

Uređaji za ispitivanje elektroenergetskih uređaja



Značaj i namena laboratorija za visoki napon

- Laboratorije za visoki napon su neophodne zbog:
 - ispitivanja električnih osobina elektroenergetskih uređaja (ispitivanje prototipova ili tipska ispitivanja)
 - ispitivanja koja služe za proveravanje kvaliteta gotovih proizvoda (serijska, rutinska ili komadna ispitivanja)
 - specijalnih ispitivanja
 - Naučno-istraživačkog rada i obuke kadrova
- Najčešće primenjivani uređaji za ispitivanje opreme u laboratoriji za visoki napon
 - uređaji za dobijanje visokog napona industrijske učestanosti
 - uređaji za dobijanje visokog jednosmernog napona
 - uređaji za dobijanje udranih napona
 - uređaji za dobijanje velikih udarnih struja
 - uređaji za dobijanje visokih napona visokih učestanosti



Uređaji za dobijanje visokih napona industrijske učestanosti

- Pod naponima industrijske učestanosti podrazumevaju se naizmeni ni naponi sinusnog oblika frekvencije koja se upotrebljava u industrijske svrhe
- Ovakav napon se primenjuje kao osnovna vrsta visokog napona za ispitivanje svih vrsta dielektrika i ispitivanje gotovo svih aparata i opreme u elektrotehnici



Ispitni transformatori

- Ispitni transformatori su monofazni transformatori prilagođeni laboratorijskim ispitivanjima.
 - primarni napon od 0.22 kV do 10 kV
 - sekundarni napon od 100 kV do 750 kV
 - reaktansa rasipanja se kreće u opsegu 2 do 15 %

$$X_T = \frac{x_T(\%)}{100\%} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}$$

- veliko rasipanje je postignuto zahvaljuju i otvorenom magnetnom kolu
- u stanju su da izdrže kratak spoj na sekundarnoj relativno duže vreme



- Snaga ispitnog transformatora se određuje na osnovu kapacitivnosti objekta koji se ispituje i vrednosti ispitnog napona U_{isp}
- Kapacitivnosti ispitivanih objekata:
 - lančasti izolatori: od 35 pF do 60 pF
 - provodni izolatori: od 150 pF do 250 pF
 - strujni transformatori: od 200 pF do 400 pF
 - energetski transformatori: od 600 pF do 4000 pF
 - visokonaponski kablovi: od 150 pF/m do 300 pF/m
- Kapacitivna snaga ispitivanog objekta:

$$S_c = U \cdot I_c = U \cdot \omega C U = \omega C U^2$$

S_c - kapacitivna snaga ispitivanog objekta

I_c - kapacitivna struja koju povla i ispitivani objekt

U - ispitni napon na objektu

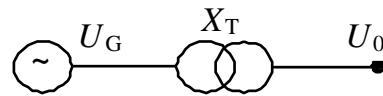
C - kapacitivnost ispitivanog objekta

ω - ugaona učestanost ispitnog napona

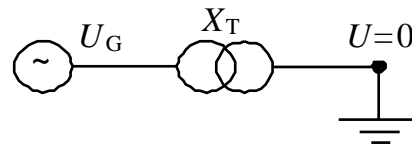


➤ Napajanje ispitnog transformatora iz generatora

- ispitni transformator u praznom hodu



- ispitni transformator u kratkom spoju



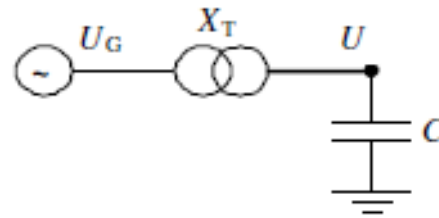
- struja i snaga ispitnog transformatora pri kratkom spoju:

$$I_k = \frac{U_0}{X}$$

$$S_k = U_0 \cdot I_k$$



- ispitni transformator kada je priključen ispitivani objekat: $U > U_0$ zbog Ferantijevoeg efekta (proticanja kapacitivne struje I_c kroz reaktansu transformatora jX_T) $U = U_0 + X_T I_c$



-struja i snaga ispitnog transformatora pri kratkom spoju:

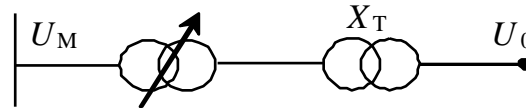
$$I_c = \omega C \cdot U \quad S_c = U \cdot I_c$$

-odnos napona pri opterećenju ispitnim objektom i napona praznog hoda:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{1}{1 - X I_c} = \frac{1}{1 - \frac{I_c}{I_k}} = \frac{1}{1 - \frac{S_c}{S_k}}$$



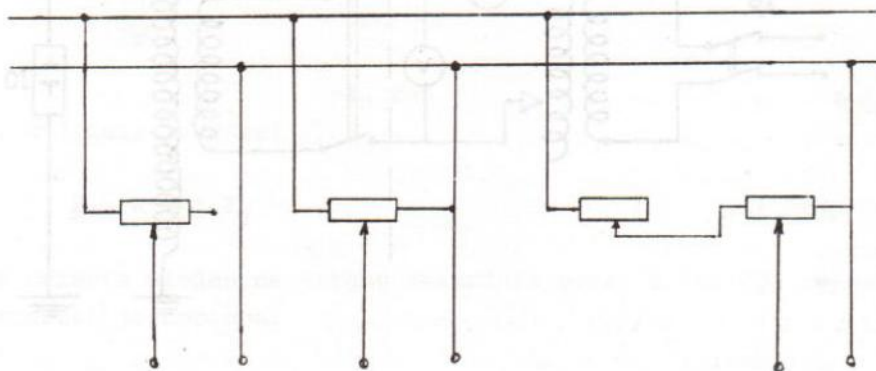
➤ Napajanje ispitnog transformatora iz mreže



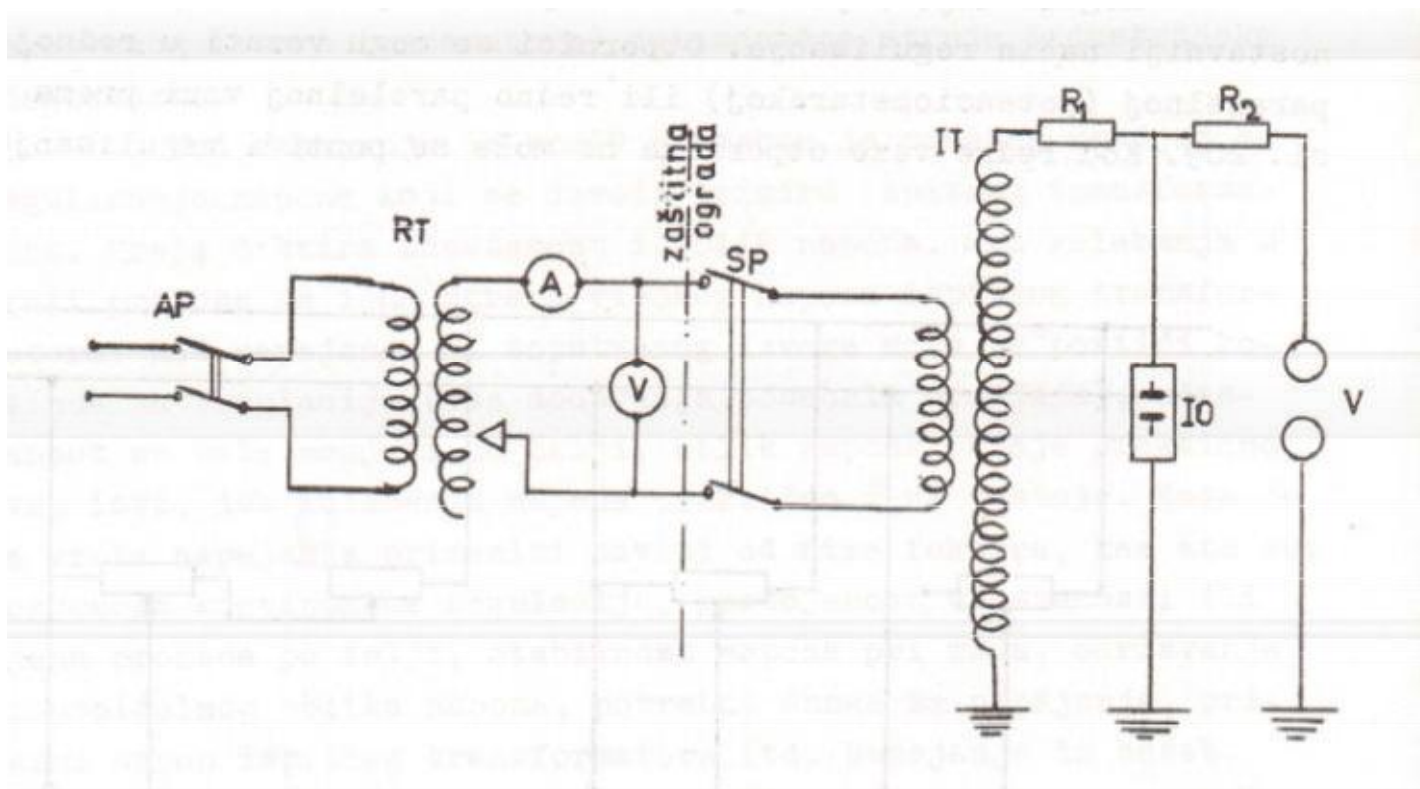
-kod napajanja ispitnog transformatora iz mreže potreban je poseban uređaj za regulisanje napona: regulacioni transformator ili otpornik

-otpornici za regulisanje napona se mogu vezati u rednoj, paralelnoj (potenciometarskoj) ili redno paralelnoj vezi

-nedostatak regulacije napona pomoću otpornika: otpor u primarnom kolu izaziva izobličenje napona pri promeni opterećenja



- Šema pri ispitivanju korišćenjem ispitnog transformatora



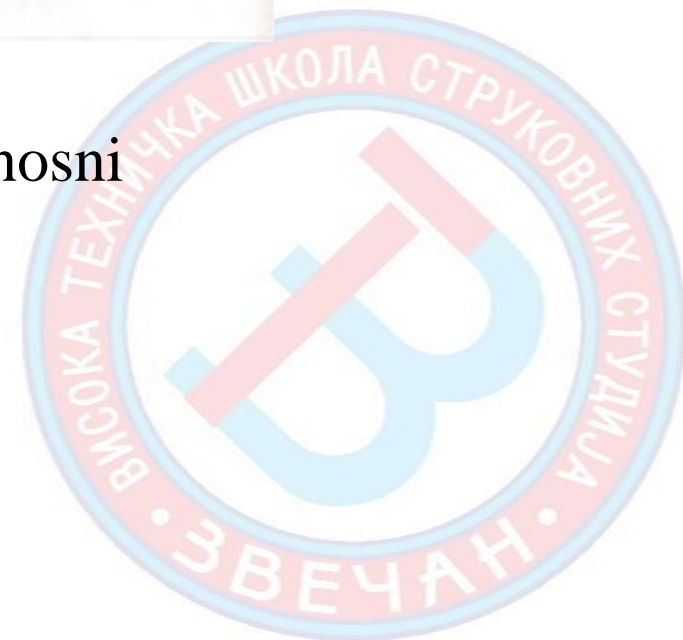
AP – automatski prekida

RT – regulacioni transformator SP – sigurnosni
prekida

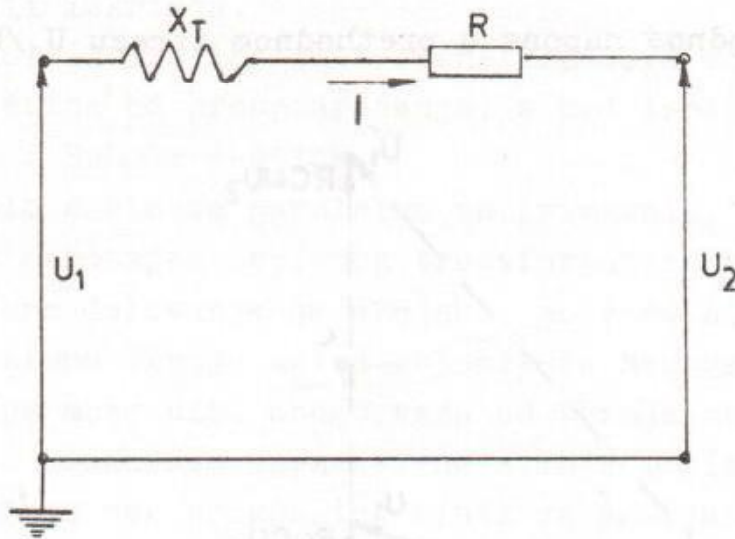
IT – ispitni transformator

V – merno sferno iskrište ili elektrostati ki
voltmetar IO – ispitivni objekat

R_1 i R_2 - otpornici



- ako reaktansa ispitnog transformatora nije dovoljna da ograniči struju kratkog spoja, ispitni transformator se štiti dodavanjem otpornika R_1



$$\underline{Z}_T = R_1 + j X_T$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \underline{Z}_T \cdot \underline{I}$$

$$\underline{I} = j\omega C \cdot \underline{U}_2$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \left((1 - X_T \omega C) + j R_1 \omega C \right)$$

$$\left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 = (1 - X_T \omega C)^2 + (R_1 \omega C)^2$$

$$R_1^2 = \frac{X_T (2 - \omega C X_T)}{\omega C}$$

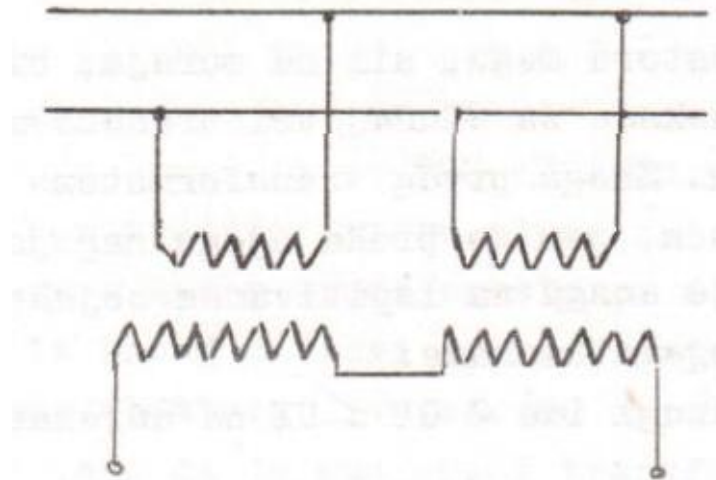
$$C < \frac{2}{\omega X_T}$$

- da bi odnos napona U_1/U_2 bio jednak 1:

- da bi prethodni izraz imao smisla:

➤ Sprege ispitnih transformatora

- sprega ispitnih transformatora primenjuje se radi dobijanja viših napona
- sprega sa izolovanim krajevima sekundarnih namotaja – za ispitivanje objekata sa izolovanim krajevima: primarni namotaji dva transformatora se vezuju u paraleli i priključeni su na izvor a sekundarni namotaji se vezuju na red čime se napon udvostručuje.

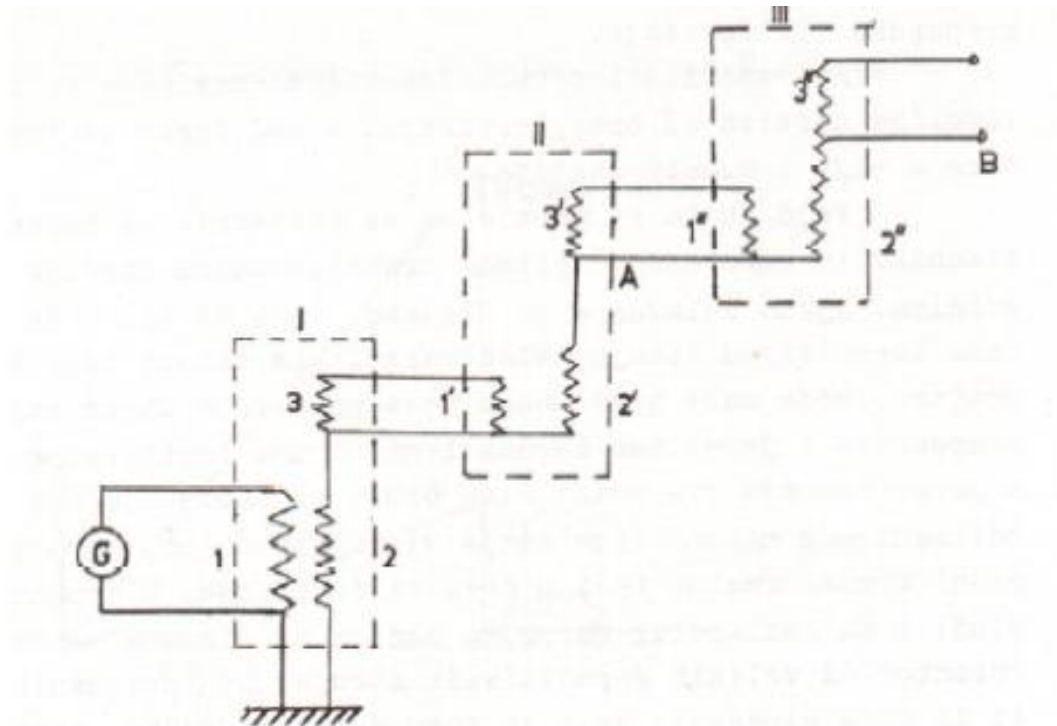


➤ Sprege ispitnih transformatora

-sprega ispitnih transformatora primenjuje se radi dobijanja viših napona

-sprega kada je jedan kraj sekundarnog namotaja uzemljen – za ispitivanje objekata čiji je jedan kraj uzemljen: naponi na sekundarnim namotajima se sabiraju, na ispitnom objektu se dobija napon nU

-instalirana snaga kaskade je $(1+2+\dots+n)UI$ a na ispitnom objektu nUI



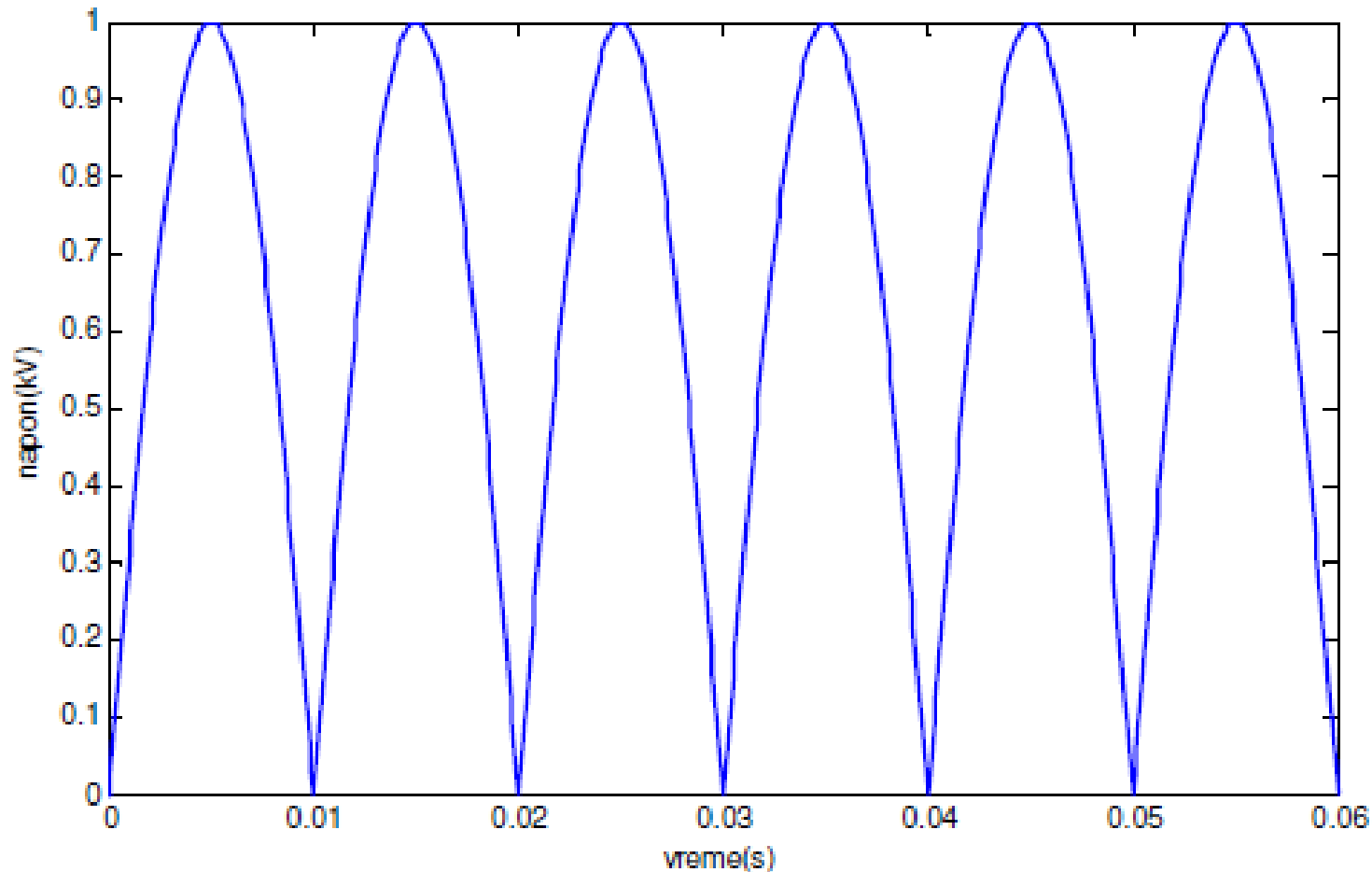
Uređaji za dobijanje visokih jednosmernih napona

- Jednosmerni napon za ispitivanje primenjuje se kod ispitivanja objekata velikih kapacitivnosti (kondenzatori, kablovi i slično)
- Visoki jednosmerni naponi se mogu dobiti:
 - ispravljanjem naizmeničnog napona industrijske učestanosti
 - sprezanjem ispravljača u kombinaciji sa kondenzatorima
 - pomoću elektrostatičkih generatora.



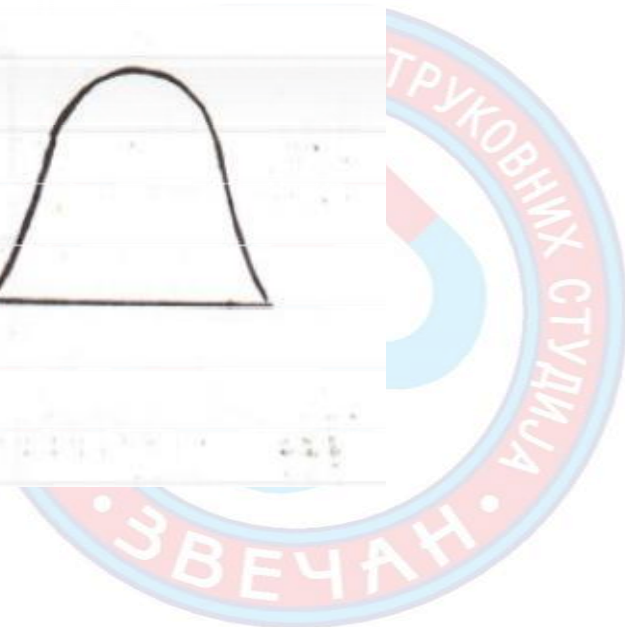
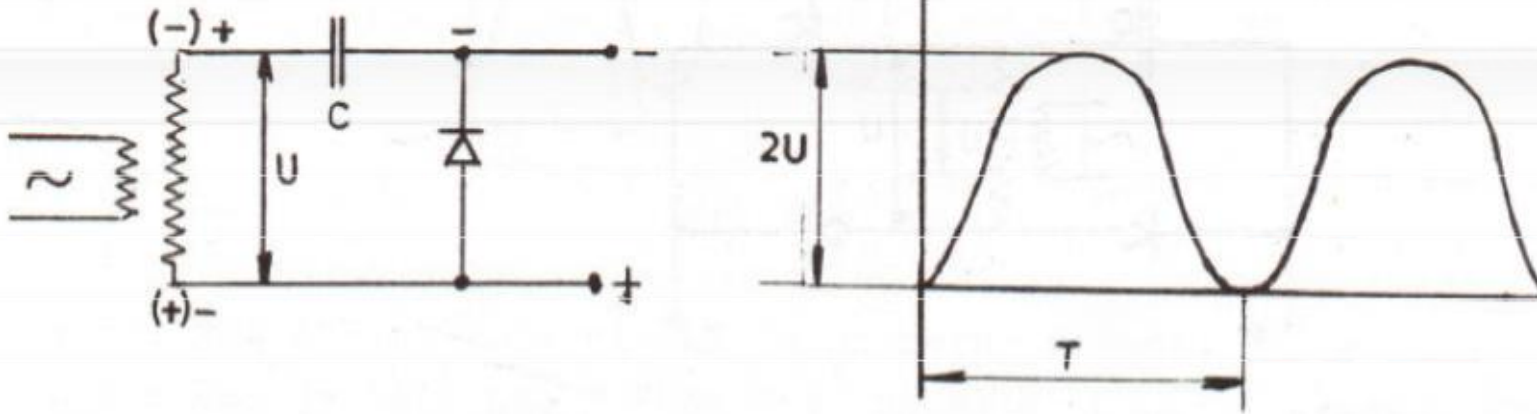
Ispravljači naizmeničnog napona u jednosmerni

- Cevni ispravljači koji rade na principu elektronske cevi, u jednoj poluperiodi propuštaju struju a drugoj ne
- Poluprovodnički ispravljači (diode i tiristori)

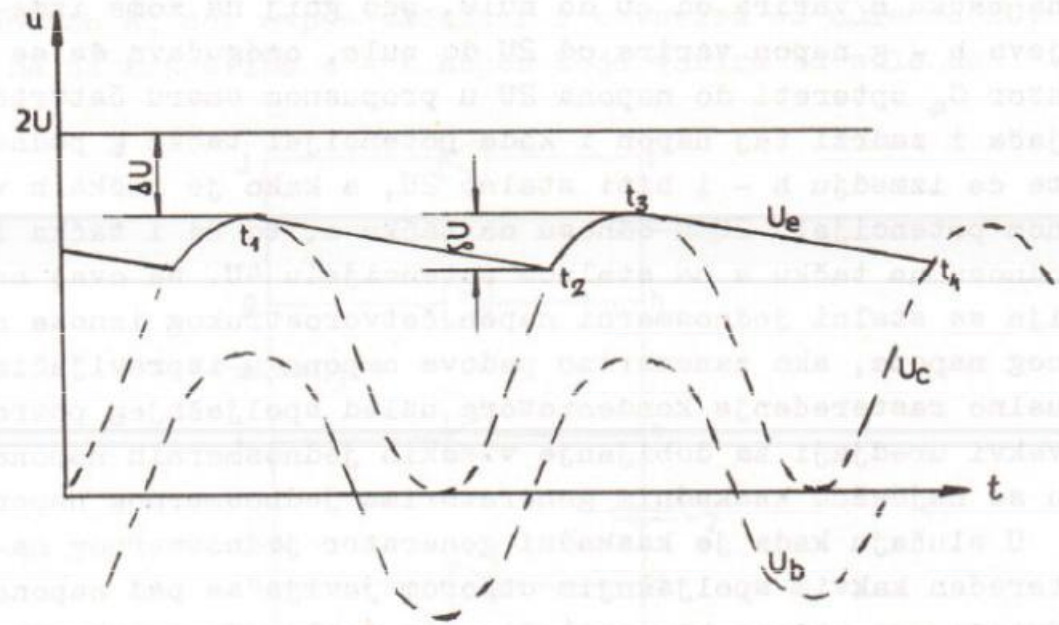
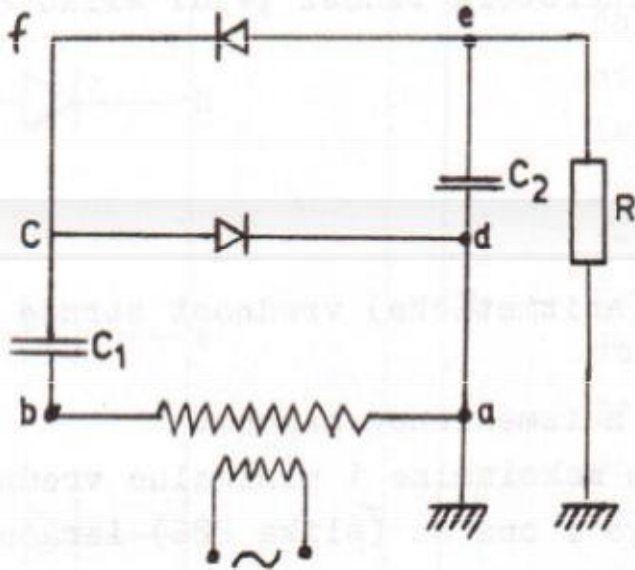


Sprezanje ispravljača u kombinaciji sa kondenzatorima

- sprega jednog ispravljača u kombinaciji sa kondenzatorom
 - u toku jedne poluperiode opterećuje se kondenzator do napona U
 - u drugoj poluperiodi sabiraju se naponi na kondenzatoru i transformatoru i dobija se pulsirajući jednosmerni napon amplitude $2U$



- jednostepeni kaskadni generator jednosmernog napona
 - u toku jedne poluperiode opterećuje se kondenzator do napona U
 - u drugoj poluperiodi sabiraju se naponi na kondenzatoru i transformatoru i dobija se jednosmerni napon amplitude $2U$ ako je kaskadni generator u praznom hodu
 - ako je kaskadni generator opterećen javlja se pad napona i pulsacije napona



- napon praznog hoda

$$U_{ph} = 2U$$

- pad napona: razlika između napona u praznom hodu $2U$ i navišeg napona pri opterećenju

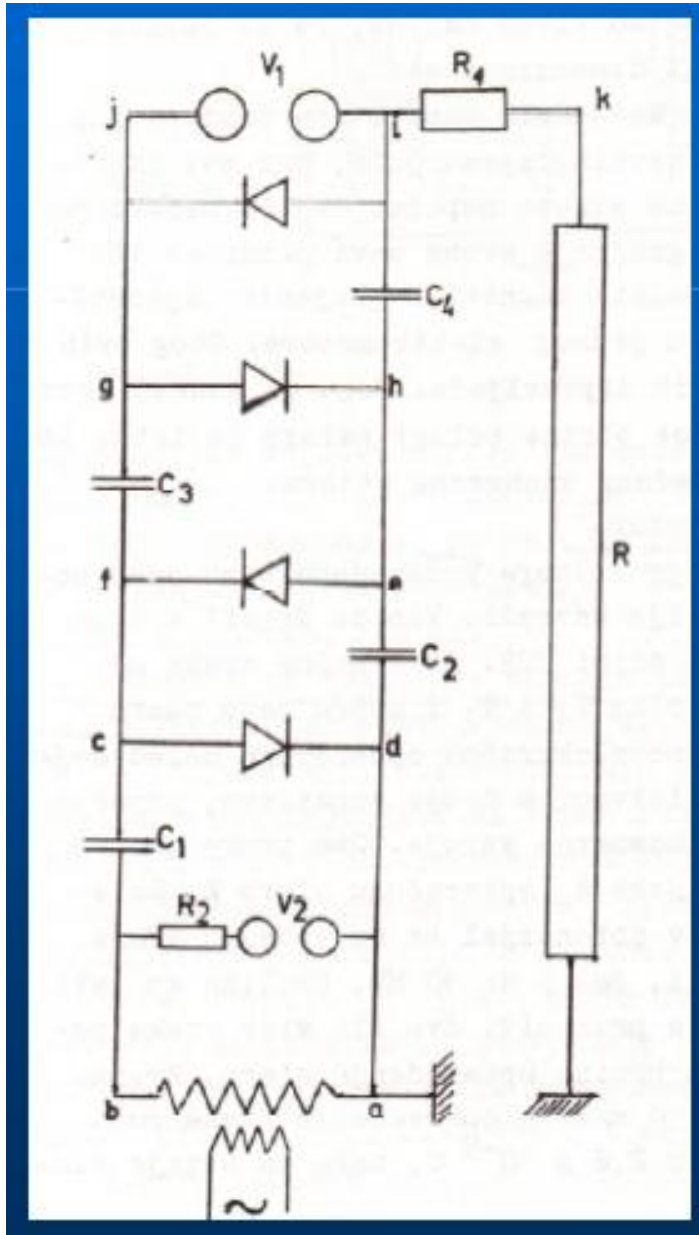
$$\Delta U = \frac{I_{sr}}{f C_1}$$

- pulsacija napona: razlika između maksimalne i minimalne vrednosti napona

$$\delta U = \frac{I_{sr}}{f C_2}$$



- višestepeni kaskadni generator jednosmernog napona



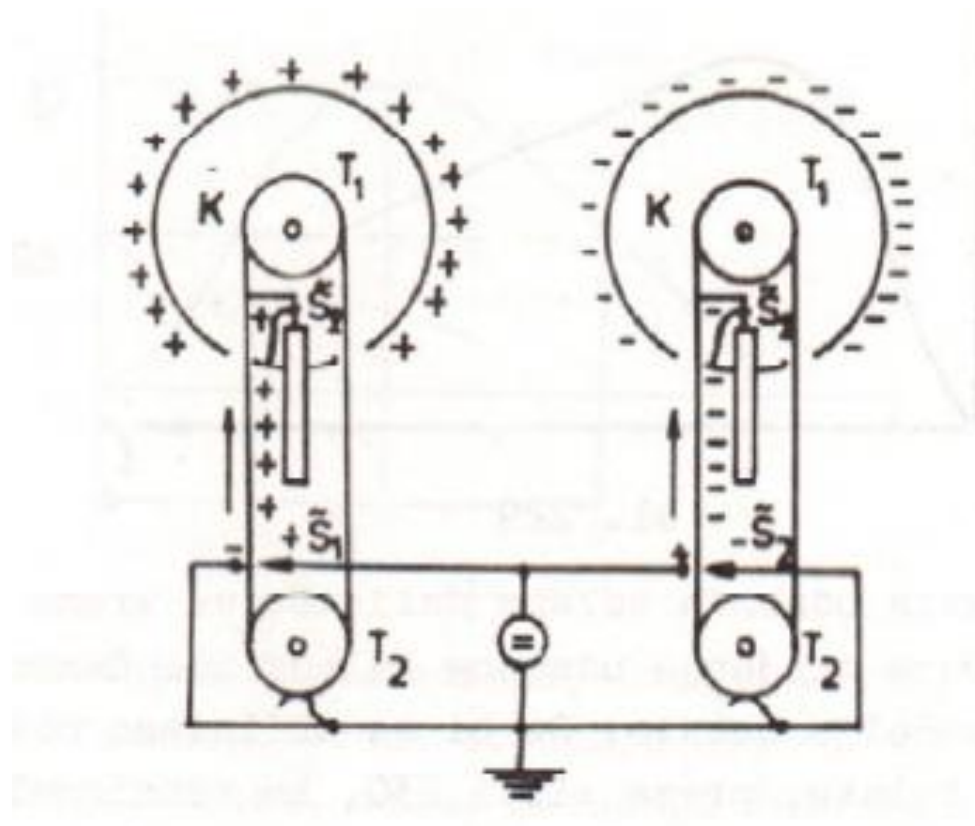
$$U_{ph} = 2nU$$

$$\Delta U = \frac{I_{sr}}{fC} \cdot \left(\frac{2}{3}n^3 + \frac{1}{2}n^2 - \frac{n}{6} \right)$$

$$\delta U = \frac{I_{sr}}{fC} \cdot \frac{n(n+1)}{2}$$



- Elektrostatički generatori –
- Van de Graaf – ov generator

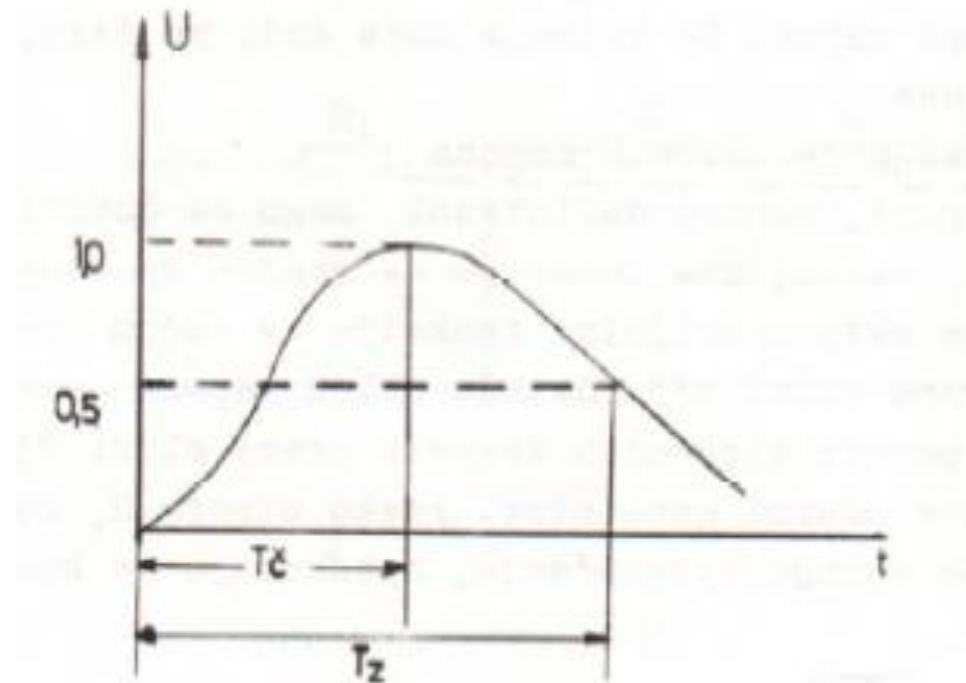
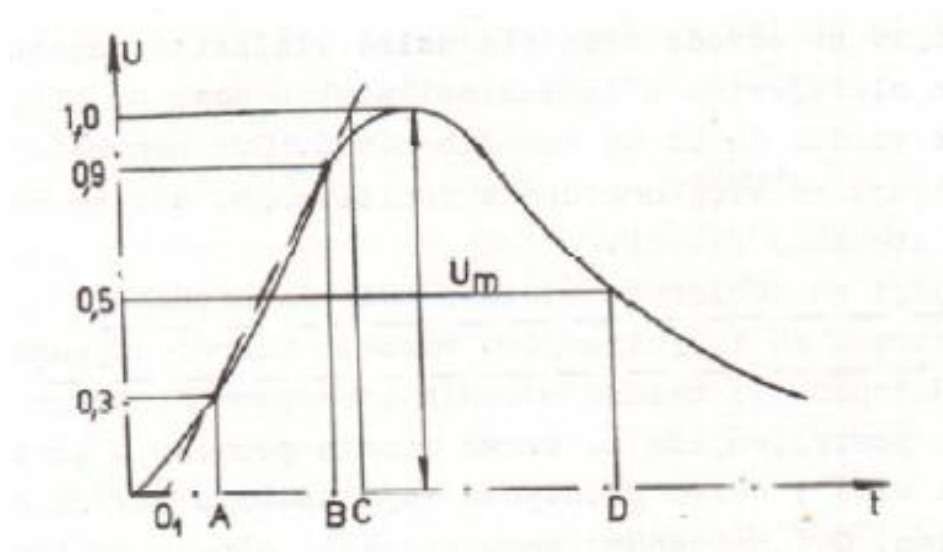


Uređaji za dobijanje visokih udarnih napona

➤ Definicije udarnih napona

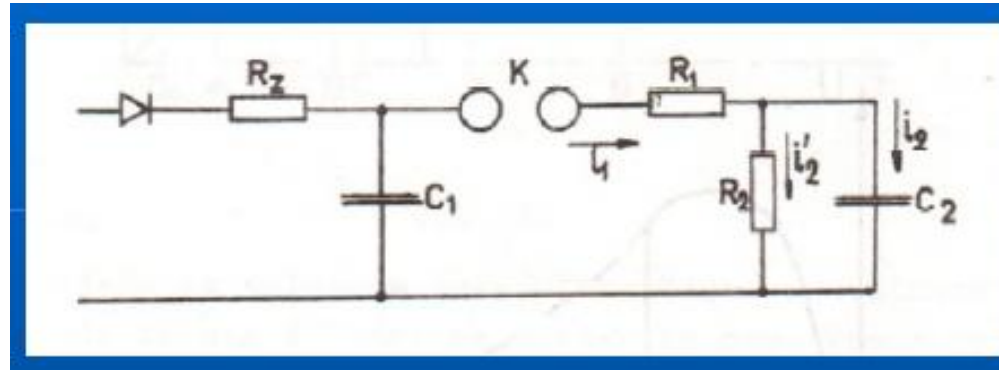
-standardni atmosferski udarni napon 1.2/50

-standardni sklopni udarni napon 250/2500



➤ Udarni naponski generator

- $C_1 \gg C_2, R_2 \gg R_1$

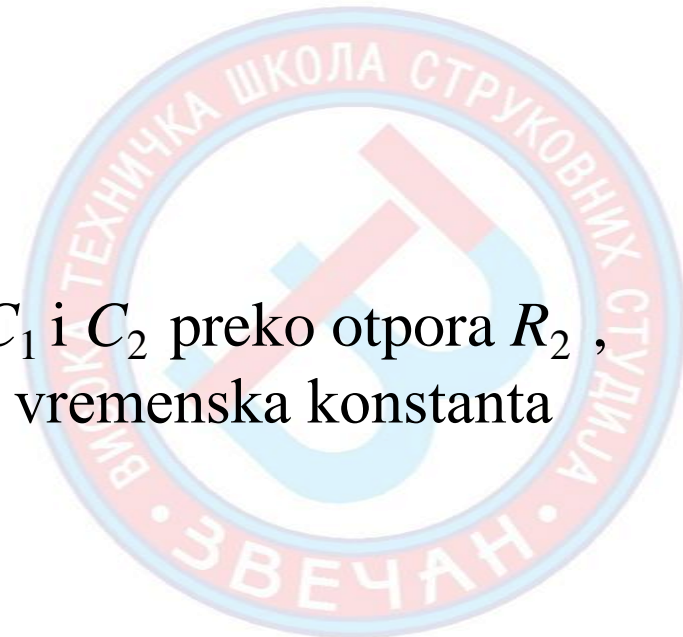


- čelo talasa definiše proces punjenja kondenzatora C_2 preko otpora R_1 , kondenzatori C_1 i C_2 se ponašaju kao da su vezani paralelno, vremenska konstanta punjenja kondenzatora C_2 je mala.

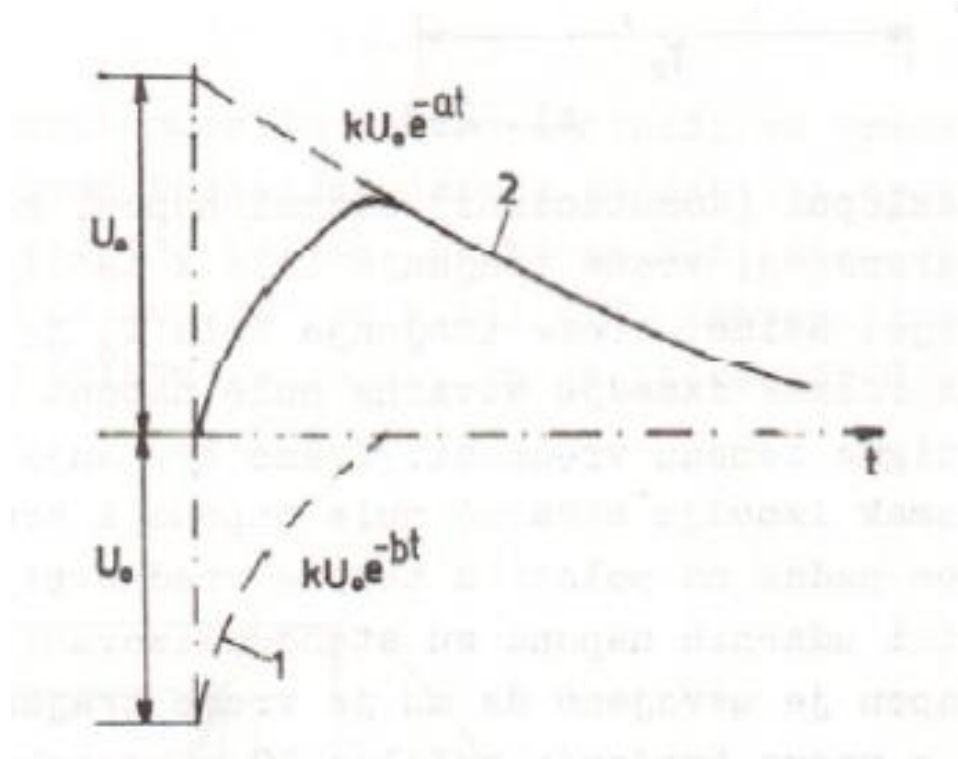
$$T_1 = R_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

- začelje talasa definiše proces pražnjenja kondenzatora C_1 i C_2 preko otpora R_2 , kondenzatori C_1 i C_2 se ponašaju kao da su vezani redno, vremenska konstanta pražnjenja kondenzatora C_1 i C_2 je velika.

$$T_2 = R_2 (C_1 + C_2)$$



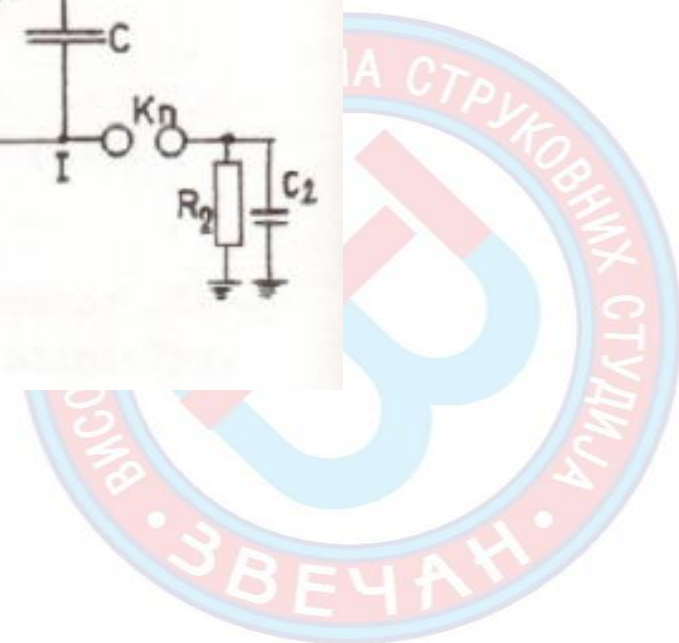
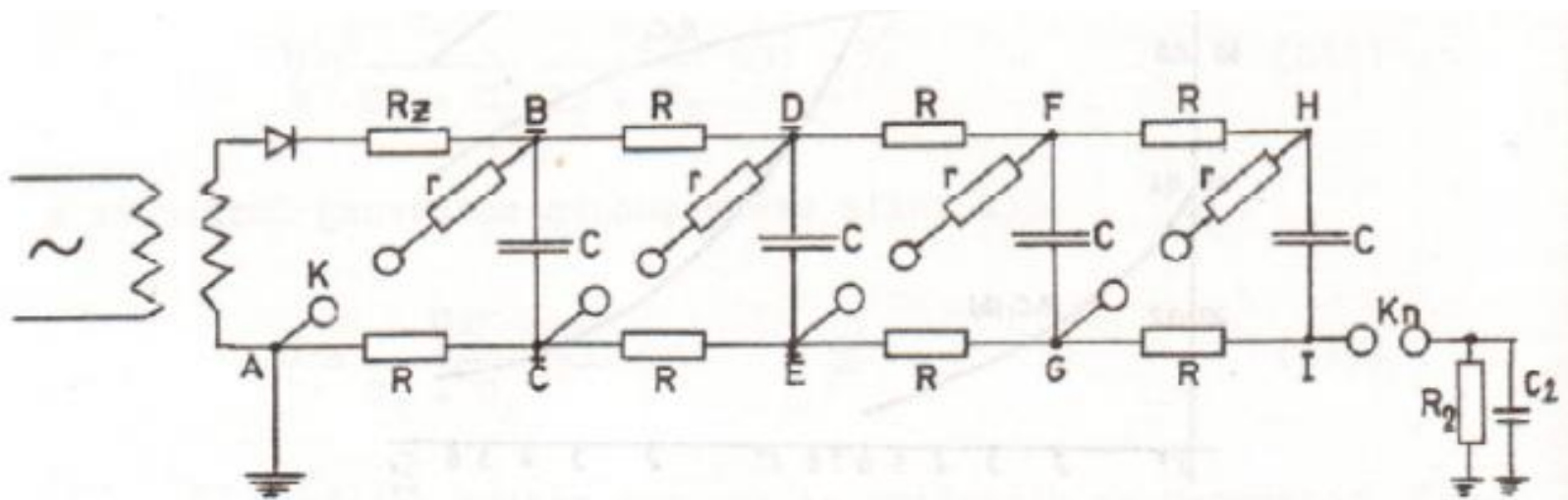
- izborom parametara C_1, C_2, R_1, R_2 podešava se vreme čela T i vreme začelja T_z



➤ Udarni naponski generator prema Marx-u

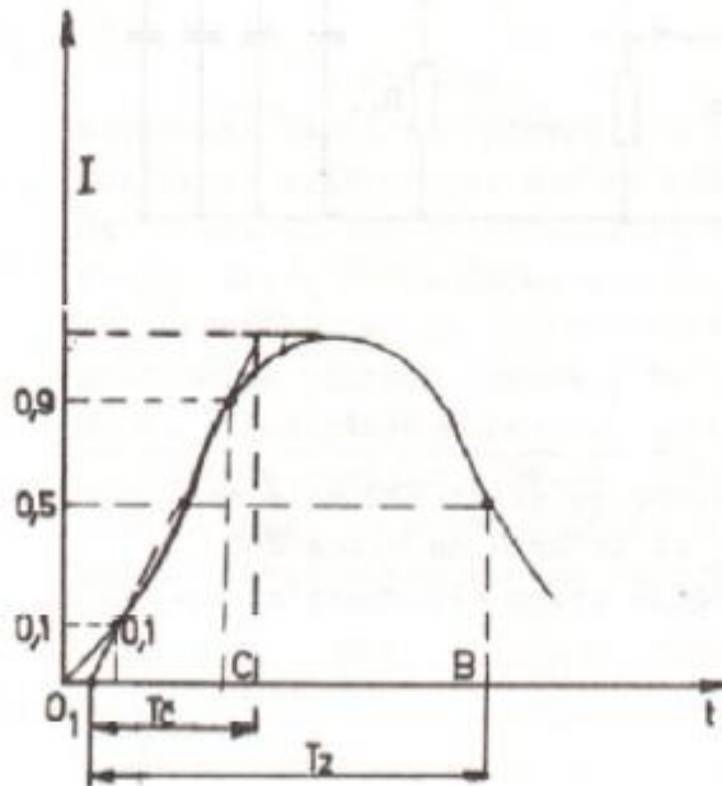
-najpre se preko ispravlja a i otpora R_z optere uju paralelno vezani kapaciteti

-preskokom na prvom iskrištu K dolazi do sukcesivnih preskoka na iskrištima dako da se kondenzatori vezuju na red i rasterećuju što dovodi do povećanja napona u tački I na $4U$ i do preskoka na izlaznom iskrištu K_n



Uređaji za dobijanje velikih udarnih struja

- Definicija udarnih struja
 - standardna udarna struja 4/10
 - standardna udarna struja 8/20



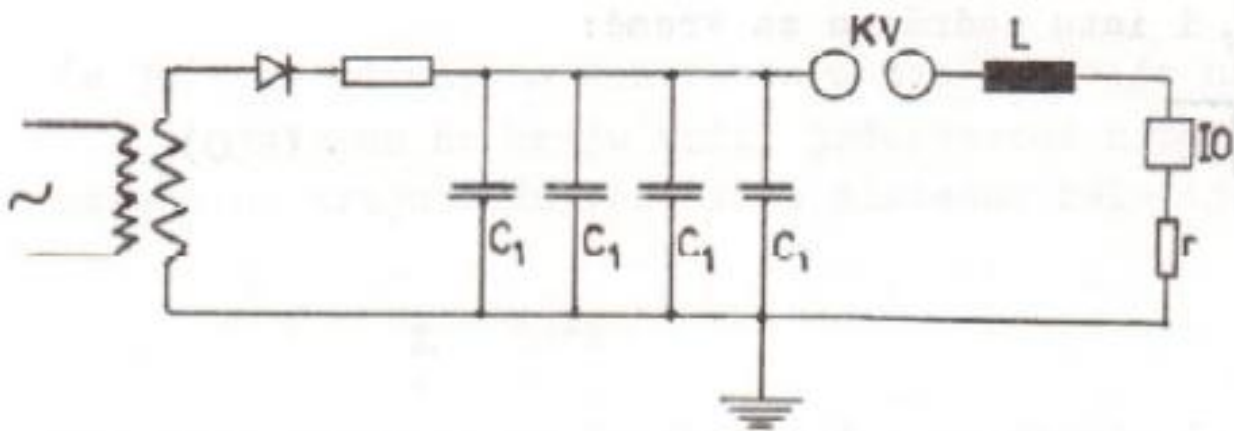
➤ Udarni strujni generator

-paralelno vezani kondenzatori C_1 se optere uju jednosmernim naponom dok ne do e do preskoka na iskrištu KV

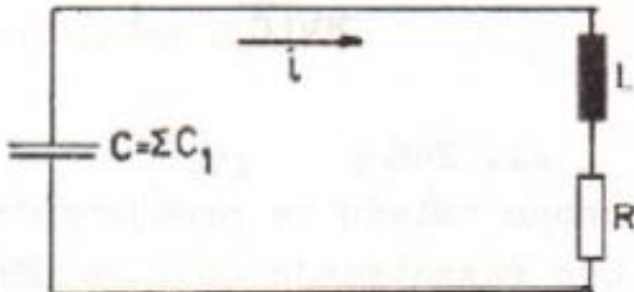
-u trenutku reagovanja iskrišta kondenzatori se rastere uju preko kola u kome se nalazi ispitivani objekat

-kolo se sastoji od otpor ispitivanog objekta IO, otpora šanta r za merenje struje i induktivnost L

-sa smanjenem L se pove ava amplituda talasa



- ekvivalentna šema nakon preskoka na iskrištu



- analitički izraz za struju

$$i(t) = \frac{U_0}{\alpha \omega L} e^{-\delta t} \sin(\alpha \omega t)$$

- sopstvena učestanost kola

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

- Koeficijent prigušenja

$$\delta = \frac{R}{\omega L}$$

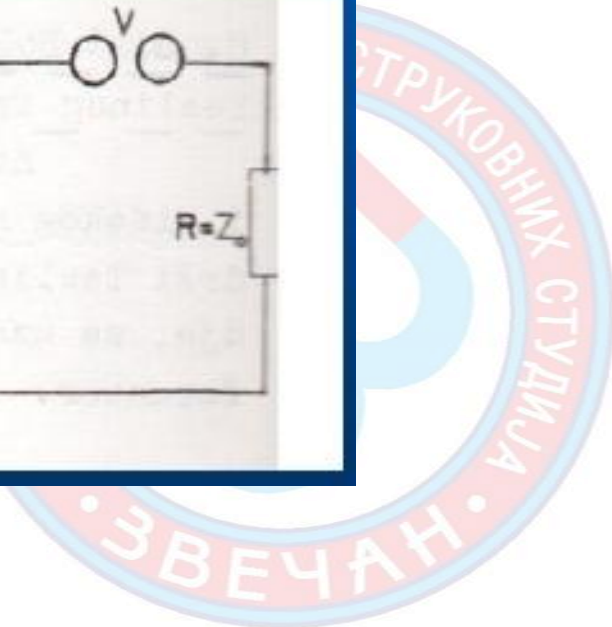
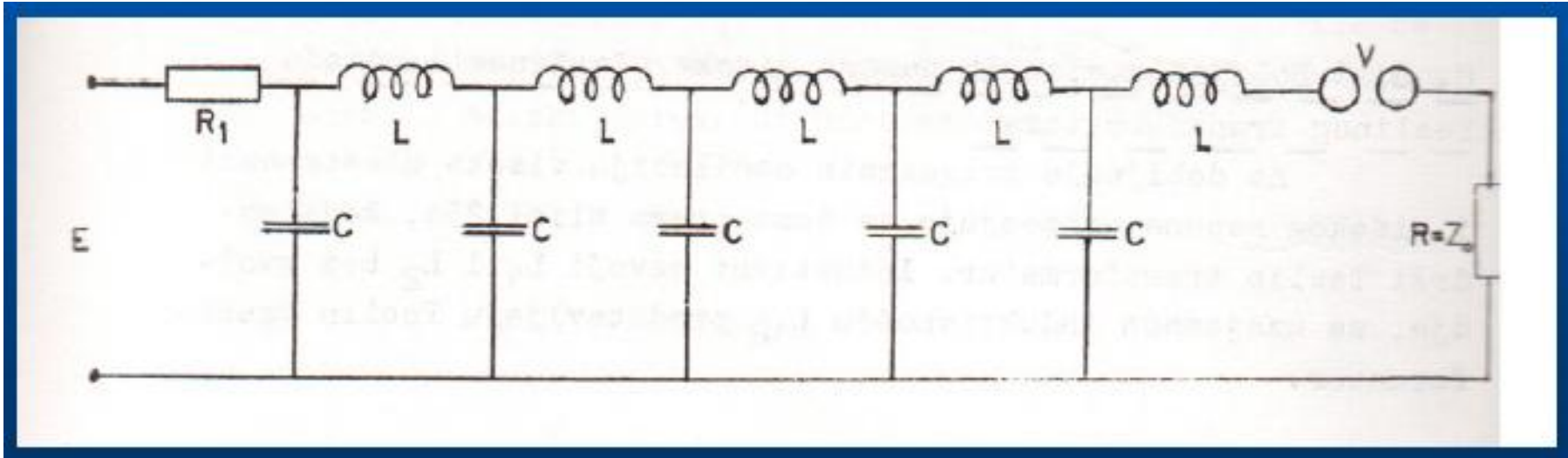
- koeficijent promene sopstvene učestanosti zbog prigušenja

$$\alpha = \sqrt{1 - \frac{\delta^2}{\omega^2}}$$

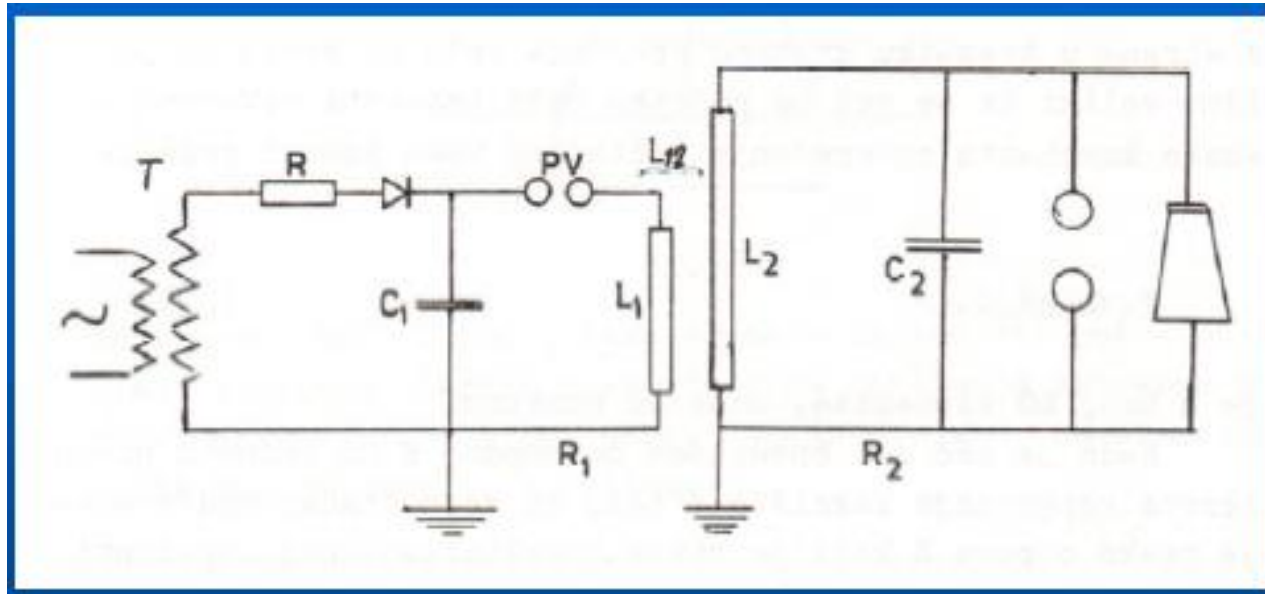


- za dobijanje udarne struje pravougaonog oblika potrebno je napraviti vešta ki vod
- vod se opterećuje preko velikog otpora R_1 dok ne do e do preskoka na svernom iskrištu V, kada se vod rasterećuje preko otpora $R=Z_0$
- amplituda i trajanje pravougaone struje:

$$I_m = \frac{E}{2R} \qquad T = 2n\sqrt{LC}$$



Dobijanje visokih napona visokih učestanosti pomoću Teslinog transformatora

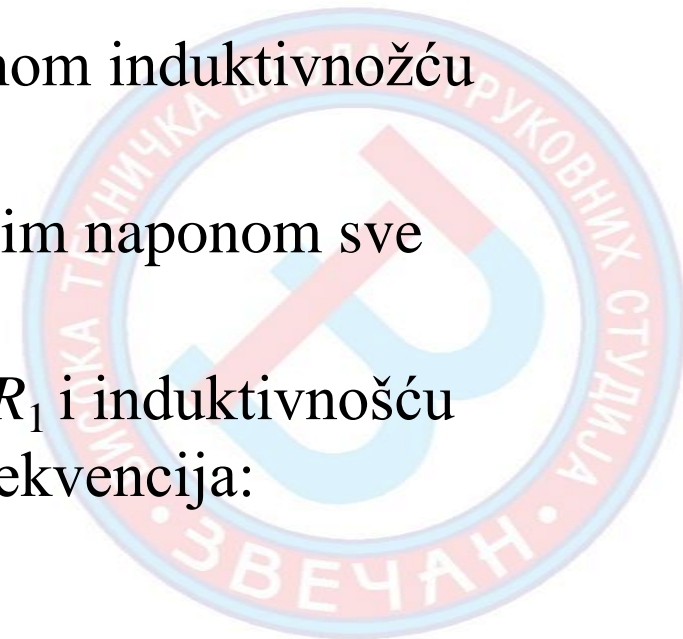


-induktivni navoji L_1 i L_2 bez gvožđa, sa međusobnom induktivnošću L_{12} predstavljaju Teslin transformator

-ispravljač opterećuje kondenzator C_1 jednosmernim naponom sve dok ne dođe do preskoka na iskrištu PV

-kondenzator C_1 se rasterećuje u kolu sa otporom R_1 i induktivnošću L_1 , pri čemu nastaju prigušene oscilacije čija je frekvencija:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$$



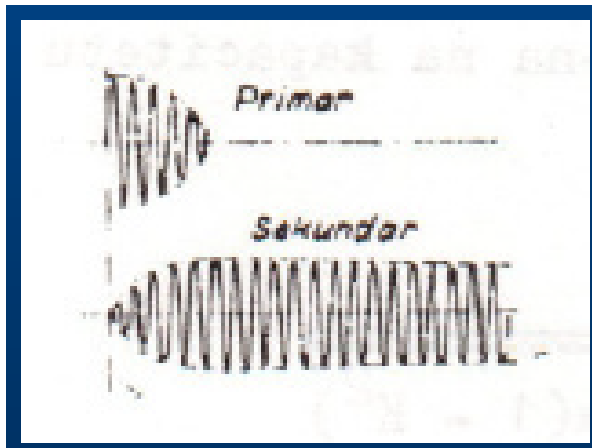
- deo fluksa primarnog namotaja prolazi kroz sekundarni namotaj u kome se javljaju jake oscilacije ako je sopstvena učestanost sekundarnog kola bliska učestanosti primarnog kola:

$$f_2 = f_1, \quad f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}$$

- karakter oscilacija u sekundarnom kolu zavisi od koeficijenta sprege:

$$K = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

- mali koeficijent sprege



- veliki koeficijent sprege

