

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГИБРИДНОЙ УСТАНОВКИ АВТОМОБИЛЯ

В.Я. Двадненко, доцент, к.т.н., А.М. Дробинин, студент, ХНАДУ

***Аннотация.** Рассмотрен вопрос возможности конвертирования автомобиля с двигателем внутреннего сгорания в гибридный. Предложен и теоретически обоснован метод выбора электродвигателя и расчета основных его характеристик при работе в электроприводе гибридного автомобиля.*

***Ключевые слова:** гибридный автомобиль, гибридная силовая установка, электропривод, вентильный электродвигатель.*

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ ГІБРИДНОЇ УСТАНОВКИ АВТОМОБІЛЯ

В.Я. Двадненко, доцент, к.т.н., О.М. Дробінін, студент, ХНАДУ

***Анотація.** Розглянуто питання можливості конвертації автомобіля з двигуном внутрішнього згорання в гібридний. Запропоновано та теоретично обґрунтовано метод вибору електродвигуна і розрахунку основних його характеристик при роботі в електроприводі гібридного автомобіля.*

***Ключові слова:** гібридний автомобіль, гібридна силова установка, електропривод, вентильний електродвигун.*

COMPONENTS OPTIMIZATION FOR HYBRID VEHICLE SYSTEMS

V. Dvadnenko, associate professor, cand. eng. sc., A. Drobinin, student, KhNAHU

***Abstract.** The question of the possibility of converting a car with a combustion engine in hybrid was considered. Method for selecting electric motor and calculation its main characteristics for work in electric hybrid car was proposed and theoretically substantiated.*

***Key words:** hybrid car, hybrid power plant, electric drive, brushless electric motor.*

Введение

Основные причины применения гибридной силовой установки – уменьшение расхода топлива количества вредных выбросов в атмосферу. Это позволяет снизить выброс сажи и углеводородов на 90%, оксидов азота - на 50%. При этом экономия топлива достигает 60% по сравнению с обычными автомобилями. Ускорение во время начала движения увеличивается на 50%. Принцип работы гибридной силовой установки, позволяет не только разрабатывать новые модели автомобилей, но и конвертировать в гибридные уже существующие машины. Для этого в обыч-

ный автомобиль устанавливается электропривод, тяговый аккумулятор и система управления электроприводом. К тому же при такой конверсии двигатель внутреннего сгорания (ДВС) остается соединенным с трансмиссией, и автомобиль полностью сохраняет все возможности обычного автомобиля. Другими словами он может быть использован как гибридный автомобиль, электромобиль и как обычный автомобиль.

Анализ публикаций

Сегодня пока нет абсолютного правила, каким должен быть гибридный привод конст-

руктивно и как выбрать соотношение мощностей ДВС и электродвигателя. Так, Honda Insight оснащена гибридной силовой установкой, состоящей из бензинового двигателя мощностью 68 л.с. и электромотора мощностью 7 кВт. В Toyota Prius образца 1997 г. 58 л.с. бензинового двигателя и 30 кВт мощности у электромотора. В Prius второго поколения силовую пару составляют 78 л.с. бензинового двигателя и 50 кВт электромотора [1].

Автомобили Lexus RX400h и Ford Escape Hybrid оснащены двумя электромоторами, один из которых расположен в заднем мосте, служит для привода задних колес и подключается, когда того требует дорожная обстановка [2]. В гибридных версиях BMW X3 и X5, а также Audi Q7 электромотор установлен один и размещен между основным двигателем и коробкой передач [3]. Valeo Group разработала технологию гибридной системы со стартером-генератором, приводимым ременной передачей с клиновым ремнем, для совместного производства с PSA Peugeot Citroen [4].

Одной из перспективных областей внедрения гибридных технологий видятся автобусы и грузовые автомобили. Фирма DaimlerChrysler Otion (Канада) выпускает гибридный автобус, на котором установлен 6-цилиндровый дизель мощностью 194 кВт, который при постоянных оборотах приводит в действие генератор, питающий электродвигатель. Фирма Freightliner (США) выпускает фургон FedEx с 4-цилиндровым дизелем. Фирма Hino выпустила грузовой автомобиль с полной массой 7,3 т, в котором использован параллельный гибридный привод, что дает экономию топлива на 14...27% [1-4].

На сегодняшний день, широко применяют вентильные электродвигатели (ВЭД) на основе синхронной электрической машины с постоянными магнитами на роторе. Такие ВЭД имеют более высокий КПД и лучшие электрические характеристики. Однако они малодоступны и имеют высокую стоимость. Кроме того, недостатком этих ВЭД является малый диапазон регулировки скорости вращения ротора. Для расширения скоростного диапазона, в таких двигателях применяют повышенное напряжение питания. Для этой цели в ряде гибридных автомобилей (Toyota Prius, Lexus RX400h) установлен электронный преобразователь постоянного напряже-

ния, который повышает напряжение аккумуляторов с 250 В до 600 В. Однако такой преобразователь увеличивает потери электроэнергии.

Относительно недорогими и широко распространенными являются синхронные электрические машины с электромагнитным возбуждением. Именно этот тип электрических машин был выбран для изготовления ВЭД тягового электропривода гибридного автомобиля на базе «Таврий-пикап» [5].

Цель работы

Рассмотреть возможность конвертирования автомобиля с двигателем внутреннего сгорания в гибридный автомобиль. Рассчитать все необходимые для этого параметры электропривода: момент на валу, обороты и мощность тягового электродвигателя при заданной скорости движения, коэффициент передачи от вала электродвигателя к колесам, максимальную скорость, которую способен развить автомобиль, двигаясь на электроприводе.

Расчет электропривода гибридного автомобиля

Для конвертирования автомобиля с ДВС в гибридный автомобиль, в первую очередь, надо рассчитать необходимую мощность тягового электродвигателя при заданной скорости движения. Обычно при подобных расчетах принимают различные допущения как по составу системы (число масс, характер связей), так и по характеру движения. Автомобили с механической трансмиссией, имеют однозначную связь частоты вращения всех вращающихся масс с частотой вращения коленчатого вала двигателя. Автомобиль в этом случае представляется материальной точкой (центр масс автомобиля) и считается, что она совершает плоское движение, копируя продольный профиль дороги, без колебаний, вызываемых ее неровностями. Если продольный профиль дороги криволинейный, то автомобиль, кроме поступательного движения, совершает еще вращательное относительно проходящей через центр масс оси, перпендикулярной плоскости движения.

Принимаем, что все внешние силы, действующие на автомобиль, лежат в плоскости движения. Это позволяет вместо простран-

венной схемы рассматривать плоскую схему, заменяя у каждого из мостов два колеса одним. Скоростью и ускорением автомобиля будем называть скорость и ускорение центра масс.

Для начала расчета надо определиться с основными силами, действующими на электромобиль. Основными из них являются: $F_{тяги}$ - сила тяги на ведущих колесах; $F_{тр}$ - сила трения в трансмиссии; $F_{кач}$ - сила трения качения колес; $F_{под}$ - сила сопротивления подъему; $F_{возд}$ - сила сопротивления воздуха; $F_{ин}$ - сила сопротивления разгону (сила инерции).

Для того, чтобы автомобиль начал движение, сила тяги на ведущих колесах должна превысить сумму остальных сил - сил сопротивления движению.

Сила тяги на ведущих колесах может быть выражена через крутящий момент на двигателе, учитывая передаточные числа главной передачи и коробки передач, а также потери мощности в трансмиссии и радиус колес электромобиля

$$F_{тяги} = (\eta_{ТР} \cdot M_E \cdot u_{КП} \cdot u_{ГП}) / r, \quad (1)$$

где $F_{тяги}$ - сила тяги на ведущих колесах, Н; $\eta_{ТР}$ - коэффициент потери мощности в трансмиссии электромобиля; M_E - эффективный крутящий момент двигателя, Н·м; $u_{КП}$ - передаточное число коробки передач; $u_{ГП}$ - передаточное число главной передачи; r - радиус ведущего колеса в метрах.

Для расчета скорости движения электромобиля, в зависимости от частоты вращения вала двигателя, применяется формула

$$v = (2 \cdot \pi \cdot r \cdot n) / (u_{КП} \cdot u_{ГП}), \quad (2)$$

где v - скорость электромобиля, км/ч; r - радиус ведущего колеса, м; π - частота вращения вала двигателя, Гц; $u_{КП}$ - передаточное число коробки передач; $u_{ГП}$ - передаточное число главной передачи.

Для расчета силы сопротивления качению требуется учитывать деформацию шины, деформацию дороги, силу трения шины об дорогу и силу трения в подшипниках колеса. При этом потери, связанные с деформациями опорной поверхности и возникающими при

качении колеса динамическими нагрузками, зависят от типа и состояния дорожного покрытия. Чем больше деформируемость дорожного покрытия, тем больше сопротивление качению. Неровности дорожного покрытия создают динамические нагрузки, вызывающие дополнительные деформации шины и дополнительные гистерезисные потери.

Так как расчет влияния данных величин является достаточно сложным, на практике пользуются эмпирически полученным коэффициентом трения качения f . Формула для расчета силы сопротивления качению имеет вид

$$F_{кач} = f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha, \quad (3)$$

где $F_{кач}$ - сила сопротивления качению, Н; f - коэффициент трения качения; m — масса автомобиля, кг; g - ускорение свободного падения, м/с²; α - угол уклона дороги.

Составляющая силы тяжести является проекцией силы сопротивления подъему на направление вектора скорости центра масс автомобиля. Радиусы кривизны вертикального профиля дороги обычно велики по сравнению с базой автомобиля, поэтому отрезки дороги, на которых в каждый данный момент находится автомобиль, можно заменить плоскостями, имеющими продольный наклон α , и рассматривать силу $F_{под}$ как составляющую силы тяжести, параллельную этой плоскости. Тогда

$$F_{под} = m \cdot g \cdot \sin \alpha, \quad (4)$$

где $F_{под}$ - сила сопротивления подъему, Н; m - масса автомобиля, кг; g - ускорение свободного падения, м/с; α - угол уклона дороги.

Сила сопротивления подъему может быть как положительной, так и отрицательной. Знак $F_{под}$ определяется знаком α , который считается положительным на подъеме.

При движении автомобиля на скоростях, превышающих скорость пешехода, заметное влияние оказывает сила сопротивления воздуха. Для ее расчета используют следующую эмпирическую формулу

$$F_{\text{возд}} = C_X \cdot S \cdot \rho \cdot v^2 / 2, \quad (5)$$

где $F_{\text{возд}}$ - сила сопротивления воздуха, Н; C_X - коэффициент сопротивления воздуха (коэффициент обтекаемости); ρ - плотность воздуха (1,29 кг/м³ при нормальных условиях); S - лобовая площадь автомобиля (автомобиля), м². S является площадью проекции кузова на плоскость, перпендикулярную продольной оси; v - скорость автомобиля (автомобиля), м/с.

Коэффициент C_X определяют опытным путем. Чаще всего в справочной литературе приводят коэффициенты, полученные при продувке моделей автомобилей (реже автомобилей в натуральную величину) в аэродинамических трубах. Их значения при таком способе определения получаются несколько заниженными, особенно при испытании моделей.

Для расчета разгонных характеристик автомобиля следует учитывать силу сопротивления разгону (силу инерции). Причем, нужно учитывать не только инерцию самого автомобиля, но и влияние момента инерции вращающихся масс внутри автомобиля (ротор, коробка передач, кардан, колеса).

Сила сопротивления разгону рассчитывается по формуле

$$F_{\text{ин}} = m \cdot a \cdot \sigma_{\text{вп}}, \quad (6)$$

где $F_{\text{ин}}$ - сила сопротивления разгону, Н; m - масса автомобиля, кг; a - ускорение автомобиля, м/с²; $\sigma_{\text{вп}}$ - коэффициент учета вращающихся масс.

Приблизительно коэффициент учета вращающихся масс $\sigma_{\text{вп}}$ можно рассчитать по формуле

$$\sigma_{\text{вп}} = 1,05 + 0,05 \cdot u_{\text{кп}}^2, \quad (7)$$

где $u_{\text{кп}}$ - передаточное число коробки передач.

Для правильного выбора электродвигателя гибридного автомобиля нужно знать такие характеристики как номинальная мощность и частота вращения вала двигателя. Номиналь-

ная мощность используется для поддержания заданной постоянной скорости. Знание частоты вращения электродвигателя требуется для выбора самого двигателя.

Из (2) выведем формулу для вычисления частоты вращения вала двигателя

$$n = (v \cdot u_{\text{кп}} \cdot u_{\text{гп}}) / (2 \cdot \pi \cdot r). \quad (8)$$

Расчет максимального крутящего момента произведем при помощи уравнения баланса сил при равноускоренном движении автомобиля

$$F_{\text{тяги}} = F_{\text{кач}} + F_{\text{под}} + F_{\text{возд}} + F_{\text{ин}}. \quad (9)$$

Расписав это уравнение получаем

$$\begin{aligned} (\eta_{\text{гп}} \cdot M \cdot u_{\text{кп}} \cdot u_{\text{гп}}) / r = f \cdot m \cdot g \cdot \\ \cdot \cos \alpha + m \cdot g \cdot \sin \alpha + C_X \cdot S \cdot \rho \cdot \\ \cdot v^2 / 2 + m \cdot a \cdot (1,05 + 0,05 \cdot u_{\text{кп}}^2). \end{aligned} \quad (10)$$

Выразим из этого уравнения минимально необходимый момент для движения гибридного автомобиля

$$\begin{aligned} M = r \cdot (f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha + m \cdot g \cdot \\ \cdot \sin \alpha + C_X \cdot S \cdot \rho \cdot v^2 / 2 + m \cdot a \cdot \\ \cdot (1,05 + 0,05 \cdot u_{\text{кп}}^2)) / (\eta_{\text{гп}} \cdot u_{\text{кп}} \cdot u_{\text{гп}}). \end{aligned} \quad (11)$$

Для примера выберем автомобиль «Таврипикап» и примем следующие численные значения: $\alpha = 0$; $r = 0,26$ м; $\eta_{\text{гп}} = 0,9$; $m = 900$ кг; $f = 0,016$; $g = 9,81$ м/с²; $C_X = 0,38$; $S = 1,61$ м²; $u_{\text{кп}} = 2$; $u_{\text{гп}} = 4$.

Промоделируем полученное уравнение для средних значений ускорений автомобиля в городском цикле движения $a = 1,04$ м/с²;

$a = 0,52$ м/с² и получим график минимально необходимой мощности тягового электрического двигателя для движения автомобиля по горизонтальной поверхности с заданной скоростью представленный на рис.1.

Для дальнейших расчетов необходимо задать конкретным типом синхронной электрической машины. Выберем самый мощный

из существующих в СНГ автомобильных генераторов - Г290 [6].

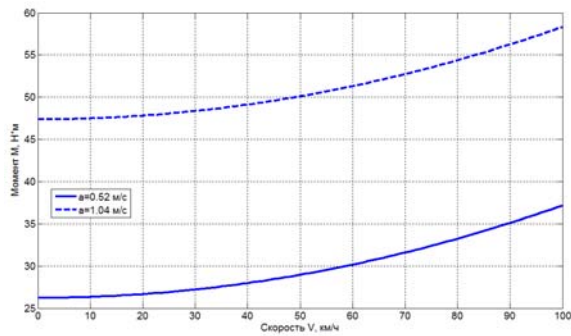


Рис. 1. Зависимость момента тягового электрического двигателя от скорости

После преобразований описанных в [5] Г290 работает в режиме вентильного двигателя с напряжением питания 72 В и сопротивлением фазы ротора 0,0125 Ом. При этом максимальные обороты холостого хода составляют $N_{\max \text{ XX}} = 3570$ об/хв, при максимальном токе 150 А, максимальна мощность в режиме двигателя составляет 10 кВт.

С (8) можно выразить максимальную скорость, которую способен развить автомобиль двигаясь на этом электродвигателе

$$n = (2N_{\max} \pi r) / (60U_K), \quad (12)$$

где N_{\max} - максимальные обороты электродвигателя, которые он сможет набрать под нагрузкой в процессе движения; U_K - передаточное число от электродвигателя к колесам.

Момент на валу вентильного двигателя

$$M = I_{\text{я}} k \Phi = \frac{60U^2}{2\pi R N_{\max \text{ XX}}}, \quad (13)$$

где $I_{\text{я}} = U/R$ - ток якоря; $k\Phi = (60 \cdot U) / (2 \cdot \pi \cdot N_{\max})$ - произведение конструктивного коэффициента машины и магнитного потока в воздушном зазоре.

На практике момент создаваемый электродвигателем ограничивается максимальным током ротора (для генератора Г290 - ток якоря 150 А)

$$M = I_{\text{я}} \cdot k \cdot \Phi = 150 \cdot \frac{30 \cdot U^2}{\pi \cdot N_{\max \text{ XX}} \cdot R}. \quad (14)$$

Для генератора Г290 согласно (12) - (14) для передающих коэффициентов 6, 8, 10, 12 от электродвигателя к колесам рассчитываются механические характеристики электродвигателя в координатах скорости автомобиля и крутящего момента на колесах и накладываются на механическую характеристику автомобиля (рис.2).

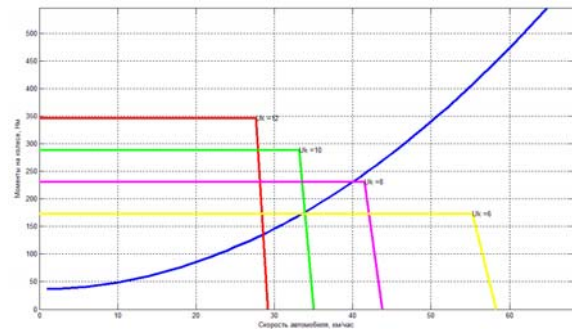


Рис. 2. Механические характеристики электродвигателя, наложенные на механическую характеристику автомобиля

Точки пересечения механических характеристик электродвигателя и автомобиля дают максимальную достижимую скорость на электроприводе, а разница ординат на выбранной скорости пропорциональна ускорению автомобиля на этой скорости. Используя вместо механического переключения передач регулирования ВЭД во второй зоне можно получить минимальное время разгона автомобиля до заданной скорости, так же как и при механическом переключении передач в процессе разгона. Функцию «автоматической коробки передач» при этом будет выполнять система управления ВЭД.

Программная реализация

Создадим программу, которая позволяла бы быстро рассчитать основные параметры электродвигателя, используя аналитические выкладки предыдущего пункта. Удобной средой для ее написания может служить математический пакет MATLAB. Разработанный графический вид основного окна программы представлен на рис.3. При запуске программы на выполнение пользователь может выбрать тип автомобиля и решить нужно ли сохранять отчет о проведенном расчете. При установлении галочки в квадрате

«Сохранить отчет» становятся доступными кнопки «Выбор ...» и полоса ввода.

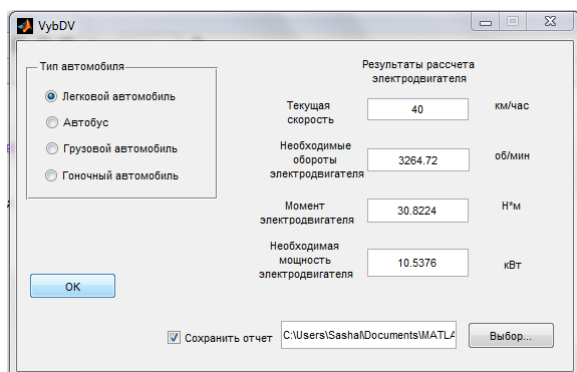


Рис. 3. Исходное окно работы программы

После нажатия кнопки ОК программа предлагает ввести исходные данные (рис.4). Далее осуществляется выбор дорожного покрытия для определения коэффициента качения и ускорение автомобиля при движении с неподвижного состояния. Далее предлагается указать скорость автомобиля, для которой будет произведен численный расчет.

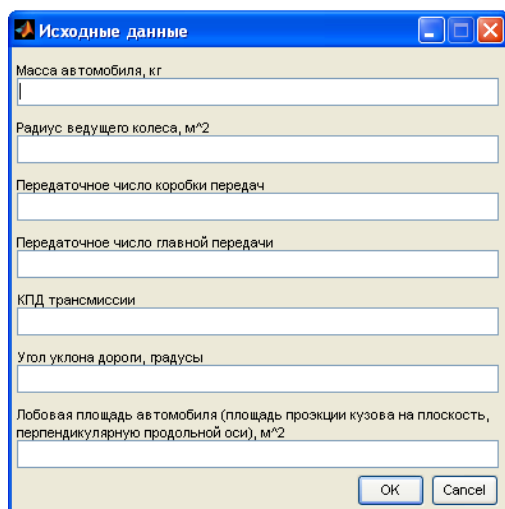


Рис. 4. Окно для ввода исходных данных

Для введенных величин и скоростей от 0 до 100 просчитываются минимально необходимые обороты и крутящий момент электродвигателя. Пользователю они представляются в графическом виде. А для указанной скорости рассчитывается еще и мощность двигателя и записывается в исходное окно работы программы (рис.3). Пример оформления программой файла отчета представлен на рис.5.

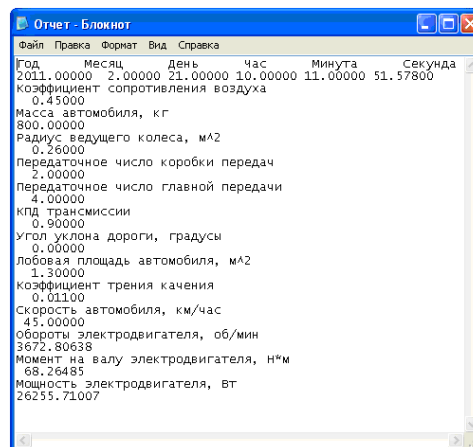


Рис. 5. Пример оформления файла отчета

Выводы

В работе рассмотрен случай конверсии автомобиля с ДВС в гибридный. Разработана программа расчета необходимой мощности тягового электродвигателя при заданной максимальной скорости движения на электроприводе. Для вентильного двигателя на основе синхронной машины Г290 построены механические характеристики при различных передаточных коэффициентах от электродвигателя к колесам, показана возможность эквивалентного регулирования соотношения момента и оборотов ВЭД изменением тока возбуждения.

Литература

1. <http://www.hybrid-cars.ru>
2. <http://autotime.in.ua/gibridnyj-avtomobil-shag-v-budushhee/>
3. [http://www.objectiv.tv/gazeta/27_\(383\)/1397.html](http://www.objectiv.tv/gazeta/27_(383)/1397.html)
4. <http://hybridcars.com.ua>
5. Бажинов А. В. Разработка тягового электропривода гибридного автомобиля / А. В. Бажинов, В. Я. Двадненко, А. В. Колесников // Вісті автомобільно-дорожного інституту. – 2009. – № 1. – С. 118–122.
6. Василевский В. И. Автомобильные генераторы / В. И. Василевский, Ю. А. Купеев – М., Транспорт, 1978. – 159 с.

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

Статья поступила в редакцию 28 октября 2011 г.