

# Skladištenje električne energije kod hibridnih električnih vozila

---

**Dubić, Krunoslav**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2010**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:752586>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-26**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Krunoslav Dubić

Zagreb, 2010. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:  
Prof. dr. sc. Joško Petrić

Krunoslav Dubić

Zagreb, 2010. godina

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

**IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno koristeći navedenu literaturu, te znanje stečeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

Zahvaljujem se asistentu dr. sc. Danijelu Pavkoviću na korisnim savjetima i podršci tijekom izrade završnog rada.

Zagreb, 2010



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

|  |        |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum  | Prilog |
| Klasa:   |        |
| Ur.broj:   |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Krunoslav Dubić**

Mat. br.: 0035158720

Naslov: **Skladištenje električne energije kod hibridnih električnih vozila**

Opis zadatka:

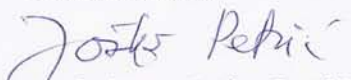
Elementi za skladištenje električne energije, kao što su akumulatorske baterije i ultrakondenzatori, imaju ključnu ulogu u sustavima upravljanja tokovima energije u električnim i hibridnim-električnim vozilima. U radu je potrebno:

- Opisati tipičnu strukturu i princip rada hibridnog električnog vozila s paralelnim pogonom zasnovanim na primjeni motora s unutarnjim izgaranjem i električnih strojeva;
- opisati osnovne značajke suvremenih akumulatorskih baterija i ultrakondenzatora za primjene u hibridnim električnim vozilima;
- postaviti matematičke modele punjenja i pražnjenja akumulatorskih baterija i ultrakondenzatora;
- opisati postupke procjene stanja nabijenosti akumulatorske baterije.

Zadatak zadan:

11. prosinca 2009.


Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Joško Petrić

Rok predaje rada:

Prosinac 2010.

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Dubravko Majetić

# Sadržaj

|   | <b>Br. stranice</b> |
|---|---------------------|
| <b>Tekst zadatka</b>                          | <b>II</b>           |
| <b>Sadržaj</b>                                | <b>III</b>          |
| <b>Sažetak</b>                                | <b>V</b>            |
| <b>Popis slika, tablica</b>                   | <b>VI</b>           |
| <b>Popis oznaka</b>                           | <b>IX</b>           |
| <b>1 Uvod</b>                                 | <b>1</b>            |
| <b>2 Hibridna vozila</b>                      | <b>2</b>            |
| 2.1 Toyota Prius - hibridno električno vozilo | 3                   |
| 2.2 Vrste hibridnih vozila                    | 4                   |
| 2.3 Rad HSD-sustava                           | 7                   |
| 2.4 Princip rada i struktura hibridnog vozila | 12                  |
| <b>3 Akumulatorska baterija</b>               | <b>17</b>           |
| 3.1 Značajke akumulatorskih baterija          | 18                  |
| 3.1.1 Napon ćelije i napon baterije           | 18                  |
| 3.1.2 Kapacitet punjenja                      | 19                  |
| 3.1.3 Pohranjena energija                     | 19                  |
| 3.1.4 Specifična energija                     | 20                  |
| 3.1.5 Gustoća energije                        | 20                  |
| 3.1.6 Specifična snaga                        | 20                  |
| 3.1.7 Efikasnost punjenja ili ampersata       | 22                  |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 3.1.8     | Efikasnost energije  | 22        |
| 3.2       | Nikal-metal-hidridne (NiMH) baterije                                   | 23        |
| 3.3       | Litijska baterija  | 26        |
| 3.3.1     | Litij-polimerska baterija  | 26        |
| 3.3.2     | Litij-ionska baterija  | 26        |
| <b>4</b>  | <b>Ultrakondenzator</b>  | <b>28</b> |
| 4.1       | Značajke ultrakondenzatora   | 30        |
| 4.2       | Primjena ultrakondenzatora   | 34        |
| <b>5.</b> | <b>Punjenje i pražnjenje ultrakondenzatora i kontrola napunjenosti</b> | <b>37</b> |
| <b>6.</b> | <b>Punjenje i pražnjenje baterija</b>                                  | <b>41</b> |
| 6.1       | Metode mjerenja  | 43        |
| 6.2       | Pražnjenje baterija  | 48        |
| 6.3       | Procjena algoritama stanja nabijenosti                                 | 51        |
| <b>7</b>  | <b>Zaključak</b>   | <b>54</b> |
| <b>8</b>  | <b>Literatura</b>  | <b>55</b> |

## Sažetak

U ovom radu se analizira skladištenje električne energije hibridnih električnih vozila. Navedeni su elementi za skladištenje električne energije, kao što su akumulatorske baterije i ultrakondenzatori koji imaju ključnu ulogu u sustavima upravljanja tokovima energije u električnim i hibridnim-električnim vozilima.

U radu je opisana tipična struktura i princip rada hibridnog električnog vozila s paralelnim pogonom zasnovanim na primjeni motora s unutarnjim izgaranjem i električnih strojeva, rad HSD-sustava, te vrste hibridnih električnih vozila prema načinu djelovanja pojedinih impulsa snage. Za opis tipične strukture i princip rada hibridnog električnog vozila uzeli smo primjer hibridnog vozila Toyote Priusa. U radu su također opisane osnovne značajke suvremenih akumulatorskih baterija i ultrakondenzatora za primjene u hibridnim električnim vozilima. Postavljeni su modeli punjenja i pražnjenja akumulatorskih baterija i ultrakondenzatora te prikazane mogućnosti skladištenja energije u istima.



# Popis slika, tablica

|   | Br. stranice |
|---|--------------|
| <b>Slika 2.1.</b> Hibridno vozilo - presjek   | 2            |
| <b>Slika 2.2.</b> Toyota Volta  | 3            |
| <b>Slika 2.3.</b> Pogonska osnova Toyote Prius - elektromotor i benzinski motor kod Priusa su smješteni poprečno naprijed | 3            |
| <b>Slika 2.4.</b> Serijski hibrid   | 5            |
| <b>Slika 2.5.</b> Paralelni hibrid  | 6            |
| <b>Slika 2.6.</b> Serijsko - paralelni hibrid (THS)   | 6            |
| <b>Slika 2.7.</b> Dijelovi hibridnog sinergijskog pogona  | 7            |
| <b>Slika 2.8.</b> Operativni panel Toyote Priusa unutar vozila  | 7            |
| <b>Slika 2.9.</b> HSD-sustav (start - uzbrdica)   | 8            |
| <b>Slika 2.10.</b> HSD-sustav: prikaz rada kod starta   | 8            |
| <b>Slika 2.11.</b> HSD-sustav: prikaz rada kod normalne vožnje  | 9            |
| <b>Slika 2.12.</b> HSD-sustav: prikaz rada kod ubrzanja (uzbrdice)  | 9            |
| <b>Slika 2.13.</b> HSD-sustav (usporavanje - zaustavljanje)   | 9            |
| <b>Slika 2.14.</b> HSD-sustav: prikaz rada kod kočenja (usporavanja)  | 10           |
| <b>Slika 2.15.</b> HSD-sustav: prikaz rada kod punjenja baterije  | 10           |
| <b>Slika 2.16.</b> HSD-sustav: prikaz rada kod zaustavljanja  | 11           |
| <b>Slika 2.17.</b> Smještaj pojedinih komponenti u prednjem djelu automobila Toyote Prius                                 | 11           |
| <b>Slika 2.18.</b> Prikaz vrhunskih komponenti Hybrid Synergy Drive-a   | 11           |

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <b>Slika 2.19.</b> | Sinergija motora, elektromotora i prijenosa  | 12 |
| <b>Slika 2.20.</b> | Nikal-metal-hidridna baterija  | 13 |
| <b>Slika 2.21.</b> | Inverter   | 14 |
| <b>Slika 2.22.</b> | Kompletan pogonski sklop s inovativnim benzinskim motorom, sklopom za podjelu snage i elektromotorom | 14 |
| <b>Slika 2.23.</b> | Sustav pri regenerativnom i hidrauličkom kočenju   | 15 |
| <b>Slika 2.24.</b> | PSD (Power Split Device)   | 15 |
| <b>Slika 3.1.</b>  | Akumulatorska baterija   | 17 |
| <b>Slika 3.2.</b>  | Ragone-ov dijagram   | 21 |
| <b>Slika 3.3.</b>  | Reakcije na elektrodama NiMH baterije  | 23 |
| <b>Slika 3.4.</b>  | Komercijalna NiMH baterija   | 24 |
| <b>Slika 4.1.</b>  | Prikaz elektrostatskog kondenzatora i kondenzatora s dielektrikom                                    | 28 |
| <b>Slika 4.2.</b>  | Ultrakondenzator   | 29 |
| <b>Slika 4.3.</b>  | Prikaz površine i razmaka između ploča kondenzatora  | 30 |
| <b>Slika 4.4.</b>  | Prikaz debljine kondenzatora   | 31 |
| <b>Slika 4.5.</b>  | Usporedba različitih tipova ultrakondenzatora, kondenzatora i baterija                               | 32 |
| <b>Slika 4.6.</b>  | Razlika između klasičnog tipa pločastog kondenzatora i ultrakondenzatora                             | 33 |
| <b>Slika 4.7.</b>  | Upotreba ultrakondenzatora u hibridnim vozilima  | 36 |
| <b>Slika 4.8.</b>  | Upotreba ultrakondenzatora i baterija u hibridnim vozilima   | 36 |

|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
| <b>Slika 5.1.</b>  | Kondenzator s elektrodama i dielektrikom  | 37 |
| <b>Slika 5.2.</b>  | Kondenzator u strujnom krugu  | 39 |
| <b>Slika 6.1.</b>  | Opći prikaz SOC sustava   | 42 |
| <b>Slika 6.2.</b>  | Osnovni princip SOC na temelju izravnog mjerenja  | 43 |
| <b>Slika 6.3.</b>  | Krivulje pada napona pri različitim postocima pražnjenja<br>Li-ion baterije             | 44 |
| <b>Slika 6.4.</b>  | EMS krivulje dobivene metodom linearne interpolacije                                    | 45 |
| <b>Slika 6.5.</b>  | EMS po dijelovima krivulje za Li-ion bateriju   | 46 |
| <b>Slika 6.6.</b>  | Karakteristika pražnjenja baterije u vremenu  | 48 |
| <b>Slika 6.7.</b>  | Napon pražnjenja u odnosu na vrijeme karakteristično<br>za različita područja           | 49 |
| <b>Slika 6.8.</b>  | Skalirani napon pražnjenja u odnosu na vrijeme karakteristično<br>za različita područja | 50 |
| <b>Slika 6.9.</b>  | Dijagram stanja nabijenosti baterije  | 51 |
| <b>Slika 6.10.</b> | Određivanje maksimalnog kapaciteta $Cap_{max}$  | 52 |
| <b>Slika 6.11.</b> | Pregled mogućnosti skladištenja energije  | 53 |
| <b>Slika 6.12.</b> | Usporedba različitih tehnologija skladištenja energije                                  | 53 |
| <b>Tablica 6.1</b> | Naponi i vrijednosti SOC u intervalima EMS krivulje                                     | 46 |

## Popis oznaka

| Oznaka          | Opis                             | Jedinica       |
|-----------------|----------------------------------|----------------|
| $v$             | Brzina vozila                    | m/s            |
| $U$             | Električni napon                 | V              |
| $Q$             | Električni naboj                 | C              |
| $W$             | Pohranjena energija              | J              |
| $S$             | Površina elektrode               | m <sup>2</sup> |
| $d$             | Razmak između ploča kondenzatora | m              |
| $W$             | Elektrostatska energija          | J              |
| $E$             | Jakost električnog polja         | V/m            |
| $\varepsilon_0$ | Dielektrična konstanta vakuumu   | As/Vm          |
| $\varepsilon_r$ | Relativna dielektrična konstanta | As/Vm          |
| $C$             | Električni kapacitet             | F              |
| $T$             | Temperatura                      | K              |
| $A$             | Površina elektrode               | m <sup>2</sup> |
| $I$             | Jakost električne struje         | A              |
| $U_r$           | Električni napon na otporu       | V              |
| $V_c$           | Električni napon na kondenzatoru | V              |
| $R$             | Električni otpor                 | $\Omega$       |
| $\tau$          | Vremenska konstanta pražnjenja   | s              |
| $V_r$           | Nominalni napon kondenzatora     | V              |

|          |  |          |
|----------|--|----------|
| $R_i$    | Unutarnji otpor kondenzatora               | $\Omega$ |
| $\eta_c$ | Stupanj korisnog djelovanja pri punjenju   |          |
| $\eta_d$ | Stupanj korisnog djelovanja pri pražnjenju |          |
| $V_l$    | Fiksni napon EMS krivulje                  | V        |
| $V_h$    | Fiksni napon EMS krivulje                  | V        |
| $SOC$    | Procjena stanja nabijenosti                | %        |
| $EMS$    | Elektromotorna sila                        | V        |

# 1. UVOD

Cijene nafte i naftnih derivata prisilile su automobilsku industriju na razvoj efikasnijih automobila. Samo je pitanje vremena kada će cijena nafte, kao i svijest o zaštiti okoliša toliko ojačati da će klasična vozila na cestama posve nestati, a zamijenit će ih ona hibridna i električna. Dok hibridna vozila ispuštaju manje otrovnih plinova, električna vozila ne ispuštaju plinove uopće, niti ne zagađuju okoliš bukom. Hibridna vozila su trenutačno najzanimljivija alternativa klasičnim automobilima.

Zahvaljujući elektromotoru koji se uključuje kada automobilu zatreba više snage, obujam motora s unutarnjim izgaranjem se smanjuje, a time i emisija štetnih plinova te potrošnja. Baterija koja pogoni elektromotor puni se u režimu regenerativnog kočenja gdje se energija koja se oslobađa prilikom kočenja elektromotorom vraća natrag u bateriju. Samo ove dvije promjene omogućavaju uštedu gotovo 50 posto goriva.

Vrste hibridnih vozila, princip rada i struktura hibridnog vozila, rad HDS-sustava, te elementi za skladištenje električne energije kao što su akumulatorske baterije i ultrakondenzatori opisani su u 7 poglavlja uključujući uvod i zaključak. U nastavku se sažeto opisuju pojedini dijelovi rada.

**Drugo poglavlje:** *Hibridna vozila.* Razmatraju se tipične strukture i princip rada hibridnog vozila s pogonom zasnovanim na primjeni motora s unutarnjim izgaranjem i električnih strojeva.

**Treće poglavlje:** *Akumulatorska baterija.* Opisuju se osnovne značajke suvremenih akumulatorskih baterija za primjene u hibridnim električnim vozilima.

**Četvrto poglavlje:** *Ultrakondenzator.* Opisuju se osnovne značajke ultrakondenzatora za primjene u hibridnim električnim vozilima.

**Peto poglavlje:** *Punjenje i pražnjenje ultrakondenzatora.* Postavljen je matematički model punjenja i pražnjenja ultrakondenzatora.

**Šesto poglavlje:** *Punjenje i pražnjenje baterija.* Postavljen je matematički model punjenja i pražnjenja baterije.

## 2. HIBRIDNA VOZILA

Hibridna vozila su trenutno najzanimljivija alternativa klasičnim automobilima. Proizvode se već nekoliko godina, a u Japanu je broj takvih vozila prešao milijun.

U većini država EU su za kupnju hibridnog vozila na raspolaganju subvencije i/ili niži porez. Financijski gledano, isplativost hibridnog vozila (po pitanju utroška goriva) povećava se s prijednom udaljenosti u odnosu na klasični automobil, naročito u uvjetima gradske vožnje.



**Slika 2.1.** Hibridno vozilo - presjek

Ponuda hibridnih vozila je raznolika i u sektoru terenskih vozila, jer hibridno vozilo s pogonom na četiri kotača (jednu osovinu pokreće motor s unutarnjim izgaranjem, a drugu električni pogon) nije teško napraviti. Kod mjenjača brzina nije potrebno dodati okretni moment, a kontrolni sustav tog tipa hibrida je jednostavan. Zbog dobrog okretnog momenta elektromotora vozila su prikladna za vožnju po gradu i ruralnim područjima. Izdržljivost vozila na isključivo električni pogon može biti manja. Osim toga je na niskim temperaturama kapacitet negrijanih akumulatora bitno niži (ovisi o tipu akumulatora).

Hibridna vozila pokretana su električnom energijom, ali i klasičnim motorom s unutrašnjim izgaranjem. Iako su ovakva vozila skuplja od klasičnih, njihova potrošnja goriva je i do dva puta manja, a vozne karakteristike jednake. U osobnim vozilima najčešće se koristi takozvani paralelni hibridni sustav, kod kojega kotače istodobno pokreću i benzinski motor i elektromotor, pri čemu uvjeti vožnje određuju koji pogon preuzima vodeću ulogu.

## 2.1 Toyota Prius - hibridno električno vozilo

Toyota je započela razvijati hibridni sustav daleko prije nego što je 1997. godine predstavila prvu generaciju Priusa. Razvoj plinske turbine koja je trebala napajati električni pogonski sustav započeo je već 1965. godine.

Već nakon četiri godine predstavljen je prvi autobus kojeg je pokretao taj sustav.

Prvi osobni automobil sa električno - turbinskim pogonom predstavljen je šest godina kasnije, dok je prototip hibridnog modela Sports 800 nastao 1977. godine. Najnoviji Toyotin sportski automobil sa hibridnim pogonom Volta dostiže brzinu od 100 km/h u samo 4.05 sekundi.



**Slika 2.2.** Toyota Volta

Što je to hibridni pogon? Kod hibridnog pogona osnovna ideja vodilja jest što učestaliji rad i uključivanje dodatnog elektromotora radi što manje potrošnje goriva, što niže emisije štetnih plinova i što veće vučne snage. Specifičnost hibridnih vozila je postojanje dodatnog izvora snage koji može funkcionirati kao glavni pogon, kao dodatna potisna sila ili zajednička snaga automobila. No da bi sve funkcioniralo kako treba potrebna je najsuvremenija tehnologija, pred samo petnaestak godina nezamisliva.



**Slika 2.3.** Pogonska osnova Toyote Prius - elektromotor i benzinski motor kod Priusa su smješteni poprečno naprijed



## 2.2 Vrste hibridnih vozila

Hibridi su dakle vozila koja za pogon koriste dva ili više izvora snage.

Prema vrstama različitih ugrađenih pogonskih motora možemo govoriti o:

- hibridima koji kombiniraju motor s unutarnjim izgaranjem (benzinski ili dizel) i elektromotor
- hibridima koji kombiniraju motor s unutarnjim izgaranjem ili elektromotor sa zrakom (hibridi na stlačeni zrak)
- hibridima pokretanim ljudskim pogonom ili snagom vjetra i elektromotorom

Također hibride prema načinu djelovanja pojedinih impulsa snage možemo podijeliti na serijske i paralelne.

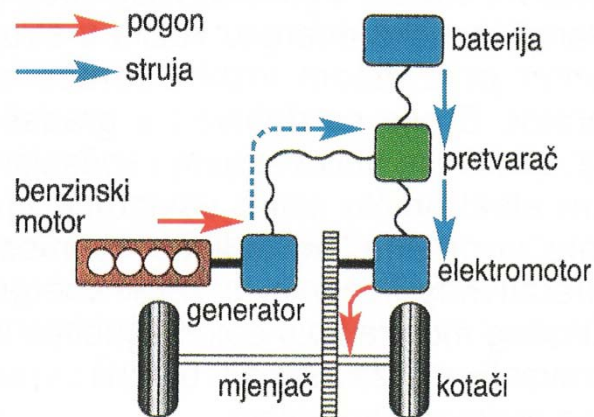
Tijekom desetljeća u praksi su iskušane razne kombinacije pogona i goriva, no tek je Prius dao zadovoljavajući omjer učinka benzinskog motora, elektromotora i kapaciteta baterije. Sve se zasniva na spremanju dovoljne količine energije koja se u određenom trenutku može uspješno iskoristiti, a potom i brzo nadoknaditi.

Nakon dugotrajnih pokusa i novih tehničkih rješenja Toyota ima svoj snažni hibrid i jedinstveni HDS sustav (Hybrid Synergy Drive).

Da bi to postigli, razvili su originalan serijsko-paralelni hibridni pogon (THS) koji objedinjuje isključivo najpoželjnije osobine tzv. serijskih i paralelnih hibrida.

Serijski hibrid ima benzinski motor koji služi isključivo za pogon generatora, koji dovodi energiju pogonskim elektromotorima i akumulatorima. Kotače pokreće samo elektromotor, stoga su performanse vozila ograničene snagom motora, što je najveća slabost serijskog hibrida. Generator je napravljen poput elektromotora, pa u sustavu imamo dva elektromotora od kojih jedan puni baterije, a drugi vrti kotače. Struja od generatora do kotača protječe serijski.

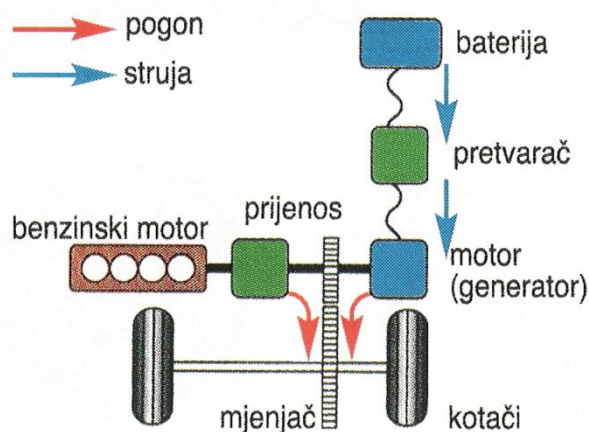
Vozilo se neko vrijeme može kretati i sa ugašenim benzinskim motorom, bez emisije plinova i buke. Benzinski motor uvijek radi u najekonomičnijem području (području optimalnog iskorištenja snage), te je stoga ekološki prihvatljiv, a zbog rada u području optimalne korisnosti njegova snaga ne mora biti prevelika.



**Slika 2.4.** Serijski hibrid

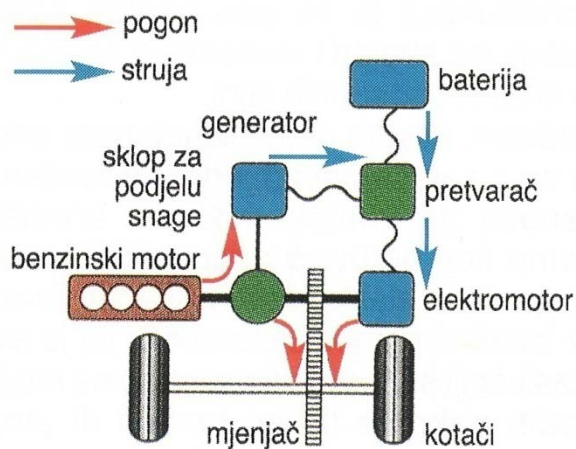
Paralelni hibrid ima dvostruki pogon, pa kotače istodobno pokreću i benzinski motor i elektromotor pri čemu uvjeti vožnje određuju koji pogon preuzima vodeću ulogu. Benzinski motor i pogonski elektromotor su nefleksibilno povezani, tako da oba motora prenose okretni moment na kotače istovremeno, pri čemu elektromotor pomaže benzinskom motoru pri pogonu vozila. Takvo vozilo ima odlična ubrzanja, no potrošnja goriva nije uvijek ekonomična. Vožnja s ugašenim benzinskim motorom nije moguća, pošto su zbog njegove mehaničke povezanosti okretaji u razmjeru sa okretajem kotača. Kako elektromotor može raditi u generatorskom režimu, baterija se puni prekapčanjem elektromotora u funkciju generatora.

Osnovni problem je u tome što paralelni hibrid ne može puniti baterije (osim na nizbrdici), dok iz njih istodobno troši struju za pokretanje elektromotora i kotača i obrnuto (pošto je u sustavu samo jedan motor / generator).



**Slika 2.5.** Paralelni hibrid

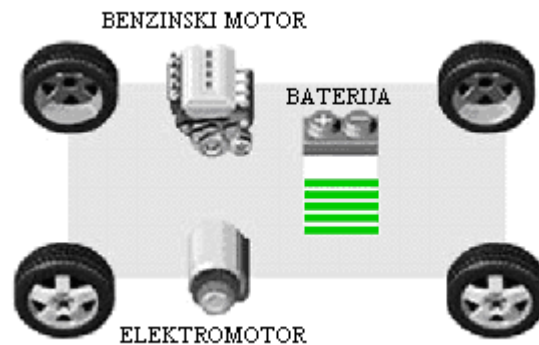
Serijsko - paralelni hibrid je kombinacija dvaju sustava (THS sustav) te objedinjuje prednosti obaju sustava. Tu benzinski motor i elektromotor sinkrono vrte kotače, a punjenje baterije prepušteno je generatoru koji se, po potrebi, spaja na pogon jednog ili drugog motora. Ovisno o uvjetima vožnje i kontroliranoj štednji energetske rezerve, vozilo se simultano kreće s jednim ili oba pogonska sklopa, pri čemu se baterije stalno dopunjuju. Ovisno o potrebi, u nekim uvjetima rada dominira benzinski motor, a drugim elektromotor. Posebni benzinski motor, snažni elektromotor i generator su mehanički povezani uz pomoć jednostavnog planetarnog reduktora i njima upravlja inteligentni sustav u računalu. Sustav tako uvijek osigurava odlične performanse sa najboljom mogućom iskoristivošću.



**Slika 2.6.** Serijsko - paralelni hibrid (THS)

## 2.3 Rad HSD-sustava

Toyotina inteligentna tehnologija Hybrid Synergy Drive (hibridni sinergijski pogon) neprestano analizira reakcije vozača, brzinu, ubrzavanje i kočenje, te s obzirom na dinamiku, ekonomičnost i emisiju štetnih plinova odabire optimalnu kombinaciju pogonskih izvora - elektro i benzinskog motora.



**Slika 2.7.** Dijelovi hibridnog sinergijskog pogona



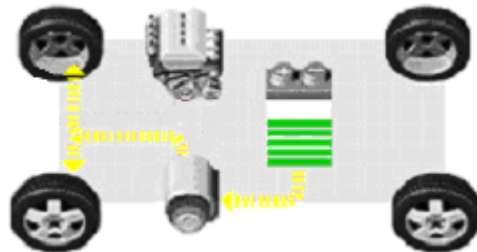
**Slika 2.8.** Operativni panel Toyote Priusa unutar vozila



**Slika 2.9.** HSD-sustav (start - uzbrdica)

## START

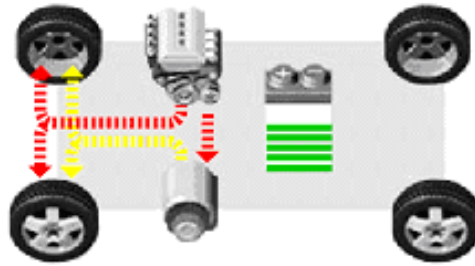
Pritiskom na gumb POWER, za nekoliko će sekundi na displeju zasvijetliti oznaka READY. Krećemo li naprijed ili unatrag, ručicu pogona postavljamo u položaj D ili R. Bez obzira u kojem smjeru, Prius kreće s mjesta isključivo električnim pogonom, trošeći struju iz baterije. Tako se iz položaja mirovanja vozilo pokreće bez dima iz ispuha i s optimalnim utroškom energije.



**Slika 2.10.** HSD-sustav: prikaz rada kod starta

## NORMALNA VOŽNJA

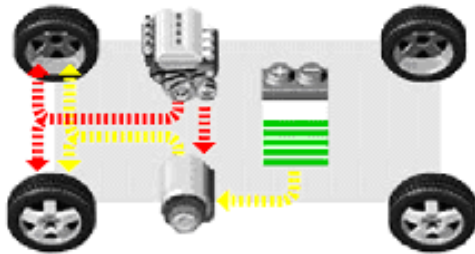
Čim se vozilo pokrene i brzina vrtnje postigne određeni iznos, uključuje se benzinski motor koji pokreće prednje kotače i generator koji rasterećuje baterije za pogon elektromotora (koji istovremeno olakšava rad benzinskom motoru). Omjer opterećenja između elektromotora i benzinskog motora pod stalnim je nadzorom uređaja (mikrokontrolera) koja određuje optimalno trošenje energije.



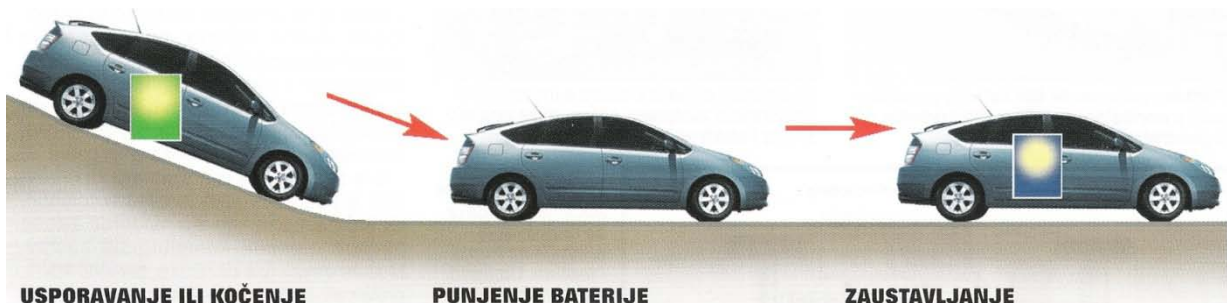
**Slika 2.11.** HSD-sustav: prikaz rada kod normalne vožnje

## UBRZANJE ILI UZBRDICA

Ubrzamo li zbog pretjecanja ili pak pojačamo gas na uzbrdici, baterija će elektromotor opskrbiti s više struje. Da bi pogonski sklop razvio što više snage, aktivira se optimalna kombinacija benzinskog motora, elektromotora i pojačanog dotjecanja energije iz baterije. Rezultat je pouzdano, ujednačeno i vrlo uvjerljivo ubrzane ili pak svladavanje uspona.



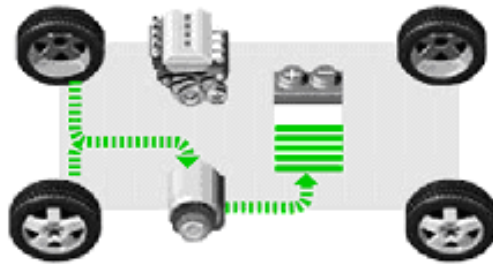
**Slika 2.12.** HSD-sustav: prikaz rada kod ubrzanja (uzbrdice)



**Slika 2.13.** HSD-sustav (usporavanje - zaustavljanje)

## USPORAVANJE ILI KOČENJE

Pri postupnom usporavanju ili kočenju, elektromotor preuzima ulogu generatora i puni bateriju električnom energijom proizvedenom gibanjem automobila i vrtnjom kotača (regenerativno kočenje). Pritom je benzinski motor potpuno isključen, energija se uopće ne troši već se njene zalihe u bateriji dodatno povećavaju. U tom djelotvornom iskorištenju energije krije se najvažnija osobina Priusa.

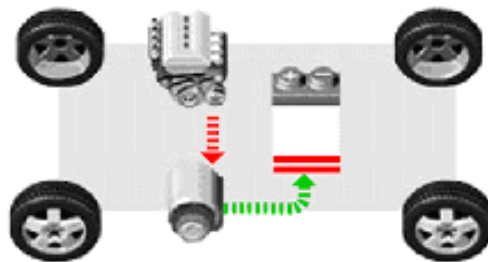


**Slika 2.14.** HSD-sustav: prikaz rada kod kočenja (usporavanja)

## PUNJENJE BATERIJE

Kad kontrolni uređaj otkrije da je baterija ispražnjena (akumulirani naboj je ispod unaprijed određene najdonje granice), automatski se uključuje benzinski motor koji vrtnjom generatora ponovno puni bateriju.

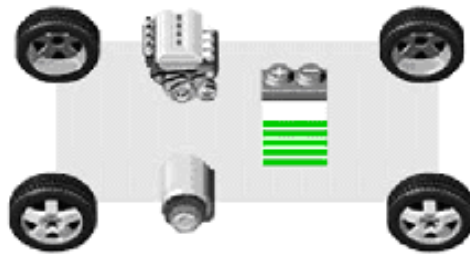
Toyotina nikal-metal-hidridna baterija jedna je od najdjelotvornijih na svijetu, pa i kratkotrajni rad generatora ili regenerativno djelovanje elektromotora pri kočenju obilno puni bateriju.



**Slika 2.15.** HSD-sustav: prikaz rada kod punjenja baterije

## ZAUSTAVLJANJE

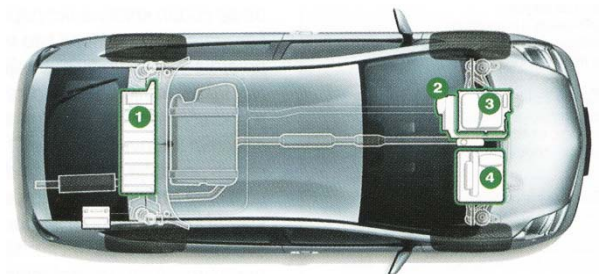
Hybrid Synergy Drive je sustav koji pri zaustavljanju trenutačno gasi benzinski motor, a izdašna zaliha električne energije s lakoćom održava sve ostale funkcije. To se ponajprije odnosi na klima-uređaj, svjetla i funkcioniranje uređaja visokog komfora interijera. Kako Prius tada ne troši gorivo, znatno nadmašuje gotovo sve ekološke standarde.



**Slika 2.16.** HSD-sustav: prikaz rada kod zaustavljanja



**Slika 2.17.** Smještaj pojedinih komponenti u prednjem djelu automobila Toyote Prius



**Slika 2.18.** Prikaz vrhunskih komponenti Hybrid Synergy Drive-a

Toyota Prius ima nekoliko vrhunskih komponenti po kojima je Hybrid Synergy Drive jedinstven u svijetu (slika 2.18). Tu je nikal-matel-hidridna (NiMH) baterija (1), elektromotor i generator (2), originalni sklop za kontrolu snage i struje (3) i jedinstveni benzinski motor (4) visokog učinka.

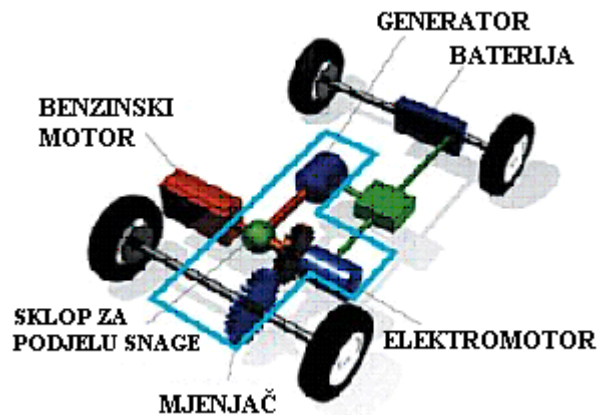


## 2.4 Princip rada i struktura hibridnog vozila

Kod hibrida koji kombiniraju motor s unutarnjim izgaranjem (benzinski ili dizel) i elektromotor, osnovne su komponentne motor s unutarnjim izgaranjem, elektromotor, generator, baterije i prijenosni mehanizam. U takvim slučajevima elektromotori mogu biti spojeni s glavnim motorom i smješteni poprečno ili uzdužno iznad prednje osovine ili pak mogu biti smješteni u kotačima automobila (koliko kotača-toliko elektromotora) dajući mu pogon na svim kotačima.

Za razliku od dosadašnjih modela, u novom Priusu je lakši i kompaktniji benzinski motor od 1500 cm<sup>3</sup> gdje hod ventila i klipova ostvaruje tzv. Atkinsonov krug pri čemu se u smanjenom prostoru izgaranja potpunije iskorištava energija goriva, a ispuh se otvara tek nakon prestanka ekspanzije. Pritom se trajanje kompresije i ekspanzije podešava odvojeno, pa iskorištena toplinska energija goriva i zakretni moment dostižu znatno viši stupanj. Primjenom novih aluminijskih legura u izradi pokretnih dijelova motora smanjeno je opterećenje, a gornja granica vrtnje pomaknuta s 4500 na 5000 okretaja u minuti. Time je i generator dobio mogućnost naglih ubrzanja i viši učinak.

Inovativni zahvat sa smanjenjem i naginjanjem uparenih permanentnih (neodimskih) magneta generatora u V-položaj, osigurao je istodobno brže punjenje baterije i više struje za pogonski elektromotor.



**Slika 2.19.** Sinergija motora, elektromotora i prijenosa

Generator se brže vrti, a to ubrzanje sa 6500 o/min na 10000 o/min daje sad više struje pri umjerenoj vožnji i snažnije ubrzanje u području nižih srednjih brzina. Cijeli sustav nosi oznaku THSII, pri čemu je učinak motora povećan s 350 Nm na 400 Nm, a snaga s 33 kW na 50kW.

Originalni Toyotin pretvarač s IGBT tranzistorima (engl. Insulated Gate Bipolar Transistor) napaja elektromotor naponom koji dostiže iznos i do 500V, ostvarujući pritom visoku učinkovitost i malo zagrijavanje sklopa pretvarača.

Vrhunska NiMH baterija osigurava Priusu visoku autonomiju. Volumen baterije je manji, energetska gustoća (omjer mase i proizvedene struje) povećana u odnosu na ranije modele za više od 35 %.

Nove legure elektroda i inovativno povezivanje baterijskih ćelija potpuno isključuje svaku potrebu dodatnog punjenja (dopunjavanja) iz vanjskih izvora.



**Slika 2.20.** Nikal-metal-hidridna baterija

Inverter pretvara istosmjernu (DC) struju iz baterije u izmjeničnu (AC) za pogon elektromotora. No u THSII-sustavu ugrađen je ispred invertera visokonaponski DC/DC konverter koji drastično povećava napon i elektromotoru osigurava izuzetne učinke.

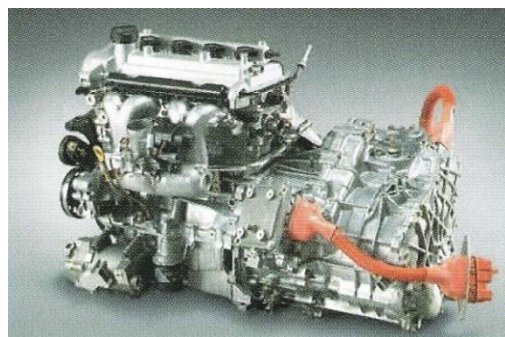
Uza sve to, originalne Toyotine poluvodičke sklopke tipa IGBT tranranzistora u sklopu pretvarača koji iz istosmjerne baterijske struje sad daje 500 V izmjenične struje ima znatno manje dimenzije, bito manje zagrijavanje i neusporedivo veći učinak.

To je najizraženije pri ubrzanju, te pri istodobnom radu benzinskog motora i elektromotora u trenucima kad vozilu treba najviše snage.



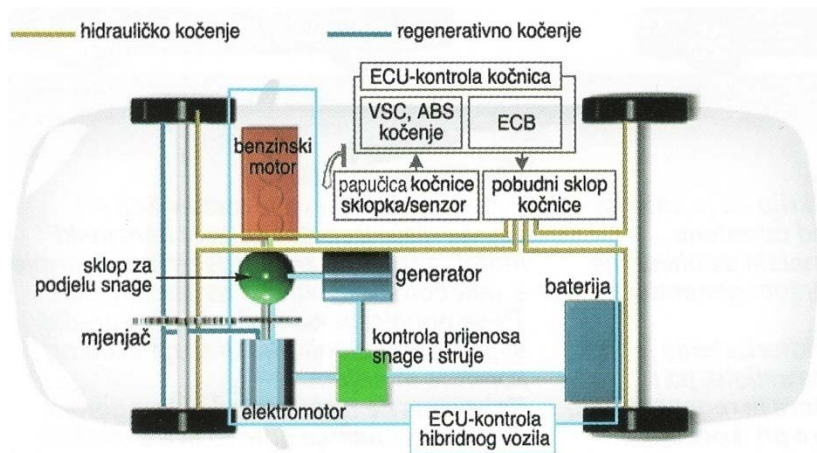
**Slika 2.21.** Inverter

Elektronički komutirani istosmjerni motor (EKM, engl. Brushless DC Motor) moćan je istosmjerni motor s neodimskim V-magnetima koji napajan izmjeničnom strujom razvija snagu i do 50 kW.



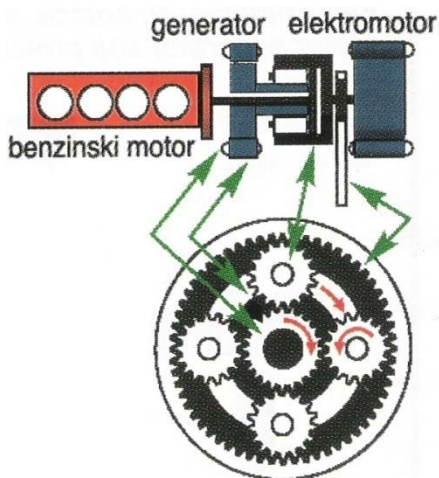
**Slika 2.22.** Kompletan pogonski sklop s inovativnim benzinskim motorom, sklopom za podjelu snage i elektromotorom

Inovativni sustav regenerativnog kočenja pretvara kinetičku energiju vozila u struju izravnim prijenosom vrtnje kotača na generator. Električnu energiju proizvodi i u gradskoj vožnji, učestalim ubrzavanjem i kočenjem. Pritom elektronički sklop usklađuje djelovanje normalne hidrauličke kočnice i regenerativnog kočenja, a višak energije benzinskog motora koju obično gubimo pri usporavanju sad završava u bateriji i vraća nam se preko elektromotora.



**Slika 2.23.** Sustav pri regenerativnom i hidrauličkom kočenju

Uređaj za preraspodjelu snage (engl. PSD, Power Split Device) od samog je početka projekta najvažniji sklop cijelog pogonskog sustava koji je Priusu donio odlučujuću prednost pred ostalim hibridima.



**Slika 2.24.** PSD (Power Split Device)

On povezuje benzinski motor i elektromotor, a istodobno osigurava vrtanju generatora i djelotvornost regenerativnog kočenja. Konstrukcija je na prvi pogled sasvim jednostavna, pa strojari i mehaničari neće u njoj naći nikakvih posebnih tajni. Međutim, uspjeh ovog

planetarnog sklopa krije se u savršenim omjerima trosmjernog prijenosa na vanjski prsten i središnju osovinu koji potpuno odgovaraju benzinskom motoru, elektromotoru i generatoru.

Uz izdašnu pomoć elektronike, taj je sklop najzaslužniji što u vožnji naprosto ne možemo odrediti pokreće li nas benzinski motor ili elektromotor. Pritom se broj okretaja motora, elektromotora i generatora savršeno usklađuje i stalno održava optimalni tok energije, a kod Priusa to znači minimalnu potrošnju energije, minimalnu emisiju štetnih plinova i optimalno punjenje baterije.

### By-wire Control

Kako bi se postigao takav sklad raznorodnih vitalnih dijelova, primijenjena su iskustva iz avioindustrije. Naime, sve komande vozača pretvaraju se u električne signale i obrađuju u centralnom upravljačkom (kontrolnom) uređaju koji ispravlja eventualne pogreške u komandama. Sustav korigira i zanošenje u zavojima, proklizavanje guma i sl. Sve se uključuje čim se sjedne za upravljač, a pod kontrolom je cijeli automobil, na jednak način kao što moderne avione nadzire pametni računalni sustav. Čak i u uvjetima maksimalnog dodavanja gasa, paničnog kočenja i pretjecanja, te jurnjave uzbrdo i nizbrdo, središnji upravljački sustav kontinuirano optimizira rad obaju motora, generatora i hidrauličkih kočnica.

### 3 AKUMULATORSKA BATERIJA

Akumulatorska baterija je ključna komponenta u gotovo svim električnim vozilima. Kod klasičnih električnih vozila akumulatorska baterija je jedino spremište energije i komponenta s najvećim volumenom, težinom i najvišom relativnom cijenom. U hibridnim je vozilima akumulator koji konstantno mora primati i davati električnu energiju također ključna komponenta najveće važnosti.

Baterija (akumulator) se sastoji od dvije ili više povezanih električnih ćelija. Ćelije pretvaraju kemijsku energiju u električnu energiju, a sastoje se od pozitivnih i negativnih elektroda povezanih elektrolitom. Kemijska reakcija između elektroda i elektrolita generira istosmjerni (DC) elektricitet. U slučaju sekundarnih (punjivih) baterija kemijska reakcija može se obrnuti promjenom smjera struje, te se tada baterija puni.



**Slika 3.1** Akumulatorska baterija

Postoji velik broj materijala i elektrolita koji se mogu kombinirati kako bi se formirala baterija. Međutim, razvijen je relativno mali broj kombinacija za komercijalne električne baterije koje se mogu puniti pogodne za vozila. Trenutno su to kiselina, nikal željezo, nikal kadmij, nikal metal hidrid, litij polimer i litij željezo, natrij sumpor i natrij metal klorid. Postoje također noviji tipovi baterija koji se mogu mehanički puniti - glavni su aluminij-zrak i cink-zrak.

## **3.1 Značajke akumulatorskih baterija**

Usprkos svim različitim iskušanim mogućnostima i oko 150 godina razvoja, još uvijek nije razvijena baterija pogodna za široku upotrebu kod električnih vozila. Međutim, nedavno su ostvareni određeni važni pomaci u tehnologiji izrade baterija koji pružaju veliku nadu u budućnost. Također je moguće dizajnirati vrlo korisna vozila koristeći postojeće baterije kao jedino ili glavno spremište energije. Sa stajališta dizajnera električnih vozila, baterija se može promatrati kao "crnu kutiju" koja ima niz karakteristika. Te karakteristike uključuju specifičnu energiju, gustoću energije, specifičnu snagu, specifičnosti napona, efikasnost ampersata, efikasnost energije, komercijalnu dostupnost, cijenu, radnu temperaturu, stope samopražnjenja, broj životnih ciklusa i stope punjenja. Također je vrlo važno barem temeljno poznavanje kemijskih procesa baterije radi razumijevanja rada i održavanja različitih tipova baterije, te negativne efekte kao što su ograničeni vijek trajanja, samopražnjenje, smanjena efikasnost pri višim strujama itd. Potrebno je također temeljno znanje o mogućim opasnostima u slučaju nesreće te o općem utjecaju kemikalija iz baterije na okoliš, s naglaskom na recikliranje upotrijebljenih baterija.

### ***3.1.1 Napon ćelije i napon baterije***

Nominalni napon ćelije je napon na osnovnoj ćeliji u uvjetima nominalnog opterećenja. Ćelije se mogu povezati u seriju kako bi se povećao izlazni napon baterije. Baterije u električnim vozilima se obično određuju na 6V ili 12V i te se jedinice dalje povezuju u seriju kako bi se dobio željeni napon. Napon na stezaljkama baterije ovisi o opterećenju: opada kod pražnjenja baterije, a raste kod punjenja.

### **3.1.2 Kapacitet punjenja**

Električni naboj koji baterija može pružiti je naravno najvažniji parametar. SI jedinica za to je Coulomb (C). Jedan Coulomb odgovara  $6,25 \cdot 10^{13}$  jediničnih naboja ( $e$ ). U praksi se Coulomb često označava oznakom As, jer jedan Coulomb naboja odgovara količini naboja koja u jednoj sekundi protokne vodičem ako je jakost struje iznosa 1A. Međutim, ta je jedinica relativno mala. Umjesto nje koristi se ampersat - jedan amper koji teče jedan sat. Kapacitet baterije može biti, npr. 10 ampersati. To znači da baterija teoretski može pružiti 1 amper 10 sati ili 10 ampera 1 sat. Međutim, u praksi to ne ispada tako za većinu baterija. Obično je informacija o kapacitetu točnija kod manjih opterećenja (manjih iznosa struja pražnjenja).

### **3.1.3 Pohranjena energija**

Svrha baterije je da pohranjuje energiju. Energija pohranjena u bateriji ovisi o njoj voltaži i pohranjenom naboju. SI jedinica za to je džul (J), ali je to nezgodno mala jedinica, pa umjesto nje koristimo vatsat. To je energija odgovarajuća radu na snazi od 1 vat 1 sat. Vatsat odgovara 3600 džula. Vatsat je kompatibilan s upotrebom ampersata za naboj, kao što se vidi u jednostavnoj formuli:

$$\text{energija u vatsatima} = \text{napon} \cdot \text{energija u ampersatima} = V \cdot C$$

Međutim, ova se jednadžba treba koristiti s velikim oprezom. Napon baterije  $V$ , a još više kapacitet jako variraju ovisno o tome kako se baterija koristi. Oba parametra se smanjuju ako struja poraste i baterija se brzo isprazni. Pohranjena je energija, dakle, prilično varijabilna i smanjuje se ako se energija brzo otpušta.



### ***3.1.4 Specifična energija***

Specifična energija je količina električne energije pohranjene za svaki kilogram baterijske mase. Ima jedinicu u  $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$  (na minus prvu). Jednom kad se zna kapacitet energije baterije potreban za vozilo (Wh), može se podijeliti sa specifičnom energijom ( $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) da bi se dobila prva približna masa baterije. Navedene specifične energije mogu biti samo vodič, jer kao što smo vidjeli, energija pohranjena u bateriji jako varira u faktorima kao što su temperatura i stopa pražnjenja.

### ***3.1.5 Gustoća energije***

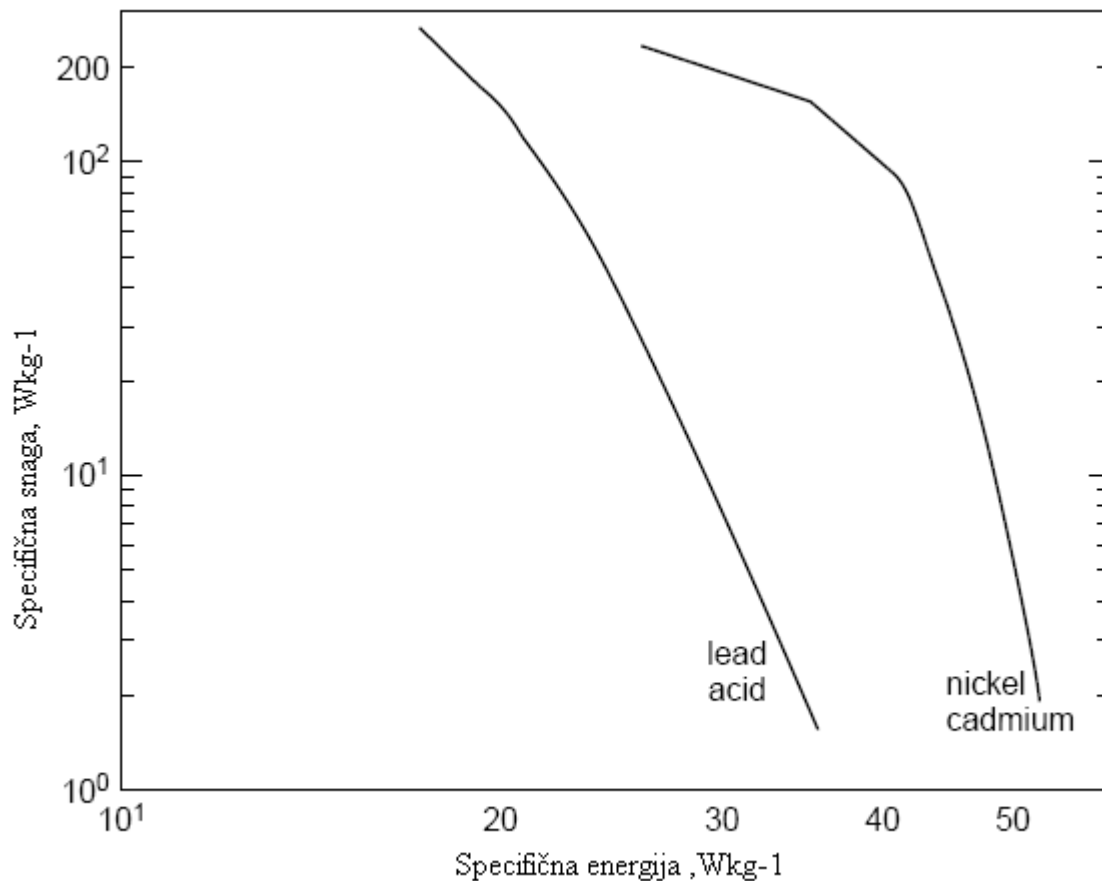
Gustoća energije je količina električne energije pohranjene na kubni metar volumena baterije, a mjeri se u  $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-3}$ . Također je važan parametar s obzirom da se kapacitet energije baterije (Wh) može podijeliti s gustoćom energije baterije ( $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-3}$ ) da bi se prikazao traženi volumen baterije. Ako je dostupan poznati volumen, volumen ( $\text{m}^3$ ) se može pomnožiti s gustoćom energije baterije ( $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-3}$ ) kako bi se dobila približna vrijednost moguće dostupne količine. Volumen baterije može imati velik utjecaj na dizajn vozila. Kao i specifična energija, gustoća energije je nominalna vrijednost i može se mijenjati s uvjetima opterećenja.

### ***3.1.6 Specifična snaga***

Specifična snaga je količina snage dobivena po kilogramu baterije. To je izrazito varijabilna količina, s obzirom da snaga koju baterija daje ovisi puno više o punjaču na koji je spojena nego o samoj bateriji. Na primjer, baterija može raditi pri maksimalnoj snazi relativno kratko vrijeme jer je tada pražnjenje vrlo neefikasno i kroz dulje razdoblje se baterija brzo isprazni.

Uobičajene jedinice su  $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Neke baterije imaju jako dobru specifičnu energiju, ali jako nisku specifičnu snagu, što znači da pohranjuju mnogo energije, ali je ne mogu brzo osloboditi.

Visoka specifična snaga obično rezultira niskom specifičnom energijom za svaki tip baterije. To je zato što brzo uzimanje energije iz baterije (pri visokoj snazi) snižava dostupnu energiju. Ta razlika u promjeni specifične snage sa specifičnom energijom za različite tipove baterije je vrlo važna. Za usporedbu se često koristi graf specifične snage suprotstavljen specifičnoj energiji, poznat kao Ragone-ov dijagram. Koriste se logaritamske skale, s obzirom da snaga izvučena iz baterije može jako varirati u različitim primjenama. Slika 3.2 prikazuje Ragone-ov dijagram za kvalitetni galvanski članak baterije u električnim vozilima i slične nikal-kadmijeve (NiCd) baterije.



**Slika 3.2.** Ragone-ov dijagram

Ragone-ov dijagram poput ovoga koristi se za usporedbu izvora energije svih tipova. U tom slučaju možemo zaključiti, ignorirajući ostale faktore poput troška, da NiCd baterija bolje radi ako se traži gustoća snage manja od  $100 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Međutim pri višim vrijednostima, do  $250 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$  ili više galvanski članak (akumulatorska olovna baterija) je u prednosti zbog veće gustoće snage. Ragone-ov dijagram također naglašava činjenicu da na pitanje "Koja je specifična snaga baterije?" ne možemo dati jednostavan odgovor u obliku jednog broja.

### ***3.1.7 Efikasnost punjenja ili ampersata***

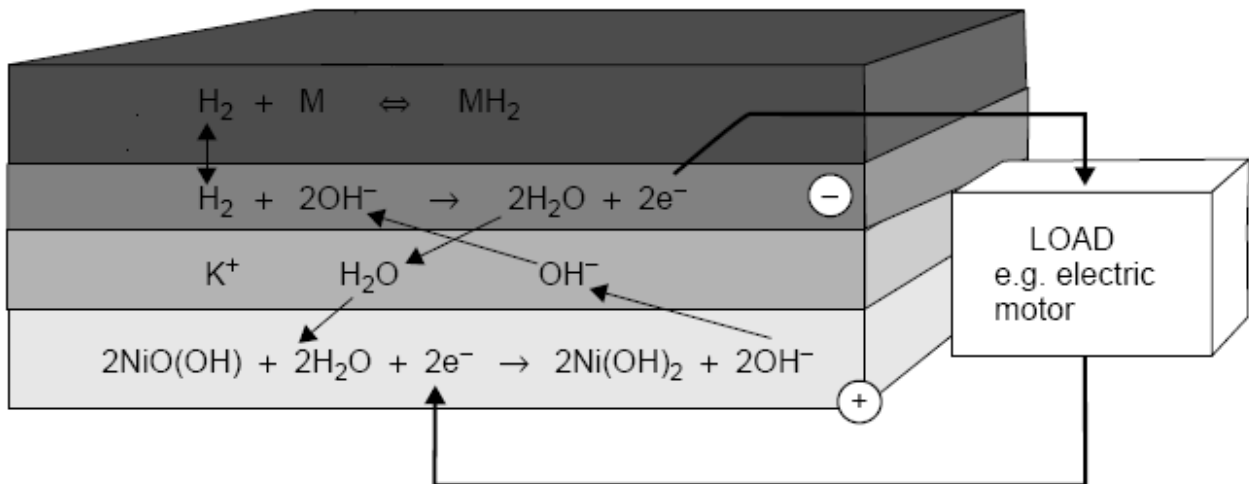
U idealnim uvjetima, baterija bi vratila sav akumulirani naboj i u tom slučaju je efikasnost ampersata 100%. Međutim, to nije slučaj kod niti jedne baterije; efikasnost punjenja je ispod 100%. Točna vrijednost varira s različitim tipovima baterije, temperaturom i stopom punjenja. Također varira i sa stanjem napunjenosti. Sa stanjem napunjenosti od 20% do 80%, efikasnost će obično biti vrlo blizu 100%, ali kada je napunjenosti ispod 20% nominalnog kapaciteta, efikasnost znatno opada.

### ***3.1.8 Efikasnost energije***

Ovo je još jedan važan parametar i definira se kao omjer električne energije koju baterija predaje trošilu prema količini električne energije potrebne da se vrati u stanje prije pražnjenja. Snažan argument za upotrebu električnih vozila se temelji na njihovoj efikasnoj upotrebi energije s rezultatom smanjenja ukupne emisije; stoga je poželjna visoka efikasnost energije. Efikasnost energije će jako varirati ovisno o tome kako se baterija koristi. Ukoliko se baterija brzo puni i prazni, efikasnost energije znatno pada. Međutim to nije vodič za usporedbu baterija, kao što ni potrošnja goriva nije vodič za usporedbu automobila.

### 3.2 Nikal-metal-hidridne (NiMH) baterije

Nikal-metal-hidridna baterija (NiMH) uvedena je na tržište u zadnjem desetljeću 20. stoljeća. Radi slično NiCd bateriji, s glavnom razlikom u tome što NiMH baterija kao negativnu elektrodu koristi vodik apsorbiran u metal hidrid. Na ovaj način se izbjegava korištenje kadmija, a to je znatna prednost s ekološkog stanovišta (kadmij je iznimno toksičan). Zanimljiva karakteristika ovog tipa baterije je to što se negativna elektroda ponaša slično gorivoj ćeliji. Reakcija na pozitivnoj elektrodi je ista kao na ćeliji nikal kadmija; nikal oksihidroksid postaje nikal hidroksid tijekom pražnjenja. Na negativnoj elektrodi vodik se otpušta iz metala za koji je privremeno vezan i reagira s hidroksidnim ionom (OH), proizvodeći vodu i slobodne elektrone. Reakcije na obje elektrode prikazane su na slici 3.3.



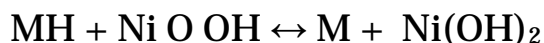
**Slika 3.3.** Reakcije na elektrodama NiMH baterije

Alkalni metali koji se koriste za spremene vodika su obično slitine. Princip njihova rada je potpuno jednak kao u spremištima metal hidrid vodika koja se koriste u gorivim ćelijama. Temeljni princip je reverzibilna reakcija u kojoj se vodik veže za metal, te se potom otpušta kao slobodni vodik po potrebi. Da bi to funkcioniralo, ćelija mora biti zatvorena, s obzirom da je važan pokretač procesa absorpcija i de-apsorpcija tlak vodikovog plina koji se održava na približno konstantnoj vrijednosti. Drugi razlog zbog kojeg je važno zatvaranje je taj što

će se slitine koje apsorbiraju vodik oštetiti ako zrak uđe u ćeliju. To je zato što će reagirati sa zrakom, a druge molekule će zauzeti mjesta pohrane vodika.

Slika prikazuje reakcije tijekom pražnjenja NiMH ćelije. Kad se napuni, reakcije su obrnute. Pri punjenju i pražnjenju voda se stvara potpuno istim tempom kojim se i koristi, pa se stoga elektrolit ne mijenja sa stanjem napunjenosti.

Opća kemijska reakcija za NiMH bateriju piše se:



Po gustoći energije i gustoći snage metal hidridna ćelija je ponešto bolja od NiCd baterije. NiMH baterije imaju nominalnu specifičnu energiju od oko  $65 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$  i nominalnu gustoću energije od  $150 \text{ Wh}\cdot\text{L}^{-1}$  i maksimalnu specifičnu snagu od oko  $200 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

U većini pogleda, njen rad je sličan ili malo bolji od nikal kadmijeve ćelije. Nominalni napon ćelije je 1.2 V. Jedno područje u kojem je NiMH bolja od NiCd je to što ju je moguće puniti nešto brže. Ustvari, može se puniti toliko brzo da je nužno hlađenje.

Kao što se stvara toplinska energija normalnim unutarnjim otporom baterije, tako reakcija u kojoj se vodik veže na metal uz negativnu elektrodu oslobađa toplinsku energiju. Osim ako se radi o motociklu ili skuteru s malom baterijom, sistem hlađenja je važna značajka NiMH baterijskih sistema. Dostupni su u malim veličinama, ali počinju se pojavljivati veće baterije prikladne za električna vozila.

Primjer komercijalne NiMH baterije sa sustavom za hlađenje prikazan je na slici 3.4.



**Slika 3.4.** Komercijalna NiMH baterija

NiMH baterija ima nešto veći kapacitet pohrane energije od NiCd sistema iste snage i nešto je skuplja. Jedina značajka pokojoj je NiMH baterija lošija od NiCd baterija je efekt samopražnjenja. Molekule vodika su vrlo malih dimenzija, pa mogu razmjerno lako proći difuzijom kroz elektrolit do pozitivne elektrode, gdje reagiraju na sljedeći način:



Time se praktički postiže pražnjenje ćelije, jer se vodik gubi iz negativnog dijela, a hidroksid se formira na pozitivnom dijelu članka. Rezultat ovoga je da je baterija podložna veoma brzom samopražnjenju. Zanimljiva karakteristika te ćelije je to što se sastav elektrolita ne mijenja tijekom punjenja i pražnjenja; voda i OH- ioni se stvaraju i troše istim ritmom. Rezultat je taj da su unutarnji otpor i napon otvorenog strujnog kruga znatno ujednačeniji tijekom pražnjenja nego kod galvanskog članka i NiCd baterija. S obzirom na metalni sloj, unutarnji otpor je također nešto niži, no nije bitno različit od onog kod NiCd baterije.

Režim punjenja je sličan onome NiCd baterije sa strujom koja se uključuje i isključuje kako bi se napon ćelije održao između gornjeg i donjeg limita. Poput NiCd baterija, NiMH baterija se može napuniti u roku od jednog sata. Djelomično prepunjavanje je nužno kako bi svaka ćelija bila potpuno napunjena. Od svih novih baterija NiMH se smatra jednom od najnaprednijih i koristi se kod niza vozila uključujući Toyotu Prius koja je daleko najuspjeliji električni hibrid do danas. Tržišni udio NiMH baterija je još uvijek mali, no za očekivati je da će cijena pasti s povećanjem proizvodnje. Za te se baterije smatra da najviše obećavaju za primjene u automobilskoj industriji u budućnosti.

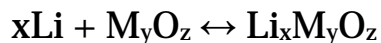
### **3.3 Litijska baterija**

Litijske baterije pojavile su na tržištu kasnih 80-tih. One nude daleko povećanu gustoću energije u usporedbi s ostalim baterijama na punjenje iako uz mnogo veći trošak. One su sastavni dio prijenosnih računala i mobilnih telefona, te su ih praktički u potpunosti istisnule NiCd i NiMH ćelije za te primjene.

#### **3.3.1 Litij-polimerska baterija**

Litij-polimerska baterija koristi litij metal za negativnu elektrodu i tranzicijski metal interkalacijski oksid za pozitivnu. U rezultirajućoj kemijskoj reakciji litij se kombinira s metalnim oksidom i otpušta energiju. Kad se baterija napuni, kemijska reakcija se obrne. Na taj je način litij i reaktant i mobilni ion koji se kreće kroz elektrolit.

Opća kemijska reakcija glasi:



Čvrsta litijeva negativna elektroda je uzrokovala probleme ovom tipu ćelije; postoje sigurnosne teškoće i ponekad smanjena efikasnost zbog pasivnosti. Stoga su taj tip baterije pretekle litijske ionske baterije.

#### **3.3.2 Litij-ionska baterija**

Litij-ionska baterija uvedena je ranih 1990-ih i koristi metalni oksid za pozitivnu elektrodu i ugljik za negativnu elektrodu. Elektrolit je tekuća organska otopina ili čvrsti polimer. Električna se energija dobiva kombiniranjem litij-ugljika (litij-karbida) i litij metal oksida da bi se dobio ugljik i litij metal oksid.

Opća kemijska reakcija za tu bateriju je:



Za litij-ionsku bateriju je važno napomenuti da je potrebna stroga kontrola napona pri punjenju litijskih ćelija. Ako se dozvoljeni napon i malo prekorači, može oštetiti bateriju, dok kod preniskog napona baterija neće biti dovoljno napunjena. Uz bateriju se razvijaju i prikladni komercijalni punjači.

Litij-ionska baterija ima znatnu prednost što se tiče težine pred drugim baterijskim sistemima i to je čini veoma atraktivnim kandidatom za buduća električna vozila. Specifična energija je na primjer tri puta veća u odnosu na onu galvanskog članka (olovne baterije), što je svakako povoljna značajka. Međutim, velike su baterije trenutno vrlo skupe i njihov će se potencijal potpuno razviti tek kada padne cijena takvih baterija. Proizvedeno je nekoliko električnih vozila s baterijama na bazi litija, no to su bila vozila konceptijskog tipa za potrebe demonstracije. Jedan takav primjer je električna verzija Forda Ka proizvedenog 2001. godine.

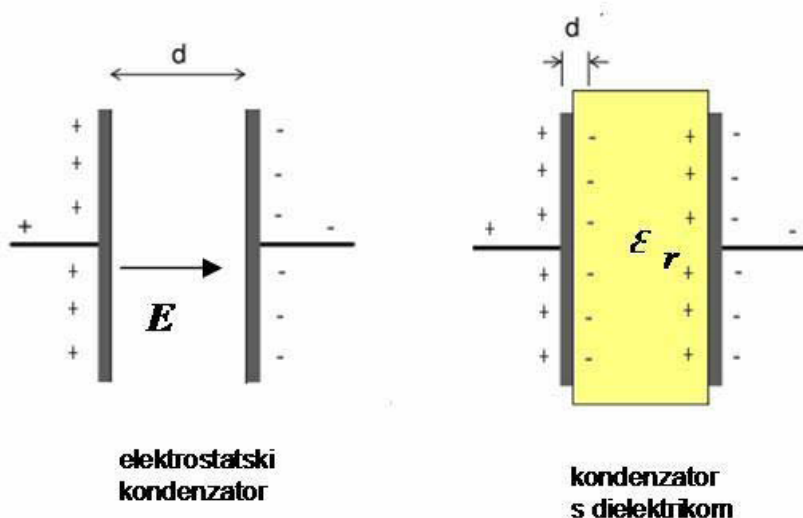


## 4 ULTRAKONDENZATOR

U kondenzatoru koji se sastoji od dviju ravnih elektroda površine  $S$  udaljenih za  $d$  možemo pohraniti elektrostatsku energiju jednaku  $W = V\varepsilon_0 E^2/2$ , gdje je  $E$  jakost električnog polja u prostoru između ploča,  $V = Sd$  volumen između ploča kondenzatora, a  $\varepsilon_0$  dielektrična konstanta vakuuma. Uzmemo li u obzir da za električno polje približno vrijedi  $E = U/d$ , gdje je  $U$  napon između elektroda, za energiju dobivamo  $W = \varepsilon_0 U^2 S/d$ .

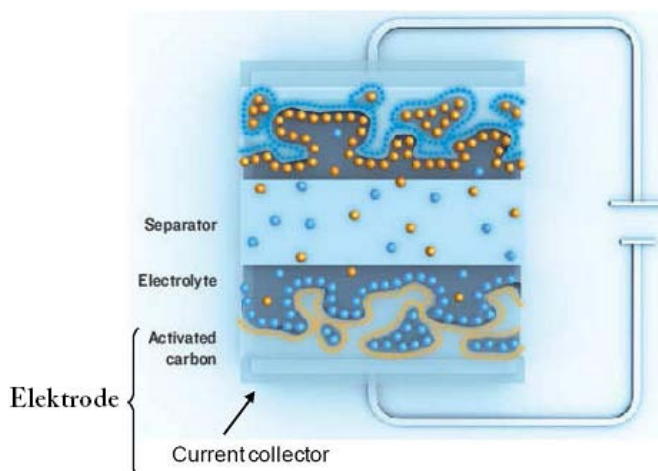
Ovaj izraz možemo tumačiti na slijedeći način. Ako imamo dvije bliske plohe nabijene suprotnim nabojem, tada je u prostoru između njih uskladištena energija statičkog električnog polja. Ova energija proporcionalna je površini ploha, a obrnuto proporcionalna njihovoj udaljenosti.

Želimo li u kondenzator pohraniti više energije, moramo povećati površinu i smanjiti razmak između sloja suprotnih naboja - dipolnog sloja. Razmak možemo smanjiti tako da, između ploča kondenzatora, ubacimo dielektrično sredstvo. Tada će se između svake metalne elektrode i plohe dielektrika formirati bliski dipolni sloj i time se bitno smanjiti efektivni  $d$  (slika 4.1).



**Slika 4.1.** Prikaz elektrostatskog kondenzatora i kondenzatora s dielektrikom

Zapravo će se efektivni  $d$  smanjiti  $\epsilon_r$  puta koliko iznosi relativna dielektrična konstanta dielektričnog sredstva. Razmak se može dodatno smanjiti ako se jedna elektroda zamijeni elektrolitom, odnosno ionskim vodičem. Tada se dipolni sloj i električno polje formiraju samo u vrlo tankom sloju na elektrodi, debljine nekoliko nanometara. Kod ultrakondenzatora napravljen je bitan iskorak. Površina elektroda višestruko je povećana uz pomoć poroznih elektroda. Elektrode su nanočestice grafita ili isprepletene ugljikove nanocjevčice u međusobnom električnom kontaktu. Presvučene su nanometarskim slojem izolatora uronjene u tankom sloju, između plohe nanočestice i elektrolita.



**Slika 4.2.** Ultrakondenzator

Ultrakondenzatori mogu imati ogroman kapacitet i do 3000 F, ali njihov radni napon je mali i iznosi svega oko 2 V. Međutim, za razliku od baterije, ultrakondenzatori mogu razviti veliku snagu i imati gotovo neograničen broj ciklusa punjenja-pražnjenja. Zbog toga već nalaze široku primjenu u hibridnim vozilima gdje služe za pohranu kinetičke energije automobila za vrijeme kočenja.

## 4.1 Značajke ultrakondenzatora

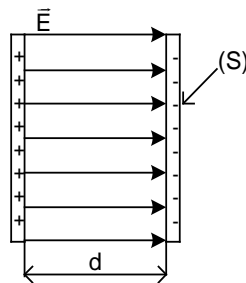
Ultrakondenzator je elektronički element koji na sebe može primiti određenu količinu naboja. Što je veći razmak između ploča (elektroda), može se pohraniti više naboja. Količina naboja je veća što su veći kapacitet i napon na koji je kondenzator priključen:

$$Q = CU \quad (4.1)$$

Kapacitet kondenzatora ovisi o vrsti materijala između ploča:

$$C = k \cdot \frac{S}{d} \quad (4.2)$$

gdje je  $C$  kapacitet kondenzatora,  $k$  konstanta za materijal,  $S$  površina ploča i  $d$  razmak između ploča.



**Slika 4.3.** Prikaz površine i razmaka između ploča kondenzatora

Konstanta  $k$  se naziva dielektrična konstanta. Za vakuum dielektrična konstanta iznosi  $\epsilon_0 = 8,68 \cdot 10^{-12}$  As/Vm. Ako je umjesto vakuuma neki drugi materijal, kapacitet kondenzatora se povećava, što se iskazuje značajkom relativne dielektričnosti.

Relativna dielektričnost  $\epsilon_r$  ukazuje koliko se puta povećava kapacitet kondenzatora ako je umjesto vakuuma neki drugi promatrani materijal. Tada dielektrična konstanta  $\epsilon$  iznosi:

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (4.3)$$

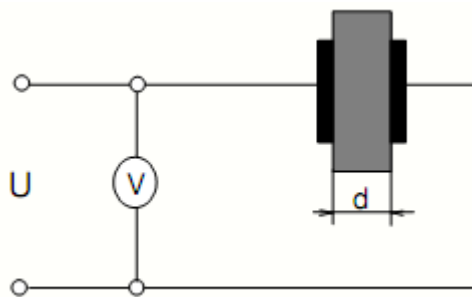
Uvrštavanjem izraza (4.3) u izraz (4.2) dobijemo izraz za izračunavanje kapaciteta kondenzatora koji glasi:

$$C \approx \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \quad (4.4)$$

Probojna čvrstoća  $E$ , koju još nazivamo električna čvrstoća ili napon proboja jest maksimalna jakost električnog polja koju izolator može izdržati bez proboja. Tu se očituje ponašanje materijala u jakim električnim poljima. Napon proboja se dobije iz izraza:

$$E = \frac{U}{d} \quad (4.5)$$

gdje je  $U$  probojni napon, a  $d$  debljina izolatora.

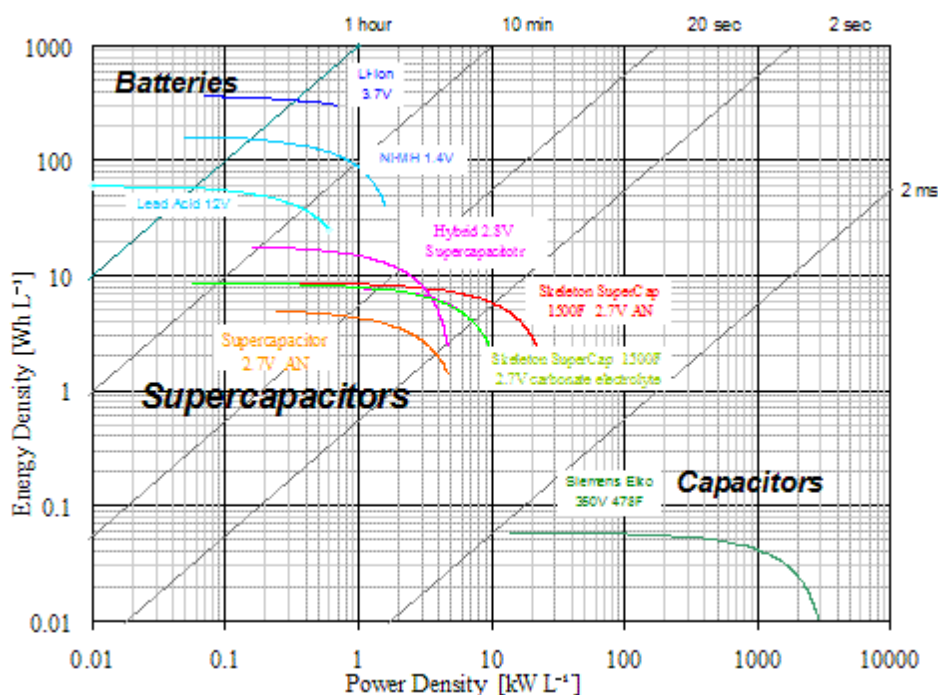


**Slika 4.4.** Prikaz debljine kondenzatora

Na mnogo načina ultrakondenzator je podložan istoj fizici kao i standardni kondenzator, tj. kapacitetnost je određena efektivnim područjem ploča, udaljenošću elektroda i dielektričnom konstantom odvajajućeg medija. Međutim ključna razlika je u tome što struktura tekućeg elektrolita i porozne elektrode u ultrakondenzatoru omogućavaju ogromnu površinu u usporedbi sa konvencionalnom strukturom. Također formiranje vrlo tankog dvostrukog sloja u ultrakondenzatorima rezultira visokom vrijednošću specifične kapacitivnosti. Ova dva faktora vode vrlo visokoj kapacitetivnosti u usporedbi s

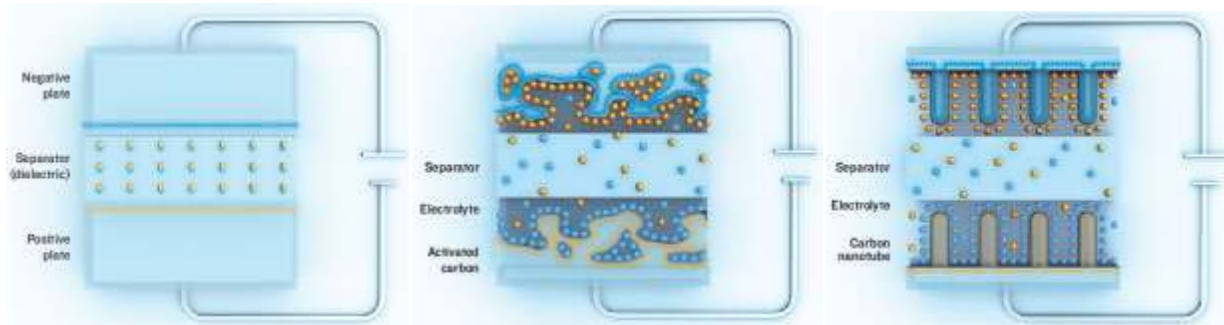
konvencionalnim elektrolitičkim kondenzatorom. Ultrakondenzatori mogu imati 100-1000 puta kapacitet po jedinici volumena u usporedbi sa konvencionalnim elektrolitičkim kondenzatorom.

Kompaktni veličinom, ultrakondenzatori mogu pohraniti neusporedivo veću količinu energije od konvencionalnih kondenzatora. Ultrakondenzatori nude visoke vrijednosti gustoće snage i gustoće energije. Mogu se brže puniti i prazniti. Štoviše, sposobni su za milijune ciklusa i na taj način praktički ne zahtijevaju nikakvo održavanje i dulje traju od baterija. Svi ovi atributi ultrakondenzatora čine ih idealnim za poboljšanu kontrolu frekvencije punjenja i brzine odziva.



**Slika 4.5.** Usporedba različitih tipova ultrakondenzatora, kondenzatora i baterija

Na slici 4.5 možemo vidjeti kako je kod elektrolitičkih kondenzatora velika promjena toka u vrlo kratkom vremenu. Baterije mogu pohraniti velike količine energije, ali se ona ne može brzo iskoristiti, dok se kod ultrakondenzatora ona može prije osloboditi.



**Slika 4.6.** Razlika između klasičnog tipa pločastog kondenzatora i ultrakondenzatora

Razlika između konvencionalnog tipa pločastog kondenzatora i ultrakondenzatora je u velikoj površini elektrolita, koji se kod ultrakondenzatora uspio postići s tehnologijom poroznog ugljika, a u novije vrijeme korištenjem ugljikovih nanocijevčica.

## 4.2 Primjena ultrakondenzatora

U skorijoj budućnosti se očekuje dostizanje gustoće skladištenja energije u ultrakondenzatorima kao i kod baterija i potpuna zamjena električnih baterija ultrakondenzatorima. Razlog za ovakvo mišljenje leži u činjenici da ultrakondenzatori imaju niz prednosti u odnosu na električne baterije, a neke od njih su:

Veoma visok stupanj korisnog djelovanja - kulonska učinkovitost (ona se definira kao umnožak naboja koji je doveden na kondenzator i elektriciteta koji je odveden s kondenzatora) je veća do 99 posto, čak i pri velikim strujama, dok je učinkovitost pri cikličnom pražnjenju i punjenju (round-trip efficiency - pražnjenje do  $\frac{1}{2}$  nominalnog napona u danom vremenskom intervalu, a zatim ponovno punjenje do nominalnog napona) preko 70% za razdoblje od 5 s odnosno preko 80% za razdoblje od 10 s.

Ultrakondenzatori imaju mali serijski otpor, pa imaju mogućnost da daju ili apsorbiraju jako veliku struju, što im omogućuje da se vrlo brzo napune. Ovo je osobito pogodno kod rekuperativnog kočenja jer se ultrakondenzatori mogu puniti i prazniti u jednakom vremenskom intervalu, što je nezamislivo kod električnih baterija.

Ultrakondenzatori mogu raditi u širokom opsegu napona, odnosno pri bilo kojem naponu koji je manji ili jednak nominalnom, dok se za postizanje viših napona od nominalnog više kondenzatora povezuje u krug, a pritom ne postoji opasnost od "pretjeranog pražnjenja" kao kod baterija. U sustavima kao što su gorive ćelije, sposobnost ultrakondenzatora da prati naponske promjene koje diktiraju gorive ćelije je značajna prednost u odnosu na baterije, jer gorive ćelije rade u širem naponskom opsegu nego što baterija može izdržati.

Pošto ultrakondenzatori rade bez oslanjanja na kemijske reakcije, oni mogu raditi u širokom temperaturnom rasponu koji se kreće od  $-40^{\circ}\text{C}$ , što je daleko bolje od svake baterije, pa do  $65^{\circ}\text{C}$ , a mogu izdržati i do  $85^{\circ}\text{C}$  bez rizika od temperaturnog gubitka uskladištenog naboja.

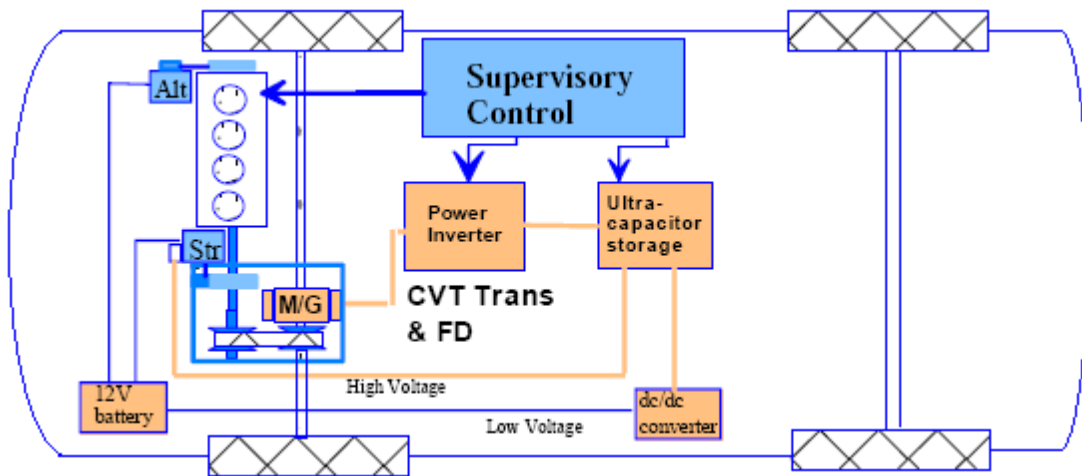
Određivanje napunjenosti baterije (state of charge - SOC) i preostalog vremena upotrebe (state of health - SOH) je značajan faktor pri projektiranju robusnih sistema s baterijama, koji zahtjeva precizna mjerenja i kompleksne algoritme obrade dobivenih podataka. S druge strane određivanje SOC i SOH kod ultrakondenzatora je vrlo jednostavno. Mjerenjem napona se određuje SOC, dok se zbog relativno male promjene ekvivalentnog serijskog otpora i kapacitivnosti s vremenom, povremenim pražnjenjem ultrakondenzatora za vrijeme od 2 do 10 s pri konstantnoj struji dobiva dovoljno podataka za određivanje SOH.

Mehanizam akumuliranja energije kod ultrakondenzatora je vrlo reverzibilan proces, jer se pomiču samo ioni, pa nema produkata kemijskih reakcija. Zato je on sposoban da izdrži stotine tisuća ciklusa punjenja i pražnjenja, bez važnije promjene u strukturi. Također se mogu podvrgavati mikro ciklusima (promjene od 5% ukupne energije) ili punim ciklusima (promjene od 80% ukupne energije) bez utjecaja na vijek trajanja. Mogu se puniti i prazniti rijetko kao kod neprekidnih izvora napajanja (nekoliko puta godišnje) ili vrlo često kao kod hibridnih vozila.

Ultrakondenzatori ne zahtijevaju nikakvo održavanje, ako rade u dozvoljenom rasponu temperatura i napona, imaju veliku specifičnu snagu, veliku pouzdanost i sigurnost korištenja i bezopasni su po okoliš.

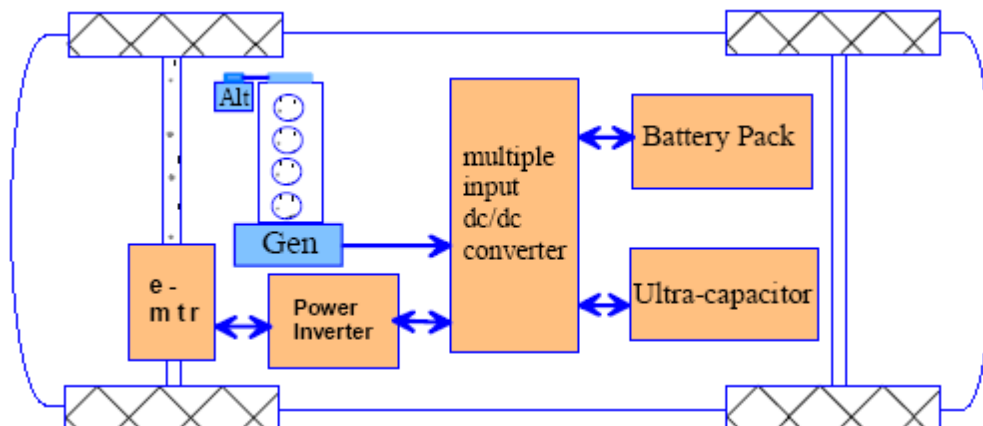
Za sada ultrakondenzatori najčešće imaju ulogu pomoćnih izvora energije kod električnih i hibridnih automobila, gdje služe za akumuliranje energije pri rekuperativnom kočenju kada je potrebno preuzeti veću količinu energije u kratkom vremenskom intervalu, jer se mnogo brže pune nego baterije. Kasnije se u režimima kada je potrebna dodatna količina energije kao što je režim pokretanja ili pri pretjecanju ova akumulirana energija koristi zajedno s energijom iz baterija čime se postiže bolja učinkovitost cijelog sustava. Dobar primjer za uporabu ultrakondenzatora u hibridnim vozilima predstavlja eksperimentalni model Toyota Yaris. Shema ovog vozila je prikazana na slici 4.7.





**Slika 4.7.** Upotreba ultrakondenzatora u hibridnim vozilima

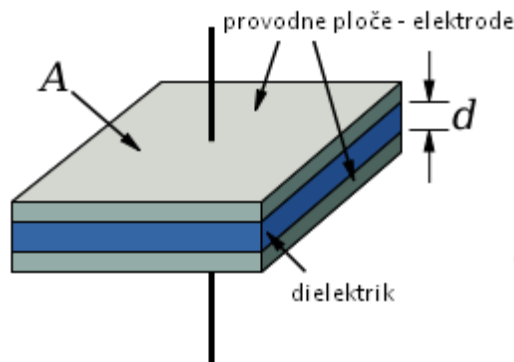
Drugi primjer se ogleda u istovremenoj upotrebi električnih baterija i ultrakondenzatora, pri čemu se primjenjuje multivarijabilni pretvarač koji odlučuje kada se koji uređaj koristi. Ovaj sustav može biti samostalan ili spregnut s motorom koji osigurava pogon i punjenje baterija, ako se iste isprazne. Shema ovog vozila je prikazana na slici 4.8.



**Slika 4.8.** Upotreba ultrakondenzatora i baterija u hibridnim vozilima

## 5. PUNJENJE I PRAŽNENJE ULTRAKONDENZATORA I KONTROLA NAPUNJENOSTI

Kondenzator je pasivni električni element, koji može akumulirati energiju u električnom polju između dvije vodljive elektrode. Proces akumuliranja energije u kondenzatoru ili punjenje kondenzatora uključuje nagomilavanje naboja suprotnog polariteta na elektrodama kondenzatora, čime se stvara razlika potencijala između elektroda. Kondenzator se sastoji od dvije metalne elektrode i dielektrika koji se nalazi između njih i koji osigurava da ne dođe do pomicanja naboja izravno s jedne elektrode na drugu. Nabijanje se može postići posredstvom strujnog kruga u koji je povezan kondenzator. Kada se ukloni strujni krug elektrode kondenzatora ostaju nabijene. Nagomilani naboj na elektrodama se privlači i stvara električno polje između elektroda. Možemo analizirati kondenzator s dvije paralelne elektrode i dielektrikom između njih koji je prikazan na slici 5.1.



**Slika 5.1.** Kondenzator s elektrodama i dielektrikom

Ako pretpostavimo da je dimenzija elektrode  $\sqrt{A}$ , gdje je  $A$  površina elektrode, mnogo veća od udaljenosti između elektroda  $d$ , onda je trenutna vrijednost električnog polja  $E(t)$  između elektroda ista u svakoj točki, osim blizu ruba elektrode. Ako je trenutna vrijednost nabijanja koje je ravnomjerno raspoređeno na elektrodama  $-q(t)$ , a dielektričnost dielektrika  $\varepsilon$  onda je:

$$E(t) = \frac{q(t)d}{\varepsilon A} \quad (5.1)$$

Trenutna vrijednost napona između elektroda je:

$$u(t) = - \int_0^d E(t) dz = \frac{q(t)d}{\epsilon A} \quad (5.2)$$

Kapacitivnost  $C$  predstavlja odnos naboja i napona između elektroda, pa je u našem slučaju pločastog kondenzatora:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (5.3)$$

Kao što vidimo iz gornje formule, kapacitivnost jednog kondenzatora se može povećati povećanjem površine elektroda, smanjenjem udaljenosti između elektroda, odnosno smanjenjem debljine dielektrika i korištenjem kvalitetnijeg dielektrika - veće  $\epsilon$ . Energija koja se akumulira u kondenzatoru pri njegovom punjenju je:

$$W(t) = -q(t) \int_0^d E(t) dz = \frac{1}{2} \frac{q(t)^2}{C} = \frac{1}{2} C u(t)^2 = \frac{1}{2} u(t) q(t) \quad (5.4)$$

Maksimalna energija koja se može pohraniti u kondenzatoru je ograničena probojnim naponom kondenzatora, a to je proizvod jakosti kritičnog električnog polja u dielektriku i njegove debljine:  $U_{kr} = E_{kr} d$ .

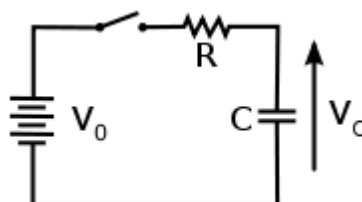
Kao što vidimo energija koja se akumulira u kondenzatoru može se povećati povećanjem kapacitivnosti ili nominalnog napona kondenzatora. Kod konvencionalnih kondenzatora se primjenjuje princip povećanja napona što je ograničeno kvalitetom upotrijebljenog dielektrika, odnosno cijenom kondenzatora. Drugi princip je povećati kapacitivnost, a smanjiti nominalni napon i ovaj princip se koristi kod ultrakondenzatora.

Kada se kondenzator priključi u krug s naponskim izvorom, struja u priključcima kondenzatora i napon na kondenzatoru su:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (5.5)$$

$$u(t) = \frac{1}{C}q(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \Rightarrow i(t) = C \frac{du(t)}{dt} \quad (5.6)$$

Možemo analizirati kondenzator koji je priključen u strujni krug za punjenje prikazan na slici 5.2.



**Slika 5.2.** Kondenzator u strujnom krugu

Jednadžba po Kirhofovom zakonu za napone glasi:

$$V_0 = u_r(t) + v_c(t) = Ri(t) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (5.7)$$

Ovo se svodi na diferencijalnu jednadžbu prvog reda:

$$RC \frac{di(t)}{dt} = -i(t) \quad (5.8)$$

Početni uvjeti su:  $I_0 = \frac{V_0}{R}$ , kondenzator je neopterećen u trenutku  $t = 0$ .

Rješenje diferencijalne jednadžbe je:

$$i(t) = \frac{V_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (5.9)$$

a napon na kondenzatoru je:

$$v_c(t) = V_0[1 - e^{-\frac{t}{RC}}] \quad (5.10)$$

Kao što vidimo, nakon dovoljno dugog vremenskog intervala  $t = 5RC$ , napon na kondenzatoru će praktično biti jednak naponu izvora i tada je kondenzator napunjen.

Ultrakondenzatori su elektrokemijski kondenzatori koji imaju neobično veliku kapacitivnost i gustoću energije, kada se usporede sa standardnim kondenzatorima, tipično 1000 puta veću kada se usporede s visoko kapacitivni elektrolitički kondenzatorima. Danas se u komercijalnoj uporabi mogu naći ultrakondenzatori do 5000 Farada.

Vremenska konstanta pražnjenja ultrakondenzatora predstavlja vrijeme nakon kojeg se ultrakondenzator potpuno isprazni pri konstantnoj struji i ona se računa iz izraza:

$$\tau = \frac{C}{I} V_r \quad (5.11)$$

U ovoj formuli  $V_r$  predstavlja nominalni napon kondenzatora. Stupanj korisnog djelovanja ultrakondenzatora pri punjenju ili pražnjenju istog ovisi od vremenske konstante  $\tau = R_i C$ , gdje  $R_i$  predstavlja unutarnji otpor ultrakondenzatora. Stupanj korisnog djelovanja pri punjenju  $\eta_c$  i pri pražnjenju  $\eta_d$  se može izračunati iz izraza:

$$\eta_c = \frac{1}{\left(1 + \frac{2\tau}{T}\right)} \quad (5.12)$$

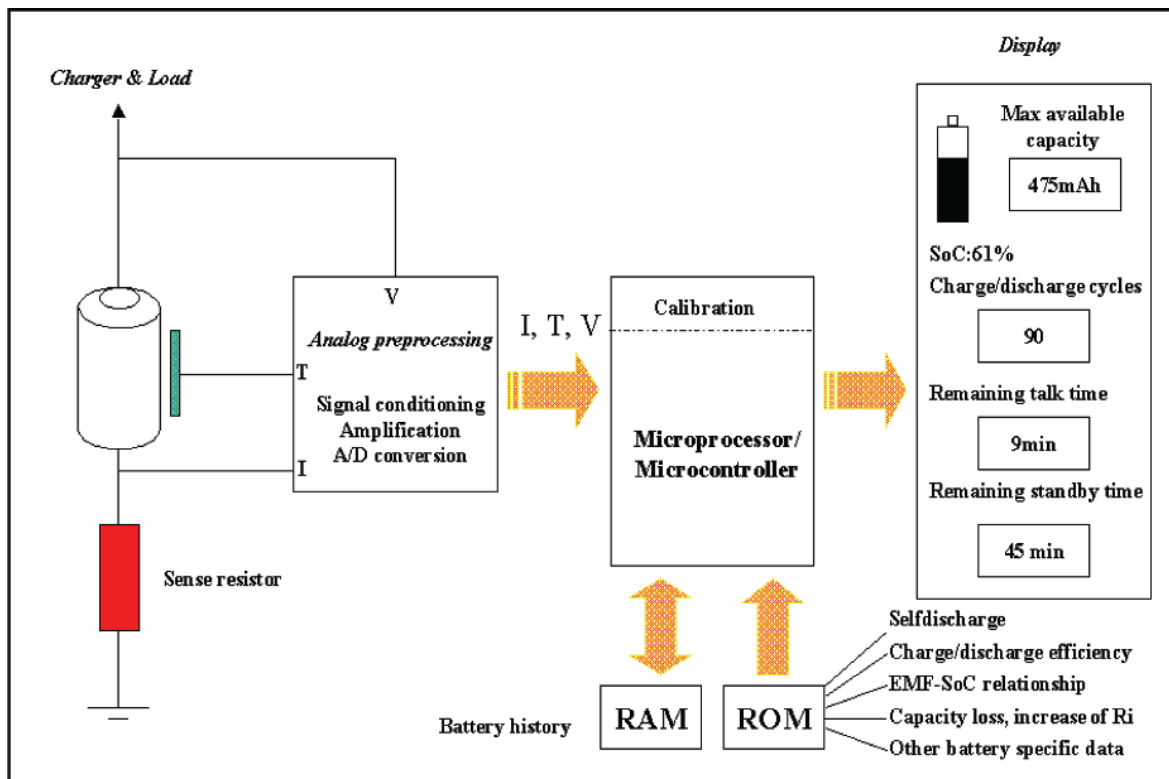
$$\eta_d = 1 - \frac{2\tau}{T} \quad (5.13)$$

## 6. PUNJENJE I PRAŽNENJE BATERIJA

Električni naboj koji baterija može pružiti je naravno najvažniji parametar. SI jedinica za to je Coulomb (nazvana po francuskom fizičaru C. A. Coulumbu, 1736-1806). U praksi se Coulomb često označava oznakom As, jer jedan Coulomb naboja odgovara količini naboja koja u jednoj sekundi protekne vodičem ako je jakost struje iznosa 1A. Međutim, ta je jedinica relativno mala. Umjesto nje koristi se ampersat - jedan amper koji teče jedan sat.

Od velike važnosti je poznavanje procjene stanja nabijenosti baterije (SOC). SOC baterije se definira kao postotak od punog kapaciteta baterije koji je još uvijek na raspolaganju za daljnje pražnjenje. Za pravilno razumijevanje onoga što predstavlja izraz "SOC" potrebno je razumijevanje jasne definicije koja govori: SOC je postotak maksimalnog mogućeg naboja koji je prisutan unutar punjive baterije. SOC metoda mjerenja i računski model SOC-a mora biti jednostavan, praktičan i pouzdan.

Slika 6.1 prikazuje primjer praktičnog sustava mjerenja SOC. Baterijske ćelije se mogu povezati u seriju i/ili paralelno, a svaka baterijska ćelija ima najmanje dva terminala. SOC sistem uključuje analogno-digitalni pretvarač (ADC) za pretvaranje pada napona između najmanje dva otpornika kao mjerilo struje ( $I$ ) u digitalni signal i za pretvaranje mjerene analogne vrijednosti napona baterije ( $V$ ) i temperatura ( $T$ ) u digitalne signale.



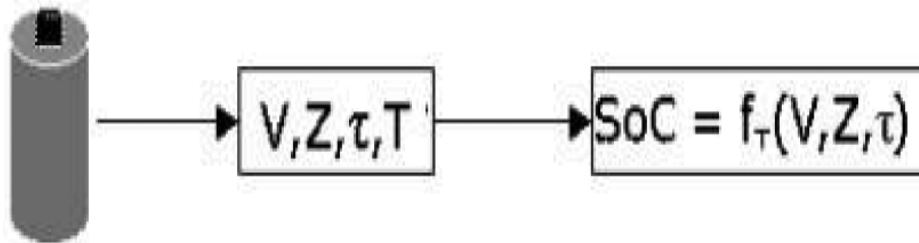
**Slika 6.1.** Opći prikaz SOC sustava

Mikroprocesor / mikrokontroler (u kojem je pohranjen SOC algoritam) određuje SOC baterije na temelju izmjerenih signala. Potrebna su dva tipa memorije: ROM i RAM memorija. Osnovni podaci baterije kao što je iznos samopražnjenja kao funkcije  $T$  i učinkovitost pražnjenja kao funkcije od  $I$  i  $T$ , čitaju se iz ROM memorije. Memorija s izravnim pristupom (RAM) koristi se za pohranu podataka o bateriji, kao što su broj punjenja i pražnjenja baterije, koji mogu biti korišteni za ažuriranje maksimalnog kapaciteta baterije. Svaki dio ovog sustava (algoritam ili hardverski uređaj) utjecat će na krajnju točnost SOC.

## 6.1 Metode mjerenja

### *Metoda izravnog mjerenja*

Metoda izravnog mjerenja se odnosi na mjerenja varijabli baterije kao što su napon baterije ( $V$ ), impedancija baterije ( $Z$ ) i vremenske konstante ( $\tau$ ) nakon određenog koraka. Većina odnosa između varijabli baterije i SOC ovise o temperaturi ( $T$ ). To znači da treba osim napona i impedancije mjeriti temperaturu baterije. Osnovni princip SOC sustava indikacije na temelju izravnog mjerenja prikazan je na slici 6.2.



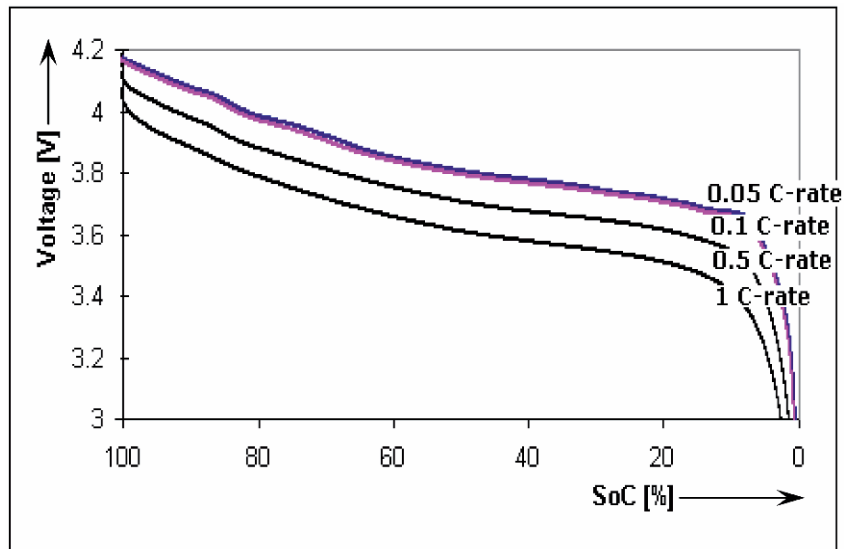
**Slika 6.2.** Osnovni princip SOC na temelju izravnog mjerenja

Glavna prednost sustava SOC na temelju izravnog mjerenja je da on ne treba biti stalno spojen na bateriju. Mjerenje može biti izvedeno čim se sustav spoji na bateriju.

### *Metoda mjerenja napona*

Iako je metoda mjerenja napona bila vrlo popularna, ona ne daje najtočnije rezultate. Određivanje preostalog kapaciteta ćelije jednostavnim mjerenjem napona može biti manje skupo, ali pod stvarnim uvjetima mjerenja napona rezultati mogu biti vrlo različiti. Iako je istina da će napon ćelije kontinuirano padati za vrijeme pražnjenja, napon ćelije uvelike ovisi o temperaturi ćelije i postotku pražnjenja. Slika 6.3 prikazuje krivulje pada napona pri različitim postocima pražnjenja Li-ion baterije.



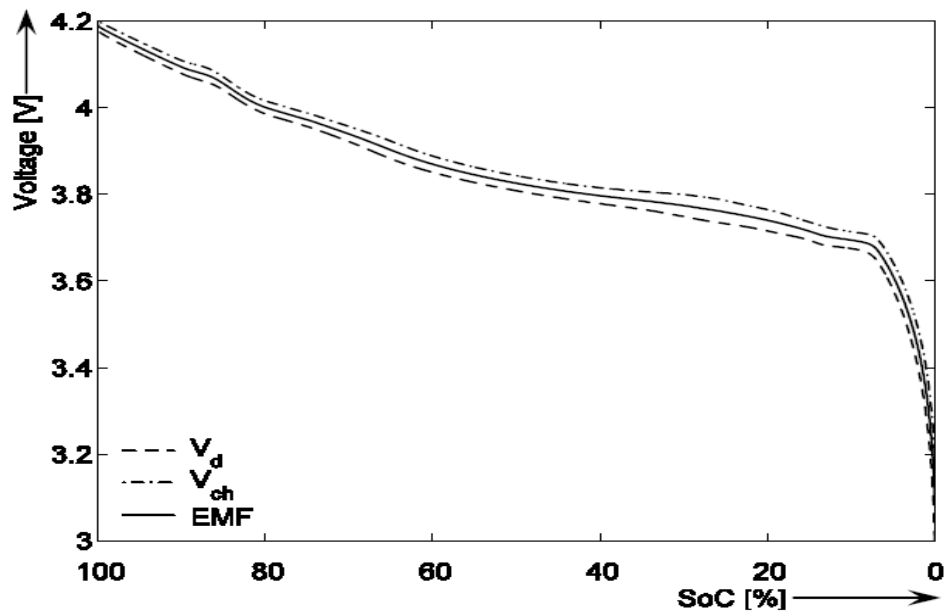


**Slika 6.3.** Krivulje pada napona pri različitim postocima pražnjenja Li-ion baterije

### *EMS metoda*

EMS termin označava elektromotornu silu. Elektromotorna sila je veličina kojom se izražava rad potreban za razdvajanje nosilaca električnih naboja u izvoru električne struje, pri čemu sila koja djeluje na električne naboje nije direktna posljedica električnog polja. Definira se kao omjer rada i količine električnog naboja. U principu, EMS se može odrediti iz termodinamičkih podataka.

Druga metoda s kojom se može dobiti EMS zove se linearna interpolacija. S ovom metodom prosječan napona baterije, dobiva se kao i kod SOC, iz napona baterije tijekom dva uzastopna pražnjenja gdje se u ciklusima pražnjenja koriste iste struje i odvijaju se na istoj temperaturi. Slika 6.5 pokazuje EMS krivulje Li-ion baterije dobivene metodom linearne interpolacije pri 25 ° C.



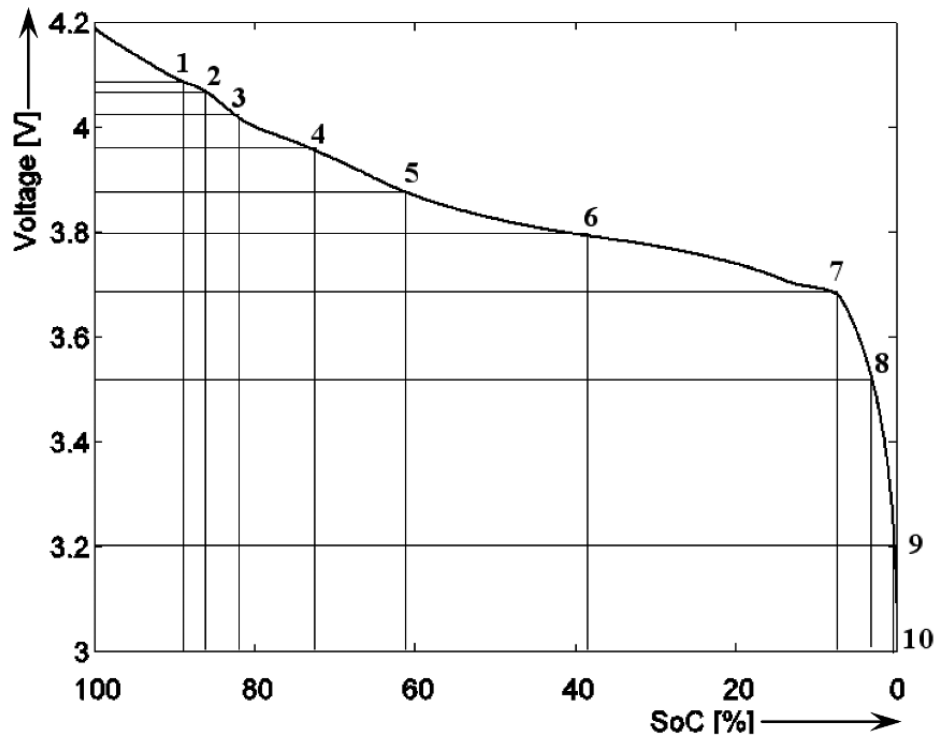
**Slika 6.4.** EMS krivulje dobivene metodom linearne interpolacije

Temperaturna ovisnost EMS je mala, osim ako je baterija gotovo u potpunosti ispražnjena ili gotovo potpuno napunjena.

Kada se algoritam SOC temelji na metodi EMS, za točnost je potrebna metoda implementacije EMS. Tri metode implementacije EMS koje se koriste u praksi su:

(a) Look-up tablica. Tablica u koju se mogu pohraniti izmjerene fiksne vrijednosti parametara koji se mogu koristiti kako bi se odredila SOC. Veličina i točnost Look-up tablice u SOC indikaciji sustava ovisi o broju pohranjenih vrijednosti. Jedan od glavnih nedostataka ove metode je da čak i u slučaju jednog tipa baterije teško uzeti u obzir svaku točku EMS krivulje kako bi se omogućila precizna SOC indikacija sustava. Kada su uključene mnoge točke mjerenja, proces postaje sve složeniji i skuplji od drugih postupaka, te ne daje nikakve prednosti u odnosu na druge postupke.

(b) Po dijelovima linearne funkcije. U ovoj metodi EMS krivulja se aproksimira po dijelovima linearne funkcije. Mogući primjer sa 10 intervala prikazan je na slici 6.4 za Li-ion bateriju. Naponi i odgovarajuće SOC u pojedinim intervalima prikazani su u tablici 6.1.



**Slika 6.5.** EMS po dijelovima krivulje za Li-ion bateriju

**Tablica 6.1** Naponi i vrijednosti SOC u intervalima EMS krivulje

| Interval number | Interval voltage limits [V] | SoC [%]   |
|-----------------|-----------------------------|-----------|
| 1               | 4.08 – 4.20                 | 90 – 100  |
| 2               | 4.06 – 4.08                 | 84 – 90   |
| 3               | 4.02 – 4.06                 | 81 – 84   |
| 4               | 3.98 – 4.02                 | 72 – 81   |
| 5               | 3.88 – 3.98                 | 61 – 72   |
| 6               | 3.80 – 3.88                 | 39 – 61   |
| 7               | 3.68 – 3.80                 | 8 – 39    |
| 8               | 3.54 – 3.68                 | 4 – 8     |
| 9               | 3.22 – 3.54                 | 0.5 – 4   |
| 10              | 3.00 – 3.22                 | 0.0 – 0.5 |

Uz pomoć jednadžbe (6.1) za bilo koju mjerenu vrijednost napona baterije, tj. EMS, SOC se može izračunati:

$$\text{SOC} = \text{SOC}_1 + \frac{\text{EMS} - V_l}{V_h - V_l} (\text{SOC}_h - \text{SOC}_1) \quad (6.1)$$

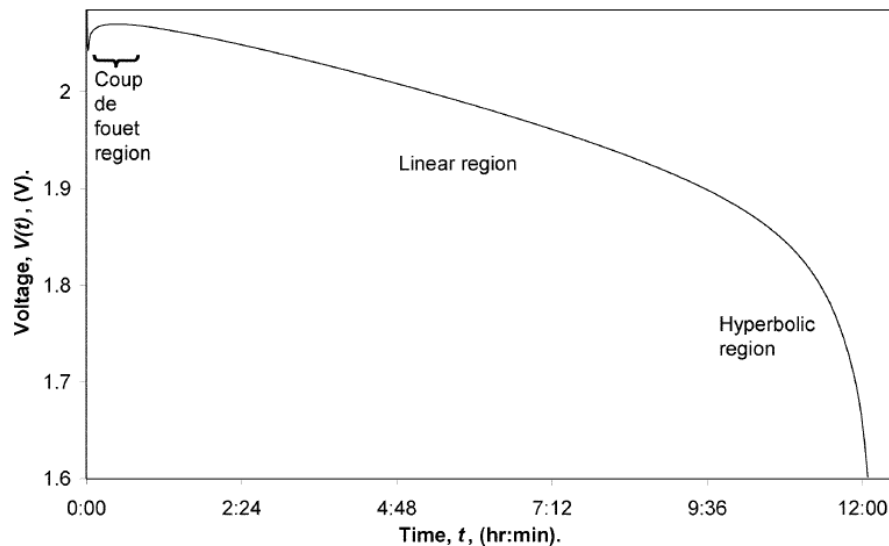
gdje  $V_l$  i  $V_h$  predstavljaju fiksne i specifične vrijednosti napona EMS krivulje za odgovarajući  $SOC_l$  [%] i  $SOC_h$  [%] SOC vrijednosti (npr. u tablici 6.1  $V_l = 4,08$  V i  $V_h = 4,2$  V što odgovara  $SOC_l = 90\%$  i  $SOC_h = 100\%$ ).

Kada bismo izabrali dovoljan broj intervala napona i SOC, ova metoda bi omogućila više fleksibilnosti (mogućnost primjene za druge vrste baterija) i preciznost procjene SOC na temelju EMS krivulje u odnosu na Look-up tablicu implementacije. Problemi širenja, temperature i starenje i dalje neće biti riješeno.

(c) Matematička funkcija. U ovoj metodi EMS krivulja se aproksimira sa matematičkim funkcijama. Primjer ove metode je da se EMS baterije s interkalacijskim elektrodama modelira kao razlika u ravnoteži potencijala pozitivne i negativne elektrode. Korištenje adaptivnih metoda za ažuriranje parametara jednadžbi uzimajući u obzir faktore kao što su širenje, temperatura i starenje baterije, ova metoda će vjerojatno ponuditi najbolje rješenje za praktičnu provedbu EMS.

## 6.2 Pražnjenje baterija

Tipična karakteristika pražnjenje baterije u vremenu prikazana je na slici 6.6. Jasno je da postoje tri različita područja: coup de fouet područje, linearno područje i hiperbolno područje. S operativnog gledišta, najvažnije je linearno područje. Coup de fouet područje počinje na početku pražnjenja baterije i obično vremenski traje manje od 10% vremena pražnjenja. Hiperbolno područje pojavljuje se u kasnoj fazi pražnjenja. U ovom području treba imati plan za nepredviđo djelovanje (osobito ako je potrebna ručna intervencija), inače je za to prekasno.



**Slika 6.6.** Karakteristika pražnjenja baterije u vremenu

Taj oblik pražnjenja napona baterije u vremenu za sve baterije je sličan. Pristupom skaliranja omogućuje se ujediniti sve karakteristike pražnjenja baterije. Efektivno ovo skaliranje definira transformaciju koja transformira karakteristiku pražnjenja napona baterije u vremenu iz vremenske domene u drugu domenu tako da su usklađene karakteristike pražnjenja bez obzira na način pražnjenja i uvjetima baterije.

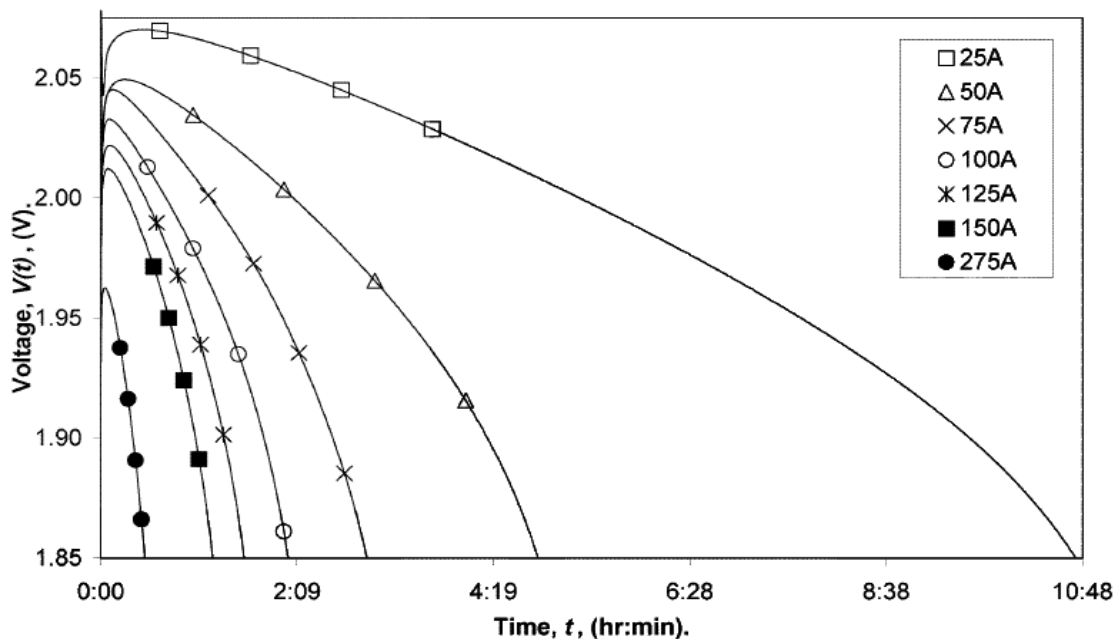
Pokušaj u tom pristupu je donesen ranije. U ovom slučaju normalizirano vrijeme pražnjenja  $t_u$  je omjer vremena pražnjenja  $t$  i ukupnog vremena pražnjenja  $t_T$ :

$$t_u = \frac{t}{t_T} \quad (6.2)$$

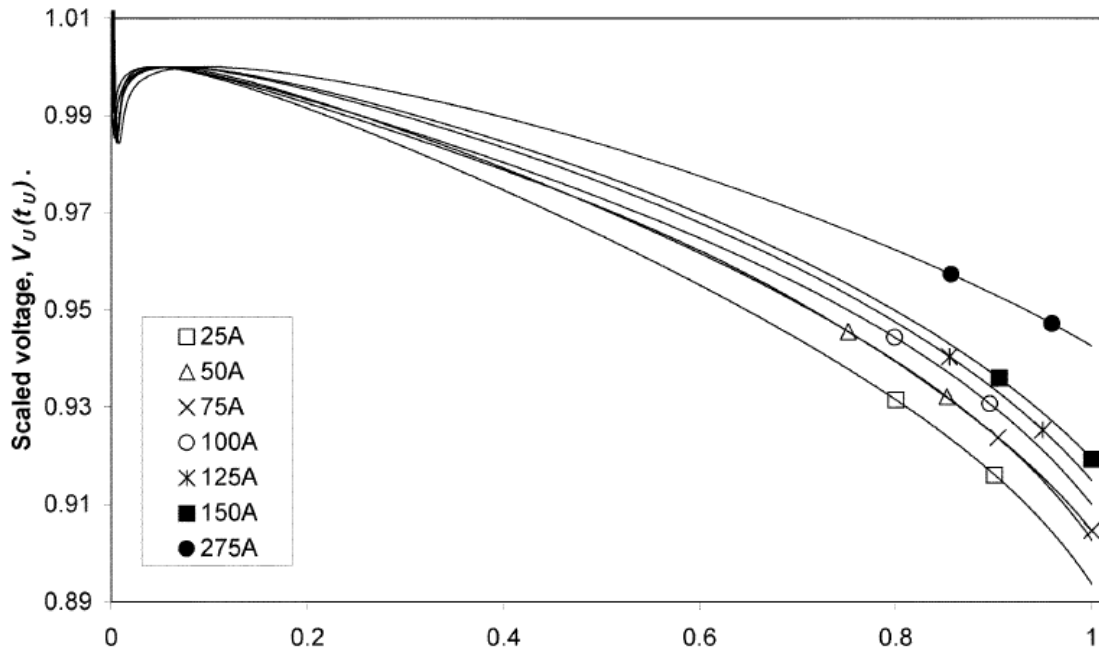
Također normaliziran napon pražnjenja u vremenu  $V_u(t_u)$  izražen je kao omjer napona pražnjenja  $V(t)$  i početnog napona pražnjenja  $V_s$ :

$$V_u(t_u) = \frac{V(t)}{V_s} \quad (6.3)$$

Početak pražnjenja baterije može biti odabran napon koji je umanjen za 5 % od napona baterije. Tu je problem da je početni napon (neovisno o tome kako je on definiran) različit za pražnjenja provedena u različitim vremenskim uvjetima ili za različite uvjete baterija. Tako, dok sve karakteristike pražnjenja imaju zajednički početni napon pražnjenja  $V_s$ , ostatak karakteristike pražnjenja će odstupati od jedinstvene karakteristike. Maksimalna razlika će u konačnici odgovarati razlici napona na kraju pražnjenja. Ovo je jasno ilustrirano na slici 6.7.



**Slika 6.7.** Napon pražnjenja u odnosu na vrijeme karakteristično za različita područja



**Slika 6.8.** Skalirani napon pražnjenja u odnosu na vrijeme karakteristično za različita područja

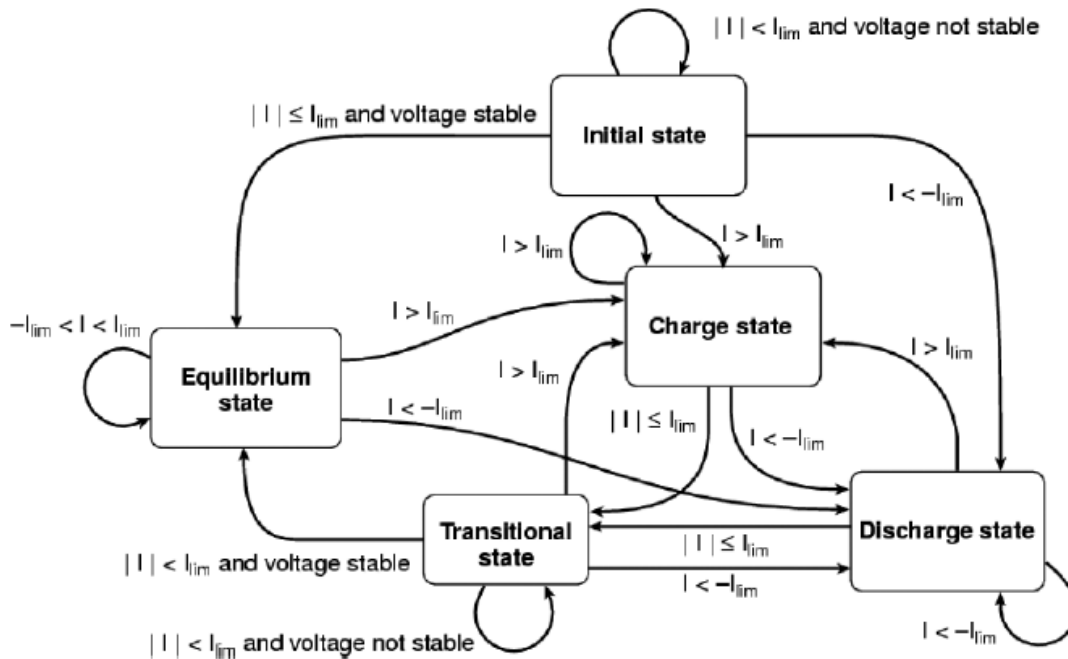
Zbog tih razlika predlaže se transformacija koja rezultira jače ujednačenu karakteristiku pražnjenja (slika 6.8). Napon pražnjenja je tada:

$$V_u(t_u) = \frac{(V(t) - V_{end})}{(V_P - V_{end})} \quad (6.4)$$

U ovom slučaju, napon na početku pražnjenja kao i napon na kraju pražnjenja  $V_{end}$  su skalirani tako da su početak i kraj pražnjenja "vezani".

## 6.3 Procjena algoritama stanja nabijenosti

Prema algoritmima stanja nabijenosti možemo odrediti pet različitih stanja: početno stanje, ravnotežno stanje, prijelazno stanje i stanje punjenja i pražnjenja. Dijagram stanja koji prikazuje osnovnu strukturu algoritama prikazan je na slici 6.9.



**Slika 6.9.** Dijagram stanja nabijenosti baterije

Kada se baterija prvi puta poveže u SOC sustav, primjenjuje se algoritam za početno stanje. U tom stanju SOC se određuje na temelju napona i mjerenja temperature. Ovisno o tome da li je baterija napunjena, ispražnjena ili u ravnoteži, algoritam će biti pomaknut za odgovarajuće stanje.

U ravnotežnom stanju struja baterije je jako mala. Ova situacija će se dogoditi primjerice kada se mobilni uređaj nalazi u stanju čekanja. Struja će u tom slučaju biti samo nekoliko mA, što je niže od najmanje definirane struje u sustavu  $I_{lim}$ . Na ovoj vrlo niskoj vrijednosti struje, napon baterije će biti blizu vrijednosti EMS, pod uvjetom da je taj napon stabilan. Dakle, potrebno je omogućiti stabilan napon za algoritam za promjenu u to stanje.

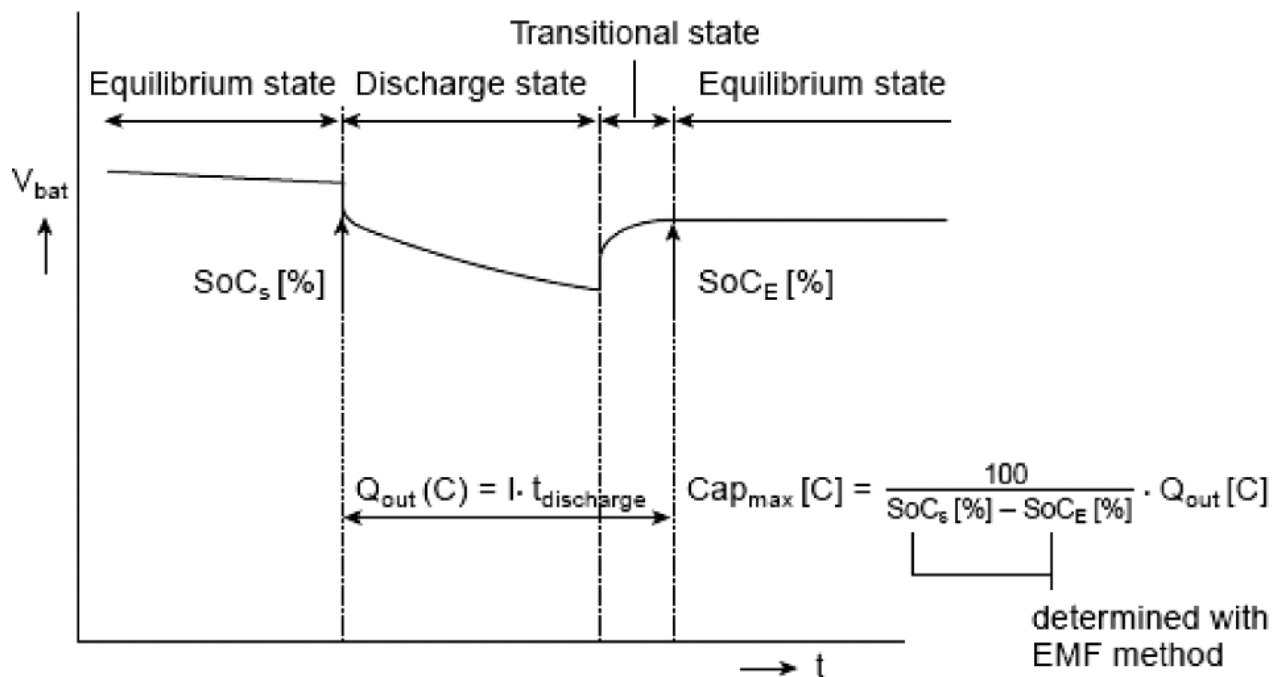


Prijelazno stanje se koristi kada se algoritam mijenja bilo iz stanja punjenja ili pražnjenja u stanje ravnoteže. Kada se u ovom stanju utvrdi da je napon baterije stabilan, algoritmu je dozvoljen ulazak u stanje ravnoteže. To se postiže deriviranjem napona baterije u vremenu  $dV/dt$  uspoređujući ga s vrijednosti praga  $dV/dt_{lim}$  pohranjenog u SOC sustavu za provjeru napona stabilnosti. Prag  $dV/dt_{lim}$  trebao bi biti dovoljno mali da bi se osigurao napon baterije konstantan u vremenu i da baterija dostigne stanje ravnoteže.

U stanju punjenja baterija je spojena na punjač i u strujnom krugu teče struja u bateriju iznosom većim od  $I_{lim}$ . Na kraju stanja punjenja, sustav prelazi kroz prijelazno stanje u ravnotežno stanje.

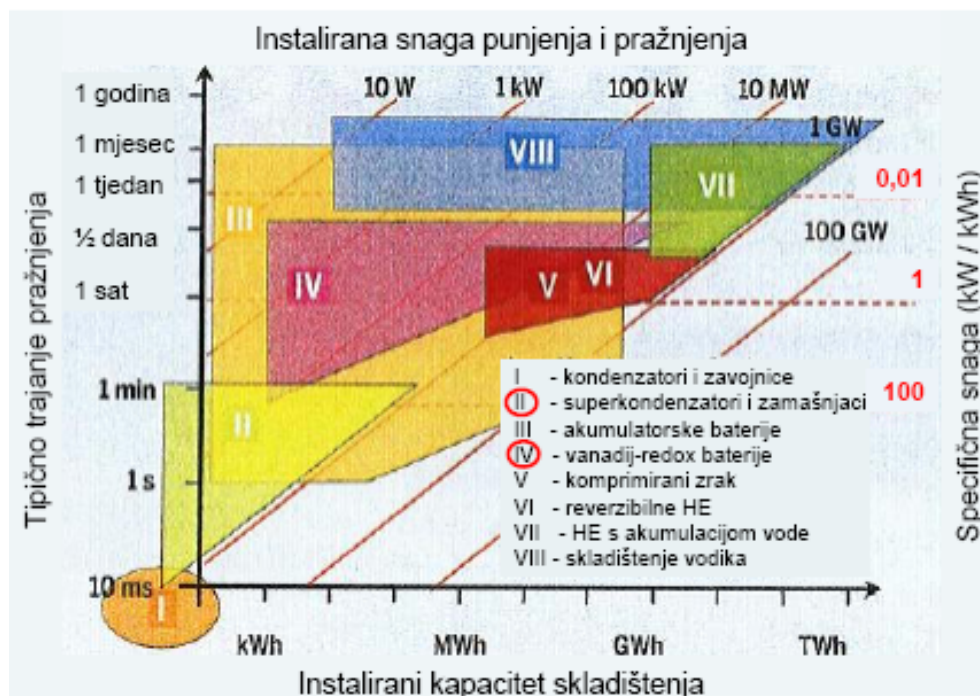
U stanju pražnjenja, baterija se prazni i iz baterije teče negativna struja veća od  $I_{lim}$ . Na kraju stanja pražnjenja, sustav prolazi kroz prijelazno u ravnotežno stanje.

Jednostavna metoda za određivanje maksimalnog kapaciteta  $Cap_{max}$  uzimajući u obzir gubitke kapaciteta prolazeći kroz razna stanja prikazani su na slici 6.10.

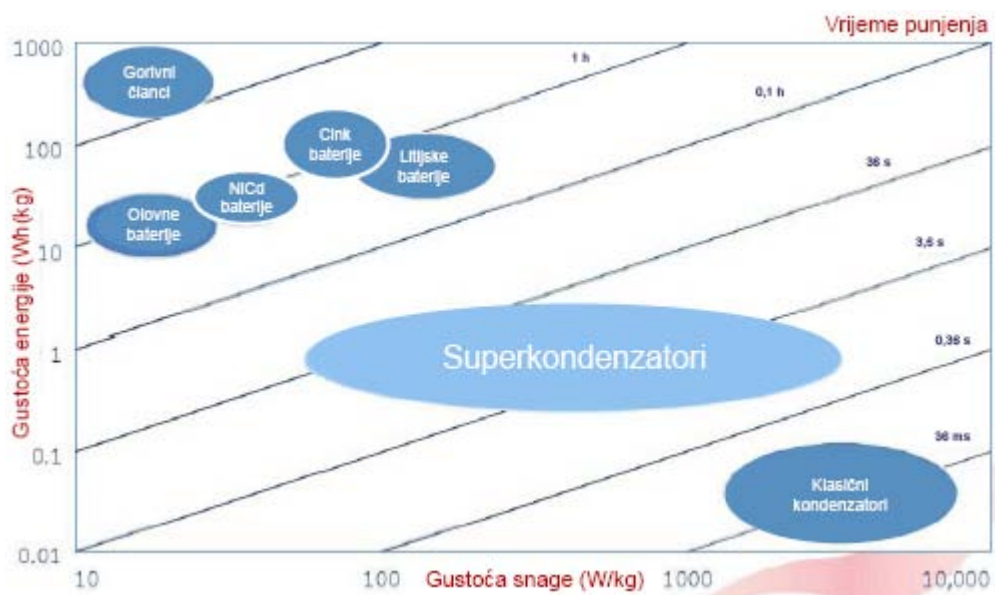


**Slika 6.10.** Određivanje maksimalnog kapaciteta  $Cap_{max}$

Pregled mogućnosti i usporedba različitih tehnologija skladištenja energije dani su na slici 6.11 i 6.12.



**Slika 6.11.** Pregled mogućnosti skladištenja energije



**Slika 6.12.** Usporedba različitih tehnologija skladištenja energije

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisani su sustavi skladištenja električne energije u električnim hibridnim vozilima, te su opisane pojedine vrste hibridnih pogona (serijski, paralelni i serijsko-paralelni pogon), pri čemu je napravljen poseban osvrt na električno hibridno vozilo Toyota Prius. Osnovna ideja postojanja hibridnog električnog pogona leži u tome da električni dio pogona može obavljati funkciju glavnog pogona (npr. u režimima pokretanja vozila), dodatnog izvora snage uz glavni benzinski motor (npr. u uvjetima gradske vožnje), te kao dodatni kočioni mehanizam koji istovremeno može skladištiti energiju generiranu u procesu generatorskog kočenja električnim motorom.

Provedena je detaljna usporedba mehanizama skladištenja električne energije, gustoće energije i efikasnosti (korisnosti) pojedinih tipova komercijalno dostupnih baterija, kao što su olovne (Pb), nikal-kadmijeve (NiCd), nikal-metal-hidridne (NiMH) i litij-ionske (Li-Ion) baterije. Također su analizirani mehanizmi skladištenja električne energije (naboja) i tehnologije proizvodnje kondenzatora ultra-visokog kapaciteta (ultrakondenzatora). Osnovna prednost baterije u odnosu na ultrakondenzator je u daleko većim apsolutnim iznosim akumulirane energije. S druge strane, osnovna prednost ultrakondenzatora je u mogućnost daleko bržeg skladištenja i oslobađanja prethodno uskladištene električne energije (tj. veća brzina punjenja i pražnjenja), te razmjerno mali gubici pri punjenju i pražnjenju u odnosu na kemijske izvore (baterije).

Stanje nabijenosti i količina akumulirane električne energije, te sami procesi punjenja i pražnjenja baterija i ultrakondenzatora ključni su za kvalitetan rad električnog hibridnog pogona. Stoga se u ovom radu također predstavljaju razmjerno jednostavni i praktično primjenjivi matematički modeli procesa punjenja i pražnjenja, te stanja nabijenosti baterija i ultrakondenzatora.

## 8. LITERATURA

[1] Toyota Prius, <http://www.prius.com.hr/minisite>, 18.10.2009.

[2] Hibridi su svuda oko nas, <http://www.vidiauto.com>, 20.10.2009.

[3] Pop, V., Bergveld, H.J., Danilov, D., Regtien, P.P.L., Notten, P.H.L.: Battery Management Systems, Eindhoven, 2008

[4] Sandeep, D.:Electric Vehicle Battery Systems, Butterworth–Heinemann, Woburn, 2002

[5] Wiley, J., Ltd, S.: Electric Vehicle Technology Explained, 2003

[6] Nelson, J.P., Boli, W.D.: Basics and Advances in Battery Systems, IEEE, 1995

[7] Burke, A. F.:Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles, IEEE, 2007

[8] Aylor, J.H.:A Battery State-of-Charge Indicator for Electric Eheelchairs, IEEE, 1992