

UČINSKA ELEKTRONIKA

Zbog čega je potrebna učinska elektronika?

Što je to učinska elektronika?

Osnovne vrste elektroničke učinske pretvorbe.

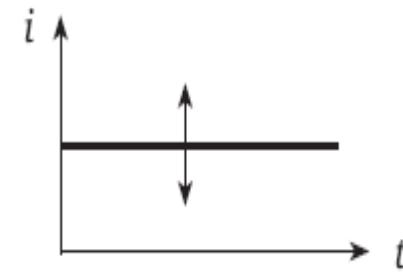
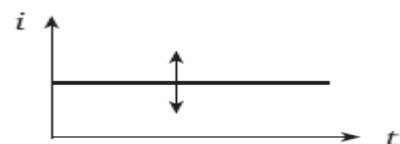
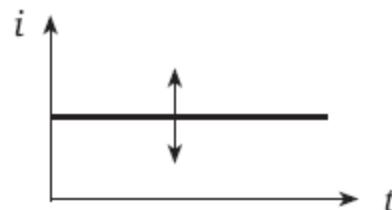
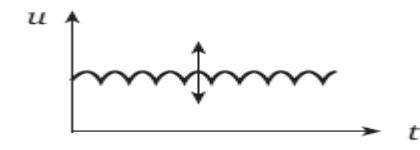
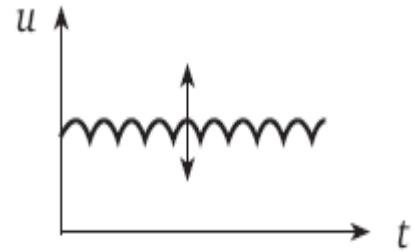
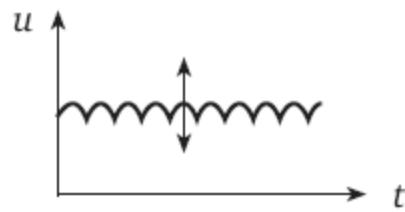
Osnovne učinske sklopke.

Osnovni učinski sklopovi.



Kakvo nam je napajanje potrebno u elektromehaničkim sustavima ?

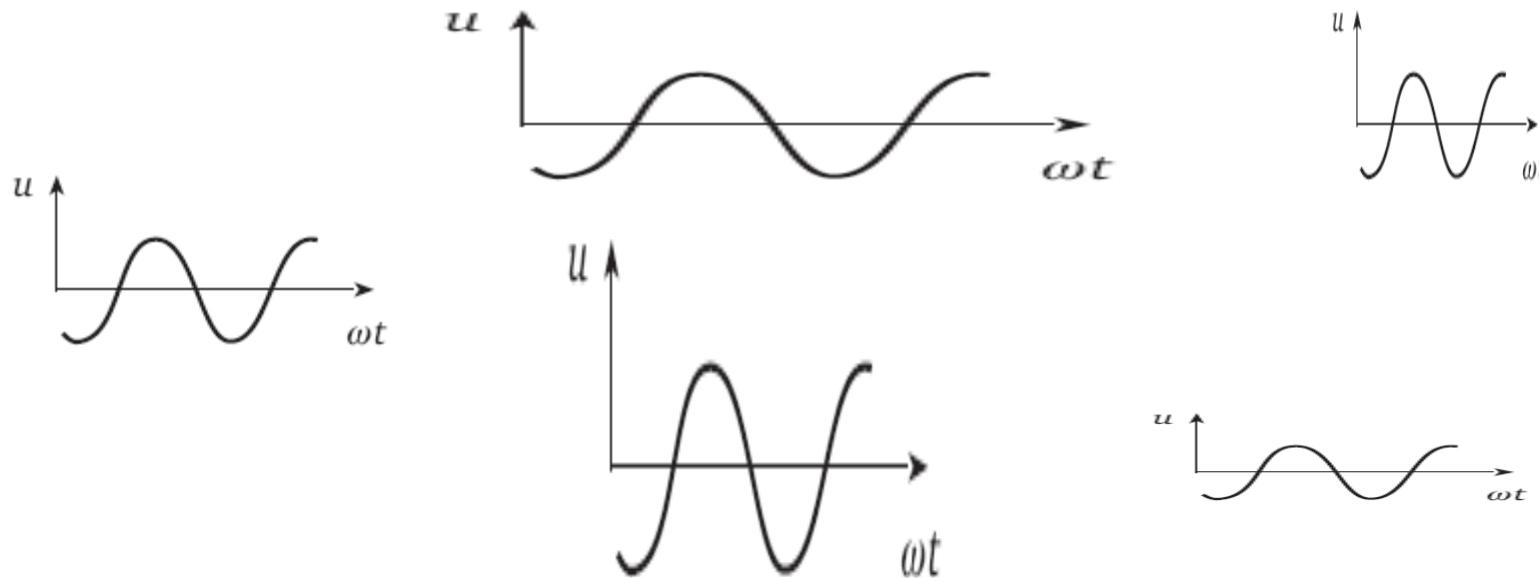
I. izmjenična struja $i(t)$ i/ili napon $u(t)$ promjenjive frekvencije i amplitude



Kakvo nam je napajanje potrebno u elektromehaničkim sustavima ?

I.

II. izmjenična struja $i(t)$ i/ili napon $u(t)$ promjenjive frekvencije i amplitude

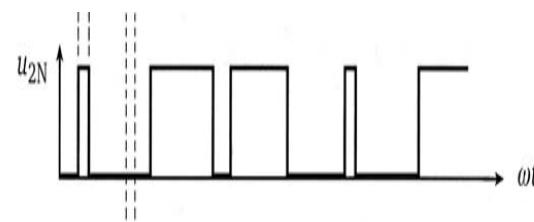
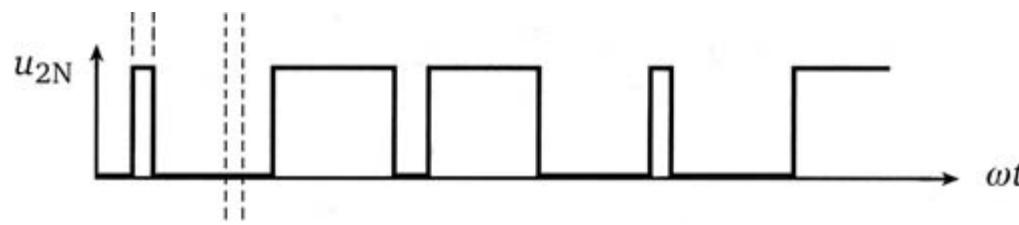


Kakvo nam je napajanje potrebno u elektromehaničkim sustavima ?

I.

II.

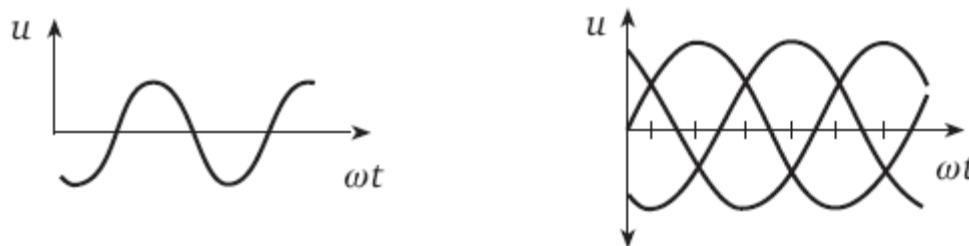
III. posebni slijedovi strujnih i/ili naponskih impulsa (primjerice za koračne motore)



ELEKTROMEHANIČKI SUSTAVI – UČINSKA ELEKTRONIKA

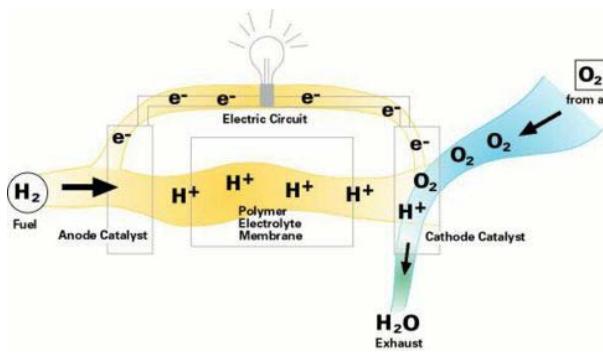
Što nam stoji na raspolaganju?

I. izmjenična napojna mreža (jednofazna i trofazna)



II. istosmjerni izvori napajanja (naponski fotopaneli, akumulatori, gorivni članci...)

130 W cca. 600 USD



DEFINICIJA UČINSKE ELEKTRONIKE

Sve ostalo moramo sami napraviti, problem je na koji način?

Pomaže nam **učinska elektronika** (energetska elektronika, power electronics, Leistungselektronik...)

Učinska elektronika je dio elektronike koji se koristi za pretvorbu obilježja električne energije i za upravljanje tokom električne energije.

Važno je da se pretvorba obilježja odvija uz veliku djelotvornost.

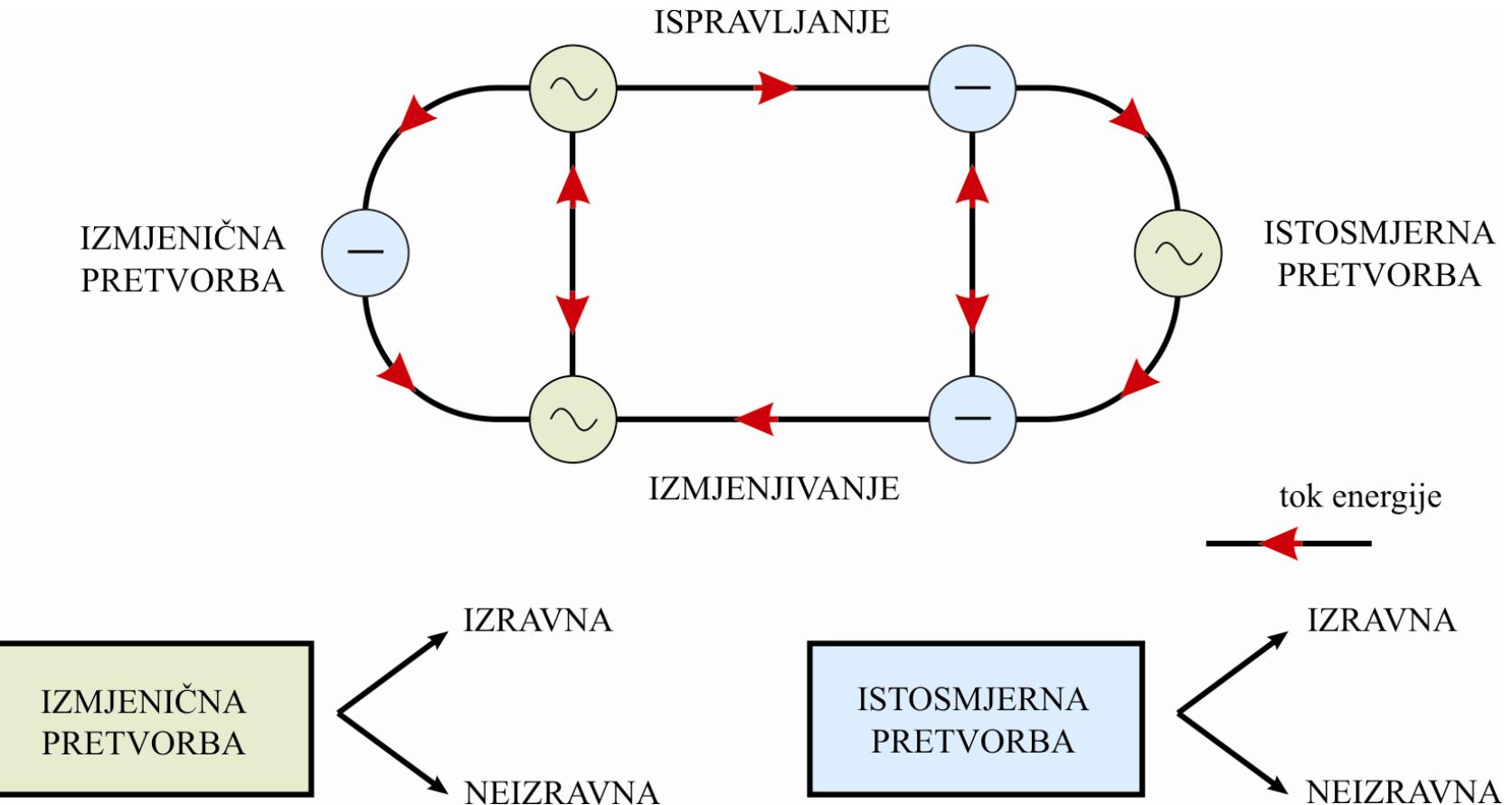
DEFINICIJA UČINSKE ELEKTRONIKE

U definiciji javljaju se dva ključna pojma: *elektronika* i *obilježja električne energije*.

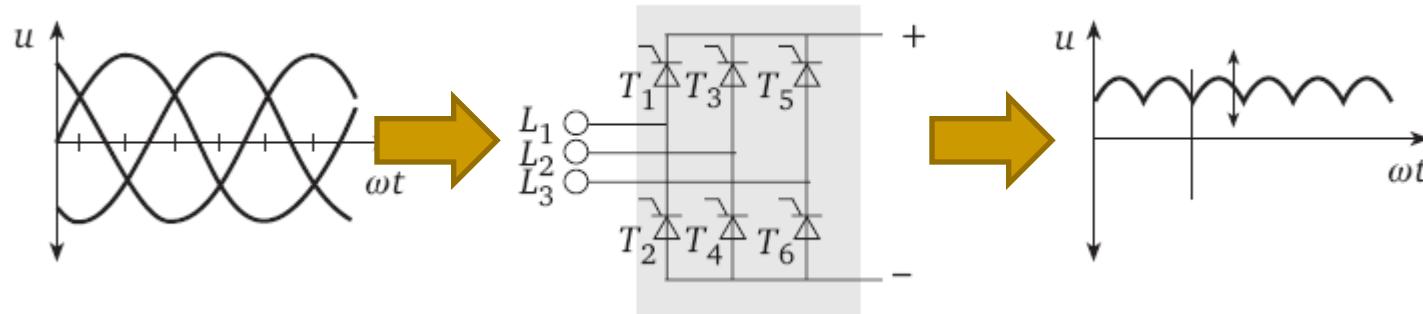
Elektronika je grana znanosti i tehnike koja obuhvaća izučavanje i primjenu onih pojava povezanih s gibanjem slobodnih elektrona i električki nabijenih čestica u vakuumu, plinovima, tekućinama i poluvodičima koje se ostvaruju u komponentama elektroničkih uređaja. Dakle, ako neki sklop sadrži elektroničku komponentu onda je to elektronički sklop i pripada grani znanosti koja se naziva elektronika.

Obilježja električne energije su: valni oblik napona, valni oblik struje, frekvencija i broj faza.

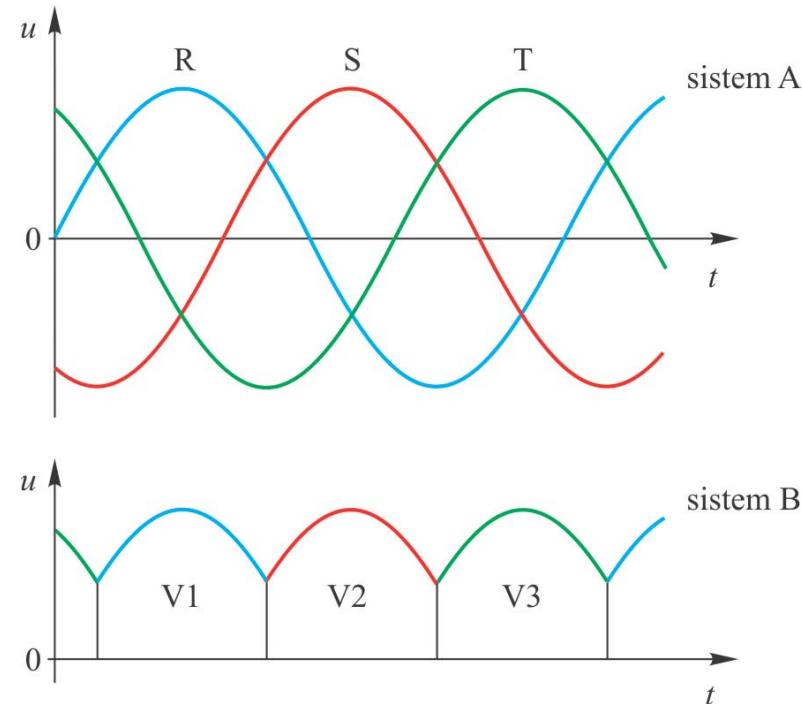
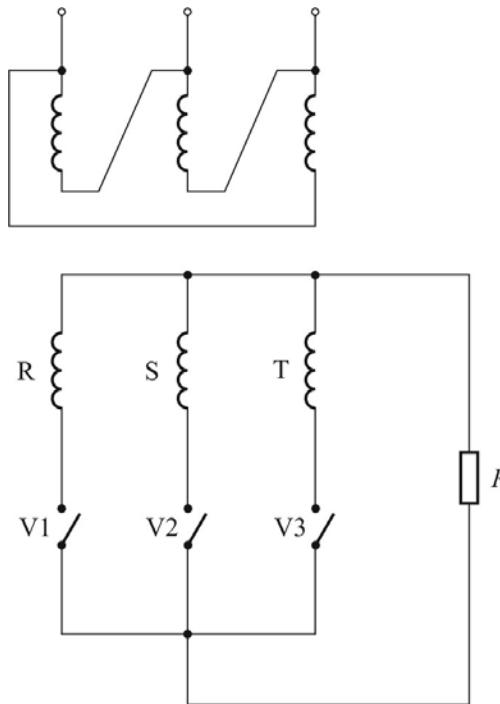
VRSTE ELEKTRONIČKE ENERGETSKE PRETVORBE



Vrste elektroničke energetske pretvorbe ISPRAVLJANJE



Primjer ispravljanja (izmjenično-istosmjerna pretvorba - AC/DC)

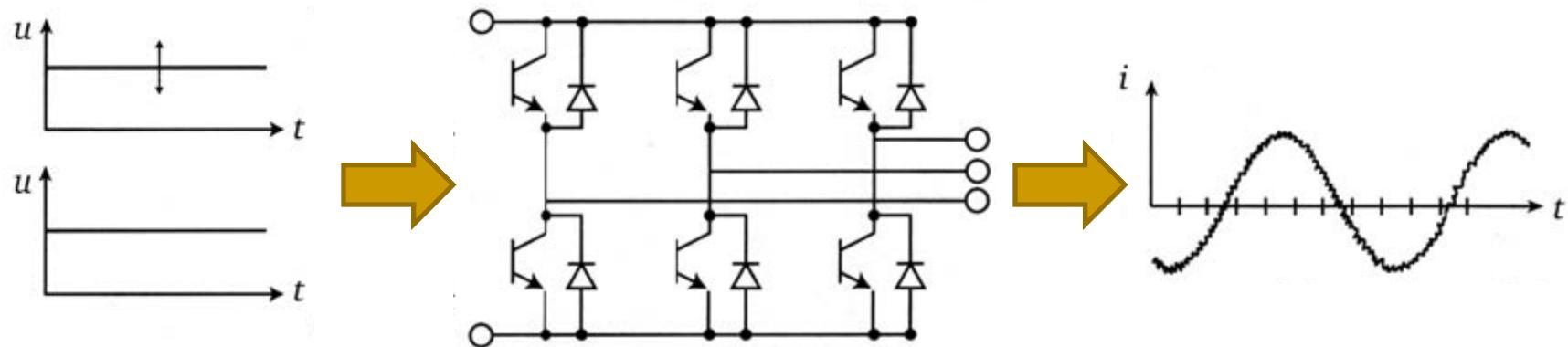


Objašnjenje crtanja trofaznog sustava napona:

- najprije se nacrtava trokutna funkcija,
- zatim se povuku paralele na dvostrukoj amplitudi trokutne funkcije i
- dodaju vrhovi sinusoida.

Vrste elektroničke energetske pretvorbe

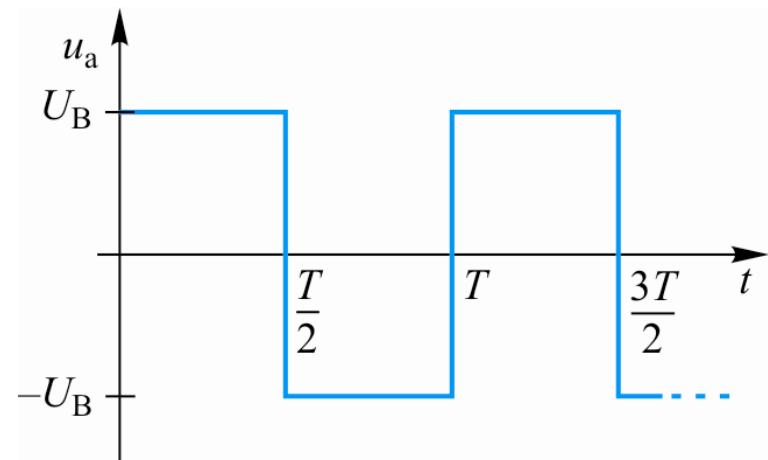
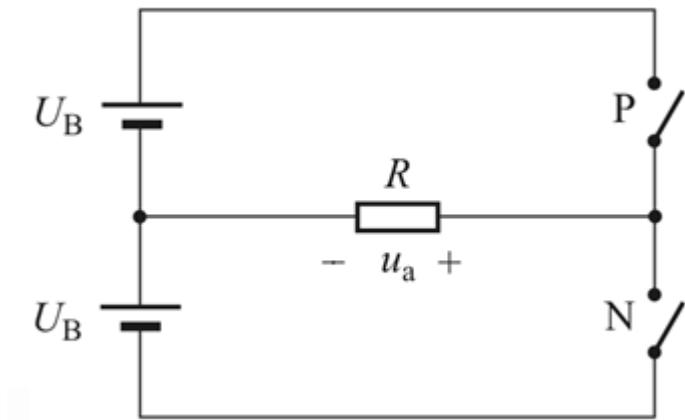
IZMJENJIVANJE



Primjer izmjenjivanja (istosmjerno-izmjenična pretvorba - DC/AC)

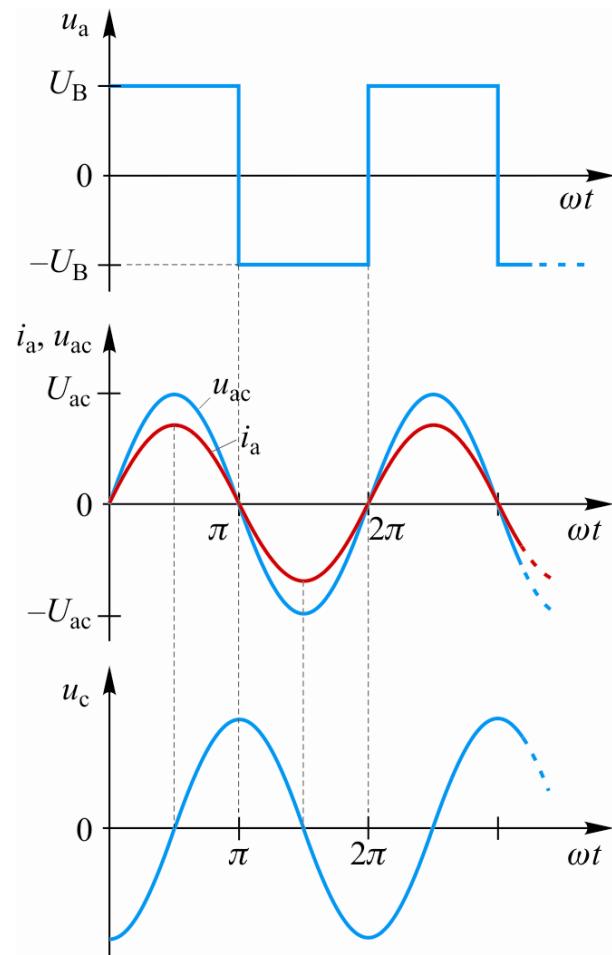
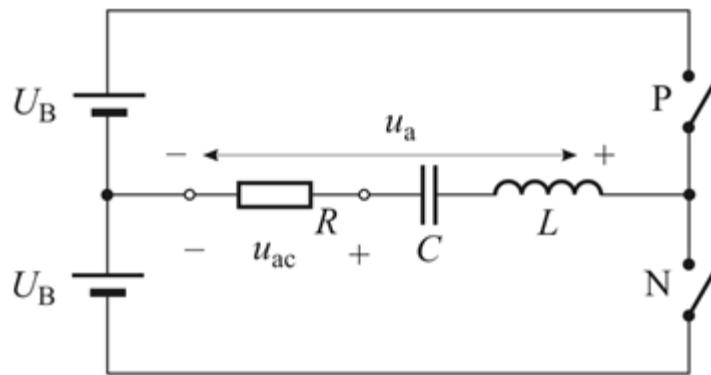
Shema spoja za pretvorbu
ulaznog istosmjernog napona u
izlazni izmjenični napon
(polumosni spoj).

- djelatno (otporno) trošilo
- pravokutna modulacija
- sklopke sklapaju u protutaktu



Još jedan primjer istosmjerno-izmjenične pretvorbe (rezonantni izmjenjivač)

Shema spoja rezonantnog izmjenjivača s ugodjenim serijskim filtrom na izmjeničnoj strani.

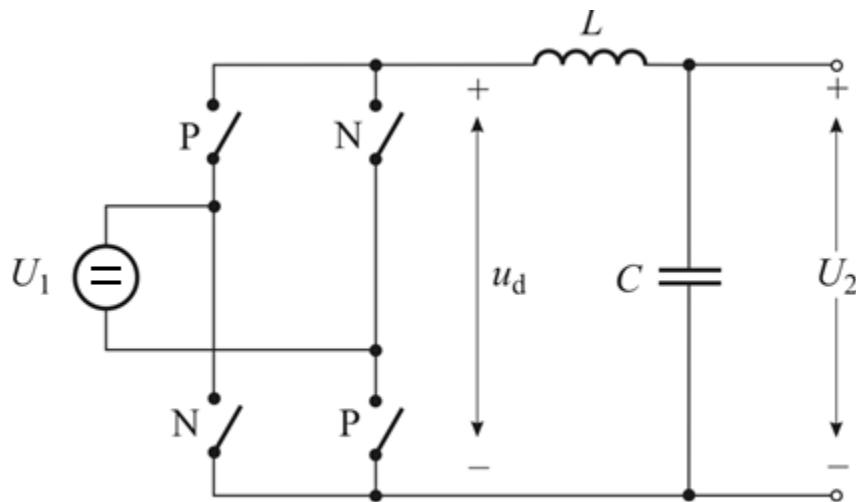


Naponski odnosi između nefiltriranog izlaznog napona u_a i napona trošila u_{ac} ako je filter ugođen na sklopnu frekvenciju ω_s ($\omega_0 = \omega_s$).

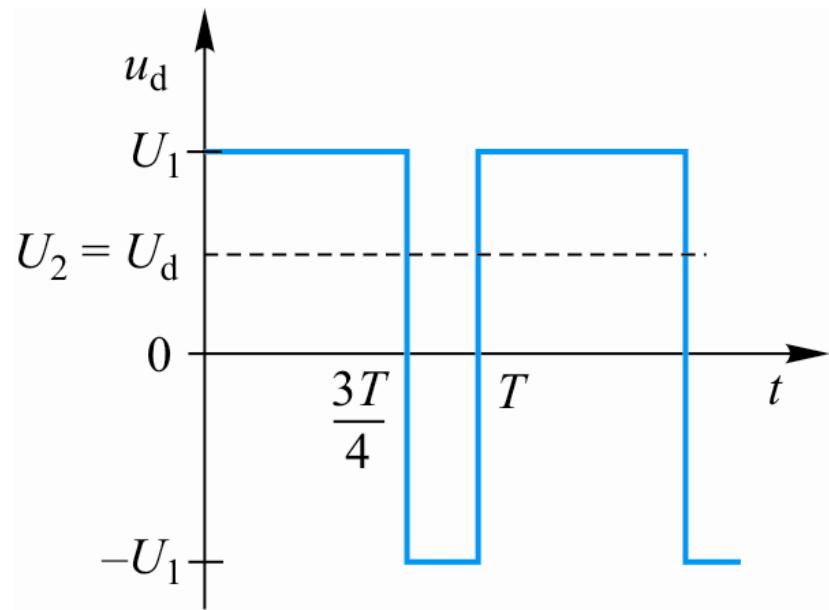
Vrste elektroničke energetske pretvorbe

IZRAVNA ISTOSMJERNA PRETVORBA

Shema spoja za pretvorbu ulaznog istosmjernog napona u izlazni istosmjerni napon (jednofazni mosni spoj).



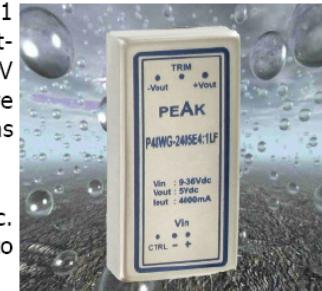
Faktor pretvorbe U_2/U_1 može se mijenjati između ± 1 .



[PEAK electronics "PM9- Series"](#) is now available from 7 Watt output power up to 20 Watt output power

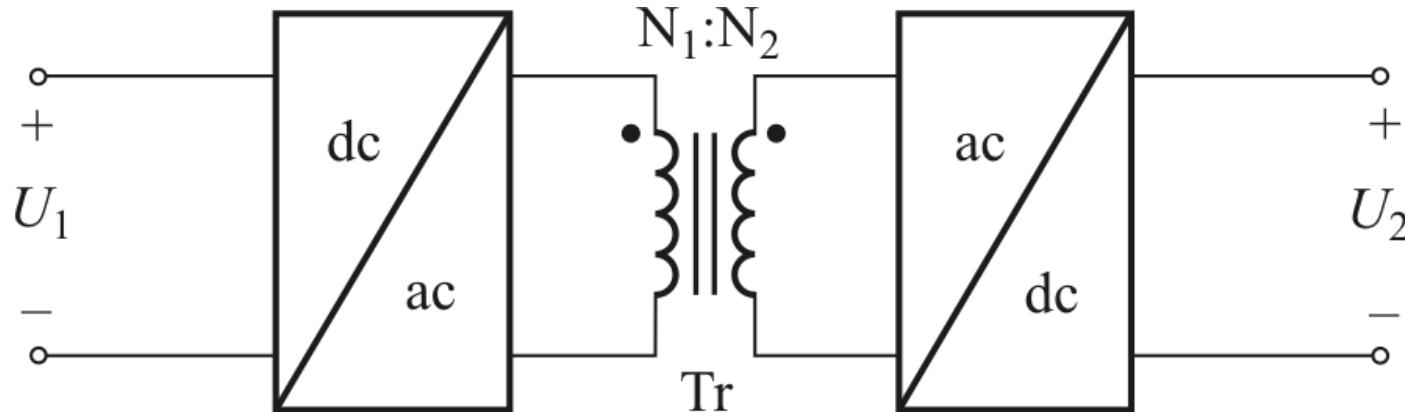
Input voltages of 4,5V to 72V dc (2:1 or 4:1) supply regulated output voltages of 3.3V, 5V, 9V, 12V, 15V, 18V and 24V dc. The output voltages are available as single output, as well as double output.

The standard I/O isolation is 1.500V dc. Operating environment is -40°C up to $+85^{\circ}\text{C}$ ambient temperature.



Vrste elektroničke energetske pretvorbe

NEIZRAVNA ISTOSMJERNA PRETVORBA



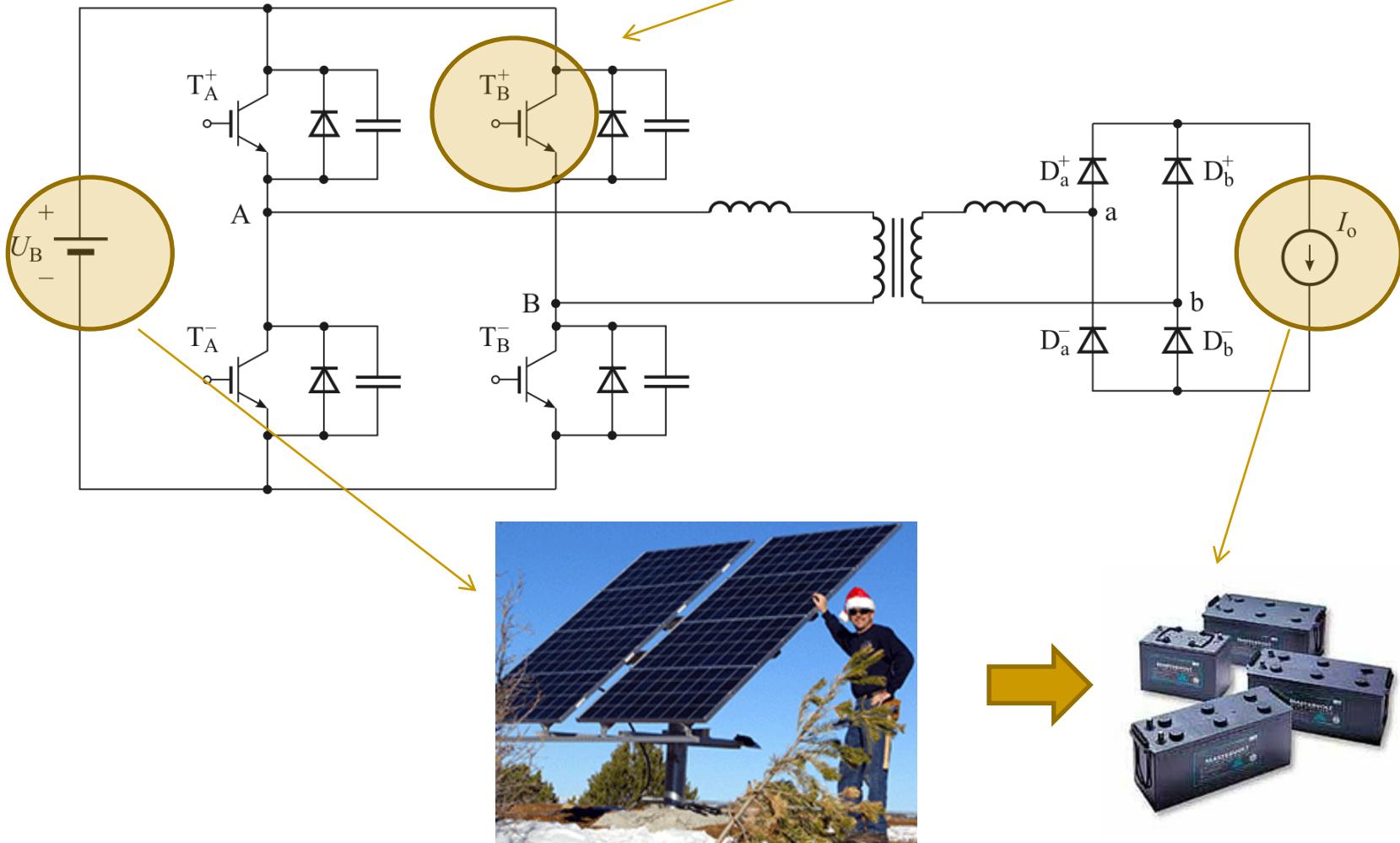
Načelna shema istosmjernog pretvarača koji se sastoji od dva serijski spojena pretvarača

Ovakav raspored omogućuje:

- upotrebu transformatora za galvansko odvajanje
- dobivanje izlaznog napona višeg iznosa od ulaznog napona.

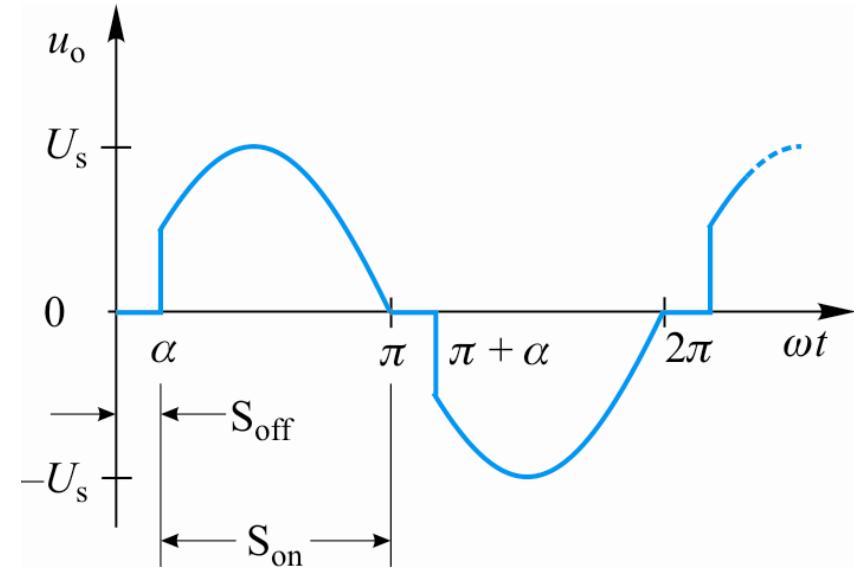
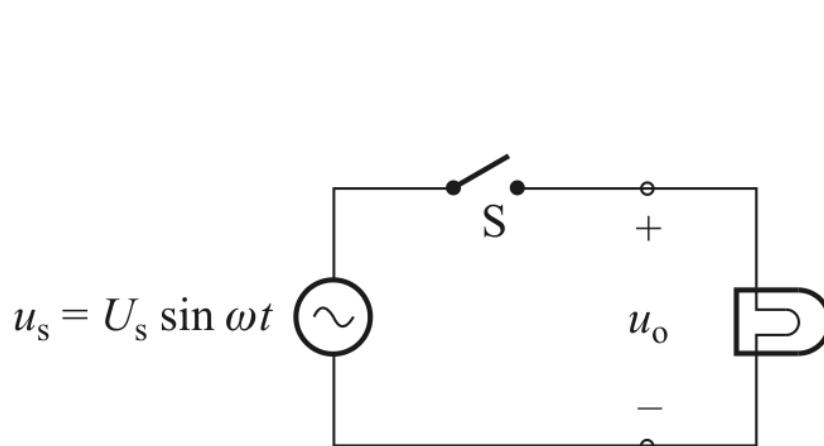
Primjer neizravne istosmjerne pretvorbe

Ovo je jedan od simbola IGBT-a.



Vrste električke energetske pretvorbe

IZRAVNA IZMJENIČNA PRETVORBA

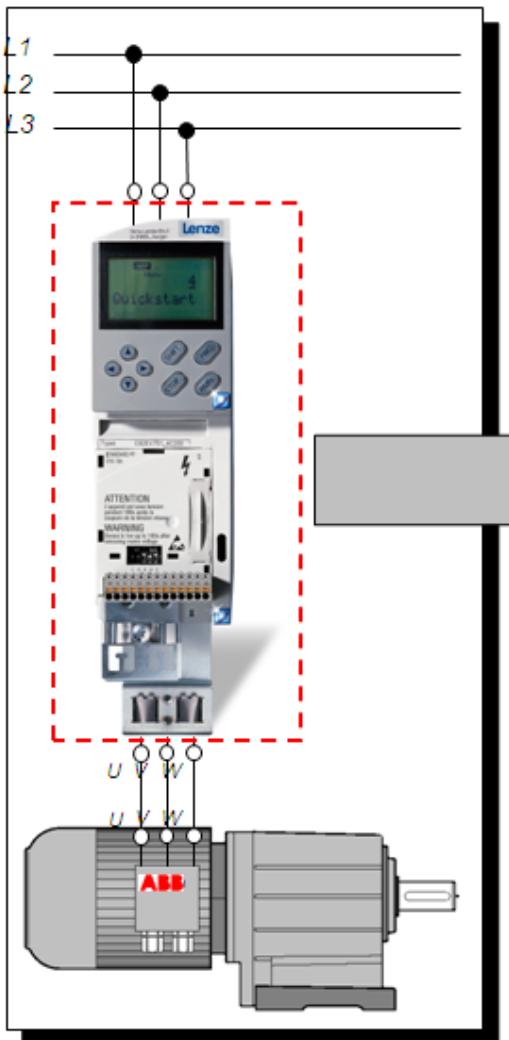


Shema spoja izmjeničnog regulatora napona upotrijebljenog za namještanje jakosti svjetla žarulje.

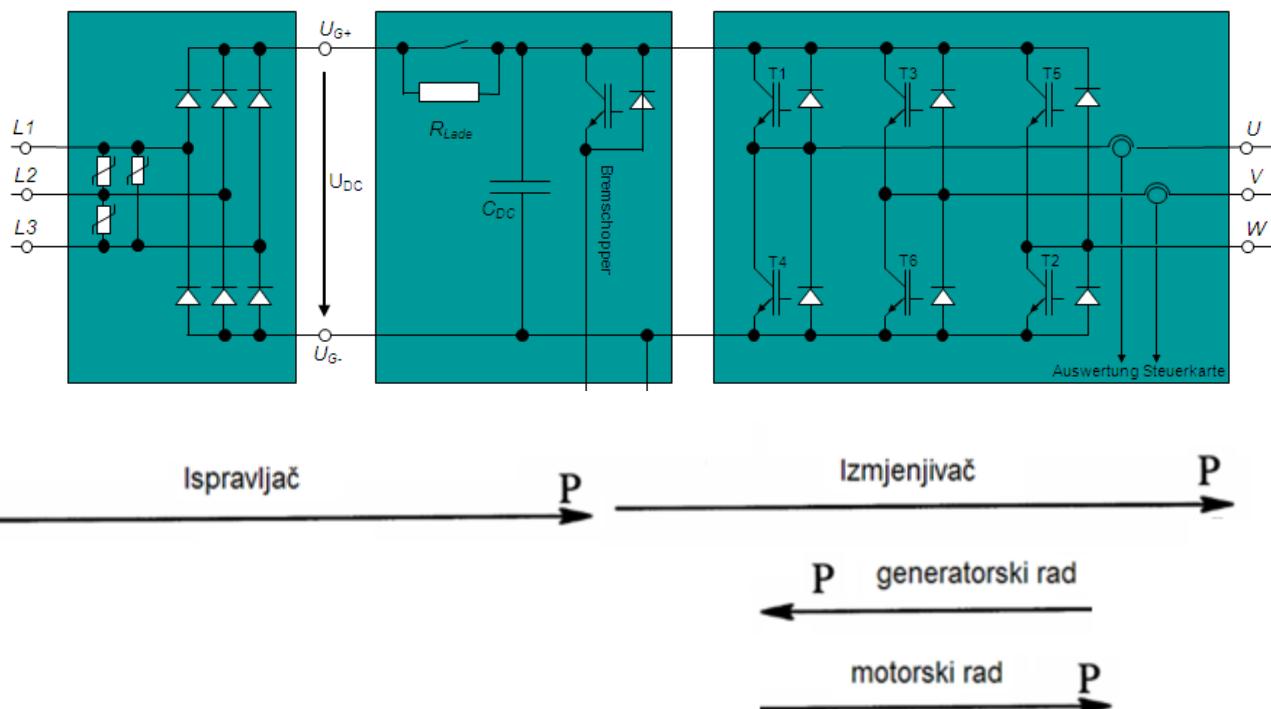


Vrste električke energetske pretvorbe

NEIZRAVNA IZMJENIČNA PRETVORBA



- frekvencijski pretvarači
(pretvarači napona i frekvencije)



OSNOVNE SKLOPKE I VENTILI UČINSKE ELEKTRONIKE

- razlika sklopka/ventil, idealna sklopka
- pregled vrsta poluvodičkih ventila
- modeli i osnovna svojstva poluvodičkih ventila

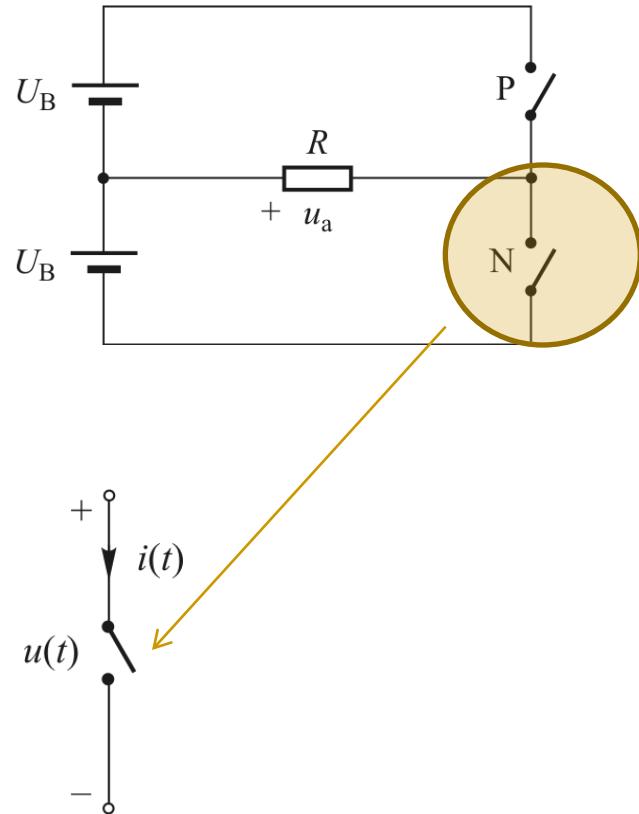


Idealna elektronička sklopka

Osnovna komponenta pretvaračkog sklopa je elektronička tj. *poluvodička sklopka*. Jasno je da su inženjeri nastojali razviti poluvodičku sklopku u svemu jednaku idealnoj *mehaničkoj sklopci*.

Idealna mehanička sklopka:

- sklopka zatvorena: $u(t) = 0$
- sklopka otvorena: $i(t) = 0$
- gubitci: $p(t) = u(t) \cdot i(t)$
- trenutačno uklapa i isklapa



Poluvodička sklopka - poluvodički ventil

Poluvodička sklopka je operativna cjelina. Sastoji se od:

- jednog ili više poluvodičkih ventila
- zaštite od prenapona i prekostruja
- pobudnog (upravljačkog) stupnja
- rashladnog tijela

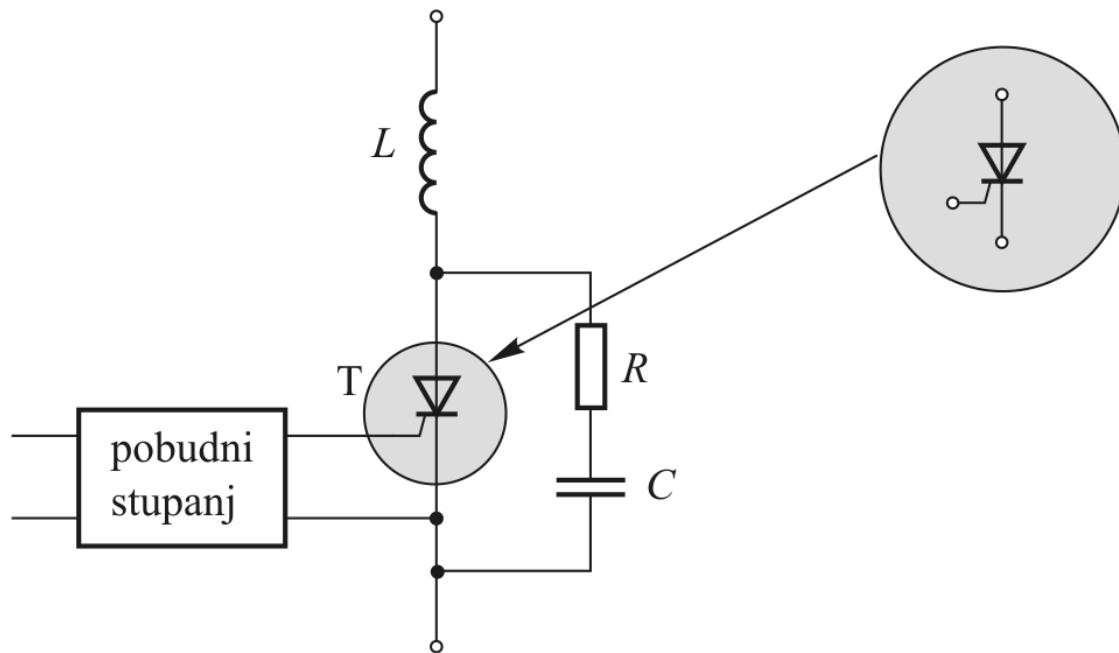
Zaštita od prekostruje – prigušnica induktiviteta L

Zaštita od prenapona – RC član

Poluvodički ventil je poluvodička komponenta za uklapanje i isklapanje struje (sklapanje). Samostalno nije operativna.

Primjer poluvodičke sklopke i poluvodičkog ventila

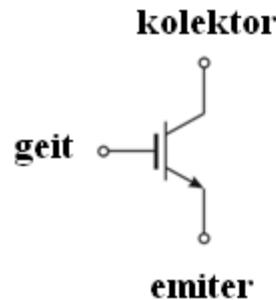
poluvodički ventil - tiristor



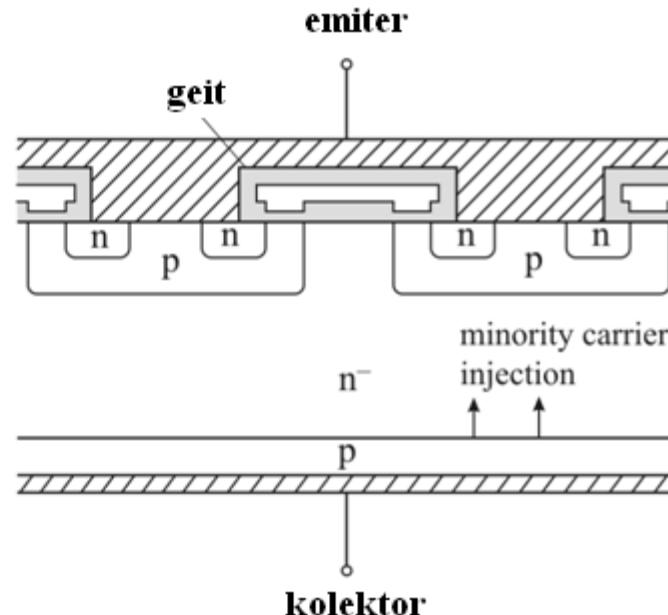
poluvodička sklopka - tiristorska sklopka

Poluvodički ventil

Poluvodički ventil je složena struktura unutar monokristala silicija. Primjerice, IGBT u jednom smjeru može držati napon i uklapati i isklapati struju, a u drugom smjeru eventualno može držati napon (samo neke izvedbe) i ne može voditi struju.



Jedan od simbola
IGBT-a



Struktura IGBT-a

Gubitci poluvodičkih ventila

Svaki poluvodički ventil ima gubitke:

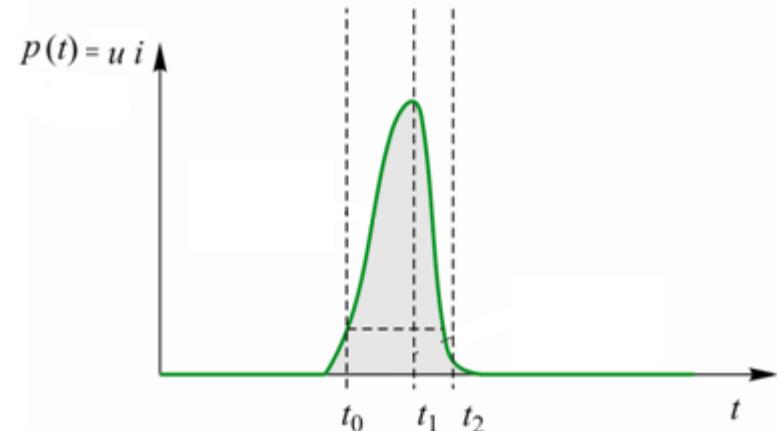
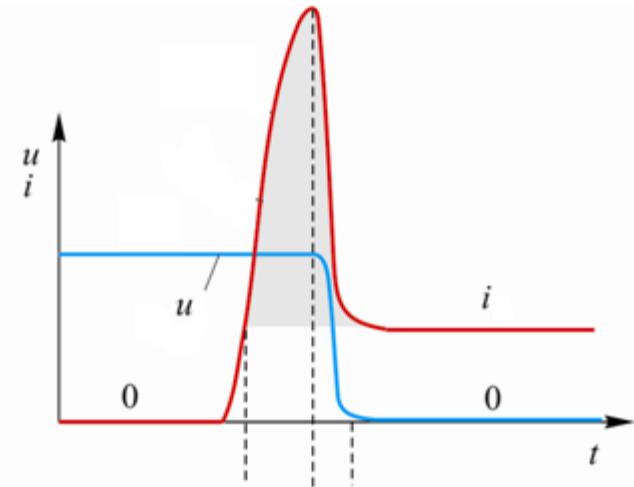
- gubitke uklapanja
- gubitke isklapanja
- gubitke vođenja



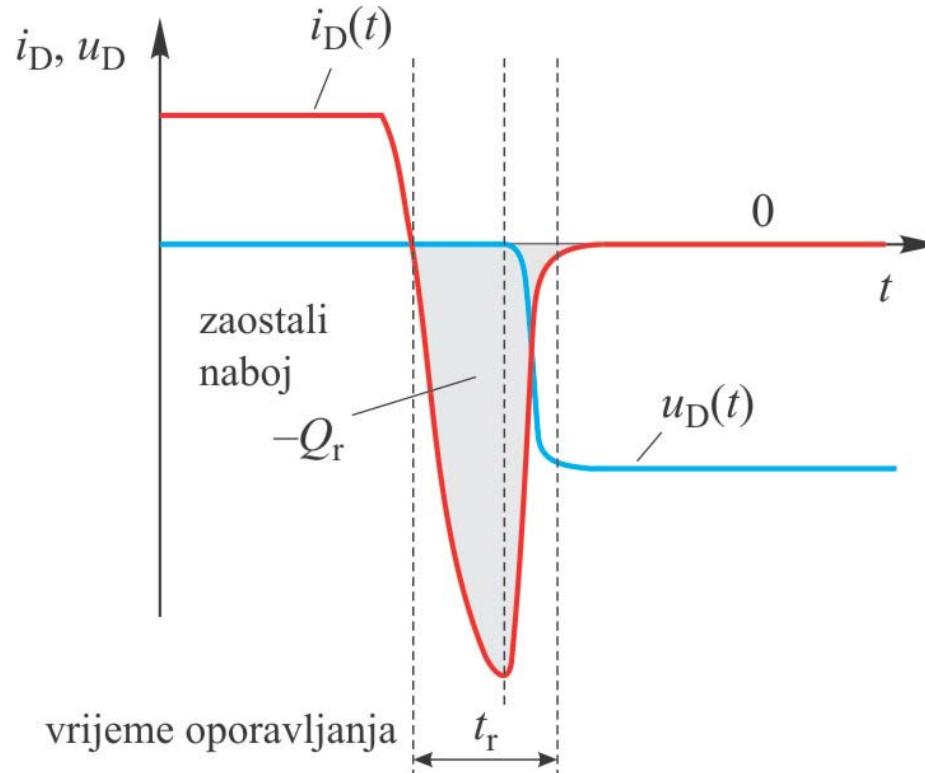
Tijekom uklapanja tranzistora, na tranzistoru istodobno postoji napon i teče znatna struja.

Umnožak napona i struje daje vremenski tijek gubitaka.

Sklopni gubici ograničavaju rad pretvarača na višim frekvencijama.

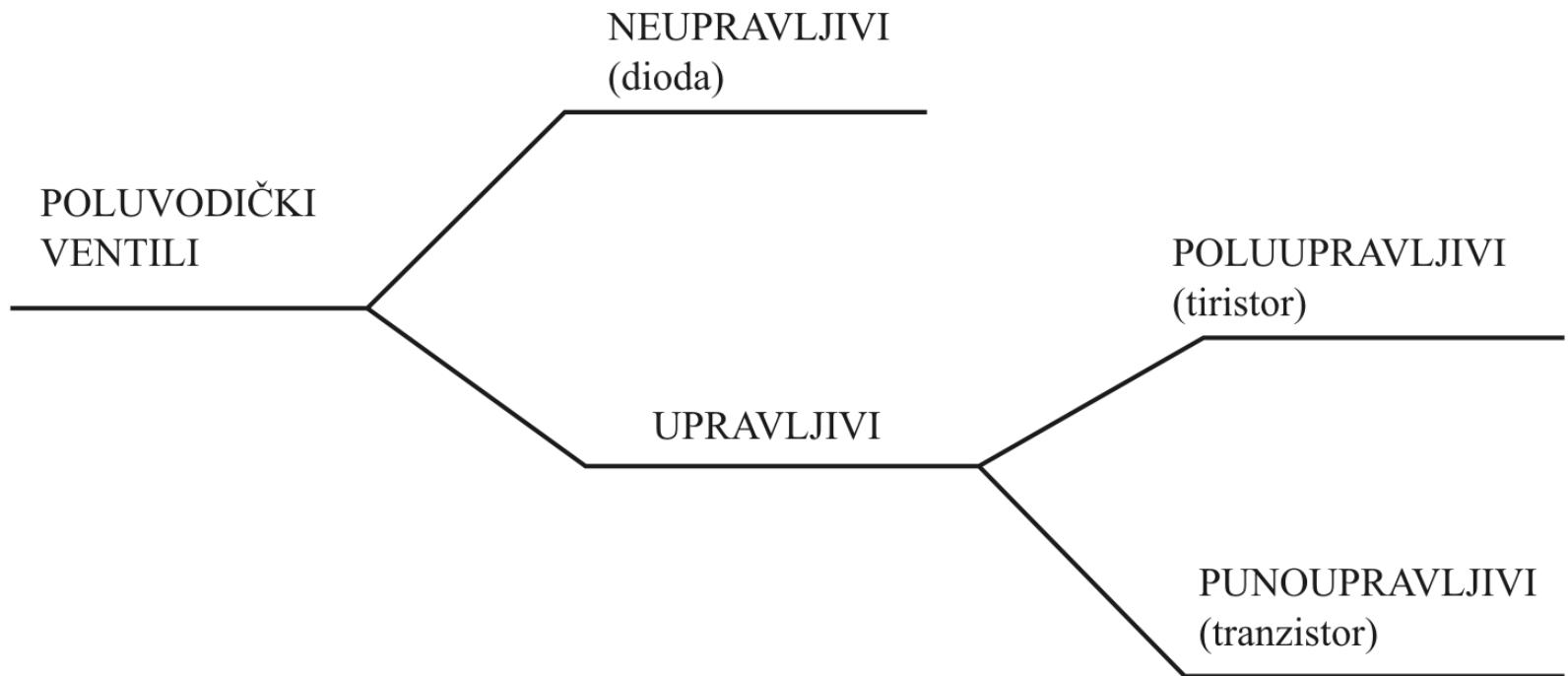


Gubitci poluvodičkih ventila

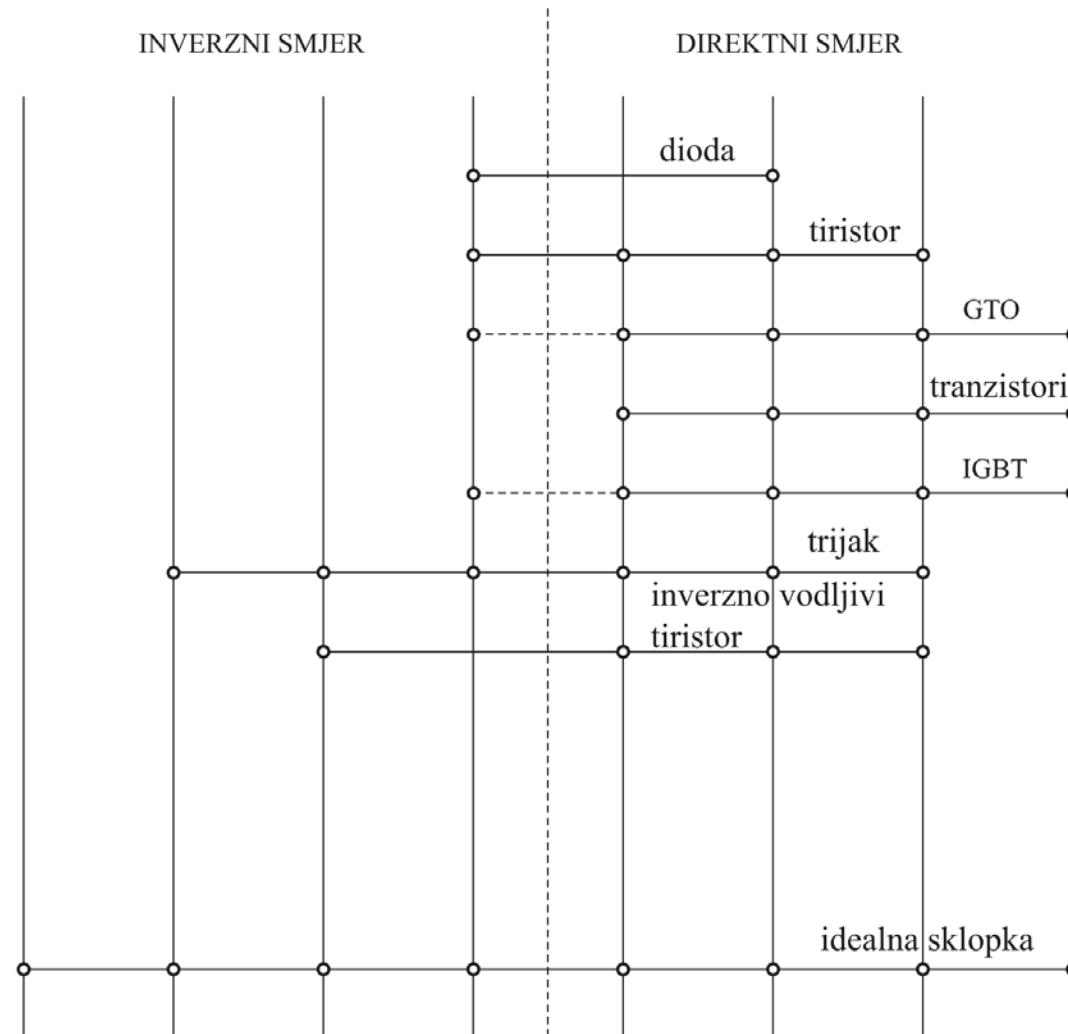


Naponsko-strujno naprezanje diode tijekom isklapanja

Podjela poluvodičkih ventila



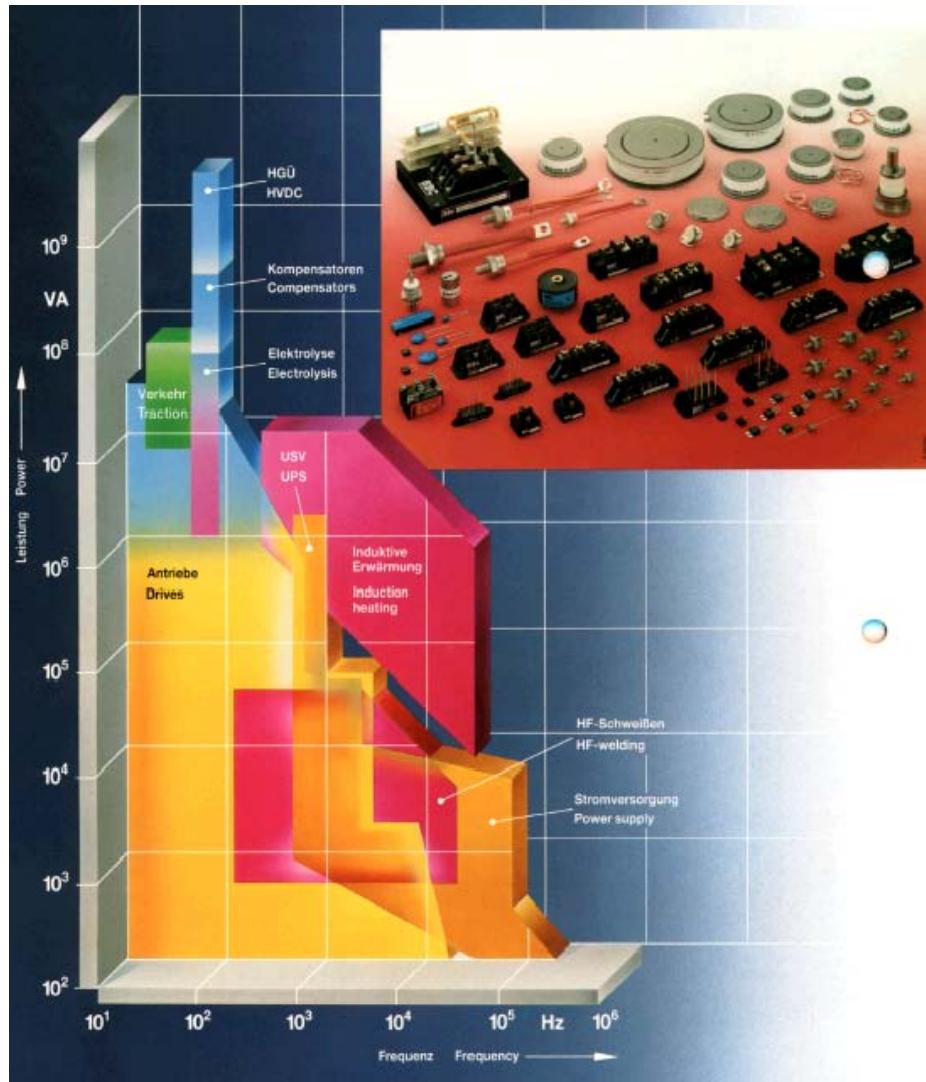
Osnovne vrste poluvodičkih ventila



Ne postoji poluvodički ventil koji ima sva svojstva idealne mehaničke sklopke.

SVOJSTVO: isklapanje uklapanje vođenje zapiranje blokiranje vođenje uklapanje isklapanje

Gdje se upotrebljavaju poluvodički ventili?



Vuča

Elektromotorni pogoni

Napajanje

Neprekinuto napajanje

Istosmjerni veleprijenosi

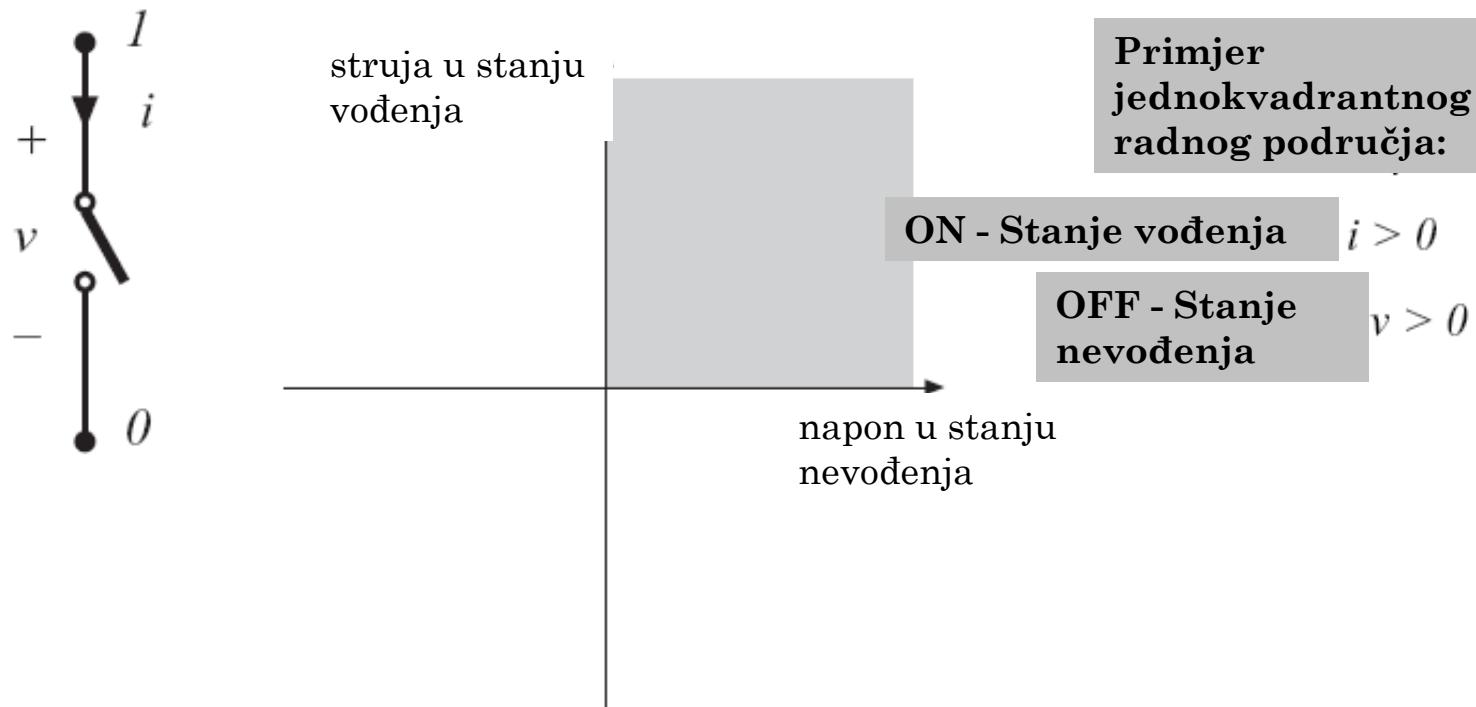
Kompenzatori

Elektrolize

Indukcijsko zagrijavanje

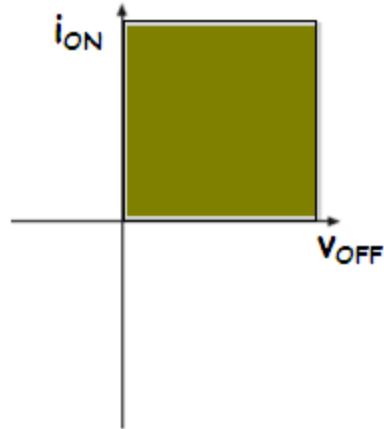
Visokofrekvencijsko zavarivanje

Radna područja poluvodičkih sklopki

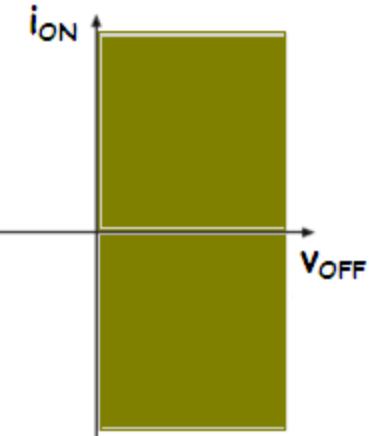


Radna područja poluvodičkih sklopki

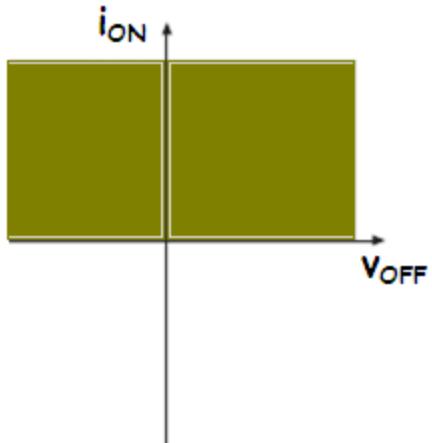
Jednokvadrantna
sklopka
(strujno
jednosmjerna,
naponski
unipolarna)



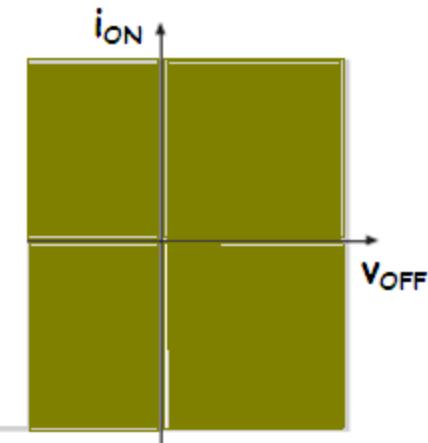
Dvokvadrantna
sklopka
(strujno
dvosmjerna,
naponski
unipolarna)



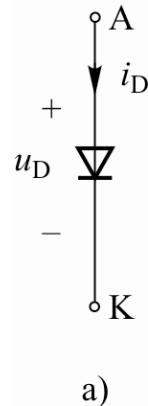
Dvokvadrantna
sklopka
(strujno
jednosmjerna,
naponski
bipolarna)



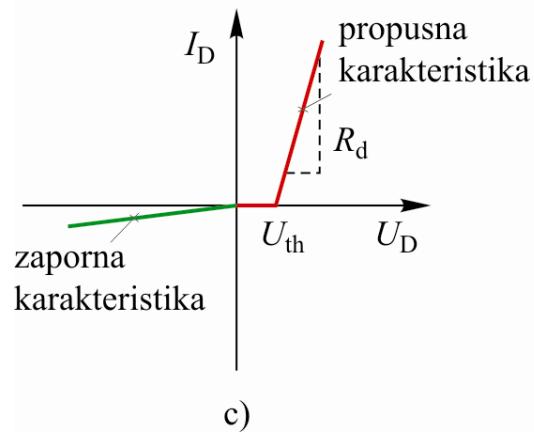
Četverokvad-
rantna sklopka
(strujno
dvosmjerna,
naponski
bipolarna)



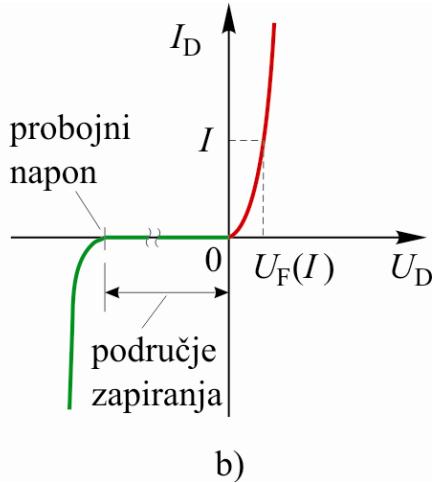
Modeli poluvodičkih ventila - DIODA



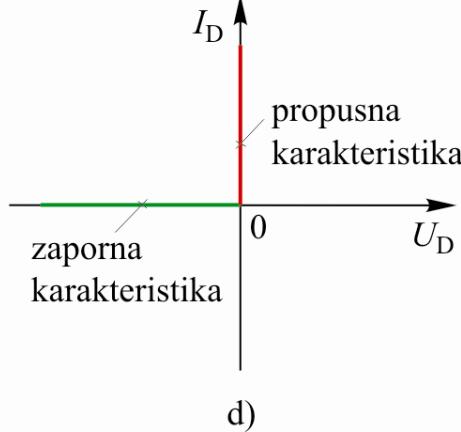
a)



c)



b)

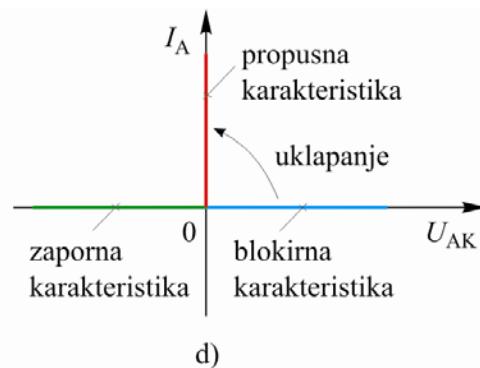
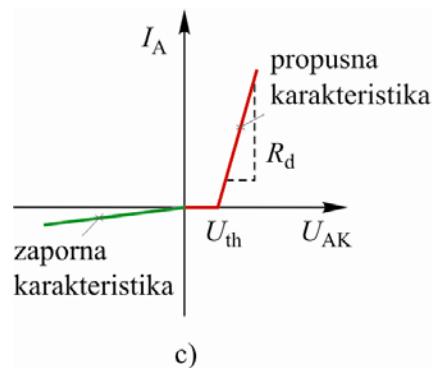
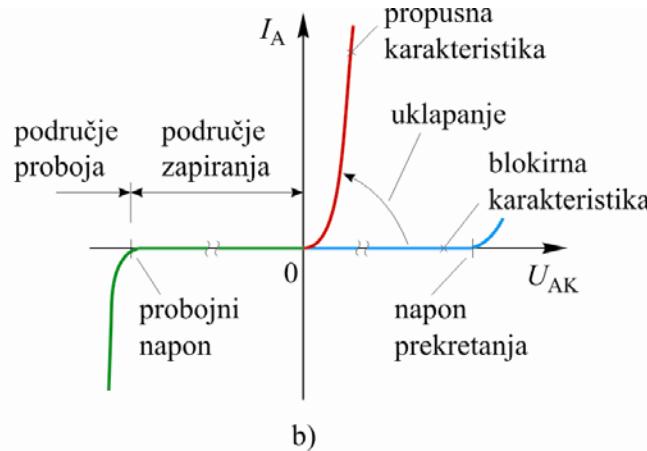
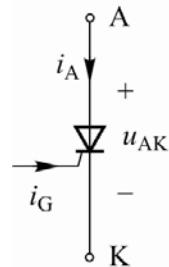


Idealna karakteristika

- neupravljiva, jednokvadrantna sklopka
- vodi struju u jednom, propusnom smjeru (od anode A prema katodi K)
- preuzima negativni (zaporni) napon u stanju nevođenja

U_{th} – napon praga (1 – 1,5 V)
 R_d – dinamički otpor ($m\Omega$)

Modeli poluvodičkih ventila - TIRISTOR



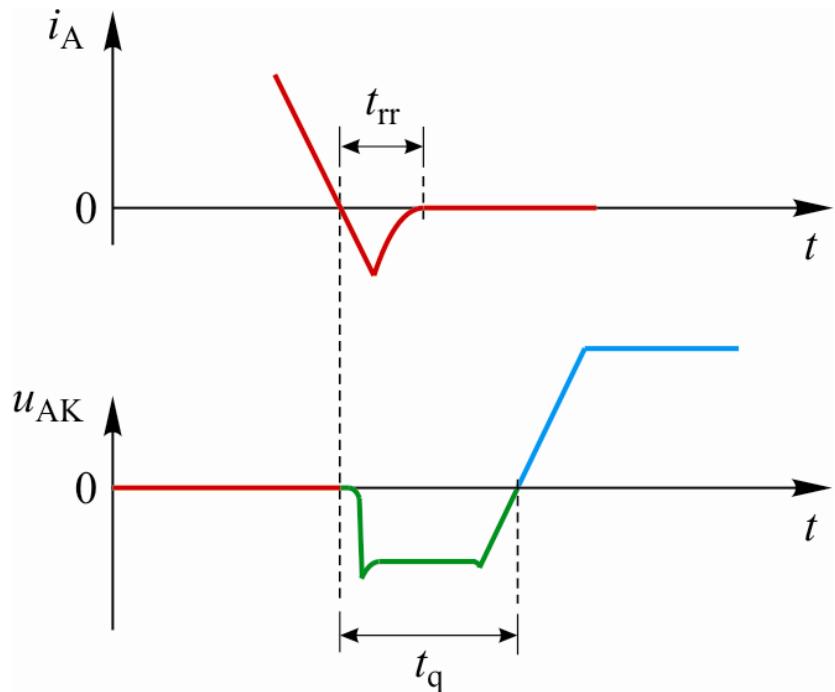
- poluupravljava, uklopiva, dvokvadrantna sklopka
- vodi struju u jednom, propusnom smjeru (od anode A prema katodi K)
- preuzima negativni (zaporni) napon ili pozitivni (blokirni) u stanju nevođenja
- uklapa pomoću pozitivnog impulsa na upravljačkoj elektrodi G (geitu) pod uvjetom da se nalazi u stanju blokiranja
- isklapa prolazom struje kroz nulu

Idealizirana karakteristika

Idealna karakteristika

Tiristor – vrijeme oporavljanja

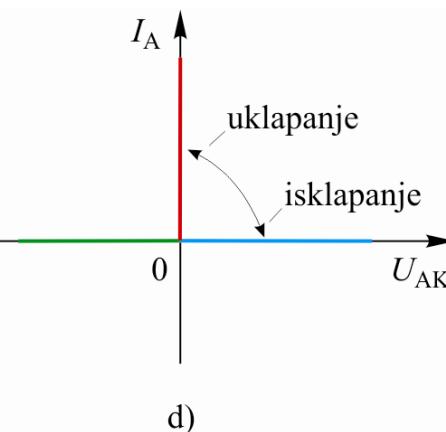
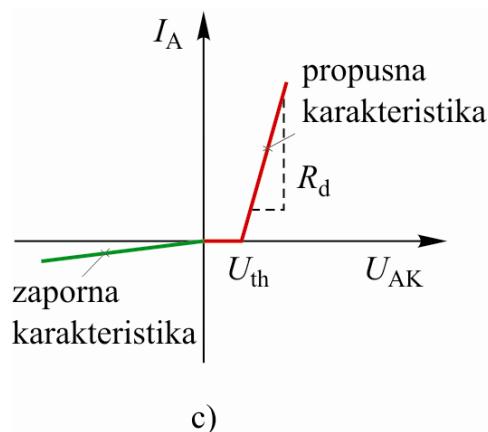
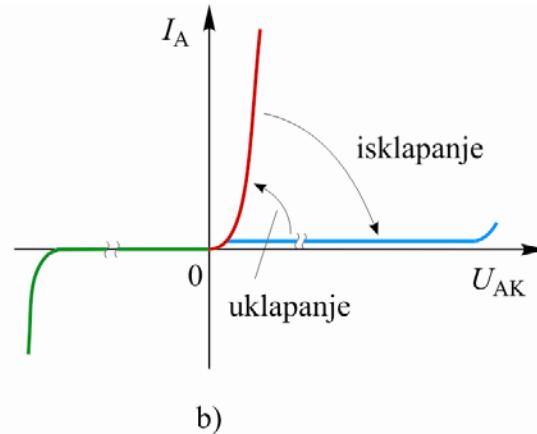
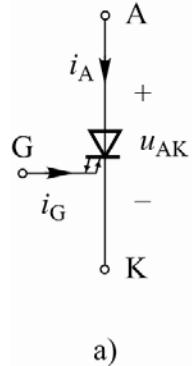
Već na razini osnovne analize sklopova, treba u model tiristora uvesti *vrijeme oporavljanja*.



t_{rr} vrijeme oporavljanja
 t_q vrijeme odmaranja

Vrijeme oporavljanja je fizikalna karakteristika komponente. *Vrijeme odmaranja* je karakteristika sklopa. Vrijeme odmaranja treba biti jednako ili veće od vremena oporavljanja. U protivnom tiristor može nekontrolirano provesti.

Modeli poluvodičkih ventila - Geitom isklopivi tiristor – GTO (engl. *gate turn off thyristor*)

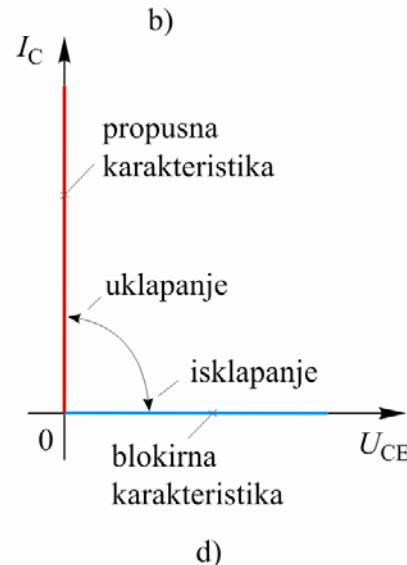
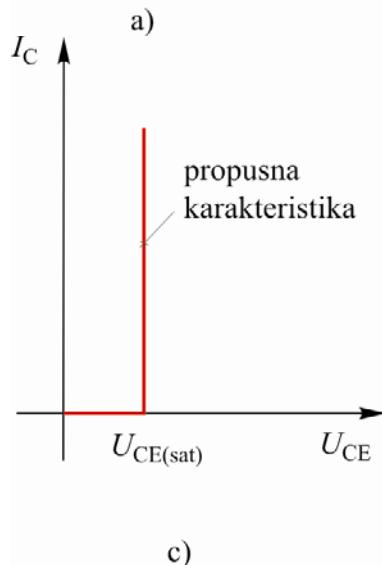
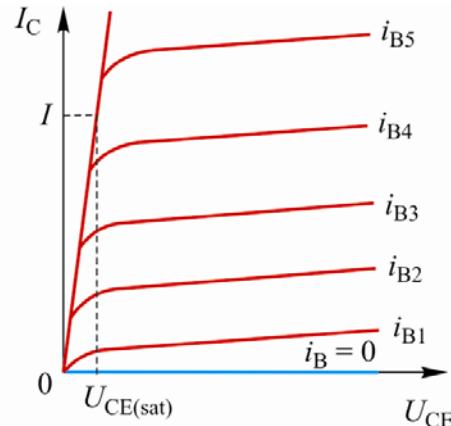
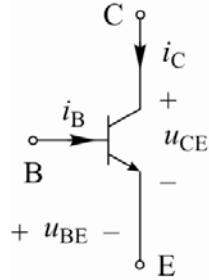


- upravljiva, uklopljiva i isklopiva, dvokvadrantna sklopka
- vodi struju u jednom, propusnom smjeru (od anode A prema katodi K)
- preuzima negativni (zaporni) napon ili pozitivni (blokirni) u stanju nevođenja
- uklapa dovođenjem pozitivnog impulsa na upravljačku elektrodu (geit) pod uvjetom da se nalazio u stanju blokiranja
- isklapa dovođenjem negativnog impulsa na upravljačku elektrodu (geit)

Idealizirana karakteristika

Idealna karakteristika

Modeli poluvodičkih ventila - Bipolarni tranzistor – BJT (engl. *bipolar junction transistor*)

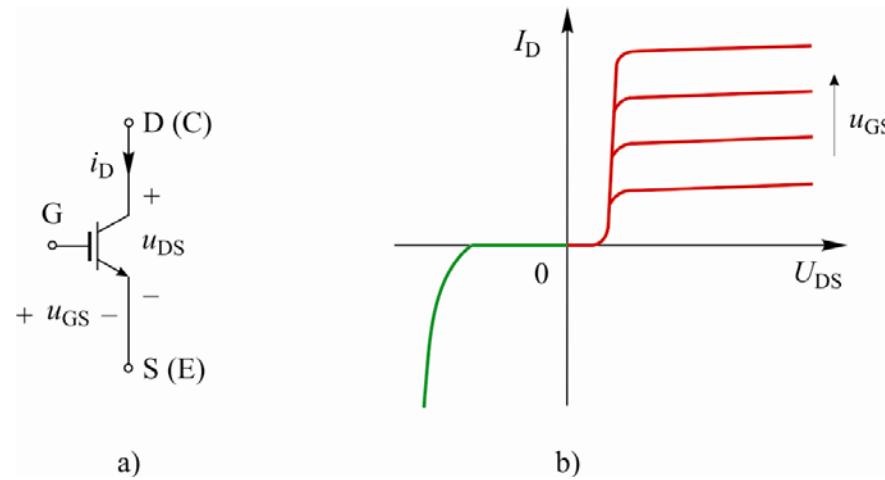


Idealizirana karakteristika

Idealna karakteristika

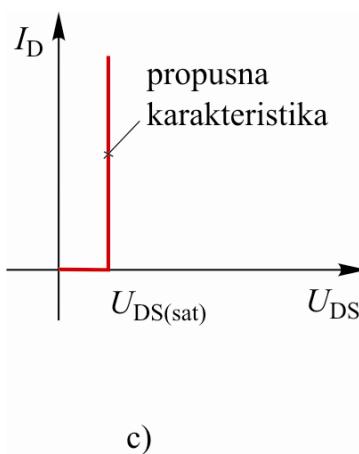
- upravljiva, uklopiva i iskllopiva, jednokvadrantna sklopka
- vodi struju u jednom smjeru
- preuzima pozitivni (blokirni) u stanju nevodenja
- uklapa pomoću pozitivnog strujnog impulsa na upravljačkoj elektrodi (bazi), isklapa nakon uklanjanja tog impulsa

Bipolarni tranzistor s izoliranom upravljačkom elektrodom – IGBT (engl. *insulated gate bipolar transistor*)

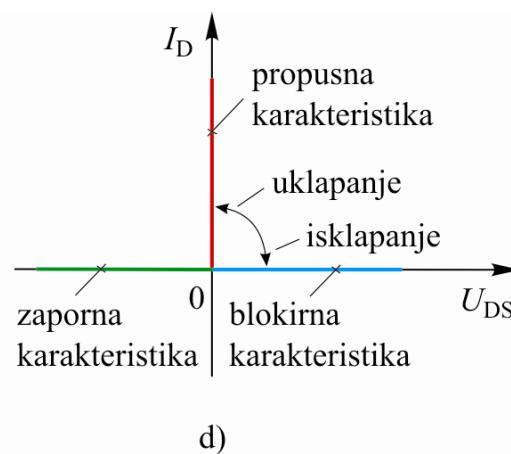


a)

b)



c)



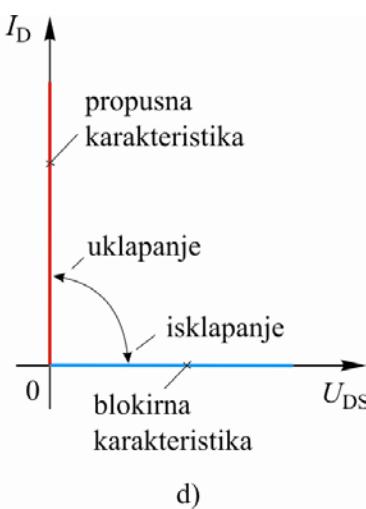
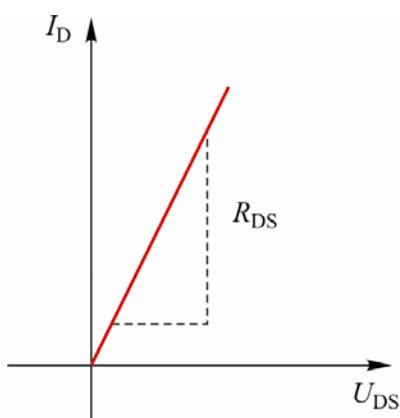
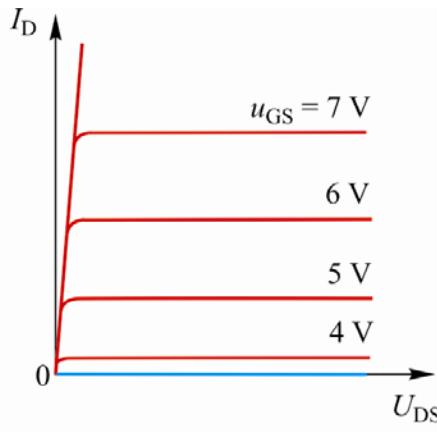
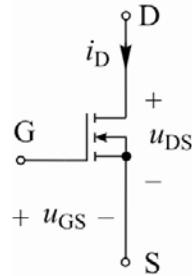
d)

Idealizirana karakteristika

Idealna karakteristika

- upravljiva, uklopiva i isklopiva jednokvadrantna sklopka
- vodi struju u jednom smjeru
- preuzima pozitivni (blokirni) u stanju nevođenja, samo neki tipovi IGBT-a mogu preuzeti negativni (zaporni) napon
- uklapa pomoću pozitivnog naponskog impulsa na upravljačkoj elektrodi (geitu), isklapa nakon uklanjanja tog impulsa

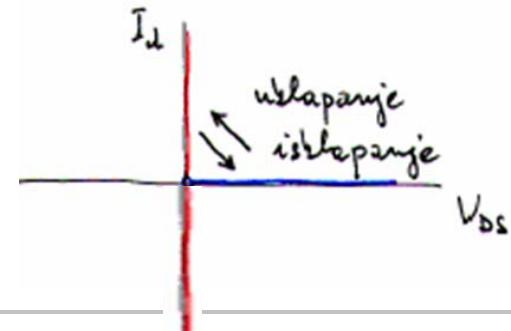
MOS tranzistor s učinkom polja – MOSFET (engl. *metal oxide semiconductor field effect transistor*)



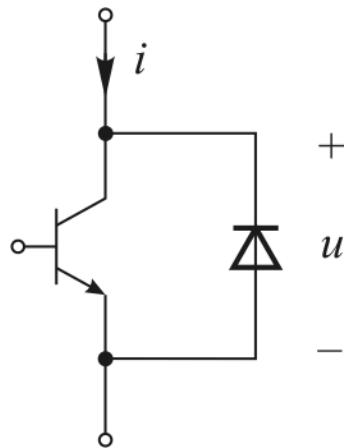
Idealizirana karakteristika

Idealna karakteristika

- upravljiva, uklopljiva i isklopljiva, dvokvadrantna sklopka
- vodi struju u dva smjeru (u jednom FET, a u drugom ugrađena dioda)
- preuzima pozitivni (blokirni) u stanju nevođenja
- uklapa pomoću pozitivnog naponskog impulsa na upravljačkoj elektrodi (geitu), isklapa nakon uklanjanja tog impulsa

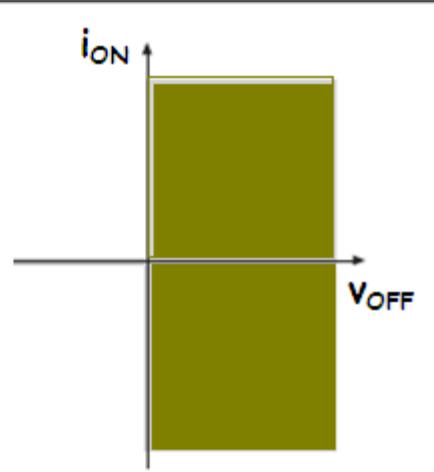


Hibridna sklopka- strujno dvosmjerna

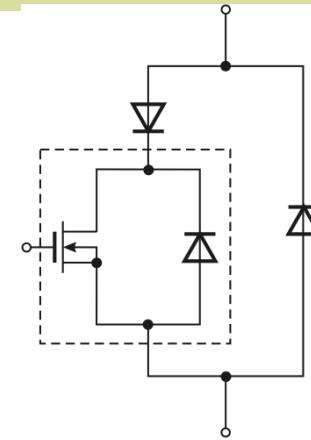


Bipolarnom tranzistoru (isto tako i IGBT-u) može se dodati povratna dioda.

Dvokvadrantna
sklopka
(strujno
dvosmjerna,
naponski
unipolarna)

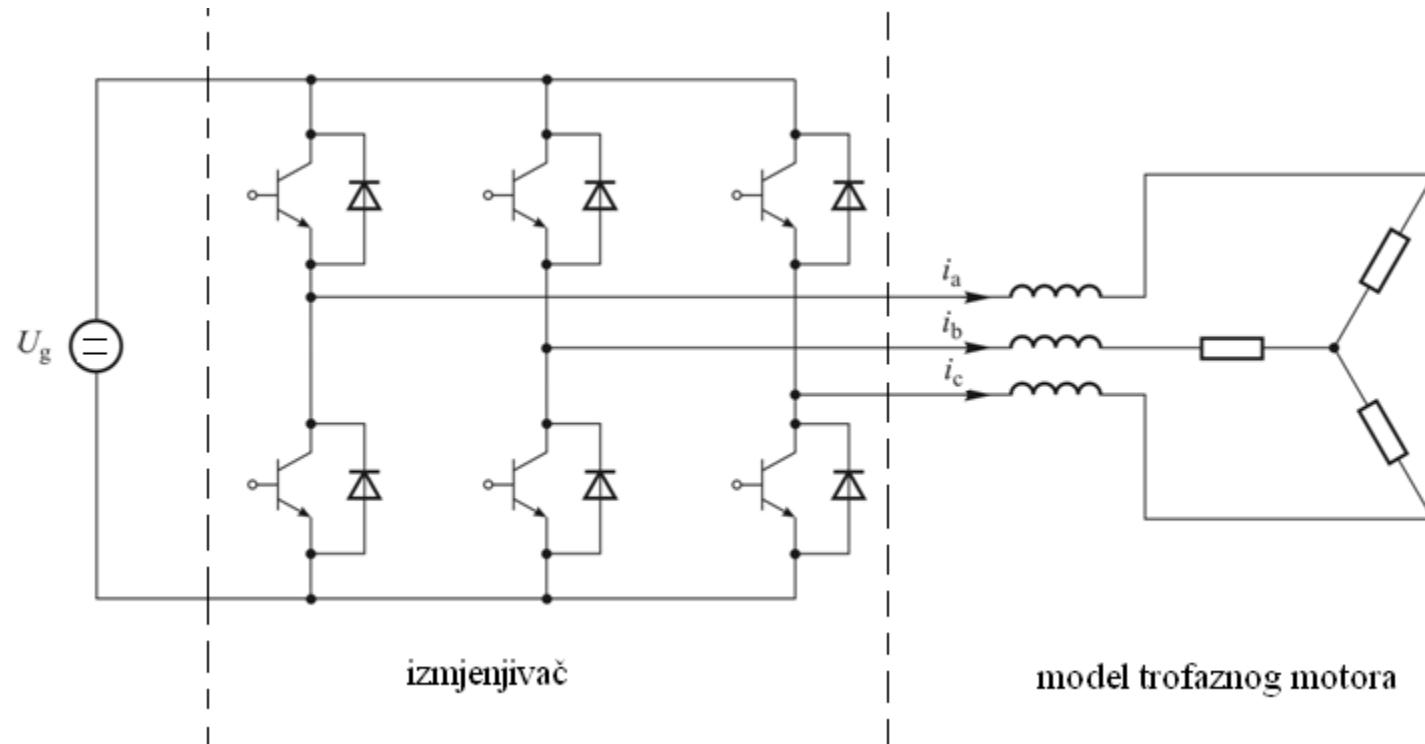


Ukoliko dinamička svojstva ugrađene diode MOSFET-a ne zadovoljavaju, rješenje je sljedeće:

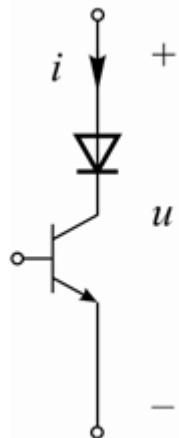


Primjer upotrebe strujno dvosmjerne sklopke

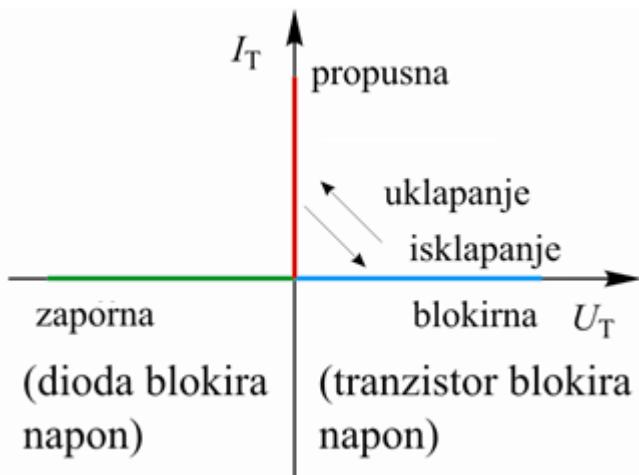
Primjer upotrebe dvokvadrantne strujno dvosmjerne sklopke kod trofaznog izmjenjivača s naponskim ulazom.



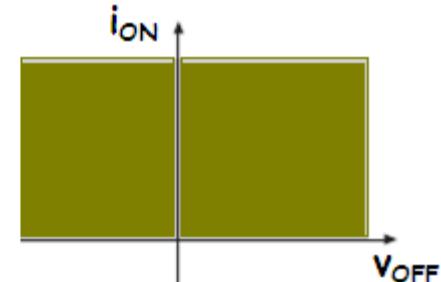
Hibridna sklopka- naponski bipolarna



Bipolarnom tranzistoru (isto tako i IGBT-u ili MOSFET-u) može se u seriju dodati dioda koja preuzima zaporni napon kojeg tranzistor ne bi mogao preuzeti.

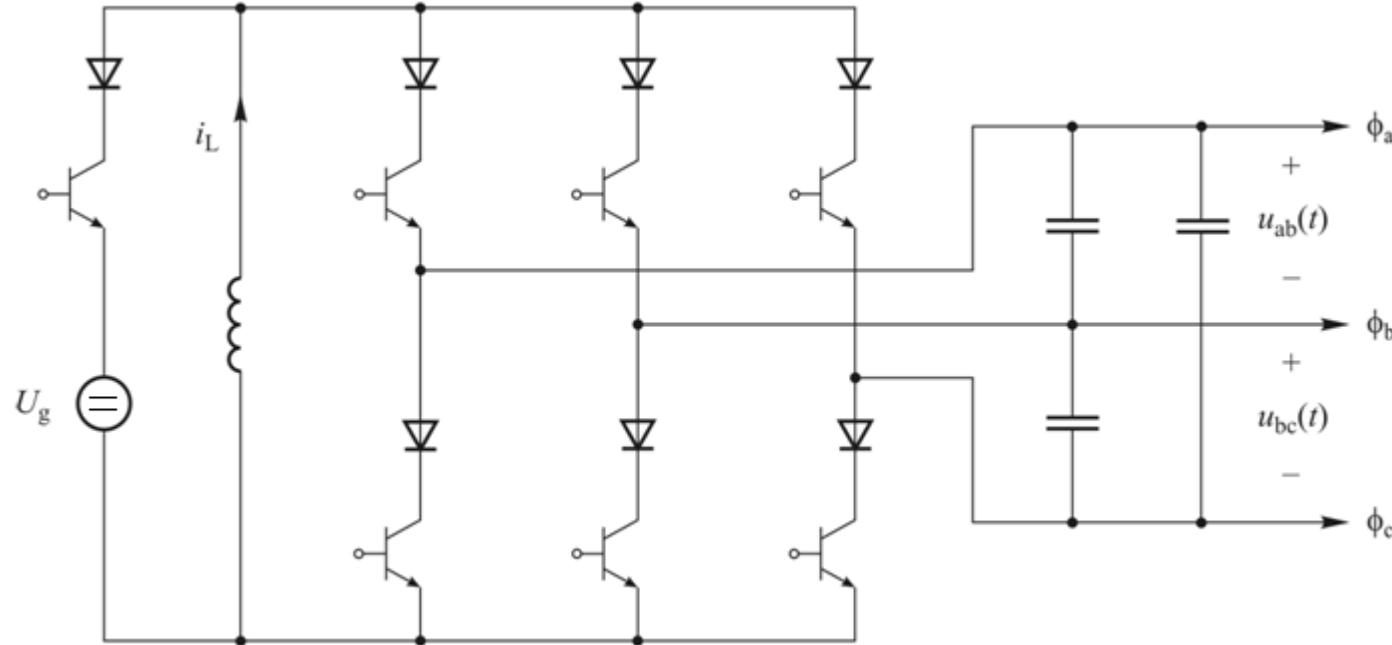


Dvokvadrantna
sklopka
(strujno
jednosmjerna,
naponski
bipolarna)



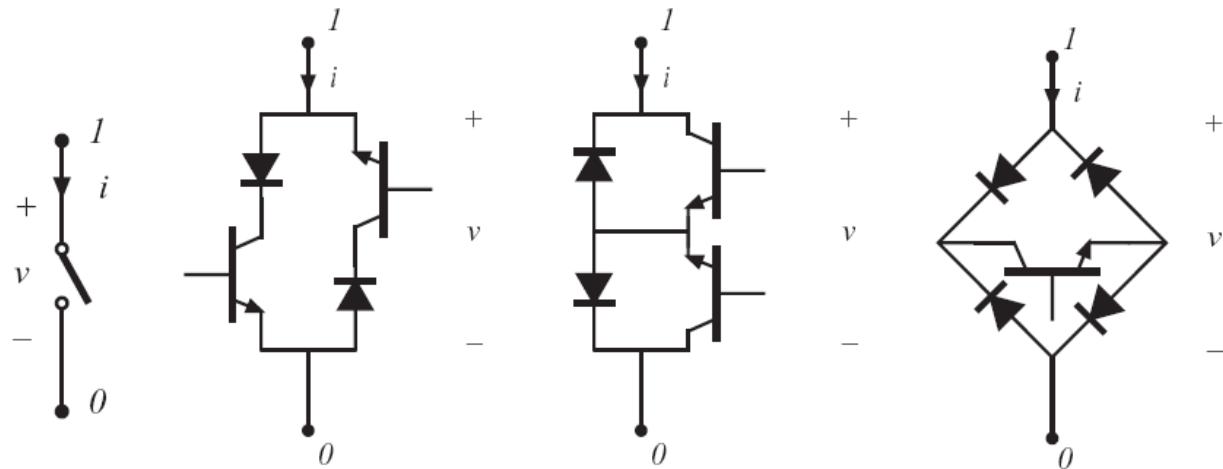
Primjer upotrebe naponski bipolarne sklopke

Primjer upotrebe dvokvadrantne naponski bipolarne sklopke kod trofaznog izmjenjivača sa strujnim ulazom.

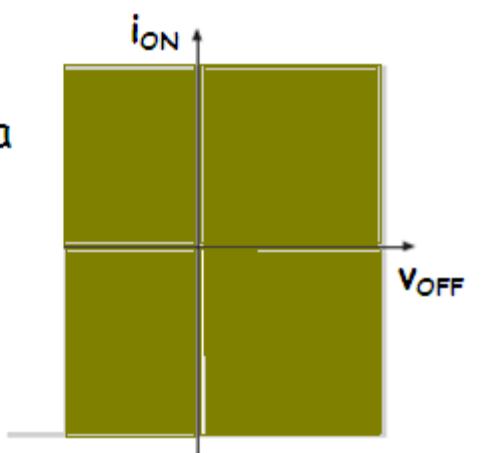


Četverokvadrantna sklopka

Idealni nadomjestak za mehaničku sklopku je četverokvadrantna sklopka, koja se na različite načine može ostvariti kombinacijom poluvodičkih ventila

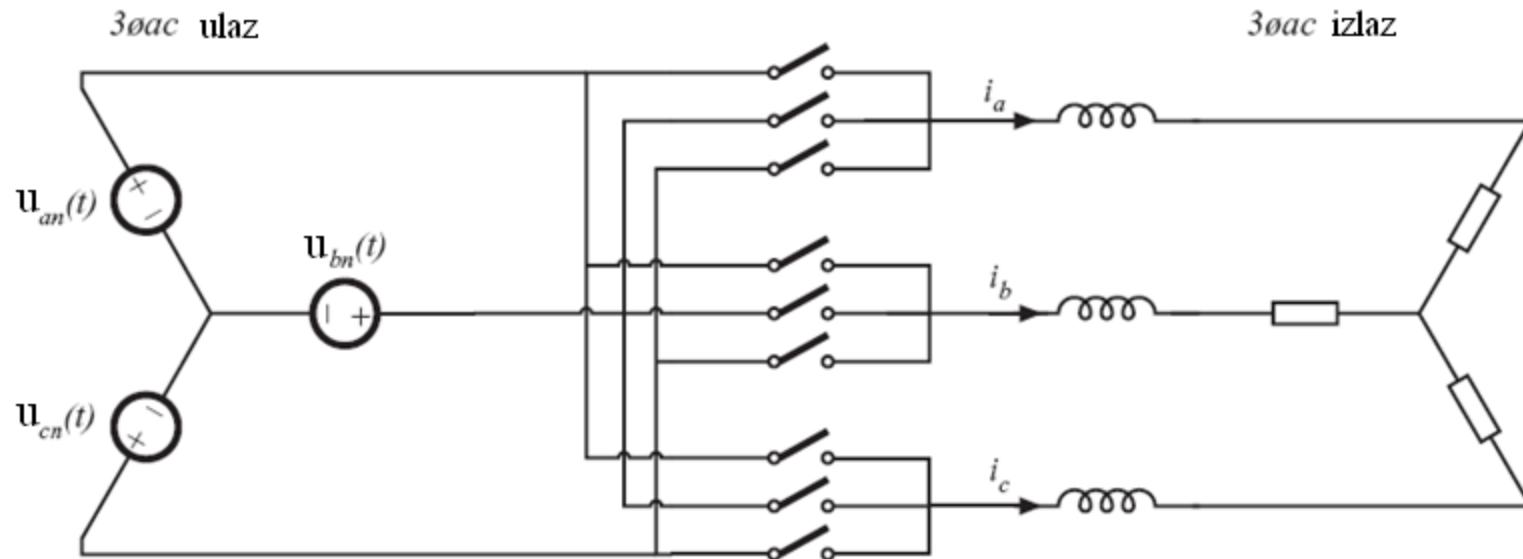


Četverokvadrantna sklopka
(strujno dvosmjerna, naponski bipolarna)



- upravljiva, uklopljiva i isklopljiva, četverokvadrantna sklopka,
- vodi struju u dva smjeru i preuzima napon u dva smjera,
- uklapa pomoću pozitivnog naponskog impulsa na upravljačkoj elektrodi, isklapa nakon uklanjanja tog impulsa

Primjer upotrebe četverokvadrantne sklopke – matrični pretvarač



Svi naponi i struje su izmjenične veličine, sklopke moraju biti četverokvadrantne. Potrebno je 9 takvih sklopki.

UČINSKA ELEKTRONIKA

- nakon uvodnog dijela spoznali smo čime se bavi učinska elektronika i upoznali osnovne sklopke
- u dalnjem radu potrebna su nam pomagala, knjige i programski alati



Osnovna pomagala

Daniel W. Hart,

INTRODUCTION TO POWER ELECTRONICS

**IPES (Interactive Power Electronics
Simulation)**

www.ipes.ethz.ch

SIMPLORER

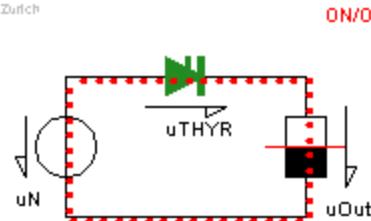
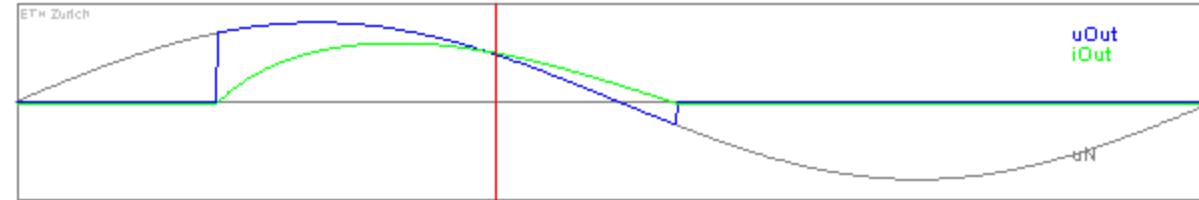
www.ansoft.com

IPES (Interactive Power Electronics Simulation)

Phase-
Controlled
Thyristor
Converters
with
Resistive/
Inductive
Load

iPES-Home

Basic Thyristor Converter

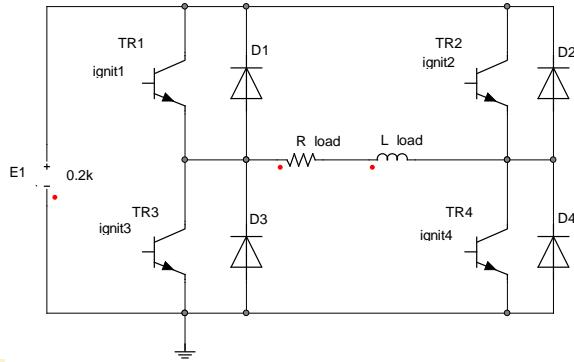


- (1) Drag the vertical red time-marker with the mouse. The corresponding power circuit conduction state is animated in the power circuit applet.
- (2) The second time-diagram shows the generation of the gate-signal of the thyristor. Drag the horizontal red line with the mouse to change the delay of the triggering signal (firing angle "Alpha") of the thyristor.
- (3) The left-hand applet shows resistive-inductive load. Drag the horizontal red line in the load symbol with the mouse to increase the resistive component while decreasing the inductive component (or vice versa).

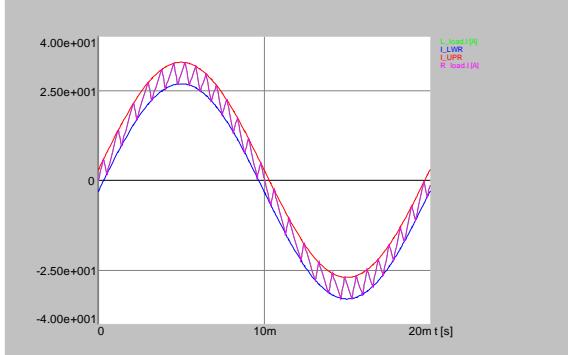
SIMPLORER

Simulation of a single-phase inverter with 2-point-hysteresis controller

circuit



output



quick4

assignments

ICA -Initial Condition Assignment.

```
ICA:  
FX := 50  
OMEGA := 2 * PI * FX  
A := 30  
D := 0.1
```

VA -Variable Assignment,

```
EQU:  
I_SET := A * sin(OMEGA * t)  
I_UPR := I_SET + D * A  
I_LWR := I_SET - D * A
```

Reference for model characteristic. In Simplorer 5, it is possible for the user to select the characteristic line from the internal function of the component or simply linked using the same name "EXP1"



EXP1

control

```
SET := ignit1:=1  
SET := ignit2:=0  
SET := ignit3:=0  
SET := ignit4:=1 (R_load.I>=I_UPR)  
ON14  
ON23  
SET := ignit1:=0  
SET := ignit2:=1  
SET := ignit3:=1  
SET := ignit4:=0
```

Simulation properties:
Step width max 1m
Step width min 10u
Simulation end time

SIMpler®
systems simulation

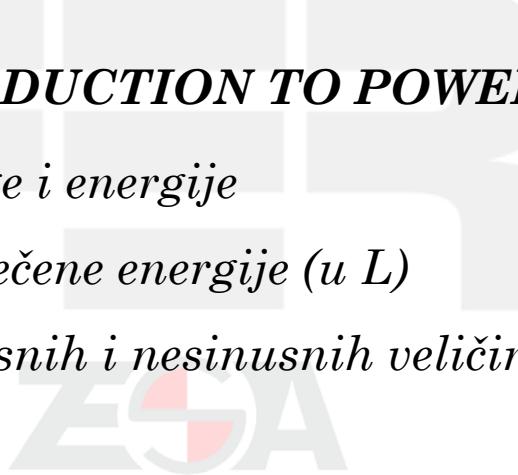
UČINSKA ELEKTRONIKA

Što je potrebno znati – temeljna znanja,
što treba ponoviti?

Daniel W. Hart,

INTRODUCTION TO POWER ELECTRONICS

- # Računanje snage i energije
- # Razgradnja zatečene energije ($u\ L$)
- # Snaga kod sinusnih i nesinusnih veličina,
Fourierov red
- i još mnogo toga...

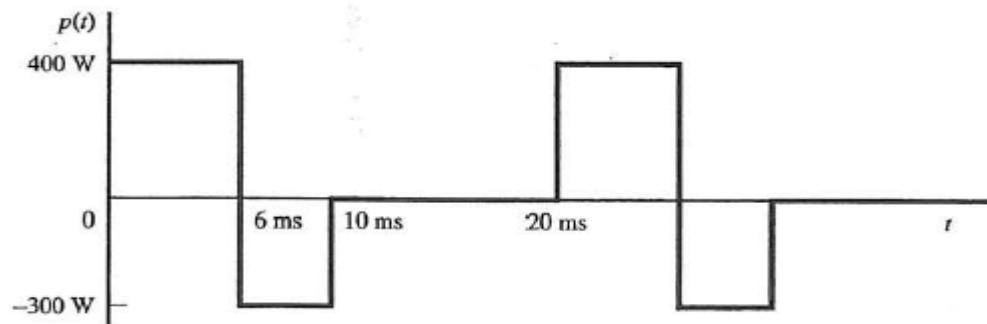
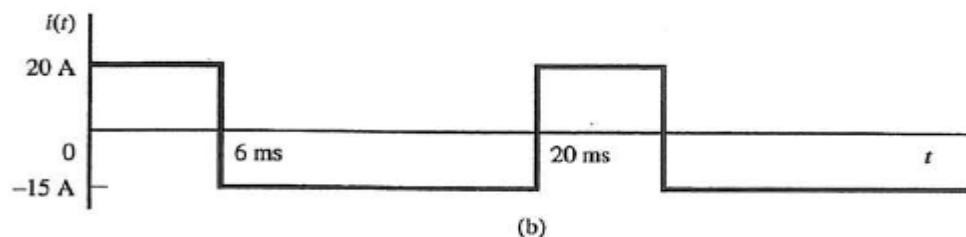
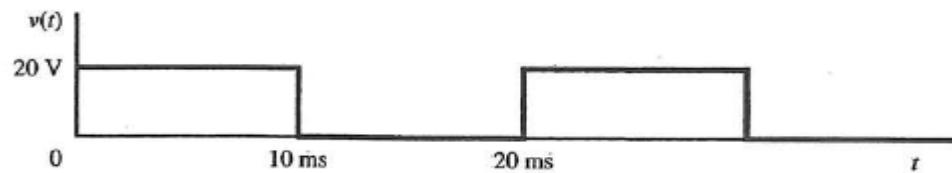


PONAVLJANJE - Računanje snage i energije

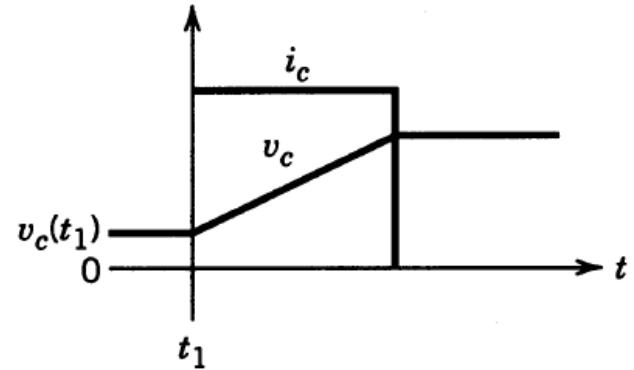
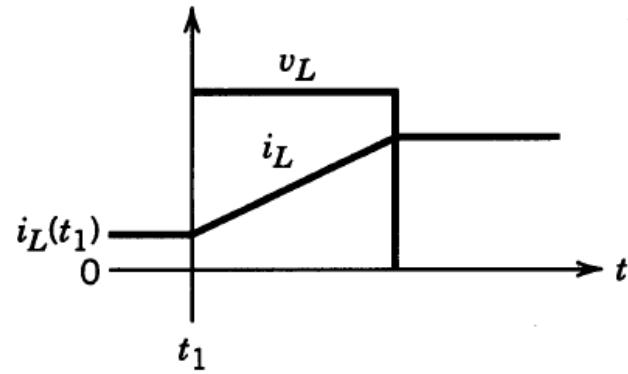
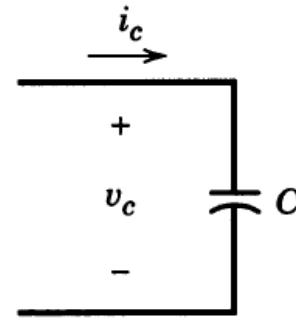
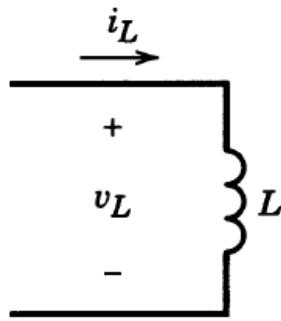
Trenutačna vrijednost, srednja vrijednost, efektivna vrijednost veličine (struje, napona)

Example 2-1 Power and Energy

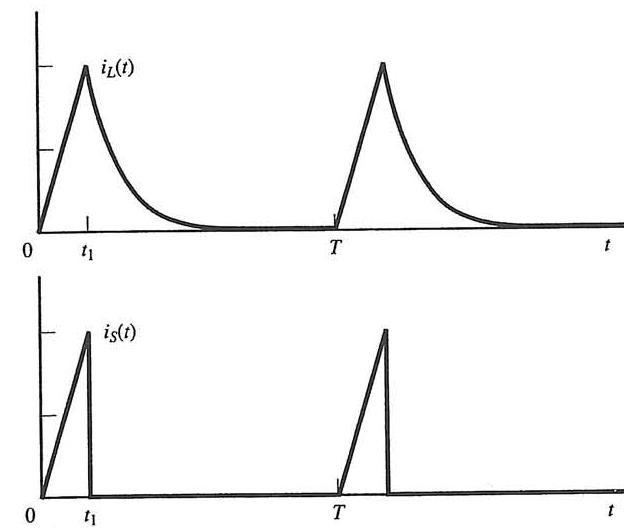
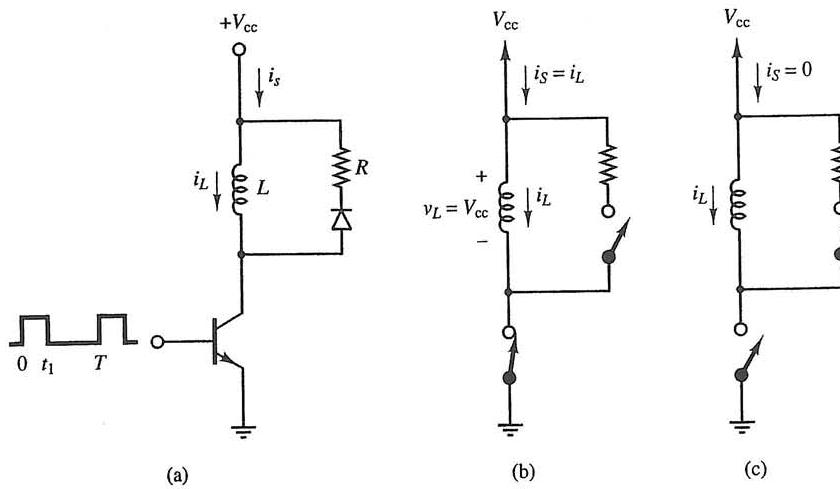
Voltage and current (consistent with the passive sign convention) for a device are shown in Figs. 2-2a and b. (a) Determine the instantaneous power $p(t)$ absorbed by the device. (b) Determine the energy absorbed by the device in one period. (c) Determine the average power absorbed by the device.



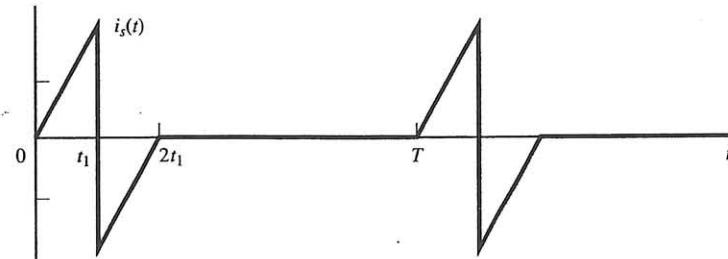
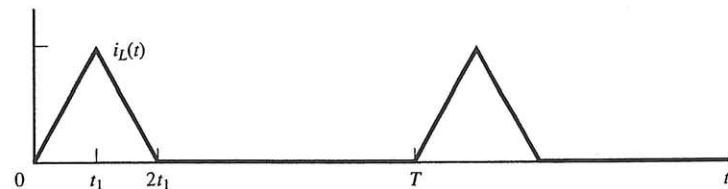
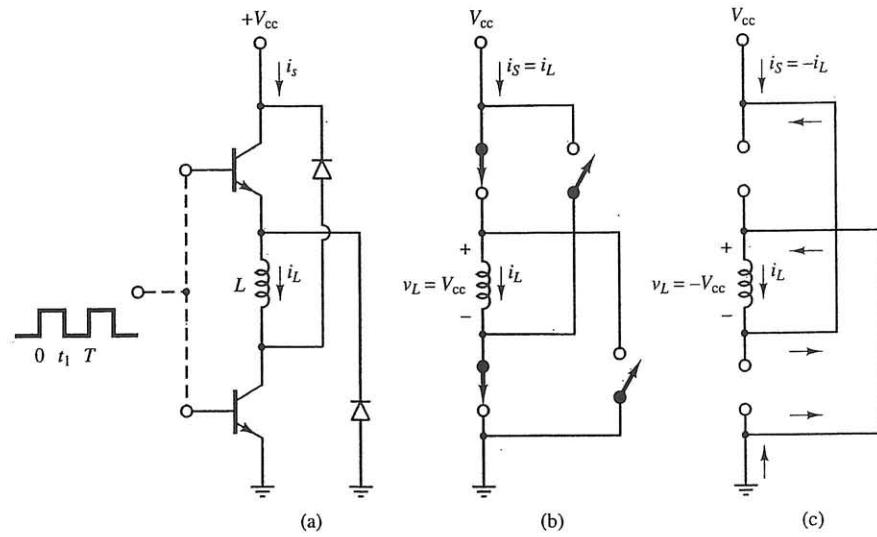
PONAVLJANJE - Odzivi L i C



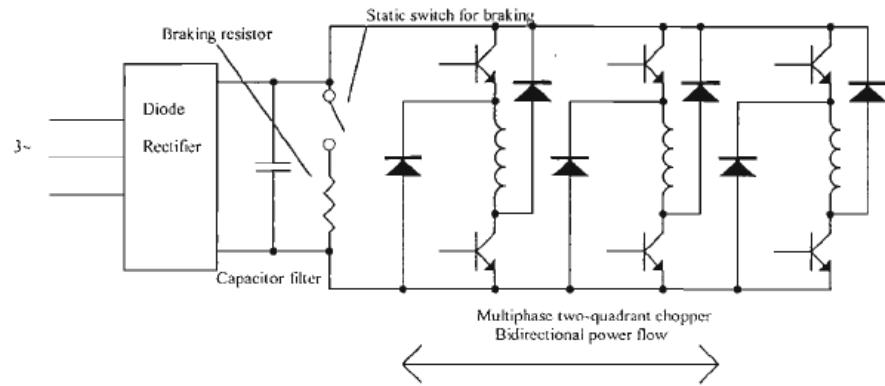
PONAVLJANJE - Razgradnja energije zatečene u L – (I)



PONAVLJANJE - Razgradnja energije zatečene u L – (II)



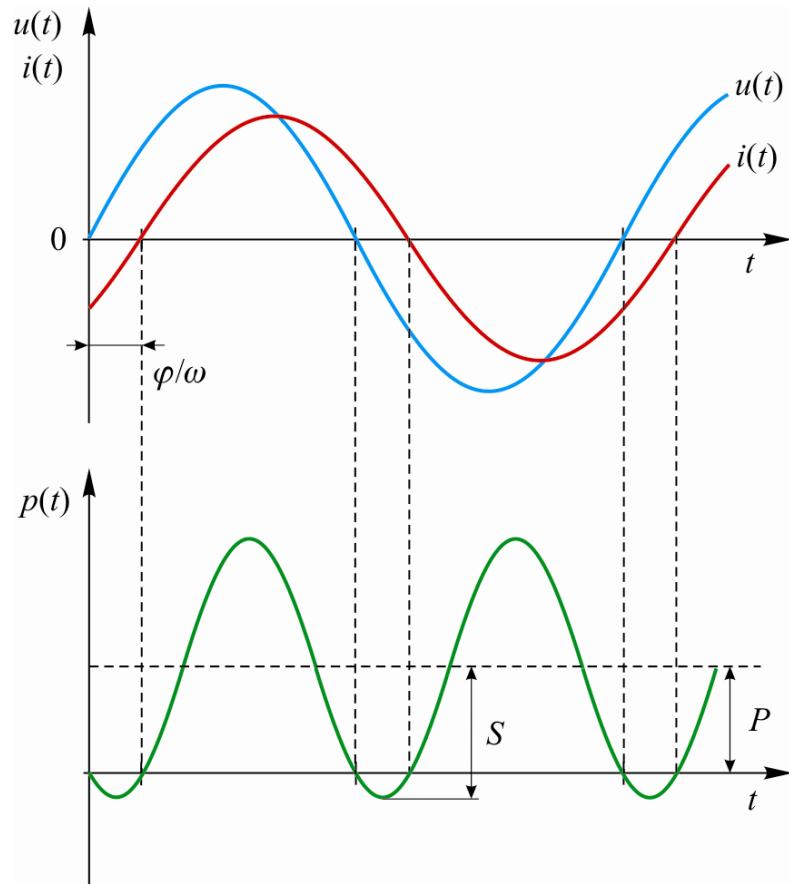
Primjena kod višefaznog DC pretvarača za reluktantne motore.



Temeljna znanja = TZ

TZ - Snaga kod sinusnih i nesinusnih veličina

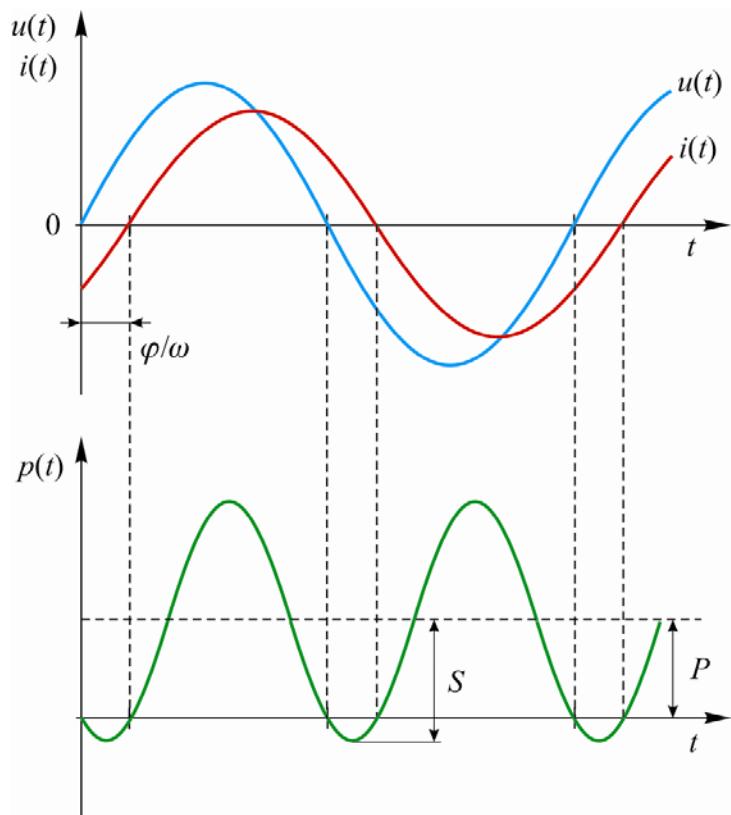
Tok energije mjeri se snagom. Vremensko mijenjanje toka energije mjeri se vremenskim tijekom snage.



$$p(t) = U \cdot I [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)]$$

U , I efektivne vrijednosti
napona i struje

TZ - Prividna, djelatna i jalova snaga



Djelatna snaga: $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$

Prividna snaga: $S = U \cdot I$

$$p(t) = P - S \cos(2\omega t - \varphi)$$

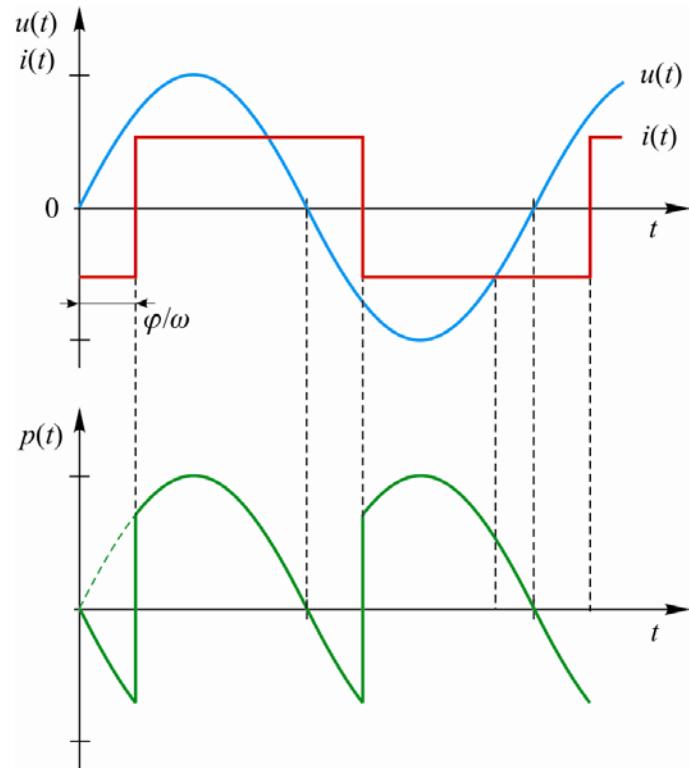
Jalova snaga: $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

Faktor snage: $\lambda = \frac{P}{S} = \cos \varphi$

TZ - Nesinusna struja

Iznesene definicije proširit će se na sinusne napone ali nesinusne struje.



Srednjoj vrijednosti snage pridonosi samo osnovni harmonik struje: $P = P_1 = U \cdot I_1 \cos \varphi_1$

Prividna snaga:

$$S = U \cdot I = U \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots}$$

Prividna snaga osnovnog harmonika:

$$S_1 = U \cdot I_1$$

TZ - Nesinusna struja

Jalova snaga:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$Q = \sqrt{U^2(I_1^2 + I_2^2 + \dots) - U^2 I_1^2 \cos^2 \varphi_1}$$

$$Q = \sqrt{U^2 I_1^2 \sin^2 \varphi_1 + U^2(I_2^2 + I_3^2 + \dots)}$$

$$Q_1^2 = U^2 I_1^2 \sin^2 \varphi_1$$

$$Q_1 = U \cdot I_1 \sin \varphi_1 \quad Q_1 \text{ - jalova snaga osnovnog harmonika}$$

$$D^2 = U^2(I_2^2 + I_3^2 + \dots)$$

$$D = U \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad D \text{ - jalova snaga izobličenja}$$

TZ - Faktor snage

Dakle:

$$S^2 = P^2 + Q_1^2 + D^2$$

Faktor snage:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1$$

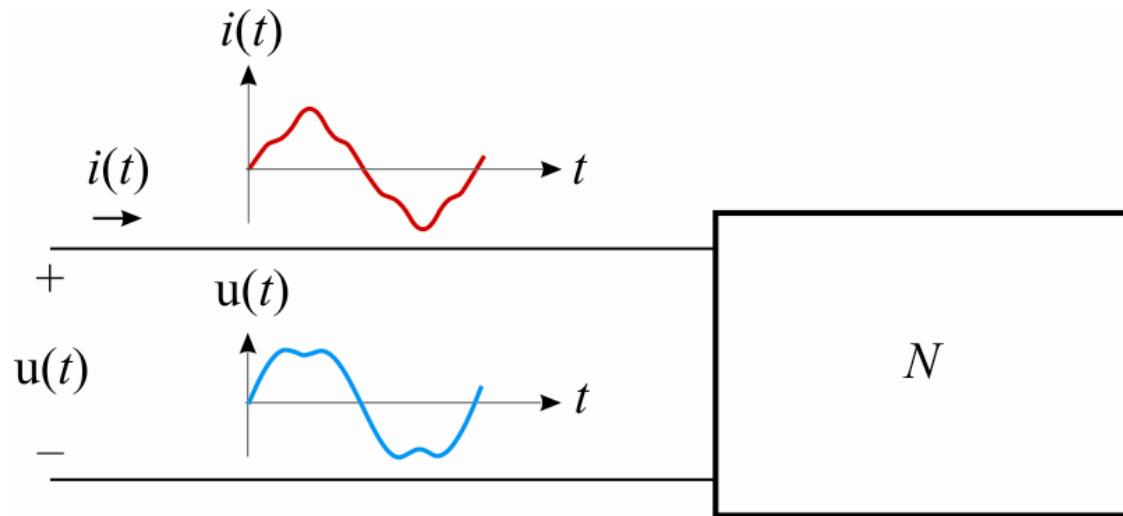
Važno:

Samo kod sinusnih veličina faktor snage i faktor faznog pomaka ($\cos \varphi$) su jednaki.

Faktor snage iskazuje koliko se angažira prividne snage za dobivanje djelatne snage.

U definiciju faktora snage ugrađena je pretpostavka da opterećenje napojne mreže ovisi samo o efektivnoj vrijednosti struje. To znači da harmonički spektar nije bitan; primjerice, svejedno je da li je struja sinusna ili bogata harmonicima.

TZ - Opći slučaj – nesinusna struja i nesinusni napon

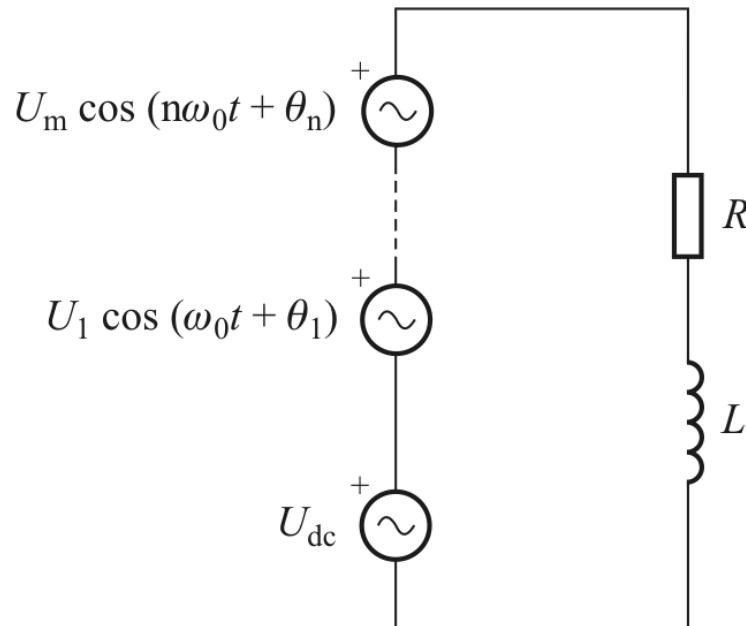


Opća vremenski promjenjiva nelinearna mreža N s periodičnim pristupnim varijablama u i i .

Srednja vrijednost snage P na pristupima mreže N je: $P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt$

TZ - Nesinusni izvor i linearno trošilo

Primjenjuje se načelo superpozicije:



$$P = \sum_{n=0}^{\infty} P_n = U_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_{n,rms} I_{n,rms} \cos(n\omega_o t + \theta_n)$$

ili

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} P_n = U_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_{n,max} I_{n,max}}{2} \cos(n\omega_0 t - \theta_n)$$

TZ - RAČUNANJE GUBITAKA UČINSKIH POLUVODIČKIH VENTILA

GUBICI VOĐENJA - IDEALIZIRANO

DEFINICIJA

$$P_s(t) = v_s(t) \cdot i_s(t)$$

$$P_s(t) = v_s(t) \cdot i_s(t) = (v_{s0}(t) + R_s \cdot i_s(t)) \cdot i_s(t) = v_{s0}(t) \cdot i_s(t) + R_s \cdot i_s^2(t)$$

SREDNJA
VRIJEDNOST

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T_{sw}} \cdot \int_{T_{sw}} P_s(\tau) d\tau = \\ &= \frac{1}{T_{sw}} \cdot \int_{T_{sw}} (v_{s0} \cdot i_s(\tau) + R_s \cdot i_s^2(\tau)) d\tau = \\ &= v_{s0} \cdot \int_{T_{sw}} \frac{i_s(\tau)}{T_{sw}} d\tau + R_s \cdot \int_{T_{sw}} \frac{i_s^2(\tau)}{T_{sw}} d\tau = \\ &= v_{s0} \cdot i_{s,average} + R_s \cdot i_{s,rms}^2 \end{aligned}$$

TZ - RAČUNANJE GUBITAKA UČINSKIH POLUVODIČKIH VENTILA

**IZRAČUNAVANJE IDEALIZIRANIH GUBITAKA
VOĐENJA ZA RAZLIČITE TIPOVE UČINSKIH
POLUVODIČKIH VENTILA:**

ZA DIODE I TIRISTORE VRIJEDI

$$v_{s0} \cdot i_{s,average} + R_s \cdot i_{s,rms}^2$$

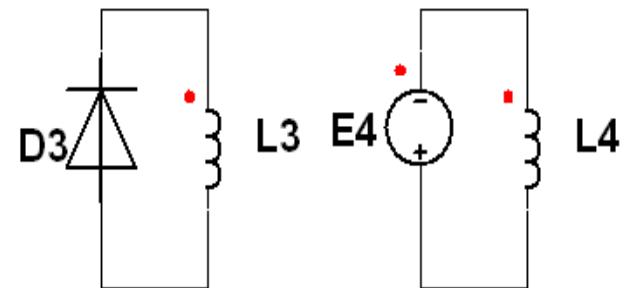
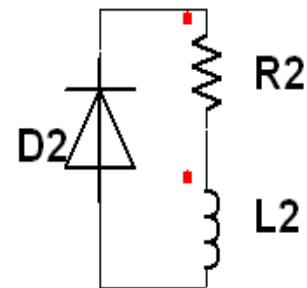
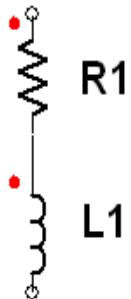
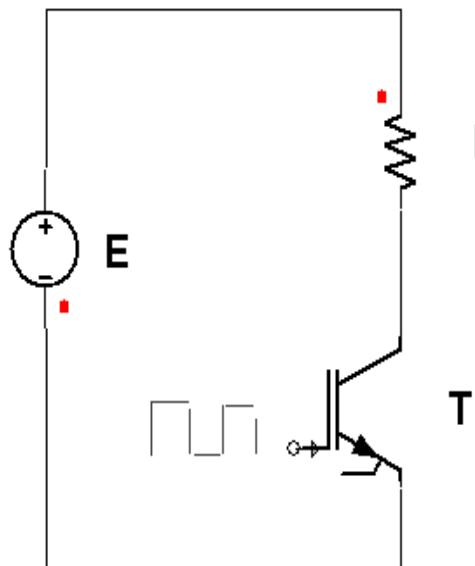
KOD MOSFETA-a DJELUJE SAMO $R_{DS(on)}$

$$R_s \cdot i_{s,rms}^2$$

KOD BJT I IGBT-a DJELUJE SAMO U_{CES}

$$v_{s0} \cdot i_{s,average}$$

PROVJERA ZNANJA - Znamo li ispravno razmišljati ?



Nacrtajmo strujno-naponske odnose za različite tipove trošila !

OSNOVNI SKLOPOVI UČINSKE ELEKTRONIKE

- tranzistorska sklopka s istosmjernim (DC) izvorom
- dioda i tiristor u krugu s izmjeničnim (AC) izvorom
- induktivno trošilo, poredna dioda, protuelektrnomotorna sila

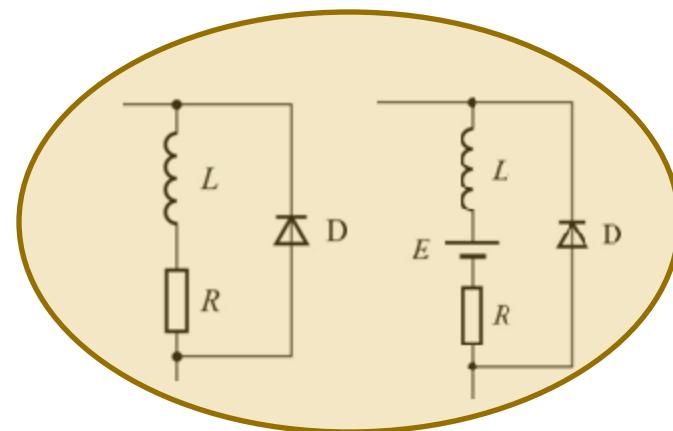
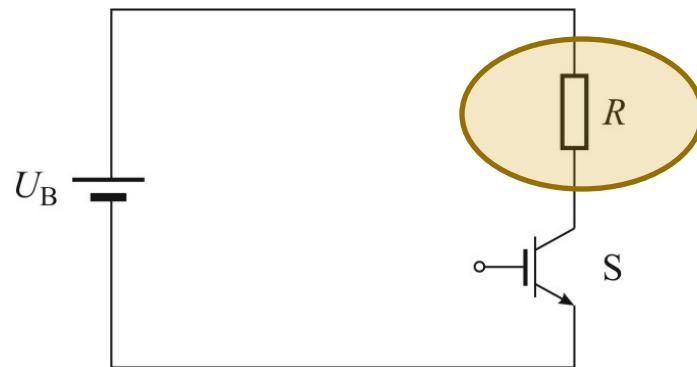


Istosmjerni naponski izvor (DC) i tranzistorska sklopka

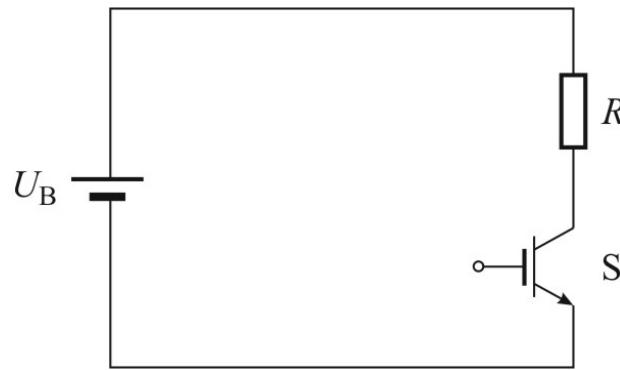
Tranzistorska sklopka (BJT, MOSFET ili IGBT) spaja ili odvaja istosmjerni naponski izvor i trošilo koje može biti različitog karaktera:

- djelatno (omsko, otporno)
- induktivno (serijski spoj otpora i prigušnice)
- RLE (serijski spoj otpora prigušnice i protuelektromotorne sile)
- potpuno induktivno

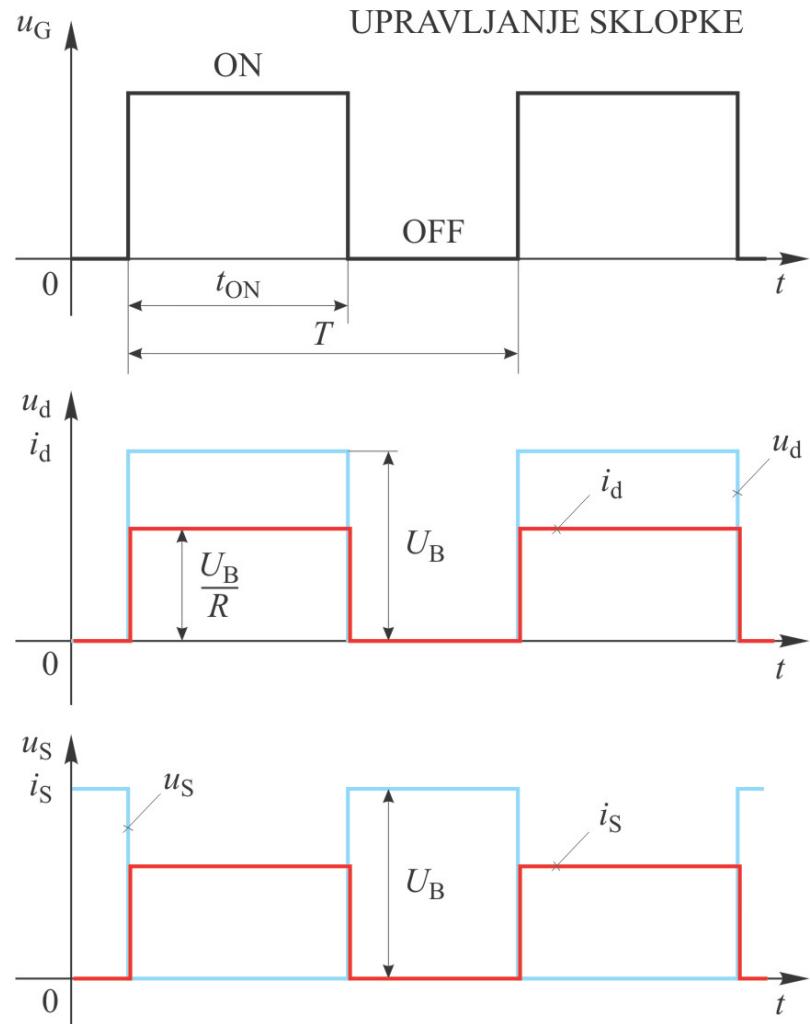
Ovaj spoj je temeljni spoj za izučavanje istosmjernih pretvarača.



Istosmjerni naponski izvor i tranzistorska sklopka – djelatno trošilo

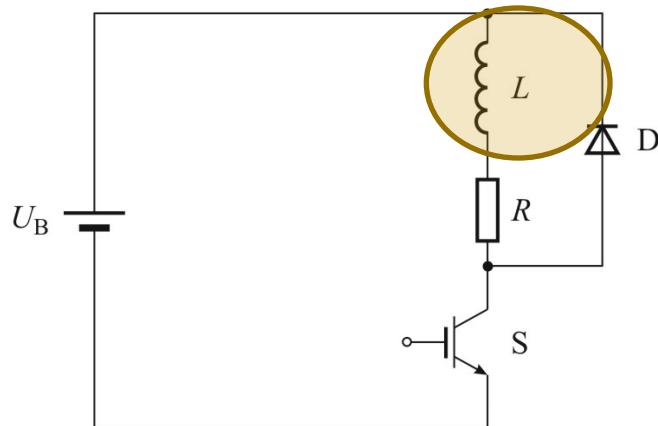


Naponsko-strujni odnosi na sklopci i djelatnom trošilu.

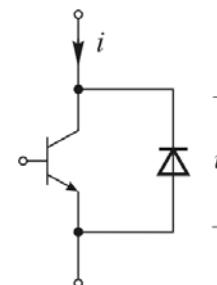


Istosmjerni naponski izvor i tranzistorska sklopka – induktivno trošilo

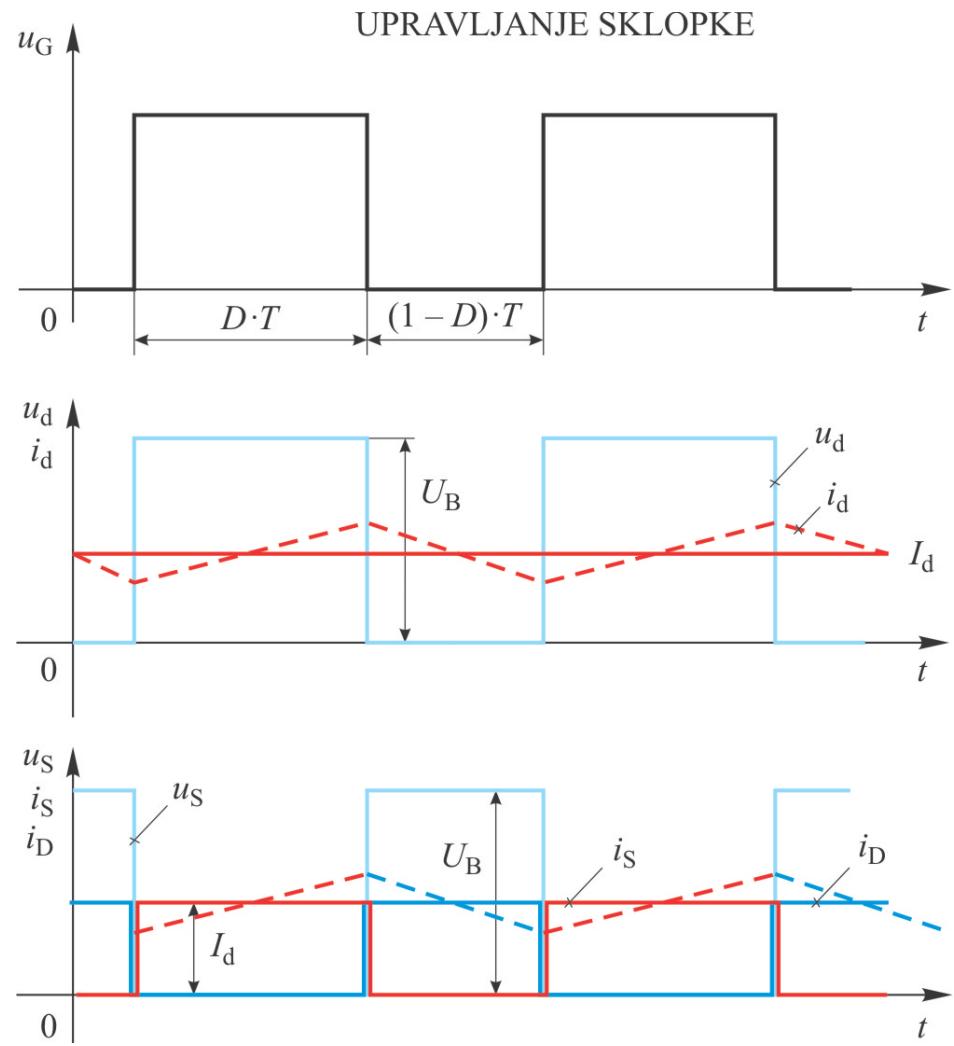
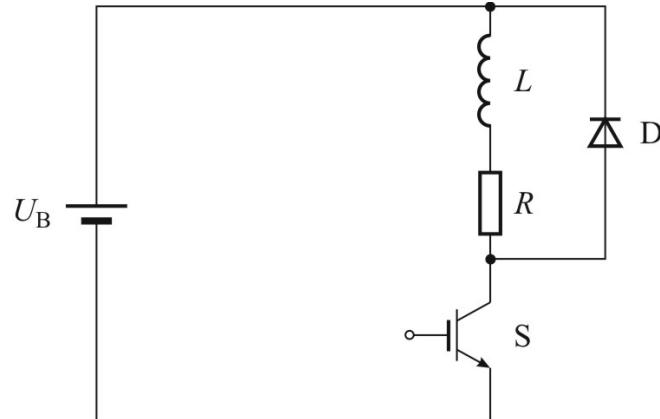
U učinskoj elektronici vrlo rijetko se susreće samo djelatno trošilo, ono je najčešće induktivno. Kod induktivnog trošila, zbog razgradnje pohranjene energije, potrebno je dodati tzv. *porednu* diodu.



Dioda u protuparalelnom spoju s poluvodičkim ventilom (hibridna, strujno dvosmjerna sklopka) naziva se *povratna* dioda



Istosmjerni naponski izvor i tranzistorska sklopka – induktivno trošilo



Naponsko-strujni odnosi na sklopci i induktivnom trošilu.

Istosmjerni naponski izvor i tranzistorska sklopka – induktivno trošilo

U slučaju da je struja induktivnog trošila neisprekidana (nije nužno da je i nevalovita), srednju vrijednost struje trošila određuje samo otpor R , dok induktivitet L određuje samo valovitost struje trošila.

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{DU_B}{R_d}$$

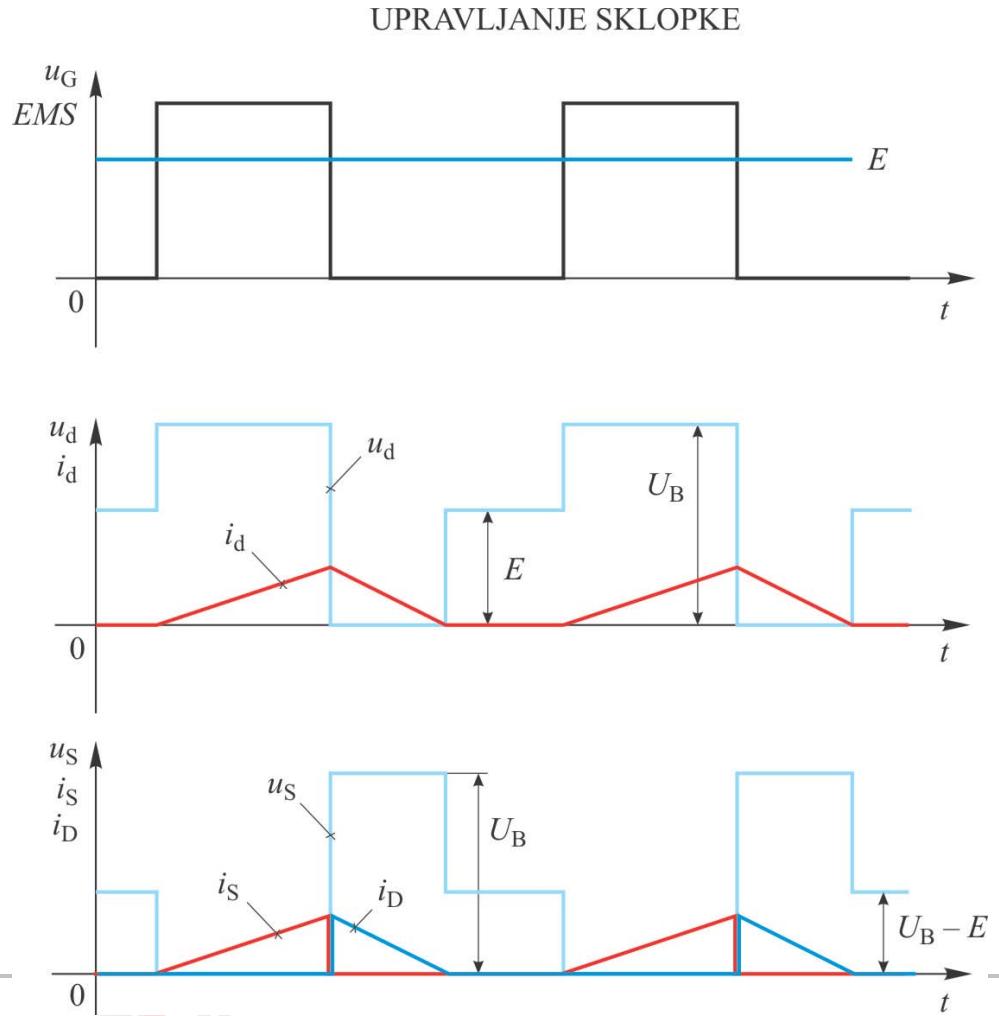
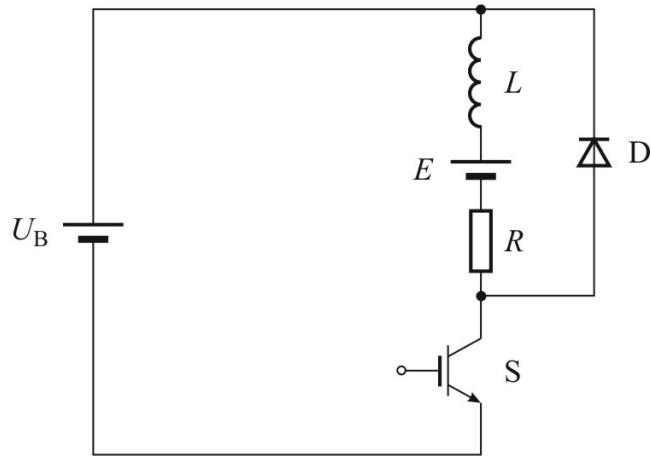
Srednjom vrijednošću struje trošila upravlja se promjenom srednje vrijednosti napona trošila, a srednja vrijednost napona trošila se mijenja promjenom faktora vođenja (opterećenja) D .*

U pojednostavljenim, idealiziranim razmatranjima, u slučaju jako induktivnog trošila, struja trošila se smatra neisprekidanom i nevalovitom.

*Načelo modulacije širine impulsa - PWM

Istosmjerni naponski izvor i tranzistorska sklopka – RLE trošilo

Često se u krugu trošila nalazi i protueletromotorna sila (E).



Naponsko-strujni odnosi na sklopci i RLE trošilu.

Istosmjerni naponski izvor i tranzistorska sklopka – RLE trošilo

Razlikuju se dva slučaja: neisprekidana i isprekidana struja trošila I_d .

- U slučaju neisprekidane struje trošila, protuelektromotorna sila se ne vidi u valnom obliku napona na trošilu, ali izravno određuje srednju vrijednost struje (kako?).

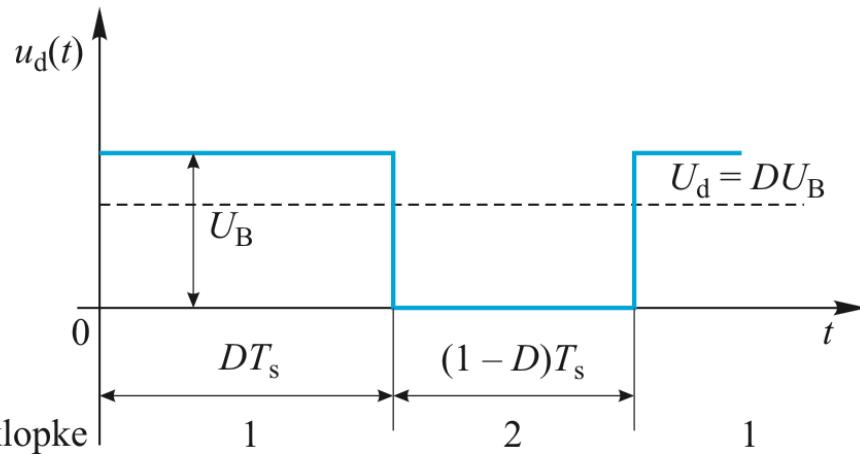
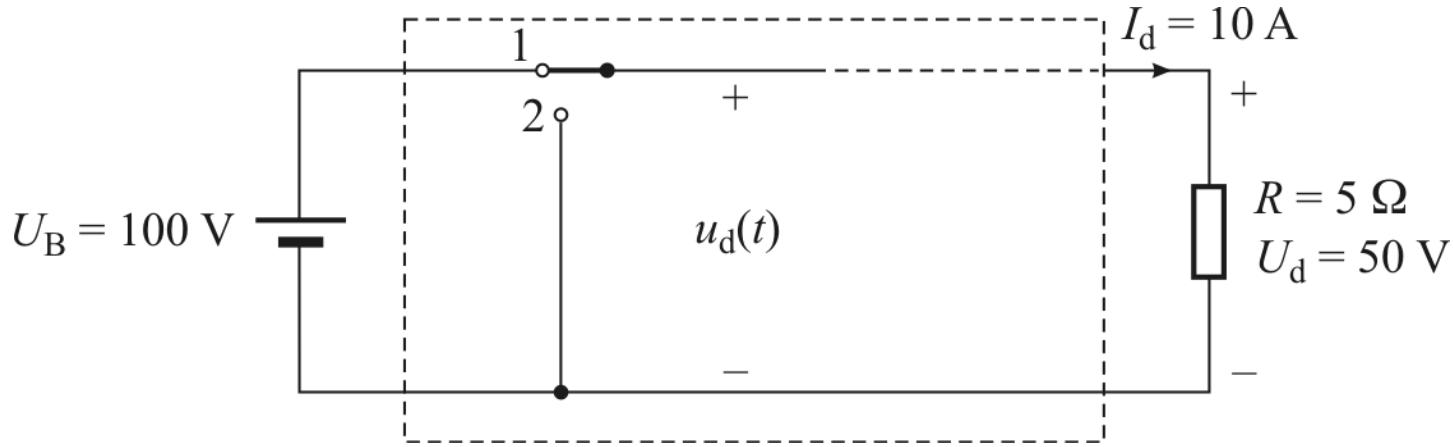
$$I_d = \frac{U_d \pm E}{R_d} = \frac{DU_B \pm E}{R_d}$$

- U slučaju isprekidane struje trošila, protuelektromotorna sila se vidi u valnom obliku napona na trošilu, tijekom intervala kada je struja trošila jednaka nuli. Tada ne vrijedi navedeni izraz za srednju vrijednost struje trošila I_d .

Zadatak za vježbu: Izvesti izraz za srednju vrijednost struje trošila u isprekidanom načinu rada.

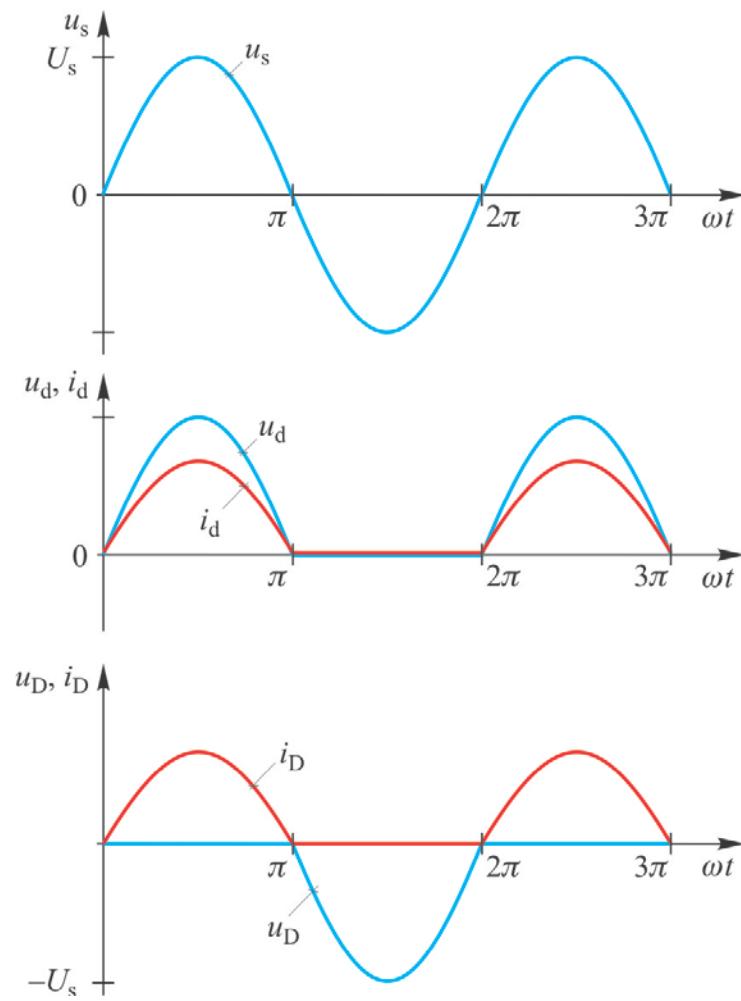
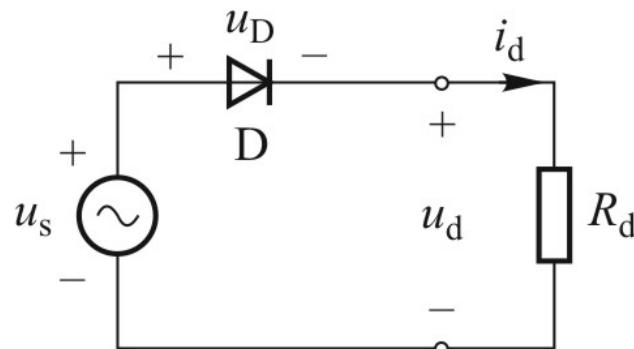
Tranzistorska sklopka s DC izvorom

- Često se koristi funkcionalno jednak oblik sklopa istosmjerne sklopke, koji odgovara obliku za analizu istosmjernog silaznog pretvarača



Izmjenični naponski izvor (AC) i dioda – djelatno trošilo (R)

Ovo je najjednostavniji
ISPRAVLJAC!



Naponsko-strujni odnosi
na diodi i djelatnom
trošilu.

Izmjenični naponski izvor (AC) i dioda – djelatno trošilo (R)

Srednja vrijednost napona na trošilu:

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_s \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{U_s}{\pi}$$

Srednja vrijednost struje trošila dobiva se dijeljenjem s otporom:

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{U_s}{\pi \cdot R_d}$$

Srednja vrijednost snage na trošilu:

$$P = I_{d,\text{rms}}^2 R_d = \frac{U_{d,\text{rms}}^2}{R_d}$$

Efektivne vrijednosti napona i struje trošila za poluvalno ispravljeni sinusni valni oblik:

$$U_{d,\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_s^2 \sin^2(\omega t) d(\omega t)} = \frac{U_s}{2}$$

$$I_{d,\text{rms}} = \frac{U_{d,\text{rms}}}{R_d} = \frac{U_s}{2R_d}$$

Pazite na uvrštanje odgovarajuće vrijednosti veličine (vršna, srednja, efektivna..)

Primjer : Poluvalni diodni ispravljač s djelatnim trošilom

Za poluvalni ispravljač s djelatnim trošilom efektivna vrijednost napona izmjeničnog izvora iznosi 220 V, $f = 50 \text{ Hz}$, otpor trošila je 10Ω . Treba odrediti:

- a) srednju vrijednost struje trošila,
- b) srednju vrijednost snage koja se disipira na trošilu,
- c) faktor snage sklopa.

a) Budući je maksimalna vrijednost napona izvora jednaka:

$$U_s = \sqrt{2} \cdot U_{s,\text{rms}} = \sqrt{2} \cdot 220 = 310,2 \text{ V}$$

Srednja vrijednost napona je: $U_d = \frac{U_s}{\pi} = \frac{310,2}{\pi} = 98,8 \text{ V}$

a srednja vrijednost struje: $I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{U_s}{\pi \cdot R_d} = 9,88 \text{ A}$

Primjer : Poluvalni diodni ispravljač s djelatnim trošilom

b) Srednja vrijednost snage na trošilu je:

$$P = I_{d,\text{rms}}^2 R_d = \frac{U_{d,\text{rms}}^2}{R_d} = \frac{U_s^2}{4R_d} = \frac{310,2^2}{4 \cdot 10} = 2405,6 \text{W}$$

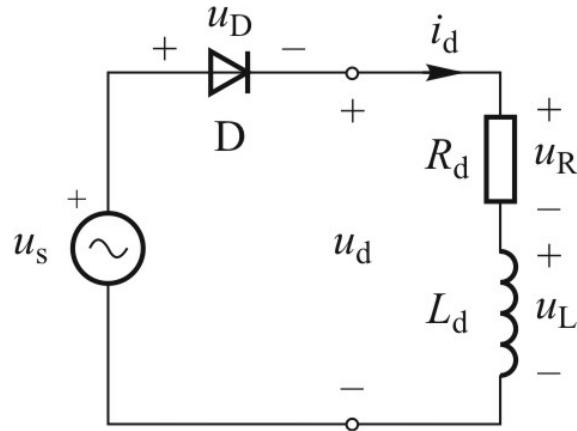
c) Efektivna vrijednost struje trošila je :

$$I_{d,\text{rms}} = I_{s,\text{rms}} = \frac{U_s}{2 \cdot R_d} = 15,51 \text{A}$$

te je faktor snage:

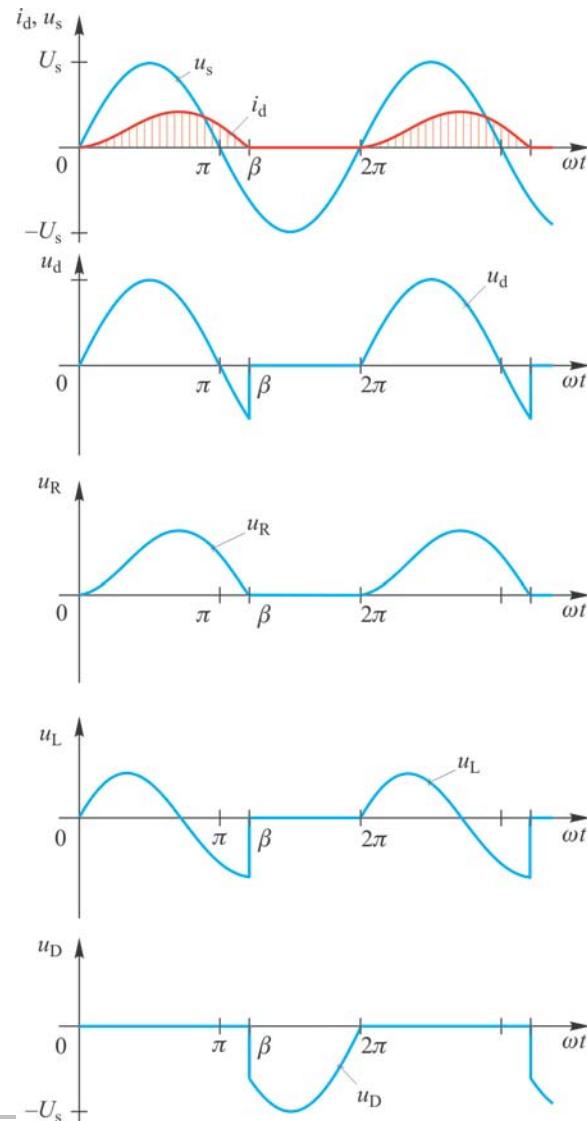
$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{U_{s,\text{rms}} \cdot I_{s,\text{rms}}} = \frac{2405,6}{220 \cdot 15,51} = 0,705$$

Izmjenični naponski izvor (AC) i dioda – induktivno trošilo (RL)



Potrebno je uočiti da srednja vrijednost napona na trošilu ovisi o vremenskoj konstanti trošila.

Naponsko-strujni odnosi na diodi i induktivnom trošilu.



Izmjenični naponski izvor (AC) i dioda – induktivno trošilo (RL) – POSTUPAK RJEŠAVANJA

$$U_s \sin(\omega t) = R_d i(t) + L_d \frac{di(t)}{dt}$$

$$R_d i(t) + L_d \frac{di(t)}{dt} = 0$$

$$i(t) = i_f(t) + i_n(t)$$

$$i_n(t) = A e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$i_f(t) = \frac{U_s}{Z} \sin(\omega t - \varphi)$$

$$i(t) = i_f(t) + i_n(t) = \frac{U_s}{Z} \sin(\omega t - \varphi) + A e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$Z = \sqrt{R_d^2 + (\omega L_d)^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L_d}{R_d} \right)$$

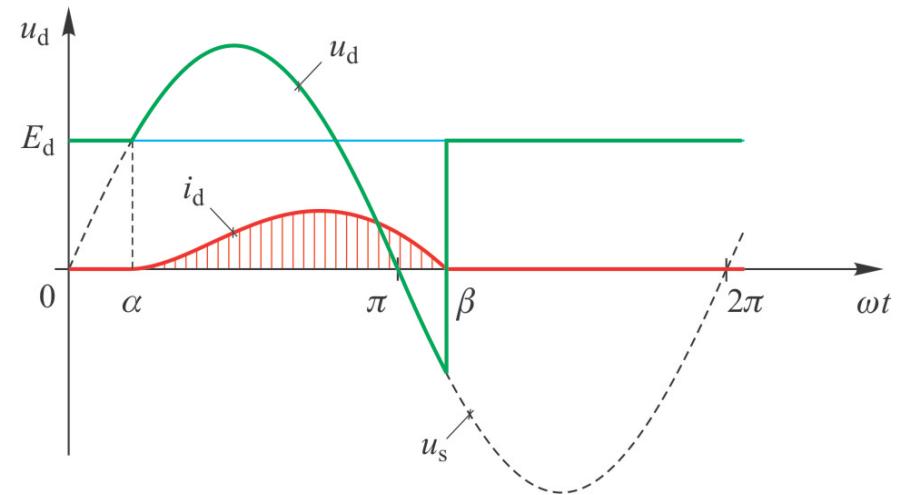
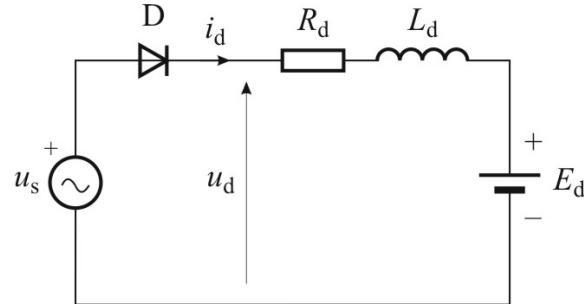
$$i(0) = i_f(0) + i_n(0) = \frac{U_s}{Z} \sin(0 - \varphi) + A e^0$$

$$A = -\frac{U_s}{Z} \sin(-\varphi) = \frac{U_s}{Z} \sin \varphi$$

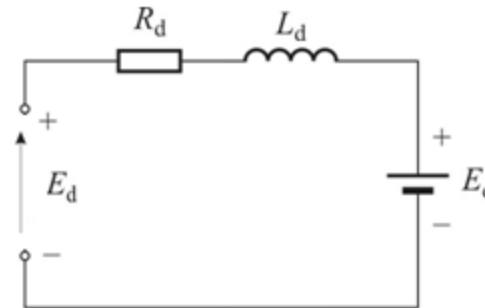
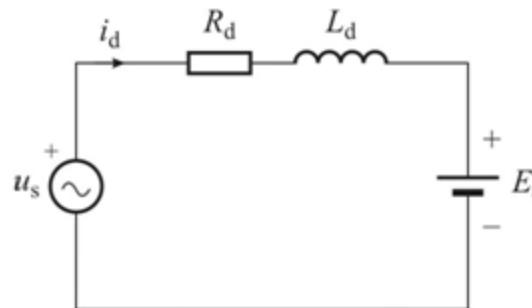
$$i(t) = \frac{U_s}{Z} \sin(\omega t - \varphi) + \frac{U_s}{Z} \sin(\varphi) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$i(t) = \frac{U_s}{Z} \left[\sin(\omega t - \varphi) + \sin(\varphi) e^{-\frac{t}{\tau}} \right] = \frac{U_s}{Z} \left[\sin(\omega t - \varphi) + \sin(\varphi) e^{-\frac{\omega t}{\tau}} \right]$$

Izmjenični naponski izvor (AC) i dioda – RLE trošilo



Naponsko-strujni odnosi na RLE trošilu.



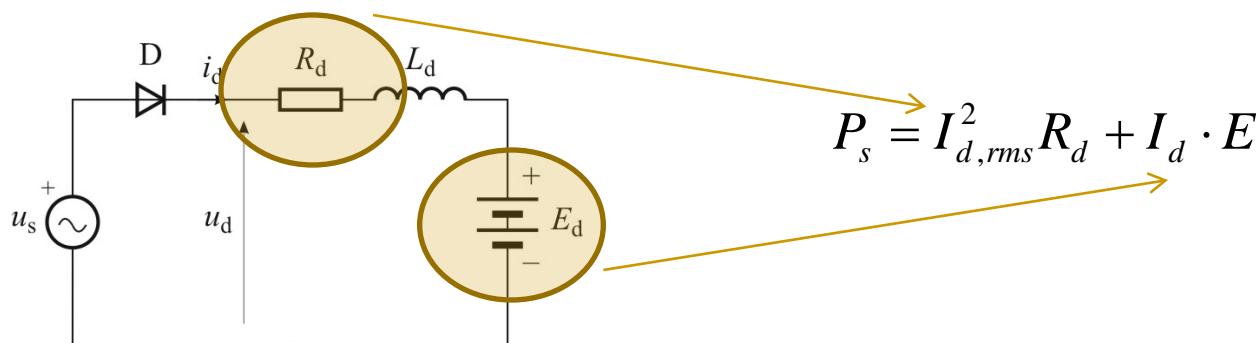
Nadomjesne sheme spoja za dva karakteristična intervala rada.

Izmjenični naponski izvor (AC) i dioda – RLE trošilo

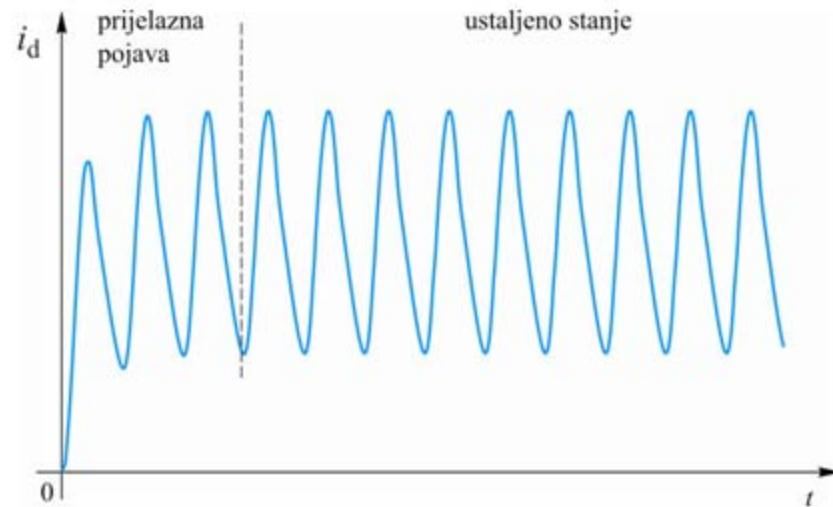
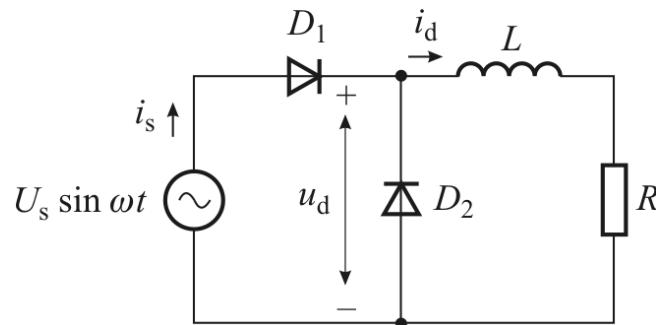
Kada dioda počinje voditi?

$$U_s \sin(\alpha) = E$$
$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{E}{U_s} \right)$$

Važno je uočiti da je snaga izmjeničnog izvora jednaka zbroju snage istosmjernog izvora i snage na otporu (istosmjerna snaga + izmjenična snaga).

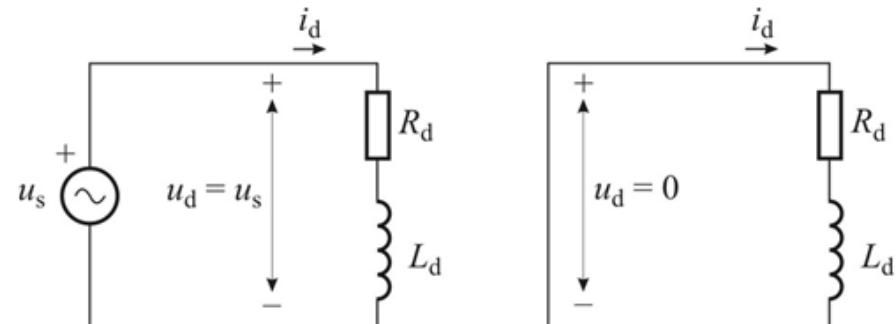


Izmjenični naponski izvor i spoj s porednom diodom



Valni oblik struje trošila do ustaljenog stanja.

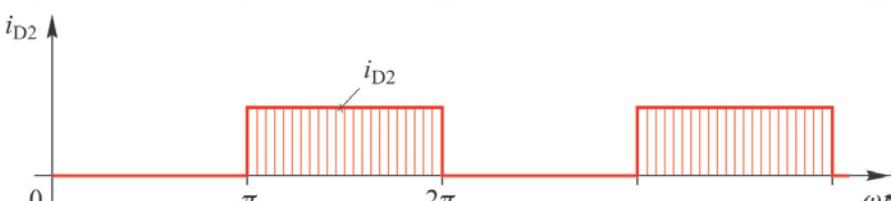
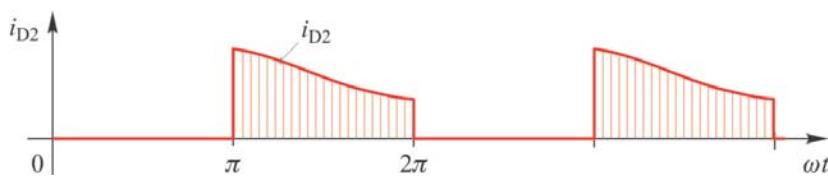
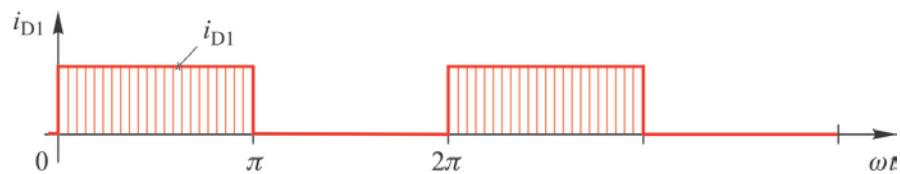
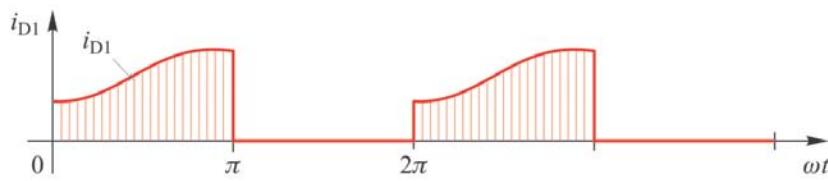
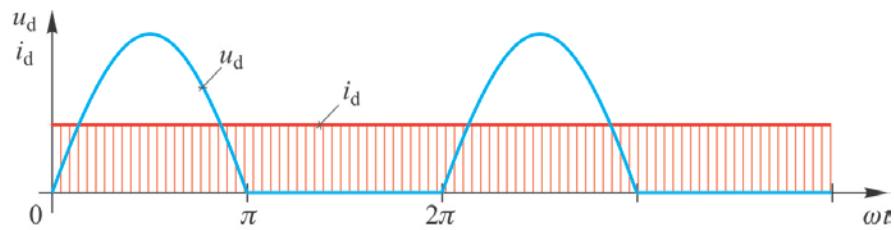
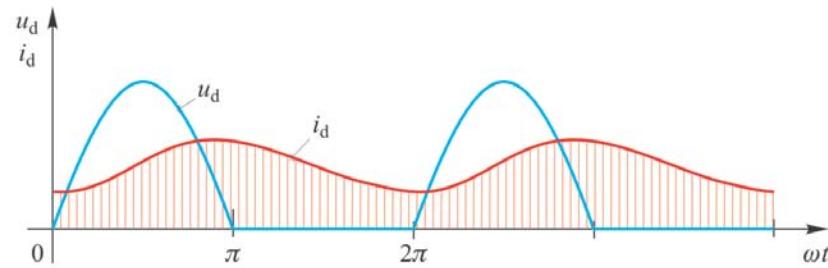
Potrebno je uočiti da obje diode ne mogu voditi istovremeno.



Nadomjesne sheme spoja za dva karakteristična intervala rada.

Izmjenični naponski izvor i spoj s porednom diodom

Nakon nekoliko perioda doseže se ustaljeno stanje, u kojem je struja trošila neisprekidana, za razliku od prethodnih spojeva.



Naponsko-strujni odnosi u ustaljenom stanju uz tipično induktivno trošilo.

Naponsko-strujni odnosi u ustaljenom stanju uz pretpostavku jako induktivnog trošila.

Primjer : Izmjenični izvor i dioda – poredna D

Za poluvalni ispravljač s porednom diodom i pretežno induktivnim trošilom, napon izvora je 220 V, 50 Hz, a $R_d = 10 \Omega$. Pretpostavimo se da je L_d za praktične primjene neizmjeran, pa je potrebno odrediti:

- snagu koju uzima trošilo i faktor snage koji „vidi“ izvor,
- te nacrtati valne oblike za srednju vrijednost struje svake diode
- i odrediti L_d ako struja od vrha do vrha nije veća od 10% vrijednosti srednje struje

Rješenje:

- napon na R_d , L_d trošilu za poluvalni ispravljač sinusnog napona ima srednju vrijednost :

$$U_{d \text{ avg}} = \frac{U_s}{\pi}$$

te je srednja vrijednost struje trošila:

$$i_d(\omega t) \approx I_{d \text{ avg}} = \frac{U_{d \text{ avg}}}{R_d} = \frac{U_s}{\pi R_d} = \frac{220\sqrt{2}}{10\pi} = 9,87 \text{ A} \approx I_{s \text{ avg}}$$

Primjer : Izmjenični izvor i dioda – poredna D

Srednja snaga na otporu je:

$$P_{d \text{ avg}} = I_{S \text{ avg}}^2 R_d = (9,87)^2 * 10 = 974,2 \text{ W}$$

Efektivna vrijednost struje izvora određuje se iz izraza:

$$I_{S \text{ rms}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi [I_{S \text{ avg}}]^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi [9,87]^2 d(\omega t)} = 6,98 \text{ A}$$

Faktor snage je:

$$\lambda = \frac{P_{d \text{ avg}}}{S} = \frac{P_{d \text{ avg}}}{U_{S \text{ rms}} * I_{S \text{ rms}}} = \frac{974,2}{220 * 6,98} = 0,634$$

Primjer : Izmjenični izvor i dioda – poredna D

b) svaka dioda vodi tijekom jednog poluvala izmjeničnog napona. Srednja vrijednost struje svake diode je:

$$I_{D \text{ avg}} = \frac{I_{d \text{ avg}}}{2} = \frac{9,87}{2} = 4,93 \text{ A}$$

c) induktivitet određen dopuštenom promjenom struje trošila 10% može se odrediti aproksimiranjem za osnovnu frekvenciju Fourierovog reda.

Ulagani napon trošila za $n=1$ ima amplitudu:

$$U_S = U_{S \text{ rms}} * \frac{\sqrt{2}}{2} = 155,1 \text{ V}$$

Valovitost struje od vrha do vrha ograničena je na:

$$\Delta i_d = 0,1 I_{d \text{ avg}} = 0,1 * 9,87 = 0,987 \text{ A}$$

i odgovara joj amplituda: $\frac{0,987}{2} = 0,493 \text{ A}$

Primjer : Izmjenični izvor i dioda – poredna D

Impedancija trošila za osnovnu frekvenciju za to je:

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{155,1}{0,49} = 316,5 \Omega$$

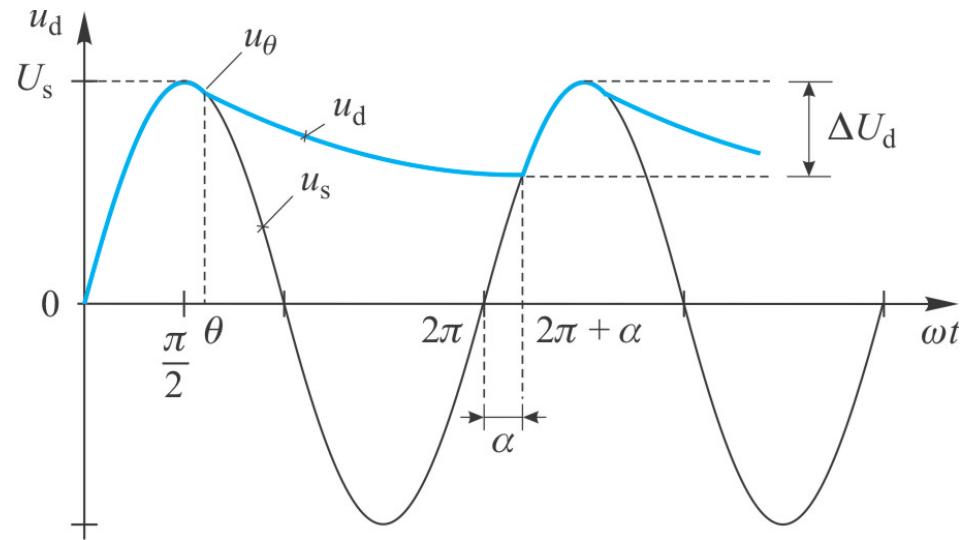
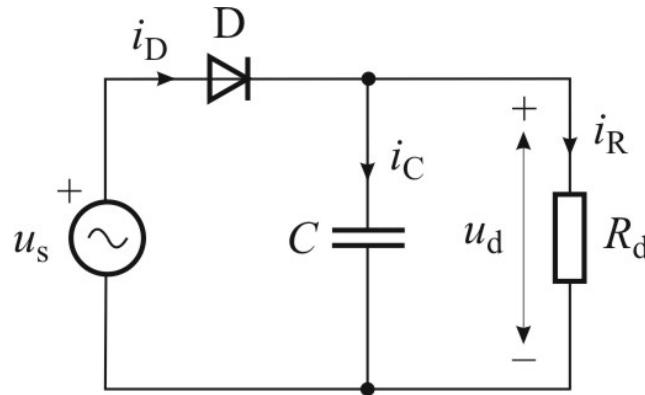
odnosno: $Z_1 = |R_d + j\omega L_d| = |10 + j314L_d| = 316,5 \Omega$

Budući da se otpor od 10Ω prema cijeloj impedanciji može zanemariti, približna vrijednost induktiviteta je:

$$L_d \approx \frac{Z_1}{\omega} = 1,008 H$$

U stvarnosti će induktivitet biti neznatno manji od $1,008 H$ jer se Fourierovi članovi viši od $n=1$ u ovoj procjeni mogu zanemariti.

Izmjenični naponski izvor i dioda – kapacitivno trošilo (C)



Valni oblik napona na kapacitivnom trošilu.

To je najčešće rješenje za dobivanje glatkog ispravljenog napona.

Rješavanje naponsko-strujnih odnosa nije trivijalno (knjiga od *Harta*), no korisno je znati konačna rješenja.

Izmjenični naponski izvor i dioda – kapacitivno trošilo (C)

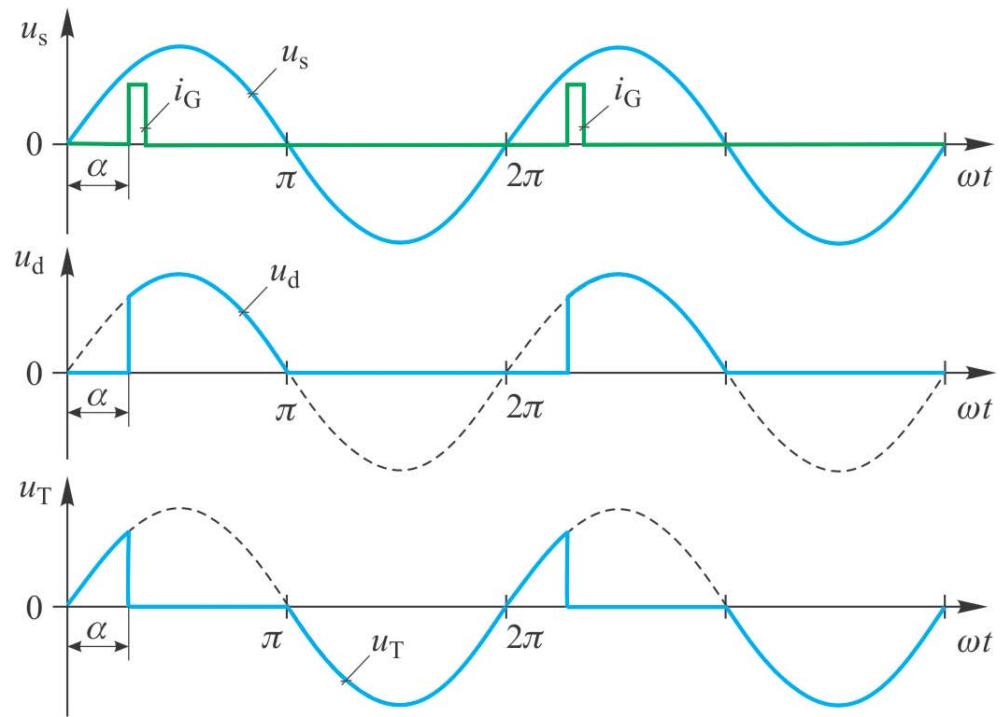
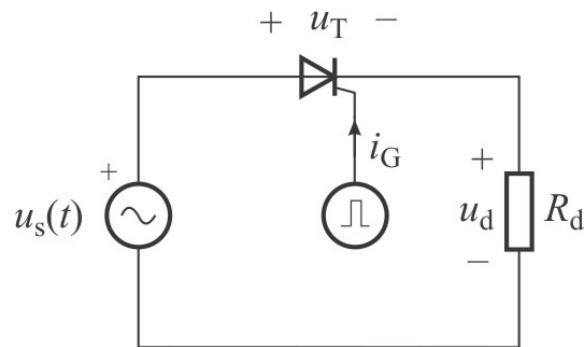
Vršna vrijednost struje diode:

$$\begin{aligned} I_{D,\max} &= \omega \cdot C \cdot U_s \cos(\alpha) + \frac{U_s \sin(\alpha)}{R_d} = \\ &= U_s \left[\omega \cdot C \cdot \cos(\alpha) + \frac{\sin(\alpha)}{R_d} \right] \end{aligned}$$

Približni izraz za valovitost izlaznog napona:

$$\Delta U_d \approx U_s \frac{2\pi}{\omega \cdot R_d \cdot C} = \frac{U_s}{f \cdot R_d \cdot C}$$

Izmjenični naponski izvor i tiristor – djelatno trošilo (R)



Naponsko-strujni odnosi
na tiristoru i djelatnom trošilu.

Izmjenični naponski izvor i tiristor – djelatno trošilo (R)

Srednja vrijednost napona na trošilu (upravljačka karakteristika):

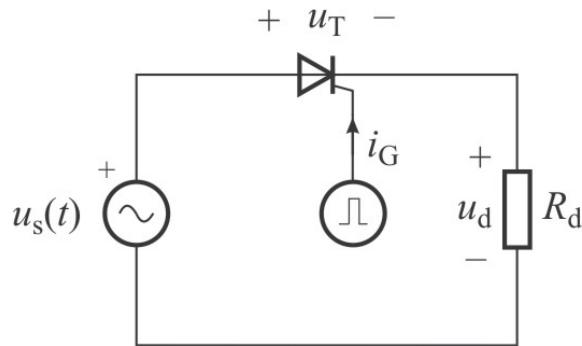
$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_s \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{U_s}{2\pi} [1 + \cos(\alpha)]$$

Efektivna vrijednost napona na trošilu:

$$\begin{aligned} U_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} [U_s \sin(\omega t)]^2 d(\omega t)} = \\ &= \frac{U_s}{2} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}} \end{aligned}$$

Primjer: Poluvalni upravljivi ispravljač s djelatnim trošilom

Projektirati sklop koji na djelatnom trošilu od 100Ω daje srednju vrijednost napona 40 V . Na ulazu je izmjenični izvor efektivne vrijednosti 120 V i frekvencije 60 Hz . Izračunati snagu disipiranu na otporniku kao i faktor snage izmjeničnog izvora.



$$U_d = \frac{U_s}{2\pi} [1 + \cos(\alpha)]$$

Najjednostavnije i najekonomičnije rješenje je upotreba jednofaznog poluvalnog upravljivog ispravljača s prethodno opisanom upravljačkom karakteristikom.

Korištenjem gornje jednadžbe i uvrštavanjem poznatih podataka dobiva se potrebni kut upravljanja α .

Primjer: Poluvalni upravljeni ispravljač s djelatnim trošilom

$$\alpha = \cos^{-1} \left[U_d \left(\frac{2\pi}{U_s} - 1 \right) \right] = \cos^{-1} \left[40 \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2} \cdot 120} \right) - 1 \right] = 61,2^\circ = 1,07 \text{ rad}$$

Za izračunavanje snage trošila potrebna je efektivna vrijednost napona na trošilu:

$$U_{d,rms} = \frac{\sqrt{2} \cdot 120}{2} \sqrt{1 - \frac{1,07}{\pi} + \frac{\sin(2 \cdot 1,07)}{2\pi}} = 75,6V$$

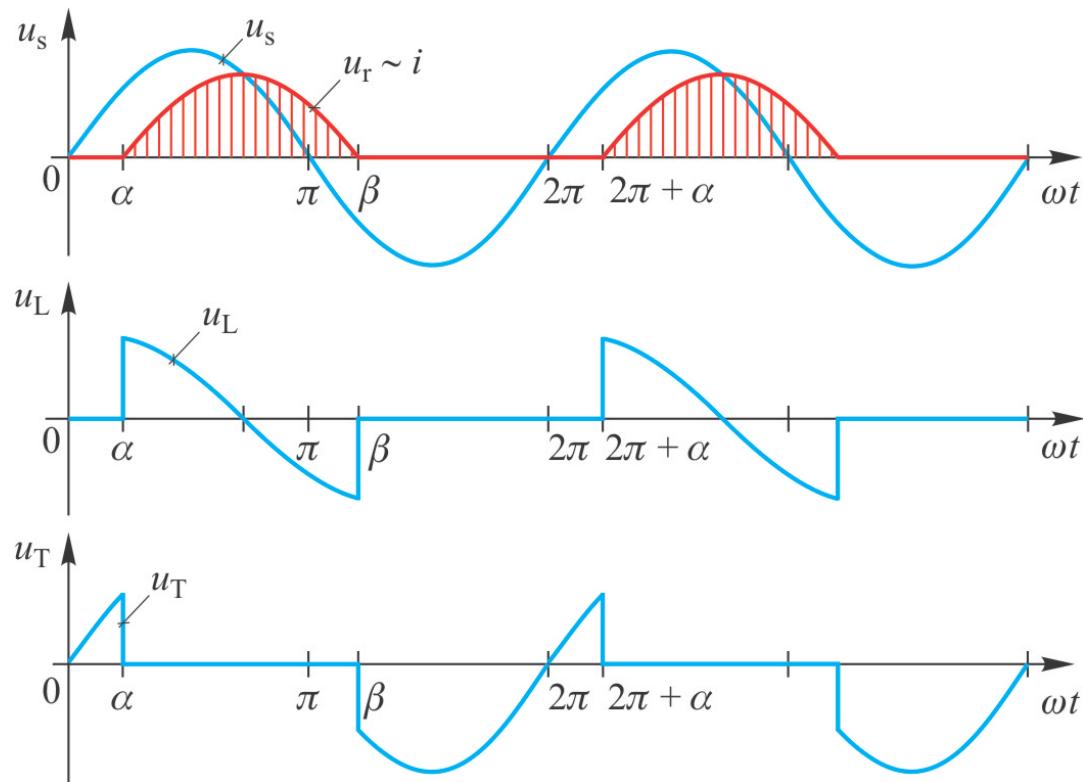
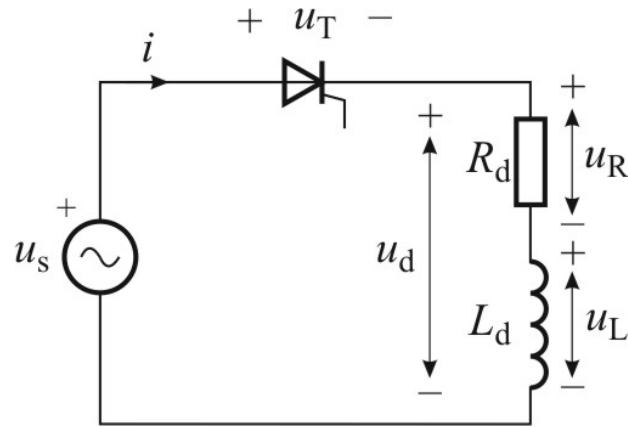
Sada se može izračunati snaga trošila.

$$P = P_R = \frac{U_{d,rms}^2}{R} = \frac{75,6^2}{100} = 57,1W$$

Te konačno slijedi izračunavanje faktora snage kao omjera djelatne i prividne snage.

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{U_{s,rms} \cdot I_{s,rms}} = \frac{57,1}{120 \cdot \frac{75,6}{100}} = 0,63$$

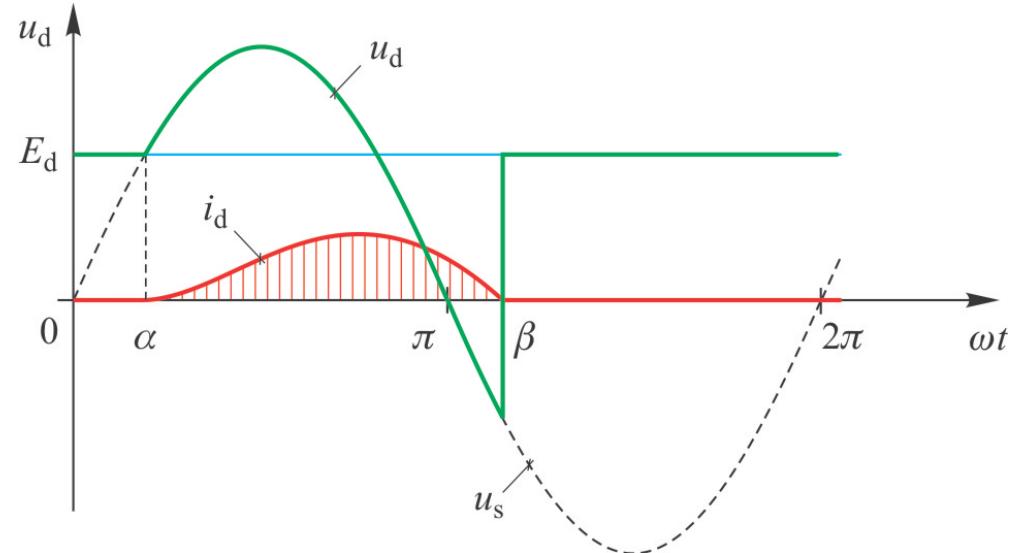
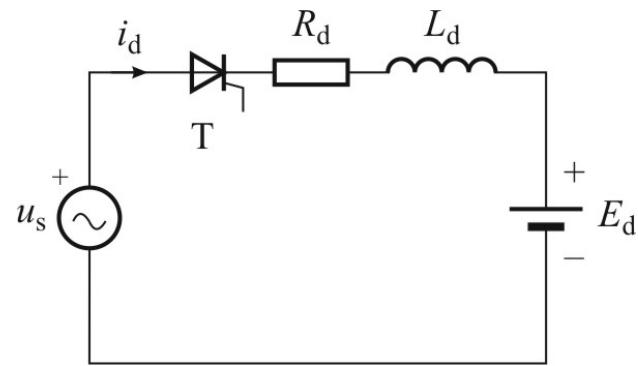
Izmjenični naponski izvor (AC) i tiristor – induktivno trošilo (RL)



Rješavanje naponsko-strujnih odnosa nije trivijalno. Može se pronaći u literaturi i u zadacima za vježbu. Trajanje vođenja tiristora ovisi o vremenskoj konstanti trošila.

Naponsko-strujni odnosi na tiristoru i induktivnom trošilu.

Izmjenični naponski izvor i tiristor – RLE trošilo



Rješenje naponsko-strujnih odnosa je slično kao kod spoja s diodom, no vođenje tiristora počinje ukoliko i kada postoji okidni impuls na geitu tiristora.

Naponsko-strujni odnosi na RLE trošilu.

Izmjenični naponski izvor i tiristor – RLE trošilo

$$\alpha_{\min} = \sin^{-1} \left(\frac{E_d}{U_s} \right)$$

$$i(\omega t) = \frac{U_s}{2} \sin(\omega t - \theta) - \frac{E_d}{R_d} + A e^{-\frac{\omega t}{\omega \tau}} \quad \text{za } \alpha \leq \omega t \leq \beta$$

$$i(\omega t) = 0 \quad \text{za ostale kutove}$$

$$A = \left[-\frac{U_s}{2} \sin(\omega t - \alpha) - \frac{E_d}{R_d} \right] e^{\frac{\alpha}{\omega \tau}}$$

ISPRAVLJAČI - IDEALNI JEDNOFAZNI MOST

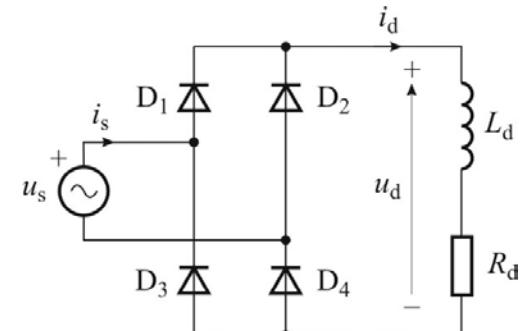
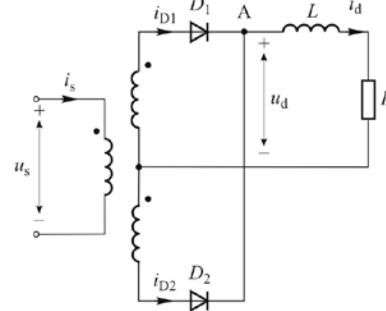
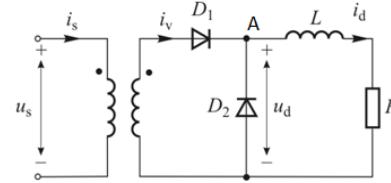
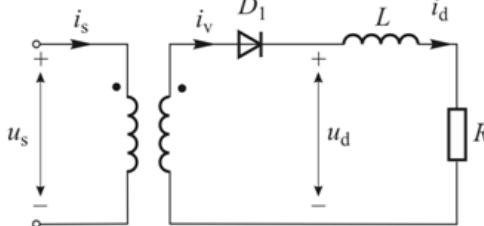
Do sada opisivani spojevi bili su jednostavnii spravljači (poluvalni spojevi) bez veće praktične primjene.

- jednofazni mosni spoj ispravljača (sklopke diode)
- trošila su R, RL i RLE

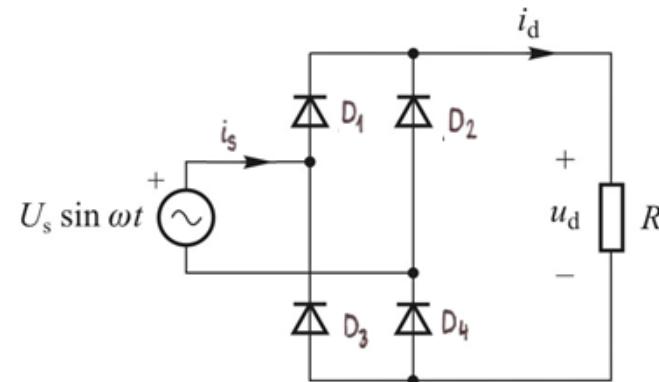
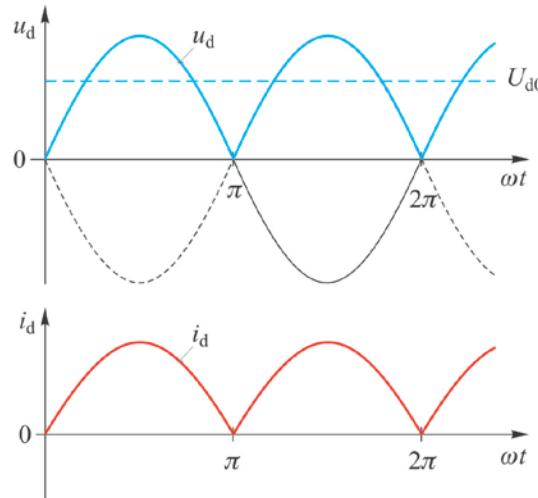


Od poluvalnog do mosnog spoja

- Poluvalni spojevi ispravljača zbog slabijih svojstava nemaju veću primjenu, poglavito pri srednjim i većim snagama.
- Prikazanim razvojem topologije, preko spoja sa srednjom točkom (ili spoja s porednom diodom) dolazi se do standardnog spoja učinske elektronike, jednofaznog mosnog spoja.
- Prednosti: bolji faktor snage, nema istosmjerne komponente struje mreže, manja valovitost istosmjernog napona.

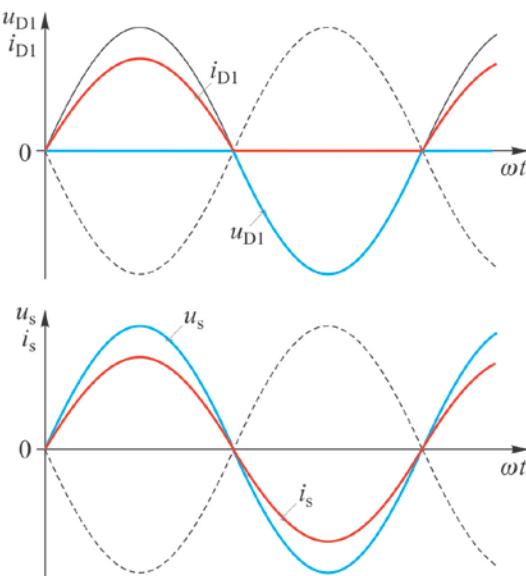


Jednofazni mosni spoj ISPRAVLJAČA, trošilo je R



Uočimo temeljna svojstva:

- Spoj je simetričan, ventili vode u dijagonalnim parovima ($T_{1,4} - T_{2,3}$).
- Diode predstavljaju komutator, pretvaraju izmjenični sustav u istosmjerni.
- Vršna vrijednost zapornog napona na ventilima jednaka je vršnoj vrijednosti napona izvora.
- Efektivna vrijednost struje izvora jednaka je efektivnoj vrijednosti struje trošila.
- Osnovna frekvencija u izlaznom naponu je dvostruka frekvencija izvora, postoje parni harmonici i istosmjerna komponenta.



Jednofazni mosni spoj ISPRAVLJAČA, trošilo je R

$$u_d(\omega t) = U_S \sin(\omega t) \quad \text{za } 0 \leq \omega t \leq \pi$$

$$u_d(\omega t) = -U_S \sin(\omega t) \quad \text{za } \pi \leq \omega t \leq 2\pi$$

Srednja vrijednost napona na trošilu

$$U_{d \text{ avg}} = U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_S \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2U_S}{\pi}$$

Srednja vrijednost struje trošila

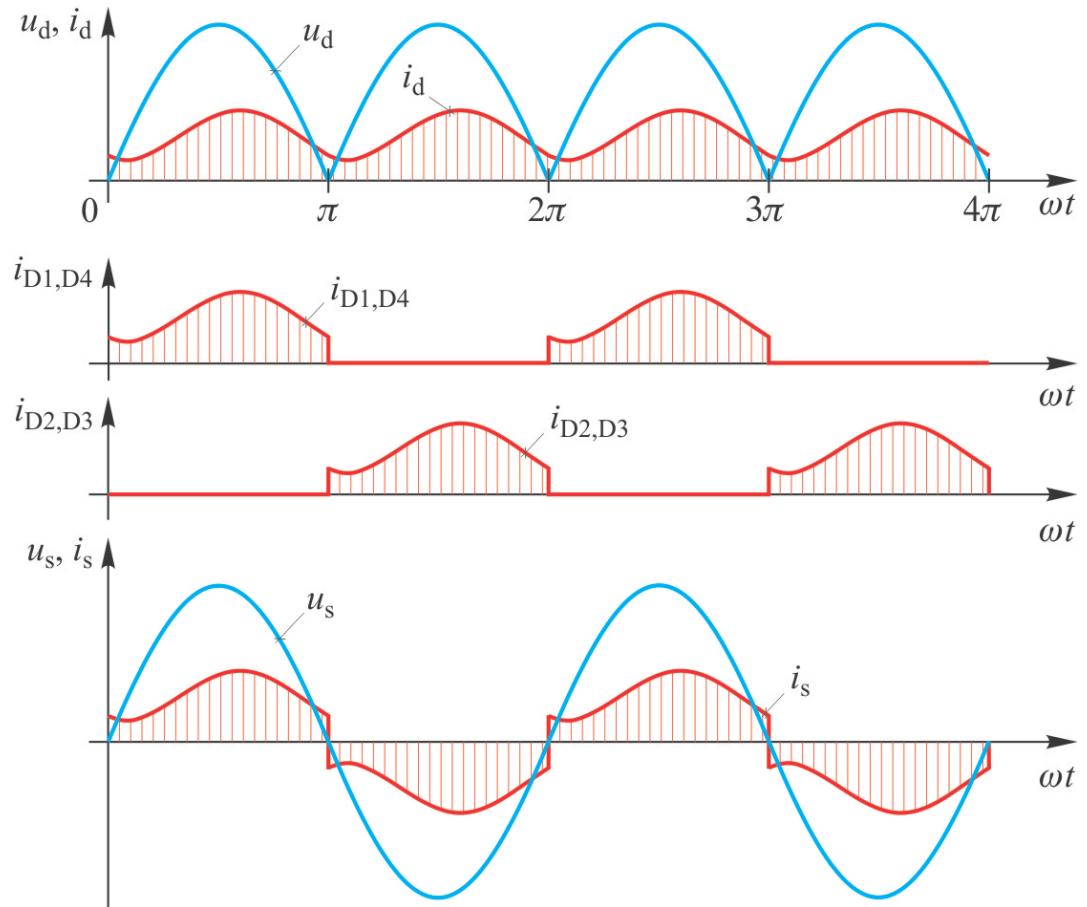
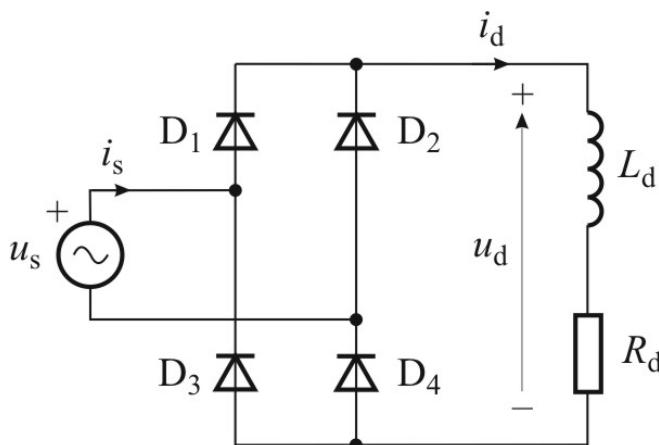
$$I_{d \text{ avg}} = I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{2U_S}{\pi R_d}$$

Efektivna vrijednost struje trošila jednaka je efektivnoj vrijednosti struje izmjeničnog izvora.

$$I_{S \text{ rms}} = \frac{I_S}{\sqrt{2}}$$

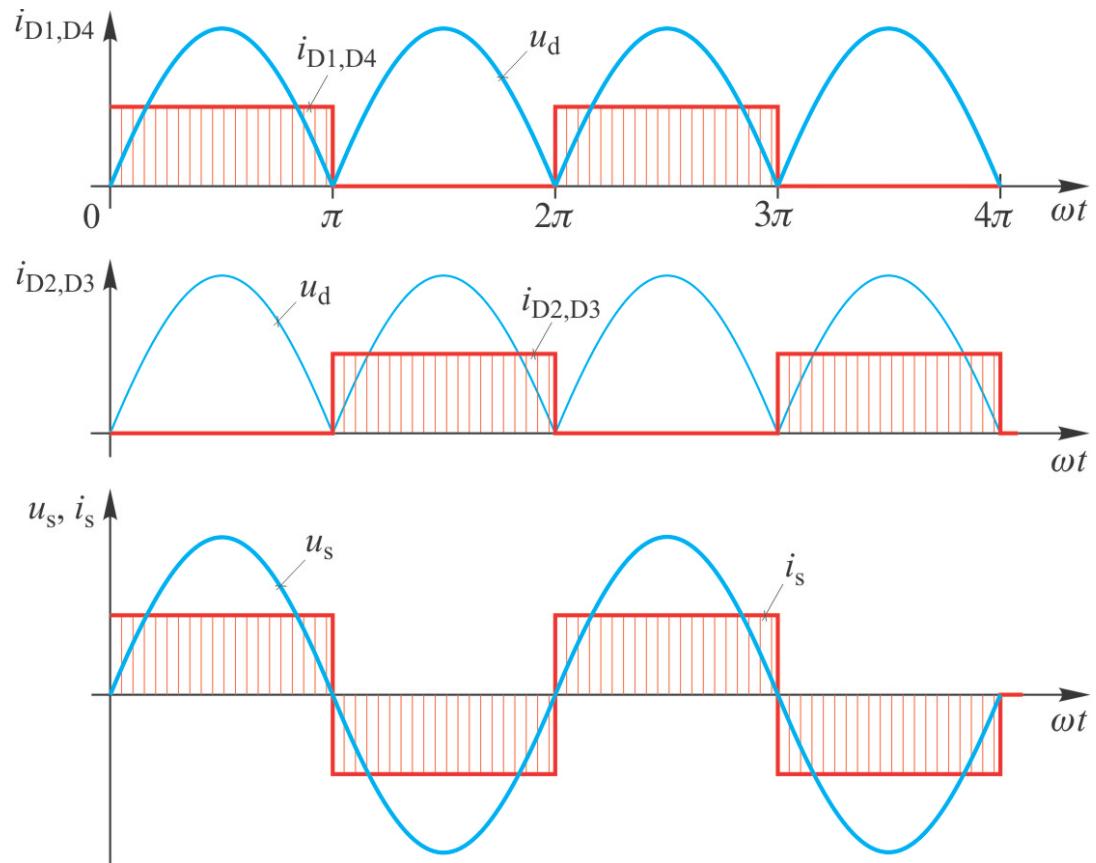
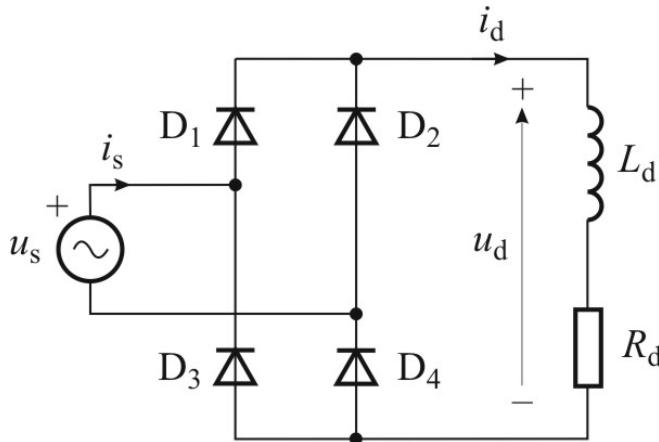
Pokušajte analizirati faktor snage ovog spoja!

Jednofazni mosni spoj ISPRAVLJAČA, trošilo je RL



Stvarni valni oblici varijabli spoja

Jednofazni mosni spoj ISPRAVLJAČA, trošilo je RL



Idealizirani valni oblici varijabli spoja za veliki L

Jednofazni mosni spoj ISPRAVLJAČA, trošilo je RL

$$u_d(\omega t) = U_{d \text{ avg}} + \sum_{n=2,4,\dots}^{\infty} U_n \cos(n\omega t + \pi)$$

$$U_{d \text{ avg}} = \frac{2U_s}{\pi}$$

$$U_n = \left(\frac{2U_s}{\pi} \right) \left[\frac{1}{n-1} - \frac{1}{n+1} \right]$$

Srednja vrijednost struje trošila je istosmjerna komponenta

$$I_{d \text{ avg}} = \frac{U_{d \text{ avg}}}{R_d}$$

Viši harmonici struje trošila

$$I_n = \frac{U_n}{Z_n} = \frac{U_n}{|R_d + jn\omega L_d|}$$

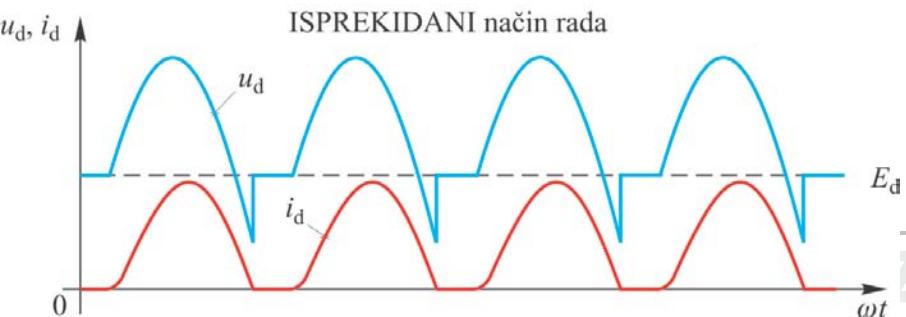
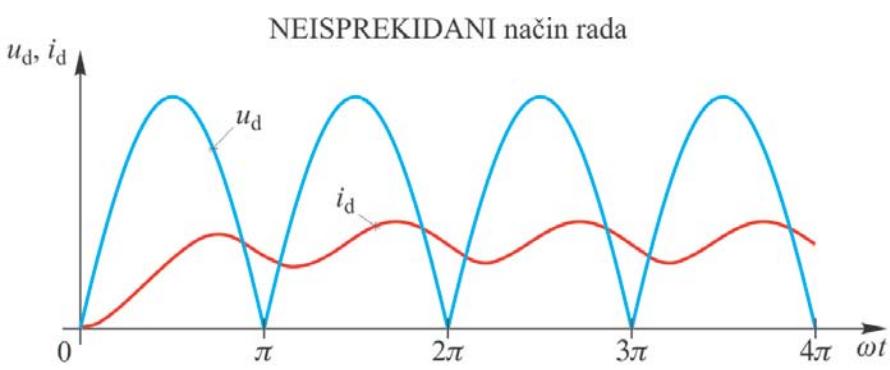
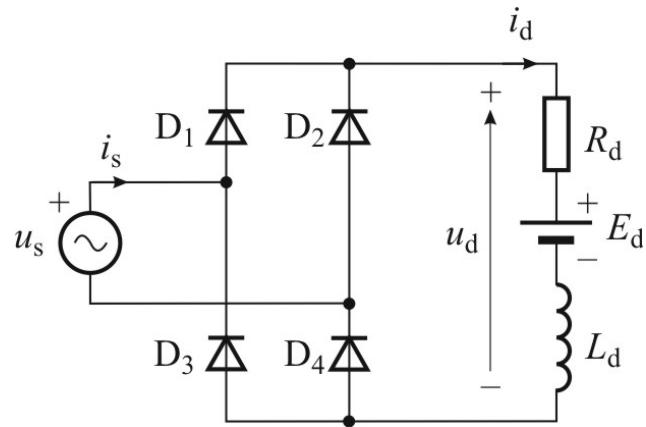
Porastom reda harmonika, amplituda naponskih harmonika opada, dok impedancija trošila Z raste.

Stoga amplituda strujnih harmonika naglo opada s porastom reda harmonika.

Može se primjeniti načelo superpozicije.

U slučaju velike vremenske konstante trošila, svi viši harmonici struje mogu se zanemariti, struja trošila ima samo istosmjernu komponentu.

Jednofazni mosni spoj ISPRAVLJAČA, trošilo je RLE



Ovaj se tip trošila često javlja u praksi, istosmjerni motor, punjač baterija.

Struja trošila može biti neisprekidana (kontinuirana) i isprekidana (diskontinuirana).

To su 2 različita načina rada.

Za isprekidani način rada točan proračun je složen.

Za neisprekidani način rada za srednju vrijednost struje trošila vrijedi:

$$I_{d \text{ avg}} = I_d = \frac{U_{d \text{ avg}} - E_d}{R_d} = \frac{\frac{2U_s}{\pi} - E_d}{R_d}$$

FAZNO UPRAVLJIVI ISPRAVLJAČI - IDEALNI JEDNOFAZNI MOST

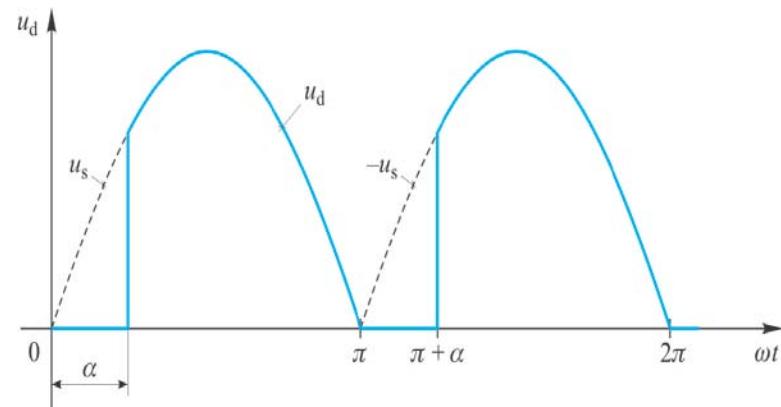
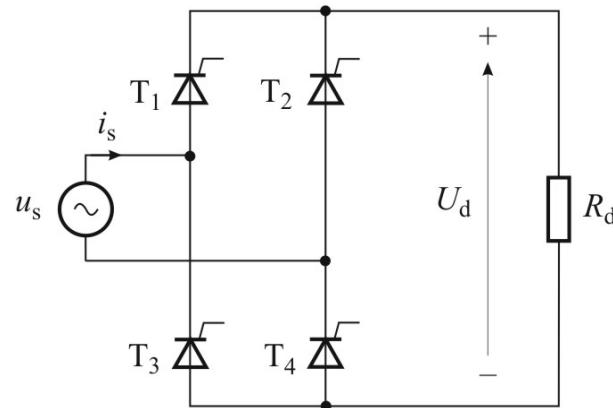
Ukoliko umjesto neupravljive diode koristimo upravljeni tiristor, dobivamo fazno upravlje ispravljače s mogućnošću promjene srednje vrijednosti napona na trošilu pomoću kuta upravljanja α .

- jednofazni mosni spoj ispravljača (sklopke tiristori)
- trošila su R, RL i RLE

Jednofazni mosni spoj fazno upravlјivog ispravljачa, trošilo je R

Diode zamjenjujemo tiristorima i uvodimo načelo faznog upravljanja.

Za djelatno (R) trošilo analiza je trivijalna, izrazi za srednju vrijednost napona i struje trošila sliče onima kod poluvalnog ispravljачa.



$$\begin{aligned} U_{d \text{ avg}} &= U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_s \sin(\omega t) d(\omega t) = \\ &= \frac{U_s}{\pi} (1 + \cos(\alpha)) = \frac{U_{d0}}{2} (1 + \cos(\alpha)) \end{aligned}$$

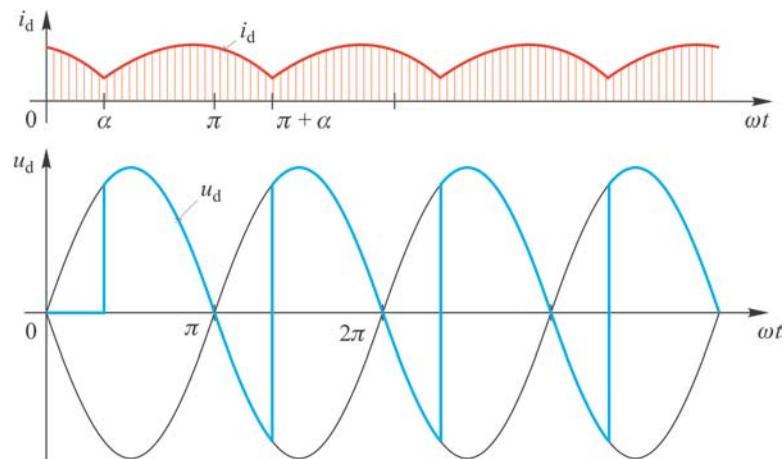
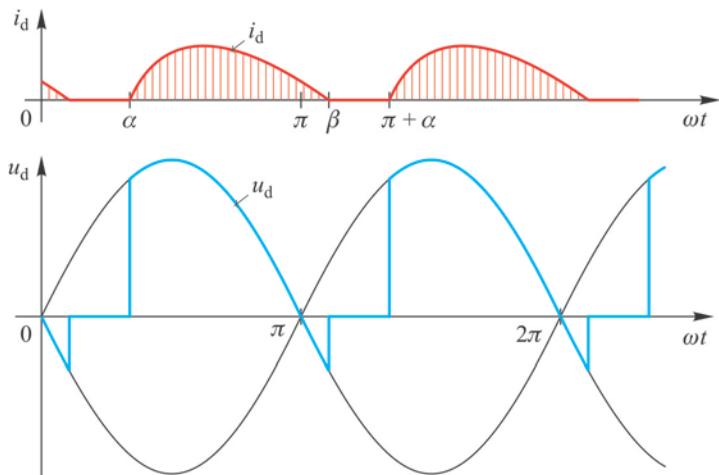
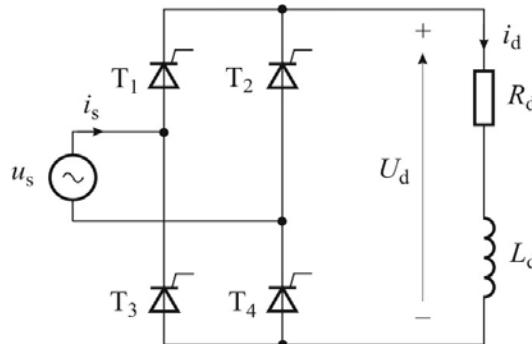
$$I_{d \text{ avg}} = I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{U_s}{\pi R_d} (1 + \cos(\alpha))$$

Srednja vrijednost napona trošila

Srednja vrijednost struje trošila

Jednofazni mosni spoj fazno upravlјivog ispravljача, trošilo je RL

Postoje 2 načina rada, uz isprekidanu i neisprekidanu struju trošila.
Način rada određuje upravljačku karakteristiku, kao i pojačanje
sklopa.



Jednofazni mosni spoj fazno upravlјivog ispravljača, trošilo je RL

Granica isprekidanog načina rada
ovisi o vremenskoj konstanti trošila

$$\alpha \leq \tan^{-1} \left(\frac{\omega L_d}{R_d} \right)$$

Napon trošila pri neisprekidanom
radu možemo rastaviti na srednju
vrijednost i više harmonike.

$$u_d(\omega t) = U_{d \ avg} + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(n\omega t + \theta)$$

Srednja vrijednost napona trošila
pri neisprekidanom radu

$$U_{d \ avg} = U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} U_S \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2U_S}{\pi} \cos(\alpha)$$

Srednja vrijednost struje trošila pri
neisprekidanom radu

$$I_{d \ avg} = \frac{U_{d \ avg}}{R_d}$$

Jednofazni mosni spoj fazno upravlјivog ispravljачa, trošilo je RL

$$U_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

Izračunavanje viših harmonika
napona i struje trošila

$$a_n = \left(\frac{2U_s}{\pi} \right) \left[\frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\alpha}{n-1} \right]$$

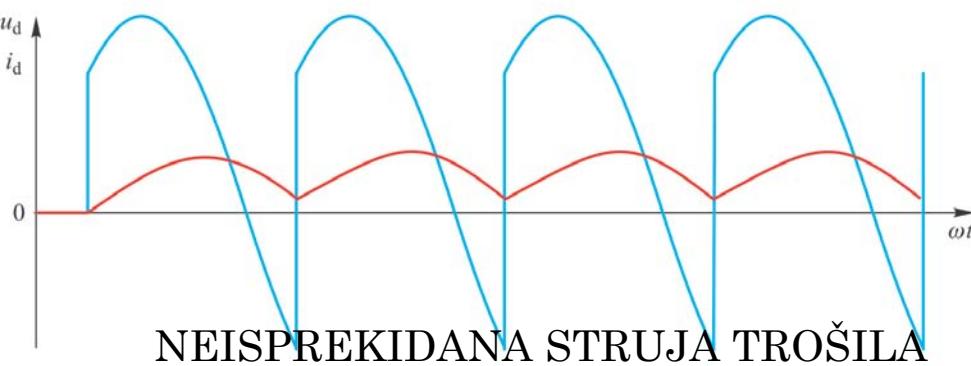
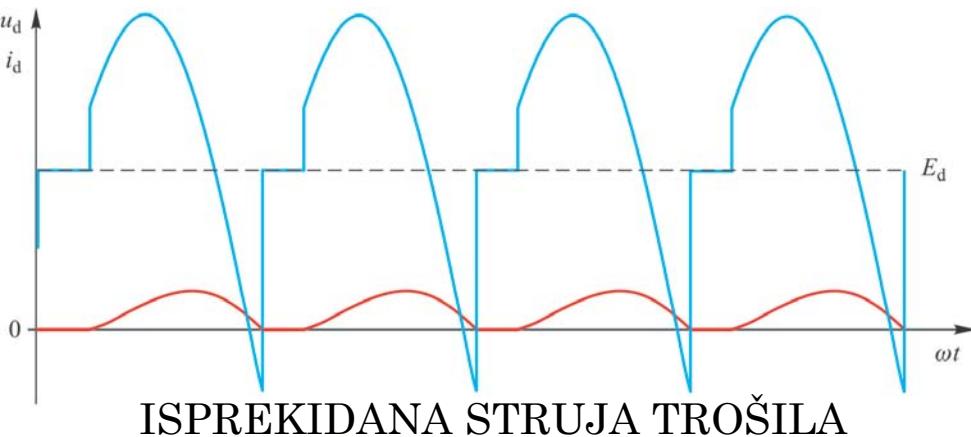
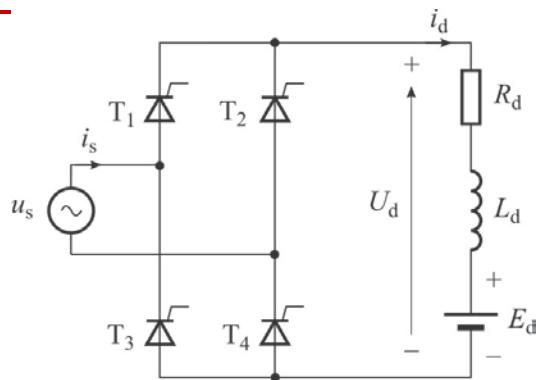
$$b_n = \left(\frac{2U_s}{\pi} \right) \left[\frac{n(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} \right]$$

$$I_{rms} = \sqrt{I_d^2 + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}} \right)^2}$$

$$I_{d\ avg} = \frac{U_{d\ avg}}{R_d}$$

$$I_n = \frac{U_n}{Z_n} = \frac{U_n}{|R_d + jn\omega_0 L_d|}$$

Jednofazni mosni spoj fazno upravlјivog ispravljачa, trošilo je RLE



Ponovo razlikujemo isprekidani i neisprekidani način rada.

U isprekidanom načinu rada u valnom obliku izlaznog napona vidi se protuEMS.

U neisprekidanom načinu rada u valnom obliku izlaznog napona **ne vidi se protuEMS**.

U oba načina rada iznos EMS utječe na srednju vrijednost struje trošila.

$$U_{d \text{ avg}} = U_d = \frac{2U_s}{\pi} \cos(\alpha)$$

$$I_{d \text{ avg}} = I_d = \frac{U_d - E_d}{R_d}$$

Jednofazni mosni spoj fazno upravlјivog ispravljачa, PRIMJER

Upravlјivi punovalni ispravljач sa pretežito induktivnim trošilom i protunaponom spojen je na izmjeničnu mrežu 240 V, 50 Hz, a na njegovom izlazu djeluje protunapon $E_d = 100$ V. Otpor trošila je 10Ω , a induktivitet trošila je dovoljno velik da je struja ispravljачa kontinuirana. Treba odrediti:

- a) kut upravljanja α da bi istosmjerni izvor uzimao snagu od 1000 W i
- b) vrijednost induktiviteta prigušnice koja može ograničiti valovitost struje od vrha do vrha kroz trošilo na 2 A.

Rješenje:

- a) Za snagu od 1000 W istosmjernog izvora napona od 100 V, struja mora biti ograničena na 10 A. Potreban izlazni napon može se odrediti iz jednadžbe:

$$U_{d \text{ avg}} = E_d + I_{d \text{ avg}} R_d = 100 + 10 * 10 = 200 \text{ V}$$

Jednofazni mosni spoj fazno upravlјivog ispravljača, PRIMJER

Kut upravljanja za koji će izlazni napon ispravljača biti 200 V, određuje se prema jednadžbi:

$$U_{d\ avg} = U_d = \frac{2U_s}{\pi} \cos(\alpha)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\pi U_{d\ avg}}{2 U_s} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{\pi * 200}{2 * 240 * \sqrt{2}} \right) = 46^\circ$$

b) Valovitost struje trošila proizvode izmjenični članovi Fourierovog reda. Amplitude struje trošila bilo kojeg izmjeničnog člana su:

$$I_n = \frac{U_n}{Z_n}$$

gdje je U_n opisan jednadžbama:

$$U_n = \left(\frac{2U_s}{\pi} \right) \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$a_n = \left[\frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\alpha}{n-1} \right]$$

$$b_n = \left[\frac{n(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} \right]$$

Jednofazni mosni spoj fazno upravlјivog ispravljača, PRIMJER

Impedancija za izmjenične članove je: $Z_n = |R_d + jn\omega_0 L_d|$

Budući da se smanjenje amplitude naponskih članova i povećanje vrijednosti impedancije zajedno pridonose smanjenju izmjenične struje s povećanjem n , promjene struje od vrha do vrha mogu se procijeniti na temelju prvoga izmjeničnog člana.

Za $n=2$:

$$\frac{U_n}{U_S} = \frac{2}{\pi} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = 0,68$$

Zato je:

$$U_2 = 0,68 * U_S = 0,68 * 240 * \sqrt{2} = 211 V$$

Jednofazni mosni spoj fazno upravlјivog ispravljača, PRIMJER

Promjena struje od vrha do vrha od 2 A odgovara maksimalnoj vrijednosti od 1 A, tako da je impedancija trošila za $n=2$:

$$Z_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{211}{1} = 211 \Omega$$

Otpor otpornika od 10Ω neznačajan je prema impedanciji od 211Ω , te je ukupna impedancija:

$$Z_n \approx n\omega_0 L_d$$

odnosno induktivitet:

$$L_d \approx \frac{Z_2}{2\omega_0} = \frac{Z_2}{2 * 2 * \pi * f_0} = \frac{211}{2 * 2 * \pi * 50} = 0,34 H$$

Za potiskivanje utjecaja viših harmonika treba upotrijebiti nešto veći induktivitet.

Jednofazni mosni spoj fazno upravlјivog ispravljača, UPRAVLJAČKA KARAKTERISTIKA

Upravljačka karakteristika je ovisnost srednje vrijednosti izlaznog napona o upravljačkoj veličini, kutu upravljanja.

Kod fazno upravlјivih ispravljača postoje 2 temeljna tipa upravljačkih karakteristika, ovisno o tvorbi napona na trošilu.

Kada trenutačna vrijednost napona na trošilu ne može poprimiti negativne vrijednosti (primjerice kod djelatnog trošila, sklopova s porednom diodom, poluupravlјivih spojeva) upravljačka karakteristika je oblika

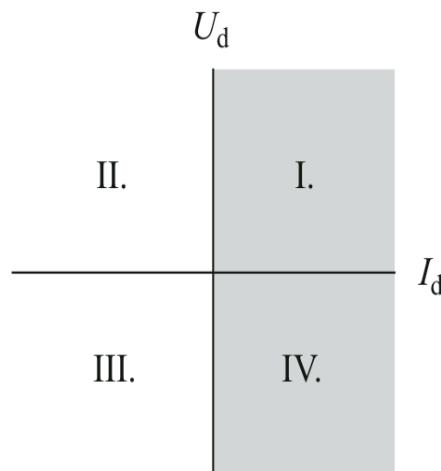
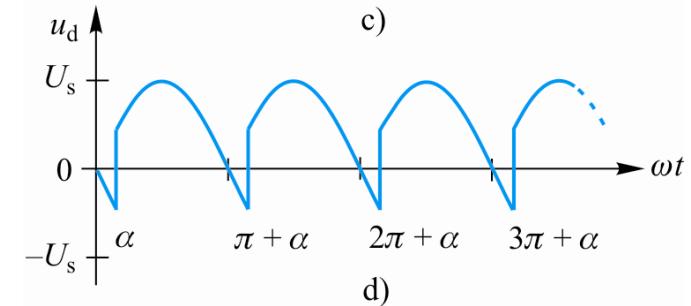
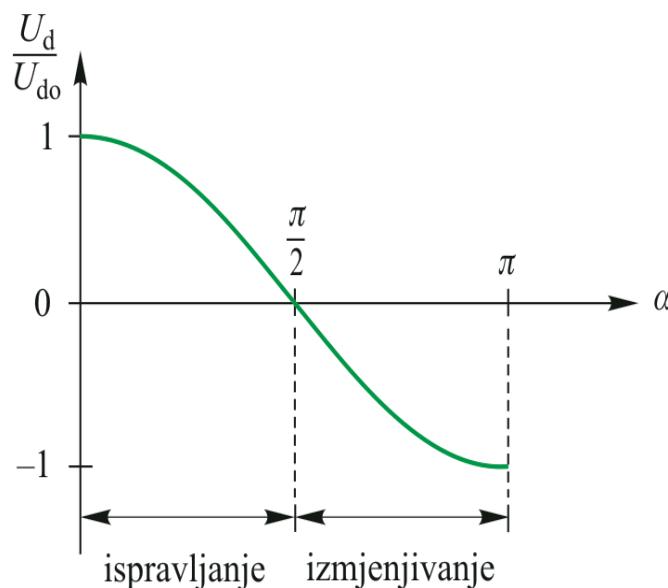
$$U_{d\alpha} = U_{d0} \cdot \frac{1}{2}(1 + \cos \alpha)$$

Ukoliko trenutačna vrijednost napona može poprimiti i negativne vrijednosti (kod punoupravlјivih spojeva s jako induktivnim trošilom) upravljačka karakteristika je oblika

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \cdot \cos \alpha$$

Jednofazni mosni spoj fazno upravlјivog ispravljача, UPRAVLJAČKA KARAKTERISTIKA - A

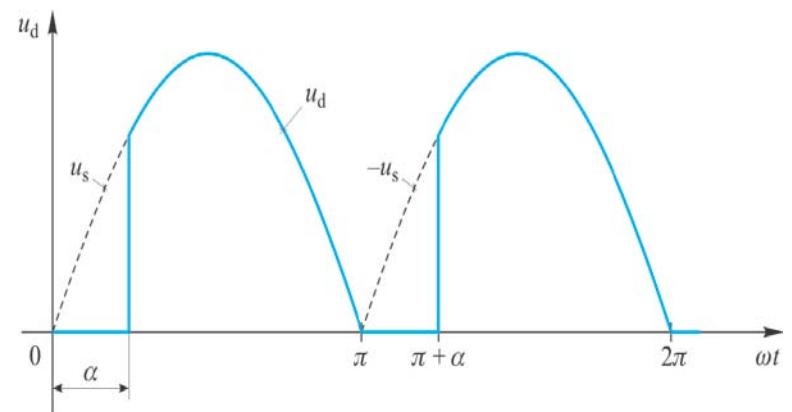
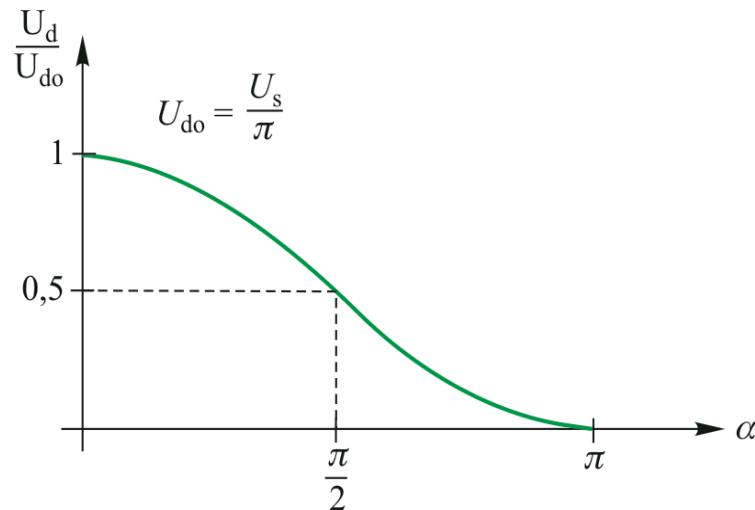
$$\begin{aligned} U_{d \text{ avg}} &= U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} U_S \sin(\omega t) d(\omega t) = \\ &= \frac{2U_S}{\pi} \cos(\alpha) = U_{d0} \cos(\alpha) \end{aligned}$$



Upravljačka karakteristika uz
induktivno trošilo i neisprekidanu
struju trošila.

Jednofazni mosni spoj fazno upravljivog ispravljača, UPRAVLJAČKA KARAKTERISTIKA - B

$$U_{d\ avg} = U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_s \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{U_s}{\pi} (1 + \cos(\alpha)) = \frac{U_{d0}}{2} (1 + \cos(\alpha))$$



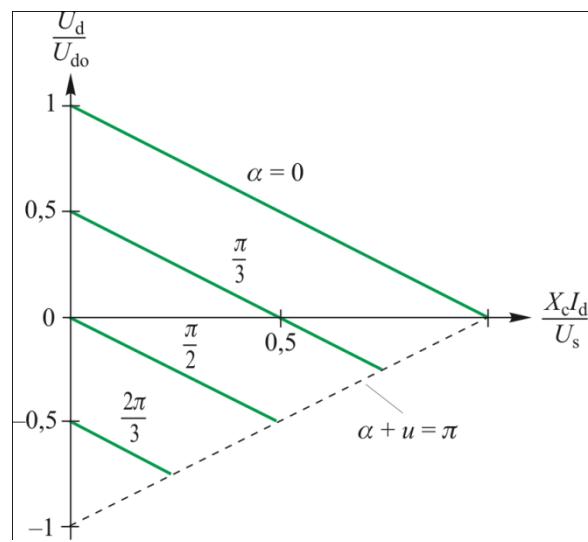
Upravljačka karakteristika uz djelatno trošilo i
isprekidanu struju trošila.

Jednofazni mosni spoj fazno upravlјivog ispravljača, IZLAZNA KARAKTERISTIKA

Izlazna karakteristika je ovisnost srednje vrijednosti izlaznog napona o struji trošila.

Razmislite kako izgleda izlazna karakteristika za do sada promatrane pretvarače ?

Kako izgleda stvarna izlazna karakteristika ?



Fazno upravljivi ispravljači, USMJERIVAČI

USMJERIVAČ, elektronički učinski tiristorski pretvarač koji se s izmjenične strane spaja na izmjeničnu energetsku mrežu (izmjenični električni energetski sustav), a s istosmjerne strane daje ili uzima istosmjernu struju (istosmjerni električni energetski sustav). Komutiran je izmjeničnom energetskom mrežom; zato je impulsni uređaj koji daje impulse za okidanje tiristora nužno sinkroniziran na napon izmjenične mreže). *Jednosmjerni usmjerivač* može dati ili pozitivnu ili negativnu srednju vrijednost napona kod jednog smjera struje; ako je srednja vrijednost napona pozitivna izmjenična energetska mreža daje energiju (*ispravljački način rada*), a ako je negativna ju prima (*izmenjivački način rada*). *Dvosmjerni usmjerivač* (sastoji se od dva antiparalelno spojena jednosmjerna usmjerivačka sklopa) može dati ili pozitivnu ili negativnu srednju vrijednost napona kod oba smjera struje (naziva se i *reverzibilni usmjerivač*, jer se upotrebljava za reverziranje smjera vrtnje istosmjernih motora). Usmjerivači se upotrebljavaju npr. u istosmjernim veleprijenosima, u sustavima uzbude sinkronih generatora i istosmjernim elektromotornim pogonima. Riječ *usmjerivač* uveo je prof. Zlatko Plenković, oko 1945. godine, na tadašnjem zagrebačkom Tehničkom fakultetu, kao prijevod njemačke riječi *Stromrichter*, uvedene u njemački jezik 1932. godine. U zadnje vrijeme pojam usmjerivač obuhvaća i autonomne pretvarače koji mogu procesirati električnu energiju u oba smjera, a spajaju izmjenični s istosmjernim energetskim sustavom (npr. PWM usmjerivač).

Fazno upravljeni ispravljači, USMJERIVAČI

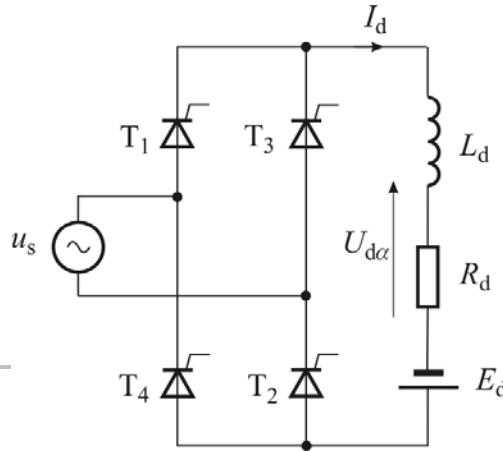
Kod usmjerivača je moguća promjena smjera toka energije !

Načelo izmjenjivačkog načina rada

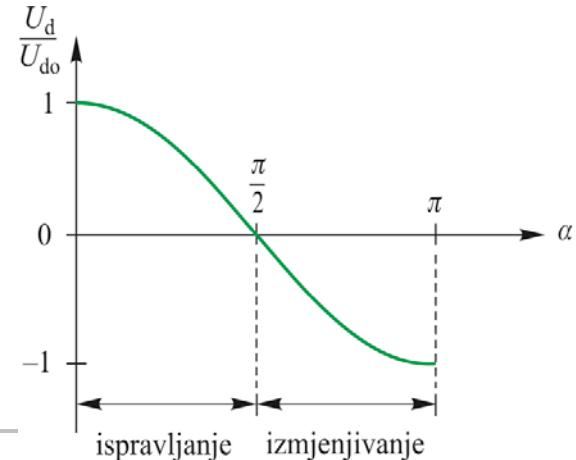
Srednja vrijednost izlaznog napona fazno upravljenog ispravljača u jednofaznom mosnom spoju iznosi:

Da li može biti $\alpha > 90^\circ$ el. ? $U_{d\ avg} = U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} U_S \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2U_S}{\pi} \cos(\alpha)$

Trajno zadržati nepromijenjen smjer struje, a promijeniti polaritet izlaznog napona moguće je samo dodavanjem naponskog izvora u istosmjerni krug (krug trošila).

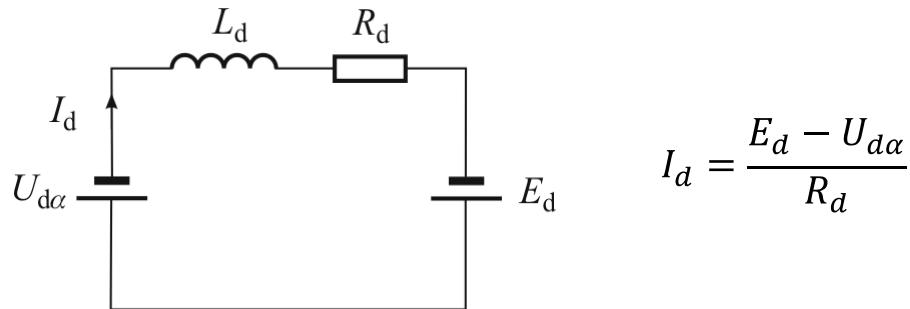


Kako to ostvarujemo u praksi?



Fazno upravljeni ispravljači, USMJERIVAČI

Nadomjesna shema usmjerivača u izmjenjivačkom načinu rada



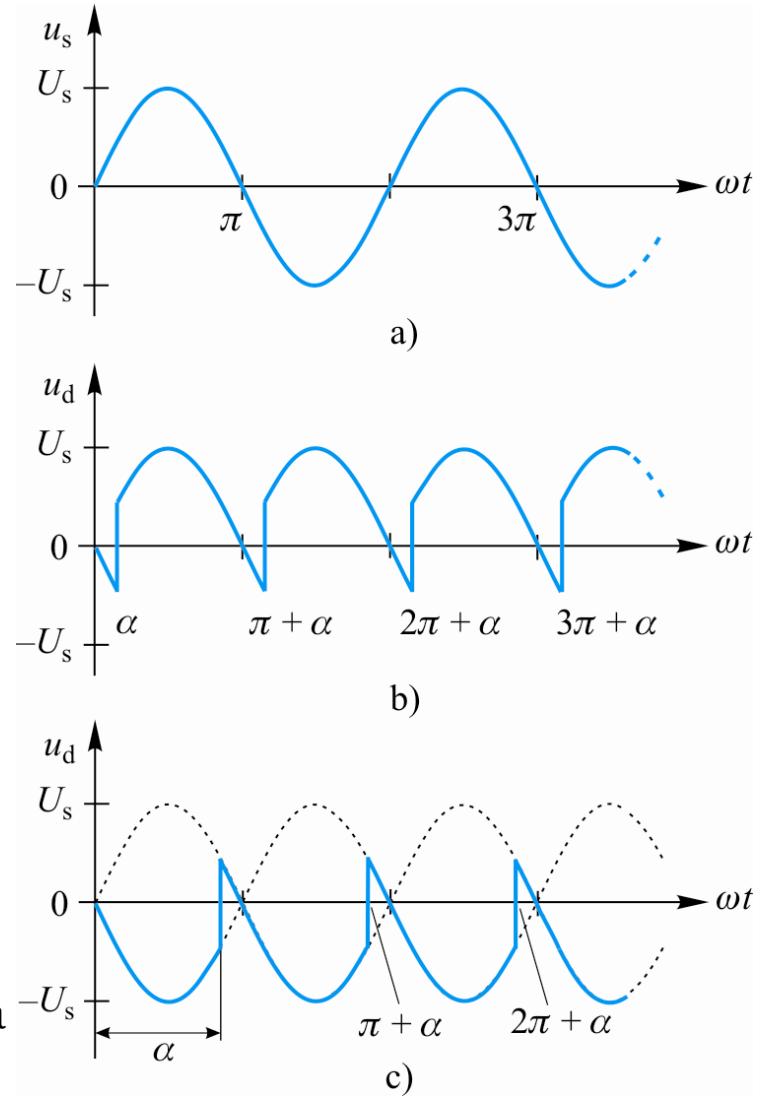
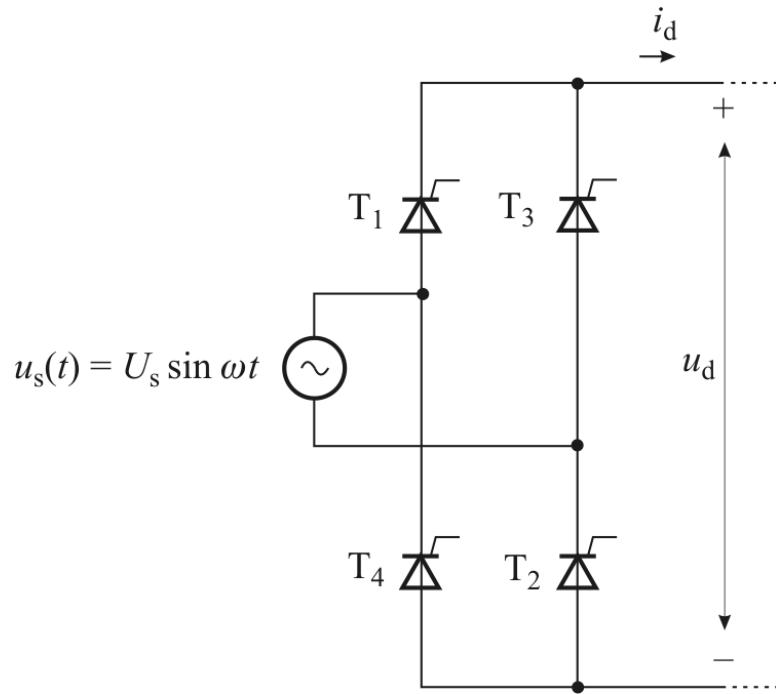
Istosmjerni izvor E_d predaje snagu izmjeničnoj mreži. Snaga istosmjernog izvora $P_d = E_d I_d$. Razmislite kolika se snaga predaje izmjeničnoj mreži?

Ova nadomjesna shema u stvari predstavlja usrednjeni model.

Izmjenjivački način rada upotrebljava se, primjerice, za kočenje nezavisnog istosmjernog motora.

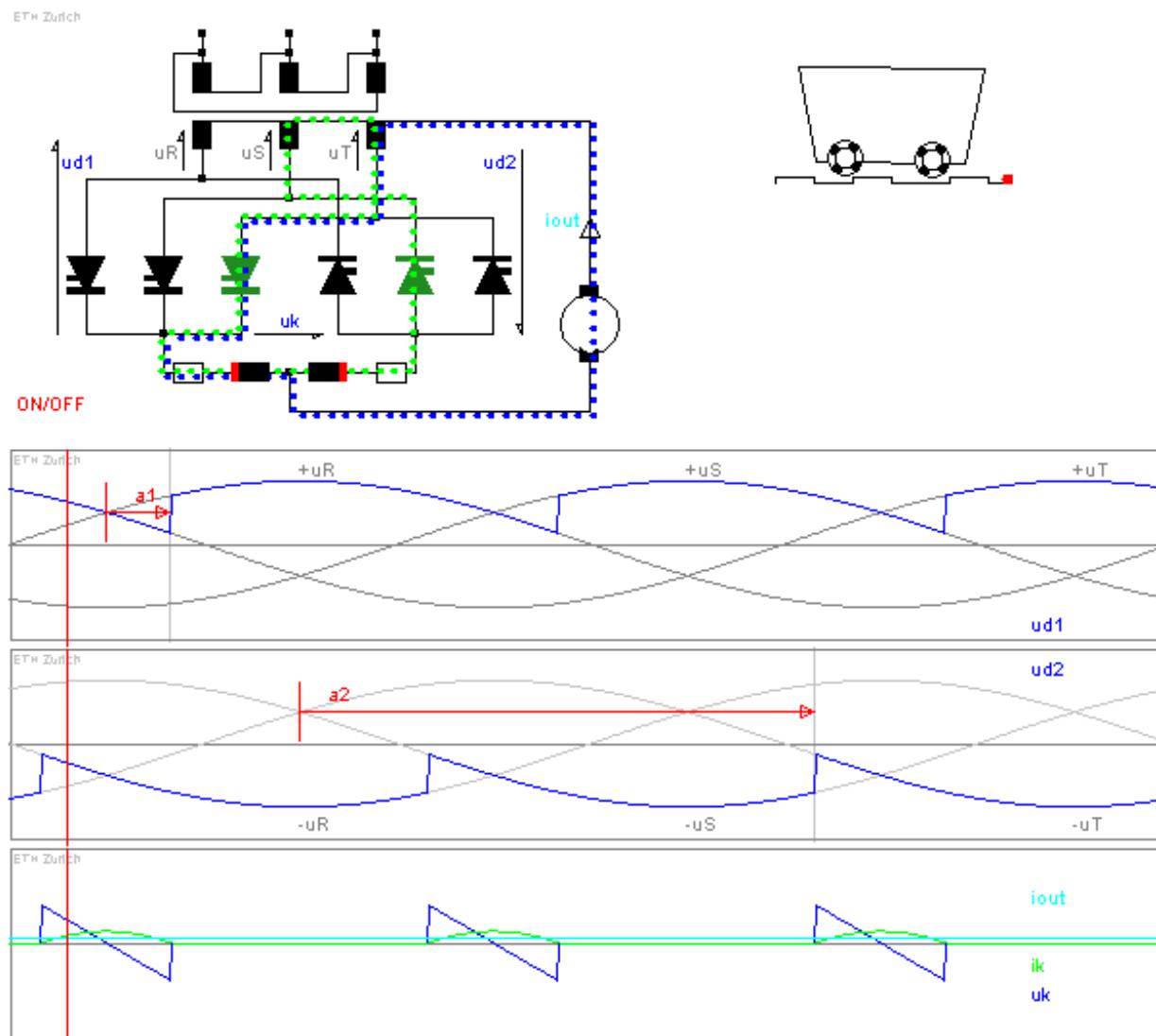
Svaki usmjerivač je fazno upravljeni ispravljač, no obratno ne vrijedi ! Razmislite zašto !

USMJERIVAČI – Izmjenjivački način rada



- a) napon napojne mreže
- b) izlazni napon u ispravljačkom načinu rada
- c) izlazni napon u izmjenjivačkom načinu rada

USMJERIVAČI – primjer IPES, dvosmjerni usmjerivač



USMJERIVAČI – primjer korištenja sunčevih čelija

Primjer: Jednofazni usmjerivački most u izmjenjivačkom načinu rada

Istosmjerni izvor u shemi predstavlja polje sunčevih čelija napona $E_d = 110 \text{ V}$. Sunčeve čelije mogu proizvesti snagu od $P_d = 1000 \text{ W}$. Efektivna vrijednost napona izmjeničnog izvora iznosi 120 V , djelatni otpor trošila $R_d = 0,5 \Omega$, a induktivitet L je dovoljno velik da se može pretpostaviti nevalovita istosmjerna struja. Izračunajte kut upravljanja α potreban da se osigura da sunčeve čelije predaju snagu P_d ! Izračunajte snagu predanu izmjeničnoj mreži P_{ac} i gubitke na djelatnom otporu P_R ! Pretpostavite idealne tiristore.

Da bi čelije predavale snagu od 1000 W , srednja vrijednost struje čelija mora iznositi

$$I_{d\ avg} = \frac{P_d}{E_d} = \frac{1000}{110} = 9,09 \text{ A}$$

Srednja vrijednost izlaznog napona usmjerivača mora biti jednaka zbroju napona istosmjernog izvora i pada napona na djelatnom trošilu.

$$U_{d\ avg} = I_{d\ avg} R_d + E_d = 0,09 * 0,5 + (-110) = -105,5 \text{ V}$$

Sada se jednostavno može izračunati potrebni kut upravljanja tiristora usmjerivača.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\pi U_{d\ avg}}{2 U_S} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{\pi * (-105,5)}{2 * 120 * \sqrt{2}} \right) = 165,5^\circ$$

Snaga koju istosmjerni sustav (sunčeve čelije) predaje izmjeničnom sustavu (napojnoj mreži) umanjena je za snagu potrošenu na djelatnom dijelu trošila (otpor R).

$$P_{ac} = -I_{d\ avg} * U_{d\ avg} = -105,5 * (-9,09) = 959 \text{ W}$$

USMJERIVAČI – primjer korištenja sunčevih čelija

Gubici na djelatnom otporu R jednostavno se mogu izračunati pomoću izraza (uočite da je efektivna vrijednost istosmjerne nevalovite struje jednaka njenoj amplitudi)

$$P_R = I_{d \text{ rms}}^2 R_d \approx I_{d \text{ avg}}^2 * R_d = 9,09^2 * 0,5 = 41 \text{ W}$$

Pri rješavanju ovog zadatka pretpostavili smo da su tiristori idealni, tj. pad napona na njima u stanju vođenja jednak je 0 V. U ovom slučaju to možda i nije bilo opravdano, jer su vrijednost istosmjernog napona i izlaznog napona usmjerivača vrlo bliske. Izračunajmo glavne rezultate uz pretpostavku da je pad napona na tiristoru u stanju vođenja jednak 1 V.

Budući da istovremeno vode 2 tiristora, izlazni napon usmjerivača se zbog toga smanjuje za 2 V.

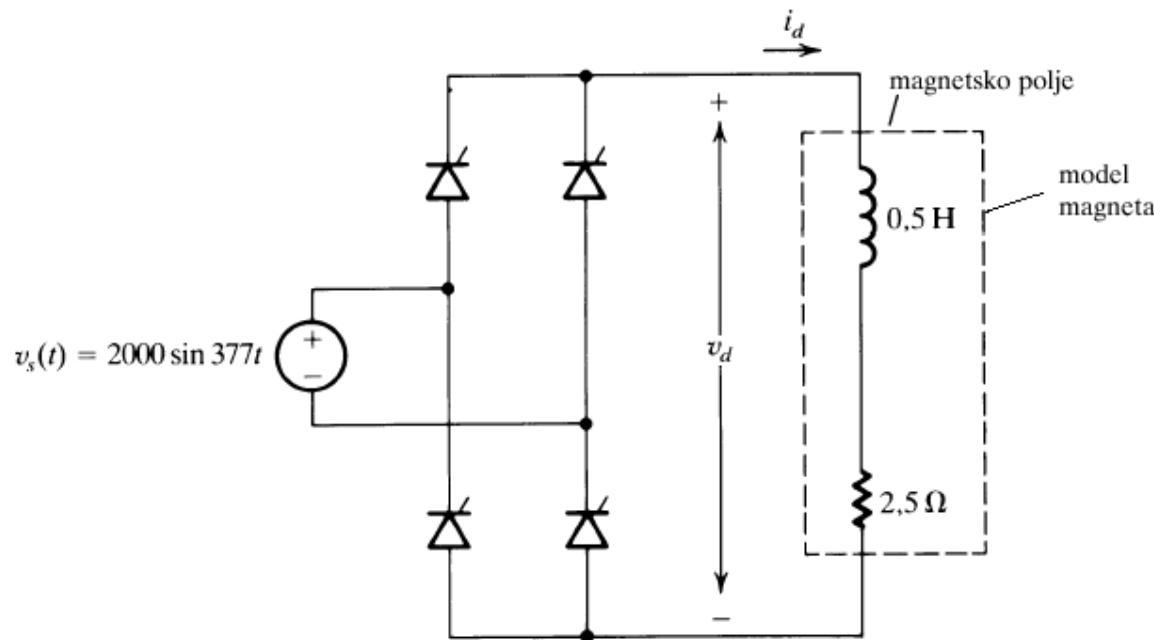
$$U_{d \text{ avg}} = -105,5 - 2 = -107,5 \text{ V}$$

Struja trošila tada iznosi

$$I_{d \text{ avg}} = \frac{-107,5 - (-110)}{0,5} = 5 \text{ A}$$

što je znatno smanjenje u odnosu na idealan slučaj. Zaključujemo da je sklop osjetljiv na promjene parametara (kut upravljanja, padovi napona).

Pokušajte izračunati koju snagu sada daju sunčeve čelije !



Slika 5.6. Fazno upravljivo pretvarač upotrijebljen za upravljanje magnetskim poljem jakog magneta.

Pitanja: Koliki je kut upravljanja a , ako je struja magneta 400 A ? Kako brzo se može struja magneta od te vrijednosti dovesti do nule?

Izraz za srednju vrijednost napona usmjerivača (upravljačka karakteristika) je

$$U_{d\ avg}(\alpha) = U_d(\alpha) = U_{d\alpha} = \frac{2U_s}{\pi} \cos(\alpha) = U_{d0} \cos(\alpha)$$

Već znamo da srednju vrijednost struje trošila određuje djelatni otpor trošila R

$$I_{d\ avg} = \frac{U_{d\ avg}}{R_d} = \frac{2 * 2000}{\pi R_d} \cos(\alpha)$$

Uvrštenjem $I_{d\ avg} = 400$ A i rješavanjem po α , dobije se:

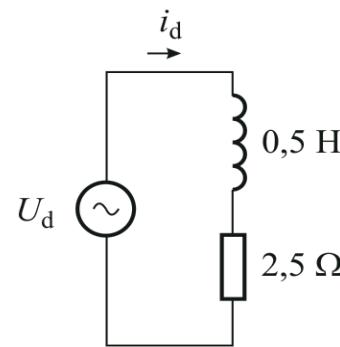
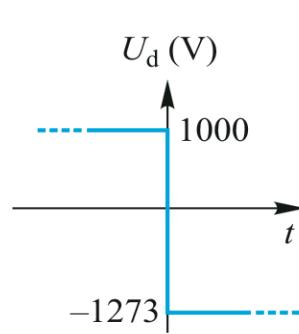
$$\alpha = 38,2^\circ$$

Pri toj vrijednosti kuta α srednja vrijednost napona usmjerivača je :

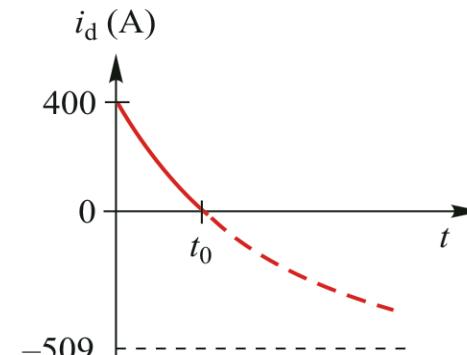
$$U_{d\alpha} = 1000 V$$

Usmjerivač radi u ispravljačkom načinu rada. Da bi najbrže smanjili struju na nulu, moramo prevesti u izmjenjivački način rada.

Ideja proračuna vremena demagnetizacije



a)



b)

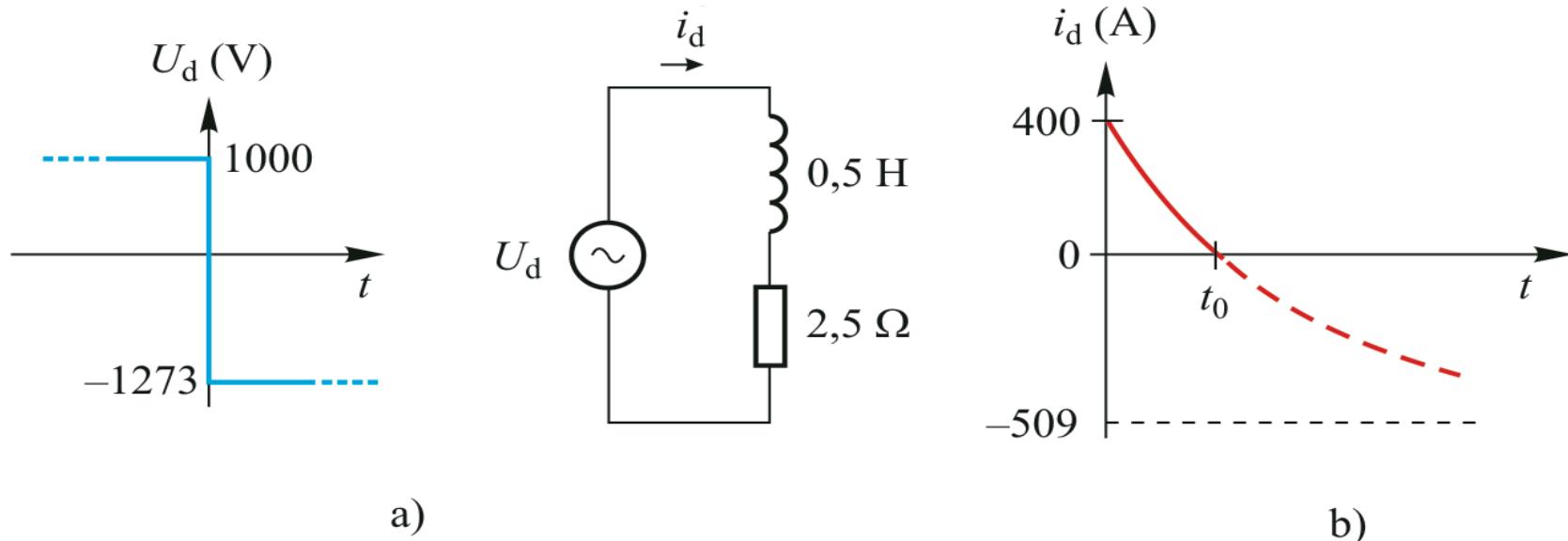
$$U_{d\alpha} = \frac{2U_s}{\pi} \cos(\alpha) = \frac{2 * 2000}{\pi} \cos(\pi) = -1273 \text{ V}$$

$$I_{d \text{ avg}} = \frac{U_{d \text{ avg}}}{R_d} = -\frac{1273}{2.5} = -509 \text{ A}$$

$$i_d = -509 + 909 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

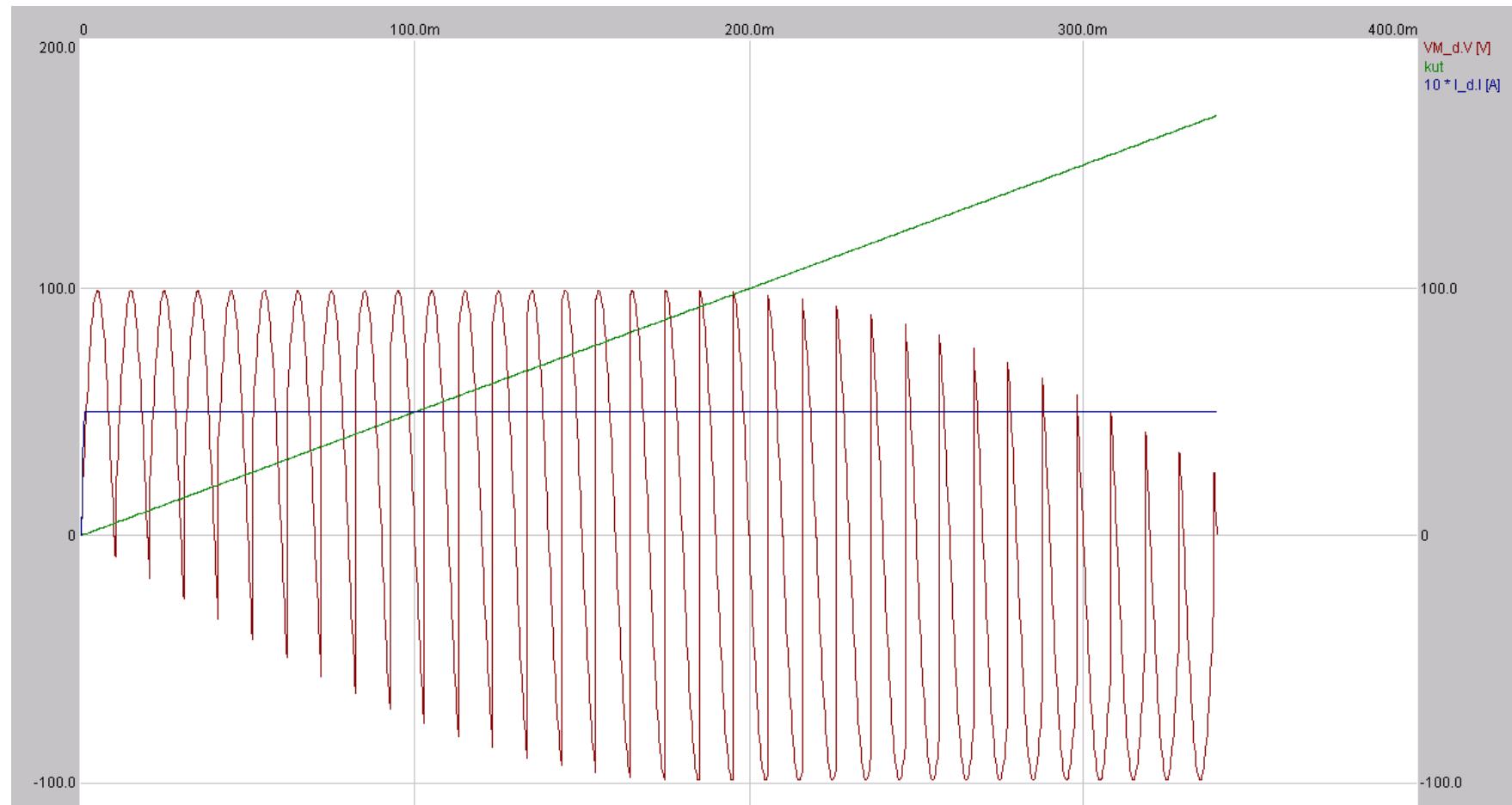
Uvrštenjem $\tau = 0,2$ s i $i_d = 0$, dobije se:

$$t_0 = \tau \ln \frac{909}{509} = 0,12 \text{ s}$$

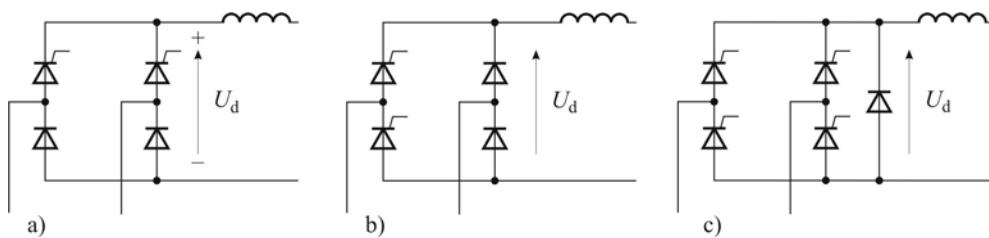


Slika 5.7. a) Nadomjesni spoj za računanje struje i_d . Pojna mreža i tiristor su nadomješteni izvorom $\langle v_d \rangle$. b) Vremenski tijek struje i_d u nadomjesnom spoju.

USMJERIVAČI – analiza rada pomoću SIMPLORER-a



USMJERIVAČI – poluupravljeni spojevi



Moguće inačice poluupravljenih spojeva

Kod poluupravljenih spojeva na trošilu se ne može pojaviti negativni napon.

Mogu raditi samo u jednom kvadrantu.

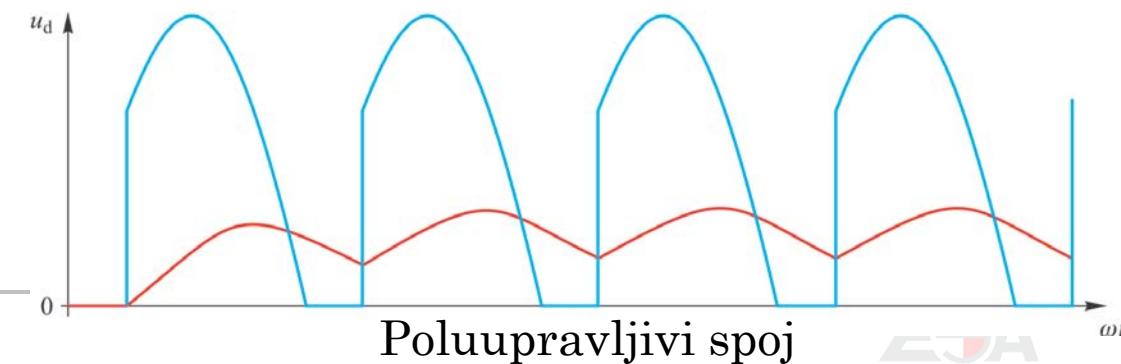
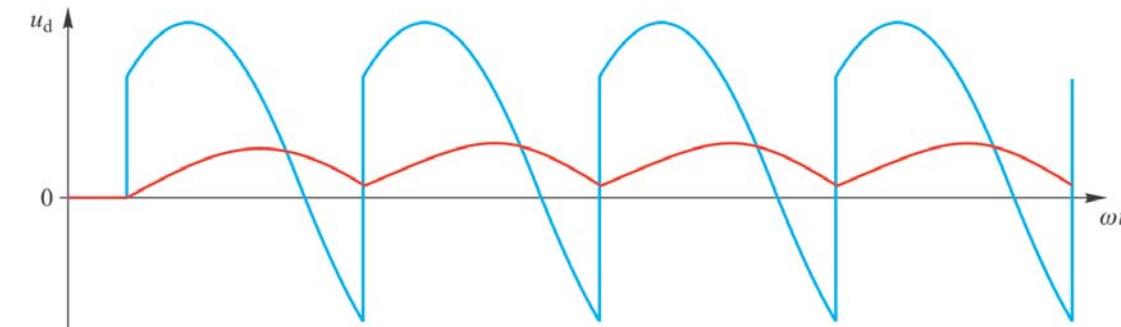
Različita je raspodjela struje između ventila.

Poluupravljeni spojevi imaju manji utjecaj na mrežu od punoupravljenih (bolji faktor snage).

Više o sklopu s porednom diodom u zadacima za vježbu.

Punoupravljeni spoj

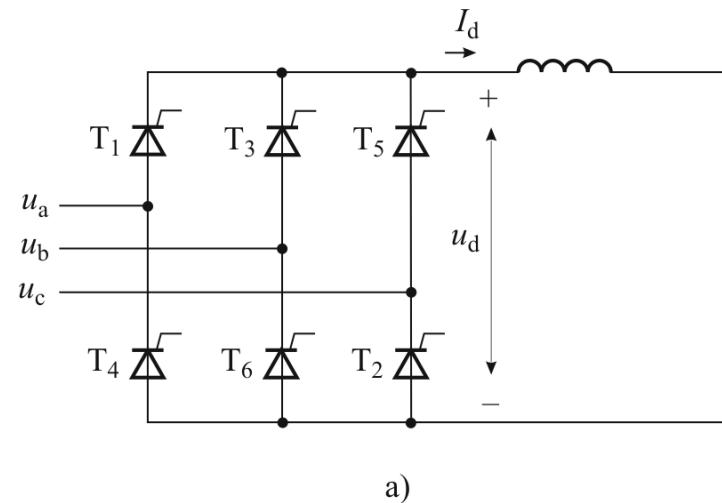
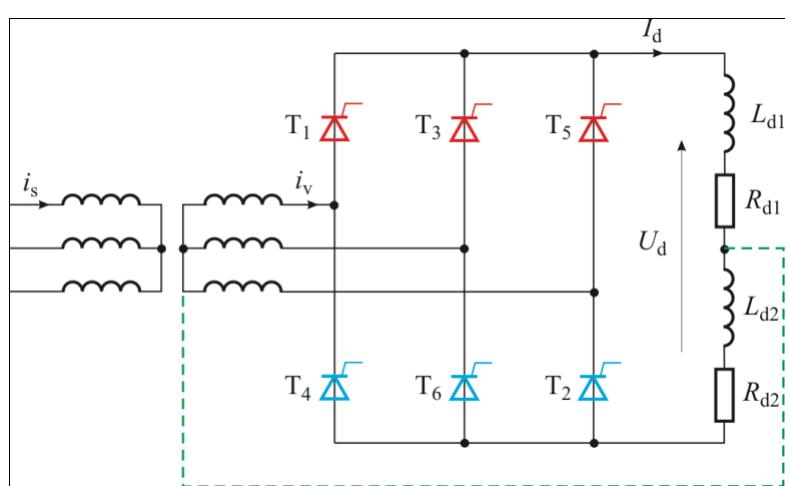
Poluupravljeni spoj



USMJERIVAČI – trofazni mosni spoj

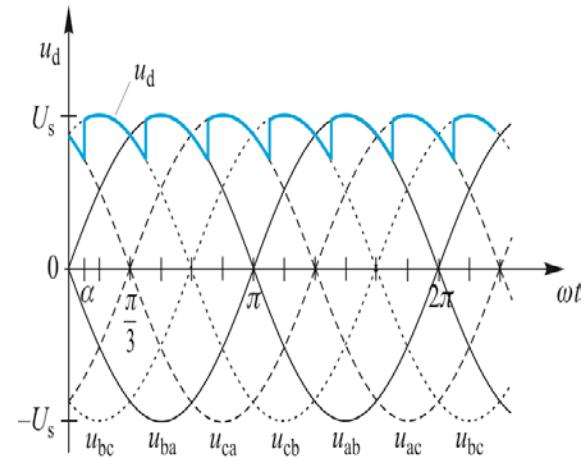
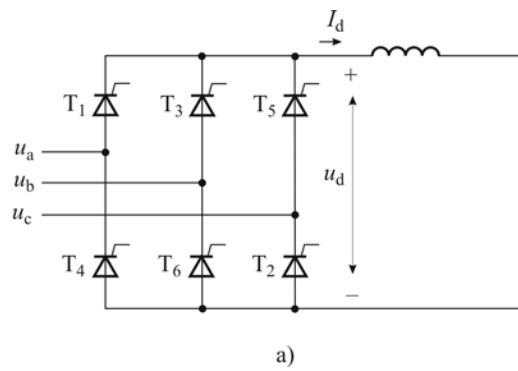
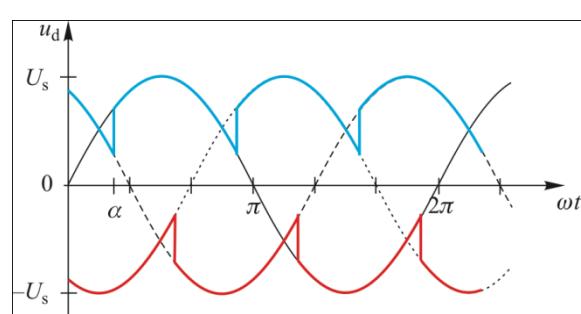
Na manjim snagama (do 10 kW), najčešće se koriste jednofazni mosni spojevi pretvarača. Za veće snage jednofazniji spojevi nisu pogodni, te se mora prijeći na korištenje višefaznih spojeva.

Najčešće je korišteni **trofazni mosni spoj** (sastoji se od serijskog spoja 2 trofazna spoja sa srednjom točkom).



USMJERIVAČI – trofazni mosni spoj

Napon na trošilu tvori se od 2 fazno pomaknuta sustava faznih napona (3FSRT). Budući da je trenutačna vrijednost napona na trošilu razlika trenutačnih vrijednosti faznih napona, to će se za konstrukciju napona na trošilu kod 3FM koristiti sustav linijskih napona.



Za sada samo zapamtimo izraz za srednju vrijednost napona na trošilu za punoupravljeni trofazni mosni spoj (s induktivnim trošilom i neisprekidanom strujom trošila) – U_L je amplituda linijskog napona, a U_S je amplituda faznog napona.

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \cdot \cos \alpha = \frac{3U_L}{\pi} \cdot \cos \alpha = \frac{3\sqrt{3}U_S}{\pi} \cdot \cos \alpha = \frac{3\sqrt{6}U_{Srms}}{\pi} \cdot \cos \alpha$$

USMJERIVAČI – trofazni mosni spoj

Često dolazi do nesporazuma, previda i pogrešaka pri primjeni navedenih izraza, jer korisnik nije siguran da li koristiti linijski ili fazni napon, te amplitudu ili efektivnu vrijednost. U literaturi se koriste doista raznoliki načini zapisivanja formula. Stoga pripazite u primjeni!

U nastavku ponavljamo izraze za srednju vrijednost napona na trošilu **punoupravlјivog spoja** (to je upravljačka karakteristika), te zbog lakšeg pamćenja dodajemo i brojčane vrijednosti faktora.

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \cdot \cos \alpha = \frac{3 U_L}{\pi} \cdot \cos \alpha = \frac{3 \sqrt{3} U_S}{\pi} \cdot \cos \alpha = \frac{3 \sqrt{6} U_{S rms}}{\pi} \cdot \cos \alpha$$

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \cdot \cos \alpha = 0,95 \cdot U_L \cdot \cos \alpha = 1,65 \cdot U_S \cdot \cos \alpha = 2,34 \cdot U_{S rms} \cdot \cos \alpha$$

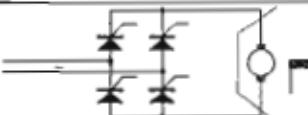
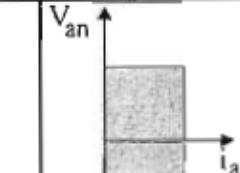
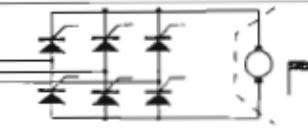
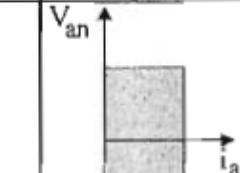
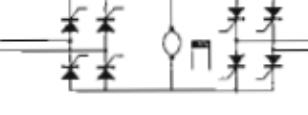
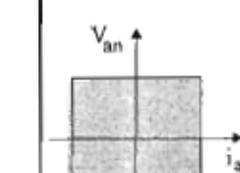
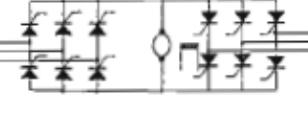
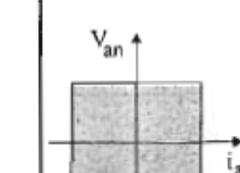
Ukoliko se koristi **poluupravlјivi spoj (3 diode i 3 tiristora)** ili spoj s **porednom diodom**, može se primjeniti već poznati oblik izraza (U_{d0} je kao kod punoupravlјivog mosnog spoja).

$$U_d = U_{d0} \cdot \frac{1}{2} (1 + \cos \alpha) = 1,17 U_{S rms} \cdot \frac{1}{2} (1 + \cos \alpha)$$

FAZNO UPRAVLJIVI ISPRAVLJAČI – PREGLED

| Circuit type | | Power range | Ripple frequency | Quadrant operation |
|--------------|--------------------------------|----------------|------------------|--------------------|
| | half wave single-phase | below 0.5KW | f_s | one quadrant |
| | half wave three phase | up to 50KW | $3f_s$ | two quadrant |
| | semi-converter single-phase | up to 75KW | $2f_s$ | one quadrant |
| | semi-converter three-phase | up to 100KW | $3f_s$ | one quadrant |

FAZNO UPRAVLJIVI ISPRAVLJAČI – PREGLED

| | | | | |
|---|--------------------------------|-----------------|--------|--|
|  | full converter single-phase | up to 75KW | $2f_s$ | V_{an} ↑  two quadrant |
|  | full converter three-phase | up to 150KW | $6f_s$ | V_{an} ↑  two quadrant |
|  | Dual converter single-phase | up to 15KW | $2f_s$ | V_{an} ↑  four quadrant |
|  | Dual converter three-phase | up to 1500KW | $6f_s$ | V_{an} ↑  four quadrant |