

АВТОТРАНСПОРТНІ ЗАСОБИ

УДК 629.3

DOI: 10.30977/АТ.2219-8342.2019.45.0.12

УЛУЧШЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МИКРОГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯДвадненко В. Я.¹, Пушкарь О. Б.¹¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Для улучшения экономических и экологических параметров автомобиля с системой старт-стоп (микрогибридного автомобиля) предложен новый алгоритм работы двигателей силовой установки, делающий его более близким к подзаряжаемому гибриднему автомобилю. Предложена методика расчета такого микрогибридного автомобиля в режиме электропривода. Приведены и проанализированы результаты расчета основных характеристик в режиме электропривода. Показана целесообразность и эффективность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: автомобиль с системой старт-стоп, алгоритм работы двигателей микрогибридного автомобиля, расчет автомобиля с тяговым электроприводом, вентильный электродвигатель, подзаряжаемый гибридный автомобиль, тяговый электропривод, гибридная силовая установка.

Введение

Снижение расхода топлива и уменьшение вредных выбросов являются актуальными задачами, как для производителей, так и для владельцев автомобилей. Эффективным решением этих проблем представляется повсеместный переход на электромобили [1]. Но есть много причин, не позволяющих быстро это сделать. Это малый пробег без подзарядки тягового аккумулятора, длительное время зарядки, недостаточное число зарядных станций. Кроме того, сдерживает продажи электромобилей в настоящее время также высокая стоимость, прежде всего из-за дорогого аккумулятора с высокой энергетической емкостью. Кроме того, для зарядки большого количества электромобилей потребуется существенно увеличить мощности электростанций и электрических сетей.

Анализ публикаций

В современных условиях более приемлемым решением является использование гибридных автомобилей, которые не имеют недостатков электромобилей [2]. Гибридные автомобили имеют более высокую стоимость, чем автомобили, которые имеют только ДВС, и поэтому применение гибридных автомобилей не всегда является экономически целесообразным. В последние годы для уменьшения выбросов CO₂ и экономии топлива часто на автомобили устанавливают систему старт-стоп и применяют рекупера-

тивное торможение. Такие автомобили иногда называют микрогибридными автомобилями, учитывая то, что все гибридные автомобили имеют систему старт-стоп [3]. Недостатком таких автомобилей является невозможность движения с помощью электродвигателя.

Более эффективно решают проблемы экономии топлива и экологии подзаряжаемые гибридные автомобили, сочетающие лучшие качества электромобилей и автомобилей с ДВС [4 – 5], но они имеют более емкие тяговые батареи, и поэтому эти автомобили дороже и тяжелее гибридных автомобилей без внешней подзарядки [5].

Учитывая вышесказанное, считаем, что улучшение экономических и экологических характеристик микрогибридного автомобиля в сочетании с сохранением их основных положительных качеств, является актуальной задачей.

Цель и постановка задачи

Целью работы является улучшение экономических и экологических характеристик автомобиля с системой старт-стоп (микрогибридного автомобиля). Для этого в таком автомобиле необходимо ввести возможность его движения с помощью электродвигателя, как в гибридном автомобиле. В то же время очевидным путем снижения стоимости, а также уменьшения веса и габаритов существующих гибридных автомобилей, является

снижение мощности тягового электродвигателя, что, в свою очередь, позволит уменьшить потребляемый ток и, следовательно, энергетическую емкость тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ). Также из-за снижения веса электропривода улучшится динамика автомобиля, и, кроме того, снизится расход топлива и электроэнергии. Однако оба эти подхода требуют разработки нового алгоритма работы двигателей автомобиля, теоретического обоснования как мощности электродвигателя [5], так и энергетической емкости ТАБ. Также требуется и экспериментальная проверка предложенного алгоритма и расчетных значений.

Изложение основного материала

Микрогибридный автомобиль имеет ДВС и дополнительно установленный тяговый электропривод. Для обеспечения возможности снижения мощности тягового электропривода нужно разработать алгоритм, описывающий, в каких условиях движения следует использовать ДВС и в каких – электропривод. Такой алгоритм, естественно, будет отличаться от алгоритма, обычно применяемого в гибридных автомобилях. Также он будет отличаться и от алгоритма, применяемого в микрогибридных автомобилях (в автомобилях с ДВС и системой старт-стоп).

Прежде чем перейти к предлагаемому нами алгоритму, рассмотрим, за счет чего собираемся уменьшить энергопотребление и, следовательно, стоимость километра пробега, а также снизить вредные выбросы. Для этого будем использовать два источника энергии: углеводородное топливо и электрическую сеть переменного тока, т.е. используем принцип подзаряжаемого гибрида [4, 5]. Такой выбор сделан потому, что километр пробега на энергии из электрической сети в несколько раз дешевле, чем километр пути, пройденный на углеводородном топливе [4]. Кроме того, будем максимально использовать кинетическую и потенциальную энергии движущегося автомобиля, как путем рекуперации, так и непосредственно для движения автомобиля, с минимальными потерями без преобразования их в другие виды энергии [6].

В предлагаемом гибридном автомобиле для минимизации мощности тягового электропривода режимы работы ДВС с малой нагрузкой, но с высоким удельным расходом топлива заменим на движение с электроприводом. Это такие режимы: медленное движе-

ние на низких передачах (например, в заторах), когда имеют место невысокие скорости и ускорения, а также равномерное движение с относительно невысокой скоростью (50–60 км/ч) по асфальтированной дороге без заметного подъема. Также исключен режим холостого хода ДВС.

Двигатели современных автомобилей, как ДВС, так и электрические, если они используются для набора скорости, должны обладать достаточно большой мощностью, чтобы автомобиль имел достаточное ускорение и не выпадал из транспортного потока. Следовательно, тяговые электродвигатели современных гибридных автомобилей имеют сравнительно большую мощность, т.к. во всех гибридных автомобилях начало движения происходит на электродвигателе. В предлагаемом автомобиле энергичный набор скорости производится на ДВС с ручным или автоматическим переключением передач. В случаях, когда не требуются большие ускорения, начинать движение можно и на маломощном электроприводе. При движении в городских условиях, когда максимальная скорость ограничена до 50–60 км/ч, в предлагаемом автомобиле движение начинается с автоматического запуска ДВС системой старт-стоп, затем, на ДВС, с переключением передач, набирают скорость 30–50 км/ч, затем коробку передач устанавливают в нейтральное положение, автоматически ДВС останавливается и происходит переключение педали акселератора на управление мощностью электропривода. На электроприводе производится дальнейший набор скорости до 50–60 км/ч и дальнейшее равномерное движение. На этот интервал скоростей оптимизировано значение передаточного числа редуктора электродвигателя, который работает на достаточно высоких оборотах. Кроме того, если отпустить педаль акселератора, электродвигатель будет обесточен и не будет оказывать сопротивления вращению, т.е. автомобиль имеет хороший накат. Перед остановкой, например, у светофора, производится служебное рекуперативное электрическое торможение и часть энергии возвращается в ТАБ. Это происходит, если водитель отводит педаль тормоза от упора, срабатывает стоп-сигнал и начинается рекуперативное торможение. Тормозные колодки при этом еще не касаются дисков, но, когда потребуется окончательно остановить автомобиль, водитель усиливает нажатие на педаль тормоза и штатная тормозная система останавливает

автомобиль. Такой алгоритм особенно эффективен при движении с частыми остановками, что характерно для городского режима движения. В таком режиме улучшается баланс электрической энергии в ТАБ, поскольку при разгоне расходуется углеводородное топливо, а при рекуперативном торможении подзаряжается ТАБ. При необходимости набрать скорость, превышающую 50–60 км/ч, водитель, выжав сцепление, включает соответствующую передачу и далее, после включения сцепления, происходит автоматический запуск ДВС без стартера от кинетической энергии движущегося автомобиля. При такой скорости не заметно каких-либо толчков при запуске ДВС [6]. Далее электропривод отключается и дальнейшее движение происходит с помощью ДВС. Относительно небольшая емкость ТАБ такого подзаряжаемого гибридного автомобиля позволяет достаточно быстро заряжать его от бытовой сети при сравнительно небольшой потребляемой мощности. Эта мощность не превышает допустимую мощность практически любой розетки бытовой сети.

Поскольку автомобиль способен эксплуатироваться не только в гибридном режиме, но и на бензине, то нет проблем с дальностью пробега. Этому способствует также то обстоятельство, что применены относительно легкие ТАБ и электродвигатель, следовательно, масса автомобиля по сравнению с обычным автомобилем увеличивается незначительно, соответственно это также способствует сравнительно малому расходу топлива в режиме движения на ДВС и малому расходу электроэнергии в режиме движения на электроприводе. В отличие от традиционного подзаряжаемого гибридного автомобиля, ДВС предлагаемого автомобиля работает при наборе скорости, поэтому у него лучше тепловой режим и лучше работает обогрев салона.

Для подтверждения достоинств предложенного алгоритма проведем расчет для автомобиля Ланос-пикап, с системой управления реализующий требуемый для этого алгоритма режим работы основного ДВС и вспомогательного вентильного электродвигателя (ВЭД). ВЭД выполнен на основе синхронной электрической машины Г290 [9]. Этот электродвигатель кинематически связан через поликлиновую ременную передачу с вторичным валом механической коробки передач автомобиля. Вентильный электродвигатель выполнен на основе синхронной элек-

трической машины Г-290 с электромагнитным возбуждением. Обратные диоды силовых управляемых ключей трехфазного управляемого моста вентильного инвертора на основе MOSFET транзисторов работают как выпрямитель в генераторном режиме. Такой режим используется при рекуперативном торможении. Расчет будем делать по методике, разработанной в работе [8].

Расчет мощности электропривода

Выберем для движения на электроприводе интервал скоростей от 0 до 60 км/ч. При равномерном движении на скорости 40–60 км/ч, как будет показано ниже, требуется небольшая мощность электродвигателя. При этом на такой скорости, как показывает эксперимент, кинетическая энергия движущегося автомобиля достаточно велика, чтобы можно было незаметно для водителя и пассажиров использовать её часть для запуска ДВС [6]. Рассмотрим расчет основных параметров конверсионного автомобиля в режиме электропривода на основе работы [7]. Для этого используем силовой баланс [8]:

$$P_t = P_k + P_n + P_v + P_i,$$

где P_t – сила тяги; P_k – сила сопротивления качению; P_n – сила сопротивления подъему; P_v – сила сопротивления воздуха; P_i – сила инерции (сила сопротивления разгону).

Используем обозначение P_d – сила сопротивления дороги:

$$P_d = P_k + P_n = G(f_k \cos \alpha + \sin \alpha) = \psi G,$$

где G – вес автомобиля; α – угол уклона дороги; f_k – коэффициент сопротивления качению; ψ – суммарный коэффициент сопротивления дороги.

Раскрыв выражения для силы сопротивления воздуха и силы сопротивления разгону, имеем уравнение баланса сил:

$$P_t = \psi G + \frac{1}{2} C_x A \rho_v V^2 + \frac{1}{g} G \delta a, \quad (1)$$

где δ – коэффициент учета вращающихся масс, для легкового автомобиля δ можно брать 1,05; a – ускорение автомобиля; V – скорость автомобиля; ρ_v – плотность воздуха; C_x – коэффициент обтекаемости; A – лобовая площадь автомобиля; g – ускорение свободного падения.

После умножения левой и правой части равенства (1) на скорость автомобиля получим уравнение баланса мощностей:

$$N_t = N_d + N_b + N_v = \psi GV + \frac{1}{2} C_x A \rho_b V^3 + \frac{1}{g} G \delta a V^2 \quad (2)$$

где N_t – тяговая мощность; N_d – мощность, необходимая для преодоления сопротивления дороги; N_b – мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления воздуха; N_v – мощность, затрачиваемая на преодоление инерции (сопротивления разгону).

Если учесть КПД трансмиссии (главной передачи и передачи от электродвигателя к вторичному валу коробки передач) $\eta_{тр}$, получим выражение для необходимой мощности электродвигателя N_3 :

$$N_3 = \frac{1}{\eta_{тр}} \left(\psi GV + \frac{1}{2} C_x A \rho_b V^3 + \frac{1}{g} G \delta a V^2 \right). \quad (3)$$

Зависимость необходимой механической мощности электродвигателя от требуемой максимальной скорости при различных углах подъема дороги для автомобиля Ланос-пикап на дороге с асфальто-бетонным покрытием приведена на рис. 1. Кривые 1, 2, 3, 4, 5 и 6 соответствуют подъемам 0, 1, 2, 3, 4 и 5 %.

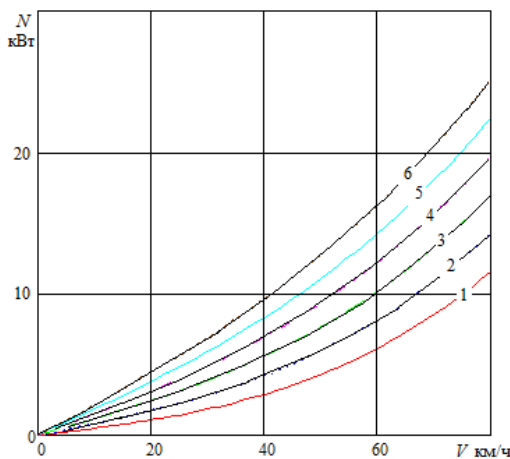


Рис. 1. Зависимость необходимой механической мощности электродвигателя от требуемой максимальной скорости при различных углах подъема дороги

Из выражения (3) можно получить механическую мощность электродвигателя, требуемую для того, чтобы конверсионный гибридный автомобиль Ланос-пикап набирал

на асфальтированной дороге скорость до 60 км/ч. На горизонтальном участке получаем 6,4 кВт, на подъеме 2 % достичь скорости 60 км/ч можно при мощности электродвигателя 10 кВт. Выберем мощность тягового электродвигателя, близкую к 10 кВт.

На ровной дороге запас мощности, как будет показано ниже, обеспечит достаточную динамику автомобиля при движении на электроприводе. Поскольку конверсионный автомобиль полностью сохраняет возможности обычного автомобиля, преодоление крутого подъема или большого сопротивления дороги может быть осуществлено с использованием ДВС на соответствующих передачах.

Расчет коэффициента передачи от оси электродвигателя к ведущим колесам автомобиля

С одной стороны, имеем зависимость суммы сопротивления дороги и сопротивления воздуха P_c от скорости V :

$$P_c = \psi G + \frac{1}{2} C_x A \rho_b V^2. \quad (4)$$

С другой стороны, имеем зависящую от скорости силу тяги автомобиля с электроприводом, выраженную через момент на валу электродвигателя:

$$P_m = \frac{M_3(V) i_{э} i_{гп} \eta_{тр}}{r_k}, \quad (5)$$

где $M_3(V)$ – зависящий от скорости вращающий момент электродвигателя; $\eta_{тр}$ – КПД трансмиссии; $i_{гп}$ – коэффициент главной передачи; $i_{тр}$ – коэффициент передачи между электродвигателем и вторичным валом коробки передач.

Для вентильного двигателя зависимость $M_3(V)$ получена из уравнения механической характеристики [8]:

$$\omega(M_3) = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_k M_3}{(k\Phi)^2},$$

где $\omega = i_{гп} i_{э} V / r_k$.

Построим на одном графике семейство зависимостей для выражения (4) и семейство зависимостей для выражения (5). Используем для кривых, полученных из выражения (4), следующие обозначения: кривая $P_c 1$ со-

ответствует горизонтальной дороге, $P_c 2$ – подъему 1 %, $P_c 3$ – подъему 2 %, $P_c 4$ – подъему 3 %, $P_c 5$ – подъему 4 %, $P_c 6$ – подъему 5 %. Механическую характеристику электродвигателя $M_3(V)$ в выражении (5) рассчитаем по методике построения внешней механической характеристики электродвигателя, предложенной в работе [9]. При этом используем синхронную электрическую машину Г290, для которой суммарное активное сопротивление якорной цепи $R_{я} = 0,03$ Ом и выберем напряжение ТАБ, равное 89,6 В, т.е. 28 последовательно соединенных аккумуляторов WB LYP90АНА. Используем для кривых, полученных из выражения (5), следующие обозначения: кривая $P_T 1$ соответствует передаточному числу от вала электродвигателя к ведущим колесам $i_{эк} i_{тп} = 8,88$ зависимость $P_T 2$ – 7,88; зависимость $P_T 3$ – 6,88; зависимость $P_T 4$ – 5,88; зависимость $P_T 5$ – 4,88. Координата по горизонтальной оси точки пересечения зависимостей P_T и P_c является максимально достижимой скоростью автомобиля с соответствующим передаточным числом на дороге с соответствующим уклоном.

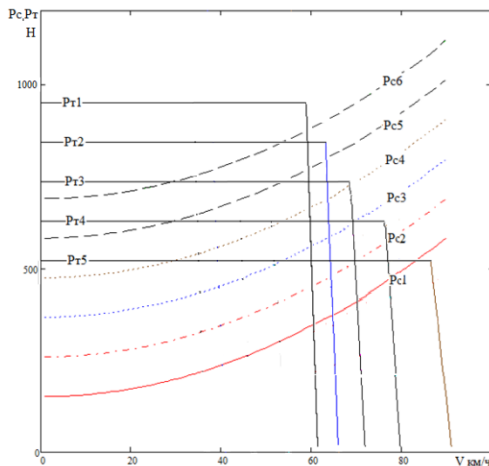


Рис. 2. Зависимость силы тяги электродвигателя для различных передаточных чисел и силы сопротивления движению для различных уклонов от скорости конверсионного гибридного автомобиля

При скоростях, меньших максимально достижимой, разность между ординатами соответствующих кривых P_T и P_c является силой, обеспечивающей ускорение автомобиля. В выражении для силового баланса эта сила обозначена $P_{и}$. Для выбора оптимального передаточного числа между электродвигателем и ведущими колесами автомобиля, заме-

тим, что по графику на рис. 2 при уклоне до 1 % скорость 60 км/ч может быть достигнута со всеми указанными передаточными числами.

Выберем для улучшения разгона передаточное число 6,88. Для автомобиля Ланос-пикап с передаточным числом главной передачи 4,133 передаточное число 6,88 получается с передаточным числом передачи между электродвигателем и вторичным валом коробки передач, равным 1,66 (диаметры шкивов соответственно 120 и 200 мм).

Расчет времени разгона

Рассчитаем время достижения скорости $V_1 = 60$ км/ч при старте с места на ровной дороге. Как видно из рис. 2, вращающий момент электродвигателя, а значит, и сила тяги $P_{ТЗ}$, на участке от 0 и до 60 км/ч остается постоянной. Обусловлено это работой системы автоматического регулирования (САР), которая ограничивает (стабилизирует) предельный фазовый ток [9]. Такая работа САР имеет место на указанном интервале тогда, когда педаль управления якорным током электродвигателя (педаль акселератора) полностью нажата и задействована внешняя механическая характеристика электродвигателя. Время разгона t_p до скорости V_1 можно вычислить с помощью интегрирования по скорости обратной величины мгновенного ускорения автомобиля на требуемом интервале скоростей:

$$t_p = \int_0^{V_1} \frac{1}{a} dV.$$

Используя мгновенное ускорение автомобиля, полученное из выражения (1), имеем:

$$t_p = \int_0^{V_1} \frac{1}{a} dV = \int_0^{V_1} \frac{\delta G}{g(P_T - P_B - \psi G)} dV = \int_0^{V_1} \frac{\delta G}{g \left(\frac{M_3(V) i_{эк} i_{тп} \eta_{тп}}{r_k} - \frac{1}{2} C_x \rho_s V^2 - \psi G \right)} dV.$$

Введем обозначения:

$$d = P_m - \psi G = \frac{1}{r_k} M_3 i_{тп} i_{эк} \eta_{тп} \psi G; \quad b = \frac{1}{2} C_x \rho_s A,$$

следовательно, имеем $P_B = bV^2$.

С учетом этих обозначений имеем «табличный интеграл»:

$$t_p = \frac{\delta G}{gb} \int_0^{V_1} \frac{1}{\frac{d}{b} - V^2} dV = \frac{\delta G}{gb} \left\{ \frac{1}{2\sqrt{\frac{d}{b}}} \ln \left| \frac{\sqrt{\frac{d}{b}} + V}{\sqrt{\frac{d}{b}} - V} \right| \right\}_0^{V_1} \quad (6)$$

Расчет времени разгона с использованием выражения (6) производился для конверсионного автомобиля Ланос-пикап с электроприводом на основе синхронной электрической машины (генератора) Г290. Такой электропривод имеет вращающий момент около $M_{\text{эмакс}} = 30 \text{ Н}\cdot\text{м}$ при токе якоря 150 А, который может быть длительное время, или имеем вращающий момент примерно $M_{\text{эмакс}} = 40 \text{ Н}\cdot\text{м}$ при токе якоря 230 А (такой ток может быть кратковременно, до 1 минуты). При расчете использовались следующие численные параметры: $G=11000 \text{ Н}$, $\delta=1,05$, $\psi = 0,014$, $C_x = 0,38$, $r_k = 0,284 \text{ м}$, $i_{\text{гп}} i_{\text{эк}} = 6,88$, $\eta_{\text{тр}} = 0,92$, $\rho_v = 1,29 \text{ кг/м}^3$, $A = 2,6 \text{ м}^2$, $V_1 = 16,66 \text{ м/с}$. Для $M_{\text{эмакс}} = 30 \text{ Н}\cdot\text{м}$ расчетное время разгона 44,1с. Для $M_{\text{эмакс}} = 40 \text{ Н}\cdot\text{м}$ расчетное время разгона 29 с. Опытная эксплуатация конверсионного гибридного автомобиля показала хорошее совпадение экспериментальных данных с результатами расчета. При движении в городских условиях такие возможности электропривода обеспечивают эксплуатацию гибридного автомобиля только в случае, когда приемлемо малое ускорение, например, при движении в заторах, во дворах, в помещениях складов, цехов или когда не создаются проблемы для другого транспорта. Во всех других случаях быстрый набор скорости в гибридном режиме предполагается проводить на ДВС с переключением передач. При этом ДВС достаточно нагружен и поэтому работает с относительно малым удельным расходом топлива. Электродвигатель связан с ведущими колесами постоянным передаточным отношением, но с ростом оборотов его мощность растет, и он становится способным обеспечить приемлемое ускорение автомобиля. Следовательно, разгон с переключением передач на ДВС можно осуществлять только частично, например, до 20 – 40 км/ч, после чего отпустить педаль акселератора,

выжать педаль сцепления и включить нейтральную передачу. Автомобиль при этом автоматически остановит ДВС и дальше, если нажать педаль акселератора, продолжит движение на электродвигателе, набирая разрешенную в городе скорость (до 50 – 60 км/ч). Если надо двигаться с более высокой скоростью, надо выжать сцепление и включить соответствующую передачу. Быстрый запуск ДВС на движущемся автомобиле при включении сцепления происходит автоматически, благодаря работе системы «старт-стоп» гибридного автомобиля.

Расчет расхода электрической энергии и пути разгона тягового электропривода

Рассчитаем количество электрической энергии W , израсходованной гибридным автомобилем Ланос-пикап с указанным выше алгоритмом управления силовой установкой на максимально быстрый разгон при помощи электропривода с места до и 60 км/ч. Энергию, затраченную при таком разгоне, можно представить в виде двух слагаемых: энергии, затраченной на разгон с учетом КПД трансмиссии $\eta_{\text{тр}}$ и КПД импульсного стабилизатора (ограничителя) якорного тока $\eta_{\text{от}}$, и энергии, потраченной на нагрев за счет активного сопротивления цепи якоря $R_{\text{я}}$:

$$W = \frac{S_{60} M_{\text{эмакс}} i_{\text{эк}} i_{\text{гп}}}{r_k \eta_{\text{от}} \eta_{\text{тр}}} + R_{\text{я}} I_{\text{ямакс}}^2 t_1; \quad W = S_{60} \frac{k\Phi I_{\text{ямакс}} i_{\text{эк}} i_{\text{гп}}}{r_k \eta_{\text{от}} \eta_{\text{тр}}} + R_{\text{я}} I_{\text{ямакс}}^2 t_1, \quad (7)$$

где S_{60} – путь, пройденный от старта до момента достижения скорости 60 км/ч; $I_{\text{ямакс}}$ – максимальный ток якорной цепи.

Остается еще энергия, потраченная в ВЭД на потери в подшипниках, вентиляционные потери, питание возбуждения и магнитные потери. Ввиду малости этой энергии будем ею пренебрегать. Чтобы найти путь, пройденный от старта до момента достижения скорости 60 км/ч, воспользуемся интегральным выражением:

$$S_{60} = \int_0^{t_1} V(t) dt = \int_0^{t_1} a(t) t dt, \quad (8)$$

где t_1 – время разгона до скорости 60 км/ч.

Ускорение автомобиля a вычислим аналогично тому, как это сделано при получении выражения (6), однако используя то обстоя-

тельство, что в этом интервале скоростей сравнительно малая часть энергии расходуется на преодоление сопротивления воздуха, применим линейную аппроксимацию зависимости силы сопротивления воздуха от времени. Такая аппроксимация внесет незначительную погрешность, но позволит упростить расчет. В этом случае имеем ускорение автомобиля:

$$a = \frac{g \left(\frac{k\Phi I_{\text{яmax}} i_{\text{эк}} i_{\text{гп}} \eta_{\text{тр}}}{r_{\text{к}}} - P_{\text{в}} - \psi G \right)}{\delta G} = \frac{g \left(\frac{k\Phi I_{\text{яmax}} i_{\text{эк}} i_{\text{гп}} \eta_{\text{тр}}}{r_{\text{к}}} - \frac{P_{\text{в60}}}{t_1} t - \psi G \right)}{\delta G},$$

где $P_{\text{в60}}$ – сила сопротивления воздуха при скорости 60 км/ч, $g = 9,8 \text{ Н/с}^2$. Тогда имеем:

$$S_{60} = \frac{g}{\delta G} \int_0^{t_1} \frac{k\Phi}{r_{\text{к}}} I_{\text{яmax}} i_{\text{эк}} i_{\text{гп}} \eta_{\text{тр}} t dt - \frac{g}{\delta G} \int_0^{t_1} \frac{P_{\text{в60}}}{t_1} t^2 dt - \frac{g}{\delta G} \int_0^{t_1} \psi G t dt.$$

Или после сведения к табличным интегралам:

$$S_{60} = \frac{g}{\delta G} \frac{k\Phi}{r_{\text{к}}} I_{\text{яmax}} i_{\text{эк}} i_{\text{гп}} \eta_{\text{тр}} \int_0^{t_1} t dt - \frac{g}{\delta G} \frac{P_{\text{в60}}}{t_1} \int_0^{t_1} t^2 dt - \frac{g\psi}{\delta} \int_0^{t_1} t dt. \quad (9)$$

После интегрирования и подстановки пределов, а также, вынеся за скобки общие множители, имеем

$$S_{60} = \frac{g t_1^2}{\delta} \left(\frac{M_{\text{эmax}}}{2G r_{\text{к}}} i_{\text{эк}} i_{\text{гп}} \eta_{\text{тр}} - \frac{P_{\text{в60}}}{3G} - \frac{\psi}{2} \right). \quad (10)$$

Подставляя указанные выше и полученные численные значения для экспериментального Ланос-пикап, переоборудованного в микрогибридный автомобиль, имеем путь разгона до 60 км/ч для $M_{\text{эmax}} = 30 \text{ Н}\cdot\text{м}$, равный 327,2 м, для $M_{\text{эmax}} = 40 \text{ Н}\cdot\text{м}$, равный 145,4 м. Более точное значение пути разгона можно получить, если линейную аппроксимацию параболы заменить кусочно-линейной аппроксимацией, т.е. выполнить на более

коротких отрезках времени (скорости). Соответственно на этих отрезках надо проводить интегрирование для нахождения времени и пути и затем эти частичные пути складывать. Подставив в выражение (7) полученный путь и силу тяги, которую развивает электропривод и которая, как видно из рис. 2, на пути разгона до 60 км/ч постоянна, имеем:

$$W = S_{60} \frac{M_{\text{эmax}} i_{\text{эк}} i_{\text{гп}}}{r_{\text{к}} \eta_{\text{от}} \eta_{\text{тр}}} + R_{\text{я}} I_{\text{яmax}}^2 t_1. \quad (11)$$

Расчет количества электрической энергии на разгон с места до скорости 60 км/ч, по формуле (11) дает для момента $M_{\text{эmax}} = 30 \text{ Н}\cdot\text{м}$ значение 323 331 Дж, или 0,0898 кВт·ч. Для $M_{\text{эmax}} = 40 \text{ Н}\cdot\text{м}$ имеем 208744 Дж, или 0,058 кВт·ч. Меньшее значение во втором случае связано с тем, что разгон потребовал более короткого пути и поэтому произведенная работа оказалась меньше. Сравнение этих расчетных значений с результатами, полученными на бортовом счетчике ватт-часов во время экспериментальных пробегов, показали хорошее совпадение результатов расчета с экспериментом.

Расчет максимальной скорости на электроприводе, расчет удельного потребления электроэнергии на заданной скорости и расчет емкости ТАБ

Для расчета максимальной скорости гибридного автомобиля на электроприводе приравняем сумму сил сопротивления дороги и сопротивления воздуха силе тяги, создаваемой ВЭД. Запишем уравнение этого равновесия:

$$\psi G + \frac{1}{2} C_x A \rho_{\text{в}} V^2 = \frac{M_{\text{э}}(V) i_{\text{эк}} i_{\text{гп}} \eta_{\text{тр}}}{r_{\text{к}}}. \quad (12)$$

Воспользуемся уравнением механической характеристики ВЭД:

$$\omega = \frac{V i_{\text{эк}} i_{\text{гп}}}{r_{\text{к}}} = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{э}}}{(k\Phi)^2},$$

из которого получим выражение для момента:

$$M_{\text{э}} = \frac{(k\Phi)^2}{R_{\text{я}}} \left(\frac{U}{k\Phi} - \frac{V i_{\text{эк}} i_{\text{гп}}}{r_{\text{к}}} \right).$$

Это выражение для момента подставим в правую часть (12), после чего имеем:

$$\begin{aligned} \psi G + \frac{1}{2} C_x A \rho_b V^2 = \\ = \frac{(k\Phi)^2}{R_{я} r_k} \left(\frac{U}{k\Phi} - \frac{V i_{эк} i_{гп}}{r_k} \right) i_{эк} i_{гп} \eta_{тр}. \end{aligned}$$

После преобразований имеем:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} C_x A \rho_b V^2 + \frac{(k\Phi)^2 (i_{эк} i_{гп})^2 \eta_{тр}}{R_{я} r_k^2} V + \psi G - \\ - \frac{k\Phi U i_{эк} i_{гп} \eta_{тр}}{R_{я} r_k} = 0. \end{aligned} \quad (13).$$

В полученное квадратное уравнение относительно скорости V подставляем численные значения рассматриваемого автомобиля: $G = 11000$ Н, $R_{я} = 0,03$ Ом, $\psi = 0,014$, $C_x = 0,38$, $r_k = 0,284$ м, $i_{гп} i_{эк} = 6,88$, $\eta_{тр} = 0,92$, $\rho_b = 1,29$ кг/м³, $A = 2,6$ м², $U = 89,6$ В, $k\Phi = 0,192$ и находим корни этого уравнения, один из которых будет являться максимально достижимой скоростью на электроприводе. Выбран положительный корень, который дает скорость 18,6 м/с или 67,0 км/ч. Экспериментально достигнутая максимальная скорость гибридного автомобиля Ланос-пикап на электроприводе составила 64 км/ч.

Для нахождения тока ВЭД воспользуемся уравнением мощностного баланса для движения автомобиля с нулевым ускорением:

$$\eta_{вэд} \eta_{тр} U I_{вэд} = \psi G V + \frac{1}{2} C_x A \rho_b V^3,$$

где $\eta_{вэд}$ – КПД ВЭД, откуда получим выражение для тока:

$$I_{вэд} = \frac{\psi G V + \frac{1}{2} C_x A \rho_b V^3}{\eta_{вэд} \eta_{тр} U}.$$

После подстановки ранее приведенных численных значений для автомобиля Ланос-пикап проводим вычисления и получаем ток якоря при скорости 60 км/ч $I_{вэд} = 74,3$ А. Вместе с током обмотки возбуждения, которая питается также от ТАБ, имеем общий ток около 76 А. Умножив этот ток на напряжение ТАБ получим полную потребляемую электрическую мощность $N_{вэд} = 6810$ Вт.

Для расчета удельного потребления электрической энергии равномерно движущимся гибридным автомобилем в режиме электропривода имеем:

$$Q_a = \frac{W}{S} = \frac{N_{вэд} t}{S} = \frac{N_{вэд}}{V},$$

где Q_a – удельное потребление электрической энергии гибридным автомобилем в режиме электропривода; W – израсходованная электрическая энергия; S – путь, на котором израсходована эта энергия; $N_{вэд}$ – средняя потребляемая электрическая мощность ВЭД на этом пути; t – время прохождения этого пути.

При такой полученной потребляемой мощности и полученной максимальной скорости имеем удельный расход электроэнергии 0,1135 кВт·ч/км, или 11,35 кВт·ч/100 км. Полученный удельный расход электроэнергии примерно соответствует удельным расходам электроэнергии современных электромобилей. Допустимо длительное время ехать с максимальной скоростью на электроприводе с достаточно высокой экономичностью. При этом потребляемый ток будет около 80 А, что даст слабый нагрев ВЭД, поскольку предельный ток в длительном режиме для ВЭД на основе синхронной электрической машины Г290 равен 150 А [9].

Сравнение этих расчетных значений с результатами, полученными во время экспериментальных пробегов, показало хорошее совпадение результатов расчета с экспериментом. Требуемая емкость ТАБ будет:

$$C_{ТАБ} = \frac{S_{рд}}{Q_a} - W_{рек},$$

где $S_{рд}$ – дневной пробег без пути разгона и без пути торможения, а также без пути, пройденного накатом; $W_{рек}$ – энергия, возвращенная в ТАБ при рекуперации.

Обоснование предложенного алгоритма работы силовой установки гибридного автомобиля

Проведенные расчеты показывают, что равномерное движение гибридного автомобиля в режиме электропривода возможно до скорости более 60 км/ч. Старт с мест и набор скорости происходит относительно медленно и не соответствует требованиям к динамике при движении легкового автомобиля в сво-

бодной дорожной обстановке. Следовательно, старт с места и разгон на ДВС в большинстве случаев надо проводить до скорости по крайней мере 30 – 50 км/ч и затем переходить на тяговый электропривод. Поскольку при ограничении тока крутящий момент постоянный, при скорости выше 30 – 50 км/ч мощность электродвигателя растет и становится достаточной, чтобы гибридный автомобиль не выпадал из транспортного потока. Однако в случае движения в заторе или при движении во дворах, помещениях складов, цехов, когда не нужны высокие скорости и ускорения, движение на электроприводе становится не только удобным для водителя (пользоваться можно только педалями газа и тормоза), но и экономным, так как на таких скоростях удельный расход электроэнергии будет небольшим, в отличие от удельного расхода топлива на ДВС. Кроме того, нет загрязнения окружающей среды выхлопными газами, что особенно важно при движении в помещениях.

По сравнению с подзаряжаемыми гибридными автомобилями увеличивается пробег на одной зарядке в гибридном режиме, что позволяет существенно сократить емкость ТАБ, а значит, также стоимость и вес ТАБ.

По сравнению с автомобилями с системой старт-стоп, стало возможным отказаться от принудительного холостого хода ДВС, тем самым улучшить накат и повысить эффективность рекуперации.

Экспериментальные исследования, проведенные на подзаряжаемом микрогибридном автомобиле на основе автомобиля Ланос-пикап с системой управления, работающей с использованием рассмотренного алгоритма, показали хорошее соответствие экспериментальных результатов расчетным.

Выводы

Реализация разработанного алгоритма позволяет создать гибридную силовую установку микрогибридного автомобиля, позволяющую улучшить экономические и экологические параметры, а также позволяет добиться низкой стоимости микрогибридного автомобиля по сравнению с гибридными автомобилями. Данный алгоритм работы позволит также снизить время зарядки, улучшить тепловой режим ДВС и снизить не только стоимость, но и вес микрогибридного автомобиля. Полученные теоретические и экспериментальные результаты имеют практическое значение для транспортной отрасли.

Литература

1. Ning D., Prasad K., Lie T. The electric vehicle: a review. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*. Vol. 9 (1), 2017. С. 49–66.
2. Бажинов О. В., Смирнов О. П., Серіков С. А., Гнатів А. В., Колесніков А. В. *Гібридні автомобілі*. Харків, 2008. 327 с.
3. Dvadnenko V., Arhun Shch., Bogajevskiy A., Ponikarovska S. Improvement of economic and ecological characteristics of a car with a start-stop system. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, 2018. Vol. 10, № 3, pp. 209–222. doi: 10.1504/IJEHV.2018.097377.
4. Гиббс Н. Плагин-гибриды будут преобладать среди автомобилей с электрифицированным приводом в Европе. *Журнал Автомобильных Инженеров*. 2015. № 6 (95). С. 20–21.
5. Travis F., Ryan J., Evan G., Joshua C. Hwan-Sik Y. Effect of an electric vehicle mode in a plug-in hybrid electric vehicle with a post-transmission electric motor. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*. Vol. 8 (4). 2016. С. 289–301.
6. Dvadnenko V. Hybrid Vehicle Control System. *Автомобільний транспорт*: сб. науч. тр. 2016. Вып. 38. С. 149–154.
7. Двадненко В. Я., Математическая модель конверсионного гибридного автомобиля в режиме электропривода. *Вестник ХНАДУ*. 2016. Выпуск 72. С. 41 – 48.
8. Волков В. П. Теорія експлуатаційних властивостей автомобіля. Харків, 2003. 292 с.
9. Двадненко В. Я. Расчет основных характеристик тягового вентильного электродвигателя на базе автомобильного генератора. *Автомобільний транспорт*. 2014. Вып. 35. С. 80–86.
10. Бажинов О. В., Двадненко В. Я. Автомобільні гібридні силові установки. Харків, 2016. 186 с.

References

1. Ning D., Prasad K., Lie T. (2017). The electric vehicle: a review. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*. 9 (1), 49–66.
2. Bazhynov O. V., Smyrnov O. P., Sierikov S. A., Hnatov A. V., Koliessnikov A. V. (2008) Hibrydni avtomobili [Hybrid cars]. Kharkiv. [in Ukrainian]
3. Dvadnenko V., Arhun Shch., Bogajevskiy A., Ponikarovska S. (2018). Improvement of economic and ecological characteristics of a car with a start-stop system. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*. 10(3). 209–222.
4. Gibbs N. (2015). Plagin-gibridyi budut pre-obladat sredi avtomobiley s elektrifitsiro-vannyim privodom v Evrope [PHEV will prevail among electrically powered cars in Europe]. *Zhurnal Avtomobilnyih Inzhenerov*. 6 (95). 20–21. [in Russian].
5. Travis F., Ryan J., Evan G., Joshua S. Hwan-Sik Y. (2016). Effect of an electric vehicle mode in a plug-in hybrid electric vehicle with a post-transmission electric motor. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*. 8 (4). 289–301.

6. Dvadenko V. (2016). Hybrid Vehicle Control System. Avtomobilnyi transport: sb. nauch. tr. 38. 149–154.
7. Dvadenko V. Ya. (2016). Matematicheskaya model konversionnogo gibridnogo avtomobilya v rezhime elektroprivoda [A mathematical model of a conversion hybrid vehicle in electric drive mode]. Vestnik HNADU. 72. 41 – 48. [in Russian]
8. Volkov V. P. (2003) Teoriia ekspluatatsiinykh vlasty-vostei avtomobilya [The theory of performance properties of auto-mobile]. Kharkiv. [in Ukrainian]
9. Dvadenko V. Ya. (2014) Raschet osnovnykh kharakteristik tyagovogo ventilnogo elektrodvigatelya na baze avtomobilnogo generatora [Calculation of the main characteristics of a brushless electric traction motor based on a car generator]. Avto-mobilnyi transport, 35, 80–86. [in Russian].
10. Bazhynov O. V., Dvadenko V. Ya. (2016) Avtomobilni hibrydni sylovi ustanovky [Automobile hybrid power plants]. Kharkiv. [in Ukrainian].

Двадненко Владимир Яковлевич¹, д.т.н., проф. каф. автомобильной электроники, тел. +38 067-733-04-41, dvadenkovladimir@gmail.com,

Пушкар Олег Борисович¹, аспирант, каф. автомобильной электроники, тел. +38 095-246-30-07, oleg.pushkar83@gmail.com
¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Украина, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.

Поліпшення економічних і екологічних характеристик мікрогібридного автомобіля

Анотація. Показано перспективність у сучасних умовах гібридних автомобілів з підзарядкою. Відзначено недоліки таких автомобілів: висока вартість і істотно збільшена вага. Для зниження вартості і ваги гібридного автомобіля запропоновано новий алгоритм роботи двигунів силової установки. У пропонуваному автомобілі в гібридному режимі для мінімізації потужності тягового електроприводу режими роботи ДВЗ з малим навантаженням, але з високою питомою витратою палива, замінені на рух з електроприводом. Це повільний рух на низьких передачах, коли малі як швидкості, так і прискорення, а також рівномірний рух з відносно невисокою швидкістю (50–60 км / г) по асфальтованій дорозі без помітного підйому. Також виключений режим холостого ходу ДВЗ. Розглянуто методику розрахунку режиму електроприводу гібридного автомобіля, із запропонованим алгоритмом роботи силової установки. Наведено та проаналізовано результати розрахунку основних характеристик гібридного автомобіля. Проведені розрахунки показують, що рівномірний рух гібридного автомобіля в режимі електроприводу можливий до швидкості 60 км / г. Однак старт з місця і набір

швидкості відбувається відносно повільно і не відповідає сучасним вимогам до динаміки при русі легкового автомобіля у відносно вільних дорожніх умовах. Отже, розгін на ДВЗ треба проводити до швидкості принаймні до 30 – 50 км/г і переходити на тяговий електропривод. При швидкості вище 30 – 50 км/г передавальне число від вала електродвигуна до коліс стає достатнім, щоб гібридний автомобіль не випадав з транспортного потоку. Однак в разі руху в заторах, при русі у дворах, приміщеннях складів або цехів, коли не потрібні високі швидкості і прискорення, рух на електроприводі стає не тільки зручним для водія, але і економічним, оскільки в таких умовах питомо витрата електроенергії буде невеликою, на відміну від питомої витрати палива на ДВЗ. Крім того, немає забруднення навколишнього середовища вихлопними газами, що особливо важливо при русі в приміщеннях. Експериментальні дослідження, проведені на гібридному автомобілі з підзарядкою на основі автомобіля Ланосікап, показали хорошу відповідність експериментальних результатів розрахунковим. Показано доцільність та ефективність запропонованого алгоритму.

Ключові слова: алгоритм роботи двигунів гібридного автомобіля, розрахунок гібридного автомобіля, вентильний електродвигун, гібридний автомобіль з підзарядкою, тяговий електропривод, гібридна силова установка.

Двадненко Володимир Якович¹, д.т.н., проф. каф. автомобильной электроники, тел. +38 067-733-04-41, dvadenkovladimir@gmail.com,

Пушкар Олег Борисович¹, аспирант, каф. автомобильной электроники, тел. +38 095-246-30-07, oleg.pushkar83@gmail.com

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Improving the economic and environmental characteristics of a microhybrid car

Abstract. The prospects of PHEV in modern conditions is shown. The disadvantages of such cars are noted: high cost and the significantly increased weight. To reduce the cost and weight of the hybrid car, a new algorithm for the operation of the engines of the power plant is proposed. In the proposed car, in order to minimize the power of the traction electric drive in hybrid mode, the ICE operating modes with low load but with high specific fuel consumption are replaced by electric drive. This is a slow movement in low gears, when both speed and acceleration are small, as well as uniform movement with a relatively low speed (50-60 km / h) on an asphalt road without a noticeable rise. Also idle mode of engine is excluded. The methodology for calculating the electric drive mode of a hybrid car with the proposed algorithm of the power plant is considered. The results of the calculation of the main characteristics of a hy-

brid car are presented and analyzed. The calculations performed show that uniform movement of a hybrid car in electric drive mode is possible up to a speed of 60 km/h. Starting from rest and accelerating is relatively slow and does not meet modern requirements for dynamics when a car is moving in a relatively free road environment. Therefore, acceleration on the internal combustion engine must be carried out to a speed of at least 30-50 km/h and then switched to a traction electric drive. At speeds above 30 - 50 km/h, the gear ratio from the electric motor shaft to the wheels becomes sufficient for the hybrid car not to fall out of the traffic stream. However, when moving in traffic jams, in the yards, in the warehouses or workshops, when high speeds and accelerations are not needed, driving on an electric drive becomes not only convenient for the driver, but also economical, since at such speeds the specific energy consumption will be small, unlike specific fuel consumption on internal combustion engines. In addition, there is no environmental pollution by exhaust

gases, which is especially important when driving indoors. Experimental studies conducted on a rechargeable hybrid car based on a Lanos pickup car showed good accord between experimental and calculated results. The expediency and effectiveness of the proposed algorithm is shown.

Keywords: hybrid car engine operation algorithm, PHEV, hybrid car calculation, valve electric motor, rechargeable hybrid car, traction electric drive, hybrid power plant.

Dvadnenko Vladimir Yakovlevich¹, Doctor of Engineering, prof. cafe automotive electronics, tel. +38 067-733-04-41, dvadnenkovladimir@gmail.com,

Pushkar Oleg Borisovich¹, graduate student, department automotive electronics, tel. +38 095-246-30-07, oleg.pushkar83@gmail.com

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkov, 61002, Ukraine.
