

**Predmet: ELEKTRONIKA U MEHATRONICI**  
**Predmetni nastavnik: Dr Nándor Burány**

1. Semestar specijalističkih studija iz  
Mehatronike

**3. GLAVA**  
**KOLA ENERGETSKE**  
**ELEKTRONIKE**

## Teme

### ❖ Principi:

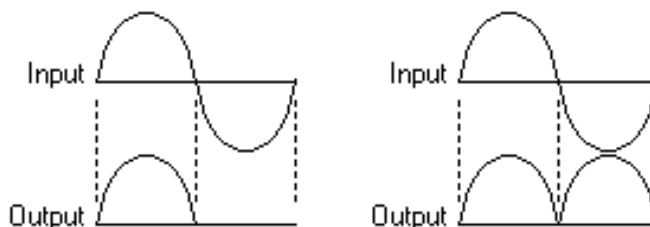
- Ispravljači
- DC-DC pretvarači
- Invertori
- AC-AC pretvarači

### ❖ Primene:

- Napajanja
- Motorni pogoni
- Ostalo

## Usmerači (ispravljači)

- U većini slučajeva električnu energiju uzimamo iz naizmjenične mreže (gradske ili industrijske).
- Ako napajamo jednosmerne potrošače, potrebno je ispraviti napon (struju).
- Usmerač se može priključiti direktno na mrežu ili preko mrežnog transformatora (danas se sve manje primenjuje).
- Korišćene komponente: **diode** (kod običnih usmerača), **tiristori** (kod regulisanih usmerača).



4

### Obični usmerači – jednofazne polutalasne varijante

- Diodna kola napajana iz jedne faze.
- Retko se koriste pošto obično se ne preporučuje opterećenje izvora jednosmernom strujom.
- Ponašanje pri različitim opterećenjima: R, RL, LV.
- Važne jednakosti:  

$$\int_0^T v_L dt = 0 \quad v_L = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

(a)

$v_L = v_s - v_R = 0$

(b)

$v_L = v_s - v_d = 0$

(c)

### Obični usmerači – jednofazne punotalasne varijante

- Uglavnom se koristi mostna sprega sa četiri diode (Graetz-ov spoj).
- Druga mogućnost: transformator sa srednjim izvodom i dve diode.
- Kapacitivni filter na izlazu - izobličava ulaznu struju.

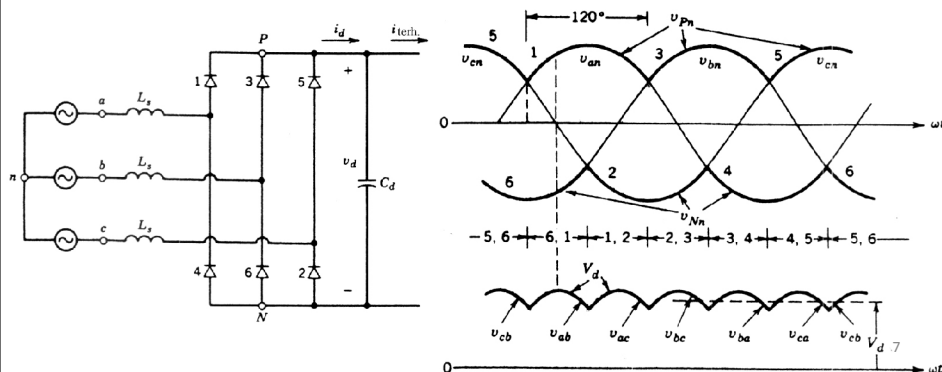
(a)

(b)

Resultant Output Waveform

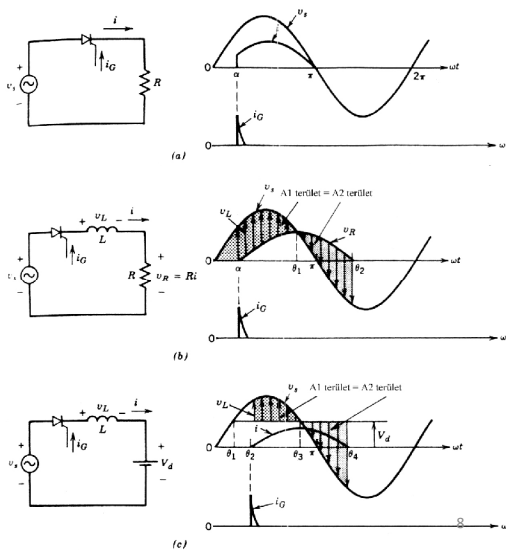
## Obični usmerači - trofazne punotalasne varijante

- Kod većih snaga treba koristiti trofazni usmerač (ravnomerno opterećenje sve tri faze).
- Talasnost izlaznog napona je mala u odnosu na jednofazne usmerače, čak i bez filtracije.



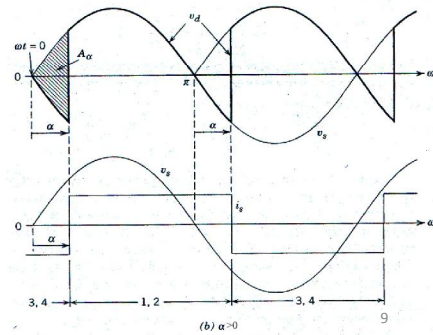
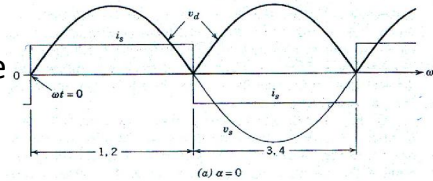
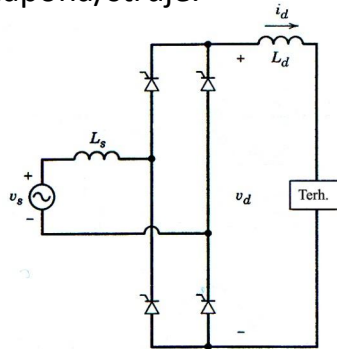
## Regulisani usmerači – jednofazne polutalasne varijante

- Slična su odgovarajućim diodnim kolima, ali se koriste tiristori.
- Zahvaljujući tiristorima može se regulisati jednosmerna komponenta (srednja vrednost) izlaznog napona/struje.



## Regulisani usmerači – jednofazne punotalasne varijante

- Slične su odgovarajućim diodnim kolima.
- Zahvaljujući tiristorima može se regulisati jednosmerna komponenta izlaznog napona/struje.



## Regulisani usmerači – analiza jednofazne punotalasne varijante

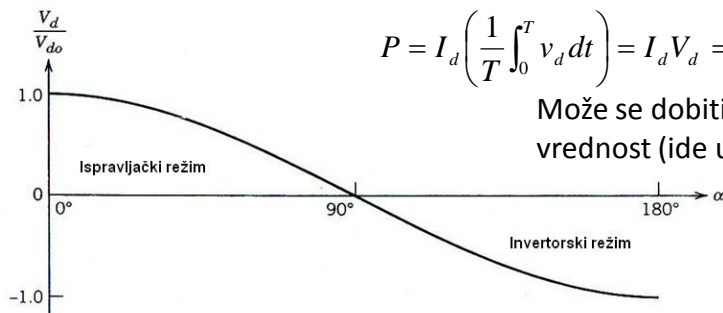
- Srednja vrednost izlaznog napona:

$$V_{d\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} V_s \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_s \cos \alpha \approx 0,9 V_s \cos \alpha$$

- Srednja snaga na izlazu:  $P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T v_d i_d dt$

$$P = I_d \left( \frac{1}{T} \int_0^T v_d dt \right) = I_d V_d = 0,9 V_s I_d \cos \alpha$$

Može se dobiti i negativna vrednost (ide unazad)!



### Regulisani usmerači – analiza trofazne punotalasne varijante

- Maksimalna srednja vrednost izlaznog napona se dobija kada se tiristori zamene diodama:
 
$$V_{do} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \approx 1,35V_{LL}$$
- Ako zakasnimo uključenje tiristora u odnosu na prirodnu komutaciju, prvo dolazi do smanjenja srednje vrednosti izlaznog napona, zatim napon postaje negativan:
- Izlazna snaga se ponaša na sličan način (reguliše se uglom paljenja tiristora i može da menja smer):
 
$$V_{d\alpha} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos \alpha \approx 1,35V_{LL} \cos \alpha$$

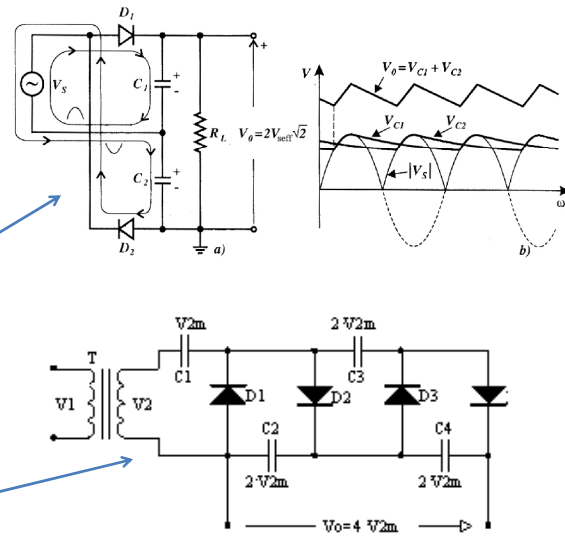
$$P = V_{d\alpha} I_d \approx 1,35V_{LL} I_d \cos \alpha$$

### Regulisani usmerači - vremenski dijagrami za trofaznu punotalasnu varijantu

- Izlazni (usmereni) napon u slučaju diodnog usmerača:
- Ulazni trofazni naponi:
- Prikazivanje efekta kašnjenja paljenja tiristora (fazna regulacija) na faznim naponima:
- Ulazna struja jedne faze:
- Prikazivanje uticaja fazne regulacije:

## Kola za udvostručivanje i umnožavanje napona

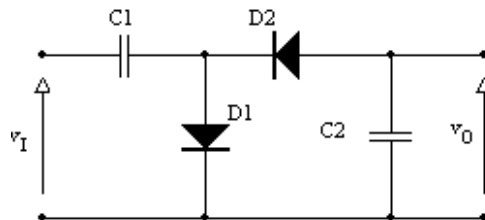
- Udvostručivanje se često koristi kada želimo napajati uređaj projektovan na 230V na 110V. Danas za to postoji i drugo rešenje: podizanje napona pomoću PFC-a.
- Umnožavači služe za dobijanje velikog napona (i male struje).



13

## Invertujući udvostručivač napona

- U pozitivnoj poluperiodi  $C_1$  se puni na amplitudu ulaznog naizmjeničnog napona.
- U negativnoj poluperiodi ulazni napon se sabere sa naponom kondenzatora:  $C_2$  se puni na dvostruku amplitudu.
- Izlaz je negativan u odnosu na zajedničku referentnu tačku.



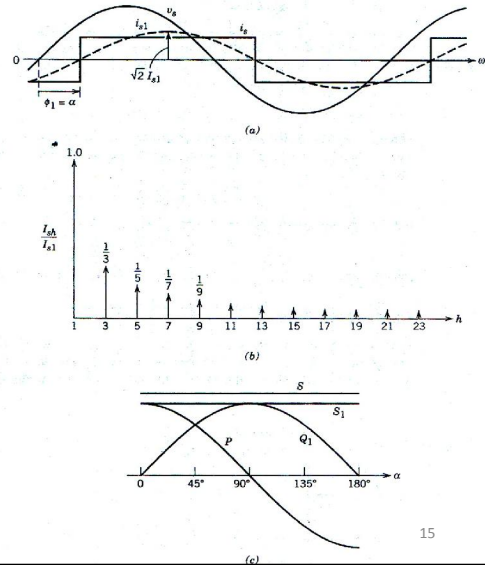
14

### Karakteristike usmerača sa strane izvora - jednofazna varijanta

- Ulazni napon je redovno sinusnog oblika ali ulazna struja niti je sinusna, niti je u fazi sa ulaznim naponom (kasni).

$$I_{s1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d \approx 0,9I_d$$

$$\%THD = 100 \times \frac{\sqrt{I_s^2 - I_{s1}^2}}{I_{s1}} = 48,43\%$$

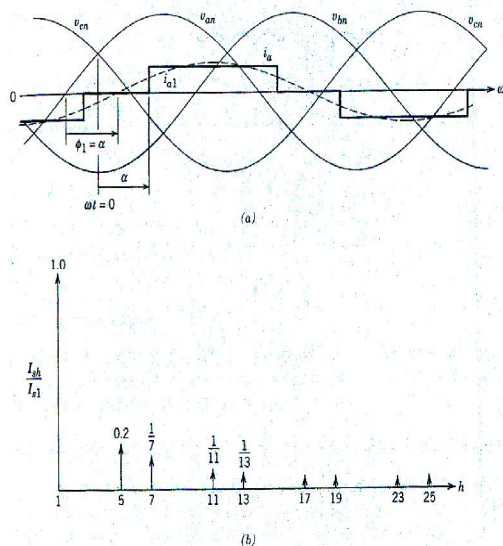


### Karakteristike usmerača sa strane izvora - trofazna varijanta

- Fazne struje su i u ovom slučaju pravougaonog oblika i kasne u odnosu na ulazni napon ali imaju i pauzu.

$$I_{s1} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \approx 0,78I_d$$

$$THD = 31,08\%$$





## Pretvarači jednosmernog napona

- Iz jednog **jednosmernog napona** proizvode **drugi**, manji ili veći **jednosmerni napon**.
- Obično se primenjuje i **regulacija**: time se kompenzuju uticaji promene ulaznog napona i struje potrošača na izlazni napon.
- **Izlazna snaga** je uvek nešto **manja** od ulazne snage - javljaju se gubici.
- Ipak se često uzima da su te dve snage jednake (dobra aproksimacija):  $V_1 I_1 = V_2 I_2$ , odnosno  $V_1/V_2 = I_2/I_1$  (kao kod **idealnog transformatora**, ali ovi rade na jednosmerni napon).

17

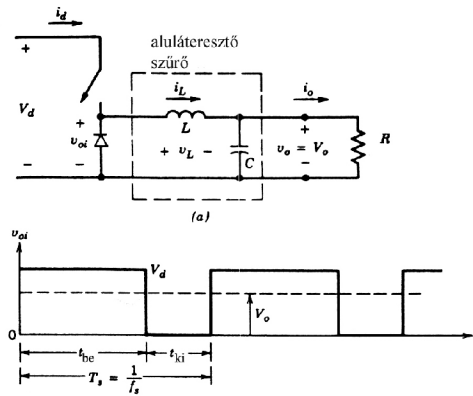
## Klasifikacija jednosmernih pretvarača

- **Osnovni pretvarači:**
  - pretvarač za smanjivanje napona (*buck* pretvarač),
  - pretvarač za povećanje napona (*boost* pretvarač).
- **Izvedeni pretvarači:**
  - pretvarač za smanjivanje-povećanje napona (*buck-boost* pretvarač),
  - Čukov pretvarač,
  - polumostni i mostni pretvarač.
- **Pretvarači dopunjeni sa transformatorom:** u sve navedene pretvarače može se povezati transformator. Zahvaljujući transformatoru napon i struja se mogu menjati u proizvoljnom odnosu, iz jednog pretvarača možemo formirati više izlaza i može se ukinuti galvanska sprega ulaza sa izlazom (izlazom).

18

## Pretvarač za smanjivanje napona (buck pretvarač) - osnovni pojmovi

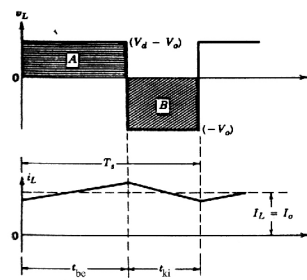
- $V_o < V_i$ .
- Ulazni napon se prekida tranzistorskim prekidačem, zatim se filtrira LC filtrom (peglanje).
- Pored prekidača potrebna je i dioda jer struja kabela neće stati kada se isključi tranzistor.



19

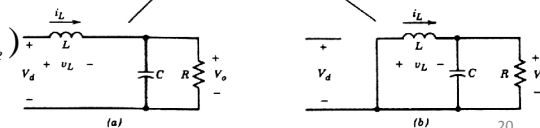
## Analiza buck pretvarača pri kontinualnoj struji prigušnice

- Vremenski dijagrami napona i struje prigušnice.
- Ekvivalentne šeme:
  - pri **uključenom** prekidaču:  $v_L = V_d - V_o$
  - pri **isključenom** prekidaču:  $v_L = -V_o$
- **Proračun izlaznog napona** (fvd=0):



$$(V_d - V_o)t_{be} = V_o(T_s - t_{be})$$

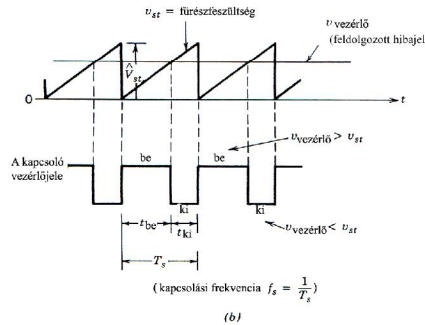
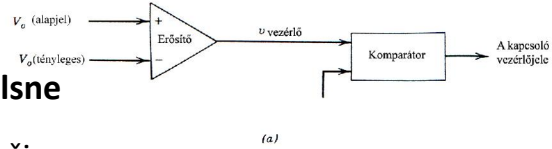
$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{t_{be}}{T_s} = D; \quad \frac{I_o}{I_d} = \frac{1}{D}$$



20

## Impulsno-širinska modulacija

- Upravljačke impulse prekidačkog tranzistora dobijamo pomoću **impulsne širinske modulacije**.
- Uključenje se redovno vrši u jednakim intervalima, a moment isključenja se menja.
- Konstantna frekvencija, promenljivi faktor ispunje.



$$D = \frac{t_{be}}{T_s} = \frac{v_{vezérlő}}{\hat{v}_{st}}, \quad 0 \leq D \leq 1$$

- Ima i drugih postupaka modulacije ali se oni retko koriste.

21

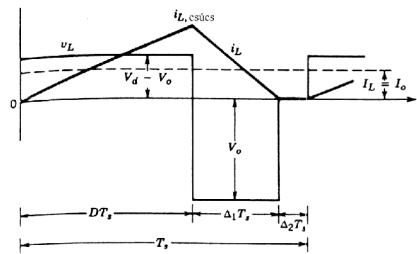
## Analiza buck pretvarača pri diskontinualnoj struji prigušnice

- Nakon isključenja tranzistora **struja prigušnice** teče još neko vreme, zatim **stoji na nuli** do sledećeg uključenja prekidača.
- To se dešava ili kada je pretvarač slabo opterećen ili kada je prigušnica nedovoljne induktivnosti.
- **Izlazni napon je veći** nego u kontinualnom režimu:

$$(V_d - V_o)DT_s + (-V_o)\Delta_1 T_s = 0$$

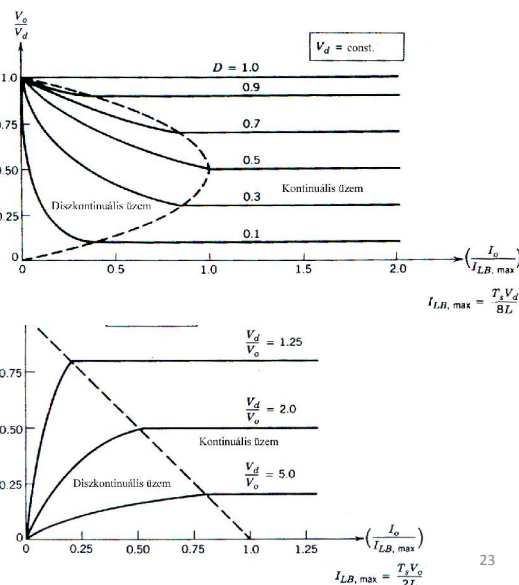
$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{D + \Delta_1}$$

$$D + \Delta_1 < 1$$



## Izlazne i upravljačke karakteristike buck pretvarača

- Pri kontinualnoj struji izlazni napon je srazmeran sa ulaznim naponom i sa faktorom ispunje.
- U diskontinualnom režimu dobija se veći napon.
- Radi dobijanja konstantnog izlaznog napona potrebno je smanjiti faktor ispunje.
- Regulacija napona je redovno automatska - postoji pojačavač greške.



## Proračun talasnosti izlaznog napona kod buck pretvarača

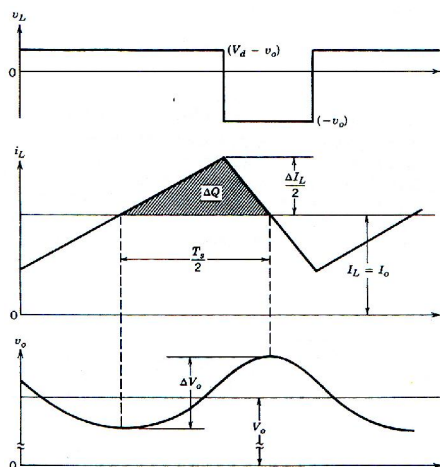
- Struja prigušnice je redovno trougaonog oblika.
- Kondenzator vrši integraljenje tog napona - dobijemo segmente parabole.
- Talasnost izlaznog napona merena od vrha do vrha ima vrednost:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q_c}{C} = \frac{1}{C} \frac{1}{2} \frac{\Delta I_L T_s}{2}$$

$$\Delta I_L = \frac{V_o}{L} (1-D) T_s$$

$$\Delta V_o = \frac{T_s V_o}{8C L} (1-D) T_s$$

$$\therefore \frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1}{8} \frac{T_s^2 (1-D)}{LC} = \frac{\pi^2}{2} (1-D) \left( \frac{f_c}{f_s} \right)^2$$

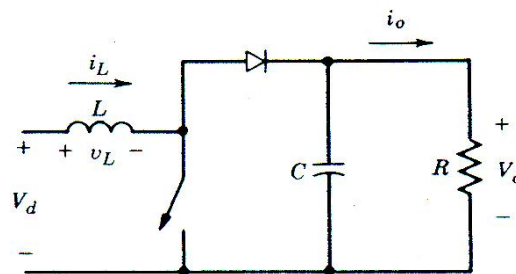


$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

24

## Pretvarač za povećanje napona (boost pretvarač) - osnovni pojmovi

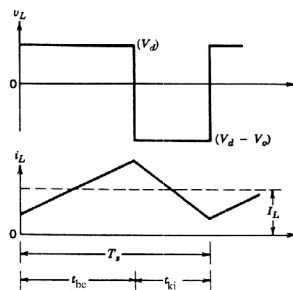
- Konstruisan je od istih komponenti kao *buck* pretvarač samo je drugačiji raspored.
- Ovaj tip pretvarača može da poveća ulazni napon nekoliko puta - ako nam je potrebno više, treba konstruisati pretvarač sa transformatorom.



25

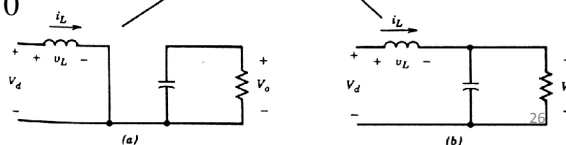
## Boost pretvarač - proračun prenosnog odnosa pri kontinualnoj struji prigušnice

- Polazimo od oblika napona i struje prigušnice.
- Ekvivalentne šeme:
  - za slučaj **uključenog tranzistora (a)**:  $v_L = V_d$
  - pri **isključenom tranzistoru (b)**:  $v_L = V_d - V_o$
- Proračun **izlaznog napona** ( $\int v dt = 0$ ):



$$V_d \cdot t_{be} + (V_d - V_o)t_{ki} = 0$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{1}{1-D}; \quad \frac{I_o}{I_d} = 1-D.$$

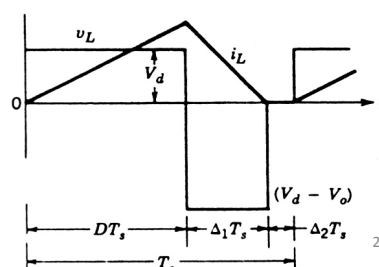


## Boost pretvarač - proračun prenosnog odnosa pri diskontinualnoj struji prigušnice

- Nakon isključenja tranzistora **struja prigušnice** teče još neko vreme, zatim **stoji na nuli** do sledećeg uključenja prekidača.
- To se dešava ili kada je pretvarač slabo opterećen ili kada je prigušnica nedovoljne induktivnosti.
- **Izlazni napon je veći** nego u kontinualnom režimu:

$$V_d DT_s + (V_d - V_o) \Delta_1 T_s = 0$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{\Delta_1 + D}{\Delta_1}$$

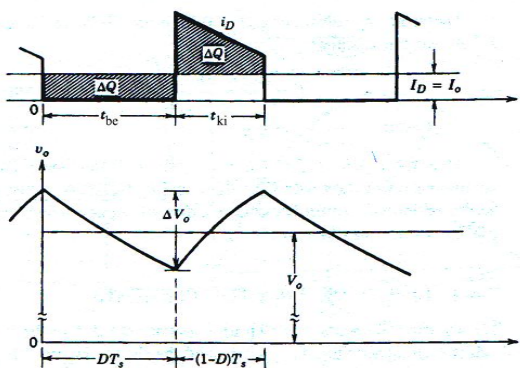


## Proračun talasnosti izlaznog napona kod boost pretvarača

- Izlazni kondenzator se puni i prazni impulsnim strujama.
- Napon kondenzatora je srazmeran integralu struje kondenzatora:  $v_c = 1/c \int i_c dt$ :

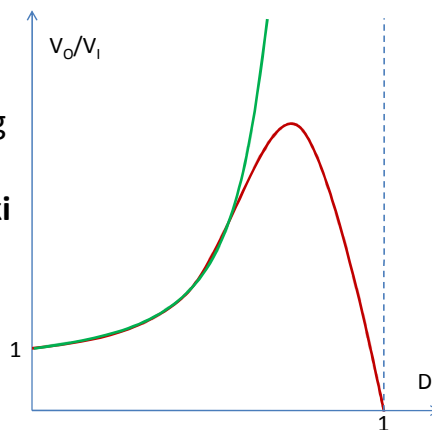
$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_o DT_s}{C} = \frac{V_o DT_s}{RC}$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{DT_s}{RC} = D \frac{T_s}{\tau}$$



## Ponašanje boost pretvarača pri velikim faktorima ispunje

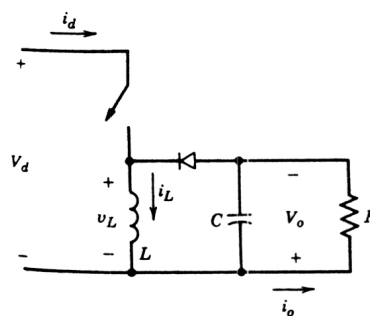
- U principu dobija se  $V_o \rightarrow \infty$  ako  $D \rightarrow 1$  (zeleni dijagram).
- Kod stvarnih pretvarača ponašanje je bitno drugačije kod velikih faktora ispunje zbog **gubitaka** (crveni dijagram).
- **Ne smeju se dozvoliti preveliki faktori ispunje**, jer dolazi do zaglavljivanja regulacije: povratna sprega se trudi da dalje povećava faktor ispunje, ali to ne doprinosi daljem povećanju napona.



29

## Pretvarač za smanjivanje/povećanje napona (buck-boost pretvarač) - osnovni pojmovi

- Konstruisan je od istih komponenti kao *buck* pretvarač samo je drugačiji raspored.
- Moguće je i smanjenje i povećanje napona.
- Ako je  $D < 1/2$ ,  $V_o < V_1$ .
- Ako je  $D > 1/2$ ,  $V_o > V_1$ .
- Obrne se polaritet napona!
- Polazeći od uslova  $\int v dt = 0$  :  $V_d t_{be} - V_o (T_s - T_{be}) = 0$
- Oдавде:  $\frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{1-D}$



30

## Buck-boost pretvarač - nastavak

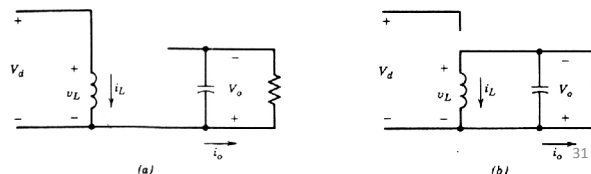
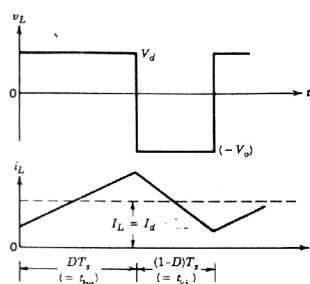
- Izjednačavanjem ulazne i izlazne snage:

$$P_d = P_o$$

dobija se odnos struja:

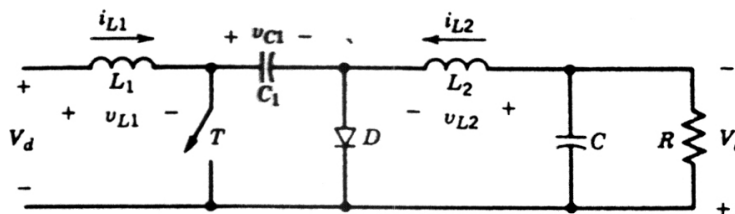
$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{1-D}{D}$$

- Struja prigušnice može biti diskontinualna i u ovom slučaju.



## Ćukov pretvarač - osnovni pojmovi

- Komplikovaniji od dosadašnja tri pretvarača.
- Opravdanje: nije ni ulazna ni izlazna struja impulsnog oblika - manje su smetnje.
- Može se konstruisati sa magnetno spregnutim prigušnicama. Pri određenom koeficijentu sprege jedna od struja može da bude skroz ravna (bez talasnosti).





## Ćukov pretvarač - analiza

- Uslov  $\int v dt = 0$  primenimo na oba kalem:

$$V_d DT_s + (V_d - V_{c1})(1-D)T_s = 0$$

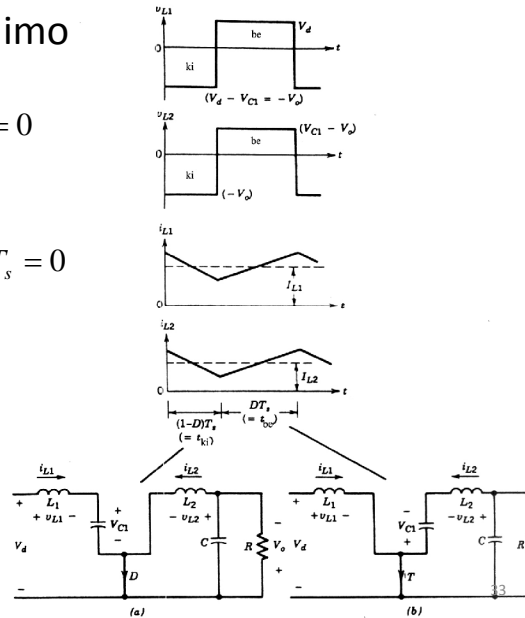
$$V_{c1} = \frac{1}{1-D} V_d$$

$$(V_{c1} - V_o)DT_s + (-V_o)(1-D)T_s = 0$$

$$V_{c1} = \frac{1}{D} V_o$$

- Odavde:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{1-D}; \quad \frac{I_o}{I_d} = \frac{1-D}{D}$$

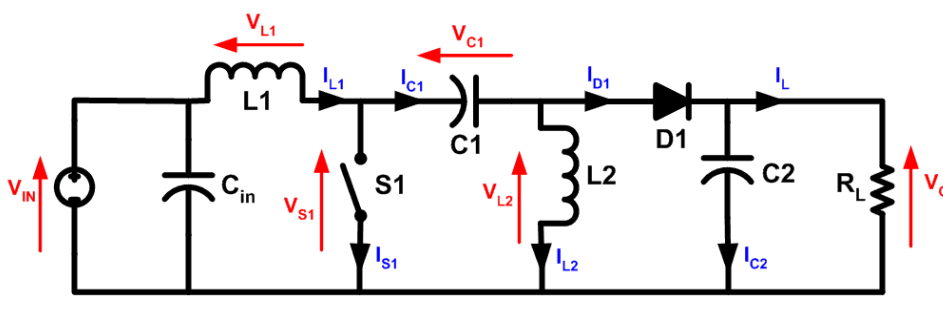


## Ćuk-ov pretvarač - dodatne analize

- I ovaj pretvarač daje napon obrnutog polariteta kao što je bio slučaj kod buck-boost pretvarača.
- I ovde postoji kontinualni i diskontinualni režim.
- I pri radu sa Ćukovim pretvaračem ne sme se dozvoliti preveliki faktor ispunje jer dolazi do zaglavlivanja regulacije, a snaga gubitaka može da dostigne veliku vrednost.
- I Ćukov pretvarač može da se konstruiše sa transformatorom - time se dobija mogućnost promene napona u velikom odnosu.

## SEPIC pretvarač

- SEPIC - *single ended primary inductor converter*
- Može i da povećava i da smanjuje napon.
- Naponski prenosni odnos je isti kao kod buck-boost ili kod Čukovog pretvarača.
- Ne obrće predznak napona.
- Sadrži isti broj komponenti kao Čukov pretvarač, ali je filtracija izlaznog napona slabija.

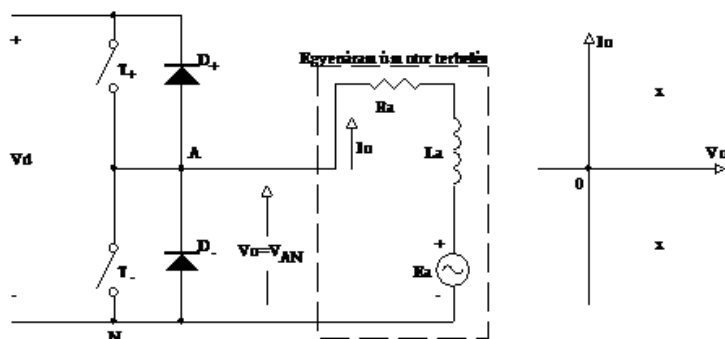


## Polumostni pretvarač - osnovi

- Jedno te isto kolo, različite kontrole.
- Oblasti primene:
  - Pogon i kočenje jednosmernih motora u jednom smeru,
  - Sinhroni buck pretvarači (za smanjenje napona),
  - DC-AC pretvaranje kod jednofaznih invertora,
  - DC-AC pretvaranje kod prekidačkih izvora napajanja sa transformatorom.
- Uloga u prva tri slučaja: regulacija napona u opsegu  $0 < V_o < V_d$  (kao kod buck pretvarača).
- Razlika u odnosu na buck pretvarač:
  - Izlazna struja može da teče u oba smera (dvokvadrantni režim, moguće je generatorsko kočenje),
  - Ne javlja se prekidni režim čak ni kod malih struja.

## Polumostni pretvarač– princip rada

- Dva upravljiva prekidača (tranzistor).
- Potrebne su zamajne diode zbog eventualnih kontra struja kroz prekidače.
- Prekidači se uključuju naizmenično (uvek je uključen jedan i samo jedan prekidač – time je obezbeđeno da je napon u tački A uvek definisan i da ne zavisi od smera izlazne struje).
- U praksi je potrebno ostaviti malu pauzu između provođenja dva prekidača (radi izbegavanja kratkih spojeva).



37

## Polumostni pretvarač – proračun izlaznog napona

- Ako je uključen tranzistor  $T_+$  (nezavisno od smera struje), važi:

$$v_{AN} = V_d$$

- Ako je uključen tranzistor  $T_-$  (nezavisno od smera struje), važi:

$$v_{AN} = 0$$

- Srednja vrednost izlaznog napona će biti:

$$V_o = V_{AN} = \frac{V_d t_{be} + 0 \cdot t_{ki}}{T_s} = V_d \cdot D_+$$

- $D_+$  je faktor ispunje definisan za gornji tranzistor. Pošto je  $0 < D_+ < 1$ , važi  $0 < V_o < V_d$ .

38

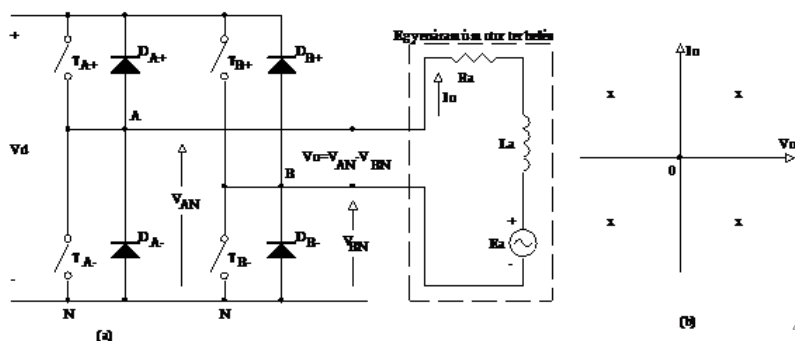
## Mostni pretvarač - osnovi

- Jedna te isto kolo, različite kontrole.
- Oblasti primene:
  - pogon i kočenje DC motora u oba smera (četvorokvadrantni rad),
  - DC-AC pretvaranje kod jednofaznih invertora,
  - DC-AC pretvaranje kod prekidačkih izvora napajanja sa transformatorom.
- Uloga u prva dva slučaja: regulacija napona u opsegu  
 $-V_d < V_O < V_d$ .
- Prekidačka napajanja sa transformatorom će se obraditi posebno.

39

## Mostni pretvarač – princip rada

- Četiri upravljiva prekidača (tranzistor).
- Potrebne su zamajne diode zbog eventualnih kontra struja kroz prekidače.
- Prekidači se načelno mogu uključivati u raznim kombinacijama ali se ne sme praviti kratak spoj i treba izbegavati kombinacije kod kojih izlazni napon nije jednoznačno definisan.
- Ako uključimo samo jedan ili nijedan prekidač, vrednost izlaznog napona će zavisiti od smera struje.
- U praksi su se odomaćila dva modulaciona postupka: bipolarna i unipolarna.



40

## Mostni pretvarač – proračun izlaznog napona

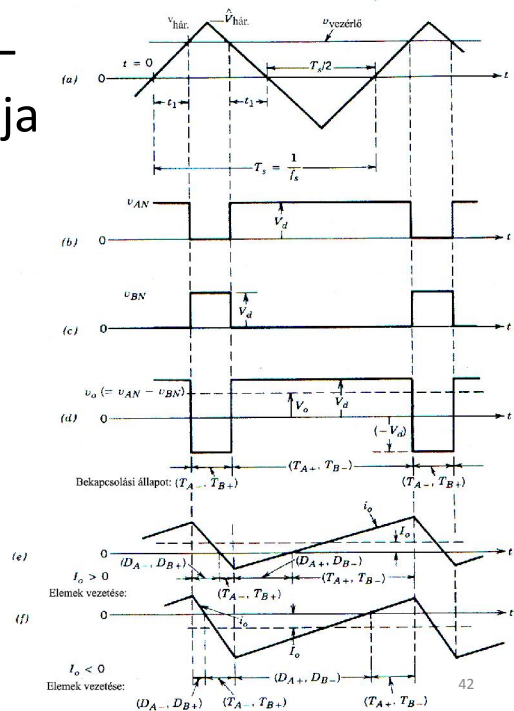
- Most se može razdvojiti na dva polumosta. Napajanje je isto, izlazne tačke su A i B.
- I ovde važi za tranzistore istog polumosta, da može biti uključen jedan i samo jedan prekidač.
- Za jedan polumost proračun izlaznog napona ide kao kod polumostnog pretvarača.
- Ako je uključen tranzistor  $T_{A+}$  (nezavisno od smera struje) važi:
 
$$V_{AN} = V_d$$
- Ako je uključen tranzistor  $T_{A-}$  (nezavisno od smera struje) važi:
 
$$V_{AN} = 0$$
- Srednja vrednost izlaznog napona je:  $V_{AN} = \frac{V_d t_{be} + 0 \cdot t_{ki}}{T_s} = V_d \cdot D_{A+}$
- $D_{A+}$  je faktor ispunje za gornji tranzistor. Pošto je  $0 < D_{A+} < 1$ , važi  $0 < V_{AN} < V_d$ .
- Za polumost B dobija se sličan rezultat:  $V_{BN} = V_d \cdot D_{B+}$
- Rezultantni napon je razlika izlaznih napona dva polumosta:

$$V_o = V_{AN} - V_{BN}$$

41

## Mostni pretvarač – bipolarna modulacija

- Modulacija pojedinih polumostova u većini slučajeva nije međusono nezavisna.
- Kod bipolarne modulacije dva polumosta rade u protivfazi – tranzistori se uvek uključuju dijagonalno:  $T_{A+}, T_{B-}$  ili  $T_{A-}, T_{B+}$ .



42

### Mostni pretvarač – bipolarna modulacija – jednačine

- Formula za trougaoni napon koji se koristi pri modulaciji:
 
$$v_{hár.} = \hat{V}_{hár.} \frac{t}{T_s / 4} \quad 0 < t < T_s / 4$$
- Proračun momenta uključenja:
 
$$t_1 = \frac{v_{vezérlő} T_s}{\hat{V}_{hár.} 4}$$
- Vreme uključenosti dijagonale ( $T_{A+}$   $T_{B-}$ ):
 
$$t_{be} = 2t_1 + \frac{T_s}{2}$$
- Faktor ispune za  $T_{A+}$   $T_{B-}$ :
 
$$D_1 = \frac{t_{be}}{T_s} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{v_{vezérlő}}{\hat{V}_{hár.}} \right)$$
- Faktor ispune za ( $T_{B+}$   $T_{A-}$ ):
 
$$D_2 = 1 - D_1$$
- Rezultantni izlazni napon je:
 
$$V_o = V_{AN} - V_{BN} = D_1 V_d - D_2 V_d = (2D_1 - 1) V_d, \quad 0 \leq D_1 \leq 1$$
- Ili:
 
$$V_o = \frac{V_d}{\hat{V}_{hár.}} v_{vezérlő} = k v_{vezérlő}$$

43

### Mostni pretvarač – unipolarna modulacija

- Upravljanje sa prekidačima pojedinih polumostova ni ovde nije nezavisno, ali se ne vrši istovremeno uključivanje/isključivanje.
- Pored dijagonalnih kombinacija prekidača ( $T_{A+}$   $T_{B-}$  ili  $T_{A-}$   $T_{B+}$ ) kod unipolarne modulacije koriste se još i kombinacije  $T_{A+}$   $T_{B+}$  és a  $T_{A-}$   $T_{B-}$ .
- U takvim situacijama izlazni napon  $V_{AB}$  je jednak nuli – to se isto koristi za regulaciju napona.
- Pozitivan izlazni napon se dobija usrednjavanjem pozitivnih impulsa i pauza, kod negativnog izlaznog napona usrednjavaju se negativni impulsi i pauze.

44

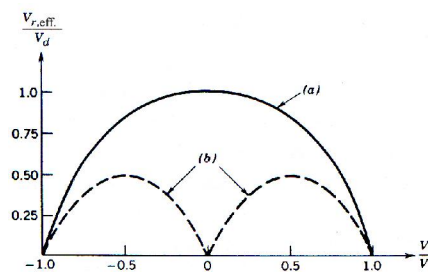
## Mostni pretvarač – unipolarna modulacija – jednačine

- $T_{A+}$  se uključuje ako:  $v_{vezérlő} > v_{hár.}$
- $T_{B+}$  se uključuje ako:  $-v_{vezérlő} > v_{hár.}$
- Faktor ispunje za  $T_{A+}$ :  $D_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{v_{vezérlő}}{\hat{V}_{hár.}} + 1 \right)$
- Faktor ispunje za  $T_{B+}$ :  $D_2 = 1 - D_1$
- Rezultantni izlazni napon:  $V_o = (2D_1 - 1)V_d = \frac{V_d}{\hat{V}_{hár.}} v_{vezérlő}$
- U pogledu jednosmernog napona dobili smo istu vrednost kao kod bipolarne modulacije.
- Razlika se javlja u spektru izlaznog signala.

45

## Mostni pretvarač – upoređenje bipolarne i unipolarne modulacije

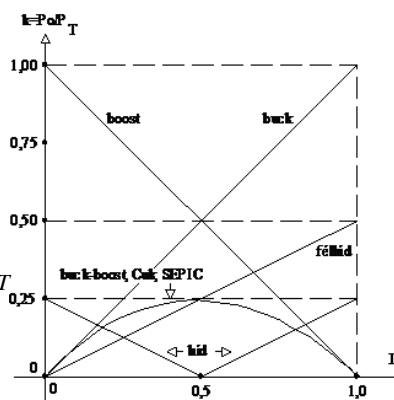
- Ako se od izlaznog napona mosta oduzme jednosmerna komponenta, dobija se **naizmjenični signal**.
- Efektivna vrednost te naizmjenične komponente se bitno razlikuje kod bipolarne modulacije (puna linija) i unipolarne modulacije (isprekidana linija)
- Lakša je filtracija napona dobijenog unipolarnom modulacijom.
- Nema razlike u prekidačkim gubicima tranzistora pošto je frekvencija ista u oba slučaja.



46

## Uspoređenje DC-DC pretvarača

- Kriterijumi: broj aktivnih i pasivnih komponenti, njihovi gabariti, stepen iskorišćenja pretvarača, nivo smetnji...
- Jedna dobra metoda - uspoređenje stepena iskorišćenja prekidača:  $k = \frac{P_O}{P_T}$ .
- $P_T$  je prividna snaga prekidača (nije snaga gubitaka niti snaga koja prolazi kroz prekidač!)  $P_T = V_T I_T$
- Gde je  $V_T$  maksimalni napon koji se pojavljuje na prekidaču, a  $I_T$  je maks. struja.
- U stvarnosti retko imamo izbora!



47

## Povezivanje transformatora u kola pretvarača

- Kod dosadašnjih pretvarača (osnovni i izvedeni) postoji **galvanska sprega** između ulaza i izlaza (zajedničko uzemljenje).
- **Korišćenjem transformatora:**
  - može se **ukinuti galvanska sprega** (ostvarivanje izolovanog izlaza iz razloga bezbednosti),
  - može da se **poboljša stepen iskorišćenja tranzistora**,
  - iz jednog pretvarača se može dobiti **više izlaza** (za različite napone i struje).

48



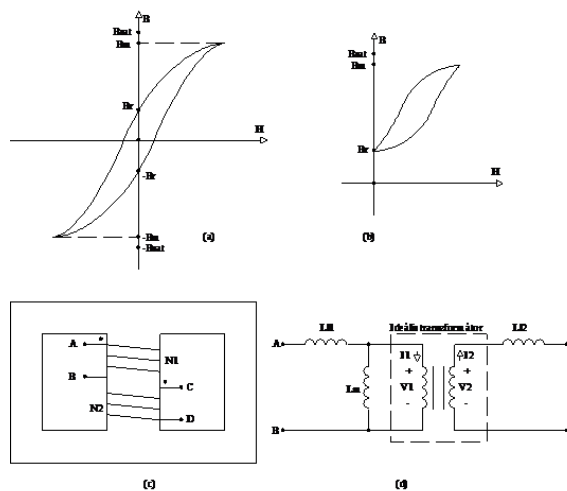
## Osobine transformatora koji se primenjuju u pretvaračima

- Uglavnom se proračunavaju za visoke frekvencije: 20kHz-1MHz, jer se na taj način mogu smanjiti gabariti.
- Prenešenu snagu limitiraju dva faktora:
  - zasićenje (zbog nelinearnosti jezgra),
  - zagrevanje (usled gubitaka).
- Mehanizmi zagrevanja:
  - **Gubici u bakru:** potiču od otpornosti namotaja. Na visokim frekvencijama dolazi do povećanja tih gubitaka, jer se struja neravnomerno raspoređuje na preseku provodnika (skin effect, proximity effect).
  - **Gubici u jezgru:** usled histereze i vrtložnih struja. Kod ferita vrtložne struje nisu izražene.

49

## Karakterizacija transformatora korišćenih u pretvaračima

- Magnetizacija može biti simetrična (a) i asimetrična (b) zavisno od načina pobuđivanja.
- Korišćenjem simetrične magnetizacije načelno se može preneti veća snaga, ali neki načini pobuđivanja ipak nisu simetrični.
- Namotaji se mogu postaviti na feromagnetno jezgro na različite načine (c), parametri transformatora a u velikoj meri zavise od rasporeda namotaja (d).



50

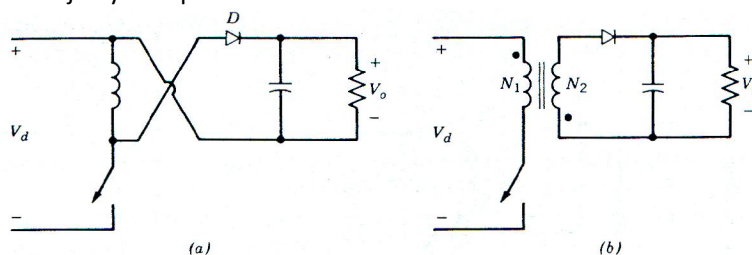
## Tipovi dc-dc pretvarača sa transformatorom

- Varijante sa asimetričnom magnetizacijom:
  - flyback pretvarač - izvodi se iz buck-boost pretvarača.
  - forward pretvarač – izvodi se iz buck pretvarača.
- Varijante sa simetričnom magnetizacijom (svi su izvedeni iz buck pretvarača):
  - push-pull pretvarač,
  - polumostni pretvarač sa transformatorom,
  - mostni pretvarač sa transformatorom.

51

## Flyback pretvarač - uvod

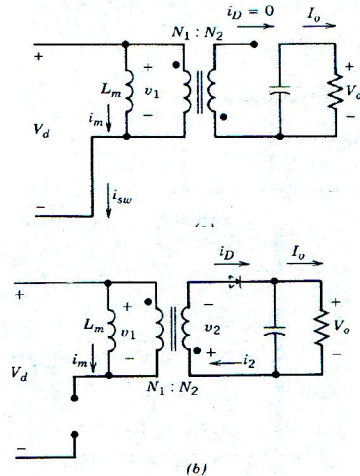
- Popularan je jer sadrži samo jednu induktivnu komponentu (jedno feritno jezfro) a ipak obezbeđuje izolovan izlaz.
- Transformator u stvari nije pravi transformator, više se može okarakterisati kao spregnuta prigušnica.
- Energija se prenosi tako što se prvo akumulira u jezgru preko primara, zatim se isprazni prema izlazu preko sekundara.
- Ovaj pretvarač se često koristi u prekidnom režimu.
- Kod drugih pretvarača sa transformatorom nagomilavanje energije u transformatoru je minimalno, a ovde je naglasak na tome.
- Izvođenje flyback pretvarača:



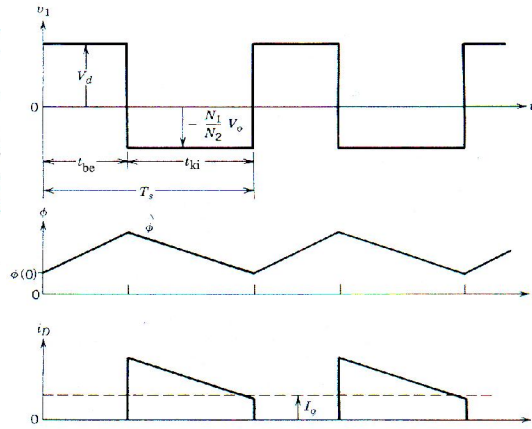
52

## Flyback pretvarač – model i dijagrami

- Model pretvarača pri uključenom prekidaču (a) i pri isključenom prekidaču (b):



- Odgovarajući dijagrami:



53

## Flyback pretvarač – jednačine

- Pratimo promene magnetnog fluksa u jezgru.
- Pri uključenom prekidaču:  $\phi(t) = \phi(0) + \frac{V_d}{N_1} t$
- Na kraju uključenja:  $\hat{\phi} = \phi(t_{be}) = \phi(0) + \frac{V_d}{N_1} t_{be}$
- Nakon isključenja prekidača u sekundaru se pokreće struja, a fluks počinje postepeno da pada:  $\phi(t) = \hat{\phi} - \frac{V_o}{N_2} (t - t_{be})$
- Na kraju periode važi:  $\phi(T_s) = \hat{\phi} - \frac{V_o}{N_2} (T_s - t_{be}) = \phi(0) + \frac{V_d}{N_1} t_{be} - \frac{V_o}{N_2} (T_s - t_{be})$
- Pretpostavljajući ustaljeno stanje:  $\phi(T_s) = \phi(0)$
- Oдавde se dobija naponski prenosni odnos:  $\frac{V_o}{V_d} = \frac{N_2}{N_1} \frac{D}{1-D}$
- U prekidnom režimu (više se koristi kod flyback pretvarača) dobija se veći napon od ovoga.

54

## Flyback pretvarač – dodatne jednačine

- Primarna struja raste linearno za vreme uključenosti tranzistora:
- Vršna vrednost pre isključenja je:
- Struja magnećenja nakon isključenja :
- Struja preslikana u sekundar odnosno struja diode:
- Ako se zna željena srednja vrednost izlazne struje, možemo izračunati vršnu vrednost struje prekidača:  $\hat{I}_m = \hat{I}_{kaps.} = \frac{N_2}{N_1} \frac{1}{1-D} I_o + \frac{N_1}{N_2} \frac{(1-D)T_s}{2L_m} V_o$
- Vršna vrednost napona prekidača je:
- Ovi podaci su potrebni za izbor prekidača.

$$i_m(t) = i_{kaps.}(t) = I_m(0) + \frac{V_d}{L_m} t$$

$$\hat{I}_m = \hat{I}_{kaps.} = I_m(0) + \frac{V_d}{L_m} t_{be}$$

$$i_m(t) = \hat{I}_m - \frac{V_o(N_1/N_2)}{L_m}(t - t_{be})$$

$$i_D(t) = \frac{N_1}{N_2} i_m(t) = \frac{N_1}{N_2} \left[ \hat{I}_m - \frac{V_o(N_1/N_2)}{L_m}(t - t_{be}) \right]$$

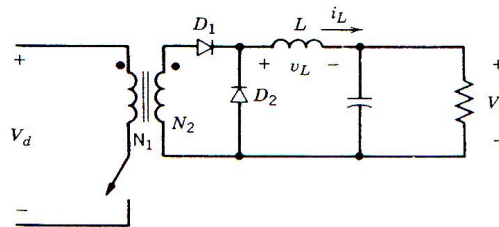
$$\hat{I}_m = \hat{I}_{kaps.} = \frac{N_2}{N_1} \frac{1}{1-D} I_o + \frac{N_1}{N_2} \frac{(1-D)T_s}{2L_m} V_o$$

$$V_{kaps.} = V_d + \frac{N_1}{N_2} V_o = \frac{V_d}{1-D}$$

55

## Forward pretvarač – princip rada

- Principijelna šema – liči na buck pretvarač samo se naponski impulsi ne dovode direktno na ulaz LC filtra, već preko jednog transformatora.
- Transformator se ne može koristiti tačno na ovaj način jer odlazi u zasićenje (kasnije će još biti reči o ovom).
- Napon kalema pri uključenom prekidaču je:
- Napon kalema pri isključenom prekidaču je:
- Korišćenjem uslova  $\int v dt = 0$  dobija se formula za naponski prenosni odnos:



$$v_L = \frac{N_2}{N_1} V_d - V_o$$

$$v_L = -V_o$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{N_2}{N_1} D$$

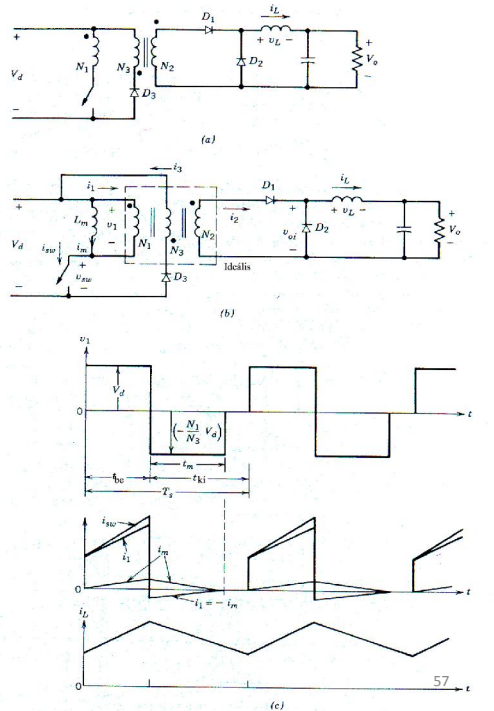
56

## Forward pretvarač – demagnetizacija

- Potreban je jedan pomoćni namotaj preko kojeg se u svakoj periodi energija magnetenja transformatora vraća u izvor.
- Maksimalni faktor ispune impulsa za pobuđivanje tranzistora može biti:

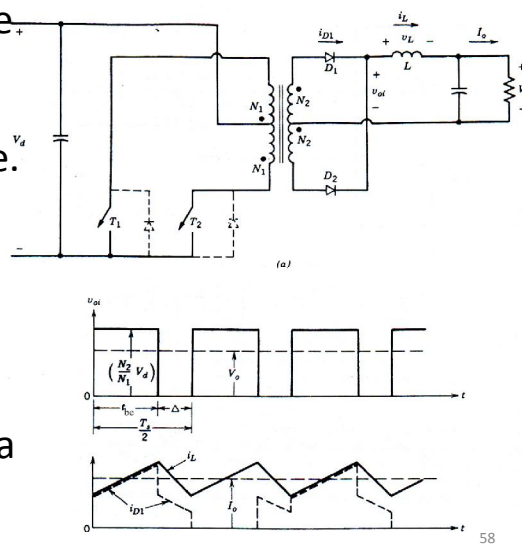
$$D_{\max} = \frac{1}{1 + N_3 / N_1}$$

- U većini slučajeva je  $N_3 = N_1$ , odavde:  $D_{\max} = 0,5$ .



## Push-pull pretvarač – princip rada

- Pravougaoni impulsi za pobudu primara se dobijaju preko prikazane dvotranzistorske veze.
- Tranzistori se uključuju naizmenično, sa manjim ili većim pauzama između pojedinih uključivanja (zavisno od željenog faktora ispune).



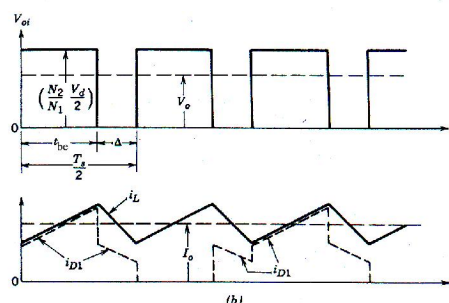
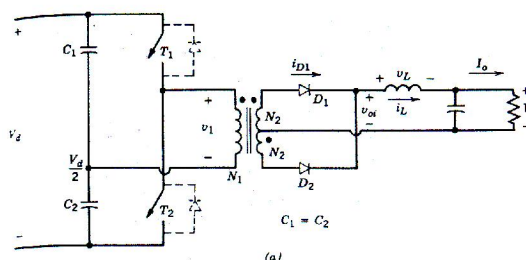
## Push-pull pretvarač – jednačine

- Napon kalema pri uključivanju jednog od tranzistora:  $v_L = \frac{N_2}{N_1} V_d - V_o$
- Napon kalema u pauzama između provođenja pojedinih tranzistora:  $v_L = -V_o$
- Korišćenjem uslova  $\int v_L dt = 0$  dolazimo do izraza za naponski prenosni odnos:
- Važi  $D_{\max} = 0,5$ .
- Push-pull pretvarač je sklon asimetriji (nastaje razlika između primarnih struja što dovodi do zasićenja transformatora).
- Maksimalni napon na prekidačkim tranzistorima je dvostruki ulazni napon.
- Pogodno je što su oba tranzistora vezana na masu.

59

## Polumostni pretvarač sa transformatorom – princip rada

- Pravougaoni impulsi za pobudu primara se dobijaju preko polumostne veze.
- Tranzistori se uključuju naizmenično, sa manjim ili većim pauzama između pojedinih uključivanja (zavisno od željenog faktora ispunje).



## Polumostni pretvarač sa transformatorom – jednačine

- Napon kabela pri uključivanju jednog od tranzistora :
- Napon kabela u pauzama između provođenja pojedinih tranzistora :
- Korišćenjem uslova  $\int v_L dt = 0$  dolazimo do izraza za naponski prenosni odnos :
- I ovde važi  $D_{max} = 0,5$ .
- Kod polumostnog pretvarača ne dolazi do asimetrije (eventualno za vreme tranzijenata) zahvaljujući kapacitivnom razdelniku na ulazu – ne može da se formira jednosmerna komponenta struje primara – ne dolazi do zasićenja.
- Prekidači su opterećeni samo jednostrukim ulaznim naponom, ali je struja dva puta veća nego kod push-pull pretvarača.

$$v_L = \frac{N_2}{N_1} \left( \frac{V_d}{2} \right) - V_o$$

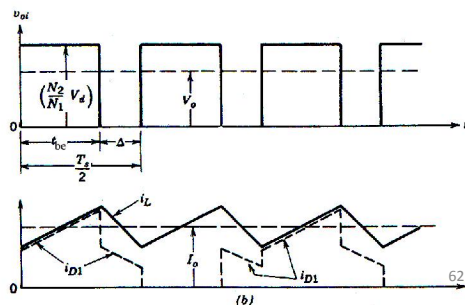
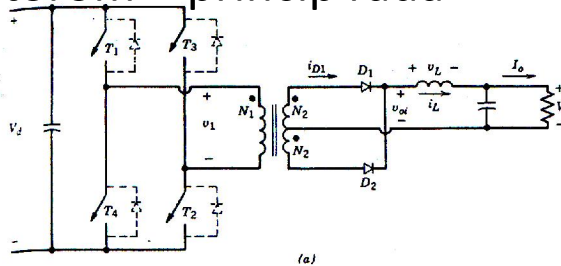
$$v_L = -V_o$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{N_2}{N_1} D$$

61

## Mostni pretvarač sa transformatorom – princip rada

- Pravougaoni impulsi za pobudu primara se dobijaju preko mostne veze.
- Tranzistori se uključuju u dijagonalnim parovima, sa manjim ili većim pauzama između pojedinih uključivanja (zavisno od željenog faktora ispunje).



## Mostni pretvarač sa transformatorom – jednačine

- Napon kabela pri uključenju jedne dijagonale:
- Napon kabela u pauzama kada nije uključena ni jedna ni druga dijagonala:
- Korišćenjem uslova  $\int v_L dt = 0$  :
- I ovde važi  $D_{\max} = 0,5$ .
- Mostna sprega je sklona asimetriji – preporučuje se vezivanje kondenzatora na red sa primarem.
- Prekidači su opterećeni samo sa jednostrukim ulaznim naponom, struja je upola manja nego kod polumostnog pretvarača.
- Složeno rešenje, zato ga je racionalno primeniti samo pri većim snagama.

$$v_L = \frac{N_2}{N_1} V_d - V_o$$

$$v_L = -V_o$$

$$\frac{V_o}{V_d} = 2 \frac{N_2}{N_1} D$$

63

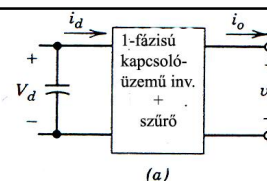
## Invertori

- Iz jednosmernog napona (struje) formira se naizmenični napon (struja).
- Prema današnjem stanju tehnike može se proizvesti signal bilo koje amplitude, frekvencije i oblika korišćenjem odgovarajućeg invertora.
- **Izvor energije** na ulazu može biti neki originalni jednosmerni izvor (hemijski izvor, fotonaponski element, obrtna mašina), ali se potreban jednosmerni napon može proizvesti i iz raspoloživog naizmničnog napona ispravljanjem.
- Mnoga različita rešenja. Mogući principi **podele**:
  - prema broju izlaznih faza (uglavnom jednofazni i trofazni invertori),
  - prema tipu ulaznog signala: strujni inverter, naponski inverter,
  - prema algoritmu upravljanja prekidačima: PWM invertori, pravougaoni invertori i invertori sa poništavanjem napona.

64

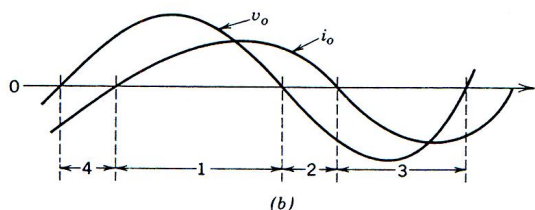


## Polumostni inverter

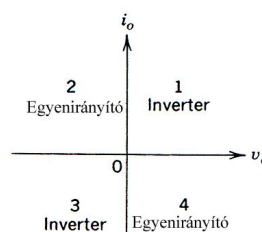


(a)

- Generalni zahtev prema svakom invertoru: četvorokvadrantni izlaz.
- Smerovi napona i struje se menjaju periodično, takođe i smer trenutne snage.
- Invertor treba da se konstruiše tako da bi mogao da napaja i (delimično) induktivno ili kapacitivno opterećenje.



(b)

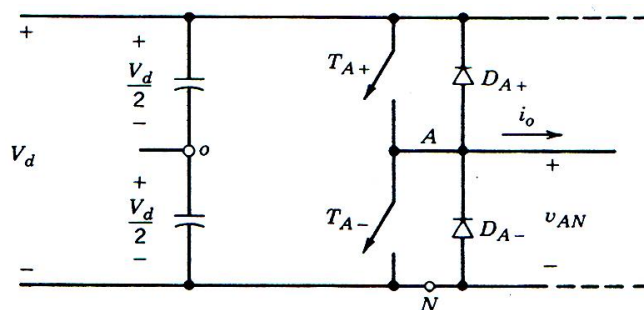


(c)

65

## Polumostni inverter - konstrukcija

- Ranije analizirani polumostni DC-DC pretvarač može da radi u dva kvadranta.
- Četvorokvadrantni rad se može dobiti, ako se na ulazu koristi kapacitivni razdelnik ili izvor napona sa srednjim izvodom.
- Jedan izlaz invertora je tačka O, a drugi je tačka A.



66

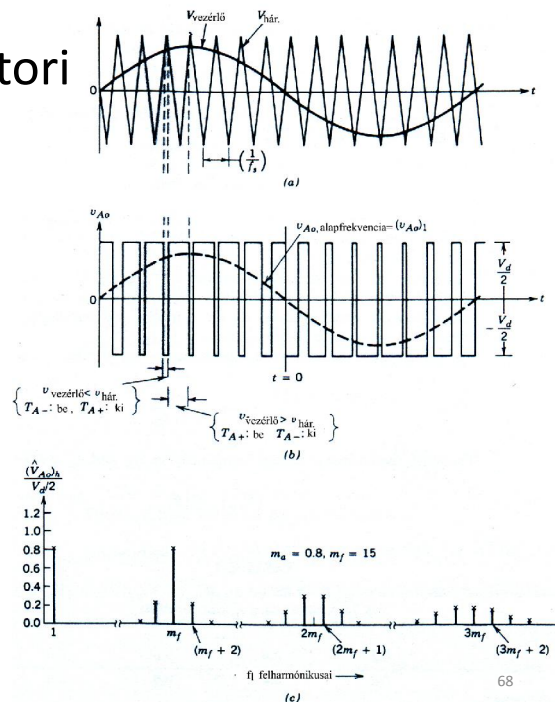
## Polumostni inverter - kontrola

- Radi formiranja izlaznog napona potrebno je primeniti impulsno-širinsku modulaciju.
- Modulacija se vrši na sličan način kao kod DC-DC pretvarača sa polumostnom i mostnom spregom
- U ovom slučaju trougaoni nosilac se ne upoređuje sa jednosmernim signalom već sa naizmeničnim signalom niske frekvencije koji odgovara amplitudi, frekvenciji i obliku željenog naizmeničnog signala.
- Odgovarajući vremenski dijagrami signala se mogu videti na sledećem slajdu.

67

## Polumostni invertori - oblici signala

- $f_s$  – frekvencija prekidanja (noseća frekvencija),
- $f_1$  – modulišuća učestanost,
- $\hat{V}_{hár}$  - amplituda trougaonog signala.
- $V_{vezérlő}$  – modulišući signal.
- $V_{vezérlő}$  - amplituda modulišućeg signala.



68

## Polumostni inverter – jednačine

- Koeficijent modulacije po amplitudi (amplitudni indeks):

$$m_a = \frac{\hat{V}_{vezérlő}}{\hat{V}_{hár.}}$$

- Koeficijent modulacije po frekvenciji:

$$m_f = \frac{f_s}{f_1}$$

- Ako je  $v_{vezérlő} < v_{hár.}$ ,  $T_{A-}$  se uključi,  $T_{A+}$  se isključi:

$$v_{Ao} = -\frac{V_d}{2}$$

- Ako je  $v_{vezérlő} > v_{hár.}$ ,  $T_{A+}$  se uključi,  $T_{A-}$  se isključi:

$$v_{Ao} = \frac{V_d}{2}$$

69

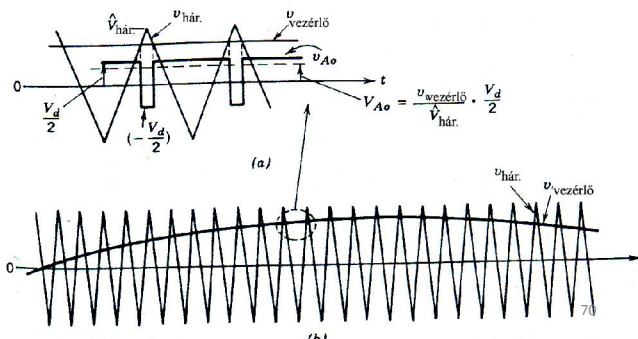
## Polumostni inverter – analiza izlaznog signala

- Izlazni signal invertora je pravougaoni signal fiksne amplitude i frekvencije ali promenljivog faktora ispunje.
- Razvojem u Fourier-ov red dobija se komponenta na osnovnoj učestanosti:

$$\hat{V}_{Ao1} = m_a \cdot (V_d / 2)$$

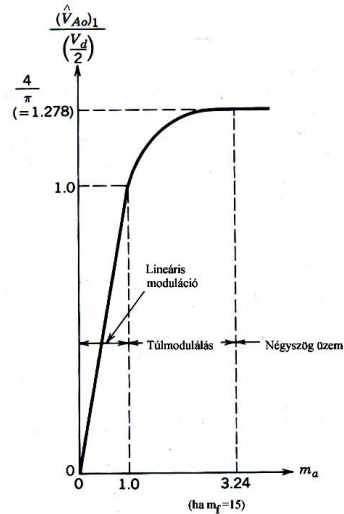
- Dobija se beskonačan spektar sa višim harmonicima oko prekidačke frekvencije i celobrojnog umnoška te frekvencije.
- Viši harmonici se mogu odstraniti (ublažiti) odgovarajućom filtracijom.
- Viša frekvencija

prekidanja:  
lakša filtracija.



## Polumostni inverter – linearni i nelinearni opseg modulacije

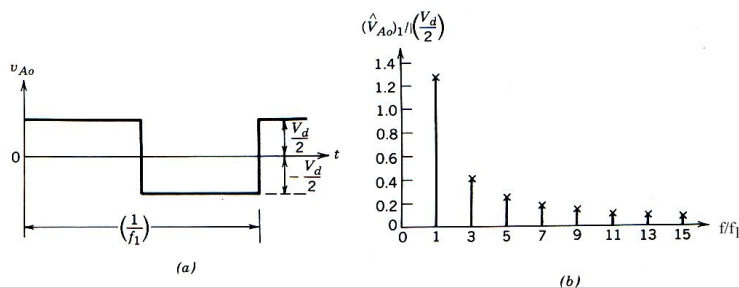
- Za dobijanje sinusnog izlaza  $m_a \leq 1,0$  - to se zove linearna modulacija.
- Ako kontrolni signal i dalje povećavamo, i dalje će da raste efektivna vrednost izlaznog signala ali se dobija izobličeni signal (spljošti se vrh).



71

## Polumostni inverter – pravougaoni režim

- Pri dovoljno velikoj vrednosti  $m_a$  frekvencija izlaznog pravougaonog signala se poklapa sa frekvencijom modulišućeg signala (na pr. 50Hz) – nema visokofrekvencijskog prekidanja.
- Amplituda osnovnog harmonika dobijenog  $(V_{AO})_1 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{V_d}{2}$  pravougaonog signala:
- Dobija se veliki broj viši harmonika sa značajnim amplitudama (teško filtrirati).



72

## Polumostni inverter – opšte primedbe

- Zahvaljujući kapacitivnom razdelniku na ulazu, ne može da se formira jednosmerna komponenta struje na izlazu invertora – može se neposredno vezati na transformator.
- Maksimalni napon koji se pojavljuje na prekidačkim tranzistorima je jednak ulaznom naponu:

$$V_T = V_d$$

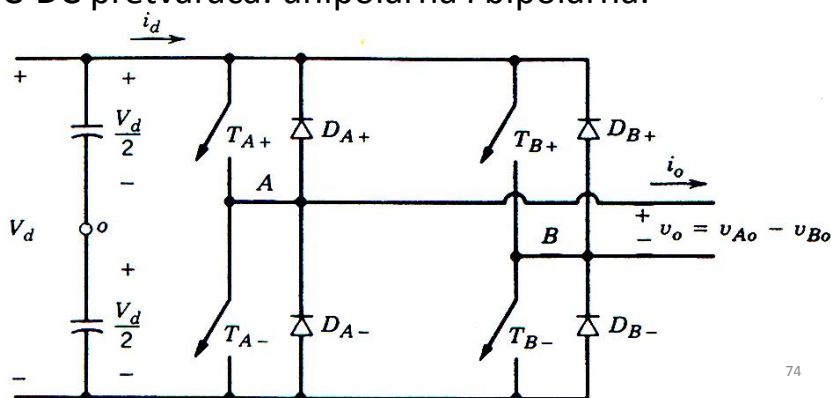
- Maksimalna vrednost struje tranzistora je:

$$I_T = i_{o,csúcs}$$

73

## Mostni inverter

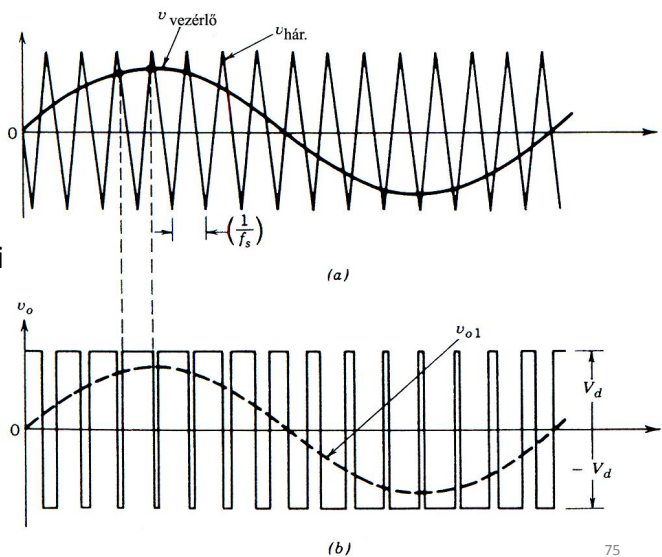
- Sadrži dva polumosta (četiri prekidača).
- Dobija se signal dva puta veće amplitude.
- Nije potreban kapacitivni razdelnik na ulazu.
- Moguće su dve vrste modulacije, kao kod mostnog DC-DC pretvarača: unipolarna i bipolarna.



74

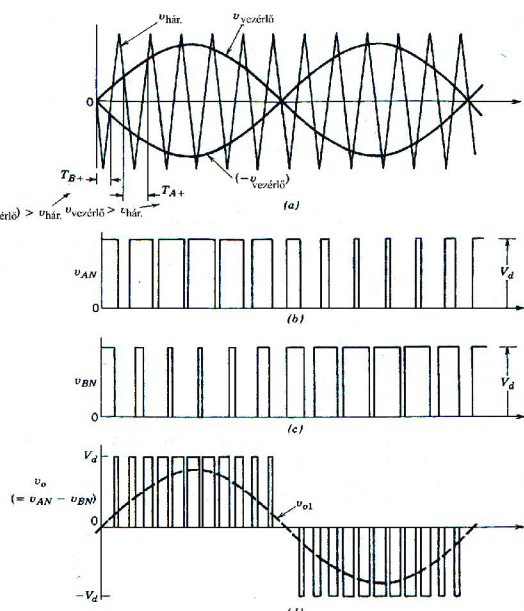
## Mostni inverter – bipolarna modulacija

- Kontrolni signal se upoređuje sa trougaonim signalom visoke frekvencije (prekidačka učestanost).
- Uvek se uključuju dijagonalni parovi tranzistora.
- Izlazni signal invertora skače između  $\pm V_d$ .
- Viši harmonici se odstranjuju (ublažuju) filtracijom.



## Mostni inverter – unipolarna modulacija

- Pored dijagonalnih parova povremeno se uključuju i dva gornja ili dva donja tranzistora – u takvim intervalima izlazni napon ima nultu vrednost.
- U jednoj poluperiodi modulišućeg signala izlazni signal osciluje između 0 i  $V_d$ , u drugoj poluperiodi između 0 i  $-V_d$ .



## Mostni inverter – pravougaoni režim

- Pri linearnoj modulaciji važi:

$$\hat{V}_{o1} = m_a V_d$$

- Za slučaj  $m_a > 1$ :

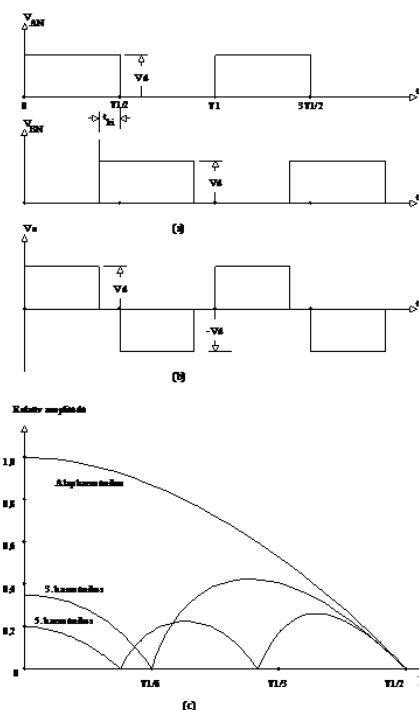
$$V_d < \hat{V}_{o1} < \frac{4}{\pi} V_d$$

- Na gornjoj granici prelazi se u pravougaoni režim.
- Isti rezultat se dobija i pri unipolarnoj i pri bipolarnoj modulaciji.
- Izlaz sadrži veliki broj viših harmonika sa značajnim amplitudama.

77

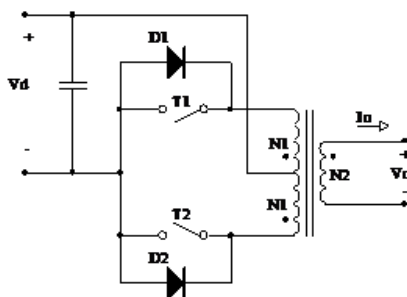
## Mostni inverter – inverter sa poništavanjem napona

- Oba polumosta rade sa faktorom ispunje od 50% na frekvenciji željenog izlaznog signala
- Uvodi se kašnjenje između prekidanja u pojedinim polumostovima.
- U vremenskom intervalu koji odgovara kašnjenju (pauza) dobija se nulti napon.
- Varijacijom kašnjenja može se regulisati efektivna vrednost izlaznog signala.
- Amplituda je konstantna.
- Izlaz sadrži veliki broj viših harmonika sa značajnim amplitudama



## Push-pull inverter

- Polumostni i mostni invertori se smatraju za standardna rešenja ali kod prostih jednofaznih primena koristi se i push-pull rešenje.
- Modulacija: kao kod polumostnog invertora, tranzistori  $T_1$  i  $T_2$  provode naizmenično sa faktorima ispunje  $D$  i  $(1-D)$ .



### 2.3.3.1. PUSH-PULL INVERTOR - PRORAČUNI

- Trenutna vrednost izlaznog napona je:  $v_o = V_d(N_2/N_1)$
- Amplituda osnovnog harmonika je:

$$\hat{V}_{o1} = m_a V_d \frac{N_2}{N_1}$$

- Opseg regulacije osnovnog harmonika u slučaju premodulacije je:

$$V_d \frac{N_2}{N_1} < \hat{V}_{o1} < \frac{4}{\pi} V_d \frac{N_2}{N_1}$$

- Maksimalna opterećenja tranzistora su:

$$V_T = 2V_d \quad I_T = \frac{N_2}{N_1} i_{o,csics}$$

- Transformator se magnetiše na niskoj učestanosti – rešenje sa čeličnim jezgrom, veliki gabariti.
- U slučaju velikog koeficijenta modulacije po amplitudi i push-pull inverter prelazi u pravougaoni režim.

80



## Stepen iskorišćenja prekidača kod invertora

- Za sve dosad prikazane jednosmerne invertore dobija se stepen iskorišćenja prekidača.

$$k = \frac{V_{o1} I_{o,\max}}{q V_T I_T}$$

- Polazi se od formule:

- Kod mostnih invertora u pravougaonom režimu važe sledeće vrednosti:

$$V_T = V_d, \quad I_T = \sqrt{2} I_{o,\max}, \quad V_{o1} = \frac{4}{\pi\sqrt{2}} V_d, \quad q = 4.$$

- Dakle, u pravougaonom režimu je:

$$k_{\max, \text{negyszög}} = \frac{1}{2\pi} \approx 0,16$$

- U slučaju linearne modulacije:

$$k_{\max, \text{szinusz}} = \frac{1}{8} m_a = 0,125 m_a$$

81

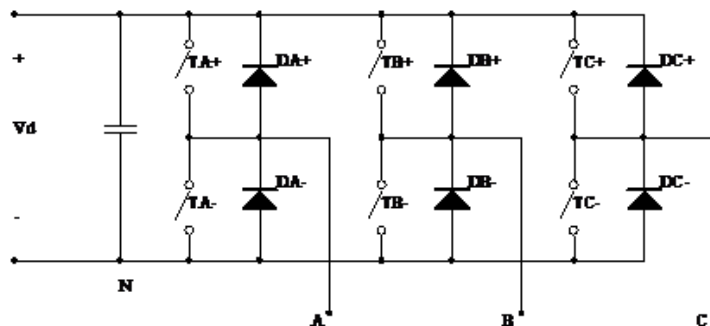
## Trofazni i višefazni invertori - osnovi

- Naizmenični potrošači veće snage su redovno trofaznog tipa.
- Trofazni inverter omogućava napajanje trofaznog potrošača uz promenljivu amplitudu, frekvenciju i oblik napona.
- Načelno bi se mogao formirati trofazni inverter od tri jednofazna invertora, ali bi se oni morali napajati iz nezavisnih izvora ili bi došlo do kratkih spojeva preko prekidača.
- Pravo rešenje je trofazni most koji se dobija spajanjem tri polumosta.

82

## Trofazni i višefazni invertori - konstrukcija

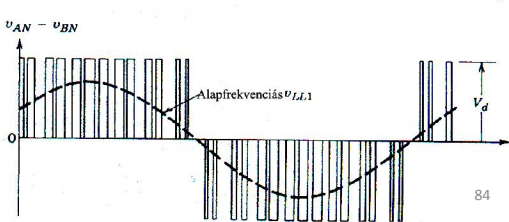
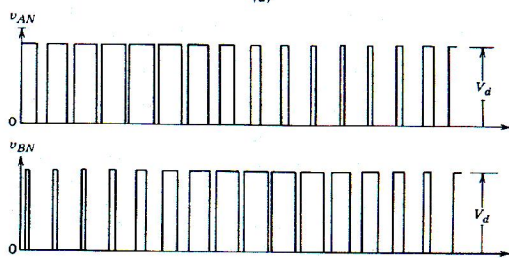
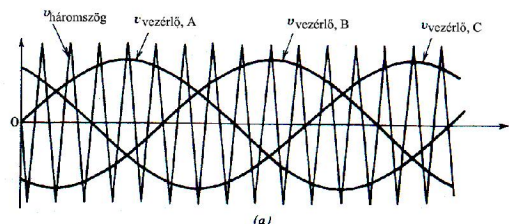
- Tri polumosta sa istim napajanjem (ulazom).
- Izlazi pojedinih polumostova će biti izlazne faze.



83

## Trofazni i višefazni invertori - upravljanje

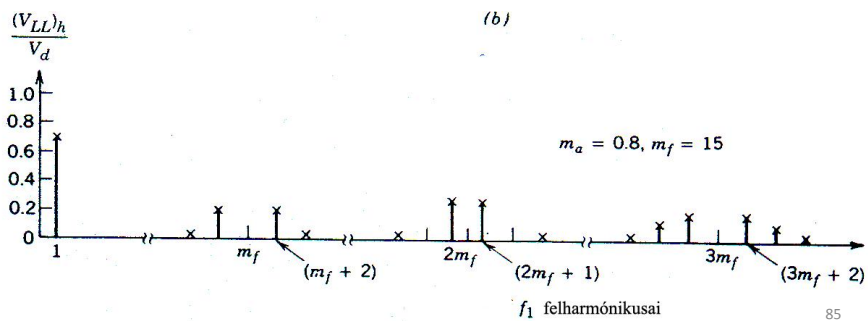
- Jedan visokofrekvencijski trougaoni signal kompariramo sa tri niskofrekvencijska sinusna signala.
- Sinusni signali su međusobno pomereni za  $120^\circ$ .
- Signali  $v_{AN}$  i  $v_{BN}$  sadrže jednosmernu komponentu, ali napon  $v_{AB} = v_{AN} - v_{BN}$  koji se smatra za izlaz, ne sadrži jednosmernu komponentu zahvaljujući oduzimanju (razlika napona).



84

## Trofazni i višefazni invertori - spektar

- Spektar linijskog napona je sličan spektru izlaznog napona kod polumostnog i mostnog invertora.
- Odgovarajućim izborom  $m_f$  mogu se eliminisati izvesni harmonici.



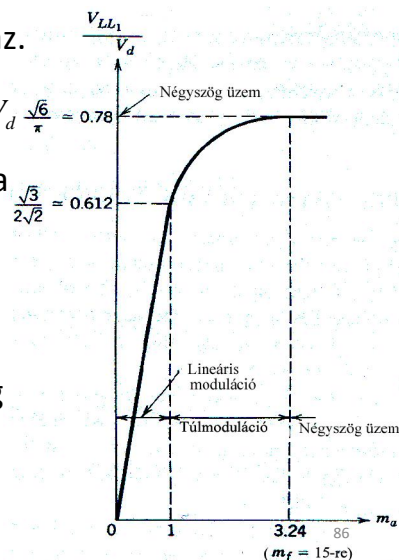
## Trofazni i višefazni invertori – proračun efektivne vrednosti izlaznog linijskog napona

- Linearna modulacija – sinusni izlaz.

$$V_{LL} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (\hat{V}_{AN})_1 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} (m_a V_d) \approx 0,612 m_a V_d \frac{\sqrt{6}}{\pi} = 0,78$$

- U slučaju premodulacije efektivna vrednost raste ali se dobija izobličeni signal.
- U krajnjem slučaju i tu se dobija pravougaoni signal.
- Efektivna vrednost pravougaonog signala je:

$$V_{LL} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \frac{4}{\pi} \frac{V_d}{2} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_d \approx 0,78 V_d$$



## Stepena iskorišćenja prekidača kod trofaznih i višefaznih invertora

- Stepenn iskorišćenja prekidača se dobija kao odnos prividne snage trofaznog izlaza i prividne snage prekidača:  $k = \frac{(VA)_{3-fázis}}{6V_T I_T}$
- U najboljem slučaju dobijaju se sledeći odnosi:  $V_T = V_d, I_T = \sqrt{2}I_{o,max}$   
 $(VA)_{3-fázis} = \sqrt{3}V_{LL1} I_{o,max}$
- U slučaju linearne modulacije maksimalni stepenn iskorišćenja je:  $k = \frac{\sqrt{3}V_{LL1} I_{o,max}}{6V_d \sqrt{2}I_{o,max}} = \frac{1}{2\sqrt{6}} \frac{V_{LL1}}{V_d}$
- U pravougaonom režimu važi:  $k = \frac{1}{2\sqrt{6}} \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a = \frac{1}{8} m_a$
- I kod ranije prikazanih invertora smo dobili iste rezultate.  $k = \frac{1}{2\pi} \approx 0,16$ .

87

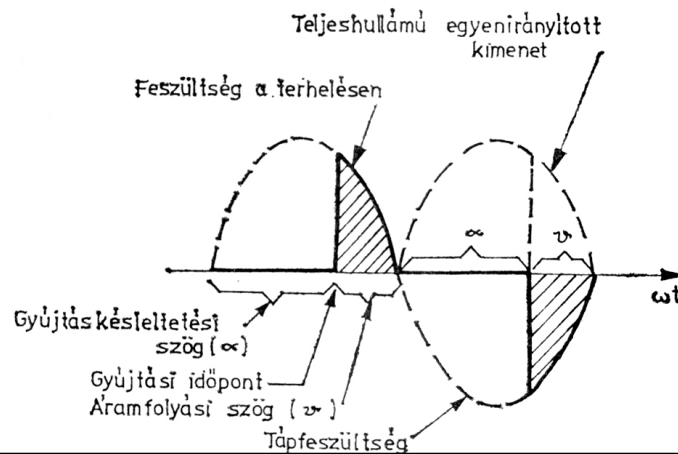
## Pretvarači naizmeničnog napona

- Mnogi različiti sklopovi.
- Jedan naizmenični napon (ili struju) pretvaraju u drugi.
- Šta se može menjati:
  - amplituda (efektivna vrednost) i/ili
  - frekvencija i/ili,
  - oblik signala.
- Tipovi:
  - fazni regulatori
  - regulatori brojem celih perioda,
  - kontinualni regulatori naizmeničnog napona,
  - pretvarači frekvencije,
  - ciklokonvertori.

88

## Fazni regulatori - osnovi

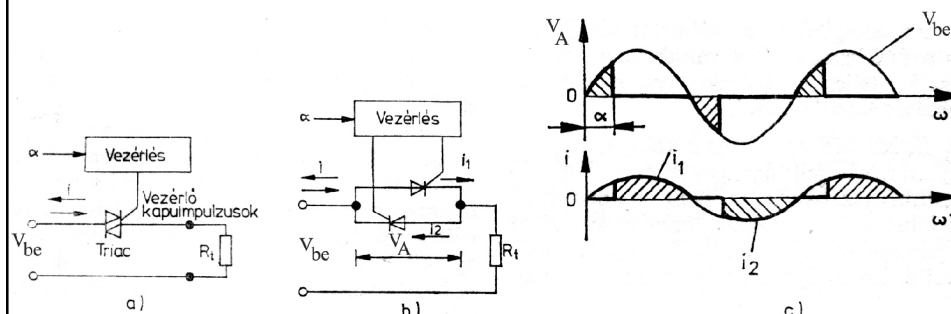
- Na ulazu je naizmenični napon.
- Pokretanje struje kasni u odnosu na prolaz mrežnog napona kroz nulu unutar svake poluperiode.



89

## Fazni regulatori - konstrukcija

- Rešavaju se tiristorskim dva tiristora ili jedan triac).
- Uključenje: pomoću impulsa za paljenje.
- Isključenje: pri prolascima ulaznog napona kroz nulu (prirodna komutacija).



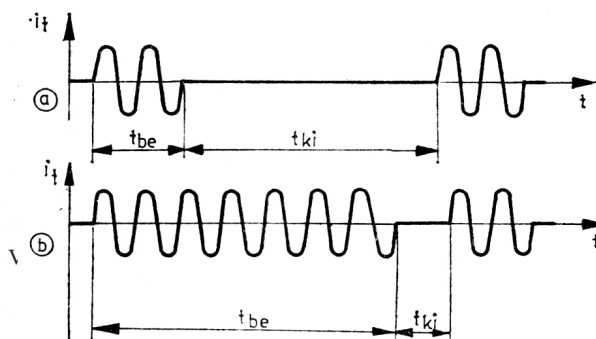
## Fazni regulatori- karakteristike

- Srednja snaga potrošača se može regulisati u celokupnom opsegu (od nule do maksimuma).
- I pri čisto ohm-skome potrošaču troši se reaktivna snaga (kasni osnovni harmonik struje u odnosu na ulazni napon).
- Na potrošač se dovodi napon u svakoj poluperiodi ili periodi, samo u kratkim intervalima ostaje bez napajanja, zato je fazna regulacija pogodna za regulaciju osvetljenja.
- Na potrošač dolazi signal sa istom osnovnom frekvencijom kao na ulazu ali su značajna izobličenja.
- Omogućava regulaciju sa malim gubicima.
- Ne koriste se pasivne komponente značajnih gabarita.
- Izobličava se i ulazni napon i značajne su radiofrekvencijske smetnje.

91

## Regulacija brojem celih perioda

- Propuštaju se ili se ne propuštaju cele periode .
- Ne proizvodi se značajan nivo izobličenja i RF smetnji.



92

## Regulacija brojem celih perioda - karakteristike

Mane:

- napon koji dolazi na potrošač se ne može menjati kontinualno,
- u dužem intervalu potrošač ne dobija energiju, zato o srednjoj snazi potrošača može se govoriti tek ako je vremenska konstanta potrošača velika,
- opterećenje mreže se menja u vremenu.

Prednosti:

- na potrošač se uvek dovode cele periode (eventualno poluperiode),
- ne postoji nagli skok napona kao kod fazne regulacije, zato nema radiofrekvencijskih smetnji,
- zahtevi prema tiristorima su manji (skok struje nije tako nagli),
- ne uzima se reaktivna snaga iz izvora.

93

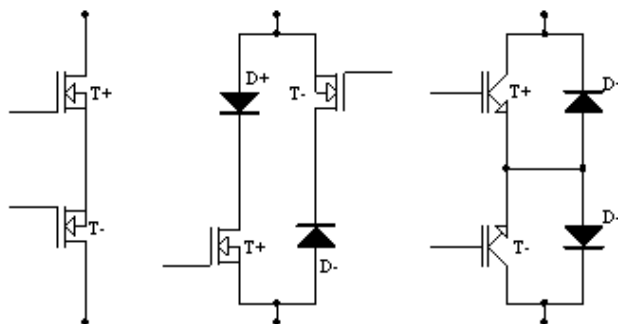
## Kontinualni regulatori naizmeničnog napona - osnovi

- Pomoću regulacionog transformatora moguće je regulisati napon kontinualno u opsegu  $0 \dots V_{\max}$  (frekvencija, broj faza i oblik signala se ne menjaju).
- Regulacioni transformator je velikih dimenzija, težak, skup i kratkog radnog veka (zbog kliznog kontakta).
- Razvijene su ideje za elektronsku regulaciju naizmeničnog napona ali zasad nema takvih uređaja na tržištu.
- Načelno svaki pretvarač jednosmernog napona u drugi jednosmerni napon (buck, boost, buck-boost, Ćukov) može da reguliše naizmenični napon ako se obični (jednokvadrantni, unilateralni) prekidači u pretvaraču zamene sa bilateralnim (četvorokvadrantnim) prekidačima.

94

## Bilateralni prekidači

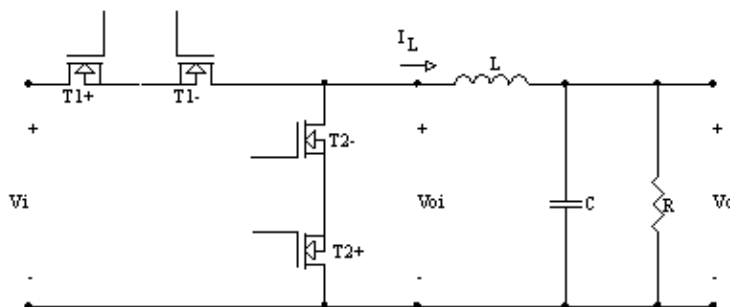
- U uključenom stanju mogu da provode struju u oba smera, u isključenom stanju mogu da podnose napone oba smera (neće proteći struja).



95

## Naizmenični buck regulator napona

- I prekidački tranzistor i dioda je zamenjena bilateralnim prekidačima.
- Dva bilateralna prekidača se uključuju naizmenično sa faktorima ispunje  $D$  i  $1-D$ .

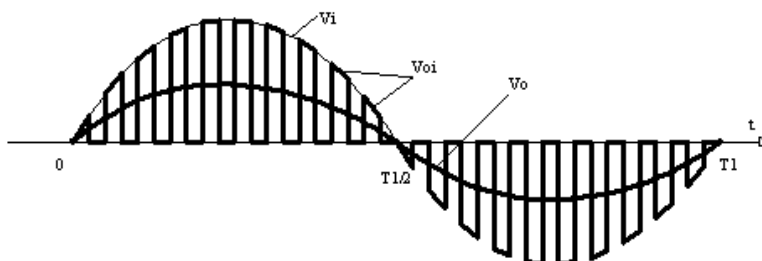


96



## Dijagrami za buck regulator naizmeničnog napona

- Na ulazu izlaznog LC filtra se formira pravougaoni signal modulisan po amplitudi.
- Na izlazu filtra dobijemo sinusni napon, amplituda tog napona se može menjati kontinualno promenom faktora ispunje.



97

## Problemi oko bezbednog rada prekidača u naizmeničnom buck regulatoru

- U principu prekidači se uključuju naizmenično.
- Pri promeni stanja ne može biti niti preklapanja niti prekid u provođenju – to je u praksi nemoguće – kod svih dosadašnjih višetranzistorskih pretvarača bilo je bar malo pauze između provođenja dva tranzistora.
- Unutrašnje tranzistore bilateralnog prekidača treba uključivati/isključivati ponaosob, uz poštovanje određenog redosleda (višestepeno prekidanje).
- Redosled zavisi od trenutnog smera struje kalema.

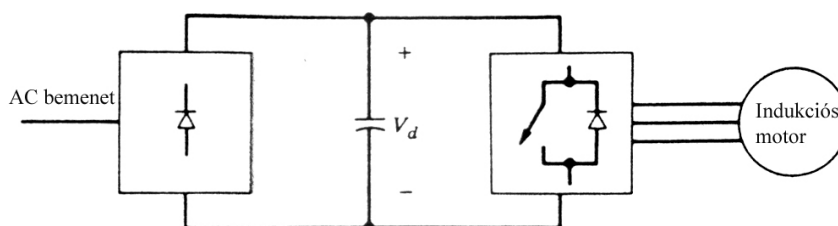
98

## Pretvarači frekvencije

- Dva stepena: usmerač + inverter.
- Između ta dva stepena postoji međukolo sa jednosmernim naponom (kondenzator) ili sa jednosmernom strujom (kalem)
- Pretvarač frekvencije može da menja:
  - amplitudu,
  - frekvenciju,
  - broj faza,
  - oblik signala.

99

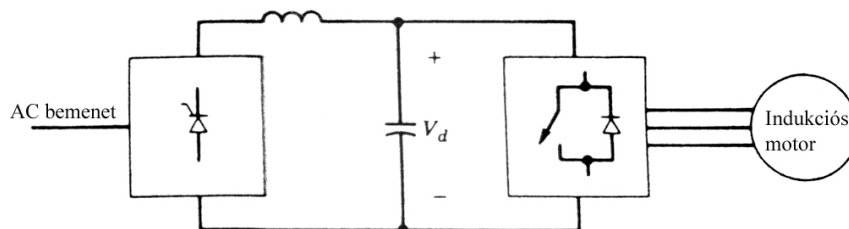
## Pretvarači frekvencije – konstrukcija br. 1.



- Diodni usmerač + PWM inverter.
- Napon međukola nije potrebno regulisati pošto PWM inverter može da menja sve parametre izlaznog signala.
- Na velikim snagama se javljaju veliki gubici, pogotovu a ko se koristi visoka frekvencija za PWM.
- Danas se skoro isključivo koristi ovo rešenje na malim i srednjim snagama.

100

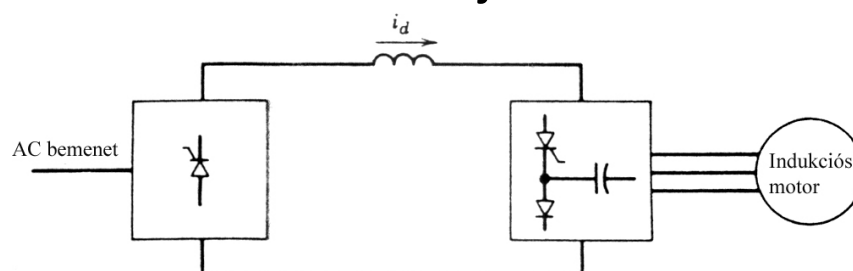
## Pretvarači frekvencije – konstrukcija br. 2.



- Tiristorski usmerač + pravougaoni inverter.
- Umesto tiristorskog usmerača možemo koristiti diodni usmerač u kombinaciji sa buck pretvaračem.
- Tiristorski ispravljač reguliše napon međukola. Pravougaoni inverter ne može da menja amplitudu izlaznog signala.
- Pogodan je za velike snage zbog malih prekidačkih gubitaka (prekidači u invertoru rade na niskoj frekvenciji).

101

## Pretvarači frekvencije – konstrukcija br. 3.



- Inverter vođen sa potrošača (napon motora omogućava prirodnu komutaciju) napaja potrošač.
- Ulazni tiristorski usmerač reguliše struju.
- Danas se ovo rešenje smatra zastarelim.

102

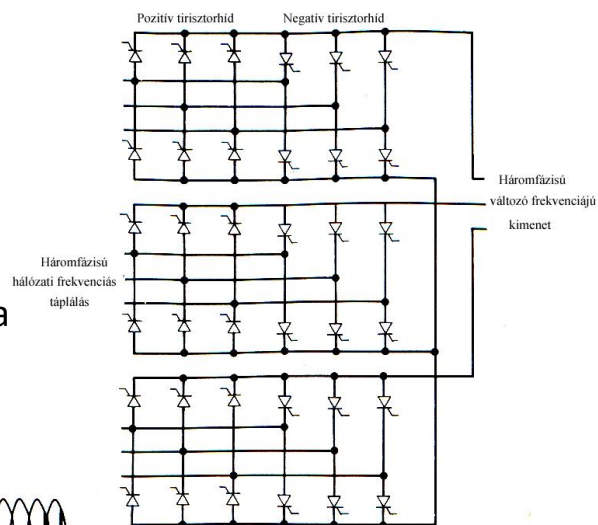
## Ciklokonvertori

- Pretvaranje naizmeničnog napona bez jednosmernog međukola (nema dela sa jednosmernim naponom ili jednosmernom strujom).
- Dva tipa:
  - tiristorski ciklokonvertori sa prirodnom komutacijom,
  - tranzistorski (PWM) ciklokonvertori sa prisilnom komutacijom.

103

## Ciklokonvertori – tiristorska rešenja

- Dva usmeračka tiristorska mosta formiraju jednu i drugu poluperiodu izlaznog napona.
- Maksimalna izlazna frekvencija je trećina ulazne frekvencije.



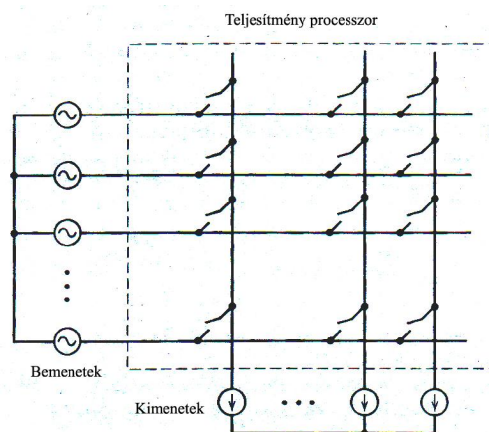
A kimeneti feszültség alapharmónikus



104

## Ciklokonvertori – tranzistorska rešenja

- Koristi matrično raspoređene bilateralne prekidače.
- Broj prekidača je  $m \times n$ , gde je  $m$  broj ulaznih faza,  $n$  broj izlaznih faza.
- Uključivanju/isključivanju prekidača treba posvetiti veliku pažnju: ne sme da dođe ni do kratkog spoja ulaznih napona ni do prekidanja izlazne struje.



105

## Primene pretvarača

- jedinice za napajanje
- elektromotorni pogoni
- ostalo

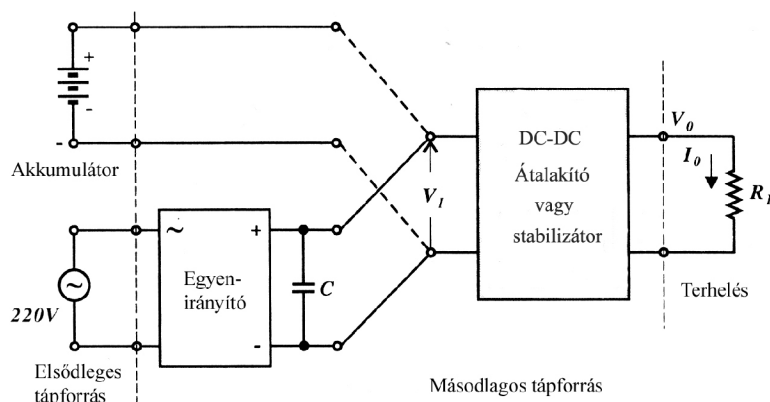
## Jedinice za napajanje

- Proizvodnja, eksploatacija i održavanje jedinica za napajanje je jedna od glavnih oblasti energetske elektronike.
- Uloga: napajanje analognih i digitalnih elektronskih uređaja
- Teme koje obrađujemo:
  - Linearna napajanja
  - Prekidačka napajanja
  - Besprekidna napajanja

107

## Jedinice za napajanje – osnovna konstrukcija

- Primarni izvori napajanja su: naizmjenična mreža, akumulator, suva ćelija, fotonaponski element, vetrogenerator itd.
- Uloga sekundarnih izvora (jedinica) za napajanje: regulacija, izolacija (odvajanje), zaštite...
- Tipovi: linearni, prekidački, kombinovani.



108

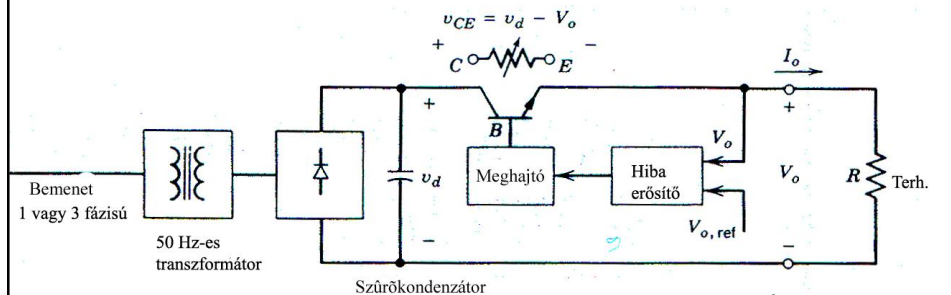
## Linearne jedinice za napajanje – uvod

- **Uloga:** snabdevanje elektronskih uređaja regulisanim (stabilnim) jednosmernim naponom (jedan napon ili više njih).
- **Regulacija** se vrši **disipativnim** putem: višak snage se pretvara u toplotu.

109

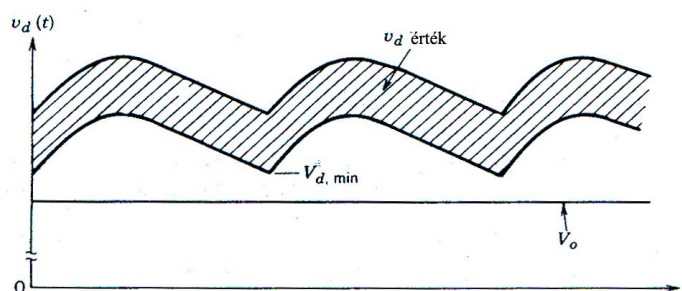
## Linearne jedinice za napajanje - konstrukcija

- Redovno se koristi transformator na ulazu: radi izolacije ulaza od izlaza i radi smanjivanja napona na potreban nivo.
- Usmeravanje.
- Regulacija.
- Ako je primarni izvor jednosmernog karaktera, neće se koristiti transformator.



## Linearne jedinice za napajanje - analiza

- Usmerač daje talasajući jednosmerni napon.
- Napon varira i usled promene opterećenja.
- Ulazni napon regulacionog elementa u svakom momentu mora biti veći od željenog izlaznog napona.



111

## Linearne jedinice za napajanje – karakteristike

- **Prednosti:**
  - mala izlazna otpornost,
  - mala talasnost izlaznog napona,
  - dobar faktor stabilizacije,
  - prosta regulacija,
  - nema radiofrekvencijskih smetnji.
- **Mane:**
  - nizak stepen iskorišćenja (obično  $0,2 < \eta < 0,6$ ),
  - velika težina i veliki gabariti.
- Prema današnjem stanju tehnike primena linearnih jedinica za napajanje je opravdana svega do nekoliko watti snage!

112



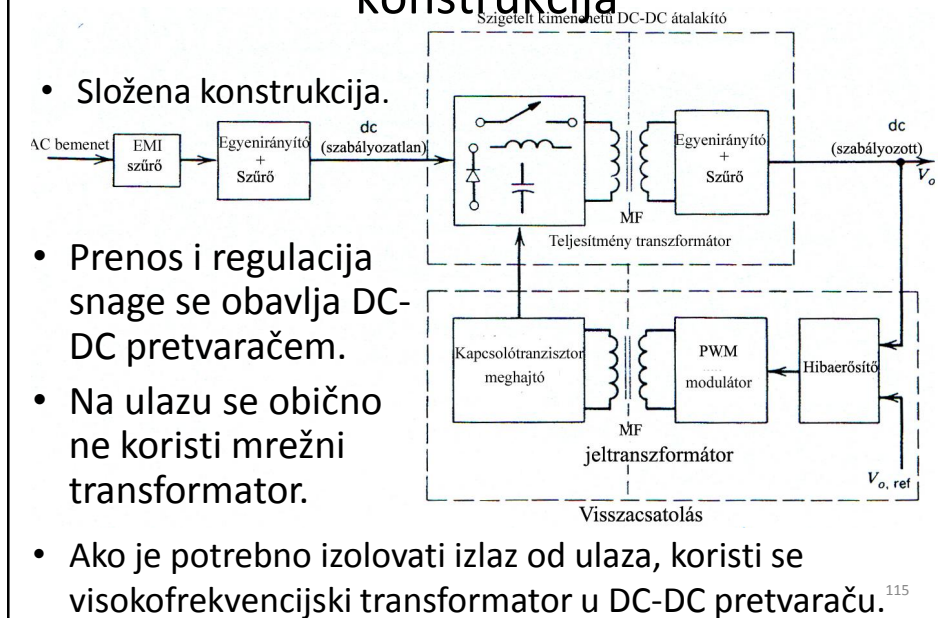
## Linearne jedinice za napajanje – raspoloživi izbor

- Uglavnom primenjujemo integrisana polugotova rešenja.
- Integrisana rešenja pored regulacije sadrže i zaštitne funkcije.
- Podele:
  - regulacija **pozitivnog** ili **negativnog** napona,
  - izlazni napon je **fabrički fiksiran** ili je **podešljiv** (na pr. potenciometrom),
  - **redni** ili **paralelni** regulacioni element,
  - **low drop** rešenje – mala razlika između ulaznog i izlaznog napona – bolji stepen iskorišćenja. <sup>113</sup>

## Prekidačke jedinice za napajanje - uvod

- Prema današnjem stanju tehnike u većini slučajeva treba primeniti prekidačke jedinice za napajanje zbog većeg stepena iskorišćenja.
- Veći stepen iskorišćenja smanjuje troškove energije ali nije to glavni razlog već manje dimenzije, niža cena i veća pouzdanost prekidačkih jedinica

## Prekidačke jedinice za napajanje - konstrukcija



## Prekidačke jedinice za napajanje – konstrukcija – ulazni usmerač

- Redovno se vrši direktno usmeravanje (bez mrežnog transformatora).
- Talasnost napona se smanjuje elektrolitskim kondenzatorom velike kapacitivnosti.
- Kondenzator vrši i izvesno kratko premošćavanje za slučaj kratkih ispada mrežnog napona (10-50ms).
- Ulazna struja ni približno nije sinusna – ima visok sadržaj viših harmonika. Mogu se dobiti poboljšanja pasivnim i aktivnim metodama (tačka 5.4.1).
- Pri uključenju usmerača javlja se veliki strujni udar. Taj udar se ublažava NTC otpornicima (otprilike do 1kW) ili kombinacijom otpornika i prekidača.

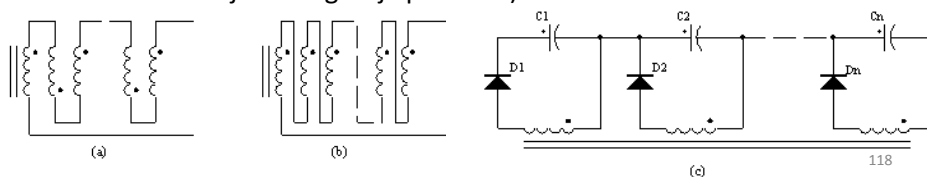
## Prekidačke jedinice za napajanje – konstrukcija – smetnje

- Brzo uključenje velikih napona i struja – javljaju se smetnje.
- Mehanizmi prenosa smetnji: zračenje, provođenje.
- Zračenje: potiče od namotaja, hladnjaka, energetskih vodova na štampanoj ploči. Lek: oklapanje (Faraday-ev kavez).
- Provođenje: visokofrekvencijske struje i naponi na priključnim vodovima, ometaju okolne uređaje. Lek: LC filtri.

117

## Prekidačke jedinice za napajanje – konstrukcija – VF transformator

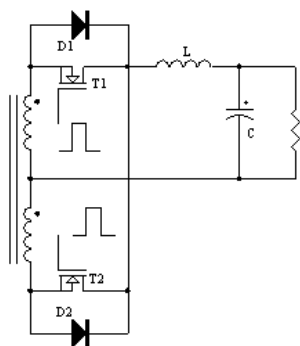
- Transformator izoluje izlaz od ulaza (ako je potrebno).
- Treba obezbediti veliki probojni napon (višestruka vrednost radnih napona!): dobri izolacioni materijali, odgovarajući razmaci, impregnacija, utapanje u smolu.
- Modelovanje transformatora: idealni transformator + rasipne induktivnosti + parazitne kapacitivnosti.
- Rasipne induktivnosti se mogu smanjiti sendvič motanjem ili bifilarnim motanjem.
- Kapacitivnosti između slojeva se mogu smanjiti specijalnim tehnikama namotavanja (a – obično motanje, b namotavanje uz vraćanje na početak, c – usmeravanje svakog sloja posebno).



118

## Prekidačke jedinice za napajanje – konstrukcija – izlazni ispravljač

- Zbog brzih signala uglavnom koristimo brze diode. Ima par izuzetaka kod rezonantnih pretvarača. Kod sporih dioda inverzna struja pri isključenju diode prouzrokuje velike gubitke.
- U slučaju velikih struja i malih napona treba koristiti Schottky-jeve diode – manji pad napona, manji gubici.
- Kod jako velikih struja i jako malih napona najbolje rešenje je sinhroni usmerač – koriste se MOSFET-ovi umesto dioda – mala otpornost kanala – mali pad napona.
- Potrebno je odgovarajuće upravljanje za MOSFET-ove – bez preklapanja.



119

## Prekidačke jedinice za napajanje – konstrukcija – dimenzionisanje snažnih poluprovodnika

- Razni tranzistori (bipolarni tranzistor, MOSFET, IGBT...) i diode.
- Odrede se vremenski dijagrami za slučaj idealnih prekidača.
- Poluprovodničke komponente se biraju tako da mogu da podnesu najveće napone i struje na dijagramima.
- Procene se gubici (statički + dinamički) i primeni se adekvatno hlađenje.

120

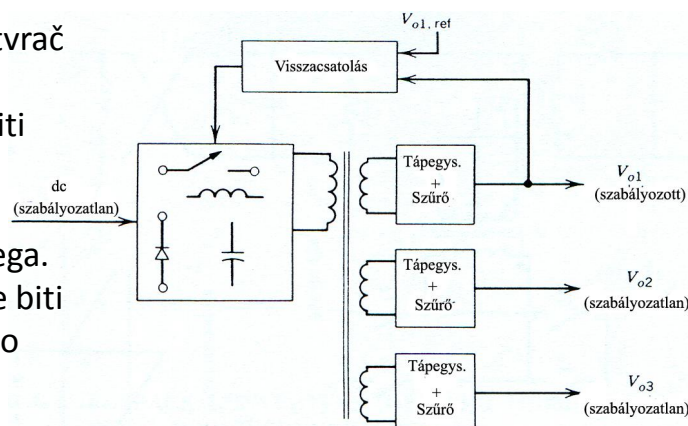
## Prekidačke jedinice za napajanje – konstrukcija – upravljanje i regulacija

- Kod pretvarača sa pravougaonim signalima koristi se impulsno-širinska modulacija.
- Kod rezonantnih pretvarača koristi se frekventna modulacija.
- Modulatorom upravlja pojačavač greške.
- Modulator obično ne vrši upravljanje prekidačkih tranzistora direktno već preko pobudnog stepena.
- Izlaz pobudnog kola se često izoluje od ulaza (prenos signala optokaplerom ili transformatorom).
- Razlog za izolaciju: bezbednost korisnika i pobuda tranzistora na različitim potencijalima.

121

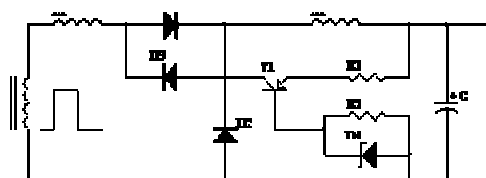
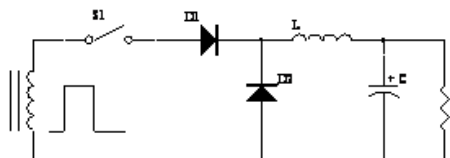
## Prekidačke jedinice za napajanje – konstrukcija – formiranje više izlaza

- I kada je potrebno dobiti više izlaznih napona, trude se da to ostvare sa minimalnim brojem pretvarača (na pr. sa jednim).
- Na jedan pretvač se uglavnom može primeniti samo jedna naponska povratna sprega.
- Ostali izlazi će biti samo približno stabilni.



## Prekidačke jedinice za napajanje – konstrukcija – primena magnetnog pojačavača

- Neregulisani izlazi se mogu regulisati magnetnim pojačavačem.
- Princip: određeni delovi sekundarnih impulsa se ne puštaju na izlaz (prekidačem se blokiraju).
- Ulogu prekidača obavlja zasitljiva prigušnica.
- U prigušnicu se dovodi jednosmerni napon, time se reguliše vreme uključenja ekvivalentnog prekidača.
- Druga mogućnost je da se doda jedan direktno spregnuti pretvarač ili linearna jedinica za napajanje.



123

## Prekidačke jedinice za napajanje – karakteristike – uvod

Pri projektovanju, proizvodnji i nabavci prekidačkih jedinica za napajanje potrebno je uzeti u obzir sledeće podatke:

- opseg ulaznog napon,
- izlazni napon,
- izlazna struja,
- talasnost izlaznog napon,
- stabilnost izlaznog napon,
- stepen iskorišćenja,
- radni temperaturni opseg,
- način hlađenja,
- radni vek,
- nivo elektronskih smetnji,
- nivo akustičkih smetnji.

124

### Prekidačke jedinice za napajanje – karakteristike – opseg ulaznog napona

- Obično se navodi nazivna vrednost.
- Maksimalna vrednost: važna je zbog prekidačkih tranzistora.
- Minimalna vrednost: ispod toga nije moguće izregulisati traženi izlazni napon i struju.
- Kod naizmeničnog ulaza važna je i frekvencija ulaza: kritična je minimalna frekvencija pošto u tom slučaju filtarski kondenzator treba da premošćava veće pauze.

125

### Prekidačke jedinice za napajanje – karakteristike – parametri izlaznog napona

- Osnovni podatak je nazivna vrednost. Pored toga potrebno je zadati očekivana odstupanja (usled promene opterećenja, promene ulaznog napona, promene temperature).
- Opseg podešavanja – ima smisla kod onih jedinica kod kojih je napon podešljiv.
- Umesto izlaznog napona moguće je regulisati izlaznu struju, snagu... Za to je potrebna adekvatna povratna sprega.

126

### Prekidačke jedinice za napajanje – karakteristike – izlazna struja

- Prekidačke jedinice za napajanje treba zaštititi od prekomerne izlazne struje.
- Kod prevelike struje pojedine komponente se preoptereće i mogu da propadnu.
- Može biti problema i sa preslabim opterećenjem. jedinice za napajanje po mogućstvu ne rade ispod desetog dela nazivne struje.
- Jedinica za napajanje će najverovatnije raditi i pri manjim strujama, ali može doći do povećanja talasnosti izlaznog napona i kvari se tranzijentno ponašanje.

127

### Prekidačke jedinice za napajanje – karakteristike – **talasnost** izlaznog napona

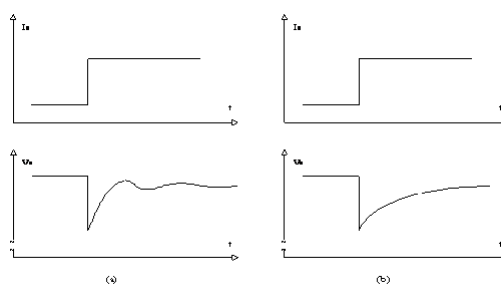
- Kod buck pretvarača i pretvarača izvedenih iz buck pretvarača dobija se mala talasnost izlaznog napona zato što se između prekidača i izlaza postoji LC filter.
- Kod boost pretvarača i pretvarača izvedenih iz boost pretvarača redovno se dobija veća talasnost zato što su strujni impulsi pretvarača filtrirani samo kondenzatorom.
- Uobičajeno je da se dozvoli talasnost reda veličine jednog procenta nazivne vrednosti izlaznog napona.
- Pored talasnosti na prekidačkoj frekvenciji preslikava se i izvesna talasnost iz ulaznog usmerača (komponenta na 100 Hz) – usled nesavršenosti regulacije – potrebna je brza i precizna regulacija.

128



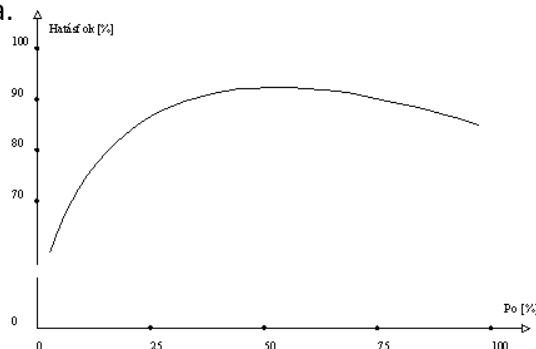
## Prekidačke jedinice za napajanje – karakteristike – **dinamika** izlaznog napona

- Prekidačke jedinice za napajanje reaguju sporije na skokovite promene ulaznog napona i struje opterećenja.
- Obično je potrebno vreme reda *ms* da bi kolo regulacije ponovo došlo u ustaljeno stanje.
- U međuvremenu izlazni napon vrši pseudoperiodične ili aperiodične oscilacije.
- Nakon spomenutog odziva jedinica za napajanje se vraća na polaznu vrednost izlaznog napona, ali uvek postoji mala izlazna otpornost: to će pri porastu struje opterećenja prouzrokovati mali pad izlaznog napona i suprotno.



## Prekidačke jedinice za napajanje – karakteristike – **stepen iskorišćenja**

- Prekidačka tehnika načelno omogućava visoki stepen iskorišćenja.
- Manji su gubici prekidačkih tranzistora od gubitaka tranzistora u linearnim jedinicama za napajanje.
- Manji su gubici visokofrekvencijskih transformatora.
- Stepenn iskorišćenja se kreće između 70%...90%, zavisi od opterećenja.



130

## Prekidačke jedinice za napajanje – karakteristike – **temperaturni opseg**

- Treba da se pronade kritična komponenta koja će odrediti do koje temperature okoline može da radi jedinica za napajanje.
- Integrisana kola za regulaciju i druge funkcije se proizvode za komercijalni (0...70°C), industrijski (-40°C...+85°C) i vojni (-55...+125°C) temperaturni opseg.
- Kod pasivnih komponenti najviša radna temperatura je obično oko 100°C prvenstveno zbog izolacionih materijala.
- I performanse magnetnih jezgara se kvare na visokim temperaturama.
- Kod snažnih poluprovodničkih komponenti maksimalna temperatura kućišta je obično između 80...100°C.
- Radni temperaturni opseg jedinica za napajanje, pored veličine gubitaka, dosta zavisi i od načina hlađenja.

131

## Prekidačke jedinice za napajanje – karakteristike – očekivani **radni vek**

- Očekuje se od jedinice za napajanje da radi besprekorno bar nekoliko godina.
- Poluprovodničke komponente mogu da stradaju usled slučajnih preopterećenja, protiv toga se primenjuje izvesno predimenzionisanje i izvesne zaštite.
- Kod motanih komponenti radni vek je ograničen trajanjem izolacionog materijala.
- Elektrolitski kondenzatori su podložni isušivanju: kod njih se zadaje radni vek preko broja radnih časova (na određenoj temperaturi).
- Pouzdanost jedinice za napajanje se obično zadaje preko očekivanog radnog veka (*mean time between failure – MTBF*).

132

## Prekidačke jedinice za napajanje – karakteristike – **smetnje**

- Za elektromagnetne smetnje od prekidačkih jedinica za napajanje postoje obavezujući nacionalni i internacionalni standardi.
- U standardima se navode granični nivoi vođenih i zračenih smetnji u funkciji učestanosti.
- Da li jedinica za napajanje odgovara standardima, ispituje se u ovlašćenim organizacijama pri atestiranju.
- Akustičke smetnje uglavnom potiču od magnetostricije: namotaji i jezgra u ritmu radne frekvencije menjaju položaj i oblik.
- Da bi se izbegle akustičke smetnje, radna frekvencija se obično bira iznad čujnog opsega (preko 20kHz).
- Zalivanje namotaja veštačkom smolom može dosta da priguši zvuk.
- Za akustičke smetnje obično ne postoje opštevažeći standardi već se treba prilagoditi zahtevima korisnika.

133

## Prekidačke jedinice za napajanje – **zaštite** – uvod

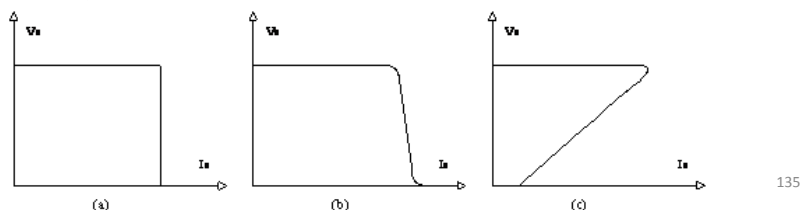
Izvor napajanja treba zaštititi od sledećih stvari:

- Prekostruja na izlazu.
- Prenapon na ulazu.
- Prenapon na izlazu.
- Zaštita od obrnutog polariteta.

134

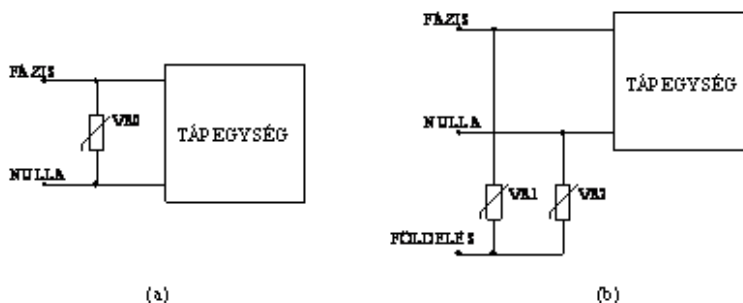
## Prekidačke jedinice za napajanje – zaštite – prekostruja

- Uzroci prekostruja: preopterećenje, startovanje, zaustavljanje, zasićenje induktivnih komponenti...
- Senzori struje: shunt otpornici, strujni transformator, hall-ova sonda.
- Važna je što brža intervencija.
- Može da nastupi osetljivost na smetnje i visokofrekvencijska oscilacija.
- Ostvaruju se razne izlazne karakteristike:



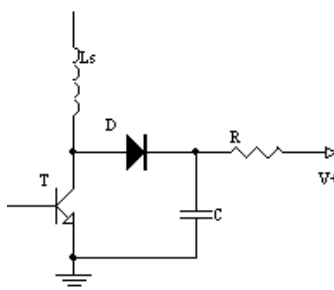
## Prekidačke jedinice za napajanje – zaštite – prenaponi na ulazu

- Prenaponi u primarnom izvoru energije (induktivni potrošači, udar groma...)
- Zaštitni elementi: varistori, TVS diode, cevi punjene plemenitim gasom.



## Prekidačke jedinice za napajanje – zaštite – prenaponi na prekidačima

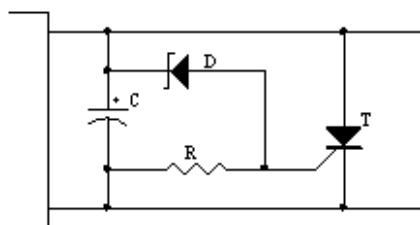
- Prenaponi na tranzistorima se javljaju pri isključenju.
- Kola za olakšanje komutacije (snubber) mogu donekle da pomognu.
- Naponski limiter: višak energije ide u kondenzator, zatim se preko otpornika deo izgubi, deo vraća u izvor.



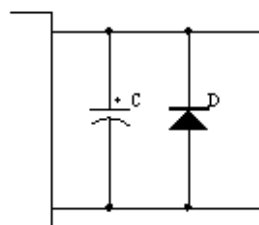
137

## Prekidačke jedinice za napajanje – zaštite – prenapon na izlazu

- Usled nepravilnog rada kola za regulaciju izlazni napon može da pobegne na veliku vrednost.
- Kod osetljivih potrošača posledice su katastrofalne.
- Crowbar zaštita (a) – (tiristorom) se kratko spoji izlaz napajanja (može eventualno i ulaz).
- Pogrešan polaritet na ulazu i izlazu se rešava rednom ili paralelnom diodom (b).



(a)



(b)

138

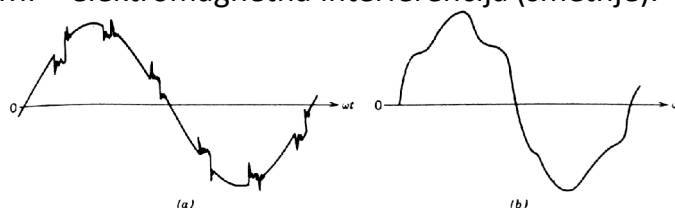
## Besprekidni izvori napajanja

- Besprekidni izvor napajanja (*uninterruptible power supply - UPS*)
- Kod mnogih uređaja već i kratka pauza (x10ms) u snabdevanju električnom energijom ima katastrofalne posledice.
- Kratke pauze se mogu premostiti kondenzatorima.
- Za duže pauze potreban je rezervni izvor energije (obično se koristi akumulator).
- Dva pristupa:
  - korekcija manjih nepravilnosti,
  - primena besprekidnog napajanja.

139

## Nepravilnosti u mrežnom napajanju

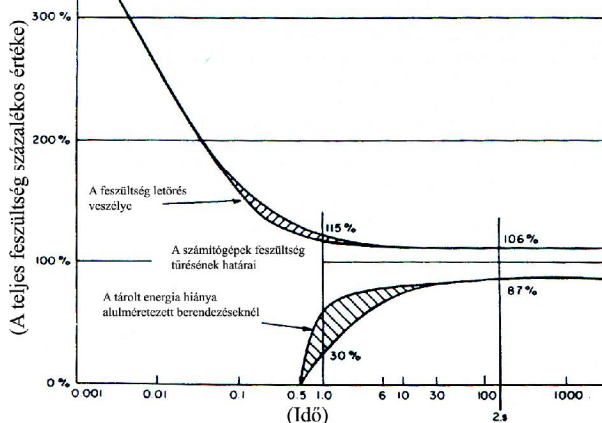
- Mrežni napon bi trebao da bude idealnog sinusnog oblika – samo to može da garantuje ispravan rad svih uređaja.
- Uređaji mogu da podnesu do određenog nivoa sledeće nepravilnosti:
  - prenapon,
  - podnapon,
  - ispad napona,
  - vrhovi napona,
  - skokovi u naponu (a),
  - viši harmonici (b),
  - *EMI* – elektromagnetna interferencija (smetnje).



140

## Nepravilnosti u mrežnom napajanju – granice tolerancije

- Različiti uređaji mogu da podnesu nepravilnosti različitih nivoa.
- Primer: tolerancija izvora napajanja za računare.
- Jedna poluperioda može da ispadne potpuno.



- Kratke prenapone uspešno limitiraju odvodnici prenapona (čak i 2-3 puta veće vrednosti od nazivnog napona).

141

## Korekcija nepravilnosti

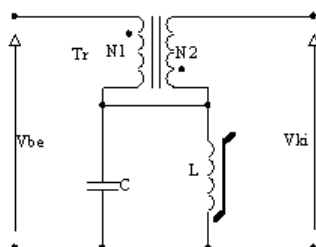
Postoje razni elementi i uređaji koji mogu da **eliminiraju ili smanje određene nepravilnosti**:

- **varistori**: pružaju zaštitu od naponskih vrhova,
- **EMI filtri**: smanjuju ulazak smetnji iz mreže u uređaj i u suprotnom smeru,
- **odvojni transformatori**: pored izolacije od mreže ukidaju i dobar deo naponskih vrhova,
- **ferorezonantni stabilizatori**: za korekciju prenapona koriste prigušnice i kondenzatore sa mogućnošću akumulisanja značajne energije; isti sklopovi ujedno ispoljavaju jak filtarski efekat protiv viših harmonika i radiofrekvencijskih smetnji,
- **korektori napona sa autotransformatorom**: menjanjem izvoda transformatora podešavaju izlazni napon,
- **linearni izvori napajanja**: daju „čist“ napon (bez smetnji) za snabdevanje osetljivih uređaja (samo za male snage).

142

## Korekcija nepravilnosti – ferorezonantni stabilizatori napona

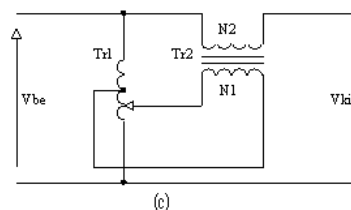
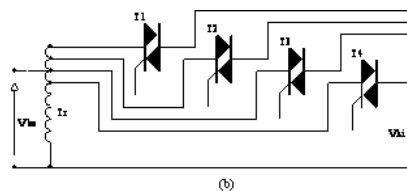
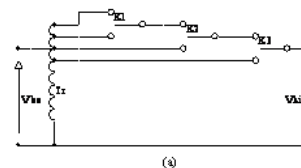
- Vrší regulaciju ulaznog naizmeničnog napona u relativno uzanom opsegu.
- Obično se rešava sa **pasivnim komponentama** (transformator, prigušnica, kondenzator).
- **Zasitljiva prigušnica** limitira napon.
- **Transformator** diže ulazni napon za neki procenat.
- **Kondenzator** ima ulogu oblikovanja izlaznog signala u sinusoidu.



143

## Korekcija nepravilnosti – korektor napona sa autotransformatorom

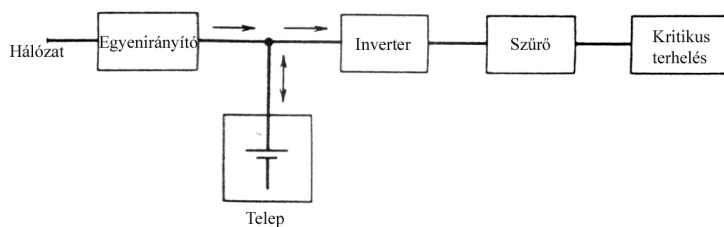
- Vrší regulaciju ulaznog naizmeničnog napona u **širokom opsegu**.
- Koristi se **autotransformator** sa više izvoda na primarnoj ili sekundarnoj strani.
- Može da se koristi i **regulacioni transformator** – dobija se kontinualna regulacija ali je to skupo rešenje.
- **Izvode menjamo** sa relejima (a) ili sa trijacima (b).
- Kombinovanjem sa dodatnim običnim transformatorom dobijemo **rešenje sa manjim ulaganjem** (c).





## Konstrukcija besprekidnih napajanja

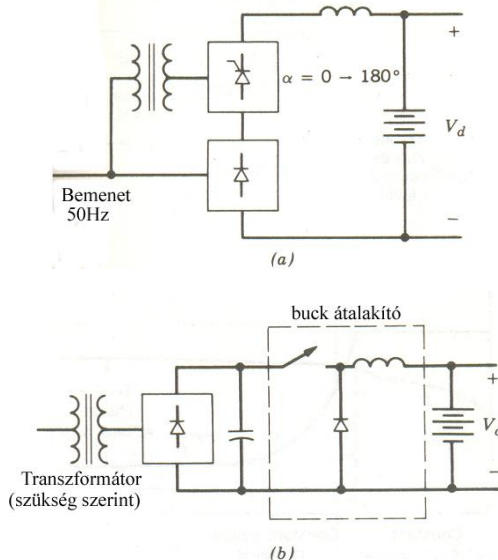
- Obezbeđuju **napajanje potrošača nezavisno od mreže za duži vremenski interval** (obično od nekoliko minuta do nekoliko sati).
- Kod **pravih** besprekidnih napajanja potrošač **stalno napajamo naponom sintetizovanim inverterom**.
- Ima **prostih** rešenja kod kojih **inverter se pokreće samo za vreme ispada** mrežnog napona.
- Ako je mrežni napon ispravan, **energija za napajanje invertora se uzima iz mreže**.
- U suprotnom slučaju koristi se **energija iz akumulatora**.



145

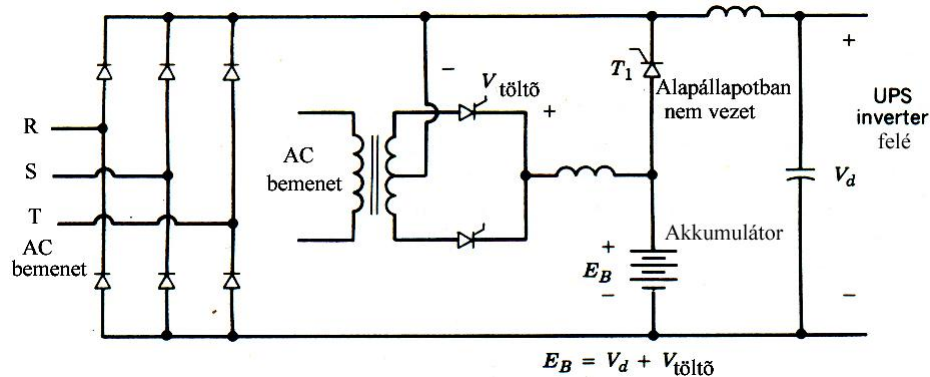
## Konstrukcija besprekidnih napajanja – razna rešenja za ispravljač

- Ispravljač može **ujedno da vrši i punjenje akumulatora**.
- Regulacijom punjenja ujedno **regulišemo i napon međukola**.
- Regulacija može da se vrši **tiristorskim usmeračem (a)** ili **pomoću buck pretvarača (b)**.



## Konstrukcija besprekidnih napajanja – razna rešenja za ispravljač

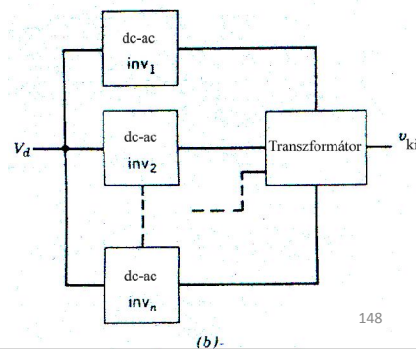
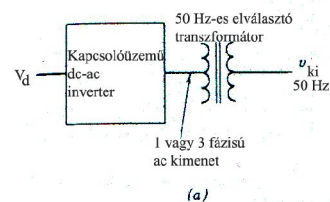
- Može da se koristi i **poseban ispravljač** za napajanje međukola i za punjenje akumulatora.



147

## Konstrukcija besprekidnih napajanja – razna rešenja za inverter

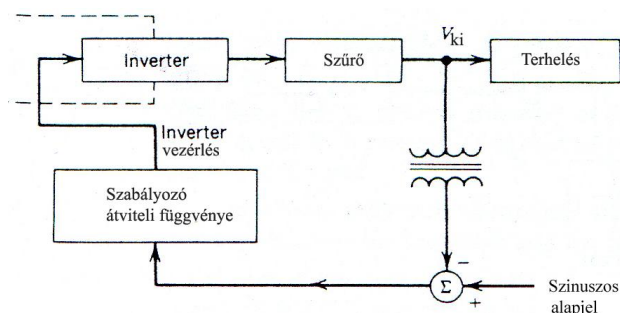
- Uglavnom** se koristi **PWM inverter** (a).
- U **jeftinim uređajima** se koriste i **pravougaoni** invertori.
- Izlazni napon** invertora je **limitiran** naponom akumulatora. **Po potrebi** ugrađuje se **transformator** (a).
- Kod UPS-ova **velikih snaga** koristi se **trofazni inverter** ili ili **paralelna veza** jednofaznih invertora manje snage (b).



148

## Konstrukcija besprekidnih napajanja – regulacija invertora

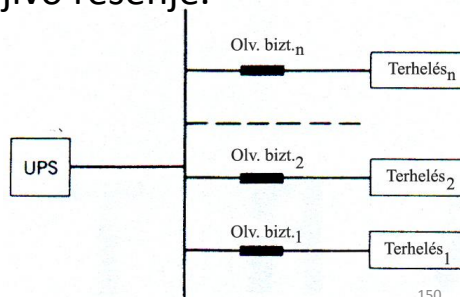
- Izlaz invertora treba da daje **izlazni napon** što čistijeg **sinusnog oblika**.
- Može da se koristi **predefinisani PWM** signal ili **on-line regulacija** (videti na slici).
- Postoje i **analogna** rešenja za regulaciju ali se danas sve više koriste **digitalni** regulatori.



149

## Konstrukcija besprekidnih napajanja – izlazni razdelnik

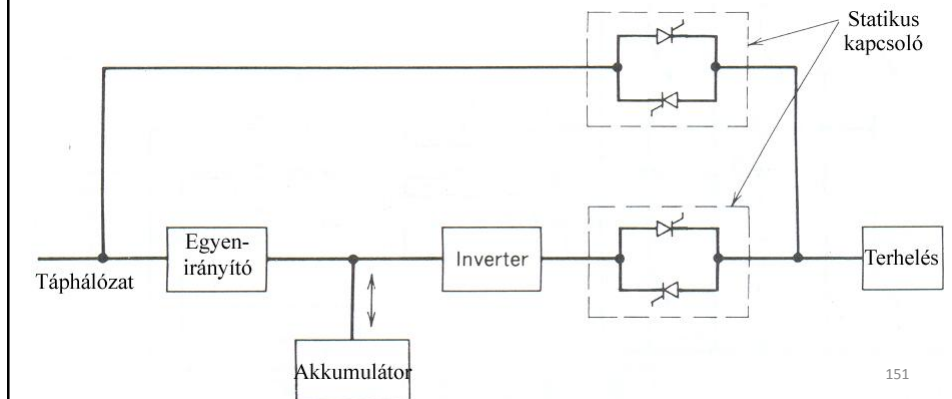
- U slučaju napajanja više potrošača treba da se reši da **kvar** (kratak spoj) **jednog** od njih **ne prouzrokuje isključivanje drugih**.
- Postavljanjem **osigurača** u svaku potrošačku granu može se dobiti prihvatljivo rešenje.



150

## Konstrukcija besprekidnih napajanja – statička sklopka

- Može da dođe i do **kvara UPS-a**.
- U takvom slučaju potrošač treba **automatski prebaciti** na mrežno napajanje.
- **Statička sklopka** rešena sa tiristorima omogućava **prebacivanje potrošača sa invertora na mrežu** i obrnuto bez značajne pauze.



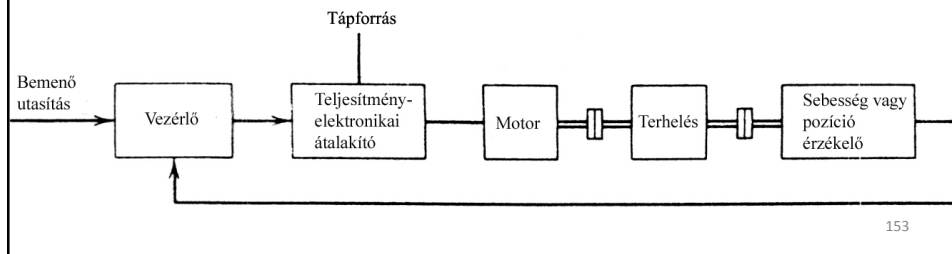
## Elektromotorni pogoni

- Široki opseg primene:
  - W...MW,
  - precizno pozicioniranje...gruba regulacija brzine.
- Vrste motora:
  - jednosmeni motori,
  - asinhroni motori,
  - sinhroni motori,
  - koračni motori.

152

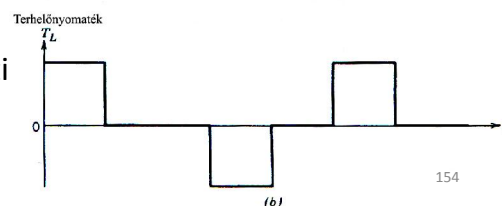
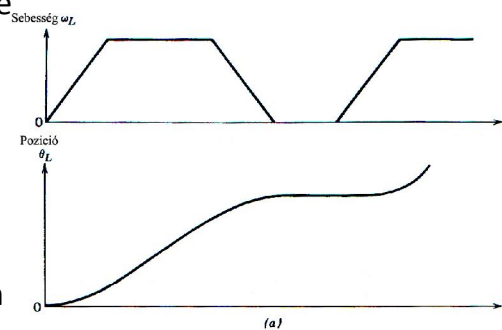
## Elektromotorni pogoni - uvod – blok šema

- Možemo regulisati brzinu ili poziciju.
- Nije obavezno koristiti detektor brzine/pozicije.
- Ulaznu komandu može da zadaje rukovalac ili računar koji vodi proces.



## Elektromotorni pogoni - uvod - polazne osnove za projektovanje

- Treba upoznati opterećenje (inercija, smer rotacije, brzina, moment, dinamika, da li ima kočenja...).
- Na osnovu gornjih podataka može se odrediti koje su potrebe za obrtnim momentom.
- Na osnovu zahtevanog momenta mogu se odrediti struje motora.
- Na osnovu struja može se proceniti grejanje.



## Elektromotorni pogoni - uvod - dimenzionisanje uređaja energetske elektronike

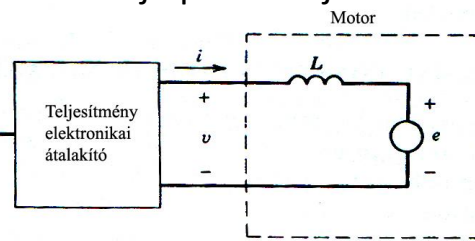
- Uređaj energetske elektronike je redovno sa naponskim izlazom.
- Model motora se sastoji od induktivnosti, otpornosti i indukovane elektromotorne sile.
- U zavisnosti od primenjenog napona, dolazi do porasta ili opadanja struje.
- Momenat je obično srazmeran sa strujom.
- Motor se obično greje sporije od uređaja energetske elektronike - zato treba da se dimenzioniše na vršnu struju motora.

155

## Elektromotorni pogoni - uvod - regulacija struje

- Za brzu regulaciju struje (servo pogoni) potrebno je dovesti na motor znatno veći napon od indukovane elektromotorne sile.
- Najbolje je da induktivnost namotaja bude što manja.
- Da ne bi dobili preveliku talasnost struje, potrebno je primeniti što veću frekvenciju prekidanja.

$$\frac{di}{dt} = \frac{v - e}{L}$$

50 Hz-es  
bemenet

156

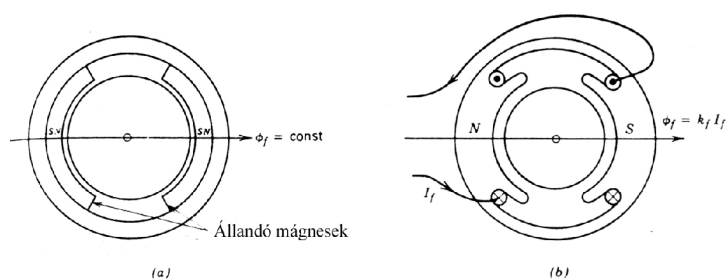
## Jednosmerni elektromotorni pogoni

- Prvo su konstruisani i primenjivani jednosmerni motori.
- I u regulisanim pogonima prvo su primenjivani jednosmerni motori.
- Imaju odlične pogonske karakteristike.
- Troškovi održavanja su veći nego kod drugih motora.

157

## Konstrukcija i modelovanje jednosmernih motora – **dobijanje fluksa i momenata**

- Stator formira statičko magnetno polje ( $\Phi_f$ ).
- Dva rešenja: pobuda sa stalnim magnetima ili sa pobudnim namotajem.
- Dobija se obrtni moment:  $T_{em} = k_f \Phi_f i_a$



158

## Konstrukcija i modelovanje jednosmernih motora - **napon, struja, snaga**

- Rotor se okreće u polju statora i indukuje se napon (elektromotorna sila):  $e_a = k_e \Phi_f \omega_m$
- Primljena električna snaga je:

$$P_e = e_a i_a = k_e \Phi_f \omega_m i_a$$

- Mehanička snaga je:

$$P_m = T_{em} \omega_m = k_f \Phi_f \omega_m i_a$$

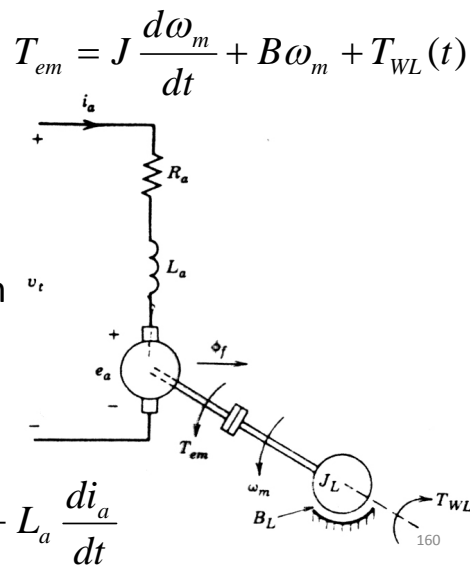
- Ako zanemarimo gubitke:

$$P_e = P_m \quad k_e = k_f$$

159

## Konstrukcija i modelovanje jednosmernih motora - **mehanički model**

- Elektromagnetni obrtni moment drži ravnotežu sa mehaničkim opterećenjem:
- Napon priključen na rotor (armaturu) drži ravnotežu sa induktivnim i otpornim padovima napona i sa indukovanom elektromotornom silom:

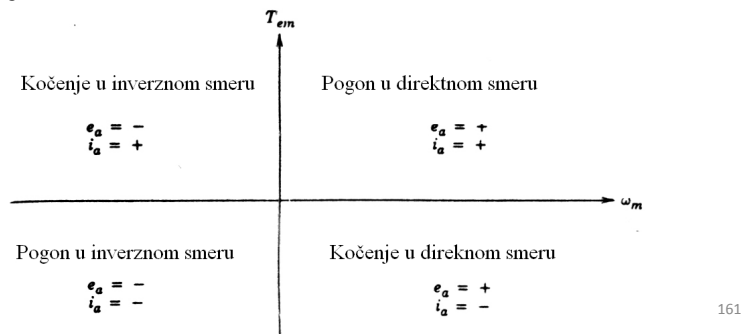


$$v_t = e_a + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}$$



## Konstrukcija i modelovanje jednosmernih motora - režimi rada

- Promenom polariteta priključenog napona može se promeniti smer rotacije.
- Pri promeni smera struje obrne se smer momenta: dolazi do (generatorskog) kočenja. U takvim situacijama indukovani napon je veći od priključenog napona.

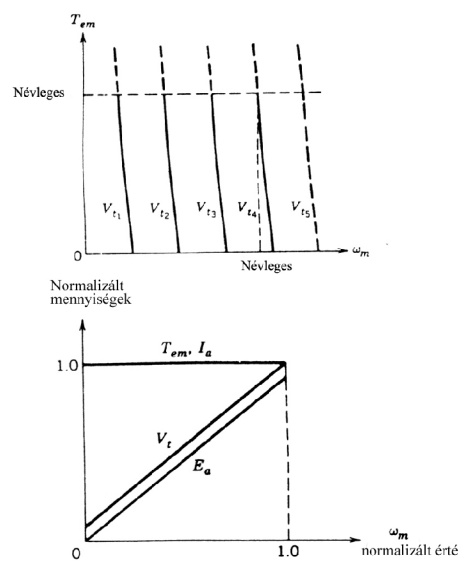


## Konstrukcija i modelovanje jednosmernih motora - karakteristike motora sa stalnim magnetima

- Pri konstantnom priključenom naponu broj obrtaja motora je približno konstantan ali pomalo pada, srazmerno sa veličinom opterećenja:

$$\omega_m = \frac{1}{k_E} \left( V_t - \frac{R_a}{k_T} T_{em} \right)$$

- Jedinstveni normalizovani dijagram prikazuje zavisnost  $V_t$  i  $E_a$  od broja obrtaja, pri konstantnom momentu i konstantnoj struji rotora.

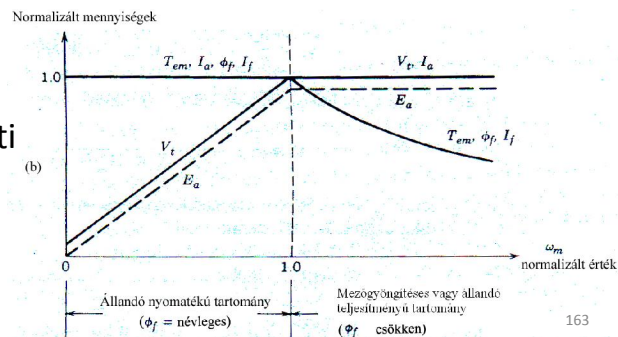


## Konstrukcija i modelovanje jednosmernih motora - karakteristike motora sa nezavisnom pobudom

- Može se regulisati pobudna struja i time i fluks statora.
- Do nazivnog broja obrtaja redovno je fluks konstantan.
- Formula za broj obrtaja:

$$\omega_m = \frac{1}{k_e \Phi_f} \left( V_t - \frac{R_a}{k_t \Phi_f} T_{em} \right)$$

- U oblasti slabljenja polja smanjenjem pobudne struje može se povećati broj obrtaja (uz smanjenje momenta.)



## Pretvarači za pogon jednosmernih motora - osnovi

Zadaci su:

- rad u jednom, dva ili četiri kvadranta (potrebna je promena polariteta priključenog napona i/ili struje).
- potrebno je obezbediti regulaciju i ograničenje struje motora (redovno je potrebno obezbediti struju koja je nekoliko puta veća od nazivne struje motora),
- potrebno je ostvariti malu talasnost.

164

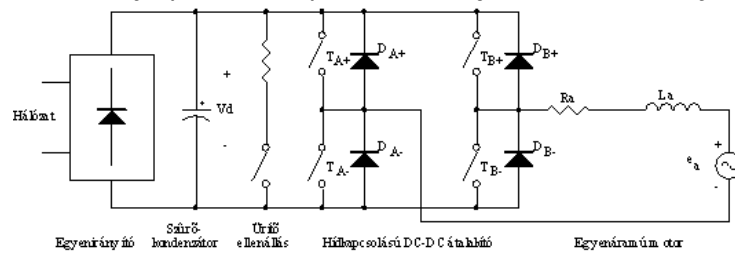
## Pretvarači za pogon jednosmernih motora - moguća rešenja

- Tiristorski usmerači: ima mogućnosti regulacije, dobar je stepen iskorišćenja, upravljanje je prosto, velika je talasnost.
- Buck pretvarač (obično bez LC filtra): ostvaruje jednokvadrantni pogon.
- Polumostni pretvarač: pogon i kočenje u jednom smeru.
- Mostni pretvarač: omogućava četvorokvadrantni rad.

165

## Pretvarači za pogon jednosmernih motora - mostni pretvarači - pogon za motore sa stalnim magnetima ili sa nezavisnom pobudom

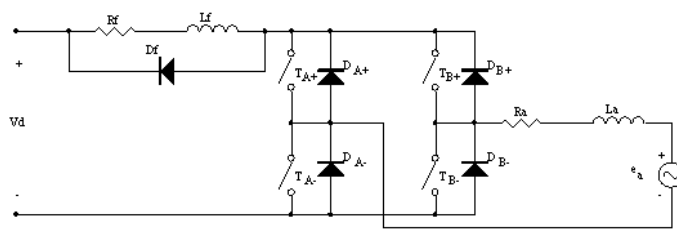
- Most se obično napaja iz **mrežnog usmerača**.
- **Peglanje izlazne struje** rešava induktivnost namotaja motora.
- Radi smanjenja talasnosti struje motora treba primeniti **unipolarni PWM** (talasnost povećava gubitke!).
- Usmerač u većini slučajeva nije u stanju da vraća energiju u mrežu - zato je potrebno primeniti **otpornik za kočenje**.



166

Pretvarači za pogon jednosmernih motora - mostni pretvarač - pogon motora sa rednom pobudom

- **Redni motor daje veliki momenat** pri startovanju - važna karakteristika za električnu vuču.
- **Promena polariteta priključenog napona ne menja smer rotacije** jer se istovremeno okrene i smer statorskog magnetnog polja - treba prekinuti rednu vezu statorskog i rotorskog namotaja i okrenuti samo smer struje u jednom od njih (korišćenjem mosta).



Állórész

Hítkapcsolás

Forgórész

167

## Asinhroni elektromotorni pogoni

- Asinhroni motor je široko rasprostranjen u industriji zbog **proste konstrukcije i minimalne potrebe za održavanjem**.
- Kod mnogih motora nije potrebna **nikakva regulacija** (eventualno startovanje zvezda-trougao ili meko startovanje sa tiristorima).
- Prostiji slučaj regulisanog asinhronog pogona je kada se vrši **samo gruba regulacija brzine**.
- Primenom savremenih tehnika za upravljanje danas se i asinhroni motori mogu primeniti za **servo pogon (sa preciznim podešavanjem brzine i pozicije)**.

168

## Konstrukcija i karakteristike asinhronih motora - uvod

- **Stator** se sastoji od čeličnog jezgra i od namotaja u tom jezgru. Na statorske namotaje dovodimo trofazni napon/struju koja ostvaruje **obrtno magnetno polje** na sinhronoj brzini:

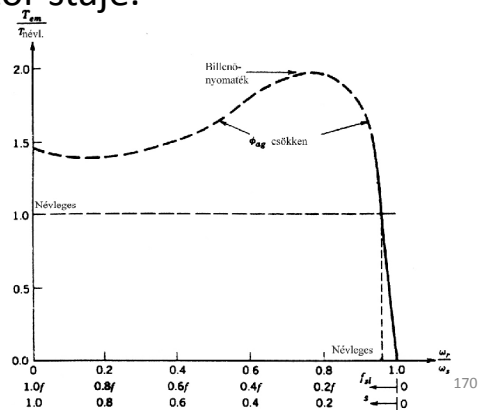
$$n_s = 60 \times \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{120}{p} f$$

- **Rotor** se obično sastoji od magnetnog jezgra i kratkospojenog namotaja (kavez).
- Pod uticajem obrtnog magnetnog polja statora u rotor se indukuju naponi koji formiraju struje u rotoru i novo (rotorsko) magnetno polje. **Magnetno polje rotora se okreće malo sporije** (za nekoliko procenata) od statorskog polja. Razlika brzina je **klizanje**:  $\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r$
- **Obrtni momenat** se javlja kao rezultat međusobnog uticaja obrtnog polja statora i rotorskih struja.

169

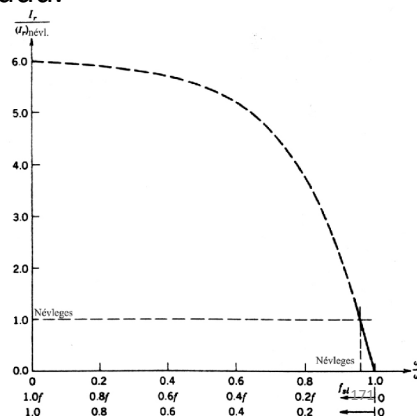
## Konstrukcija i karakteristike asinhronih motora - momentna karakteristika

- Pri napajanju sa nazivnim naponom i frekvencijom, **pri povećanju opterećenja raste klizanje**.
- Opterećenje se može povećavati **do maksimalnog momenta**, posle motor staje.
- Motor obično radi na **linearnom segmentu karakteristike** (malo ispod sinhronne brzine).



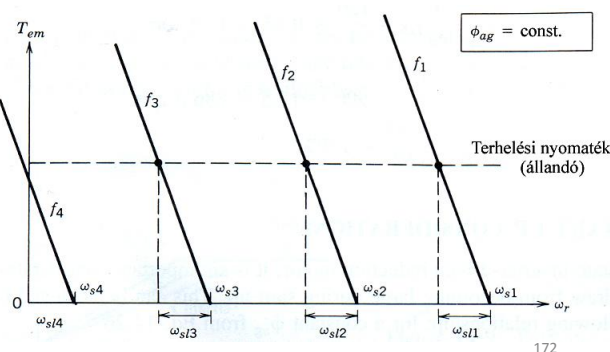
## Konstrukcija i karakteristike asinhronih motora - **struja motora**

- Počev od sinhronne brzine (oko praznog hoda) pa **do nazivnog opterećenja struja motora raste srazmerno.**
- **Pri daljem povećanju opterećenja struja dalje raste** - to se ne može dozvoliti pri trajnom radu.
- **Pri direktnom startovanju** motor uzima višestruku struju iz izvora (obično 5x...8x).
- **Struja startovanja se može smanjiti** smanjivanjem napona napajanja (meko startovanje) ili istovremenim smanjivanjem napona i frekvencije.



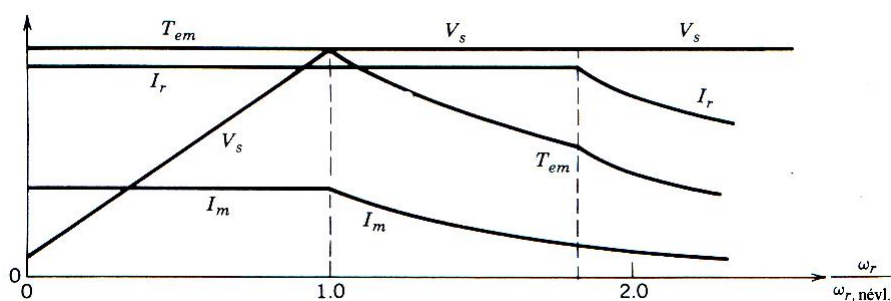
## Konstrukcija i karakteristike asinhronih motora - **upravljivost**

- Kod regulisanog pogona sa asinhronim motorom potreban naizmenični napon se formira **trofaznim inverterom.**
- **Promenu broja obrtaja postizemo promenom frekvencije napajanja** - time se pomera i momentna karakteristika.
- **Za obezbeđenje konstantnog momenta** potrebna je približno linearna promena napona sa frekvencijom ( $U_s/f \approx \text{const.}$ ).



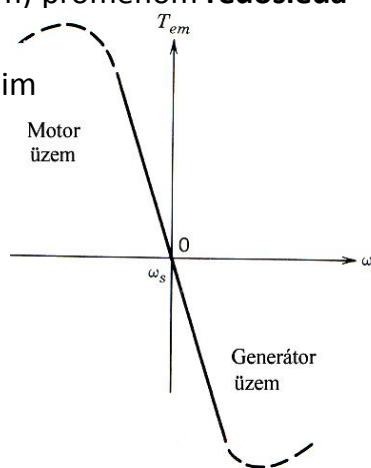
## Konstrukcija i karakteristike asinhronih motora - **normalizovani dijagrami**

- **Od nule do nazivnog broja obrtaja**, napon doveden na stator treba da se diže linearno, tako će struja motora i formirani **momenat biti približno konstantni**.
- Motor obično može da radi i **preko nazivnog broja obrtaja**, ali se napon ne povećava dalje i **momenat pada** (oblast slabljenja polja).



## Konstrukcija i karakteristike asinhronih motora - **kočenje i generatorski režim**

- Uz odgovarajuću kontrolu asinhroni motori mogu da rade u **četiri kvadranta**.
- **Smer rotacije** se menja (elektronskom) promenom **redosleda faza**.
- **Kočenje motora** se postiže postepenim smanjivanjem frekvencije napajanja.
- Smanjivanjem frekvencije postiže se **negativno klizanje**, što dovodi do promene smera obrtnog momenta (generatorski režim).
- U **generatorskom režimu** energija iz mehaničkog sistema se vraća u električni sistem.



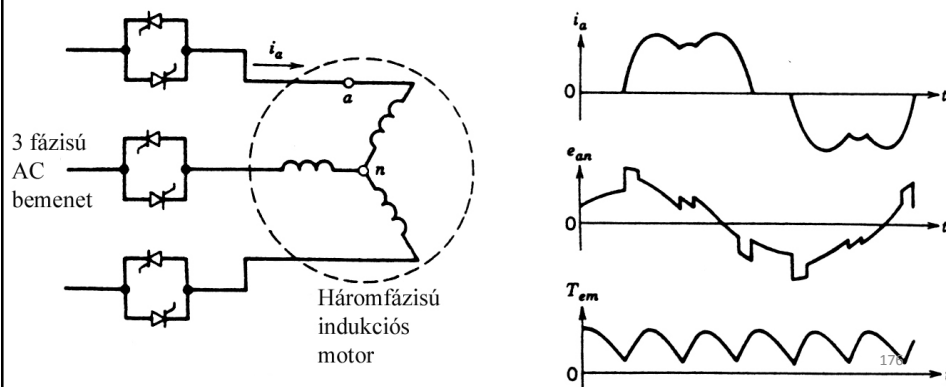
## Asinhroni pogoni na bazi pretvarača frekvencije

- Promenom frekvencije napajanja statora ( $f_s$ ) menja se **sinhrona brzina motora**. U većini slučajeva stvarna brzina motora je u blizini sinhronne brzine.
- Istovremeno i **približno srazmerno treba menjati i efektivnu vrednost statorskog napona ( $V_s$ )** da bi se rotorska struja i fluks u vazдушnom zazoru održao na istom nivou.
- Prema tome, za upravljanje asinhronim motorom, potreban je **trofazni sinusni napon promenljive frekvencije i amplitude**.
- Pogon se vrši **trofaznim invertorima**.
- Na vrlo velikim snagama se koriste **tiristorski ciklokonvertori**.
- Sve to **važi za trofazne motore**. Obično se **ne bave regulacijom broja obrtaja jednofaznih motora** (mada je to moguće).

175

## Meko startovanje asinhronih motora

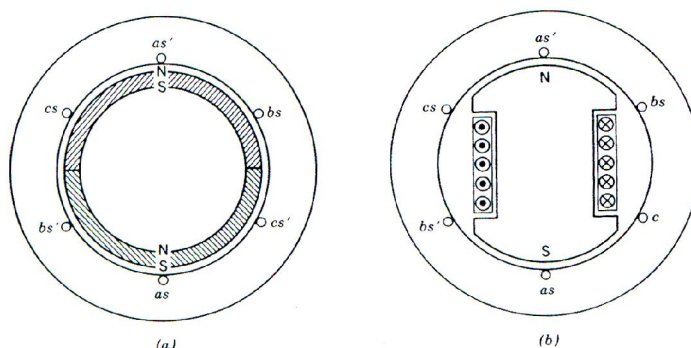
- Zbog **velike struje startovanja**, veliki asinhroni motori se obično ne pokreću direktnim spajanjem na mrežni napon.
- Mekim starterom se **diže napon motora postepeno od nule do nazivne vrednosti**.
- **Kod malih opterećenja** motora meki starter može ujedno da služi i kao rešenje za smanjenje gubitaka: smanjuje se napon motora nakon postizanja nazivnog broja obrtaja.





## Sinhroni pogoni - osnovi

- Sinhroni motor se može konstruisati sa **rotorom sa stalnim magnetima** (BLDC - brushless DC motor) (a) i sa **motanim rotorom** (b).
- Motani rotor se napaja jednosmernom strujom - formira se elektromagnet.



177

## Konstrukcija i karakteristike sinhronog motora

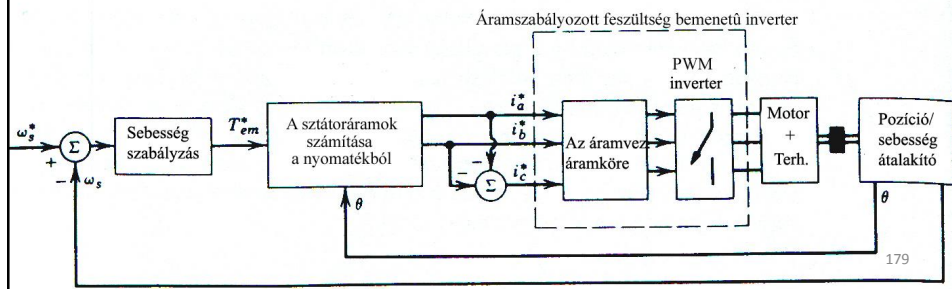
- Na statoru je trofazni namotaj koji se napaja trofaznom sinusnom strujom.
- Struje statora formiraju **obrtno magnetno polje** koje se okreće sinhronom brzinom.
- Zahvaljujući međusobnom uticaju statorskog i rotorskog magnetnog polja dobija se obrtni moment.
- Kod sinhronog motora **rotor se obično okreće sinhronom brzinom**, ali postoji izvesna **ugaona razlika između smerova statorskog i rotorskog polja**. Dobijeni obrtni moment je srazmeran sinusnu tog ugla:

$$T_{em} = k_t \phi_f I_a \sin \delta$$

178

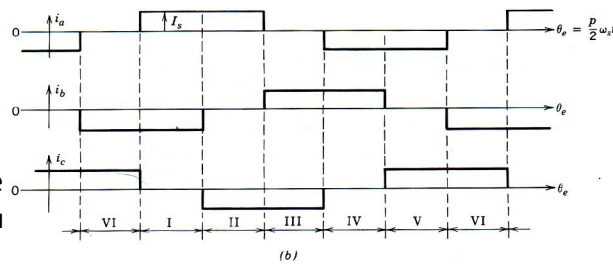
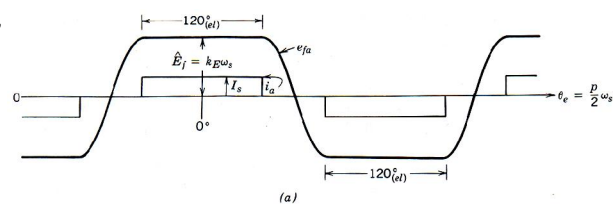
## Napajanje sinhronog motora sinusnim strujama

- **Potrebno je meriti smer rotorskog magnetnog polja i pomoću statorskih struja treba formirati statorsko polje koje je okomito na rotorsko polje.**
- Na taj način motor ne izlazi iz sinhronizma i daje maksimalni momenat.
- Kontrolno kolo kontinualno proračunava trenutno važeće referentne vrednosti statorskih struja.
- PWM inverter ostvaruje zadate vrednosti struja.



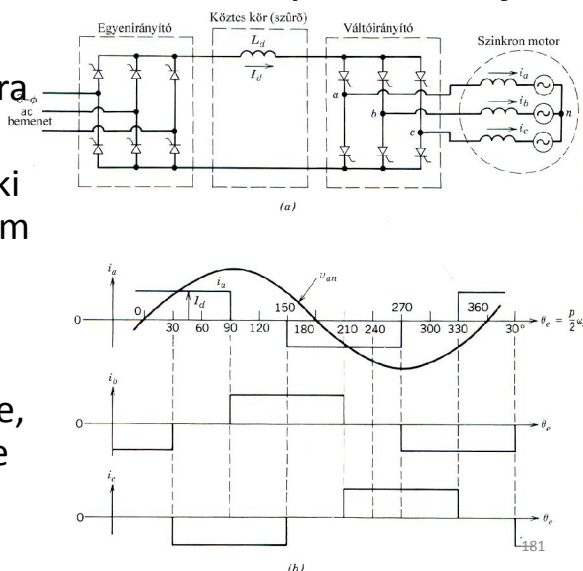
## Napajanje sinhronog motora pravougaonim strujama

- Važi na malim snagama, kod motora sa stalnim magnetima na rotoru.
- Indukovani napon je približno trapeznog oblika.
- Struje statora su pravougaonog oblika.
- Ugaonu poziciju rotora obično detektuju Hall-ovim sensorima - struje se uključuju/isključuju u skladu sa trenutnom pozicijom.



## Upravljanje sinhronim motorom komutacijom sa strane opterećenja

- Karakteristično rešenje kod motora snage reda MW.
- Koristi se tiristorski inverter sa strujnim ulazom.
- Ako struje statora prednjače u odnosu na napone, dolazi do prirodne komutacije tiristora.

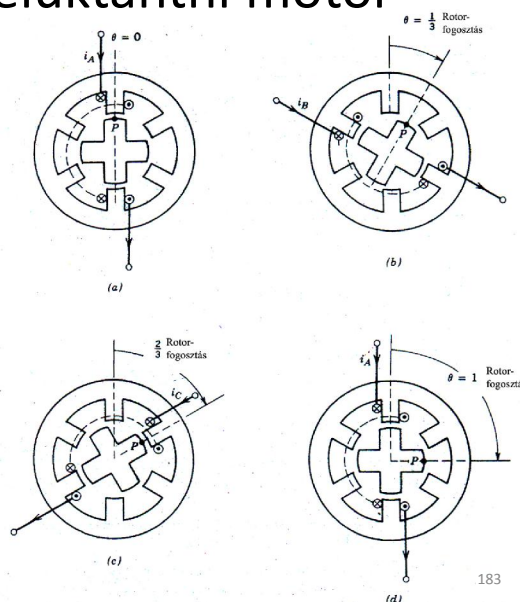


## Upravljanje koračnim motorima - uvod

- Koračni motori se uglavnom koriste u računarskim periferijama i kancelarijskim mašinama.
- Postoje i industrijske primene.
- Velika prednost im je da mogu da ostvare precizno pozicioniranje bez detektora pozicije.
- Primenjujući jedan pobudni impuls, koračni motor se uvek okrene za izvestan ugao.
- Brojanjem pobudnih impulsa može se znati rezultantna ugaona pozicija rotora.

## Konstrukcija i karakteristike koračnih motora- reluktantni motor

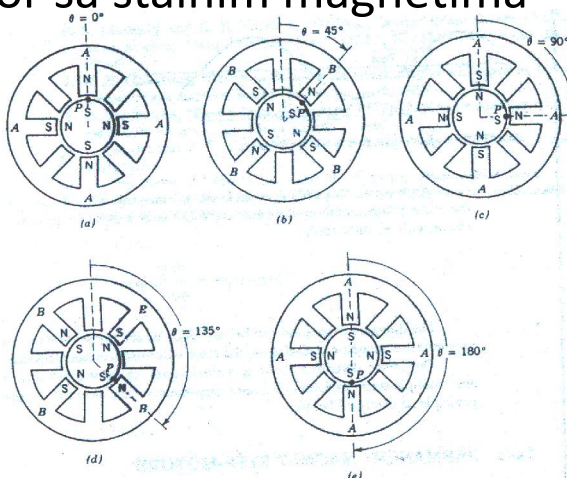
- Ima dva rešenja: reluktantni motori i motori sa stalnim magnetima.
- Kod reluktantnih motora magnetno polje statora okreće rotor tako da se dobije minimalna reluktancija (zub rotora se privuče aktivnom zubu statora).
- Slika prikazuje okretanje za  $90^\circ$  u tri koraka.



183

## Konstrukcija i karakteristike koračnih motora - motor sa stalnim magnetima

- Rotor je sa stalnim magnetima.
- Rotor se okrene tako da se poklopi smer magnetnog polja statora sa magnetnim poljem rotora.
- Dovođenjem struje u odgovarajući statorski namotaj rotor se okreće u željenu poziciju.



U prikazanom slučaju pri svakom koraku statorske struje se pomeraju za  $45^\circ$ . Motor u četiri koraka napravi pola obrtaja.

184

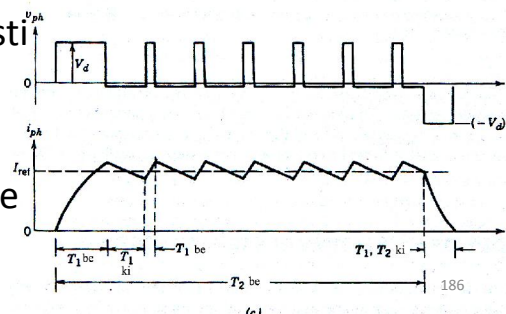
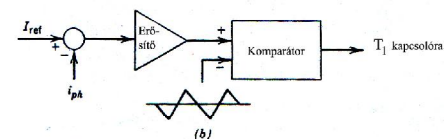
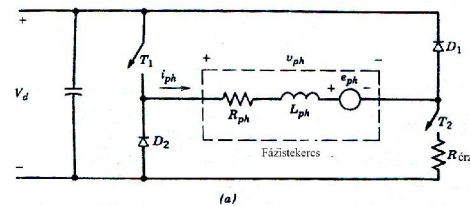
## Upravljačka kola za koračne motore

- Statorski namotaji se napajaju pravougaonim strujama.
- Kontrolno kolo treba da obezbedi što brži priraštaj i pad struje.

185

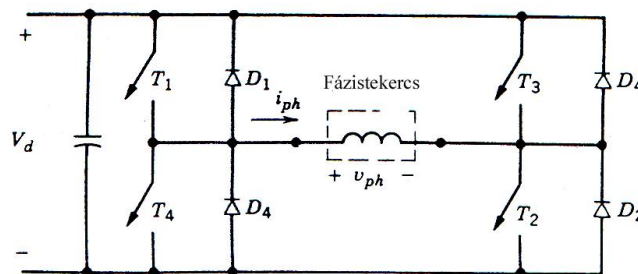
## Upravljačka kola za koračne motore - reluktantni motori

- Dovoljno je obezbediti struje jednog smera.
- $V_d$  treba da je znatno veći od srednje vrednosti faznog napona, ako želimo dobiti brzi priraštaj struje.
- Struja se obično reguliše PWM signalom konstantne frekvencije.



## Upravljačka kola za koračne motore - motori sa stalnim magnetima

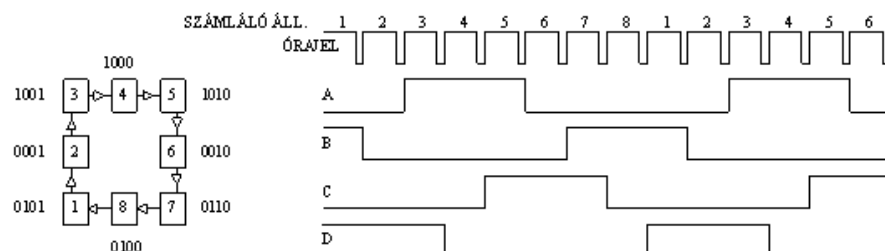
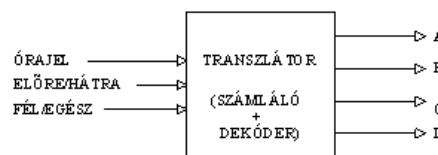
- Za dobijanje bipolarnih strujnih impulsa potrebno je za svaki fazni namotaj realizovati jedan tranzistorski most.
- Možemo koristiti unipolarnu ili bipolarnu modulaciju.



187

## Upravljačka kola za koračne motore - formiranje upravljačkih impulsa

- Mikro kontroler obično formira samo sledeća tri signala: takt, smer, polukorak/pun korak.
- Od ovih signala se odgovarajućim logičkim automatom (translator) dobijaju komandni signali za pojedine faze.



## Ostale primene pretvarača

- napajanja za izvore svetlosti
- punjači akumulatora
- aparati za zavarivanje
- plazma sekači
- korona uređaji
- ultrazvučni čistači...

## Napajanja za izvore svetlosti

- Sijalice sa užarenim vlaknom se dobrim delom napajaju direktno iz onakvog izvora energije za koji su konstruisane.
- Klasične fluorescentne cevi se napajaju iz mreže 230Vac, sa rednom prigušnicom za limitiranje struje i starterom za generisanje visokonaponskog impulsa pri startovanju. Moguće je realizovati prekidačku jedinicu za napajanje fluo cevi koja radi na više desetina kHz, visoki napon za paljenje dobija LC rezonantnim kolom. Isti je princip kod kompaktnih fluo cevi.
- Nisko naponske halogene sijalice se napajaju preko klasičnog (elektromagnetnog) mrežnog transformatora ili tzv. elektronskog transformatora koji sadrži diodni ispravljač bez filtra i polumostni transformatorski pretvarač bez ispravljanja na izlazu.
- Mrežno napajanje LED-ova za rasvetu se vrši preko mrežnog usmerača i neke vrste izolovanog (transformatorskog) DC-DC pretvarača (flyback, polumostni...).

## Napajanja za izvore svetlosti



Halogena sijalica.



Elektromagnetni transformator.



Elektronski transformator (pretvarač).



Kompaktna fluo cev sa pretvaračem u sklopljenom i rasklopljenom stanju.



## Punjači akumulatora

- Najprostiji punjači se rešavaju mrežnim transformatorom i diodnim (nekontrolisanim) usmeračem.
- Korišćenjem kontrolisanog (tiristorskog) usmerača dobija se mogućnost regulacije struje i napona. Kvalitetni punjači treba da mogu da rade i u režimu konstantne struje i u režimu konstantnog napona.
- Savremeni punjači redovno koriste mrežni ispravljач sa kapacitivnim filtrom i neku varijantu izolovanog (transformatorskog) DC-DC pretvarača. Sa obzirom na velike snage često se koriste mostne veze pretvarača i trofazni ulaz umesto jednofaznog.
- Pored punjača ponekad se koriste pražnjači za merenje kapaciteta. Pražnjači su potrošači konstantne struje. Konstantna struja se dobija povezivanjem tranzistorskog prekidača na red sa snažnim otpornikom i pobuđivanjem tranzistora sa potrebnim faktorom ispune na ultrazvučnoj frekvenciji.



## Punjači akumulatora



Punjač za telefon.



Punjač za automobilsku bateriju.



Punjač za viljuškar.

## Aparati za zavarivanje

- Aparati za zavarivanje su dobrim delom izvori konstantne struje u opsegu od nekoliko ampera do nekoliko stotina ampera. Kod nekih aparata potrebno je uključiti u regulaciju i napon luka.
- Kod većine aparata struja je jednosmerna, kod nekih naizmjenična. U ovom drugom slučaju potrebno je imati mogućnost promene frekvencije i faktor ispune.
- Vrednost struje zavarivanja često nije konstantna u toku celog procesa zavarivanja već se automatski reguliše na startnu vrednost, vrednost u ustaljenom stanju itd.
- Radni naponi su od nekoliko volti do nekoliko desetina volti.
- Pored izvora struje u aparatima za zavarivanje ponekad nalazimo i pogon za žicu za zavarivanje (MIG-MAG postupak) i/ili ventil za propuštanje zaštitnog gasa.

## Aparati za zavarivanje



MIG-MAG (ili GMAW)  
uređaj za zavarivanje.

Postupak zavarivanja.



## Plazma sekači

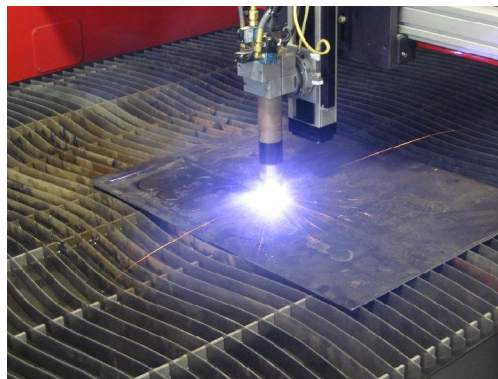
- Plazma sekač topi površinu metala primenom luka između elektrode i osnovnog materijala i izduvava topljeni deo pomoću komprimovanog vazduha. Na taj način ostvaruje se vrlo efikasno sečenje metala. Preciznost obrade je osrednja.
- Plazma sekač zahteva izvor konstantne struje u opsegu od 10A do 100 A i više, u zavisnosti od vrste i debljine materijala.
- Izlazni napon izvora, odnosno napon luka je oko 120V za većinu uređaja.
- Obzirom na veliku snagu, savremeni plazma izvori se obično prave kao kaskadna veza mrežnog trofaznog usmerača sa kapacitivnim filtrom i izolovanog (transformatorskog) DC-DC pretvarača u mostnoj vezi.
- Pored regulacije struje treba rešiti i paljenje luka. To se ili rešava kratkotrajnim visoko naponskim impulsom, ili konstrukcijom pištolja tako da se prvo unutar pištolja formira pomoćni luk, zatim se to izduva prema materijalu koji se seče.

## Plazma sekači



Izvor konstantne struje sa pištoljem za ručno sečenje.

Sečenje na koordinatnom stolu uz računarsko vođenje.



## Korona uređaji

- Korona uređaji služe za površinsku obradu plastičnih folija i odlivaka radi boljeg prianjanja boja i lepkova.
- Površina se izloži varničenju koje se generiše priključivanjem naizmeničnog visokog napona od 5 do 10kV, frekvencije iznad audio opsega na odgovarajuću elektrodu. Snaga takvih izvora se kreće od par desetine W do par desetine kW.
- Visoki napon se može generisati transformatorom, LC rezonantnim kolom ili njihovom kombinacijom.
- Pobuda transformatora i/ili rezonantnog kola se vrši polumostnim ili mostnim inverterom.
- Model transformatora sadrži značajnu kapacitivnost zbog međuslojne kapacitivnosti visokonaponskog namotaja, to treba uzeti u obzir pri izboru načina pobuđivanja.

## Korona uređaji



Korona reaktor

Generator visokog  
napona i velike  
frekvencije

## Ultrazvučni čistači

- Ultrazvučni čistači stvaraju jake vibracije u razređivaču ili tečnosti za pranje u koju se uroni mašinski elemenat, medicinsko sredstvo itd. koji treba čistiti.
- Vibracije se mogu generisati magneto-strikcijom ili piezo-električnim efektom.
- Napajanje namotaja elektromagneta ili piezo aktuatora se vrši iz polumostnog ili mostnog invertora. Bitno je da se pobuda vrši u ritmu mehaničkih vibracija, zato je važno podesiti frekvenciju pobude.
- Ultrazvučni čistač zubnog kamenca je nož koji osciluje i time povećava efekat čišćenje.

## Ultrazvučni čistači



Kada sa duplim dnom.  
Ultrazvučni aktuatori su  
montirani na gornje dno.

Kraj 3. glave

(KOLA ENERGETSKE  
ELEKTRONIKE)