

МОДЕЛ НА АВТОМОБИЛ С ГОРИВНА КЛЕТКА С ХИБРИДНО ЕЛЕКТРИЧЕСКО ЗАДВИЖВАНЕ

MODEL OF FUEL CELL HYBRID ELECTRIC VEHICLE

Маг.инж. Бурдин Б.

Факултет по транспорт, Технически университет – София

Резюме: В настоящия доклад е представен математичен модел, за определяне разхода на енергия при движение на електромобил, захранван от горивна клетка. Моделът отчита основните параметри на автомобила и системата на задвижване, като се дава възможност да се оптимизират мощността на горивната клетка и капацитета на акумулаторната батерия в зависимост от параметрите на автомобила и цикъла на движение.

Ключови думи: ЕЛЕКТРОМОБИЛ, ГОРИВНА КЛЕТКА, ХИБРИДНО ЗАДВИЖВАНЕ

1. Увод

Съществуват два основни вида автомобили с електрическо задвижване – захранвани с акумулаторни батерии (АБ) и с горивни клетки (ГК).

При автомобилите с горивни клетки водородът осигурява пробег с едно зареждане, който не се различава съществено от автомобилите, използващи конвенционални горива. Въпреки това съществуват редица недостатъци, които възпрепятстват навлизането им като енергиен източник в транспортните средства като все още сравнително високата им цена, ниска ефективност при работа с много ниски и много високи натоварвания.

От друга страна акумулаторните батерии имат по-ниска енергийна плътност в сравнение със система на задвижване с горивни клетки с водород, съхраняван на автомобила в газообразно или течно състояние. При използването им като основен енергиен източник в автомобила това представлява сериозен недостатък. Това е така, защото автомобилите задвижвани чрез акумулаторна батерия имат пробег с едно зареждане от порядъка на 100-150 км. В допълнение на малкия пробег зареждането на батерията изисква значително по-голямо време за зареждане от колкото при автомобилите, използващи конвенционални горива.

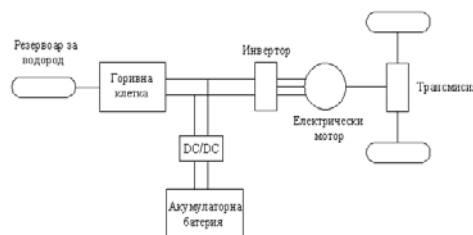
Хибридизацията на електрическото задвижване е един от начините за намаляване на цената и подобряване както на ефективността на системата на задвижване, така и на транспортното средство като цяло. При оптимизирането на хибридно електрическо задвижване е важно съчетаването на предимствата на горивните клетки и акумулаторните батерии и същевременно минимизиране на техните недостатъци.

Базата за оптимизирането на основните параметри на електрическото задвижване (електродвигател, горивна клетка и акумулаторна батерия) стои разработване на математичен модел на електромобил с хибридно електрическо задвижване.

2. Математичен модел на автомобил с хибридно електрическо задвижване

Разглежда се модел на автомобил с хибридно електрическо задвижване (фиг.1) с паралелна схема на свързване на източниците на енергия - горивна клетка и акумулаторна батерия.

Математичният модел е изграден в среда на компютърната програма MATLAB, като съдържа следните основни елементи – резервоар за водород, ГК, АБ, двупосочен DC/DC преобразувател, електрически двигател със съответното за него управление, трансмисия и основните масови и геометрични параметри на автомобила.



Фиг.1 Принципна схема на хибридно електрическо задвижване

2.1. Основни масови и геометрични параметри на автомобила

За извършване на изчисленията за съпротивителните сили и моменти са необходими следните изходни данни за автомобила: челна площ, коефициент на въздушно съпротивление, брой пътници, маса на полезния товар и собствена маса на автомобила, в която не се включват масата на горивната клетка, резервоарите за водород, маса на акумулаторната батерия.

Поради това, че мощността на системата с ГК и пробег на автомобила са променливи величини в модела, масата на системата с ГК се изчислява на база следните параметри: енергийна плътност на система ГК и резервоари за водород под налягане от 350атм - 600Wh/kg [9]; специфична мощност на ГК - (600-1000)W/kg - от данни за електромобили с водородни горивни клетки на автомобилните производители Хонда и Нисан;

Масата на акумулаторната батерия се изчислява на база следните параметри: енергийна плътност АБ - 150Wh/kg [9] и от данни за произведени батерии за електромобили на производителя „A123 System“; специфична мощност на АБ – 300W/kg - от данни за произведени батерии за електромобили на производителя „A123 System“;

2.2. Приведен масов инерционен момент

За динамичните изчисления в математичния модел е необходимо изчисляване на приведения масов инерционен момент на автомобила, към вала на задвижващия електродвигател. Извеждането се осъществява чрез приравняване на кинетичните енергии:

$$(1) mV_a^2 = J_{np} \cdot \omega_d^2,$$

от където:

$$(2) J_{np} = m \frac{V_a^2}{\omega_d^2}, \text{ kg.m}^2,$$

Където m е обща маса на автомобила, V_a , m/s- скорост на автомобила, ω_d , rad/s - ъглова скорост на въртене на

електродвигателя, $J_{пр}$, $kg.m^2$ - приведен масов инерционен момент към вала на електродвигателя.

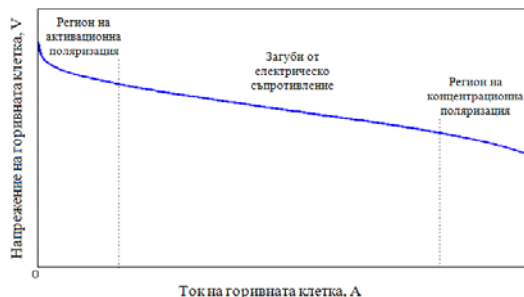
След отчитане на диаметъра на колелото и предавателното отношение на редуктора (трансмисията) за приведения масов инерционен момент се получава следната зависимост:

$$(3) J_{пр} = m \frac{r_k^2}{i_r^2}, kg.m^2$$

Формула (3) отчита транслационното движение на автомобила и колелата. За облекчаване на изчисленията е възможно пренебрегване на ротационното движение на колелата, тъй като техния приведен масов инерционен момент към вала на електродвигателя е незначителен в сравнение с този от масата на автомобила. Приведените масови инерционни моменти на електродвигателя и редуктора могат да се вземат от съответните данни в техническите им спецификации.

2.3. Модел на горивна клетка [1]

Моделът описва горивна клетка, използваща за гориво чист водород и окислител - кислород от околния въздух. Приема се, че работната температура и налягане на водорода и въздуха са оптимални за работата на системата. Волт-амперната характеристика, описана чрез уравнение (4) се състои от три зони (фиг.2). В първата зона най-голямо влияние оказват загубите от активационна поляризация. Ширината на зоната зависи от работната температура и налягане, вид на използваните електроди и катализатори. Втората зона се характеризира със загубите от вътрешно електрическо съпротивление в горивните елементи. В третата зона основно влияние оказват загубите от концентрационна поляризация.



Фиг.2 Волт-амперна характеристика на водородна горивна клетка

$$(4) E_{ГК} = E_{T,P,C} - \frac{RT}{\alpha F} \ln\left(\frac{i + i_{loss}}{i_0}\right) - \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) - iR_i, V$$

Където $R=8,314 J/mol.K$ е универсална газова константа, $F=96485 C.mol^{-1}$ - Фарадеева константа, $\alpha=1$ - коефициент на трансфер, $n=2$ - брой електрони участващи в реакцията, $i_0=3 \times 10^{-6} A.cm^{-2}$ - приета стойност на плътността на обменния ток, $i_L=1,6 A.cm^{-2}$ - гранична стойност на плътността на тока, $R_i=0,15 \Omega.cm^{-2}$ - вътрешно съпротивление на горивната клетка, $E_{T,P,C}=1,89 V$, $T=333K(60^\circ C)$, $i_{loss}=0,002 A.cm^{-2}$.

За определяне параметрите на горивна клетка, плътност на тока в горивната клетка (5), мощност на пакет горивни клетки (6), мощност на горивната клетка (7) и напрежение на пакет горивни клетки (8), се използват следните зависимости:

$$(5) i_{stack} = \frac{I_{stack}}{A_{stack}}, A/cm^2,$$

$$(6) V_{stack} = \sum_{i=1}^{N_{cell}} V_i = \overline{V}_{cell} \cdot N_{cell},$$

$$(7) P_{stack} = V_{stack} \cdot I_{stack},$$

$$(8) U_{ГК} = V_{cell} \cdot i_{stack} \cdot A_{stack}.$$

Където I_{stack} е ток на пакета горивни елементи, A_{stack} - активна площ на пакета горивни елементи, V_{stack} - напрежение на пакета горивни елементи, V_{cell} - напрежение на всеки отделен елемент в горивната клетка, N_{cell} - брой елементи в горивната клетка, P_{stack} - мощност на пакета горивни елементи, $U_{ГК}$ - напрежение на горивната клетка.

2.4. Модел на задвижващия електродвигател

Електрическият двигател е моделиран чрез следните две основни зависимости:

$$(9) U_{де} = Ri + L \frac{di}{dt} + k_c \cdot \omega_{де};$$

$$(10) J \frac{d\omega}{dt} = M_o - M_c.$$

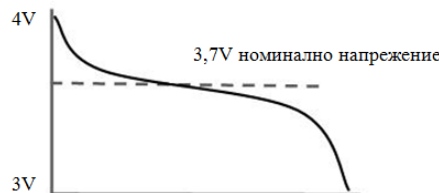
Където $U_{де}$, V е напрежение на захранващия източник на електродвигателя, R, Ω - вътрешно съпротивление на електродвигателя, i, A - ток на електродвигателя, L, H - индуктивност на електродвигателя, k_c - коефициент, $\omega_{де}, rad/s$ - ъглова скорост на въртене на вала на електродвигателя, $J, kg.m^2$ - инерционен момент на вала на електродвигателя, M_d, Nm - двигателен момент, M_c, Nm - съпротивителен момент.

2.5. Модел на акумулаторната батерия

В математичния модел на системата, литиево-йонната акумулаторна батерия е моделирана чрез нейната волт-амперна характеристика и степента ѝ на зареденост (SOC). При използваните в електромобилите батерии степента на зареденост на батерията е в границите 40-80%. В тази си част разрядната характеристика е линейна и може да бъде моделирана чрез следното уравнение:

$$(11) U_{bat} = n_{bat} (E_{bat} - R_{bat} \cdot I_{bat}) V$$

Където U_{bat} , V е напрежение на батерията, n_{bat} - брой клетки в батерията, E_{bat} , V - е.д.н. на батерията, R_{bat}, Ω - вътрешно съпротивление на батерията, I_{bat}, A - разряден ток на батерията.



Фиг.3 Разрядна характеристика на литиево-йонна батерия

Текущата стойност на степента на зареденост на батерията се определя от началната степен на зареденост в момента на симулацията и количеството на енергия, използвано от батерията при движение на автомобила или съответно върнато към батерията в режим на рекуперация [10]:

$$(12) SOC(t) = SOC_0 + \frac{1}{C_{bat}} \int_{t_0}^t i_{bat}(\tau) d\tau, \%$$

При електромобилите с литиево-йонни батерии степента на зареденост се определя, чрез измерване на електродвижещото напрежение на батерията и използване на следната зависимост [8]:

$$(13) SOC = SOC_{low} + \frac{E_{bat} - U_{low}}{U_{high} - U_{low}} (SOC_{high} - SOC_{low}), \%$$

Където $SOC_{low}=85\%$, $SOC_{high}=100\%$, $U_{low}=4,08V$, $U_{high}=4,24V$.

В математичния модел стойността на степента на зареденост е известна (12). Това може да се използва за определяне на E_{bat} и след заместване в уравнение (13), да се определи напрежението под товар на батерията U_{bat} .

След преобразуване на (13) и заместване на стойностите за SOC_{low} , SOC_{high} , U_{low} и U_{high} за E_{bat} се получава следната зависимост:

$$(14) E_{bat} = \frac{SOC - 85}{93,75} + 4,08 \text{ V.}$$

3. Резултати от направена симулация

За доказване на адекватност на резултатите от математичния модел е извършена симулация с данните от реален автомобил Mercedes B-class F-cell [5]. За някои от параметрите на автомобила, както и за режимите при които работи системата на задвижване няма данни, тъй като представляват търговска тайна. При това за определянето им са използвани сходни автомобили и системи на задвижване. Използваните за симулацията изходни данни са показани в таблица 1.

Таблица 1: Основни данни за автомобил с горивна клетка Mercedes B-class F-cell

Маса на автомобила [kg]	1800
Коефициент на въздушно съпротивление	0,24
Челна площ на автомобила [m ²]	2,24
Базов коефициент на съпротивление при търкаляне	0,012
Радиус на колелото [m]	0,341
Предавателно отношение на редуктора	8,6
Максимална мощност на ГК [kW]	100
Максимален к.п.д. на ГК	0,55
Вътрешно съпротивление на ГК [$\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$]	0,15
Капацитет на батерията [Wh]	1400
Номинално напрежение на батерията [V]	200
Вътрешно съпротивление на батерията [Ω]	0,04
Начална степен на зареденост [%]	60
Максимална мощност на електродвигателя [kW]	100
Номинална мощност на електродвигателя [kW]	70
Максимална честота на въртене на ел.двигателя [min^{-1}]	12000
Номинален въртящ момент [Nm]	290
Номинално напрежение на електродвигателя [V]	300
Максимален к.п.д. на инвертора на електродвигателя	0,95
Максимален к.п.д. на електродвигателя	0,95
К.п.д. на трансмисията на автомобила	0,9

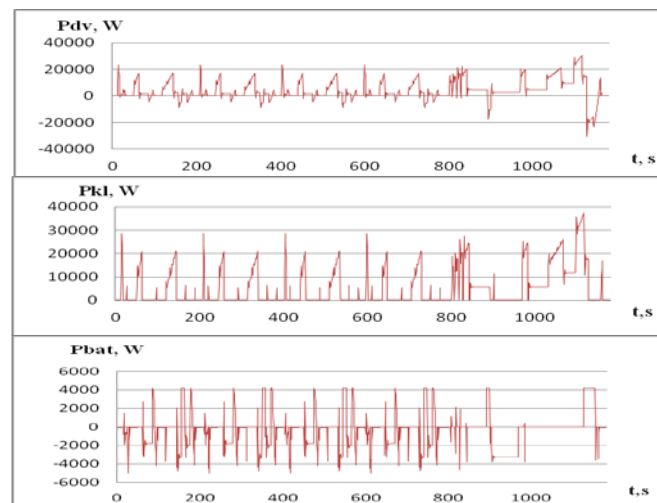
Заданието за скорост на движение на автомобила се осъществява, чрез използване на стандартен за Европейския съюз цикъл на движение – NEDC [6], показан на фиг.4.



Фиг.4 Европейски стандартен цикъл на движение NEDC

Резултатите за консумираната мощност от електродвигателя, мощността на горивната клетка и мощността на акумулаторната батерия са показани на фиг.5. Изчисления разход на водород за един стандартен цикъл на движение е

0,102kg, т.е. за 100 км пробег разхода на водород ще бъде 0,927kg. Съгласно спецификацията на автомобила [5], разхода на водород при стандартен цикъл на движение NEDC е 0,97kg/100km. Разликата между изчисления чрез математичния модел разход на енергия и данните от реалния автомобил е 4,4%.



Фиг. 5 Мощност на електродвигателя, горивната клетка и акумулаторната батерия при стандартен цикъл на движение (NEDC)

4. Заключение

При направеното сравнение за разхода на енергия на реален електромобил с водородна горивна клетка Mercedes B-class с резултатите получени от представения математичен модел, разликата е под 5%. Това доказва, че резултатите от модела са адекватни, което дава възможност за използване на модела в процедура по оптимизация на параметрите на източниците на електрическа енергия - горивна клетка и акумулаторна батерия при проектиране електрическо задвижване на автомобил.

5. Литература

- [1] Barbir Fr., PEMFuel Cells – Theory and Practice, p.58 Elsevier Inc. 2005.
- [2] Guzzella L., Sciarretta A., Vehicle Propulsion Systems - Introduction to Modeling and Optimization, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005.
- [3] Isfahani A., Sadeghi S., Design of a permanent magnet Synchronous machine for the hybrid electric vehicle, *World Academy of Science, engineering and technology* 45 2008.
- [4] Kim Min-Joong, Peng H., Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles, *Journal of Power Sources, Vol.165, issue 2, March 2007*.
- [5] Mercedes-Benz, The B – Class with Fuel Cell Electric Drive Technology – The propulsion system of tomorrow, *Mercedes – Benz, 25.08.2009*.
- [6] New European Driving Cycle, *Operating Cycle for Type I Test, Directive (98 / 69 / EC)*.
- [7] Orburg M., Nelson D., Modeling and Validation of a Fuel Cell Hybrid Vehicle, *Mechanical Engineering, 2000*
- [8] Pop V., H J Bergveld H. J. ant others, State of the art of battery state of charge Determination, *Institute of Physics Publishing, Meas. Sci. Technol. 16 (2005) R93–R110*.
- [9] Thomas C. E., Fuel cell and battery electric vehicles compared, *The National hydrogen Association annual meeting, Sacramento, California, March 2008*
- [10] Thounthong P., Control of Fuel cell/battery hybrid source for electric vehicle applications, *ECTI Transactions on electrical eng., electronics and communications vol.5, No2, p.194 August 2007*.