

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра Проектирование и эксплуатация автомобилей

(наименование кафедры)

15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств

(код и наименование направления подготовки)

Инжиниринг и производство транспортных средств

(направленность, профиль)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Исследование методов моделирования и оптимизации
многорежимных гибридных силовых агрегатов автомобилей

Студент

Н.Г. Киселев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

А.В. Зотов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Консультант

А.Г. Егоров

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы к.т.н., доцент А.В. Бобровский

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« _____ » _____ 20 _____ г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент А.В. Бобровский

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« _____ » _____ 20 _____ г.

Тольятти 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 Анализ структуры гибридного автомобиля.....	6
1.1 Обозначение гибрида.....	6
1.2 Структура и работа гибридного автомобиля.....	7
1.3 Типы гибридов.....	10
1.4 Классификация по типу батарей.....	17
2 Анализ существующих разработок гибридных технологий в автомобилестроении.....	23
2.1 Анализ существующих энергосберегающих технологий.....	23
2.2 Электрические транспортные средства.....	28
2.3 Гибридные транспортные средства на электричестве.....	32
2.4 Гибридные транспортные средства на топливных элементах.....	34
2.5 Конфигурация гибридного многорежимного силового агрегата..	37
2.6 Инструменты моделирования.....	42
2.7 Обобщение проведенного анализа.....	42
3 Анализ циклов моделирования и оптимизации гибридных силовых агрегатов автомобилей.....	45
3.1 Моделирование гибридного транспортного средства.....	45
3.2 Моделирование систем топливных элементов.....	55
3.3 Исследования систем топливных элементов.....	57
3.4 Рекомендации по применению многорежимных гибридных силовых агрегатов автомобилей и способов их моделирования.....	61
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	66
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	68

ВВЕДЕНИЕ

В наши дни при стабильном росте количества различных автомобилей и непрерывно растущей необходимости в обеспеченности энергетическими ресурсами, все большую актуальность приобретает проблема снижения расхода топлива и улучшения способности контролировать его расход при эксплуатации автомобиля. Потребление такого ресурса как топливо зависит от многих факторов. Имеют значение транспортные условия, климат и качество дорожных покрытий, и, наконец, характер эксплуатации автотранспорта. Можно с уверенностью сказать, что дорожное покрытие, с присущими ему элементами профиля и планировкой, а также особенностями местности оказывают основное, из всех приведенных факторов, влияние на эффективность использования топливных ресурсов. Методики и нормативная документация определяют допустимый уровень топливных затрат при движении транспортного средства. Но данные нормативы регламентируют только расход на ровных дорогах, которые, не часто встречаются в дорожной сети России. Преобладающая часть дорожного покрытия РФ застроена дорогами с большим количеством ям и неровностей. Когда транспортное средство двигается по ухабистому дорожному покрытию, требуется дополнительная мощность для того, чтобы ехать по всем неровностям, сохраняя заданную скорость. Данная ситуация ведет к увеличению топливного расхода или, проще говоря, к снижению коэффициента полезного действия (КПД).

Актуальность данной проблемы может быть обоснована, например, себестоимостью грузоперевозок посредством автотранспорта, особенно если взять в расчет тот факт, что стоимость на топливное сырье неуклонно становится выше.

В ближайшие годы, обещают производители, ассортимент основных сегментов европейского авторынка пополнится за счет новичков - гибридных

автомобилей последнего поколения. Речь идет о транспорте, оснащенный одновременно двигателем внутреннего сгорания и электрическим мотором.

Несомненным преимуществом автомобиля с гибридным приводом - его меньший, в сравнении с традиционной трансмиссией, расход топлива. Это происходит благодаря возможности аккумулировать и использовать в дальнейшем энергию торможения (рекуперация). При торможении электротрансмиссия машины переходит в режим генератора и начинает рекуперировать энергию торможения. Полученная таким образом электроэнергия поступает в аккумуляторную батарею (АКБ) и сохраняется для последующего использования. Этот процесс наступает при разгоне машины, когда гибридный автомобиль ускоряют одновременно и дизель, и электромотор. Во время движения на малых скоростях, при маневрировании или в трафике машина может передвигаться на одном электромоторе. Итогом внедрения в автомобиль такого довольно сложного гибридного привода становится заметная экономия топлива, которая в различных моделях колеблется в пределах от 25 до 50%.

Гибридная тема за последние годы получила довольно широкое распространение. Опытные образцы с комбинированным приводом создали и выпустили подавляющее большинство мировых автопроизводителей. Многие начали даже мелкосерийный выпуск. Конечно, общий мировой выпуск гибридных коммерческих автомобилей и автобусов на сегодняшний день не превысил пока что отметку в 10000 единиц. Но аналитики американской исследовательской компании Frost & Sullivan утверждают, что автогибриды станут преобладать на наших дорогах уже к 2020 году. Это в первую очередь касается городских автобусов, а также среднетоннажных развозных и тяжелых коммунальных грузовиков. Анализируя причины, почему гибриды станут популярными у потребителей в ближайшее время, специалисты рынка указали на три основных фактора: повышающаяся урбанизация городов, увеличение интенсивности грузоперевозок, а также сохраняющаяся тенденция роста стоимости топлива.

Популярность гибридных коммерческих автомобилей пока не заметна. Гибриды отлично демонстрируют свои преимущества на улицах мегаполисов, там, где им приходится очень часто разгоняться и тормозить. У развозных гибридных транспортных средств, работающих в городах с частыми разгонами и торможениями, экономия топлива достигает 25-35 %.

Немаловажным моментом внедрения гибридной технологии становится сохранение полезной нагрузки транспортного средства. Ведь снаряженная масса коммерческого автомобиля немного вырастает после того, как его основной ДВС будет агрегатирован с электротрансмиссией и связанным с ней тяжелым блоком аккумуляторных батарей. ДВС-электрические гибридные приводы могут регенерировать всего лишь 25 % энергии торможения. Этот незначительный процент обусловлен нежеланием автопроизводителей устанавливать более емкие батареи в гибридный автомобиль. Если смонтировать емкие АКБ, то резко уменьшится грузоподъемность машины, а цена вырастет еще больше. Потому конструкторам гибридных грузовиков всегда необходимо находить компромисс между экономичностью, стоимостью и сохранением полезной нагрузки [1].

Существенное удорожание автомобиля - это очень важный аспект, который сегодня сопутствует всем гибридным транспортным средствам. Аналитики полагают, что с развитием нового автомобильного направления получится снизить цену, хотя рост популярности гибридной технологии в итоге будет зависеть от стоимости топлива и внедрения более эффективных приводов.

1 Анализ структуры гибридного автомобиля

Гибридный автомобиль (Hybrid vehicle) - транспортное средство, приводимое в движение с помощью силовой установки, отличительной особенностью которой является использование двух источников энергии и соответствующим им двигателей, преобразующих энергию в механическую работу.

1.1 Обозначение гибрида

Как отличить гибрид от обычного автомобиля. На корпусе автомобиля имеются обозначения в различных местах: в задней части автомобиля (крышка багажника, задняя дверь), водительская дверь, левое, правое переднее крыло, инвертор (см. рисунок 1.1).

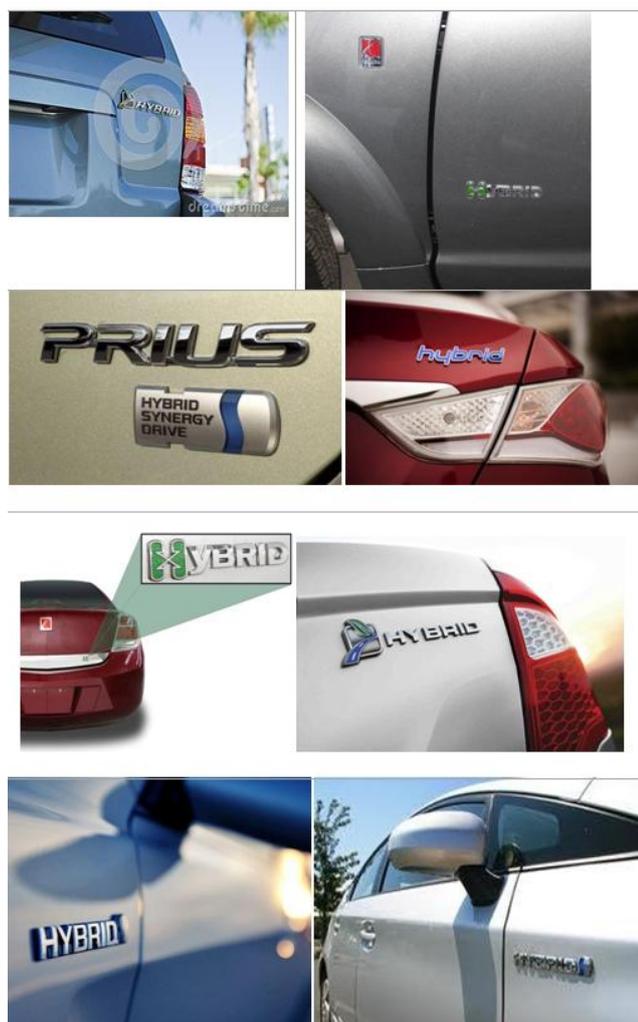


Рисунок 1.1 – Способы обозначения гибридных автомобилей

1.2 Структура и работа гибридного автомобиля

Основные компоненты гибридного автомобиля на примере Toyota Prius [2] показаны на рисунке 1.2.

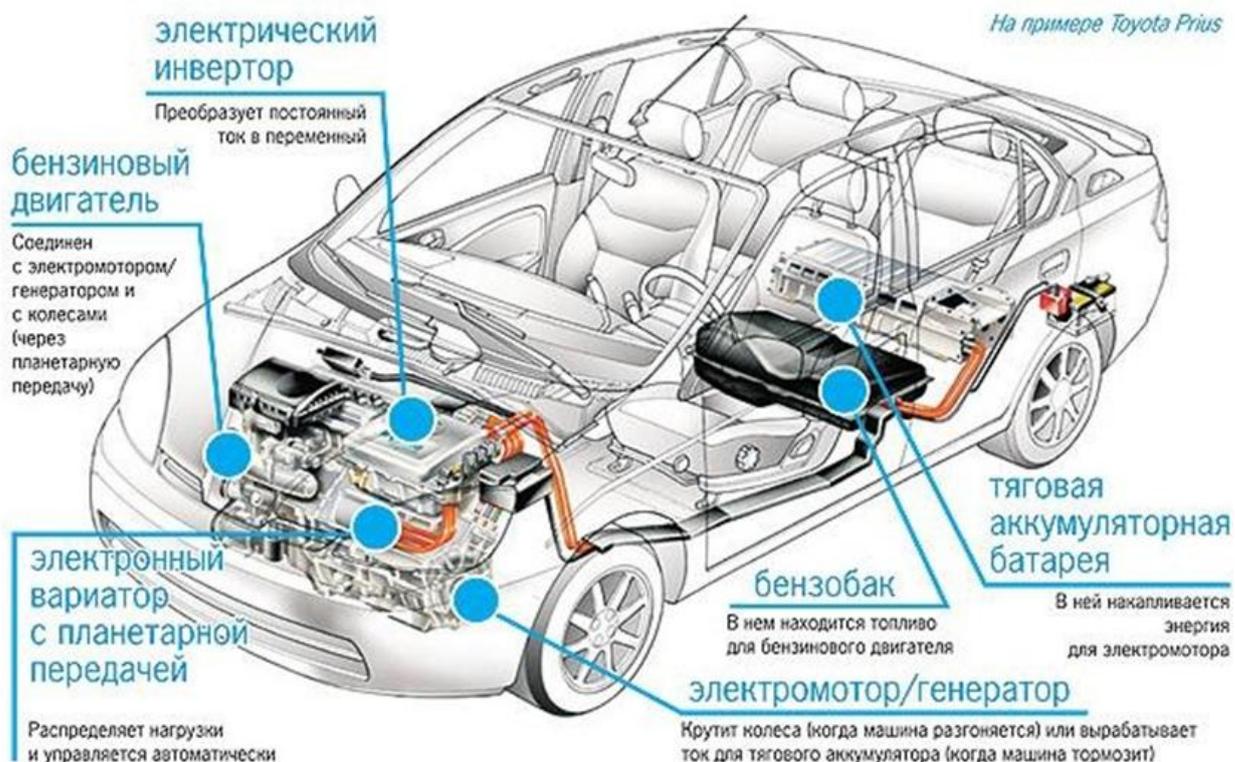


Рисунок 1.2 - Основные компоненты гибридного автомобиля на примере Toyota Prius

Принципы работы гибридного автомобиля во время движения показаны на рисунке 1.3 [3].



Рисунок 1.3 - Принципы работы гибридного автомобиля во время движения

Рассмотри работу систем гибридного автомобиля с последовательно-параллельной схемой.

Начало движения (см. рисунок 1.4).

Для того чтобы начать движение на небольших скоростях, используется только один электромотор.

Когда скорость набирается, батарея начинает направлять свою энергию на блок управления электропитанием машины.

После чего блок управления перенаправляет энергию на электромоторы, расположенные в задней и передней частях авто.

Задний и передний электромоторы позволяют машине плавно тронуться с места [4].

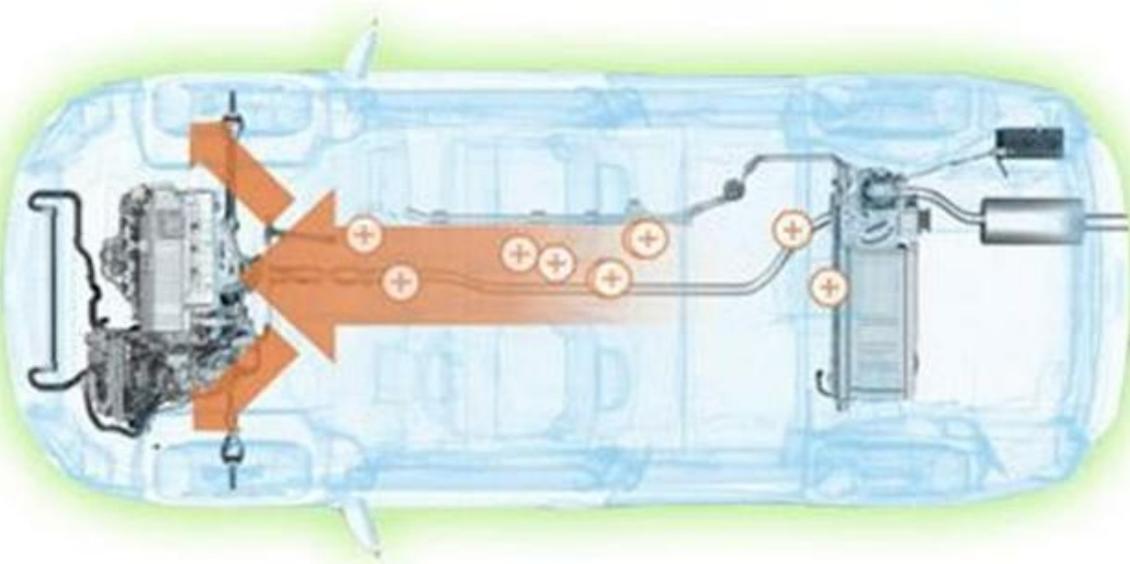


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема начала движения гибридного автомобиля

Движение (см. рисунок 1.5).

Когда машина движется в нормальном режиме, привод ведущих колес будет осуществляться за счет электромоторов и бензинового двигателя; энергия двигателя распределяется между электрическим генератором и колесами, затем генератор приводит в движение моторы, также он осуществляет зарядку батарей, отдавая им лишнюю энергию.

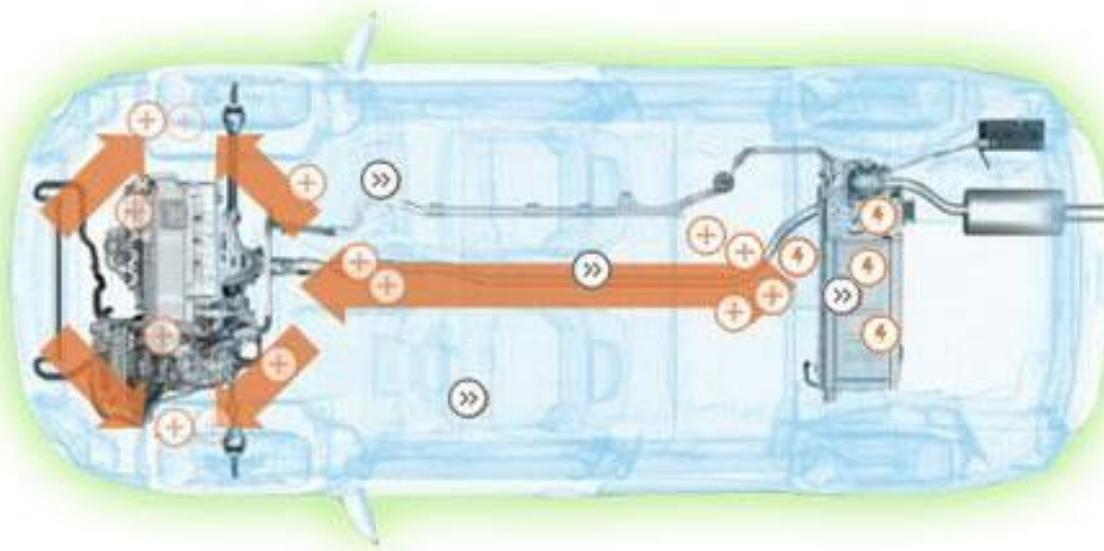


Рисунок 1.5 – Принципиальная схема движения гибридного автомобиля

Разгон (см. рисунок 1.6).

Работая в нормальном режиме бензиновый двигатель работает на разгон автомобиля.

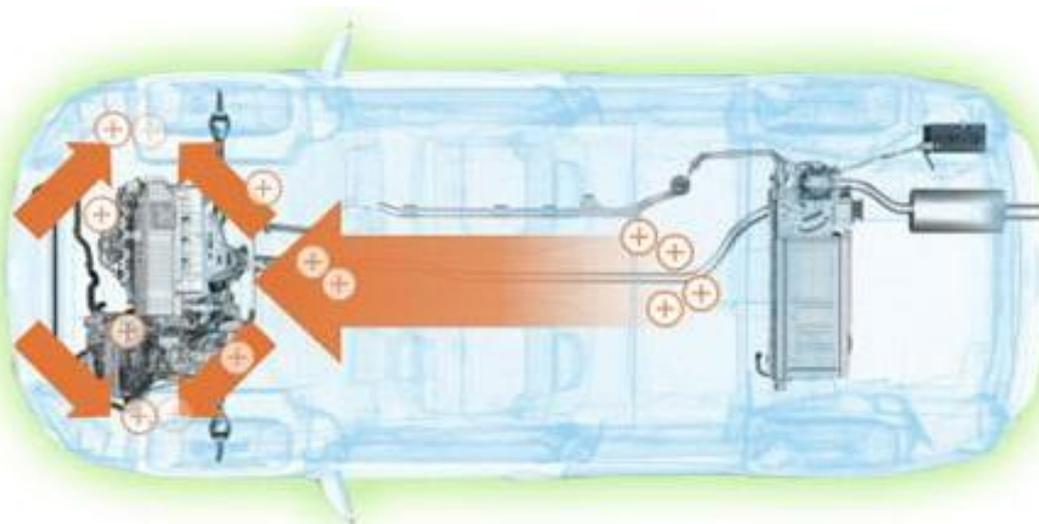


Рисунок 1.6 – Принципиальная схема разгона гибридного автомобиля

Для того чтобы улучшить динамику, от электромотора поступает дополнительная энергия.

В нормальном режиме работы бензиновый двигатель энергией снабжает генератор.

На блок управления электропитанием генератором могут быть направлены излишки энергии.

Торможение (см. рисунок 1.7).

В процессе торможения кинетическая энергия будет преобразована в электричество.

Электромоторы направят его на блок управления электропитанием.

Бензиновый двигатель авто начинает работу в обычном режиме. Перед этим управленческий электропитанием блок возвратит энергию на высоковольтную батарею [4].

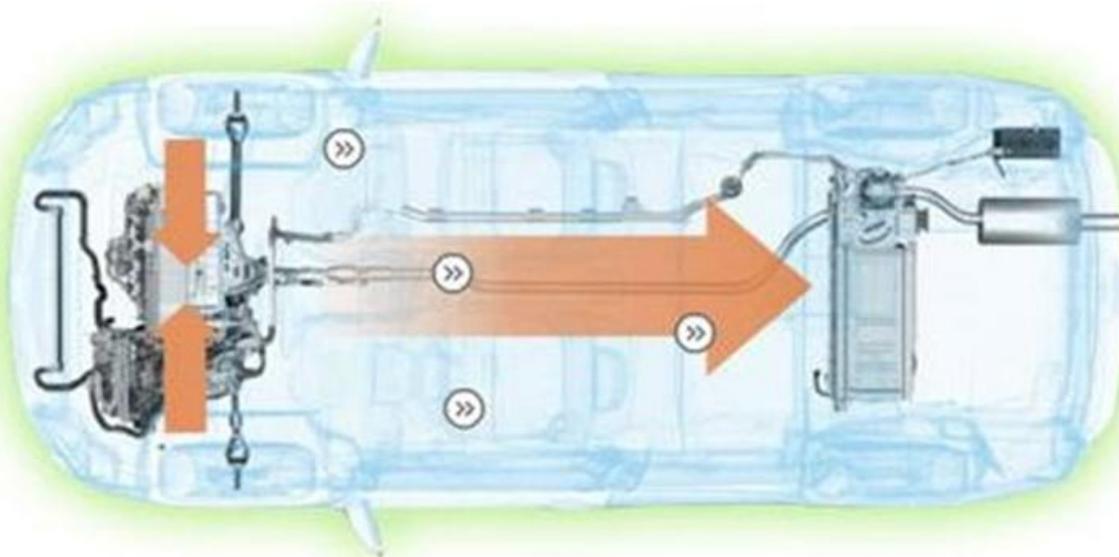


Рисунок 1.7 – Принципиальная схема торможения гибридного автомобиля

1.3 Типы гибридов

Для правильной работы с такими автомобилями крайне важно понимать, какие существуют типы гибридов (приведена международная классификация) [5].

Микрогибрид (см. рисунок 1.8).

Это автомобиль с обычным топливным двигателем и системой «старт-стоп». Двигатель отключается, например, когда водитель останавливается на светофоре, а потом система автоматически активирует стартер, как только

нажимается педаль сцепления или отпускается педаль тормоза. У таких автомобилей обычная 12-вольтная электрическая система.

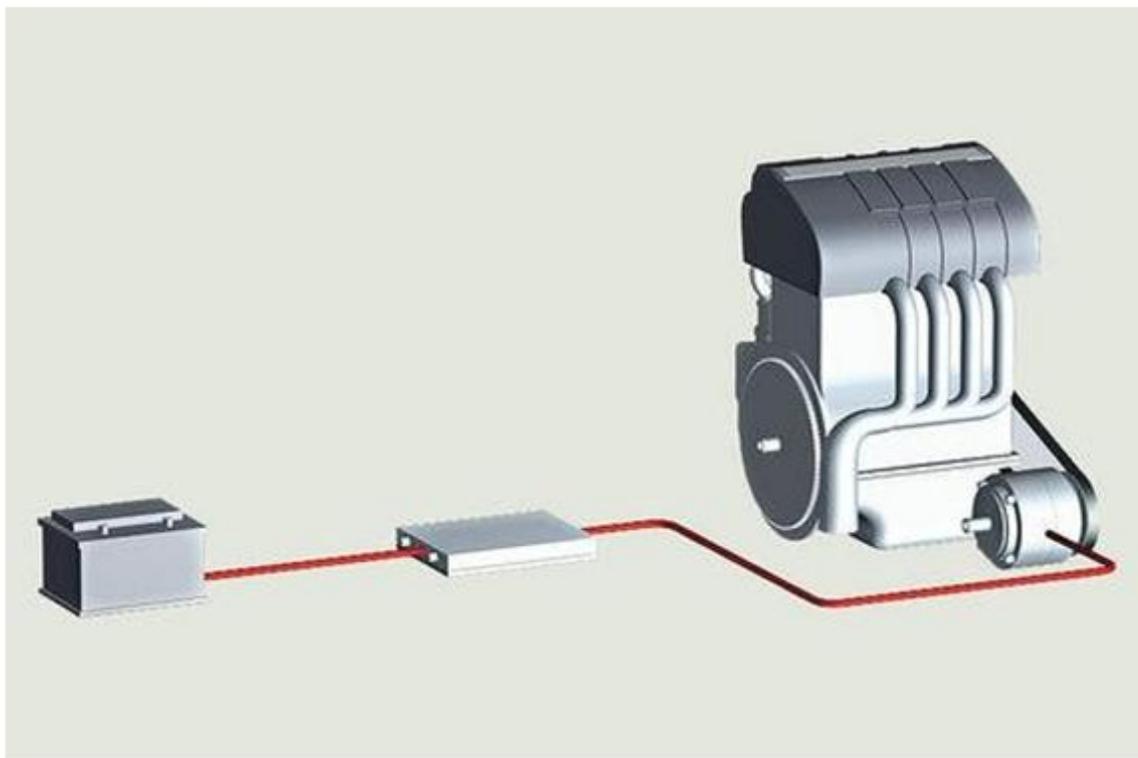


Рисунок 1.8 – Структурная схема микрогибрида

Мягкий гибрид (также умеренный гибрид, полугибрид) (см. рисунок 1.9).

На таких гибридах установлена та же система «старт-стоп», но уже несколько модифицированная. Здесь традиционный стартер и генератор полностью заменены на электродвигатель, который используется для запуска двигателя и его поддержки, при движении небольшой электродвигатель увеличивает мощность двигателя внутреннего сгорания. Кроме того, на этой машине особая тормозная система: в процессе торможения от вырабатываемой энергии заряжается аккумулятор. Кроме стандартной 12-вольтной системы, установлены независимые электрические цепи. Учитывая, что такие машины не могут работать только от электродвигателя, система работает на низком напряжении в 36 вольт. А значит, при работе с таким типом автомобиля новых опасностей для спасателей не появляется.

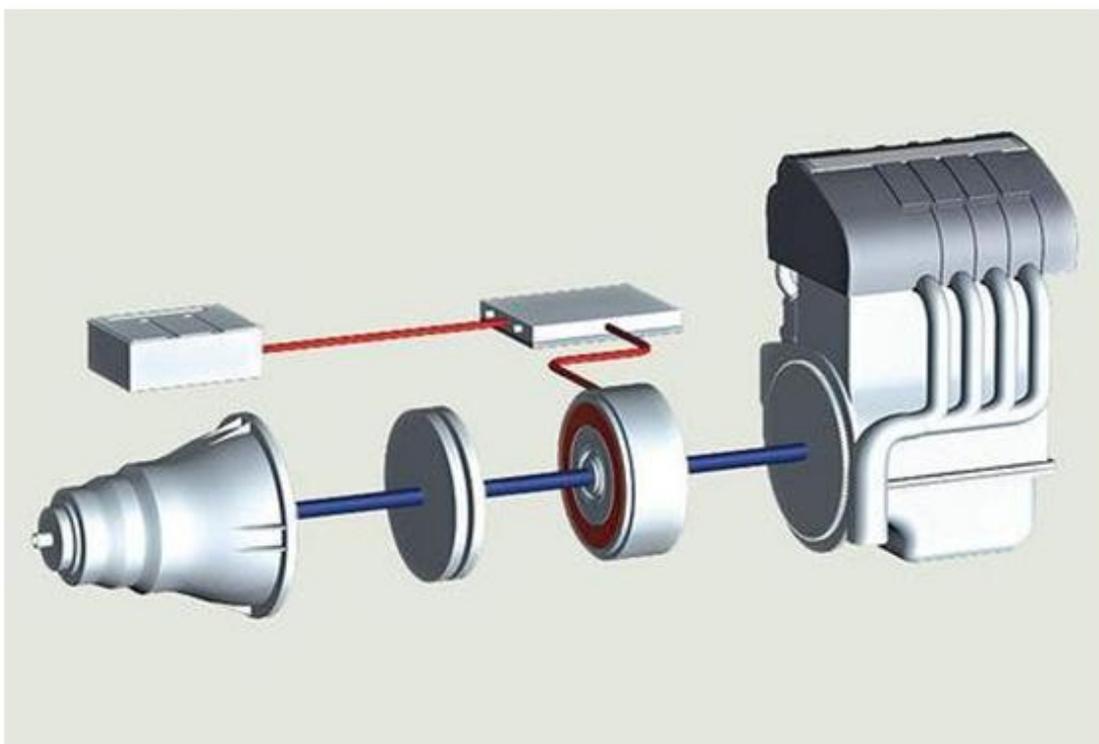


Рисунок 1.9 – Структурная схема мягкого гибрида

Полный гибрид (см. рисунок 1.10).

Работа систем полного гибрида и машин, описанных выше, схожа. Однако полный гибрид может работать только от энергии электрического двигателя, а для этого необходимо высокое напряжение. В полностью гибридных системах автомобиль может приводиться в движение электромотором на любом этапе движения: и при ускорении, и в движении с постоянной скоростью. Например, в «городском цикле» автомобиль может использовать один только электродвигатель. Наиболее популярный полный гибрид – Toyota Prius. В Toyota установлена аккумуляторная батарея постоянного тока напряжением более 200 вольт. Она состоит из 28 модулей, состоящих каждый из 6-ти гальванических элементов, номинальное напряжение каждого из которых 1,2 вольта.

Высокое напряжение в кузове представляет опасность само по себе, поэтому производители создали различные системы безопасности с целью уменьшить риски для спасателей при проведении спасательных работ.



Рисунок 1.10 – Структурная схема полного гибрида (полный параллельный гибрид и полный последовательный гибрид)

Обычно 12-вольтная цепь использует металлические детали корпуса как отрицательный полюс батареи (катод). В такой цепи электричество проходит по корпусу.

Если автомобиль обесточен или хотя бы заглушен, то риск удара током при работе с ним не возрастает.

Чтобы работать от электрической силовой установки, полные гибриды оборудованы цепью высокого напряжения.

Положительные и отрицательные (оранжевые) (см. рисунок 1.11) цветные кабели проходят от расположенной в задней части автомобиля батареи к преобразователю под капотом. В высоковольтной цепи высокое напряжение проходит только по высоковольтным проводам. А это значит, что, если плюсовая клемма соприкоснется с металлическими деталями корпуса, короткого замыкания не произойдет.

Виды гибридных приводов [6, 7].

По принципу взаимодействия электрической и топливной составляющих авто, гибридные приводы принято разделять на три вида: последовательный, параллельный и последовательно-параллельный.

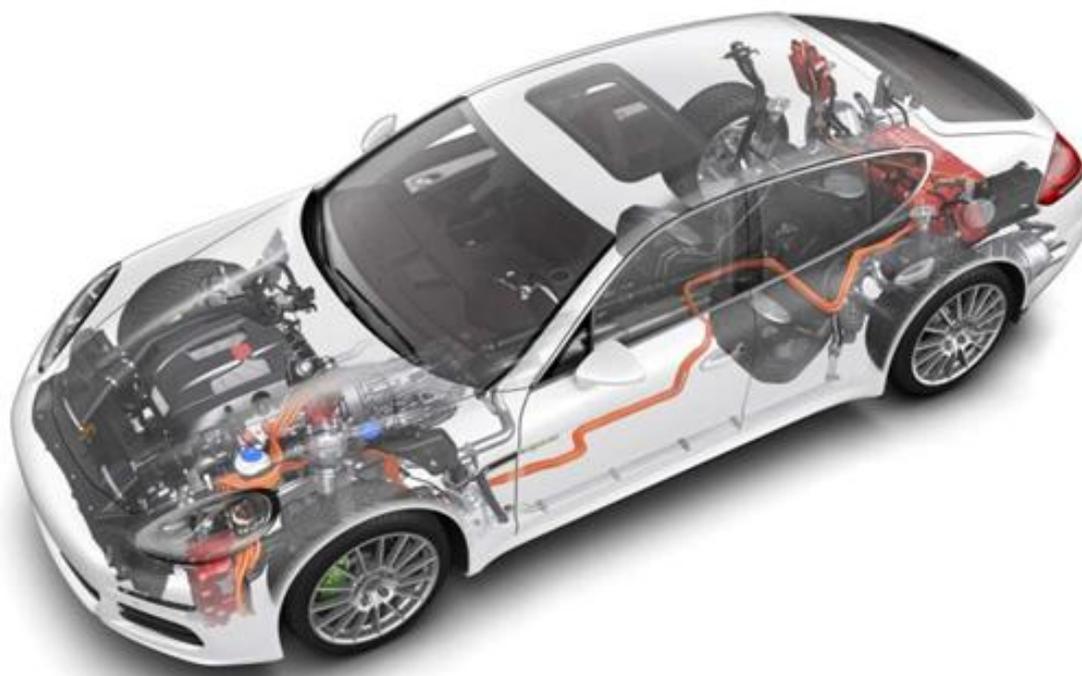


Рисунок 1.11 – Конструкция гибридной силовой установки

Последовательный вид приводов (см. рисунок 1.12).

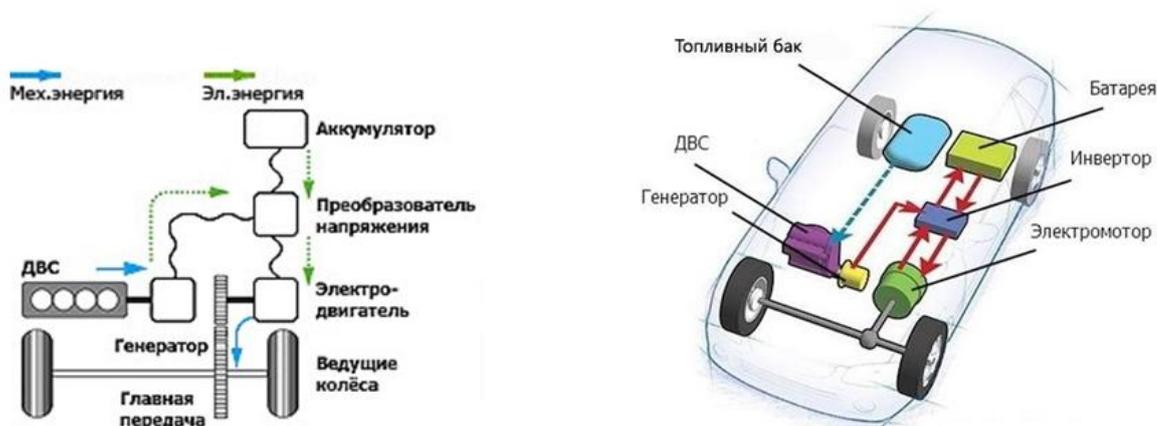


Рисунок 1.12 – Последовательный привод

Это самая простая гибридная конфигурация. Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) используется только для привода генератора, а вырабатываемая последним электроэнергия заряжает аккумуляторную батарею и питает электродвигатель, который и вращает ведущие колеса. Это избавляет от необходимости в коробке передач и сцеплении. Для подзарядки

аккумулятора также используется рекуперативное торможение. Свое название схема получила потому, что поток мощности поступает на ведущие колеса, проходя ряд последовательных преобразований. От механической энергии, вырабатываемой ДВС в электрическую, вырабатываемую генератором, и опять в механическую. При этом часть энергии неизбежно теряется.

Последовательный гибрид позволяет использовать ДВС малой мощности, причем он постоянно работает в диапазоне максимального КПД, или же его можно совсем отключить. При отключении ДВС электродвигатель и батарея в состоянии обеспечить необходимую мощность для движения. Поэтому они, в отличие от ДВС, должны быть более мощными. Наиболее эффективна последовательная схема при движении в режиме частых остановок, торможений и ускорений, движении на низкой скорости, т.е. в городе. Поэтому используют ее в городских автобусах и других видах городского транспорта. По такому принципу работают также большие карьерные самосвалы, где необходимо передать большой крутящий момент на колеса, и не требуются высокие скорости движения.

Параллельный вид приводов (см. рисунок 1.13).

Здесь ведущие колеса приводятся в движение и ДВС, и электродвигателем (который должен быть обратимым, т.е. может работать в качестве генератора). Для их согласованной параллельной работы используется компьютерное управление. При этом сохраняется необходимость в обычной трансмиссии, и двигателю приходится работать в неэффективных переходных режимах.

Момент, поступающий от двух источников, распределяется в зависимости от условий движения: в переходных режимах (старт, ускорение) в помощь ДВС подключается электродвигатель, а в устоявшихся режимах и при торможении он работает как генератор, заряжая аккумулятор.

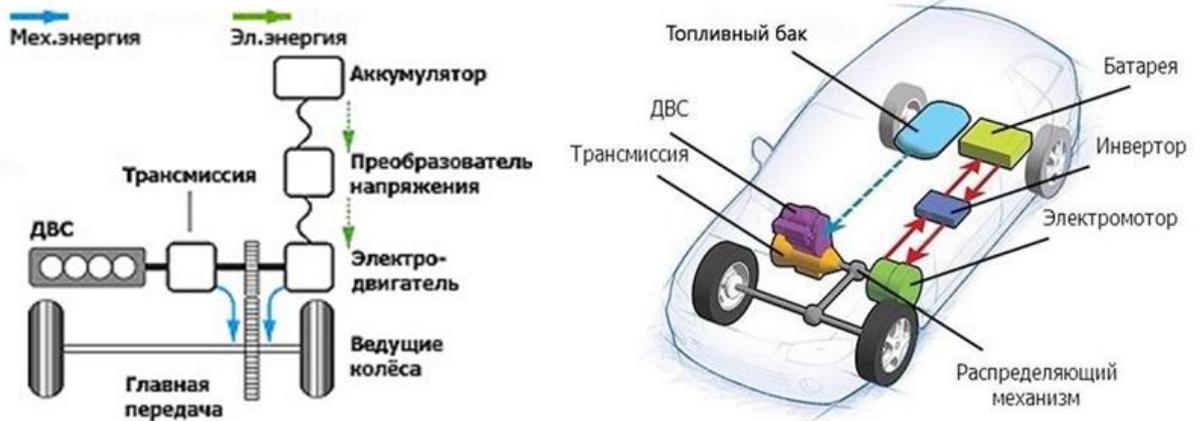


Рисунок 1.13 – Параллельный привод

Таким образом, в параллельных гибридах большую часть времени работает ДВС, а электродвигатель используется для помощи ему. Поэтому параллельные гибриды могут использовать меньшую аккумуляторную батарею, по сравнению с последовательными.

Последовательно-параллельная схема (см. рисунок 1.14).



Рисунок 1.14 – Последовательно-параллельная схема привода

Разработанная японскими инженерами система Hybrid Synergy Drive (HSD) объединяет в себе особенности двух предыдущих типов. В схему параллельного гибрида добавляется отдельный генератор и делитель мощности (планетарный механизм).

Гибриды, имеющие последовательно-параллельную схему, называются Full Hybrid.

В результате гибрид приобретает черты последовательного гибрида: автомобиль трогается и движется на малых скоростях только на электротяге. На высоких скоростях и при движении с постоянной скоростью подключается ДВС. При высоких нагрузках (ускорение, движение в гору и т.п.) электродвигатель дополнительно подпитывается от аккумулятора - т.е. гибрид работает как параллельный.

Благодаря наличию отдельного генератора, заряжающего батарею, электродвигатель используется только для привода колес и при рекуперативном торможении. Планетарный механизм передает часть мощности ДВС на колеса, а остальную часть на генератор, который либо питает электродвигатель, либо заряжает батарею. Компьютерная система постоянно регулирует подачу мощности от обоих источников энергии для оптимальной эксплуатации при любых условиях движения.

В этом типе гибрида большую часть времени работает электродвигатель, а ДВС используется только в наиболее эффективных режимах. Поэтому его мощность может быть ниже, чем в параллельном гибриде.

1.4 Классификация по типу батарей

Автомобиль на электрической тяге был разработан раньше, чем транспортное средство с двигателем внутреннего сгорания. Неприемлемая работа аккумуляторной батареи не позволила ему стать привычным транспортным средством. Однако, возможно, что ситуация кардинально изменится. Использование литий-ионных аккумуляторов, по сравнению со свинцовыми, никель-кадмиевыми и никель-металлогидридными батареями, означает более высокую плотность энергии, лучшую надежность, а также больший ресурс. По мере улучшения характеристик источников тока возникают все более разнообразные модели электротранспорта. Чтобы

осознать, насколько близка эра электрификации транспортного средства, произведен анализ продукции аккумуляторных компаний.

Гибридные автомобили можно разграничить и по третьему признаку – типу емкостных батарей [8-12].

В серийных гибридах встречаются никель-металлогидридные (NiMH), литий-металл-фосфатные (LiFePO₄), литий-полимерные (Li-pol) и литий-ионные (Li-ion) батареи. Наибольшее распространение получили литий-ионные батареи.

Как правило, аккумуляторная батарея гибридного автомобиля (см. рисунок 1.15) помещена в металлический корпус, расположена за задним сиденьем и надёжно прикреплена к поперечине металлического пола багажного отделения автомобиля.

Аккумуляторная батарея гибридного автомобиля состоит из 28 низковольтных (7,2 В) последовательно соединённых никель-металлогидридных модулей, которые генерирует приблизительно 201 В. Каждый модуль аккумуляторной батареи неразливаемый и заключён в герметичный пластиковый корпус.

Необходимо отметить, что в свободном доступе находится весьма скудная, а порой противоречивая, информация о технических характеристиках аккумуляторных батарей. Модуль некоторых производителей включает в себя, помимо ячеек, систему охлаждения, а также систему контроля и управления. Поэтому удельные показатели одних производителей оказались занижены, а других, наоборот, завышены. В соответствии с вышесказанным распределение позволяет производить только грубую оценку и сравнение.

Электролит, используемый в никель-металлогидридных модулях аккумуляторной батареи, является щелочной смесью гидроксида калия и натрия. Электролит абсорбируется в ячеистые пластины аккумуляторной батареи и переходит в форму геля, поэтому, как правило, не вытекает даже вследствие столкновения автомобиля.

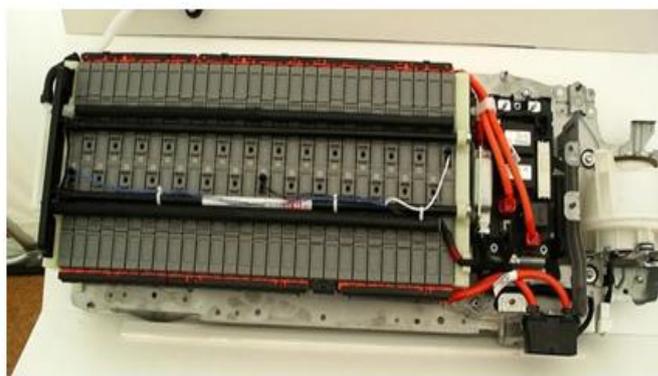


Рисунок 1.15 – Аккумуляторные батареи гибридного автомобиля

Гибридный автомобиль комплектуется герметичной свинцово-кислотной 12-вольтной аккумуляторной батареей. Как и в обычном автомобиле, вспомогательная 12-вольтная аккумуляторная батарея питает электрическую систему транспортного средства, отрицательная клемма вспомогательной аккумуляторной батареи заземлена на металлическом шасси транспортного средства.

Подкапотная наклейка (см. рисунок 1.16) указывает расположение аккумуляторной батареи (тягового аккумулятора) и 12-вольтной вспомогательной батареи.

Аккумуляторная батарея гибридного автомобиля питает электрическую систему высокого напряжения электричеством постоянного тока. Положительные и отрицательные высоковольтные силовые кабели оранжевого цвета проложены от аккумуляторной батареи под металлическим днищем кузова к инвертеру/преобразователю.

В инвертере/преобразователе находится цепь, которая повышает напряжение аккумуляторной батареи с 201 до 650 В постоянного тока. Силовые кабели проложены от инвертера/преобразователя к каждому высоковольтному двигателю (электрическому двигателю, электрическому генератору и компрессору кондиционера).

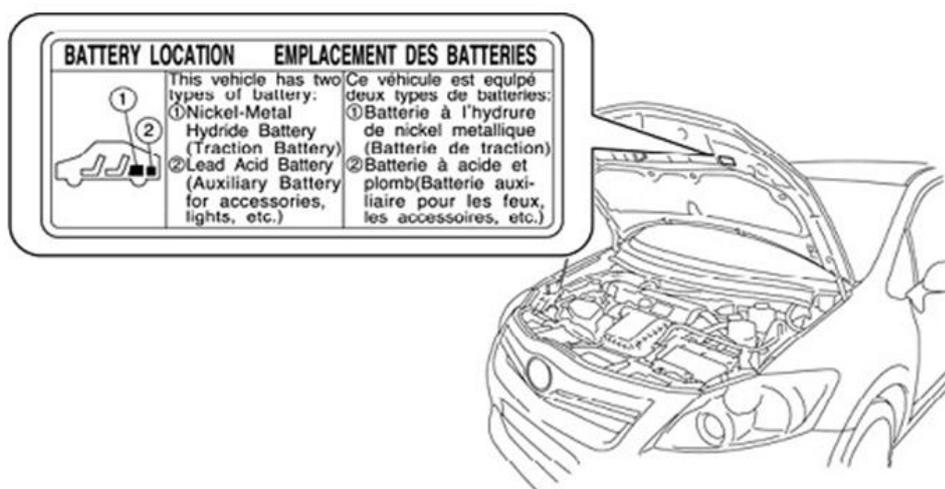
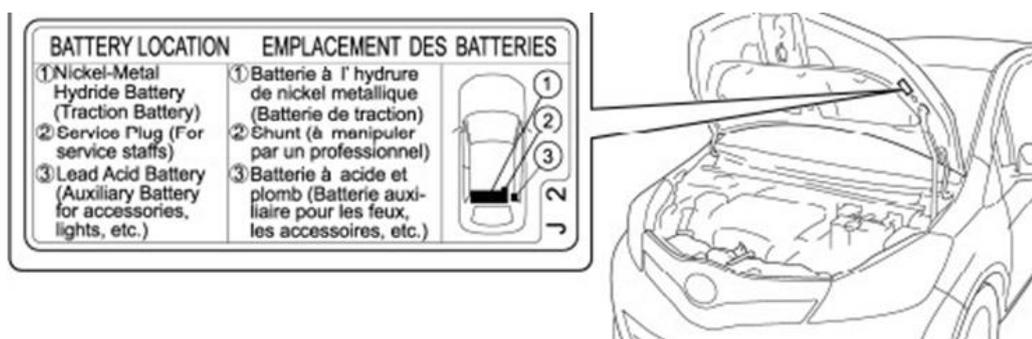


Рисунок 1.16 – Подкапотная наклейка

Система безопасности высокого напряжения включает (см. рисунок 1.17, 1.18):

- высоковольтный предохранитель 1, который обеспечивает защиту от короткого замыкания аккумуляторной батареи гибридного автомобиля;

- положительные и отрицательные высоковольтные силовые кабели 2 соединенные с аккумуляторной батареей гибридного автомобиля, которые управляются 12-вольтными реле с нормально разомкнутыми контактами 3. Когда автомобиль выключается, реле останавливают подачу электрического тока от аккумуляторной батареи;

- как положительные, так и отрицательные силовые кабели 2, которые изолированы от металлического корпуса. Электричество высокого напряжения проходит по этим кабелям, а не по металлическому

кузову автомобиля. Контакт с металлическим кузовом совершенно безопасен, поскольку он изолирован от высоковольтных компонентов;

- регистратор замыкания на землю 4, который постоянно контролирует утечку высокого напряжения на металлическое шасси в процессе работы автомобиля. Если обнаружена ошибка, бортовой компьютер 4 включит световую аварийную сигнализацию на приборной панели и выведет на мультимедийный дисплей сообщение «Проверьте гибридную систему».

Несомненно, необходимо повышать энергоемкость системы. Произведя сравнение с традиционной системой ДВС, мы видим, что при большой дальности поездки, а также большей скорости электронакопительная установка уступает.

Необходимо увеличение массы и объема накопительной системы для удовлетворения высокой потребности в энергии, что, очевидно, приведет к увеличению всей массы транспортного средства, ухудшению его технических характеристик.

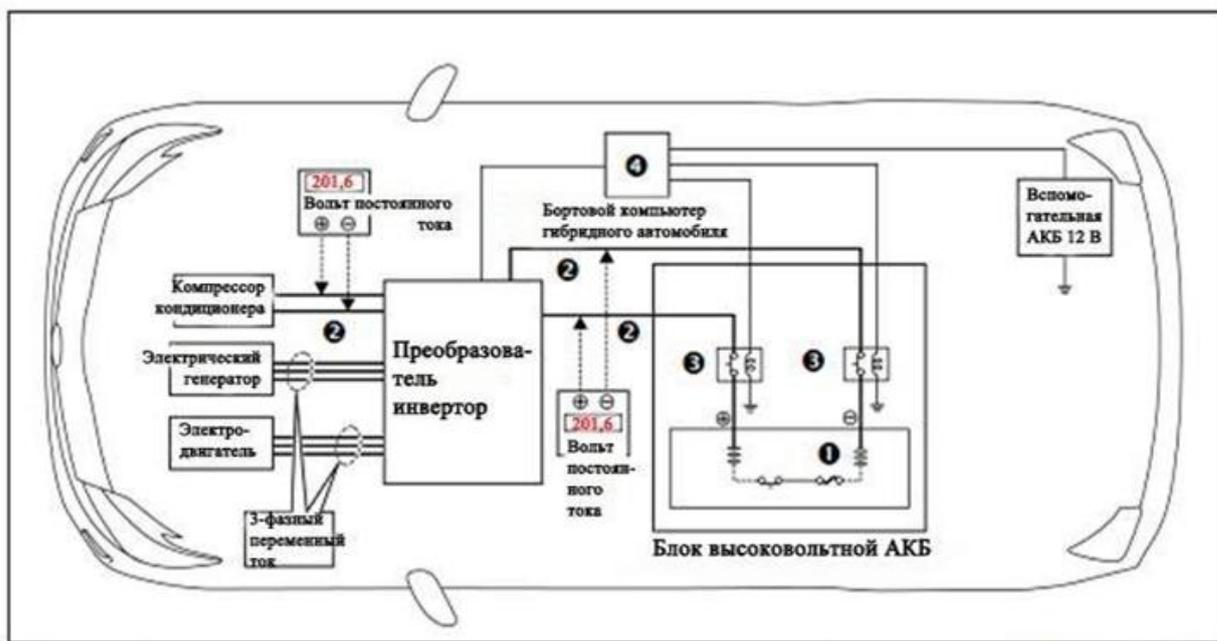


Рисунок 1.17 – Система безопасности высокого напряжения - автомобиль включен и готов к работе (READY светится).

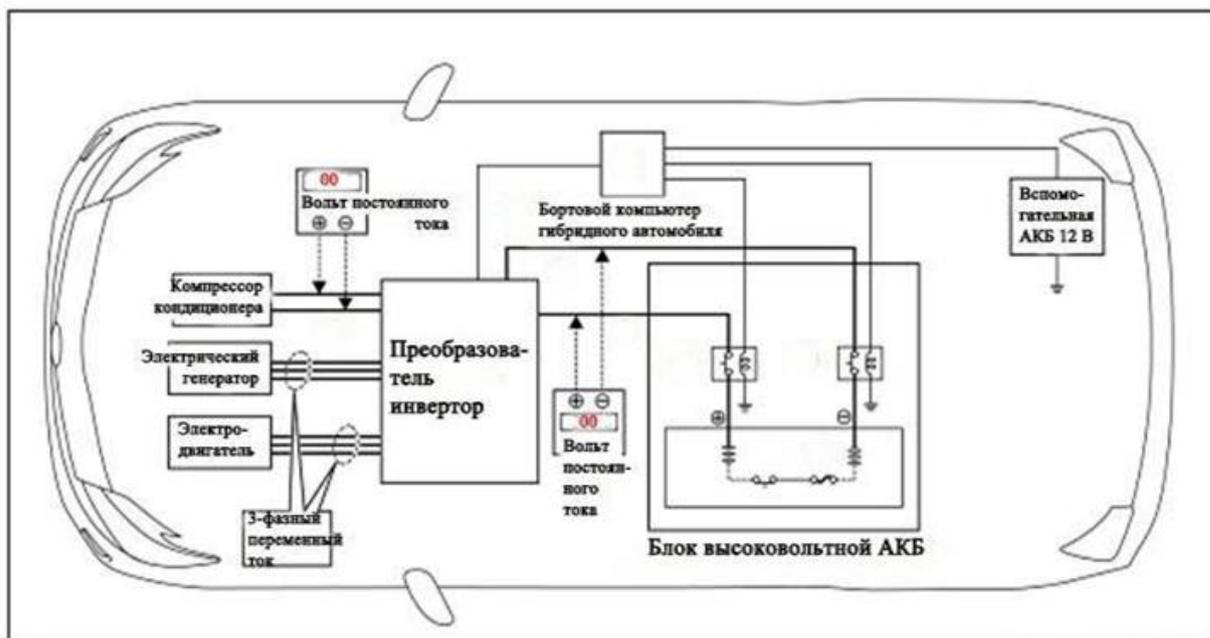


Рисунок 1.18 – Система безопасности высокого напряжения – автомобиль выключен (READY не светится)

Производители аккумуляторных батарей ведут работу по повышению энергоемкости, созданию более компактных и эффективных систем охлаждения и управления аккумуляторной батареей.

2 Анализ существующих разработок гибридных технологий в автомобилестроении

2.1 Анализ существующих энергосберегающих технологий

Транспорт потребляет огромное количество топлива, но только 10-16 % уходит непосредственно на передвижение.

Потери энергии распределены по факторам, выбранным по принципу использования этой энергии (см. рисунок 2.1). Отдельно выделены полезные нагрузки такие, как мультимедиа система автомобиля, подогрев, кондиционер, подсветки, климат контроль и другие элементы автомобиля, нуждающиеся в электроэнергии, отражены также факторы вынужденной потери энергии, такие как трение качения, выделение тепла и т.д.

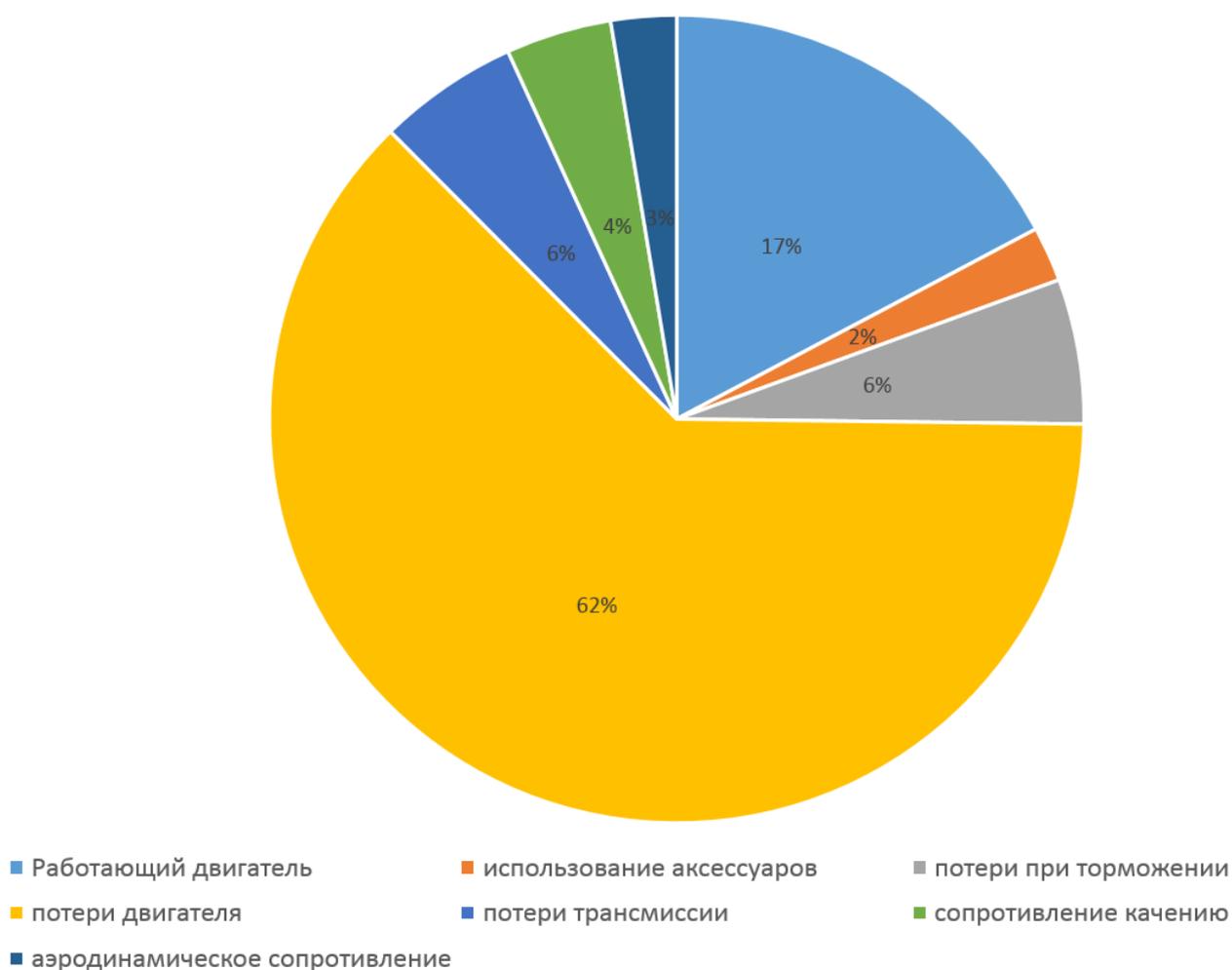


Рисунок 2.1 - Распределение затрат энергии в автомобиле

Лишь 17 % топлива тратятся на передвижение. Иными словами, КПД автомобиля равняется 17 %. Данный показатель доказывает, что огромное количество энергии тратится на преодоление всевозможных сопротивлений. Конечно, для комфортной езды необходимо использование всех мультимедиа и других аксессуаров автомобиля, что в среднем составляет 2 %. В итоге 19 % топлива действительно используется по назначению. Задача любой энергосберегающей технологии снизить показатель 81 % до минимально возможного.

Как видно на рисунке 2.2 – тепло выделяемое двигателем при движении автомобиля несет в себе 10-30 % энергии, которую можно было бы сохранить. Процесс торможения в среднем также поглощает 30% энергии. Неровности, которые преодолевает автомобиль в процессе передвижения, забирают до 10% энергии, которая могла бы быть направлена в полезных целях.

Энергосберегающие технологии, способны в совокупности сэкономить 50-70% энергии, повысив КПД в 3-4 раза. Данное исследование позволяет сделать вывод о том, что энергосберегающие технологии это одно из главных направлений развития транспортной индустрии [12].

Представленные технологии уже разрабатываются во всем мире.

Систему рекуперативного торможения (СРТ) чаще всего можно встретить в автомобилях нового поколения с гибридными двигателями. Основную её часть составляет электрический способ рекуперации кинетической энергии.

Данная энергия появляется во время движения автомобиля. Излишек кинетической энергии, происходящий при торможении, в обычной тормозной системе переходит в тепловую энергию путём трения тормозных колодок и тормозного диска. Из этого следует, что расход осуществляется вхолостую.

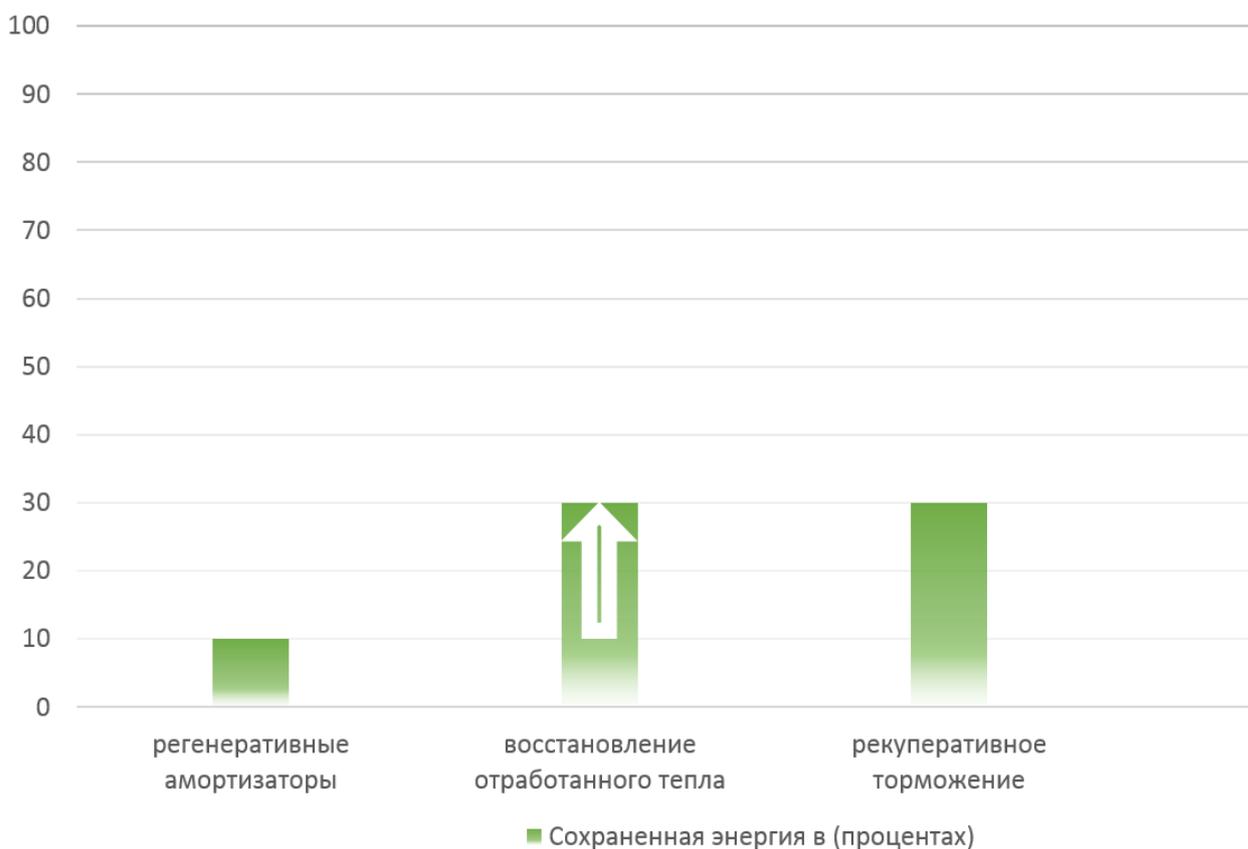


Рисунок 2.2 - Возможности энергосберегающих технологий

Электродвигатель, который входит в трансмиссию автомобиля, применяется для замедления в СРТ. При замедлении электродвигатель начинает свою работу в режиме генератора, на валу двигателя возникает тормозной момент и выходит электрическая энергия, сохраняющаяся в аккумуляторной батарее. Этот запас расходуется для дальнейшего передвижения автомобиля.

Применение СРТ влечет за собой увеличение отдачи от каждого заряда аккумуляторной батареи и высокую топливную экономичность. Рекуперативное торможение имеет наибольшую пользу, если она расположена на передней оси автомобиля, по той причине, что до 70% кинетической энергии в процессе остановки автомобиля приходится именно на переднюю ось.

Эффективность использования СРТ достаточно сильно уменьшается, если автомобиль движется с низкой скоростью. И чтобы полностью

остановить автомобиль, применяются традиционные фрикционные тормоза. Действие двух систем одновременно управляется электроникой.

Ниже приведены функции одного из электронных блоков управления:

- управление скоростью вращения колес;
- стабилизация тормозного момента электродвигателя, который используется для торможения автомобиля;
- распределение усилия тормозов на фрикционную систему тормозов;
- сохранение крутящего момента, который нужен для зарядки аккумуляторной батареи.

В такой тормозной системе между педалью тормоза и тормозными колодками связь механическая отсутствует. Электроника помогает принять решение о торможении, основываясь на исследовании действий автомобилиста и на том, как движется автомобиль.

В процессе торможения электронная система рекуперативного торможения работает в паре с АБС (антиблокировочная система) тормозов, системой распределения тормозных усилий, системой курсовой устойчивости, усилителем экстренного торможения.

Кроме вышеупомянутого электрического способа рекуперации энергии есть несколько других вариантов избежать потерь энергии:

- механический
- гидравлический
- пневматический

Наибольшую популярность получил первый вариант и сконструированная на его основе система рекуперации кинетической энергии (Kinetic Energy Recovery Systems, KERS). Энергия транспортного средства, находящегося в процессе движения рекуперирована во время остановки и сохраняется с помощью маховика для возможности использования ее в будущем. Разница между CPT и KERS в том, что последняя не создает тормозной момент [13].

Маховик находится в трансмиссии автомобиля, он совершает движение вращательного характера в вакуумной камере. В момент торможения скорость вращения маховика может достигать 60000 об/мин. Конструктивные особенности делают возможным сохранить 600 кДж энергии и мощность до 60 кВт, что в переводе на лошадиные силы даст показатель 80 л.с. Рекуперированная энергия в дальнейшем может использоваться для резкого набора скорости, рывков или в момент, когда транспортное средство начинает движение.

Система KERS уже активно используется в автомобильных гонках. KERS устанавливается на болиды Formula 1 с 2009 года. Момент начала массового производства данной системы пока не наступил, но в будущем технологию планируется применять во многих видах транспорта. На данный момент компании Volvo находится ближе всех к началу серийного производства данной технологии.

Систему KERS предлагается использовать в городском цикле для любых транспортных средств. Общий смысл технологии заключается в следующих этапах с момента торможения:

- 1 двигатель автомобиля выключается
- 2 маховик раскручивается и запасает энергию

Когда автомобиль начинает движение автомобиль трогается за счет энергии маховика, а двигатель запускается уже в движении.

Применение данной технологии сохранения энергии обеспечивает рост эффективности использования топлива на 20% [13].

Восстановление отработанного тепла.

Разработка принадлежит исследователям из Университета Пердью, которые работали в партнёрских отношениях с концерном с General Motors. Результатом этого сотрудничества был прототип инновационной системы энергосбережения. Данная система способна сделать расход топлива транспортного средства более эффективным, за счет использования термоэлектрических генераторов (ТЭГ).

ТЭГ служит для подзарядки батареи и питания бортовой электрической системы автомобиля, это повышает энергоэффективность и разгружает двигатель.

Устройство встраивается в систему выхлопа транспортного средства позади каталитического конвертера. Это необходимо, чтобы получать электричество из тепловой энергии выхлопных газов, температура которых достигает 700 °С [14].

Прототип должен обеспечить 5% рост энергоэффективности. В будущем, когда появятся генераторы способные работать при сверхвысоких температурах, этот показатель может вырасти до 10%.

Термоэлектрический материал находится на нескольких чипах, конфигурация которых различается в зависимости от места установки. Чипы созданы таким образом, что функционируют в разных температурных условиях. Эти условия различные и зависят от конкретного местоположения измеряемой точки в системе выхлопа.

Ток при использовании термоэлектрических материалов генерируется за счет разницы температур. Одна сторона расположена рядом с нагретой поверхностью, а другая находится в более холодном окружении. Наличие разницы температур и есть достаточное условие для выработки энергии.

2.2 Электрические транспортные средства

Самая известная технология ZEV (zero-emission vehicle - транспортное средство с нулевым уровнем выбросов) – это EV технология (electric vehicle - электромобиль), история которого так же длинна, как и у ICEV (internal combustion engine vehicle – автомобиль с двигателем внутреннего сгорания).

Фактически, в 1900 году 38 % всех проданных автомобилей в США были электромобилями, в то время, как только 22 % были оснащены ДВС (40 % были паровые). Технология EV была переведена в статус меньшинства и почти забыта, потому как технология ICEV развивалась ускоренными

темпами, позволяя создавать более дешевые и значительно более мощные транспортные средства.

Концепция транспортного средства на батареях (BV) была возрождена во время разгара нефтяного эмбарго ОПЕК в 1973 году. Несколько автопроизводителей разработали технологии BV, которые в конечном итоге удалось запустить в серию, в частности, General Motors (GM) EV1. К 2001 году в одной только Калифорнии насчитывалось около 2500 BV [15]. Впрочем, те BV, которые были доступными, использовали в основном свинцово-кислотные (LA) батареи и по характеристикам были невыгодны по сравнению с ICEV технологиями.

Причиной возрождения технологии BV стал новый усовершенствованный тип батарей – прежде всего никель-металл-гидридные (NiMH) и литий-ионные (Li-Ion) батареи.

Первые в настоящее время доминируют на автомобильном рынке, а вторые повсеместно используются в индустрии портативной электроники. Однако, в последнее время, в отрасли электрических транспортных средств отдают предпочтение Li-Ion аккумуляторам, а не NiMH.

Энергетическая емкость Li-Ion аккумуляторов примерно в два раза больше, чем у NiMH, и, поскольку масштаб производства увеличивается, Li-Ion аккумуляторы вскоре станут заметно дешевле. Ожидается, что Li-Ion тип батарей станет доминирующим [16].

У всех на слуху пример BV технологии следующего поколения является Tesla Roadster от компании Tesla Motors [17]. Roadster запитывается от Li-Ion батарей и при этом ускоряется от 0 до 96 км/ч за четыре секунды, а запас хода на одном заряде составляет до 320 км. Технологии электромобилей, как видно на примере Roadster, способны прилично разгоняться с простой механикой, поскольку высокий крутящий момент на низких скоростях электрической машины (EM) исключает необходимость низких передач и преобразователей крутящего момента. Электромобиль

также намного тише, чем сопоставимый по характеристикам автомобиль с двигателем внутреннего сгорания.

Другой возможной технологией накопления энергии для электромобилей является внедрение ультраконденсатора на транспортном средстве с ультраконденсаторной системой (UCV).

Ультраконденсатор был изготовлен и запатентован в 1957 году компанией General Electric.

Обычные конденсаторы представляют собой пассивный электронный компонент, в простейшем варианте конструкция которого состоит из двух электродов в форме пластин, разделённых диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с размерами обкладок

Ультраконденсатор – это тот же аккумулятор, но с на порядок лучшими свойствами. В первую очередь это относится к существенно более быстрому заряду и разряду. Ультраконденсатор представляет элемент с двумя электродами – между ними располагается электролит. Electrodes выполнены в виде пластины из определенного материала. Для улучшения электрических параметров ультраконденсатора, пластины могут дополнительно покрываться пористым материалом, к примеру, активированным углем. В качестве электролита может применяться неорганическое или органическое вещество.

В целом ультраконденсатор – это гибрид химической аккумуляторной батареи и обычного конденсатора.

Главное отличие ультраконденсатора от привычного конденсатора – в наличии у первого не просто диэлектрика между электродами, а двойного электрического слоя. В результате между электродами образуется очень маленькое расстояние, а его возможность накапливать электрическую энергию (электрическая емкость) получается намного выше.

Кроме этого ультраконденсатор от аккумуляторной батареи отличается скоростью накопления, а также степенью отдачи электрического заряда. Благодаря применению двойного электрического слоя повышается площадь

поверхности электродов при тех же общих габаритах. То есть в устройстве сочетаются лучшие электрические характеристики – существенная емкость аккумулятора и скорость конденсатора.

Ультраконденсатор – электрохимический конденсатор, который имеет способность накапливать чрезвычайно большое количество энергии по отношению к его размеру, а также в сравнении с традиционным конденсатором. Данное свойство ультраконденсатора особенно интересно в создании гибридных транспортных средств в автомобильной промышленности, в том числе в производстве машин на аккумуляторной электротяге, в которых ультраконденсаторы применяются в виде дополнительного накопителя энергии [18, 19].

Ультраконденсатор в качестве источника энергии для электротранспорта позволяет решить сразу несколько задач. Во-первых, исчезает проблема зависимости от проводов. Троллейбус не способен объехать серьезное препятствие, в отличие от электрического автобуса. Во-вторых, попытки создать общественный транспорт на аккумуляторах раз за разом терпели крах из-за большого веса и дороговизны элементов питания. Если экономить на батареях, то пробег получался слишком низким.

Но на данный момент технология еще не отработана. Например, автобусы в г. Шанхай, работавшие по данной технологии, очень быстро разряжались и требовали зарядки на каждой конечной остановке маршрута.

Таким образом, даже при использовании самых современных источников питания электромобилей, будь то батареи, либо ультраконденсаторы, ограничивает их использование в основном для городского транспорта, что довольно неудобно для граждан таких крупных стран как Канада, где распространены путешествия дальностью 600 км и дальше. Это ограничение усугубляется многочасовым периодом, необходимым для перезарядки батарей. Кроме того, постоянное, почти полное истощение аккумуляторного блока значительно сократит его срок службы и приведет к снижению производительности и затратным заменам,

поскольку производительность электробатарей уменьшается по мере того, как состояние их заряда приближается к истощению.

Ультраконденсаторные транспортные средства не предназначены для дальних поездок из-за небольшой емкости накопления.

Таким образом, технологии BV и UCV будут востребованным транспортными средствами в обозримом будущем, когда появится революционная батарея или технология UC, которая значительно увеличит плотность энергии, удельную энергию, плотность мощности, удельную мощность и время жизни цикла, а также значительно снизит время зарядки.

2.3 Гибридные транспортные средства на электричестве

Основной принцип гибридных транспортных средств (HV) заключается в том, что разные моторы работают лучше на разных скоростях; электродвигатель более эффективен для создания крутящего момента или мощности при повороте, а двигатель внутреннего сгорания работает лучше для поддержания высокой скорости (лучше, чем обычный электродвигатель). Переключение с одного на другое в нужное время при ускорении дает беспроигрышный вариант с точки зрения энергоэффективности, как таковой, что, например, приводит к повышению эффективности использования топлива [20].

В настоящее время существуют три различных варианта электрических автомобилей [21]:

- гибридный электрический автомобиль (HEV).

Имеет два двигателя (ДВС и электромотор), которые могут работать как параллельно, так и последовательно. Батарея может заряжаться с помощью рекуперативного торможения. Отсутствует возможность подзарядки от сети. Пример: Toyota Prius.

- гибридный автомобиль с подзарядкой от электросети (PHEV).

Аналогичен HEV, однако батарею можно заряжать от внешнего источника электроэнергии. Пример: Chevrolet Volt.

- Электромобиль на аккумуляторных источниках питания (Электрический автомобиль, BEV).

Используется только электродвигатель и перезаряжаемая батарея.

Пример: Nissan Leaf, Tesla Model S.

Различные типы (технологии) автомобилей можно ранжировать по «степени электрификации» (degree of electrification, DOE).

Гибридный электрический автомобиль (Hybrid electric vehicle, HEV) - транспортное средство, приводимое в движение с помощью гибридной силовой установки, отличительной особенностью которой является использование двух источников энергии и двух типов двигателей: электрического и двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

Существует множество типов HEV. Наиболее распространенной формой HEV является гибридный электромобиль.

Современные HEV используют технологии повышения эффективности, такие как регенеративные тормоза. Регенеративный тормоз - энергетический механизм восстановления, который замедляет транспортное средство или объект, преобразовывая его кинетическую энергию в другую форму, которая может или немедленно использоваться или сохранена, пока не необходим. Это контрастирует с обычными тормозными системами, где избыточная кинетическая энергия преобразована, чтобы нагреться трением в тормозных накладках и поэтому потрачена впустую.

Гибридный автомобиль с подзарядкой от электросети (Plug-in hybrid electric vehicle, PHEV) - гибридное электрическое транспортное средство (ДВС плюс электродвигатель) с высокой емкостью аккумулятора, используемого в качестве основного источника энергии. ДВС преимущественно используется для зарядки батареи или служит резервом на случай полной разрядки батареи [21].

Электромобиль на аккумуляторных источниках питания (Battery electric vehicle, BEV) - полностью электрический автомобиль, приводимый в

движение с помощью электродвигателя, использующего энергию батареи, установленной в автомобиле.

2.4 Гибридные транспортные средства на топливных элементах

Топливный элемент представляет собой гальванический элемент, который преобразует химическую энергию топливного (часто водород) и окислитель (часто кислород) в электрическую энергию через окислительно-восстановительные реакции. Топливные элементы отличаются от большинства батарей тем, что для поддержания химической реакции требуется постоянный источник топлива и кислорода (обычно из воздуха), тогда как в батарее химическая энергия обычно исходит от металлов и их ионов или оксидов которые обычно уже присутствуют в батарее, Топливные элементы могут производить электричество непрерывно, пока топливо и кислород поставляются.

Существует много типов топливных элементов, но все они состоят из анода, катода и электролита, который позволяет ионам, часто положительно заряженным ионам водорода (протонам), перемещаться между двумя сторонами топливного элемента. На аноде катализатор заставляет топливо подвергаться реакциям окисления, которые генерируют ионы (часто положительно заряженные ионы водорода) и электроны. Ионы движутся от анода к катоду через электролит. В то же время электроны протекают от анода к катоду через внешнюю цепь, производя постоянный ток. На катоде другой катализатор вызывает реакцию ионов, электронов и кислорода с образованием воды и, возможно, других продуктов. Топливные элементы классифицируются по типу электролита, который они используют, и по разнице во времени запуска в диапазоне от 1 секунды для топливных элементов с протонообменной мембраной (топливные элементы PEM или PEMFC) до 10 минут для твердооксидных топливных элементов (SOFC). Отдельные топливные элементы вырабатывают относительно небольшие электрические потенциалы, около 0,7 В, поэтому элементы «сложены» или

расположены последовательно, чтобы создать достаточное напряжение. В дополнение к электричеству топливные элементы производят воду, тепло и, в зависимости от источника топлива, очень небольшие количества диоксида азота и другие выбросы. Энергоэффективность топливного элемента обычно составляет от 40 до 60%; однако, если отработанное тепло улавливается в схеме когенерации, может быть достигнута эффективность до 85%.

На рисунке 2.3 представлена схема гибрида с топливными элементами.

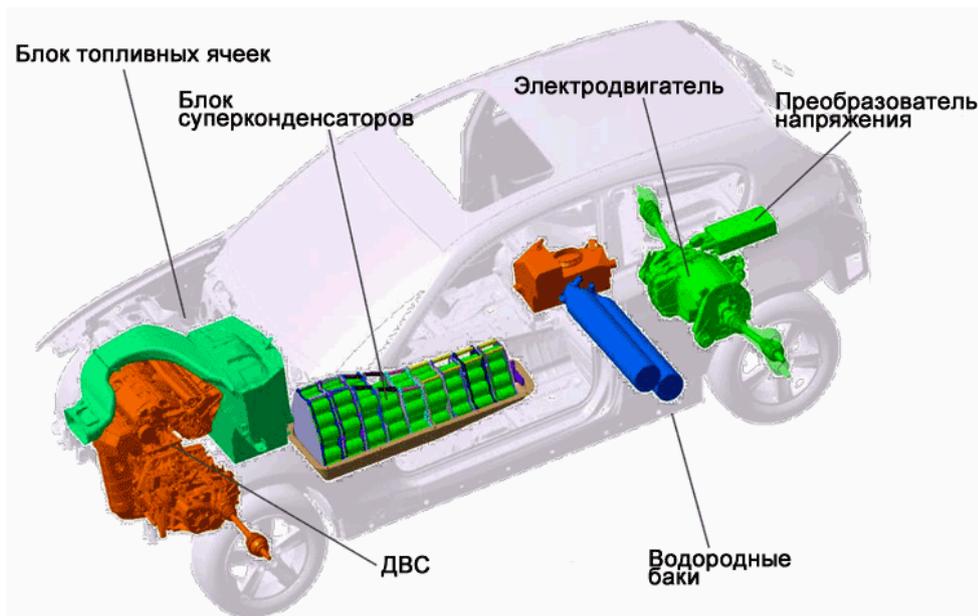


Рисунок 2.3 - Гибрид с топливными ячейками

Изготовленный на базе BMW 1-ой серии, гибрид демонстрирует новый подход к использованию водорода в качестве топлива. Автомобиль оборудован четырехцилиндровым бензиновым ДВС, электродвигателем и вспомогательной силовой установкой (ВСУ) на основе топливных элементов. Сочетание ДВС с топливными ячейками позволяет использовать обе технологии с максимальной эффективностью. Использование водорода обеспечивает необходимую дальность хода и быструю заправку [22].

«Размер топливного элемента достаточен для обеспечения движения автомобиля на малых скоростях, в то время как ДВС идеально подходит для дальних высокоскоростных загородных поездок. В условиях городского движения электроэнергия, вырабатываемая ВСУ, запасается в

суперконденсаторах. Эта энергия отдается электродвигателю при разгоне и старте со светофора. Во время торможения и движения накатом электромотор работает как генератор, возвращая энергию в суперконденсаторы. Проводимые в настоящее время исследования и испытания имеют целью довести общий пробег гибрида в городском цикле до нескольких сотен километров.

Все компоненты гибрида легко устанавливаются в стандартный трехдверный кузов BMW 1 Series. ВСУ расположена под капотом вместе с ДВС, электродвигатель занимает место заднего редуктора и приводит в движение задние колеса. 82 кВт «электрической» мощности и высокий крутящий момент обеспечивают с самого старта «спортивный дух» BMW. Батарея суперконденсаторов заняла место КПП в центральном туннеле. 120-сильный ДВС крутит передние колеса. Объем бензинового бака уменьшен, что позволяет разместить рядом бак для водорода. Таким образом, внутреннее пространство кузова не уменьшилось, и в нем по-прежнему могут разместиться пять человек. Общий же вес автомобиля вырос незначительно. На рисунке 2.4 представлен пример блока топливных ячеек.



Рисунок 2.4 - Блок топливных ячеек

Технология низкотемпературных топливных ячеек с полимерной мембраной разрабатывалась BMW с 1997 года. С самого начала исследования были направлены на создание компактной ВСУ с максимально низким весом. Концепт BMW 750hL, представленный в начале 2000-х годов, использовал блок топливных ячеек как источник бортового питания. В настоящее время производится уже четвертое поколение ВСУ. Помимо увеличения срока службы до 5000 часов, эти устройства менее сложны, а, значит, имеют более высокую надежность.

Они уверенно работают при атмосферном давлении, а их КПД достигает 58%. ВСУ быстро реагирует на изменение нагрузки. Переход от режима холостого хода до максимальной мощности занимает всего лишь 5 миллисекунд. Полимерные топливные ячейки способны работать при низких температурах. Система приходит в рабочее состояние всего лишь через 30 секунд после «холодного» старта. Исследования показали, что после нескольких сотен «холодных» пусков параметры ВСУ не изменились [22].

ВСУ нового гибрида обеспечивает электропитанием всех потребителей сети аналогично с концептом BMW 750hL. При этом они не отбирают мощность ДВС. Это позволяет также улучшить и некоторые функции комфорта. Например, кондиционер или медиа-системы могут работать во время стоянки, питаясь от батареи топливных ячеек. ВСУ обеспечивает небольшую мощность на протяжении длительного периода времени; энергия же, запасенная в суперконденсаторах, позволяет развивать высокую мощность в течение короткого временного отрезка. Совместная работа этих устройств позволяет добиться идеального движения в городских условиях.

2.5 Конфигурация гибридного многорежимного силового агрегата

Конструкция силового агрегата, выбранного для исследования, представлена на рисунке 2.5. Данная конструкция основана на решениях, описанных в патенте US6478705 [23]

Исследование данной силовой установки представляется интересным по причине полного отсутствия какой-либо информации на русском языке.

Конфигурация многорежимного силового агрегата содержит два устройства деления потоков мощности (PSD), три муфты и два мотор-генератора. PSD обозначаются метками «S», «C» и «R» для солнечной шестерни, водила и коронной шестерен соответственно.

В конструкции:

- двигатель через муфту (CL3) соединен с коронной шестерней первой планетарной передачи (R1);

- первый мотор-генератор (MG1) непосредственно соединен с солнечной шестерней первой планетарной передачи (S1), а также через промежуточный вал и муфту (CL2) с коронной шестерней второй планетарной передачи (R2);

- первое (C1) и второе (C2) водила напрямую соединены с карданным валом;

- коронная шестерня второй планетарной передачи (R2) соединена с неподвижным элементом через муфту (CL1);

- второй мотор/генератор (MG2) соединен с солнечной шестерней второй планетарной передачи (S2).

Трехрежимная структура силовой установки способна работать как электромобиль (EV) или в одном из двух режимов разделения мощности. Полностью электрический режим (AER) возможен благодаря конфигурации EV. AER ограничивается посредством электронного блока управления (ECU) на низких скоростях и мощностях для исключения нежелательного истощения системы накопления энергии (ESS). AER практически всегда используется исключительно для начала движения транспортного средства. Работа EV активируется путем отключения муфты CL3 и подачей системы накопления энергии ESS энергии на второй мотор-генератор MG2, который, в свою очередь, приводит в движение колеса. Двигатель и первый мотор-генератор MG1 выключены.

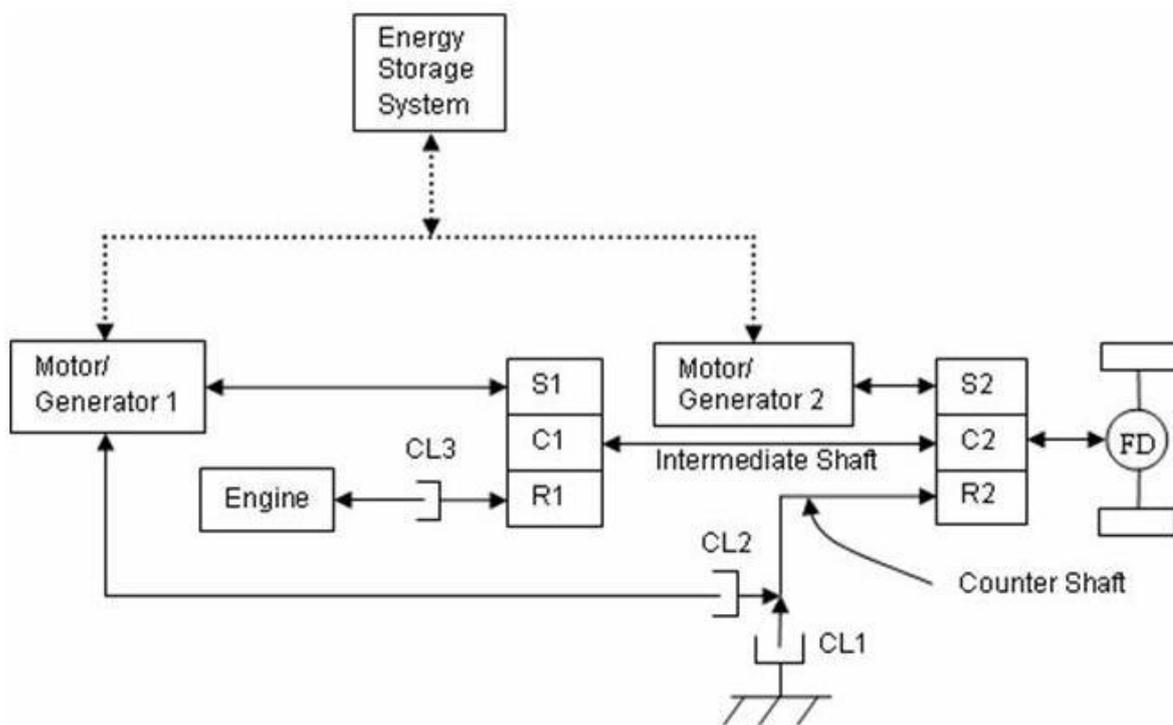


Рисунок 2.5 – Структурная схема многорежимного силового агрегата

Для разделения потоков мощности муфта CL3 включается вместе с одной из двух других муфт. Двигатель также запускается и начинает вырабатывать энергию.

Два режима разделения потоков мощности охватывают условия низкой и высокой скорости соответственно. Низкоскоростной режим срабатывает при включении муфты CL1 и отключении муфты CL2. Это действие отключает первый мотор-генератор MG1 от второго устройством деления потоков мощности PSD, фиксирует коронную шестерню второй планетарной передачи R2 и в результате происходит разделение входного потока. Этот режим используется, когда требуемая скорость не может быть получена посредством AER, но и не является, собственно говоря, высокой.

Дорожная обстановка и желания водителя будут определять уровень мощности силового агрегата и, следовательно, ту скорость, с которой режимы будут изменяться.

Следует отметить, что на низкоскоростном режиме схема практически идентична конструкции автомобиля Toyota Prius THS. Два имеющихся

различия в конструкциях заключаются в соединении двигателя с коронной шестерней первой зубчатой передачи и типе выходного зубчатого зацепления: в конструкции General Motors используется PSD с неподвижным коронным зубчатым колесом, а в THS используется обычная зубчатая передача.

Высокоскоростной режим включается при превышении скорости, обозначенной как Vперекл., путем отключения муфты CL1 и включения муфты CL2. Это действие соединяет первый мотор-генератор MG1 с коронной шестерней второй планетарной передачи R2. Этот режим имеет два узла, первый из которых является общим для низкоскоростного режима, а второй, обозначенный как VS3, имеет более высокое соотношение - выходная/входная скорость. Дополнительный узел обеспечивает более эффективную работу на высоких скоростях. Различные режимы работы приведены в таблице 2.1.

Следует отметить, что представлены только те режимы, обеспечивают движение транспортного средства вперед, хотя также возможны и режимы с задним ходом автомобиля.

Режим зарядки системы накопления энергии ESS, в котором отсутствует движение, достигается путем применения механических тормозов для предотвращения любого перемещения. Две другие важные скорости при высокоскоростном режиме обозначены как VS2 и VS4. VS2 - это скорость, на которой второй мотор-генератор MG2 начинает работать как генератор. VS4 - это та скорость, после которой оба мотор-генератора работают как моторы. Активация этих двух скоростей будет зависеть от состояния заряда (SOC) батареи; если уровень заряда батареи остается достаточно высоким, то оба мотор-генератора могут работать как моторы для получения дополнительной мощности.

Таблица 2.1 – Режимы работы ICEHV

Режим	Электрические машины	CL1	CL2	CL3
Движение вперед				
AER	MG1 выкл / мотор	ВКЛ.	ВЫКЛ.	ВЫКЛ.
	MG2 мотор			
Низкоскоростной режим $V < V_{\text{перекл}}$	MG1 генератор	ВКЛ.	ВЫКЛ.	ВКЛ.
	MG2 мотор			
Высокоскоростной режим $V_{\text{перекл}} < V < VS2$	MG1 мотор	ВЫКЛ.	ВКЛ.	ВКЛ.
	MG2 мотор			
Высокоскоростной режим $VS2 < V < VS3$	MG1 мотор	ВЫКЛ.	ВКЛ.	ВКЛ.
	MG2 генератор			
Высокоскоростной режим $VS3 < V < VS4$	MG1 генератор	ВЫКЛ.	ВКЛ.	ВКЛ.
	MG2 мотор			
Высокоскоростной режим $VS4 < V$	MG1 мотор	ВЫКЛ.	ВКЛ.	ВКЛ.
	MG2 мотор			
Торможение				
рекуперативный	MG1 выкл.	ВКЛ./ВЫКЛ.	ВКЛ./ВЫКЛ.	ВКЛ./ВЫКЛ.
	MG2 генератор			
Замедление двигателя	MG1 мотор	ВКЛ./ВЫКЛ.	ВКЛ./ВЫКЛ.	ВКЛ./ВЫКЛ.
	MG2 генератор			
рекуперативный + замедление двигателя	MG1 мотор	ВКЛ./ВЫКЛ.	ВКЛ./ВЫКЛ.	ВКЛ./ВЫКЛ.
	MG2 генератор			

2.6 Инструменты моделирования

Исследования гибридных трансмиссий транспортных средств сосредоточено на разработке их виртуальных прототипов.

Инструменты компьютерного моделирования, используемые для исследования, представляют собой пакеты программного обеспечения. Так программное обеспечение MATLAB от компании The Math Works применяют для компьютерного моделирования. Это программное обеспечение широко используется многими отраслями промышленности для научных исследований. Программное обеспечение имеет опциональный набор инструментов оптимизации, который используется для математической оптимизации.

Второе программное обеспечение разработано Национальной лабораторией возобновляемой энергии (NREL) в 1994 году (и постоянно совершенствуется с помощью процесса с открытым исходным кодом) для моделирования и оптимизации транспортных средств, известного как ADvanced VehIcle SimulatOR (ADVISOR). ADVISOR был основан на платформе MATLAB / Simulink, что делает его использование гибким для объединения процедур оптимизации. Программное обеспечение ADVISOR было открытым исходным кодом, в котором большое количество исследовательских групп внесли свой вклад в библиотеки моделей, что позволило инструменту стать отраслевым стандартом.

Третий инструмент проектирования - LSVTF, в котором можно выполнить экспериментальную проверку результатов моделирования и симуляции. Средство позволяет воспроизводить точные результаты контролируемой среды.

2.7 Обобщение проведенного анализа

Проведенный анализ показал, что наибольшее количество энергии затрачивается на работу двигателя автомобиля и лишь 17 % энергии тратится

на передвижение, то есть задача внедрения энергосберегающих технологий актуально как никогда.

Порядка 10-30 % энергии можно сохранить. Процесс торможения в среднем также поглощает 30% энергии. Неровности, которые преодолевает автомобиль в процессе передвижения, забирают до 10% энергии, которая могла бы быть направлена в полезных целях.

Существующие энергосберегающие технологии, способны в совокупности сэкономить 50-70% энергии, что подтверждает актуальность направлений развития транспортной индустрии в эту сторону.

Одной из основных концепций развития является продвижение транспортных средств на батареях. Наибольшее распространение имеют батареи NiMH и Li-Ion типов, причем энергетическая емкость Li-Ion аккумуляторов примерно в два раза больше, чем у NiMH, но выше и цена.

Второе рождение испытывают и ультраконденсаторы. Как известно, ультраконденсатор – электрохимический конденсатор, который имеет способность накапливать чрезвычайно большое количество энергии по отношению к его размеру, а также в сравнении с традиционным конденсатором. Данное свойство ультраконденсатора особенно интересно в создании гибридных транспортных средств в автомобильной промышленности, в том числе в производстве машин на аккумуляторной электротяге, в которых ультраконденсаторы применяются в виде дополнительного накопителя энергии.

При проектировании гибридных транспортных средств необходимо определять критерии на самом раннем этапе, поскольку это может существенно снизить стоимость и время проектирования

Исторически сложилось так, что общее правило автомобильной инженерии заключается в том, что затраты и время производства пропорциональны весу и размеру автомобиля. Обобщение больше неприемлемо.

Исследования гибридных трансмиссий транспортных средств сосредоточено на разработке их виртуальных прототипов с использованием инструментов проектирования и моделирования. Динамическое моделирование выбранных конструкций используется для точного описания функций механизмов трансмиссии. Моделирование проводится для прогнозирования производительности разработанных моделей.

Эти шаги являются необходимыми при разработке виртуального прототипа. Виртуальный прототип незаменим в конкурентной отрасли автомобильных разработок, поскольку он позволяет быстро и легко оценить эффект изменения элементов конструкции без необходимости производства дорогостоящих натуральных испытаний.

3 Анализ циклов моделирования и оптимизации гибридных силовых агрегатов автомобилей

Многорежимная конфигурация, которая включает в себя множество возможностей, таких как параллельная работа и работа с разделением потоков мощности, является более адаптируемой к разнообразным типам транспортных средств и областей применения. Именно эта гибкость убедила многих аналитиков автомобильной промышленности в том, что многорежимная архитектура превзойдет конструкцию Toyota Hybrid System (THS) и станет превалирующей гибридной трансмиссией. Daimler AG, Chrysler и BMW и другие автомобильные компании, используют патенты General Motors, посвященные многорежимной конфигурации гибридных автомобилей в качестве основы, указывает на то, что руководство этих компаний также считает, что многорежимные конфигурации силовых агрегатов являются довольно многообещающими.

3.1 Моделирование гибридного транспортного средства

Чтобы сравнить и проанализировать производительность многорежимной конфигурации, было проведено имитационное моделирование, в котором многорежимная модель сравнивалась с моделями THS, гибридного и обычного силового агрегата.

Конфигурации транспортных средств были смоделированы с использованием языка программирования MATLAB/Simulink и с помощью интегрированного комплекса для симуляции и анализа движения автомобиля ADVISOR. Используемая версия - это версия 2002 года с открытым исходным кодом. Важно отметить, что ADVISOR позволяет выполнять стационарное моделирование, которое не способно имитировать переходные процессы. Поэтому динамические процессы не учитываются, и поведение компонентов между установившимися состояниями не может быть нами проанализировано.

ADVISOR содержит большую библиотеку различных типов транспортных средств, из которых можно выбрать необходимый. Базовые модели для THS, гибрида с параллельным проводом и стандартного силового агрегата были приняты за основу, и впоследствии изменены, чтобы продемонстрировать желаемые характеристики исследуемых транспортных средств. Многорежимная модель была разработана путем значительной модернизации модели THS.

Кузов транспортного средства, выбранного для моделирования, был основан на грузовике Kenworth T400, типичном коммерческом транспортном средстве. Характеристики автомобиля, включая все компоненты, кроме компонентов силовой передачи, приведены в таблице 3.1. Два разных веса базового транспортного средства рассматриваются для случаев, когда транспортное средство имеет полезную нагрузку (загружен) или не имеет полезной нагрузки (незагружен).

Таблица 3.1 - Характеристики моделируемого автомобиля ICENV

Компонент	Характеристика
Колесная база	9,75 м
Радиус колеса	0,5 м
Вес транспортного средства (незагружен)	5933 кг
Вес транспортного средства (загружен)	11333 кг
Коэффициент сопротивления качению	0,00938
Аэродинамический коэффициент	0,7
Площадь лобового сопротивления	8,55 м ²

Все четыре моделируемые конфигурации используют двигатель с воспламенением от сжатия (CI) с меньшим размером двигателя для трех гибридных моделей. Модели многорежимная и THS имеют практически одинаковые компоненты силовых установок, а при параллельной конфигурации включены те же модели двигателя и мотор-генератора.

Так как четыре различных конфигурации будут иметь разный вес, была предпринята попытка учесть эти отличия. В исследовании, проведенном научно-исследовательским институтом электроэнергетики, вес силового агрегата обычного транспортного средства был на 20 % меньше, чем у силовой установки гибридного транспортного средства с параллельной схемой [24]. Эта разница была учтена в этом исследовании. Кроме того, предполагалось, что силовые установки THS и многорежимные силовые установки были тяжелее, чем у стандартного транспортного средства на 25 % и 27 % соответственно. Последние два предположения о весе были сделаны несколько произвольно; однако предположения отражают оценки веса дополнительных мотор/генераторов (MG), силовой электроники и устройства деления потоков мощности (PSD). Также необходимо обратить внимание на то, что представленные значения мощности двигателей являются номинальными, а не пиковыми.

3.1.1 Моделирование

Для сравнения были выбраны различные циклы при езде, которые представляют типичные условия работы тяжелых коммерческих автомобилей. Расход топлива измеряли в течение циклов, которые представлены на рисунке 3.1, и описаны в руководстве по программному обеспечению ADVISOR. Эти циклы при езде включают:

1) Городской трафик движения для транспортных средств большой грузоподъемности (UDDSHDV), представляющий идеализированный городской трафик движения для тяжелых транспортных средств. Цикл включает в себя средне или высокоскоростное движение с периодическими полными остановками. Пиковая скорость цикла составляет 93,3 км/час, а средняя скорость 30,3 км/час за интервал 1061 с. Пиковое ускорение составляет 2,0 м/с².

2) New York City Truck (NYCT) - характерный трафик по управлению тяжелым транспортным средством в Нью-Йорке. Цикл имеет очень низкую среднюю скорость всего 12,1 км/час, а также максимальную скорость 54,7

км/ч. Пик ускорения составляет $2,0 \text{ м/с}^2$, а продолжительность цикла составляет 1017 с.

3) Городской пригородный маршрут для тяжелых транспортных средств (CSHVR) - совокупность коротких поездок, типичных для транспортных средств большой грузоподъемности. Скорости варьируются от медленных пригородных скоростей до высоких городских скоростей. Пиковая скорость цикла составляет 70,5 км/час и средняя скорость 21,8 км/ч. Пик ускорения составляет $1,2 \text{ м/с}^2$, а продолжительность цикла 1781 с.

4) Тест экономии топлива на автомагистралях (HWFET), используемый EPA США для сертификации CAFE. В данном цикле самая высокая средняя скорость из всех четырех циклов со средним значением 77,2 км/ч. Пиковая скорость составляет 96,3 км/час, пик ускорения - $1,4 \text{ м/с}^2$, а продолжительность цикла - 766 с.

Результаты исследования показывают, что многорежимные конфигурации являются перспективными для использования в тяжелых транспортных средствах с различной степенью полезной нагрузки. Результаты моделирования расхода топлива представлены на рисунке 3.2 для случая без нагрузки и на рисунке 3.3 для случая с нагрузкой. Как видно по рисункам, модель многорежимного транспортного средства превзошла автомобили THS и автомобили с обычными силовыми агрегатами во всех циклах езды и по всем условиям загрузки.

Средняя процентная разница между расходом топлива, достигнутым в многорежимном и обычном исполнении, составляет 22,4%, при этом наибольшая разница наблюдается при CSHVR (при загрузке) - 57,8%.

Средняя процентная разница между расходом топлива, достигнутым в многорежимном и THS-исполнении, составляет 65,1%, при этом наибольшая разница наблюдается для CSHVR (без загрузки) - 88,1%.

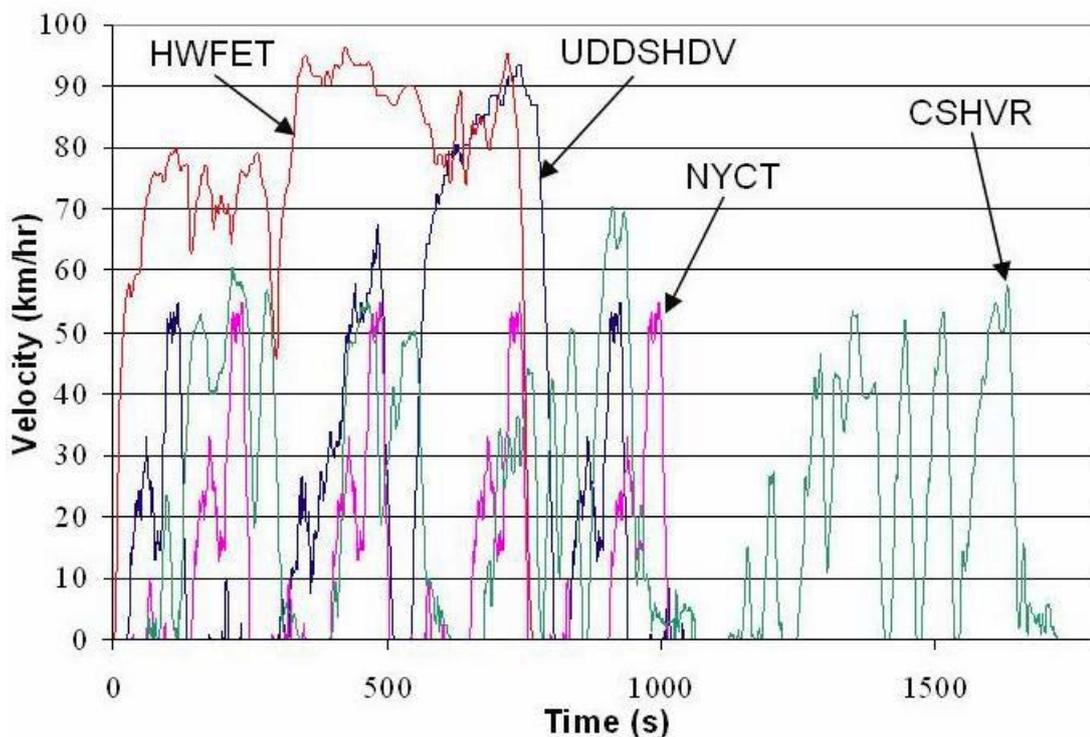


Рисунок 3.1 - IСENV имитация циклов езды

Мультирежим не позволяет снизить расход топлива в среднем по сравнению с гибридом с параллельным приводом. Средняя процентная разница между многорежимным и параллельным исполнением составляет 3,3%, при этом наибольшая разница наблюдается для NYCT (с нагрузкой) - 20,1%.

Тем не менее, многорежимное исполнение превосходит параллельное в четырех случаях: UDDSHDV (без нагрузки) - 1,2%; CSHVR (без нагрузки) - 11,6%; HWFET (без нагрузки) - 9,6%; и HWFET (загружен) - 4,7%. Таким образом, многорежимное исполнение силовой установки является наилучшим для передвижения по шоссе.

Параллельная схема гибридного транспортного средства, как наиболее распространенная конструкция гибрида для коммерческих транспортных средств, продемонстрировала наилучшую общую производительность и среднюю процентную разницу в расходе топлива на 25,6% по сравнению с обычной конструкцией силового агрегата.

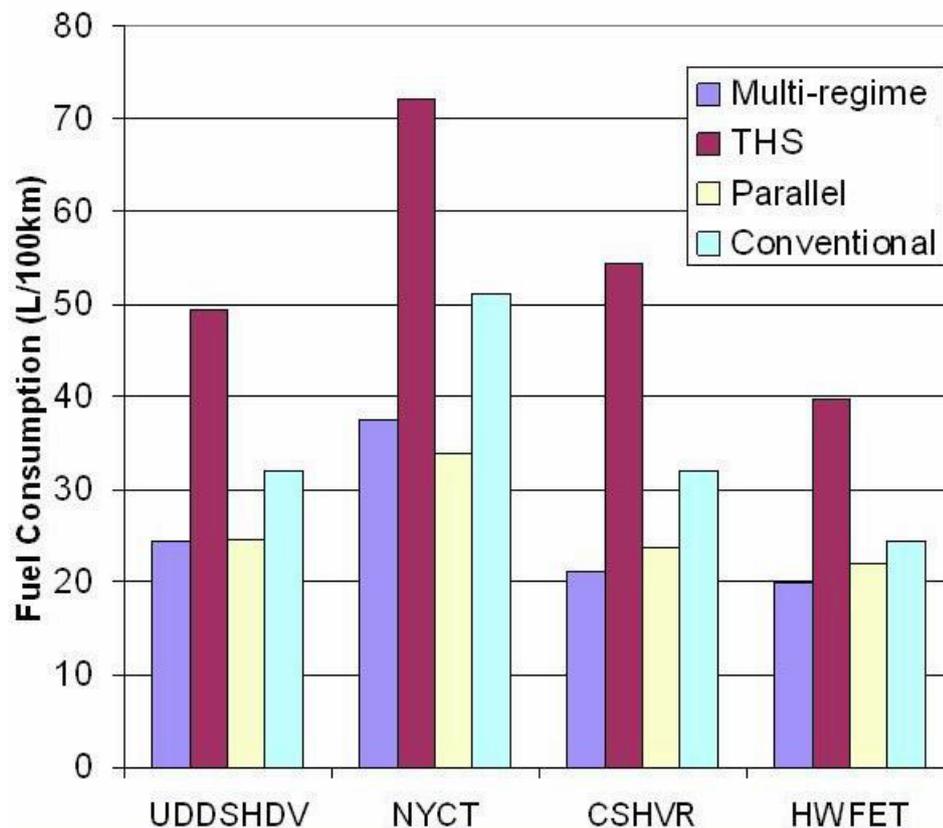


Рисунок 3.2 - Результаты моделирования ICEHV: расход топлива в незагруженном автомобиле

Конфигурация THS получилась сильно неадекватной для выбранных циклов езды для тяжелого транспортного средства с различной полезной нагрузкой. Так TNS-исполнение не показало улучшений в расходе топлива - среднее потребление топлива увеличилось на 44,5% по сравнению с автомобилем с обычной конструкцией силового агрегата, а по сравнению с гибридом с параллельным приводом разница в потреблении топлива в среднем составила 68,0 %.

Моделирование многорежимной конфигурации также необходимо подробно проанализировать. В качестве примера был выбран цикл привода CSHVR с загруженными и незагруженными условиями работы. На рисунке 3.4 показана мощность двигателя на протяжении всего цикла езды. Как и ожидалось, требования к мощности двигателя значительно выше при полной нагрузке - в среднем на 18,9 кВт.

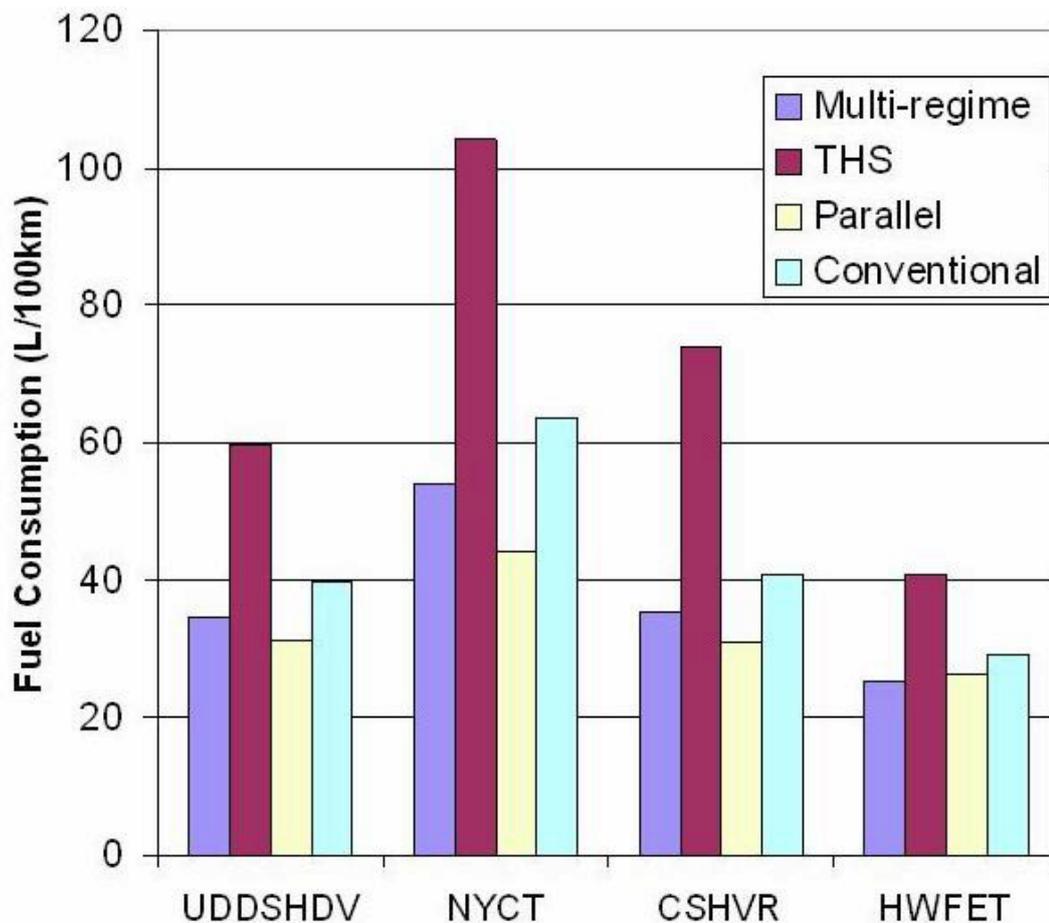


Рисунок 3.3 - Результаты моделирования ICEHV: расход топлива в загруженном автомобиле

На рисунке 3.5 показана мощность первого мотор-генератора MG1 на протяжении всего цикла движения. Как и в случае с мощностью двигателя, нагруженный автомобиль требует от мотор-генератора большей мощности - в среднем 7,4 кВт и выше.

На рисунке 3.6 показана мощность второго мотор-генератора MG2 на протяжении всего цикла движения. Здесь также нагруженный автомобиль требует от мотор-генератора большей мощности - в среднем на 6,8 кВт выше.

Рисунок 3.7 изображает состояние заряда системы накопления энергии (ESS SOC) на протяжении всего цикла движения. В этом случае среднее значение состояния заряда (SOC) для незагруженного автомобиля неожиданно ниже, чем у загруженного. Средняя разница между двумя

случаями составляет 1,6%. Неизвестно, является ли этот результат погрешностью моделирования при управлении питанием или работа двигателя в незагруженном автомобиле менее эффективна при принятых условиях моделирования.

Результаты моделирования показывают, что многорежимная и параллельная конфигурации оказывают заметное влияние на улучшение характеристик расхода топлива по сравнению с базовым стандартным транспортным средством. Однорежимная конфигурация работает плохо в отличие от других трех. Параллельная конфигурация обеспечивает самый низкий расход топлива в целом, однако уровень, достигнутый при многорежимной конфигурации в целом не хуже.

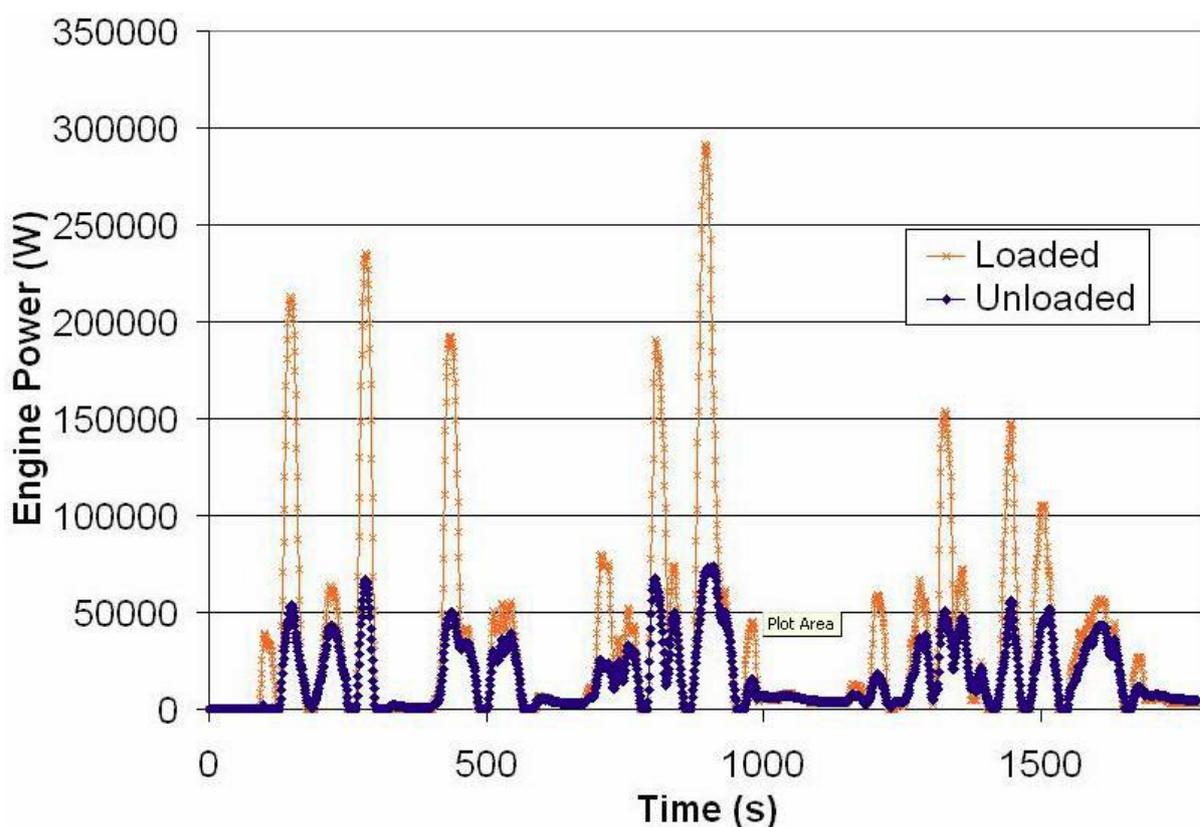


Рисунок 3.4 - Результаты моделирования ICENV: мощность двигателя с многорежимной конфигурацией силовой установки на трассе "Город-пригород"

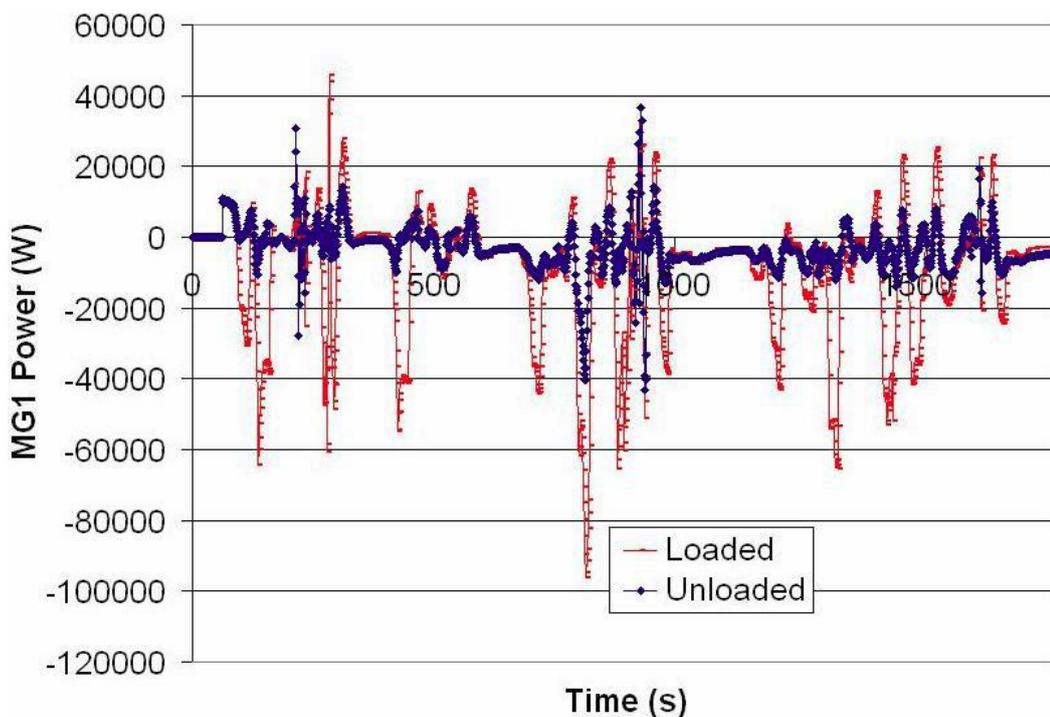


Рисунок 3.5 - Результаты моделирования ICENV: мощность первого мотор-генератора с многорежимной конфигурацией силовой установки на трассе "Город-пригород"

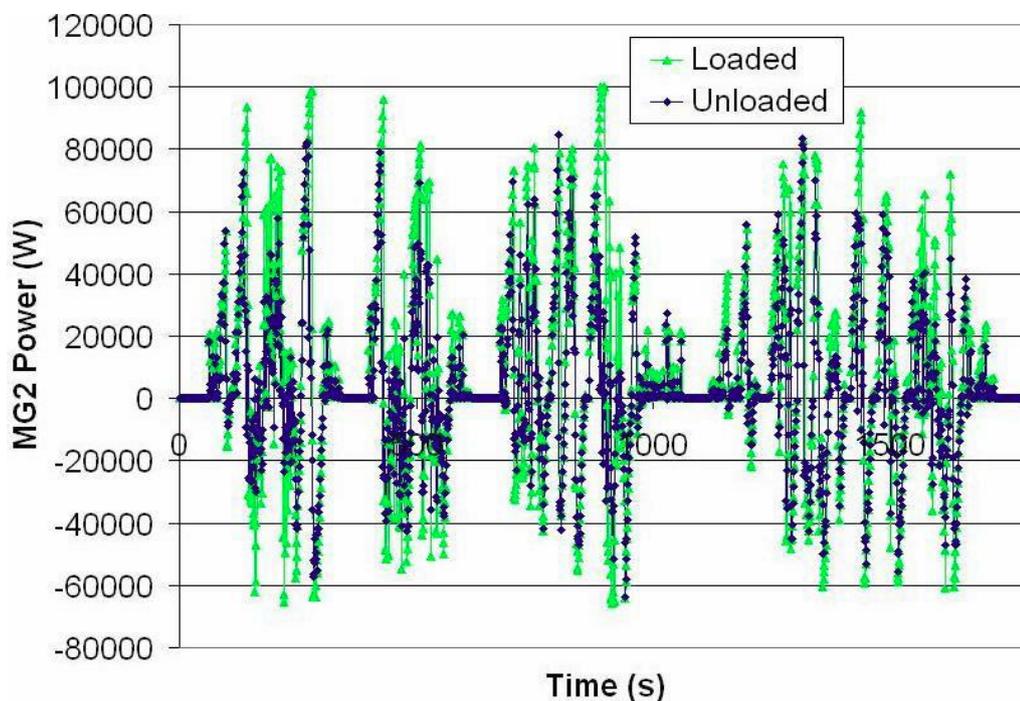


Рисунок 3.6 - Результаты моделирования ICENV: мощность второго мотор-генератора с многорежимной конфигурацией силовой установки на трассе "Город-пригород"

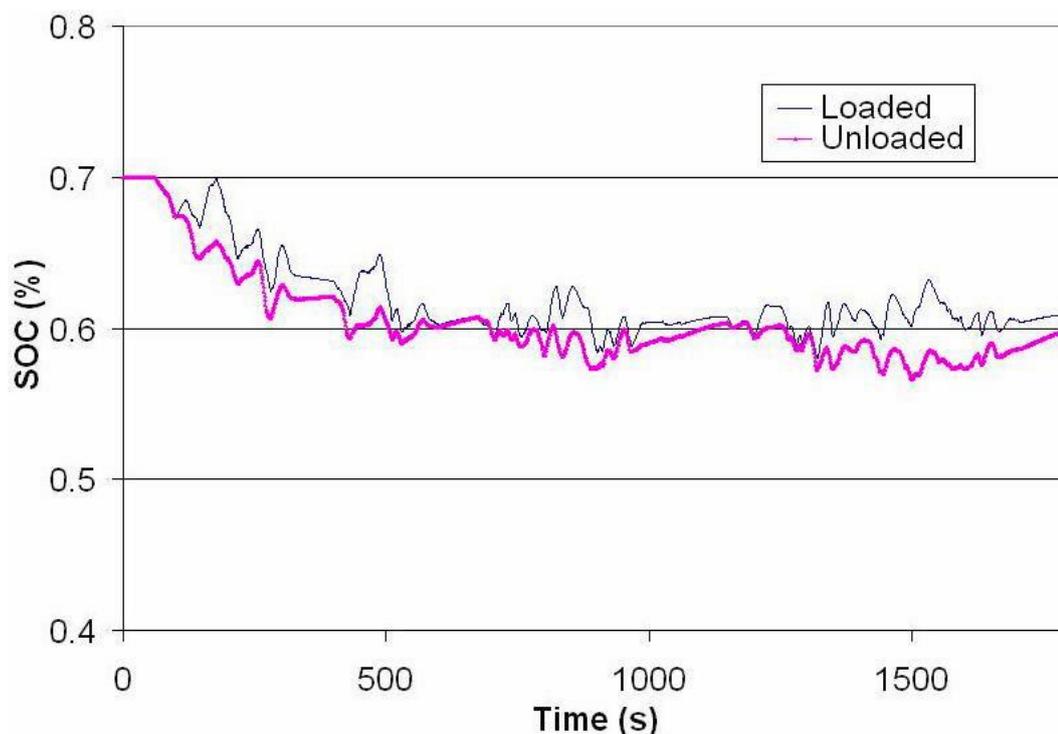


Рисунок 3.7 - Результаты моделирования ICEHV: ESS SOC-кривая с многорежимной конфигурацией силовой установки на трассе "Город-пригород"

Анализ результатов моделирования позволяет сделать несколько выводов.

Во-первых, было показано, что многорежимная конфигурация является довольно многообещающим проектом для улучшения расхода топлива, особенно в транспортных средствах с сильно меняющимися условиями загрузки (например, коммерческих грузовиках). Как видно, попытка моделирования показала результаты максимально приближенные к производительности самого распространённого гибрида с параллельным приводом на тяжелых транспортных средствах. Исследование продемонстрировало потенциальные преимущества усовершенствованной концепции многорежимного проектирования по сравнению с существующими однорежимными конфигурациями.

Во-вторых, стратегия управления питанием гибридных транспортных средств является важной областью для потенциального улучшения.

Поскольку гибриды с параллельным приводом являются гораздо более распространенными, то и стратегии моделирования и контроля имеют минимальное количество допущений.

Что касается производительности однорежимной конфигурации, то напрашивается вывод о том, что существующая стратегия управления питанием, реализованная в ADVISOR не может быть применена к крупному коммерческому транспорту. Результат не говорит о том, что эта конфигурация в принципе не подходит для более тяжелых транспортных средств. При правильно выбранной стратегии управления питанием конфигурация может превзойти производительность даже гибрида с параллельным приводом, хотя, вероятно, она не сможет улучшить расход топлива, достигнутый на гибриде с многорежимной конфигурацией силовой установки.

Дальнейшее моделирование должно быть сосредоточено на разработке стратегии управления питанием многорежимной конфигурации, тем более что она обеспечивает больше возможностей для повышения производительности, чем однорежимная структура.

Проведенные исследования могут быть полезны на ведущих производственных площадках для грузовых и пассажирских перевозок.

3.2 Моделирование систем топливных элементов

В этом подразделе рассмотрено моделирование системы топливных элементов гибридных транспортных средств. Моделируются потоки воздуха, водорода и воды через систему, а также вспомогательные компоненты системы топливных элементов (FCS) и то, как они интегрированы в общую модель FCS. Модели потока включают в себя коллекторы, через которые реагенты и продукты проходят вверх и вниз по потоку, соответственно.

Компоненты оборудования включают в себя: компрессор для приведения воздуха реагента к требуемому давлению, систему охлаждения (состоящую из водяного насоса и вентилятора радиатора) для поддержания

необходимой рабочей температуры и два увлажнителя для обеспечения надлежащего уровня водяного пара.

Была сделана попытка моделирования в сочетании с динамической моделью отклика напряжения, которая позволит учесть временную реакцию системы на изменение требуемого тока. В настоящее время переходная составляющая модели не реализована. Системные уравнения были запрограммированы в MATLAB.

Схема для системы топливных элементов, включающей потоки и компоненты ВОР, показана ниже на рисунке 3.8. На рисунке изображены контуры газообразного водорода и воздуха, контур системы увлажнения и система охлаждения.

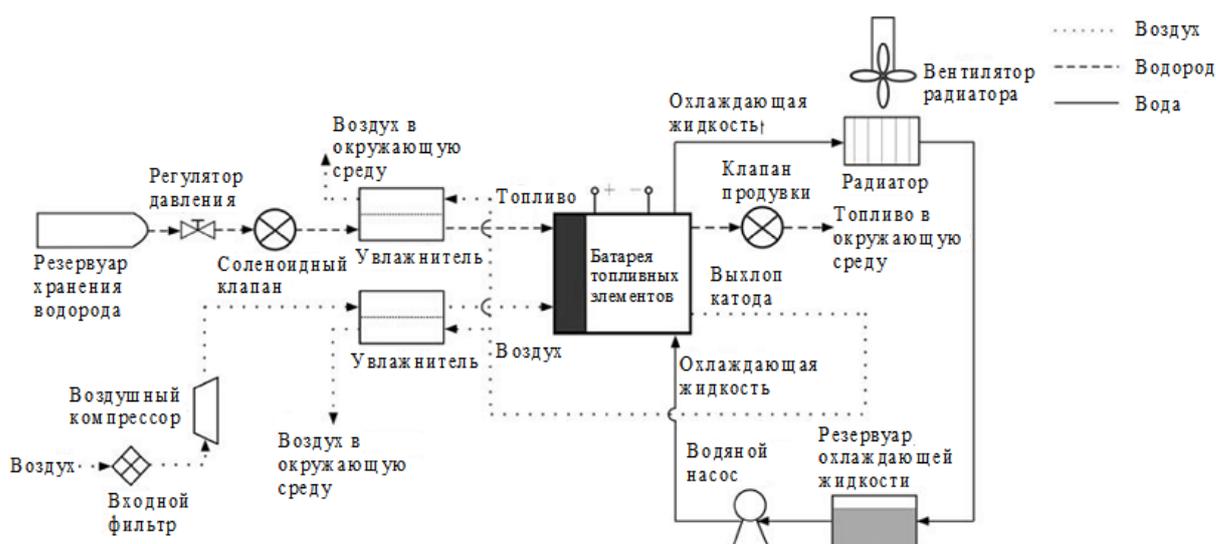


Рисунок 3.8 - Схема системы топливных элементов

Компоненты оборудования получают энергию от той системы, которая вырабатывается самой работой топливного элемента, тем самым снижая общую выходную мощность. Выпускаемый газообразный водород находится под давлением, аналогичным тому, которое требуется для батареи, и, таким образом, компрессор для анодной стороны ячейки часто не требуется; в этом случае достаточно регулятора давления и электромагнитного клапана.

Дальнейшие исследования могут включать полную модель хранения водорода. На рисунке 3.7 водород, который не участвует в электрохимической реакции, выпускается в атмосферу. Однако возможно допустить, чтобы этот потерянный газообразный водород был объединен с водородом под давлением посредством использования системы рециркуляции. Дополнительный модуль рециркуляции включен в модель. Воздушный фильтр показан для полноты картины; предполагается, что он вносит незначительные физические изменения в модель. Это предположение потенциально противоречит исследованиям, где воздушный фильтр может привести к потере до 70% общей мощности в установке обработки воздуха.

3.3 Исследования систем топливных элементов

Комплексное моделирование является оптимальным методом для снижения затрат и времени на проектирование. Важным шагом в этом процессе является использование методов оптимизации для определения оптимальной конструкции без необходимости создания дорогостоящих и трудоемких физических прототипов. Возможные решения для ускорения коммерциализации топливных элементов в транспортных средствах могут быть реализованы намного качественней, если предварительно была проведена обобщённая оптимизация.

Например, если определена оптимальная гибридизация для конкретного транспортного средства, то впоследствии улучшатся эксплуатационные характеристики транспортного средства.

Оптимизация широко используется во многих областях проектирования, но только сравнительно недавно была представлена в литературе по проектированию топливных элементов. Конструкции системы топливного элемента, механизмов, управляющих работой топливного элемента, имеют настолько сложную природу, что целевая функция может иметь множество локальных минимумов, и, следовательно, оптимизация

таких систем может быть довольно сложной. Поиск научной литературы показывает, что попытки строгой оптимизации FCS относительно редки.

Тем не менее, исследования топливных элементов с использованием методов оптимизации были проведены несколькими исследовательскими группами.

Груйициц с соавторами [25] используют двумерную вычислительную модель, чтобы оптимизировать электрический ток на ширину топливного элемента при напряжении элемента 0,7 В. Алгоритм оптимизации был основан на методе последовательного квадратичного программирования (ПМК). Для получения максимальной величины электрического тока были использованы эксплуатационные параметры (входное давление воздуха) и геометрические параметры (толщина катода, длина катода).

Маварди с соавторами [26] использовали одномерную механистическую модель топливного элемента для оптимизации плотности мощности с учетом ограничений нескольких рабочих параметров. Оптимизация позволила количественно получить степень влияния толщины мембран и электродов, а также величины концентрации CO на значения оптимальных условий эксплуатации.

Относительно недавно Ву с соавторами [27] выполнили оптимизацию рабочих условий протонообменной мембраны топливного элемента (PEMFC) с использованием математического моделирования и полной трехмерной модели. Анализируемыми рабочими параметрами были уровень увлажнения катода, катодное давление, стехиометрия катода и температура ячейки.

Ванг и Донг [28] использовали полуэмпирическую модель, основанную на данных из анализа Балларда Марка IV и новую схему оптимизации, которую они назвали методом адаптивной поверхности отклика (ARSM), чтобы найти оптимальную конфигурацию запатентованной конструкции батареи топливных элементов. Было показано, что конкретная модель, известная как модель радиатора TERS, имеет улучшенную производительность, а оптимизация также минимизировала стоимость

устройства. Полуэмпирическая модель не включает в себя явления, которые необходимы для точной комплексной модели батареи топливных элементов. Оптимизация позволила максимизировать мощность для пяти расчетных переменных: стехиометрия воздуха, ширина батареи, высота батареи, ширина конвекционных ребер и количество ячеек.

Ху и Донг [29] использовали полуэмпирическую модель топливного элемента Балларда Марка IV вместе с несколькими моделями для вспомогательных систем, основанных на кривых производительности, чтобы создать модель FCS. Были получены оптимальная площадь пересечения активной зоны и стехиометрическое соотношение воздуха для максимизации полезной мощности. При этом производственные затраты сведены к минимуму.

Годат и Маречал [30] использовали очень простую модель батареи топливных элементов как часть системы, включающей реактор паровой метановой конверсии (SMR), водо-газообмен (WGS) и реактор предпочтительного окисления (PROX) для полной переработки топлива. Цель оптимизации состояла в том, чтобы определить оптимальные значения отношения пара к углероду, температуры SMR, температуры дыма в трубе и уровня использования топлива.

Франгопуулос и Накос [31] провели совместную оптимизацию производительности и стоимости PEMFC. При оптимизации производительности использовались только температура и плотность тока в качестве входных переменных, игнорируя большое влияние стехиометрии давления и воздуха на производительность системы.

В целом, подводя итоги чтобы иметь возможность использовать метод оптимизации, необходимо определить проблему, которая содержит несколько противоречивых целей. Например, для оптимизации отдельной ячейки батареи, где выходная мощность должна быть максимизирована, противоречивые цели в основном связаны с проблемами управления теплом и водой. Например, если стехиометрия воздуха мала, воздух не сможет

устранить всю воду, образовавшуюся в катоде ячейки, и в газодиффузионном слое батареи (GDL) произойдет затопление, что приведет к значительному уменьшению генерируемой энергии в мощность.

С другой стороны, если стехиометрия слишком велика, мембрана высыхает, снижая протонную проводимость и, следовательно, уменьшая выходную мощность. Существует оптимальное значение стехиометрии воздуха, для которого достаточно воды для увлажнения мембраны без затопления в газодиффузионном слое, именно при этом значении достигается максимальная выходная мощность.

Таким образом, модель, используемая при оптимизации, должна предполагать, что мембрана полностью гидратирована, следовательно, вышеупомянутый конфликт целей не возникает. Из-за отсутствия противоречивых целей оптимизация выходной мощности отдельного элемента или батареи топливных элементов дает нереалистичные результаты, поскольку переменные конструкции оказывают взаимоисключающее влияние на общую производительность.

Поэтому для решения противоречивых задач система топливных элементов должна быть оптимизирована в целом.

В этом случае мощность, потребляемая вспомогательными системами, создает несколько конфликтов интересов, когда чистая выходная мощность должна быть максимизирована. Работа топливного элемента значительно улучшается при высокой температуре и давлении, однако это увеличение приведет к более высоким потерям мощности из-за вспомогательных систем, в частности из-за системы охлаждения и воздушного компрессора, соответственно. Именно из-за этих противоречивых интересов конструкция системы топливных элементов является элементом для постоянной оптимизации.

Чтобы решить проблему оптимизации, модель системы топливных элементов, описанная в предыдущем подразделе, должна быть связана с нужными алгоритмами оптимизации. Связь между алгоритмом оптимизации

и моделью достигается с помощью проектных переменных, целевой функции и ограничений.

Для проведения оптимизации выбирается начальное значение для проектных переменных либо алгоритмом оптимизации, либо пользователем. В случае глобальных методов начальное значение для проектных переменных выбирается случайным образом. В случае локального метода пользователь сам вводит начальные значения для переменных проекта.

Значения проектных переменных затем присваиваются модели системы топливных элементов. Модель системы топливного элемента затем вычисляет производительность системы. Исходя из этих результатов, программа вычисляет значение целевой функции с учетом проектных ограничений. С помощью этой информации алгоритм оптимизации выбирает новый набор проектных переменных, которые потенциально могут повысить производительность системы. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнута целевая функция.

3.4 Рекомендации по применению многорежимных гибридных силовых агрегатов автомобилей и способов их моделирования

Развитие гибридных технологий в автомобилестроении идет ускоренными темпами и для того, чтобы не отстать окончательно, необходимо широко внедрять эти технологии в нашей стране.

Ужесточение норм выбросов вредных веществ в окружающую среду повышает популярность гибридных технологий у автопроизводителей по всему миру, а это, в свою очередь, может привести к радикальным изменениям в способах и методах разработки автомобильных продуктов.

В этом ключе, комплексное моделирование является оптимальным методом для снижения затрат и времени на проектирование гибридных транспортных средств. Немаловажным фактором в этом процессе является использование методов оптимизации для создания улучшений в конструкции

без необходимости создания дорогостоящих и трудоемких физических прототипов.

Для оптимизации работы транспортного средства требуется управление потоком энергии в режиме реального времени. Это особенно важно сейчас, когда возросла сложность систем силовых установок гибридных автомобилей. Таким образом, ожидается, что потребность в компьютерном моделировании, симуляции и оптимизации комплексных систем на протяжении всего процесса проектирования и разработки будет только расти.

Целью данной работы было исследование методов моделирования и оптимизации многорежимных гибридных силовых установок автомобилей.

Далее изложены основные выводы и вклад, вытекающие из различных аспектов проведенного исследования.

Многорежимная конфигурация позволяет проводить более тонкую настройку гибридных силовых установок транспортных средств, поскольку является более адаптируемой к разнообразным типам транспортных средств и областей их применения.

Было проанализировано исследование, в котором многорежимная конфигурация сравнивается однорежимной конфигурацией THS, гибридом с параллельным приводом и стандартным силовым агрегатом. Причем многорежимная модель была разработана путем значительной модернизации модели THS

Проведенный анализ показал, что многорежимная конфигурация позволяет улучшить расход топлива, особенно в таких транспортных средствах, как коммерческий грузовой транспорт и транспорт для пассажирских перевозок, то есть с периодически изменяющимися условиями загрузки. Моделирование показало результаты максимально приближенные к производительности самого распространённого гибрида на тяжелых транспортных средствах - гибрида с параллельным приводом. Причем в четырех моделируемых случаях многорежимная конфигурация превзошла гибрида с параллельным приводом.

При многорежимной конфигурации гибридного транспортного средства, как и на всех гибридах, система накопления энергии ESS допускает рекуперативное торможение; использовать полностью электрический режим AER и способность выключать двигатель, когда в его работе нет необходимости. Все это позволяет снизить износ тормозов и вредные выбросы в окружающую среду, а также повысить экономию топлива.

Многорежимная конфигурация по сравнению с гибридом с последовательным приводом имеет меньший электродвигатель и при этом эффективность работы при высоких нагрузках повышается.

В отличие от гибрида с параллельным приводом, многорежимная конфигурация позволяет отсоединять двигатель от трансмиссии, обеспечивая меньшие потери и более эффективную работу, особенно на низких скоростях. Наконец, несколько режимов разделения мощности в изученной многорежимной конфигурации обеспечивают эффективную работу в более широком диапазоне нагрузок, чем в конструкции THS с разделением мощности.

Основным аспектом, отсутствующим в исследуемой многорежимной конфигурации является стратегия управления питанием. Стратегия управления питанием координирует работу подсистем транспортного средства для достижения целевых показателей производительности, таких как максимальная экономия топлива и снижение выбросов выхлопных газов.

В рассматриваемой модели используется модифицированная версия стратегии, разработанной в ADVISOR для схемы разделения мощности THS. Был сделан вывод, что стратегию управления питанием можно существенно улучшить.

В литературе опубликовано много работ, в которых обсуждают различные методологии разработки стратегии управления питанием. Одним из наиболее распространенных методов является использование эвристических методов управления, таких как правила управления, нечеткая логика или нейронные сети. Однако эти методы не обеспечивают

оптимальную стратегию и могут не обеспечивать эффективную работу для циклов привода, которые не рассматривались на этапе программирования алгоритма.

Чтобы получить оптимальную стратегию управления питанием, обычно использует один из двух методов оптимизации. Первый класс методологий оптимизации имеет дело с алгоритмами мгновенной оптимизации, разработанными для применения в реальном времени. Второй класс основан на алгоритмах глобальной оптимизации, для которых цикл привода предоставляется априори, и определяется оптимальная стратегия для данного цикла движения. Последняя стратегия превосходит мгновенные результаты оптимизации, но требует значительного времени на вычисления и мощности оборудования, и не может быть выполнена в режиме реального времени. В результате, методы глобальной оптимизации были в значительной степени ограничены исследованиями моделирования.

Однако методы GO могут обеспечить оптимальные результаты, которые можно использовать в качестве эталона для оценки производительности стратегии управления питанием в реальном времени мгновенных алгоритмов. Алгоритм мгновенной оптимизации, который показывает производительность, наиболее приближенную к производительности методов глобальной оптимизации, будет оптимальной стратегией управления питанием в реальном времени.

Для рассмотренной многорежимной конфигурации предлагается использовать итеративный процесс для повышения производительности и уменьшения стоимости гибридного автомобиля за счет комбинированной оптимизации стратегии управления питанием и определения размеров используемых компонентов. Первоначально будет сделано предположение о компонентах силовой установки, и будет определена оптимальная стратегия управления питанием для этих компонентов. Затем устанавливается стратегия управления питанием и проводится оптимизация размеров

компонентов. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока улучшения с каждой итерацией не станут существенными.

Эта стратегия формирует новый метод для определения глобальной оптимальной конфигурации как оптимальной стратегии управления питанием, так и оптимального выбора компонентов. Объединение двух задач оптимизации позволит получить действительно оптимальную конфигурацию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потребление такого ресурса как топливо зависит от многих факторов. Имеют значение транспортные условия, климат и качество дорожных покрытий, и, наконец, характер эксплуатации автотранспорта. Можно с уверенностью сказать, что особенности рельеф местности и тип передвижения транспортного средства оказывают немаловажное влияние на эффективность использования топливных ресурсов. Методики и нормативная документация определяют оптимальный уровень топливных затрат при движении транспортного средства. Но данные нормативы регламентируют расход на ровных дорогах, которые, не часто встречаются в сети дорог России.

Особенно актуальным вопросом является себестоимость грузоперевозок посредством автотранспорта, особенно если взять в расчет тот факт, что стоимость на топливное сырье неуклонно становится выше.

Как известно, гибриды отлично демонстрируют свои преимущества на улицах мегаполисов, там, где им приходится очень часто разгоняться и тормозить. У грузовых гибридных транспортных средств, работающих в городах с частыми разгонами и торможениями, экономия топлива достигает 25-35 %.

В результате выполнения данной работы было предложено использовать итеративный процесс при моделировании оптимальной конфигурации гибридного автомобиля за счет комбинированной оптимизации стратегии управления питанием.

Целью данной работы было исследование методов моделирования и оптимизации многорежимных гибридных силовых установок автомобилей.

Для достижения цели решены следующие задачи:

- проанализированы структуры гибридного автомобиля;
- проанализированы существующие разработки гибридных технологий в автомобилестроении;

- исследованы методы моделирования и оптимизации многорежимных гибридных силовых агрегатов автомобилей;

- представлены результаты моделирования системы топливных элементов гибридных транспортных средств;

- разработаны рекомендации по применению многорежимных силовых установок автомобилей, а также способах их моделирования и оптимизации.

Научная новизна исследования заключается в разработке теоретических и практических положений, совокупность которых дает системное решение задачи исследования методов моделирования и оптимизации многорежимных гибридных силовых установок автомобилей.

Главной целью данной работы был анализ проведенных исследований по многорежимной конфигурации гибридных силовых установок, которые позволят в дальнейшем разработчикам гибридных агрегатов начать не с чистого листа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гибридные грузовики: модели, конструкции, перспективы [Электронный ресурс]. – 2013. – URL: <http://www.autotruck-press.ru/articles/4457/> (дата обращения: 09.03.2019).
2. Все о гибридах: история, принцип работы, преимущества [Электронный ресурс]. – URL: <https://sferacar.ru/blog/vse-o-gibridah-istoriya-printsip-raboty-preimushhestva> (дата обращения: 25.05.2019).
3. Бензин, дизель... А может гибрид? Что выбрать? [Электронный ресурс]. – 2012. – URL: <https://www.infocar.ua/arts/article-8009.html> (дата обращения: 25.05.2019).
4. Устройство, схема гибридных автомобилей [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.autoshcool.ru/1592-ustrojstvo-sхема-gibridnyx-avtomobilej.html> (дата обращения: 25.05.2019).
5. Гибридная трансмиссия [Электронный ресурс]. – URL: <https://wiki.zr.ru/> (дата обращения: 26.05.2019).
6. Гибридная силовая установка автомобиля [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.studiplom.ru/Technology-DVS/hybrid.html>. (дата обращения: 26.05.2019).
7. Шабанов, А.В. Применение комбинированных силовых установок на автомобилях и экологическая безопасность окружающей среды / А.В. Шабанов, В.В. Ломакин, А.А. Шабанов, В.И. Сальников // Известия МГТУ «МАМИ». – 2013. – № 1 (15).– С. 232–239.
8. At the heart of automotive revolution [Электронный ресурс]: URL: <http://www.samsungsdi.com/automotive-battery/products/battery-module.html>. (дата обращения: 15.05.2019)
9. Batteries & Energy Products: Automotive Battery [Электронный ресурс]: URL: <https://eu.industrial.panasonic.com/products/batteries-energy-products/automotive-battery> (дата обращения: 15.05.2019)

10. Ultracapacitor Overview [Электронный ресурс]: URL: <https://www.maxwell.com/products/ultracapacitors> (дата обращения: 15.05.2019)
11. Automotive Battery [Электронный ресурс]: URL: <https://www.lgchem.com/global/vehicle-battery/car-batteries/product-detail-PDEB0001> (дата обращения: 15.05.2019)
12. Hybrid Electric Vehicles and the Battery [Электронный ресурс]: URL: https://batteryuniversity.com/learn/article/hybrid_electric_vehicles_and_the_battery (дата обращения: 15.05.2019)
13. Без двигателя нет движения а следовательно нет автомобиля [Электронный ресурс]. – 2015. – URL: <http://samzan.ru/191260> (дата обращения: 03.06.2019)
14. Выхлопная энергия: не вылетит в трубу [Электронный ресурс]. – 2013. – URL: https://www.f1-portal.ru/index.php?id_notes=2780 (дата обращения: 03.06.2019)
15. Lipman, T. Hybrid electric and fuel cell vehicle technological innovation: hybrid and zero-emission vehicle technology links / T. Lipman, R. Hwang // Proceedings of the 2003 20th International Electric Vehicle Symposium and Exposition. – Long Beach, 2003. – 26 с.
16. Khateeb, S. (2004). Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter / S. Khateeb, M. Farid, J. Selman, S. Al-Hallaj // Journal of Power Sources. – 2004. – № 128. – С. 292–307.
17. Tesla Roadster [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.tesla.com/roadster> (дата обращения: 05.06.2019).
18. Суперконденсаторы. Устройство и применение. Виды и работа [Электронный ресурс]. – URL: <https://electrosam.ru/glavnaja/slabotochnye-seti/oborudovanie/superkondensatory/> (дата обращения: 07.06.2019).
19. Преимущества транспорта на суперконденсаторах [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ultracapacitor.ru/stati/superkondensatory> (дата обращения: 07.06.2019).

20. Wouk, V. (2000). The hybrids are coming! / V. Wouk // Proceedings of the 2000 17th International Electric Vehicle Symposium. – Montreal, QC.

21. Электрический и гибридный автотранспорт. Аналитический обзор [Электронный ресурс]. – 2014. – URL: <http://portal-energo.ru/articles/details/id/746/> (дата обращения: 15.06.2019)

22. Водородные технологии и концепты BMW [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <https://avtonov.info/hydrogen-bmw> (дата обращения: 12.06.2019)

23. Пат. 6478705 United States МПК F 16 H 3/72 Hybrid electric powertrain including a two-mode electrically variable transmission / Holmes A. G., Schmidt M. R. заявитель и патентообладатель General Motors Corporation. – заявл. 19.01.01 ; опубл. 12.11.02 – 7 с.

24. Miller, J. M. Propulsion Systems for Hybrid Vehicles. – London: Technology & Engineering, 2004 – 455 с.

25. Grujicic, M., Design and optimization of polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells / M. Grujicic, K. M.Chittajallu // Applied Surface Science. – 2004. – № 227. – С. 56-72.

26. Mawardi, A. Optimization of the Operating Parameters of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell for Maximum Power Density / A. Mawardi, F. Yang, R. Pitchumani // Journal of Fuel Cell Science and Technology. – 2005. – № 2. – С. 121-135.

27. Wu, J. Toward the optimization of operating conditions for hydrogen polymer electrolyte fuel cells / J. Wu, Q. Liu, H. Fang // Journal of Power Sources. – 2006. – № 156. – С. 388-399.

28. Wang, G. Adaptive Response Surface Method - A Global Optimization Method Scheme for Approximation-based Design Problems / G. Wang, Z. Dong // Journal of Engineering Optimization. – 2001. – № 33. – С. 707-734.

29. Xue, D. (1998). "Optimal fuel cell system design considering functional performance and production costs / D. Xue, Z. Dong // Journal of Power Sources. – 1998. – № 76. – С. 69-80.

30. Godat, J. Optimization of a fuel cell system using process integration techniques / J. Godat, F. Marechal // Journal of Power Sources. –2003. – № 118. – C. 411-423.

31. Frangopoulos, C. Development of a model for thermoeconomic design and operation optimization of a PEM fuel cell system / C. Frangopoulos, L. Nakos // Energy. –2005. – № 31. – C. 1501-1519.