

Využitie prostredia Matlab Simulink® na simuláciu jazdy mestského autobusu

Hanečková Kristína · Elektrotechnika, Strojárstvo

02.02.2011



V súčasnej dobe je čoraz väčšia pozornosť v oblasti dopravy zo strany legislatívy a aj samotných výrobcov automobilov venovaná snahe o zníženie spotreby paliva a emisií, či už sa jedná o osobné automobily, nákladné automobily alebo autobusy. V mestskej premávke sa čoraz častejšie stretávame s autobusmi na pohon s alternatívnymi palivami, či už je to CNG alebo LPG, ale aj s autobusmi, ktoré na svoj pohon používajú hybridnú hnaciu jednotku, napríklad Volvo 7700 HybridBus.

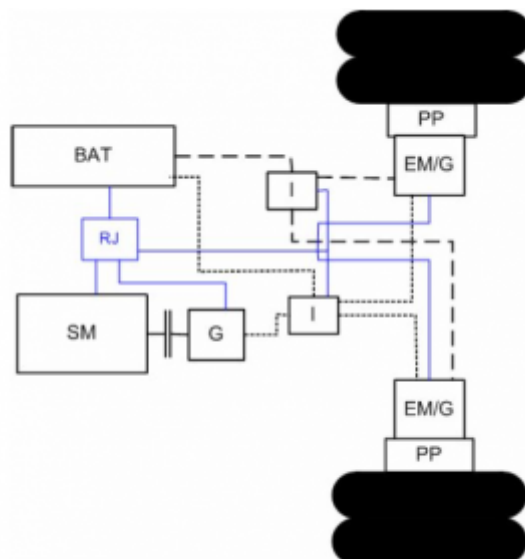
Tento príspevok je venovaný predovšetkým popisu simulačného modelu mestského autobusu s konvenčným a hybridným pohonom. Simulačný model je v prostredí Matlab Simulink® vytvorený na základe zvolenej koncepcie hybridného pohonu. Príspevok sa taktiež venuje aj možnostiam využitia vytvoreného modelu, vplyvu spolupráce jednotlivých komponentov a stručnej analýze výsledkov simulácií.

1. Popis autobusu s konvenčným a sériovým hybridným pohonom

Na tvorbu modelu a vykonanie výpočtov a simulácií bol použitý mestský autobus SOR. Autobus s konvenčným pohonom má vznetrový motor a automatickú 6-stupňovú prevodovku.

Autobus s hybridným pohonom kombinuje viac zdrojov energie, v tomto prípade sa jedná o kombináciu spaľovací motor a elektromotor. V prípade sériového usporiadania slúži na pohon automobilu elektromotor, spaľovací motor prostredníctvom generátora dobíja batérie alebo dodáva energiu potrebnú na pohon automobilu. Výhodou takéhoto usporiadania je, že spaľovací motor môže pracovať v režimoch s nižšou mernou spotrebou a toto usporiadanie je oproti paralelnému a kombinovanému usporiadaniu aj konštrukčne jednoduchšie. Určitou nevýhodou sériového usporiadania je vznik strát pri trojnásobnej premene energie (chemická - mechanická - elektrická - mechanická).

Zvolená koncepcia sériového hybridného pohonu je znázornená na obrázku 1.



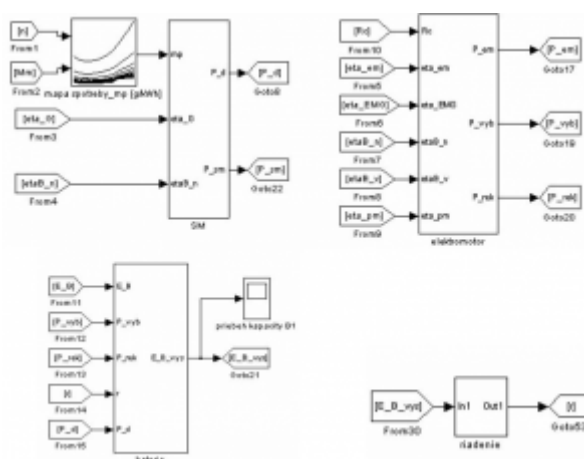
Obrázok 1: Konceptia sériového hybridného pohonu autobusu; PP – planétová prevodovka, EM/G – elektromotor / generátor, I – inverter, G – generátor, SM – spaľovací motor, BAT – batérie, RJ – riadiaca jednotka

Na pohon autobusu slúžia 2 elektromotory umiestnené na zadnej náprave. Na akumuláciu energie slúžia 2 kusy Ni-MH batérií, na dobíjanie batérií a dodávku požadovanej elektrickej energie na pohon autobusu je použitý generátor a pôvodný spaľovací motor.

2. Model autobusu v prostredí Matlab Simulink®

Simulačný model autobusu s hybridným pohonom je vytvorený na základe zvolenej koncepcie uvedenej na obrázku 1.

Samotný model pozostáva z viacerých subsystémov, ktoré sú navzájom poprepájané prostredníctvom vstupných a výstupných veličín. Každý zo subsystémov predstavuje jednotlivý komponent hybridnej hnacej jednotky.

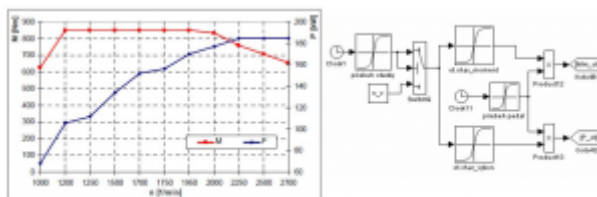


Obrázok 2: Model sériového hybridného pohonu

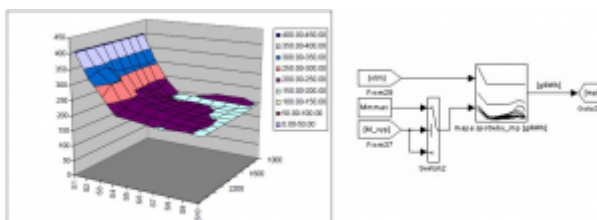
Na obrázku 2 je znázornený model hybridnej hnacej jednotky. V nasledujúcej časti sú podrobnejšie popísané jednotlivé subsystémy celého modelu.

2.1 Subsystém spaľovacieho motora

Model spalovacieho motora obsahuje základné údaje a charakteristiky daného motora použitého pre pohon autobusu s konvenčným pohonom a aj pre autobus s hybridným pohonom, keďže pre oba prípady je použitý rovnaký spalovací motor.



Obrázok 3: Subsystém spalovacieho motora - otáčková charakteristika; vľavo: otáčková charakteristika motora, vpravo: model v Matlab Simulink



Obrázok 4: Subsystém spalovacieho motora - mapa mernej spotreby paliva; vľavo: mapa mernej spotreby paliva, vpravo: model v Matlab Simulink

Na obrázku 3 a 4 sú znázornené schémy, ktoré sú súčasťou subsystému, ktorý tvorí model spalovacieho motora. Obrázok 3 znázorňuje model otáčkovej charakteristiky. Na obrázku vľavo je znázornená otáčková charakteristika daného motora a vpravo jej znázornenie v prostredí Matlab Simulink. V modeli otáčkovej charakteristiky je pomocou funkcie Lookup Table zadaná zvlášť závislosť momentu a zvlášť závislosť výkonu od otáčok motora.

Vstupom do modelu otáčkovej charakteristiky sú otáčky, pri ktorých pracuje spalovací motor počas zvoleného jazdného cyklu. Pracovné otáčky spalovacieho motora sú vypočítané z rýchlosti jazdy a aktuálneho celkového prevodového pomeru podľa vzťahu 1. Prvok Switch v modeli zabezpečuje vplyv voľnobežných otáčok. Výstupom z modelu otáčkovej charakteristiky je aktuálna hodnota krútiaceho momentu a výkonu motora, ktoré následne vstupujú do modelu mapy mernej spotreby paliva.

$$n_m = \frac{v \cdot i_c}{2\pi r_d} \quad (1)$$

kde: v - rýchlosť jazdy, i_c - celkový prevodový pomer, r_d - dynamický polomer kolesa

Mapa mernej spotreby paliva je znázornená na obrázku 4 vľavo, vpravo je model vytvorený v prostredí Matlab Simulink. 3D mapa spotreby je do modelu zadaná pomocou prvku Lookup Table a v modeli je veľmi dôležitá pre určenie aktuálnej spotreby paliva. Ďalšími matematickými operáciami je možné vyjadriť spotrebu paliva na prejdený jazdný cyklus, resp. v jednotkách l/100km, vďaka ktorej je možné si urobiť asi najlepšiu predstavu o ekonomickosti vozidla.

2.2 Subsystém elektromotora

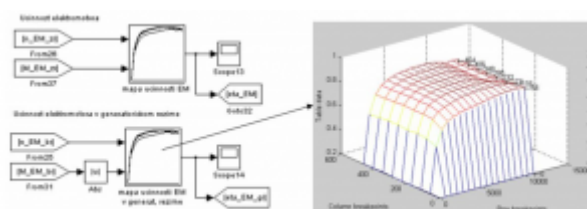
Model elektromotora v sebe ukrýva otáčkovú charakteristiku a mapu účinnosti

elektromotora v motorickom aj generátorickom režime. Pri brzdení je elektromotor schopný vzniknutú energiu premeniť na energiu elektrickú, ktorú je možné uskladniť v akumulátoroch, prípadne superkapacitoroch a následne ju použiť napríklad pri zrýchlení alebo rozbehu. Zadanie otáčkovej charakteristiky do prostredia Matlab Simulink je také isté ako v prípade spalovacieho motora. Mapa účinnosti je v prostredí Matlab Simulink zadaná podobne, ako mapa mernej spotreby pre spalovací motor.

Na obrázku 5 vpravo je model mapy účinnosti elektromotora v Matlab Simulink. Vstupom do modelu sú otáčky a moment elektromotora, ktorých hodnoty sú závislé od okamžitej rýchlosti jazdy a celkového odporu, ktorý na vozidlo počas jazdy v danom cykle pôsobí. Výstupom z modelu je aktuálna hodnota účinnosti elektromotora. Hodnota účinnosti elektromotora pri jazde konštantnou rýchlosťou alebo pri zrýchľovaní je dôležitá na určenie potrebného výkonu elektromotora podľa vzťahu:

$$P_{EMvyp} = \frac{R_c \cdot v}{\eta_{pm} \eta_{EMm}} \text{ [kW]} \quad (2)$$

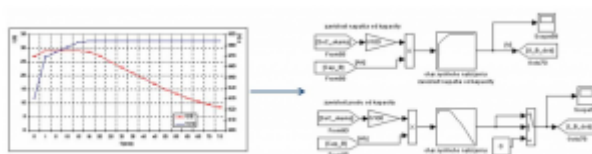
kde: R_c - celkový jazdný odpor, v - rýchlosť jazdy, η_{pm} , η_{EMm} - účinnosť prevodového mechanizmu, účinnosť elektromotora



Obrázok 5: Znázornenie mapy účinnosti elektromotora v Matlab Simulink

2.3 Subsystem batérií

V subsysteme batérií sú zohľadnené potrebné parametre a charakteristiky - nabíjacia a vybíjacia charakteristika zvolených Ni-MH batérií.



Obrázok 6: Nabíjacia charakteristika batérií



Obrázok 7: Vybíjacia charakteristika batérií

Nabíjacia charakteristika batérií je v simulačnom modeli zadaná pomocou Lookup Table, podobne ako otáčková charakteristika spalovacieho motora a elektromotora. Vstupom do nabíjacej charakteristiky je stav nabitia batérií a hodnota kapacity batérií. Výstupom z nabíjacej charakteristiky je aktuálna hodnota nabíjacieho napätia a prúdu v závislosti od stavu nabitia batérií. Hodnoty nabíjacieho napätia a prúdu tvoria obmedzujúce podmienky pri nabíjaní batérií, aby nedošlo k stavu, že by batérie boli

nabíjané väčším výkonom aký sú fyzicky schopné prijať.

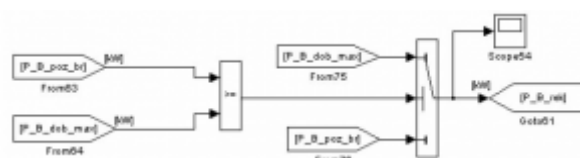
Na obrázku 7 je znázornená vybijacia charakteristika batérií, z ktorej je možné jednoducho určiť maximálny výkon, ktorým môžu byť batérie vybijané, resp. ktorý môže odoberať z batérií elektromotor. Pribeh vybijacieho napätia je v modeli zadaný pomocou funkcie, ktorá predstavuje krivku, znázornenú na obrázku 7 vľavo.

2.4 Subsystem riadenia

V subsysteme riadenia je zohľadnená zvolená stratégia riadenia. Stratégia riadenia určuje vzájomnú spoluprácu jednotlivých komponentov hybridnej hnacej jednotky. Samotná stratégia riadenia je závislá na type vozidla, na podmienkach prevádzky daného vozidla a na filozofii riadenia. V tomto konkrétnom prípade sú podmienky pre zvolenú stratégiu riadenia znázornené podmienkami práce spalovacieho motora, podmienkami dobíjania batérií a podmienkami pre rekuperáciu brzdného energie.



Obrázok 8: Podmienka práce spalovacieho motora a nabíjania batérií



Obrázok 9: Podmienka rekuperácie brzdného energie

Podmienka práce spalovacieho motora stanovuje pre danú stratégiu riadenia okamihy, kedy je potrebná práca spalovacieho motora. Spalovací motor prostredníctvom generátora v závislosti na stratégii riadenia môže dobíjať batérie a/alebo dodávať energiu potrebnú na pohon elektromotora. Podmienka dobíjania batérií stanovuje hranice stavu nabitia batérií, kedy je potrebné ich dobíjanie spalovacím motorom prostredníctvom generátora.

Podmienka rekuperácie brzdného energie udáva, aký výkon vznikajúci pri brzdení je systém schopný akumulovať v batériách. Takto naakumulovaná energia následne pokrýje výkonové požiadavky pri jazde automobilu.

2.5 Vstupné parametre

Vo vytvorenom simulačnom modeli je zadávanie vstupných parametrov zabezpečené prostredníctvom m.filu. V m.fily sú zadané hodnoty základných parametrov autobusu – hmotnosť, súčiniteľ odporu vzduchu, súčiniteľ valivého odporu, veľkosť kolies a pod., ďalej sú v m.fily zadané charakteristiky a účinnosti jednotlivých komponentov konvenčnej a hybridnej hnacej jednotky. Okrem toho m.file obsahuje aj údaje o jazdnom cykle – závislosť rýchlosti jazdy od času, o profile vozovky – závislosť stúpania na prejdenej dráhe a o zmene hmotnosti cestujúcich. Príklad vytvoreného m.filu je na obrázku 10.

```

1
2
3
4 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
5 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
6 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
7 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
8 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
9 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
10 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
11 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
12 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
13
14 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
15 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
16 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
17 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
18 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
19 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
20 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
21 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
22 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
23 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
24 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
25
26 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
27 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
28 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
29 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
30 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
31 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
32 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
33 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
34 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
35 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
36 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
37 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
38 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
39 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
40 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
41 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
42 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
43 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
44 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
45 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
46 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
47 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
48 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
49 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
50 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
51 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
52 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
53 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
54 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
55 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
56 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
57 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
58 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
59 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
60 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
61 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
62 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
63 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
64 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
65 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
66 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
67 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
68 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
69 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
70 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
71 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
72 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
73 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
74 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
75 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
76 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
77 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
78 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
79 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
80 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
81 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
82 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
83 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
84 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
85 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
86 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
87 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
88 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
89 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
90 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
91 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
92 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
93 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
94 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
95 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
96 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
97 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
98 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
99 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu
100 %Vstupné údaje - vstupná časť modelu

```

Obrázok 10: Vstupné údaje pre simulačný model

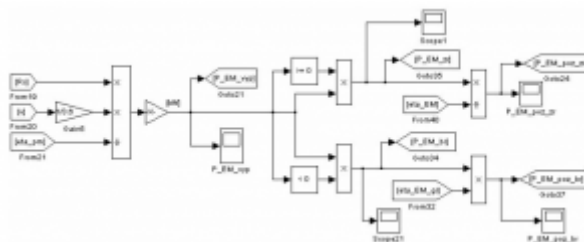
3. Simulácia jazdy autobusu v mestskom jazdnom cykle

Nasledujúca kapitola je venovaná simulácii jazdy autobusu s hybridným pohonom vo zvolenom jazdnom cykle. Pre simuláciu bol zvolený mestský jazdný cyklus CADC, ktorého priebeh je uvedený na obrázku 11. Jazdný cyklus CADC má dĺžku 4,8 km, doba trvania je cca 17 minút, maximálna rýchlosť jazdy je 60 km/h a priemerná rýchlosť jazdy je 22,4 km/h. V tomto prípade nie je uvažované stúpanie vozovky.

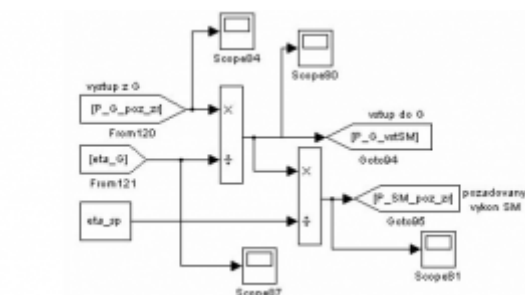


Obrázok 11: Mestský jazdný cyklus CADC

Základ simulácie tvorí výpočet potrebného výkonu elektromotora, ktorý je vypočítaný z celkového jazdného odporu pôsobiaceho na vozidlo a z rýchlosti jazdy podľa vzťahu 2. Výpočet v prostredí Matlab Simulink je na obrázku 12.



Obrázok 12: Výpočet požadovaného výkonu elektromotora v Matlab Simulink



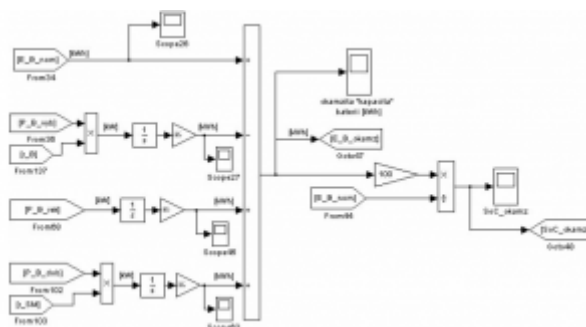
Obrázok 13: Výpočet požadovaného výkonu spaľovacieho motora

Vypočítaný požadovaný výkon elektromotora je rozdelený na výkon pri jazde a zrýchľovaní a na výkon pri brzdení autobusu. Výkon potrebný na jazdu autobusu vstupuje do subsystému riadenia, kde sa v závislosti od zvolenej stratégie riadenia určí spolupráca batérií a spaľovacieho motora s generátorom. Na obrázku 13 je znázornený výpočet požadovaného výkonu spaľovacieho motora potrebného na pohon elektromotora pri jazde autobusu. Požadovaný výkon spaľovacieho motora je vypočítaný podľa vzťahu 3 z požadovaného výkonu elektromotora.

$$P_{SM} = \frac{P_{EM}}{\eta_I \eta_G \eta_{sp}} \quad (3)$$

kde: P_{EM} je výkon elektromotora, η_I , η_G , η_{sp} - účinnosť inverotra, generátora, stáleho prevodu

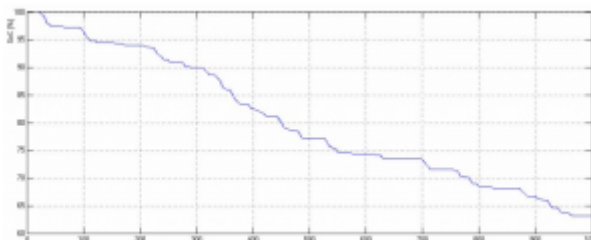
Výkon, ktorý vzniká pri brzdení autobusu následne vstupuje do podmienky rekuperácie, ktorá určí maximálnu hodnotu výkonu, ktorú je možné akumulovať do batérií. Výpočet okamžitého stavu nabitia batérií je znázornený na obrázku 14. Hodnota stavu nabitia batérií v % v modeli vstupuje do subsystému batérií, kde je zohľadnená nabíjacia a vybíjacia charakteristika zvolených batérií - obrázok 6 a 7.



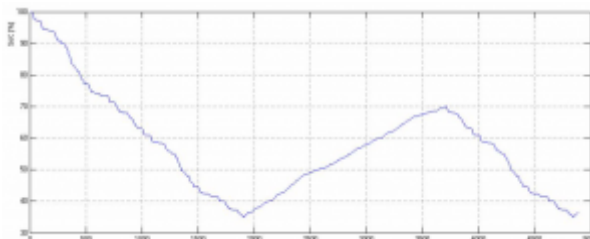
Obrázok 14: Výpočet stavu nabitia batérií

4. Výsledky simulácie

Najsledovanejším výsledkom simulácie jazdy autobusu v mestskom jazdnom cykle CADC je priebeh kapacity resp. stavu nabitia batérií a hodnota spotreby paliva. Z priebehu stavu nabitia batérií, ktorého výpočet je znázornený na obrázku 14, je viditeľná aj spolupráca spaľovacieho motora a batérií. Na obrázku 15 je výsledný priebeh stavu nabitia batérií pre jazdný cyklus CADC (obrázok 11).



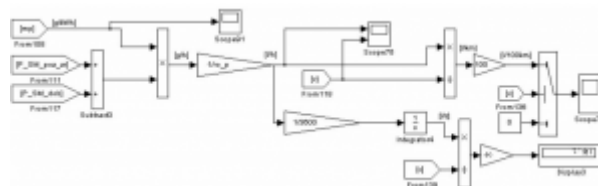
Obrázok 15: Priebeh stavu nabitia batérií pre mestský cyklus CADC



Obrázok 16: Priebeh stavu nabitia batérií pre cyklus CADC opakovaný 5x

Z priebehu stavu nabitia batérií na obrázku 15 je vidieť stav nabitia batérií pre jeden mestský cyklus CADC. Tento cyklus je ale krátky, takže nedošlo k vybitiu batérií a taktiež nebola splnená požiadavka na naštartovanie spaľovacieho motora. Pre lepšiu ilustráciu je na obrázku 16 zobrazený viackrát sa opakujúci cyklus CADC, kde je už aj viditeľné dobíjanie batérií. Dĺžka 5-krát sa opakujúceho cyklu je 24 km a doba trvania je 85 minút. Z priebehu kapacity je vidieť, že batérie sa začnú dobíjať, keď ich kapacita klesla na hodnotu 35% z celkovej kapacity a nabíjanie bolo ukončené keď kapacita dosiahla 70% z celkovej kapacity. Podmienky, kedy sú batérie dobíjané závisia od zvolenej stratégie riadenia.

Ďalším dôležitým a sledovaným výsledkom simulácie jazdy autobusu je spotreba paliva. Výpočet spotreby paliva v prostredí Matlab Simulink je na obrázku 17. Výpočet spotreby paliva vychádza z aktuálnej hodnoty mernej spotreby, ktorá je výstupom z mapy spotreby paliva zadanej v subsysteme spaľovacieho motora. Pomocou jednoduchých matematických operácií je možné z mernej spotreby paliva a požadovaného výkonu vo zvolenom jazdnom cykle vyjadriť spotrebu paliva aj v l/100km.



Obrázok 17: Výpočet spotreby paliva v prostredí Matlab Simulink

5. Záver

V príspevku je opísaná tvorba a princíp činnosti modelu mestského autobusu v prostredí Matlab Simulink. Vytvorením modelu obsahuje submodely jednotlivých komponentov hybridného pohonu a vstupné parametre sú zadávané cez m.file, čo umožňuje jednoducho meniť vstupné parametre. Tak je napríklad možné vykonať simulácie jazdy nie len pre mestský autobus, ale aj pre osobné prípadne nákladné vozidlo. Taktiež je možné jednoduchým spôsobom meniť vlastnosti a charakteristiky jednotlivých komponentov a tým v podstate zmeniť vlastnosti hybridnej hnacej jednotky.

Veľký vplyv na výsledok simulácie má vzájomná spolupráca jednotlivých komponentov. Tá určuje, kedy a za akých podmienok bude pracovať spaľovací motor, kedy budú batérie dobíjané a taktiež určuje podmienky rekuperácie. Vo vytvorenom modeli je uvažované, že rekuperovaná energia je akumulovaná v batériách. Je ale bez väčších ťažkostí možné v modeli vypracovať aj subsystem pre supercapacitor, v ktorom by sa akumulovala zrekuperovaná brzdná energia.

Vytvorený model je používaný na zisťovanie a následnú optimalizáciu vzájomnej spolupráce elektromotora, spaľovacieho motora s generátorom a batérií. Vďaka jednoduchému zadávaniu vstupných parametrov je možné meniť jazdný cyklus a podmienky jazdy, čo umožňuje simulovať rôzne trate mestských autobusov. Z výsledkov simulácií, najmä z priebehu kapacity batérií a spotreby paliva, je možné zhodnotiť vplyv stratégie riadenia autobusu s hybridným pohonom na jazdné výkony, ekológiu a ekonomiu prevádzky v porovnaní s konvenčným pohonom.

Podakovanie

Tento príspevok bol podporovaný grantom VEGA 1/0024/09 Ministerstva školstva Slovenskej republiky.

Použitá literatúra

1. De Haan P., Keller M. Real-world driving cycles for emission measurements: ARTEMIS and Swiss cycles, SAFEL 2001, Bern
2. Hanečková K. Simulačný model činnosti sériového hybridného pohonu pre motorové vozidlo, 2009
3. Hanečková K. Analýza prevádzkových parametrov mestského autobusu, ERIN 2009 Plzeň

Spoluautor článku je Ing. Eduard Rojko, CSc., Strojnícka fakulta STU v Bratislave, Ústav dopravnej techniky a konštruovania, Nám. slobody 17, 812 31 Bratislava
