

УДК 629.113

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА С МАХОВИЧНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

А.И. Маматов, аспирант / Я.В. Калинин, аспирант / В.В. Давыдов / А.И. Лаврентьев

В настоящее время автомобильная промышленность уделяет большое внимание разработкам электромобилей. Главный недостаток всех существующих электромобилей — низкая практическая удельная емкость химических аккумуляторных батарей и, как следствие, малый запас хода. Реальный запас хода в городских условиях эксплуатации оказывается на 30..50% ниже заявленного даже при положительных температурах окружающей среды. Отмечено, что при интенсивном движении в городских условиях с высокой средней скоростью запас хода снижается приблизительно на 50% по сравнению с заявленным [1, 2, 5, 7, 8]. Причина высокой чувствительности запаса хода к режимам движения обуславливается, в первую очередь, резким снижением КПД аккумуляторных батарей с ростом нагрузки. Например, КПД серийно выпускаемых литиево-ионных батарей при относительном разрядном токе 3С составляет 60..65% [3], что значительно ниже традиционно заявляемых 95..97%. Как показывает проведенное авторами статьи исследование, относительный ток тягового аккумулятора электромобиля при разгонах и торможениях достигает 1.7С (разряд) и 3С (заряд) в сравнительно плавном

ездовом цикле NEDC. В интенсивном цикле движения US06 относительный зарядный и разрядный ток достигает значения 3.6С.

Для снижения пиковой нагрузки на аккумулятор и повышения практического запаса хода электромобилей компания «Комбарко» предлагает комбинированный тяговый привод с двумя источниками энергии — аккумуляторной батареей и маховичным накопителем, схема которого представлена на рис. 1.

Отличительной чертой предложенной схемы является добавление в состав силовой установки электромобиля маховичного накопителя энергии, соединенного с приводом колес многопоточной бесступенчатой электромеханической передачей. Энергоемкость маховичного накопителя составляет 1..2% от емкости аккумуляторных батарей и используется как буферный источник мощности при разгоне, рекуперативном торможении электромобиля, а также движении на крутых подъемах и спусках. Многопоточная бесступенчатая электромеханическая передача (супервариатор) содержит пару маломощных электроприводов, которые одновременно выполняют две функции:

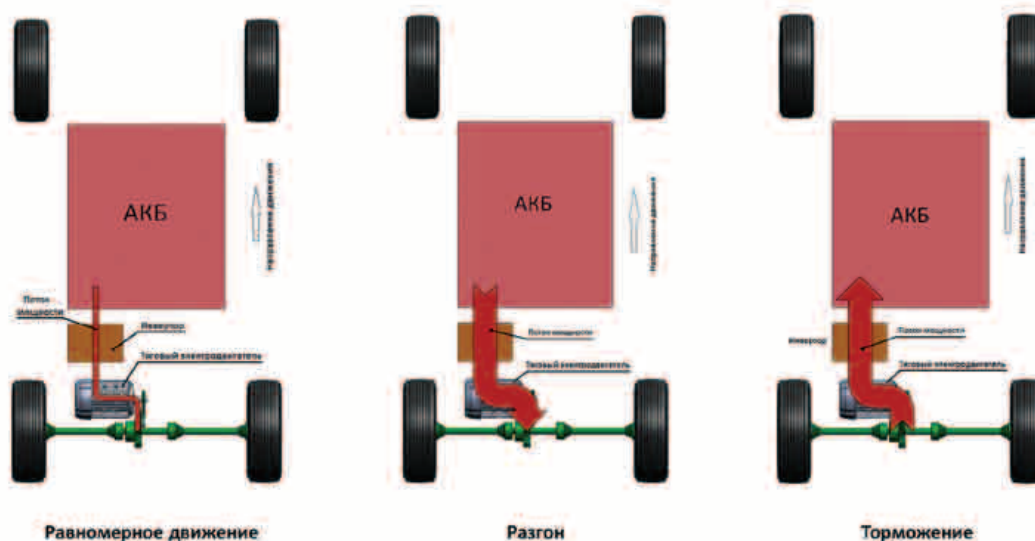
- Трансформация крутящего момента при передаче мощности от маховика на колеса и обратно. За счет многопоточной схемы со сложным делением, через электромашины протекает лишь малая доля от полной передаваемой мощности [9].

- Преобразование электрической мощности батареи в механическую мощность на колесах. Малая установленная мощность электромашин позволяет отбирать от батареи 20..60% мощности по сравнению с мощностью маховичного накопителя. Конкретная величина длительной максимальной мощности выбирается в зависимости от назначения электромобиля и определяется числом диапазонов и другими параметрами супервариатора.



Рисунок 1. Схема электромобиля с комбинированным тяговым приводом с маховичным накопителем энергии

Электромобиль с традиционным приводом



Электромобиль с комбинированным приводом

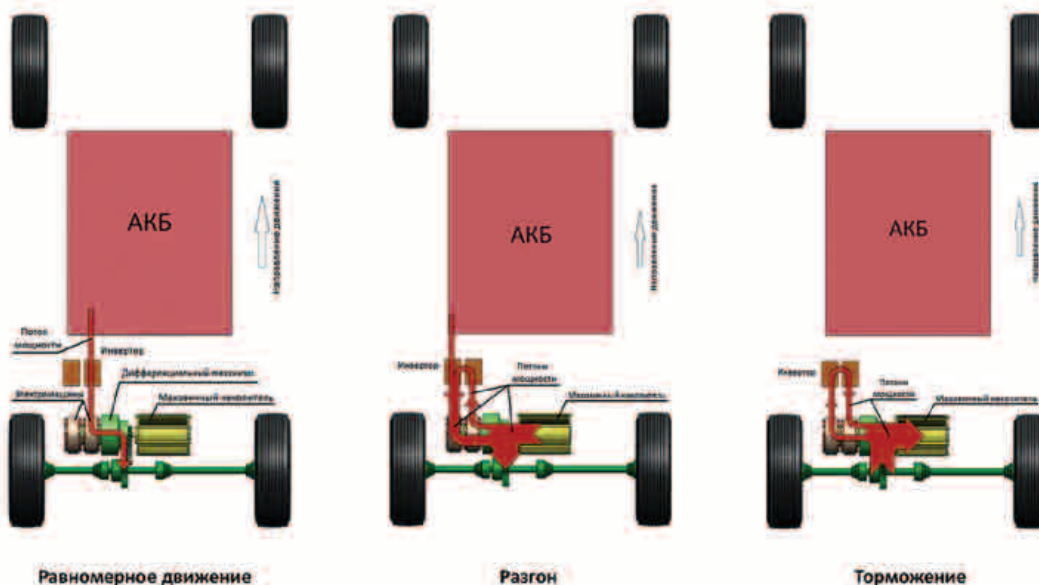


Рисунок 2а.
Потоки мощности
электромобиля с
традиционным при-
водом

Рисунок 2б.
Потоки мощности
электромобиля с
комбинированным
приводом

Потоки мощности электромобилей с традиционным и комбинированным приводом на разных режимах движения показаны на рис. 2а,б.

При равномерном движении электромобилей обоих типов энергия, необходимая для движения, берется из аккумуляторных батарей. Эффективность силовой установки при этом определяется КПД процессов разряда аккумуляторов и КПД тяговых электродвигателей.

При разгоне электромобиля с традиционным приводом энергия так же берется из аккумуляторных батарей, при этом мощность разряда аккумуляторов выше, чем при равномерном движении. Это приводит к снижению КПД батарей, а значит, и всей силовой

установки. При торможении электромобиля тяговым электродвигателем последний работает в режиме генератора, рекуперирова кинетическую энергию движения в аккумулятор. При интенсивном торможении мощность рекуперации может быть значительной, что также приводит к снижению КПД аккумуляторных батарей. В итоге, за один цикл разгона-торможения только небольшая часть энергии, потраченная на ускорение автомобиля, вернется обратно в аккумуляторы (в среднем, 40..60%).

При разгоне электромобиля с комбинированным приводом основным источником энергии становится маховичный накопитель, который подключен к основному приводу через электромеханическую бесступен-

Таблица 1. Исходные данные моделирования

Параметры	Электромобиль с традиционным приводом	Электромобиль с комбинированным приводом
Снаряженная масса автомобиля, кг	1600	1600
Коэффициент инерции	1,12	1,12
Радиус колеса, м	0,285	0,285
Коэффициент трения качения	0,007	0,007
Мощность электрической машины (пиковая), кВт	120	30
Кпд электрической машины (максимальный), %	92	92
Емкость аккумуляторной батареи, кВт·ч	24	24
Пиковая мощность аккумуляторной батареи, кВт	120	120
Емкость маховичного накопителя, Вт·ч	-	300
Средний кпд передачи энергии от маховика на колеса автомобиля, %	-	90
Максимальная частота вращения маховика, об/мин	-	30 000
Момент инерции маховика, кгм ²	-	0,3
Мощность саморазряда маховика на максимальной частоте вращения, Вт	-	265
Масса маховичного накопителя, кг	-	40
Коэффициент аэродинамического сопротивления автомобиля	0,28	0,28
Ширина автомобиля, м	1,77	1,77
Высота автомобиля, м	1,55	1,55
Коэффициент формы	0,83	0,83
Площадь поперечного сечения, м ²	2,28	2,28

чатку передачу (супервариатор). В процессе разгона автомобиля маховик отдает энергию на колеса, и кпд передачи энергии выше, чем у аккумуляторов, причем, он практически не зависит от величины передаваемой мощности. При торможении электромобиля с комбинированным приводом вся мощность рекупе-

рации поступает в маховичный накопитель. Полный кпд рекуперации «на круг» становится выше, а значит, повышается эффективность всей силовой установки, что дает предпосылки к снижению удельного расхода энергии и увеличению запаса хода в интенсивном городском режиме движения.

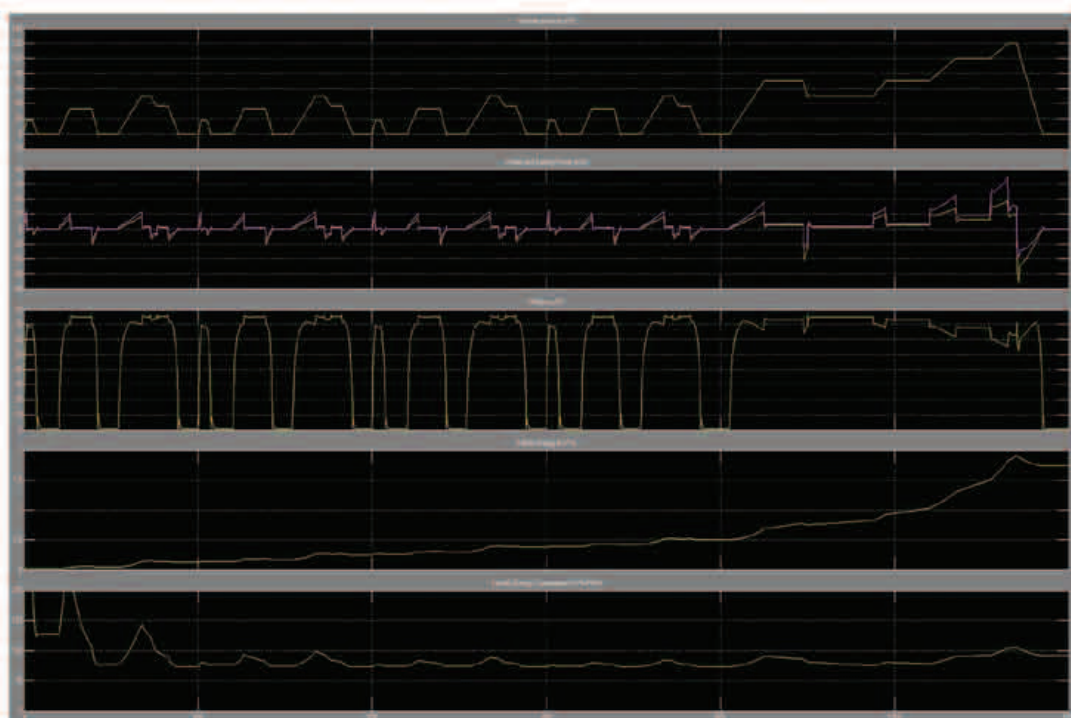


Рисунок 3. Результаты моделирования электромобиля с традиционным приводом (ездовой цикл NEDC)

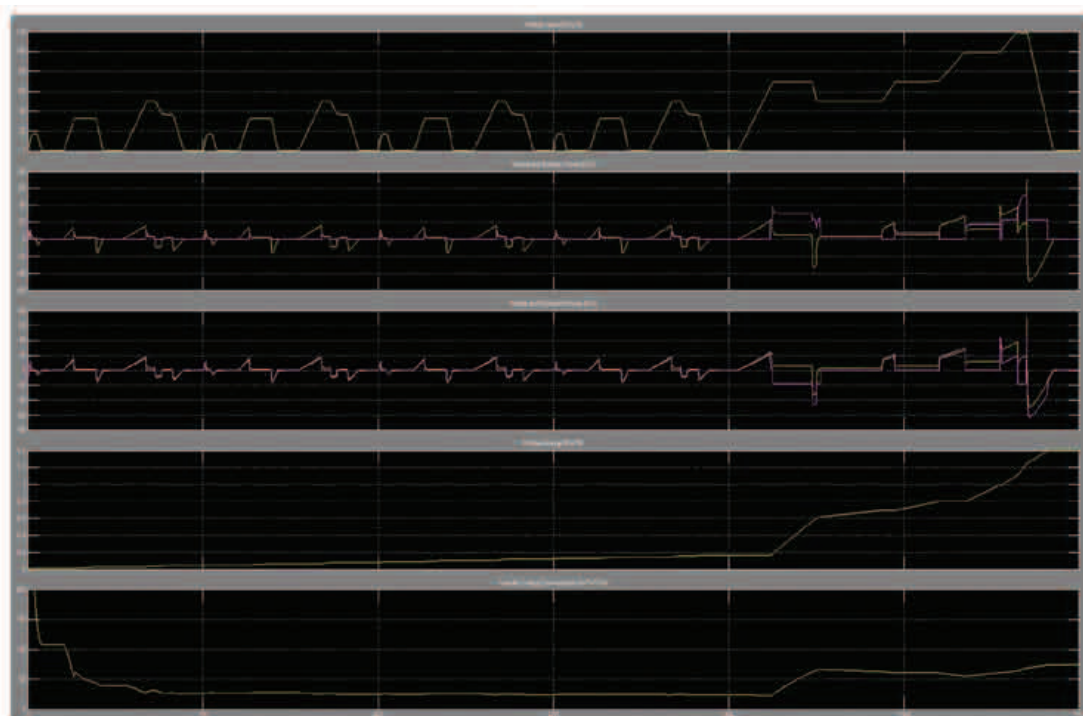


Рисунок 4. Результаты моделирования электромобиля с комбинированным приводом (ездовой цикл NEDC)

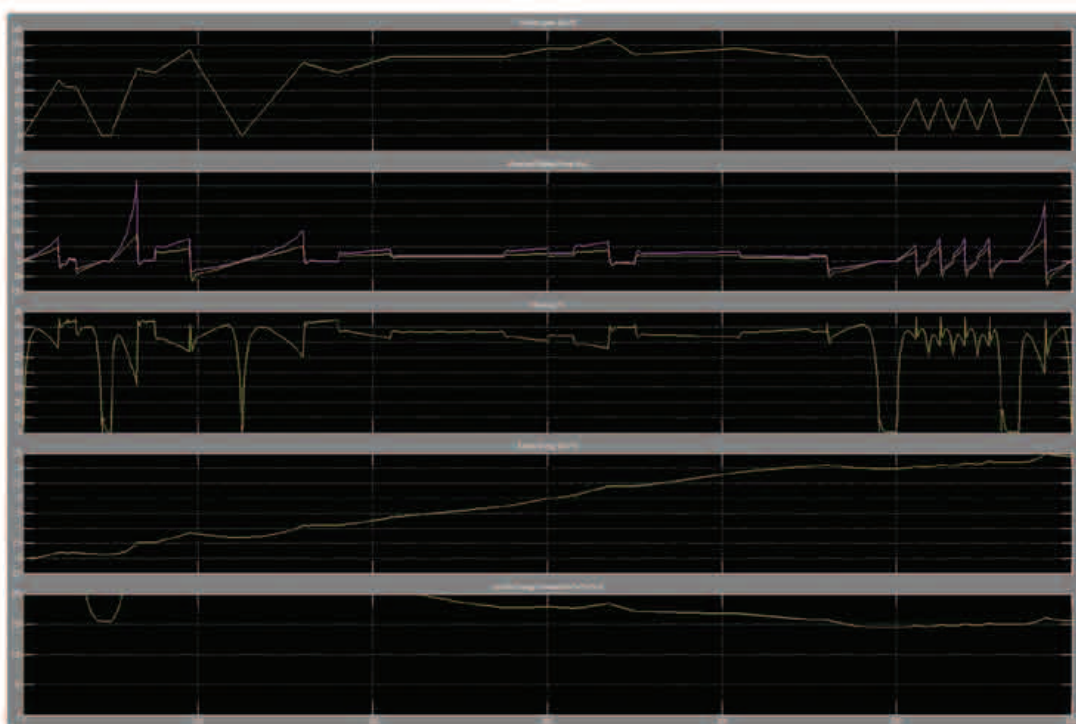


Рисунок 5. Результаты моделирования электромобиля с традиционным приводом (ездовой цикл US06)

Для предварительной оценки характеристик электромобиля с комбинированным приводом было выполнено моделирование его движения и проведен сравнительный анализ результатов моделирования с результатами, полученными для электромобиля традиционной схемы.

В качестве исходных данных для моделирования были выбраны параметры серийного электромобиля Nissan Leaf (табл.1).

Моделирование движения выполнялось при помощи программы Simulink программного комплекса Matlab.

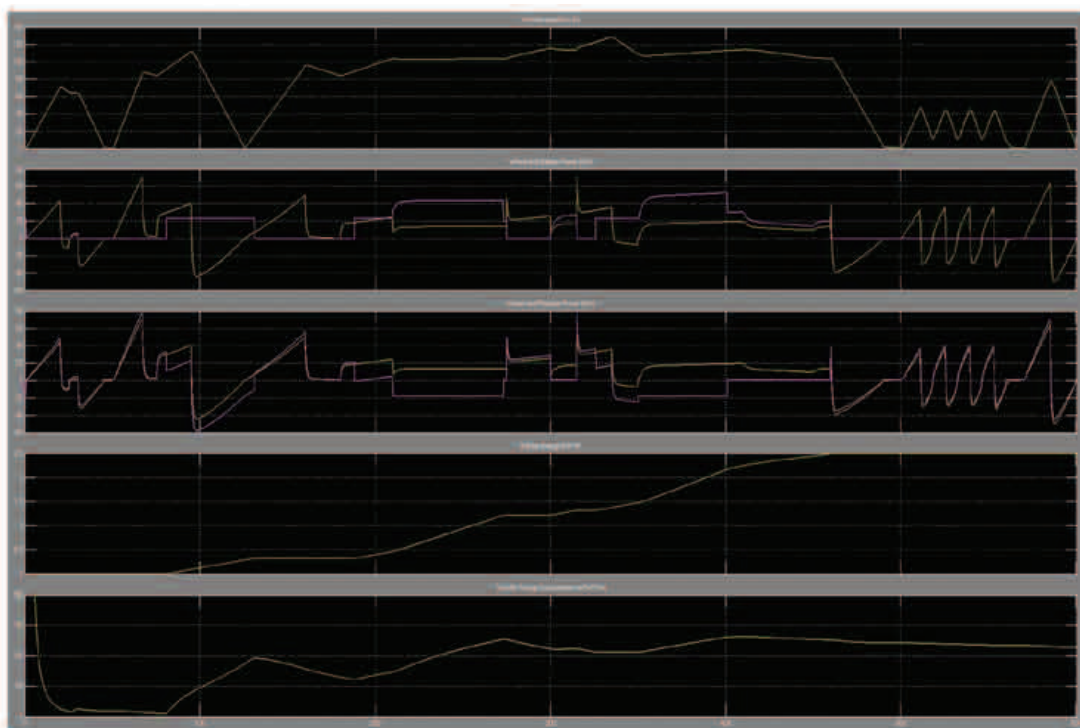


Рисунок 6.

Результаты моделирования электромобиля с комбинированным приводом (ездовой цикл US06)

Для оценки характеристики электромобилей в реальных условиях городского движения проводилось моделирование двух ездовых циклов: смешанного европейского NEDC (New European Driving Cycle) и городского американского US06.

При этом было принято, что комбинированная силовая установка работает следующим образом:

- при равномерном движении электромобиля единственным источником энергии являются аккумуляторные батареи;

- при разгоне электромобиля мощность к колесам подводится только от маховика;

- при торможении электромобиля кинетическая энергия движения рекуперируется в маховичный накопитель, аккумулятор не участвует в процессе рекуперации;

- при снижении запаса энергии маховика до критического уровня 100 Вт·ч происходит его полная зарядка от аккумуляторов с постоянной мощностью 30 кВт для цикла NEDC и 22 кВт для цикла US06.

Таблица 2. Сравнение результатов моделирования для смешанного цикла (NEDC)

Показатель	Электромобиль с традиционным приводом	Электромобиль с комбинированным приводом
Энергия, подведенная к колесам за цикл, Вт·ч	825	825
Разряд аккумуляторных батарей за цикл, Вт·ч	1745	1380
Разряд маховика за цикл, Вт·ч	-	0
Средний КПД «на круг», %	47	60
Пробег до полного разряда АКБ, км	148	188
Удельный расход энергии, (Вт·ч)/(т·км)	92	73
Максимальная мощность заряда/разряда АКБ, кВт	70	50

Таблица 3. Сравнение результатов моделирования для городского цикла (US06)

Показатель	Электромобиль с традиционным приводом	Электромобиль с комбинированным приводом
Энергия, подведенная к колесам за цикл, Вт·ч	1540	1540
Разряд аккумуляторных батарей за цикл, Вт·ч	3400	2500
Разряд маховика за цикл, Вт·ч	-	0
Средний КПД «на круг», %	45	62
Пробег до полного разряда АКБ, км	89	120
Удельный расход энергии, (Вт·ч)/(т·км)	155	110
Максимальная мощность заряда/разряда АКБ, кВт	270	50

Таблица 4. Сравнение результатов моделирования для двух ездовых циклов NEDC и US06

Показатель	NEDC	US06
Увеличение пробега, %	27	35
Снижение расхода энергии АКБ, %	21	26
Снижение пиковой мощности заряда/разряда АКБ, %	29	81

В ходе моделирования оценивались следующие параметры:

1. скорость движения электромобиля, км/ч;
2. пройденный путь, км;
3. уровень заряда аккумуляторных батарей и маховичного накопителя, Вт·ч;
4. мощность разряда/заряда аккумуляторных батарей и маховичного накопителя, кВт;
5. частота вращения маховика, об/мин;
6. расчетный пробег до полного разряда аккумуляторных батарей, км;
7. удельный расход энергии Вт·ч/т·км.

Результаты моделирования показаны на графиках рис. 3–6 и в табл. 2–4.

При этом адекватность модели подтверждается соответствием результатов моделирования движения электромобиля официальными данными по пробегу, а также тестами различных периодических изданий автомобильной тематики. Из данных, приведенных в табл. 2, следует, что пробег электромобиля класса В с аккумуляторной батареей емкостью 24 кВт·ч и маховичным накопителем энергии в ездовом цикле NEDC на 40 км выше, чем у традиционного электромобиля с теми же параметрами и аккумулятором той же емкости. Средний расход энергии на движение при этом снижается на 21%. Максимальные значения мощности разряда и заряда аккумуляторных батарей снизились на 29% и 100% соответственно. Снижение нагруженности батарей способствует увеличению их ресурса и повышению КПД.

Сравнивая результаты моделирования движений гибридного и традиционного электромобилей для двух различных ездовых циклов, можно отметить, что использование комбинированного привода наиболее эффективно в интенсивных городских режимах движения с частыми и резкими разгонами и торможениями, например, в стандартном цикле US06.

В цикле US06 расход энергии аккумуляторов снижается на 26%. Такой результат объясняется тем, что в динамичных режимах движения повышается число циклов разгонов-торможений машины на 1 км пути и средняя мощность, а значит, повышается доля потерь энергии, связанных с рекуперацией. Поскольку у электромобиля с комбинированным приводом осуществляется рекуперация энергии

в маховичный накопитель, с более высоким КПД, то суммарные потери энергии так же снижаются. И, чем выше средняя мощность силовой установки в цикле, тем эффективнее применение комбинированного привода.

Таким образом, применение комбинированной электромеханической силовой установки с маховичным накопителем позволит существенно снизить расход электроэнергии, повысить пробег электромобиля, увеличить долговечность аккумуляторной батареи.

Результаты предварительной оценки параметров электромобиля с комбинированным приводом позволяют сделать вывод о значительных преимуществах предложенной схемы электромобиля в сравнении с традиционной и целесообразности проведения дальнейших работ по исследованию и разработке в рамках деятельности компании «Комбарко».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Подорожанский М. Электрошок // Авторевю. №19, 2011.
2. Голованов А. Электропшик // Авторевю. №3, 2012.
3. Inerton, «Анализ и сравнение характеристик аккумуляторов основных типов», inerton.ucoz.ru, 18.04.2011.
4. Литвинов А.С., Фаробин Я.Е. Автомобиль: теория эксплуатационных свойств: учебник для вузов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство». — М.: Машиностроение. 1989. — 240 с.: ил.
5. Miller John, Propulsion systems for hybrid vehicles, Institution of Electrical Engineers, 2008.
6. Гулиа Н.В., Инерционные аккумуляторы энергии. — Воронеж: Изд-во ВГУ. 1973, стр. 240.
7. Matthew Bishop, Test Drive: Nissan Leaf, The DMonline, February 22, 2012 — 6:22pm
8. Muller Joann. Electric Car Warning: Actual Mileage May Vary, Forbes Staff, 6.11.2010 — 6:23pm.
9. Давыдов В.В. Многодиапазонная бесступенчатая трансмиссия со сложным разделением потока мощности — супервариатор // Машиностроение: новости, статьи, каталог машиностроительных заводов, 22 сентября 2011. www.i-Mash.ru.
10. Джента Дж. Накопление кинетической энергии. Теория и практика современных маховичных систем: пер. с англ. — Изд-во мир, 1988.