

Elektrotehnički fakultet univerziteta u Beogradu

Katedra za energetske pretvarače i pogone

Električna vozila

Semestralni rad

tema:

Primena zamajca, superkondenzatora i solarnih ćelija u električnim vozilima

Student: Vladimir Vojinović
Broj indeksa: 131/06

Profesor: Slobodan Vukosavić
Asistent: Željko Pantić

Sadržaj:

Uvodna reč	3
1. Zamajac kao akumulator mehaničke energije	4
1.1 Uvod	4
1.2 Princip rada i osnovne karakteristike zamajca	4
1.3 Problemi konstrukcije i praktične izvedbe zamajca	5
1.4 Praktična primena zamajca kod električnih vozila	7
2. Superkondenzatori	10
2.1 Uvod	10
2.2 Princip rada i osnovne karakteristike superkondenzatora	11
2.3 Problemi konstrukcije i budući pravci razvoja superkondenzatora	14
2.4 Praktična primena superkondenzatora kod električnih vozila	15
3. Solarne ćelije	17
3.1 Uvod	17
3.2 Princip rada i osnovne karakteristike solarnih ćelija	17
3.3 Problemi konstrukcije i budući pravci razvoja solarnih ćelija	19
3.4 Praktična primena solarnih ćelija kod električnih vozila	22
4. Zaključak	25
5. Literatura	26

Uvodna reč

Sve veća naftna kriza i nedostatak energije primorava proizvođače vozila za civilni i masovni transport da se okrenu alternativnim rešenjima kao što su autonomna električna vozila koja kao primarni izvor energije koriste električne baterije koje mogu da se pune priključenjem na lokalnu mrežu, a već sada se istražuje upotreba zamajca, superkondenzatora, solarnih ćelija, gorivnih ćelija i energija komprimovanog vazduha pomoću kojih bi se dobijala električna energija potrebna za napajanje pogonskog električnog ili mehaničkog (u slučaju komprimovanog vazduha) motora, kao krajnje rešenje za što bolje iskorišćenje postojećih energetske resursa i veću energetske efikasnost.

Razlog za dominaciju motora sa unutrašnjim sagorevanjem (SUS) u auto industriji u odnosu na elektricne motore leži u ekonomskom interesu multinacionalnih naftnih kompanija koje su puno uložile u istraživanja naftnih resursa i postojeću naftnu infrastrukturu (naftovodi, rafinerije, hemijska industrija...) i nastoje da te resurse maksimalno iskoriste, bez obzira što štetni izduvni gasovi zagađuju životnu sredinu, stvaraju efekat staklene bašte, menjaju klimu, biljni i životinjski svet.

U poslednje vreme proizvode se štedljivija vozila sa smanjenim stepenom emisije izduvnih gasova koja mogu da koriste i biogoriva dobijena iz bio mase kao što je biodizel dobijen iz uljane repice, etanol, metanol itd. ali ni to nije dovoljno jer glavni doprinos zagađenju životne sredine nastaje u procesu proizvodnje, jer je količina potrebnog materijala za izradu jednog vozila, odnosno količina električne energije potrebne za elektrolizu bakra, aluminijuma, gvožđa itd. daleko veća od ukupne energije koju vozilo potroši u toku svog radnog veka. Značajan doprinos smanjenju utrošene energije u procesu proizvodnje može se postići reciklažom starih vozila. Kao prelazno rešenje nude se hibridna električna vozila koja koriste SUS motor (benzinski ili dizel) i električni AC motor najčešće u paralelnoj sprezi zbog veće korisne snage, s tim da se pri manjim brzinama (gradska vožnja) i u fazama polaska koristi najviše električni motor, a pri većim brzinama se paralelno električnom uključuje i SUS motor koji ujedno i dopunjuje baterije. Kod ovih vozila se pri kočenju koristi rekuperacija, tako da se deo energije kočenja (jedan deo odlazi na gubitke u motoru i pretvaraču) vraća u baterije, gde isti AC motor radi u generatorskom režimu rada. Hibridna vozila ostvaruju uštede od 30 - 40 % u potrošnji goriva u odnosu na konvencionalna vozila iste snage koja koriste samo SUS motor.



Toyota Prius hibridno vozilo

1. Zamajac kao akumulator mehaničke energije

1.1 Uvod

Zamajac predstavlja mehanički uređaj sa značajnim momentom inercije koji se koristi kao akumulator rotacione energije. Njegova osobina je da se opire promenama brzine obrtanja vratila na koje je spojen što pomaze ustaljivanju brzine obrtanja vratila, kada se na njega dovede promenljivi moment (kao kod motora SUS) ili kada je moment opterećenja promenljiv (kao kod klipne pumpe). Zamajac može biti korišćen da proizvede veoma jak energetski impuls potreban za laboratorijska ispitivanja, gde bi uzimanje energije iz lokalne mreže prouzrokovalo nedopustive pikove napona i struja. Za tu upotrebu se koristi mali motor koji ubrzava zamajac između udarnih energetskih impulsa. Nedavno su počela istraživanja koja za cilj imaju konstruisanje zamajca koji bi se koristio kao akumulator energije u vozilima.

1.2 Princip rada i osnovne karakteristike zamajca

Zamajac se sastoji od rotora i ležajeva na koje je rotor oslonjen i može slobodno da rotira. Princip rada se sastoji u tome da se zamajac ubrzava do vrlo visokih brzina pri čemu se energija sistema skladišti u zamajcu kao rotaciona energija. Energija se vraća nazad u sistem usporavanjem zamajca. Ležajevi mogu biti mehanički i oni se koriste kod manjih brzina obrtanja do 20000 obr/min ili magnetni za veće brzine obrtanja preko 20000 obr/min. Kinetička energija rotacije koja se uskladišti u zamajcu se računa pomoću formule:

$$E_k = \frac{1}{2}J\omega^2$$

U ovoj formuli je:

J - moment inercije rotora zamajca.

ω - ugaona brzina zamajca.

Rotor zamajca najčešće ima oblik cilindra pa moment inercije može biti:

- pun cilindar $J = mr^2$, m je masa, a r poluprečnik cilindra.

- cilindar sa tankim zidom (folija savijena u obliku cilindra) $J = \frac{1}{2}mr^2$.

- cilindar sa debelim zidom (pun cilindar sa šupljinom u sredini) $J = \frac{1}{2}m(r_1^2 + r_2^2)$, gde je r_1 spoljašnji poluprečnik, a r_2 unutrašnji poluprečnik.

Količina energije koja se sigurno može uskladištiti u rotoru zavisi od naprezanja na istezanje materijala rotora jer se on usled prevelikih centrifugalnih sila može iskriviti ili polomiti pa je ovo glavni parametar pri projektovanju zamajca kao sistema za akumuliranje energije. Napon na istezanje se može izračunati iz formule:

$$\sigma_t = \rho r^2 \omega^2$$

U ovoj formuli je:

σ_t - napon na istezanje na obodu rotora.

ρ - specifična gustina materijala od koga je napravljen rotor.

r - poluprečnik rotora zamajca.

ω - ugaona brzina rotora.

Iz ove formule možemo videti da je akumulirana kinetička energija proporcionalna sa naponom na istezanje, a obrnuto proporcionalna sa gustinom materijala, odnosno: $E_k \sim \frac{\sigma_t}{\rho}$

Ovaj odnos se naziva specifični napon na istezanje, i što je ovaj odnos veći, to se više energije može akumulirati u zamajcu. U poređenju sa drugim načinima skladištenja energije sistemi sa zamajcem imaju dug radni vek sa vrlo malo održavanja ($10^5 - 10^7$ ciklusa upotrebe), veliku gustinu skladištenja energije (do 130 W·h/kg ili 500 kJ/kg) i veliku maksimalnu izlaznu snagu. Stepenn korisnog dejstva može da dostigne 90%. Danas se mogu naći zamajci za energije od 3 kWh do 133 kWh.

Primeri akumulirane energije zamajca:

telo koje rotira	masa [kg]	prečnik [m]	brzina obrtanja [obr/min]	akumulirana energija [J]	akumulirana energija [kWh]
točak bicikla	1	0.7	150	15	0.0000004
točak bicikla, dupla brzina	1	0.7	300	60	0.0000016
točak bicikla, dupla masa	2	0.7	150	30	0.0000008
Flintstones betonski točak na kolima	245	0.5	200	1680	0.00047
točak na vozu	942	1	318	65000	0.018
točak na kamionu za rudnik	1000	2	79	17000	0.0048
mala baterija sa zamajcem	100	0.6	20000	9.80E+06	2.7
zamajac za kočenje kod voza	3000	0.5	8000	3.30E+07	9.1
baterija za backup sa zamajcem	600	0.5	30000	9.20E+07	26
planeta Zemlja	5.97E+24	1.27E+07	6.94E-04	2.50E+29	7.00E+22

1.3 Problemi konstrukcije i praktične izvedbe zamajca

Zamajac koji može da akumulira dosta kinetičke energije pravi se tako da bude manje mase i što veće brzine obtanja jer kinetička energija zavisi od kvadrata brzine. Ovakav zamajac ne može da koristi mehaničke ležajeve jer je frikcija proporcionalna brzini, pa bi se samim tim puno energije koja je uskladištena u zamajcu trošilo na zagrevanje ležajeva usled frikcije, pa se za te primene moraju koristiti magnetni ležajevi.

Magnetni ležaj koristi magnetnu levitaciju kako bi podržao teret koji se na njega oslanja i on može da omogući lebdenje vratila koje rotira bez ikakvog kontakta, odnosno frikcije i mehaničkog habanja, pa kod ovog lezaja ne postoji ograničenje u relativnoj brzini obrtanja vratila koje podržava.

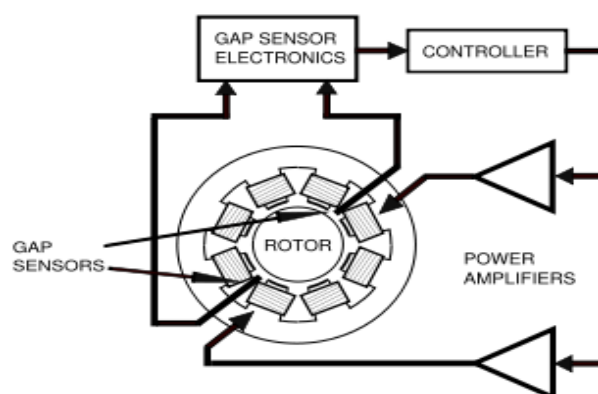
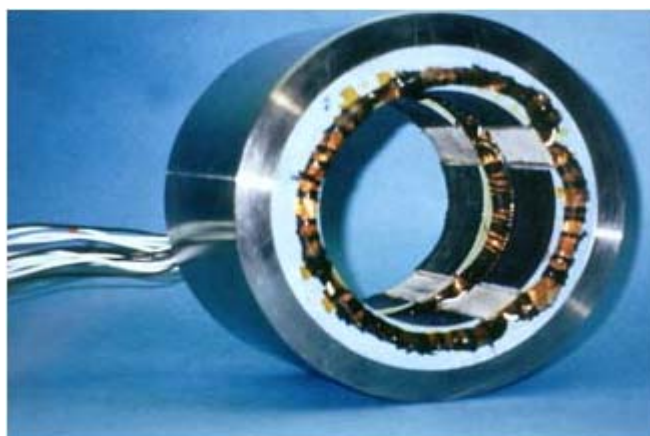
Teško je napraviti magnetni ležaj koristeći permanentne magnete shodno ograničenjima koja su uspostavljena *Earnshaw*-ovom teoremom, a tehnike koje koriste dijamagnetske materijale su relativno neistražene. Kao rezultat svega toga najveći broj magnetnih ležajeva zahteva konstantan izvor energije i aktivan sistem kontrole koji održava vratilo koje rotira u stabilnom stanju. Zbog ovakve kompleksnosti, magnetni ležajevi zahtevaju neku vrstu pomoćnog ležaja, u slučaju da izvor energije ili kontrolni sistem zakažu.

Postoje dve vrste nestabilnosti kod magnetnih ležajeva. Kao prvo, magneti koji se privlače daju nestabilnu statičku silu koja slabi za veća rastojanja, a pojačava se pri smanjivanju rastojanja. Druga pojava nestabilnosti je uzrokovana time što je magnetna sila konzervativna sama po sebi, pa će bilo kakva pojava oscilacija ili stranih sila, koje su redovno prisutne, onemogućiti uspešnu suspenziju i podržavanje vratila koje rotira.

Jedan aktivan magnetni ležaj se sastoji od skupa elektromagneta koji su raspodeljeni po unutrašnjem obimu ležaja, seta pojačavača snage koji snabdevaju strujom elektromagnete, kontrolera i senzora pozicije koji su povezani sa elektronikom i obezbeđuju povratnu spregu koja je potrebna da bi se kontrolisala pozicija vratila unutar međuprostora. Pojačavači snage snabdevaju strujom dva elektromagneta koji se nalaze u opoziciji, a kontroler dodaje potrebnu količinu struje u jedan od elektromagneta ako pozicija vratila odstupa od željene pozicije u centru ležaja. Senzori položaja su obično induktivni tako da registruju male promene u položaju vratila. Pojačavači snage se izvode tako da rade na principu impulsno širinske modulacije (PWM – Pulse Width Modulation), a kontroler je obično mikroprocesor ili digitalni signalni procesor (DSP).

Kao i kod svake druge naprave i kod magnetnih ležajeva postoje gubici energije koji nastaju usled histerezisa, vrtložnih struja i frikcije (ne možemo je potpuno eliminisati), pa brzina vratila zamajca koje se slobodno vrti sa vremenom polako opada, pa se definiše ekonomsko vreme zamajca i to je ono vreme za koje je ekonomski opravdano iskoristiti akumuliranu energiju (po isteku ovog vremena energija zamajca, odnosno njegova brzina obrtanja se smanji ispod neke granice koja je unapred definisana – najčešće $\omega_{nom}/2$). Današnji zamajci za velike brzine se konstantno usavršavaju u cilju smanjenja gubitaka i povećanja stepena iskorišćenja. Inače, vreme koje je potrebno za zaustavljanje zamajca sa magnetnim ležajevima koji nije opterećen od maksimalne brzine do nulte se meri u godinama.

Sledeća slika prikazuje magnetni ležaj i šemu aktivnog sistema za kontrolu pozicije vratila.



Drugi problem u konstrukciji zamajca za velike brzine je materijal koji se upotrebljava u izradi rotora zamajca, jer taj materijal mora da izdrži velika mehanička naprezanja koja se javljaju na obodu rotora usled centrifugalnih sila. Da bi se ovo postiglo koristi se kombinacija čelika i kompozitnih materijala koji imaju povećanu otpornost na mehanička naprezanja i lakši su za red veličine od čelika. Središnji deo zamajca se izrađuje od čelika, dok se spoljašnji prsten izrađuje od kompozita. Ovakva konstrukcija je posledica činjenice da centrifugalne sile rastu sa rastojanjem od ose rotacije i zavise od mase. Iz tog razloga, čelik koji ima veću masu i manju čvrstocu je postavljen u središnji deo, bliže osi rotacije kako bi na njega delovale manje sile. Kompozit ima veću čvrstocu i manju masu, tako da je postavljen po obodu zamajca. Još jedan problem predstavlja aerodinamički otpor vazduha koji se javlja usled velike brzine obrtanja i koji bi zagrejao zamajac do nekoliko stotina stepeni Celzijusa čime bi se mehaničke karakteristike materijala od kojih je napravljen zamajac drastično pogoršale, pa bi postojala opasnost od "eksplozije" zamajca (centrifugalne sile bi ga pokidale). Ove aerodinamičke sile su takođe nepovoljne jer bi se uskladištena kinetička energija nepotrebno

rasipala. Zbog ovoga se zamajac smešta u sigurnosno kućište u kome vlada vakuum, pa nemamo otpor vazduha. Kao što je poznato iz mehanike, svako telo koje rotira teži da zadrži sopstvenu osu rotacije, pa se zamajac koji rotira ponaša kao žiroskop, što može uticati na upravljivost vozila pri kretanju u krivini, pa se zato osa rotacije zamajca postavlja vertikalno. Sa druge strane, ova osobina zamajca može biti iskorišćena za sprečavanje prevrtanja vozila pri oštrom skretanju u krivini. Alternativno rešenje problema žiroskopskog efekta je postavljanje dva jednaka zamajca na istu osovinu koji se vrte sinhrono u suprotnim smerovima. Problem sa ovim rešenjem se javlja ako su brzine obrtanja ova dva zamajca različite jer se javlja spreg sila koji teži da polomi osovinu u središtu, pa osovina mora biti napravljena od kvalitetnih materijala, tako da mogu da izdrže ovakva mehanička naprezanja.

1.4 Praktična primena zamajca kod električnih vozila

Primena zamajca za pogon u vozilima je počela 1950. u Švajcarskoj u takozvanim žirobusevima (gyrobus), ali su u to vreme oni bili glomazni i nepraktični, jer se nije moglo uskladištiti puno energije. Danas se istražuje razvoj zamajca koji su manji, lakši, jeftiniji i imaju veći kapacitet. Postoji mišljenje da bi u budućnosti sistemi sa zamajcem mogli da zamene konvencionalne hemijske izvore energije koji se koriste u električnim vozilima. Ovim bi se uklonili mnogi nedostaci baterija, kao što su mali kapacitet, dugo vreme punjenja, velika težina, osetljivost na promene temperature, visoka cena, upotreba opasnih hemijskih supstanci koje nepovoljno deluju na životnu sredinu i kratak vek upotrebe.

Zamajac bi se koristio za generisanje električne energije koju bi trošio pogonski električni motor, a u režimu kočenja bi se energija direktno preko sistema prenosnika vraćala u zamajac, pa bi gubici energije bili znatno manji. Punjenje bi se vršilo mnogo jednostavnije i brže, gde bi generator za proizvodnju električne energije radio u motornom režimu. Druga primena bi mogla da bude ugradnja u postojeće električno vozilo, gde bi se energija zamajca koristila pri polasku ili fazama ubrzanja, a pri kočenju bi se energija vraćala u zamajac što se koristi kod manjih lokomotiva. Napredni zamajac od 133 kWh konstruisan na Univerzitetu u Teksasu može da pokrene voz iz stanice do ekonomske brzine. Još jedan primer kako bi mogao da se koristi zamajac je kod vozila javnog prevoza, gde bi se u stanici brzo dopunjavala kinetička energija zamajca, a između stanica bi se za pogon koristila uskladištena energija preko niza prenosnika, dok bi se pri kočenju zamajac koristio za skladištenje energije kočenja.

Dobar primer upotrebe zamajca kao akumulatora mehaničke energije je odluka da se od 2009. u Formuli 1 koriste sistemi za recikliranje energije, odnosno da se energija koja nastaje pri kočenju skladišti i ponovo koristi pri ubrzavanju bolida. Ovakav koncept bi mogao uskoro da se primenjuje i u civilnoj auto industriji, pri čemu bi masovna proizvodnja značajno snizila cenu ovih proizvoda. U tekstu je opisan KERS sistem (kinetic energy recovery system) koji će od sezone 2009. koristiti tim Williams-a. Sistem je nastao saradnjom tri velike kompanije:

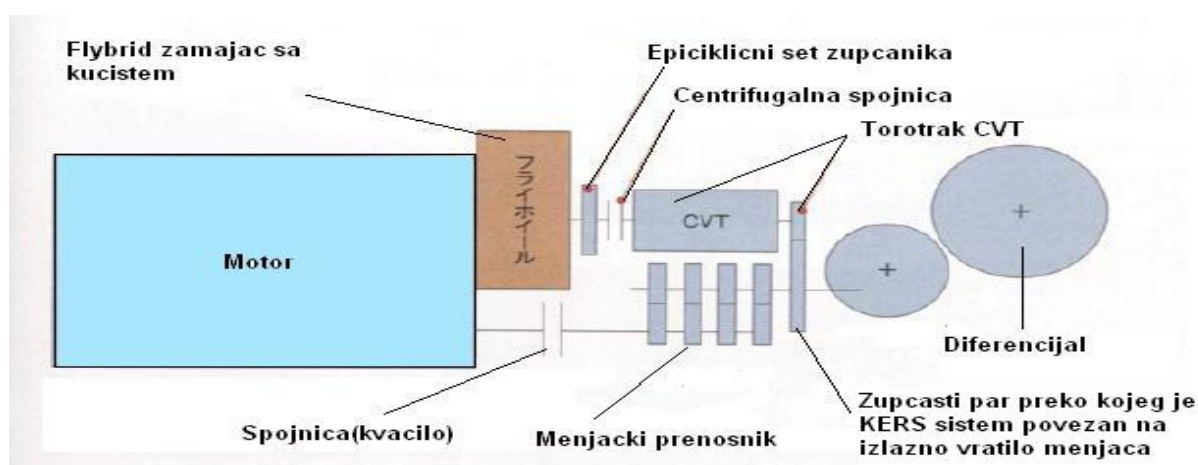
1. Flybrid Systems LLP
2. Xtrac
3. Torotrak

Flybrid Systems LLP su osnovali bivši inženjeri Renaultovog F1 tima, John Hilton i Doug Cross, koji su svoj novac uložili u Flybridovu tehnologiju skladištenja energije pomoću specijalno konstruisanog zamajca. Xtrac je poznati proizvođač sistema za prenos snage (menjači, diferencijali, poluvratila, hidraulični sistemi za upravljanje transmisijom). Torotrak je

kompanija koja se takođe bavi proizvodnjom sistema za prenos snage, s tim što su njihova specijalnost kontinualno varijabilni menjači (poznatiji kao CVT).

Ideja do koje su došli inženjeri iz Flybrida je bila da se kinetička energija rotacije točkova, pretvori u kinetičku energiju rotacije zamajca, koja se potom može iskoristiti za pogon vozila. Osnovni razlog zbog kojeg su se odlučili za ovakav sistem je što se sa njim mogu ostvariti mnogo manji gubici nego što je to slučaj kod električnih sistema tj. veći deo kinetičke energije se reciklira za pogon vozila. Kako je kod svake konverzije energije iz jednog oblika u drugi prisutan i određeni gubitak energije, cilj je bio da se što je moguće više smanje konverzije energije. Ono što je osnovna prednost ovog sistema je to što pretvaranje energije ne postoji. Mehanička energija rotacije točkova se skladišti u mehaničku energiju rotacije zamajca. Jedini gubici su oni usled trenja, koji su prisutni i kod električnih sistema. Kod električnog sistema bi se prvo morala vršiti konverzija mehaničke energije u električnu u generatoru, pa potom iz električne energije u hemijsku kako bi se ista mogla skladištiti u baterijama. Prilikom korišćenja energije iz takvog sistema se takođe mora vršiti konverzija energije u obrnutom smeru čime se dodatno povećavaju gubici. Rezultat je da je KERS sistem zasnovan na principu zamajca u stanju da reciklira 65% energije prilikom kočenja, naspram maksimalno 45% koliko je do sada bilo moguće električnim sistemima pri čemu su dimenzije duplo manje od konvencionalnih električnih ekvivalenata. Ovo je veoma značajna količina energije koja se može koristiti za ubrzavanje vozila, što je naročito izraženo u civilnoj auto industriji, pogotovo u gradskoj voznji. Kod konvencionalnih vozila je moguće ovaj sistem dodatno usavršiti, jer dimenzije i masa nisu toliko važni kao u F1.

Sistem koji su razvili inženjeri ovih kompanija je šematski prikazan na sledećoj slici:



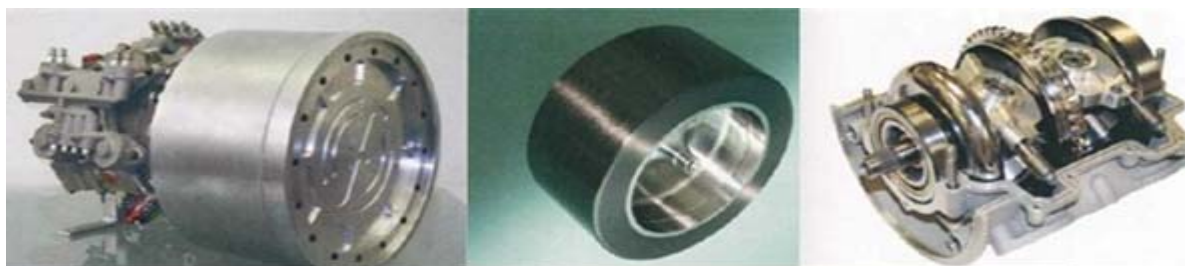
KERS sistem je ukomponovan u već postojeću transmisiju vozila, i preko para zupčanika povezan sa izlaznim vratilom menjača. U sklopu sistema se nalazi i Torotrak CVT čiji je zadatak da reguliše koliki će moment biti iskorišćen za ubrzavanje vozila prilikom korišćenja energije uskladištene kočenjem, odnosno broja obrtaja zamajca prilikom skladištenja kinetičke energije. Kako KERS sistem može razviti do 130Nm momenta maksimalno, ovakav vid regulacije je neophodan. Ovoliki moment je moguće isporučiti u roku od 50ms. Motori F1 razvijaju oko 250-280Nm momenta, tako da je jasno da bi toliko momenat ispušten odjednom ugrozio prijanjanje zadnjih točkova. Moment se mora oslobađati postepeno i kontrolisano. Uz pomoć ovakvog CVT prenosnika to je i omogućeno. Njegov prenosni odnos je moguće kontinualno varirati u rasponu od 6 do 0.166, čime se postiže potrebna regulacija. Efikasnost CVT-a se kreće u rasponu od 90-94% u zavisnosti od prenosnog odnosa. Prilikom kočenja, moment sa zadnjih točkova preko ovog prenosnika ubrzava zamajac, pri čemu je od

ključnog značaja regulacija broja obrtaja zamajca. U ovom slučaju, Torotrak CVT služi za regulaciju broja obrtaja zamajca. Upravljanje ovim sistemom se vrši pomoću elektronike, dok je izvrši deo rešen pomoću hidraulike. Kod sistema su još prisutni i centrifugalna spojnica i epiciklični set zupčanika. Funkcija spojnice je da prekine vezu sa zamajcem u slučaju prekoračenja broja obrtaja. Epiciklični set zupčanika je prisutan kako bi se smanjio broj obrtaja CVT-a u odnosu na zamajac. On funkcioniše u rasponu od 10000 - 12500 o/min.

Na kraju, možemo reći nešto i o samom zamajcu. Kako bi ovaj zamajac vršio funkciju koja mu je namenjena a da pri tom bude prihvatljivih dimenzija i mase, došlo se do zaključka da se mora obrtati kružnom brzinom u rasponu od 32250 do 64000 o/min, pa se za ovu namenu koriste magnetni ležajevi. Kako se pri tom broju obrtaja tačka na spoljnoj ivici zamajca kreće brzinom od 3.3 Mah-a (oko 4174 km/h) zamajac bi se u prisustvu vazduha usled aerodinamičkih otpora zagrejavao na 400 stepeni Celzijusa, pa bi postojala opasnost od eksplozije zamajca. Kako bi rešili ovaj problem, konstruktori su zamajac smestili u hermetički zatvoreno sigurnosno kućište u kojem vlada vakuum. Prisutni su bili i problemi sa dinamičkim uravnoteženjem zamajca, sopstvenim oscilacijama sistema i žiroskopskim silama koji su uspešno rešeni.

Zamajac je precnika 200mm, širina prstena od kompozita iznosi 100mm, a masa zamajca je 5 kg. Ovako konstruisan zamajac ima odgovarajući moment inercije potreban za skladištenje kinetičke energije vozila i relativno male dimenzije i masu kako ne bi narušavao balans vozila. Zamajac je projektovan da izdrži maksimalno 85000 - 90000 o/min. Kućište zamajca je izrađeno od aluminijuma. Ceo sklop kućišta sa magnetnim ležajevima i zaptivkama ima masu od dodatnih 5 kg. Još jedan zadatak koji kućište mora da ispuni je bezbednost. Zamajac koji se vrti ovolikom brzinom bi u slučaju kvara bio ekvivalent granati koja nekontrolisano leti. Kućište mora sprečiti da do toga dođe. Prilikom provere bezbednosnih uslova Flybrid KERS sistem je uspešno prošao crash testove pod opterećenjem od 20 - 30 G. Xtrac je bio zadužen za projektovanje i proizvodnju kućišta celog ovog sistema. Hidraulički deo za upravljanje i CVT dodaju još 15 kg tako da je ukupna masa ovog KERS sistema 25kg. Maksimalni prečnik KERS-a iznosi 250mm. Sistem je rešen tako da čim vozač pritisne pedal kočnice počinje skladištenje energije. Skladišti se maksimalno 400kJ za šta će biti potrebno nekoliko krivina, u zavisnosti od konfiguracije staze. Nakon što je sistem napunjen vozaču je na raspolaganju maksimalno 60 kW koje može koristiti u trajanju od 6.6 s. Naravno moguće je i korišćenje npr. 30 kW tokom nekih 13.2 s, sve dok je ukupna količina energije jednaka 400kJ. Tokom jednog kruga ukupna količina energije od 400kJ se može koristiti maksimalno dva puta npr. tokom jednog kruga se na pravcu iskoristi 300kJ i u par krivina još 100kJ.

Na koji način će se koristiti KERS je odluka vozača i tima, a u zavisnosti od staze. Tu će biti važno pronaći pravilnu strategiju upotrebe ovog uređaja tj. gde ga koristiti na stazi, koliku snagu koristiti i u kojem vremenskom intervalu kako bi se vreme po krugu najviše smanjilo. Sledeća slika prikazuje izgled KERS sistema, zamajca i Torotrak CVT-a.



Slika koja prikazuje sistem bez kućišta zamajca.



2. Superkondenzatori

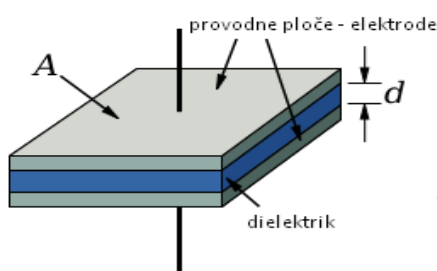
2.1 Uvod

Od 1800. godine, kada je Alesandro Volta napravio prvu bateriju, principi na kojima se zasniva ovaj izvor energije ostali su gotovo netaknuti. Uprkos neprekidnom unapređenju materijala i tehnologije izrade baterija, sve je jasnije da se moraju naći novi principi skladištenja električne energije, pa se širom sveta u istraživanja ove vrste ulaže puno novca i napora, i već smo sada svedoci nekoliko potencijalnih rešenja koja bi mogla klasične baterije da pošalju u istoriju. Jedno od rešenja koje se nameće je upotreba superkondenzatora za skladištenje električne energije.

Opšte je poznato da kondenzatori mogu da uskladište određenu količinu električne energije, ako se priključe na neki napon, kao i to da povećanje količine uskladištene energije zahteva i povećanje gabarita kondenzatora. Ovi problemi vezani za skladištenje energije u kondenzatorima obeshrabrivali su naučnike da se uopšte pozabave idejom korišćenja kondenzatora umesto baterija, sve do šezdesetih godina prošlog veka, kada su stvari polako počele da se zahuktavaju i kada su se pojavili prvi superkondenzatori (supercapacitors), kondenzatori izuzetno velikih kapaciteta. Danas su na raspolaganju superkondenzatori kapaciteta do nekoliko hiljada farada, a najčešća primena im je trenutno u hibridnim vozilima i vozilima na električni pogon, uglavnom u ulozi pomoćnih izvora energije u trenucima kada je potrebno u kratkom vremenu emitovati veću količinu energije. I pored postignutog napretka, današnji superkondenzatori ipak imaju gustinu energije po jedinici zapremine oko 25 puta manju od klasičnih baterija.

2.2 Princip rada i osnovne karakteristike superkondenzatora

Kondenzator je pasivni električni element, koji može da akumulira energiju u električnom polju između dve provodne elektrode. Proces akumuliranja energije u kondenzatoru ili punjenje kondenzatora uključuje nagomilavanje naelektrisanja suprotnog polariteta na elektrodama kondenzatora, čime se stvara razlika potencijala između elektroda. Kondenzator se sastoji od dve metalne elektrode i dielektrika koji se nalazi između njih i koji obezbeđuje da ne dođe do pomeranja naelektrisanja direktno sa jedne elektrode na drugu. Naelektrisanje može preći sa jedne na drugu elektrodu posredstvom spoljašnjeg kola u koje je povezan kondenzator. Kada se ukloni spoljašnje kolo elektrode kondenzatora ostaju naelektrisane. Nagomilana naelektrisanja na elektrodama se privlače i stvaraju električno polje između elektroda. Možemo analizirati kondenzator sa dve paralelne elektrode i dielektrikom između njih koji je prikazan na slici.



Ako pretpostavimo da je dimenzija elektrode \sqrt{A} , gde je A površina elektrode, mnogo veća od rastojanja između elektroda d , onda je trenutna vrednost električnog polja $E(t)$ između elektroda ista u svakoj tački, osim blizu ivica elektrode. Ako je trenutna vrednost naelektrisanja koje je ravnomerno raspoređeno na elektrodama $-q(t)$, a permitivnost dielektrika ε onda je:

$$E(t) = -\frac{q(t)}{\varepsilon A}$$

Trenutna vrednost napona između elektroda je:

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

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

$$C = \frac{\varepsilon A}{d}$$

Kao što vidimo iz gornje formule, kapacitivnost jednog kondenzatora se može povećati povećanjem površine elektroda, smanjenjem rastojanja između elektroda, odnosno smanjenjem debljine dielektrika i upotrebom kvalitetnijeg dielektrika – veće ε . Energija koja se akumulira u kondenzatoru pri njegovom punjenju je:

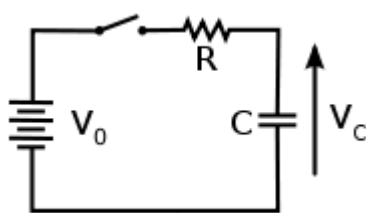
$$W(t) = -q(t) \int_0^d E(t) dz = \frac{1}{2} \frac{q(t)^2}{C} = \frac{1}{2} C u(t)^2 = \frac{1}{2} u(t) q(t)$$

Maksimalna energija koja se može uskladištiti u kondenzatoru je ograničena probojnim naponom kondenzatora, a to je proizvod jačine 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 primenjuje princip povećanja napona što je ograničeno kvalitetom upotrebljenog dielektrika, odnosno cenom kondenzatora. Drugi princip je povećati kapacitivnost, a smanjiti nominalni napon i ovaj princip se koristi kod superkondenzatora. Kada se kondenzator priključi u kolo sa naponskim generatorom, struja u priključcima kondenzatora i napon na kondenzatoru su:

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

Možemo analizirati kondenzator koji je priključen u kolo za punjenje prikazano na slici.



Jednačina po Kirchofovom zakonu za napone glasi:

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

Ovo se svodi na diferencijalnu jednačinu prvog reda:

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

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

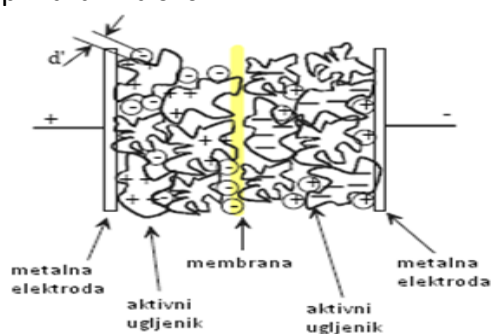
Rešenje diferencijalne jednačine je:

$$i(t) = \frac{V_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}}, \text{ napon na kondenzatoru je: } v_c(t) = V_0 [1 - e^{-\frac{t}{RC}}]$$

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

Superkondenzatori su elektrohemijski kondenzatori koji imaju neobično veliku kapacitivnost i gustinu energije, kada se uporede sa standardnim kondenzatorima, tipično 1000 puta veću kada se uporede sa visoko kapacitivnim elektrolitičkim kondenzatorima. Danas se u komercijalnoj upotrebi mogu naći superkondenzatori do 5000 farada.

Superkondenzator se sastoji od dve metalne elektrode na koje je nanoseno puno slojeva aktivnog nanoporoznog ugljenika, a između ovako formiranih elektroda se nalazi membrana od elektrolita. Aktivni ugljenik je prah sačinjen od izuzetno malih i okruglih fragmenata koji skupa formiraju strukturu nalik na sunđer sa porama nanometarskih dimenzija što rezultuje u velikoj efektivnoj površini elektroda, reda par stotina m^2/g . Svaki sloj aktivnog ugljenika je poprilično provodan, što rezultuje malom unutrašnjom otpornošću superkondenzatora, dok dodir između susednih slojeva predstavlja neku vrstu dielektrika, jer vrlo mala struja može da teče kroz ovaj spoj, pa je efektivna debljina "dielektrika" reda nanometra i on može da izdrži napon od 2 do 3 V, pa se većina superkondenzatora pravi za napone od par volti. Zbog ovako velike efektivne površine elektroda i maksimalno stanjenog "dielektrika", dobijamo izuzetno veliku kapacitivnost. Superkondenzatori za veće napone i struje se prave tako što se više manjih superkondenzatora veže na red i u paralelu. Izgled strukture superkondenzatora je prikazan na slici.



Vremenska konstanta pražnjenja superkondenzatora predstavlja vreme posle kojeg se superkondenzator potpuno isprazni pri konstantnoj struji i ona se računa iz izraza:

$$T = \frac{C}{I} V_r$$

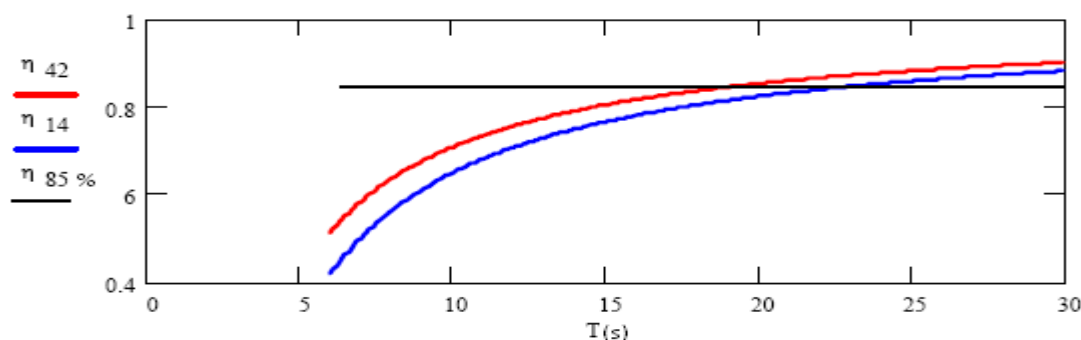
U ovoj formuli V_r predstavlja nominalni napon kondenzatora. Stepenn korisnog dejstva superkondenzatora pri punjenju ili pražnjenju istog zavisi od vremenske konstante $\tau = R_i C$, gde R_i predstavlja unutrašnji otpor superkondenzatora. Stepenn korisnog dejstva pri punjenju η_c i pri pražnjenju η_d se može izračunati iz izraza:

$$\eta_c = \frac{1}{(1 + \frac{2\tau}{T})}, \eta_d = 1 - \frac{2\tau}{T}$$

Sledeća tabela predstavlja karakteristike nekih tipova superkondenzatora proizvođača *Maxwell Technologies*.

DLC	V_r V	I A	C F	R_i m Ω	W_e J	τ s	T s
PC10	2.5	2.5	10	180	31.25	1.8	10
PC100	2.5	25	100	13	312.5	1.3	10
BCAP0015	42	600	145	10	127890	1.45	10.15
BCAP0017	14	600	435	4	42630	1.74	10.15

Efikasnost superkondenzatora pri pražnjenju je velika i ona zavisi od vremena pražnjenja, pa se za modele BCAP0015 i BCAP0017 maksimalna efikasnost postiže za vreme pražnjenja od $T_{d42} = 19.4$ s, odnosno $T_{d14} = 23.2$ s, što je prikazano na sledećem grafiku.



Za ova vremena pražnjenja struja u priključcima superkondenzatora je 314 A za modul od 42 V i 262.5 A za modul od 14 V. Pražnjenjem ovih superkondenzatora pri datim strujama se postiže da se iskoristi praktično sva energija koja je akumulirana u njima. U praksi se međutim primenjuje princip da se crpi od 50 % do 75 % akumulirane energije u toku vremenskog intervala koji je blizak vremenskoj konstanti superkondenzatora T , da bi se održao konstantan nivo struje. Snaga kojom se energija crpi iz superkondenzatora je:

$$P_0 = \frac{W_e \eta_d}{T_d}$$

Prema ovoj formuli superkondenzatorski modul od 42 V je sposoban da isporuči snagu od 5.6 kW tokom 10 s, pri čemu je efikasnost iznad 85 %. Sa superkondenzatorom se povezuje konvertor napona, koji je potreban da bi održavao konstantan nivo napona pri pražnjenju superkondenzatora. Sadašnji superkondenzatori imaju gustinu energije od 0.5 do 10 Wh/kg, sa tendencijom daljeg rasta u budućnosti, dok je njihova cena oko 0.01 \$/F za količinu od preko 10000 superkondenzatora.

2.3 Problemi konstrukcije i budući pravci razvoja superkondenzatora

Aktivni ugljenik nije najpovoljniji materijal za primenu u superkondenzatorima. Naime, dimenzije slobodnih elektrona su često veće nego pore u aktivnom ugljeniku, pa pore ne mogu da prihvate slobodne elektrone, čime ograničavaju kapacitet za skladištenje elektrona. Današnja istraživanja su usmerena ka pronalazanju materijala koji nude još veću efektivnu površinu.

Tim naučnika sa Američkog MIT-a (Massachusetts Institute of Technology) prišao je problemu superkondenzatora sa drugog stanovišta i odlučio da pokuša da skladištenje energije vrši na atomskom nivou, korišćenjem vertikalnih ugljeničih nanotuba sa jednim zidom. Ove nanotube imaju širinu od svega nekoliko atomskih prečnika, i oko 100.000 puta veću dužinu, a uz to su izuzetno pravilne strukture, što praktično znači da su dobijene gotovo idealne elektrode kondenzatora. Budući da se nanotube mogu veoma gusto pakovati, ovakva struktura obezbeđuje ogromnu površinu idealnih elektroda, čime se dobija gustina skladištenja energije od 30 do 60 Wh/kg, uporediva sa onom kod sadašnjih baterija. Početni rezultati istraživanja su ohrabrujući i očekuje se da bi u sledećih nekoliko godina ova vrsta superkondenzatora mogla da uđe u komercijalnu primenu.

Za proizvodnju superkondenzatora se takođe koristi ugljeni aerogel. Ovo je jedinstven materijal koji pruža veliku efektivnu površinu od 400 do 1000 m²/g. Elektrode ovih superkondenzatora se prave od specijalnog papira koji sadrži ugljena vlakna presvučena sa organskim aerogelom, a zatim se formirane elektrode izlože pirolizi. Ovako napravljen papir predstavlja kompozitni materijal gde ugljena vlakna daju strukturni integritet, a ugljeni aerogel obezbeđuje zahtevanu veliku efektivnu površinu. Nominalni napon ovih superkondenzatora je ograničen na nekoliko volti. Veći napon bi doveo do jonizacije ugljenika čime bi se oštetio kondenzator. Sa superkondenzatorima od ugljenog aerogela je postignuta gustina energije od 90 Wh/kg i specifična snaga od 20 W/g.

Kompanija *Reticle* je uspela da napravi superkondenzator od aktivnog ugljenika u cvrstoj formi. Oni su ovaj materijal nazvali konsolidovani amorfnii ugljenik (consolidated amorphous carbon - CAC). Ovaj materijal može da ima efektivnu površinu od 2800 m²/g, a pored toga je jeftiniji za proizvodnju od ugljenog aerogela.

Kompanija *Tartu Technologies* iz Estonije je proizvela superkondenzatore bazirane na mineralnom ugljeniku. Ovaj neaktivni ugljenik je sintetizovan iz metalnih ili metaloidnih karbida kao što su SiC, TiC, Al₄C₃. Sintetički nanostrukturni ugljenik, često zvan ugljenik iz derivata karbida (Carbide Derived Carbon - CDC), može da ima efektivnu površinu od 400 do 2000 m²/g i specifičnu kapacitivnost do 100 F/mL (u organskom elektrolitu). Ova kompanija tvrdi da njihov superkondenzator napravljen od ovog materijala zapremine 135 mL i težine 200 g ima kapacitivnost od 1.6 kF. Gustina energije je veća od 47 kJ/L pri nominalnom naponu od 2.85 V, dok specifična snaga iznosi preko 20 W/g.

Potpuno drugi pristup skladištenju energije u kondenzatorima je razvila kompanija *EEStor* koja tvrdi da je razvila dramatično poboljšan dielektrik baziran na barijum titanatu koji povećava permitivnost dielektrika ϵ za nekoliko redova veličine, čime se postiže skladištenje energije pri mnogo većim naponima nego kod superkondenzatora, reda nekoliko hiljada volti. Kondenzatori napravljeni na ovom principu bi imali gustinu skladištenja energije od 200 do 300 Wh/kg.

Tim istraživača sa RPI-a (Rensselaer Polytechnic Institute) je razvio papirnu bateriju sa paralelno postavljenim karbonskim nanotubama, koja je dizajnirana da funkcioniše istovremeno kao baterija i kao superkondenzator (ovakva struktura se zove bacitor) koja

koristi tečnu so sa jonima kao elektrolit. Ovako formirana struktura je lagana i nema visoku cenu izrade, pa bi mogla da nađe primenu u prenosnim elektronskim uređajima, električnim vozilima ili u avionskoj industriji, dok sposobnost da koristi elektrolite iz krvi otvara mogućnost za upotrebu u medicinskim uređajima, kao što su pejsmejkri, a pored toga, bacitori su biorazgradljivi.

2.4 Praktična primena superkondenzatora kod električnih vozila

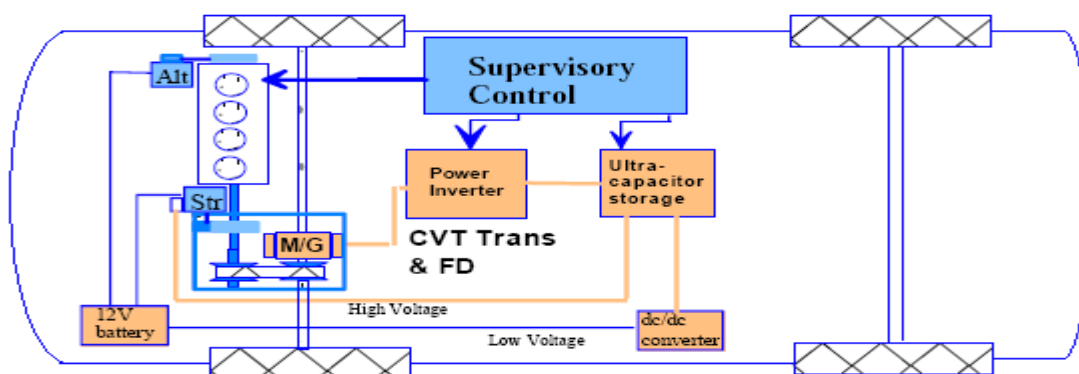
U skorijoj budućnosti se očekuje dostizanje gustine skladištenja energije u superkondenzatorima kao kod baterija i potpuna zamena električnih baterija superkondenzatorima. Razlog za ovakvo mišljenje leži u činjenici da superkondenzatori imaju niz prednosti u odnosu na električne baterije, a neke od njih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

1. Veoma visok stepen korisnog dejstva – kulonska efikasnost (ona se definiše kao količnik naelektrisanja koje je dovedeno na kondenzator i naelektrisanja koje je odvedeno sa kondenzatora) je veća od 99 %, čak i pri velikim strujama, dok je efikasnost pri cikličnom pražnjenju i punjenju (round-trip efficiency - pražnjenje do ½ nominalnog napona u datom vremenskom intervalu, a zatim ponovno punjenje do nominalnog napona) preko 70 % za period od 5 s odnosno preko 80 % za period od 10 s.
2. Superkondenzatori imaju mali serijski otpor, pa imaju mogućnost da isporuče ili apsorbuju veoma veliku struju, što im omogućava da se veoma brzo napune. Ovo je naročito pogodno kod rekuperativnog kočenja jer superkondenzatori mogu da se pune i prazne za isti vremenski interval, što je nezamislivo kod električnih baterija.
3. Superkondenzatori mogu da rade u širokom opsegu napona, odnosno pri bilo kom naponu koji je manji ili jednak nominalnom, dok se za postizanje viših napona od nominalnog više kondenzatora povezuje na red, a pri tom ne postoji opasnost od “preteranog pražnjenja” kao kod baterija. U sistemima kao što su gorivne ćelije, sposobnost superkondenzatora da prati naponske promene koje diktira gorivna ćelija je značajna prednost u odnosu na baterije, jer gorivna ćelija radi u širem naponskom opsegu nego što baterija može da toleriše.
4. Pošto superkondenzatori rade bez oslanjanja na hemijske reakcije, oni mogu da rade u širokom temperaturnom opsegu koji se kreće od -40°C, što je daleko bolje od svake baterije, pa do 65°C, a mogu da izdrže i do 85°C bez rizika od termalnog gubitka uskladištenog naelektrisanja.
5. Određivanje napunjenosti baterije (state of charge - SOC) i preostalog vremena upotrebe (state of health - SOH) je značajan faktor pri projektovanju robusnih sistema sa baterijama, koji zahteva precizna merenja i kompleksne algoritme obrade dobijenih podataka. Sa druge strane određivanje SOC i SOH kod superkondenzatora je vrlo jednostavno. Merenjem napona se određuje SOC, dok se zbog relativno male promene ekvivalentnog serijskog otpora i kapacitivnosti sa vremenom, povremenim pražnjenjem superkondenzatora za vreme od 2 do 10 s pri konstantnoj struji dobija dovoljno podataka za određivanje SOH.
6. Mehanizam akumuliranja energije kod superkondenzatora je veoma reverzibilan proces, jer se pomeraju samo naelektrisanja i joni, pa nema produkata hemijskih reakcija. Zato je on sposoban da izdrži stotine hiljada ciklusa punjenja i pražnjenja, bez bitnije promene u performansama. Takođe se mogu podvrgavati mikro ciklusima (promene od 5 % ukupne energije) ili punim ciklusima (promene od 80 % ukupne

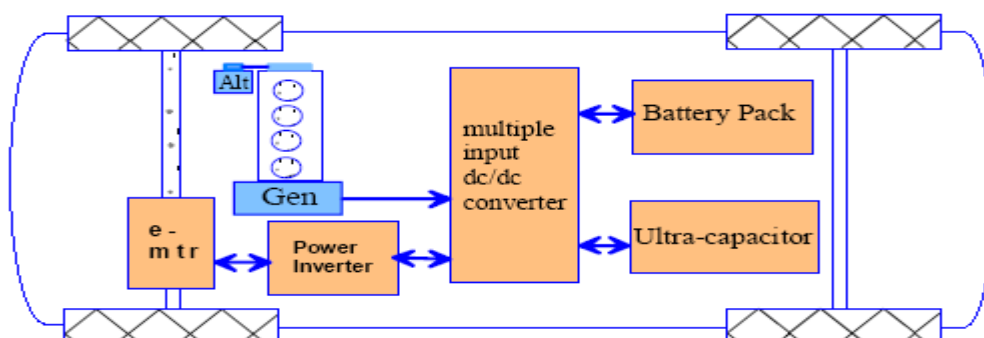
energije) bez uticaja na vek trajanja. Mogu se puniti i prazniti retko kao kod neprekidnih izvora napajanja (nekoliko puta godišnje) ili veoma često kao kod hibridnih vozila.

7. Superkondenzatori ne zahtevaju nikakvo održavanje, ako rade u dozvoljenom opsegu temperatura i napona, imaju veliku specifičnu snagu, veliku pouzdanost i bezbednost korišćenja i bezopasni su po životnu sredinu.

Za sada superkondenzatori najčešće imaju ulogu pomoćnih izvora energije kod električnih i hibridnih automobila, gde 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 polaska ili pri preticanju ova akumulirana energija koristi zajedno sa energijom iz trakcionih baterija čime se postiže bolja efikasnost celog sistema. Dobar primer za upotrebu superkondenzatora u hibridnim vozilima predstavlja eksperimentalni model Toyota Yaris koji sa dizel motorom od 1.4 L koji je spregnut sa elektromotorom - generatorom i setom superkondenzatora postiže potrošnju od 2.13 l/100 km. Principijska šema ovog vozila je prikazana na slici.

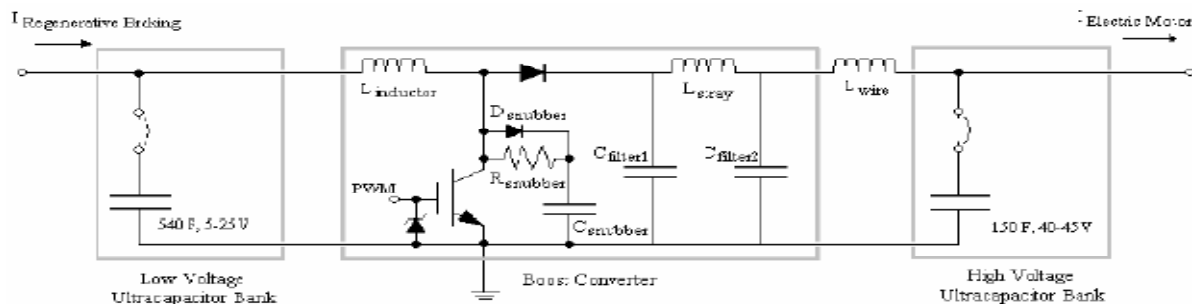


Drugi primer se ogleda u istovremenoj upotrebi električnih baterija i superkondenzatora, pri čemu se primenjuje multivarijabilni konvertor koji odlučuje kad se koji uređaj koristi. Ovaj sistem može biti samostalan ili spregnut sa SUS motorom koji obezbeđuje pogon i punjenje baterija, ako se iste isprazne. Principijska šema ovog vozila je prikazana na slici.



Superkondenzator se u obe izvedbe koristi da prihvati energiju nastalu pri električnom kočenju, pa je potrebno da on bude povezan sa konvertorom napona koji vrši usklađivanje napona.

Principijska šema veze konvertora i superkondenzatora je prikazana na slici:



Kina je uvela u upotrebu novu vrstu električnog autobusa - kapabus koji ne koristi električne provodnike duž trase za preuzimanje energije, već koristi energiju akumuliranu u masivnim superkondenzatorima koji se brzo dopunjuju na svakoj stanici ispod takozvanih električnih kišobrana, a potpuno se napune kada autobus stoji na okretnici. Jedan od ovakvih električnih autobusa saobraća na liniji 11 u Šangaju.

3. Solarne ćelije

3.1 Uvod

Sunce se često smatra za najbolji izvor energije - neiscrpan je, ne košta ništa, ne proizvodi nikakvo zagađenje i traje praktično beskonačno. Efikasnost solarnih ćelija neprestano raste, ali energija dobijena iz njih još uvek je do tri puta skuplja od energije koju proizvode termoelektrane. Smatra se da će dalja usavršavanja u ovoj oblasti dovesti do masovnije primene i opadanja cene solarnih ćelija, kao i upotrebu solarnih ćelija u komercijalnim električnim vozilima, što bi bio veliki napredak, jer bi takva vozila zahtevala izvor energije samo onda kada nema sunčeve energije, a pri tom ne bi proizvodila nikakvo zagađenje životne sredine.

3.2 Princip rada i osnovne karakteristike solarnih ćelija

Solarna ćelija ili fotonaponska ćelija je elektronski uređaj koji konvertuje solarnu energiju u elektricitet na principu fotoelektričnog efekta. Solarna ćelija najčešće se sastoji od *pn* spoja velike površine i metalnih elektroda sa provodnicima koje se nalaze sa *p* i *n* strane. Na osnovu fotoelektričnog efekta osvetljeni *pn* spoj apsorbira fotone, pri čemu se elektroni iz valentne zone oslobađaju i prelaze u provodnu zonu, odnosno generišu se slobodni parovi elektron – šupljina pri čemu se javlja napon na priključcima solarne ćelije. Pod dejstvom električnog polja koje se obrazuje u oblasti prostornog tovara javlja se usmereno kretanje slobodnih nosilaca što daje struju koja teče od katode ka anodi. Kada foton padne na *pn* spoj može se desiti jedna od tri situacije:

1. Foton može da prođe kroz *pn* spoj bez ikakve interakcije – fotoni nižih energija.
2. Foton može da se reflektuje nazad u sredinu iz koje je došao.
3. Foton može da se apsorbira u *pn* spoju, ako je njegova energija veća od izlaznog rada koji je potreban da bi elektron prešao iz valentne u provodnu zonu.

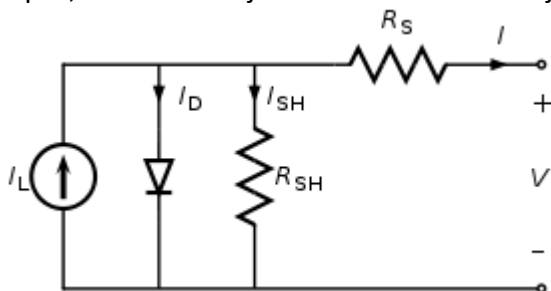
Energija fotona se prema Ajnšajnovoj jednačini fotoefekta troši na izlazni rad i kinetičku energiju emitovanog elektrona:

$$hf = A_i + E_{kmax}$$

U ovoj jednačini je:

hf - energija fotona, $h = 6.626 * 10^{-34} \text{ Js}$ - Plankova konstanta, f - frekvencija upadnog fotona, $A_i = hf_0$ - izlazni rad, gde f_0 predstavlja minimalnu frekvenciju fotona koja izaziva fotoefekat, $E_{kmax} = \frac{1}{2}mv_m^2$ - maksimalna kinetička energija emitovanih elektrona.

Da bi razumeli osnovne karakteristike solarne ćelije, korisno je napraviti model koji predstavlja električni ekvivalent i koji je baziran na komponentama čije ponašanje dobro poznajemo. Idealna solarna ćelija se može modelovati paralelnom vezom izvora konstantne struje i diode. Da bi imali pravu sliku stvari, ovom modelu treba dodati paralelni i serijski otpor, čime se dobija ekvivalentno kolo koje je prikazano na slici.



Na osnovu Kirhofovog zakona za struje možemo postaviti sledeću jednačinu:

$$I = I_L - I_D - I_{SH}$$

Na osnovu Kirhofovog zakona za napone dobijamo sledeću jednačinu:

$$V_j = V + IR_S$$

Zavisnost struje diode i napona na njoj je data relacijom:

$$I_D = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{qV_j}{nkT} \right] - 1 \right\}$$

Prema Omovom zakonu struja kroz R_{SH} je:

$$I_{SH} = \frac{V_j}{R_{SH}}$$

Zamenom ovih relacija u prvu jednačinu dobijamo karakterističnu jednačinu:

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_S)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_{SH}}$$

Kao što vidimo dobili smo transcendentnu jednačinu koja se ne može rešiti analitički već se rešava numeričkim metodama. Veličine koje se pojavljuju u ovoj jednačini su:

I - struja u priključcima solarne ćelije, V - napon solarne ćelije, I_L - fotogenerisana struja, I_0 - inverzna struja zasićenja, R_S - serijski otpor, R_{SH} - paralelni otpor, q - elementarno naelektrisanje, n - faktor idealnosti solarne ćelije, k - Bolcmanova konstanta, T - apsolutna temperatura, za silicijum je na 25°C temperaturni napon:

$$V_T = \frac{kT}{q} = 0.0259 \text{ V}$$

Parametri I_0 , R_S , R_{SH} zavise od fizičke veličine solarne ćelije, pa se često zbog poređenja istih solarnih ćelija različite veličine karakteristična jednačina piše tako da u njoj figurišu gustine struja i specifični otpori:

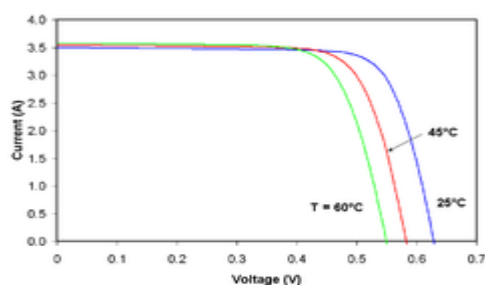
$$J = J_L - J_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + Jr_S)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + Jr_S}{r_{SH}}$$

3.3 Problemi konstrukcije i budući pravci razvoja solarnih ćelija

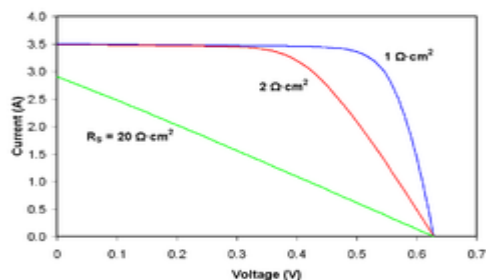
Solarne ćelije su osetljive na temperaturne promene, jer temperatura utiče na karakterističnu jednačinu na dva načina: direktno preko T u imeniocu eksponenta i indirektno jer utiče na I_0 . Dok povećanje T smanjuje eksponencijalni član, vrednost I_0 se povećava srazmerno $\exp T$. Ukupni efekat se može videti pretpostavkom da vrednost paralelnog otpora teži beskonačnosti i rešavanjem karakteristične jednačine po naponu V , čime se dobija:

$$V = \frac{kT}{q} \exp \left[\frac{I}{I_0} + 1 \right]$$

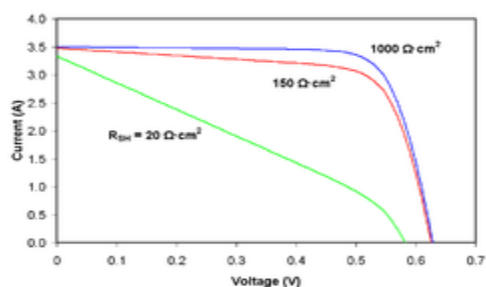
Iz ovog izraza zaključujemo da se napon na solarnoj ćeliji smanjuje linearno sa povećanjem temperature i za većinu solarnih ćelija pad napona iznosi 0.5 %/°C, što se može videti sa grafika koji je prikazan na slici:



Ako se serijski otpor povećava, smanjuje se napon na priključcima solarne ćelije, što ima za posledicu pad struje, odnosno smanjenje strmine strujno – naponske karakteristike, pa se za veliko R_s solarna ćelija ponaša kao otpornik, što se vidi sa narednog grafika:



Ako se paralelni otpor smanjuje, kroz njega teče veća struja, pa je za isti napon manja struja u priključcima solarne ćelije. Ako se paralelni otpor još više smanji, onda će se značajno smanjiti i napon solarne ćelije, pa će se ona ponašati slično otporniku, što je prikazano na narednom grafiku:



Stepen korisnog dejstva solarne ćelije je odnos električne energije koja je dobijena iz nje i energije koju je solarna ćelija preuzela u vidu svetlosti. Stepen korisnog dejstva se računa iz sledeće formule:

$$\eta = \frac{P_m}{EA_c}$$

U ovoj relaciji je:

P_m - maksimalna snaga solarne ćelije, E – iradijansa, odnosno specifična svetlosna snaga (u W/m^2), A_c - površina solarne ćelije. Spektar zračenja koje dospeva na Zemlju sa Sunca dosta zavisi od gustine vazduha (odnosno od atmosferskog pritiska) jer on deluje kao filter pa neke talasne dužine svetlosti reflektuje, a druge propušta. Za solarnu ćeliju efikasnosti 12 % i površine od 100 cm^2 pri standardnoj vrednosti iradijanse od 1000 W/m^2 (vedro prolećno podne) i normalnom atmosferskom pritisku, dobija se očekivana snaga od 1.2 W. Solarna ćelija može da radi u širokom opsegu struja i napona. Da bi se odredila maksimalna snaga solarne ćelije koja je izložena određenom intenzitetu svetlosti, ona se povezuje sa otpornikom čija se vrednost menja od nule (kratak spoj) do vrlo velike vrednosti (otvoreno kolo). Pošto je u graničnim tačkama snaga jednaka nuli, za neku vrednost priključenog otpora će se imati maksimalna snaga za dati intenzitet svetlosti. Gubici koji se javljaju u solarnoj ćeliji mogu se podeliti na gubitke usled refleksije, termodinamičke gubitke, gubitke usled rekombinacije i električne rezistivne gubitke. Pošto se ovi pojedinačni gubici teško mere, meri se termodinamička efikasnost, kvantna efikasnost, napon otvorenog kola i fil faktor (fill factor).

Solarne ćelije konvertuju kvante svetlosne energije - fotone u električnu energiju pa se može posmatrati termodinamička efikasnost. Fotoni koji padaju na solarnu ćeliju mogu imati manje i veće energije što zavisi od njihove frekvencije (boje svetlosti). Ako fotoni imaju manju energiju od izlaznog rada za dati materijal solarne ćelije, onda ne mogu da generišu par elektron – šupljina, pa njihova energija ne može biti pretvorena u korisnu energiju već se generiše toplota, ako se fotoni apsorbuju. Za fotone čija je energija veća od izlaznog rada samo deo energije koji predstavlja razliku energija fotona i izlaznog rada može biti konvertovan u korisnu energiju. Ovaj višak energije se zapravo pretvara u kinetičku energiju nosilaca, a deo te kinetičke energije se ponovo pretvara u toplotu jer se brzina nosilaca smanjuje na ustaljenu vrednost brzine ravnotežnog stanja. Kod svake solarne ćelije se deo solarne energije pretvori u toplotu, pa one imaju termodinamički limit, odnosno iznad neke radne temperature napon otvorenog kola solarne ćelije se smanji ispod određene granice.

Kada se formira par elektron – šupljina, on poseduje određenu kinetičku energiju pa može da dođe do površine solarne ćelije i da učestvuje u ukupnoj struji koju proizvodi solarna ćelija ili može na putu do površine da se rekombinuje i tada taj nosilac ne doprinosi ukupnoj struji solarne ćelije. Kvantna efikasnost predstavlja procenat fotona koji su konvertovani u električnu struju, kada solarna ćelija radi u režimu kratkog spoja. Ova efikasnost se meri spektralnim metodama tako što se posmatra koje talasne dužine fotona posmatrani materijal solarne ćelije najbolje apsorbuje, pa se samim tim dobija i informacija koja poboljšanja dizajna solarne ćelije treba napraviti da bi se poboljšala efikasnost.

Još jednu važnu karakteristiku solarne ćelije predstavlja njen fil faktor i on se definiše kao odnos maksimalne snage solarne ćelije P_m i proizvoda napona otvorenog kola V_{oc} i struje kratkog spoja I_{sc} :

$$F_F = \frac{P_m}{V_{oc}I_{sc}}$$

Solarne ćelije se najčešće svrstavaju u tri generacije što pokazuje njihov tehnološki napredak.

Solarne ćelije prve generacije su najstarije po tehnološkom procesu i one su prve ušle u komercijalnu upotrebu. Sastoje se od visoko kvalitetnog pn spoja velike površine. Tehnološki proces uključuje upotrebu velikih energija za njihovu proizvodnju pa je i cena visoka. Ove ćelije se još uvek usavršavaju i približavaju se teorijskom limitu od 33 % efikasnosti, dok je cena energije dobijene iz njih slična onoj kod fosilnih goriva posle perioda otplate od 5 – 7 godina.

Solarne ćelije druge generacije predstavljaju relativno nov tehnološki pristup koji ima za cilj da smanji energetske potrebe kod proizvodnje solarnih ćelija, a samim tim i njihovu cenu. Materijali koji se najčešće koriste za njihovu proizvodnju su kadmijum telurid (CdTe), bakar indijum galijum selenid i amorfni silikon. Ovi materijali se nanose u tankom filmu na osnovu koja može biti od stakla ili keramike, čime se smanjuje utrošak materijala odnosno troškovi izrade, a pri tome su ovakve solarne ćelije efikasnije.

Treća generacija solarnih ćelija treba da obezbedi bolje električne performanse od druge generacije i da održi niske troškove proizvodnje. Sadašnja istraživanja su usmerena ka dobijanju visoko efikasnih solarnih ćelija (30 - 60 %) pri čemu postoji više različitih pristupa:

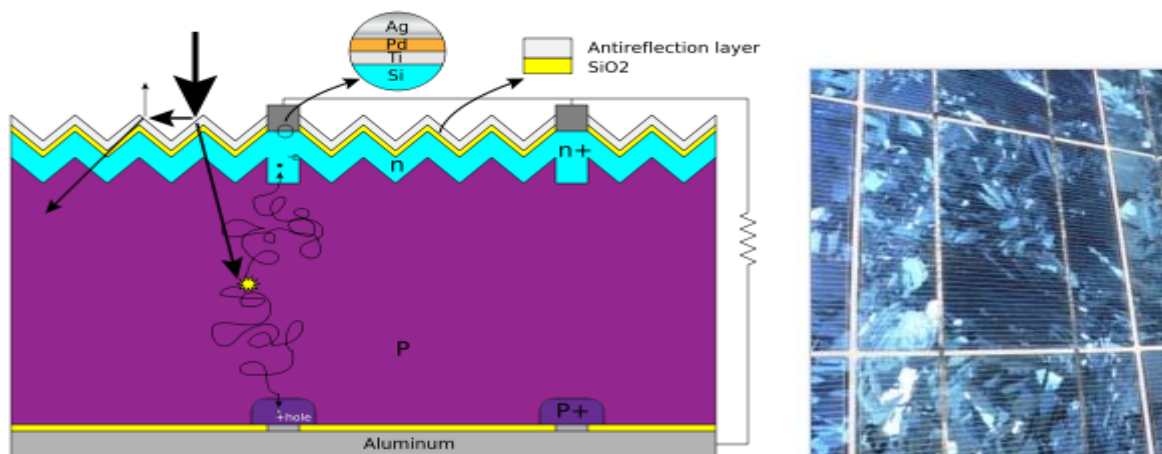
1. Solarne ćelije sa više pn spojeva koji se nanose jedan preko drugog.
2. Modifikovanje incidentnog spektra promenom koncentracije nosilaca.
3. Upotreba generisane toplote za povećanje napona ili struje solarne ćelije.

Visoko efikasne solarne ćelije sa više pn spojeva se prave tako što se nanosi nekoliko slojeva tankog filma, tako da svaki sloj filma apsorbuje jedan opseg spektra sunčevog zračenja. Poluprovodnici se pažljivo biraju tako da svaki od ovih slojeva ima karakterističan izlazni rad da bi mogli da se apsorbuju fotoni iz skoro celog spektra, pa je veća iskoristivost solarne energije koju ćelija prima.

Istraživači iz Nacionalne Laboratorije Idaho u saradnji sa Univerzitetom iz Misurija i kompanijom *Microcontinuum* su izmislili jeftin način proizvodnje plastičnih listova sa milijardama ugrađenih nanoantena koje sakupljaju toplotnu energiju Sunca ili drugih izvora toplote. Nanoantena je uređaj koji apsorbuje elektromagnetne talase kraćih talasnih dužina (infracrvena oblast spektra elektromagnetnog zračenja) i konvertuje ih u elektricitet na principu rezonancije. Nanoantena se sastoji od veoma tanke zlatne spiralne niti koja je postavljena u specijalno tretiran sloj polietilena. Toplotna energija koja se danju predaje Zemlji sa Sunca se u toku noći odaje u vidu infracrvenih zraka i tu energiju infracrvenih zraka mogu da sakupljaju nanoantene i konvertuju u elektricitet, što nije slučaj kod konvencionalnih solarnih ćelija koje mogu da rade samo u vidljivoj oblasti spektra EM zračenja. Takođe, ako bi se nanoantene postavljale sa obe strane plastičnih listova, mogle bi da sakupljaju energiju iz šireg spektra EM zračenja. Nanoantena bi takođe mogla da se koristi kao uređaj za hlađenje koji izvlači suvišnu toplotu iz elektronskih uređaja ili kao klima uređaj u zgradama bez korišćenja električne energije. Ova tehnologija bi mogla vrlo lako da se primeni u masovnoj proizvodnji jer bi cena iznosila nekoliko evrocenti po m², a efikasnost je velika i dostiže 80 %.

Solarne ćelije se električno povezuju i formiraju modul. Sa strane na kojoj je izložen suncu i okolini ovakav modul ima sloj stakla koje propušta svetlost i štiti sloj poluprovodnika od spoljnih uticaja (kiša, prašina itd.). Solarna ćelija obično daje napon oko 0.6 V pa se više njih povezuje serijski da bi se dobio potreban napon solarnog modula. Zatim se ovakvi nizovi vezuju paralelno da bi se dobila potrebna struja modula. Moduli se nakon toga povezuju redno i paralelno formirajući mrežu da bi se dobile željene maksimalne vrednosti jednosmernog napona i struje. Energija dobijena iz ovog sistema se može pomoću invertora predavati u distributivnu mrežu ili se može skladištiti u baterijama ako nije potrebna u datom

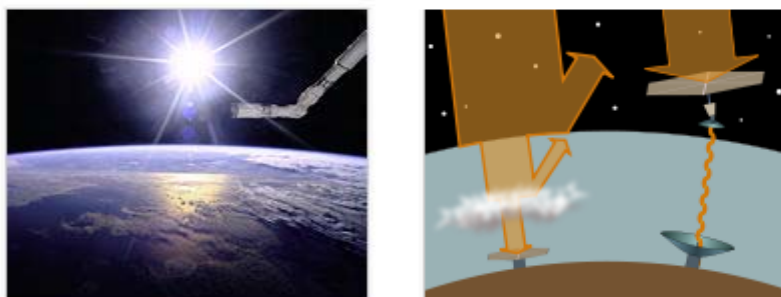
trenutku. Izgled strukture tipične silicijumske solarne ćelije sa jednim slojem i solarnog modula su prikazani na slikama ispod.



Cena proizvedenog kWh iz solarnih ćelija se kreće od 0.5 €/kWh u zemljama centralne Evrope do 0.25 €/kWh u mestima sa velikim brojem sunčanih dana. Solarne ćelije mogu da traju i do 40 godina, a za većinu njih se daje garantni rok od 25 godina. Energiju koja je uložena u njihovu proizvodnju, moderni solarni moduli generišu za 1 do 4 godine.

3.4 Praktična primena solarnih ćelija kod električnih vozila

Konverzija solarne energije u električnu se može obavljati kako na Zemlji, tako i u njenoj orbiti. Atmosfera Zemlje dosta utiče na intenzitet sunčevog zračenja kao i na njegov spektar. U Zemljinoj orbiti je ovo zračenje intenzivnije, ravnomernije i ne zavisi od doba dana, pa je solarne energija po jedinici površine do deset puta veća nego na Zemlji. Solarne ćelije u orbiti nisu izložene atmosferskim uticajima, ali se zato javljaju oštećenja usled povećane radijacije ili bliskog susreta sa mikrometeoritima. U budućnosti se očekuje primena ogromnih solarnih kolektora u orbiti Zemlje koja je sinhrona sa Suncem (blizu polova, kolektori uvek okrenuti ka Suncu) koji bi sakupljali solarne energiju, konvertovali je putem transmitera u mikrotalase i slali je na Zemlju gde bi postojale velike antene za sakupljanje ove energije i njenu dalju konverziju iz mikrotalasa u električnu energiju. Ovaj pristup je prikazan na slici.



Mikrotalasi su pogodni jer imaju male gubitke pri prolasku kroz atmosferu. Ovaj način generisanja energije bi bio izuzetno povoljan jer ne proizvodi zagađenje. NASA je proračunala da bi transmiteri bili 500 m u prečniku, a mikrotalasi bi se emitovali na 5.8 GHz. Prema proračunu iz 1996. kolektor snage 5 GW (kao 5 velikih nuklearnih elektrana) bi imao

nekoliko kvadratnih kilometara solarnih ćelija koje bi bile teške oko 5000 t i antenu za prijem mikrotalasa na Zemlji prečnika 8 km. Da bi se delovi ovog kolektora transportovali u orbitu, predloženo je da se koriste sistemi sa magnetnom levitacijom. Jedno rešenje (Mag Lifter) je da se letelica ubrza horizontalno do 880 km/h koristeći magnetnu levitaciju i princip linearnog motora (kao kod MAGLEV sistema), a zatim uz pomoć sopstvenog raketnog pogona dodatno vertikalno ubrza i dostigne orbitu Zemlje, pri čemu bi cena isporučenog tereta iznosila oko 2000 \$/kg (kod čisto raketnih sistema ova cena iznosi 20000 \$/kg). Drugo predloženo rešenje (Star Tram) podrazumeva korišćenje čisto magnetnih sistema tako što bi se letelica ubrzavala do 8km/s za 5.3 minuta u 1600 km dugačkom cilindru iz koga je izvučen vazduh. Cilindar je u prvih 1280 km paralelan površini Zemlje, a onda se uzdiže do visine od 22 km gde letelica napušta cilindar i nastavlja da se kreće tangencijalno u odnosu na površ Zemlje po inerciji dok ne dostigne orbitu. Za ovaj slučaj bi cena isporučenog tereta iznosila oko 200 \$/kg. Hipotetički gledano, ako bi došlo novo ledeno doba, nivo energije koji bi bio potreban za preživljavanje ljudi i proizvodnju hrane jedino bi bilo moguće obezbediti upotrebom ogromnih solarnih kolektora u orbiti Zemlje koji bi energiju slali putem mikrotalasa na Zemlju.

Uskoro se očekuje komercijalna proizvodnja vozila koja koriste solarnu energiju kao pomoćni ili glavni izvor energije za pogon vozila. Za sada se ovakva vozila prvenstveno koriste za trke solarnih automobila i demonstraciju i promociju korišćenja solarne energije. Vozila za trke obično imaju tri točka (dva napred i jedan nazad) i jedno mesto za vozača i mnoštvo instrumenata kojima se meri stanje u električnom podsistemu i dobijaju informacije za poboljšanje performansi. Od baterija se koriste nikel - metal - hibridne (NiMH), nikel - kadmijumske (NiCd), litijum - jonske i litijum - polimerne. Mehanički sklopovi se projektuju tako da imaju što manju težinu i veliku čvrstoću, što se postiže upotrebom ugljeničnih vlakana, a teži se da celo vozilo ima što manje otpore kretanju. Solarna mreža se sastoji od stotina visoko efikasnih solarnih ćelija i ona se postavlja na vozilo tako da kod većih mreža može da proizvede preko 2 kWh električne energije.

Solarne ćelije bi takođe mogle naći primenu u hibridnim automobilima gde bi služile kao pomoćni izvor energije. Nedavno je proizvođač automobila Toyota objavio da će se njihov hibridni automobil Toyota Prius od 2009. isporučivati sa solarnim ćelijama koje su ugrađene na krovu kao dodatnom opremom. Ove solarne ćelije generišu do 240 Wh električne energije kada je sunčan dan i time omogućavaju do 15 km dužu vožnju kada se koristi električni motor. Još jedan primer je vozilo zvano Solartaxi koje sa sobom vuče prikolicu na kojoj su postavljene solarne ćelije površine 6 m². Ovo vozilo poseduje baterije sa kojima može da pređe do 400 km bez dopunjavanja, a bez prikolice može da pređe do 200 km, pri čemu je maksimalna brzina 90 km/h. Samo vozilo ima težinu od 500 kg, a prikolica još dodatnih 200 kg. Ovo vozilo bi prema tvrdnjama konstruktora u masovnoj proizvodnji koštalo 16000 €. Na slikama ispod su prikazani Solartaxi i detalj sa trke solarnih automobila.



Automobilska kompanija Venturi je objavila da će od januara 2008. pustiti u prodaju Venturi Astrolab - prvi komercijalni električni hibridni automobil koji za pogon koristi električne

baterije i solarne panele instalirane na karoseriji i ne proizvodi nikakvo zagađenje. Neke od tehničkih karakteristika ovog vozila su date u sledećoj tabeli.

motor	tip	asinhroni
	snaga	16 kW
	maksimalna brzina obrtanja	3500 ob/min
	obrtni moment	50 Nm
	hlađenje	vazdušno
prenosni odnos		7
baterije	tip	NiMH 72 V 100Ah
	akumulirana energija	7 kWh
	masa	108 kg
	hlađenje	tečno
	očekivani vek upotrebe	2500 ciklusa (10 godina)
	autonomija	110 km
	punjenje	5 h sa punjačem 1.5 kW 16 A
karoserija		ugljena vlakna i aluminijum
solarni paneli	površina	3.6 m ²
	snaga	600 W
	efikasnost	21 %
	učešće u kilometraži	18 km/dan
maksimalna brzina		120 km/h
masa praznog vozila		280 kg

Vozilo Venturi Astrolab je prikazano na slici.



Solarne ćelije se mogu koristiti kao dodatni izvor energije kod vozila koja plove ili lete i koriste baterije za pogon električnog motora. Solarne ćelije se na brodu mogu instalirati na mestima kao što su paluba, krov kabine ili u vidu nastrešnice, a na avionu na krilima i trupu. Sledeće slike prikazuju izgled ovih vozila.



Električna vozila sa baterijama koja su opremljena solarnim ćelijama će imati mogućnost dopunjavanja kad god su izložena suncu što će omogućiti njihovu veću autonomiju. Sa druge strane, sa sadašnjom tehnologijom i budućim inženjerskim inovacijama, mnogo je verovatnije da će mesto za solarne ćelije biti krovovi zgrada, tako da one uvek budu izložene suncu i imaju mnogo veću površinu i masu, što je ograničavajući faktor u primeni kod vozila. Energija iz krovnih panela bi mogla da se skladišti u baterijama i koristi za dopunu baterija električnog vozila ili za druge uređaje.

4. Zaključak

Uređaji za proizvodnju čiste energije kao što su solarne ćelije i vetro generatori i akumuliranje te energije kao što su zamajac i superkondenzator imaju veliku perspektivu jer imaju mnoge prednosti u odnosu na konvencionalne uređaje i samo je pitanje dana kada će oni početi masovno da se primenjuju čime bi njihova cena drastično opala. Konstantna usavršavanja i inovacije na ovom polju dovode do interesovanja velikih proizvođača vozila i drugih proizvoda koji prepoznaju veliki potencijal i sami puno ulažu u istraživanja ove vrste. Opšte je poznato da izvori energije zasnovani na fosilnim i nuklearnim gorivima, pored toga što nanose ogromnu štetu životnoj sredini i podstiču efekat staklene bašte i klimatske promene, imaju ograničene zalihe i da će jednog dana ostati samo Sunce, voda i vetar kao jedini sigurni izvori energije koji nemaju alternativu. Zato je potrebno mobilisati i informisati što više ljudi u cilju što bržeg prelaska na čiste izvore energije i efikasnu upotrebu električne energije.

5. Literatura

- [1] <http://maxwell.com/>
- [2] <http://wikipedia.com/>
- [3] <http://www.flybridsystems.com/>
- [4] <http://www.xtrac.com/>
- [5] <http://www.torotrak.com/>
- [6] <http://forum.b92.net/>
- [7] Vujo Drndarević, Elektronika, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, 2005.
- [8] Predrag Marinković, Fizika 1 skripta, autorsko izdanje, 2006.
- [9] Lazar Rusov, Mehanika - dinamika, Naučna knjiga, 1975.