

IZMJENIČNA STRUJA

POJAM ELEKTRIČNE STRUJE

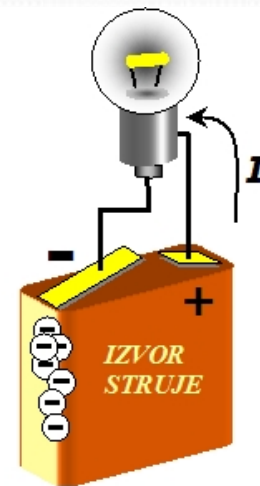
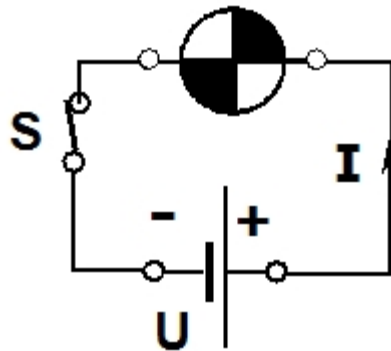
- **Što je električna struja?**
 - Električna struja je usmjereno gibanje električnih naboja (**elektrona** u metalima, **iona** u elektrolitima) pod utjecajem električnog polja.
- **Što je osnovni uvjet za njen nastanak?**
 - Osnovni uvjeti za njezin nastanak su **zatvoren strujni krug** i **izvor napona**.
- **Smjer struje u istosmjernoj struji?**
 - Prema dogovoru, smjer struje je od pozitivnog prema negativnom polu, iako se elektroni gibaju suprotno – od negativnog prema pozitivnom.

ISTOSMJERNA STRUJA

- Do sada smo učili i riješavali zadatke kod istosmjerne struje.
- Istosmjernu struju je puno lakše razumjeti nego izmjeničnu struju:
 - Ona teče uvijek u istom smjeru
 - U tijeku vremena ima stalnu ili konstantnu jakost
 - Za istosmjernu struju u strujnim krugovima vrijede osnovni zakoni:
 - Ohmov zakon
 - Oba Kirchhoffova zakona
 - Jouleov zakon
 - Faradayevi zakoni elektrolize
 - Hopkinsov zakon magnetskog toka

ISTOSMJERNA STRUJA

- Znaete li neke izvore istosmjerne električne struje?
 - Baterije, akumulatori, fotonaponske (solarne) ćelije, ispravljači
- Baterije i akumulatori predstavljaju kakve izvore?
 - Kemijski izvori (galvanski članci)
 - Fotoelektrični izvori su solarne ćelije
 - Ispravljači pretvaraju izmjeničnu struju u istosmjerno (bilo koja vrsta punjača za baterije)



ISTOSMJERNA STRUJA

- Primjena istosmjerne struje je široka – svi uređaji koji koriste baterije ili akumulatore se baziraju na istosmjernoj struji, uključujući i električna i hibridna vozila.
- Istosmjerna struja je nezamjenjiva za elektroniku, baterijske uređaje.
- Svi uređaji sa poluvodičkim elementima praktički imaju u sebi ugrađen adapter AC-DC.
- Lakše se pohranjuje.

ISTOSMJERNA STRUJA

- Primjena istosmjerne struje je široka – svi uređaji koji koriste baterije ili akumulatore se baziraju na istosmjernoj struji, uključujući i električna i hibridna vozila.
- Istosmjerna struja je nezamjenjiva za elektroniku, baterijske uređaje.
- Svi uređaji sa poluvodičkim elementima praktički imaju u sebi ugrađen adapter AC-DC.
- Lakše se pohranjuje.

RAT STRUJA

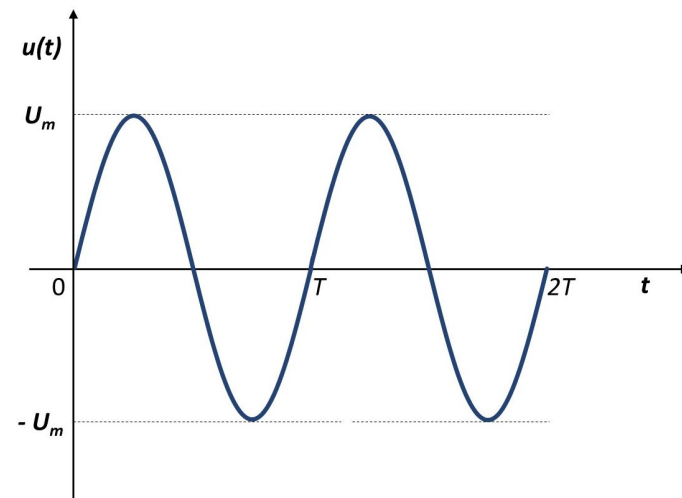
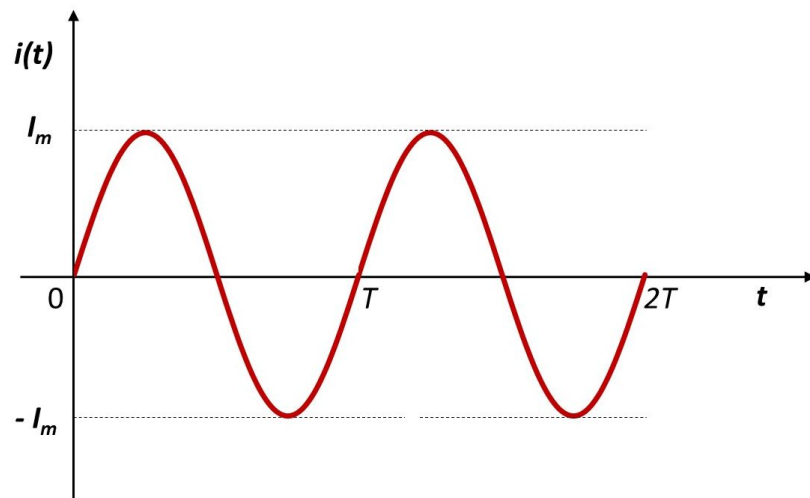
- U samim počecima prijenosa električne struje, istosmjerna struja bila je standard u SAD-u i Europi.
- Ona se, međutim, mogla prenositi na vrlo male udaljenosti i time je zahtijevala raširenu i skupu infrastrukturu.
- Nikola Tesla pridružio se Edisonu 1884. godine, nadajući se suradnji na razvoju električnih sustava. Međutim, njihovi su se pogledi na distribuciju električne energije razlikovali.
- Edison je zagovarao istosmjernu struju (DC), dok je Tesla promovirao izmjeničnu struju (AC), koja je bila učinkovitija za prijenos na velike udaljenosti.

RAT STRUJA

- Ovo neslaganje dovelo je do "rata struja" tijekom kojeg su obojica nastojali dokazati superiornost svojih sustava.
- Na kraju je Teslin AC sustav, u suradnji s Georgeom Westinghouseom, prevladao i postao standard za distribuciju električne energije.
- Zbog niskog napona, Edisonov sustav je imao ograničen doseg distribucije (samo nekoliko kilometara od elektrane), što je zahtijevalo izgradnju mnogih malih elektrana u gusto naseljenim urbanim sredinama.
- Tesla pak, zbog mogućnosti distribucije na puno većem naponu i malim gubicima u distribuciji imao praktički neograničenu distribuciju.

IZMJENIČNA STRUJA

- **Izmjenična električna struja** ili **izmjenična struja** je ona električna struja kojoj se smjer mijenja u vremenu.
- Izmjeničnoj struji i naponu stalno se i u pravilnim vremenskim razmacima mijenjaju i smjer i iznos.
- Promjenu iznosa i smjera izmjeničnog napona i izmjenične struje tijekom vremena zorno prikazuju sinusoide.

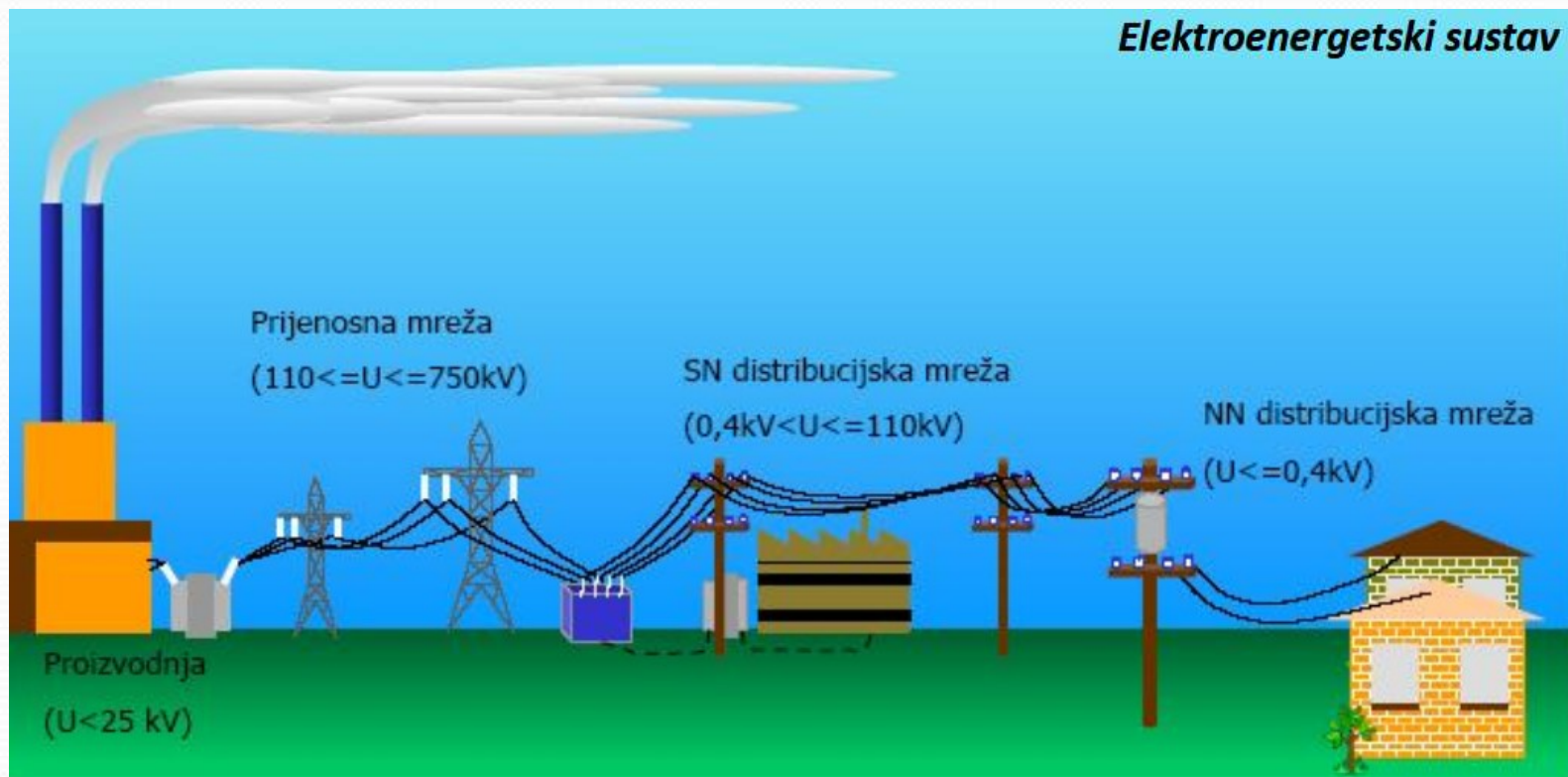


IZMJENIČNA STRUJA

- Proizvodnja te prijenos na velike udaljenosti kod izmjenične struje je vrlo lagan proces.
- Gubici?
 - Pri tome su i gubici puno manji nego kod istosmjerne struje.
- Kod visokih napona (većih od 110 kV, trenutno 400 kV su najveći naponi u distribucijskim mrežama) manje energije se gubi prilikom prijenosa električne struje.
- Visoki napon znači smanjenje jakosti struje, a to znači manje topline zbog otpora u žicama za prijenos.
- Napon u izmjeničnoj struji se vrlo lako povećava/smanjuje pomoću **transformatora**.

IZMJENIČNA STRUJA

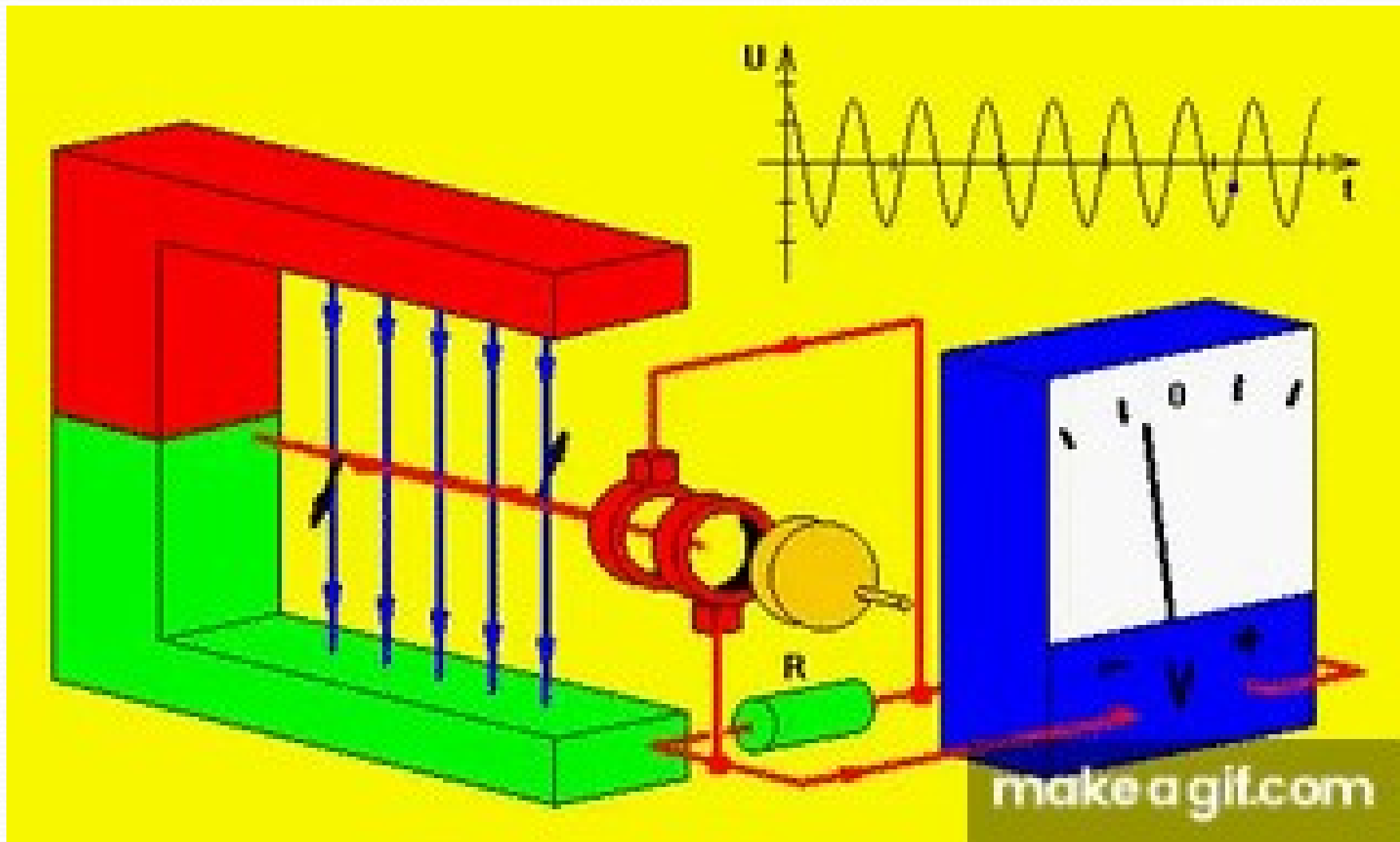
- Izmjenična struja nastaje u posebno konstruiranim uređajima koje nazivamo **generatori**.
- Oni su sastavni dio svakog postrojenja za proizvodnju električne energije. Takva postrojenja nazivamo elektrane.



IZMJENIČNA STRUJA - PROIZVODNJA

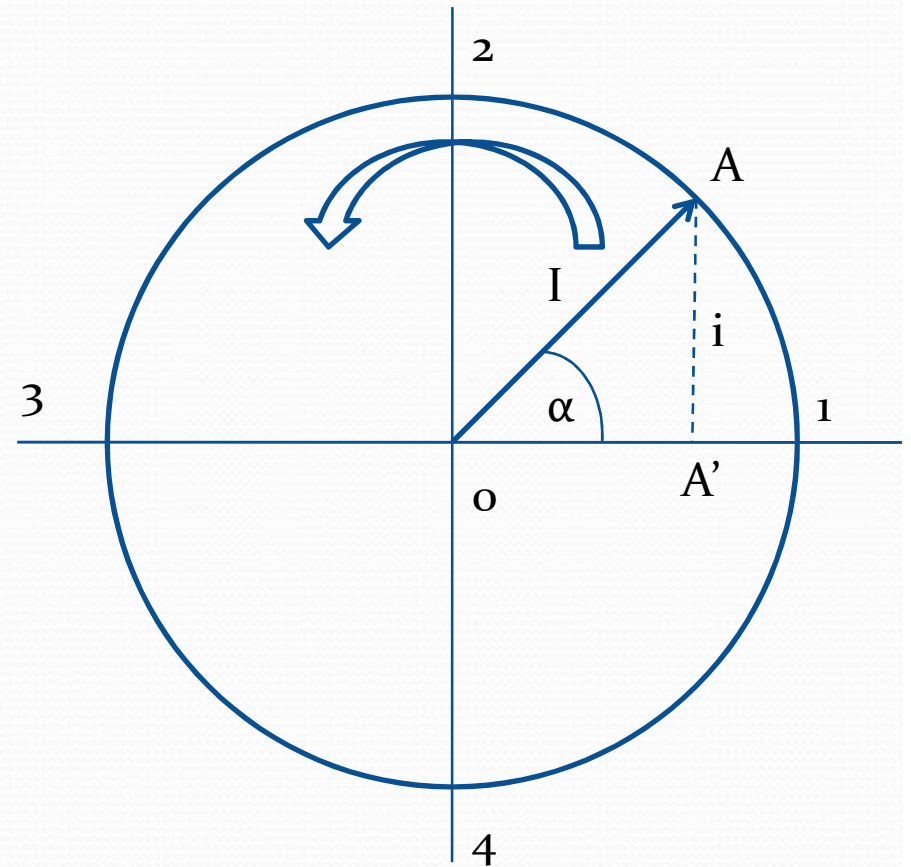
- Ako se okvir od metalne žice u obliku pravokutnika okreće oko svoje osi u magnetnom polju, u njemu će se zbog sječenja magnetnih silnica inducirati električni napon.
- Inducirani električni napon biti će najveći kada okvir siječe najviše magnetnih silnica, a najmanji, odnosno jednak nuli, kada nema sječenja magnetnih silnica.
- Nakon svake polovine okreta metalnog okvira u magnetnom polju s jednim parom polova mijenja se smjer induciranog električnog napona.
- Takav električni napon zove se **izmjenični napon**, a struja koju ona proizvodi zove se **izmjenična struja**.

IZMJENIČNA STRUJA - PROIZVODNJA



VEKTORSKI DIJAGRAM PROMJENA IZMJENIČNE STRUJE

- Maksimalnu vrijednost struje (I) možemo prikazati duljinom radijvektora \overline{OA}
- On se jednolikom kutnom brzinom okreće oko ishodišta O u smjeru suprotnom od smjera kazaljke na satu
- Vrijeme punog okretaja radijvektora ($360^\circ = 2\pi$ radijana) jednako je vremenu trajanja jedne **periodične promjene struje**.
- **Vrijednost struje u pojedinom trenutku jednaka je duljini okomice spuštene iz vrha radijvektora na apscisnu os ($\overline{AA'}$)**

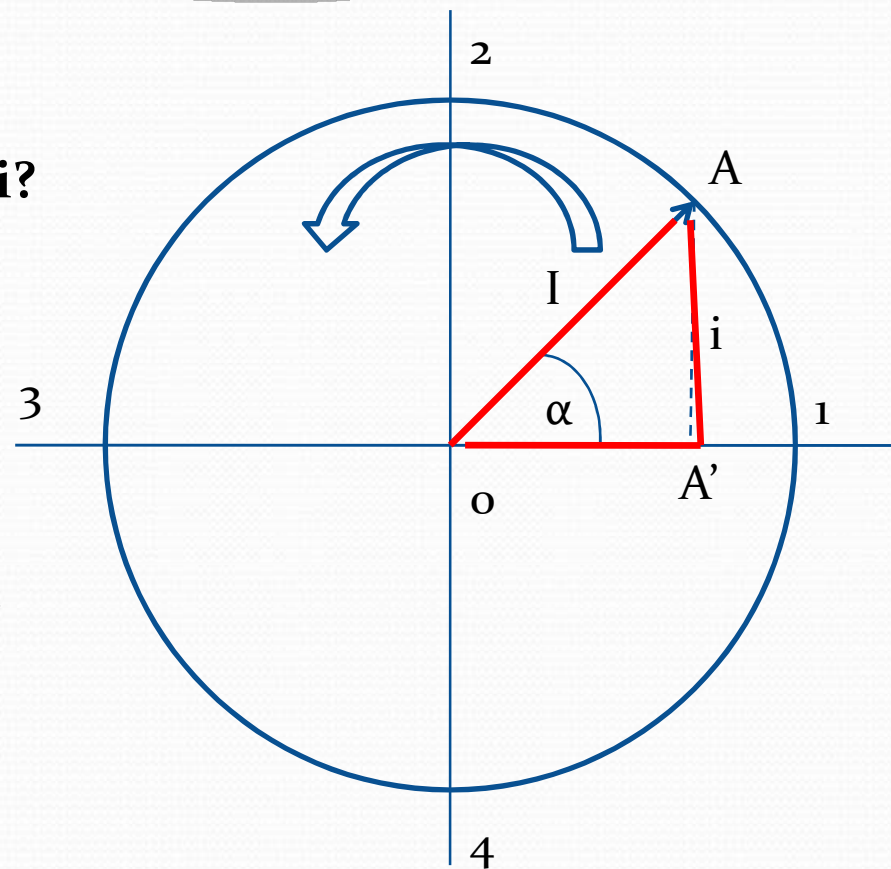


VEKTORSKI DIJAGRAM PROMJENA IZMJENIČNE STRUJE

- Što na dijagramu možemo primjetiti?
 - Trenutna vrijednost struje za vrijeme punog okretaja radijvektora mijenja od nule (vrhovi 1 i 3) do maksimalne vrijednosti struje (vrhovi 2 i 4)
- Iz pravokutnog trokuta AOA' vidimo da je trenutačna vrijednost struje (i):

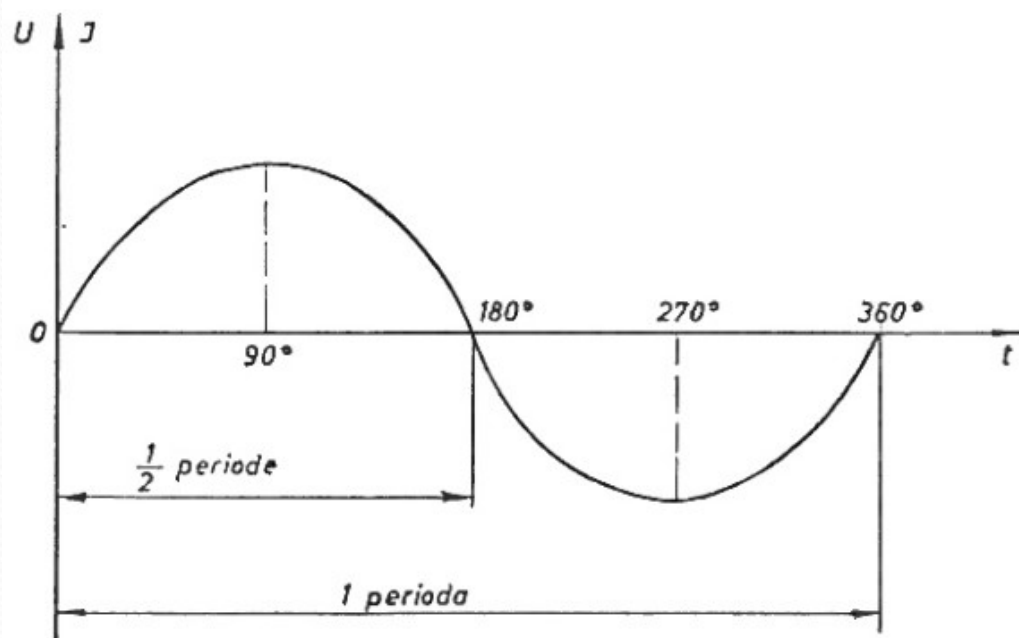
$$i = I \cdot \sin \alpha$$

- Maksimalna vrijednost struje je stalna, pa trenutna ovisi samo o sinusuu trenutnog kuta α
- Izmjenična struja nastala jednolikim okretanjem petlje u homogenom magnetskom polju mijenja se po zakonu sinusa.



PERIODA, FREKVENCIJA

- Izmjenična struja stalno mijenja svoju veličinu po određenom zakonu, a promjene se periodički ponavljaju.
- Niz promjena izmjenične struje koji se periodički ponavlja zove se **perioda izmjenične struje**.



- Broj perioda u jednoj sekundi zove se **frekvencija izmjenične struje**

PERIODA, FREKVENCIJA

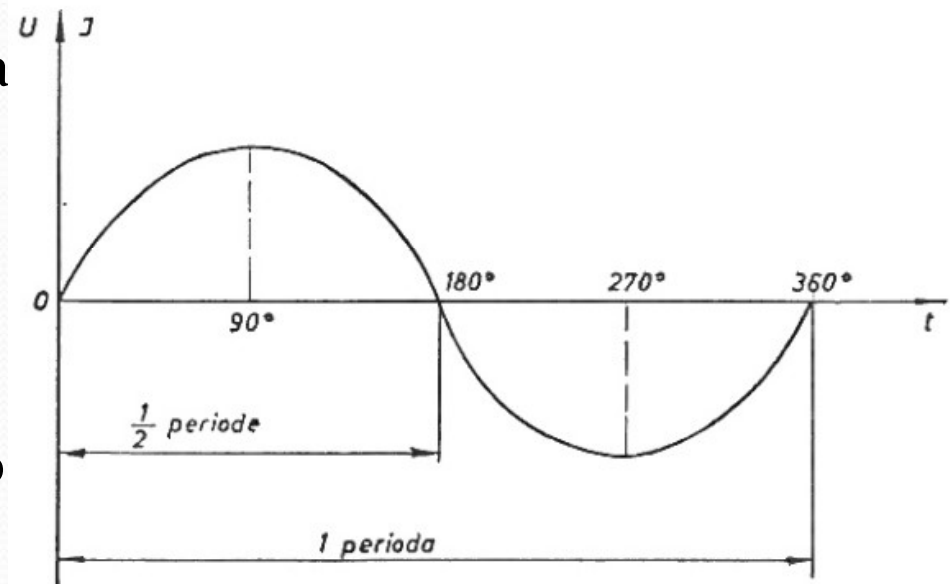
- U toku jedne periode imamo niz promjena:

a) Porast od nule do maksimuma ($0-90^\circ$)

b) Pad od maksimuma do nule ($90^\circ-180^\circ$)

c) Porast u suprotnom smjeru do maksimuma ($180^\circ-270^\circ$)

d) Pad od suprotnog maksimuma na nulu ($270^\circ-360^\circ$)



PERIODA, FREKVENCIJA

- Jedinica za mjerenje frekvencije je **herz** (1 Hz)
- U Europi, te većini zemalja Azije, Afrike, Južne Amerike te Australiji i Oceaniji standardizirana je izmjenična struja napona 230V frekvencije 50 Hz.
- Sjeverna i srednja Amerika, karipska otočja, Kolumbija Ekvador, Venezuela, Tajvan, Libanon, Liberija te neki dijelovi Brazila koriste 120V/60 Hz, kolokvijalno 110V.
- Japan je jedinstven po tome što koristi 100V (najniži standard na svijetu) frekvencije 50 ili 60 Hz.
- Svi moderni punjači imaju oznaku *Input: 100-240V, 50/60Hz*, što znači da će raditi bilo gdje bez problema.

PERIODA, FREKVENCIJA

- Vrijeme trajanja **jedne periode**:

- T – vrijeme trajanja jedne periode
- f – frekvencija struje (Hz)

$$T = \frac{1}{f}$$

- Brzina promjene izmjenične struje može se prikazati i kružnom frekvencijom:

$$\omega = 2 \pi f$$

- ω – kružna frekvencija struje (1/s)
- f – frekvencija struje (Hz)
- π – Ludolfov broj ($n=3,14\dots$)

MATEMATIČKI IZRAZ PROMJENA IZMJENIČNE STRUJE

- Vrijeme (t) odnosi se prema vremenu trajanja jedne pune periode (T) kao trenutni kut (α) prema punom kutu (2π):

$$t:T = \alpha:2\pi$$

$$\alpha = \frac{2\pi t}{T} \quad \left(f = \frac{1}{T}\right)$$

$$\alpha = 2\pi f t \quad (\omega = 2\pi f)$$

$$\alpha = \omega t$$

- Ako dobivene izraze za α uvrstimo u formulu za trenutnačnu vrijednost struje dobijemo još dva oblika te formule.

MATEMATIČKI IZRAZ PROMJENA IZMJENIČNE STRUJE

- Trenutnu vrijednost struje možemo izračunati formulama:

$$i = I_m \cdot \sin \alpha$$

i – trenutna vrijednost struje (A)

I_m – maksimalna vrijednost struje (A)

$$i = I_m \cdot \sin 2\pi f t$$

α – trenutni kut radijvektora

t – vrijeme od početka prve periode (s)

$$i = I_m \cdot \sin \omega t$$

f – frekvencija struje (Hz)

ω – kružna frekvencija struje (1/s)

- I ostale veličine izmjenične struje (napon) mijenjaju se po zakonu sinusa, pa se i njihove promjene prikazuju sinusoidom, a njihove trenutne vrijednosti izračunavaju formulama istog oblika.

MATEMATIČKI IZRAZ PROMJENA IZMJENIČNE STRUJE

- PRIMJER:

- Kojem kutu α odgovara $t=0,4$ sekunde kod izmjenične struje frekvencije 8 Hz? Izračunajte pomoću kuta α i pomoću vremena t trenutnu vrijednost te struje ako je njezina maksimalna vrijednost 120 mA.

$$\begin{array}{l} t = 0,4 \text{ s} \\ f = 8 \text{ Hz} \\ I_m = 0,12 \text{ A} \\ \hline \alpha = ? \\ i = ? \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{a) } \alpha = 2 \pi f t \\ \alpha = 360 \cdot 8 \cdot 0,4 = 1152^\circ \\ \\ \text{b) } i = I_m \cdot \sin \alpha \\ i = 0,12 \cdot \sin 1152^\circ = 0,12 \cdot \sin (3 \cdot 360^\circ + 72^\circ) \\ = 0,12 \cdot \sin 72^\circ = 0,12 \cdot 0,951 = 0,114 \text{ A} = 114 \text{ mA} \\ \\ \text{c) } i = I_m \cdot \sin 2 \pi f t \\ i = 0,12 \cdot \sin 360^\circ \cdot 8 \cdot 0,4 = 0,12 \cdot \sin 1152^\circ = \\ = 0,12 \cdot \sin 72^\circ = 0,12 \cdot 0,951 = 0,114 \text{ A} = 114 \text{ mA} \end{array}$$

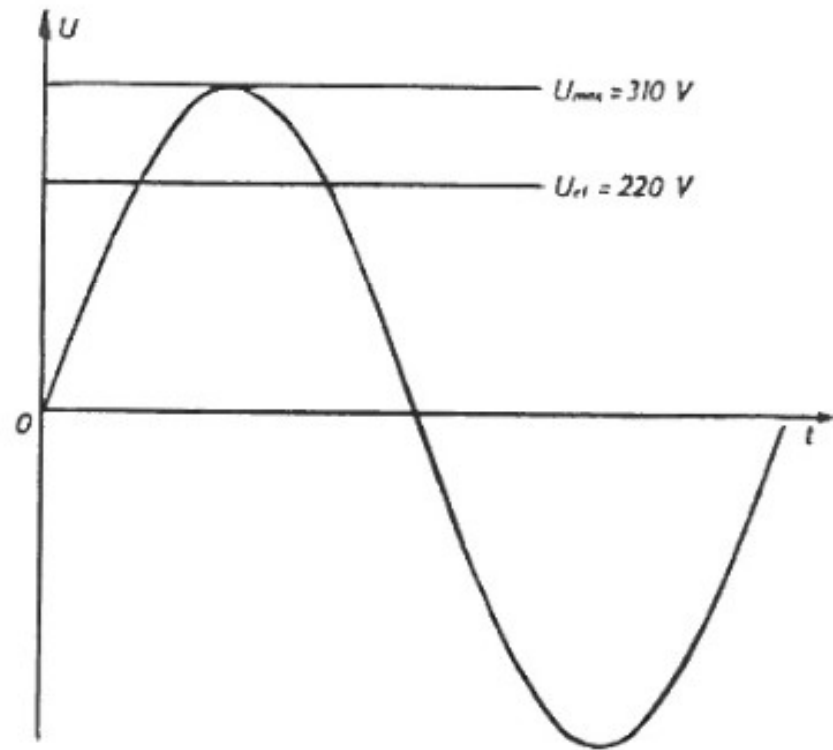
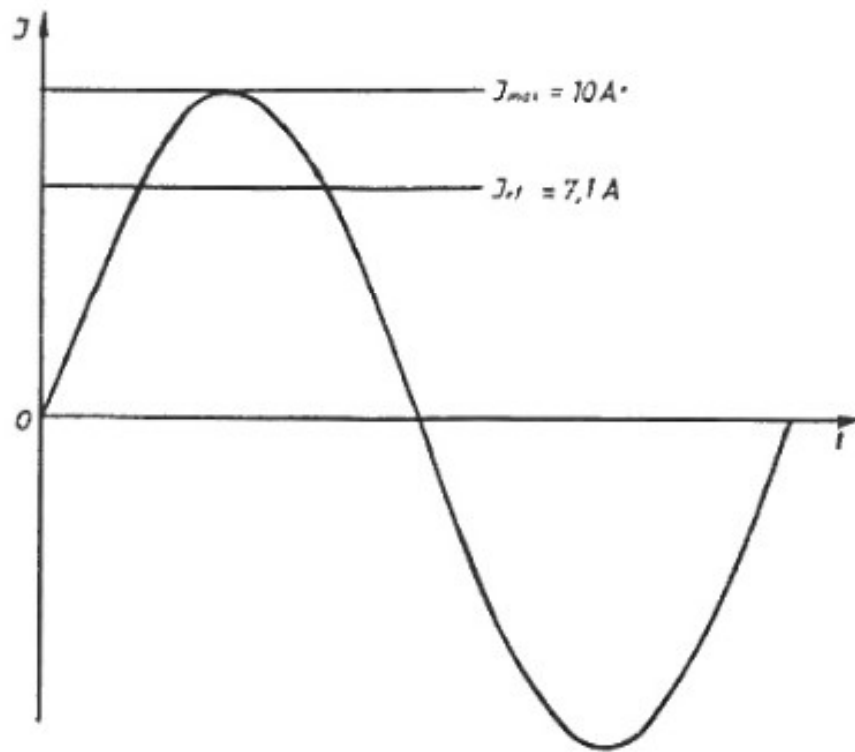
MAKSIMALNE I EFEKTIVNE VRIJEDNOSTI

- Najveća vrijednost koju izmjenična struja postigne za vrijeme jedne periode zove se **maksimalna vrijednost struje**.
- **Efektivna vrijednost neke izmjenične struje** ona je vrijednost koju bi trebala imati istosmjerna struja da proizvede isti toplinski učinak kao ta izmjenična struja.

$$I_{ef} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \qquad U_{ef} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$$

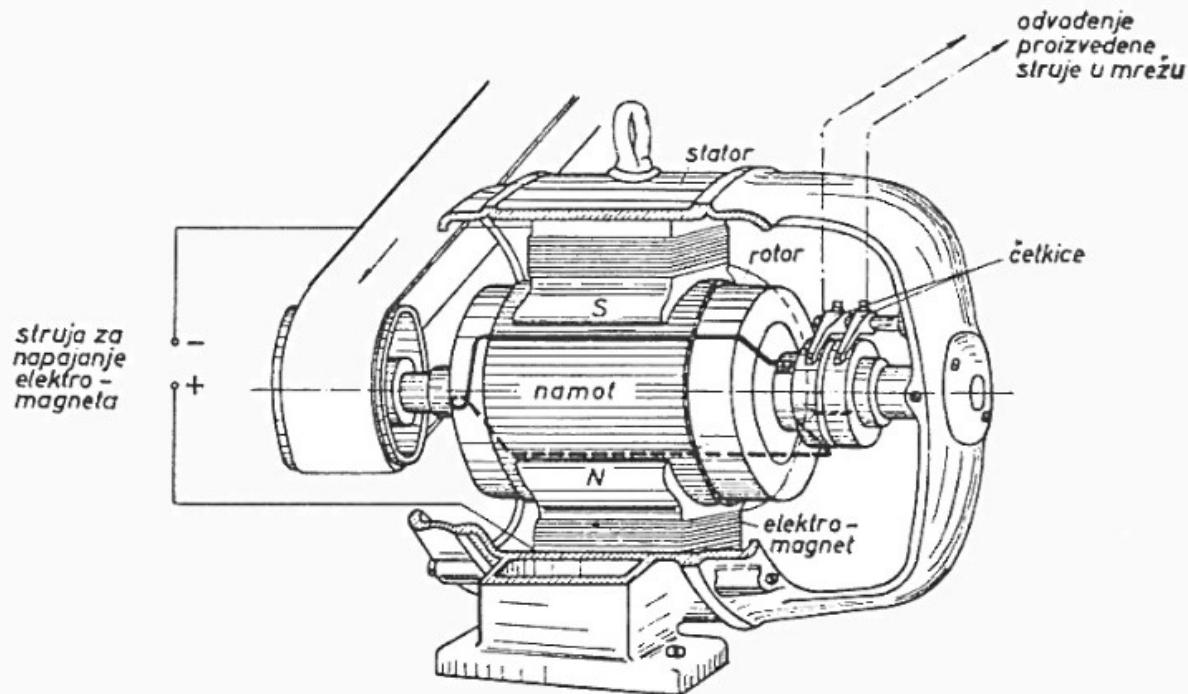
- Prema tome, izmjenična struja s maksimalnom jakošću 10A stvarno vrijedi kao istosmjerna struja od 7,1 A. **Isti odnos vrijedi i za napone.**

MATEMATIČKI IZRAZ PROMJENA IZMJENIČNE STRUJE



PRINCIP GENERATORA IZMJENIČNE STRUJE

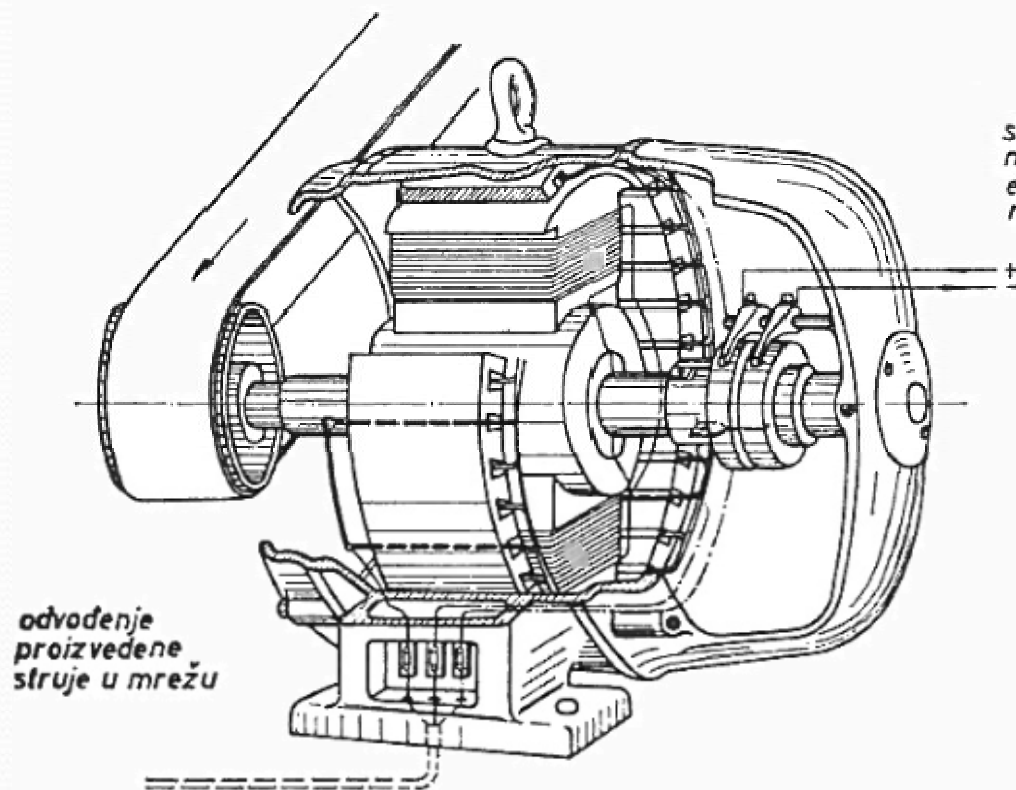
- Princip rada generatora izmjenične struje temelji se na elektromagnetskoj indukciji, gdje se mehanička energija (rotacija) pretvara u električnu energiju.
- Okretanjem vodiča (ZAVOJA) u magnetskom polju ili magneta unutar zavoja, mijenja se magnetski tok, čime se inducira izmjenični napon i struja.



PRINCIP GENERATORA IZMJENIČNE STRUJE

- Kod velikih generatora se namot na kojem se inducira struja nalazi na statoru a elektromagneti na rotoru (da se eliminira jako iskrenje na kliznim četkicama).
- Tada se proizvedena jaka struja odvodi direktno iz namota u mrežu, a preko kliznih četkica i koluta teče samo slaba struja potrebna za napajanje elektromagneta.
- Generator s jednim parom magneta trebao bi imati 3000 okr/min (50 okr/s) da bi se proizvela struja frekvencije 50 Hz.
- Koliko okretaja treba 4-polni a koliko 6-polni generator da bi stvorio izmjeničnu struju od 50 Hz?
- Kod višepolnih generatora polovi se postavljaju tako da je uz svaki magnetski pol njemu suprotan pol. To se postiže obratnim smjerom motanja svitka na susjednim polovima.

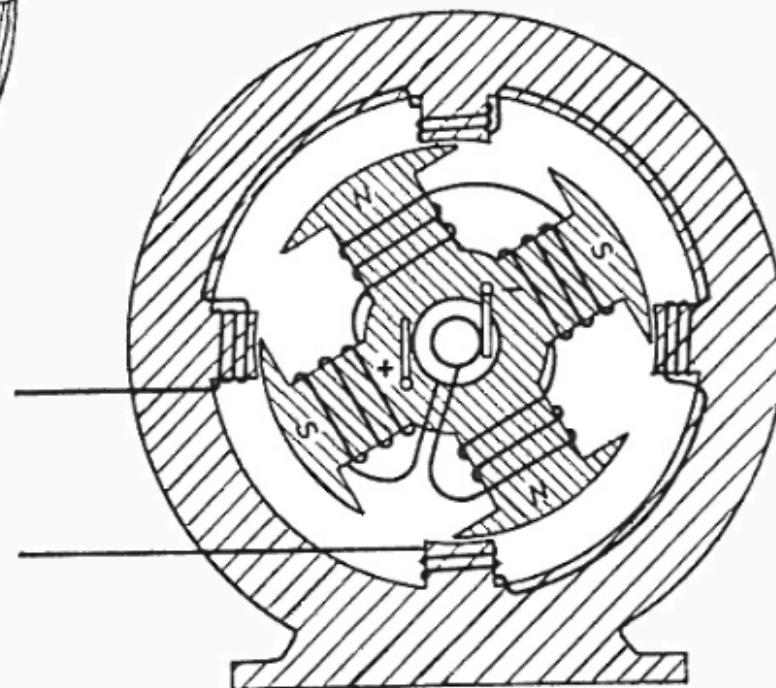
PRINCIP GENERATORA IZMJENIČNE STRUJE



odvođenje
proizvedene
struje u mrežu

struja za
napajanje
elektro-
magneta

◀ Generator
s elektromagne-
tima na
rotoru



▶ Smjer motanja namota kod
višepolnih generatora

ZADACI

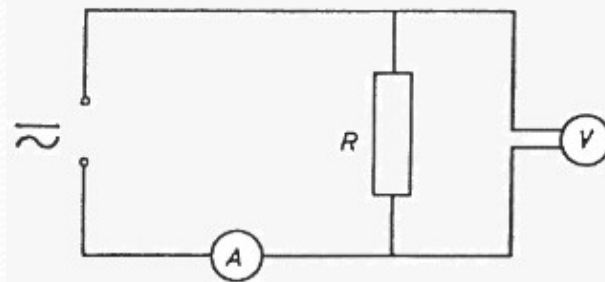
5. Kolika je kružna frekvencija izmjenične struje koja ima $16\frac{2}{3}$ periode u jednoj sekundi?
6. Koliki je efektivni napon struje čiji je maksimalni napon 165 V?
7. Koliko vremena traje jedna perioda izmjenične struje čija je frekvencija 120 kHz?
8. Kolika je trenutačna vrijednost izmjenične struje frekvencije 50 Hz nakon 0,002 sekunde od početka prve periode ako je maksimalna jakost te struje 3,5 A?
9. Nakon kojeg vremena od početka periode vrijednost struje dosegne 12 A ako je efektivna jakost struje 10 A, a frekvencija 50 Hz?
10. Kolika treba biti efektivna jakost struje frekvencije 50 Hz da bi trenutačna vrijednost nakon 0,0005 sekunde od početka periode iznosila 0,5 A?
11. Koliki je maksimalni napon ako je trenutačni napon nakon 0,003 sekunde od početka periode 180 V, a frekvencija 60 Hz?
12. Kolika je kružna frekvencija struje kojoj je maksimalna vrijednost 8 A, a trenutačna vrijednost nakon 0,001 sekunde od početka periode 6 A? Kolika je frekvencija te struje?

OTPORI U KRUGU IZMJENIČNE STRUJE

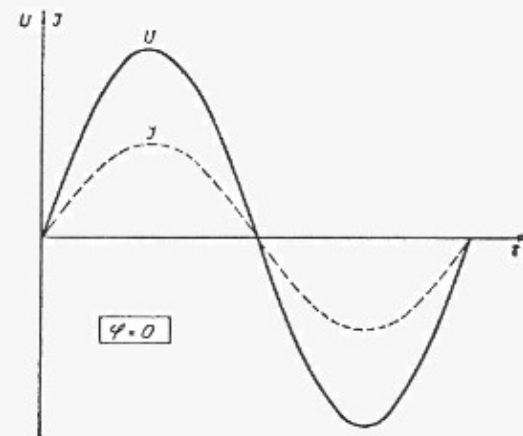
OMSKI OTPOR

- Postoje trošila čiji otpor ostaje isti i pri istosmjernoj i pri izmjeničnoj struji.
- Takav otpor zove se **omski otpor**, a trošila koja imaju samo omski otpor zovu se **omska trošila**.
- Omski otpor je otpor uzrokovan sudarima elektrona u vodiču (**radni otpor**).
- Omski otpor (R) stvarni je otpor koji pretvara električnu energiju u toplinu, neovisan o frekvenciji. Napon i struja su u fazi ($\phi=0$)

- $I=U/R$



Omsko opterećenje strujnog kruga



Promjene napona i struje pri omskom opterećenju

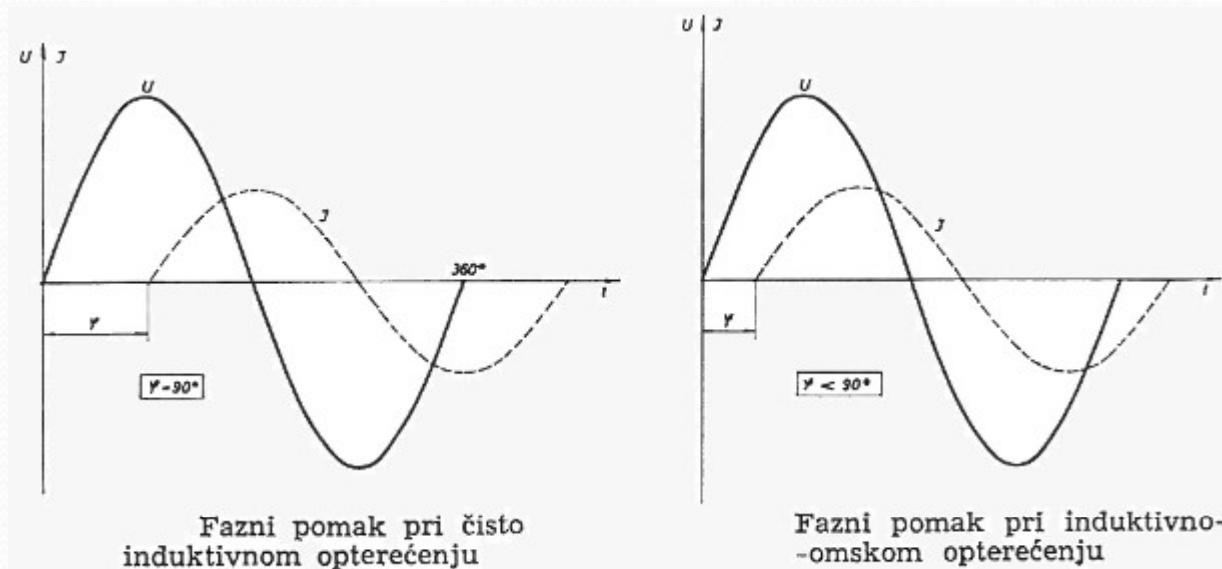
INDUKTIVNI OTPOR

- Ako bi u strujnom krugu imali svitak (zavojnicu), dali bi uz omski imali i još neki otpor čija veličina ne ovisi o materijali kroz koji struja prolazi.
- Taj otpor zove se **induktivni otpor**, a trošila koja imaju taj otpor zovu se **induktivna trošila**.
- Induktivni otpor je otpor koji nastaje uslijed samoindukcije u induktivnom trošilu.

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$$

- X_L - induktivni otpor (Ω)
 - f - frekvencija struje (Hz)
 - L - induktivitet svitka (H)
- Induktivni otpor je to veći što je veća frekvencija struje i veći induktivitet svitka.

INDUKTIVNI OTPOR – FAZNI POMAK



- Struja zaostaje za naponom zbog djelovanja elektromotorne sile samoindukcije.
- Kad svitak nebi imao omski otpor struja bi zaostajala za naponom četvrtinu periode, tj fazni pomak bio bi 90° . Budući da u svitku uvijek postoji i neki omski otpor fazni pomak je uvijek manji od 90° .
- Fazni pomak je to veći što je veći induktivni otpor, a manji omski otpor.

KAPACITIVNI OTPOR

- Ako bi u strujnom krugu imali kondenzator, tada taj kondenzator pruža izvjesni otpor.
- Taj otpor koji kondenzator pruža prolazu izmjenične struje zove se kapacitivni otpor.
- Kapacitivni otpor nastaje uslijed odbojne sile među elektronima.

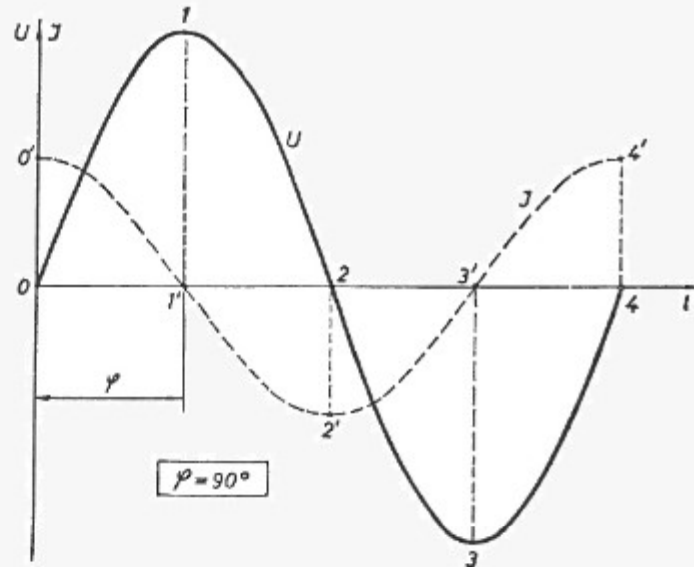
- X_c – kapacitivni otpor (Ω)
- f – frekvencija struje (Hz)
- C – kapacitet kondenzatora (F)

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

- Kapacitivni otpor je to manji što je frekvencija struje i kapacitet kondenzatora veći.

KAPACITIVNI OTPOR – FAZNI POMAK

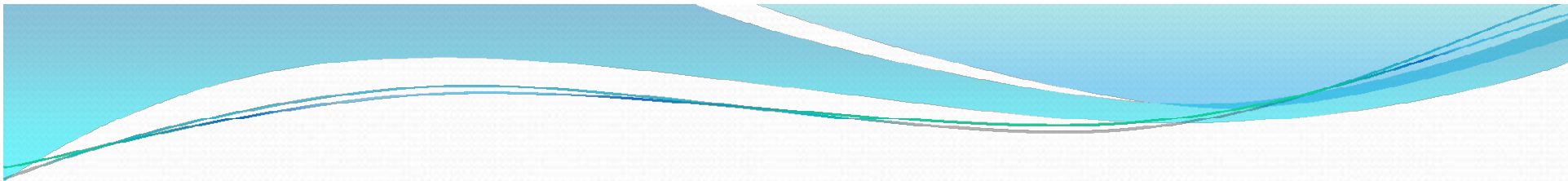
Fazni pomak pri kapacitivnom opterećenju



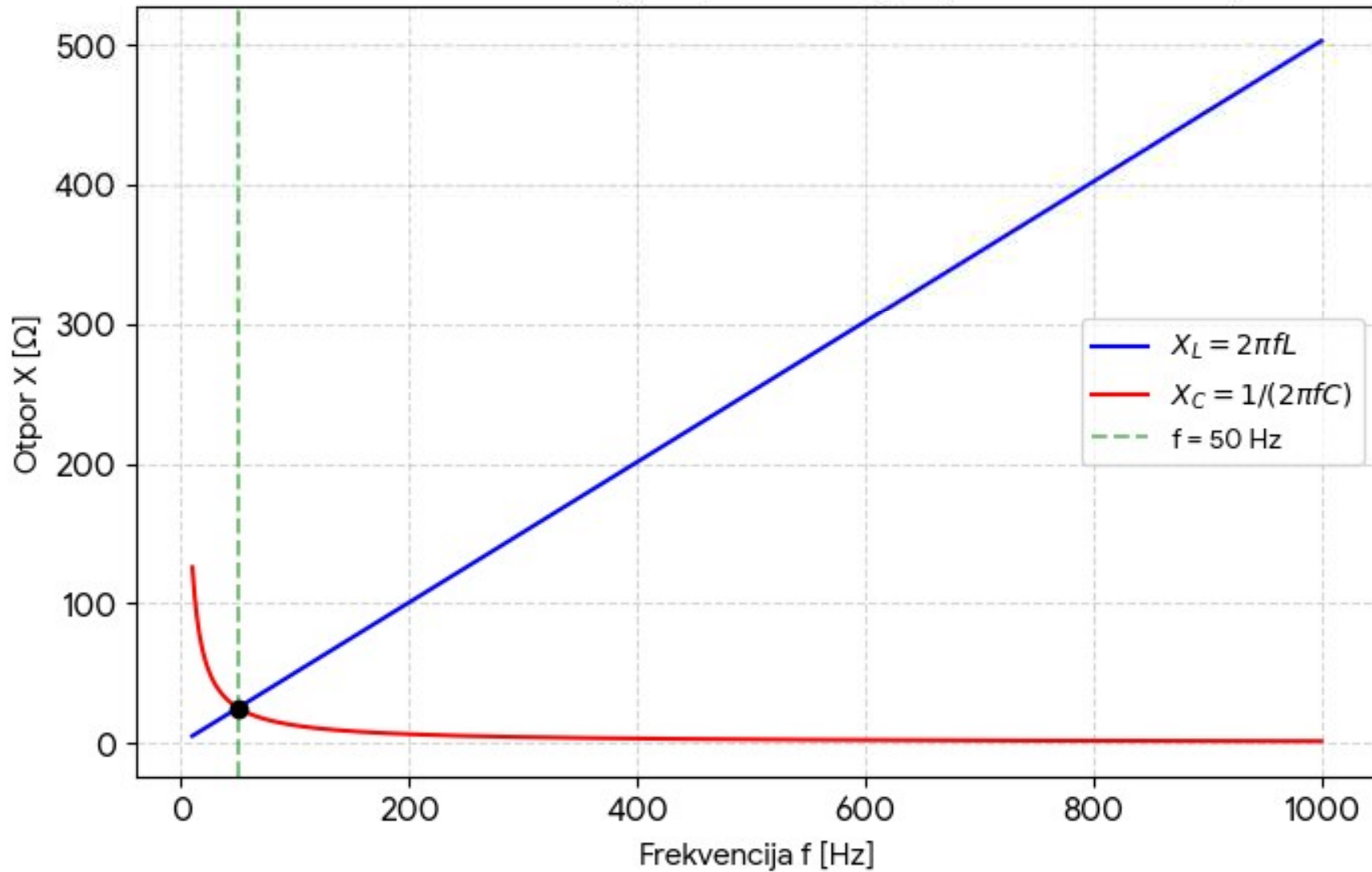
- Napon i struja u kapacitivnom otporu nisu u fazi.
- Dok je napon maksimalan, struja je jednaka nuli, i obrnuto.
- Između njih je fazni pomak četvrtina periode (90°) tako **struja pri kapacitivnom opterećenju prethodi naponu.**

ZADACI

1. Koliki je induktivni otpor svitka i kolika struja kroz njega teče ako je njegov induktivitet $0,1\text{H}$, a priključen je na izmjeničnu struju od 110V i 50 Hz ?
2. Koliki mora biti kapacitet kondenzatora da priključen na izmjeničnu struju napona 220V i frekvencije od 50Hz propušta struju jakosti 40mA ?
3. Koliki je induktivitet svitka čiji induktivni otpor pri izmjeničnoj struji frekvencije 50Hz iznosi $45\ \Omega$?
4. Koliki mora biti kapacitet kondenzatora da pri izmjeničnoj struji frekvencije 60 Hz pruža otpor od $300\ \Omega$?
5. Koliki je kapacitivni otpor koji nastaje prolazom izmjenične struje frekvencije 50Hz kroz kondenzator, čije ploče imaju površinu $0,5\text{ m}^2$ i međusobnu udaljenost $0,1\text{ mm}$, ako se između tih ploča nalazi pertinaks? ($\epsilon_r=4$, $\epsilon_0=8,854\times 10^{-12}\text{F/m}$)
6. Svitak sa 5000 zavoja nalazi se na zatvorenoj čeličnoj jezgri čiji je presjek 10 cm^2 , a srednja duljina 50 cm . Koliki je induktivni otpor toga svitka ako kroz njega teče struja od 420 mA , frekvencije 50 Hz ?
7. Koliki mora biti kapacitet kondenzatora da njegov kapacitivni otpor bude pri frekvenciji od 50Hz jednak induktivnom otporu svitka čiji je induktivitet $0,08\text{H}$?
8. Da li kapacitivni i induktivni otpor kondenzatora i svitka iz prethodnog zadatka ostaju isti i pri frekvenciji od 1000Hz ? Koliki su ti otpori pri toj frekvenciji?
9. Kolika mora biti frekvencija struje da pri prolazu kroz svitak bez jezgre, koji ima 400 zavoja, duljinu 20 cm i promjer 5 cm , izazove induktivni otpor od $5\ \Omega$?



Ovisnost induktivnog i kapacitivnog otpora o frekvenciji



ODREĐIVANJE REZULTANTNIH VELIČINA IZMJENIČNE STRUJE

- U krugu istosmjerne struje djeluju stalno samo elektromotorne sile izvora.
 - Ako u takvom krugu serijski djeluju dva ili više izvora, njihovo rezultantno djelovanje može se lagano odrediti.
 - Rezultantna elektromotorna sila se dobije algebarskim zbrajanjem pojedinih EMS-a
 - $U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$
 - Rezultantna struja se dobije algebarskim zbrajanjem pojedinih struja.
 - $I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$
- **Može li se ovo primjeniti i kod izmjenične struje?**

ODREĐIVANJE REZULTANTNIH VELIČINA IZMJENIČNE STRUJE

- U krugu izmjenične struje uz elektromotornu silu jednog ili više izvora mogu se zbog induktivnog i kapacitivnog djelovanja pojedinih elemenata strujnog kruga pojaviti i druge elektromotorne sile.
- Određivanje rezultatnog djelovanja svih EMS-a i njima pokrenutih struja otežano je jer su to veličine koje neprestano mijenjaju svoje vrijednosti.
- Uz to su često fazno pomaknute i nekad je i frekvencija različita.
- **Za sada ćemo se ograničiti samo na veličine istih frekvencija.**

ZBRAJANJE IZMJENIČNIH SINUSNIH VELIČINA

a) NAPONI U FAZI ($\varphi = 0$)

$$U = U_1 + U_2$$

b) NAPONI U PROTUFAZI ($\varphi = 180^\circ$)

$$U = U_1 - U_2$$

c) NAPONI POMAKNUTI ZA ČETVRTINU PERIODE

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$$

d) NAPONI FAZNO POMAKNUTI ZA KUT φ ($0 < \varphi < 90^\circ$)

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2\cos\varphi}$$

ZADACI

1. Koliki je rezultantni napon dvaju izmjeničnih napona od 220V i 110 V iste frekvencije?
 - a) Ako su u fazi
 - b) Ako su u protufazi
 - c) Ako su fazno pomaknuti za $\frac{1}{4}$ periode
 - d) Ako su fazno pomaknuti za 68°
2. Koliki je rezultantni napon dvaju napona od 60V i 80V ako su fazno pomaknuti za 90° ? Koliki je rezultantni napon ako je fazni pomak 75° ?
3. Dva izmjenična napona fazno su pomaknuta za 90° , a veličina jednog iznosi 150V. Koliki mora biti drugi napon da dobijemo rezultantni napon od 200V?