивлением. Уравнение движения автомобиля при выбеге имеет вид [79]:

$$\delta m \frac{dV}{dt} = -\left(\psi mg + k_{\rm g} S_{\rm noo} V^2\right) \tag{4.23}$$

где  $\delta$  – коэффициент учета вращающихся масс при отсоединенном двигателе;

m — масса автомобиля, кг;

V – скорость автомобиля, м/с;

 $\psi$  – коэффициент сопротивления дороги;

 $g = 9.81 \text{ м/c}^2 - \text{ускорение свободного падения;}$ 

 $k_e = 0.5 \cdot C_x \cdot \rho_e$  — коэффициент обтекаемости автомобиля,  $H \cdot c^2/m^4$ ,  $(C_x -$  продольная составляющая безразмерного коэффициента полной аэродинамической силы;  $\rho_e$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>);

 $S_{noo}$  – лобовая площадь автомобиля (сечение Миделя), м<sup>2</sup>.

Разделив обе части уравнения 4.23 на  $\delta m$  ,получим:

$$\frac{dV}{dt} = -\left(\frac{\psi g}{\delta} + \frac{k_e S_{no\delta}}{\delta m}V^2\right)$$

Приведем уравнение к табличному виду, обозначив  $\frac{\psi g}{\delta} = K, \frac{k_e S_{no\delta}}{\delta m} = B,$ 

 $\frac{K}{B}=A^2$ ; после подстановки получим  $\frac{dV}{dt}=-B(A^2+V^2)$ , откуда

$$\frac{dV}{A^2 + V^2} = -Bdt \tag{4.24}$$

Проинтегрировав левую часть 4.24 от начальной  $V_0$  до текущей скорости выбега V, а правую часть от 0 до текущего времениt, имеем:

$$\frac{1}{A} \left( arctg \frac{V}{A} - arctg \frac{V_0}{A} \right) = -Bt.$$

С учетом того, что tg[arctg(x)] = x, получим искомую зависимость скорости автомобиля от времени:

$$V = A \cdot tg \left( arctg \frac{V_0}{A} - A \cdot B \cdot t \right) \,, \tag{4.25}$$
 где  $A = \sqrt{\frac{\psi mg}{k_s \cdot S_{_{noo}}}} \,, \, B = \frac{k_s \cdot S_{_{noo}}}{\delta m} \,.$ 

По уравнению 4.25 и построен график (рис. 4.15) изменения скорости автомобиля BA3-2106 от времени при выбеге с начальной скорости  $V_0=20$  м/с до полной остановки. Экспериментальная проверка показала, что погрешность результатов по (4.25) на всем выбеге не превышает 6,7%. Здесь же показано изменение текущей кинетической энергии автомобиля  $W_{\kappa}$ .

При торможениях автомобиля карданный вал кинематически подключен к использованному в эксперименте нештатному генератору, частота его вращения определяется выражением:

$$n_{\text{kap}} = \frac{30 \cdot i_{\text{rm}}}{\pi \cdot R_{\cdot}} V, \qquad (4.26)$$

где  $n_{\rm кар}$  — частота вращения карданного вала, р/с (считаем равной частоте вращения генератора  $n_{\rm r}$ );

 $i_{\scriptscriptstyle \Gamma\Pi}$  – передаточное отношение главной передачи;

 $R_{\kappa}$  – радиус колес, м.

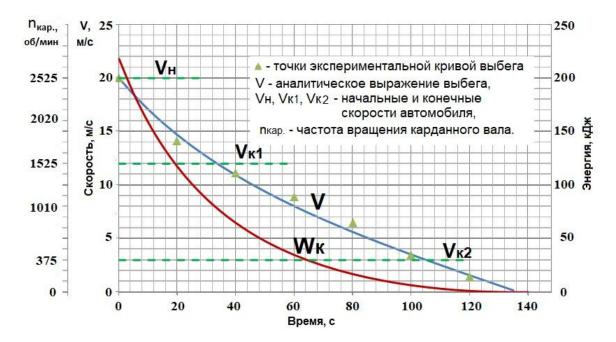


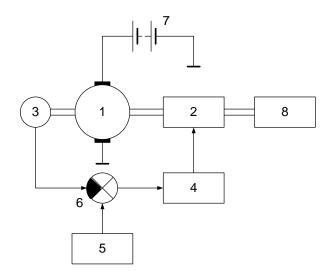
Рисунок 4.15 - Изменение скорости V и остаточной кинетической энергии  $W_k$  автомобиля при выбеге

Номинальная частота вращения генератора  $n_{\rm rh}$ =1500 об/мин. Как видно (рис. 4.15), из-за снижения скорости автомобиля генераторный режим довольно быстро (на скорости около 11 м/с) заканчивается, т.е. время генераторного торможения и количество переводимой в накопитель энергии, получаются небольшими. Очевидно, надо сделать так, чтобы вал генератора (независимо от снижения скорости тормозящего в это время автомобиля) как можно дольше вращался со скоростью, большей скорости идеального холостого хода. Для этого мы предлагаем установить между трансмиссией автомобиля и электрической машиной вариатор, способный обеспечить поддержку заданной угловой скорости вала генератора во время торможения, и изменяющий свое передаточное отношение обратно-пропорционально изменению скорости автомобиля. При этом становится возможным использовать кинетическую энергию торможения автомобиля почти до полной его остановки.

### 4.4.2 Усовершенствование привода рекуперативного торможения АТС.

Для реализации вышеизложенного разработано устройство эффективного торможения транспортного средства [91]. Схема устройства представ-

лена на рис. 4.16 и оно является составной частью стартер-генераторной установки ( $C\Gamma V$ ).



1 – электрическая машина; 2 – вариатор; 3 – датчик частоты вращения;
 4 – исполнительный механизм; 5 – задатчик частоты вращения; 6 – элемент сравнения; 7 – аккумуляторная батарея; 8 – ходовая платформа АТС.
 Рисунок 4.16 – Устройство эффективного рекуперативного торможения ав-

томобиля (патент РФ №2229767).

Устройство работает следующим образом. При замедлениях транспортного средства его кинетическая энергия через трансмиссию 8 передается якорю электрической машины 1 через вариатор 2, передаточное число последнего изменяется с помощью исполнительного механизма 4 таким образом, чтобы разность сигналов задатчика 5 и датчика 3 частоты вращения якоря электрической машины на выходе элемента сравнения 6 была равна нулю. По достижении вариатором максимального передаточного отношения исполнительный механизм прекращает свою работу.

Особенностью предлагаемого способа торможения является то, что тормозятся только ведущие колеса автомобиля: если переднеприводного — то передние, заднеприводного — задние, а если полноприводного — то все четыре.

В уравнении движения тормозящего автомобиля 4.23 появляются дополнительные слагаемые:

$$\delta m \frac{dV}{dt} = -[(\psi + \psi_{\rm T}) mg + k_{\rm g} S_{no\delta} V^2 + \frac{i_{\rm rit}}{R_{\rm r}} i_{\rm Bap} M_{\rm rest}], \tag{4.27}$$

где  $\psi_{\scriptscriptstyle \rm T}$  – коэффициент сопротивления штатного тормоза;

 $i_{\text{вар}} = i_{\text{вар}}(V)$  — принудительно изменяемое передаточное отношение вариатора;  $M_{\text{ген}}$  — тормозной момент электрической машины  $C\Gamma V$  в режиме генератора.

В *СГУ* без вариатора (считаем  $i_{\text{вар}} = 1$ ) напряжение электрической машины, заряжающее аккумуляторную батарею,  $U_{\text{ген}} = c \cdot \Phi_{\text{в}} \cdot \omega_{\text{кар}}$ , стабилизируется на уровне  $\approx 13.8$  В штатным регулятором напряжения путем регулирования её тока возбуждения. Здесь c и  $\Phi_{\text{в}}$  — конструктивный коэффициент и поток возбуждения электрической машины *СГУ*; угловая скорость вращения карданного вала:

$$\omega_{\kappa ap} = \frac{i_{\text{rm}}}{R_{\kappa}} V. \tag{4.28}$$

Это соответствует изменению потока возбуждения по следующей зависимости:

$$\Phi_{\rm B} = \frac{13.8 \cdot R_{\rm K}}{c \cdot i_{\rm PM}} \cdot \frac{1}{V}.$$

Но регулятор не может нарастить поток возбуждения сверх физического предела, определяющегося током обмотки возбуждения  $I_{\rm B}^{\rm max}=\frac{U_{\rm ген}}{R_{\rm oB}}$  и нелинейностью кривой намагничивания. По оценке из [124, с.94-95], начальная частота вращения ротора без нагрузки (т.е. началу генераторного режима штатных генераторов) обычно соответствует  $\approx 1000$  об/мин его вала или линейная скорость автомобиля при торможении (рис. 4.15) более 8 м/с.

Будем считать, что выше этой скорости в  $C\Gamma Y$  для потока возбуждения реализуется идеальная зависимость, тогда тормозной момент, создаваемый электрической машиной будет равен:

$$M_{\scriptscriptstyle \mathrm{\Gamma eH}} = c \cdot \Phi_{\scriptscriptstyle \mathrm{B}} \cdot I_{\scriptscriptstyle \mathrm{M}} = rac{13.8 \cdot R_{\scriptscriptstyle \mathrm{K}} \cdot I_{\scriptscriptstyle \mathrm{M}}}{i_{\scriptscriptstyle \mathrm{DH}}} \cdot rac{1}{V} \, .$$

А в режиме движения этот момент преодолевается за счет ДВС.

Пренебрегая переходными процессами в обмотках электрической машины, как весьма кратковременными, и считая, что напряжения генератора  $U_{\text{ген}}$  и аккумулятора  $U_{\text{акб}}$  стабильны (т.е. и ток якоря  $I_{\text{я}} = \text{const}$ ), то в режиме рекуперативного торможения, когда ДВС отключен, а  $C\Gamma V$  с регулятором напряжения соединена с карданным валом, получим:

$$\delta m \frac{dV}{dt} = -[(\psi + \psi_{\text{\tiny T}}) mg + k_{\text{\tiny g}} S_{\text{\tiny NOO}} V^2 + 13.8 \cdot I_{\text{\tiny S}} \frac{1}{V}]. \tag{4.29}$$

Ниже скорости автомобиля 8 м/с (срыв генерации) электрическая машина  $C\Gamma V$  должна пересоединяться от карданного вала (во избежание перехода в двигательный режим и ухудшения процесса торможения) к коленчатому валу  $\mathcal{L}BC$  и работать в режиме обычного генератора.

В предлагаемой же  $C\Gamma V$  с вариатором обмотка возбуждения подключена на аккумулятор, её магнитный поток постоянен ( $\Phi_{\rm BH}={\rm const}$ ). Вал электрической машины на время рекуперативного торможения кинематически подключен к карданному валу через вариатор, вырабатываемое напряжение  $U_{\rm reh}=c\cdot\Phi_{\rm BH}\cdot i_{\rm Bap}\cdot\omega_{\rm Kap}\approx 13,8$  В. Отсюда закон регулирования величины передаточного отношения вариатора (с учетом 3.28):

$$i_{\text{Bap}} = \frac{13.8 \cdot R_{\text{K}}}{c \cdot \Phi_{\text{pu}} \cdot i_{\text{rg}}} \cdot \frac{1}{V}$$

$$\tag{4.30}$$

Момент генератора  $M_{\text{ген}} = c \cdot \Phi_{\text{вн}} \cdot I_{\text{я}} = \text{const}$ , подставив эти выражения в 4.27, получим точно то же математическое описание (4.29) процесса торможения, только электрическая машина  $C\Gamma V$  должна пересоединяться от карданного вала при спаде скорости автомобиля до  $V = 8/i_{\text{вар}}^{\text{max}}$  м/с, где  $i_{\text{вар}}^{\text{max}}$  — верхнее значение передаточного числа вариатора. Если при этом нижнее значение передаточного *числа* вариатора  $i_{\text{вар}}^{\text{min}}$  может быть меньше 1, то нет необходимости в регуляторе напряжения, т.к. скорость вращения электрической машины в такой  $C\Gamma V$  во всем диапазоне изменения передаточного числа вариатора и так будет поддерживаться одной и той же. Условием переключе-

ния генератора от карданного вала трансмиссии к коленчатому валу  $\mathcal{L}BC$  и наоборот становится пересечение скоростью движения уровня  $V=8/i_{\text{вар}}^{\text{max}}$  м/с.

Уравнение 4.29 аналитически (методом разделения переменных) не интегрируется, поэтому оно решено численным методом с помощью программы Simulink из пакета компьютерной математики Matlab. Блок-диаграмма соответствующей модели приведена на рис. 4.17.

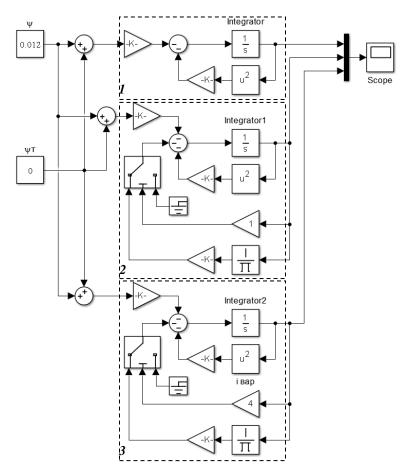
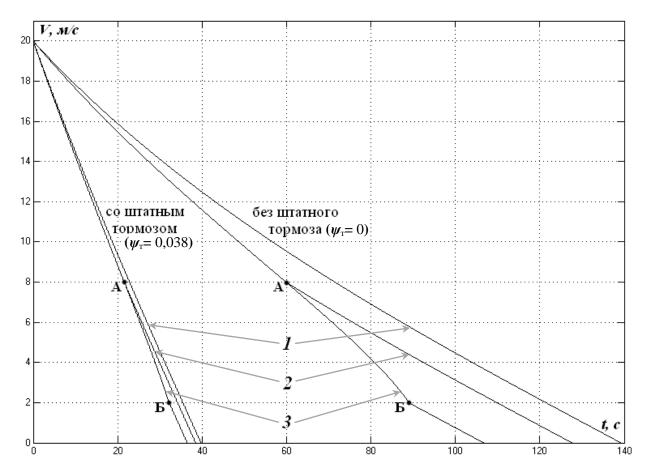


Рисунок 4.17 - Блок-диаграмма моделирования процессов торможения автомобилей с различными *СГУ*.

Одновременно рассчитывается торможение трех автомашин: в первой (выделена на блок-диаграмме пунктирным прямоугольником I) процесс осуществляется без рекуперации, только штатной тормозной системой; у второй (пунктир 2) — с дополнительным рекуперативным тормозным моментом, создаваемым электрической машиной  $C\Gamma V$  с обычным регулятором напряжения; в третьей (3) — то же, но  $C\Gamma V$  с вариатором, у которого диапазон равен 4. Действие штатной тормозной системы определяется её коэффициентом со-

противления  $\psi_{\text{T}} \neq 0$ , при  $\psi_{\text{T}} = 0$  тормоз не включен, имеет место выбег автомобиля.

Результаты моделирования представлены семействами тахограмм торможений на рис. 4.18.



1 — без рекуперации (выбег); 2 — с рекуперацией в СГУ с регулятором напряжения; 3 — с рекуперацией в СГУ с вариатором; A — точка срыва рекуперации в СГУ без вариатора, E — точка срыва рекуперации с диапазоном вариатора E — точка срыва рекуперации E — точка срыва рекуперации с диапазоном вариатора E — точка срыва рекуперации с диап

### Рисунок 4.18 - Результаты моделирования торможения автомобиля

Цифрами 1, 2 и 3 указаны тахограммы торможений автомашин (той же нумерации, что на блок-диаграмме 4.18) для двух случаев: самовыбег без включения тормоза ( $\psi_{\rm T}$ = 0) и остановка с использованием тормоза при  $\psi_{\rm T}$ = 0,038. Рекуперативная часть тормозной тахограммы для второго автомобиля заканчивается в точках «A», для третьего — в точках «B». До точки «A» тахограммы торможений этих автомашин совпадают. Здесь, помимо создания до-

полнительного тормозного момента и облегчения режима работы штатного тормоза, подзарядка аккумулятора происходит без отбора мощности от  $\mathcal{L}BC$ , т.е. налицо экономия топлива. Участки (AB) — удлинение такой выигрышной ситуации для предлагаемой  $C\Gamma Y$  с вариатором при  $i_{\text{вар}}^{\text{max}} = 4$ . На графиках видно, что по времени рекуперативный режим в  $C\Gamma Y$  с вариатором длится в 1,8 раза дольше, чем в  $C\Gamma Y$  с регулятором напряжения. В условиях городского движения с пробками, частыми притормаживаниями и остановками предлагаемая нами схема особенно эффективна.

Конструктивная сложность и стоимость вариатора определяется диапазоном варьирования его передаточного числа (или значением  $i_{\text{вар}}^{\text{max}}$ ). Чем выше это значение, тем большая часть времени торможения может быть охвачена режимом рекуперации (рис. 4.19).

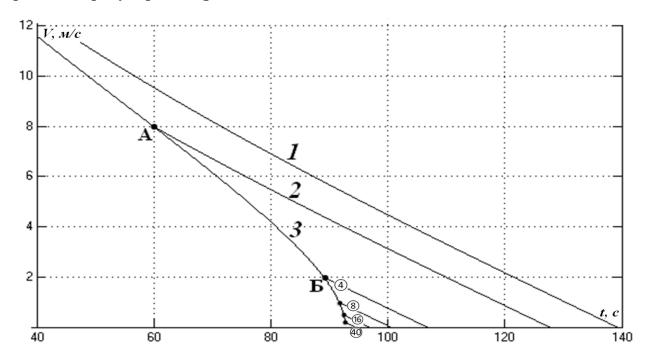


Рисунок 4.19 - Фрагмент правой нижней части рис. 4.18 при работе  $C\Gamma V$  с различными вариаторами (с диапазонами,  $\Pi = 4, 8, 16, 40$ ).

Точка «А» с абсциссой 60 сек на рис. 4.19 соответствует прекращению рекуперативной части торможения при  $i_{\rm вар}^{\rm max}=1$  или в  $C\Gamma V$  без вариатора (при полном времени торможения 127,7 сек, тахограмма 2); относительная длительность рекуперации  $(60/127,7)\cdot 100\% \approx 47\%$ .

Точка *«Б»* с абсциссой 89 сек соответствует прекращению рекуперации при  $i_{\rm вар}^{\rm max}=4$  (с полным временем торможения 106,8 сек, тахограмма 3). Относительная длительность рекуперации (89/106,8)·100%  $\approx$  83,3%.

Возвращаемая энергия при рекуперативном торможении автомобиля со стартер-генераторной установкой определяется формулой расчета кинетической энергии движущегося тела:

1. при традиционном способе рекуперации она составит:

$$W_1 = \frac{m_a(V_1^2 - V_2^2)}{2} = 168m_a, (\mathcal{J})$$
 (4.31)

где  $m_a$  – масса автомобиля, кг;

 $V_{I}$ ,— начальная скорость торможения автомобиля,  $V_{I} = 20 \text{ м/c}$ ;

 $V_2$  – скорость при котором срывается традиционный способ рекуперации энергии (точка A на рис. 4.18),  $V_2=8~{\rm m/c}.$ 

2.при рекуперации с использованием вариатора будет возвращена дополнительно энергия:

$$W_2 = \frac{m_a(V_2^2 - V_3^2)}{2} = 30m_a, (\beta 32)$$

где  $V_3$  — скорость, при котором заканчивается рекуперация энергии с использованием вариатора диапазоном Д = 4 (точка Б на рис. 4.19),  $V_3$  = 2 м/с.

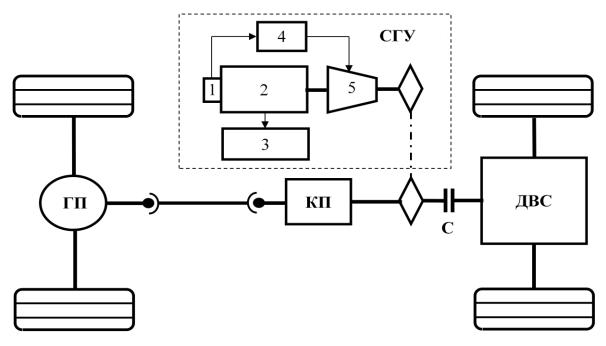
Дополнительно возвращаемая энергия при использовании вариатора с диапазоном  $\mathcal{J}=4$  в процентах составит:

$$\Delta W = \frac{W_2}{W_1} \cdot 100 = \frac{30m_a}{168m_a} = 18\% \tag{4.33}$$

Представляет интерес определиться с рациональным значением  $i_{\rm ваp}^{\rm max}$  . При увеличении  $i_{\rm ваp}^{\rm max}$  точка «Б» (рис. 4.19) смещается вправо-вниз по всё бо-

лее крутопадающей траектории. Абсцисса точки *«Б»* при  $i_{\rm вар}^{\rm max}$  = 40 равна 92,7 сек, т.е. режим рекуперации продлевается всего на несущественные 4%. Поэтому, во избежание неоправданного усложнения вариатора, нет смысла увеличивать  $i_{\rm вар}^{\rm max}$  свыше 4.

Полная кинематическая схема предлагаемой системы рекуперативного торможения транспортного средства с использованием вариатора показана на рис. 4.20.



1 — датчик скорости; 2 — электрическая машина СГУ; 3 — аккумуляторная батарея; 4 — блок управления; 5 — вариатор; ГП — главная передача; КП — коробка передач; C — сцепление; ДВС — двигатель внутреннего сгорания.

Рисунок 4.20 - Схема рекуперативного торможения автотранспортного средства с вариатором.

Датчик скорости 1 контролирует угловую скорость вращения генератора 2 и при её снижении блок управления 4 повышает передаточное число вариатора 5, обеспечивая постоянство угловой скорости вала генератора, который получает вращение от ведущих колес, продолжая заряжать аккумулятор 3 и обслуживать бортовые потребители электроэнергии без отбора мощности

от  $\mathcal{A}BC$ . По такой схеме  $C\Gamma V$ , являясь достаточно автономной и компактной, может быть без существенных переделок встроена в серийный автомобиль.

#### Выводы по четвертой главе

- 1. Разработана двухэтапная система стартерного пуска  $\mathcal{A}BC$  ( $\mathcal{A}C\Pi$ ) и аналитически обоснована её эффективность по сравнению с традиционным пуском ( $TC\Pi$ ):
- система пуска получает дополнительную кинетическую энергию в начальный момент прокручивания коленчатого вала *ДВС*, когда на стартер приходится максимальная нагрузка;
- аккумуляторная батарея в переходном процессе пуска *ДВС* нагружается поэтапно, что позволяет избежать относительно длительных нагрузок, как при традиционном пуске;
- стартер можно использовать в качестве генератора, рекуперативного тормоза и при необходимости в качестве тягового электродвигателя.
- 2. В зависимости от условий эксплуатации транспортного средства и требований, разработаны различные варианты двухэтапного пуска:
  - пуск ДВС через электромагнитную муфту;
  - пуск  $\mathcal{A}BC$  через штатное сцепление транспортного средства;
  - пуск ДBC стартером с маховиком;
  - двухрежимный стартерный пуск  $\mathcal{L}BC$ ;
  - стартер-генератор транспортного средства.
- 3. Разработана новая конструкция контактов втягивающего реле стартера и схема подключения стартера, что позволило снизить расход цветного металла и переходное сопротивление в контактах реле.
- 4.Предложена система бесконтактного включения стартера ДВС при двухэтапном пуске, которая исключает использование втягивающего реле, повышает надежность пусковой аппаратуры.

- 5. Разработана схема заряда аккумуляторной батареи, исключающая перезаряд и предложен привод вентилятора системы охлаждения, способствующие успешному запуску двигателя.
- 6. Эффективность рекуперации, как отношение длительности рекуперативного режима к общему времени торможения, возрастает почти в 1,8 раза (83,3% против 47%) по сравнению со схемой без вариатора, что позволяет дополнительно возвратить 18% рекуперируемой энергии.
- 7. При этом предельное передаточное отношение вариатора требуется порядка 4, т.е. можно использовать готовые промышленно выпускаемые изделия.
- 8. Наибольший эффект предложение даёт при глубоких торможениях (вплоть до остановки ATC), иначе говоря в интенсивном городском цикле движения машины.
- 9. Автономность, компактность и простота предложенных решений позволяют использовать их, в том числе, для быстрой модернизации существующих серийных моделей автомобилей.

## **5.** ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕ-ХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

- 5.1 Эффективность разработанных приводов для гибридных и электрических автотранспортных средств.
- **5.1.1** Результаты моделирования и оценка эффективности привода электромобиля.

Проведено сравнение моделей тягового привода электромобиля с ДПТ при управлении его скорости широтно-импульсным преобразователем (ШИП) и вариатором. Условия сравнения одинаковы для обоих вариантов, использовались три испытательные режимы движения.

Режим 1. Разгон с места до скорости 100 км/ч, затем через 20 с торможение до полной остановки при начальном состоянии заряда батареи SOC = 80% для сравнения динамики вариантов электромобилей по полученным тахограммам.

Режим 2. Имитация установившегося движения по шоссе с заданной скоростью 60 км/ч до полного расхода ресурса тяговой батареи от SOC = 100% до SOC = 0% с целью оценки предельного пробега электромобиля по трассе. Пробег электромобиля по шоссе составил:

- 1. с вариаторным управлением 315,3 км;
- 2. с управлением ШИП 339,5 км.

Режим 3. Имитация движения в городских условиях с использованием ездового цикла *ARDC*, т.к. международный цикл *WLTC* окончательно не утвержден. *ARDC* единственный цикл движения, который учитывает «пробки» в городе, длительность его 40, 7 мин.

Электромобиль по результатам моделирования расходует электроэнергию на 100км пути в городском режиме (табл.№3.3 и табл.№3.4):

- при управлении скорости вариатором 18,07 кВт<sub>\*</sub>ч;

- при управлении скоростью  $UUU\Pi$  29,72 кВт\*ч.

Затраты на электроэнергию составляют:

- при вариаторном управлении

$$C_B = q_{31}* \coprod_3 = 18,07*4 = 72 \text{ py6.}/100 \text{km};$$

- при управлении ШИП

$$C_{\text{шип}} = q_{92}* \coprod_{9} = 29,72*4 = 118,9 \text{ руб}/100 \text{км}.$$

Себестоимость 1км пробега электромобиля (без учета обслуживания и ремонта):

- с вариаторным управлением 0,72 руб/км;
- c управлением *ШИП* 1,189 руб/км.

Электромобиль с вариаторным управлением скорости в 1,64 раза меньше потребляет энергии. Основной экономический показатель разработанного электромобиля – удельный расход энергии составляет – 180,7 Вт\*ч/км. (табл. №3.5).

# **5.1.2** Результаты моделирования и оценка эффективности привода гибридного автомобиля (*ГТС*).

Модель гибридного автомобиля проверена в трех режимах движения и одном режиме самозарядки тяговой батареи.

Режим 1. Разгон и торможение  $\Gamma TC$  в течение 92 с для оценки динамических характеристик автомобиля. Эти характеристики соответствуют расчету: разгон до 100 км/ч за 12 с, максимальная скорость — 140 км/ч (рис. 2.17).

Режим 2. Имитация пробега по шоссе на расстояние 100 км со скоростями 75 км/ч, 80 км/ч, 90 км/ч, 100 км/ч, 110 км/ч, 120 км/ч и 140 км/ч, при начальных зарядах тяговой батареи (*SOC*%): 90%, 80% и 55% (табл. 2.1). Данный режим оценивает эксплуатационные характеристики в условиях длительных перегонов (более 200 км): расход топлива на 100 км и установившееся значение уровня заряда тяговой батареи (*SOC*%) при данной скорости движения. Показатели для разных скоростей следующие:

- 80 км/ч расход топлива 3,29 л; SOC% = 77,47%;
- 90 км/ч расход топлива 3,58 л; SOC% = 72,57%;
- 100 км/ч расход топлива 3,77 л; SOC% = 65,64%.

А при скорости 110 км/ч и выше на помощь *ДВС* подключается электродвигатель, который теперь не может работать в генераторном режиме, т.к. должен компенсировать возросшее аэродинамическое сопротивление, расход топлива с повышением скорости немного снижается. Движение на этих высоких скоростях требует периодической путевой подзарядки переходом на движение со скоростью 80 км/ч, при снижении SOC% батареи до 30%.

Режим 3. Имитация суточного пробега в городском цикле с выработкой ресурса батареи от SOC = 80% до SOC = 30% - для оценки эксплуатационных характеристик в условиях максимальной интенсивности движения. Использован городской цикл движения ARDC [44]. Здесь возможны два варианта подзарядки батареи:

1. Экономичная зарядка батареи от розетки через каждые 90 км пробега, когда расход топлива составляет 1,78 л на 100 км, а расход электроэнергии равен 9,96 кВт\*ч. Общие затраты составляют:

$$C_1 = q_m * \mathcal{U}_m + q_3 * \mathcal{U}_3 = 1,78 * 42 + 9,96 * 4 = 115 \text{ (руб.) } (5.6)$$

где  $q_{\rm T}$ ,  $q_{\rm 9}$  — расход топлива и электроэнергии;

 $U_{m}$ ,  $U_{3}$  — цена топлива и электроэнергии.

Себестоимость 1 км городского пробега при такой зарядке составит: 1,15руб.

2. Путевая подзарядка. При установившемся движении гибридного автомобиля в городе заряд батареи устанавливается на уровне SOC = 40,5%, т.е. при таком состоянии батареи можно ездить в городском режиме сколь угодно долго без подзарядки батареи, но расход топлива составит  $0,984*100/22,86 = 4,3\pi$  на 100 км (табл. 4.2). Затраты при этом составят:

$$C_2 = q_m * U_m = 4,3 * 42 = 180,6$$
 руб/100км

Себестоимость 1 км городского пробега составит 1,8 руб.

Режим 4. Стояночная «самозарядка», когда автомобиль остановлен, ДВС вращает тяговый электродвигатель в генераторном режиме. Батарея заряжается до уровня SOC = 80% за 1 час работы привода (при начальном уровне SOC = 30%). При этом расход топлива составляет 3,816 л. Учитывая,

что при езде расход топлива составит 1,78 л/100км. Общие затраты при «самозарядке» составят:

$$C_{c3} = (q_{c3} + q_e)_* U_m = (3,816 + 1,78)_* 42 = 23502$$
 руб/100км

где  $q_{c3}$ ,  $q_e$  — расход топлива при «самозарядке» и при езде.

Себестоимость 1 км при самозарядке 2,35 руб.

Сравнение себестоимости 1 км городского пробега с серийной « $\Gamma$ ран-moй».

Городской расход «*Гранты*» - 7,5 л/100 км. При стоимости 1 л бензина АИ-92 42 рубля, себестоимость 1км составит 3,15 руб.

#### 5.2 Эффективность разработок для системы пуска ДВС.

#### 5.2.1 Экспериментальные исследования двухэтапного пуска ДВС

Экспериментально исследование двухэтапного стартерного пуска  $(\mathcal{I}C\Pi)$   $\mathcal{I}BC$  было проведено на специально разработанном и изготовленном стенде (рисунок 5.1) [23].



Рисунок 5.1 - Стенд для экспериментального исследования привода двухэтапного пуска *ДВС*.

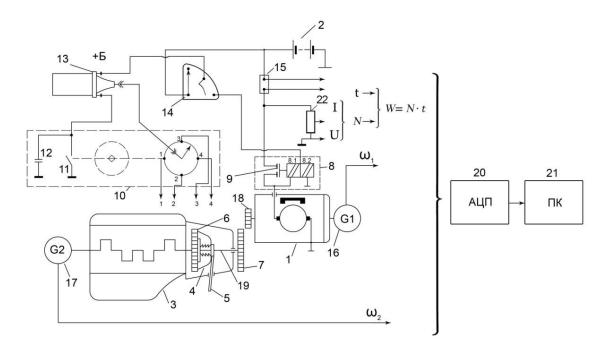
Основу стенда составляет двигатель от автомобиля BA3-2106, установленный на кантователь ДВС. Двигатель укомплектован всем навесным

оборудованием. На кантователь закреплена передняя балка от автомобиля BA3 - 2106. К балке на подушках закреплен двигатель с маховиком и сцеплением. Отдельно изготовлен узел, обеспечивающий двухэтапный стартерный пуск ABC собранный в картере сцепления. От торца нерабочего коленчатого вала срезано установочное место маховика, к нему закреплен дополнительный маховик. Установочное место с дополнительным маховиком состыковано с торцом первичного вала коробки передач, отцентрировано и приварено. Для установки и фиксации первичного вала к картеру сцепления срезана передняя стенка картера коробки передач с задним подшипником первичного вала. На вал надет выжимной подшипник с вилкой привода сцепления. Затем первичный вал по шлицам соединен с диском сцепления, а срезанная передняя стенка коробки передач болтами соединена с картером сцепления, который так же болтами соединен с двигателем. Электростартер закреплен к картеру сцепления таким образом, чтобы при пуске шестерня привода стартера цеплялась с зубцами венца дополнительного маховика, закрепленного на первичном вале. Схема стенда для экспериментального исследования двухэтапного пуска и сравнения его с традиционным пуском, представлена на рисунке 5.2.

Традиционный пуск *ДВС* обеспечивается без выключения сцепления 4, а двухэтапный пуск производится выключением сцепления 4 вилкой 5 привода сцепления, пуском стартера без нагрузки, с последующим включением сцепления 4. Пуск *ДВС* осуществляется включением зажигания 14 переводом его сначала в положение *II* ("включение зажигания"), затем в положении *III*, ( "включение стартера"). Запитываются втягивающая 8.1 и удерживающая 8.2 обмотки реле. Якорь реле 8 вводит шестерню 18 в зацепление с зубчатым венцом дополнительного маховика 7 и замыкает силовые контактные болты 9. Стартер 1 получает питание от аккумуляторной батареи 2.

После запуска ДВС 3 выключатель зажигания 14 обратно переводится в положение II, втягивающая 8.1 и удерживающая 8.2 обмотки реле 8 подсое-

диняются к аккумулятору 2 последовательно, через силовые контактные болты 9.



1 — электростартер; 2 — аккумуляторная батарея; 3 — ДВС; 4 — сцепление; 5 — вилка привода сцепления; 6 — маховик ДВС; 7 — дополнительный маховик; 8 — втягивающее реле; 9 — контакты втягивающего реле; 10 — прерыватель — распределитель; 11 — контакты прерывателя; 12 — конденсатор; 13 — катушка зажигания; 14 — устройство управления пуском; 15 — токовый шунт; 16 — датчик частоты вращения стартера; 17 — датчик частоты вращения коленчатого вала; 18 — шестерня стартера; 19 — первичный вал КП; 20 — аналогово — цифровой преобразователь; 21 — компьютер; 22 - переменный резистор.

Рисунок 5.2 - Схема стенда для экспериментального исследования двухэтапного стартерного пуска (ДСП) ДВС.

Так как число витков у обеих обмоток одинаково и по ним при последовательном соединении проходит один и тот же ток, обмотки при разомкнутом состоянии устройства управления пуском 14 создают два равных, но противоположно направленных магнитных потока. Сердечник электромагнита размагничивается, возвратная пружина перемещает якорь втягивающего реле 8 в исходное нерабочее положение и выводит шестерню 18 из зацепле-

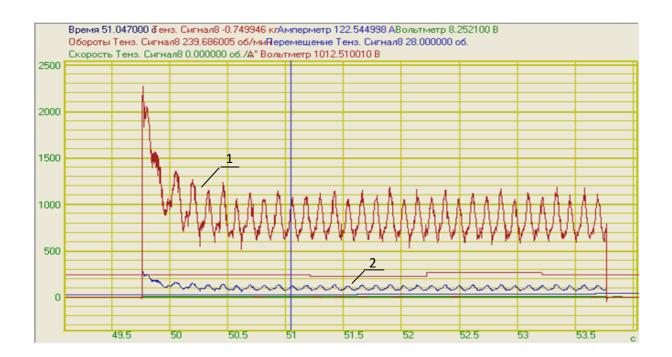
ния с зубчатым венцом маховика 7. При этом размыкаются и силовые контакты 9 втягивающего реле.

# **5.2.2** Анализ результатов эксперимента и оценка эффективности разработанной системы пуска

При проведении эксперимента контролировались и записывались основные параметры переходного процесса стартерного пуска. Ток потребляемый стартером от аккумуляторной батареи І записывается от сигнала шунта 15 (75 см 500), который при токе 500 A выдает напряжение 75 mV, класс точности 0,5. Напряжение на клеммах стартера снималось с делителя напряжения 22. На отдельный канал записывалась мощность N, потребляемая стартером, определяемая как произведение тока на напряжение. Для сигнала об изменении угловой скорости  $\mathcal{A}BC$   $\omega_2$  использован микродвигатель постоянного тока  $\Pi BP$  с возбуждением от постоянных магнитов. Кроме того, для синхронизации записываемых каналов, как базовый, использовался тензометрический датчик, наклеенный на гибкую стальную пластину, которая закреплена на раме стенда и при каждом обороте изгибается под действием резинового ролика, закрепленного на кромке маховика 7. Этот датчик также определяет угловую скорость и количество оборотов коленчатого вала. Все сигналы через аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) 20 подаются на компьютер 21 для записи.

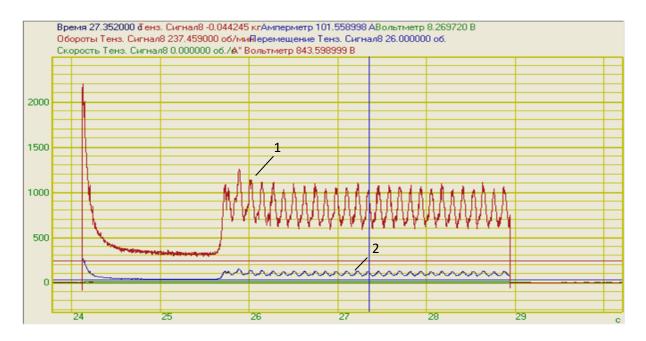
Для записи сигналов использовано программное обеспечение «Zetlab», фирмы 3AO «39T», г. Зеленоград. На рисунке 5.3 представлены экспериментальные кривые потребляемые мощности (1) и тока (2), а также частота вращения коленчатого вала (кривая 3) стартером при переходном процессе традиционного, а на рисунке 5.4 двухэтапного пуска  $\mathcal{A}BC$  при температуре окружающего воздуха  $+5^{\circ}$ С. Результаты обработки кривых двух видов пуска  $\mathcal{A}BC$  показывают, что за время переходного процесса 1,6 с при традиционном пуске средняя потребляемая мощность  $N_1 = 1022$  Вт, а при двухэтапном пус-

ке  $N_2$  = 741 Вт. Благодаря двухэтапному пуску снижение мощности составляет 281 Вт, а надежность пуска  $\mathcal{L}BC$  повышается на 27,5%. Проведенные эксперименты подтвердили эффективность двухэтапного стартерного пуска  $\mathcal{L}BC$ , позволяющего изменить конфигурацию кривой потребляемой мощности во время переходного процесса и обеспечить благоприятный режим работы для аккумуляторной батареи.



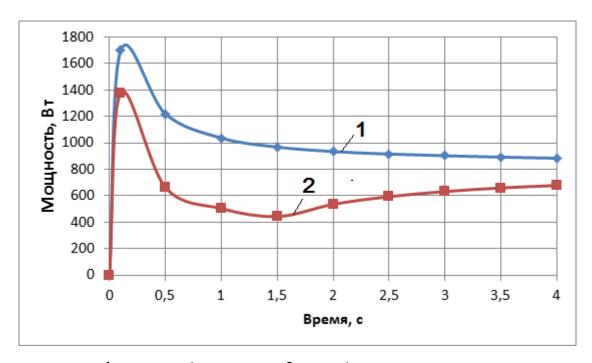
1 — мощность потребляемая стартером (Вт); 2 — ток потребляемый стартером (А)

Рисунок 5.3 - Осциллограммы переходных процессов традиционного пуска  $\mathcal{L}BC$ 



1 — мощность потребляемая стартером (Bm); 2 — ток потребляемый стартером (A).

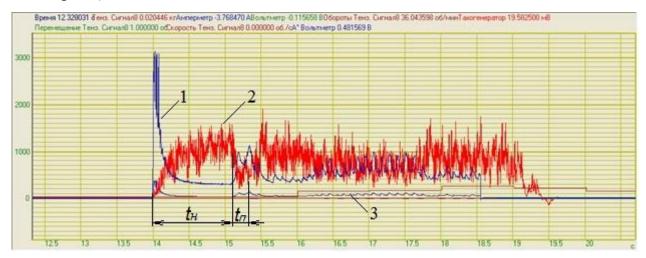
Рисунок 5.4 — Осциллограммы переходных процессов двухэтапного пуска  $\mathcal{L}BC$ 



1- при традиционном; 2 - при двухэтапном

Рисунок 5.5 – Кривые потребления мощности стартером в течение переходного процесса пуска

Преимущество двухэтапной системы пуска ( $\mathcal{A}C\Pi$ ) наглядно видно из рисунка 5.5, где представлены совмещённые кривые потребления мощности стартером при двух видах пуска, в начальный момент за время переходного процесса, рассчитанные в «Excel». Оно проявляется именно в начальный момент пуска, когда кинетическая энергия набранная стартером, после пуска его без нагрузки, отдаётся затем для осуществления пуска ДВС. Благодаря этому, при двухэтапном пуске мы избегаем больших и относительно длительных начальных пусковых моментов трогания системы с места (рис. 5.4), как это наблюдается при традиционном пуске (рис. 5.3). В то же время, для системы традиционного стартерного пуска, начальный нагрузочный момент является решающим успешность пуска, т.к. требуется тронуть с места всю систему «Стартер-ДВС», когда стартер имеет нулевую скорость вращения. При двухэтапном пуске начальный пусковой момент практически не меняется, т.к. стартер запускается без нагрузки, а при традиционном пуске эта величина переменная и зависит от температуры окружающего воздуха, чем ниже она, тем выше будет момент сопротивления вращению ДВС. Поэтому, для преодоления этих повышенных моментов двухэтапным пуском и обеспечения успешности пуска, необходимо повысить момент инерции системы пуска и предусмотреть установку на вал стартера маховика. Двухэтапный стартерный пуск ( $AC\Pi$ ) менее требователен к состоянию уровня заряженности аккумуляторной батареи, т.к. в первом этапе запуск стартера без нагрузки не требует большой пиковой мощности, а во втором этапе дополнительно используется кинетическая энергия, накопленная стартером при первом этапе, и батарея меньше нагружается. Для анализа переходных процессов, происходящих при двухэтапном пуске, использованы осциллограммы, представленные на рисунке 5.6. Здесь обозначены: 1 - кривая изменения мощности, потребляемой стартером; 2 - кривая скорости вращения вала стартера и 3 – кривая изменения тока, потребляемого стартером (3). Процесс накопления кинетической энергии стартером происходит при его запуске вхолостую это первый этап ДСП, который проходит за время  $t_{\scriptscriptstyle H}$  (время накопления энергии), начало второго этапа пуска, когда вращающийся вал стартера через сцепление соединяется с коленчатым валом — это передача энергии вращающегося якоря стартера на пуск  $\mathcal{L}BC$ , проходит за время  $t_{\pi}$  (время передачи энергии).

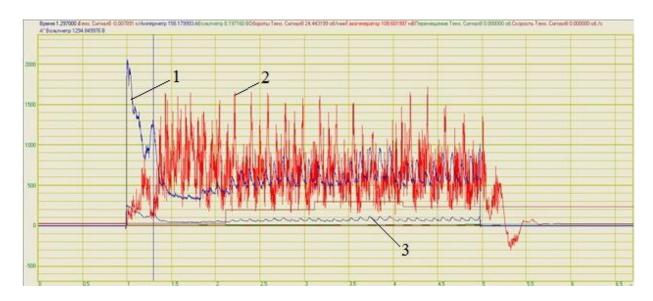


1 — кривая изменения мощности, потребляемой стартером; 2 — кривая изменения скорости вращения стартера; 3 — кривая изменения тока, потребляемого стартером;  $t_{\rm H}$  — время накопления кинетической энергии якорем стартера (первый этап пуска);  $t_{\rm n}$  — время передачи кинетической энергии на вращение ДВС (начало второго этапа пуска).

Рисунок 5.6 - Анализ переходных процессов двухэтапного стартерного пуска  $(\mathcal{A}C\Pi)\mathcal{A}BC$ .

При традиционном стартерном пуске высокая и длительная нагрузка приходится на начало процесса пуска (рисунок 5.7) — это момент сопротивления вращению коленчатого вала, зависящий от внешних условий, а также инерционные моменты, создаваемые системой «Стартер-ДВС». Для преодоления этих моментов требуется времени, а значит и энергии больше, чем при двухэтапном пуске, т.к. стартер запускается под нагрузкой, что можно рассмотреть из сравнения рисунков 5.6 и 5.7. Измерения показывают, при двухэтапном пуске, время действия максимального момента — это пусковой момент стартера при первом этапе пуска, составляет 0,1с (рисунок 5.6), а при традиционном пуске это время составляет 0,3с (рисунок 5.7) при равных

внешних условиях. Во втором этапе двухэтапного пуска (рисунок 5.6, время  $t_{\rm n}$ ) нагрузка на стартер повышается незначительно, благодаря использованию инерционного момента якоря стартера



1 — мощность, потребляемая стартером; 2 — скорость вращения стартера; 3 — ток, потребляемый стартером.

Рисунок 5.7 - Переходные процессы при традиционном пуске ДВС.

Годовой экономический эффект от создания и использования новых средств труда долговременного применения (машины, оборудование, приборы) с улучшенными качественными характеристиками (производительность, долговечность, снижение эксплуатационных затрат и т.д.) рассчитывают по формуле [83]:

$$\mathcal{F} = [(C_{\delta} + E_{\mu} K_{\delta}) \frac{B_{\mu}}{B_{\delta}} \cdot \frac{P_{\delta} + E_{\mu}}{P_{\mu} + E_{\mu}} + \frac{(W_{\delta} - W_{\mu}) - E_{\mu} (K_{\mu}' - K_{\delta}')}{P_{\mu} + E_{\mu}} - (C_{\mu} + E_{\mu} K_{\mu})] A_{\mu}$$
(5.1)

где  $C_{\delta}$ ,  $C_{H}$ — себестоимость единицы базового и нового средства труда, руб.;

 $K_{H}$ ,  $K_{\delta}$  — удельные (в расчёте на оборудование, машину) капитальные вложения в базовом и новом варианте, руб.;

 $\frac{B_{H}}{B_{6}}$  — коэффициент учёта роста производительности единицы нового средства труда по сравнению с базовым;

 $B_{\delta}$  и  $B_{H}$  — годовые объёмы продукции (работы), производимые при использовании единицы базового и нового средств труда в натуральных единицах;

 $\frac{P_6 + E_H}{P_H + E_H}$  — коэффициент учёта изменения срока службы нового средства труда, по сравнению с базовым;

 $P_{\delta}$  и  $P_{\scriptscriptstyle H}$  — доли отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление (реновацию) базового и нового средств труда. Рассчитывают как величины, обратные срокам службы средств труда  $T_{\rm o}$ , определяемым с учётом их морального износа. Для повышения точности расчёта их берут по данным приложения 2 [83];

 $\frac{({\rm H}_6'-{\rm H}_H')-{\rm E}_{\rm H}({\rm K}_H'-{\rm K}_6')}{{\rm P}_{\rm H}-{\rm E}_{\rm H}}$  — экономия потребителя на текущих эксплуатационных затратах и отчислениях от сопутствующих капитальных вложений за весь срок службы нового средства труда по сравнению с базовым, руб.;

И'<sub>б</sub> и И'<sub>н</sub> - годовые эксплуатационные затраты потребителя при использовании базового и нового средств труда в расчёте на объём продукции (работы), производимого с помощью нового средств труда, руб. В этих затратах учитывается только часть амортизации, предназначенная на капитальный ремонт средств труда, т.е. без учёта средств на их реновацию, а также амортизационные отчисления по сопутствующим капитальным вложениям потребителя;

 $K'_{6}$  и  $K'_{H}$  - сопутствующие капитальные вложения потребителя (капитальные вложения без учёта стоимости рассматриваемых средств труда) при использовании базового и нового средств труда в расчёте на объём продукции (работы) производимой с помощью нового средства труда, руб.;

 $A_{\scriptscriptstyle H}$  – годовой объём производства новых средств труда в расчётном году, в натуральных единицах;

Базовым вариантом является традиционный стартерный пуск *ДВС*, новым — двухэтапный пуск ДВС с упрощёнными контактами втягивающего реле. Капитальные вложения в обоих вариантах системы пуска остаются практически одинаковыми, изменяется способ запуска ДВС. Предлагаемый вариант системы пуска имеет следующие преимущества:

- 1. Снижается потребление энергии стартером от аккумуляторной батареи, а также требуемая средняя мощность для стартера на 25,4%;
- 2. Конструктивное изменение силовых контактов втягивающего реле стартера (рис.2.10) по сравнению с традиционной конструкцией (рис.2.9) снижает расход электротехнической меди при их производстве;
- 3. Уменьшается в два раза переходное сопротивление контактов, вместо двух контактных разрывов остаётся один разрыв.

Двухэтапная система пуска может быть использована для любых  $\mathcal{L}BC$ , используемых на тяговых, транспортных, а также стационарных установках. При экономических расчётах за основу принят электростартер типа 5702.3708, устанавливаемый на автомобили марки BA3.

Исходные данные для расчёта:

- 1. Годовая программа выпуска автомобилей марки BA3 [84]  $A_{H}$ , шт. 593296;
- 2.Цена базового стартера 5702.3708,  $C_{\delta}$  (руб.).

2972

3.Срок службы стартера 5702.3708.  $T_o$  (лет)

7

- 4. Экономия электрической меди при производстве предлагаемого втягивающего реле на 1 стартер,  $m_{\scriptscriptstyle M}$  (г) 16,4
- 5. Повышение эффективности пуска  $\mathcal{L}BC$  по предлагаемому методу, % 25,4 6. Цена электротехнической меди,  $\mathcal{U}_{M}$  (руб./кг) 300.

Расчёты проведены согласно формуле (5.1).

1.Себестоимость базового электростартера выше себестоимости нового на величину стоимости сэкономленной электротехнической меди на изготовление контактов втягивающего реле. Стоимость сэкономленной меди составит:

$$C_{M} = m_{M} \cdot \mathcal{U}_{M} = 16.4 \cdot 10^{-3} \cdot 300 = 4.92 \text{ (py6.)}$$
 (5.2)

Определяем себестоимость нового стартера:

$$C_{H} = C_{\delta} - C_{M} = 2972 - 4,92 = 2967,08 \text{ (py6.)}$$
 (5.3)

- 2. Удельные капитальные вложения в базовом и новом вариантах одинаковы  $(K_{_{\rm H}}=K_{_{\rm 0}}).$
- 3.Возможность успешного пуска  $\mathcal{A}BC$  в зимнее время повышается на 25,4%, т.е.  $B_{H}/B_{0}=1.254$ .
- 4. Ресурс аккумуляторной батареи повышается на 25,4%, т.е.  $\frac{P_6 + E_H}{P_H + E_H} = 1,254$ .
- 5. Предлагаемая система пуска используется, в основном, в зоне холодного климата в зимний период, поэтому для определения количества автомобилей, которые будут использовать предлагаемый способ пуска, вводим коэффициенты корректирования холодной территории  $K_m$  и холодной погоды  $K_n$ . Учитывая, что около 70% общей территории нашей страны относится к зоне сурового холодного климата, а число дней со среднесуточной температурой (- $10^{\circ}$ C) составляет более 180 дней [38], принимаем коэффициент холодной территории  $K_m$ = 0,7, а коэффициент холодной погоды  $K_n$ = 0,5. Общий коэффициент корректирования составит:

$$K_{\kappa} = K_m \cdot K_n = 0,7 \cdot 0,5 = 0,35$$
 (5.4)

6. Тогда количество автомобилей, используемых предлагаемый двухэтапный пуск ДВС составит:

$$A'_{\rm H} = A_{\rm H} \cdot K_{\kappa} = 593296 \cdot 0.35 = 207653 \text{ (iiit.)}$$
 (5.5)

7. Экономическая эффективность использования двухэтапного пуска за 1 год согласно формуле (5.1) составит:

$$\mathcal{F} = (2972 \cdot 1,254 \cdot 1,254 - 2967,08) \cdot 207653 = 348165,55$$
 (тыс. руб.)

В том числе производители стартеров для завода ВАЗ получают годовую прибыль за счёт экономии электротехнической меди:

$$\Theta_3 = A_H \cdot C_M = 593296 \cdot 4,92 = 2918,9966$$
 (тыс. руб.)

Основной годовой экономический эффект для потребителей на 1автомобиль составляет:

$$\Theta_n = (\Theta - \Theta_3)/A'_H = (348165,55 - 2918,9966)/207653 = 1662,22 \text{ (py6.)}.$$

# **5.2.3** Эффективность разработок для *ATC* со стартер-генераторной установкой.

Моделирование процесса рекуперативного торможения транспортного средства со стартер-генераторной установкой с использованием вариатора выявило:

-предлагаемая вариаторная система рекуперативного торможения транспортного средства со стартер-генераторной установкой повышает количество возвращаемой энергии торможения на 18% за счет увеличения длительности рекуперации посравнению со схемой без вариатора;

#### Выводы по пятой главе.

- 1. Стоимость 1 км пробега с учетом энергетических затрат у разработанного гибридного автомобиля по результатам моделирования в 1,43 раза ниже затрат серийного Лада «Гранта» с ДВС (2,35 руб/км против 3,36 руб/км)
- 2. Разработанный электромобиль с вариаторным управлением скорости движения, по результатам моделирования, экономичнее электромобиля с управлением *ШИП* как в городском режиме: расходует 180,7 Вт\*ч на 1 км против 297,2 Вт\*ч на 1 км, а на «шоссе» практически одинаковы.
- 3. Экспериментальные исследования подтвердили преимущество и эффективность двухэтапной системы стартерного пуска, которая во втором (основном) этапе пуска потребляет на 27,5% меньше мощности, по сравнению с традиционным пуском.
- 4.Использование двухэтапного стартерного пуска *ДВС* с усовершенствованными контактами втягивающего реле даёт годовой экономический эффект:
  - 4.1 для завода производителя стартеров 2918,9 тыс. руб.;
- 4.2 для предприятий, эксплуатирующих транспортные средства 1662,2 руб. на 1 автомобиль.
- 5. Предлагаемая вариаторная система рекуперативного торможения транспортного средства со стартер-генераторной установкой повышает эффективность рекуперации на 18% по сравнению со схемой без вариатора.

#### Основные выводы по диссертационной работе.

- 1. Предложен и обоснован параметрический принцип управления скоростью транспортного средства бесступенчатым изменением передаточного числа трансмиссии, без регулирования скорости вращения двигательной установки. Преимущество принципа (по сравнению с традиционным) состоит в уменьшении требуемого крутящего момента от двигателя пропорционально уменьшению текущей скорости движения автомобиля, что особенно проявляется в режимах разгона и торможения.
- 2. Разработаны новые схемы приводов электромобиля и гибридного автомобиля на основе предложенного параметрического принципа управления скоростью транспортного средства прямым регулированием передаточного числа вариатора.
- 3. Обоснован расчет основных параметров привода предложенной в диссертации схемы электромобиля на базе учета допустимого времени работы тягового электродвигателя в трёх режимах: номинальной нагрузки, двухи трехкратной перегрузки.
- 4. Обоснована методика расчета основных параметров привода предложенной в диссертации схемы гибридного автомобиля совместным решением системы двух уравнений, отражающих баланс движущих сил и сил сопротивления в двух режимах: первый конец процесса разгона до 100 км/ч (с максимальным использованием перегрузочной способности электродвигателя); второй длительное движение транспортного средства на максимальной скорости (ДВС работает с максимальным крутящим моментом, электродвигатель с номинальной нагрузкой).
- 5. Разработана методика двухэтапного концептуального проектирования приводов электромобиля и гибридного транспортного средства: первый этап обоснованный предпроектный расчет параметров приводов; второй

этап - уточнение эксплуатационных показателей приводов на компьютерных моделях исследуемых объектов в основных режимах движения.

- 6. Для оптимизации расходов топлива и энергии тяговой батареи гибридного транспортного средства рационально регулирование дроссельной заслонки осуществлять не только по положению педали акселератора, но и корректировать в зависимости от текущего уровня заряда батареи.
- 7. Обоснована и экспериментально подтверждена эффективность предложенного привода двухэтапного пуска  $\mathcal{L}BC$  с вариантами технических решений (на уровне изобретений), повышающих надежность пуска за счёт снижения энергозатратности процесса на 27-30% по сравнению с традиционным.
- 8. Обоснован предложенный привод стартер-генераторной установки автомобиля (патент РФ № 2229767), повышающий возврат рекуперируемой энергии на 18% по сравнению с традиционной схемой.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Adzhimanbetov S. B. Two concepts of urban electric vehicle drive (Две концепции регулирования скорости городского электромобиля) /Кhatagov A. Ch., Khatagov Z. A. 2019 International Russian Automation Conference IEEE. (статья №8867798, Scopus).
- 2. Adzhimanbetov S. B. Conceptual Design Methodics of Hybrid Car Traction Drive [ICIE2020] / Khatagov A. Ch., Khatagov Z.A. (Методика концептуального проектирования тягового привода гибридного автомобиля). Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering, Volume II, Pages 643-651 (Материалы 6-й Международной конференции промышленных инженеров 2020, часть 2, с. 643-651, Сочи.) (Scopus).
- 3. Аджиманбетов С.Б. Стартерные и гибридные силовые установки автомобилей:/ монография/ С.Б. Аджиманбетов С.Б./. Владикавказ: Издательство ФГБОУ ВО «Горский госагроуниверситет», 2020. 175 с.
- 4. Аджиманбетов С.Б. Расчет мощности электродвигателя и емкости батареи для электромобиля / Кодзаев Т.Б., Дрияев Т.В.//Вестник научных трудов молодых ученых, аспирантов и магистрантов, №54, с.165-167 ФГБОУ ВО Горский ГАУ, 2017.
- 5. Аджиманбетов С.Б., Электромобиль с автономным зарядным устройством / Токарев В.А.// Материалы международной НПК «Научное обеспечение устойчивого развития АПК горных и предгорных территорий», посвященной 100-летию Горского ГАУ часть 1, с.321 323– ФГБОУ Горский ГАУ, Владикавказ 2018.
- 6. Аджиманбетов, С.Б. Двухступенчатая система пуска двигателя / С.Б. Аджиманбетов, Г.И. Мамити, М.С. Льянов // Автомобильная промышленность. -2002.-N 28.-c.23-24.

- 7.Аджиманбетов, С.Б. Новый выключатель электростартера / С.Б. Аджиманбетов // Автомобильная промышленность. 2003. № 7. с. 19.
- 8.Аджиманбетов, С.Б. Защита аккумуляторной батареи от перезаряда / С.Б. Аджиманбетов // Автомобильная промышленность. 2004. № 1. с. 31-32.
- 9. Аджиманбетов, С.Б. Способ повышающий эффективность торможения АТС с гибридным приводом / С.Б. Аджиманбетов // Автомобильная промышленность. 2005. № 9. с. 28.
- 10.Аджиманбетов, С.Б. Автомобиль с комбинированной силовой установкой. Торможение электродвигателем / С.Б. Аджиманбетов, И.Х. Есенов // Автомобильная промышленность, 2006, № 3. с. 19.
- 11. Аджиманбетов, С.Б. Рациональный привод вентилятора системы охлаждения ДВС / С.Б. Аджиманбетов // Труды СКГМИ (ГТУ) вып. 12. Владикавказ 2005 г. с. 129.
- 12. Аджиманбетов, С.Б. Пуск ДВС в две ступени / С.Б. Аджимабетов //Известия ГГАУ 2003г. Т.40, Владикавказ с.82-83.
- 13.Аджиманбетов, С.Б. Двухэтапный пуск ДВС электростартером / С.Б. Аджиманбетов // Автомобильная промышленность. 2007. № 7. с. 11-12.
- 14. Аджиманбетов, С.Б. Стартер-генератор транспортного средства / С.Б. Аджиманбетов // Известия ФГБОУ ВПО «Горский ГАУ». 2007 т. 42. с. 125-126.
- 15.Аджиманбетов, С.Б. Втягивающее реле электростартера ДВС / С.Б. Аджиманбетов, И.Х. Есенов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2009. № 3. с. 36-37.
- 16. Аджиманбетов, С.Б. Система эффективного электрического торможения АТС / С.Б. Аджиманбетов, И.Х. Есенов // Автомобильная промышленность. -2010. -№ 5. -c. 20-22.

- 17. Аджиманбетов, С.Б, Автомобильные комбинированные энергоустановки и их классификация / С.Б. Аджиманбетов // Автомобильная промышленность. 2011. N = 8. с. 13-17.
- 18.Аджиманбетов, С.Б. Гибридомобиль с вариатором /
   С.Б. Аджиманбетов // Автомобильная промышленность. 2011. № 9. с. 9 10.
- 19.Аджиманбетов, С.Б. Электростартер с маховиком / С.Б. Аджиманбетов // Автомобильная промышленность. –2011. –№ 12. с. 19-20.
- 20. Аджиманбетов, С.Б. Тиристорное включение электростартера ДВС / С.Б. Аджиманбетов, И.Х. Есенов // Проектирование специальных машин для освоения горных территорий. Матер.межд. научно-практ. конф. Владикав-каз: ФГБОУ ВПО «Горский ГАУ». 2011. с. 5-6.
- 21. Аджиманбетов, С.Б. Электростартерный пуск ДВС и устройства его облегчения / С.Б. Аджиманбетов // Автомобильная промышленность. 2012. N 10. с. 14-18.
- 22.Аджиманбетов, С.Б. Моделирование двухэтапного пуска ДВС [Текст] / С.Б. Аджиманбетов, Э.К. Гутиев // Автомобильная промышленность, 2013, № 9.-c. 12-14.
- 23. Аджиманбетов, С.Б., Экспериментальное исследование двухэтапного электростартерного пуска ДВС / С.Б. Аджиманбетов, В.И. Кесаев // Известия ФГБОУ ВПО ГГАУ, №52(2), 2015. с.169 172.
- 24.Аджиманбетов, С.Б., Система двухрежимного электростартерного пуска ДВС / Аджиманбетов С.Б., Тхапсаев В.А.// Известия ФБГОУ ВО ГГАУ, №53(1), 2016. с. 97 101.
- 25.Аджиманбетов, С.Б., Расчет системы двухэтапного пуска ДВС/Аджиманбетов С.Б., Есенов И.Х.//Автомобильная промышленность, 2017, №8. с. 32- 33.
- 26.Аджиманбетов, С.Б. Расчет маховика максимальной энергоемкости для электростартера ДВС/Аджиманбетов С.Б., Есенов И.Х., Бидеева

- И.Х.//Сб. Перспективы развития АПК в современных условиях, материалы 7й международной НПК, Владикавказ, 2017 с.324 325.
- 27. Аджиманбетов С.Б. Оценка эффективности системы рекуперации гибридного автомобиля с вариатором/Аджиманбетов С.Б., Льянов М.С.//Материалы всероссийской НПК «Достижения науки сельскому хозяйству». Горский ГАУ. Том 1, часть 1. Владикавказ, ФГБОУ ВО Горский ГАУ, 2017, с.278-281.
- 28.Аджиманбетов С.Б. Гибридная силовая установка автомобиля/Аджиманбетов С.Б., Уртаев Т.А.// Материалы всероссийской НПК «Достижения науки сельскому хозяйству». Горский ГАУ. Том 1, часть 1. Владикавказ, ФГБОУ ВО Горский ГАУ, 2017, с.281-284.
- 29. Аджиманбетов С.Б., Льянов М.С.Автономное электрическое транспортное средство для фермерских хозяйств/ Материалы всероссийской НПК «Инновационные технологии производства и переработки с.х. продукции» в честь 90-летия факультета технологического менеджмента, часть 2, с. 144-146 ФГБОУ Горский ГАУ, Владикавказ 2019.
- 30. Adzhimanbetov S. B. Conceptual design methodology of electric vehicle drive / Khatagov A. Ch., Khatagov Z.A. [ICIE2021]. (Методика концептуального проектирования привода электромобиля). Международная конференция промышленных инженеров 2021, Сочи. (Scopus).
- 31. Аджиманбетов С.Б., Катаев А.Ю. Два способа управления скоростью электромобиля. / Научные труды студентов Горского ГАУ «Студенческая наука агропромышленному комплексу» №58 (2), с. 158 160, ФГБОУ ВО Горский ГАУ 2021.
- 32. Айзенцон, А.Е. Модель работы системы электропуска ДВС / А.Е. Айзенцон, Ю.В. Гармаш, Е.В. Латахина, // Автомобильная промышленность. −2005. №5. с.16-18.
- 33. Александров, И.К. Перспективы развития АТС с электроприводом / И.К. Александров, В.А. Раков, А.А. Щербаков // Автомобильная промышленность. 2012. №1. с. 8-10.

- 34. Анисимов, В.М. Электромеханические стартер генераторные системы автомобильных транспортных средств (теория, проектирование, исследование). Автореферат на соискание ученой степени д.т.н. по специальности 05.09.01. электромеханика и электрические аппараты. / В.М. Анисимов. Сам. ГТУ, Самара 2004 г. 42с.
- 35.Богданов К.Л. Тяговый электропривод автомобиля М.: МАДИ  $2009-56~\mathrm{c}$ .
- 36. Белоусов, Б.Н. Автомобили с гибридной трансмиссией и КЭУ / Б.Н. Белоусов, Д.Б. Изосимов, К.Г. Лексин // Автомобильная промышленность, 2006, №6, с.4-6.
- 37. Белоусов, Б.Н. О проблеме создания наземных тягово транспортных средств с мехатронными системами / Б.Н. Белоусов // Автомобильная промышленность. 2012. №1. с.22-24.
- 38. Белоусов, И.С. Пуск тракторных дизелей / И.С. Белоусов, Г.М. Крохта // Новосиб. гос. аграрн. ун – т. – Новосибирск, 2003. – 146с.
- 39. Благонравов, А.А. Механическая бесступенчатая передача для трансмиссии городского АТС с рекуперацией энергии при торможении / А.А. Благонравов, А.В. Юркевич, В.А. Солдаткин // Автомобильная промышленность. 2012. №1. с. 18-21.
  - 40.Борисевич А.В.Моделирование литий-ионных аккумуляторов для систем управления Батареями: обзор текущего состояния. // Современная техника и технологии. 2014. № 5 [Электронный ресурс]. URL: http://technology.snauka.ru/2014/05/3542 (дата обращения: 01.10.2017).
- 41. Васильев, В. Зимние помощники моторов / В. Васильев // Автомобильный транспорт. 2003. №11. с.20-22.
- 42. Венцель, С.В. Применение смазочных масел в автомобильных и тракторных двигателях / С.В. Венцель М.: Химия, 1969 240с.
- 43.Ветров. Ю. Утвержден единый для всех континентов измерительный ездовой цикл WLTC: что это значит? <a href="https://autoreview.ru/articles/toplivnaya-ekonomichnost/vsemirnyy-cikl">https://autoreview.ru/articles/toplivnaya-ekonomichnost/vsemirnyy-cikl</a>

- 44.Ветров. Ю. Представляем ARDC ездовой цикл Авторевю для оценки топливной экономичности. <a href="https://autoreview.ru/articles/toplivnaya-ekonomichnost/nauka-i-zhizn">https://autoreview.ru/articles/toplivnaya-ekonomichnost/nauka-i-zhizn</a>
- 45. Воробьёв Обухов, А. Инерция «Порше» / А. Воробьёв Обухов // «За рулём». 2010. №6. с.157.
- 46. Галкин, Ю.М. Электрооборудование автомобилей и тракторов / Ю.М. Галкин М.: Машиностроение, 1968 280с.
- 47. Гзовский, М. Слово имеют гибриды / М Гзовский // «За рулём». 2003. №6. с.86-88.
- 48.ГОСТ 51709 2001 Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки.
- 49. ГОСТ 52230 2004 Электрооборудование автотракторное. Общие технические условия.
- 50. ГОСТ 53829 2010 Автотранспортные средства. Стартеры электрические. Технические требования и методы испытаний.
- 51. ГОСТ 53165 2008 Батареи аккумуляторные свинцовые стартерные для автомобильной техники. Общие технические условия.
- 52. ГОСТ Р.7.05 2008 Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления.
- 53. Гулиа, Н.В. Инерционные аккумуляторы энергии / Н.В. Гулиа Воронеж: изд. Воронежского университета, 1973 240 с.
- 54. Гулиа, Н.В. Механическая гибридная силовая установка / Н.В. Гулиа, В.В. Давыдов, В.А. Бабин и др. // Автомобильная промышленность. 2010. №8. с.10-12.
- 55. Гулиа, Н.В. Удивительная физика [электронный ресурс] / Н.В. Гулиа. Режим доступа: http://bookz.ru/autors/gulia.
- 56.Гулиа Н.В., Юрков С. Новый многодисковый вариатор с «мягкой» рабочей характеристикой. N-T.ru, электронная библиотека «Наука и техника». <a href="http://n-t.ru/tp/ts/mv.htm">http://n-t.ru/tp/ts/mv.htm</a>

- 57. Гусаков, С.В., Энергетический баланс гибридной силовой установки автомобиля при его движении в соответствии с новым европейским испытательным циклом *NEDC*/ С.В. Гусаков, И.В. Афанасьева, В.А. Марков // Грузовик &. − 2010. №7. с.22-34.- (Исследование.Расчёт).
- 58. Дасоян, М.А. Стартерные аккумуляторные батареи. Устройство, эксплуатация, ремонт / М.А. Дасоян, Н.И. Курзуков, О.С. Тютрюмов и др. М.: Транспорт, 1994 242с.
- 59. Дидманидзе, О.Н. UltraCap: области применения. / О.Н. Дидманидзе, С.А. Иванов, Г.Н. Смирнов // «Ремонт, восстановление, модернизация». 2005 №4. с.11-14.
- 60. Дьяков, В.П. MATLAB 6 (6/1) 6.5 Simulink 4/5. Основы применения / В.П. Дьяконов М.: Солон Пресс, 2002 768 с.
- 61. Егоров, А.В. ДВС, дающий возможность рекуперации энергии торможения автомобиля/ А.В. Егоров, В.Н. Сергеев, К.Н. Сергеев и др. // Автомобильная промышленность. 2009 №2 с.6-8.
- 62. Ефремов, И.С. Теория и расчёт тягового привода электромобилей / И.С. Ефремов, А.П. Пролыгин, Ю.М. Андреев, А.Б. Миндлин. М.: Высшая школа 1984. 379с.
- 63. Иванченко, П.Н. Электромеханические передачи / П.Н. Иванченко.— М.Л.: Машгиз 1962. 432c.
- 64. 49.Ильчук И.А. Способы повышения надёжности пуска ДВС при низких температурах / И.А. Ильчук //Автомобильная промышленность. 2003. №12, с.22-24.
- 65. Ипатов, А.А. АТС с комбинированными силовыми установками/ А.А. Ипатов, В.В. Карницкий, И.М. Минкин //Автомобильная промышленность. 2002. №7. с. 36-39.
- 66. Карунин, А.Л. Экспериментальный многоцелевой гибридный автомобиль/ А.Л. Карунин, С.В. Бахмутов, В.В. Селифонов и др. // Автомобильная промышленность. 2006. №7. с.5-7.

- 67. Клюкин, П.Н. Автомобильный вентильно- индукторный стартер генератор/ П.Н. Клюкин, Нгуен Куанг Тхиеу, В.В Марков // Автомобильная промышленность. 2012. №5. с.13-15.
- 68. Колодочкин, М. Таблетка для возбуждения./ М. Колодочкин // За рулем. 2001. №4. –с. 90-91.
  - 69. Коммерческие автомобили. М.: Третий Рим -2000 202 с.
  - 70. В.Н. Кравец, В.В. Селифонов. Теория автомобиля. –Москва: ООО «Гринлайт+», 2011, С. 884 (с. 171).
- 71.Котиев Г.О., Харитонов С.А., Нагайцев М.В. Метод расчета динамических характеристик транспортного средства с гибридной трансмиссией, построенной по схеме GM/Журнал автомобильных инженеров 2011, №4 (69) 2011 и №5(70) с. 8-11.
- 72. Кропп, А.Е. Устройство для экономии топлива при движении автомобиля в городском цикле./ Кропп А.Е. // Автомобильная промышленность. 2012. №6. с.22-25.
- 73.Ксеневич, И.П. Идеология проектирования электромеханических систем для гибридной мобильной техники/ И.П. Ксеневич, Д.Б. Изосимов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2007. №1; 2007. №2. с.12-19.
- 74. Кублановский, Я.С. Тиристорные устройства / Я.С. Кублановский. М.: Энергия, 1978 86с.
- 75. Кудрявцев В.Н. Планетарные передачи М.: Машиностроение, 1966 – 307 с.
- 76. Куликов И.А, Селифонов В.В., Филонов А.И. Поиск оптимального управления гибридной силовой установкой автомобиля по критерию баланса его экологических и топливно-экономических свойств. / Известия МГТУ МАМИ №2 (10), 2010, с.44-51.
- 77. Лазарев, А.А. Совершенствование электростартерной системы пуска ДВС: автореферат диссертации на соискание учёной степени к.т.н. по спе-

- циальности 05.09.03.- электротехнические комплексы и системы / А.А. Лазарев. Ивановский ГЭУ. Иваново, 2009 г. 20с.
- 78. Лебедев, С.А. Альтернативные источники тока для систем электростартерного пуска ДВС / С.А. Лебедев, В.С. Антипенко // Автомобильная промышленность. 2009. №11. с. 9-11.
- 79. Литвинов, А.С. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств / А.С. Литвинов, Я.Е. Фаробин М.: Машиностроение, 1989. 240 с.
- 80. Ломакин В.В., Шабанов А.А., Шабанов А.В. К вопросу выбора мощности и алгоритма работы силовой установки гибридного автомобиля /Журнал автомобильных инженеров, 2013, №6, с. 40-45.
- 81. Мамити, Г.И. Проектирование тормозов автомобилей и мотоциклов / Г.И. Мамити Минск: Дизайн ПРО, 1997 112 с.
- 82. Мацкерле Ю. Современный экономичный автомобиль/ Ю. Мацкерле, пер. с чешск. М.: Машиностроение, 1987 320с.
- 83. Методика определения экономической эффективности использования в сельском хозяйстве результатов научно исследовательских и опытно конструкторских работ, новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. М.: Россельхозиздат. 1984. 104с.
- 84. Моржаретто, И. Битва на Волге (История Российского автопрома, ВАЗ) / И. Моржаретто // За рулём. 2013. №1. с. 176-180.
- 85. Набоких, В.А. Концептуальное электрооборудование автомобилей./ В.А. Набоких // Автомобильная промышленность. 2002. №10. с. 5-6.
- 86. Нагайцев М.В. Разработка общих алгоритмов работы блока управления магистральным тягачом с комбинированной энергоустановкой. / Известия МГТУ МАМИ, 2014, №2 (20), т.4 с. 72-78.
- 87. Никишин, С.В. Новая схема комбинированных силовых агрегатов для ATC./ С.В. Никишин // Автомобильная промышленность. 2005. №11. с. 27-29.

- 88. Овсянников, Е.М. Стартер генераторные устройства для автомобильных ДВС / Е.М. Овсянников, П.Н. Клюкин // Автомобильная промышленность.  $2012. N_{2}9. c.11-13.$
- 89. Патент 2546047 РФ, МПК F 16H 3/42/ Зубчатый реверсивный вариатор/ Абаев А.Х., Джанаев В.Х, Абаев З.А., Кочиев З.Т. Опубл. 10.04.2015.
- 90. Патент №2239090 РФ, МПК F02N 15/02 Система электростартерного пуска ДВС. / С.Б. Аджиманбетов, М.С. Льянов, И.Ч. Цховребова // Горский ГАУ// опубл. 27.10.2004, Бюл. №30.
- 91.Патент №2229767 РФ, МПК Н02k 7/18 Устройство эффективного торможения транспортного средства с гибридным приводом / Аджиманбетов С.Б./ Горский ГАУ //опуб. 27.05.2004, Бюл. №15.
- 92. Патент №2280190 РФ, МПК F02N 15/00 Система двухступенчатого электростартерного пуска ДВС транспортного средства / Аджиманбетов С.Б., Тангатаров М.Я. / Горский ГАУ // опуб. 20.07.2006, Бюл. №20.
- 93. Патент №2320888 РФ, МПК F02N 15/02 Система двухэтапного электростартерного пуска ДВС / Аджиманбетов С.Б. опубл. 27.03.2008, Бюл.№9.
- 94. Патент №2350774 РФ, МПК F02N 15/06; F02N 11/00 Выключатель электростартера ДВС / Аджиманбетов С.Б., Есенов И.Х., Бурдзиев А.Г. опуб. 27.03.2009, Бюл. №9.
- 95. Патент №2418974 РФ, МПК F02N 15/00 Система бесконтактного включения электростартера ДВС транспортного средства / Аджиманбетов С.Б., Есенов И.Х. опуб. 20.05.2011, Бюл.№14.
- 96. Патент №2462611 РФ, МПК F02N 15/02 Система электростартерного пуска ДВС / Аджиманбетов С.Б., Глабец А.А., Голобоков М.Г. опуб. 27.09.2012, Бюл. №
- 97. Патент №2479744 РФ, МПК F02N 11/00 Система двухрежимного электростартерного пуска ДВС / Аджиманбетов С.Б. опуб. 20.04.13 Бюл.№11.

- 98. Патент РФ на полезную модель №97174 МПК F02 P 5/04 Привод вентилятора системы охлаждения ДВС / Аджиманбетов С.Б. опуб. 27.08.2010, Бюл. №24.
- 99. Патент 2703639 на изобретение. Рос. Федерация: МПК B60L 50/60 Способ управления приводом электромобиля и устройство для его осуществления /Аджиманбетов С.Б., Хатагов А.Ч., Хатагов З.А., Дрияев Т.В.; заявлено 30.10.2018; опубл. 19.12.2019. Бюл.№35.
- 100. Патент 2729847 на изобретение, Рос. Федерация МПК F16H 15/50 Широкодиапазонная реверсивная трансмиссия / Хатагов А.Ч, Хатагов З.А. , Аджиманбетов С.Б.; заявл. 19.02.2020; опубл. 12.08.2020. Бюл. №23 9 с.: ил.
- 101.Патент РФ, №2131361, МПК B60L 7/22; B60L15/08; B60L11/04 Тяговый электропривод постоянного тока. /Кашканов В.В. Опубл. 10.06.1999.
- 102.Патент РФ №2332599, МПК F16H 15/52 Бесступенчатая передача / Гулиа H.B. Опубл. 27.08.2008
- 103. Патент РФ № 2523507, МПК F 16H 15/52 Широкодиапазонный бесступенчатый привод (Супервариатор) /Гулиа Н.В. Опубл. 20.07.2014. Бюл. №20.
- 104. Раков, В.А. Определение необходимой мощности ДВС гибридных силовых установок транспортных средств/ В.А. Раков, А.В. Смирнов // Вестник машиностроения. 2010. №4. с. 32-35.
- 105. Робустов, В.В. Системный анализ факторов влияния на успех пуска ДВС в условиях низких отрицательных температур / В.В. Робустов // Омский научный вестник ОГТУ. 2006. №3. с. 100-104.
- 106. Семёнов, Н.В. Эксплуатация автомобилей в условиях низких температур / Н.В. Семёнов. М.: Транспорт, 1993 190с.
- 107.Сердечный Д.В. Томашевский. Ю.Б. Моделирование многоэлементных литий-ионных аккумуляторов в станционных комплексах автономных объектов. Бюллетень Южно-Уральского университета, серия Энергетика, 2017, вып. 17, №3, с. 86 94.

- 108. Сколков, А.В. Стартер генераторное устройство российскому автопрому / А.В. Сколков, Д.Е. Пронин // Автомобильная промышленность. 2011. №2. с. 20-21.
- 109. Скрипко, Л.А. Перспективы гибридных АТС. / Л.А. Скрипко // Автомобильная промышленность. 2012. №2. с. 8-10.
- 110. Скрипко, Л.А. Некоторые результаты моделирования гибридных автомобилей / Л.А. Скрипко // Автомобильная промышленность. 2012. №7. с. 8-10.
- 111. Соснин, Д.А. Новейшие автомобильные электронные системы / Д.А. Соснин, В.Ф. Яковлев М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 250 с.
- 112. Стандарт отрасли ОСТ 37.001.052 2000 Двигатели автотранспортных средств. Качества пусковые. Технические требования. – 16с.
- 113. Техническая эксплуатация автомобилей / Е.С. Кузнецов, В.П. Воронов, А.П. Болдин и др.: под ред. Кузнецова Е.С. М.: Наука, 2001. 535с.
- 114. Титков, А.И. От концепции к стратегии развития автомобильной промышленности России в первой четверти XXI века / А.И. Титков // Автомобильная промышленность. 2005. №2. с. 1-4.
- 115. Фещенко, А.И. Тенденции развития электропусковой системы и системы электроснабжения в автомобилях [Электронный ресурс] / А.И. Фещенко, С.А. Феофанов // МАДИ (ГТУ)/ 2007/ Режим доступа: Formulahybrid.ru.
- 116. Филькин Н.М., Умняшкин В.А., Музафаров Р.С. Гибридные автомобили: основы проектирования, конструирование и расчет М.: ФОРУМ Инфра М, 2014 240 с.
- 117. Фомин, А. Скрестив бензин с электричеством / А. Фомин //За рулём. 2009. №2. с.142-147.
- 118.Халютин С.П., Жмуров Б.В., Старостин И.Е. Математическое моделирование электрохимических процессов в литий-ионных аккумуляторах потенциально-потоковым методом. Научный вестник МГТУ ГА, №201, 2014, с. 65–73

- 119. Хортов, В.П. Снимаем! / В.П. Хортов // Изобретатель и рационализатор. — 1989. — №3. — с.20-21.
- 120. Хортов, В.П. Новые направления в развитии электрооборудования АТС. / В.П. Хортов // Автомобильная промышленность. 1999. №9. с. 13-15.
- 121. Хортов, В.П. Будущее за высоковольтными системами пуска ДВС./ Хортов В.П. // Автомобильная промышленность. 2000. №4. с. 14-16.
- 122. Черных, И.В. Simulink: среда создания инженерных приложений / И.В. Черных М: ДИАЛОГ-МИФИ. 2004. 496c. http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/
- 123. Чижков, Ю.П. Электростартерный пуск автотракторных двигателей / Ю.П. Чижков, С.М. Квайт, Н.Н. Сметнёв— М: Машиностроение, 1985. 160с.
- 124. Чижков, Ю.П. Электрооборудование автомобилей и тракторов / Ю.П. Чижков. М.: Машиностроение. 2007. 656с.
- 125. Чижков, Ю.П. Электростартер с маховиком и дополнительным редуктором / Ю.П. Чижков // Автомобильная промышленность. 2000. №5. с. 18-20.
- 126. Чижков, Ю.П. Расчёт системы электростартерного пуска с комбинированным источником тока / Чижков Ю.П., Малеев Р.А., Коротков В.И. и др. // Автомобильная промышленность. 2005. №8. с. 26-28.
- 127. Чиликин М.Г, Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. 6-е изд. Доп. И перераб. М.: Энергоиздат, 1981. 576 с.
- 128. Чмиль, В.П. Гибридные силовые установки как инструмент повышения экономичности и экологичности АТС/ В.П. Чмиль, Ю.В. Чмиль // Автомобильная промышленность. 2012. №3. с. 10-12.
- 129. Чмиль, В.П. Система рекуперации кинетической энергии автомобиля КамАЗ / В.П. Чмиль, Ю.В. Чмиль // Автомобильная промышленность. 2012. №8. с.13-15.

- 130. Шевченко, А.Ф. Стартер генераторное устройство для легковых автомобилей класса ВАЗ -2110 / А.Ф. Шевченко, А.С. Медведко, Ю.Г. Бухгольц и др. // Электротехника. -2003. -№9. -c. 15-19.
- 131. Шилова, Е.П. Что надо знать об аккумуляторах? / Е.П. Шилова. М.: Информагротех, 1995 60с.
- 132. Эксплуатация автомобилей в зимних условиях (Рекомендации) / Кузмичёв В.Е., Фокин В.В. М.: Россельхозиздат, 1977 47с.
- 133. Электромобиль: Техника и экономика / Щетина В.А., Морговский Ю.Я., Центер Б.И. и др.; под общей ред. В.А. Щетины Л.: Машиностроение. Ленинградскоеотделение, 1987 253с.
- 134. JamesLarminie, JohnLowry. Electric Vehicle Technology Explained. / John Wiley and Sons, Ltd 2003, p. 314.
- 135. Arnaud Villeneuve, Paulo Mendes; Renault, France./ Dual Mode Electric Infinitely Variable Transmission.
- 136.Marius Lehna / Hybridfahrzeugkonzepte im Spannungsfeld zwischen technischen Moglichkeiten und Marktanforderungen./ / 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2006, p. 1477- 1490.
- 137.Prof. Dr.-Ing. Bernd- Robert Hohn, Dr.-Ing. Hermann Pflaum, Dipl.-Ing. Claus Lechner / Optimiserter CVT Hybrid. // "Konstruktion" Oktober 10 2007, p. 69-70.
- 138.Hilda Bridges. Hybrid vehicles and hybrid electric vehicles new developments, energy management and emerging technologies. Nova publischers, New York, 2015-95s
- 139. Thomas J. Böhme, Benjamin Frank. Hybrid Systems, Optimal Control and Hybrid Vehicles Theory, Methods and Applications. Springer International Publishing AG 2017 549 s.
- 140. USA Patent №1 150 523, 290/22 Engine starting device // C.F. Kettering, 17.08.1915, p.18, 3 sheets.
- 141.USA Patent №5 508 566 Starter for starting an engine / Yasuhiro Nagao et al. F 02 n 11/00; H 02 p 9/04, Nippondenso Co., Ltd, Kariya, Japan.

142.Mikael Cugnet. Highly Accurate Li-ion Battery Simulation.https://www.comsol.ru/story/download/179813/CEA CN2013.pdf

143.High Fidelity Electrical Model with Thermal Depedence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells / T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzari, R. Jackey // International Electric Vehicle Conference. – 2012. – P. 1–8. DOI: 10.1109/IEVC.2012. 6183271

144. <a href="http://akbinfo.ru/litievye/litij-ionnyj-akkumuljator.html">http://akbinfo.ru/litievye/litij-ionnyj-akkumuljator.html</a>

145.<u>http://www.toyota.co.jp/en/tech/environment/ths2/</u> (Материалы с официального вебсайта компании Тойота).

146.<u>http://autotesla.ru/tag/tesla-model-s</u>

147.<u>http://autotesla.ru/other-elektrokar/elektromobili-nissan/nissan-leaf-obzor-elektromobilya.html</u>

148. <a href="https://www.drom.ru/catalog/bmw/i3/specs/transmission/">https://www.drom.ru/catalog/bmw/i3/specs/transmission/</a>

149.https://auto.mail.ru/article/69782-pervyi\_test-

draiv\_koreiskogo\_elektrokara/

150.https://www.ford.com/cars/focus/models/focus-electric/

151.https://www.renault.fr/vehicules/vehicules-electriques/zoe.html

152. https://www.kia.com/us/en/vehicle/soul-ev/2018/features

https://elenergi.ru/tyagovyj-asinchronnyj-electroprivod-v-

avtomobilestroenii.html

153.https://econet.ru/articles/100045-electrodvigateli-kakie-oni-byvayut

154.w.w.w.ideasandmoney.ru

155.catalog-vaz.ru>vaz1111.php

156.habr.com>post/390361/Peter Kellerhoff

157.http://inerton.ucoz.ru/publ/ehlektronika/khity/analiz\_i\_sravnenie\_kharak teristik\_akkumuljatorov\_osnovnykh\_tipov/14-1-0-21

158. https://toyota-club.net/files/faq/21-01-10\_faq\_cvt\_ru.htm

### Список иллюстративных материалов

- 1. Рисунок 1.1 Классификация гибридных силовых установок (ГСУ)
- 2. Рисунок 1.2 Последовательная схема гибридной силовой установки автомобиля.
- 3. Рисунок 1.3 Параллельная схема гибридной силовой установки автомобиля.
  - 4. Рисунок 1.4 Смешанная схема гибридного привода автомобиля «Prius»
- 5. Рисунок 1.5— Гибридный автомобиль с электрической машиной двойного вращения
- 6. Рисунок 1.6 Схема городского автобуса с маховиковым накопителем энергии.
- 7. Рисунок 1.7 Гидропневматический рекуператор энергии торможения для автотранспорта
- 8. Рисунок 1.8. Перевод ДВС в режим компрессора для рекуперации энергии торможения ATC.
- 9. Привод электромобиля «Тесла»
- 10. Рисунок 1.10 Вариаторная коробка передач с гидротрансформатором
- 11 Рисунок 1.11 Вариаторная коробка передач со стартовым редуктором (*«Direct Shift CVT»*)
- 12. Рисунок 1.12 Зубчатый реверсивный вариатор
  - 13. Рисунок 1.13 Процесс изменения момента стартера (M) и частоты вращения коленчатого вала (n) при пуске шестицилиндрового дизеля
- 14. Рисунок 1.14 Схема включения электронагревателя в рубашку охлаждения блока цилиндров
- 15. Рисунок 1.15 Разогрев масла в поддоне картера и охлаждающей жидкости в блоке цилиндров одним нагревателем.
- 16. Рисунок 1.16 Традиционная схема включения стартера.

- 17. Рисунок 1.17 Механические характеристики стартеров в зависимости от вида возбуждения
- 18. Рисунок 1.18 Схема стартерного пуска  $\mathcal{A}BC$  с последовательным включением конденсаторов.
- 19. Рисунок 1.19 Схема системы стартерного пуска *ДВС* с параллельным включением конденсаторов.
- 20. Рисунок 1.20 Схема стартерного пуска  $\mathcal{A}BC$  с высоковольтными конденсаторами.
- 21. Рисунок 1.21 Схема системы стартерного пуска *ДВС* с использованием суперконденсаторов
- 22. Рисунок 1.22 Система стартерного пуска *ДВС* с планетарным мультипликатором и встроенным маховиком
- 23. Рисунок 1.23 Классификация средств облегчения пуска двигателя внутреннего сгорания
- 24. Рисунок 1.24— Первый электростартер автомобиля (1912г.)
- 25. Рисунок 1.25 Схема переключения стартер-генератора в режим стартера.
- 26. Рисунок 1.26 Блок-схема асинхронного стартер-генератора Самарского  $\Gamma T Y$
- 27. Рисунок 1.27 Блок-схема  $C\Gamma V$  с синхронным электродвигателем, разработка AвтоBA3a и Новосибирского  $\Gamma TV$ .
- 28 Рисунок 1.28 Традиционная схема включения стартера генератора
- .29. Рисунок 1.29 Схема электрической машины встроенной в коробку передач.
- 30. Рисунок 1.30– Классификация стартер-генераторных установок (СГУ)
- 31. Рисунок 2.1 Управление скоростью автомобиля изменением скорости вращения двигателя (традиционное управление)
- 32. Рисунок 2.2 Управление скоростью автомобиля бесступенчатым изменением передаточного числа трансмиссии (параметрическое управление)

- 33 Рисунок 2.3 Разгон (а) и торможение (б) транспортного средства при двух принципах управления его скоростью движения.
- 34. Рисунок —2.4 Схема привода электромобиля с бесступенчатой трансмиссией по параметрическому принципу управления скоростью движения без регулирования частоты вращения электродвигателя.
- 35. Рисунок 2.5 Лист *Excel*-формуляра эскизного расчета привода электромобиля с бесступенчатой трансмиссией (вариатор)
- 36. Рисунок 2.6 *Simulink*-модель привода электромобиля с бесступенчатой трансмиссией (вариатор)
- 37. Рисунок 2.7 Simulink-модель литий-ионной батареи
- 38. Рисунок 2.8 *Simulink*-модель трансмиссии: управляемый вариатор и главная передача
- 39. Рисунок 2.9 *Simulink*-модель формирования сигналов задания и регулирования
- 40. Рисунок 2.10 Simulink-модели якорной цепи электродвигателя (а) и обмотки его независимого возбуждения (б)
- 41. Рисунок -2.11 Динамика проектируемого электромобиля с вариаторным управлением скорости.
- 42. Рисунок— 2.12 *Simulink*-модель привода электромобиля с управлением скорости *ШИП(PWC)*
- 43. Рисунок— 2.13 Simulink-схема PWM Generator (субблока PWC)
  - 44. Рисунок 2.14 Динамика электромобиля с управлением скорости IIIIII
- 45. Рисунок 2.15 Диаграмма продольного ускорения  $\boldsymbol{a}$  (в м/с²) электромобиля с управлением UUUI в динамике (режим 1)
- 46. Рисунок 2.16 Городской ездовой цикл *ARDC*
- 47. Рисунок 2.17 Уменьшение заряда батареи электромобилей в течении первого ездового городского цикла (режим 3)
- 48. Рисунок 3.1 Внешние характеристики накопителей энергии.

- 49. Рисунок 3.2 Схема привода гибридного *ATC* с вариаторной трансмиссией
- 50. Рисунок— 3.3 Широкодиапазонная реверсивная трансмиссия
- 51. Рисунок -3.4 Лист Excel-формуляра концетуального расчета привода гибридного автомобиля
- 52. Рисунок 3.5 Simulink-модель привода гибридного автомобиля
- 53. Рисунок 3.6 Simulink-модель двигательной установки
- 54. Рисунок 3.7 Simulink-модель двигателя внутреннего сгорания (*ICE*)
- 55. Рисунок 3.8 Аппроксимация экспериментальных внешних скоростных характеристик *ДВС ВАЗ-1111*
- 56. Рисунок 3.9 Расчетная часть уточненного *Excel*-формуляра
- 57. Рисунок 3.10 Simulink-модель системы Start-stop гибридного автомобиля
- 58. Рисунок 3.11 *Simulink*-модель блока логики управления гибридного автомобиля
- 59. Рисунок 3.12 Динамика проектируемого гибридного автомобиля
- 60. Рисунок 4.1 Кинематическая схема традиционной системы стартерного пуска ( $TC\Pi$ )
- 61. Рисунок 4.2 Кинематическая схема двухэтапной системы стартерного пуска (ДСП).
- 62. Рисунок 4.3 Система двухэтапного стартерного пуска ДВС (патент РФ №2320888).
- 63. Рисунок 4.4 Двухэтапный стартер ДВС.
- 64. Рисунок 4.5 Двухэтапный пуск двигателя автотранспортного средства через сцепление (патент РФ №2280190).
- 65. Рисунок 4.6 Система двухэтапного стартерного пуска ДВС с маховиком (Патент РФ №2462611)
- 66. Рисунок 4.7 Система двухрежимного стартерного пуска ДВС (патент РФ №2479744).
- 67. Рисунок 4.8 Стартер-генератор автотранспортного средства

- 68. Рисунок 4.9 Существующая (двухконтактная) конструкция втягивающего реле стартера  $\mathcal{A}BC$ .
- 69. Рисунок 4.10 Одноконтактная конструкция втягивающего реле стартера ДВС (патент РФ №2350774).
- 70. Рисунок 4.11 Схема тиристорного включения стартера при двухэтапном пуске ДBC (патент РФ №2418974).
- 71. Рисунок 4.12 Устройство защиты аккумуляторной батареи от перезаряда
- 72. Рисунок 4.13 Гидромуфта вентилятора системы охлаждения двигателей семейства КамА3.
  - 73. Рисунок 4.14 Привод вентилятора системы охлаждения от коленчатого вала с электромагнитной муфтой (патент РФ на полезную модель №97174).
- 74. Рисунок 4.15 Механические характеристики электродвигателя постоянного тока в двигательном и генераторном режимах.
- 75. Рисунок 4.15 Изменение скорости V и остаточной кинетической энергии  $W_k$  автомобиля при выбеге
- 76. Рисунок 4.16 Устройство эффективного рекуперативного торможения автомобиля (патент РФ №2229767).
- 77. Рисунок 4.17 Блок-диаграмма моделирования процессов торможения автомобилей с различными  $C\Gamma V$ .
- 78. Рисунок 4.18 Результаты моделирования торможения автомобиля
- 79. Рисунок 4.19 Фрагмент правой нижней части рис. 4.18 при работе  $C\Gamma V$  с различными вариаторами (с  $i_{\text{вар}}^{\text{max}} = 4, 8, 16, 40$ ).
- 80. Рисунок 4.20 Схема рекуперативного торможения автотранспортного средства с вариатором.
- 81. Рисунок 5.1 Стенд для экспериментального исследования привода двухэтапного пуска  $\mathcal{A}BC$ .
- 82. Рисунок 5.2 Схема стенда для экспериментального исследования двухэтапного стартерного пуска (ДСП) ДВС.

- 83. Рисунок 5.3 Осциллограммы переходных процессов традиционного пуска  $\mathcal{L}BC$
- 84. Рисунок 5.4 Осциллограммы переходных процессов двухэтапного пуска  $\mathcal{L}BC$
- 85. Рисунок 5.5 Кривые потребления мощности стартером в течение переходного процесса пуска
- 86. Рисунок 5.6 Анализ переходных процессов двухэтапного стартерного пуска (ДСП) ДВС.
- 87. Рисунок 5.7 Переходные процессы при традиционном пуске ДВС.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ А

Поле минимальной пусковой частоты вращения коленчатого вала бензиновых двигателей в зависимости от температуры окружающего воздуха.

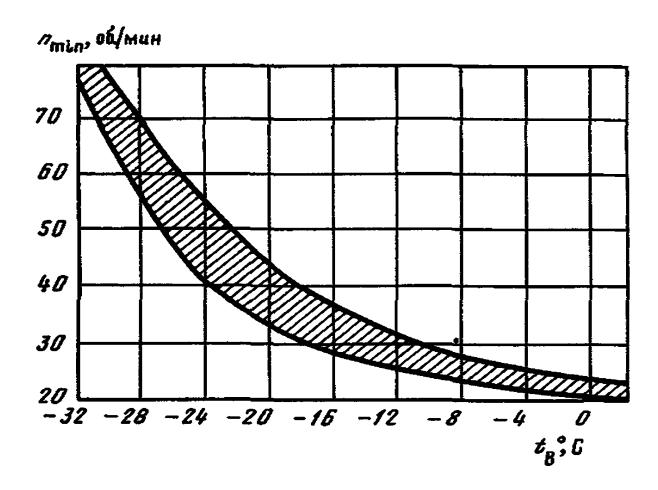
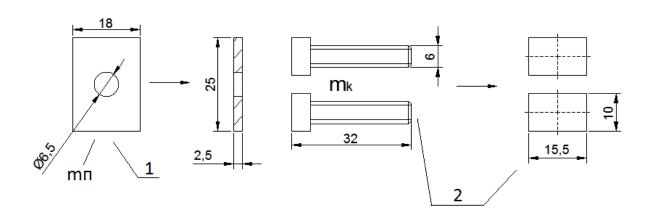


Рисунок А Зависимость требуемой частоты вращения коленчатого вала при пуске от температуры окружающего воздуха

# Конструкция традиционных и предлагаемых контактов втягивающего реле стартера.

Материал: электротехническая медь.

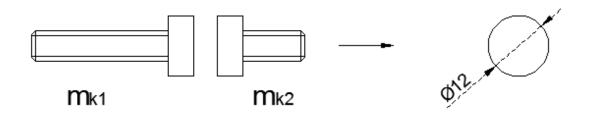
# 1. Традиционная конструкция контактов:



Общая маска контактной группы :  $m_1 = 2m_k + m_\pi = 2 \cdot 16 + 8.4 = 40.4$ г  $m_k =$  масса контактного болта, г;

 $m_{\pi}$  = масса контактной пластины, г.

### 2. Предлагаемая конструкция контактов:



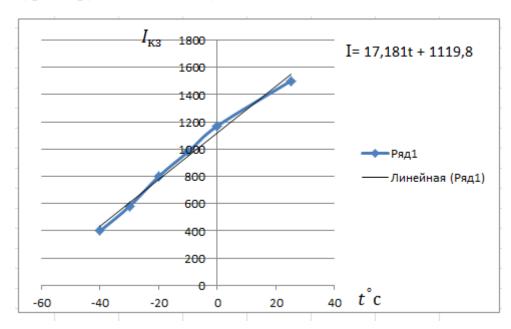
Общая масса контактной группы: $m_2=m_{k1}+m_{k2}=16+8=24$ г  $m_{k1}$ и  $m_{k2}$  -масса контактных болтов, г.

$$\Delta m = m_1 - m_2 = 40$$
,  $-24 = 16.4$ r

Предлагаемая конструкция контактов сокращает число контактных соединений и снижает переходное сопротивление в цепи питания стартера.

# Приложение В

Зависимость тока короткого замыкания аккумуляторной батареи от температуры окружающего воздуха [ ].



 $\begin{tabular}{ll} $\Pi$ риложение & $\Gamma$ \\ \begin{tabular}{ll} $\Gamma$ \\ \$ 

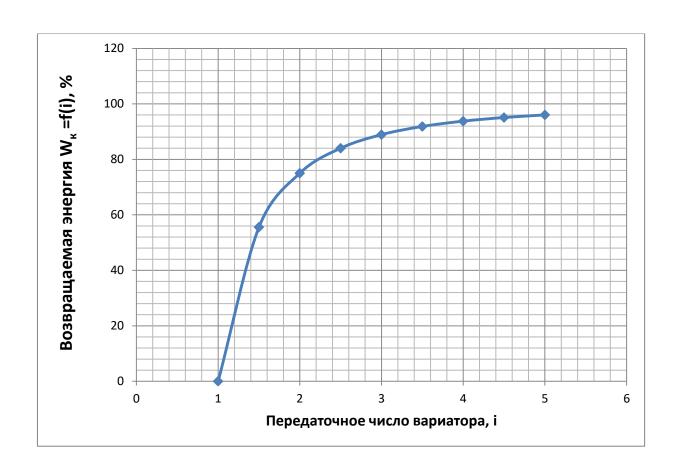
Description	Скорость V, м/с	Скорость V, м/с	Энергия Wк,
Время t, с	(теоретич.)	(эксперим.)	кДж
0	20	20	218
5	18,45269		185,5735
10	17,06393		158,6918
15	15,80726		136,1788
20	14,6617	14,12	117,1562
25	13,6104		100,9575
30	12,63964		87,06947
35	11,73813		75,09206
40	10,89649	11,12	64,70972
45	10,10686		55,67103
50	9,362604		47,77381
55	8,65804		40,8541
60	7,988294	8,89	34,778
65	7,349146		29,43542
70	6,736909		24,73534
75	6,148344		20,60216
80	5,580584	6,48	16,97289
85	5,031069		13,79485
90	4,4975		11,02399
95	3,977793		8,623447
100	3,470046	3,42	6,562463
105	2,972506		4,815507
110	2,483548		3,361565
115	2,001645		2,183587
120	1,525355	1,39	1,268055
125	1,053297		0,604642
130	0,584141		0,185965
135	0,116586		0,007408

# Приложение Д

Расчет зависимости возвращаемой энергии  $W_\kappa$  =f(i), от передаточного числа вариатора і при генераторном торможении транспортного средства

$$W_{\kappa} = 100 \cdot (1 - 1/i^2), \%$$

Передаточное число вариатора, і	Возвращаемая энергия W <sub>к</sub> =f(i), %
1	0
1,5	55,5556
2	75
2,5	84
3	88,88889
3,5	91,83673
4	93,75
4,5	95,06173
5	96



#### ПРИЛОЖЕНИЕ Е

# Зависимость пути выбега транспортного средства от тормозных усилий

$$\mathbf{S} = \mathbf{f}(\sum \mathbf{F} + \mathbf{F}_{\mathbf{T}}). \ \mathbf{S} = \frac{W_k}{\sum F + F_{\mathbf{T}}}$$

Исходные данные по выбегу транспортного средства (ВАЗ-2131):

- 1. Начальная скорость автомобиля при выбеге,  $V_H = 50 \text{км/ч} (13.9 \text{м/c});$
- 2. Масса автомобиля + 2 человека, m = 1350 + 150 = 1500 (кг);
- 3. Путь свободного выбега автомобиля,  $S_B = 500 \text{ м}$ ;
- 4. Кинетическая энергия автомобиля,  $W_k$  при начальной скорости,  $V_{\rm H} = 50$  км/ч (13,9 м/с):

$$W_k = mV^2/2 = 1500(13.9)^2/2 = 145000$$
 (Дж)

5.∑F – силы сопротивления движению автомобиля при выбеге:

$$\sum F = W_k / S_B = 145000 / 500 = 290 \text{ (H)}$$

 $6.F_{\scriptscriptstyle T}$  – тормозное усилие, прикладываемое автомобилю, берется кратно 290 Н (силам сопротивления движению).

$\sum F + F_{\mathrm{T}}$	$\mathbf{W}_{\mathrm{k}}$	S
290	145000	500
580	145000	250
870	145000	166,7
1160	145000	125
1450	145000	100
1740	145000	83,3
2030	145000	71,4
2320	145000	62,5
2610	145000	55,5
2900	145000	50
3190	145000	45,4
3480	145000	41,7

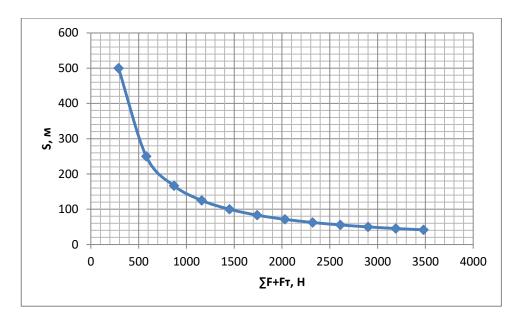


Рисунок 1E – Зависимость  $S = f(\sum F + F_T)$ 

#### приложение ж

# Исходные данные к расчету приведенного момента инерции кривошипно-шатунного механизма ДВС

Параметры	Обозначение	Значение	Размерность	
Радиус кривошипа коленчатого ва-				
ла	R	0,04	M	
Длина шатуна	l	0,12	M	
Масса шатуна	$m_u$	0,664	КГ	
Угловая скорость коленчатого вала	ω	11	1/c	
Отношение радиуса кривошипа к				
длине шатуна	$\lambda = R/l$	0,33	-	
Момент инерции коленчатого вала	$J_{\scriptscriptstyle \mathcal{K}\mathcal{G}}$	0,01572	КΓ*м <sup>2</sup>	
Момент инерции маховика	$J_{\scriptscriptstyle \mathcal{M}}$	0,11	КГ <b>*</b> М <sup>2</sup>	
Масса поршня	$m_n$	0,513	КГ	
Угол поворота коленчатого вала	α	до 720	градус	

Приведенный момент инерции ДВС расчитан по формуле:

$$J_{\pi p} = J_{M} + J_{KB} + 4m_{\Pi} \frac{V_{\Pi}^{2}}{\omega^{2}}$$
 (Ж1)

где  $J_{\text{м}}$ ,  $J_{\text{кв}}$  — моменты инерции соответственно маховика и коленчатого вала,  $\text{кг}^{\bullet}\text{м}^2$ ;

 $\omega$  – угловая скорость коленчатого вала, рад/с;

 $V_{\scriptscriptstyle \Pi}-$  скорость движения поршня, м/с;

Масса шатуна,  $m_{\rm m}$  распределена между коленчатым валом и поршнем:

0.725т<sub>ш</sub> = 0.725\*0.664 = 0.481(кг) передано коленчатому валу.

Скорость поршня рассчитывается по формуле:

$$V_{II} = -Rω(Sinα + \frac{\lambda Sin2α}{2 - \lambda^2 Sin^2α})$$
 (Ж2)

тогда 
$$J_{\text{пр}} = J_{\text{м}} + J_{\text{кв}} + 4m_{\text{п}} \cdot \frac{\left[-R\omega(\sin\alpha + \frac{\lambda Sin2\alpha}{2 - \lambda^2 Sin^2\alpha})\right]^2}{\omega^2}$$
 (Ж3)

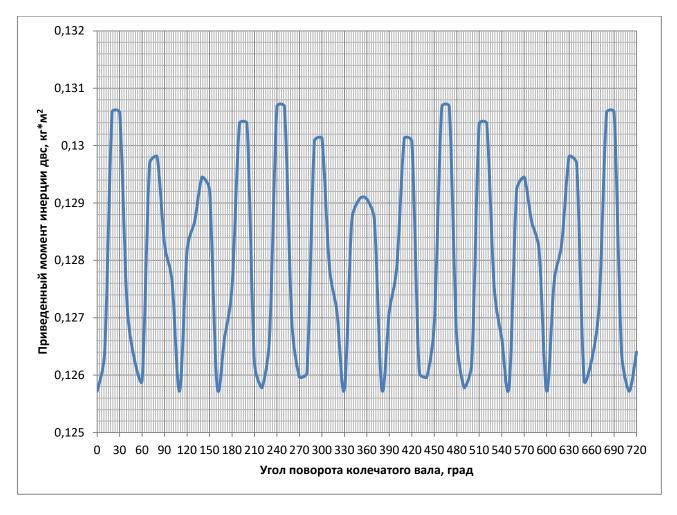


Рисунок Ж1 Кривая изменения приведенного момента инерции ДВС ВАЗ-  $2106\,$ 

Таблица Ж1 – Результаты расчета приведенного момента инерции ДВС

$N_{\underline{0}}$	Угол по-	Угол по- Приведенный		Угол по-	Приведенный	
$\Pi/\Pi$	ворота	момент		ворота	момент	
	коленвала	инерции двс		коленвала	инерции двс	
	градус	<b>к</b> Γ* <b>м</b> <sup>2</sup>		градус	<b>ΚΓ*M</b> <sup>2</sup>	
1.	0	0,12572	38.	370	0,128711	
2.	10	0,126405	39.	380	0,125755	
3.	20	0,130582	40.	390	0,127111	
4.	30	0,130576	41.	400	0,127899	
5.	40	0,127206	42.	410	0,130129	
6.	50	0,126257	43.	420	0,130077	
7.	60	0,125915	44.	430	0,126044	
8.	70	0,129688	45.	440	0,125964	
9.	80	0,129811	46.	450	0,126905	
10.	90	0,128279	47.	460	0,130677	

11.	100	0,127627	48.	470	0,130681
12.	110	0,125724	49.	480	0,126637
13.	120	0,12817	50.	490	0,125782
14.	130	0,128672	51.	500	0,126207
15.	140	0,129452	52.	510	0,130379
16.	150	0,129225	53.	520	0,130389
17.	160	0,125819	54.	530	0,127539
18.	170	0,126646	55.	540	0,126646
19.	180	0,127539	56.	550	0,125819
20.	190	0,130389	58.	560	0,129226
21.	200	0,130379	59.	570	0,129452
22.	210	0,126207	60.	580	0,128672
23.	220	0,125782	61.	590	0,12817
24.	230	0,126637	62.	600	0,125724
25.	240	0,130681	63.	610	0,127628
26.	250	0,130677	64.	620	0,128279
27.	260	0,126905	65.	630	0,129811
28.	270	0,125964	66.	640	0,129687
29.	280	0,126044	67.	650	0,125915
30.	290	0,130078	68.	660	0,126257
31.	300	0,130129	69.	670	0,127207
32.	310	0,127898	70.	680	0,130576
33.	320	0,127111	71.	690	0,130582
34.	330	0,125756	72.	700	0,126404
35.	340	0,128712	73.	710	0,12572
36.	350	0,129068	74.	720	0,126405
37.	360	0,129067			

# приложение 3

Сравнение мощностей, потребляемых стартером при традиционном и двух-этапном пусках.

	Мощность потребляемая стартером				
	при традицион-	при двухэтап-			
Время	ном пуске,	ном пуске,			
c	Вт	Вт			
4	883,7343	678,088			
3,5	892,4258	659,4927			
3	902,7638	632,2814			
2,5	915,5845	593,6788			
2	934,6422	535,2998			
1,5	968,4194	442,9049			
1	1036,679	503,57			
0,5	1219,566	663,6038			
0,1	1697,919	1378,867			
0	0	0			

Кривые потребления мощности стартером:

1 – при традиционном пуске; 2 – при двухэтапном пуске

#### приложение и

Зависимость момента сопротивления вращению коленчатого вала от температуры окружающего воздуха (автомобиль ГАЗ-53),

$$M_{c \text{ }_{\text{IB}}} = f(t_{\scriptscriptstyle B})$$

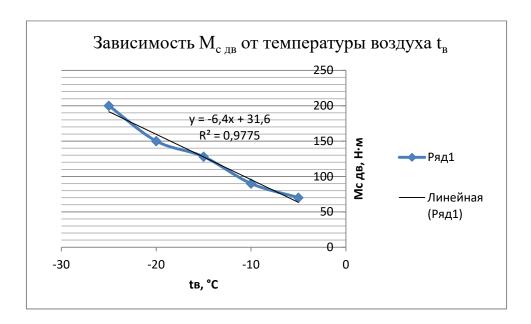


Рисунок М1 — Зависимость момента сопротивления вращению коленчатого вала от температуры окружающего воздуха (автомобиль  $\Gamma$ A3-53).

#### приложение к

# Справка о внедрении результатов НИР в Горском агроуниверситете

# МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «ГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

362040, РСО-А, г. Владикавказ, ул. Кирова, 37, тел. (8-867-2)53-23-04, факс (8-867-2)53-03-01 email: ggau@globalalania.ru

or 12.03.15 № 01-84/199

«Утверждаю» Проректор по УВР Горского ГАУ д.т.н., профессор

Т.Х. Кабалоев

Справка

об использовании результатов научно-исследовательской работы к.т.н., доцента кафедры «Техническая эксплуатация автомобилей» Аджиманбетова Султанхана Багатовича

Настоящая справка дана Аджиманбетову Султанхану Багатовичу в том, что результаты его научно-исследовательской работы - устройства повышающие эффективность функционирования стартерных и генераторных установок транспортных средств (патенты РФ № 2239090, № 2229767, № 2280190, № 2350774, № 2462611 и № 2479744), внедрены на кафедре «Техническая эксплуатация автомобилей» и используются в учебном процессе по подготовке бакалавров, магистров и инженеров по дисциплинам:

- «Техническая эксплуатация автомобилей» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 190600.62/23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» (профиль «Автомобили и автомобильное хозяйство», получающих квалификацию бакалавр;
- «Специальные главы технической эксплуатации автомобилей» для магистров, обучающихся по направлению подготовки 23.04.03/190600.68 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов (профиль магистерская программа «Эксплуатация транспортных средств»);
- «Технологическая эксплуатация автомобилей» для специалистов (инженеров), обучающихся по направлению подготовки 653300 «Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования» (Специальность 190601.65 «Автомобили и автомобильное хозяйство»).

Декан автомобильного факультета, зав. каф. ТЭА, д.т.н., профессор

М.С. Льянов

#### приложение л

#### Справка о внедрении результатов НИР в Дагестанском агроуниверситете

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации Департамент научно-технологической политики и образования

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

# ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.М. Джамбулатова

367032, г.Махачкала, ул.М.Гаджиева, 180; тел./факс (8-872-2) 69-35-25, 68-24-42 Факс 68-24-19; Электронная почта: (E- mail): daggau@list.ru

16 марга 20 15г.

No 30-244

«Утверждаю»
Проректор по учебной работе
ДагГАУ имени М.М. Джамбулатова
профессор С.А. Курбанов

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_2015 г.

#### СПРАВКА

об использовании результатов научно-исследовательской работы к.т.н., доцента кафедры «Техническая эксплуатация автомобилей» Горского ГАУ Аджиманбетова Султанхана Багатовича

Настоящая справка дана Аджиманбетову С.Б. в том, что результаты его научно-исследовательской работы: устройства, повышающие эффективность функционирования стартерных и генераторных установок транспортных средств (патенты РФ № 2239090, № 2229767, № 2280190, № 2350774, № 2462611 и № 2479744), внедрены на автомобильном факультете ДагГАУ имени М.М. Джамбулатова и используются в учебном процессе по подготовке инженеров по дисциплине «Техническая эксплуатация автомобилей» (специалитет) по специальности 190601.65 – «Автомобили и автомобильное хозяйство».

Декан автомобильного факультета, зав. кафедрой технической эксплуатации автомобилей, к.т.н., профессор

А.Х. Бекеев

#### приложение м

#### Справка о внедрении результатов НИР на заводе ОЗАТЭ

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ РЕСПУБЛИКА СЕВЕРНАЯ ОСЕТИЯ - АЛАНИЯ Открытое Акционерное Общество

«ОСЕТИНСКИЙ ЗАВОД АВТОМОБИЛЬНОГО И ТРАКТОРНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ» (ОАО «ОЗАТЭ»)

362015, г. Владикавказ, проспект Коста, 15, р/с 40702810000220000323 в Ставропольском филиале ОАО "Банк Москвы" г. Ставрополь; к/с 301018102000000000714; БИК 040702714, ИНН 1504000026, КПП 150101001, ОК-ПО 00232472, ОКОНХ 14343, ОКВЭД 31.61, телефоны: приемная (8672) 25-60-56, тел./факс: 52-58-36; зам. ген. директора: 25-81-33; коммерческий отдел: тел./факс. 25-69-58/25-69-66; e-mail: ozate2@mail.ru

#### AKT

внедрения результатов научных исследований докторской диссертации Аджиманбетова Султанхана Багатовича на тему: «Повышение эффективности функционирования автотракторного электрооборудования»

Результаты научных исследований к.т.н., доцента Горского государственного аграрного университета Аджиманбетова Султанхана Багатовича по докторской диссертации на тему: «Повышение эффективности функционирования автотракторного электрооборудования» приняты к внедрению Осетинским заводом автомобильного и тракторного электрооборудования (ОАО «ОЗАТЭ»), а именно:

- выключатель электростартера ДВС (патент РФ на изобретение № 2350774);
- двухэтапный электростартерный пуск ДВС с использованием электромагнитной муфты (патенты РФ на изобретение № 2239090, № 2320888);
- электростартерный пуск ДВС транспортного средства через его сцепление (патент РФ на изобретение № 2280190);
- электростартерный пуск ДВС с использованием маховика (патент РФ на изобретение № 2462611);
- система движимого электростартерного пуска ДВС (патент РФ на изобретение № 2479744).

Настоящим подтверждаем, что указанные научные разработки докторской диссертации к.т.н. Аджиманбетова С.Б. приняты к использованию конструкторами завода ОАО «ОЗАТЭ» для усовершенствования систем электростартерного пуска автомобильных и тракторных двигателей.

Генеральный директор

А.А. Габараева

# ПРИЛОЖЕНИЕ Н

# Удельная теплота сгорания энергоносителей

П ГОНОСИТЕ	Вид энер- гоносителя	Удельная тепл	ота сгорания	Объемная плотность	Цена за единицу услов-	КПД дви- гателя	Цена за 1 кВт*ч
П		МДж	кВт*ч	вещества	ного то- плива		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Зарядка тяговой батареи от сети	-	1,0	-	3,85 р/кВт*ч	0,85	4,53 р/кВт*ч
2	Зарядка тяговой батареи на борту ГТС	-	3,66кВт*ч/л	-	42 р/л	0,85	13.5 р/кВт*ч
3	Бензин	47,3 МДж/кг (34,5МДж/л)	9,6кВт*ч/л	0,73 кг/л	42 р/л	0,35	12,5 p/кВт*ч
4	Дизельное топливо	44,8МДж/кг (38 МДж/л)	10,5кВт*ч/л	0,85 кг/л	44 р/л	0,4	10,4 р/кВт*ч
5	Пропан- бутан (СУГ)	46,8 МДж/кг (25,3 МДж/л)	7,0 кВт*ч/л	0,54 кг/л	22 р/л	0,3	10,5 р/кВт*ч
6	Метан	39,8 МДж/м <sup>3</sup>	11,1 кВт*ч/м <sup>3</sup>	0,72 кг/м <sup>3</sup>	17 p/m <sup>3</sup>	0,3	5,1 p/кВт*ч

Оценка эффективности разработанного гибридного транспортного средства и электромобиля на базе автомобиля Лада «Гранта».

Режим работы – движение по городу по циклу *ARDC* [44].

- 1. Показатели гибридного транспортного средства сравнены с техническими характеристиками серийного автомобиля Лада «Гранта»:
- расход бензина в городском цикле 7,5  $\pi/100$ км;
- стоимость 1 л бензина AИ-92 42 pyб.;
- стоимость бензина на 100 км поездки -7.5\*42 = 315 руб.

Показатели гибридного транспортного средства (ГТС):

- пробег за цикл ARDC 22,89 км [табл. 4.2];
- расход топлива за цикл -0.343 л, а на 100 км -0.343 /22,89 \*100 = 1.5 л;
- расход емкости батареи за цикл -2,589 кВт\*ч, а на 100 км -2,589/22,89\*100 = 11,31кВт.ч;
- стоимость бензина -1,5\*42 = 63 руб.;
- стоимость электроэнергии 11,31\*4/0,75=60,32 руб. (1кВт\*ч 4 руб., кпд<sub>акб</sub> 0,75);
- общие затраты  $\Gamma TC 63 + 60,32 = 123,32$  руб.

$$(315 - 123,32)/315*100\% = 60.8\%$$

Затраты на топливо у гибридного автомобиля на 60,8% меньше, чем у традиционного автомобиля с ДВС при зарядке батареи от сети.

При зарядке батареи на борту ГТС («самозарядка») стоимость 1 кВт\*ч электроэнергии составляет — 15,6 руб. (Приложение «Н»), тогда затраты на электроэнергию у ГТС составят: 11,31\*15,6/0,75 = 235,25 руб.; общие затраты: 63 + 235,25 = 298,25 руб.; в процентах: (315 - 298,25)/315 = 5,3%.

2.Показатели разработанного электромобиля с вариаторным управлением сравнены с электромобилем, скорость которого управляется широтноимпульсным преобразователем (ШИП) в городском режиме движения по циклу ARDC:

расход энергии батареи электромобилем на один цикл:

- регулированием скорости вариатором -4,059 кВт\*ч (табл. 4.3);
- регулированием скорости ШИП 6,678 кВт\*ч (табл. 4.4). (6,678-4,059)/6,678\*100% = 39,2%

Электромобиль с вариаторным управлением в городском режиме движения на 39,2% экономичнее, чем электромобиль с управлением ШИП.