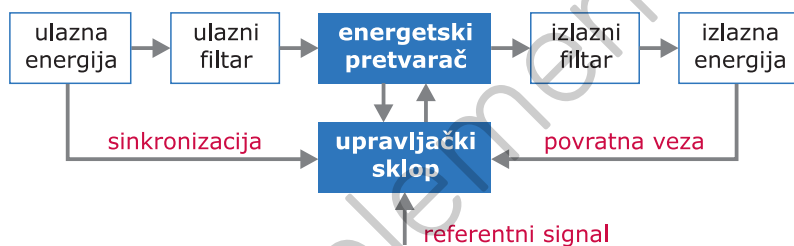


# 1.

# Uvod u energetska elektroniku

**Energetska elektronika** je grana elektrotehnike koja se bavi pretvorbom i upravljanjem električne energije s pomoću električnih energetskih pretvarača, koji koriste energetske poluvodičke sklopove. Osim naziva energetska elektronika, koristi se također i naziv učinkovita elektronika. Energetskom elektronikom proučavamo komponente energetskih sklopova, istosmjerne i izmjenične prekidače, regulacijske krugove, upravljačke sklopove, signalizacijske sklopove i dr.

Za većinu energetskih sustava ulaz predstavlja električnu mrežu, a izlaz trošilo. Snagu ulazne energije dobivamo npr. iz izmjeničnog napajanja, a snagu izlazne energije trošimo na npr. priključenom motoru. Priključak sustava energetske elektronike na električnu mrežu o spojno trošilo može biti jednofazni ili trofazni, neovisno jedan o drugome.



Slika 1.1. Blok-shema sustava energetske elektronike

**Energetski pretvarači** povezuju dva ili više različita električna sustava. Kao što je vidljivo iz slike 1.1, energetski pretvarači upravljaju tokom električne energije između izvora električne energije i potrošača (trošila). Osim električnih veličina, energetski pretvarači mogu upravljati i neelektričnim veličinama kao što su: brzina vrtnje motora, jakost svjetlosti, temperatura itd. Energija koja se dovodi u sustav snage  $P_{ul}$  i energija koju sustav daje na izlazu snage  $P_{iz}$ , mora ostvariti povoljan **stupanj korisnosti**  $\eta$ . Razliku ulazne i izlazne energije sustav

obično pretvara u toplinu kao gubitak energije odnosno snage  $P_{\text{gub}}$ . Nastala toplina mora se odvesti iz sustava preko sustava za hlađenje, što ujedno određuje i veličinu samog energetskog sklopa. Stupanj korisnosti računa se prema izrazu:

$$\eta = \frac{P_{\text{iz}}}{P_{\text{ul}}} = \frac{P_{\text{iz}}}{P_{\text{iz}} + P_{\text{gub}}}$$

### Primjer 1.1.

Energetski pretvarač iz mreže dobiva 100 kW snage, a priključenom motoru daje 90 kW. Koliki su gubici u sustavu, te stupanj korisnosti?

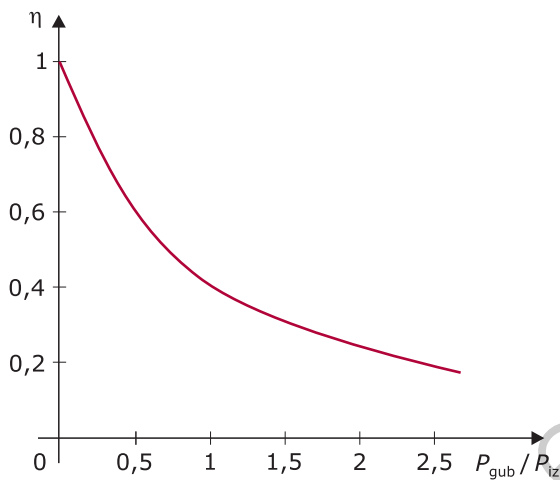
#### Rješenje:

Gubici u sustavu računaju se kao razlika ulazne i izlazne snage:

$$P_{\text{gub}} = P_{\text{ul}} - P_{\text{iz}} = 100 \text{ kW} - 90 \text{ kW} = 10 \text{ kW}.$$

Stupanj korisnosti iznosi:

$$\eta = \frac{P_{\text{iz}}}{P_{\text{ul}}} = \frac{90 \text{ kW}}{100 \text{ kW}} = 0.9 = 90 \%$$



Slika 1.2. Stupanj korisnosti pretvarača

Krivulja sa slike 1.2 pokazuje kako se mijenja stupanj korisnosti u ovisnosti omjera snage gubitaka i izlazne snage. Idealni energetska pretvarač imao bi stupanj korisnosti jednak jedinici, što bi značilo da nema gubitaka.

Mnogi energetska sustavi koriste energetska pretvarače s visokim stupnjem korisnosti za pretvorbu izlazne energije bez velikih gubitaka. Takvi energetska pretvarači u sebi sadrže energetska poluvodičke komponente odnosno sklopke, koje mogu ostvariti takav visoki zahtjev. Osim energetska poluvodičkih komponenta, energetska pretvarači također koriste i magnetske kao što su npr. transformatori, filterske prigušnice itd., te pasivne komponente.

Osim stupnja korisnosti postoji i **faktor snage** koji govori koliko se privedene snage priključene mreže pretvara u djelatnu snagu koja se predaje trošilu u pretvaraču. Faktor snage definira se izrazom:

$$\cos \varphi = \lambda = \frac{P_{ul}}{S_{ul}}$$

Faktor snage se kreće u granicama između nule i jedinice kao i stupanj korisnosti. U sustavu je poželjno imati faktor snage što bliži vrijednosti jedinice, jer se time smanjuju gubitci odnosno jalova snaga  $Q$  u mreži.

### Primjer 1.2.

Na natpisnoj pločici motora pišu sljedeći podatci:  $P = 1 \text{ MW}$ ,  $\cos \varphi = 0.833$ . Koliko je potrebno privesti snage motoru preko energetskeg pretvarača da on može ostvariti takav rad? Koliki su gubitci koji nastaju u energetskeg pretvaraču?

#### Rješenje:

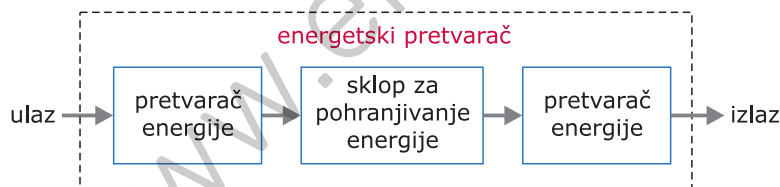
Prividna snaga mreže dobiva se izrazom:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{1 \cdot 10^6}{0.833} = 1.2 \text{ MVA.}$$

Gubitke sustava predstavlja jalova snaga:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 0.663 \text{ MVar.}$$

**Funkcionalnost energetskeg pretvarača** određena je njihovom sposobnošću da osigura potrebne ulazne i izlazne parametre u svim uvjetima rada. **Pouzdanost energetskeg pretvarača** ovisi o pouzdanosti komponenata koje koristi u radu, složenosti sustava, dizajnu komponenata, proizvodnoj tehnologiji, učinkovitosti hlađenja i sigurnosnim mjerama sustava. Kao što je vidljivo na slici 1.3, energetskeg pretvarač može imati nekoliko pretvaračkih stupnjeva, te sklop za pohranjivanje energije između njih npr. zavojnice i kondenzatore.



Slika 1.3. Blok-shema energetskeg pretvarača

Energetske pretvarače možemo podijeliti u nekoliko kategorija ako gledamo valni oblik na ulazu spram onog na izlazu. To su:

- **ispravljači** (izmjenično–istosmjerni pretvarači, engl. *AC/DC converters*) – povezuju izmjeničnu mrežu s istosmjernim trošilom, te ispravljaju izmjenični ulazni napon u istosmjerni napon na izlazu
- **izmjenjivači** (istosmjerno–izmjenični pretvarači, engl. *DC/AC converters*) – povezuju istosmjernu mrežu s izmjeničnim trošilom, te pretvaraju istosmjerni ulazni napon u izmjenični napon na izlazu promjenjive veličine i frekvencije
- **istosmjerni pretvarači** (engl. *DC/DC converters*) – povezuju dvije istosmjerne mreže tako da se ulazni istosmjerni napon pretvara u istosmjerni napon na izlazu više ili niže razine
- **izmjenični pretvarači** (engl. *AC/AC converters*) – povezuju dvije izmjenične mreže tako da se ulazni izmjenični napon pretvara u izmjenični napon na izlazu različite veličine i frekvencije.

Izmjenični i istosmjerni energetska pretvarači mogu biti izravni ili neizravni. Ulazna istosmjerna ili izmjenična energija se u izravnim energetska pretvaračima odmah pretvara u odgovarajući oblik energije na izlazu. Kod neizravnog pretvaranja se vrši dvostruka pretvorba ulazne energije da bi se na kraju dobio željeni oblik energije. Npr. kod izmjeničnog neizravnog pretvarača pretvorba se vrši tako da se prvim ispravljačem izmjenična vrijednost pretvori u istosmjernu, a zatim istosmjerna u izmjeničnu vrijednost. Na isti način radi i istosmjerni neizravni pretvarač.

U nekim primjenama npr. u istosmjernim elektromotornim pogonima jedan te isti pretvarač radi u jednom vremenskom intervalu kao ispravljač koji obavlja funkciju ispravljanja, a u drugom kao izmjenjivač. Takav energetska pretvarač još se naziva **usmjerivač**. Kod usmjerivača je moguć tok energije u oba smjera, ovisno o polaritetu izlaznog napona.

Zadatak **upravljačkog sklopa** je da na temelju informacije o npr. željenoj brzini vrtnje motora (referentni signal) i stvarnoj brzini motora dobivenoj preko povratne veze, upravlja okidnim sklopom. Okidni sklop se nalazi u upravljačkom sklopu i smatra se njegovim sastavnim dijelom. On će u sinkronizaciji s ulaznom energijom upravljati energetska poluvodičkim komponentama unutar energetska pretvarača i na takav način indirektno upravljati izlaznom energijom. Elektroničke poluvodičke komponente npr. dioda, tranzistor ili tiristor, rade kao sklopke i tako upravljaju naponom ili strujom, odnosno mijenjaju vrijednost napona i struje. Upravljački sklopovi ne koriste se magnetskim elementima zbog njihovih velikih dimenzija. S druge strane, energetska elektronika u pretvaračkim sklopovima ne koristi otpornike i poluvodiče u linearnom načinu rada, zbog velike disipacije snage na tim elementima. Kao što je već rečeno, pretvarački sklopovi moraju raditi s malim gubitcima. Upravljački sklop ima značajnu ulogu u osiguravanju pouzdanog rada cijelog sustava. U slučaju pogreške, unutar upravljačkog sklopa može doći do toga da energetska pretvarač, opterećenje ili izvor napajanja nije više u radnoj funkciji.

Sustav energetske elektronike sadrži i neke druge elemente npr. filtre za otklanjanje smetnji, te neke mehaničke komponente npr. noseće konstrukcije i rashladna tijela.

Praktična primjena energetskih pretvarača zahtijeva određene uvjete spajanja izvora napajanja. Pretvarač s naponskim ulazom mora imati njemu paralelno spojen kondenzator. Ulazni filter, odnosno kondenzator djeluje preventivno protiv induktivne unutarnje impedancije, koja nastaje zbog naponskog izvora koji nije idealan. Također, ako je potrebno, moguće je spojiti zavojnicu u seriju koja djeluje preventivno na vrijednosti struja. Bitno je naglasiti da kod spajanja energetskih pretvarača u sustav koji ima izvore napajanja s jedne i druge strane pretvarača, potrebno je također ugraditi ulazne i izlazne filtre kako ne bi došlo do nepoželjnog međusobnog spajanja izvora različitih vrijednosti.

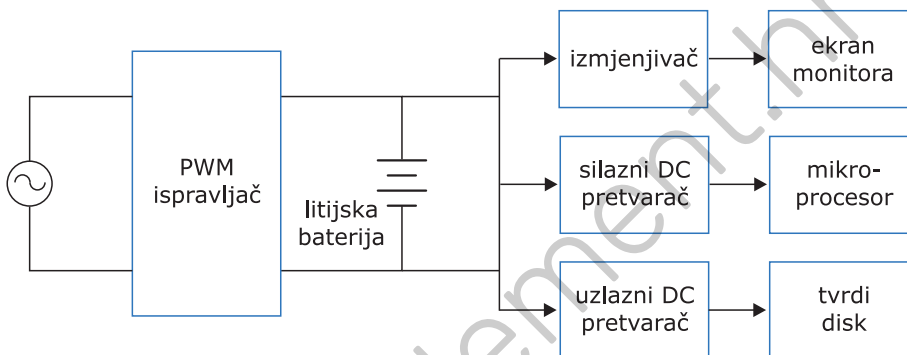
### 1.1. Primjena energetske elektronike

---

Razina snage (energije) koju koriste energetski pretvarači s visokim stupnjem korisnosti kreće se:

- od nekoliko milivati [mW], u istosmjernim pretvaračima unutar baterija prijenosne opreme
- na desetke, stotine ili tisuće vati [W], u napajanju računala i uredske opreme
- do nekoliko kilovata i megavata [kW i MW], u motorima
- te otprilike tisuću megavata [MW] u ispravljačima i pretvaračima koji povezuju pretvorbu elektroenergetske mreže.

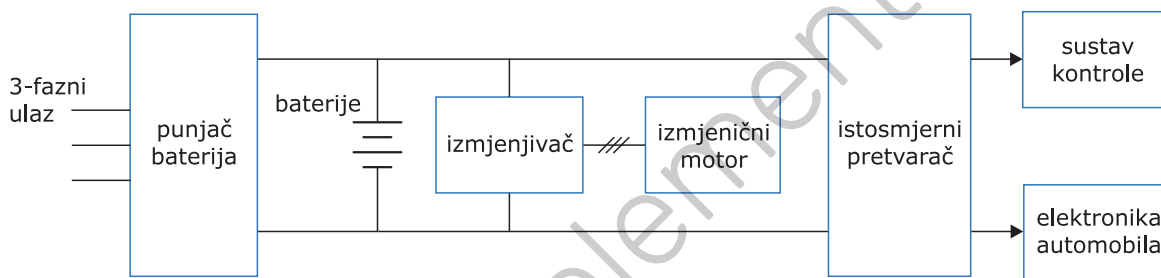
Jedan od primjera primjene energetske elektronike prikazan je na slici 1.4. Sustav za napajanje prijenosnog računala ima litijsku bateriju koja napaja sustav, dok nekoliko istosmjernih pretvarača mijenja napon baterije u napon potreban za trošila sustava. Silazni DC (istosmjerni) pretvarač pretvara napon na nižu razinu koja je potrebna za rad mikroprocesora. Uzlazni DC pretvarač povećava napon baterije na vrijednost koja je potrebna tvrdom disku. Izmjenjivač pretvara u potrebni visoki izmjenični napon i frekvenciju za ekran monitora, iz istosmjerne vrijednosti. PWM ispravljač ispravlja izmjeničnu vrijednost u istosmjernu za napajanje baterije.



Slika 1.4. Pojednostavljeni sustav napajanja za prijenosno računalo

Sljedeći sustav prema slici 1.5 prikazuje električno napajanje automobila. Baterije automobila napajaju se iz punjača baterija koji pretvara trofazni signal velike snage u jednofazni istosmjerni signal niže snage. Baterije daju energiju izmjeničnom motoru promjenjive brzine. Brzina izmjeničnog motora kontrolira se promjenjivim naponom odnosno frekvencijom, koju daje izmjenjivač. Također u sustavu može biti više izmjenjivača i izmjeničnih motora, spojenih na isti način. Istosmjerni pretvarač smanjuje napon baterije na vrijednosti koje su potrebne elektronici automobila i sustavu kontrole.

Energetska elektronika također pronalazi svoju primjenu u drugim raznovrsnim industrijama, preko istosmjernih izvora napajanja, neprekinutih napajanja, u punjačima baterija telekomunikacijske industrije, u sustavima pretvarača kod obnovljivih izvora energije kao što su vjetroelektrane i fotonaponski sustavi, u sustavima za upravljanje procesima i automatizaciju proizvodnje itd.



Slika 1.5. Pojednostavljeni sustav napajanja električnog automobila

## Sažetak

**Energetska elektronika** ili učinska elektronika je grana elektrotehnike koja se bavi pretvorbom i upravljanjem električne energije s pomoću električnih energetske pretvarača, koji koriste energetske poluvodičke sklopove. Osnovni sustav energetske elektronike sastoji se od ulazne energije (npr. izmjenično napajanje), izlazne energije (npr. priključeni motor), ulaznih i izlaznih filtara, energetske pretvarača i upravljačkog sklopa. Energetski pretvarači upravljaju tokom električne energije između izvora električne energije i potrošača (npr. motora). **Energetski pretvarači** se uglavnom sastoje od sklopova za pretvaranje i pohranjivanje energije. Ako gledamo valni oblik koji daje pretvarač na svom izlazu u odnosu na ulazni, možemo ih podijeliti u nekoliko skupina:

- **ispravljači** (izmjenično–istosmjerni pretvarači, engl. *AC/DC converters*) – povezuju izmjeničnu mrežu s istosmjernim trošilom, te ispravljaju izmjenični ulazni napon u istosmjerni napon na izlazu
- **izmjenjivači** (istosmjerno–izmjenični pretvarači, engl. *DC/AC converters*) – povezuju istosmjernu mrežu s izmjeničnim trošilom, te pretvaraju istosmjerni ulazni napon u izmjenični napon na izlazu promjenjive veličine i frekvencije
- **istosmjerni pretvarači** (engl. *DC/DC converters*) – povezuju dvije istosmjerne mreže tako da se ulazni istosmjerni napon pretvara u istosmjerni napon na izlazu više ili niže razine
- **izmjenični pretvarači** (engl. *AC/AC converters*) – povezuju dvije izmjenične mreže tako da se ulazni izmjenični napon pretvara u izmjenični napon na izlazu različite veličine i frekvencije.

Energetski pretvarači mogu biti izravni ili neizravni. Ulazna energija se u izravnim energetske pretvaračima odmah pretvara u odgovarajući oblik energije na izlazu, dok se kod neizravnog pretvaranja vrši nekoliko puta.

**Upravljački sklop** unutar sustava energetske elektronike ima značajnu ulogu u osiguravanju pouzdanog rada cijelog sustava. Zadatak mu je na temelju prikupljenih informacija upravljati energetske poluvodičkim komponentama unutar energetske pretvarača i na takav način indirektno upravljati izlaznom energijom.

**Elektroničke poluvodičke komponente** npr. dioda, tranzistor ili tiristor, rade kao sklopke i tako upravljaju naponom ili strujom.

**Primjena energetske elektronike** je vrlo široka, a neki od primjera su: istosmjerni izvori napajanja, punjači baterija, u sustavima obnovljivih izvora energije (npr. vjetroelektrane, fotonaponski sustavi), u sustavima za upravljanje procesima i automatizaciju proizvodnje itd.

### Pregled ključnih pojmova

**ispravljači** – povezuju izmjeničnu mrežu s istosmjernim trošilom, te ispravljaju izmjenični ulazni napon u istosmjerni napon na izlazu

**istosmjerni pretvarači** – povezuju dvije istosmjerne mreže tako da se ulazni istosmjerni napon pretvara u istosmjerni napon na izlazu više ili niže razine

**izmjenični pretvarači** – povezuju dvije izmjenične mreže tako da se ulazni izmjenični napon pretvara u izmjenični napon na izlazu različite veličine i frekvencije

**izmjenjivači** – povezuju istosmjernu mrežu s izmjeničnim trošilom, te pretvaraju istosmjerni ulazni napon u izmjenični napon na izlazu promjenjive veličine i frekvencije

**energetska elektronika** – grana elektrotehnike koja se bavi pretvorbom i

upravljanjem električne energije s pomoću električnih energetska pretvarača, koji koriste energetska poluvodička sklopove

**energetska pretvarači** – upravljaju tokom električne energije između izvora električne energije i potrošača

**faktor snage** – predstavlja omjer ulazne radne i prividne snage u sustavu energetska elektronike

**stupanj korisnosti** – predstavlja omjer izlazne i ulazne radne snage u sustavu energetska elektronike

**upravljački sklop** – osigurava pouzdani rad sustava energetska elektronike

**usmjerivač** – pretvarač koji u jednom vremenskom intervalu radi kao ispravljač, a u drugom kao izmjenjivač

### Dodatna literatura za učenike

T. Brodić, *Osnove energetska elektronike*, II. dio – energetska poluvodička pretvornici, Zigo, Rijeka, 2005.

J. Kotur, S. Paunović, *Analogni elektronički sklopovi* (11. poglavlje), Element, Zagreb, 2009.

S. Paunović, A. Bednjanec, R. Bogut, V. Anđelić, J. Kotur, *Elektronika i upravljanje* (21. poglavlje), Element, Zagreb, 2010.



## Pitanja za ponavljanje

**1.** Što je energetska elektronika?

Navedite nekoliko parametara koji se mogu mijenjati električnom energetskom pretvorbom.

**2.**

**3.** Nacrtajte blokovsku shemu sustava energetske elektronike i naznačite sve sastavne dijelove.

Koja je uloga energetskog pretvarača u sustavu energetske elektronike?

**4.**

**5.** Što predstavlja stupanj korisnosti, a što faktor snage kod energetskih pretvarača?

Pojasnite funkcionalnost i pouzdanost energetskih pretvarača.

**6.**

**7.** Navedite osnovne vrste energetskih pretvarača i pojasnite njihovu funkciju.

Što znači da je energetski pretvarač neizravan?

**8.**

**9.** Zašto se neki energetski pretvarači nazivaju usmjerivačima?

Koja je uloga upravljačkog sklopa u sustavu energetske elektronike?

**10.**

**11.** Navedite razine snaga energetskih pretvarača s obzirom na to gdje se koriste.

Navedite praktičnu primjenu energetske elektronike.

**12.**