

## Deo II

# Oprema laboratorija za visoki napon



# Poglavlje 4

## Namena laboratorija za visoki napon

U elektroenergetskim mrežama koje rade sa određenim pogonskim naponom povremeno se pojavljuju naponi usled različitih uzroka koji su viši od trajno dozvoljenih radnih napona. U laboratorijama za visoki napon se vrše ispitivanja sposobnosti izolacije različite opreme na podnošenje visokih napona, koji su po pravilu viši od radnih napona kojima je ispitivana izolacija izložena u normalnom pogonu i koji simuliraju određene tipove prenapona.

Laboratorije za visoki napon se dele prema svojoj ulozi na sledeće grupe:

- naučno-istraživačke i razvojne laboratorije,
- laboratorije za visoki napon pri univerzitetima koje služe za edukativne svrhe,
- nezavisne laboratorije za visoki napon za tipska ispitivanja opreme,
- fabričke laboratorije za serijska ispitivanja koja služe za proveravanje kvaliteta gotovih proizvoda, polufabrikata ili materijala u nekoj od proizvodnih faza.

Tipska ispitivanja se sastoje iz niza ispitnih procedura na jednom ili više uzoraka, čiji se broj definiše standardima. Smatra se da ako su uzorci proizvoda uspešno prošli sve složene procedure tipskog ispitivanja i time zadovoljili uslove kvaliteta, tada će i svaki komad iz serije zadovoljiti uslove kvaliteta.

Serijska ispitivanja se vrše na svakom komadu gotovog proizvoda ili poluproizvoda u cilju eliminisanja neispravnih elemenata. U fabričkim laboratorijama se takodje vrše

završna ispitivanja opreme, a kada kupac zahteva, vrše se prijemna ispitivanja opreme u prisustvu kupca.

Najčešće se u visokonaponskim laboratorijama obavljaju poslovi iz više od jedne oblasti. Na primer, po pravilu su naučno istraživačke i razvojne laboratorije ujedno i laboratorije koje služe za edukativne svrhe.

U proizvodnim pogonima proizvođača visokonaponske opreme po pravilu se nalaze ispitne stanice u kojima se vrši završno ispitivanje opreme i prijemno ispitivanje ukoliko kupac to zahteva. Takođe se u fabričkim ispitnim stanicama vrše razvojna ispitivanja novih proizvoda u cilju provere kvaliteta pre nego što se proizvod pošalje na tipsko ispitivanje u nezavisnu laboratoriju

Da bi oprema dobila potvrdu o kvalitetu, neophodno je da se ispitivanje izvrši u nezavisnoj laboratoriji, što zahteva transport opreme koji može biti veoma složen i skup u slučaju opreme velikog gabarita, kao što su na primer energetske transformatori velikih snaga.

Ponekad se dozvoljava da se neka od tipskih ispitivanja izvrše u fabričkoj laboratoriji koja zadovoljava sve potrebne tehničke uslove i ima odgovarajuće sertifikate za sve ispitne uređaje, uz prisustvo nezavisnog ovlašćenog eksperta od strane nezavisne laboratorije koji daje mišljenje o ispunjenosti uslova i izdaje izveštaj o izvršenom ispitivanju.

U laboratorijama za visoki napon nalaze se uređaji za proizvodnju visokih napona različitog talasnog oblika, kao i uređaji za generisanje struja velikih amplituda koji služe za simulaciju struja koje nastaju pri delovanju atmosferskih i sklopnih prenapona. U visokonaponskim laboratorijama strujna ispitivanja u najvećem broju slučajeva služe za ispitivanje odvodnika prenapona. U laboratorijama za visoki napon proizvode se sledeće vrste napona:

- visoki napon industrijske učestanosti,
- visoki jednosmerni napon,
- velike udarne struje,
- visoki naponi visoke učestanosti.

# Poglavlje 5

## Dobijanje visokih naizmeničnih napona

### 5.1 Visokonaponski ispitni transformatori

Pod naponom industrijske učestanosti podrazumeva se naizmenični napon sinusnog oblika industrijske učestanosti (u Evropi 50 Hz). Ovakav napon se primenjuje kao osnovna vrsta visokog napona za ispitivanje izolacije. Za dobijanje visokih napona industrijske učestanosti se koriste ispitni transformatori. To su najčešće monofazni transformatori specijalnog izvodjenja, sa izlaznim naponom u opsegu od nekoliko kV do najviše 750 kV. Primarni napon se reguliše u širokom opsegu da bi se dobio izlazni napon određene visine prema zemlji.

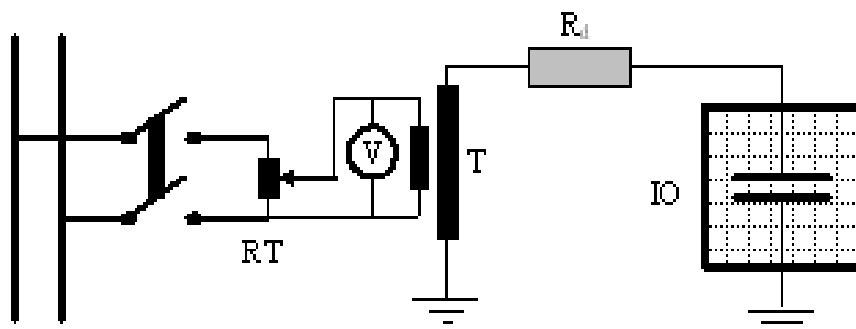
Napajanje ispitnog transformatora se može vršiti na dva načina:

- Iz mreže napona preko regulacionog transformatora
- Preko motor-generatorske grupe.

Na slici 5.1 prikazana je šema napajanja iz mreže, a na slici 5.2 iz motor-generatorske grupe.

Na slikama 5.1 i 5.2 i oznake imaju sledeće značenje:

*RT* regulacioni transformator,



Slika 5.1: Šema napajanja iz mreže preko regulacionog transformatora

$V$  voltmetar na primarnoj strani ispitnog transformatora koji meri napon napajanja,

$T$  ispitni transformator,

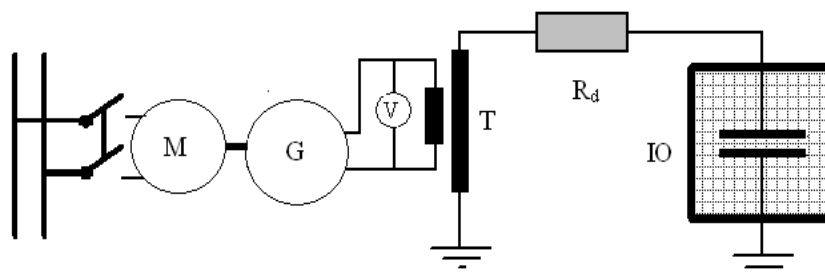
$R_d$  zaštitni otpornik čija je uloga da ograniči struju ako dodje do kvara na objektu ispitivanja, odnosno do kratkog spoja,

$IO$  objekat ispitivanja,

$M$  motor za pokretanje generatora,

$G$  sinhroni generator čijom se promenom pobude menja napon napajanja ispitnog transformatora.

Po pravilu objekat ispitivanja ima kapacitivnu impedansu, mada ima slučajeva kada to nije tako, kao na primer ispitivanje transformatora indukovanim naponom povišene



Slika 5.2: Šema napajanja iz motor-generatorске grupe

frekvencije, kada objekat ispitivanja ima induktivnu prirodu, ili ispitivanje zagađene izolacije na kiši kada objekat ispitivanja pored kapacitivne ima značajnu i omsku komponentu impedanse prema zemlji.

Jeftinije i jednostavnije rešenje je napajanje iz mreže i regulisanje napona pomoću regulacionog transformatora. Mana ovog rešenja je što se sve fluktuacije i nepravilnosti u obliku napona sa primarne strane prenose na sekundarnu stranu, odnosno ispitni napon. Značajna prednost napajanja preko motor-generatorske grupe je što se na ovaj način može vršiti ispitivanje transformatora indukovanim naponom, kada se napajanje transformatora vrši povišenom frekvencijom koja indukuje elektromotornu silu srazmernu frekvenciji koja napreže izolaciju izmedju navojaka.

Ispitni transformatori se mogu praviti sa povećanom rasipnom reaktansom u cilju smanjenja struje prilikom kratkog spoja na objektu ispitivanja.

Snaga ispitnih transformatora određuje se u zavisnosti od kapaciteta objekta koji se ispituje. Veličina kapaciteta ispitivanog objekta utiče i na visinu napona na visokonaponskoj strani. Kapaciteti ispitivanih pojedinih ispitnih objekata imaju orijentacione vrednosti prema sledećoj listi:

- kapasti izolatori od 35 do 60 pF po članku,
- prolazni izolatori od 150 do 250 pF,
- strujni transformatori od 200 do 400 pF,
- energetske transformatori od 600 do 15000 pF,
- visokonaponski kablovi od 150 do 300 pF/m.

Prilikom određivanja potrebne snage ispitnog transformatora treba znati približnu vrednost kapaciteta ispitivanog objekta.

Kapacitivna snaga koju uzima ispitivani objekat iznosi:

$$S_c = U_{isp} I_c = \omega C U_{isp}^2 \quad (5.1)$$

gde su:

$S_c$  kapacitivna snaga ispitivanog objekta,

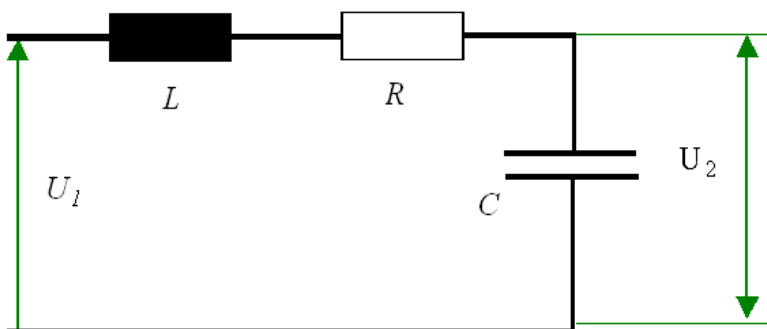
$I_c$  kapacitivna struja koju povlači ispitivani objekat,

$U_{isp}$  ispitni napon na objektu,

$C$  kapacitet ispitivanog objekta,

$\omega$  ugaona učestanost ispitnog napona

Zamenska šema napajanja ispitnog transformatora prikazana je na slici 5.3. Oznake



Slika 5.3: Šema napajanje ispitnog transformatora

na slici 5.3 imaju sledeće značenje:

$U_1$  napon napajanja iz generatora ili na izlazu iz regulacionog transformatora, koji se meri pomocu voltmetra  $V$ ,

$L$  ukupna induktivnost rasipanja primara i sekundara ispitnog transformatora,

$R$  ukupna otpornost namotaja i otpornost zaštitnog otpornika,

$C$  kapacitivnost ispitnog objekta,

$U_2$  ispitni napon na objektu ispitivanja,

$I_c$  kapacitivna struja koju povlači kapacitivnost ispitnog objekta.

Reaktansa rasipanja ispitnog transformatora je:

$$X_T = \omega L \quad (5.2)$$

Ukupna otpornost zajedno sa otpornošću dodatnog otpornika je:

$$R = R_T + R_d \quad (5.3)$$

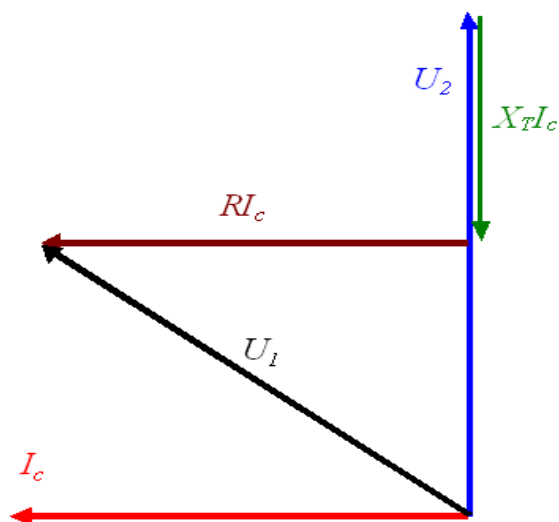
gde je:



$R_T$  otpornost namotaja ispitnog transformatora,

$R_d$  otpornost dodatnog zaštitnog otpornika.

Na slici 5.4 prikazan je vektorski dijagram napona i struja na osnovu zamenske šeme. Ukupna redna impedansa između ulaza na primaru i izlaza na sekundaru prema slici 5.3



Slika 5.4: Vektorski dijagram napona i struja pri radu ispitnog transformatora

data je izrazom:

$$\underline{Z} = R + jX_T \quad (5.4)$$

Napon primara sveden na stranu sekundara prema slici 5.4 može se dati izrazom:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \underline{Z}\underline{I}_c \quad (5.5)$$

Struja kroz ispitivani objekat je:

$$\underline{I}_c = j\omega C\underline{U}_2 \quad (5.6)$$

Ako se usvoji da je vektor struje  $\underline{I}_c$  horizontalan, orijentisan na levo, tada je vektor napona  $\underline{U}_2$  vertikalno orijentisan na više. Od vektora struje  $\underline{U}_2$  oduzima se vektor induktivnog pada napona  $\underline{X}_T\underline{I}_c$ . Ukoliko ne bi bilo uopšte omskih gubitaka, napon  $\underline{U}_2$  bi se dobio kao:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 - \underline{X}_T\underline{I}_c \quad (5.7)$$

Ako u kolu postoje omski otpori, odnos primarnog i sekundarnog napona se određuje na osnovu sledećeg izraza:

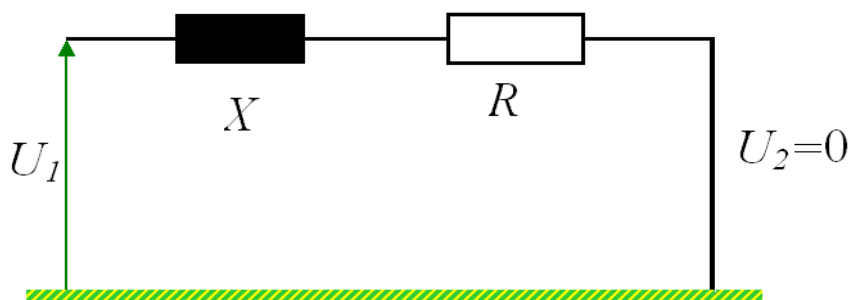
$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2[(1 - X_T C\omega) + jRC\omega] \quad (5.8)$$

Sa slike 5.4 i iz izraza 5.7 se vidi da napon  $U_1$  može biti veći, manji ili jednak naponu  $U_2$ , u zavisnosti od vrednosti  $R$  i  $X_t$ . Odnos napona  $U_1/U_2$  određuje se sledećim izrazom:

$$\left\{\frac{U_1}{U_2}\right\}^2 = (1 - X_T C\omega)^2 + R^2 C^2 \omega^2 \quad (5.9)$$

Vrednost otpora  $R_d$  određena je uslovom do koje se vrednosti želi da ograniči struja kratkog spoja pri probouju ili preskoku na strani visokog napona.

Struja kratkog spoja se određuje na osnovu šeme sa slike 5.5: Izraz za struju kratkog



Slika 5.5: Zamenska šema za određivanje struje kratkog spoja

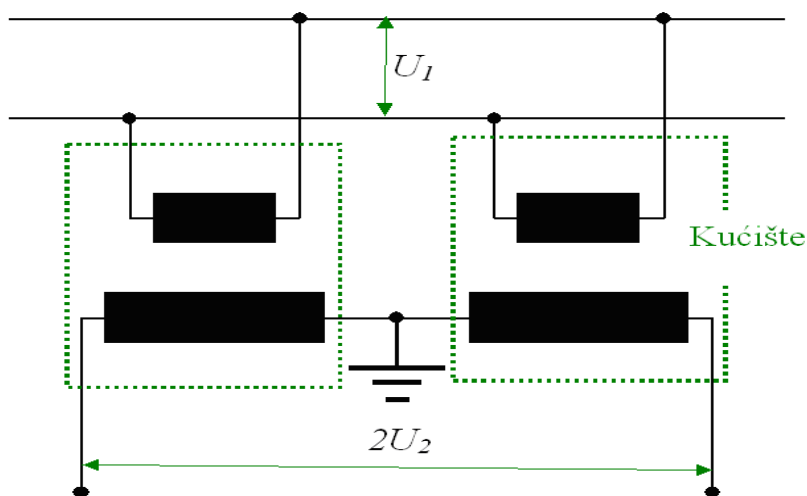
spoja ima oblik:

$$I_{KS} = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + X_T^2}} \quad (5.10)$$

Ispitni transformatori mogu se graditi kao suvi i kao transformatori sa uljem. Prednosti suvih transformatora su što su lakši, jednostavniji za održavanje i ekološki prihvatljiviji.

## 5.2 Sprege ispitnih transformatora

Sprege ispitnih transformatora primenjuju se radi dobijanja viših napona od maksimalnih napona koji se mogu postići pojedinačnim transformatorima. Jednostavna kombinacija

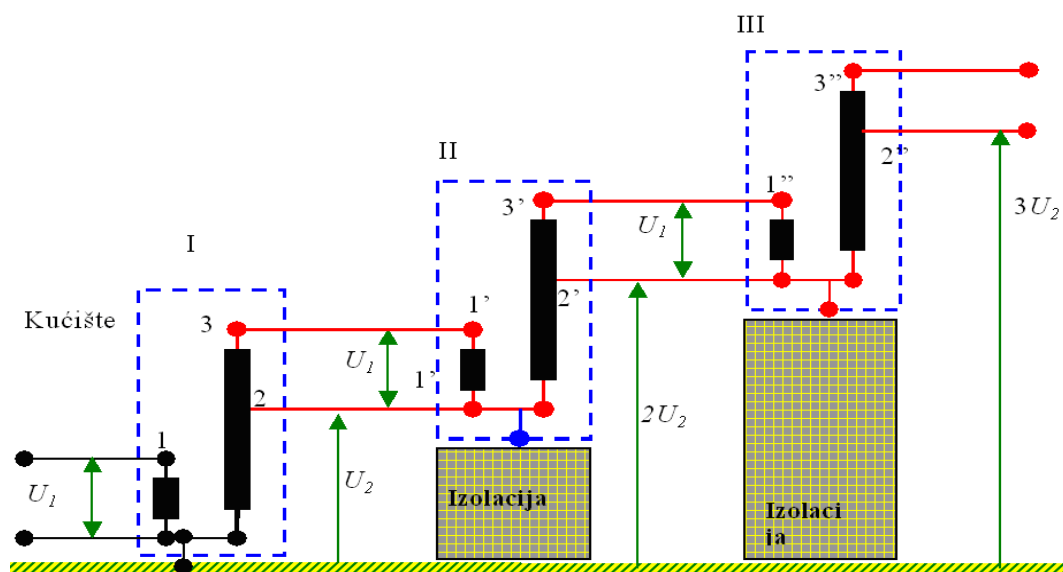


Slika 5.6: Sprega dva ispitna transformatora kada su primari vezani paralelno, a sekundari na red

veze dva ispitna transformatora data je na slici 5.6, kada su primari vezani paralelno, a sekundari na red.

Primari oba transformatora vezani su paralelno i priključeni na izvor napona  $U_1$ , pa je regulisanje napona za oba ispitna transformatora zajedničko. Sekundari su im vezani na red tako da je napon dobijen kao zbir pojedinačnih sekundarnih napona. Srednja tačka gde su sekundari spojeni treba da bude priključena na zemlju. Nezgoda ove sprege je u tome što je ovako dobijeni visoki napon simetričan u odnosu na zemlju. U tom slučaju ne sme ni jedan od priključaka ispitivanog objekta da bude uzemljen. Ako bi jedan od krajnjih priključaka transformatora uzemljili i ako bi oba kućišta bila uzemljena, tada bi drugi kraj drugog transformatora dobio dvostruki napon u odnosu na kućište, što je naprezanje izolacije izlaznog kraja drugog transformatora u odnosu na kućište veće od predviđenog.

Za dobijanje viših napona u slučajevima kada je jedan kraj ispitivanog objekta na potencijalu zemlje, primenjuje se vezivanje više ispitnih transformatora u kaskadu. Na slici 5.7 dat je princip vezivanja ispitnih transformatora u kaskadu. Cela kaskada se napaja preko primarnog namotaja prvog transformatora naponom  $U_1$ . Sekundarni namotaj, čiji je jedan kraj uzemljen i vezan za kućište prvog transformatora, daje na izvodu 2 visoki napon  $U_2$ , dok dodatni deo namotaja sekundara prvog transformatora sa izvodom 3 služi za napajanje primarnog namotaja drugog transformatora naponom  $U_1$ , koji je identičan primarnom naponu prvog transformatora. Kućište drugog transformatora mora da bude izolovano od zemlje, jer je vezano za izvod 2 prvog transformatora i se nalazi na naponu  $U_2$ . Sekundar drugog transformatora je donjim krajem vezan za kućište drugog transfor-



Slika 5.7: Kaskadna veza ispitnih transformatora

matora, a na gornjem izvodu  $2'$  dobija se napona  $2U_2$  u odnosu na zemlju. Dodatni deo namotaja sekundara drugog transformatora sa izvodom  $3'$  služi za napajanje trećeg transformatora. Napajanje trećeg transformatora se vrši na isti način kao napajanje drugog. Donji kraj sekundara trećeg transformatora vezan je za kućište trećeg transformatora i priključak  $2'$  drugog transformatora. Na gornjem izvodu  $2''$  trećeg transformatora dobija se napon  $3U_2$  odnosu na zemlju. Kućište trećeg transformatora mora biti izolovano od zemlje za napon  $2U_2$ . Kaskadnom spregom ispitnih transformatora može se postići proizvoljna visina napona, jer broj elemenata kaskade nije ograničen.

Na slici 5.8 prikazana je fotografija kaskade od dva ispitna transformatora postavljena jedan preko drugog. Kucišta su cilindričnog oblika od izolacionog materijala, a osnova i gornja kapa su metalni i predstavljaju ujedno i izvode. Na slici 5.9 prikazana je kaskada ispitnih transformatora koja daje ukupan napon od 1200 kV za vreme ispitivanja izolacije rastavljača pri delovanju veštačke kiše.



Slika 5.8: Fotografija kaskade od 2 ispitna transformatora napona po 100 kV svaki

## 5.3 Rezonantna kola

### 5.3.1 Serijska rezonantna kola

Na slici 5.10 prikazan je raspored elemenata serijskog rezonantnog kola. Objekat mora da ima kapacitivnu prirodu, mada postoji mogućnost korišćenja dodatnog kondenzatora za dobijanje visokog napona.

Na slici 5.10 oznake imaju sledeće značenje:

$U_{nn}$  napajanje iz mreže niskog napona,

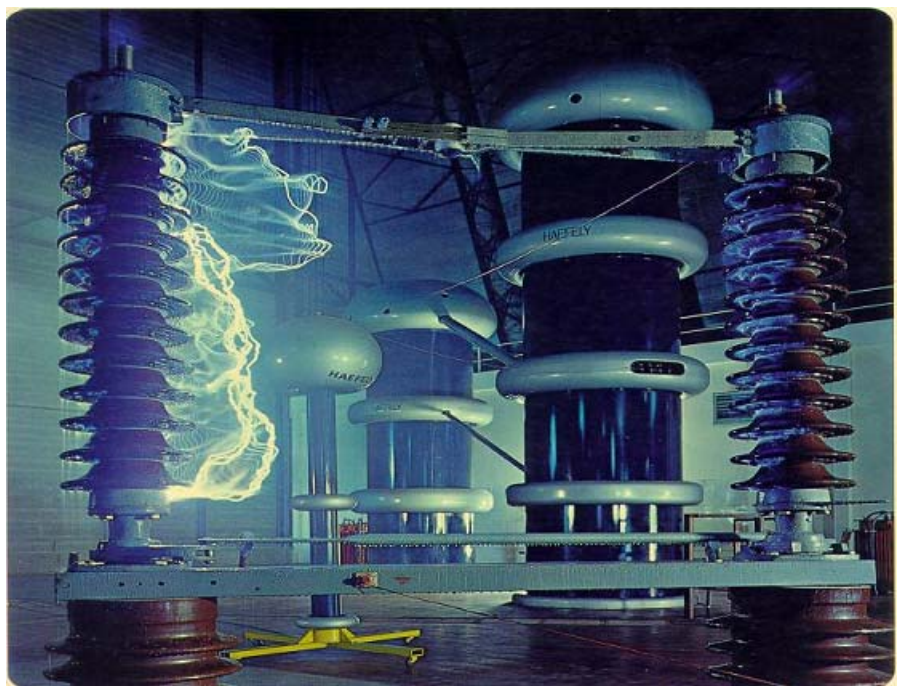
$RT$  regulacioni transformator,

$L$  induktivitet promenljive prigušnice,

$C$  kapacitet objekta uz moguće postavljanje dodatnog kondenzatora,

$U_1$  regulisani napon na ulazu u serijsko rezonantno kolo,

$U_2$  napon na objektu ispitivanja.



Slika 5.9: Fotografija kaskade od 2 ispitna transformatora napona za napon do 1200 kV svaki

Napon  $U_2$  se može dobiti u zavisnosti od napona  $U_1$  i struje  $I_c$  koju povlači kapacitet objekta iz izraza:

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - j\omega L \underline{I}_c \quad (5.11)$$

Struja kroz kapacitivnost objekta se može izrazi sledećim kompleksnim izrazom:

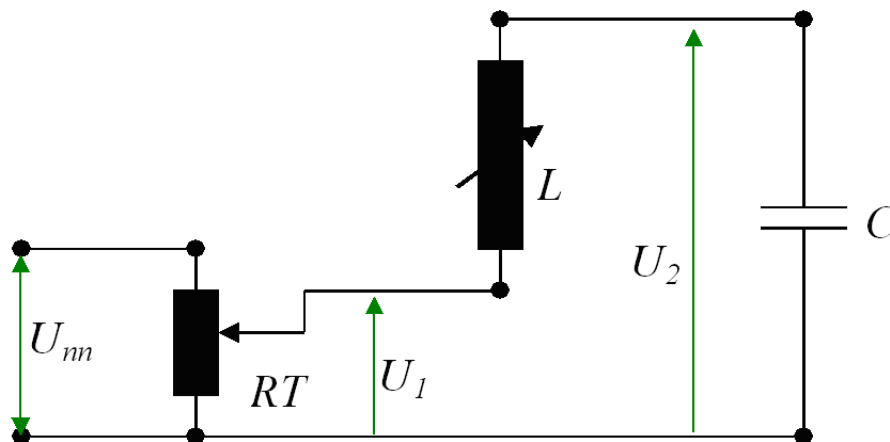
$$\underline{I}_c = j\omega C \underline{U}_2 \quad (5.12)$$

Posle zamene izraza 5.11 u 5.12 i sredjivanja se dobija se sledeći izraz za napon  $U_2$ :

$$U_2 = \frac{U_1}{1 - \omega^2 LC} \quad (5.13)$$

Prigušnica  $L$  ima promenljivi induktivitet sa velikim opsegom promene i obično je napravljen od jedinica za napon i do nekoliko stotina kilovolti, koje mogu biti postavljene jedna na drugu, što dozvoljava ispitivanja sa vrlo visokim naponima. Promenom induktiviteta može se menjati izlazni napon u vrlo širokom opsegu. Serijska rezonantna kola imaju sledeće prednosti:

- mala snaga koja prati pražnjenje na objektu,
- jeftiniji su od običnih ispitnih transformatora za iste napone i struje,



Slika 5.10: Raspored elemenata serijskog rezonantnog kola

- postiže se bolji talasni oblik napona zbog toga što ne postoji gvozdeno jezgro kao kod ispitnih transformatora, koje usled zasićenja može da proizvede više harmonike.

Mana serijskih rezonantnih kola je što je izlazni napon osetljiv na omsko opterećenje ispitnog objekta (na primer kod ispitivanja izolacije u zagađenim uslovima ili pri veštačkoj kiši kada se pojavljuje i omska komponenta struje pored kapacitivne). Potrebno je izbegavati rad u blizini potpune rezonanse zbog veoma velike struje koju bi sistem uzimao zbog male impedanse serijskog kola.

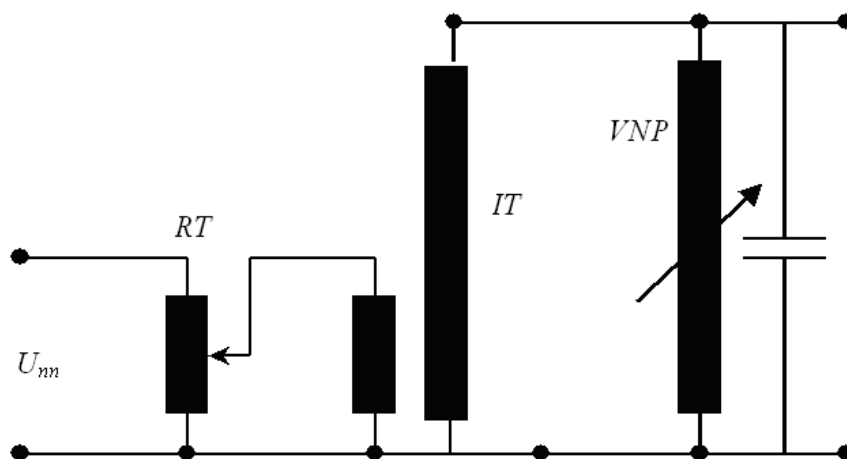
### 5.3.2 Transformatori sa paralelnim rezonantnim kolom

Uobičajeni raspored elemenata kod paralelnog rezonantnog kola je prikazan na slici 5.11. Šema se sastoji se nalazi od regulacionog transformatora, visokonaponskog transformatora, promenljive visokonaponske prigušnice i kapacitivnog opterećenja objekta ispitivanja koje je paralelno spojeno sa visokonaponskom prigušnicom. U praksi su ispitni transformator i paralelna prigušnica napravljeni kao jedna jedinica. Kapacitivna struja koja protiče kroz objekat ispitivanja je data izrazom:

$$\underline{I}_c = j\omega C \underline{U}_2 \quad (5.14)$$

Induktivna struja koja protiče kroz prigušnicu je:

$$\underline{I}_L = \frac{\underline{U}_2}{j\omega L} \quad (5.15)$$



Slika 5.11: Šema paralelnog rezonantnog kola

Ukupna struja koja opterećuje ispitni transformator je:

$$\underline{I} = \underline{I}_c + \underline{I}_L \quad (5.16)$$

Odnosno:

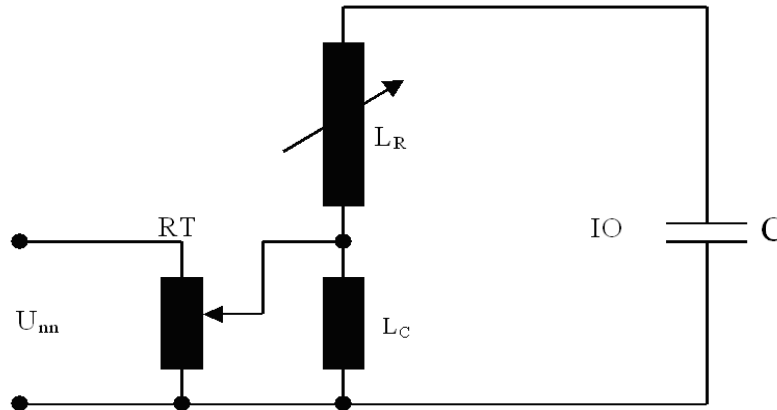
$$\underline{I} = j\underline{U}_2 \left( \omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \quad (5.17)$$

Povoljnim izborom induktiviteta  $L$  može se postići znatno manja snaga ispitnog transformatora pri istoj visini izlaznog napona koji vlada na objektu  $U_2$  pri velikim kapacitetima ispitnog objekta. U slučaju idealne antirezonanse rezultantna struja koju uzima objekat sa prigušnicom je nula. Pri korišćenju ove šeme napon na objektu se ne razlikuje bitno od izlaznog napona transformatora čak i ako se koristi zaštitni otpornik zbog male struje opterećenja.

### 5.3.3 Transformatori sa kombinovanim redno-paralelnim rezonantnim kolom

Na slici 5.12 prikazana je kombinovana redno-paralelna veza rezonantnog kola kod koje se sistem napaja iz regulacionog transformatora  $RT$ , na čijem izlazu je vezana prigušnica konstantne induktivnosti paralelna sa sekundarnim namotajem regulacionog transformatora i promenljivom rednom prigušnicom za podešavanje izlaznog napona na objektu. Oznake na slici 5.12 imaju sledeće značenje:





Slika 5.12: Kombinovano rezonantno kolo sa transformatorom sa promenljivom rednom induktivnošću

$U_{mn}$  napajanje sistema iz mreže niskog napona,

$RT$  regulacioni transformator,

$L_c$  induktivitet sekundara regulacionog transformatora,

$L_R$  induktivitet redne regulacione prigušnice,

$IO$  ispitni objekat čija je kapacitivnost  $C$ .

### 5.3.4 Kaskadna veza ispitnih transformatora sa rezonantnim kolom

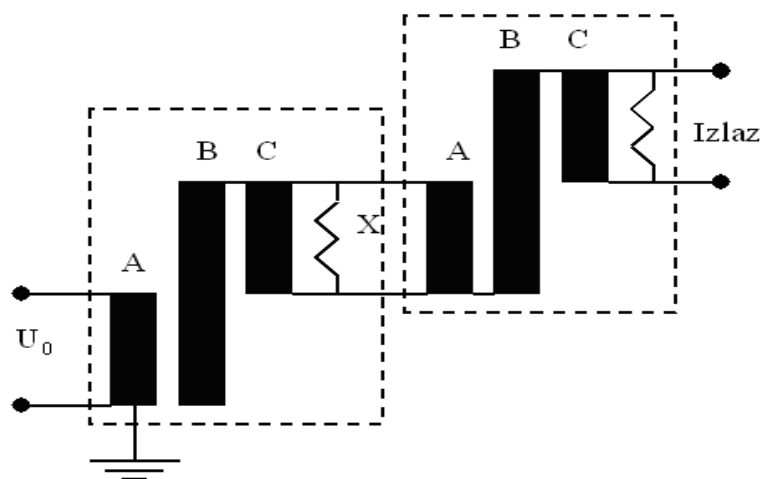
Na slici 5.13 prikazana je konstrukcija kaskadnog rezonantnog transformatora sa tri namotaja A, B i C. Oznake na slici 5.13 imaju sledeće značenje:

**A** namotaj koji se koristi kao primar za napajanje svake transformatorske jedinice,

**B** sekundarni namotaj na kome se dobija visoki napon,

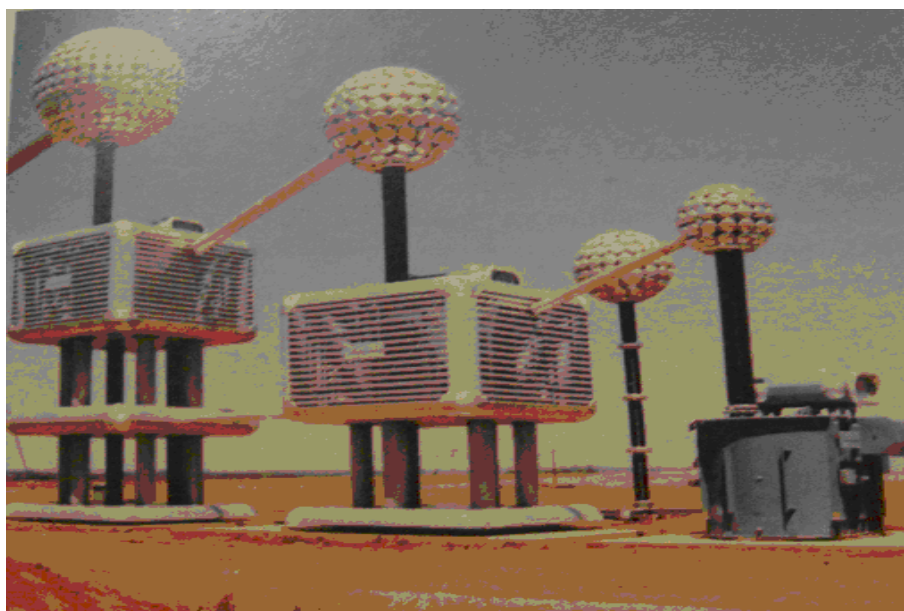
**C** tercijer koji napaja sledeću jedinicu kaskade,

**X** prigušnica za kompenzaciju.



Slika 5.13: Kaskadni transformator sa rezonantnim kolom

Paralelno svakom tercijeru nalazi se prigušnica za kompenzaciju kapacitivne struje. Kaskadne transformatorske jedinice mogu biti za napone do preko 600 kV. Impedansa kratkog spoja jedne jedinice kaskade može biti veoma mala, jer postoji veliko povećanje impedanse kratkog spoja kada se jedinice kaskadno vežu. Ponekad se pojavljuje problem neravnomerne raspodele napona između jedinica kaskade. Kaskadni transformatori mogu biti napravljeni i za spoljašnju montažu, kada se stavljaju najčešće u čelično kućište. Gornje jedinice su smeštene na izolatore. Kaskadni transformatori su veoma skupi objekti. Na slici 5.14 prikazana je sprega tri transformatora vezana u kaskadu. Da bi se sprečila pojava korone, svi priključci su napravljeni u obliku kugli, a veze između jedinica u obliku cevi.



Slika 5.14: Kaskadni transformator sa tri stepena 3 x 600 kV za spoljašnju montažu



# Poglavlje 6

## Udarni naponski generatori

### 6.1 Potreba za ispitivanjem udarnim naponima

Prenaponi koji imaju najopasnije delovanje na izolaciju vodova i razvodnih postrojenja su atmosferski prenaponi, koji nastaju pri direktnom atmosferskom pražnjenju u nadzemne vodove, elemente razvodnih postrojenja ili u njihovu blizinu. Drugi tip udarnih napona nastaje pri sklopnim operacijama stvarajući udarne naponske talase sporijeg čela i dužeg trajanja, koje nazivamo sklopnim prenaponima. Da bi se ispitala sposobnost izolacije da podnese udarne naponske talase atmosferskog porekla ili sklopne prenapone, grade se uređaji koji proizvode udarne napone koji se nazivaju udarnim generatorima. Udarni generatori su nezaobilazni elemenat svake laboratorije za visoki napon.

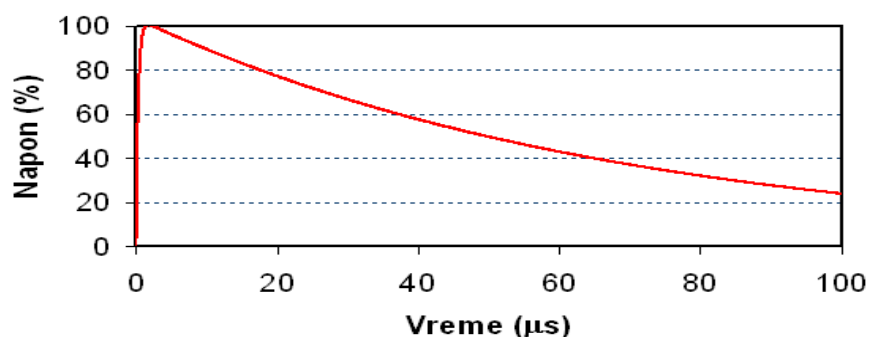
### 6.2 Definicija udarnih napona

Pod udarnim naponom, atmosferskim ili sklopnim, podrazumeva se naponski talas određenog polariteta koji ima brz porast na čelu do maksimalne vrednosti, a zatim sporije opada do nule, kao na slici 6.1 . Uobičajeno analitičko predstavljanje naponskih udarnih talasa je preko dve eksponencijalne funkcije, odnosno:

$$u(t) = U_o(e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2}) \quad (6.1)$$

gde su:

$U_o$  teorijski maksimalan napon koji daje generator,

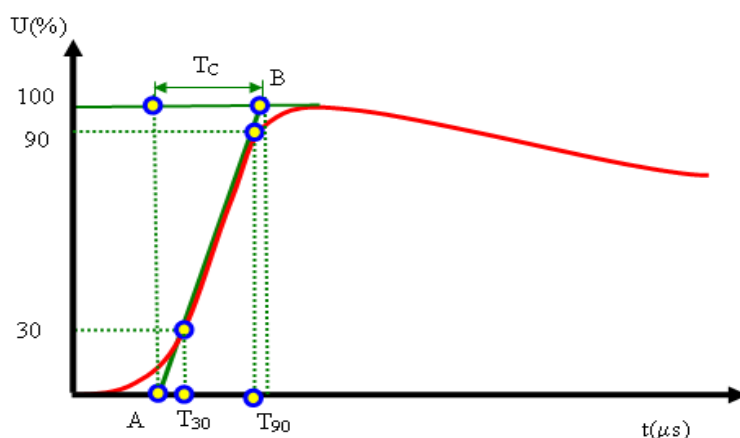


Slika 6.1: Tipičan oblik udarnog naponskog talasa

$T_1$  vremenska konstanta opadanja talasa na začelju,

$T_2$  vremenska konstanta porasta talasa na čelu.

Realni talasi koji se dobijaju u laboratorijskim uslovima imaju na početku talasa konkavni deo, koji se može videti na slici 6.2, na kojoj je prikazana procedura odredjivanja čela atmosferskog udarnog talasa.

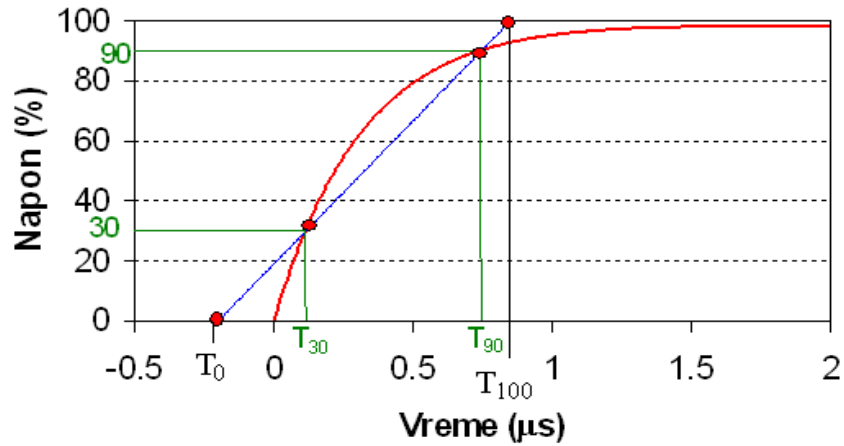


Slika 6.2: Definicija čela atmosferskog udarnog talasa

Na slici 6.3 prikazan je samo deo eksponencijalnog talasa koji odgovara porastu napona na čelu. Ovaj talas se može prikazati sledećom eksponencijalnom funkcijom:

$$u(t) = U_o(1 - e^{-t/T_2}) \quad (6.2)$$

Vreme čela talasa se definiše kao vreme potrebno da linearizovano čelo talasa poraste od



Slika 6.3: Idealizovan eksponencijalni oblik čela naponskog udarnog talasa

vrednosti 0% do vrednosti 100% od punog udarnog napona. Linearizovano čelo talasa se dobija kao prava koja prolazi kroz tačku kada talas postigne 30% od pune vrednosti i tačku kada talas postigne 90% pune vrednosti napona. Trenutak početka linearizovanog čela talasa obeležen je sa  $T_0$ , a trenutak kada linearizovan talas dostiže maksimum obeležen je sa  $T_{100}$ . Trajanje čela talasa se može izračunati na osnovu izraza:

$$T_c = \frac{T_{90} - T_{30}}{0,6} \quad (6.3)$$

Vremenska konstanta čela talasa se može izračunati na osnovu vremena potrebnog da eksponencijalni talas postigne 30% i 90% od pune vrednosti napona, pod uslovom da je vreme začelja neuporedivo duže od vremena čela, odnosno:

$$0,3U_0 = U_0(1 - e^{-\frac{T_{30}}{T_2}}) \Rightarrow 0,7 = e^{-\frac{T_{30}}{T_2}} \quad (6.4)$$

$$0,9U_0 = U_0(1 - e^{-\frac{T_{90}}{T_2}}) \Rightarrow 0,1 = e^{-\frac{T_{90}}{T_2}} \quad (6.5)$$

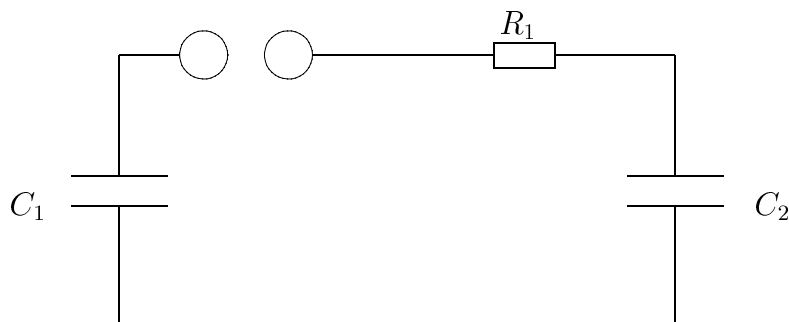
$$(6.6)$$

U gornjem sistemu jednačina se smatra da je vremenska konstanta začelja  $T_1$  neuporedivo duža od vremenske konstante čela  $T_2$  i da se može smatrati neograničeno dugom. Iz gornjeg sistema jednačina deljenjem gornje jednačine sa donjom može se izračunati razlika  $T_{90} - T_{30}$ , odnosno:

$$T_{90} - T_{30} = T_2 \ln(7) \quad (6.7)$$

Vodeći računa o izrazu 6.3 i da je vrednost  $\ln(7) = 1.946$  dobija se da je:

$$T_c = 3,243 \times T_2 \quad (6.8)$$



Slika 6.4: Ekvivalentna šema za dobijanje čela udarnih naponskih talasa

Eksponencijalni deo talasa se može praktično realizovati pražnjenjem kondenzatora  $C_1$  i punjenjem kondenzatora  $C_2$  prema šemi 6.4.

Vremenska konstanta  $T_2$  čela talasa se može izračunati na osnovu zamenske šeme sa slike 6.4 kao:

$$T_2 = R_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (6.9)$$

Za određivanje začelja talasa posmatra se samo eksponencijalno opadanje napona na začelju, smatrajući da su se naponi na kondenzatorima  $C_1$  i  $C_2$  međusobno izjednačili i postigli napon  $U_0$ . Smatramo da je vremenska konstanta čela  $T_2$  zanemarljivo kratka u odnosu na vremensku konstantu začelja. U tom slučaju vremenska funkcija začelja ima sledeći oblik:

$$u(t) = U_0 e^{-t/T_1} \quad (6.10)$$

Ova vremenska funkcija prikazana je na slici 6.5:

Vreme začelja se definiše kao vreme potrebno da talas opadne na polovinu vrednosti amplitude. Na osnovu definicije se može postaviti izraz za vreme začelja  $T_z$ .

$$0.5U_0 = U_0 e^{-\frac{T_z}{T_1}} \quad (6.11)$$

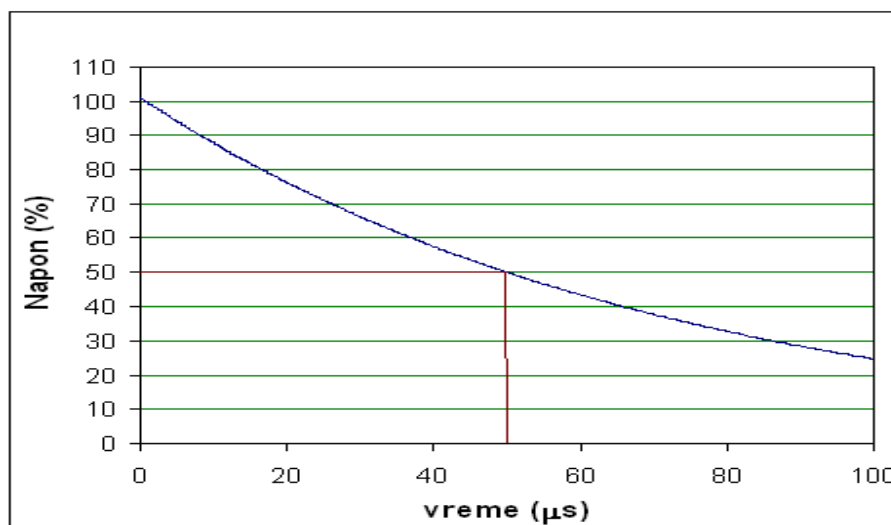
Iz izraza 6.11 se može izračunati vreme začelja:

$$T_z = T_1 \ln(2) \quad (6.12)$$

Vremenska konstanta začelja  $T_1$  može se odrediti na osnovu zamenske šeme sa slike 6.6:

$$T_1 = R_2(C_1 + C_2) \quad (6.13)$$





Slika 6.5: Idealizovan eksponencijalni oblik začelja naponskog udarnog talasa

Za simulaciju začelja talasa koristi se šema u kojoj su se naponi na oba kondenzatora izjednačili i oni se prazne preko otpornika  $R_2$  kao na slici 6.6. Na osnovu šeme na slici 6.6 se izračuva vremenska konstanta začelja prema izrazu 6.13 i 6.12 u obliku:

$$T_z = 0,693R_2(C_1 + C_2) \quad (6.14)$$

Gornje definicije čela i začelja talasa koriste se za atmosferske udarne naponske talase. Za sklopne udarne napone, koji su sporijeg čela i dužeg trajanja od atmosferskih, koristi se pojednostavljena definicija čela talasa. Vreme trajanja čela se definiše za sklopne talase kao vreme potrebno da talas od početka dostigne maksimum (bez uvodjenja linearizovanog čela talasa). Vreme začelja se definiše na isti način kao kod atmosferskih udarnih napona, kao vreme od početka talasa za koje talas opadne na polovinu vrednosti. Atmosferski udarni talasi se generišu pomoću jedostepenih i višestepenih udarnih generatora.

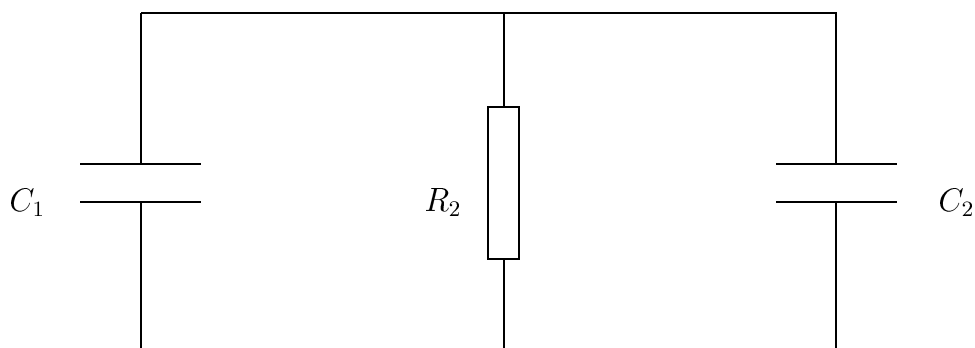
### 6.2.1 Jednostepeni udarni generatori

Najjednostavnija ekvivalentna šema ispitnog kola za dobijanje udarnih naponskih talasa prikazana je na slici 6.7. Oznake na slici 6.7 imaju sledeće značenje:

$U_{nn}$  napon napajanja sa niženaponske strane koji se može regulisati,

$T$  visokonaponski transformator za napajanje udarnog generatora,

$D$  dioda za ispravljanje naizmeničnog napona,



Slika 6.6: Ekvivalentna šema za dobijanje začelja udarnih naponskih talasa

$R_z$  zaštitni otpornik za ograničavanje struje punjenja kondenzatora  $C_1$ ,

$C_1$  kondenzator koji se puni naponom  $U_o$ , čijim pražnjenjem nastaje udarni talas,

$U_o$  napon punjenja udarnog generatora,

$SI$  sferno iskrište pomoću koga se okida udarni generator,

$R_1$  otpornik čela talasa,

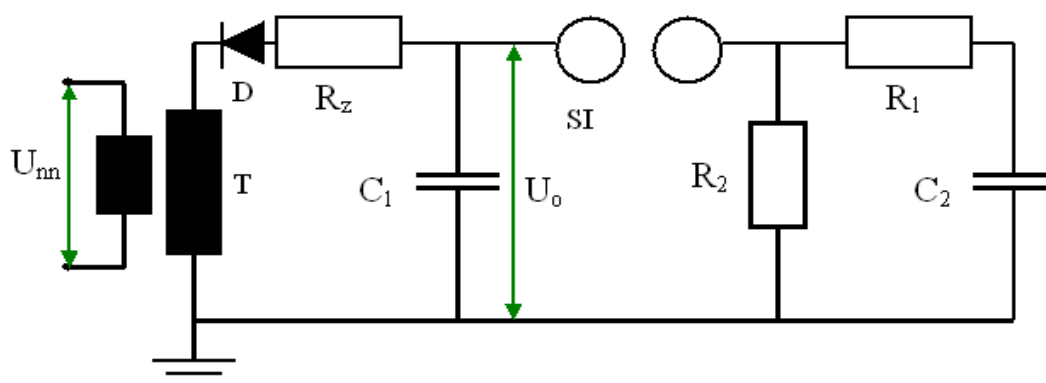
$R_2$  otpornik začelja talasa,

$C_2$  kondenzator na kome se dobija udarni napon.

Kondenzator  $C_1$  se puni preko ispravljača  $D$  dok ne dodje do preskoka na iskrištu, što nazivamo reagovanjem udarnog generatora. Punjenje kondenzatora  $C_1$  odvija se po eksponencijalnom zakonu sa vremenskom konstantom punjenja:

$$T_p = C_1 R_z \quad (6.15)$$

Vreme punjenja kondenzatora  $C_1$  je reda veličine minuta. Kada dodje do reagovanja udarnog generatora, kondenzator  $C_1$  se prazni preko iskrišta i puni kondenzator  $C_2$ . Zatim se kondenzatori  $C_1$  i  $C_2$  zajedno rasterećuju preko otpornika  $R_2$ .  $C_2$  je kondenzator na koji se udarni generator prazni, na koji je paralelno priključen objekat ispitivanja. Ponekad  $C_2$  čini kapacitet samo objekta ispitivanja. Kada su se oba kondenzatora ispraznila, započinje ponovno punjenje udarnog generatora.



Slika 6.7: Ekvivalentna šema jednostepenog udarnog generatora za dobijanje udarnih naponskih talasa

Za uspešan rad naponskog udarnog generatora treba da bude ispunjen uslov da je  $C_1 \gg C_2$ . U tom slučaju će i vremenska konstanta čela biti mnogo manja od vremenske konstante začelja. Maksimalna vrednost udarnog napona za šemu na slici 6.7 ima vrednost:

$$U_m = U_o \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (6.16)$$

Odnos:

$$\mu = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (6.17)$$

nazivamo stepenom iskorišćenja udarnog generatora.

### 6.2.2 Okidanje udarnog generatora

Okidanje udarnog generatora se može raditi na 3 načina:

- spontano, kada napon punjenja kondenzatora  $C_1$  postane veći od napona reagovanja iskrišta,
- ručno okidanje, preko kontrolisanog iskrišta,
- automatsko okidanje, preko unapred podešenog napona punjenja i kontrolisanog okidanja

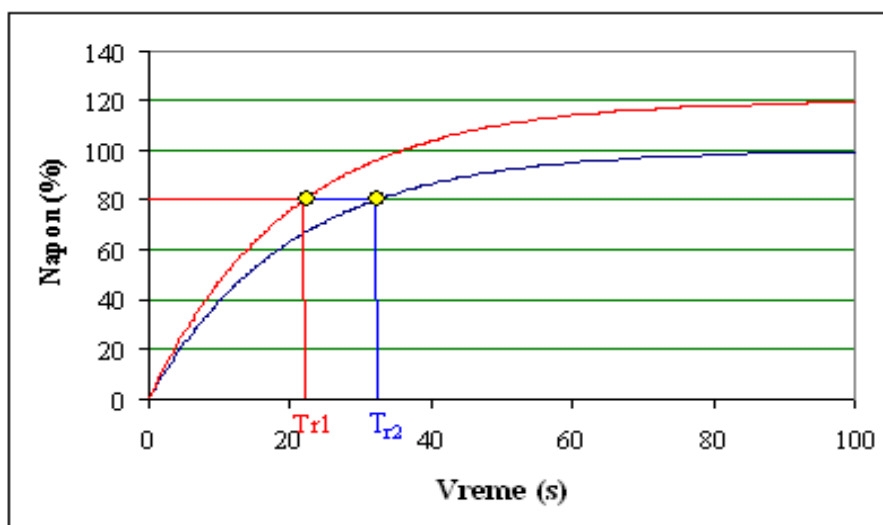
Svaki od ovih načina biće posebno objašnjen.

## Spontano okidanje

Kod spontanog okidanja kada u toku punjenja kondenzatora  $C_1$  napon poraste iznad napona reagovanja iskrišta, dolazi do reagovanja generatora. Izlazni napon generatora zavisi isključivo od razmaka kugli iskrišta. Ovo je najjednostavniji način, ali je skopčan sa sledećim nedostacima:

- trenutak reagovanja iskrišta je slučajna pojava, tako da ne možemo unapred da znamo kada će generator da okine,
- vrednost preskočnog napona iskrišta ima slučajno rasipanje, pa sa njim i izlazni napon generatora slučajno varira,
- određivanje napona koji daje generator vrši se na osnovu većeg broja proba iterativnim putem, snimanjem izlaznog napona i zatim podešavanjem rastojanja iskrišta i ponovnim snimanjem talasa, sve dok se ne približimo željenoj vrednosti napona.

Podešavanje visine napona punjenja kondenzatora  $C_1$  ne utiče se na visinu maksimalnog udarnog napona koji daje udarni generator, već utiče isključivo na vreme do reagovanja udarnog generatora. Ovo je ilustrovano na slici 6.8. Na slici 6.8 analiziran je slučaj kada

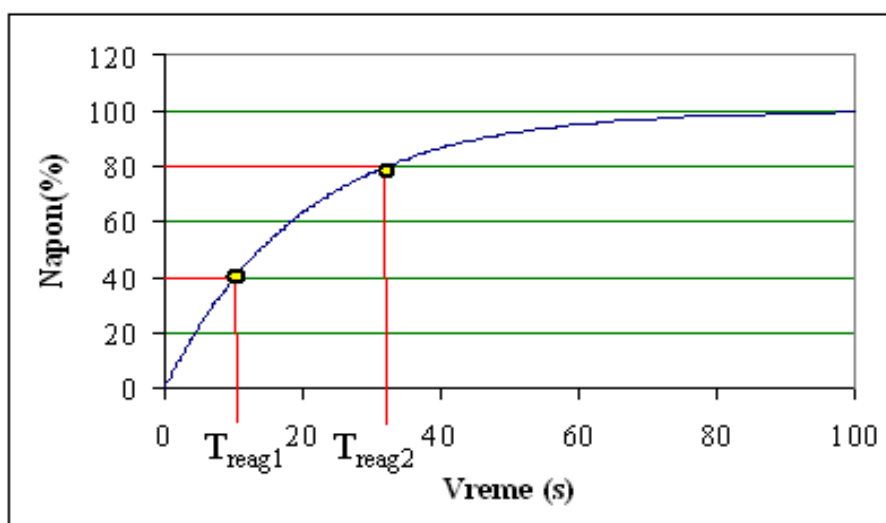


Slika 6.8: Zavisnost vremena reagovanja od visine napona punjenja

se punjenje generatora radi sa različitim naponom punjenja  $U_o$ . U slučaju višeg napona punjenja (na slici 6.8) 120% do reagovanja iskrišta dolazi u trenutku  $T_{r1}$ , a pri naponu punjenja od 100% pri dužem vremenu punjenja reagovanje nastupa u trenutku  $T_{r2}$ . U

oba slučaja napon reagovanja iskrišta je podešen na vrednost od 80% od punog napona. Napon reagovanja iskrišta se menja promenom razmaka izmedju kugli.

U slučaju kada bi promenili razmak izmedju kugli, pri istom naponu punjenja, takodje bi se promenilo vreme do reagovanja, ali i napon pri kome iskrište reaguje i maksimalni napon na izlazu iz generatora. Ovaj slučaj prikazan je na slici 6.9. Za promenu

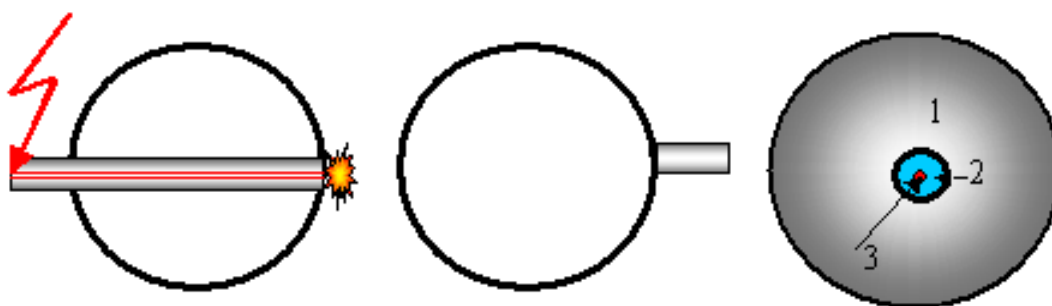


Slika 6.9: Zavisnost vremena reagovanja od razmaka iskrišta

visine napona na izlazu iz generatora menja se rastojanje kugli iskrišta, a za promenu vremena do preskoka menja se napon punjenja kondenzatora  $C_1$ . Za promenu polariteta talasa dioda  $D$  se okreće na drugu stranu. Ukoliko želimo da menjamo oblik talasa, odnosno vreme čela i začelja, to radimo promenom otpornika  $R_1$  za promenu vremena čela, a promenom otpornika  $R_2$  za promenu vremena začelja. Do promene oblika talasa dolazi zbog priključenja objekta ispitivanja, koji može da ima različite vrednosti kapacitivnosti koje se pri određivanju parametara oblika talasa dodaju na postojeću kapacitivnost  $C_2$ . Kapacitivnost udarnog generatora se najčešće realizuje kao eksterna kapacitivnost kapacitivnog delila napona koje se priključuje prvenstveno kao teretna kapacitivnost udarnog generatora, a ne za merenje napona. Kapacitivnost  $C_2$  ima veoma veliki uticaj na oblik talasa, posebno čela. Promena oblika talasa se kod pojedinih generatora može postići prevezivanjem više kondenzatora koji čine kapacitet  $C_1$  u paralelu ili na red, a izuzetno retko promenom kondenzatora.

### Ručno okidanje iskrišta

U ovom slučaju se vizuelno prati napon punjenja kondenzatora  $C_1$  preko odgovarajućeg mernog instrumenta i kada on dostigne željenu vrednost vrši se okidanje iskrišta. Okidanje iskrišta se može raditi na više načina. Najčešće korišćen način je primenom troelektrodnog iskrišta, kao na slici 6.10. Sferno iskrište je napravljeno sa jednom sferom kroz koju prolazi

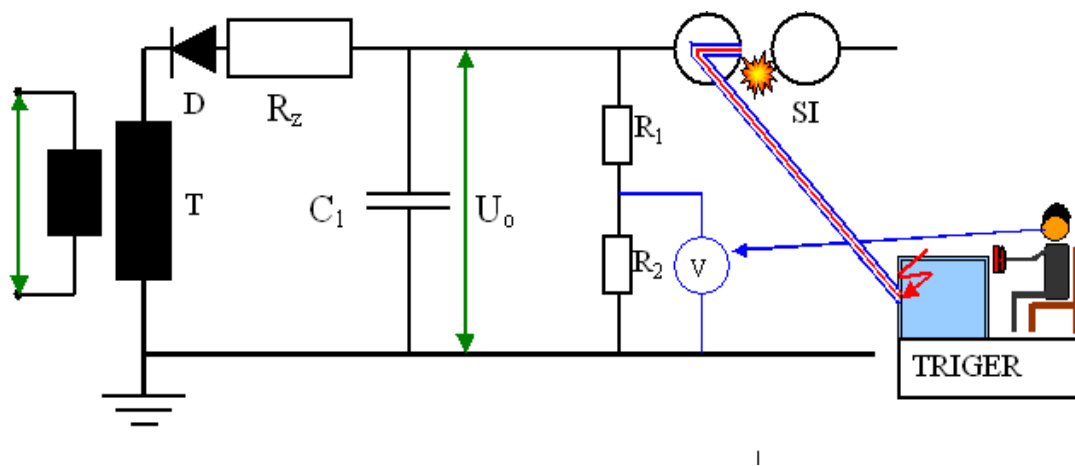


Slika 6.10: Troelektrodno iskrište za kontrolisano okidanje

visokonaponski izolovani kabl. Na površini sfere (koja je po pravilu uzemljena) kroz koju prolazi kabl, postavljena je elektroda, razdvojena od sfere izolacionim prstenom (slika desno). Oznake imaju sledeće značenje:

- 1 - provodna sfera,
- 2 - izolacioni prsten na sferi,
- 3 - provodna elektroda na koju se dovodi visokonaponski impuls koji izaziva preskok na prstenu.

Preskok na prstenu inicira pražnjenje izmedju elektroda iskrišta. U trenutku kada želimo preskok, pritiskom na dugme generiše se u posebnom uređaju visokonaponski impuls koji se dovodi na središnu elektrodu sfernog iskrišta koja izaziva preskok izmedju sfera. Sferno iskrište mora da bude na dovoljnom rastojanju da ne može da dodje do spontanog preskoka bez iniciranja varnicom na troelektrodnom iskrištu. Varnica na troelektrodnom iskrištu praktično trenutno izaziva preskok. U ovom slučaju napon punjenja kondenzatora se meri preko omskog delila napona čije su otpornosti  $R_1$  i  $R_2$  na voltmetru  $V$ . Manipulant u trenutku kada vizuelno uoči da je postignut potreban napon ručno pritiskom na dugme uređaja koji nazivamo "trigatron" vrši generisanje visokonaponskog impulsa koji izaziva reagovanje iskrišta udarnog generatora, kao na slici 6.11. U ovom slučaju izbegava se slučajno rasipanje preskočnog napona iskrišta i na taj način se dobija tačnija vrednost izlaznog napona nego u slučaju spontanog okidanja iskrišta. Jedini uticaj na visinu izlaznog napona je vezan za grešku očitavanja voltmetra i brzinu pritiska tastera, koji zavise od manipulanta.



Slika 6.11: Šematski prikaz principa ručnog okidanja udarnog generatora

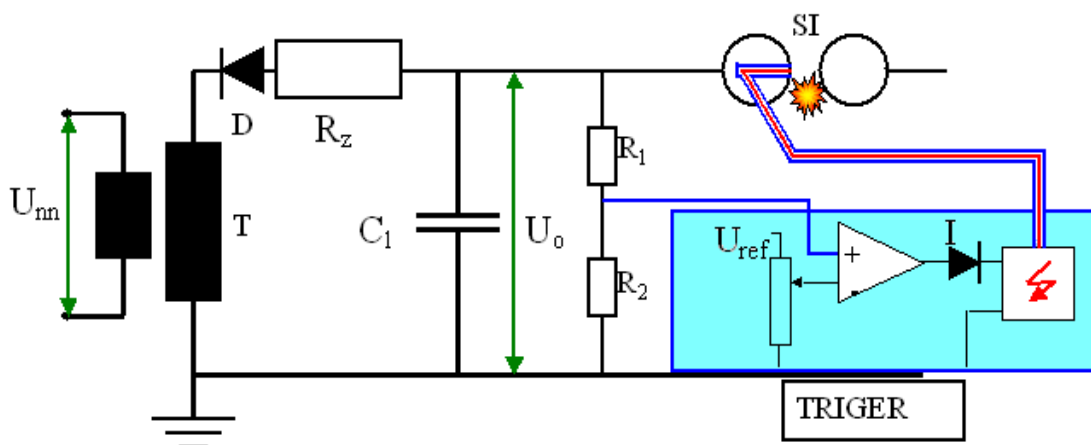
### Automatsko okidanje udarnog generatora

U slučaju automatskog okidanja udarnog generatora napon sa omskog delila napona sa visokonaponskom granom otpornosti  $R_1$  i niskonaponskom granom delila otpornosti  $R_2$  vodi se na uređaj u kome se mereni napon upoređuje sa unapred podešenim naponom na potencijometru pri kome treba da se izazove signal za okidanje iskrišta. U diferencijalnom pojačavaču se oduzimaju mereni signal i unapred podešeni signal za okidanje. Kada je ispunjen uslov da je mereni signal postao veći od podešenog, razlika napona iz diferencijalnog pojačavača postaje pozitivna, šalje se preko diode koja provodi signal u uređaj za generisanje impulsa. Dok je izlaz iz diferencijalnog pojačavača negativan, nema signala za okidanje. Ako se promeni polaritet talasa obrtanjem diode  $D$  udarnog generatora, takodje se u uređaju za okidanje mora promeniti polaritet ispravljača  $I$  i referentnog napona  $U_{ref}$  da bi se okidanje vršilo pri suprotnom polaritetu. Princip automatskog okidanja prikazan je na slici 6.12.

### 6.2.3 Višestepeni udarni generatori

Jednostepeni udarni generatori mogu da proizvedu napon koji je malo manji od temene vrednosti izlaznog napona iz transformatora. Za dobijanje vrlo visokih udarnih napona koristi se veći broj kaskada od kondenzatora, otpornika i iskrišta, koji čine višestepeni udarni generator, kao na slici 6.13. Ovakva šema naziva se Marksov udarni generator. Oznake na šemi na slici 6.13 imaju sledeće značenje:

$C$  - kondenzatori punjenja udarnog generatora,



Slika 6.12: Šematski prikaz principa automatskog okidanja udarnog generatora

$r$  - interni otpornici unutar svakog stepena koji definišu čela talasa,

$C_2$  - kondenzator koji definiše čelo talasa,

$R_{1e}$  - eksterni otpornik koji definiše čelo talasa zajedno sa internim otpornicima  $r$ ,

$R_{2e}$  - otpornik koji definiše začelje talasa,

$R$  - otpornici koji sprečavaju rasterećivanje kondenzatora  $C$  unutar kontura sa iskrištima.

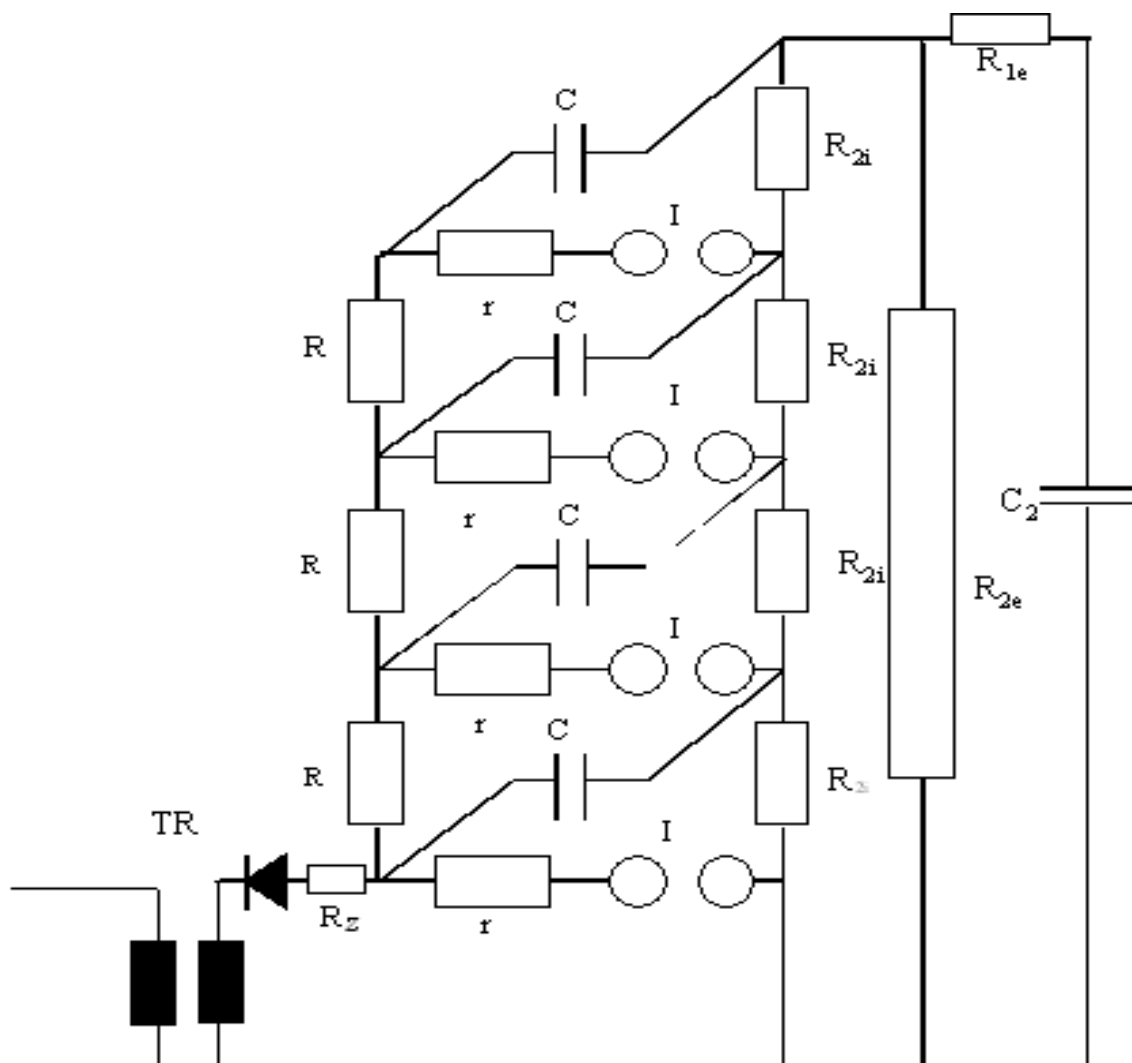
$R_{2i}$  - otpornici koji sprečavaju rasterećivanje kondenzatora  $C$  unutar kontura sa iskrištima i definišu začelje talasa,

$I$  - iskrišta udarnih generatora

Svaki kondenzator  $C$  sa pripadajućim otpornikom  $r$  i otpornicima  $R$  čine 1 stepen udarnog generatora. Višestepeni generator u opštem slučaju može imati proizvoljan broj stepeni.

U šemi na slici 6.13 svi kondenzatori  $C$  se opterećuju u paralelnoj sprezi. Kada dodje do reagovanja najnižeg iskrišta iza izvora, to dovodi do sukcesivnog reagovanja ostalih iskrišta, čime se kondenzatori  $C$  prevezuju na red. Otpornici  $R_{2i}$  se biraju tako da imaju dovoljno veliku otpornost da ne dolazi do rasterećenja kondenzatora  $C$  u lokalnim konturama. Tako prevezani kondenzatori se prazne preko otpornika  $R_{1e}$  koji se naziva eksternim otpornikom čela i preko otpornika  $r$  koji se nazivaju internim otpornicima čela i opterećuju kondenzator  $C_2$ . Svi kondenzatori se zatim zajedno lagano prazne preko otpornika  $R_{2e}$  velike otpornosti. Otpornik  $R_{2e}$  naziva se eksternim otpornikom začelja talasa. Udarni generator se podešava zajedno sa ispitivanim uzorkom u kolu tako da daje standardni oblik udarnog napona  $1, 2/50 \mu s$  čija je temena vrednost propisana standardima. Višestepeni udarni generator se može ekvivalentirati jednostepenim udarnim





Slika 6.13: Šema višestepenog udarnog generatora

generatorom. Pri tome postoje sledeće relacije izmedju parametara ekvivalentnog jednos-  
tepenog generatora sa slike 6.7 i višestepenog udarnog generatora sa slike 6.13.

$$C_1 = \frac{C}{n} \quad (6.18)$$

$$R_1 = nr + R_{1e} \quad (6.19)$$

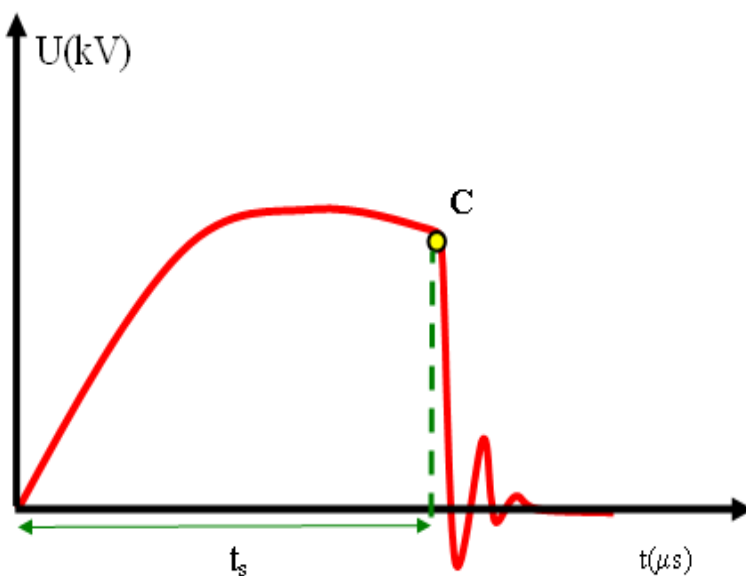
$$R_2 = \frac{nR_{2i}R_{2e}}{nR_{2i} + R_{2e}} \quad (6.20)$$

Ispitivanje uzoraka se vrši sa određenim brojem udara, najčešće i pozitivnog i neg-  
ativnog polariteta. Broj udara zavisi od objekta ispitivanja i kreće se najčešće od 5 do

15. Oblik talasa kod višestepenog naponskog udarnog generatora se menja promenom eksternog otpornika  $R_{1e}$  i internih otpornika u svakom stepenu  $r$  za čelo talasa, kao i promenom eksternog otpornika  $R_{2e}$  i internih otpornika u svakom stepenu  $R_{2i}$  za začelje. Ukoliko se u svakom stepenu nalazi veći broj kondenzatora  $C$ , tada se njihovim prevezivanjem takodje može uticati na oblik talasa. Obično se uticajem na čelo talasa utiče i na začelje. Promene otpornika kod višestepenih generatora sa velikim brojem stepeni može da bude dugotrajan posao, posebno ako se zbog visine generatora mora koristiti kran.

### 6.2.4 Dobijanje sečenog talasa

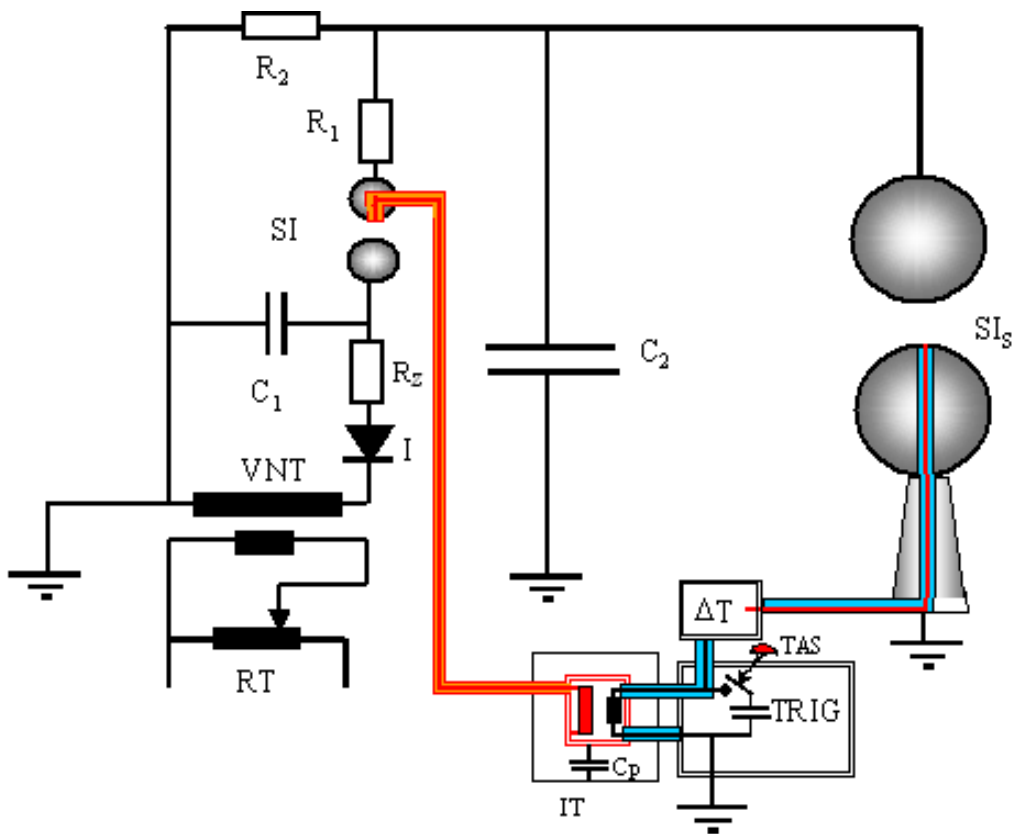
Za ispitivanje pojedine opreme potrebno je koristiti talase velike strmine. U takvu opremu spadaju pre svega energetski transformatori koji se ispituju sečenim talasom da bi se proverila sposobnost izolacije izmedju navojaka da podnesu velika naprezanja prilikom nailaska strmih napona. Strmi talasi na terenu nastaju kada atmosferski prenapon izazove preskok na vazdušnoj izolaciji u neposrednoj blizini energetskog transformatora. Oblik sečenog talasa prikazan je na slici 6.14



Slika 6.14: Šematski prikaz principa dobijanja sečenog talasa

Da bi se dobio sečeni udarni napon na ispitivanom objektu u laboratoriskim uslovima, koristi se najčešće sferno iskrište postavljeno paralelno ispitnom objektu, mada se mogu koristiti elektrode iskrišta u obliku rogova, što sve zavisi od tehničkih standarda koji definišu proceduru ispitivanja. Ukoliko je iskrište bez kontrolisanog trenutka reagovanja,

u tom slučaju dolazi do slučajnog rasipanja vremena do preskoka na iskrištu. Za standardni atmosferski sečeni talas na začelju dozvoljava se sečenje opsegu od 2 do 6  $\mu$ s. Korišćenjem uređaja za kontrolisano okidanje iskrišta udarnog generatora može se ujedno kontrolisati i okidanje iskrišta za sečenje udarnog talasa programiranjem vremena sečenja talasa na željenu vrednost. Na slici 6.15 prikazana je šema za dobijanje udarnog sečenog talasa. Na slici 6.15 oznake imaju isto značenje kao na slici 6.7, osim sledećih oznaka koje



Slika 6.15: Šematski prikaz principa dobijanja sečenog talasa

se odnose na šemu za upravljanje trenutkom sečenja talasa:

$RT$  - regulacioni transformator kojim se reguliše visina napona punjenja kondenzatora,

$VNT$  - visokonaponski transformator kojim se regulisani napon podiže na vrednost potrebnu za punjenje generatora,

$SI_s$  - iskrište za sečenje talasa,

$\Delta T$  - kolo za kontrolisano kašnjenje,

*TRIG* - kolo za okidanje (trigatron) koje proizvodi impuls za okidanje udarnog generatora i iskrišta za sečenje struje,

*IT* - izolacioni transformator preko koga se šalje impuls za okidanje sfernog iskrišta *SI* udarnog generatora,

$C_p$  - parazitna kapacitivnost kućišta izolacionog transformatora prema zemlji,

*TAS* - taster za ručno okidanje generatora.

Zahvaljujući izolacionom transformatoru ukoliko sfera udarnog generatora dodje na povišeni potencijal, on se ne može preneti na uređaj za okidanje *TRIG* koji je galvanski odvojen.

Proces okidanja odvija se na sledeći način:

- kada su uslovi za trigerovanje generatora ispunjeni (bilo preko vizuelnog praćenja stepena napunjenosti kondenzatora  $C_1$  ili preko automatskog praćenja, kondenzator trigatrona se uključuje i preko izolacionog transformatora šalje impuls za okidanje sfernog iskrišta udarnog generatora.
- Istovremeno se šalje impuls na kolo za kašnjenje  $\Delta T$  koje posle podešenog vremenskog intervala prosledjuje impuls za okidanje sfernog iskrišta za sečenje struje  $SI_S$ .

Na ovaj način se može postići kontrolisano sečenje talasa na začelju.

# Poglavlje 7

## Strujni udarni generatori

### 7.1 Namena

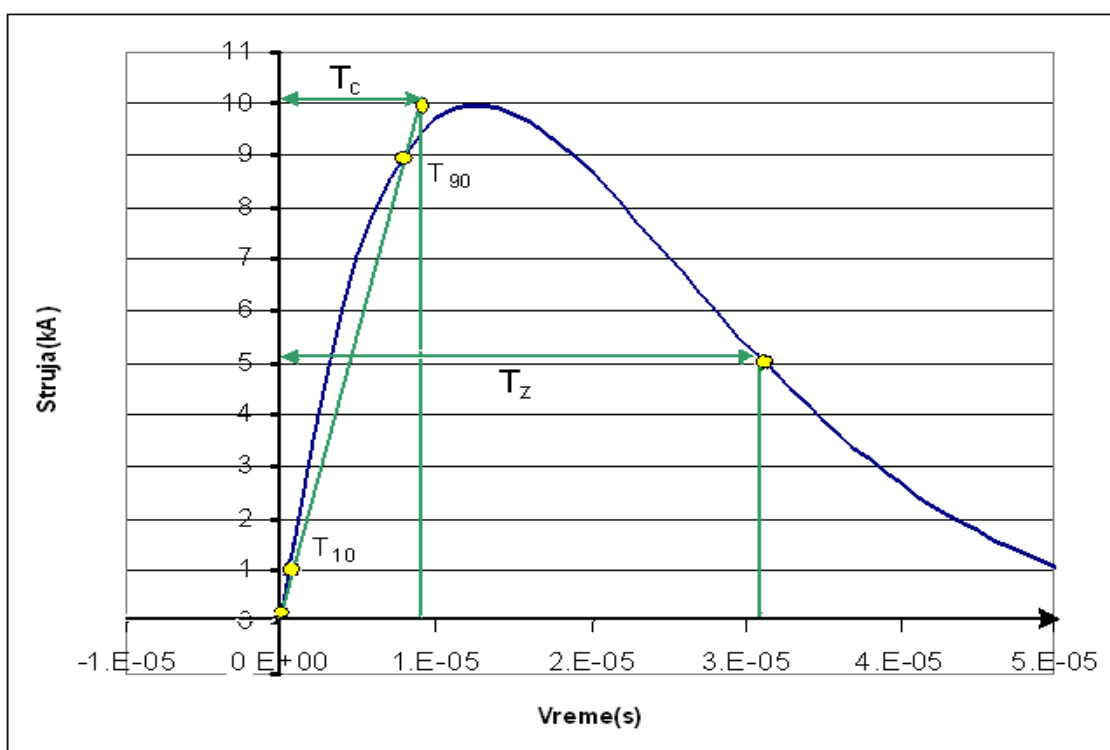
Strujni udarni generatori služe za ispitivanje električnih aparata i električne opreme ili njihovih pojedinih delova udarnim strujama raznih talasnih oblika. Posebno je važna primena strujnih udarnih generatora za ispitivanje odvodnika prenapona. Standardni talasni oblici koji se koriste za ispitivanje odvodnika prenapona su prema evropskim standardima:

- kratkotrajan strujni talas za ispitivanje podnosivom udarnom strujom čela  $4\mu s$  i začeljem  $10\mu s$  maksimalne amplitude do 100 kA,
- kratkotrajan strujni talas za određivanje preostalog napona odvodnika prenapona pri nazivnoj struji odvodjenja, čela  $8\mu s$  i začelja  $20\mu s$ , maksimalne amplitude do 100 kA,
- kratkotrajan strujni talas za određivanje preostalog napona odvodnika prenapona pri strmom udarnom strujnom talasu, čije je trajanje čela  $1\mu s$  i začelje ne duže od  $20\mu s$ ,
- sklopni strujni udarni talas, kod koga je vreme čela  $30\mu s$ , a vreme začelja dvostruko vreme čela,
- dugotrajan strujni talas pravougaonog oblika, koji na početku veoma brzo raste do maksimalne vrednosti, zatim određeno vreme zadržava tu vrednost, a nakon toga naglo opada na nulu.

Strujni udarni generatori se osim ispitivanja elektroenergetske opreme na atmosferske i sklopne udarne struje pri tipskim ispitivanjima mogu koristiti u drugim oblastima, kao što su oblast nuklearne fizike, fizike plazme, lasera itd.

## 7.2 Standardni oblik kratkotrajnog udarnog talasa za ispitivanje odvodnika prenapona

Oblik standardnog atmosferskog strujnog talasa kratkog trajanja se definiše na veoma sličan način kao kod naponskih udarnih talasa. Na slici 7.1 prikazan je tipičan talasni oblik strujnog talasa i postavljanje prave linije koja definiše linearizovano čelo talasa. Čelo



Slika 7.1: Tipičan oblik udarnog strujnog talasa i način određivanja čela i začelja

talasa se određuje na taj način što se provlači prava koja prolazi kroz tačke u kojima struja postigne 10% i 90% amplitude struje. Čelo talasa se zatim izračunava iz izraza:

$$T_C = \frac{T_{90} - T_{10}}{0.8} \quad (7.1)$$

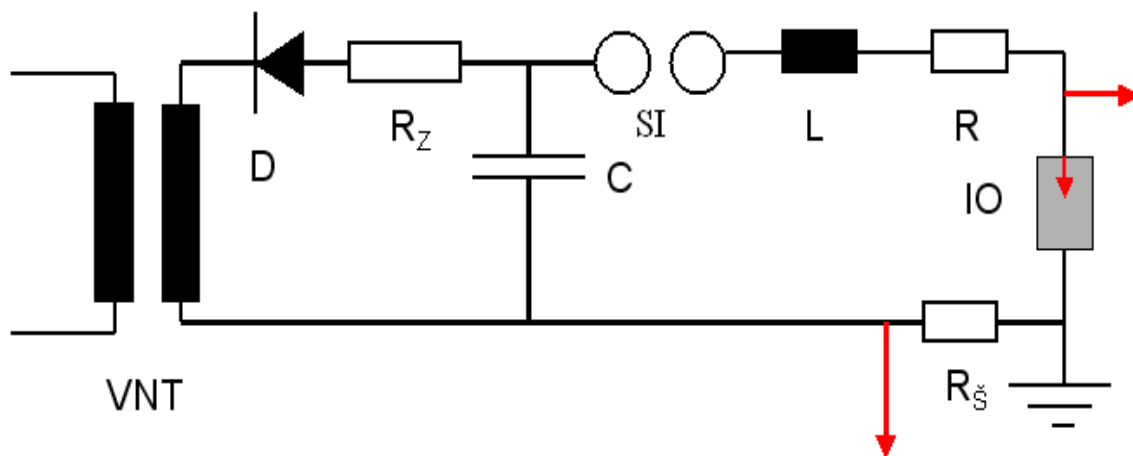
Vreme čela strujnog talasa je vreme potrebno da linearizovano čelo pretstavljeno pravom linijom koja prolazi kroz tačke 10% i 90% od amplitude poraste od nulte vrednosti do

pune amplitude talasa. Na slici 7.1 je izabrana amplituda strujnog talasa 10 kA.

Vreme začelja je vreme potrebno da talas na opadajućem delu opadne na polovinu svoje amplitude.

### 7.3 Dobijanja strujnih udarnih talasa kratkog trajanja

Strujni udarni talasi kratkog trajanja se u laboratorijama dobijaju pražnjenjem velikih kondenzatorskih baterija kroz kolo koje sadrži mali induktivitet i otpornost. Na slici 7.2 prikazana je principijelna šema po kojoj se dobijaju strujni talasi. Na slici 7.2 oznake



Slika 7.2: Šema po kojoj se dobijaju strujni talasi kratkog trajanja

imaju sledeće značenje:

*VNT* - visokonaponski transformator, koji se napaja regulisanim naponom iz regulacionog transformatora,

*D* - visokonaponska dioda za ispravljanje naizmeničnog napona u jednosmerni,

*R<sub>Z</sub>* - zaštitni otpornik za ograničenje struje punjenja kondenzatora,

*C* - baterija kondenzatora koja se sastoji od jednog ili više visokonaponskih kondenzatora u kojima se akumulira energija udarnog generatora,

*SI* -sferno iskrište koje služi za okidanje strujnog udarnog generatora,

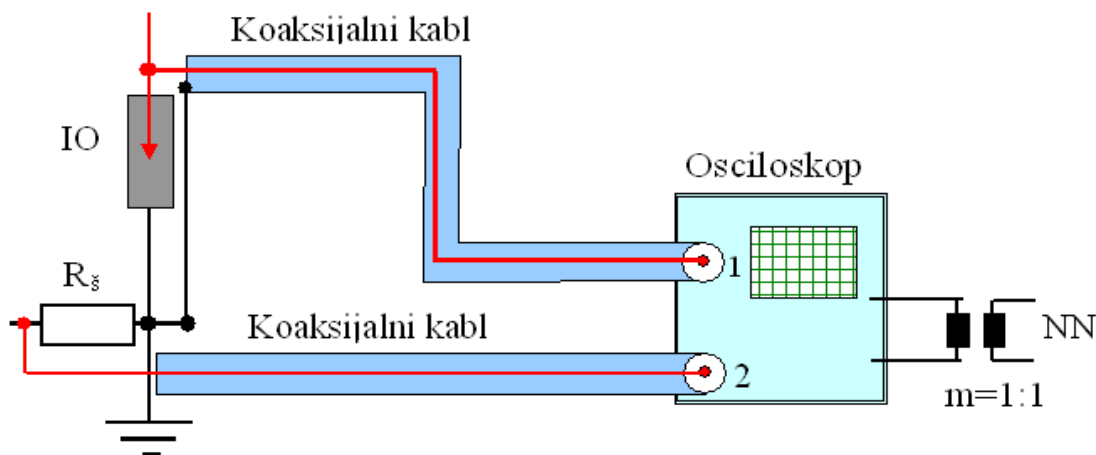
$L$  - induktivitet prigušnice i svih ostalih elemenata strujnog udarnog generatora,

$R$  - otpornost otpornika za podešavanje oblika talasa i otpornost svih ostalih elemenata kola,

$IO$  - ispitni objekat, koji je najčešće odvodnik prenapona,

$R_{\xi}$  - otpornik (šant za merenje udarnih struja), sa koga se pad napona vodi na merni instrument kojim se registruje talasni oblik struje.

Na slici 7.3 prikazan je detalj snimanja napona na objektu, koji se preko koaksijalnog kabla vodi na kanal 1 osciloscopa, kao i struje koja se meri pomoću šanta za merenje udarnih struja i vodi na kanal 2 osciloscopa. Oznake na slici 7.3 imaju sledeće značenje:



Slika 7.3: Šema po kojoj se vrši jednovremeno snimanje napona na objektu i struja koje daje udarni generator

$NN$  - napajanje osciloskopa iz mreže niskog napona

$m = 1 : 1$  - izolacioni transformator odnosa preobražaja 1:1, čiji su primarni i sekundarni namotaj međusobno izolovani za napon od nekoliko kV do nekoliko desetina kV u zavisnosti od visine napojnog napona kondenzatora udarnog generatora i očekivane udarne struje.

1 i 2 - ulazni kanali 1 i 2 osciloskopa.

Prilikom ispitivanja udarnim naponima i strujama veoma je važno izvršiti pravilno uzemljenje visokonaponske ispitne opreme. Ispitna i merna oprema treba da budu uzemljene u jednoj tački da se ne bi pojavljivali padovi napona na uzemljivačkim provodnicima



zbog induktivnog pada napona usled proticanja impulsnih struja. Kućište osciloskopa vezano je preko plašta za tačku uzemljenja udarnog generatora. Ukoliko se pojavi porast potencijala tačke uzemljenja u odnosu na tačku referentnog potencijala, taj porast se prenosi i na kućište osciloskopa. Do porasta potencijala u tački uzemljavanja udarnog strujnog generatora dolazi zbog toga što se pri impulsnim pojavama ne vraća sva struja definisanim strujnim kolom povratnog puta do donjeg priključka kondenzatora, već se deo struje zatvara prema zemlji preko parazitnih kapacitivnosti i induktivnosti, što neminovno dovodi do proticanja struje debalansa kroz uzemljivač. Struje koje protiču kroz uzemljivač su visokofrekventne, čija je frekvencija jednaka frekventnom spektru udarnog strujnog talasa, mada ponekad može da bude znatno viša od frekvencije udarne struje koju koristimo za ispitivanje. Da bi sprečili da visokofrekventni porast potencijala uzemljivača prenesen na kućište osciloskopa dovede do razornog pražnjenja između kućišta i energetskog napajanja osciloskopa iz mreže niskog napona, koristi se izolacioni transformator odnosa preobražaja 1:1 čiji su primar i sekundar međusobno izolovani da mogu da izdrže nekoliko kV ili nekoliko desetina kV. Primena izolacionih transformatora za napajanje uređaja iz mreže niskog napona pri visokonaponskim ispitivanjima je obavezno.

Da bi se koristio samo jedan osciloskop za merenje pada napona na ispitivanom objektu i za merenje struje preko pada napona na šantu  $R_{\xi}$ , i objekat ispitivanja i merni šant za udarne struje su uzemljeni u istoj tački. Potencijal tačke uzemljenja se preko plašta koaksijalnih kablova vodi na kućište osciloskopa. Pri merenju struje pojavljuje se naponski signal inverznog polariteta u odnosu na merenje napona na objektu, zbog čega pri snimanju treba na osciloskopu podesiti inverziju signala za merenje struja u odnosu na signal za merenje napona na objektu ispitivanja.

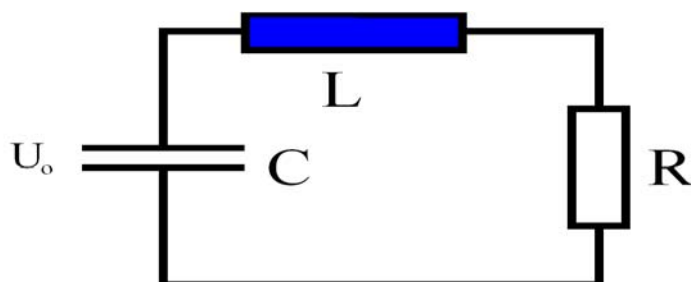
Okidanje strujnog udarnog generatora se vrši pomoću trigatrona na identičan način kao kod naponskog udarnog generatora.

Na slici 7.4 prikazana je pojednostavljena električna šema udarnog strujnog generatora posle reagovanja iskrišta na osnovu koga se može odrediti talasni oblik strujnog udarnog talasa. Na slici 7.4 oznaka  $R$  odnosi se na ukupnu otpornost kola u koje uključena otpornost ispitnog objekta i mernog šanta  $R_{\xi}$ . Na osnovu šeme može se izračunati vremenski oblik struje pražnjenja pri naponu punjenja kondenzatora  $C$  koji iznosi  $U_0$ . Mogu se razlikovati tri slučaja u zavisnosti od odnosa parametara  $R$ ,  $L$  i  $C$  kola. To su slučaj oscilatorno prigušenog talasa, aperiodičnog talasa i aperiodično kritičnog talasa. Pri određivanju parametara talasa uvedene su sledeće skraćenice:

$$\delta = \frac{R}{2L} - \text{koeficijent prigušenja,}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} - \text{sopstvena učestanost kola bez gubitaka, odnosno otpora } R,$$

$$\alpha = \sqrt{1 - \frac{\delta^2}{\omega^2}} - \text{koeficijent smanjenja učestanosti oscilacija zbog uticaja otpornosti kola.}$$



Slika 7.4: Pojednostavljena električna šema udarnog strujnog generatora posle reagovanja iskrišta

### Oscilatorno prigušen oblik talasa

Oscilatorno prigušeni oblik talasa se dobija kada je ispunjen uslov:

$$\delta < \omega \quad (7.2)$$

U ovom slučaju talasni oblik se može opisati sledećom analitičkom funkcijom.

$$i(t) = \frac{U_o}{L\alpha\omega} \sin(\alpha\omega t) e^{-\delta t} \quad (7.3)$$

Amplituda talasa se može približno izračunati iz izraza:

$$I_m = \frac{U_o}{L\alpha\omega} \quad (7.4)$$

Na slici 7.5 prikazan je grafik oscilatornog talasa. Standardi zahtevaju da u drugoj poluperiodi maksimalna vrednost bude manja od 0.2 od prvog maksimuma udarne struje.

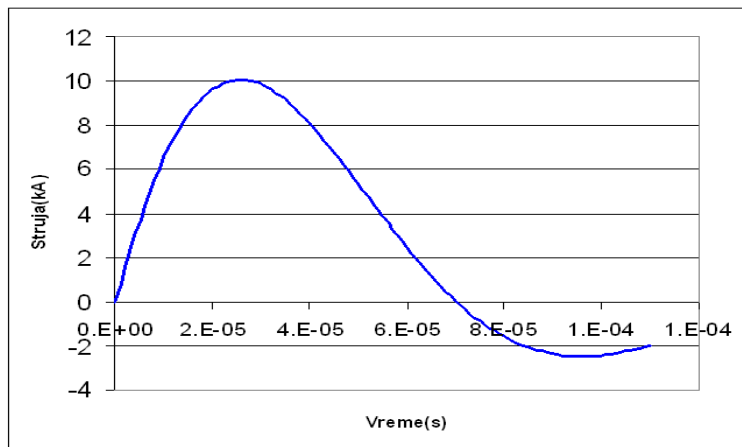
### Aperiodičan oblik talasa

Aperiodičan oblik talasa se dobija kada je ispunjen uslov:

$$\delta > \omega \quad (7.5)$$

U ovom slučaju talasni oblik se može opisati sledećom analitičkom funkcijom.

$$i(t) = \frac{U_o}{L\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)} \left( e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \quad (7.6)$$



Slika 7.5: Oscilatorno prigušeni talasni oblik napona

Amplituda talasa se može izračunati iz izraza:

$$I_m = \frac{U_o}{L\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)} \quad (7.7)$$

gde su:

$$\frac{1}{T_1} = \delta + \sqrt{\delta^2 - \omega^2} \quad (7.8)$$

$$\frac{1}{T_2} = \delta - \sqrt{\delta^2 - \omega^2} \quad (7.9)$$

$$(7.10)$$

Na slici 7.6 prikazan je grafik oscilatornog talasa.

### Aperiodično kritičan oblik talasa

Aperiodično kritičan oblik talasa se dobija kada je ispunjen uslov da je:

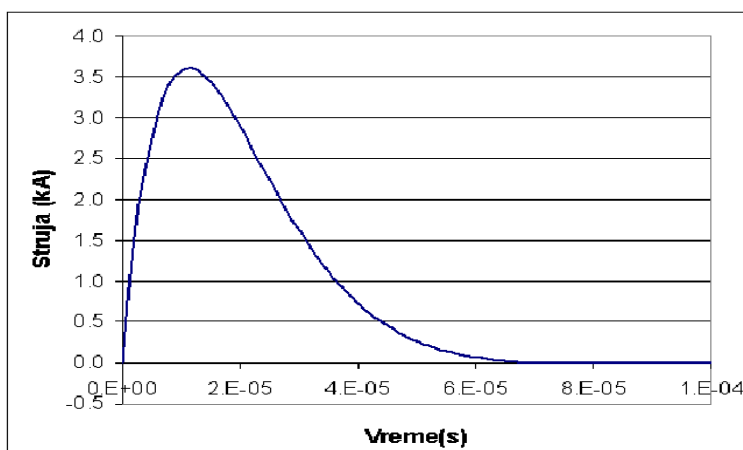
$$\delta = \omega \quad (7.11)$$

U ovom slučaju analitički izraz za vremensku promenu struje je:

$$i(t) = \frac{U_o}{L} t e^{-t\omega} \quad (7.12)$$

gde je:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (7.13)$$

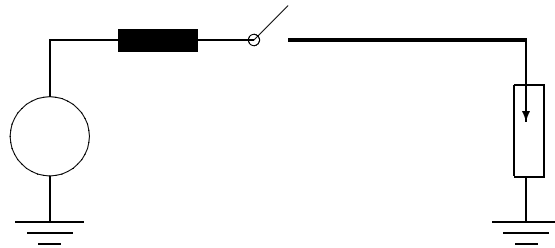


Slika 7.6: Aperiodičan talasni oblik struje

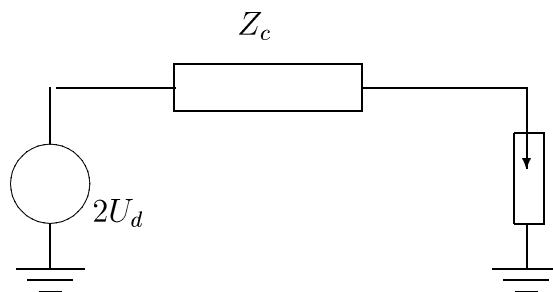
## 7.4 Generator struje dugog trajanja

Ispitivanja udarnom strujom dugog trajanja, koja je približno pravougaonog oblika, vrši se strujnim udarnim generatorom sa raspedeljenim parametrima. Primenjuje se za ispitivanje sposobnosti odvodnika prenapona da podnese sklopne prenapone. Ispitivanje se sprovodi na novim uzorcima nelinearnih otpornika nazivnog napona između 3 kV i 6 kV, sem u slučaju kada je naznačeni napon kompletnog odvodnika manji od 3 kV.

Dugotrajna udarna podnosiva struja ili podnosiva struja rasterećenja vodova je amplituda struje približno pravougaonog oblika trajanja od  $500\mu\text{s}$  do  $3200\mu\text{s}$ , u zavisnosti od klase odvodnika u odnosu na dugotrajne struje pražnjenja. Dugotrajne struje koje se mogu pojaviti kroz odvodnik nastaju zbog visokih sklopnih prenapona koji su prouzrokovani sklopnim operacijama kao što su uključivanje voda u praznom hodu, uključivanje velike kondenzatorske baterije, isključenje voda sa brzim automatskim ponovnim uključanjem. Pri ovim manipulacijama dolazi do pojave sklopnih prenapona amplitude  $U_{max}$ , koji odvodnik predviđen za teške uslove rada treba da ograniči. Pri reagovanju kroz odvodnik protiče približno pravougaona struja, čija se amplituda može približno odrediti na osnovu šeme sa slike 7.7. Na slici 7.7 prikazana je ekvivalentna šema po Petersenovom pravilu u kojoj se smatra da induktivnost izvora suprotstavlja veliku impedansu proticanju pravougaone struje, a odvodnik prenapona održava praktično konstantan napon na sebi. Generator u šemi na slici 7.7 ima vrednost napona koja je identična naponu  $U_{max}$  koji vlada na vodu u trenutku reagovanja odvodnika. Polovina tog napona  $U_d = U_{max}/2$  se kreće kao direktni talas ka odvodniku, a druga polovina se kao inverzni talas  $U_i = U_{max}/2$  vraća ka početku voda, da bi se reflektovao od induktivnosti izvora. Na slici 7.9 prikazano je određivanje amplitude pravougaone struje primenom Beržeronovog dijagrama.



Slika 7.7: Ekvivalentna šema za određivanje struje pri uključanju voda u praznom hodu



Slika 7.8: Petersenova šema za određivanje struje rasterećenja dugih vodova

Struja kroz odvodnik se može dobiti primenom sledećeg izraza:

$$I_{odv} = \frac{U_{max} - U_{odv}}{Z_c} \quad (7.14)$$

gde su:

$I_{odv}$  –pravougaona struja usled sklopnog talasa koja protiče kroz odvodnik,

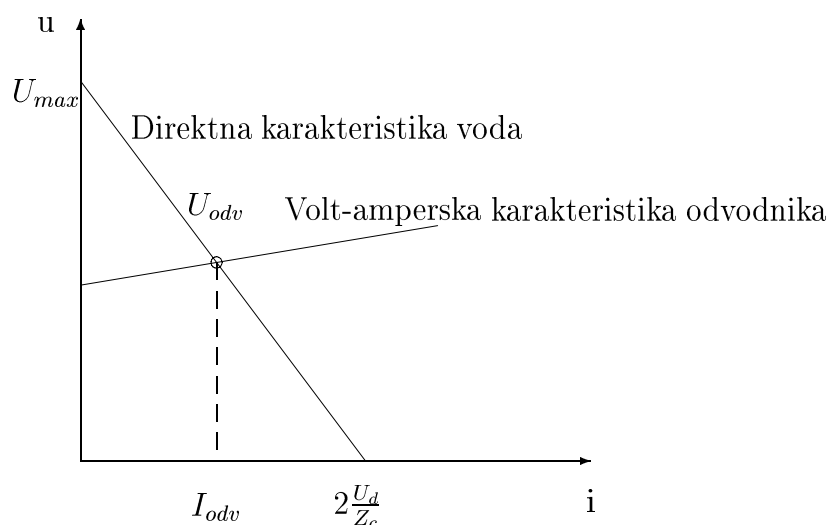
$U_{odv}$  –preostali napon na odvodniku usled proticanja struje  $I_{odv}$ ,

$Z_c$  –karakteristična impedansa voda,

$U_{max}$  – maksimalni prenapon koji je raspoređen duž voda u trenutku rasterećenja voda kroz odvodnik.

Trajanje struje u  $\mu s$  je:

$$T = 2 \frac{d}{v} \quad (7.15)$$



Slika 7.9: Određivanje struje rasterećenja kroz odvodnik primenom Beržeronovog dijagrama

gde je  $d$ —dužina voda u  $km$ , a  $v$ —brzina prostiranja talasa u  $km/\mu s$ . Specifična absorbovana energija u odvodniku usled rasterećenja dugih vodova dobija se na osnovu izraza:

$$W = \frac{U_{odv}}{U_r} I_{odv} \quad (7.16)$$

odnosno:

$$W = \frac{U_{odv}}{U_r} \left( \frac{U_{max}}{Z_c} - \frac{U_{odv}}{Z_c} \right) \quad (7.17)$$

Kada se u izrazu 7.17 izvrši množenje i deljenje sa  $U_{odv}$  i pregrupisanje članova, dobija se često korišćen izraz:

$$W = \frac{U_{odv}}{U_r} \left( \frac{U_{max}}{U_r} - \frac{U_{odv}}{U_r} \right) \frac{U_r}{Z_c} \quad (7.18)$$

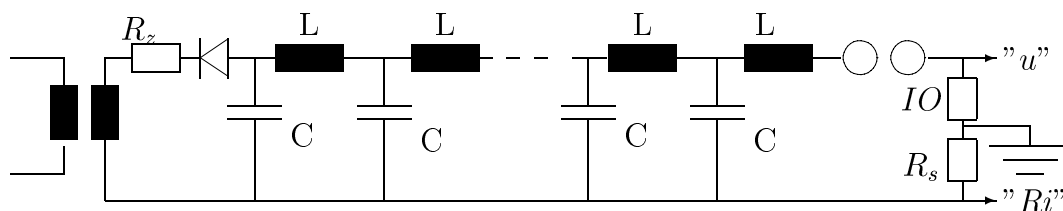
Oznaka  $U_r$  u izrazu 7.18 označava naznačeni napon odvodnika.

Za dobijanje sklopnog udarnog talasa se koristi generator pravougaonog strujnog talasa sa raspoređenim parametrima, čija je šema data na slici 7.10. Oznake na slici 7.10 imaju sledeće značenje:

$C$ —pojedinačne kapacitivnosti udarnog generatora sa raspoređenim parametrima,

$L$ —pojedinačne induktivnosti udarnog generatora sa raspoređenim parametrima,

$IO$ —ispitivani objekat (uzorak odvodnika prenapona),



Slika 7.10: Kolo za dobijanje dugotrajne udarne struje za simulaciju sklopnog talasa

$R_s$  – otpornost šanta za merenje udarnih struja,

” $u$ ” – naponski signal koji se preko odgovarajućeg delila napona vodi na osciloskop,

” $Ri$ ” – Naponski signal sazmeran struji kroz odvodnik koji se sa šanta vodi na osciloskop.

Svi kondenzatori su napunjeni do određenog jednosmernog napona  $U_o$  kada dolazi do reagovanja iskrišta. Posle toga dolazi do rasterećenja kondenzatora  $C$  preko rednih inuktivnosti  $L$ , što dovodi do obrazovanja približno pravougaonog strujnog talasa. Prema međunarodnim preporukama broj  $LC$  sekcija generatora pravougaonih strujnih talasa treba da iznosi oko 10. Snimanje struje se vrši preko šanta koji je na red vezan sa kolom udarnog generatora.

Približna vrednost amplitude struje koju generator pravougaonog talasa daje, uz zanemaren uticaj otpornosti u kolu, iznosi:

$$I = \frac{U_o}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (7.19)$$

Trajanje strujnog impulsa iznosi:

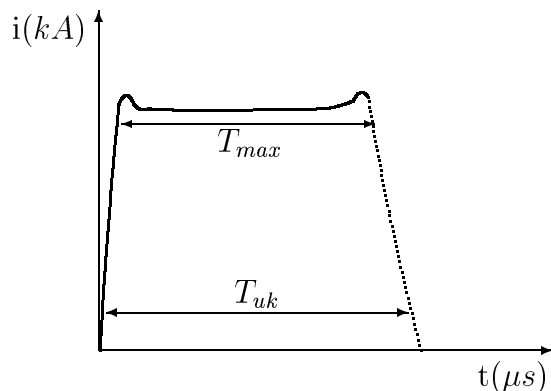
$$T = n \cdot \sqrt{LC} \quad (7.20)$$

gde je  $n$  broj sekcija generatora pravougaonog talasa.

Ako se na red sa ispitivanim objektom veže dodatni otpornik  $R_{dod}$  tako da bude ispunjen uslov da je  $R_{io} + R_s + R_{dod} = Z_c$ , gde je  $Z_c$  karakteristična impedansa veštačkog voda:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (7.21)$$

tada se dobija dvostruko manja amplituda struje i dvostruko duže trajanje talasa. Tipičan oscilogram dugotrajne struje prikazan je na slici 7.11.



Slika 7.11: Tipičan oscilogram struje dugog trajanja

Na slici 7.11 su date oznake pojedinih karakteristika pravougaonog strujnog talasa. Pod konvencionalnim trajanjem maksimalne vrednosti struje  $T_{max}$  se podrazumeva vreme kada talas ima vrednost iznad 90% od temene vrednosti struje. Pod ukupnim konvencionalnim trajanjem struje  $T_{uk}$  se podrazumeva vreme kada talas ima vrednost iznad 10% od temene vrednosti struje. Ukupno konvencionalno vreme strujnog talasa ne treba da prelazi 150 % od trajanja konvencionalnog trajanja maksimalne vrednosti struje.



# Sadržaj

<b>II</b>	<b>Oprema laboratorija za visoki napon</b>	<b>85</b>
<b>4</b>	<b>Namena laboratorija za visoki napon</b>	<b>87</b>
<b>5</b>	<b>Dobijanje visokih naizmeničnih napona</b>	<b>89</b>
5.1	Visokonaponski ispitni transformatori . . . . .	89
5.2	Sprege ispitnih transformatora . . . . .	94
5.3	Rezonantna kola . . . . .	97
5.3.1	Serijska rezonantna kola . . . . .	97
5.3.2	Transformatori sa paralelnim rezonantnim kolom . . . . .	99
5.3.3	Transformatori sa kombinovanim redno-paralelnim rezonantnim kolom	100
5.3.4	Kaskadna veza ispitnih transformatora sa rezonantnim kolom . . . .	101
<b>6</b>	<b>Udarni naponski generatori</b>	<b>105</b>
6.1	Potreba za ispitivanjem udarnim naponima . . . . .	105
6.2	Definicija udarnih napona . . . . .	105
6.2.1	Jednostepeni udarni generatori . . . . .	109

6.2.2	Okidanje udarnog generatora . . . . .	111
6.2.3	Višestepeni udarni generatori . . . . .	115
6.2.4	Dobijanje sečenog talasa . . . . .	118
<b>7</b>	<b>Strujni udarni generatori</b>	<b>121</b>
7.1	Namena . . . . .	121
7.2	Standardni oblik kratkotrajnog udarnog talasa za ispitivanje odvodnika prenapona . . . . .	122
7.3	Dobijanja strujnih udarnih talasa kratkog trajanja . . . . .	123
7.4	Generator struje dugog trajanja . . . . .	128