

УЛУЧШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ

Большинство транспорта оснащено двигателями внутреннего сгорания, что отрицательно влияет на экологическую обстановку. Альтернативным решением данной проблемы является применение электромобилей (ЭМ). Вследствие этого, возникает актуальность проведения исследований по улучшению эксплуатационных свойств ЭМ. В работе рассмотрено влияние применения коробки передач в трансмиссии ЭМ на его динамическую характеристику.

Ключевые слова: электромобиль, электродвигатель, коробка передач, динамическая характеристика

EDN: DEDEJM

На сегодняшний день автомобиль является наиболее популярным средством перемещения и перевозок. Большая часть применяемого транспорта оснащена двигателем внутреннего сгорания (ДВС), который приводит к загрязнению атмосферы из-за его выбросов, также немало важным фактором служит принятие резолюции об отказе от ДВС к 2035 году странами Евросоюза [1–3]. В связи с этим возникает потребность в транспорте, оказывающем меньшее воздействие на окружающую среду. Вследствие развития носителей электроэнергии, одним из наиболее перспективных решений данного вопроса является переход на электромобили (ЭМ) [4]. Внешне элек-



А.С. Лимарев



И.Ю. Мезин

тромобиль сложно отличить от автомобиля с ДВС, но различие в силовой установке и конструктивном расположении ее частей говорит о различии их эксплуатационных свойств.

Различают две группы свойств автомобиля: первая группа — функциональные свойства, определяющие способность автомобиля эффективно выполнять транспортную работу в заданный эксплуатационных условиях; вторая — свойства надежности, характеризующиеся такими параметрами как безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость и т.д. Функциональные свойства, также называемые эксплуатационными, обеспечивают возмож-

Лимарев Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии, сертификации и сервиса автомобилей Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. Область научных интересов: улучшение эксплуатационных и экономических характеристик легковых автомобилей с различными типами тяговых устройств. Автор 121 научной работы.

Мезин Игорь Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии, сертификации и сервиса автомобилей Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. Область научных интересов: улучшение эксплуатационных и экономических характеристик легковых автомобилей с различными типами тяговых устройств. Автор 87 научных работ.

Воротников Михаил Юрьевич, студент кафедры технологии, сертификации и сервиса автомобилей Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. Область научных интересов: улучшение эксплуатационных и экономических характеристик легковых автомобилей с различными типами тяговых устройств. Автор семи научных работ.

Зотов Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии, сертификации и сервиса автомобилей Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. Область научных интересов: улучшение эксплуатационных и экономических характеристик легковых автомобилей с различными типами тяговых устройств. Автор 61 научной работы.

ность выполнять функции, определяемые назначением автомобиля, а именно тягово-скоростные, тормозные свойства, управляемость, устойчивость, проходимость, плавность хода автомобиля [5]. Оценку эксплуатационных свойств автомобиля производят благодаря соответствующим измерителям и показателям, одним из которых является динамическая характеристика автомобиля.

Динамической характеристикой автомобиля называют зависимость динамического фактора по тяге от скорости на различных передачах, что актуально для автомобиля с ДВС [6]. В свою очередь, в конструкции электромобиля применяют одноступенчатый редуктор, так как электродвигатель способен поддерживать более широкий диапазон оборотов, в основном 3000–10000 об/мин. Это значительно упрощает его конструкцию, что является плюсом для сегмента масс-маркет.

Одним из важных параметров оценки тягово-скоростных свойств является динамичность автомобиля. Особенно важное значение она имеет в аварийных ситуациях, когда реальный тормозной путь до столкновения превышает необходимый и остается возможность только маневрировать с максимальным приростом скорости для быстро выполнения маневра, чтобы избежать дополнительных аварийных ситуаций. Также от этого свойства зависит уверенность водителя при обгоне, проезде перекрестков.

Автомобиль обладает широким диапазоном изменения скоростей. Исходя из технических требований на тягово-скоростные свойства, автомобиль должен обеспечивать заданную максимальную скорость движения V_{\max} при максимальном динамическом факторе D_{\max} . При применении одноступенчатого редуктора в роли трансмиссии, данные требования будут являться противоречивыми и выполнение их становится практически невозможным, так как для получения максимальной скорости передаточное число коробки передач (КП) нужно понижать, а для получения максимального динамического фактора, напротив, повышать, как следствие редуктор будет являться ограничителем [7].

Необходимое значение максимального динамического фактора можно достичь благодаря применению электродвигателя большей мощности, чем необходимо для обеспечения максимальной скорости, но это приведет к уменьшению КПД силовой установки на высоких скоростях и увеличению ее массы. На данный момент существует несколько способов решения данной проблемы, среди которых можно выделить следующие.

1. Увеличение динамического фактора за счет установки двух электродвигателей. Сущность метода

заключается в применении полноприводной установки, где за движение каждой из осей отвечает свой электродвигатель и редуктор, а передаточные числа редукторов будут соответствовать пониженной или повышенной передаче, т.е. моделируя двухступенчатую трансмиссию (рис. 1) [8]. Недостатком данного решения является сильное усложнение конструкции, следствием которого будет являться удорожание производства и эксплуатации, уменьшение надежности и увеличение массы транспортного средства [9].

2. Применение в составе механической части трансмиссии электромобиля многоступенчатой КП. Достоинствами данного решения являются незначительное увеличение массы, снижение расхода электроэнергии, увеличение мощностных показателей, снимаемых с того же электродвигателя. Главным недостатком будет являться усложнение конструкции, как следствие снижение надежности.

На сегодняшний день большинство ведущих мировых компаний в области производства электромобилей занимаются разработками по повышению эффективности силовых установок. В качестве примера рассмотрим опыт различных компаний в данном вопросе. Так, компания «Tesla» в своих электромобилях отказалась от многоступенчатых трансмиссий, используя редуктор с одной передачей, механически постоянно связанной с колесами. Кроме того, производитель дает возможность потребителю установить два элек-

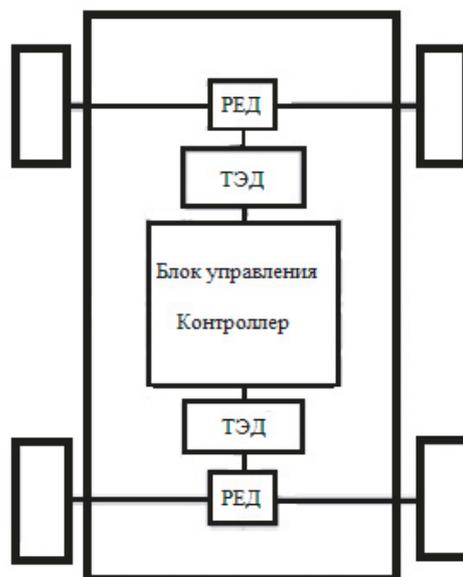


Рис. 1. Схема электромобиля с двумя электродвигателями: ТЭД – тяговой электродвигатель; РЕД – редуктор

тродвигателя, моделируя полный привод, позволяющий заменить двухступенчатую коробку передач. Данный метод описан в первом способе увеличения динамического фактора [10].

Также стоит отметить канадскую компанию «Inpotive», разработавшую и испытавшую цепную двухступенчатую КП для электромобилей. Как утверждает производитель, применение данной КП вместо редуктора увеличит запас хода и динамику электромобиля на 15%, а также сократит стоимость производства трансмиссии.

В компании «Bosch» инженеры считают, что бесступенчатая трансмиссия (вариатор) поможет электромобилям оптимизировать эксплуатационные характеристики и запас хода. Разработанный ими вариатор, по расчетам специалистов, увеличит эффективность силовой установки на 4%. На данный момент производятся его тесты на электромобиле Volkswagen e-Golf [11].

В качестве метода по улучшению динамической характеристики электромобиля на всем диапазоне его работы, применим в конструкции его трансмиссии двухступенчатую КП.

Критерием оценки целесообразности применения КП в электромобиле будет являться его динамическая характеристика, а также ускорение, скорость на разных промежутках времени и пройденный путь. Исходя из вышесказанного, приведем данные для расчета и

оценки показателей электромобиля из сегмента масс-маркет (таблица).

Определим мощность электродвигателя $P_{\text{эд.ном}}$, обеспечивающую максимальную скорость автомобиля по формуле (1) [12]:

$$P_{\text{эд.ном}} = \frac{m_a g f_0 + k_w S_d V_{\text{max}}^2}{h_{\text{эд}} h_{\text{тр}}} V_{\text{max}}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, равное $9,81 \text{ м/с}^2$.

Максимальный момент электродвигателя будет обеспечиваться при минимальных оборотах, т.е. при $0 \leq n_{\text{эд}} \leq n_{\text{эд.мин}}$ [13]. После преодоления минимальных оборотов: $n_{\text{эд.мин}} < n_{\text{эд}} \leq n_{\text{эд.макс}}$, момент электродвигателя будет рассчитываться по формуле (2):

$$M_{\text{эд}} = \frac{30 P_{\text{эд.ном}}}{\pi n_{\text{эд.мин}}}, \quad (2)$$

$M_{\text{эд.макс}} = 286 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Передаточные числа трансмиссии найдем из условий:

- для высшей передачи $u_{\text{тр.в}}$ из условий движения при номинальных оборотах с максимальной скоростью (формула 3);

$$u_{\text{тр.в}} = \frac{\pi n_{\text{эд.ном}} r_k}{30 V_{\text{max}}}. \quad (3)$$

- для низшей передачи $u_{\text{тр.н}}$ из условий преодоления максимального сопротивления движению, вызванного дорогой (формула 4):

Таблица

Исходные данные

Показатель	Электромобиль без КП	Электромобиль с КП
Количество передач	1	2
Мощность P , кВт	80	80
Полная масса m_a , кг	1430	1450
Максимальная скорость V_{max} , км/ч	144	144
Лобовая площадь S_d , м ²	2,7	2,7
Коэффициент сопротивления воздуха k_w , Н · с ² /м ⁴	0,4	0,4
Радиус качения колес r_k , м	0,3	0,3
Коэффициент сопротивления качению при малых скоростях f_0	0,01	0,01
Номинальная частота вращения электродвигателя $n_{\text{эд.ном}}$, об/мин	9800	9800
Минимальная частота вращения электродвигателя $n_{\text{эд.мин}}$, об/мин	3000	3000
КПД двигателя $h_{\text{эд}}$	0,94	0,94
КПД трансмиссии $h_{\text{тр}}$	0,92	0,92

$$u_{\text{тр.н}} = \frac{m_a g \Psi_{\text{макс}} r_k}{M_{\text{эд.макс}} h_{\text{эд}} h_{\text{тр}}}, \quad (4)$$

где $\Psi_{\text{макс}}$ – коэффициент суммарного дорожного сопротивления, равный 0,24 для одиночных автомобилей [14;15]; $M_{\text{эд.макс}}$ – максимальный момент электродвигателя, Н·м.

Передаточные числа КП электромобиля из формул (3) и (4) имеют значения: $u_{\text{тр.в}} = 7,85$; $u_{\text{тр.н}} = 18,98$.

Скорости движения v , км/ч, в зависимости от частоты вращения электродвигателя определяются по формуле (5), а соответствующие им значения силы тяги F – по формуле (6):

$$v = \frac{3,6\pi n_{\text{эд}} r_k}{30u_{\text{тр}}}, \quad (5)$$

$$F_{\text{т}} = \frac{M_{\text{эд}} u_{\text{тр}} h_{\text{эд}} h_{\text{тр}}}{r_k}. \quad (6)$$

Динамическая характеристика и ускорение электромобиля вычисляются по формулам (7) и (8):

$$D = \frac{F_{\text{т}} - k_{\omega} S_{\text{л}} v^2}{m_a g}, \quad (7)$$

$$a = \frac{(D - f_v)g}{\delta_{\text{п.м.в}}}, \quad (8)$$

где $\delta_{\text{п.м.в}}$ – коэффициент приведенной массы на высшей ступени КП, учитывающий влияние вращающихся масс механической трансмиссии на величину кинетической энергии автомобиля [16].

Исходя из формул (1–8), построим графики характеристик электромобиля с двухступенчатой КП.

Динамическая характеристика электромобиля представлена на рис. 2.

График зависимости скорости от ускорения электромобиля на высшей и низшей передаче представлен на рис. 3.

График характеристики разгона электромобиля представлен на рис. 4.

График зависимости перемещения электромобиля от времени представлен на рис. 5.

В качестве передаточного числа редуктора, используемого в электромобиле, выступает передаточное число высшей передачи (формула 3). Исходя из рис. 2, можно заметить прирост динамического фактора на начальном промежутке движения электромобиля за счет применения двухступенчатой КП в роли его трансмиссии; также доказательством целесообразности ее использования выступают положительные изменения графиков зависимости ускорения от скорости, скорости от времени и перемещения транспортного средства до и после модификации.

В целом, полученные теоретические результаты позволяют судить о перспективности использования предложенного подхода, позволяющего повысить эффективность эксплуатационных характеристик электромобилей. Также следует отметить, что данные проведенных теоретических расчетов согласуются с известными практическими исследованиями, поэтому можно говорить о возможности их дальнейшего применения [17].

Стоит выделить преимущества данного решения: благодаря применяемой конструкции трансмиссии, становится возможным выполнение требований на тягово-скоростные свойства, а именно обеспечение

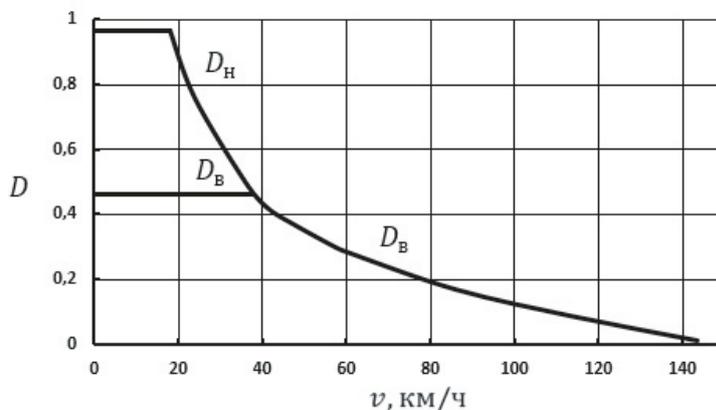


Рис. 2. Динамическая характеристика электромобиля: $D_{\text{н}}$ – динамический фактор на низшей передаче; $D_{\text{в}}$ – динамический фактор на высшей передаче

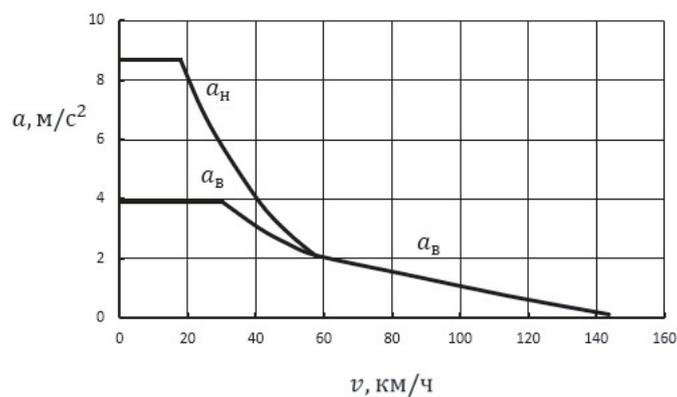


Рис. 3. Характеристика ускорения электромобиля: a_H – ускорение электромобиля на низшей передаче; a_B – ускорение электромобиля на высшей передаче

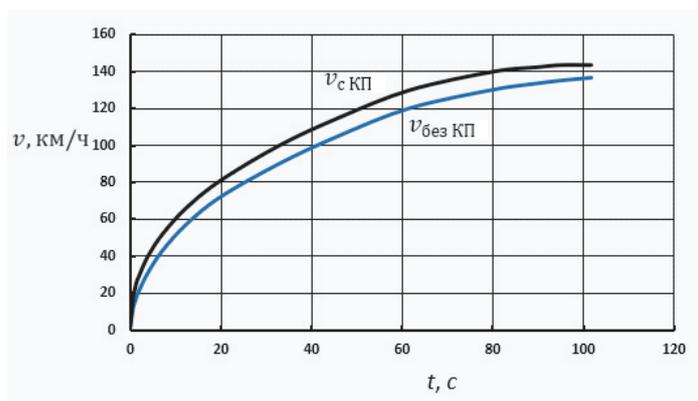


Рис. 4. График зависимости скорости от времени при разгоне электромобиля

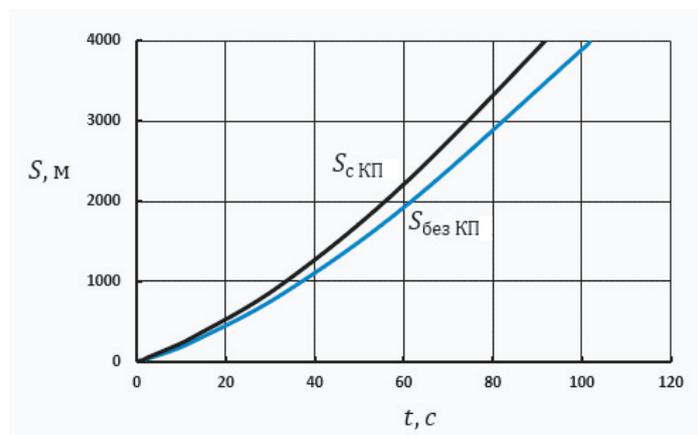


Рис. 5. График зависимости перемещения электромобиля от времени

заданной максимальной скорости и максимального динамического фактора, которые выполнить при применении одноступенчатого редуктора не представлялось возможным; как следствие увеличились мощностные показатели и снизился расход электроэнергии, что позволяет увеличить запас хода электромобиля.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о целесообразности использования многоступенчатой КП в конструкции механической части трансмиссии электромобиля для повышения его динамического фактора.



Литература

1. Европа откажется от ДВС к 2035 году: парламент принял резолюцию: AUTONEWS.RU: [сайт] – URL: <https://www.autonews.ru/news/62a1be499a79476cc42538cc> (дата обращения 10.06.2022). – Текст: электронный.
2. Оценка целесообразности применения электродвигателей на автомобилях в современных условиях / А.С. Лимарев, А.О. Коваленко, Е.А. Очкова, З.С. Акманова. – Текст: непосредственный // Труды НАМИ. – 2015. – №263. – С. 132–139.
3. Анализ возможности снижения экологического воздействия автомобилей на окружающую среду / А.С. Лимарев, Ю.В. Сомова, А.О. Коваленко, Е.А. Очкова, З.С. Акманова. – Текст: непосредственный // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2016. – Т.6, №1. – С. 47–50.
4. Лимарев, А.С. Обзор возможности применения электромобилей / А.С. Лимарев, И.Ю. Мезин, М.Ю. Воротников. – Текст: непосредственный // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2021. – Т.12., №1. – С. 87–90.
5. Скутнев, В.М. Эксплуатационные свойства автомобиля: учебное пособие / В.М. Скутнев. – Тольятти: ТГУ, 2011. – 140 с. – Текст: непосредственный.
6. Ветрогон, А.А. Повышение динамических характеристик двигателя внутреннего сгорания / А.А. Ветрогон, Л.И. Соустова, А.С. Романов. – Текст: непосредственный // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2016. – Т.4, № 5–4 (25–4). – С. 216–221.
7. Тарасик, В.П. Теория движения автомобиля: учеб. для студентов, обучающихся по специальности 190201(150100) – Автомобиле- и тракторостроение / В.П. Тарасик. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2006. – 478 с. ISBN 5-94157-967-5. – Текст: непосредственный.
8. Хазин, М.Л. Карьерный электрифицированный транспорт / М.Л. Хазин, С.О. Штыков. – Текст: непосредственный // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. – Т. 16, №1. – С. 11–18.
9. Воротников, М.Ю. Сравнение эксплуатационных расходов электромобиля и автомобиля с двигателем внутреннего сгорания / М.Ю. Воротников, А.С. Лимарев, И.Ю. Мезин. – Текст: непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. – 2021. – №10. – С. 50–53.
10. Ларин, В. Tesla-электромобиль / В. Ларин. – Текст: непосредственный // Энергия: экономика, техника, экология. – 2016. – №1. – С. 69–72.
11. В Bosch создали вариатор, увеличивающий запас хода электромобилей. – Auto.ru: [сайт]. – URL: <https://mag.auto.ru/article/v-bosch-privodimali-variator-uvlechivayushchiy-zapas-hoda-elektromobiley/> (дата обращения 20.07.2022). – Текст: электронный.
12. Тарасик, В.П. Методика определения основных параметров и характеристик электромобиля / В.П. Тарасик, О.В. Пузанова. – Текст: непосредственный // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2020. – №4(69). – С. 50–60.
13. Применение коробок передач в силовых приводах электротранспорта / С. Н. Поддубко, Н.Н. Ишин, А.М. Гоман, А.С. Скороходов, П.Э. Шабанов. – Текст: непосредственный // Механика машин, механизмов и материалов. – 2020. – №3 (52). – С. 5–11.
14. ГОСТ Р 52280-2004. Автомобили грузовые. Общие технические требования = Trucks. General technical requirements: национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2004 г. №107-ст: введен впервые: дата введения 07.01.2005 / разработан государственным научным центром Российской Федерации, Федеральным государственным унитарным предприятием «Центральный

ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт» (ФГУП «НАМИ»). – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2005. – 15 с. – Текст: непосредственный.

15. Слутин, А.Ф. Моделирование режимов движения и сравнения оценки топливно-энергетической эффективности гибридного электробуса / А.Ф. Слутин, Л.Г. Ручкина, В.А. Бугреев. – Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2021. – №1. – С. 51–56.

16. Селифонов, В.В. Теория автомобиля: курс лекций: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автомобиле- и тракторостроение / В.В. Селифонов; Федеральное агентство по образованию, Московский гос. технический ун-т «МАМИ». – Москва: Гринлайт, 2009. – 206 с. – ISBN 978-5-903688-06-7. – Текст: непосредственный.

17. Результат исследования электромобиля на шасси «Газель» / А.Н. Блохин, А.М. Грошев, Т.А. Козлова, А.Д. Яржемский, М.С. Серопян. – Текст: непосредственный // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. – №12. – С. 8.