

Izboljšanje dinamičnih lastnosti hranilnikov električne energije

Marijan ŠPANNER

Izvleček: Prispevek obravnava sisteme za hranjenje energije pri električnih in hibridnih vozilih ter različne možnosti izboljšav njihovih dinamičnih lastnosti. Ključni element vozil z električnim pogonom je učinkovit hranilnik električne energije. Lastnosti akumulatorske baterije so odvisne od izbrane tehnologije, delovne temperature, tipa obremenitve, življenjske dobe / starosti in še nekaterih drugih pogojev. Zelo pomembna lastnost hranilnika električne energije je zmožnost oddajanja in sprejemanja velike količine energije v kratkem času. Ob tem naj bi bil izkoristek hranilnika čim boljši. Standardne akumulatorske baterije (še zlasti svinčene) te zahteve le težko izpolnijo. Zato lahko dodamo sklope, ki so sposobni učinkovito prevzeti konice moči in na ta način bistveno izboljšajo dinamične lastnosti, izkoristek ter podaljšajo življenjsko dobo baterije.

V prispevku je predstavljeno, kako se na osnovi simulacije določi obremenitev baterije med vožnjo vozila. Glede na visoko dinamiko obremenitve se izkaže, da baterija pri vršnih vrednostih obremenitve ne zmore shranjene energije učinkovito pretvoriti v električno. Ta pomanjkljivost se rešuje z dodatnim hranilnikom energije, kot sta superkondenzator ali mehanski vztrajnik. Obe izvedbi »dinamičnega« hranilnika energije sta v prispevku podrobneje opisani, prav tako tudi način njune integracije v »hibridni« hranilnik električne energije.

Ključne besede: električna vozila, vozni cikli, hranilniki električne energije, superkondenzator, vztrajnik, bi-directional Buck-Boost converter

■ 1 Uvod

Električna, hibridna in vozila na go-rivne celice imajo zaradi učinkovitejše izrabe energije nekaj bistvenih prednosti pred običajnimi vozili s pogonom na fosilna goriva. Ničelna stopnja izpusta toplogrednega plina CO₂, tiha in udobna vožnja električnih vozil ter izboljšanje izkoriščenosti fosilnega goriva pri hibridnih vozilih so ključni razlogi za intenziven razvoj električne avtomobilске pogonske tehnike v zadnjih dveh desetletjih. A glede na tehnično dovršenost pogonskih motorjev in močnostnih stikalnih pretvornikov ostaja akumulatorska baterija še vedno šibka točka celotnega električnega sklopa električnih in hibridnih vozil.

Učinkovit akumulator oziroma hranilnik električne energije je ključni element pogonskega sistema pri

Mag. Marijan Španer, univ. dipl. inž., Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko računalništvo in informatiko

vozilih z električnim pogonom. Lastnosti akumulatorske baterije so odvisne od izbrane tehnologije, tipa obremenitve, življenjske dobe oziroma starosti, delovne temperature in še mnogih drugih okoliščin. Pomembna zahteva za hranilnik električne energije je zmožnost oddajanja in sprejemanja velike količine energije v kratkem času. Istočasno naj bi bil izkoristek hranilnika čim boljši. Standardne akumulatorske baterije (še zlasti svinčene) te zahteve le težko izpolnijo.

Kapaciteta akumulatorske baterije oziroma količina razpoložljive električne energije je odvisna od pogojev pri praznjenju in njene izrabiljenosti, na katero pa vplivata predvsem število ciklov in način uporabe v preteklosti. Zaradi velikega števila dejavnikov, ki vplivajo na dejansko kapaciteto baterije (praznilnega toka, števila opravljenih ciklov praznjenja-polnjenja, globina praznjenja, stanja napolnjenosti baterije (SOC), obratovalne temperature in obremenitve) [1], je modeliranje tega procesa zelo zahtevno.

V prispevku je predstavljeno, kako se na osnovi simulacije določi obremenitev baterije med vožnjo vozila. Glede na visoko dinamiko obremenitve se izkaže, da baterija pri vršnih vrednostih obremenitve ne zmore shranjene energije učinkovito pretvoriti v električno. To pomanjkljivost je možno razrešiti z dodanim hranilnikom energije, kot je superkondenzator ali mehanski vztrajnik. Obe izvedbi »dinamičnega« hranilnika energije sta v prispevku podrobneje opisani.

■ 2 Analiza vožnje električnega vozila in obremenitev baterije

Simulacija vožnje je bila narejena s programskim paketom Simulink / MATLAB. Uporabljen je bil matematični model s parametri testnega vozila Estrima Biro [2].

Matematični opis gibanja vozila je možen na osnovi splošnih pravil mehanike. Glede na dejstvo, da je vozilo kompleksen sistem, sesta-

vljen iz velikega števila komponent, smo se pri obravnavi pogonskega sistema omejili na enodimenzionalno gibanje.

Obnašanje vozila vzdolž smeri gibanja je popolnoma določeno z opisom velikosti sil v tej smeri. Pogonski agregat preko gonila generira vlečno (trakcijsko) silo F_r , ki premika vozilo naprej. Med gibanjem vozila se pojavi sila upora (kotalni in aerodinamični upor), ki nasprotuje gibanju oziroma poskuša vozilo zaustaviti, in sila za premagovanje klanca. Po drugem Newtonovem zakonu je pospeševanje vozila določeno z:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Sigma Ft - \Sigma Fr}{M + \delta J_r}$$

kjer je:

- V hitrost vozila
- ΣF_t skupna sila pogona vozila
- ΣF_r skupna sila upora vozila
- M skupna masa vozila
- δ masni faktor, ki pretvori rotacijske vztrajnosti v translacijske mase
- Jr vztrajnostni moment rotirajočih delov vozila

Skupni upor vozila med vožnjo je vsota treh komponent: kotalnega upora, zračnega upora in komponente sile teže pri vožnji po klanecu:

$$F = F_r + F_w + F_g$$

Kotalni upor avtomobilskega kolesa pri vožnji po trdni podlagi je posledica lastnosti materiala pnevmatik pri deformaciji.

$$F_r = Pf_r = mgf_r$$

kjer je

- F_r velikost sile upora kotalnega trenja
- P skupna sila obremenitve na kolesa
- m masa vozila
- f_r faktor kotalnega upora

Ob upoštevanju histerezne karakteristike pri deformaciji pnevmatike je potrebno za kotaljenje kolesa vložiti energijo, ki je proporcionalna površini histerezne krivulje. Faktor kotalnega upora f_r je odvisen od lastnosti materiala pnevmatik in podlage, običajna vrednost pri sodobnih materialih pa znaša okrog 0,01[N/N].

Upor zraka, ki deluje na vozilo pri vožnji z določeno hitrostjo, imenujemo tudi aerodinamični upor. Sestavljen je iz dveh komponent, zračnega upora zaradi oblike vozila in površinskega trenja z zrakom. Oblika vozila ima zelo pomemben vpliv na način odrivanja mase medija (zraka) med vožnjo, posledica tega je sila upora. Definiran je koeficient zračnega upora c_d (drag coefficient):

$$c_d = \frac{2F_w}{\rho v^2 A}$$

kjer je:

- F_w velikost sile zračnega upora
- ρ specifična gostota medija (zraka)
- v hitrost gibanja skozi medij
- A čelna površina vozila

Površinsko trenje nastane zaradi vrtnčenja molekul kot posledica velike razlike v hitrosti zračnih plasti tik ob površini vozila. Skupna sila zračnega upora vozila je podana kot:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho A C_d (v - v_w)^2$$

kjer je:

- ρ gostota medija (zraka)
- v hitrost gibanja skozi medij
- v_w hitrost vetra

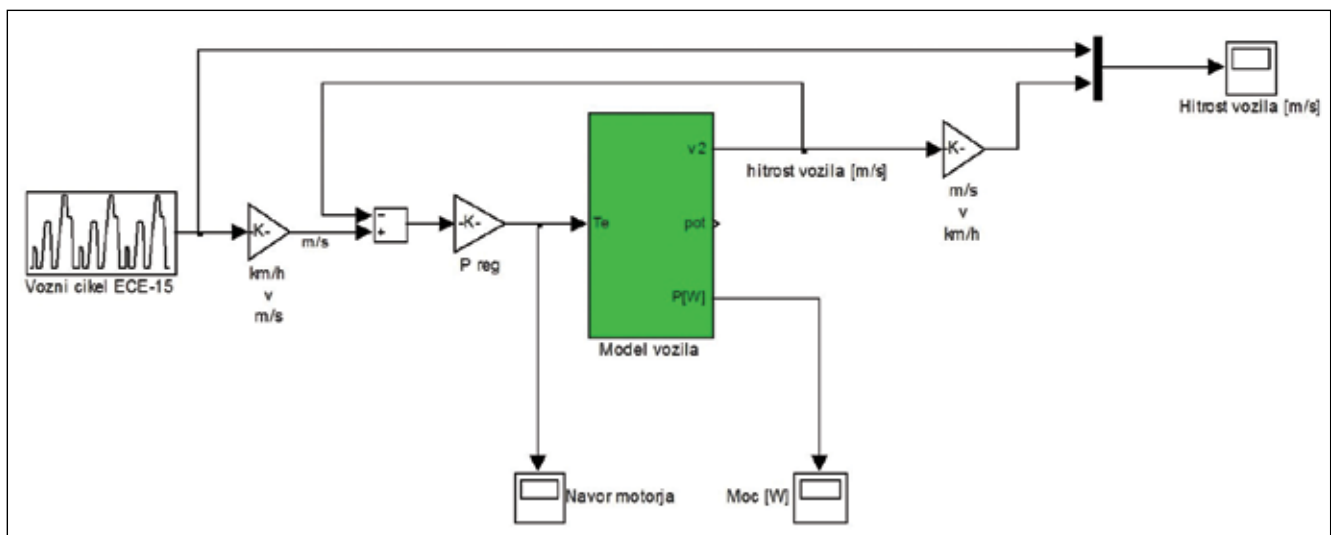
Pri vožnji po klanecu z naklonom α opišemo komponento sile, ki nasprotuje gibanju vozila pri vožnji navzgor oziroma pomaga gibanju pri vožnji navzdol:

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin \alpha$$

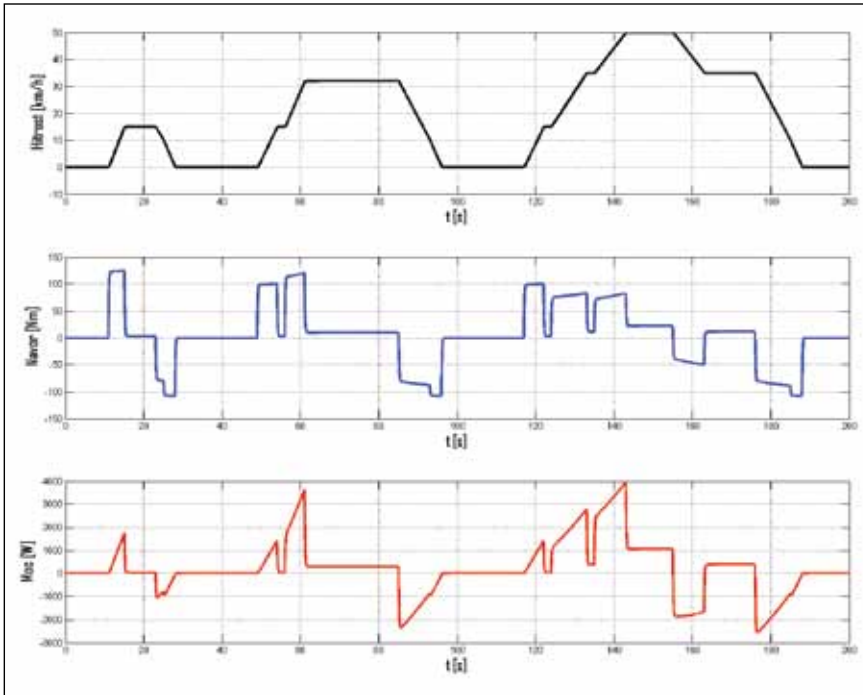
Skupna sila upora vozila med vožnjo je vsota vseh treh komponent:

$$F = mgf_r + \frac{1}{2} \rho A C_d (v - v_w)^2 + mg \sin \alpha$$

Na osnovi teh zakonitosti in lastnosti vozila je bil za potrebe simulacije izdelan matematični model vozila. Simulacijo vožnje je možno izvesti na osnovi sil, ki vplivajo na gibanje, vendar smo se zaradi tipa pogona (rotacijski motor) in preglednejše



Slika 1. Simulacijska shema za analizo vožnje



Slika 2. Simulacija vožnje vozila: hitrost vožnje, navor motorja in potrebna moč pogona

opsijske obravnave reduktorja hitrosti (menjalnika in diferenciala) odločili uporabiti navor kot vhodno veličino v model vozila.

$$T_e = F \cdot r$$

kjer je:

T_e pogonski navor elektromotorja
 F sila za pogon vozila
 r polmer kolesa

Časovni profil potrebne moči pogonskega sistema vozila je bil določen na osnovi analize vožnje vozila. Simulacija vožnje omogoča opazovanje vseh spremenljivk sistema, od potrebne pogonske sile in navora motorja do hitrosti vožnje in prevožene razdalje. Za potrebe preučevanja delovanja akumulatorske baterije je najpomembnejši podatek časovni potek potrebne električne moči, ki jo mora baterija zagotavljati za pogon vozila.

Za testni način vožnje smo izbrali Evropski mestni vozni cikel ECE-15, katerega časovni profil glede vozne dinamike in hitrosti vožnje popolnoma ustreza vožnji majhnega električnega avtomobila v urbanem okolju.

Simulacijska shema na *sliki 1* predstavlja zaprtozančno hitrostno vo-

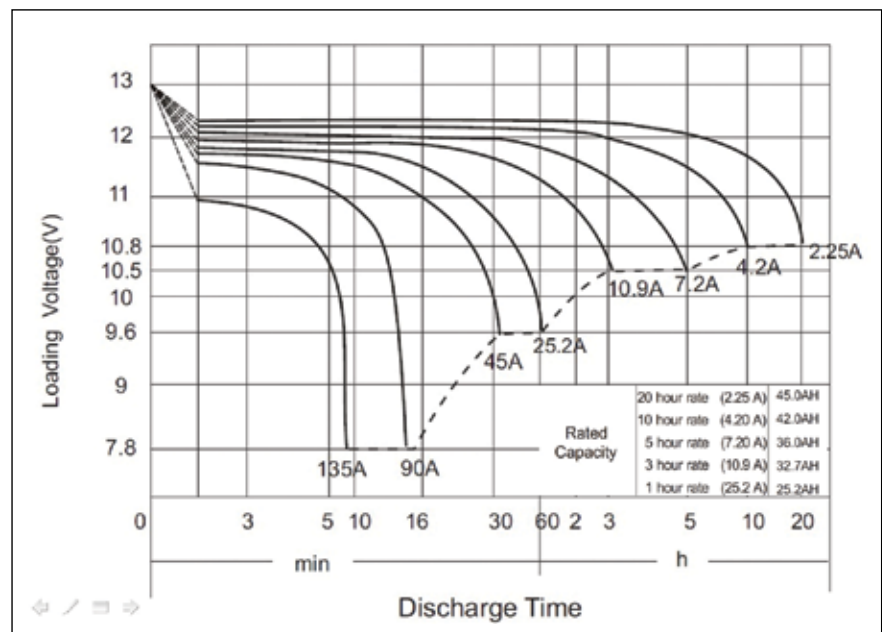
denje vozila. Uporabljen je proporcionalni hitrostni regulator, referenca regulatorja je generirana po voznem ciklu ECE-15.

Značilnost vožnje po urbanem okolju je relativno nizka hitrost s stalnimi spremembami oziroma dinamičnimi pospeševanji in zaviranjmi vozila. *Slika 2* prikazuje potreben navor oziroma moč pogonskega sklopa. Tretji graf slike prikazuje moč oziroma (ob predpostavki konstantne

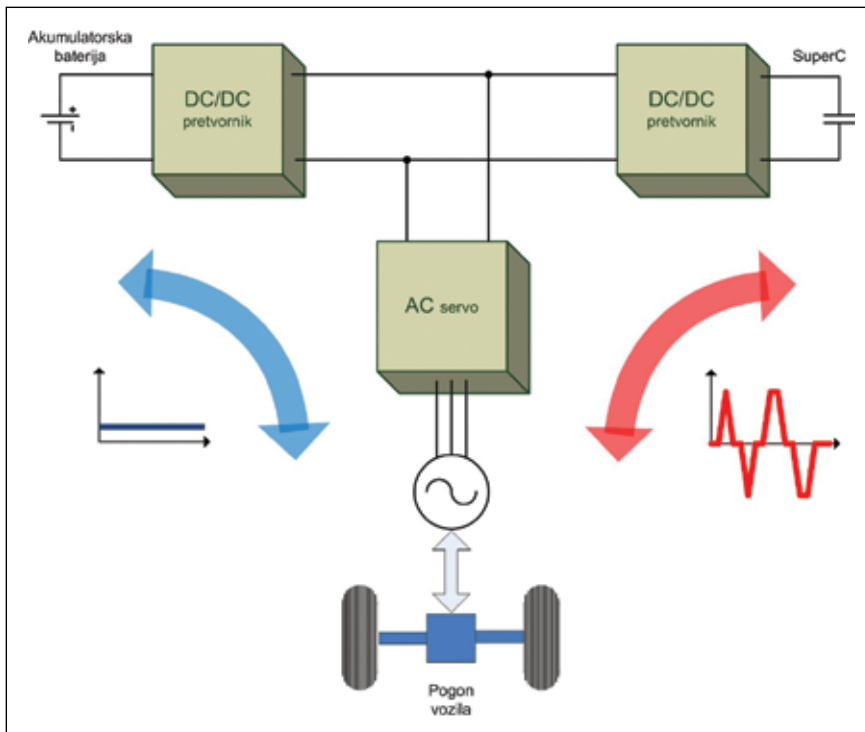
baterijske napetosti) obliko toka, ki ga mora akumulatorska baterija zagotavljati za potrebe pogonskega sklopa. Razvidno je, da je pri mestni vožnji obremenitev baterije izrazito impulzna v obeh režimih delovanja, tako pri pospeševanjih kot tudi zaviranjih vozila.

3 Omejitve akumulatorskih baterij

Za analizo energijske izkoriščenosti baterije je potrebno izvesti simulacijo delovanja elektromotornega pogona z močnostnim pretvornikom, pri čemer se za obravnavo delovanja vira energije uporabi ustrezen model akumulatorske baterije. Ob simulaciji vožnje po dinamičnem voznem ciklu se zaradi visokih obremenitev pokažejo slabosti akumulatorske baterije: znižanje napetosti, posledica tega sta še dodatno povečanje izhodnega toka in upad izkoriščenosti shranjene energije. Jasno se pokaže, da akumulatorska baterija najučinkoviteje deluje pri nizki in čim bolj konstantni obremenitvi. Pri vseh akumulatorskih baterijah, ne glede na tip (svinčene, Ni-Mh ali litijeve), s povečevanjem obremenitve upade izkoristek pretvorbe razpoložljive kemične energije v električno. Pri električnem vozilu nastopajo takšne obremenitve ob delovanju pogonskega motorja z visoko mo-



Slika 3. Praznilna karakteristika baterije Leoch, tip BLDJM 1245 [4]



Slika 4. Hibridni hranilnik energije (primer kombinacije baterije in superkondenzatorja)

čjo, to je predvsem ob močnem pospeševanju pri višjih hitrostih. V tem režimu akumulatorski bateriji zaradi njene notranje upornosti pade napetost in izkoristek hranilnika energije se drastično zmanjša. Dejansko kapaciteto baterije v odvisnosti od praznilnega toka (v primeru konstantnega bremena) je moč zadovoljivo opisati z empiričnim Peukertovim pravilom [1]:

$$C_p = I^k t$$

kjer je:

C_p nazivna kapaciteta baterije [Ah]

I^p aktualni praznilni tok [A]

t čas praznjenja baterije [h]

k Peukertova konstanta

Tudi po podatkih proizvajalca je jasno razviden efekt upada uporabne kapacitete akumulatorske baterije pri povečani tokovni obremenitvi. Slika 3 prikazuje praznilno karakteristiko svinčenih baterij Leoch, tip DJM 1245, ki so vgrajene v testnem vozilu Estrima Biro. Tako že pri obremenitvi baterije s tokom 25 A njena kapaciteta močno pade, z nazivnih 45 Ah na le 25 Ah.

Realna obremenitev baterije je med vožnjo električnega vozila

vedno dinamično spremenljiva, zato je za učinkovito analizo priporočljivo uporabiti kompleksnejši model baterije. Za simulacijo delovanja svinčene akumulatorske baterije je zelo primeren »kinetični model baterije« (KiBaM), ki upošteva tudi regeneracijski efekt med posameznimi intervali obremenitve. Podroben opis KiBaM je podan v [3].

4 Kombiniran hranilnik električne energije

Glede na opisane slabosti standardne akumulatorske baterije kot tudi s stališča učinkovitosti izrabe akumulirane energije pri vozilu so idealni pogoji delovanja takšni, le akumulatorska baterija pokriva le srednje vrednosti potrebne moči. Na ta način je razbremenjena visokih vršnih vrednosti moči, posledično pa je možno izkoristiti največji delež shranjene energije.

Predpostavimo, da je hranilnik električne energije sestavljen iz dveh komponent, od katerih prva (baterija) pokriva le srednje vrednost, druga pa dinamični del obremenitve, prikazano na sliki 4. Prednosti takšnega kombiniranega ali hibridnega hranilnika električne energije bi bile naslednje: izboljšana izkoristčenost shranjene energije, manjše termične izgube in predvidoma tudi podaljšanje življenjske dobe primarne akumulatorske baterije.

V prispevku sta opisani dve različni izvedbi kombiniranega (ali hibridnega) hranilnika električne energije. Primarni hranilnik, ki zagotavlja srednje vrednost moči, je v obeh primerih akumulatorska baterija. Kot dinamična komponenta, ki zagotavlja konice moči pri po-



Slika 5. Dvosmerni močnostni stikalni DC/DC-pretvornik

speševanju in zaviranju vozila, sta podani dve možnosti:

- a) superkondenzator s pretvornikom ali
- b) mehanski vztrajnik z elektromotornim pogonom.

V obeh primerih sta sklopa preko močnostnih pretvornikov z ustreznim vodenjem povezana na skupno enosmerno vodilo glavnega pogona (slika 4).

V hibridnem hranilniku energije je za testiranje uporabljena akumulatorska baterija iz električnega vozila Estrima Biro. Gre za 8 kosov serijsko vezanih 12-voltnih trakcijskih svinčenih gel akumulatorskih baterij Leoch, tip DJM1245 [4]. Skupna napetost je 96 V, kapaciteta 45 Ah, količina shranjene energije v celotni bateriji pa 4,3 kWh.

5 Hranilnik električne energije s superkondenzatorjem

Superkondenzatorji (SC) ali ultrakondenzatorji so kondenzatorji, ki

se zaradi svojih posebnih lastnosti (nove tehnologije, ki omogočajo zelo velike kapacitivnosti, majhno notranjo upornost in posledično visoke tokovne obremenitve) uporabljajo za shranjevanje električne energije [5].

$$W_{SC} = \frac{CU^2}{2}$$

kjer je:

W_{sc} količina shranjene električne energije [Ws]

C kapacitivnost kondenzatorja [F]

U napetost na kondenzatorju [V]

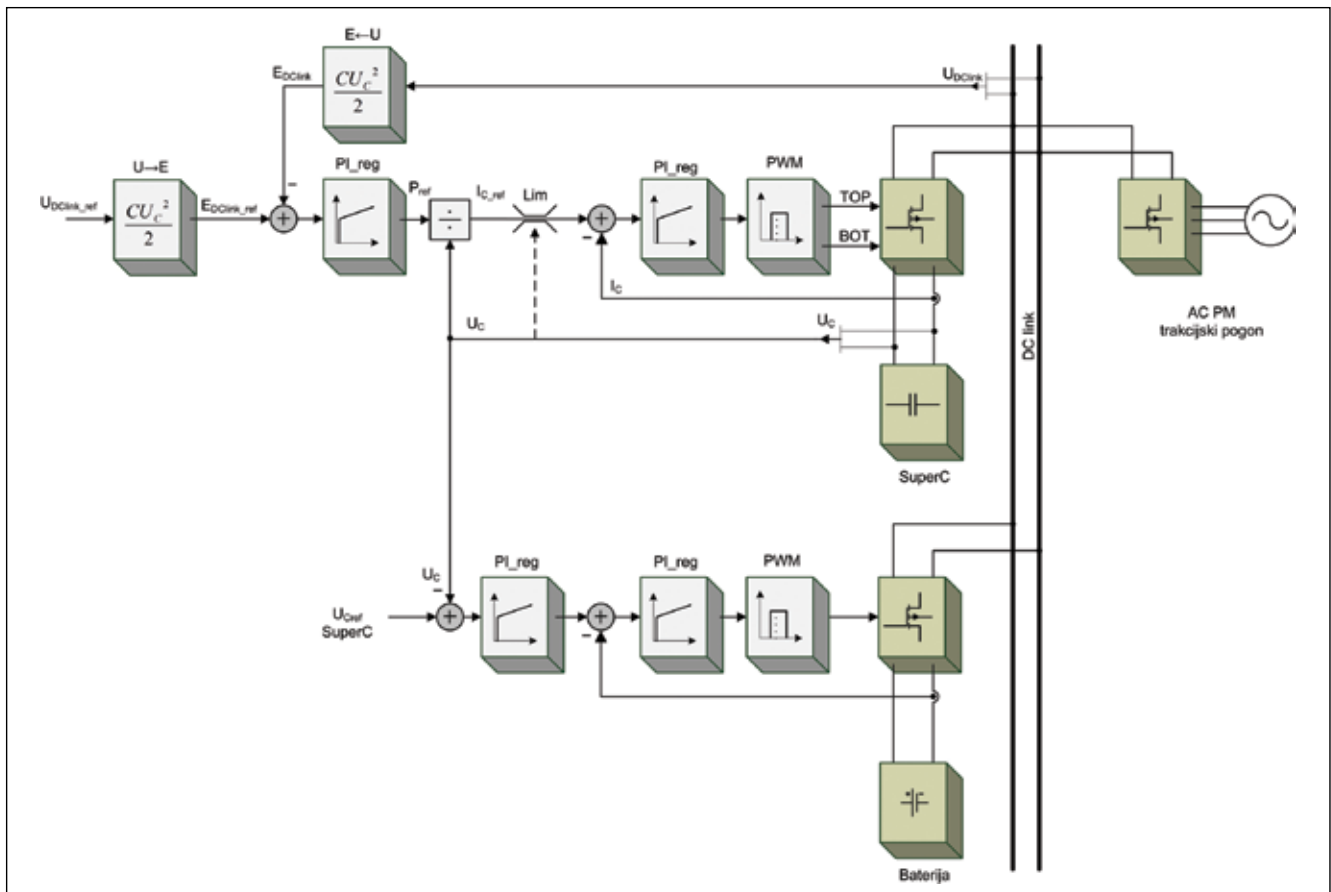
Kondenzatorska baterija je sestavljena iz šestih serijsko vezanih kondenzatorjev s kapacitivnostjo po 250 F / 16 V proizvajalca Maxwella, tip BMOD0250-16.2V. SC je na skupno enosmerno vodilo povezan preko dvosmernega močnostnega stikalnega DC/DC-pretvornika.

Močnostni dvosmerni stikalni pretvornik (slika 5) je bil v laboratoriju razvit posebej za priključitev SC na enosmerno vodilo pogona. Pretvornik navzdol (Buck) prenaša energijo z mesta višjega potenciala (s

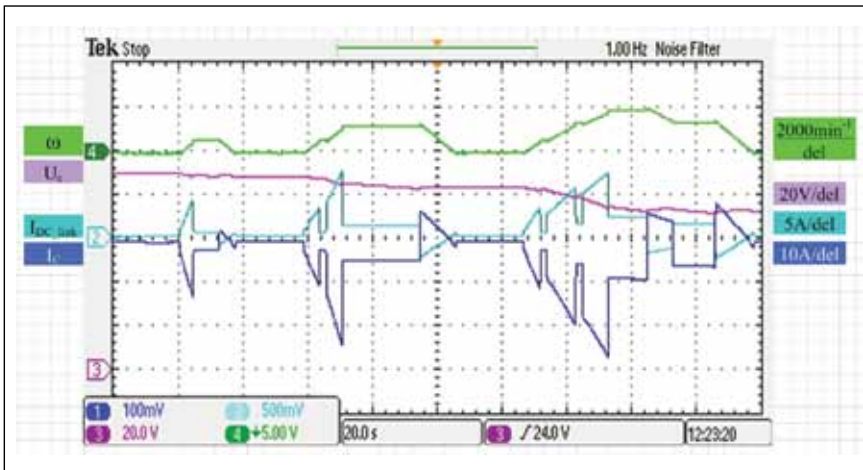
skupnega enosmernega vodila z napetostjo 250 V) v superkondenzator, ki deluje v napetostnem območju od 50 V do 100 V. Pretvornik navzgor (Boost) omogoča prenos energije v nasprotni smeri, pri čemer mora dvigniti napetost za faktor 2,5- do 5-krat. Obe konfiguraciji sta združeni v sestavljenem vezju dvosmernega pretvornika, tipa Buck-Boost.

Močnostni stikalni pretvornik deluje s pulznoširinsko modulacijo (PWM, Pulse Width Modulation). Modulator z dvema izhodoma skrbi za preklap med obema različnima strukturama vodenja (Buck ali Boost), s tem pa se določi tudi smer pretoka energije. Stikalna frekvenca 16 kHz je prilagojena uporabljenim močnostnim tranzistorskim stikalnim elementom IGBT. Tokovna zmogljivost pretvornika na strani SC je v območju +/-100 A. Delovanje pretvornika je podrobneje opisano v [5].

Za vodenje celotnega kombiniranega hibridnega hranilnika električne energije je bila razvita kompleksna shema vodenja (slika 6), ki v dveh re-



Slika 6. Shema vodenja kombiniranega hranilnika energije



Slika 7. Odziv kondenzatorskega hranilnika električne energije pri obremenitvi po voznem ciklu ECE-15

gulacijskih krogih zagotavlja ustrezno dinamiko delovanja za vsakega od obeh hranilnikov/virov energije. Vsak hranilnik energije uporablja svoj dvo-smerni močnostni pretvornik, oba pa sta priključena na skupno enosmerno vodilo, ki zagotavlja napajanje za glavni pogonski motor vozila.

Dinamična enota s superkondenzatorjem se mora hitro odzivati na spremembe. To je zagotovljeno z vodenjem pretvornika s kaskadno regulacijsko zanko neposredne kontrole količine energije na enosmernem vodilu. Pri konstantni vrednosti kapacitivnosti takšna regulacijska zanka zagotavlja konstantno napetost na enosmernem vodilu. Izhod regulatorja energije na izhodu predstavlja referenco potrebne moči. Referenca toka za notranjo tokovno regulacijsko zanko se izračunava iz reference moči in izmerjene napetosti superkondenzatorja:

$$I_{c_ref} = \frac{P_{ref}}{U_c}$$

Ker je količina shranjene energije v superkondenzatorju relativno majhna, zadošča le za pospeševanje vozila oziroma za nekaj deset sekund vožnje (zaloga energije je v razredu 10^5 Ws). Da bi bilo v SC vselej dovolj energije za potrebe glavnega pogona vozila, se mora SC z energijo polniti iz baterije. Ta proces poteka s počasno dinamiko in tako zagotavlja optimalne razmere za delovanje akumulatorske baterije. Z regulacijsko zanko vodenja pretoka energije

iz baterije preko enosmernega vodila se regulira napetost na SC. Tudi tukaj je uporabljena kaskadna shema z notranjo tokovno zanko.

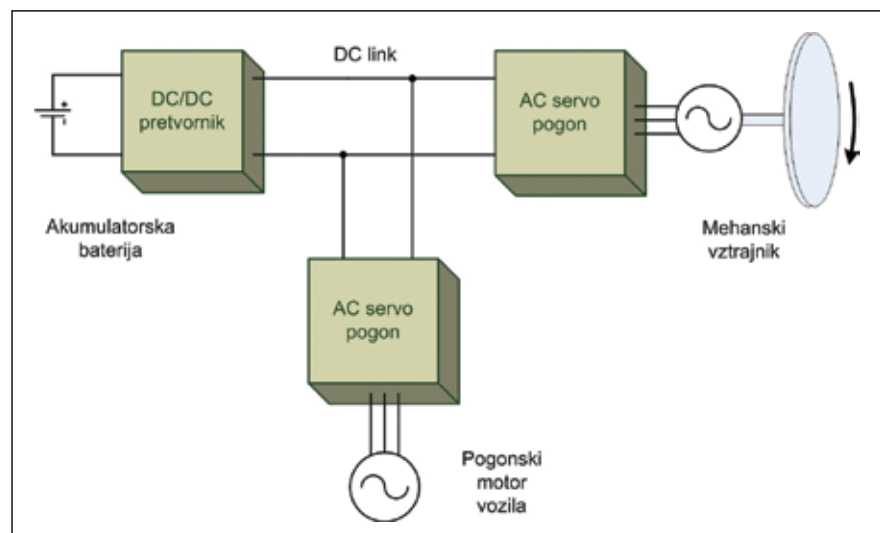
Kot strojna oprema za vodenje sklopa je v pretvorniku uporabljen eksperimentalni komplet Texas Instruments TMS320C2000 [6] z mikrokrmilnikom TMS320F28335. Regulacijsko shemo smo sestavili v programskem paketu MATLAB Simulink, generiranje in prenos programske kode se izvede s CCStudio.

5.1 Preskus dinamičnega hranilnika s superkondenzatorjem

Izveden je bil laboratorijski dinamični test obremenitve enote s superkon-

denzatorjem s pripadajočim pretvornikom. Dinamični hranilnik je bil priključen na »preizkuševališče hibridnih pogonov« [5], to je testno merilno mesto za preizkušanje posameznih pogonskih komponent pri vozilih, različnih hranilnikov energije in konfiguracij vodenja posameznih sklopov. Obremenitev hranilnika energije s SC je bila izvedena preko 5-kilovatnega traksijskega motorskega pogona AC PM z obremenitvijo, identično vožnji po voznem ciklu ECE-15. Enota za mehansko obremenjevanje je sestavljena iz vodenega AC-servopogona, sprogramirana po karakteristikah iz matematičnega modela električnega vozila Estrima Biro.

V laboratorijskem testu je bila enota s superkondenzatorjem obremenjena po dinamičnem voznem ciklu ECE-15, rezultati meritev so prikazani na *sliki* 7. Eksperiment je podrobneje opisan v [5], izveden pa je bil pod naslednjimi pogoji: konstantna napetost skupnega vodila $U_{DC_link} = 250$ V, $U_c(t=0) = 90$ V, vodenje pogonskega motorja po voznem ciklu ECE-15 (60-odstotna obremenitev). Obremenitev vira oziroma izmerjeni tok na enosmernem vodilu I_{DC_link} je po obliki identičen obremenitvi pri simulaciji vožnje (*slika* 2). Zaradi energije, ki se za pogon vozila pretaka iz SC v motor, se zmanjša vrednost shranjene energije v SC, posledično tudi zniža napetost U_c (*slika* 7). Pri enaki obremenitvi je zaznavno tudi povečanje toka iz SC ob znižani napetosti na kondenzatorju.



Slika 8. Kombinirani hranilnik energije (baterija in električni motor/generator z mehanskim vztrajnikom)

6 Hranilnik električne energije z mehanskim vztrajnikom

Kot alternativa hranilniku električne energije s superkondenzatorjem je predviden tudi hranilnik električne energije z mehanskim vztrajnikom. Ta sklop je delno še v fazi izdelave.

Električni motor (z vodenim pretvornikom) pretvarja električno moč na sponkah motorja (U.I) v mehansko moč na izhodni gredi (M.ω), energija pa se akumulira v obliki kinetične energije vrtečega se rotorja vztrajnika. Pretok moči je dvosmeren, električni motor lahko deluje v motorskem ali generatorskem režimu. Shranjena kinetična energija vrtečega telesa je določena z izrazom:

$$W_{kin} = \frac{J\omega^2}{2}$$

kjer je:

W_{kin} količina shranjene kinetične energije [Ws]

J skupni vztrajnosti moment rotorja [kg.m²]

ω kotna hitrost rotorja [rad/s]

Glede na zakonitost, da je shranjena energija proporcionalna kvadratu vrednosti kotne hitrosti, je za shranjevanje energije primerna čim višja kotna hitrost. *Slika 9* prikazuje

količino shranjene kinetične energije v vztrajniku v odvisnosti od kotne hitrosti (prikaz v grafu je v odvisnosti od vrtilne hitrosti [min⁻¹]).

Predvideno konstrukcijo rotorja vztrajnika prikazuje *slika 10*. Izbira dimenzij, vrtilne hitrosti in ostalih lastnosti sklopa je odvisna predvsem od razpoložljive tehnologije. V današnjem času se za izdelavo vztrajnikov uporabljata predvsem dva različna materiala, jeklo ali kompoziti iz ogljikovih vlaken. Oblika vztrajnika, ali je ploščat oziroma vitek in daljši, določa vrednost vztrajnostnega momenta. Matematično je možno dokazati, da količina shranjene energije pri rotorju iz določenega materiala ni odvisna od oblike, temveč le od mase vztrajnika [7].

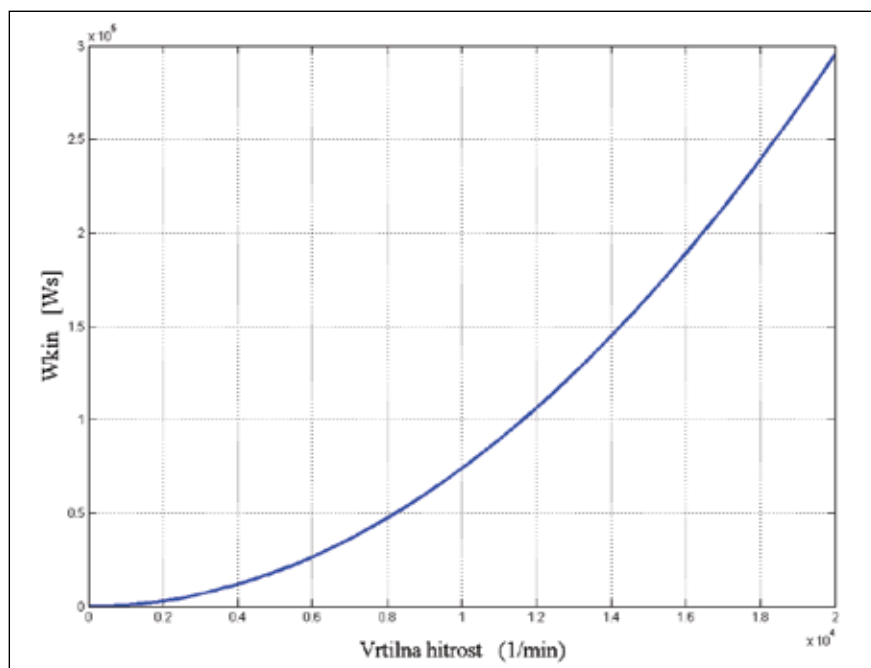
Pri podani konstrukciji (na sliki 10) je masa rotorja jeklenega vztrajnika $m = 22$ kg, skupni vztrajnostni moment vseh vrtečih se delov $J = 0,14$ kg.m². Pri vrtilni hitrosti do $n = 20.000$ min⁻¹ to ustreza najvišji vrednosti shranjene energije v razredu 300.000 Ws.

Električni motor za pogon vztrajnika ima funkcijo pretvorbe električne energije v mehansko. Glede na današnjo tehnologijo električnih motorjev bi bila smiselna izbira motorja s trajnimi magneti (PM motor),

saj so manjši, omogoča velike preobremenitve in ima boljši izkoristek od ostalih tipov motorjev. A glede na pretežno impulzno, nizko intermitenčno delovanje električnega motorja so zelo pomemben dejavnik tudi izgube v prostem teku. PM-motorji imajo v primerjavi z motorji brez trajnih magnetov pri visokih vrtilnih hitrostih primerljivo visoke izgube magnetenja (histerezne in vrtilne). Zato smo se kljub slabšemu izkoristku odločili za uporabo asinhronskega motorja. Zaradi zahtevane visoke obratovalne vrtilne hitrosti do 20.000 vrt/min je izbran standardni 2-polni motor. Predvidena predelava obsega obdelavo rotorja in natančno centriranje, zamenjavo ležajev, izdelavo novih ležajnih pokrovov kot tudi previjanje navitja statorja za ustrezno napetost. Električni motor/generator bo na skupno enosmerno vodilo vozila priključen preko trifaznega tranzistorskega mostiča z vektorskim PWM-vođenjem, kar bo omogočilo neodvisno nastavljanje magnetilne in delovne komponente. Ta način zagotavlja optimalno delovanje v različnih režimih, tako z najvišjo stopnjo magnetenja do nazivne delovne točke (10.000 vrt/min), v območju slabljenja polja (med 10.000 vrt/min in 20.000 vrt/min) kot tudi možnost delovanja brez magnetnih izgub v prostem teku.

Pri visokih vrtilnih hitrostih, še zlasti pri aplikaciji, kjer so zahtevane čim manjše izgube, je potrebno zagotoviti minimalno trenje. V ta namen je predvidena vgradnja motorja v zaprto ohišje, kjer bo deloval v helijevi atmosferi. Helij zaradi nižje viskoznosti zagotavlja tudi nižji viskozni zračni upor vrtečega se rotorja. Za boljše hlajenje je zelo ugodna tudi bistveno boljše toplotna prevodnost helija (He: 0,14 W/(m.K), zrak: 0,025 W/(m.K), oboje velja pri temperaturi $T = 293$ K in tlaku $p = 1$ bar).

Ležaji morajo pri opisani aplikaciji zadostiti mnogim zahtevam. Zagotavljati morajo vrtenje rotorja v širokem območju vrtilne hitrosti in radialnih osnih obremenitev, pri tem pa morajo biti izgube zaradi



Slika 9. Količina shranjene energije vztrajnika v odvisnosti od vrtilne hitrosti

trenja čim manjše. Tem zahtevam ustrezajo precizni kotalni ležaji s keramičnimi kroglicami.

Pri uležajanju celotnega sklopa je potrebno upoštevati tudi možnost vgradnje v vozilo. V primeru, da je sklop vgrajen vodoravno, se med vožnjo ob zavijanju vozila na os vztrajnika pojavi precesijski navor. Navor na vrteči se rotor znaša:

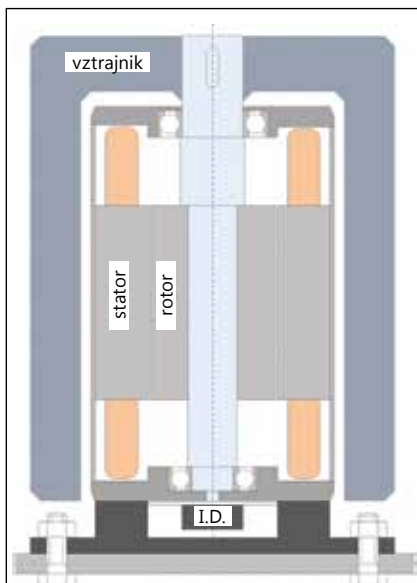
$$M = J \cdot \omega_r \cdot \omega_{prec}$$

kjer je:

J vztrajnostni moment rotorja [kg.m²]

ω_r kotna hitrost rotorja [rad/s]

ω_{prec} kotna hitrost precesije [rad/s]



Slika 10. Predvidena konstrukcija elektromotornega pogona z vztrajnikom

Za testno vozilo je bilo pri vožnji izmerjeno, da pri zavijanju vozila prihaja do precesijske kotne hitrosti do 1 rad/s. Precesijski navor bo pri najvišji kotni hitrosti rotorja vztrajnika in sočasni najvišji hitrosti zavijanja vozila dosegel vrednost 300 Nm. Pri predvideni konstrukciji vztrajnika bo sila na ležaje znašala do $F_{max} = 1600$ N, kar pa znaša le okrog 15 % dovoljene radialne dinamične obremenitve izbranih ležajev.

■ 7 Sklep

Superkondenzator je zaradi svoje robustnosti zelo primeren za dinamične obremenitve. Za razliko od akumulatorske baterije nima omejitve števila ciklov oziroma življenjske dobe, prednost pa je tudi v visoki specifični moči. Izvedena je bila analiza delovanja kombiniranega hranilnika električne energije, sestavljenega iz primarne baterije in dodane »dinamične« komponente. V laboratoriju je bilo izmerjeno obremenjevanje pogonskega sklopa vozila po voznem ciklu ECE-15 z napajanjem iz hranilnika s superkondenzatorjem kot virom energije.

Izmerjene dinamične lastnosti potrjujejo primernost uporabe superkondenzatorja kot enote za shranjevanje električne energije tudi pri hitrih spremembah obremenitve. Ker je baterija razbremenjena dinamične komponente toka, se pričakuje znatno podaljšanje njene življenjske dobe.

Identičen poskus kot s superkondenzatorjem je predviden tudi pri hranilniku energije z vztrajnikom. Cilj je natančno izmeriti in ovrednotiti vse lastnosti, vključno z izkoristkom in dinamičnimi odzivi. Zlasti zanimiva bo primerjava lastnosti superkondenzatorja kot čistega električnega sistema ter vztrajnika kot elektromehanskega sistema.

Literatura

- [1] Handbook of Batteries, David Linden, Thomas Reddy, McGraw-Hill, New York, 2001 (<http://www.mcgraw-hill.com.au/html/9780071359788.html>)
- [2] električno vozilo Estrima Biro: <http://www.estrima.com/en/>
- [3] Manwell, J. F. and J. G. McGowan. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems. Solar Energy, 1993. 50(5): p. 399
- [4] <http://www.leoton.ua/leoch-battery-djm1245.php>
- [5] M. Španer, "Hranilniki energije pri hibridnem pogonu", Magistrsko delo, Univerza v Mariboru, 2010
- [6] Texas Instruments TMS320C2000 Experimenter Kit: <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?literatureNumber=sprufr5f&fileType=pdf>
- [7] J. Laeuffer, A Small Flywheel Energy Storage for Hybrid Cars, PCIM Europe 2012, 8–10 May, Nuremberg

Electrical energy storage system with improved dynamics

Abstract: The paper presents the energy storage systems of electric and hybrid vehicles and the approaches for improving the dynamic properties of the energy storage. The key element of the vehicles with electric propulsion is an efficient energy storage system. The properties of the battery depend on its type/manufacturing technology, operation temperature, type of load, age and some other factors. A very important property of the energy storage is its ability to receive and store significant amounts of energy in a short time. Its efficiency should also be the best possible during such an operation. The commonly used batteries (especially lead batteries) hardly meet this requirement. Therefore, the elements that can efficiently handle energy peaks and by this significantly improve the dynamics and lifetime of the battery are added into the energy storage. The elements described in the paper are the supercapacitor and the mechanical storage-flywheel. Furthermore, it is shown how these additional components are integrated into the hybrid energy storage system of the vehicle.

Key words: electric vehicles, driving cycles, electric energy storage, supercapacitor, flywheel, bidirectional Buck-Boost converter.