

# **Analiza rada Teslinog transformatora**

## Sadržaj:

1. Uvod.....	3
2. Konstrukcija Teslinog transformatora.....	4
2.1 Napojni transformator.....	6
2.2 Iskrište sa LC oscilatornim kolom.....	7
2.3 Visokonaponski transformator sa kapacitivnim terminalom.....	9
2.4 Dimenzije Teslinog transformatora.....	14
3. Konceptija rada Teslinog transformatora.....	16
4. Postupci za automatizaciju izbora parametara.....	19
4.1 Microsoft Excel.....	19
4.2 MATLAB.....	21
5. Primeri izbora parametara Teslinog transformatora.....	23
5.1 Microsoft Excel.....	23
4.2 MATLAB.....	25
6. Zaključak.....	27
7. Literatura.....	28

## 1. Uvod

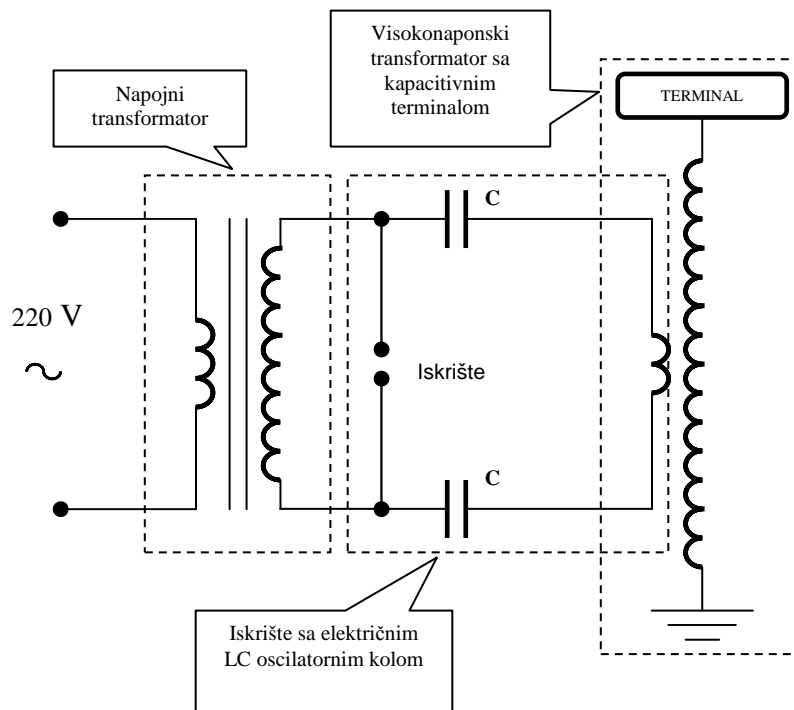
U laboratorijama za visoki napon se vrše ispitivanja sposobnosti izolacije različite opreme na podnošenje visokih napona, koji su po pravilu viši od radnih napona kojima je ispitivana izolacija izložena u normalnom pogonu i koji simuliraju određene tipove prenapona. Ispitivanja opreme mogu biti tipska i serijska. Tipska ispitivanja se vrše na jednom ili više uzoraka, dok se serijska vrše na svakom komadu gotovog proizvoda, u cilju eliminisanja neispravnih elemenata. U laboratorijama visokog napona nalaze se uređaji za proizvodnju visokih napona različitog talasnog oblika, kao i uređaji za generisanje struja velikih amplituda. U ovakvim laboratorijama proizvode se sledeće vrste napona: visoki napon industrijske učestanosti, visoki jednosmerni napon, velike udarne struje i visoki naponi visoke učestanosti.

Visoki naponi visoke učestanosti se primenjuju kod ispitivanja dielektrične čvrstoće izvesnih izolacionih materijala u vezi sa posmatranjem ponašanja ovih materijala u prelaznim stanjima, kao što su zemljospoj sa lukom ili pri delovanju unutrašnjih prenapona. Jedan od uređaja za dobijanje visokih napona visoke učestanosti je Teslin transformator. Kao što mu i samo ime kaže, ovaj uređaj je izumeo Nikola Tesla (1856-1943), istraživajući mogućnost bežičnog prenosa električne energije. Nakon pomaka koje su u oblasti visokih učestanosti napravili Maksvel i Herc, Tesla se posvetio ovoj oblasti, uočavajući sve prednosti koje ona donosi: sijalice bi mogle da svetle sjajnije, prenos energije bi mogao biti efikasniji i bezbednost bi bila veća, jer bi energija mogla bezopasno proći kroz telo. Nakon nekoliko bezuspešnih pokušaja, 1891. godine patentirao je uređaj, danas poznatiji kao Teslin transformator, kojim je struju učestanosti 60 Hz transformisao u struju učestanosti nekoliko stotina kHz i pri tome na izlazu transformatora dobio veoma visoke napone. Pomoću oscilacija visokih učestanosti, Nikola Tesla je došao do otkrića koje mu je postalo opsesija, uspeo je da osvetli vakumsku cev bežično, pri čemu je energija preneti vazdušnim putem. Teslin transformator je prvi put predstavljen na univerzitetu Columbia u SAD-u, a već 1892. godine Tesla je izveo niz eksperimenata sa naponima visoke učestanosti na univerzitetu u Londonu, čime je zadivio studente i naučnike.

U ovom radu biće prikazane različite modifikacije konstrukcija Teslinog transformatora, opisane prednosti i mane pojedinih delova Teslinog transformatora, kao i načini za određivanje njihovih parametara. Takođe, biće opisan i princip rada teslinog transformatora, uslovi u kojima je njegov rad najefikasniji, kao i procesi koji se pri njegovom radu javljaju. Poseban deo zauzimaće i postupci za automatizaciju izbora podataka Teslinog transformatora korišćenjem softvera i primeri izbora parametara Teslinog transformatora, primenom upravo ovih programa.

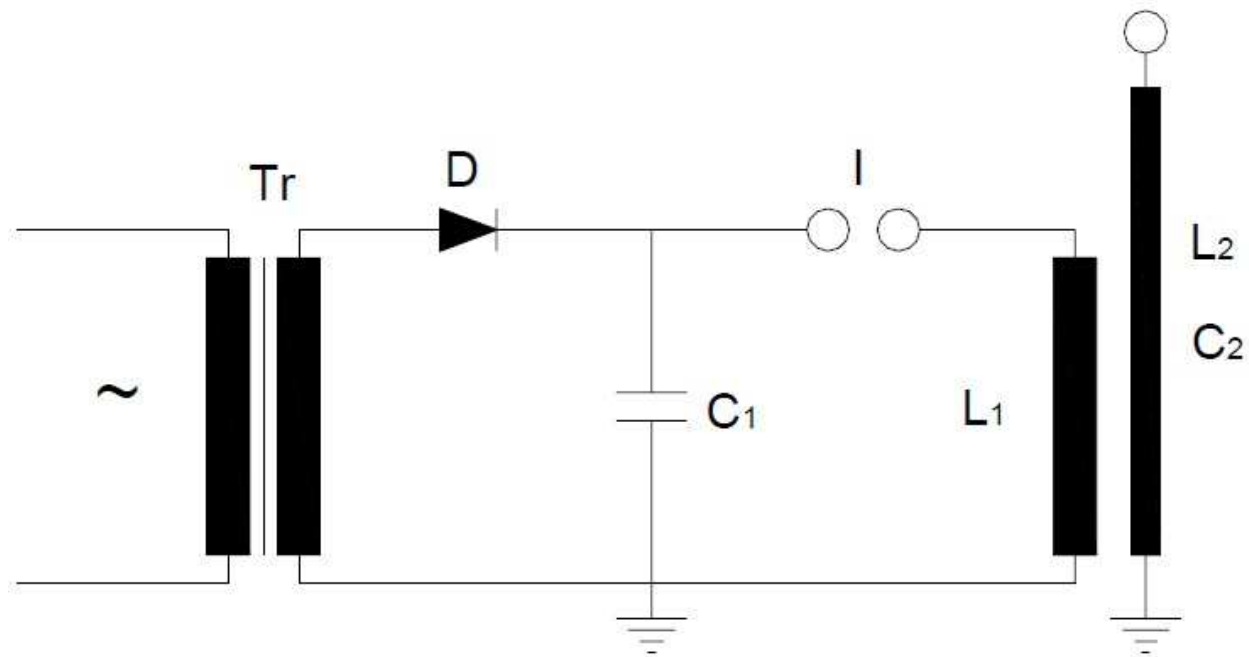
## 2. Konstrukcija Teslinog transformatora

Teslin Transformator je, kao što je već navedeno, uređaj za dobijanje visokih napona visoke učestanosti. Naponi koji se dobijaju su reda od nekoliko stotina kV do nekoliko MV, frekvencija u rasponu od 50 kHz do 400 kHz. Kolo za dobijanje ovakvih napona se sastoji iz tri funkcionalne međusobno povezane jedinice. To su: transformator za napajanje, iskrište sa električnim LC oscilatornim kolum i visokonaponski transformator sa kapacitivnim terminalom. Šematski prikaz Teslinog transformatora prikazan je na slici 2.1.



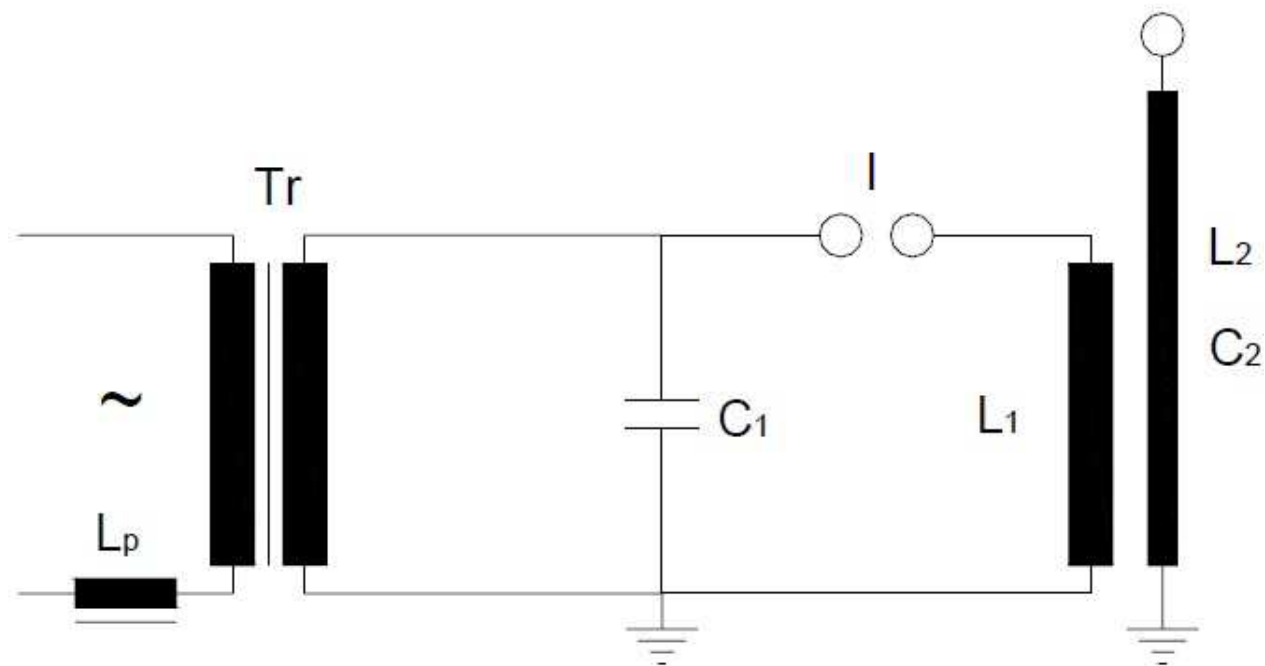
Slika 2.1. Šema Teslinog transformatora

Na slici 2.2. prikazana je zamenska šema Teslinog transformatora koja se sastoji od dva međusobno povezana oscilatorna kola, primarnog i sekundarnog. Ta dva oscilatorna kola imaju istu ili blisku frekvenciju oscilovanja. Primarno kolo čine kondenzator kapaciteta  $C_1$  i vazдушna prigušnica induktivnosti  $L_1$ , dok sekundarno kolo formiraju vazдушna prigušnica induktivnosti  $L_2$  i parazitne kapacitivnosti između navojaka  $C_2$ . Kapacitet  $C_1$  se preko visokonaponske diode  $D$  puni preko transformatora  $Tr$  jednosmernim naponom sve dok ne reaguje iskrište  $I$ .



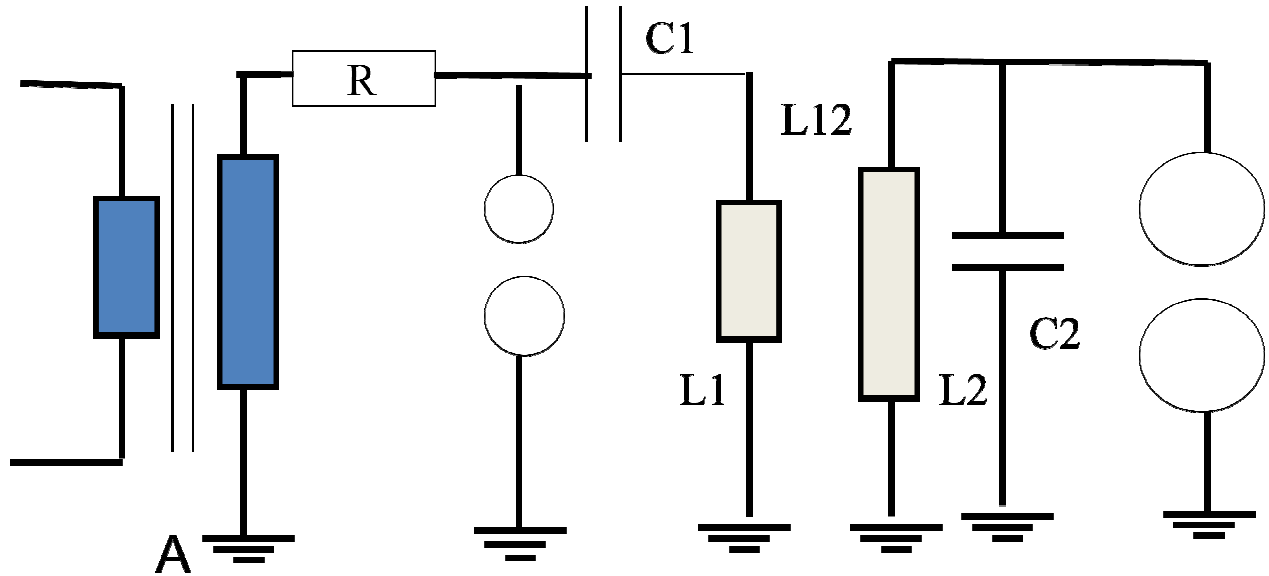
Slika 2.2. Zamenska šema Teslinog transformatora napajanog jednosmernim naponom

Slika 2.3. prikazuje zamensku šemu Teslinog transformatora napajanog naizmjeničnim naponom. Za razliku od šeme na slici 2.2, u ovom slučaju nema visokonaponske diode, ali zato postoji prigušnica  $L_p$  na primarnoj strani napojnog energetskog transformatora koja ima ulogu da priguši visoke harmonike struje. Ovakvim spojem se dobijaju oscilacije koje će biti slične neprigušenim oscilacijama. Sada se kondenzator  $C_1$  napaja visokim naizmjeničnim naponom frekvencije 50 Hz.



Slika 2.3. Zamenska šema Teslinog transformatora napajanog naizmjeničnim naponom

Šema sa slike 2.2. može se modifikovati i na drugi način, zamenom mesta kondenzatora  $C_1$  i iskrišta, izostavljajući iz kola ispravljač D. Otpor R služi za ograničenje struje kratkog spoja na sekundaru transformatora za napajanje. Zamenska šema ove modifikacije prikazana je na slici 2.4.



Slika 2.4. Modifikovana zamenska šema Teslinog transformatora

## 2.1 Napojni transformator

Napojni deo predstavlja visokonaponski transformator koji, transformiše mrežni napon 220V/50Hz u naizmenični napon od nekoliko kilovolti učestanosti takođe 50 Hz. Uloga ovog transformatora je da neprestano napaja kondanzator oscilatornog LC kola.

Napojni transformator napaja kondenzator  $C_1$  naizmeničnom strujom, a optimalan protok snage će se uspostaviti ako je impedansa transformatora jednaka impedansi kondenzatora ( $Z_c=Z_t$ ). Impedansa transformatora će biti:

$$Z_t = \frac{U_{2n}}{I} = \frac{U_{2n}^2}{P}, \quad (1)$$

gde je  $Z_t$  impedansa transformatora za napajanje,  $U_{2n}$  napon na sekundaru napojnog transformatora i  $P$  izlazna snaga transformatora.

Impedansa kondenzatora  $C_1$  se dobija kao:

$$Z_c = \frac{1}{2\pi C_1 f}, \quad (2)$$

gde je  $Z_c$  impedansa kondenzatora,  $C_1$  kapacitet kondenzatora  $C_1$  i  $f=50\text{Hz}$  mrežna učestanost.

Izjednačavanjem jednačina (1) i (2) dobijamo izlaznu snagu napojnog transformatora:

$$\frac{1}{2\pi C_1 f} = \frac{U_{2n}^2}{P}, \quad (3)$$

odnosno:

$$P = 2\pi C_1 f U_{2n}^2 \quad (4)$$

Potrebno je još odrediti i broj navojaka primarnog i sekundarnog namotaja napojnog transformatora. Ako je zadat napon koji mora postojati na izlazu sekundara transformatora i ako je poznat napon na primarnom namotaju, za izabrani broj navojaka primara, broj navojaka sekundarnog namotaja se određuje kao:

$$\frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{N_{1n}}{N_{2n}}, \quad (5)$$

gde su:  $U_{1n}$  i  $U_{2n}$  naponi na primaru, odnosno sekundaru, a  $N_{1n}$  i  $N_{2n}$  broj navojaka primara, odnosno sekundara.

## 2.2 Iskrište sa LC oscilatornim kolom

Sledeća jedinica kola sa Teslinim transformatorom naziva se iskrište sa LC oscilatornim kolom. Iskrište je sastavljeno od dve mesingane elektrode, koje na krajevima imaju pričvršćenje kugle. Elektrode su formirane od mesinganih šipki, dok su kugle na njihovim krajevima od mesinga sa primesama aluminijuma. Iskrište se ponaša kao naponom kontrolisan prekidač. Razmak između elektroda pri kome dolazi do probojnog napona, odnosno pojave električnog luka, što za posledicu ima pražnjenje kondenzatora preko iskrišta kroz primarni namotaj visokonaponskog transformatora, može se dobiti kao:

$$d = \frac{U_m}{E_p}, \quad (6)$$

pri čemu su  $U_m$  probojni napon, a  $E_p$  dielektrična čvrstoća medijuma između elektroda (najčešće mešavina gasova koja sadrži i  $SF_6$  gas, azot, itd.). Komercijalna iskrišta često koriste okidač koji omogućava inicijalnu jonizaciju dielektrika i olakšava njegov proboj između elektroda. Visoka struja koja teče kroz primarno kolo tipičnog Teslinog transformatora srednje veličine može brzo zagrevati statička iskrišta, te je potreban mehanizam za njihovo hlađenje. Upotreba niza od više statičkih iskrišta ima za posledicu jednaku raspodelu toplote i može donekle rešiti ovaj problem. Za optimalan rad Teslinog transformatora, od iskrišta se zahteva da spreči provođenje do ponovnog paljenja luka. Jonizovani gas dielektrika mora biti obnovljen posle svakog preskoka, održavajući odgovarajući pritisak u prostoru između elektroda. Vakuumska ili zatvorena statička iskrišta nisu pogodna za upotrebu kod Teslinih transformatora, jer zahtevaju vreme za obnovu od nekoliko milisekundi između dva preskoka. Komercijalna statička iskrišta su skupa za nabavku i upravljanje. Jonizovani vazduh se odstranja iz prostora između elektroda upotrebom vazduha pod pritiskom ili vakuumskim usisavanjem.

Obrtno iskrište predstavlja rešenje za nekoliko problema koji se javljaju kod statičkih iskrišta. Konfiguracija im je drugačija, jer se sastoje od grupe stacionarnih elektroda i grupe rotirajućih elektroda. Kada se obrtne electrode nađu u blizini statičkih, njihov otklon je najmanji i dolazi do pojave preskoka. Za hlađenje statičkih elektroda potrebno je obezbediti odgovarajuće hladnjake, dok se pokretne electrode gotovo ne zagrevaju. Upotrebom brzo rotirajućih iskrišta, eliminiše se potreba za odstranjnjem jonizovanog dielektrika.

Uz iskrište sastavni deo ovog sklopa je i LC oscilatorno kolo. Sastoji se od kondenzatora i primarnog namotaja visokonaponskog transformatora niskih kapacitivnosti i niskih induktivnosti. Kondenzator  $C_1$  i kalem  $L_1$  formiraju paralelno oscilatorno kolo. Kapacitivnost reda nekoliko  $\mu\text{F}$  i induktivnost reda  $\mu\text{H}$  omogućavaju visokofrekventno oscilovanje LC kola učestanošću do 400 kHz. Visokofrekventno oscilovanje je osnovna ideja pri konstruisanju Teslinog transformatora.

Za izračunavanje induktivnosti primarnog namotaja visokonaponskog transformatora prikazanom na slici 2.5. koristi se iskustvena formula, jer bi u suprotnom bilo potrebno rešavati složene matematičke jednačine:

$$L_1 = \frac{(r_1 \cdot N_1)^2}{2.54 \cdot (8 \cdot r_1 + 11 \cdot l_1)} \quad (7)$$

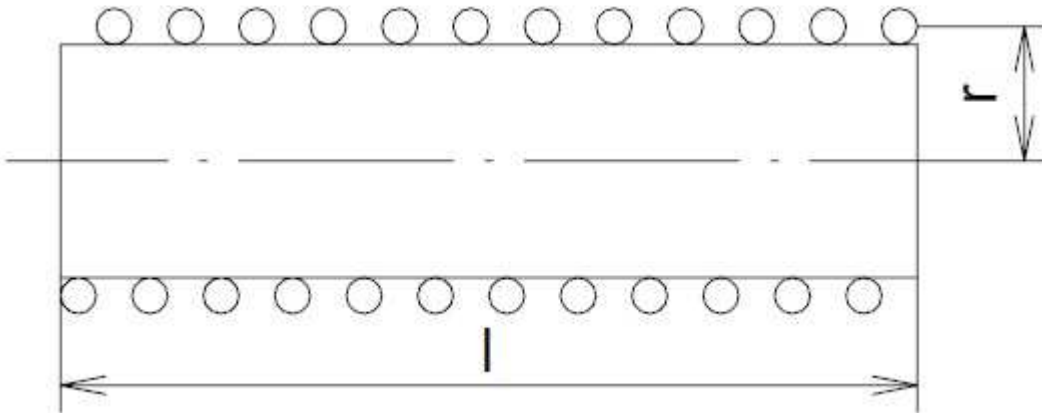
gde su:

$L_1$  – induktivnost primarnog namotaja u  $\mu\text{H}$

$r_1$  – poluprečnik primarnog namotaja u cm

$N_1$  – broj navojaka primarnog namotaja

$l_1$  – dužina primarnog namotaja u cm



Slika 2.5. Primarni namotaj visokonaponskog transformatora

Na osnovu formule:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}, \quad (8)$$

gde je  $f_1$  učestanost oscilovanja primarnog LC kola,  $L_1$  induktivnost primarnog namotaja,  $C_1$  kapacitivnost kondenzatora  $C_1$ , može se odrediti kapacitet  $C_1$  potreban za dobijanje željene učestanosti oscilovanja  $f_1$ . Ono što može predstavljati problem jeste činjenica da je



visokonaponske kondenzatore teško pronaći i najčešće moraju biti napravljeni nezavisno za svaki poseban slučaj. Takođe u slučaju statičkog iskrišta javlja se buka i varnice koje mogu biti veoma iritantne, dok obrtno iskrište zahteva motor. Zbog ovih nedostataka mogu se naći konstrukcije Teslinog transformatora koje umesto iskrišta imaju elektronske prekidače MOSFET ili IGBT.

### 2.3 Visokonaponski transformator sa kapacitivnim terminalom

Treći deo kola sa Teslinim transformatorom sastoji se od visokonaponskog transformatora sa kapacitivnim terminalom. Sekundarni namotaj visokonaponskog transformatora se nalazi u magnetskom polju primarnog namotaja, koji je deo oscilatornog LC kola. Primarni namotaj ima mali broj navojaka (5-20), zavisno do dimenzija transformatora. Izrađen je od izolovane bakarne žice prečnika do 10 mm, veoma male rezistanse. Sekundarni namotaj ima oko 1000 navojaka izolovane bakarne žice debljine oko 0.4 mm. Zbog velike razlike u broju navojaka primara i sekundara, na izlazu sekundarnog namotaja može se indukovati napon reda veličine MV, koji omogućava proboj vazduha na rastojanju do jednog metra. Na vrhu sekundarnog namotaja postavljen je terminal od aluminijuma u obliku kugle ili torusa, kapaciteta obično 15 – 30 pF, preko koga se električna energija prenosi u okolinu. Terminal je povezan sa sekundarnim namotajem i postavljen oko 10 cm iznad sekundara. Sekundarni namotaj i terminal čine sekundarno oscilatorno kolo. Na slici 2.6. prikazan je Teslin transformator na kome su rađena merenja u laboratoriji za visoki napon Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu.



Slika 2.6. Teslin transformator na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu

Pri dimenzionisanju visokonaponskog transformatora, moramo najpre proračunati potreban broj navojaka sekundara zadatih dimenzija. To se radi, uzimajući u obzir Teslinu teoriju o “1/4 talasne dužine”, ali i princip “koliko bakra u primaru – toliko bakra i u sekundaru”, tj. manje namotaja deblje žice na primaru treba da ima približno istu masu kao i više namotaja tanje žice na sekundaru. Teorija “1/4 talasne dužine” kaže da je dužina žice sekundarnog namotaja  $l_z$  jednaka jednoj četvrtini talasne dužine, koja odgovara prethodno određenoj učestanosti sekundara. Ovakvo dimenzionisanje omogućava velike struje u kolu za uzemljenje i visoke napone na terminal. Dužina žice je:

$$l_z = \frac{c}{4f}, \quad (10)$$

gde su  $l_z$  dužina žice,  $c$  brzina svetlosti i  $f$  učestanost oscilovanja LC kola.

Dužina žice se može lako odrediti in a drugi način, ako poznajemo dimenzije sekundarnog namotaja visokonaponskog transformatora:

$$l_z = N_2 \pi d, \quad (11)$$

pri čemu su  $N_2$  broj navojaka sekundara, a  $d$  prečnik sekundarnog namotaja. Izjednačenjem jednačina (10) i (11) može se dobiti broj navojaka sekundara:

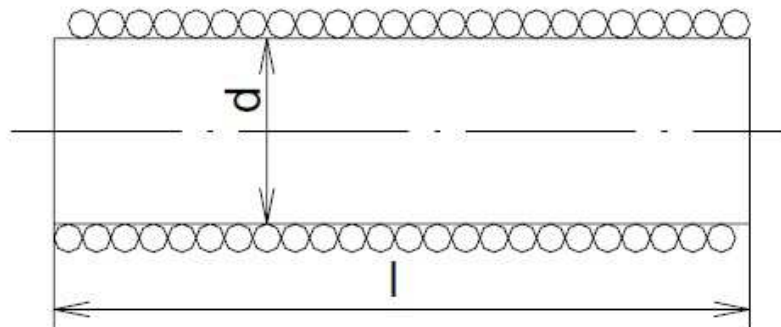
$$\frac{c}{4f} = N_2 \pi d \quad (12)$$

Sada kada je poznat broj navojaka sekundarnog namotaja visokonaponskog transformatora, lako se može utvrditi napon koji je potreban na izlazu sekundara napojnog transformatora kao:

$$U_{L1} = \frac{U_{L2} N_1}{N_2}, \quad (13)$$

pri čemu je  $U_{L1}$  napon na primaru,  $U_{L2}$  napon na sekundaru visokonaponskog transformatora,  $N_1$  broj navojaka primara i  $N_2$  broj navojaka sekundara, jer je napon na primaru visokonaponskog transformatora istovremeno i napon koji se traži na sekundarnom namotaju napojnog transformatora.

Induktivnost jednoslojne zavojnice  $L$  prikazane na slici 2.7. je induktivnost sekundarne vazdušne prigušnice, odnosno sekundarnog namotaja, i u opštem slučaju ga je komplikovano matematički izračunati, jer jednačina za proračun koeficijenta  $L$  različito oblikovanih zavojnica nije data nekim matematički zatvorenim izrazom, već su to uglavnom beskonačni redovi.



Slika 2.7. Jednoslojni kalem

Određenim zanemarivanjima dobijene su jednostavnije formule, koje u praksi služe za proračun induktivnosti jednoslojne vazdušne prigušnice, kada se ne traži apsolutna tačnost:

$$L = k\mu_0 \frac{SN^2}{l}, \quad (14)$$

gde su:

k – Nagaokin factor

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{V}\cdot\text{s}/\text{A}\cdot\text{m}$  – permeabilnost vakuuma

$S = d^2 \pi/4$  – površina preseka prigušnice

d – prečnik prigušnice

N – broj navojaka

l – dužina prigušnice

U tabeli 1. prikazane su vrednosti Nagaokinog faktora za različite vrednosti odnosa prečnika i dužine zavojnice d/l.

Tabela 1. Nagaokin faktor k

$\frac{d}{l}$	k	$\frac{d}{l}$	k	$\frac{d}{l}$	k
0.00	1.000	0.50	0.818	1.00	0.688
0.05	0.975	0.55	0.803	1.10	0.667
0.10	0.959	0.60	0.789	1.20	0.648
0.15	0.939	0.65	0.775	1.40	0.611
0.20	0.920	0.70	0.761	1.60	0.580
0.25	0.902	0.75	0.748	1.80	0.551
0.30	0.884	0.80	0.735	2.00	0.526
0.35	0.867	0.85	0.723	2.50	0.472
0.40	0.850	0.90	0.711	3.00	0.429
0.45	0.834	0.95	0.700	3.50	0.394

Takođe, za računanje induktivnosti sekundarnog namotaja, prikazanog na slici 2.8. u praksi se koristi Wheeler-ova formula:

$$L_2 = \frac{(r_2 N_2)^2}{2.54 \cdot (9r_2 + 10l_2)}, \quad (15)$$

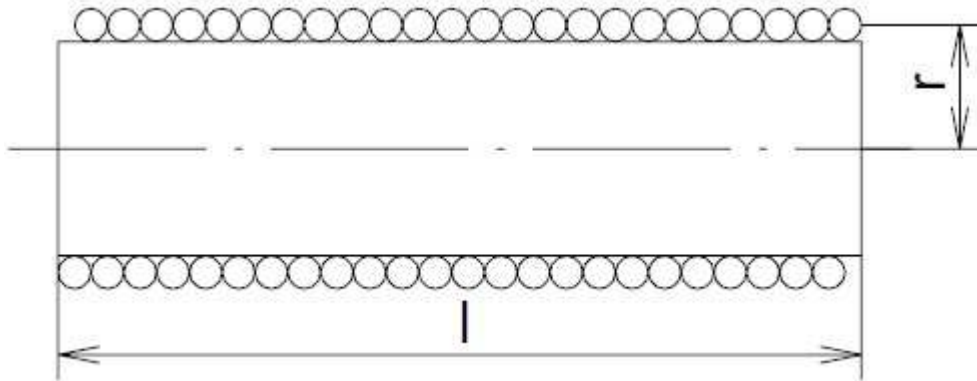
gde su:

$L_2$  – induktivnost sekundarnog namotaja u  $\mu\text{H}$

$r_2$  – poluprečnik sekundarnog namotaja u cm

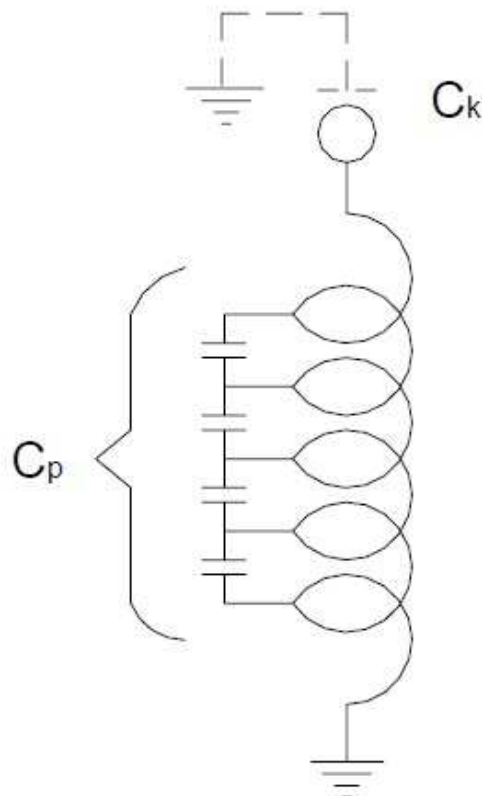
$N_2$  – broj navojaka sekundarnog namotaja

$l_2$  – dužina sekundarnog namotaja u cm



Slika 2.8. Sekundarni namotaj

Da bi se mogla izračunati frekvencija  $f_2$  potrebno je znati koliki je kapacitet  $C_2$ , a on se sastoji od parazitnih kapacitivnosti između navojaka i kapaciteta kugle (može biti kuglasta elektroda ili prstenasta elektroda) koja se nalazi na vrhu prigušnice, što je prikazano na slici 2.9, i služi za emisiju energije visoke frekvencije i visokog napona.



Slika 2.9. Parazitni kapaciteti između navojaka i kapacitet kugle

Parazитни kapaciteti se mogu približno odrediti pomoću Medhurstove formule:

$$C_p = kd_2, \quad (16)$$

gde su:

- $C_p$  – parazitska kapacitivnost između zavoja u pF
- $k$  – konstanta koja zavisi od odnosa dužine i prečnika sekundarnog kalema
- $d_2$  – prečnik sekundarnog kalema u cm

U tabeli 2. prikazane su vrednosti konstante  $k$  za različite vrednosti odnosa dužine kalema i njegovog prečnika  $l/d$ .

Tabela 2. Konstanta  $k$

$\frac{l}{d}$	$k$	$\frac{l}{d}$	$k$	$\frac{l}{d}$	$k$
5.0	0.81	3.5	0.67	2.0	0.50
4.5	0.77	3.0	0.61	1.5	0.47
4.0	0.72	2.5	0.56	1.0	0.46

Kapacitet kugle se računa preko formule:

$$C_k = 4\pi\epsilon_0 R, \quad (17)$$

gde su:

- $R$  – poluprečnik kugle
- $\epsilon_0 = 8.85416 \cdot 10^{-12} \text{ A}\cdot\text{s}/\text{V}\cdot\text{m}$  – dielektrična konstanta vakuuma

Za izračunavanje kapaciteta kuglaste elektrode važi formula:

$$C_{ke} = \frac{D^2}{7250}, \quad (18)$$

gde su:

- $C_{ke}$  – kapacitet kuglaste elektrode u pF
- $D$  – prečnik kuglaste elektrode u mm

Za izračunavanje kapaciteta prstenaste elektrode važi formula:

$$C_{kp} = \frac{(D_1 - D_2) \cdot D_2}{3000}, \quad (19)$$

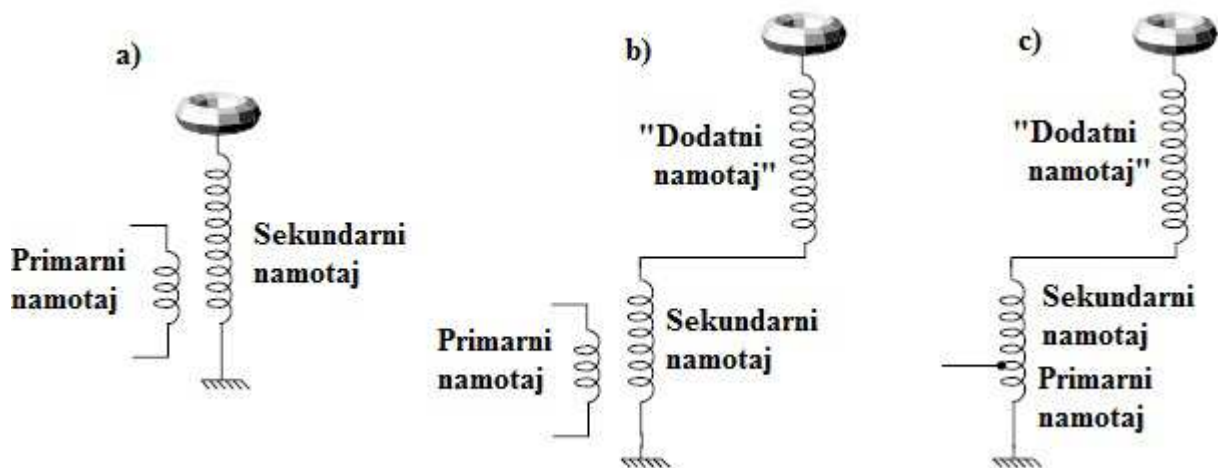
gde su:

- $C_{kp}$  – kapacitet prstenaste elektrode u pF
- $D_1$  – spoljašnji prečnik prstena
- $D_2$  – unutrašnji prečnik prstena

Sada se kapacitet sekundarnog kola dobija iz:  $C_2 = C_p + C_k$ .

Postoje određene modifikacije sekundara Teslinog transformatora prikazane na slici 2.10, koje uključuju deo koji je Nikola Tesla nazivao “dodatni namotaj”. Osnovna ideja je da se pomeri veći deo sekundarnog namotaja relativno daleko od magnetskog polja koje generiše primar. Sekundar, koji je redukovan na nekoliko navojaka, je sada u jakoj sprezi sa primarom.

Porast napona u redukovanom sekundaru je sada određen prenosnim odnosom Teslinog transformatora, kao i kod običnog transformatora. Ovaj redukovani sekundar služi za napajanje dodatnog namotaja. Kod standardnih Teslinih transformatora, visina na kojoj se nalazi terminal na vrhu sekundara ograničava potencijal na koji on može doći zbog moguće pojave luka prema bliskom primarnom namotaju ili direktno prema podu. Korišćenjem modifikacije na slici 2.10.b), terminal zajedno sa dodatnim namotajem može biti uzdignut daleko od bilo koje uzemljene tačke, izbegavajući na taj način bilo kakvo pražnjenje u zemlju. Ovaj sklop je složeniji zbog potrebe da se obezbedi jaka induktivna sprega između primara i sekundara, a da se u isto vreme održi dobra izolovanost između njih. Jaka sprega zahteva robusno i brzo obrtno iskrište, da bi se izbeglo rasipanje energije na gubitke u toku prenosa između primara i sekundara.



Slika 2.10. Modifikacije Teslinog transformatora: a) Standardni Teslin transformator  
b) Teslin transformator sa tri namotaja i induktivnom spregom c) Teslin transformator sa redno vezanim primarom i sekundarom

Na slici 2.10.c) prikazuje modifikaciju Teslinog transformatora koja se od one na slici 2.10.b) razlikuje zbog redne veze primara i sekundara, koji su uz to i induktivno spregnuti. Primar i sekundar formiraju na taj način autotransformator koji napaja dodatni namotaj. U ovom slučaju namotaji ne moraju biti izolovani, ali se zahtevi vezani za iskrište u ovom slučaju ne razlikuju od prethodnog.

## 2.4 Dimenzije Teslinog transformatora

Učink Teslinog transformatora zavisi od brojnih faktora kao što su gubici u komponentama, gubici u vezama, izbor parametara komponenata i uslovi u kojima sistem radi (vlaga, rastojanje od zemlje, itd.). Neki od ovih faktora direktno zavise od dimenzija Teslinog transformatora:

- Induktivnost primarnog i sekundarnog namotaja. Dobijeni napon je direktno proporcionalan kvadratnom korenu količnika induktivnosti sekundara i primara
- Aktivni gubici u primarnom namotaju

- Aktivni gubici u sekundarnom namotaju
- Parazitarne kapacitivnosti između navojaka sekundara. Namotaji kod kojih je odnos visine i širine manji imaju manje parazitne kapacitete.
- Rastojanje između terminala na vrhu sekundara i primarnog namotaja. Viši sekundar dozvoljava da terminal dođe na veći potencijal, pre nego što dođe do pražnjenja između njega i primara ili poda.
- Veličina terminala. Veći poluprečnik krivine terminala uslovljava veći napon praga. Takođe veći poluprečnik vodi ka većem terminalu, a samim tim je i njegov kapacitet prema zemlji veći. Kako povećanje kapaciteta terminala rezultuje smanjenjem napona koji se javlja na sekundaru, veličina terminala predstavlja kompromis.

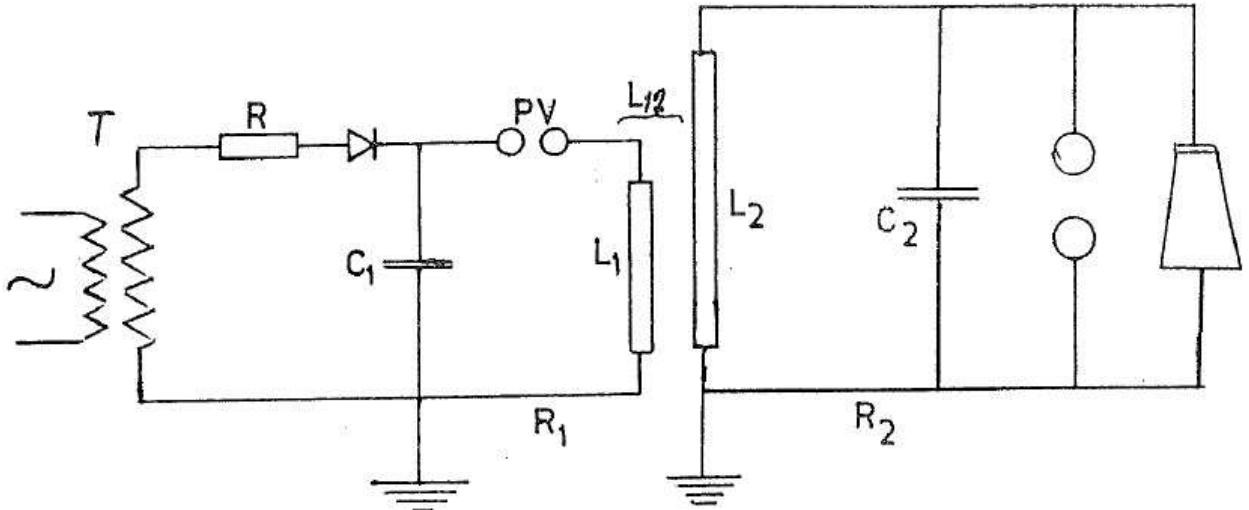
Veći Teslini transformatori podrazumevaju manji prenosni odnos, ali mogu da podnesu veće potencijale terminala, pa samim tim su pogodni za dobijanje većih napona. Snaga potrebna da bi se postigao zadovoljavajući učinak Teslinog transformatora nije linearno srazmerna veličini sekundarnog namotaja, već je ta zavisnost bar kvadratna. To bi značilo da Teslin transformator čija je visina sekundara duplo veća, zahteva četiri puta veću snagu.



Slika 2.11. Preskok između terminala na sekundarnom namotaju i sferne elektrode

### 3. Konceptija rada Teslinog transformatora

Za dobijanje prigušenih oscilacija visoke učestanosti i visokog napona primenjuje se šema na slici 3.1. Prema šemi na slici 3.1. napon se povećava u dva koraka: prvo preko transformatora T sa gvozdanim jezgrom, a zatim preko transformatora sa vazдушnim jezgrom. Induktivni namotaji  $L_1$  i  $L_2$  bez gvožđa, sa uzajamnom induktivnošću  $L_{12}$  predstavljaju Teslin transformator.



Slika 3.1. Šematski prikaz Teslinog transformatora

Preko transformatora T, zaštitnog otpora R i ispravljača opterećuje se kapacitet  $C_1$  jednosmernim naponom sve dok ne reaguje pobudno iskrište PV. Reagovanjem pobudnog iskrišta kondenzator  $C_1$  rasterećuje u kolu sa otporom  $R_1$  i induktivnošću  $L_1$ . Prilikom reagovanja iskrišta kondenzator predaje svoju električnu energiju:

$$W_{el} = \frac{C_1 U_1^2}{2}, \quad (20)$$

gde je  $U_1$  napon na kondenzatoru  $C_1$ ,

primarnom vazдушnom kalemu  $L_1$ , pri čemu nastaju prigušene oscilacije usled otpora  $R_1$  (otpor namotaja, veza i luka na iskrištu) čija je učestanost:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (21)$$

U primarnom namotaju električna energija prelazi u magnetsku energiju:

$$W_m = \frac{L_1 I_1^2}{2}, \quad (22)$$

gde je  $I_1$  struja koja teče kroz primarni namotaj koja stvara magnetsko polje.



Ako je sekundarni namotaj Teslinog transformatora dovoljno udaljen tako da praktično nema nikakvog međusobnog magnetskog uticaja između navojaka Teslinog transformatora, javljaju se oscilacije samo u primarnom kolu, jer se u sekundarnom kolu neće indukovati napon, pa samim tim ni oscilacije. U slučaju da je sekundarni namotaj dovoljno blizu primarnog, tako da jedan deo fluksa primarnog namotaja prolazi kroz sekundarni namotaj, u sekundaru će se indukovati elektromotorna sila učestanosti  $f_1$ . U sekundarnom namotaju pojaviće se naročito jake oscilacije, tj. Na slici 3.2. prikazana su dva spregnuta oscilatorna kola, primarno sastavljeno od  $C_1$  i  $L_1$ , a sekundarno od  $C_2$  i  $L_2$ . Teslin transformator će biti najefikasniji, ako je sopstvena učestanost sekundara ista, odnosno bliska primarnoj učestanosti:

$$f_1 = f_2 ,$$

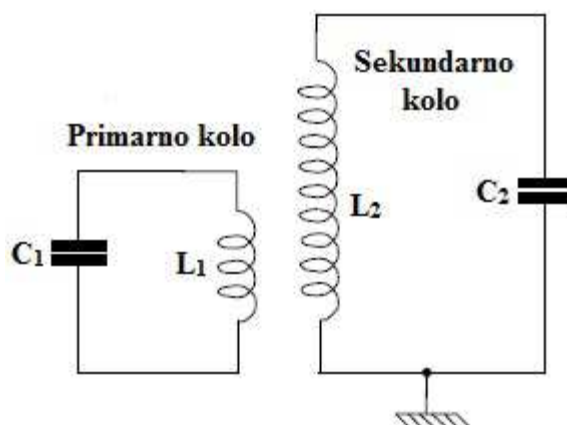
gde je:

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (23)$$

Karakter oscilacija sekundara jako zavisi od koeficijenta sprege koji iznosi:

$$K = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_1L_2}} \quad (24)$$

Ako je ovaj koeficijent mali, tj. sprega labava, oscilacije sa primara prenose se na sekundar sve dok amplitude u primaru ne padne na nulu, odnosno dok se luk u primaru ne ugasi. Sva energija primara prešla je u sekundar i sekundar nastavlja i dalje da osciluje. Oscilacije su slabo prigušene jer je otpor  $R_2$  sekundara vrlo mali, pa se energija u sekundaru lagano pretvara u toplotu.



Slika 3.2. Induktivna sprega primarnog i sekundarnog oscilatornog kola

Kada je koeficijent sprege veliki, tj. kada je sprega čvrsta, takođe se oscilacije, odnosno energija, sa primara prenosi na sekundar dok se luk na primaru ne ugasi. Međutim, usled čvrste sprege indukuje se ponovo u primaru, usled induktivnog dejstva sekundara, elektromotorna sila dovoljne veličine, tako da se luk ponovo upali. Sada se energija iz sekundara vraća u primar i obratno, tj. osciluje između primara i sekundara dok se ne utroši u toplotu oba kola.

Odnos preobražaja Teslinog transformatora iznosi:

$$\frac{U_2}{U_1} = \rho \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}, \quad (25)$$

gde su:

$U_1$  – napon opterećenja kapaciteta  $C_1$

$U_2$  – amplituda napona na kapacitetu  $C_2$

$$\rho = \frac{2K}{\sqrt{(1+a)^2 - 4a(1-K^2)}} \quad (26)$$

$$a = \frac{L_2 C_2}{L_1 C_1} \quad (27)$$

$K$  – koeficijent sprege.

Odnos preobražaja Teslinog transformatora zavisi od koeficijenta sprege, od vrednosti induktivnosti primara i sekundara, kao i od učestanosti primara i sekundara. U slučaju potpune podešenosti, tj. kada su učestanosti primara i sekundara jednake i  $a=1$  dobija se da je  $\rho=1$ . Opšte vrednosti za  $\rho$  dobijene računom prema gornjem obrascu su uvek za 20% do 25% više od vrednosti dobijene merenjem.

Na osnovu šeme veza na slici 3.1. mogu se dobiti oscilacije koje su, u pogledu ispitivanja, slične neprigušenim oscilacijama. U tom slučaju treba izostaviti ispravljač i preko podesnog otpora  $R$  napajati kondenzator  $C_1$  visokim naizmeničnim naponom od 50 Hz. Šema veza koja odgovara ovom slučaju prikazana je na slici 2.3. U ovom slučaju će u vremenskim intervalima od 10 ms nastajati oscilacije visoke učestanosti. Treba razmak pobudnog iskrišta PV i naizmenični napon napajnja tako podesiti da preskok na iskrištu nastane svakog trenutka kada napon dolazi u maksimum. Pri svakom preskoku na iskrištu javiće se u kolu oscilacije visokog napona visoke učestanosti. Ta će se pojava ponavljati u intervalima od 10 ms, pa će oscilacije biti vrlo slične neprigušenim oscilacijama. Pobudno iskrište u ovom slučaju mora biti snabdeveno i uređajem za oduvavanje luka ili načinjeno kao obrtno iskrište, da bi se izbeglo obrazovanje luka na njemu usled napona odnosno struje učestanosti 50 Hz.

U slučaju modifikacije prikazane na slici 2.4, kada su kondenzator  $C_1$  i pobudno iskrište zamenili mesta, a iz kola izostavljen ispravljač, pri čemu otpor  $R$  služi za ograničenje struje kratkog spoja na sekundaru napojnog transformatora. I ove se visokofrekventne oscilacije ponavljaju 100 puta u sekundi, kada uvek ponovo dolazi do paljenja luka na iskrištu PV.