

МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСМИССИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

К.Т.Н. Падалкин Б.В., К.Т.Н. Иваненков В.В., К.Т.Н. Косицын Б.Б.,

К.Т.Н. Стадучин А.А., Балковский К.С.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

padalkin@bmstu.ru, ant.m9@yandex.ru, kositsyn_b@bmstu.ru

С развитием тягового электропривода, а также бортовых накопителей электрической энергии, перспективными оказываются машины, оснащенные электромеханической трансмиссией. Однако на этапе проектирования подобных транспортных средств возникают затруднения, связанные с оценкой энергоэффективности разрабатываемых автомобилей, в частности, с оценкой коэффициента полезного действия тяговых электромашин. В данной работе авторами предлагается метод оценки коэффициента полезного действия тяговых электродвигателей вновь разрабатываемых электромеханических трансмиссий транспортных машин, основанный на построении эмпирической зависимости, аппроксимирующей статистические данные о характеристиках существующих электродвигателей. Для аппроксимации использовались данные по электродвигателям ряда производителей, используемых в составе трансмиссий транспортных средств. В статье рассматривается применение разработанного метода для разработки алгоритма управления трансмиссией колесной машины, направленного на повышение ее энергоэффективности. Работоспособность алгоритма подтверждена при помощи имитационного моделирования динамики рассматриваемого транспортного средства, исходные данные для моделирования были получены в ходе тягово-динамического расчета. Разработанная имитационная модель совместно с методом оценки коэффициента полезного действия электродвигателя позволила провести сравнительную оценку разработанного алгоритма управления переключением передач и подхода к переключению передач, не учитывающего зависимость величины потерь энергии электромашин от режима работы в случаях движения по городскому и смешанному ездовым циклам. В качестве критериев оценки эффективности применения разработанного закона управления электромеханической трансмиссией использовались величина затрат энергии при движении по заданному циклу и количество переключений передач на маршруте. Полученные результаты подтверждают эффективность использования разработанного алгоритма в условиях движения транспортных средств в городской среде.

Ключевые слова: колесная машина, система управления движением, алгоритм управления трансмиссией, тяговой электродвигатель, энергоэффективность, коэффициент полезного действия, электромеханическая трансмиссия.

Введение

При проектировании современных транспортных средств (ТС) большое внимание уделяется повышению их энергоэффективности [1–6]. В связи с этим перспективным является применение электромеханических трансмиссий, а также развитие специальных алгоритмов управления системами и узлами транспортных средств, направленных на снижение потерь энергии при движении. Отсутствие полной информации о характеристиках тягового электродвигателя является одной из проблем при оценке энергоэффективности транспортного средства на этапе проектирования.

Проведение тягового расчета исходя из максимальной скорости движения ТС и максимального преодолеваемого сопротивления позволяет построить потребную механическую характеристику электромашин. Однако коэффициент полезного действия (КПД) в различных точках характеристики остается неизвестным, что не позволяет проводить анализ энергоэффективности ТС при работе на различных режимах.

В настоящей статье описывается метод, позволяющий в первом приближении определить зависимость КПД от реализуемого электродвигателем момента при различных угловых

скоростях вала ротора. Получаемая характеристика позволяет провести оценку энергоэффективности машины и синтезировать алгоритм переключения передач, направленный на снижение затрат энергии на движение в заданных условиях.

Метод синтеза характеристики тягового электродвигателя

В основе метода лежит предположение о том, что электродвигатели одного типа обладают качественно схожими зависимостями КПД от реализуемого крутящего момента и частоты вращения вала ротора. Для оценки мощности потерь предполагаемого электродвигателя была сформирована выборка внешних характеристик электромашин различных производителей, включающая в себя информацию о величине КПД на различных режимах работы.

С использованием данных о коэффициенте полезного действия, для каждого двигателя из выборки рассчитывалась мощность потерь в каждой точке характеристики по следующей формуле:

$$P = \frac{N(1-\eta)}{\eta} = \frac{\omega \cdot M(1-\eta)}{\eta}, \quad (1)$$

где P – мощность потерь; ω – частота вращения вала электродвигателя; M – крутящий момент.

Для обеспечения возможности анализа электродвигателей с различными механическими характеристиками было проведено нормирование мощности потерь, частоты вращения вала электродвигателя и крутящего момента. Среди ряда величин нормированию подверглась именно мощность потерь, так как характеристика КПД имеет разрывы в области малых частот вращения и крутящих моментов, в следствие чего неудобна в использовании. В настоящей работе в качестве нормирующих выбраны значения величин, соответствующие точке характеристики с наибольшим значением КПД.

В основу аппроксимирующей функции легла зависимость, приведенная в работе [7], описывающая потери при работе электродвигателя. В соответствии с этой формулой, суммарные потери в электромашине складываются из постоянной и переменной составляющих.

Переменная составляющая потерь включает в себя механические потери (пропорциональны

квадрату частоты вращения вала двигателя) и электромагнитные потери (пропорциональны квадрату силы тока в обмотках). При этом величина тока в обмотках электродвигателя считается пропорциональной развиваемому крутящему моменту.

Помимо перечисленных потерь, в аппроксимирующую функцию включены потери мощности преобразователя (инвертора), обеспечивающего управление электромашинной. Таким образом, итоговая полуэмпирическая формула, описывающая потери мощности при работе электромашин, получена в следующем виде:

$$P_{\text{отн}} = a \cdot \omega_{\text{отн}}^2 + b \cdot M_{\text{отн}}^2 + c \cdot \omega_{\text{отн}} \cdot M_{\text{отн}} + d, \quad (2)$$

где $P_{\text{отн}}$ – относительная мощность потерь (мощность потерь, отнесенная к нормирующему значению (мощности потерь в точке максимального КПД)); $\omega_{\text{отн}}$ – относительная частота вращения (частота вращения, отнесенная к нормирующему значению (частоте вращения ротора при максимальном КПД)); $M_{\text{отн}}$ – относительный момент (крутящий момент, отнесенный к нормирующему значению (крутящему моменту в точке максимального КПД)); a , b , c и d – коэффициенты для каждой составляющей потерь.

В общем случае характеристики потерь мощности ТЭД могут быть описаны различным количеством точек, в связи с этим при получении аппроксимирующей поверхности необходимо использовать весовые коэффициенты. Весовой коэффициент для каждого электродвигателя, представленного в выборке, рассчитывался как величина, обратно пропорциональная количеству точек, полученных при описании характеристики конкретного двигателя. Аппроксимация проводилась с помощью инструмента *Curve Fitting* программного комплекса *MATLAB* [8].

Для получения состоятельной оценки обработанных данных было исключено 5 % точек с наибольшими отклонениями относительной мощности потерь от среднего значения. На рис. 1 показаны величины отклонения точек характеристики относительной мощности потерь от аппроксимирующей поверхности и исключенные данные.

Для выборки, составленной на основе характеристик электродвигателей фирм *Danfoss* [9], *BorgWarner* [10], *DANA TM4* [11], *YASA* [12], *Brusa* [13] и *GNK Driveline* [14] были получены следующие значения коэффициентов функцио-

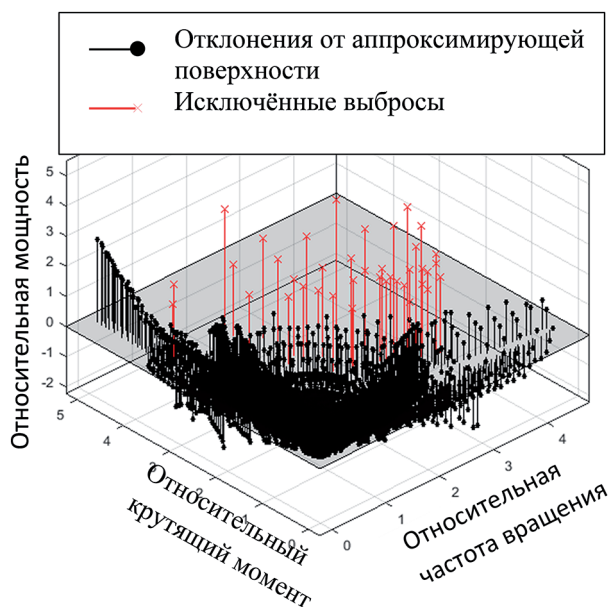


Рис. 1. Величины отклонения точек характеристики от аппроксимирующей поверхности

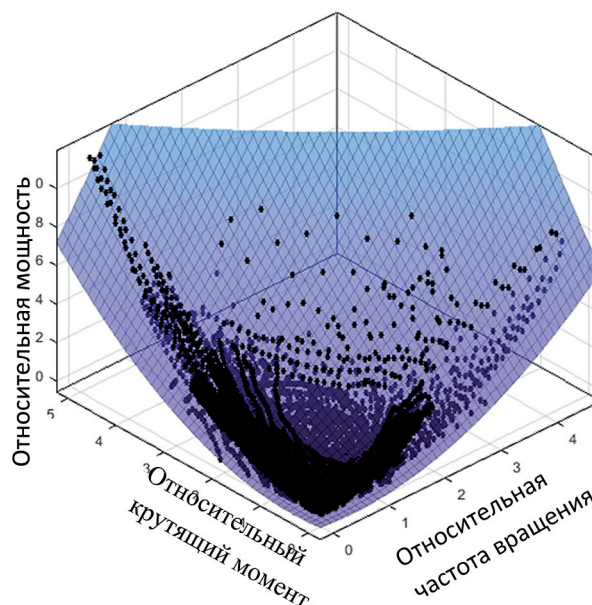


Рис. 2. Облако точек нормированных характеристик двигателей и вид аппроксимирующей поверхности

нальной зависимости (2): $a = 0,3114$; $b = 0,3249$; $c = 0,5556$ и $d = 0,1162$.

Полученная поверхность (рис. 2) позволяет определять величину мощности потерь и соответственно значение коэффициента полезного действия для электродвигателей, схожих по конструкции с рассмотренными (использовались характеристики синхронных машин с постоянными магнитами, наиболее часто применяемые в тяговом электроприводе современных наземных транспортных средств).

Полученная формула позволяет оценить нормированные потери для любого крутящего момента M и частоты ω вращения вала электродвигателя. Формулу (2) можно преобразовать к следующему виду:

$$\frac{\Pi}{\Pi_{\text{нор}}} = a \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{нор}}} \right)^2 + b \cdot \left(\frac{M}{M_{\text{нор}}} \right)^2 + c \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{нор}}} \cdot \frac{M}{M_{\text{нор}}} \right) + d, \quad (3)$$

где $\Pi_{\text{нор}}$ – нормирующее значение мощности потерь (в точке максимального КПД); $\omega_{\text{нор}}$ – нормирующее значение частоты вращения;

$M_{\text{нор}}$ – нормирующее значение крутящего момента.

Таким образом, мощность потерь электродвигателя в рассматриваемом режиме работы можно оценить следующей зависимостью (3):

$$\Pi = \frac{\omega_{\text{нор}} M_{\text{нор}} (1 - \eta_{\text{max}})}{\eta_{\text{max}}} \left(a \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{нор}}} \right)^2 + b \left(\frac{M}{M_{\text{нор}}} \right)^2 + c \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{нор}}} \cdot \frac{M}{M_{\text{нор}}} \right) + d \right), \quad (4)$$

где η_{max} – максимальная величина коэффициента полезного действия.

На основе полученных данных о мощности потерь определяется коэффициент полезного действия двигателя для произвольных значений частоты вращения и крутящего момента:

$$\eta = \frac{N_{\text{мех}}}{N_{\text{мех}} + \Pi}, \quad (5)$$

где η – коэффициент полезного действия в произвольной точке характеристики двигателя; $N_{\text{мех}}$ – механическая мощность электродвигателя в произвольной точке характеристики.

Подставляя мощность потерь Π из уравнения (4), получим:

$$\eta = \frac{1}{\left(1 + \frac{\omega_{\text{нор}} M_{\text{нор}} (1 - \eta_{\text{max}})}{\eta_{\text{max}} \omega M} \left(a \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{нор}}} \right)^2 + b \left(\frac{M}{M_{\text{нор}}} \right)^2 + c \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{нор}}} \cdot \frac{M}{M_{\text{нор}}} \right) + d \right) \right)}. \quad (6)$$

Указанная зависимость оценивает значение коэффициента полезного действия в любой точке характеристики электродвигателя при известных нормирующих значениях частоты вращения вала ротора, крутящего момента и максимального коэффициента полезного действия.

Для оценки нормирующих значений крутящего момента и частоты вращения вала электромашин удобно использовать следующие усредненные коэффициенты:

$$M_{\text{нор}} = k_{M_{\text{нор}}} \cdot M_{\text{max}}; \omega_{\text{нор}} = k_{\omega_{\text{нор}}} \cdot \omega_{\text{max}}, \quad (7)$$

где $k_{M_{\text{нор}}}$ – усредненный коэффициент нормирующего значения крутящего момента; $k_{\omega_{\text{нор}}}$ – усредненный коэффициент нормирующего значения частоты вращения.

Обработка массива данных с помощью формул (8) и (9) позволяет определить усредненные коэффициенты нормирующего момента и нормирующей частоты вращения, необходимые для практического применения предложенного метода.

$$k_{M_{\text{нор}}} = \frac{\sum_{i=1}^{Num} \frac{M_{\text{нор}_i}}{M_{\text{max}_i}}}{Num}, \quad (8)$$

где $M_{\text{нор}_i}$ – нормирующее значение крутящего момента i -го двигателя (при максимальном значении КПД электромашин); M_{max_i} – максимальный крутящий момент i -го двигателя; Num – количество электродвигателей в выборке.

$$k_{\omega_{\text{нор}}} = \frac{\sum_{i=1}^{Num} \frac{\omega_{\text{нор}_i}}{\omega_{\text{max}_i}}}{Num}, \quad (9)$$

где $\omega_{\text{нор}_i}$ – нормирующее значение частоты вращения i -го двигателя (при максимальном значении КПД электромашин); ω_{max_i} – максимальная частота вращения i -го двигателя.

На основе характеристик электродвигателей из указанной выше выборки по представленным формулам были рассчитаны следующие значения усредненных коэффициентов нормирующих значений крутящего момента и частоты вращения: $k_{M_{\text{нор}}} = 0,3601$; $k_{\omega_{\text{нор}}} = 0,4683$.

Эффективность электромашин ограничена современным уровнем технического прогресса, в связи с чем максимальный КПД разрабатываемого электродвигателя можно принять равным среднему значению по выборке:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^{Num} \eta_i}{Num}, \quad (10)$$

где η_i – максимальный коэффициент полезного действия i -ой электромашин в выборке.

Таким образом, рассчитанное по формуле (9) максимальное значение КПД электромашин рассматриваемого типа составляет 0,949.

Полученная формула (6) с использованием формулы (7) и рассчитанных по формулам (8) и (9) усредненных нормирующих коэффициентов позволяет оценить коэффициент полезного действия электромашин рассматриваемого типа на этапе проектирования транспортного средства при отсутствии экспериментальных данных, что позволяет провести оценку энергоэффективности разрабатываемой транспортной машины.

Разработка алгоритма переключения передач

Представленный выше метод был использован для оценки энергоэффективности транспортной машины и разработки алгоритма управления переключением передач. В качестве прототипа для проведения численных экспериментов был выбран легковой автомобиль, технические характеристики которого представлены в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики прототипа

| Название параметра | Значение параметра |
|--|----------------------------------|
| Полная масса, кг | 1653 |
| Радиус колеса, м | 0,32 |
| Коэффициент обтекаемости | 0,3 |
| Площадь лобовой проекции, м ² | 2 |
| Максимальная скорость движения, км/ч | 180 |
| Максимальный динамический фактор | 0,45 |
| Передаточные числа коробки передач (КП) | 3,636; 1,95; 1,357; 0,941; 0,784 |
| Передаточное число ГП | 3,938 |
| КПД механической части трансмиссии | 0,96 |

Преимущества применения в электромеханической трансмиссии транспортных машин многоступенчатых коробок передач исследованы в работе [15]. Так, использование в конструкции автомобиля трансмиссии с несколькими диапазонами позволяет уменьшить массу и габариты тяговой электромашин [16].

С использованием технических характеристик прототипа был проведен синтез потребной механической характеристики электродвигателя исходя из требуемой максимальной скорости и необходимой максимальной удельной силы тяги по следующим формулам (для примера примем $V_{\max} = 180$ км/ч и $P_{\text{уд max}} = 0,45$):

$$\omega_{\max} = \frac{V_{\max} \cdot i_{\text{тр min}}}{r_k}; \quad (11)$$

$$M_{\max} = \frac{P_{\text{уд max}} \cdot mg \cdot r_{k_0}}{\eta_{\text{тр}} \cdot i_{\text{тр max}}}, \quad (12)$$

$$N_{\max} = \omega_{\max} \cdot M(\omega_{\max}), \quad (13)$$

где $i_{\text{тр min}}$ – минимальное передаточное число трансмиссии; $i_{\text{тр max}}$ – максимальное передаточное число трансмиссии; $\eta_{\text{тр}}$ – КПД трансмиссии; r_{k_0} – радиус качения колеса в свободном режиме.

По результатам тягового расчета получено, что максимальная частота вращения вала двигателя и максимальный потребный момент составляют 485 рад/с и 160 Н·м соответственно.

Таким образом, нормирующая точка характеристики электродвигателя, в которой предполагается реализация максимального КПД, описывается следующими величинами: $M_{\text{нор}} = 57,6$ Н·м; $\omega_{\text{нор}} = 2070$ об/мин; $\eta = 0,949$, рассчитанными по формулам (8), (9) и (10) соответственно. Полученная согласно представленной выше методике характеристика электродвигателя показана на рис. 3.

На рис. 4 представлена тягово-скоростная характеристика исследуемого автомобиля, а также наложенная на нее зависимость КПД электродвигателя от реализуемого крутящего момента и частоты вращения вала ротора в рассматриваемом режиме движения. Данная характеристика позволяет выбрать оптимальный диапазон в коробке передач для эксплуатации колесной машины с точки зрения минимизации потерь энергии в электромеханической

трансмиссии при выбранном режиме движения (сочетании скорости движения и удельной силы тяги).

То есть, рис. 4 показывает, на какой передаче выгоднее всего двигаться с точки зрения минимизации потерь энергии в электродвигателе при различных сочетаниях скорости движения и удельной силы тяги.

На основе данных, представленных выше, был разработан алгоритм управления переключением передач. Суть его работы состоит в выборе такой передачи, при движении на которой мощность потерь энергии в электромеханической трансмиссии минимальна. Данный алгоритм противопоставлялся алгоритму, обеспечивающему максимальную динамичность

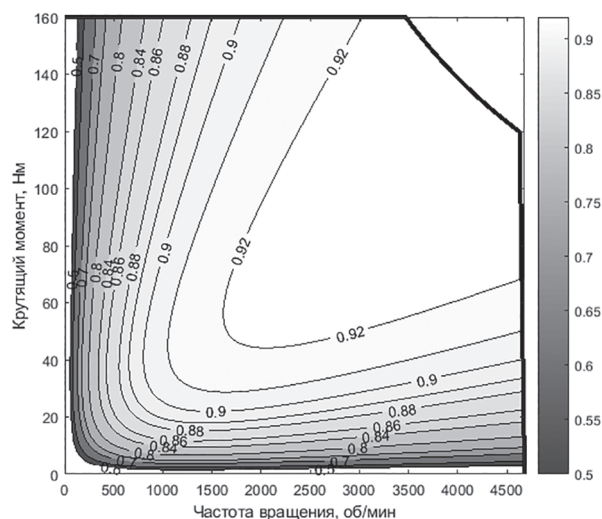


Рис. 3. Поверхность КПД синтезированного электродвигателя

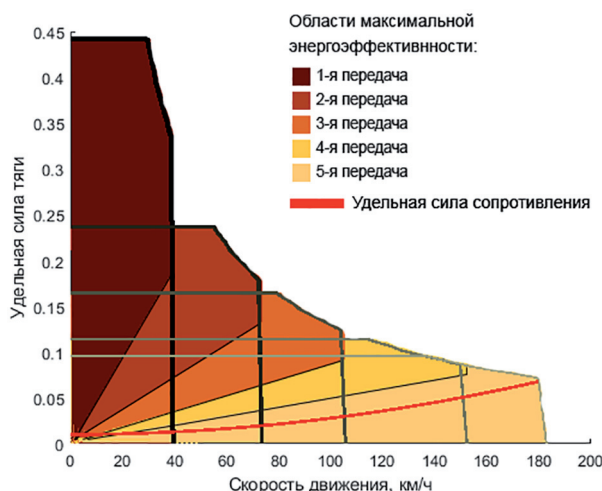


Рис. 4. Тягово-динамическая характеристика и области наиболее энергоэффективного использования передач

движения, названному в рамках данной работы «базовым». При описании базового алгоритма переключение передач предполагалось исходя из условия обеспечения максимального ускорения машины, без учета зависимости величины потерь энергии электродвигателем от режима нагружения (рис. 5).

С целью определения эффективности разработанного алгоритма была разработана математическая модель автомобиля, позволяющая проводить имитацию движения по заданному ездовому циклу. В рамках работы использовались: смешанный ездовой цикл WLTP, разработанный и утвержденный Европейской экономической комиссией ООН в 2015 году [17], и городской ездовой цикл FTP-75, разработанный и утвержденный Агентством по охране окружающей среды США в 1978 году, обновленный в 2008 году [18].

При создании модели были приняты следующие допущения:

1) скольжение в пятне контакта пренебрежимо мало;

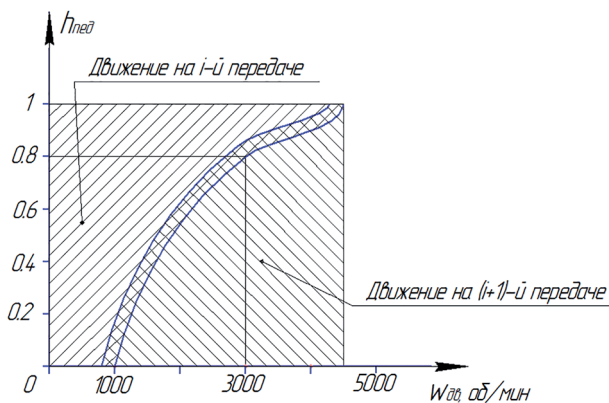


Рис. 5. Принцип работы «Базового» алгоритма переключения передач

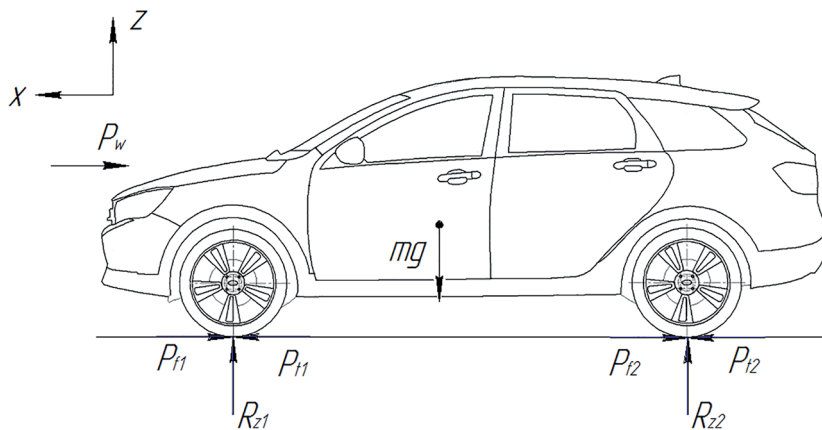


Рис. 6. Расчетная схема движения

2) контакт колес с опорной поверхностью является точечным;

3) связь колес с опорной поверхностью удерживающая;

4) перераспределение нормальных реакций отсутствует;

5) влияние системы поддрессоривания не учитывается.

В рамках разработанной модели динамика транспортного средства рассматривается как поступательное движение твердого тела по гладкой твердой опорной поверхности (рис. 6).

В соответствии с представленной расчетной схемой (рис. 6) уравнение движения центра масс машины выглядит следующим образом:

$$a_x = \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^n (P_{ti} - P_{fi}) - P_w \right) = \frac{P_{tM} - P_{fM} - P_w}{m}, \quad (14)$$

где a_x – проекция ускорения центра масс колесной машины (КМ) на ось x ; m – масса КМ; P_{ti} – тяговое усилие i -ого колеса, $P_{ti} = M_{ki}/r_{k0}$, где M_{ki} – крутящий момент i -ого колеса; P_{fi} – сила сопротивления качению i -ого колеса, $P_{fi} = M_{fi}/r_{k0}$, где M_{fi} – момент сопротивления качению i -ого колеса; P_w – проекция вектора силы сопротивления воздуха на ось x ; P_{tM} – суммарное тяговое усилие; P_{fM} – суммарная сила сопротивления качению; n – число колес КМ.

Потребное тяговое усилие при движении по ездовому циклу определяется по формуле на основе ускорения центра масс, рассчитанного исходя из изменения заданной скорости движения в соответствии с ездовым циклом:

$$P_{tM} = a_x \cdot m + P_{fM} + P_w = \frac{\Delta V}{\Delta t} \cdot m + P_{fM} + P_w, \quad (15)$$

где ΔV – приращение скорости автомобиля за время Δt ; Δt – шаг по времени.

Потребное тяговое усилие связано с крутящим моментом тягового электродвигателя следующим образом:

$$M = \frac{P_{tM} \cdot r_k}{\eta_{тр} \cdot i_{тp_i}}, \quad (16)$$

где $i_{тp_i}$ – передаточное число i -ой передачи в коробке передач.

Частота вращения вала электродвигателя в зависимости от скорости движения описывается формулой:

$$\omega = \frac{V \cdot i_{тp_i}}{r_k}. \quad (17)$$

С целью определения эффективности разработанного алгоритма было проведено сравнение суммарных потерь энергии при движении автомобиля с различными алгоритмами пере-

ключения передач в КП по ездовым циклам WLTP [17] и FTP-75 [18] (рис. 7). Потери в электроприводе определялись согласно формулам (4), (15), (16) и (17). Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 8.

Здесь и далее под общими потерями понимается сумма механических потерь в трансмиссии и электрических потерь электродвигателя на преобразование энергии.

В таблице 2 приведены результаты моделирования движения по ездовым циклам машин с использованием базового и разработанного алгоритмов.

По полученным результатам снижение потерь энергии при сравнении двух алгоритмов можно оценить по следующей формуле:

$$N_{i_{отн}} = \frac{N_{i_{ст}} - N_{i_{раз}}}{N_{i_{ст}}}. \quad (18)$$

Таблица 2

Результаты моделирования движения по ездовым циклам

| Цикл WLTP | | |
|----------------------------|--------------------|------------------------|
| | «Базовый» алгоритм | Разработанный алгоритм |
| Число переключений передач | 60 | 257 |
| Общие потери, МДж | 1,925 | 1,793 |
| Цикл FTP-75 | | |
| | «Базовый» алгоритм | Разработанный алгоритм |
| Число переключений передач | 68 | 267 |
| Общие потери, МДж | 1,468 | 1,239 |

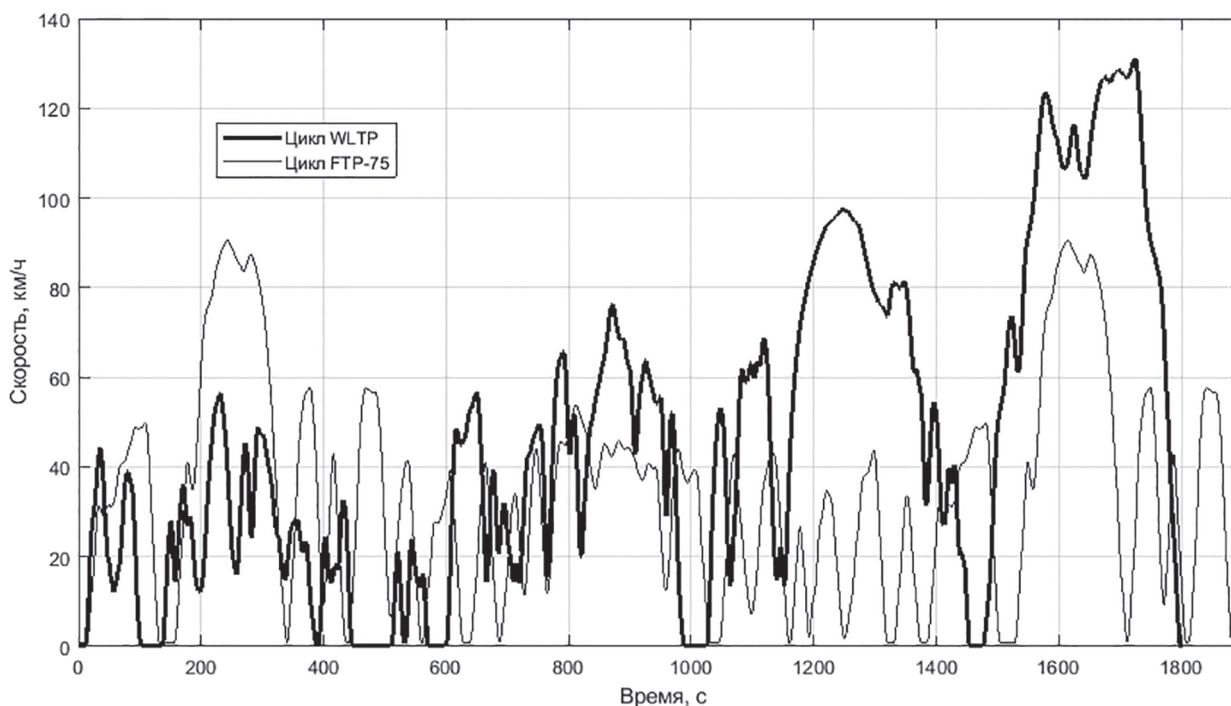


Рис. 7. Ездовые циклы

Так, получено, что при использовании разработанного алгоритма переключения передач в КП в случае реализации заданного скоростного режима движения согласно ездовым циклам *WLTP* и *FTP-75* потери энергии (рис. 8) сократились на 6,86 % и 15,6 % соответственно. Это вызвано в первую очередь тем, что цикл *FTP-75*, в отличие от *WLTP*, описывает движение транспортного средства в городской среде, которое характеризуется частыми остановками и разгонами, а также высокой частотой смены передач в КП по сравнению с движением по загородной трассе, что позволяет за счет выбора рациональной передачи в коробке передач обеспечить возможность работы электромашины в зоне высокого КПД.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что потери энергии на движение транспортного средства, использующего разработанный алгоритм, ниже, однако вызывает необходимость более частого переключения передач (таблица 2).

В данной работе не рассматривались вопросы рекуперации энергии при торможении машины, что является дальнейшим направлением исследований.

Результаты и обсуждения проведенной работы

В результате обработки массива данных, полученных из открытых источников для электромашин различных производителей была получена функциональная зависимость, позво-

ляющая оценить значение коэффициента полезного действия тягового электродвигателя для вновь проектируемой электромеханической трансмиссии транспортной машины с целью ее дальнейшего использования при анализе энергоэффективности транспортного средства.

С помощью полученной зависимости (6) и тягово-динамического расчета была определена потребная характеристика электродвигателя для рассматриваемого прототипа транспортного средства, а также был разработан алгоритм переключения передач трансмиссии, направленный на повышение энергоэффективности машины. В основу указанного алгоритма лег анализ потерь мощности в заданном режиме движения машины при использовании различных передач в коробке передач.

Получено, что разработанный алгоритм позволяет снизить потери энергии на 6,9 % при смешанном ездовом цикле и на 15,6 % в случае движения в городской среде (при условии отсутствия рекуперации энергии при торможении, учет которой не проводился в данном исследовании).

Высокая эффективность разработанного алгоритма в условиях городской среды обусловлена особенностями транспортного потока. Движение в городском цикле осуществляется на более низких скоростях по сравнению со смешанным циклом, вследствие чего заданный скоростной режим может быть реализован за счет большего количества передач (согласно рис. 4, при движении в диапазоне

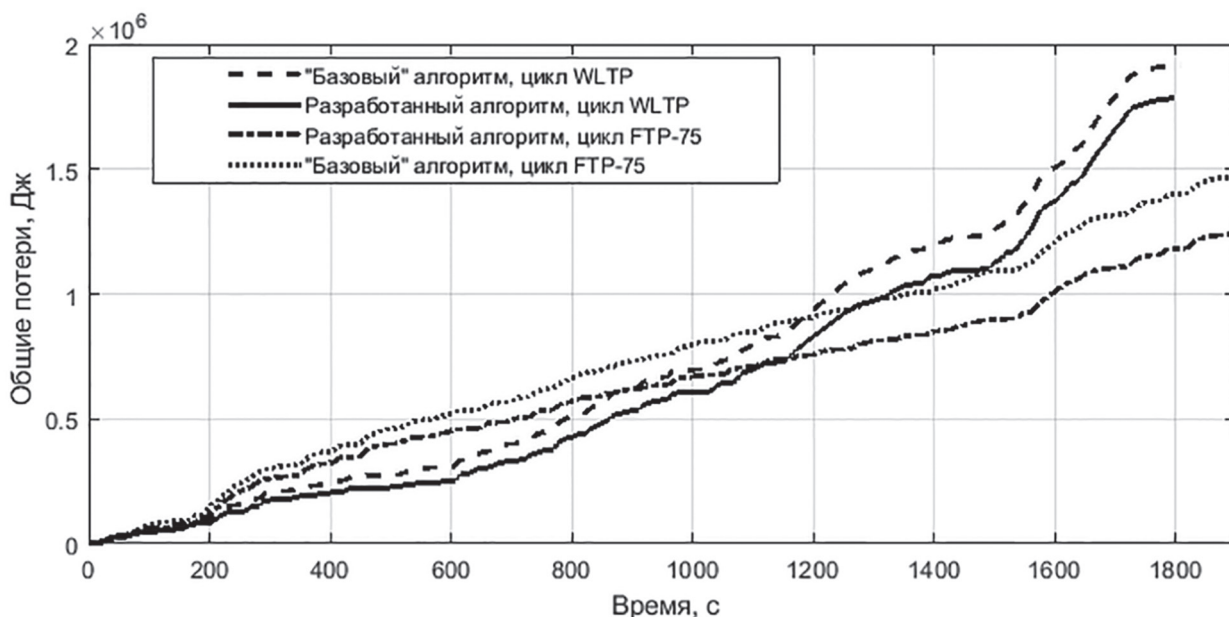


Рис. 8. Общие потери при движении

от 0 до 50 км/ч могут использоваться 1–5 передачи, в случае движения со скоростями от 70 до 90 км/ч – 3–5 передачи). Таким образом, осуществляя рациональный выбор номера передачи из допустимого диапазона, разработанный алгоритм обеспечивает работу электромашины в зоне высокого КПД в течение больших промежутков времени в процессе движения.

Заключение

На основе полученных результатов можно сделать вывод об эффективности разработанного алгоритма переключения передач, основанного на минимизации потерь энергии в электромеханической трансмиссии транспортной машины. При движении по городскому и смешанному циклам было достигнуто снижение потерь энергии по сравнению с алгоритмом, предполагающим максимальную динамичность машины при разгоне, до 15 %. Исследование разработанного алгоритма обеспечивалось благодаря применению описанного в статье метода оценки коэффициента полезного действия электромашины, базирующегося на результатах обработки статистических данных о характеристиках существующих электродвигателей транспортных машин. Использование представленных методов и алгоритмов позволит повысить энергоэффективность вновь проектируемых транспортных средств.

Литература

- Shoki Kosai, Masaki Nakanishi, Eiji Yamasue Vehicle energy efficiency evaluation from well-to-wheel lifecycle perspective, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 65, 2018, Pages 355-367, ISSN 1361-9209.
- Sangno R., Panigrahi S.P., Kumar S. (2020) Efficient Energy Management in Hybrid Electric Vehicles Using DRBF Networks. In: Sahana S., Bhattacharjee V. (eds) *Advances in Computational Intelligence. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 988. Springer, Singapore.
- Gorelov V.A., Butarovich D.O., Stduhin A.A., Skotnikov G.I. Simulation-based identification of the parameters of a minibus hybrid powertrain (2019) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 534 (1), статья № 012013, DOI: 10.1088/1757-899X/534/1/012013.
- Srivastava S., Maurya S. Fuel efficiency optimization techniques in hybrid vehicle (2019) *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8 (3), pp. 6790-6799.
- Passalacqua M., Lanzarotto D., Repetto M., Vaccaro L., Bonfiglio A., Marchesoni M. Fuel Economy and EMS for a Series Hybrid Vehicle Based on Supercapacitor Storage (2019) *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34 (10), статья № 8625545, pp. 9966-9977.
- Kotiev G.O., Butarovich D.O., Kositsyn B.B. Energy efficient motion control of the electric bus on route (2018) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 315 (1), статья № 012014, DOI: 10.1088/1757-899X/315/1/012014.
- Красовский А.Б. Основы электропривода: учебное пособие. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 405 с.
- MathWorks – Makers of MATLAB and Simulink – MATLAB & Simulink. URL: <https://www.mathworks.com/> (дата обращения: 22.01.2020).
- Danfoss – Engineering Tomorrow. URL: <https://www.danfoss.com/en/> (дата обращения: 27.02.2020)
- BorgWarner URL: <https://www.borgwarner.com/home> (дата обращения: 27.02.2020).
- DANA TM4 – Electric and hybrid powertrain systems. URL: <https://www.danatm4.com/> (дата обращения: 27.02.2020).
- YASA Limited | First for efficient electric powertrain. E-motors, controllers and electric drive. URL: <https://www.yasa.com/> (дата обращения: 27.02.2020).
- Electric drives, DC converters and battery chargers, motor controllers and portable power electronics are just a few of the solutions of BRUSA Elektronik AG supplies to automobile manufacturers around the world. URL: <https://www.brusa.biz/en.html> (дата обращения: 27.02.2020) .
- GKN Automotive. URL: <https://www.gknautomotive.com/> (дата обращения: 27.02.2020).
- Leise P., Altherr L.C., Simon N., Pelz P.F. (2020) Finding Global-Optimal Gearbox Designs for Battery Electric Vehicles. In: Le Thi H., Le H., Pham Dinh T. (eds) *Optimization of Complex Systems: Theory, Models, Algorithms and Applications. WCGO 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 991. Springer, Cham.
- Котиев Г.О., Мирошниченко А.В., Стадухин А.А. Определение скоростных диапазонов многоцелевых колесных и гусеничных машин с электромеханической трансмиссией // *Труды НАМИ*. 2017. № 3 (270). С. 51–55.
- Economic Commission for Europe Inland Transport Committee World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations Working Party on Pollution and Energy Seventy-eighth session Geneva, 8–11 Jan-

uary 2019 Item 3(b) of the provisional agenda Light vehicles – Global Technical Regulations Nos. 15 (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures (WLTP)) and 19 (Evaporative emission test procedure for the Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure (WLTP EVAP)).

18. Dynamometer Drive Schedules [Электронный ресурс] // United States Environmental Protection Agency. URL: <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules> (дата обращения: 25.10.2019).

References

1. Shoki Kosai, Masaki Nakanishi, Eiji Yamasue Vehicle energy efficiency evaluation from well-to-wheel lifecycle perspective, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol. 65, 2018, Pages 355-367, ISSN 1361-9209
2. Sangno R., Panigrahi S.P., Kumar S. (2020) Efficient Energy Management in Hybrid Electric Vehicles Using DRBF Networks. In: Sahana S., Bhattacharjee V. (eds) Advances in Computational Intelligence. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 988. Springer, Singapore
3. Gorelov V.A., Butarovich D.O., Stduhin A.A., Skotnikov G.I. Simulation-based identification of the parameters of a minibus hybrid powertrain (2019) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 534 (1), stat'ya No 012013, DOI: 10.1088/1757-899X/534/1/012013
4. Srivastava S., Maurya S. Fuel efficiency optimization techniques in hybrid vehicle (2019) International Journal of Recent Technology and Engineering, 8 (3), pp. 6790-6799.
5. Passalacqua M., Lanzarotto D., Repetto M., Vaccaro L., Bonfiglio A., Marchesoni M. Fuel Economy and EMS for a Series Hybrid Vehicle Based on Supercapacitor Storage (2019) IEEE Transactions on Power Electronics, 34 (10), stat'ya No 8625545, pp. 9966-9977.
6. Kotiev G.O., Butarovich D.O., Kositsyn B.B. Energy efficient motion control of the electric bus on route (2018) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 315 (1), stat'ya No 012014, DOI: 10.1088/1757-899X/315/1/012014.
7. Krasovskiy A.B. *Osnovy elektroprivoda: uchebnoye posobiye* [Basics of electric drive: textbook]. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2015. 405 p.
8. MathWorks – Makers of MATLAB and Simulink – MATLAB & Simulink. URL: <https://www.mathworks.com/> (accessed: 22.01.2020).
9. Danfoss – Engineering Tomorrow. URL: <https://www.danfoss.com/en/> (accessed: 27.02.2020)
10. BorgWarner URL: <https://www.borgwarner.com/home> (accessed: 27.02.2020)
11. DANA TM4 – Electric and hybrid powertrain systems. URL: <https://www.danatm4.com/> (accessed: 27.02.2020)
12. YASA Limited | First for efficient electric powertrain. E-motors, controllers and electric drive. URL: <https://www.yasa.com/> (accessed: 27.02.2020)
13. Electric drives, DC converters and battery chargers, motor controllers and portable power electronics are just a few of the solutions of BRUSA Elektronik AG supplies to automobile manufacturers around the world. URL: <https://www.brusa.biz/en.html> (accessed: 27.02.2020).
14. GKN Automotive. URL: <https://www.gknautomotive.com/> (accessed: 27.02.2020)
15. Leise P., Altherr L.C., Simon N., Pelz P.F. (2020) Finding Global-Optimal Gearbox Designs for Battery Electric Vehicles. In: Le Thi H., Le H., Pham Dinh T. (eds) Optimization of Complex Systems: Theory, Models, Algorithms and Applications. WCGO 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 991. Springer, Cham
16. Kotiyev G.O., Miroshnichenko A.V., Stdukhin A.A. Determination of speed ranges of multi-purpose wheeled and tracked vehicles with electromechanical transmission. *Trudy NAMI*. 2017. No 3 (270), pp. 51–55 (in Russ.).
17. Economic Commission for Europe Inland Transport Committee World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations Working Party on Pollution and Energy Seventy-eighth session Geneva, 8-11 January 2019 Item 3(b) of the provisional agenda Light vehicles – Global Technical Regulations Nos. 15 (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures (WLTP)) and 19 (Evaporative emission test procedure for the Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure (WLTP EVAP))
18. Dynamometer Drive Schedules [Elektronnyy resurs] // United States Environmental Protection Agency. URL: <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules> (accessed: 25.10.2019).

METHOD FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF ELECTROMECHANICAL TRANSMISSIONS OF VEHICLES AT THE DESIGN STAGE

PhD in Engineering **B.V. Padalkin**, PhD in Engineering **V.V. Ivanenkov**,
PhD in Engineering **B.B. Kositsyn**, PhD in Engineering **A.A. Stadukhin**, **K.S. Balkovskiy**
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
padalkin@bmstu.ru, ant.m9@yandex.ru, kositsyn_b@bmstu.ru

The vehicles equipped with electromechanical transmission due to the development of traction electric drive, as well as on-board electric energy storage became very prospective. However, at the stage of such vehicles design the difficulties associated with evaluating the energy efficiency of the developed vehicles, in particular, with the evaluation of the efficiency of traction electric vehicles arise. In this work, the authors propose a method for evaluating the efficiency of traction electric motors of newly developed electromechanical transmissions of transport vehicles, based on the construction of an empirical dependence approximating statistical data on the characteristics of existing electric motors. The data on electric motors from a number of manufacturers used in vehicle transmissions was studied for approximation. The article discusses the application of the developed method to design an algorithm for controlling the transmission of a wheeled vehicle, aimed at increasing its energy efficiency. The efficiency of the algorithm is confirmed by simulation of the dynamics of the vehicle, the initial data for the simulation were obtained during the traction-dynamic calculation. The developed simulation model together with the method of evaluating the efficiency of the electric motor made it possible to carry out a comparative assessment of the developed gearshift control algorithm and the gearshift approach, which does not take into account the dependence of the energy losses of the electric machine on the operating mode in cases of urban and mixed driving cycles. As criteria for assessing the effectiveness of the application of the developed law of control of an electromechanical transmission, the amount of energy spent on movement along a given cycle and the number of gear shifts on the route were used. The obtained results confirm the effectiveness of using the developed algorithm in the conditions of vehicle movement in an urban environment.

Keywords: wheeled vehicle, motion control system, transmission control algorithm, traction motor, energy efficiency, efficiency, electromechanical transmission.