

- Е.В., Карпухин К.Е. Экспериментальный многоцелевой гибридный автомобиль // Автомобильная промышленность. – 2006. – № 7. – с. 5 – 8.
3. Карунин А.Л., Бахмутов С.В., Селифонов В.В., Вайсблом М.Е., Баулина Е.Е., Карпухин К.Е. Автомобиль с комбинированной силовой установкой. Результаты и методика испытаний. // Автомобильная промышленность. – 2007. – № 7. – с. 6 – 9.
4. Отчёт о НИР по теме: "Разработка системы автоматического управления комбинированной энергетической установкой транспортного средства с использованием бортового компьютера". Этап №2 "Создание лабораторного макета системы автоматического управления КЭУ транспортного средства". ГК №16.740.11.0255.
5. Селифонов В.В., Баулина Е.Е. Экспериментальное определение топливной экономичности автомобиля с гибридной силовой установкой при движении в городском цикле. // Автомобиль и окружающая среда: сборник статей 58 Международной научно-технической конференции ААИ – Дмитров – ФГУП "НИЦИАМТ", 14 – 15 июня 2007. – с. 42 – 48.

Перспективы создания среднетоннажных грузовых городских автомобилей с комбинированными энергетическими установками с использованием системы тягового электрооборудования российского производства

д.т.н. проф. Бахмутов С.В., к.т.н. проф. Серебряков В.В., к.т.н. Баулина Е.Е., Куликов А.И., Филонов А.И.

Университет машиностроения

8(495)223-05-23 (1204) baulina@mami.ru, filonov@mami.ru

Аннотация. В статье рассмотрены перспективы создания среднетоннажных грузовых городских автомобилей с комбинированными энергетическими установками с использованием компонентов российского производства. Описываются преимущества и недостатки выбранной схемы КЭУ. Обосновывается необходимость применения стендовых установок для проведения экспериментальных исследований.

Ключевые слова: комбинированная энергетическая установка (КЭУ), последовательно-параллельная схема КЭУ, торцевые электромашины, комплексная система энергообеспечения.

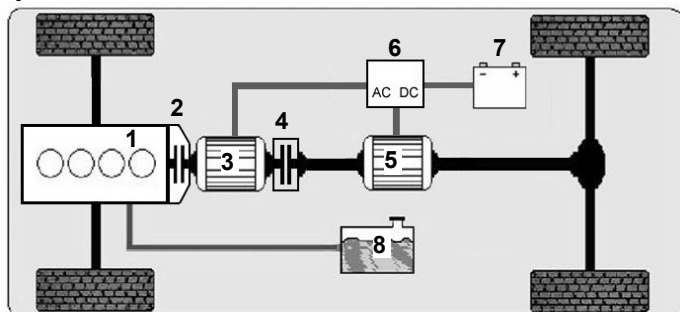
В настоящее время всё большее распространение получают автомобили с КЭУ. Интерес к таким автомобилям обусловлен тем, что они обладают меньшей токсичностью и лучшей топливной экономичностью. Наиболее перспективно применение автомобилей с КЭУ в крупных городах с большим автомобильным парком. КЭУ могут устанавливаться на городских автобусах, легковых автомобилях, развозных грузовых автомобилях. КЭУ целесообразно применять не только на малотоннажных грузовых автомобилях полной массой до 3.5 тонн, но и на среднетоннажных – полной массой порядка 7...8 тонн, таких как, например, ГАЗ-33104 "Валдай", ЗИЛ-5331 "Бычок" и др.

Среднетоннажные грузовые автомобили изготавливают в основном с использованием параллельной схемы КЭУ. Достоинством параллельной схемы является более высокий КПД передачи энергии от первичного двигателя (ДВС) к ведущим колесам в сравнении с последовательной и возможность применения одной электромашины (ЭМ) вместо двух [6, 7].

Последовательная схема КЭУ имеет смысл в случае, когда масса транспортного средства меняется значительно, тогда и мощность, требуемая для движения, будет меняться в широких пределах. В этом случае при использовании параллельной схемы, несмотря на работу по характеристике минимальных удельных расходов, диапазон работы ДВС по частоте вращения получится очень широким. Минимальный расход топлива возможно получить только при строго определенной частоте вращения и нагрузке на двигатель. Нужно обеспечить эффективность работы силовой установки при значительном диапазоне изменения фактической массы транспортного средства. Оптимальной будет та схема, которая за время работы автомобиля с разными весовыми состояниями обеспечит минимальный расход топлива

и минимальную токсичность выхлопных газов. Применение параллельной схемы приведет к работе ДВС в широком диапазоне частот. Выбор последовательной схемы позволит создать конструктивно достаточно простую установку, легко адаптирующуюся к изменению количества потребной для движения энергии за цикл, однако с меньшим по сравнению с другими схемами КПД. При выполнении КЭУ автомобиля по параллельной схеме диапазона регулирования нагрузки ДВС, который обеспечивается генератором и тяговым электродвигателем, может оказаться недостаточно. Потребуется изменение режима работы ДВС, что сразу проявится заметным ухудшением экономичности и токсичности выхлопных газов. На автобусах потребная для движения мощность изменяется в значительных пределах, и, добившись экономичной работы в одном диапазоне нагрузок, невозможно не ухудшить экономические показатели в других диапазонах, что может свести на нет все преимущества КЭУ. В связи с этим последовательная схема может быть наиболее целесообразна для большегрузных грузовых автомобилей и автобусов с КЭУ. Если автобус изготавливается на шасси грузового автомобиля или наоборот, то возможно применение как параллельной, так и последовательной схемы КЭУ.

Выбор схемы, как правило, основан на конструктивных возможностях и некоторых предварительных расчётах. В итоге выбор может быть не всегда оправдан. Существует возможность конструктивного объединения в одной КЭУ последовательной и параллельной схем для использования преимуществ каждой из них. Может оказаться, что в одних условиях движения транспортного средства выгоднее использовать последовательную схему КЭУ, а в других – параллельную. В этом случае необходимо предусмотреть в одной конструкции возможность реализации обеих схем. При этом необходимо использовать две электрические машины, как в последовательной схеме, но для обеспечения механической связи ДВС с ведущими колёсами должен быть предусмотрен связующий узел с возможностью размыкания этой связи. Таким узлом может являться многодисковая муфта, расположенная между этими электрическими машинами. Последовательно-параллельная схема КЭУ представлена на рисунке 1.



1. ДВС.
2. Соединительная муфта 1.
3. Обратимая электрическая машина 1.
4. Соединительная муфта 2.
5. Обратимая электрическая машина 2.
6. Преобразователь электрической энергии.
7. Накопитель электрической энергии.
8. Топливный бак.

Рисунок 1 – Последовательно-параллельная схема КЭУ

При этом, в зависимости от состояния фрикционных муфт (замкнуто – разомкнуто), ДВС может быть как связан механически с ведущими колёсами, так и не связан, следовательно, схема КЭУ может быть как последовательной, так и параллельной как с приводом на общую трансмиссию, так и с приводом на разные оси (патент на изобретение РФ № 2424919 от 27.07.2011 г.) [1].

Таким образом, для исследования и последующей разработки среднетоннажных грузовых городских автомобилей и автобусов целесообразно использовать именно последовательно-параллельную схему КЭУ. Для определения рациональных режимов работы КЭУ последовательно-параллельной схемы для среднетоннажных грузовых городских автомобилей сотрудниками Научно-образовательного центра "Автомобили с ГСУ" создана КЭУ в стендовом исполнении (далее допускается использование термина "стенд").

КЭУ как в стендовом исполнении, так и на транспортном средстве содержит ДВС, сцепление (в качестве соединительной муфты 1), электрические машины, в качестве соединительной муфты 2 используется электромагнитная фрикционная муфта, комплект преобразователей напряжения и устройств управления, накопители электрической энергии. Выбор па-

раметров компонентов КЭУ проводился на примере автомобиля ПАЗ-3349.

Для определения параметров обратимых электромашин была разработана математическая модель движения автомобиля с КЭУ [2]. Для моделирования городского движения были использованы городские ездовые циклы. ECE15 (городской цикл ЕЭК ООН), FUDS (Federal urban driving schedule, испытательная программа FTP, США) и JP1015 (японский городской цикл). В этих циклах были выполнены расчеты мощности, момента и частоты вращения вала электромашин, требуемые для движения автомобиля ПАЗ-3349. Кроме того, расчеты были проведены также в полном цикле ЕЭК ООН, который состоит из четырех городских циклов ECE15 и одного загородного цикла (скорость в нем была ограничена значением 110 км/ч). Результаты расчётов для полного цикла ЕЭК ООН представлены на рисунке 2, результаты для остальных циклов представлены в [2]. Максимальные значения мощности, момента и частоты приведены в таблице 1 ($P_{дв макс}$ – максимальная мощность в тяговом режиме; $P_{ген макс}$ - максимальная мощность в режиме замедления генератором; $T_{тяг макс}$ - максимальный момент в тяговом режиме; $T_{ген макс}$ – максимальный момент в режиме замедления генератором; $n_{макс}$ – максимальная частота вращения вала).

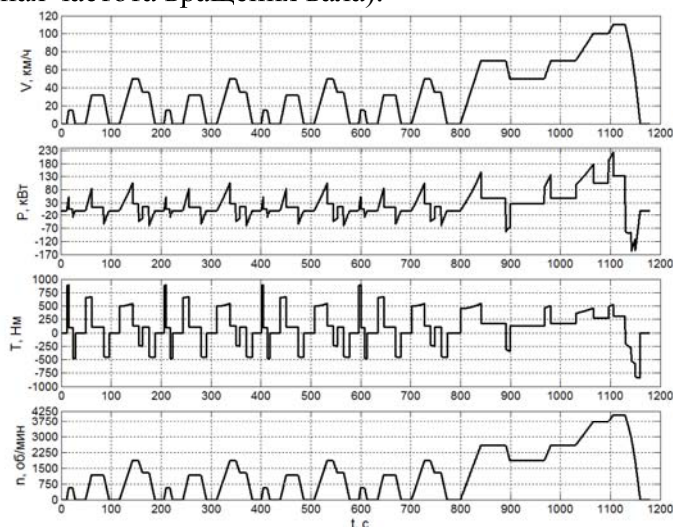


Рисунок 2 – Мощность, момент и частота вращения вала электромашин, требуемые для движения автомобиля ПАЗ-3349 в полном ездовом цикле ЕЭК ООН

Таблица 1

Максимальные расчетные значения мощности и момента в тяговом и генераторном режимах и частота вращения вала электромашин в ездовых циклах

Цикл	$P_{тяг макс}$, кВт	$P_{ген макс}$, кВт	$T_{тяг макс}$, Нм	$T_{ген макс}$, Нм	$n_{макс}$, об/мин
ECE15	105	60	888	474	1851
ЕЭК ООН	223	158	888	841	4071
FUDS	137	93	1156	837	2099
JP1015	142	72	789	538	2588

Исходя из проведенных расчетов были сформулированы требования к электромашине ЭМ2: максимальный длительный момент в тяговом режиме не менее 400 Нм; максимальная длительная мощность не менее 75 кВт (в тяговом и генераторном режимах); максимальный пиковый момент не менее 1000 Нм в тяговом режиме и не менее 850 Нм в генераторном режиме, максимальная частота поддержания пикового момента 1250 об/мин; максимальная частота вращения вала, при которой создается момент, 4000 об/мин. Максимальный длительный момент электромашин в генераторном режиме определяется не только расчетом в циклах, но характеристиками используемого в КЭУ двигателя внутреннего сгорания, поскольку ЭМ2 будет унифицирована с ЭМ1 (в силу особенностей последовательно-параллельной схемы). Так как КЭУ согласно последовательно-параллельной схеме содержит две электромашин, то ДВС может быть не полноразмерным, а уменьшенным. Для среднетоннажного грузового автомобиля целесообразно использовать отечественный дизельный

двигатель Заволжского моторного завода. Максимальный момент дизеля ЗМЗ 51432.10 составляет 270 Нм, а мощность – 85 кВт при 3600 об/мин. Если максимальный длительный момент электромашины в генераторном режиме составит 300 Нм, то мощность 85 кВт будет достигнута при 2700 об/мин.

Требуемым характеристикам удовлетворяют электромашины, созданные сотрудниками ОАО «ИНЦ "ТЭМП"». Это асинхронные двигатель-генераторы (Д-Г) специального исполнения, по существу представляющие собой торцевые электрические машины. Торцевая конструкция электромашины обладает рядом преимуществ по сравнению с асинхронной машиной цилиндрического исполнения. Среди важнейших преимуществ, применительно к задачам, поставленным в связи с созданием стенда, можно выделить в первую очередь хорошую сопрягаемость с приводным механизмом. Кроме того, торцевой Д-Г имеет меньшую массу на единицу мощности и меньшие габариты в осевом направлении, что особенно важно при последовательном соединении силовых агрегатов. Условия для теплоотдачи, охлаждения и вентиляции, в силу разнесения источников тепловыделения, у торцевого Д-Г также лучше, чем у электромашины классической конструкции.

Отмеченные преимущества позволили рассматривать данную конструкцию электрической машины как наиболее полно отвечающую целям и задачам создания КЭУ в стендовом исполнении. Выбор конструктивной схемы обратимой электромашины торцевого исполнения подробно изложен в [4]. Представленный в [4] анализ ключевых критериев, определяющих выбор конструкции торцевых асинхронных машин, был положен в основу разработки конструкции обратимой электромашины специального исполнения, основные параметры которой представлены в таблице 2.

Таблица 2

Технические параметры электромашины

Напряжение питания, фазное, регулируемое, В	0 ÷ 220
Максимальный, кратковременный, в течение 10 с, момент до 600 об/мин, Н·м	1000
Минимальный уровень фазного напряжения для обеспечения максимального момента до 600 об/мин, В	160
Максимальный длительный момент до 1800 об/мин, Н·м.	700
Рабочий диапазон частоты вращения, об/мин	0 ÷ 3000
Максимальный КПД в тяговом режиме, не менее, %	93
Охлаждение	воздушное, принудительное, от отдельного источника
Масса двигателя, не более, кг	150
Исполнение	Защищенное
Габаритные размеры, без учета вылета валов, длина × ширина × высота, не более, мм	240×500×500

Общий вид и конструктивное исполнение обратимой электромашины представлены на рисунке 3.

Для КЭУ в стендовом исполнении с последующим использованием на среднетоннажных грузовых городских автомобилях изготовлена комплексная система энергообеспечения. Основной функцией разработанной комплексной системы энергообеспечения является аккумуляция энергии, выработанной тепловым двигателем комбинированной энергетической установки, а также запас рекуперированной энергии торможения автотранспортного средства, с последующей отдачей в тяговый электрический привод и привод вспомогательных агрегатов.

В состав разработанной комплексной системы энергообеспечения входят следующие элементы: аккумуляторные блоки, состоящие из аккумуляторных элементов LiFePO₄ "ThunderSky LFP40АНА"; датчики контроля температуры аккумуляторных элементов; платы

управления; элементы силовой и сигнальной коммутации; соединительные элементы; силовые кабели и жгуты управления; монтажные элементы.

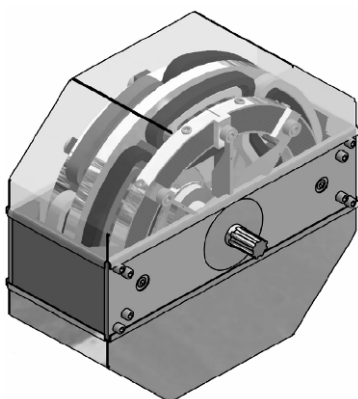
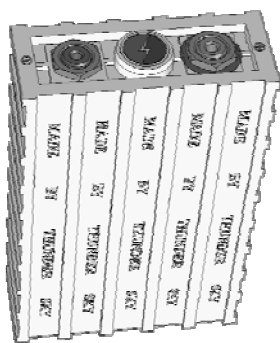


Рисунок 3 – Общий вид и конструктивное исполнение установленных на стенде электромашин

Для достижения необходимого уровня энергообеспеченности среднетоннажных грузовых городских автомобилей с КЭУ общее количество аккумуляторных элементов в системе составляет 96 шт., при этом каждые 12 аккумуляторных элементов объединяются в аккумуляторный блок, имеющий собственную систему контроля и управления. Таким образом, комплексная система энергообеспечения состоит из 8 аккумуляторных блоков, последовательно соединенных силовыми и сигнальными жгутами. Модульный подход, положенный в основу конструкции комплексной системы энергообеспечения, путем изменения количества аккумуляторных блоков дает возможность применения ее для широкой гаммы автотранспортных средств с КЭУ.

Внешний вид и технические характеристики аккумуляторных элементов ThunderSky LFP40AHА представлены на рисунке 4.



Технические характеристики аккумуляторных элементов ThunderSky LFP40AHА:

- Минимальное напряжение 2,5В;
- Максимальное напряжение 4,25В;
- Ток разряда номинальный/максимальный 20А/120А;
- Ток заряда номинальный/максимальный 20А/120А;
- Температурный диапазон заряда/разряда -45– 85⁰С;
- Габариты ДхШхВ 116х46х190мм;
- Саморазряд менее 3% в месяц;
- Вес 1,6кг.

Рисунок 4 – Аккумуляторный элемент ThunderSky LFP40AHА.

Разрядные характеристики при различных величинах тока разряда, разрядные характеристики при различных температурах, разрядные характеристики в течение срока службы элемента, саморазряд аккумуляторного элемента представлены в [4]. Основными преимуществами аккумуляторных элементов типа LiFePO₄ по сравнению с другими современными типами аккумуляторов являются высокая удельная энергоемкость; возможность заряда и разряда высокими токами; пожаро- и взрывобезопасность; широкие температурные диапазоны работы; долгий срок службы. Элементы в аккумуляторном блоке соединены последовательно, к каждому элементу присоединен датчик температуры, передающий данные о текущем тепловом состоянии элемента на плату управления. К токосъемным клеммам аккумуляторных элементов присоединены сигнальные провода, предназначенные для измерения напряжения на каждом элементе. Для контроля параметров состояния аккумуляторных элементов и управления процессами заряда, разряда и балансировки в каждом аккумуляторном блоке установлена плата управления, подробное описание функций которой представлено в [4].

Процесс сборки аккумуляторных блоков с комплексную систему энергообеспечения показан на рисунке 5.

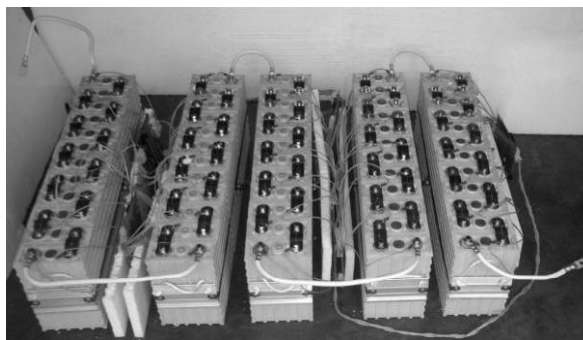


Рисунок 5 – Комплексная система энергообеспечения КЭУ

Для обеспечения совместной работы электрической машины и комплексной системы энергообеспечения ОАО "НПП "Квант" изготовлен специальный комплект преобразователей напряжения и устройств управления (КПН.У), предназначенный для повышения напряжения аккумуляторной батареи транспортного средства в тяговых режимах и понижения напряжения Д-Г транспортного средства или сети переменного тока при заряде накопителей. Подробное описание, схема электрическая соединений и технические характеристики КПН.У представлены в [4].

Схема созданной КЭУ в стендовом исполнении на агрегатах российского производства представлена на рисунке 6.

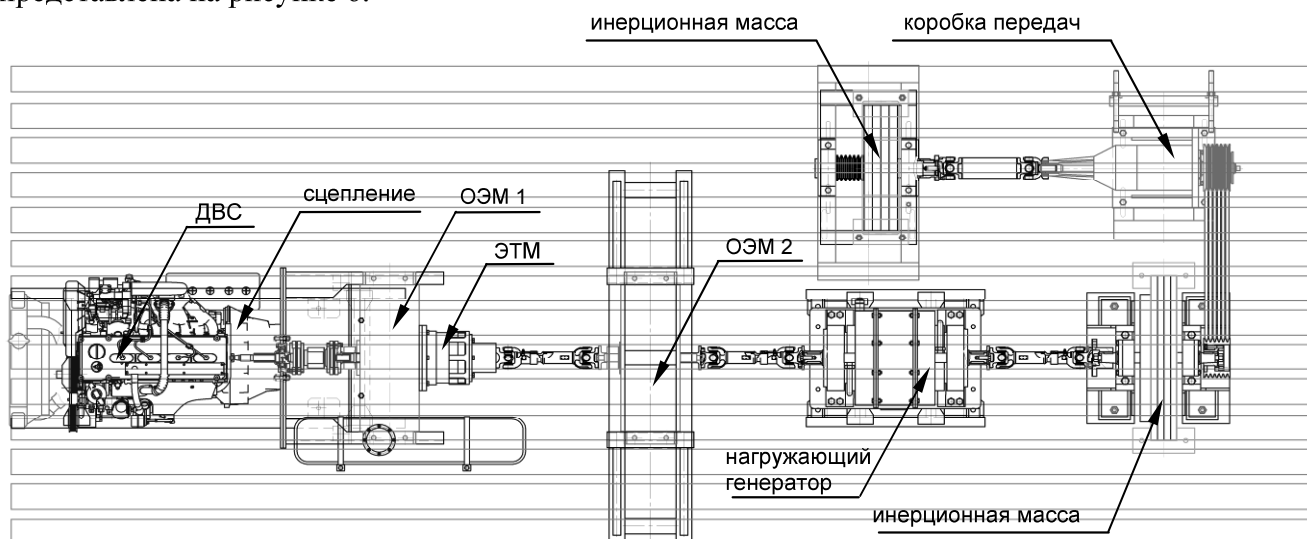


Рисунок 6 – Схема КЭУ в стендовом исполнении

КЭУ в стендовом исполнении содержит две ветви, которые можно условно разделить на тяговую (собственно КЭУ) и нагружающую. Тяговая ветвь имитирует транспортное средство и содержит ДВС (ЗМЗ-5143.10), сцепление, две обратимые электромшины производства ОАО «ИНЦ "ТЭМП" (ОЭМ1 и ОЭМ2) и электромагнитную муфту производства завода "Златмуфта" (ЭТМ 143С). Для регистрации параметров ДВС между ним и ОЭМ1 установлен датчик крутящего момента и частоты вращения М20С-500 производства ООО «ТИЛКОМ» (г. Минск).

Нагружающая ветвь имитирует сопротивление движению автомобиля: сопротивление воздуха, сопротивление качению, сопротивление подъёму и инерционные нагрузки. Нагружающая ветвь содержит нагружающий генератор Magtrol 2WB15, имитирующий силы сопротивления качению и воздуха, а также скатывающую силу. Имитация инерционных нагрузок, зависящих от параметров испытуемого транспортного средства, с помощью имеющихся в продаже программируемых нагружающих устройств имеет некоторые недостатки. Инерционные нагрузки, создаваемые среднетоннажным транспортным средством, относительно

велики, поэтому нагружающее устройство, выбранное для создания этих нагрузок, громоздкое и дорогостоящее. Его установка, тарировка и соединение с остальными элементами стенда на установочной плите, имеющей ограниченные размеры, вызывает конструктивные трудности. В этом случае наиболее рациональным вариантом имитации инерционных нагрузок на стенде является установка инерционных масс (маховиков). В связи с этим за нагружающим устройством устанавливаются последовательно две инерционные массы с условными названиями «большая» и «малая». В целях экономии площади стенда маховики соединяются между собой ремённой передачей. Для имитации сопротивления движению разных транспортных средств между маховиками установлен редуктор (коробка передач) с фиксированными передаточными числами. Элементы тяговой и нагружающей ветвей соединены между собой карданными передачами. Обоснование выбора коробки передач, расчёт параметров ремённой передачи, выбор электромагнитной муфты, схема монтажа с описанием необходимых датчиков и устройств измерения подробно представлены в [3].

Элементы электрооборудования тяговой ветви стенда были описаны выше, установка ДВС и нагружающей ветви стенда представлены на рисунках 7 и 8 соответственно.

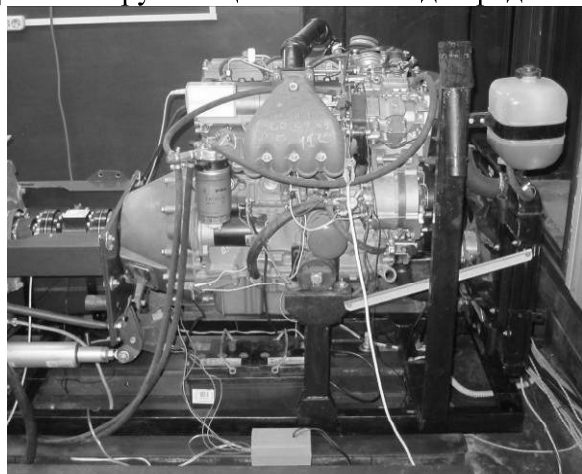


Рисунок 7 – ДВС КЭУ в стендовом исполнении

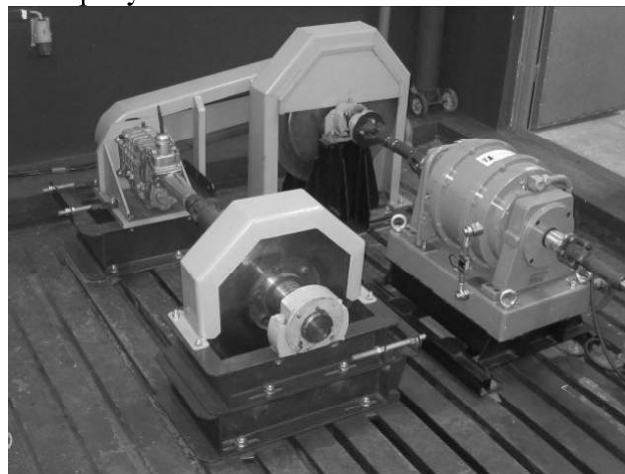


Рисунок 8 – Нагружающая ветвь КЭУ в стендовом исполнении

Проведённые теоретические исследования и предварительные стендовые испытания показали следующие результаты. С использованием разработанной модели КЭУ были построены тяговые характеристики автомобиля ПАЗ-3349, которые обеспечиваются работой одной или двух электромашин в длительном и пиковом режимах [2]. При использовании в качестве тяговой одной электромашин [2] обеспечивается длительное движение по ровной дороге (без подъемов) со скоростью до 86 км/ч. Максимальный преодолеваемый в длительном режиме работы подъем составляет 4.8%. В пиковом режиме работы ЭМ возможно преодоление подъема до 16%. При использовании двух ЭМ (рисунок 9) и электромагнитной муфты с нагрузочной способностью 400 Нм первая ЭМ не может выходить за пределы максимального длительного момента (400 Нм). Вторая ЭМ может работать во всем силовом диапазоне. В этом случае обеспечивается длительное движение автомобиля на подъеме 10% со скоростью до 60 км/ч. Максимальный преодолеваемый подъем составляет около 23% (скорость движения до 30 км/ч). При работе обеих ЭМ в пиковом режиме возможно преодоление подъема до 36%.

По результатам анализа оптимальных управлений было разработано две стратегии (алгоритма) управления КЭУ. Первая ориентирована на получение наименьшего расхода топлива ("экономичная"), вторая – на получение наилучших экологических характеристик автомобиля ("экологичная") [5]. Стратегии одинаковы по структуре, а различаются только численными значениями параметров и законами управления компонентами КЭУ.

Согласно разработанным алгоритмам управления, были получены условия переходов между состояниями и режимами работы КЭУ последовательно-параллельного типа для «экономичного» и «экологичного» алгоритмов управления [3]. Анализ оптимальных управлений

выявляет два состояния: состояние расходования заряда батарей и состояние восполнения заряда батарей. В обоих состояниях КЭУ возможно использование трёх режимов её работы: режима электромобиля, режима работы по параллельной схеме и режима работы по последовательной схеме КЭУ.

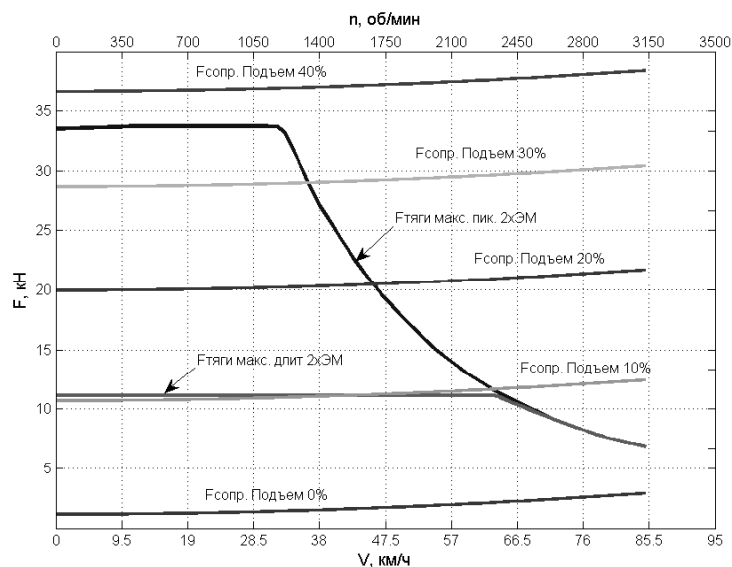


Рисунок 9 – Тяговая характеристика ПАЗ-3349 при движении на электротяге от двух ЭМ

В результате проведенных исследований установлено, что среднетоннажные городские грузовые автомобили и автобусы, оснащенные КЭУ, выполненной по последовательно-параллельной схеме при движении в городских условиях обеспечивают динамические характеристики, сопоставимые с традиционными автомобилями при движении в городском цикле (ускорение не менее 1 м/с^2 , максимальная скорость не менее 80 км/ч , сохранение ускорения 1 м/с^2 до достижения скорости 50 км/ч). Кроме того, обеспечивается не менее 25% экономии топлива в сравнении с традиционными автотранспортными средствами, возможность движения транспортного средства в режиме электромобиля в городских условиях с постоянной скоростью 20 км/ч на протяжении не менее 30 км . Ресурс электрического накопителя по числу зарядно-разрядных циклов достигает не менее 700 циклов. Таким образом, создание среднетоннажных городских грузовых автомобилей с КЭУ, выполненной по последовательно-параллельной схеме, с использованием системы тягового электрооборудования российского производства является перспективным и обеспечивает развитие отечественной компонентной базы в области электрических приводов, предназначенных для автомобильных транспортных средств.

В статье представлены результаты работы, выполненной при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ГК № 16.516.11.6062 от «28» апреля 2011 г.

Литература

6. Николаенко А.В., Бахмутов С.В., Селифонов В.В., Павлушков Б.Э., Филонов А.И., Благушко Я.В., Баулина Е.Е., Куликов И.А., Карпухин К.Е., Данилин М.Ф. Комбинированная энергетическая установка транспортного средства (варианты). // Патент № 2424919 на изобретение – 2011.
7. Отчёт о НИР по теме: "Разработка и изготовление комбинированной энергетической установки (КЭУ) в стендовом исполнении для среднетоннажных грузовых городских автомобилей с использованием перспективных электрических машин российского производства". Этап №1 "Разработка эскизного проекта комбинированной энергетической установки в стендовом исполнении с комплексной системой энергообеспечения". ГК №16.516.11.6062.
8. Отчёт о НИР по теме: "Разработка и изготовление комбинированной энергетической установки (КЭУ) в стендовом исполнении для среднетоннажных грузовых городских авто-

мобилей с использованием перспективных электрических машин российского производства". Этап № 2 "Разработка технического проекта комбинированной энергетической установки с комплексной системой энергообеспечения". ГК №16.516.11.6062.

1. Отчёт о НИР по теме: "Разработка и изготовление комбинированной энергетической установки (КЭУ) в стендовом исполнении для среднетоннажных грузовых городских автомобилей с использованием перспективных электрических машин российского производства". Этап №3 "Изготовление комбинированной энергетической установки в стендовом исполнении". ГК №16.516.11.6062.
2. Куликов И.А., Селифонов В.В., Филонов А.И. Управление комбинированной энергоустановкой автомобиля: экология или энергоэффективность? // Автомобильная промышленность – М.: Научно-техническое издательство Машиностроение – 2011 – № 1.
3. Карунин А.Л., Бахмутов С.В., Селифонов В.В., Круташов А.В., Баулина Е.Е., Авруцкий Е.В., Филонов А.И., Карпухин К.Е. Гибридные автомобили – столбовая дорога к экономичному и экологически чистому транспорту. // Журнал ассоциации автомобильных инженеров – Москва – 2007– № 3. – с. 38 – 45.
4. Карунин А.Л., Бахмутов С.В., Селифонов В.В., Круташов А.В., Баулина Е.Е., Авруцкий Е.В., Филонов А.И., Карпухин К.Е. Гибридные автомобили – столбовая дорога к экономичному и экологически чистому транспорту (продолжение). // Журнал ассоциации автомобильных инженеров – Москва – 2007– № 4. – с. 52 – 56.

Метод прогнозирования усталостной долговечности в условиях квазимонотонной деградации физико-механических свойств объекта

д.т.н. проф. Боровских В.Е., Подвойский А.О.
Саратовский государственный технический университет
+7-937-221-18-75, podvoiskijalex@mail.ru

Аннотация. Предлагается метод оценки ресурса объекта в условиях квазимонотонного ухудшения параметров качества системы, инвариантный относительно класса в общем случае нестационарного стохастического процесса сложной структуры.

Ключевые слова: стохастический процесс; деградационный процесс; вычет предела выносливости; энергия выброса

Проблемам теории управления ресурсом посвящено большое количество монографий и обзоров, но, несмотря на это, задача прогнозирования усталостной долговечности объекта в поле стохастических напряжений остается весьма актуальной и сегодня.

Современная наука о прочности насчитывает несколько десятков методов оценки ресурса при стохастических напряжениях. Аналитический аппарат этих методов чрезвычайно разнообразен: одни основываются на многомерных пуассоновских потоках, другие - на марковских процессах и уравнении Фоккера-Планка-Колмогорова, третьи - на понятии кривой усталости и линейной гипотезе накопления усталостных повреждений (гипотезе Пальмгрена-Майнера).

Существующие методы прогнозирования учитывают довольно широкий спектр факторов, влияющих на способность объекта (по ГОСТ 13377-75 понятия «система» и «элемент» можно объединить единым термином объект) сопротивляться усталостному разрушению, однако прогностический алгоритм этих методов основывается, главным образом, на *стационарной* гипотезе (гипотезе о неизменности механических свойств), а между тем известно, что реальные системы представляют собой сложные *стохастические* системы, свойства которых изменяются с течением времени, а случайные процессы, совершающиеся в этих системах, являются «существенно нестационарными».

Согласно классической теории усталости металлов, наклонный участок кривой выносливости (рисунок 1) по мере накопления усталостных повреждений поступательно сдвигается влево, а предел циклической прочности не изменяется. В этом случае выходит, что при