

УДК 621.313.333

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНВЕРСИОННОГО ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ В РЕЖИМЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В.Я. Двадненко, доц., к.т.н.,

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Предложена методика расчета конверсионного гибридного автомобиля в режиме электропривода. Приведены и проанализированы результаты расчета основных характеристик гибридного автомобиля.

Ключевые слова: расчет гибридного автомобиля, вентильный электродвигатель, конверсия автомобиля, электропривод, результаты расчета гибридного автомобиля.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОНВЕРСІЙНОГО ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ В РЕЖИМІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

В.Я. Двадненко, доц., к.т.н.,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Запропоновано методику розрахунку конверсійного гібридного автомобіля в режимі електропривода. Наведено та проаналізовано результати розрахунку основних характеристик гібридного автомобіля.

Ключові слова: розрахунок гібридного автомобіля, вентильний електродвигун, конверсія автомобіля, електропривід, результати розрахунку гібридного автомобіля.

MATHEMATICAL MODEL OF THE CONVERSION HYBRID CAR IN THE ELECTRIC DRIVE MODE

V. Dvadnenko, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.),

Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. The method of design of a conversion hybrid vehicle in the electric motor mode is offered. The results of calculation of the basic characteristics of a hybrid car are presented and analyzed.

Key words: calculation of the hybrid vehicle, BLDC motor, vehicle conversion, electric drive, results of hybrid car design.

Введение

В условиях интенсивного городского движения автомобиль вынужден двигаться со сравнительно невысокой скоростью, часто останавливаться и, затем, трогаться с места. Использование двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в автомобиле для старта связано с необходимостью иметь режим холостого хода, а движение на низких скоростях на сравнительно мощном двигателе приводит к неэкономичным режимам работы такого двигателя. В результате в городских услови-

ях имеет место увеличенный расход топлива и велики вредные выбросы. Переоборудование (конверсия) обычного автомобиля в подзаряжаемый гибридный автомобиль позволяет улучшить экономичность и экологические параметры автомобиля.

Анализ публикаций

Хорошее соотношение цена/качество на вложенные в доработку простого автомобиля средства дает, как показано в работе [1], введение относительно недорогого электропри-

вода с питанием от тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ), подзаряжаемой от электрической сети. Это является фактически переоборудованием такого автомобиля в параллельный гибридный автомобиль с внешней подзарядкой (PHEV, Plug-in Hybrid Electric Vehicle) [2]. Такие автомобили получают все большее распространение среди гибридных потому, что совершенствование аккумуляторных батарей привело к росту пробега гибридного автомобиля на электрическом приводе. Когда этот побег стал сравним со средним дневным пробегом, стало целесообразным производить зарядку ТАБ за счет существенно более дешевой энергии сети переменного тока, в том числе в ночное время [2].

Для конверсии в подзаряжаемый гибридный автомобиль в качестве базового имеет смысл взять недорогой автомобиль с механической коробкой передач (МКП), установить тяговый электродвигатель и обеспечить кинематическую связь его вала с вторичным валом МКП. При этом целесообразно организовать систему управления гибридного автомобиля так, чтобы сохранить возможность использования этого автомобиля и как обычного бензинового автомобиля. В качестве ТАБ по совокупности параметров наиболее подходят литий-ионные аккумуляторы. Емкость ТАБ (количество энергии, запасенной в ТАБ во время зарядки от сети) может быть оптимизирована и выбирается с учетом наиболее вероятного дневного пробега, который желательно проделать в гибридном режиме. При этом появляется возможность оптимизировать затраты на конверсию с учетом режима эксплуатации конкретного автомобиля [1].

Цель и постановка задачи

Целесообразность проведения конверсии может быть обоснована только оценкой достижимых технических характеристик конверсионного гибридного автомобиля. Следовательно, возникает необходимость проведения расчёта основных параметров переоборудованного автомобиля.

Целью данной работы является разработка методики расчета основных характеристик такого автомобиля, а именно: мощности электропривода, времени разгона на электроприводе, расчета расходуемой электроэнергии, максимальной скорости на электроприводе и т.д.

Расчет гибридного автомобиля в режиме электропривода

Такое переоборудование автомобиля «Ланос-пикап» проведено на кафедре автомобильной электроники Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Переход в низкоскоростных режимах на электропривод позволяет часть пути, которая при движении на ДВС наиболее неэкономична и сопровождается наибольшими вредными выбросами, преодолевать с помощью электропривода за счет дешевой электрической энергии, взятой из электрической сети.

Электропривод конверсионного гибридного автомобиля имеет сравнительно небольшую мощность. Такой выбор обусловлен относительно небольшим запасом электроэнергии в ТАБ, который, в свою очередь, связан с требованием обеспечить при конверсии невысокую стоимость и небольшой вес дополнительного оборудования. Электропривод используется, как правило, для старта и движения при низких скоростях, которые требуют небольших токов от ТАБ. При этом, благодаря отсутствию холостого хода и высокому КПД электродвигателя, эффективно используется запас дешевой электрической энергии, имеющийся на борту автомобиля. Это существенно уменьшает расход бензина.

Расчет мощности электропривода конверсионного гибридного автомобиля

Выберем для движения на электроприводе интервал скоростей от 0 до 40 км/ч. На скорости 40 км/ч, как будет показано ниже, требуется небольшая мощность электродвигателя. При этом на такой скорости, как показывает эксперимент, кинетическая энергия движущегося автомобиля достаточно велика, для того чтобы можно было незаметно для водителя и пассажиров использовать часть этой кинетической энергии для запуска ДВС.

Рассмотрим расчет основных параметров конверсионного автомобиля в режиме электропривода. Для этого используем силовой баланс [3]

$$P_T = P_K + P_{\Pi} + P_B + P_{и},$$

где P_T – сила тяги; P_K – сила сопротивления качению; P_{Π} – сила сопротивления подъему;

P_b – сила сопротивления воздуха; P_n – сила инерции (сила сопротивления разгону). Используем обозначение P_d – сила сопротивления дороги:

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

где G_a – 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

$$P_m = \psi G_a + \frac{1}{2} C_x A \rho_b V^2 + \frac{1}{g} G_a \delta a, \quad (1)$$

где δ – коэффициент учета вращающихся масс; a – ускорение автомобиля; V – скорость автомобиля; ρ_b – плотность воздуха; C_x – коэффициент обтекаемости; A – лобовая площадь автомобиля; g – ускорение свободного падения.

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

$$N_t = N_d + N_b + N_n,$$

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

$$N_t = \psi G_a V + \frac{1}{2} C_x A \rho_b V^3 + \frac{1}{g} G_a \delta a V. \quad (2)$$

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

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

Зависимость необходимой механической мощности электродвигателя от требуемой максимальной скорости при различных углах подъема дороги для автомобиля «Ланос-пикап» на дороге с асфальтобетонным покрытием приведена на рис. 1.

Кривые 1, 2, 3, 4, 5 и 6 соответствуют движению конверсионного автомобиля на подъемах 0, 1, 2, 3, 4 и 5 %.

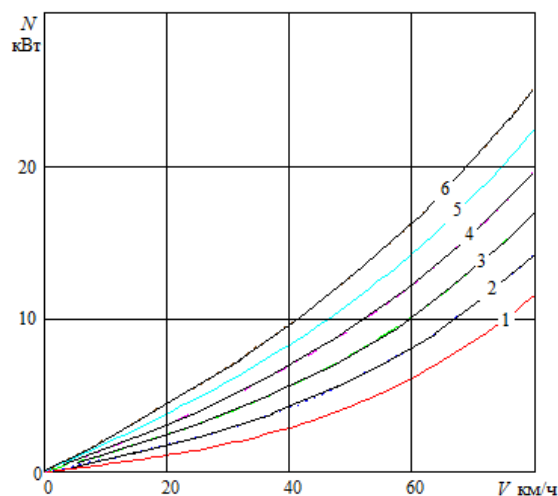


Рис. 1. Зависимость необходимой механической мощности электродвигателя от требуемой максимальной скорости при различных углах подъема дороги

Из выражения (3) можно получить механическую мощность электродвигателя, требуемую для того чтобы конверсионный гибридный автомобиль «Ланос-пикап» набирал на асфальтированной дороге скорость 40 км/ч. На горизонтальном участке получаем 2,872 кВт, на подъеме 5 % достичь скорости 40 км/ч можно при мощности электродвигателя 9,661 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 низких передачах.

Расчет коэффициента передачи

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

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

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

$$P_T = \frac{M_\omega(V) i_{\text{эк}} i_{\text{гп}} \eta_{\text{тр}}}{r_k}, \quad (5)$$

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

Построим на одном графике (рис. 2) семейство зависимостей для выражения (4) и семейство зависимостей для выражения (5). Используем для кривых, полученных из выражения (4), следующие обозначения: кривая P_{c1} соответствует горизонтальной дороге, P_{c2} – подъему 1 %, P_{c3} – подъему 2 %, P_{c4} – подъему 3 %, P_{c5} – подъему 4 %, P_{c6} – подъему 5 %. Зависимость от скорости значения момента на валу электродвигателя $M_\omega(V)$ в выражении (5) рассчитаем по методике построения внешней механической характеристики электродвигателя, предложенной в работе [4]. При этом используем синхронную электрическую машину Г290 и выберем напряжение ТАБ, равное 65 В.

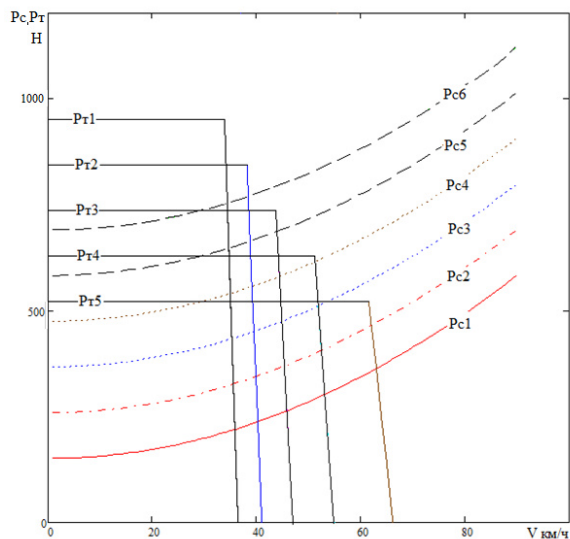


Рис. 2. Зависимость силы тяги электропривода для различных передаточных чисел и силы сопротивления движению для различных уклонов от скорости конверсионного гибридного автомобиля

Используем для кривых, полученных из выражения (5), следующие обозначения: кривая P_{T1} соответствует передаточному числу от вала электродвигателя к ведущим колесам $i_{\text{эк}} i_{\text{гп}} = 8,88$, зависимость P_{T2} – 7,88, зависи-

мость P_{T3} – 6,88, зависимость P_{T4} – 5,88, зависимость P_{T5} – 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. 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 $P_{\text{и}}$.

Для выбора оптимального передаточного числа между электродвигателем и ведущими колесами автомобиля заметим, что по графику на рис. 2 при уклоне 4 % скорость 40 км/ч может быть достигнута с передаточными числами 6,88 и 7,88. Сделаем небольшой запас по скорости, для чего выберем передаточное число 6,88. Такое передаточное число для автомобиля «Ланос-пикап» с передаточным числом главной передачи 4,133 получается с передаточным числом поликлиновой ременной передачи между электродвигателем и вторичным валом коробки передач, равным 1,67 (диаметры шкивов соответственно 120 и 200 мм). Точка пересечения кривых P_{T3} и P_{c5} находится на падающем участке механической характеристики, что обеспечивает устойчивость к воздействию на автомобиль малых возмущений.

Расчет времени разгона

Рассчитаем время достижения скорости $V_1 = 40$ км/ч при старте с места на ровной дороге. Как видно из рис. 2, на ровной дороге вращающий момент электродвигателя, а значит, и сила тяги на участке от 0 и до 40 км/ч остается постоянной. Обусловлено это работой системы автоматического регулирования (САР), которая ограничивает (стабилизирует) предельный фазовый ток. Такая работа САР имеет место на указанном интервале потому, что 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

$$t_P = \int_0^{V_1} \frac{1}{a} dV = \int_0^{V_1} \frac{\delta G}{g(P_T - P_B - \psi G)} dV.$$

Введем обозначения:

$$d = P_T - \psi G = (1/r_k) M_{\Sigma} i_{\text{ГП}} i_{\text{ЭК}} \eta_{\text{ГП}} - \psi G;$$

$$b = 0,5 C_{\text{хрв}} A;$$

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 $M_{\Sigma} = 30$ Н·м при токе якоря 150 А, который может быть длительное время, или имеем вращающий момент примерно $M_{\Sigma} = 40$ Н·м при токе якоря 230 А (такой ток может быть кратковременным (до 1 минуты)). При расчете использовались следующие численные параметры: $G = 11000$ Н; $\delta = 1,05$; $\psi = 0,014$; $C_{\text{хрв}} = 0,38$; $r_k = 0,284$ м; $i_{\text{ГП}} i_{\text{ЭК}} = 6,88$; $\eta_{\text{ГП}} = 0,92$; $\rho_{\text{в}} = 1,29$ кг/м³; $A = 2,6$ м²; $V_1 = 11,11$ м/с. Для $M_{\Sigma} = 30$ Н·м расчетное время разгона 26,7 с. Для $M_{\Sigma} = 40$ Н·м расчетное время разгона 18,3 с. Опытная эксплуатация конверсионного гибридного автомобиля показала хорошее совпадение экспериментальных данных с результатами расчета [5].

При движении в городских условиях такие возможности электропривода обеспечивают нормальную эксплуатацию гибридного автомобиля. Однако в некоторых случаях, например, при старте на крутом подъеме или на дороге с большими выбоинами, электропривод может иметь недостаточный момент на колесах, поскольку электродвигатель свя-

зан с ведущими колесами постоянным передаточным отношением (без коробки передач). Однако это не создает проблем при эксплуатации, так как конверсионный гибридный автомобиль сохраняет в полном объеме динамические возможности, которые он имел до конверсии, поскольку в полном объеме можно использовать ДВС. Быстрый запуск ДВС при включении передачи происходит автоматически, благодаря работе системы «старт-стоп» гибридного автомобиля. При необходимости более быстрого, чем с электроприводом, набора скорости также можно воспользоваться ДВС с переключением передач. Кроме того, для еще более быстрого набора скорости можно воспользоваться разгоном автомобиля при совместном использовании ДВС с переключением передач и непрерывно работающего электродвигателя.

Расчет количества электрической энергии и пути разгона

Рассчитаем количество электрической энергии W , израсходованной конверсионным автомобилем «Ланос-пикап» на разгон с места до скорости 40 км/ч. Энергию, затраченную при таком разгоне, можно представить в виде двух слагаемых: энергии, затраченной на разгон, с учетом КПД трансмиссии $\eta_{\text{ГП}}$ и КПД импульсного стабилизатора (ограничителя) якорного тока $\eta_{\text{от}}$, и энергии, потраченной на нагрев ВЭД за счет активного сопротивления обмотки якоря

$$W = \frac{S_{40} P_T}{\eta_{\text{от}} \eta_{\text{ГП}}} + \frac{R_{\text{я}}}{\eta_{\text{от}}} I_{\text{ямакс}}^2 t_1, \quad (7)$$

где S_{40} – путь, пройденный от старта до момента достижения скорости 40 км/ч; $R_{\text{я}}$ – суммарное активное сопротивление якорной цепи; $I_{\text{ямакс}}$ – максимальный ток якорной цепи.

Остается еще энергия, потраченная в ВЭД на потери в подшипниках, вентиляционные потери и магнитные потери. Ввиду малости этой энергии, будем ею пренебрегать. Чтобы найти путь, пройденный от старта до момента достижения скорости 40 км/ч, воспользуемся интегральным выражением

$$S_{40} = \int_0^{t_1} V(t) dt = \int_0^{t_1} a(t) t dt, \quad (8)$$

где t_1 – время разгона до скорости 40 км/ч.

Ускорение автомобиля a вычислим аналогично тому, как это сделано при получении выражения (6), однако, пользуясь сравнительно малой частью энергии, расходуемой на преодоление сопротивления воздуха в этом интервале скоростей, применим линейную аппроксимацию зависимости силы сопротивления воздуха от времени.

Такая аппроксимация (показана на рис. 2 для зависимости P_{c1} пунктиром) внесет незначительную погрешность при вычислении пути, пройденного до достижения скорости 40 км/ч, но позволит упростить расчет. В этом случае имеем ускорение автомобиля

$$a = \frac{g \left(\frac{k\Phi I_{\text{ямакс}} i_{\text{эк}} i_{\text{гп}} \eta_{\text{тр}}}{r_k} - \frac{P_{\text{в40}}}{t_1} t - \psi G_a \right)}{\delta G_a},$$

где $P_{\text{в40}}$ – сила сопротивления воздуха при скорости 40 км/ч. Тогда имеем

$$S_{40} = \frac{g}{\delta G_a} \int_0^{t_1} \frac{k\Phi}{r_k} I_{\text{ямакс}} i_{\text{эк}} i_{\text{гп}} \eta_{\text{тр}} t dt - t - \frac{g}{\delta G_a} \int_0^{t_1} \frac{P_{\text{в40}}}{t_1} t^2 dt - t - \frac{g}{\delta G_a} \int_0^{t_1} \psi G_a t dt. \quad (9)$$

Или (после сведения к табличным интегралам) –

$$S_{40} = \frac{g}{\delta G_a} \frac{k\Phi}{r_k} I_{\text{ямакс}} i_{\text{эк}} i_{\text{гп}} \eta_{\text{тр}} \int_0^{t_1} t dt - t - \frac{g}{\delta G_a} \frac{P_{\text{в40}}}{t_1} \int_0^{t_1} t^2 dt - \frac{g\psi}{\delta} \int_0^{t_1} t dt.$$

После интегрирования и подстановки пределов имеем

$$S_{40} = \frac{gt_1^2}{2\delta} \frac{k\Phi}{G_a r_k} I_{\text{ямакс}} i_{\text{эк}} i_{\text{гп}} \eta_{\text{тр}} - \frac{gt_1^2}{3\delta} \frac{P_{\text{в40}}}{G_a} - \frac{gt_1^2 \psi}{2\delta}. \quad (10)$$

Подставляя указанные выше и полученные численные значения для экспериментального конверсионного автомобиля «Ланос-пикап», имеем путь разгона, равный 131,68 м.

$$S_{40} = 194,06 - 15,82 - 46,55 = 131,68 \text{ м.}$$

Более точное значение пути разгона можно получить, если линейную аппроксимацию параболы выполнить на более коротких отрезках времени (скорости).

Для этого, например, отрезок $t \in (0, t_1)$ нужно разбить на два отрезка $t \in (0, t_{11})$, $t \in (t_{11}, t_1)$, где $0 < t_{11} < t_1$. 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 40 км/ч постоянна, имеем

$$W = S_{40} \frac{k\Phi I_{\text{ямакс}} i_{\text{эк}} i_{\text{гп}}}{r_k \eta_{\text{от}} \eta_{\text{тр}}} + R_{\text{я}} I_{\text{ямакс}}^2 t_1. \quad (11)$$

Расчёт количества электрической энергии, израсходованной конверсионным автомобилем «Ланос-пикап» на разгон с места до скорости 40 км/ч, по формуле (11), при подстановке соответствующих численных значений, дает: $110956,3 + 18022,5 = 128978,8$ Дж, или 0,0358 кВт·ч.

Сравнение этих расчетных значений с результатами, полученными на бортовом счетчике ватт-часов во время экспериментальных пробегов, показало хорошее совпадение результатов расчета с экспериментом.

Расчет максимальной скорости и расчет удельного потребления электроэнергии

Для расчета максимальной скорости конверсионного гибридного автомобиля на электроприводе приравняем сумму сил сопротивления дороги и сопротивления воздуха силе тяги, создаваемой ВЭД на падающем участке механической характеристики. При этом отметим устойчивость этого равновесия к произвольным малым возмущениям. Действительно, любое изменение скорости вызывает изменение силы тяги, компенсирующее это изменение скорости, вследствие чего происходит восстановление равновесия. Причиной этого является падающий характер зависимости силы тяги от скорости.

$$\psi G_a + \frac{1}{2} C_x A \rho_{\text{в}} V^2 = \frac{M_3(V) i_{\text{эк}} i_{\text{гп}} \eta_{\text{тр}}}{r_k}. \quad (12)$$

Воспользуемся уравнением механической характеристики ВЭД

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

из которого получим выражение для момента

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

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

$$\begin{aligned} \psi G_a + \frac{1}{2} C_x A \rho_{\text{в}} V^2 = \\ = \frac{i_{\text{эк}}i_{\text{гп}}\eta_{\text{тр}}(k\Phi)^2}{R_{\text{я}}r_{\text{к}}} \left(\frac{U}{k\Phi} - \frac{Vi_{\text{эк}}i_{\text{гп}}}{r_{\text{к}}} \right). \end{aligned}$$

После преобразований имеем

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} C_x A \rho_{\text{в}} V^2 + \frac{(k\Phi)^2 (i_{\text{эк}}i_{\text{гп}})^2 \eta_{\text{тр}}}{R_{\text{я}}r_{\text{к}}^2} V + \\ + \psi G_a - \frac{k\Phi U i_{\text{эк}}i_{\text{гп}} \eta_{\text{тр}}}{R_{\text{я}}r_{\text{к}}} = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

В полученное квадратное уравнение относительно скорости V подставляем численные значения конверсионного автомобиля: $G_a = 11000$ Н, $R_{\text{я}} = 0,03$ Ом, $\psi = 0,014$, $C_x = 0,38$, $r_{\text{к}} = 0,284$ м, $i_{\text{гп}}i_{\text{эк}} = 6,88$, $\eta_{\text{тр}} = 0,92$, $\rho_{\text{в}} = 1,29$ кг/м³, $A = 2,6$ м², $U = 65$ В, $k\Phi = 0,192$, и находим корни этого уравнения, один из которых будет являться максимально достижимой скоростью на электроприводе

$$\begin{aligned} V_{\text{макс}} = V_{1,2} = \frac{-670 \pm \sqrt{(670^2 + 4 \cdot 0,637 \cdot 9218)}}{2 \cdot 0,637} = \\ = \frac{-670 \pm 687}{2 \cdot 0,637} = 13,34 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

Выбран положительный корень, который дает скорость 13,34 м/с, или 48 км/ч. Экспериментально достигнутая максимальная скорость конверсионного автомобиля на электроприводе 45 км/ч. Учитывая то обстоятельство, что в реальности радиус колеса, коэффициент сопротивления дороги и т.д. могут иметь неточные значения, считаем, что полученное расчетное значение макси-

мальной скорости хорошо совпадает с экспериментом.

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

$$Q_a = \frac{W}{S} = \frac{N_{\text{ВЭД}}t}{S} = \frac{UI_{\text{ВЭД}}t}{S} = \frac{UI_{\text{ВЭД}}}{V_{\text{макс}}},$$

где Q_a – удельное потребление электрической энергии гибридным автомобилем в режиме электропривода; W – израсходованная электрическая энергия; S – путь, на котором израсходована эта энергия; $N_{\text{ВЭД}}$ – средняя потребляемая электрическая мощность ВЭД на этом пути; $I_{\text{ВЭД}}$ – средний ток, потребляемый ВЭД на этом пути; t – время прохождения этого пути. Для нахождения тока ВЭД воспользуемся уравнением токоскоростной характеристики ВЭД

$$\omega = \frac{V_{\text{макс}}i_{\text{эк}}i_{\text{гп}}}{r_{\text{к}}} = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}}I_{\text{ВЭД}}}{k\Phi}.$$

Откуда получим выражение для тока

$$I_{\text{ВЭД}} = \frac{U_{\text{ТАБ}} - \frac{V_{\text{макс}}k\Phi i_{\text{эк}}i_{\text{гп}}}{r_{\text{к}}}}{R_{\text{я}}}.$$

После подстановки ранее приведенных численных значений для конверсионного автомобиля «Ланос-пикап» проводим вычисления и получаем ток якоря при максимальной скорости $I_{\text{ВЭД}} = 98,3$ А. Вместе с током обмотки возбуждения, которая питается также от ТАБ, имеем общий ток около 100 А. Умножив этот ток на напряжение ТАБ, получим полную потребляемую электрическую мощность 6500 Вт.

Выводы

При полученной потребляемой мощности и полученной максимальной скорости 13,34 м/с имеем удельный расход электроэнергии 487256 Дж/км, или 0,135 кВт·ч/км, или 13,5 кВт·ч/100 км. Этот результат говорит о том, что можно длительное время ехать на максимальной скорости на электроприводе; при этом получаем высокую экономичность и слабый нагрев ВЭД (предельный ток

в длительном режиме для ВЭД 150 А). Сравнение этих расчетных значений с результатами, полученными во время экспериментальных пробегов, показало хорошее совпадение результатов расчета с экспериментом.

Литература

1. Бажинов О.В. Конверсія легкового автомобіля в гібридний / О.В. Бажинов, В.Я. Двадненко, М. Хакім. – Х.: ХНАДУ, 2014. – 200 с.
2. Ник Гиббс. Плагин-гибриды будут преобладать среди автомобилей с электрофицированным приводом в Европе. Automotive News Europe / Ник Гиббс // Журнал Автомобильных Инженеров. – 2015. – № 6 (95). – С. 20–21.
3. Говорущенко Н.Я. Техническая эксплуатация автомобилей / Н.Я. Говорущенко. – Х.: Вища школа, 1984. – 312 с.
4. Двадненко В.Я. Расчет основных характеристик тягового вентильного электродвигателя на базе автомобильного генератора / В.Я. Двадненко // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2014. – Вып. 35. – С. 80–86.
5. Бажинов А.В. Экспериментальное исследование бензинового автомобиля, конвертированного в гибридный / А.В. Бажинов, В.Я. Двадненко, С.А. Сериков // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2014. – Вып. 67. – С. 63–68.

Рецензент: А.В. Бажинов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 31 марта 2016 г.