

22

Močnostna elektronika

Močnostna elektronika je področje **elektrotehnike**, ki se ukvarja s **pretvorbo** oblike električne energije pretežno s **polprevodniškimi** elektronskimi komponentami. Tipični primeri so napetostni **AC-DC**, **DC-DC**, **DC-AC** in **frekvenčni** pretvorniki na področju električnih **pogonskih** tehnologij, pretvorb in uporabe **sončne** in **vetrne** energije ter za delovanje električnih naprav praktično povsod.

Elektronske komponente in vezja za navedene potrebe (sl. 22.1) so izdelane za **velike moči**, polprevodniški elementi, na katerih temeljijo, pa so predvsem **tiristor**, **GTO-tiristor**, **triak**, **diak** in **IGBT-tranzistor**.

22.1 POLPREVODNIŠKI MOČNOSTNI ELEMENTI

22.1.1 Tiristor¹

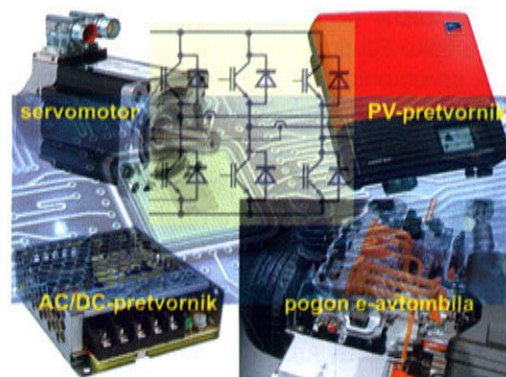
- ⇒ **Tiristor** (sl. 22.2) je **4-plastna** polprevodniška dioda s **tremi** prehodi P-N in krmilnim priključkom **G** [ang. *Gate – vrata*].
- ⇒ **Tiristor** uporabljamo kot **krmiljeno enosmerno močnostno** brezkontaktno **stikalo** za toke več 1000 A in napetosti tudi 10.000 V.

Pri pozitivnem potencialu na anodi (sl. 22.2) je **srednji** PN-prehod polariziran **zaporno**, kar zadošča, da tiristor ne prevaja. S tokovnim impulzom vrat (I_G , sl. 22.3) pripadajoči **P-tip** tiristorja »preplavimo« s prostimi elektroni, kar omogoči začetno prevajanje, **plazovito ionizacijo**, razgradnjo zaporne plasti in prehod tiristorja v **prevodno** stanje.

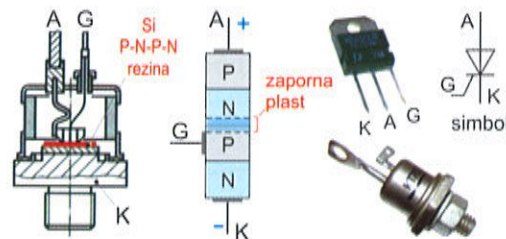
- ⇒ Prehodu tiristorja v prevodno stanje z **impulzom** krmilnega toka I_G pravimo **vžig**, prehodu v obratni smeri pa **ugasnitev** tiristorja.

Tiristor krmilimo s tokovnimi impulzi I_G **1 do 100 mA** in za to potrebno napetostjo U_{GK} 0,6 do 2,5 V. Napetost U_F na tiristorju po vžigu pade na **0,6 do 3 V** (sl. 22.3). Tok tiristorja I_F je praktično določen z napetostjo vira U_B (sl. 22.5) in upornostjo bremena R_b ter se **po prekinutvi** krmilnega toka I_G **ne prekine**. Prav to je bistvena **razlika** med tranzistorjem in tiristorjem, ki sta sicer oba tokovno krmiljena elementa.

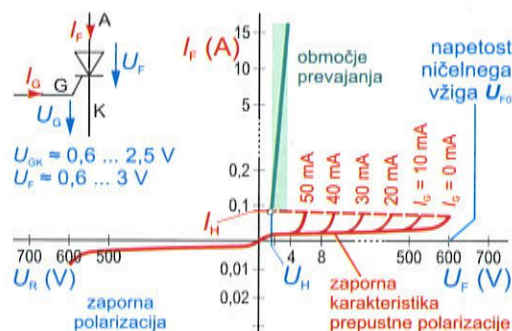
Pri $I_G = 0$ je prevodnost srednjega PN-prehoda, vzdrževana s tokom I_F . Ko I_F zmanjšamo pod določeni **minimum**, se ponovno vzpostavi zaporna plast srednjega PN-prehoda in tiristor **ugasne**.



Slika 22.1: Pretvorniki električne energije



Slika 22.2: Zgradba, izvedbi in simbol tiristorja



Slika 22.3: Simbol in karakteristika $U-I$ tiristorja

¹ Od **tiratron** – plinska stikalna elektronika in angl. **resistor** – upornost.

- ⇒ **Najmanjšemu** toku tiristorja I_F , ki pri $I_G = 0$ še vzdržuje prevajanje tiristorja, pravimo tok **držanja** I_H [angl. *Hold – držati*].
- ⇒ V **prevajanju** ima tiristor majhno upornost, v **zapori** pa izredno **veliko**. Posledično ima v obeh primerih tudi **majhno** izgubno moč.

Pri dovolj visoki, praktično prebojni napetosti U_F tiristor vžge tudi brez krmilnega impulza ($I_G = 0$, sl. 22.3). To pa lahko vodi v prebojno uničenje tiristorja, še posebej, če tok I_F ni ustrezno omejen z bremenom.

22.1.1.1 Tiristor v krogu z enosmernim tokom

Pri **akumulatorsko** napajanih pogonih, npr. **električnih vozil**, **viličarjev** ..., je aktualno brezstopenjsko krmiljenje njihove **moči**. To najpogosteje temelji na **širinski modulaciji** periodičnih impulzov toka porabnika (sl. 22.4, **PWM**¹). Ena od možnosti takega krmiljenja moči je vezje s **tiristorjem**, katere enostaven primer prikazuje slika 22.5.

Po vklopu stikala S1 delilnik napetosti R_1 - R_2 zagotovi napetost **vžiga** U_{GK} , tiristor začne **prevajati**, napetost U_{AK} pade in napetost U_C naraste na U_b . Ko s tipko S2 povežemo »+« priključek kondenzatorja na maso, napetosti U_{AK} spremenimo v $-U_b$, zato tiristor **ugasne**. Po **sprostitvi** tipke tiristor ponovno **vžge**, z elektronskim krmiljenjem »tipke« pa lahko ustvarimo širinsko krmiljene impulze ter nastavljivi **srednji tok** $\bar{I}$ in **moč** P_b .

Pri opisanem tiristorju lahko z $+I_G$ na G-vhodu tiristor **vžgemo**, ugasniti pa ga prek G-vhoda **ne moremo**, kar je njegova slabost.

22.1.1.2 Tiristor v krogu z izmeničnim tokom

V **izmeničnem** krogu tiristor prevaja le v času **polperiode**, ki predstavlja **prepustno** polarizacijo napetosti U_{AK} .

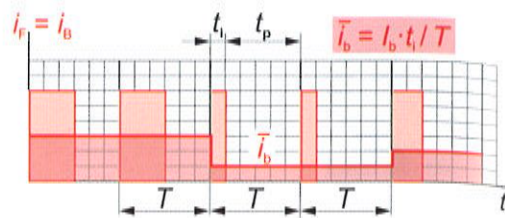
- ⇒ Tiristor ima v izmeničnem krogu **usmerniške** lastnosti (sl. 22.6).
- ⇒ Po polperiodi prevajanja tiristor **ugasne**, zato je v **vsaki** pozitivni **polperiodi** potreben njegov **ponovni vžig**.

Z določitvijo **kota vžiga** α znotraj polperiode napetosti (sl. 22.6 in 22.7) določimo **delež moči** porabnika v polperiodi, ki je sorazmeren s **površino** pod časovnim potekom napetosti/toka v polperiodi.

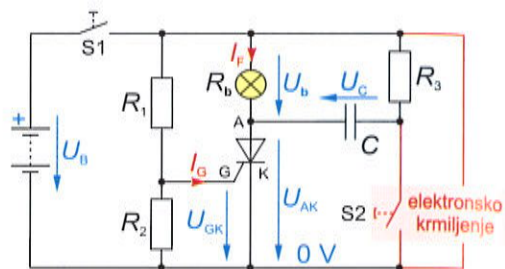
- ⇒ Kotu **vžiga** tiristorja v periodi izmenične napetosti pravimo **fazni rez**.
- ⇒ Tiristor omogoča **krmiljenje moči** delovanja porabnika z nastavljivim **faznim rezom** izmenične napetosti.
- ⇒ **Efektivna** napetost porabnika se pri faznem rezu spreminja sorazmerno s **površino** pod časovnim potekom napetosti/toka (sl. 22.7).

V vezju za krmiljenje moči porabnika v izmeničnem krogu (sl. 22.8) se po vklopu stikala S kondenzator v **pozitivni** polperiodi (sl. 22.6 a)) polni prek upora R_1 . Pri $U_C > U_Z$ na Z-diodi dobimo tokovni impulz I_G , ki tiristor **odpre**. Ob koncu pozitivne polperiode i_b in u_{AK} padeta pod I_H in U_H (sl. 22.3), tiristor se **zapre** in po nastopu nove **pozitivne** polperiode ponovno **odpre**. Z **nastavljivo** R_1C -konstanto (sl. 22.8) nastavljamo **hitrost** polnjenja kondenzatorja, »premik« prožilnega impulza I_G po časovni osi oziroma kot faznega reza (sl. 22.6 b)) in moč porabnika.

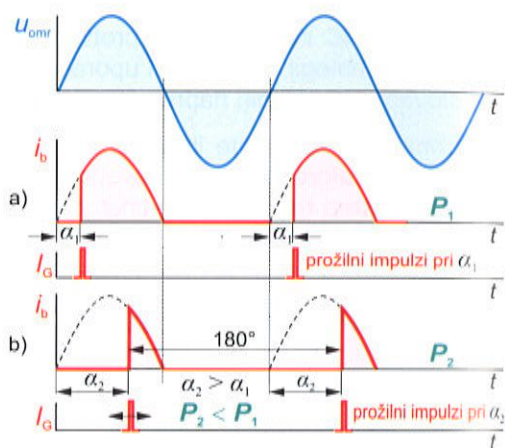
Značilni kataloški podatki tiristorja so **vžigna** krmilna napetost U_{GK} , **vžigni** tok I_G in tok **prevajanja** I_F , najmanjši tok **držanja** prevajanja tiristorja I_H ter **zaporna** napetost U_R in **izgubna** moč tiristorja P_{tot} .



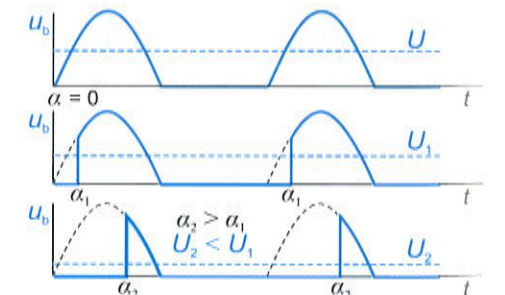
Slika 22.4: Srednja vrednost PWM krmiljenega toka



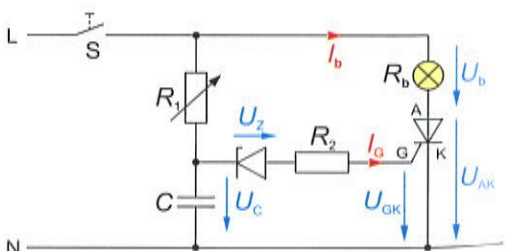
Slika 22.5: PWM-krmiljenje moči porabnika



Slika 22.6: Krmiljenje moči s tiristorjem



Slika 22.7: Krmiljenje moči s tiristorjem



Slika 22.8: Krmiljenje moči s tiristorjem

¹ Angl. *Pulse-Width Modulation*.

22.1.2 GTO¹-tiristor

Slabost tiristorja, da ne zmore prekiniti prevajanja toka, odpravlja nekoliko prirejen **GTO**-tiristor (sl. 22.9). Njegova zgradba je enaka kot pri običajnem tiristorju (sl. 22.2), struktura srednjega P-tipa pa omogoča tudi obraten postopek krmiljenja. Z **nasprotnim** tokovnim impulzom mu za trenutek **osiromašimo** srednji P-tip glede elektronov toliko, da se zaporna plast proti anodi ponovno vzpostavi in tiristor ugasne.

⇒ **GTO**-tiristor je polprevodniški **stikalni** element z veliko močjo, ki za **vžig** potrebuje na vratih **pozitivni tokovni impulz**, za **ugasnitev** pa **negativni tokovni impulz**.

GTO-tiristor ima nazivne toke tudi čez **3 kA** in nazivne napetosti do **10 kV**. Kot tak je v ospredju uporabe v usmerniških napravah z **veliko močjo**, npr. za električna prevozna sredstva (sl. 22.10).

22.1.3 Triak²

⇒ **Triak** (22.11) je v primerjavi s tiristorjem **dvosmerno** elektronsko brezkontaktno krmiljeno **stikalo**.

Triak je zgrajen kot **vzporedna** vezava **nasprotno** usmerjenih tiristorjev (sl. 22.11), prevaja tok v **obe** smeri in tako združuje uporabnost tiristorja s prednostjo koriščenja **obeh polperiod** izmeničnega toka. Potrebujemo le **dvojno** frekvenco poljubno polariziranih krmilnih impulzov oziroma krmilni impulz $\pm I_G$ v **vsaki** polperiodi.

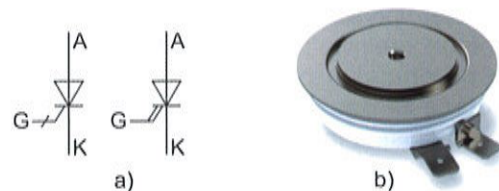
Triake izdelujemo za zaporne napetosti do okrog 1500 V in toke do 200 A. Uporabljamo jih za krmilnike toka srednjih moči, kot so npr. električna orodja, zatemnilna stikala (sl. 22.13, ①) ipd.

22.1.4 Diak³

Diak je polprevodniški PNP-element **brez krmilnega priključka**, katerega upornost se strmo zmanjša, če napetost na njegovih priključkih U_{AK} (sl. 22.12) v eni ali drugi smeri **preseže** napetost ničelnega vžiga (nadzorovanega preboja) U_{F0} . Uporabljamo ga za proženje napetostnih **impulzov** za **vžig** tiristorjev in triakov, zato mu pravimo tudi **prožilna** ali **trigger** [angl. *trigger* – sprožilo] dioda. Zaradi enakovrednega dvosmernega delovanja diak nima oznak priključkov. Njegove **preklopne** napetosti so najpogostejše med 3 in 100 V, v **visokoohmsko** stanje pa se vrne pri $I_F < I_H$ ali $U_F < U_H$.

Naveza diak-triak (sl. 22.13) je pogosta osnova vezij za **brezstopenjsko** krmiljenje **moči** in **vrtljajev** motorjev električnih orodij, grelnikov spajkalnikov, svetil ... Naraščajoča napetost polperiode omrežne napetosti (sl. 22.13) ustvarja na kondenzatorju naraščajoč padec napetosti. Pri napetosti vžiga **diaka** U_{F0} (sl. 22.12) ta postane **nizkoohmski** in s hitrim **praznjenjem** kondenzatorja omogoči tokovni impulz i_G za vžig **tiristorja**. Ko proti koncu pozitivne polperiode tok i_b in napetost u_F padeta pod I_H oziroma U_H triaka (sl. 22.11), ta ugasne in čaka na enake pogoje prevajanja v nasprotni smeri v času **negativne** polperiode.

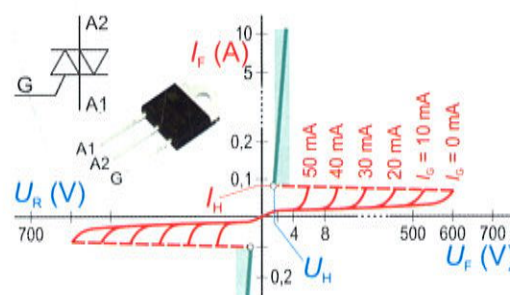
Z **nastavljivo** $(R_1+R_2)C$ -konstanto nastavljamo **hitrost** polnjenja kondenzatorja. S tem »premikamo«⁴ prožilni impulz i_G po časovni osi (sl. 22.15), spreminjamo **kot** faznega reza in **moč** delovanja porabnika.



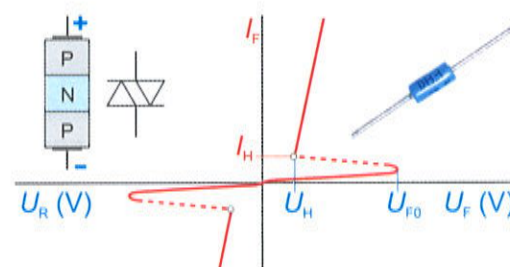
Slika 22.9: GTO-tiristor: a) simbola, b) izvedba



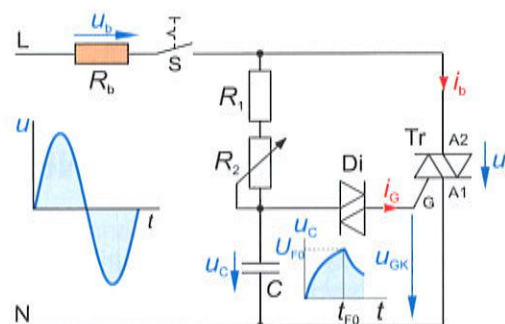
Slika 22.10: Uporaba GTO-tiristorja v električnih lokomotivah



Slika 22.11: Simbol in karakteristika U-I triaka



Slika 22.12: Simbol in karakteristika U-I diaka



Slika 22.13: Proženje triaka z diakom

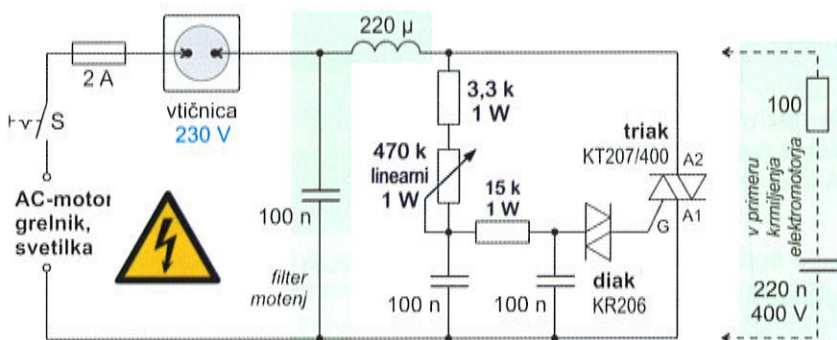
¹ Angl. od *Gate-Turned-Off*.

² Od *trioda* – element s tremi priključki in **AC**, iz angl. izmenični tok.

³ Od dioda in **AC**.

① Že v času sijalk z žarilno nitko smo lahko s takim vezjem »luč zatemnili«. Od tod naziv za tovrstno stikalo (angl. **dimmer switch**).

Z vezjem po sliki 22.13 lahko krmilimo moč manjšega enofaznega AC-motorja, grelnika ... Pri tem je treba izpostaviti, da hitri **stikalni** procesi že pri **ohmskih** bremenih povzročajo višje harmonske komponente, **moteče za omrežje**, pri **induktivnih** bremenih pa visoke **napetostne konice** lastne indukcije, nevarne tudi za diak in triak v vezju. Problem omilimo z ustreznima filtroma (sl. 22.14), pri uporabi takega odprtega vezja pa je treba upoštevati **varnostne ukrepe** pri delu z **nevarno** napetostjo.



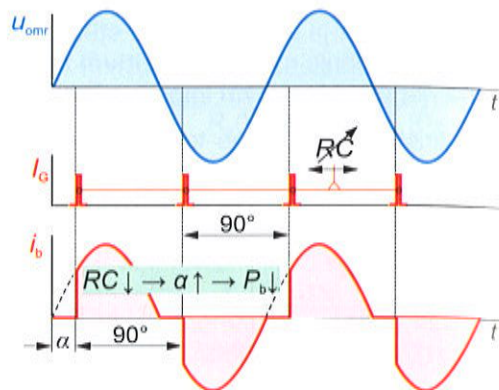
Slika 22.14: Krmiljenje moči s triakom in filtriranje VF-motenj

Diak in **triak** sta tipična elementa za krmiljenje moči v **izmeničnih** krogih, največkrat za napetostjo **230 V**. Osnovni element **LED-svetil** pa je **LED-dioda**, ki »sveti« pri **enosmernem** toku in razponu napetosti, odvisno od barve LED, približno med **0,8...3 V**. Za krmiljenje moči takih svetil, ki jih priključimo na **omrežno** napetost 230 V, so za zatemnitev potrebna kompleksnejša krmilna vezja, npr. s **PWM-krmiljenjem**. Žal je **izkoristek** LED-svetil s krmilniki moči **manjši** od opevanega izkoristka LED-svetil v enosmernem krogu brez krmilnikov moči.

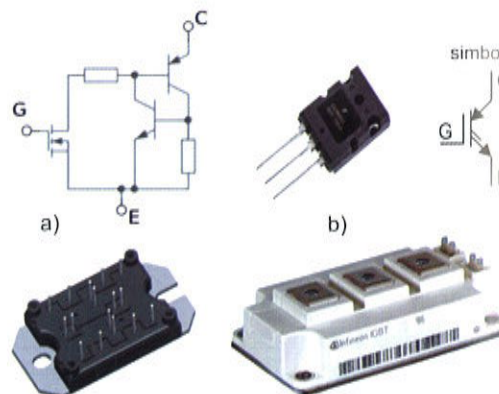
22.1.5 IGBT¹-tranzistor

⇒ IGBT je **močnostni** hibrid-tranzistor, zgrajen na osnovi **MOS-FET**-a in **bipolarnega** tranzistorja (sl. 22.16 a)) in **združuje** prednosti obeh.

IGBT ima na **vhodu** lastnosti **MOS-FET** z **veliko** vhodno upornostjo, na **izhodu** pa lastnosti bipolarnega tranzistorja z **veliko** prevodnostjo odprtega tranzistorja. Izgubna moč takega tranzistorja je **manjša** kot pri MOS, izhodne prebojne napetosti so veliko **večje**, mogoči so tudi veliko **večji** toki. Vezani v bloke (sl. 16 b)) dosegajo napetosti čez **6 kV** in toke čez **3 kA**. Navedene lastnosti omogočajo uporabo IGBT za delovanje napetostnih, frekvenčnih in solarnih **pretvornikov**, močnostnih **krmilnikov** naprav, električnih **avtomobilov** ... IGBT praktično ne rabi krmilne moči, je pa krmilni del **občutljiv** na **statično** elektriko.



Slika 22.15: Krmiljenje moči s triakom



Slika 22.16: Nadomestna vezava: a) simbol in b) izvedbe IGBT

22.2 VEZAVE MOČNOSTNE ELEKTRONIKE

Z obravnavo tiristorja, GTO-tiristorja in IGBT-tranzistorja smo nekako napovedali obravnavo elektronskih vezij za potrebe porabnikov **velikih** moči. Dejstvo pa je, da tudi pri **manjših** močeh porabnikov **neposredna** uporaba električne energije iz **omrežja** pogosto **ni mogoča**.

Stikalne, krmilne in regulacijske naprave, senzorji, računalniki in podobne elektronske naprave potrebujejo za delovanje **enosmerno**

¹ IGBT – iz angl. *Insulated-Gate Bipolar Transistor*.

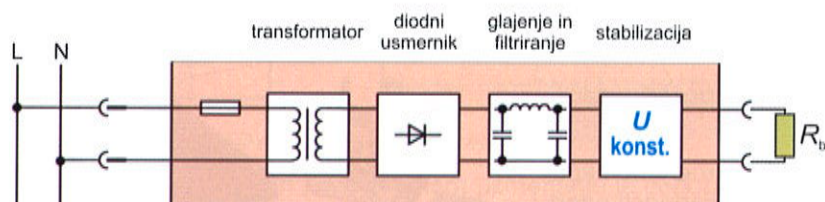
napetost. Osnove usmerjanja enofazne izmenične napetosti smo spoznali v poglavju 16.2.1 o usmerniški diodi ter v poglavjih 16.2.1.1 in 16.2.1.2 o usmerjanju, glajenju in filtriranju usmerjene napetosti. Tu bomo dodali **omrežni napajalnik s stabilizirano** izhodno napetostjo.

Zahtevni sodobni **pogoni** v mehatroniki, kot so električna prevozna sredstva velikih moči, pa tudi srednjih, kot so pogoni v industriji npr. s servomotorji, ne zmorejo **neposredne** pretvorbe električne energije iz **omrežja v mehansko**. Samo **konstantna** enosmerna napetost pa jim, praviloma, tudi ne zadošča.

⇒ **Omrežno** električno energijo za delovanje **elektronskih** naprav ter za potrebe sodobnih pogonov v mehatroniki moramo praviloma **preoblikovati** v električno energijo drugačnih oblik, jo **krmiliti** in **regulirati**.

22.2.1 Usmernik, AC-DC pretvornik, omrežni napajalnik

⇒ Omrežni **napajalnik** je elektronska naprava, ki preoblikuje **omrežno** napetost v **enosmerno**, praviloma stabilno napetost za potrebe določenega porabnika ali skupine porabnikov (sl. 22.17 in 22.18).



Slika 22.18: Struktura omrežnega napajalnika

Na kratko povzemimo osnove usmerjanja iz prej omenjenih poglavij:

- ⇒ Prek **transformatorja** in **mostične** vezave diod usmerimo izmenično napetost **230 V/50 Hz** v polnovalno **pulzirajočo** napetost (sl. 22.19).
- ⇒ **Srednja** vrednost tako usmerjene napetosti $\bar{u} = U_{DC}$ je nekoliko **nižja** od njene **efektivne** vrednosti U (sl. 22.19).
- ⇒ S **kondenzatorjem**, vezanim **vzporedno s porabnikom**, pulzirajočo napetost v veliki meri **zgladimo** (sl. 22.20).
- ⇒ **Manjšo** valovitost dosežemo z **večjo** kapacitivnostjo kondenzatorja, **večjo** upornostjo bremena in **višjo** frekvenco (pogl. 16.2.1.2).
- ⇒ Nadaljnje **zmanjšanje** valovitosti **zglajene** napetosti izvajamo s **filtriranjem** ostanka izmenične napetosti z **LC-filtri** (sl. 22.18).

22.2.1.1 Stabilizacija napetosti napajalnika

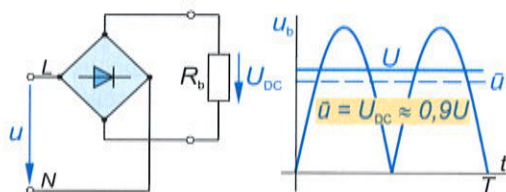
Zahtevnejše elektronske naprave potrebujejo za kakovostno delovanje **stabilno** enosmerno napajalno napetost tudi med manjšimi **niha-nji** omrežne napetosti ali manjšimi spremembami notranje **upornosti** naprave (bremena). Osnovni način stabilizacije smo spoznali pri obravnavi Z-diode (pogl. 16.2.2), v nadaljevanju pa se bomo seznanili še z nekaterimi drugimi izvedbami stabilizacije napetosti napajalnikov.

Stabilizacija napetosti z **zaporednim tranzistorjem** (sl. 22.21) je zanimiva zaradi načina, ki ga uporabljajo tudi zmogljivejši stabilizatorji, tudi v integrirani izvedbi. Stabilizacija temelji na dejstvih:

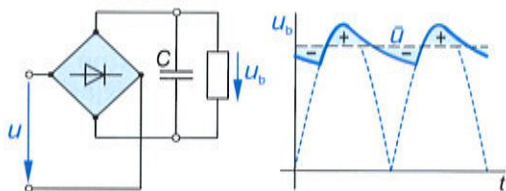
- zaporedna vezava tranzistorja in bremena je **delilnik** napetosti,
- **upornost** tranzistorja **reguliramo** s krmiljenjem U_{BE} ,
- **vsota** napetosti U_{BE} in U_b je določena z U_z in je **konstantna**.



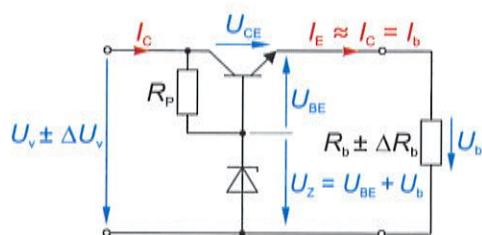
Slika 22.17: Izvedbe omrežnih napajalnikov



Slika 22.19: Enofazno polnovalno usmerjanje



Slika 22.20: Glajenje usmerjene napetosti



Slika 22.21: Stabilizacija napetosti s tranzistorjem

Sprememba vhodne **napetosti** ali **upornosti** bremena sicer povzroči manjšo kratkotrajno spremembo napetosti na bremenu U_b , toda za toliko se zaradi $U_Z = k$ spremeni tudi napetost U_{BE} . Samodejne spremembe U_{BE} regulirajo upornost tranzistorja tako, da napetost na bremenu ostaja znotraj potrebnih meja.

Opisana stabilizacija deluje le, če je **vhodna** napetost $U_i \pm \Delta U_i$ stabilizatorja **večja** od izhodne U_b . Stabilizacija je **učinkovitejša** pri **večji** razliki omenjenih napetosti, ki pa je, žal, prisotna v obliki padca napetosti na tranzistorju U_{CE} , zaradi česar se tranzistor lahko močno **greje**, ustvarja toplotne **izgube** in je toplotno **ogrožen**.

Če učinkovitost krmiljenja bazne napetosti U_{BE} povečamo z **operacijskim ojačevalnikom**, dodamo temperaturno stabilizacijo ... in vse zapakiramo v čip, dobimo **integrirano** izvedbo **napetostnih regulatorjev** za **konstantno** (sl. 22.22) ali **nastavljivo** (sl. 22.23) stabilizirano izhodno napetost.

Pri vseh navedenih stabilizacijah je prisotna relativno velika **izgubna moč** $P_i = I_C \cdot U_{CE}$, ki povzroča izdatno **segrevanje** zaporednega tranzistorja oziroma celotnega čipa in narekuje **odvajanje toplote** s hladilnikom (sl. 22.24). Segrevanje je še posebej veliko pri večjih razlikah med vhodno in izhodno napetostjo (U_{CE}), kar močno zmanjšuje tudi izkoristek stabilizatorja.

⇒ Izgubno moč stabilizatorja **zmanjšamo** z odpravo zaporednega tranzistorja (sl. 22.21).

Zaporedni regulacijski tranzistor lahko odpravimo, če usmerjeno napetost preoblikujemo v **impulzno** in stabilizacijo **srednje** vrednosti napetosti izvedemo s **širinsko modulacijo** impulzov (PWM, sl. 22.25).

22.2.1.2 Napajalnik večje moči

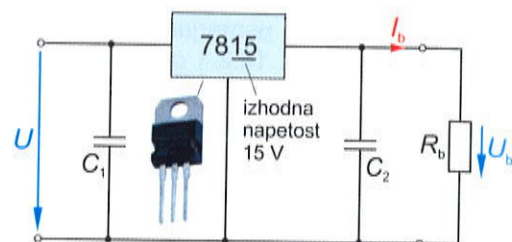
Struktura napajalnikov večje moči je praktično enaka, kot je že opisana. Potrebujemo le močnejši usmernik, ki je praviloma trifazni, diodni (sl. 22.26 in 22.27) ali tiristorski (sl. 22.29). Take napajalnike, pogosto jim pravimo kar usmerniki, uporabljamo v industriji za pogon in krmiljenje motorjev, v storitveni dejavnosti za polnjenje akumulatorjev ...

Trifazni usmernik

Pri trifaznem **polvalnem** usmerjanju imamo po **eno diodo** na linijski vodnik (sl. 22.26 a)). Za **prepustno** polarizacijo diode morata biti potenciala **anod** drugih dveh diod **nižja** od potenciala **katode** prve.

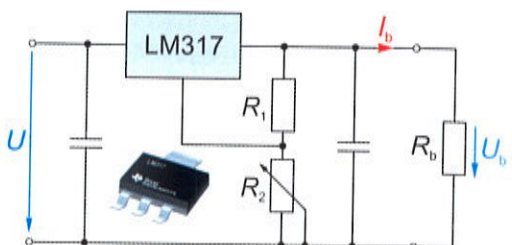
- ⇒ Pri **trifazni** napetosti imamo **tri** napetostne **impulze** na periodo (sl. 22.26 b)), zato že pri polvalnem usmerjanju napetost na porabniku v nobenem trenutku periode **ne pade** na **0 V**.
- ⇒ V periodi 360° prevaja vsaka od diod po 120° .
- ⇒ **Srednja** napetosti $\bar{u}$ trifaznega polvalnega usmerjanja je **večja** kot pri polnovalnem usmerjanju enofazne napetost (sl. 22.26 b) in pregl. 22.1).

Veliko manjša je v omenjeni primerjavi tudi **valovitost**, zato se že s **polvalnim** trifaznim usmerjanjem lažje približamo enosmerni napetosti in njeni manjši občutljivosti na obremenitev. Slaba stran usmernika na sliki 22.26 a) je njegovo delovanje v **4-vodnem** trifaznem sistemu (potrebuje četrti vodnik) in da je glede na možnosti trifaznega sistema njegova napetost relativno nizka.



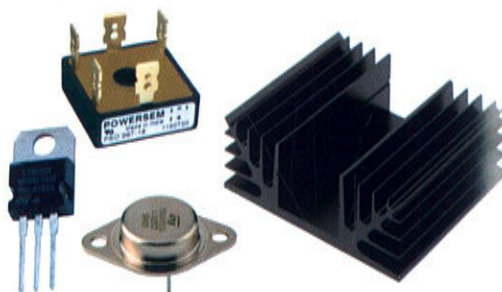
78: pozitivna izhodna napetost 79: negativna izhodna napetost

Slika 22.22: Stabilizacija fiksne napetosti

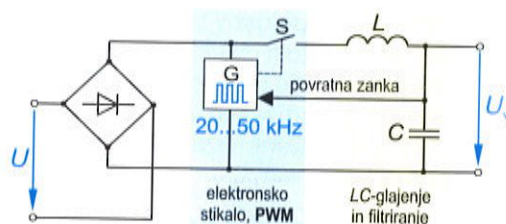


$$U_b = 1,25 \cdot (1 + R_2/R_1) \quad U_b = 1,25 \dots 37 \text{ V}$$

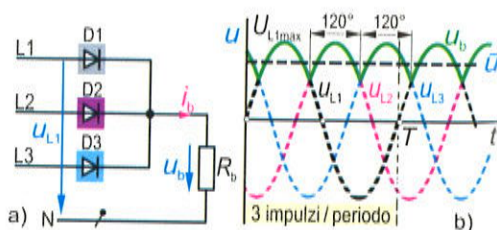
Slika 22.23: Stabilizacija nastavljive napetosti



Slika 22.24: Hladilnik polprevodniških komponent napajalnikov manjše moči



Slika 22.25: Stikalni stabilizator (principlno)



Slika 22.26: Trifazno polvalno usmerjanje

Primer:

Porabnik z ohmsko upornostjo $50\ \Omega$ je priključen prek polvalnega usmernika v 4-vodni trifazni sistem $230\ \text{V}/400\ \text{V}$ (sl. 22.26). Izračunamo srednjo napetost U_{DC} in tok I_{DC} porabnika in srednji tok posamezne idealizirane diode.

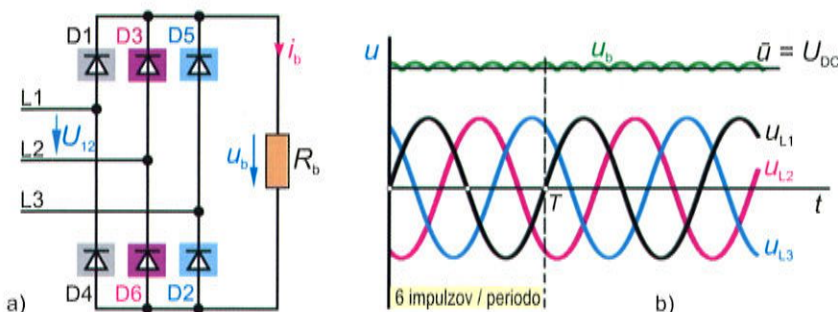
Srednja napetost in tok porabnika sta ob upoštevanju preglednice 23.1:

$$U_{DC} = 1,18 \cdot U = 1,18 \cdot 230 = 271\ \text{V} \quad \text{in} \quad I_{DCb} = U_{DC} / R_b = 271 / 50 = 5,42\ \text{A}$$

Vsaka dioda prispeva $1/3$ srednjega toka porabnika:

$$I_{DC-dioda} = I_{DCbremena} / 3 = 5,42 / 3 = 1,8\ \text{A}$$

Pomanjkljivost polvalnega usmerjanja v 4-vodnem sistemu odpravimo s **polnovalnim** usmerjanjem v 3-vodnem sistemu. Za to potrebujemo vezavo **šestih** diod (po dve na linijski vodnik, sl. 22.27 a)), priključeno na **medlinjske** napetosti.



Slika 22.27: Trifazni polnovalni usmernik

Pogoj prevajanja diod pri **polnovalnem** usmerjanju je podoben kot pri polvalnem, le da sta **prepustno polarizirani** vedno po **dve** diodi (sl. 22.27). Posledično imamo **dvakratno** število napetostnih impulzov na periodo, **6** (sl. 22.27 b)), prevajanje dvojice diod pa je 60° .

- ⇒ **Srednja vrednost** usmerjene napetosti je praktično enaka **temenski** napetosti, **valovitost** napetosti pa je le **minimalna** (pregl. 22.1).
- ⇒ **Izhodna napetost** in **moč** polnovalno usmerjene trifazne napetosti sta skoraj **dvakratna** efektivna fazna napetost in moč (pregl. 22.1).

Primer:

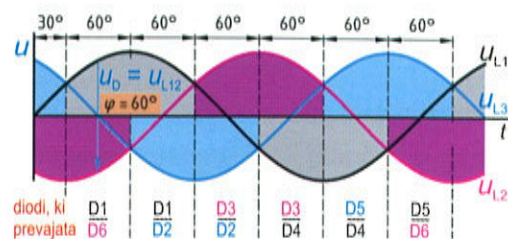
Porabnik z ohmsko upornostjo $150\ \Omega$ je priključen prek polnovalnega usmernika v 3-vodni trifazni sistem $230\ \text{V}/400\ \text{V}$ (sl. 22.27). Izračunamo srednjo napetost U_{DC} in tok I_{DC} porabnika.

Srednja napetost in tok porabnika sta ob upoštevanju preglednice 23.1:

$$U_{DC} = 1,35 \cdot U = 1,35 \cdot 400 = 540\ \text{V} \quad \text{in} \quad I_{DCb} = U_{DC} / R_b = 540 / 150 = 3,6\ \text{A}$$

Z obravnavanimi **diodnimi** usmerniki pretvorimo izmenično napetost v **fiksno** enosmerno napetost. Če pa želimo pri isti vhodni izmenični napetosti izhodno enosmerno napetost **spreminjati** (krmiliti, regulirati), uporabimo namesto diodnega **tiristorskega** usmernika (sl. 22.29 a)).

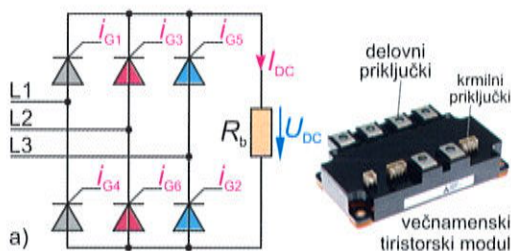
Z elektronskim vezjem generiramo v tem primeru krmilne impulze toka I_G tako, da istočasno prevajata po **dva** tiristorja (podobno kot pri trifaznem diodnem usmerniku). S krmiljenjem kota **faznega reza α** za dvojico tiristorjev krmilimo srednjo vrednost usmerjene napetosti porabnika U_{DC} . Pri $\alpha = 0^\circ$ še ni faznega reza, zato usmernik deluje »na polno« kot **diodni** usmernik. S **povečevanjem** kota faznega reza **zmanjšujemo** usmerjeno napetost U_{DC} zvezno proti nič. Časovni potek napetosti u_{DC} (u_{ba}) na bremenu ima v danem primeru dokaj zahtevno ozadje, zato ima slika 22.29 b) bolj informativni pomen.



Slika 22.28: Prevajanje diod pri trifaznem polnovalnem usmerjanju

Preglednica 22.1: Lastnosti usmeriških vezav

usmerjanje ter potek in vrednosti usmerjene napetosti	
enofazno, polnovalno 	$U = 230\ \text{V}$ $U_m = \sqrt{2} \cdot U = 325\ \text{V}$ $U_{DC} = 0,9 \cdot U = 207\ \text{V}$ $w = 0,48$
trifazno, polnovalno, 4-vodno 	$U = 230\ \text{V}$ $U_m = \sqrt{2} \cdot U = 325\ \text{V}$ $U_{DC} = 1,18 \cdot U = 269\ \text{V}$ $w = 0,18$
trifazno, polnovalno, 3-vodno 	$U = 400\ \text{V}$ $U_m = \sqrt{3} \cdot U = 565\ \text{V}$ $U_{DC} = 1,35 \cdot U = 540\ \text{V}$ $w = 0,04$



Slika 22.29: Krmiljeni trifazni tiristorski usmernik

22.2.2 Pretvornik DC-AC (razsmernik)

⇒ Razsmernik je elektronsko vezje ali naprava, ki **enosmerno** napetost 12 V, 24 V ali več 100 V (sončne elektrarne) preoblikuje v **izmenično** enofazno 230 V ali trifazno 400/230 V.

V praksi uporabljamo **samostojne** razsmernike (sl. 22.30), pogosto pa je razsmernik sestavni del naprave, kot je npr. **servopretvornik** (pogl. 23.3.4.2). V obeh primerih **enosmerno** napetost z elektronskimi stikali (sl. 22.31) preoblikujemo v **izmenično** napetost, najprej **pravokotne** oblike z določeno **frekvenco**, ki jo v nadaljevanju po potrebi bolj ali manj približamo **sinusni** obliki.

Od **avtomobilskih** akumulatorskih razsmernikov in razsmernikov manjših otočnih sončnih elektrarn (sl. 22.30 a)) praviloma ne zahtevamo idealne sinusne oblike in zelo točne frekvence, ker to večina na ta način napajanih naprav ne zahteva. Drugače pa je z razsmerniki npr. **omrežnih** sončnih elektrarn (sl. 22.30 c)), katerih **oblika** in **frekvenca** izhodne napetosti se morata povsem ujemati z omrežno napetostjo.

Za pretvorbo **enosmerne** napetosti v **pravokotno** najpogosteje uporabljamo **izmenično mostično** vezavo **močnostnih** tranzistorskih stikal (sl. 22.31). Z **IGBT**-tranzistorji (Q, sl. 22.31) izdelujemo enofazne razsmernike z močjo do pribl. **10 kW** in trifazne (sl. 22.32) tudi z močjo čez **1 MW**.

22.2.2.1 Enofazni razsmernik

Za enofazni razsmernik potrebujemo **štiri** tranzistorska stikala **Q** v mostični vezavi, ki jih **procesorsko** krmilimo tako, da **izmenično diagonalno** prevajata po **dve** stikali (sl. 22.31). Z »vključitvijo« stikal Q1/Q4 priključimo porabnik na **enosmerno** napetost **U**, s preklpom na stikali Q3/Q2 pa na napetost **-U**. Pri določeni krmilni frekvenci je porabnik priključen na izmenično napetost pravokotnih impulzov, kar določenim porabnikom že zadostuje. Pri **RL**-porabnikih (motor) pa morajo tranzistorji imeti vzporedne zaporno polarizirane diode, ki po izklopu stikal zmanjšujejo učinek napetosti **lastne indukcije** v navitjih porabnika na tranzistorje.

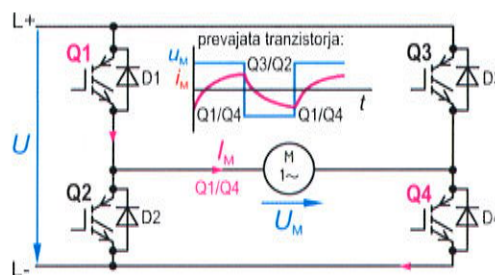
22.2.2.2 Trifazni razsmernik

Za trifazni razsmernik potrebujemo **šest** tranzistorskih stikal **Q** v **mostični** vezavi (sl. 22.32). **Procesorsko** jih krmilimo tako, da hkrati prevajajo diagonalno po **tri** stikala (sl. 22.32 a) in b)) tako, da na bremenih trifaznega porabnika dobimo za **120°** premaknjene **stopničaste** izmenične napetosti (sl. 22.32 c)).

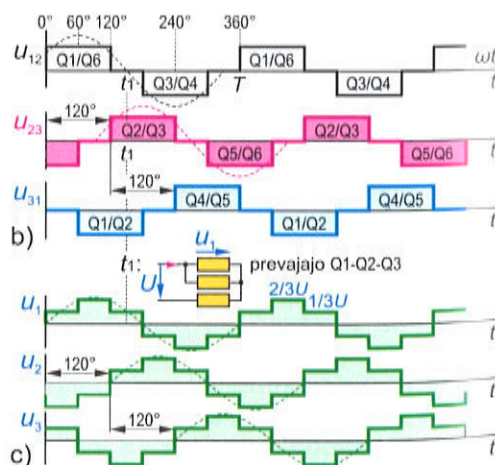
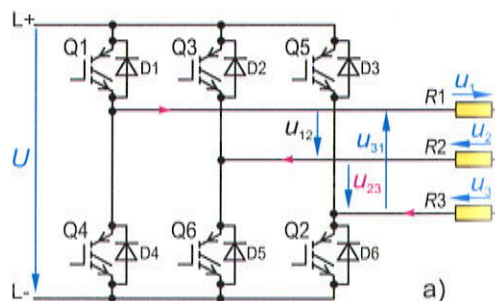
Stopničasta oblika je grob **približek** sinusne oblike (sl. 22.32 b)), ki pri manj zahtevnih trifaznih pogonih lahko že zadostuje. Z boljšimi približki sinusne oblike dobimo predvsem **enakomernejši** potek **navora** trifaznih asinhronskih motorjev. Boljše sinusne oblike dobimo najpogosteje z nekoliko drugačnim krmiljenjem stikal in **pulzno širinsko modulacijo** (PWM, sl. 22.39). Stikala pretvornika s PWM krmilimo tako, da časovni potek **srednjih vrednosti** dobljenih impulzov predstavlja boljši približek sinusne napetosti. Čim **višja** je frekvenca PWM, tem boljši je približek, zadovoljive rezultate pa dosežemo s frekvenco pribl. **20 kHz**. V podobni vlogi se bomo s PWM boljše seznanili pri frekvenčnem pretvorniku v naslednjem poglavju.



Slika 22.30: a) Avtomobilski razsmernik, b) razsmernik USV in c) razsmernik sončne elektrarne, 8 kW



Slika 22.31: Enofazni pretvornik DC-AC v mostični vezavi



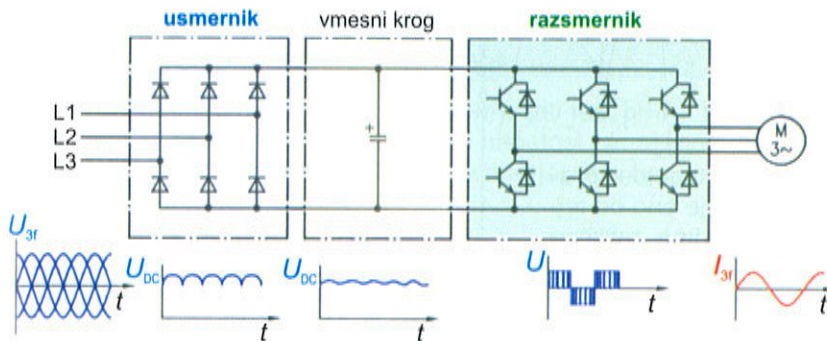
Slika 22.32: Trifazni pretvornik DC-AC v mostični vezavi

22.2.3 Frekvenčni pretvornik

Pogoni mehatronskih sistemov narekujejo tudi **zvezno** krmiljenje in regulacijo npr. **vrtljajev, navora** ... trifaznih asinhronskih motorjev. Vrtljaji teh motorjev so odvisni od **frekvence** ($n = f \cdot 60/p$) in napetosti, ki pa sta v omrežju **konstantni** (400 V / 230 V/50 Hz) in omogočata le **konstantne** vrtljaje. Trifazno napetost s **spremenljivo** napetostjo in frekvenco lahko dobimo s **pretvorniki frekvence** (sl. 22.33).

⇒ **Frekvenčni pretvornik** je elektronska naprava, ki preoblikuje enofazno ali trifazno izmenično **omrežno** napetost v enofazno ali trifazno napetost **spremenljive velikosti in frekvence**.

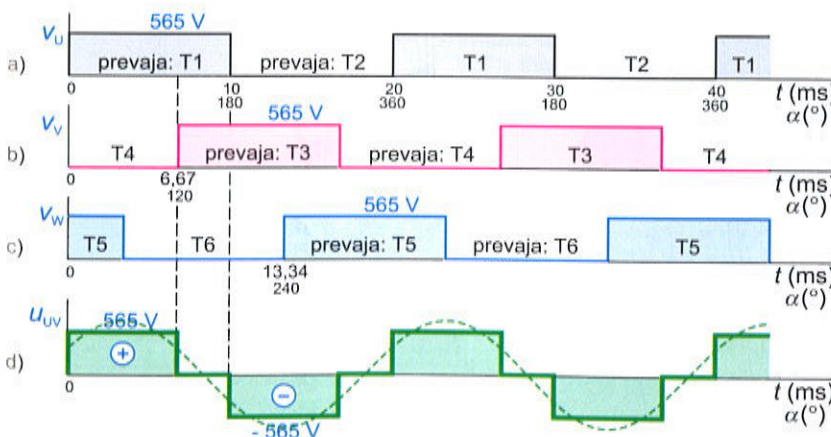
Sestavni deli frekvenčnega pretvornika so eno- ali trifazni polnovalni diodni ali tiristorski **usmernik** (sl. 22.34 in 35), enosmerni **vmesni krog** (①), **razsmernik**, procesorsko zasnovan **krmilnik** in **upravljalna enota**.



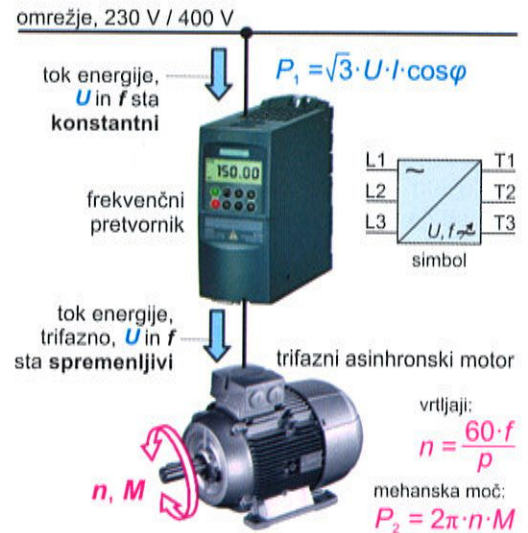
Slika 22.34: Osnovni sestavni deli frekvenčnega pretvornika

Razsmernik za preoblikovanje enosmerne napetosti v trifazno izmenično napetost smo spoznali v prejšnjem poglavju. **Mehatronski** pogoni potrebujejo izmenično napetost s karseda **pravilno sinusno** obliko in frekvenčni pretvornik ima že tak razsmernik. Oglejmo si ga na primeru preoblikovanja **omrežne** trifazne napetosti **400/230 V, 50 Hz** v trifazno napetost s **spremenljivo** napetostjo in frekvenco.

Pri neobremenjenem razsmerniku dobimo na njegov vohod **enosmerno** napetost, ki je enaka praktično **najvišji** medfazni napetosti **565 V**. Za izhodno napetost s frekvenco **50 Hz** bo krmilnik upravljal s tranzistorskimi **stikali Q** razsmernika tako, da bosta hkrati prevajali po **dve** stikali, na posameznem bremenu R_b (sl. 22.36) pa bomo dobili potek potencialov v_u, v_v in v_w , kot prikazuje slika 22.37.

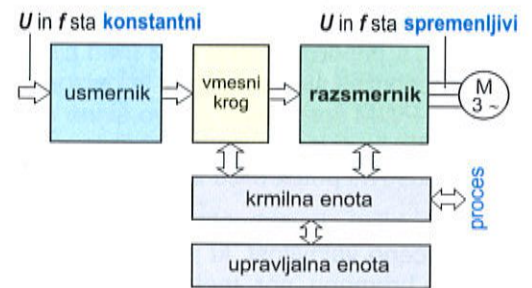


Slika 22.37: Izhodni potenciali in napetosti razsmernika

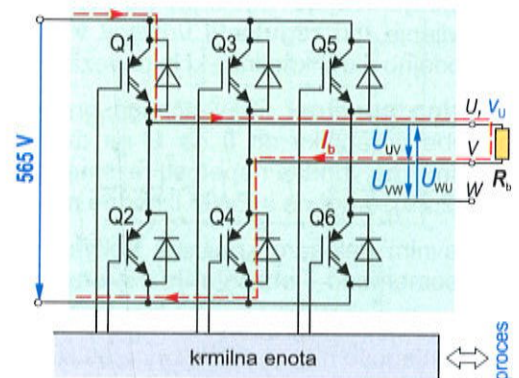


Slika 22.33: Pogon s frekvenčnim pretvornikom

Enosmerni vmesni krog je vezje med izhodom **usmernika** in vohod **razsmernika**. Poleg gladilnega kondenzatorja lahko vsebuje še elemente **filtriranja**, ohmsko upornost za **zaviranje** motorja (chopper) ...



Slika 22.35: Shema frekvenčnega pretvornika



Slika 22.36: Trifazni razsmernik z IGBT

Pri frekvenci 50 Hz je perioda T 20 ms in polperioda 10 ms. Pri **odprtem** stikalu **Q1** v prvih desetih ms bo potencial v_U izhoda **U** (sl. 22.36 in 22.37 a)) 565 V. V naslednjih desetih ms pa odprto stikalo **Q2** isti izhod kratko sklene na potencial **0 V** (sl. 22.37 a)).

Potenciali izhoda **V** si morajo slediti na enak način, le zamaknjeni morajo biti glede na potenciale izhoda **U** za kot 120° . To ustreza $1/3$ periode oziroma pri periodi 20 ms času 6,67 ms (sl. 22.37 b)). Podobno velja tudi za potenciale izhoda **W** (sl. 22.37 c)). Zaradi boljše preglednosti je prikazan tok le enega bremena trifaznega porabnika (sl. 22.36), in sicer za primer odprtih stikal **Q1** in **Q4**.

Napetost med linijskima vodnikoma (medfazna napetost) na izhodu razsmernika dobimo kot **razliko** potencialov vodnikov. Za napetosti med priključkoma **U** in **V** (sl. 22.38 d)) velja:

$$\alpha = 0^\circ \dots 120^\circ \Rightarrow U_{UV} = V_U - V_V = 565 - 0 = 565 \text{ V}$$

$$\alpha = 120^\circ \dots 180^\circ \Rightarrow U_{UV} = V_U - V_V = 565 - 565 = 0 \text{ V}$$

$$\alpha = 180^\circ \dots 300^\circ \Rightarrow U_{UV} = V_U - V_V = 0 - 565 = -565 \text{ V}$$

$$\alpha = 300^\circ \dots 360^\circ \Rightarrow U_{UV} = V_U - V_V = 0 - 0 = 0 \text{ V}$$

Na opisani način dobimo na izhodu trifazno izmenično napetost **pravokotne** oblike s frekvenco **50 Hz**. Slika 22.37 d) prikazuje eno od teh napetosti. Z drugačnim krmiljenjem stikal lahko ustvarimo različne **modificirane** »sinusne« oblike (sl. 22.38), katerih približki sinusu so odvisni od potreb in zmogljivosti ter s tem cene krmilnika.

Sinusno obliko iz pravokotne (sl. 22.37 d)) lahko dobimo pri **manjših** močeh s filtriranjem in ojačenjem **prve harmonske** komponente. Za večje moči pa to največkrat naredimo s **PWM** (sl. 22.39, idealizirano). Slika ustreza frekvenci »sekanja« impulza (sl. 22.37 d)) približno 1,2 kHz, s priporočeno **20 kHz** (nad slišno) pa bi se s PWM že zadovoljivo približali **sinusni** obliki. Impulzom s **konstantno** frekvenco procesor s PWM spreminja njihovo širino t_i znotraj **konstantne** periode T (sl. 22.39) in s tem njihovo **srednjo** vrednost v periodi T tako, da je njihov časovni potek blizu **sinusni** obliki.

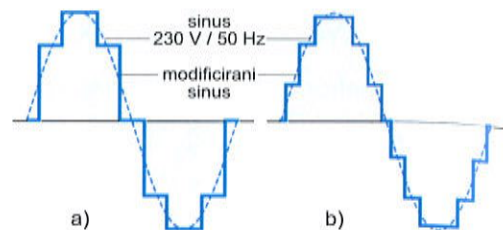
Še manj blizu sinusni obliki je časovni potek **toka** (sl. 22.40). Ta ima še določeno valovitost, ki je v danem primeru posledica induktivnega značaja bremena, npr. motorja in impulznega načina napajanja. Potek toka izboljšamo z **višjo frekvenco** PWM in akumulirano energijo v vmesnem krogu frekvenčnega pretvornika.

Drugačni parametri **časa** v programu krmilnika (sl. 22.36) vodijo v **višjo** ali **nižjo frekvenco** izhodne napetosti frekvenčnega pretvornika. Pri **krmiljenju vrtljajev** motorjev ($n \sim f$) jih upravljamo ročno na enoti za upravljanje, pri **regulaciji** vrtljajev v tehnološkem procesu pa za to samodejno skrbi krmilnik, ki je povezan s procesom.

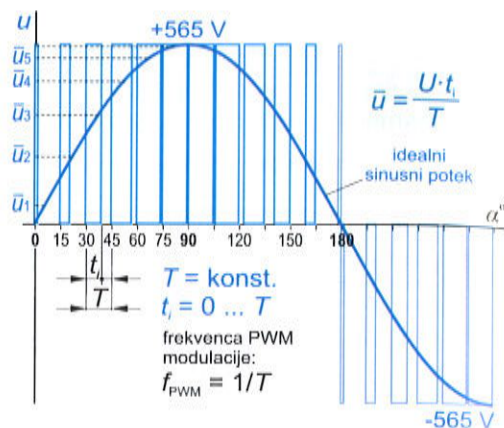
Izhodno napetost frekvenčnega pretvornika lahko spreminjamo za potrebe porabnika od **0** do **U** na dva načina. Prvi je s krmiljenjem **enosmerne** vhodne napetosti razsmernika s **tiristorskim** usmernikom (sl. 22.29), drugi pa s PWM izhodne napetosti (sl. 22.36).

Zahtevnim nalogam krmilnika frekvenčnega pretvornika dodajmo še eno pomembno – **ohranjanje navora** pri frekvencah, nižjih od 50 Hz.

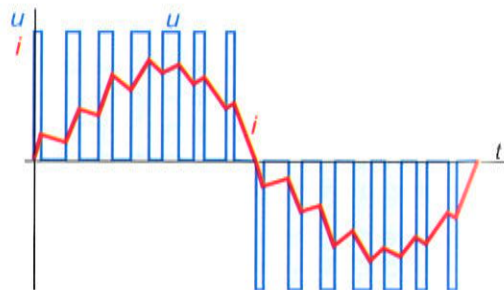
⇒ **Navor** trifaznega frekvenčno krmiljenega motorja je od **nekaj Hz** do njegove nazivne frekvence **50 Hz** (sl. 22.41) praktično enak **nazivnemu** M_N oziroma je **neodvisen od vrtljajev**.



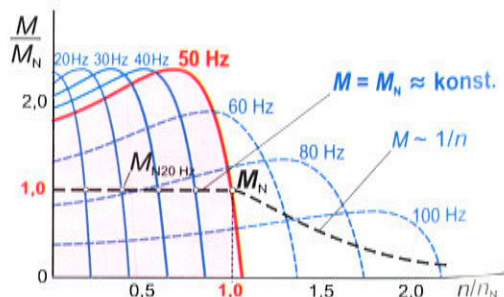
Slika 22.38: a) Modificirana in b) izboljšana modificirana oblika sinusne napetosti



Slika 22.39: Pulzno-širinska modulacija sinusne napetosti



Slika 22.40: Tok servomotorja



Slika 22.41: Relativna karakteristika M - n napajanja s frekvenčnim pretvornikom

Dejstva asinhronskega motorja, ki so osnova za frekvenčni krmilnik:

- za navor asinhronskega motorja velja $M \sim \Phi$;
- magnetni pretok rotorja Φ je določen s tokom statorja I_1 , ta pa z vhodno impedanco motorja $I_1 = U_1/Z \approx U_1/2\pi \cdot f \cdot L$;
- če pri $U_1 = k$ znižamo frekvenco napajalne napetosti motorja f pod $f_N = 50$ Hz, se sorazmerno povečajo tok I_1 , Φ in M ;
- če želimo pri frekvencah, nižjih od 50 Hz, obdržati $M = M_N = k$, moramo ohraniti $I_1 = k$ in posledično $U_1/f = k$, kar pomeni:

⇒ Za ohranjanje **konstantnega** nazivnega navora motorja M_N pri **frekvencah**, ki so **nižje** od **nazivne**, je treba premo sorazmerno **zmanjšati** tudi priključno **napetost** motorja (sl. 22.42).

Z **linearnim** zmanjševanjem $U \sim f$ proti 0 zaidemo v problem **zagona** motorja, saj je ta nekoliko večji od nazivnega. Zato pri $f < 15$ Hz padanje napetosti v primerjavi s frekvenco **upočasnim** (sl. 22.42).

⇒ Potrebni **dvigu** izhodne napetosti frekvenčnega pretvornika pri **nizkih** frekvencah pravimo tudi **boost**¹ napetost (sl. 22.42).

Če bi konstantni navor motorja hoteli ohranjati tudi pri $f > f_N$, bi morali ohranjati tudi razmerje $U_1/f = k$. Ker pa napetost U_1 ne more biti večja od napajalne (omrežne), omenjeno razmerje in s tem **navor** s frekvenco hitro **padata** (sl. 22.41).

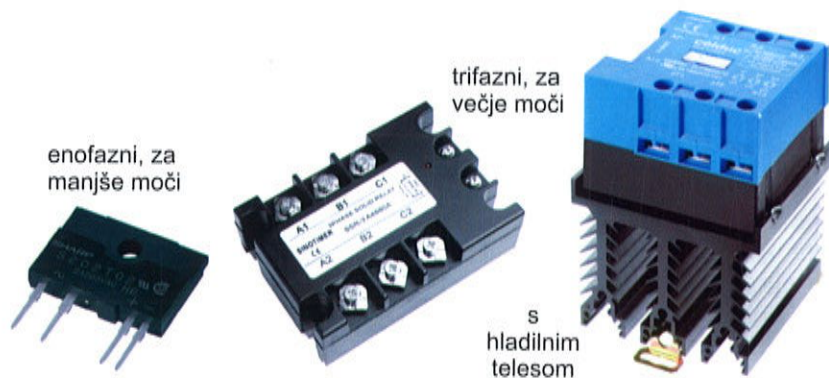
22.2.4 Polprevodniški rele

⇒ **Polprevodniški** (SSR² ali tudi elektronski, sl. 22.43) **rele** sestavljajo samo **polprevodniške** komponente.

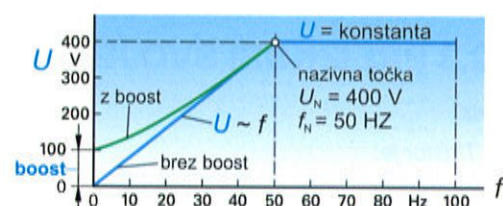
Za SSR ni nujno, da je to element samo močnostne elektronike, saj se kot stikalni element množično uporablja tudi pri manjših močeh (sl. 22.44). Pri večjih močeh pa je sestavljen iz **vhodnega** krmilnega dela z **optičnim spojnikom** (sl. 22.44) in krmiljenega **izhodnega** energetskega dela s **tiristorji**, **triaki** ali **IGBT-tranzistorji** (sl. 22.45), ki nadomeščajo mehanske kontakte elektromagnetnih relejev in kontaktorjev.

⇒ **SSR** (sl. 22.43) so **brezkontaktni**, delujejo **brezšumno**, brez **iskrenja** in **vibracij**, uporabljamo jih lahko tudi v **eksplozijskih** prostorih.

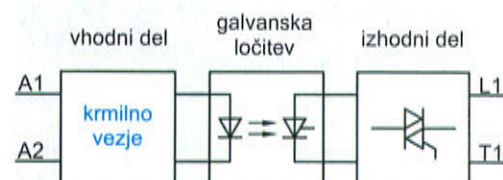
⇒ **SSR** se pri večjih močeh opazno **grejejo**, zato je njihova **moč** določena z močjo polprevodniških stikalnih elementov in **hladilnika**.



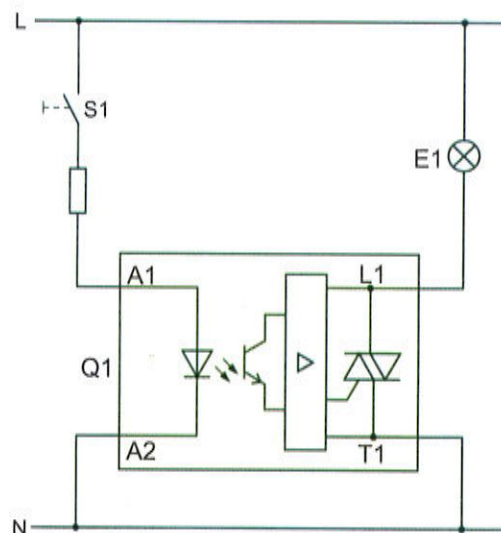
Slika 22.43: Polprevodniški rele za manjše moči (12 V/230 V/2 A, P_{tot} 2,5 W), za večje moči (trifazni, brez hladilnika in s hladilnikom)



Slika 22.42: Karakteristika U-f frekvenčnega pretvornika



Slika 22.44: Zgradba polprevodniškega releja



Slika 22.45: Polprevodniški rele z MOS-FET in triakom

¹ Angl. *boost* – potisniti, dvigniti, tudi ojačiti.

² Angl. od *Solid State Relay*.

Vhodni del releja krmilimo z **enosmerno** napetostjo, npr. 12 V, na izhodni strani pa je najpogostejše **omrežna** napetost, enofazna ali trifazna. **Oznake** krmilnih in delovnih priključkov so enake kot pri elektromagnetnih relejih.

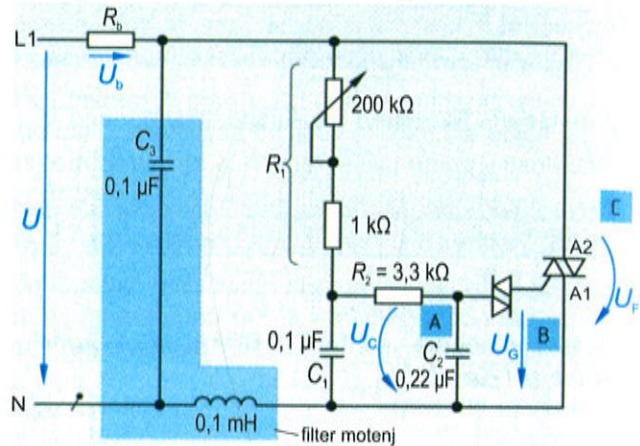
22.3 PREIZKUSI SVOJE ZNANJE

Kviz:

1. Tiristor je:
 - a) krmiljeno enosmerno močnostno brezkontaktno stikalo,
 - b) krmiljeno dvosmerno močnostno brezkontaktno stikalo,
 - c) močnostni tranzistor,
 - d) močnostni hibrid-tranzistor.
2. Prehodu tiristorja v prevodno stanje pravimo:
 - a) preboj,
 - b) vžig,
 - c) ugasnitev,
 - d) propustna polarizacija.
3. V izmeničnem krogu ima tiristor:
 - a) krmilne lastnosti,
 - b) usmerniške lastnosti,
 - c) lastnosti proženja prevajanja toka,
 - d) lastnosti držanja prevajanja toka.
4. Kot vžiga tiristorja znotraj v periodi izmenične napetosti je:
 - a) fazni premik,
 - b) fazni kot,
 - c) kot začetka prevajanja,
 - d) fazni rez.
5. Triak je:
 - a) dioda s tremi PN-prehodi,
 - b) krmilni element toka za največje moči,
 - c) dvosmerno brezkontaktno močnostno stikalo,
 - d) element, ki krmili moč z dvojnimi vžigom v polperiodi.
6. Za proženje triaka potrebujemo:
 - a) krmilne impulze $\pm I_G$ z dvojno frekvenco napetosti,
 - b) v pozitivni polperiodi krmilni impulz $+I_G$, v negativni $-I_G$,
 - c) nastavljeni RC-člen,
 - d) diak.
7. Krmilni element največjih moči, ki ne rabi krmilne moči, je:
 - a) GTO-tiristor,
 - b) IGBT-tranzistor,
 - c) diak,
 - d) triak.
8. Srednja vrednost trifazno polnovalno usmerjene napetosti je:
 - a) 5/6 temenske napetosti,
 - b) 3/9 temenske napetosti,
 - c) $3/\sqrt{3}$ temenske napetosti,
 - d) praktično enaka temenski napetosti.
9. DC-AC pretvornik pretvarja:
 - a) izmenično napetost v enosmerno,
 - b) enosmerno napetost v izmenično,
 - c) enofazno napetost v trifazno,
 - d) enosmerno moč v izmenično.
10. Frekvenčni pretvornik preoblikuje izmenično napetost:
 - a) v izmenično napetost spremenljive frekvence,
 - b) v izmenično napetost spremenljive velikosti in frekvence,
 - c) spremenljive frekvence v napetost stalne frekvence,
 - d) v enako izmenično napetost s stabilno frekvenco

Naloga:

Ohmskemu bremenu $R_b = 46 \Omega$ priključenemu na napetost 230 V (sl. 22.46), želimo krmiliti moč s faznim rezom. Za ustvarjanje krmilnih impulzov za triak BT 137/500 bi uporabili diak BR 100 s prebojno krmilno napetostjo 30 V, z nastavljivo upornostjo R_1 pa bi nastavljali kot vžiga α . Pri izpolnjenem pogoju varnega dela (230 V !!), sestavimo vezavo, jo preizkusimo in opazujemo poteke napetosti v vezavi na osciloskopu (sl. 22.47). Delovanje vezave lahko le analiziramo in narišemo približne poteke napetosti. Zakaj ne moremo doseči kota faznega reza 0° ?



Triak BT 137/500

Katalog:

Vžigni tok $I_{GT} = 30 \text{ mA}$

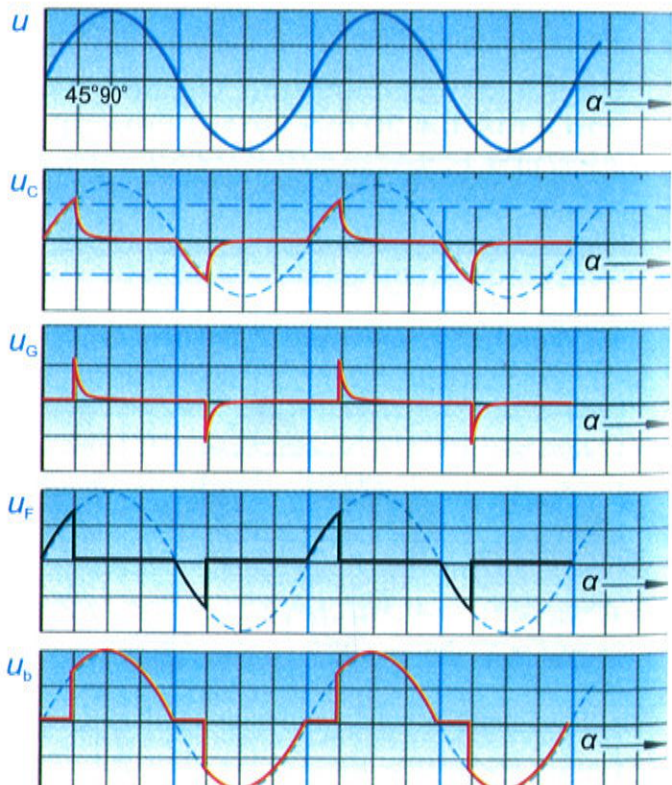
Mejni efektivni tok $I_{T(RMS)} = 8 \text{ A}$

Konična zaporna napetost $U_{RTO} = 500 \text{ V}$

Diak BR 100

Prebojna napetost $U_{BO} = 30 \text{ V}$

Slika 22.46: Krmilnik moči s faznim rezom – naloga 1



Slika 22.47: Potek napetosti – naloga