

Načrtovanje Teslovega transformatorja

Mislav Trbušič, Jože Pihler

Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija
E-pošta: mislav.trbusic@gmail.com, joze.pihler@um.si

Povzetek. V tem delu je opisan celovit postopek načrtovanja Teslovega transformatorja. Teslov transformator je naprava, ki deluje na principu magnetno sklopljenih nihajnih krogov, kjer se v resonančnem območju lahko dosežejo zelo visoke napetosti. Model Teslovega transformatorja, ki ga obravnavamo v članku, je predstavljen z dvema magnetno povezanimi nihajnim krogoma brez feromagnetnega jedra in je najosnovnejša izvedba transformatorja te vrste. Predstavljene so metode za določitev parametrov nadomestnega vezja napajalnega transformatorja (NST) ter izračun in izdelava kondenzatorja primarnega nihajnega kroga Teslovega transformatorja. Dozumno kapacitivnost VN navitja in induktivnosti smo izračunali s pomočjo računalniškega programa FEMM 4.2, odziv Teslovega transformatorja pa s programom Matlab 7. Podane so tudi smernice za izdelavo elementov Teslovega transformatorja in primerjave izračunanih z merjenimi vrednostmi. Teslov transformator je bil za vizualizacijo nekaterih elektromagnetnih fenomenov izdelan v Laboratoriju za energetiko na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko (FERI) Univerze v Mariboru.

Ključne besede: Teslov transformator, sklopljene tuljave, tuljava, kondenzator, resonančni pojav, visoka napetost, NST transformator, iskrišče

Tesla transformer design

The paper presents a comprehensive method of designing a model of the Tesla transformer. The Tesla transformer is a device that works on the principle of magnetic-coupled oscillating circuits producing very high voltages at the resonance. The presented model is an example of the basic transformer design, which is defined by two magnetic-coupled oscillating circuits with no magnetic core. The methods to determine the lumped parameters of the supply transformer are described and calculation and design of the primary capacitor of the Tesla transformer are shown. The ground capacitance of the secondary coil and coil inductances are calculated using FEMM 4.2. The response of the Tesla transformer is obtained by using MATLAB 7. The design guidelines for the Tesla transformer elements are given and comparison between the calculated and measured values is shown. The Tesla transformer model was made in the Powerlab at the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science of the University of Maribor to visually present some electromagnetic phenomena.

1 UVOD

Nikola Tesla je v svojih raziskovanjih s konca 19. in začetka 20. stoletja veliko časa namenil ideji o brezžičnem prenosu energije na daljše razdalje. Nekateri izsledki raziskav je zbral v laboratorijskem dnevniku, ki ga je vodil od junija 1899 do januarja 1900 (Colorado Springs Notes 1899), večina njegovih zapiskov pa ni bila nikoli objavljena. Ključna naprava, s katero je Tesla v tem obdobju eksperimentiral, je lahko proizvajala zelo visoke napetosti visokih frekvenc,

delovala pa je na principu magnetno povezanih električnih nihajnih krogov, bolj znana kot Teslov transformator.

V članku so opisani postopki izračuna in smernice za izdelavo najosnovnejše izvedbe Teslovega transformatorja. Dobljene vrednosti so primerjane z meritvami in dajejo odgovor na primernost uporabe opisanih postopkov.

2 IZDELAVA TESLOVEGA TRANSFORMATORJA

Teslov transformator je v osnovi sestavljen iz štirih sklopov.

- Napajalni transformator (NST)
- Iskrišče
- NN nihajni krog (primarni nihajni krog)
- VN nihajni krog (sekundarni nihajni krog)

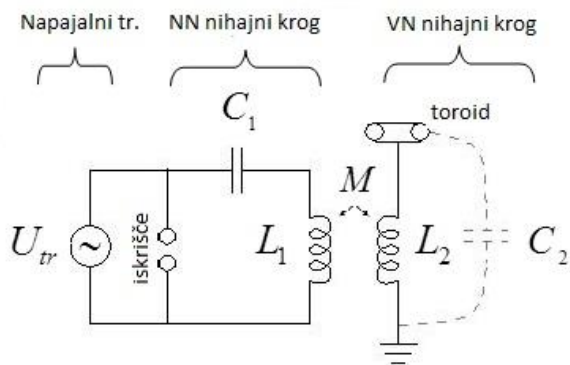
Princip delovanja lahko predstavimo s sliko 1 (slika 1). Najprej se energija iz napajalnega vira prenese v NN kondenzator C1, ko napetost na kondenzatorju doseže preskočno napetost iskrišča, ta prek električnega obloka sklone zanko L1-C1, ki zaniha z lastnimi frekvencami sistema. Ker pa sta primarna in sekundarna tuljava magnetno povezani prek medsebojne induktivnosti M, bo tudi sekundarni nihajni krog L2-C2 zanihal z enakimi frekvencami. Napetost na odprtem koncu VN tuljave, na katerem je nameščen potencialni obroč (toroid), bo prosto zanihala z amplitudo, ki je odvisna

od razmerja C_1/C_2 , uglašenosti in magnetne povezanosti k nihajnih krogov [1]. Pri statičnem iskrišču, kakšno smo uporabili v naši izvedbi, lahko ocenimo, da se takšen cikel ponovi dvakrat na periodo ali stokrat v sekundi.

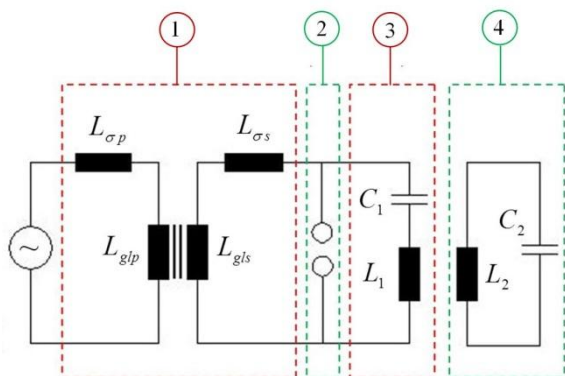
Teslov transformator, razdeljen na sklope, prikazuje slika 2 (slika 2), kjer oznake pomenijo:

- 1 ... napajalni transformator (NST)
- 2 ... iskrišče
- 3 ... NN nihajni krog
- 4 ... VN nihajni krog
- $L_{\sigma p}$... stresana induktivnost NN strani NST-ja [H]
- $L_{\sigma s}$... stresana induktivnost VN strani NST-ja [H]
- L_{glp} ... glavna induktivnost NN strani NST-ja [H]
- L_{gls} ... glavna induktivnost VN strani NST-ja [H]
- L_1 ... induktivnost NN nihajnega kroga TT [H]
- L_2 ... induktivnost VN nihajnega kroga TT [H]
- C_1 ... kapacitivnost NN nihajnega kroga TT [F]
- C_2 ... kapacitivnost VN nihajnega kroga TT [F]

Zaradi preglednosti smo v nadomestni shemi izpustili ohmske upornosti navitij.



Slika 1: Shematski prikaz Teslovega transformatorja



Slika 2: Teslov transformator, razdeljen na sklope: 1-napajalni transformator (NST), 2 - iskrišče, 3 - NN nihajni krog, 4 - VN nihajni krog

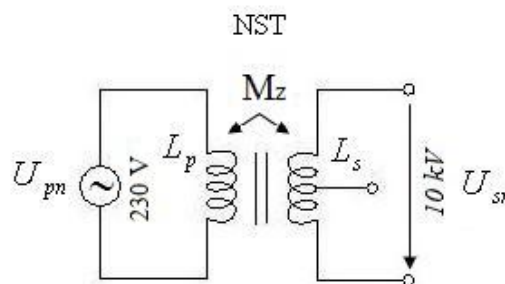
2.1 Določitev parametrov napajalnega transformatorja (NST)

Za napajanje NN strani Teslovega transformatorja je potreben izvor dovolj visoke napetosti, da povzroči preskok med elektrodama na iskrišču. Najpogostejša in cenovno ugodna rešitev je transformator za neonsko razsvetljavo NST (ang. Neon Sign Transformer). Transformator, ki smo ga uporabili pri našem projektu, ima naslednje nazivne podatke, zbrane v tabeli 1.

Izdelovalec	FART - Italy	
Tip	SBH63HT 10000 / 50	
Leto izdelave	2000	
Frekvenca: f_n	50 Hz	
Primar: U_{pn}/I_{pn}	230 V	2,5 A
Sekundar: U_{sn}/I_{sn}	5kV-E-5kV	50 mA

Tabela 1: Nazivni podatki napajalnega transformatorja (NST)

NST je izveden, kot prikazuje slika 3 (slika 3). NN navitje je nameščeno med obema VN navitjema. Izvedba z dvema VN navitjema omogoča na sekundarju možnost 2 x 5kV ali 10 kV. V našem primeru smo izkoristili polno napetost 10 kV.



Slika 3: Napajalni transformator NST

Treba je opozoriti, da NST transformator napaja pretežno kapacitivno breme C_1 , ki je lahko v resonanci s stresano induktivnostjo NST, kar pomeni, da bo napetost na izhodu transformatorja višja od nazivne in lahko povzroči okvaro NST. Da bi se izognili temu problemu, je treba določiti mejno vrednost kondenzatorja C_1 . To bomo določili tako, da bomo NST predstavili z nadomestnim vezjem in ga na sekundarju obremenili s kapacitivnim bremenom (slika 9). Pri napajanju NST na primarju z nazivno napetostjo U_{pn} (230 V) naj napetost na kondenzatorju ne preseže $1,5 \times U_{sn}$ (15 kV). Napetostno 50 % višja vrednost pri tem napetostnem nivoju še ne pomeni nevarnosti za poškodbo transformatorja, saj so zaradi tehnoloških razlogov izolacijske razdalje za oba napetostna nivoja tako rekoč enake.

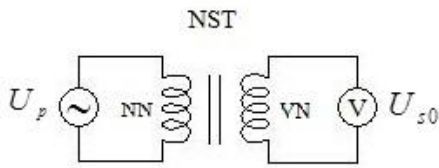
Zaradi konstrukcije NST je faktor elektromagnetne povezave k_x bistveno slabši kot pri navadnih transformatorjih, zato lahko z naslednjimi meritvami določimo vrednosti elementov nadomestnega vezja

NST. V nadaljnem izvajanju smo zanemarili ohmske upornosti navitij in izgube v železnem jedru NST.

Meritev prestave navzgor po sliki 4 (slika 4), kjer s signalnim generatorjem napajamo NN stran in merimo napetost na VN strani [2].

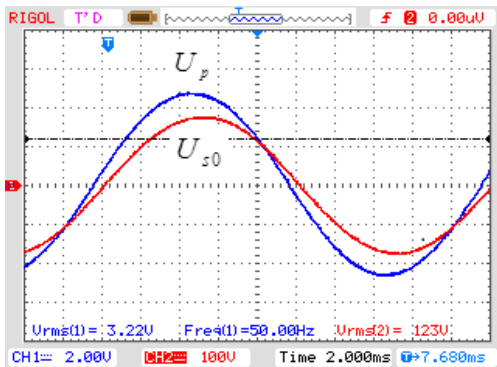
$$u_{\uparrow} = \frac{U_{s0}}{U_p} = \frac{\frac{M_z}{L_p} \cdot U_p}{U_p} = \frac{M_z}{L_p} \quad (1)$$

$$u_{\uparrow} = \frac{123V}{3,22V} = 38,2$$



Slika 4: Vezava za meritev prestave navzgor

Iz oscilograma na sliki 5 (slika 5) lahko odčitamo razmerje med pritisnjeno primarno napetostjo U_p in inducirano sekundarno napetostjo neobremenjenega napajalnega transformatorja U_{s0} .

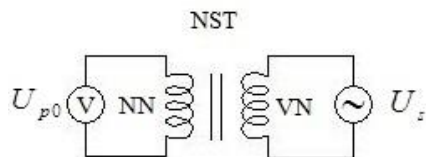


Slika 5: Oscilogram meritve prestave navzgor

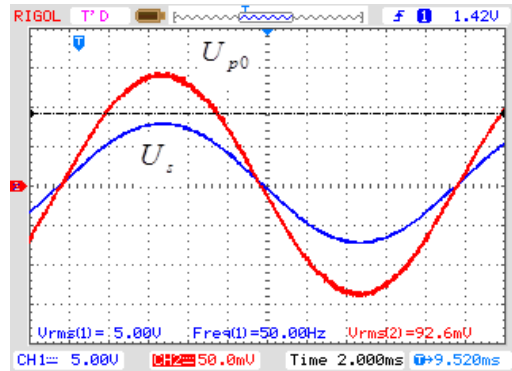
Meritev prestave navzdol po sliki 6 (slika 6), kjer napajamo VN stran in merimo napetost na NN strani, je:

$$u_{\downarrow} = \frac{U_s}{U_{p0}} = \frac{U_s}{\frac{M_z}{L_s} U_s} = \frac{L_s}{M_z} \quad (2)$$

$$u_{\downarrow} = \frac{5V}{0,0926 V} = 54$$



Slika 6: Vezava za meritev prestave navzdol



Slika 7: Oscilogram meritve prestave navzdol

Iz prestave navzgor in prestave navzdol lahko dobimo faktor elektromagnetne povezave k_x oziroma faktor stresanja σ [2], kjer smo s σ_p označili faktor stresanja magnetnega polja primarne strani NST. Približno lahko privzamemo, da je faktor stresanja sekundarne strani enak primarnemu stresanju $\sigma_s \sim \sigma_p$, ali kar brez indeksov σ .

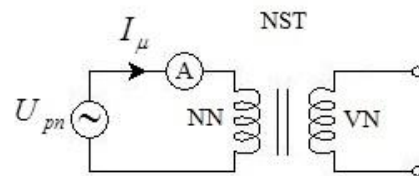
$$\frac{u_{\uparrow}}{u_{\downarrow}} = \frac{M_z^2}{L_p \cdot L_s} = k_x^2 = (1 - \sigma_p) \cdot (1 - \sigma_s) = (1 - \sigma)^2 \quad (3)$$

$$\frac{u_{\uparrow}}{u_{\downarrow}} = \frac{38,2}{54} = 0,707 \rightarrow \sigma = 0,159$$

$$k_x = 0,84$$

Za določitev nadomestnih elementov obremenjenega NST smo morali izvesti meritev magnetilnega toka.

Meritev magnetilnega toka NST I_{μ} (slika 8).



Slika 8: Merjenje magnetilnega toka NST

$$I_{\mu} = 0,9A$$

Z μ smo označili razmerje med I_{μ} in I_{pn} . Iz tabele 1 (tabela 1) vidimo, da je vrednost nazivnega toka primarne strani $I_{pn} = 2,5A$.

$$\mu = \frac{I_{\mu}}{I_{pn}} = \frac{0,9A}{2,5A} = 0,36 \quad (4)$$

Induktivnost primarne in sekundarne strani je

$$L_p = \frac{U_{pn}}{\omega_n \cdot \mu \cdot I_{pn}} = L_{glp} + L_{\sigma p} = M_z \cdot \frac{N_p}{N_s} + L_{\sigma p} = M_z \cdot p_x + \sigma_p \cdot L_p \quad (5)$$

$$L_s = L_{gls} + L_{\sigma s} = M_z \cdot \frac{N_s}{N_p} + L_{\sigma s} = \frac{M_z}{p_x} + \sigma_s \cdot L_s \quad (6)$$

$$p_x = \frac{N_p}{N_s} \approx \frac{U_{pn}}{U_{sn}} = 0,023 \quad (7)$$

$$L_p = \frac{230 \text{ V}}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,36 \cdot 2,5 \text{ A}} = 0,814 \text{ H}$$

$$L_s = \frac{L_p}{p_x^2} = 1538,8 \text{ H}$$

Parametri nadomestnega vezja napajalnega (NST) transformatorja so določeni, kot sledi spodaj.

$$L_p = 0,814 \text{ H}$$

$$L_s = 1538,8 \text{ H}$$

$$L_{\sigma p} = \sigma \cdot L_p = 0,159 \cdot 0,814 = 0,1294 \text{ H}$$

$$L_{\sigma s} = \sigma \cdot L_s = 0,159 \cdot 1538,8 = 244,7 \text{ H}$$

$$L_{glp} = L_p - L_{\sigma p} = L_p \cdot (1 - \sigma) = 0,685 \text{ H}$$

$$L_{gls} = L_s - L_{\sigma s} = L_s \cdot (1 - \sigma) = 1294 \text{ H}$$

Vse sekundarne veličine smo preračunali na primarno stran, kjer smo z x označili preračunane veličine.

$$L_{\sigma x} = p_x^2 \cdot L_{\sigma s} = 0,023^2 \cdot 244,7 = 0,1295 \text{ H}$$

$$L_{glx} = p_x^2 \cdot L_{gls} = 0,023^2 \cdot 1294 = 0,685 \text{ H}$$

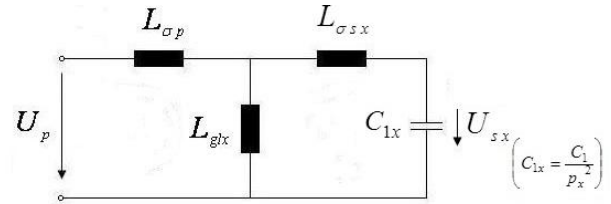
$$L_{glx} = L_{glp} = L_{glx}$$

$$C_{1x} = p_x^{-2} \cdot C_1 \quad (8)$$

$$U_{sx} = p_x \cdot U_s \quad (9)$$

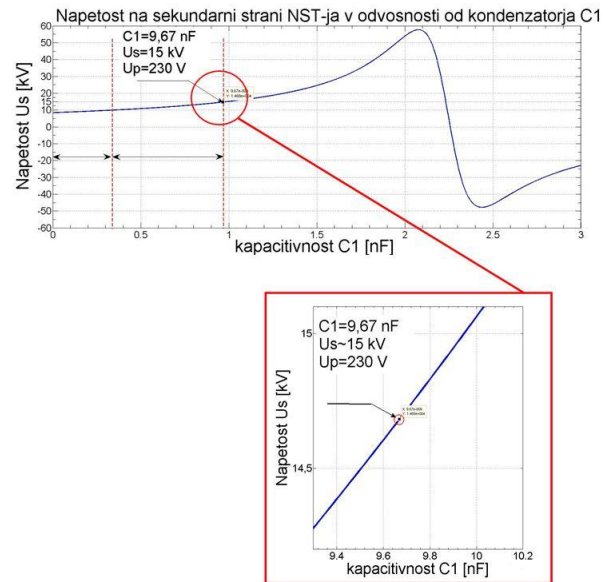
NST predstavimo z njegovim nadomestnim vezjem in ga na sekundarju obremenimo s kapacitivnostjo C_{1x} . Vpliv induktivnosti Teslovega transformatorja lahko zanemarimo, saj pri omrežni frekvenci 50 Hz velja:

$$\omega_n \cdot (L_1 + L_{gl}) \ll \frac{1}{\omega_n \cdot C_1} \quad (\omega_n = 314 \text{ s}^{-1})$$



Slika 9: Nadomestno vezje s C_1 obremenjenega NST

Slika 10 prikazuje amplitudno karakteristiko NST v odvisnosti od bremenskega kondenzatorja C_1 , ki smo jo dobili s pomočjo simulacije v programu MATLAB 7. S slike vidimo, da lahko z napačno izbiro kondenzatorja C_1 dosežemo resonančno območje in napetosti, ki so nekajkrat višje od nazivne vrednosti, kar bi uničilo NST. Zaradi že omenjenih tehnoloških razlogov pa lahko izkoristimo del resonančnega območja, kjer je napetost na sekundarju NST višja za 50 %. Napetost U_s enačimo z $1,5 \times U_{sn}$ (15 kV) in dobimo vrednost kondenzatorja C_1 (slika 10).



Slika 10: Graf, ki prikazuje izhodno napetost NST v odvisnosti od bremenskega kondenzatorja C_1

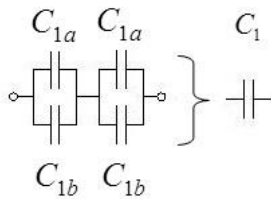
$$C_1 = 9,67 \text{ nF} \quad (C_{1x} = 18,3 \mu\text{F})$$

2.2 Izračun in izdelava kondenzatorja C_1

Zaradi relativno visoke napetosti, ki jo mora vzdržati kondenzator C_1 , smo se odločili za izvedbo po sliki 11 (slika 11).

$$C_1 = \frac{(C_{1a} + C_{1b})}{2} \quad (10)$$

C_{1a} je sestavljen iz osmih zaporedno povezanih kondenzatorjev, izdelanih v Iskri, s kapacitivnostjo 56 nF / 1 kV, kar da skupno kapacitivnost C_{1a} .



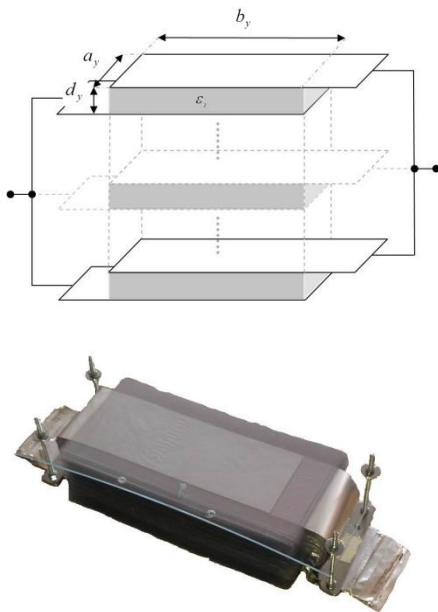
Slika 11: Vezava kondenzatorja C_1

$$C_{1a} = 7 \text{ nF} / 8 \text{ kV}$$

C_{1b} pa smo naredili kot ploščni kondenzator iz aluminijastih lističev (slojev), kot prikazuje slika 12 (slika 12). Izolacija med ploščami kondenzatorja C_{1b} je iz PVC lističev debeline $6 \times 0,18 \text{ mm}$. Prebojna trdnost med ploščama je ocenjena na $\sim 10 \text{ kV}$ [3].

$$C_{1b} = N_y \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{a_y \cdot b_y}{d_y} \tag{11}$$

- N_y ... število aluminijastih lističev: 52
- a_y ... širina lističa [mm]: 65
- b_y ... dolžina lističa [mm]: 140
- d_y ... debelina PVC izolacije [mm]: 1,08
- ϵ_0 ... abs. diel. zraka [Vs/Am]: $8,85 \cdot 10^{-12}$
- ϵ_r ... rel. diel. PVC: 2,8



Slika 12: Izvedba kondenzatorja C_{1b}

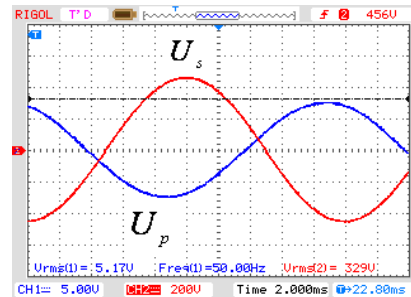
$$C_{1b} = 52 \cdot 8,85 \cdot 2,8 \cdot \frac{65 \cdot 140}{1,08} \cdot 10^{-15} = 10,85 \text{ nF}$$

$$C_1 = \frac{10,85 + 7}{2} = 8,92 \text{ nF} \quad \text{izmerjeno (9,67 nF)}$$

Meritve na izdelanem kondenzatorju C_1 so pokazale, da je dejanska kapacitivnost kondenzatorja večja za približno 8,4 %, kar je še v mejah 10-odstotne tolerance, ki jo je treba pri načrtovanju kondenzatorjev upoštevati.

Meritve na izhodu s C_1 obremenjenega NST kažejo na ujemanje računskih rezultatov z merjenimi (slika 13).

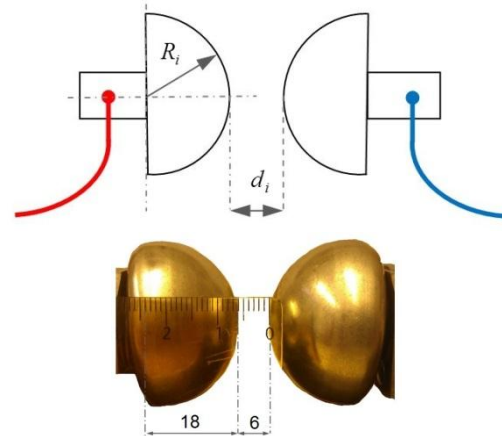
$$|U_s| = \frac{329}{5,17} \cdot 230 \text{ V} = 14,6 \text{ kV} \quad (\text{računsko } 14,7 \text{ kV})$$



Slika 13: Oscilogram prikazuje meritev napetosti na izhodu NST, obremenjenega s kondenzatorjem $C_1 = 9,67 \text{ nF}$

2.3 Izdelava iskrišča

Iskrišče je najbolj kritičen element TT, saj sta ponovljivost in napetost preskoka odvisna od oblike in dimenzij elektrod. Mi smo se odločili za konfiguracijo, kot jo prikazuje slika 14 (slika 14). Polmer polkrogelne elektrode je $R_i = 18 \text{ mm}$, razmik med elektrodama d_i je nastavljen, vendar se izkaže, da iskrišče zanesljivo deluje pri razmiku $d_i = 6 \text{ mm}$.



Slika 14: Iskrišče

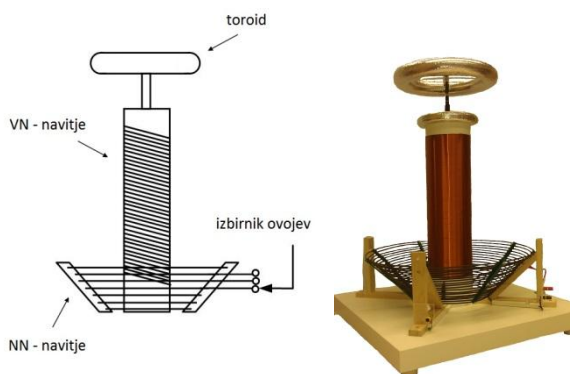
$$R_i = 18 \text{ mm}$$

$$d_i = 6 \text{ mm}$$

2.4 Določitev obeh nihajnih krogov Teslovega transformatorja

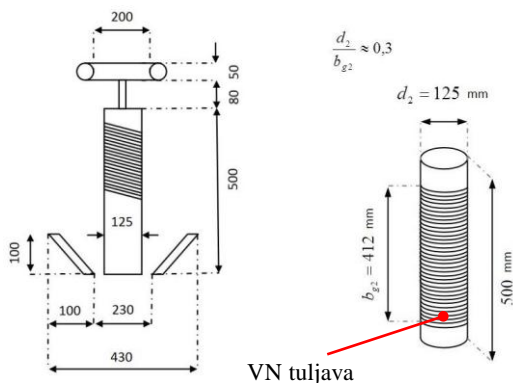
Pri izvedbi TT smo se odločili za konstrukcijo, ki jo kaže slika 15 (slika 15). NN navitje smo izdelali z možnostjo prilagajanja števila ovojev za potrebe umerjanja. Izvedba NN navitja v obliki Arhimedove spirale je izbrana zaradi kompromisa med faktorjem elektromagnetne povezave k in dielektrično vzdržnostjo do VN navitja.

Pri načrtovanju TT smo se omejili na izvedbo, ki je bila dimenzijsko in stroškovno sprejemljiva za naš laboratorij.



Slika 15: Prikaz konstrukcije Teslovega transformatorja

Izdelave tuljav smo se lotili tako, da smo najprej izbrali ogrodje (VN tuljavnik in podpornike za NN navitje) in šele nato iz znane postavitve določili število ovojev obeh tuljav. Tak pristop je bil nujen, saj smo bili omejeni pri izbiri sestavnih delov.



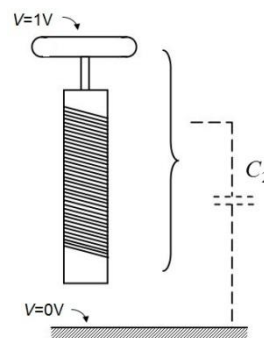
Slika 16: Geometrijske izmere TT

Geometrijske izmere TT prikazuje slika 16 (slika 16), vse veličine so v mm. Po priporočilih izdelovalcev TT [4] se razmerje med premerom d_2 in višino b_{g2} VN navitja giblje med 0,2 ~ 0,4. Izbrali smo vrednost 0,3. Iz znanih geometrijskih podatkov smo s pomočjo računalniškega programa za izračun elektrostatičnih in magnetostatičnih polj FEMM 4.2 izračunali prevodnosti magnetnih poti in dozemno kapacitivnost VN navitja s potencialnim obročem (toroidom) [1] [5].

2.4.1 Določanje kapacitivnosti VN nihajnega kroga Teslovega transformatorja

Dozemno kapacitivnost VN navitja, ki pomeni kapacitivnost VN nihajnega kroga, smo izračunali iz energije elektrostatičnega polja (W_{el}) z uporabo programa FEMM 4.2.

$$C_2 = \frac{2W_{el}}{U^2} \quad (U=1V) \quad (12)$$

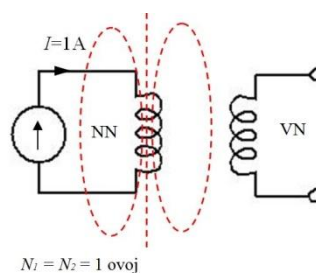


Slika 17: Določitev dozemne kapacitivnosti VN navitja

2.4.2 Določitev induktivnosti Teslovega transformatorja

Induktivnosti TT smo določili s pomočjo magnetnih prevodnosti. Magnetno prevodnost NN navitja (Λ_1) TT lahko določimo prek energije magnetostatičnega polja (W_{mag}), če predpostavimo, da imata obe navitji en ovoj in da v NN navitje teče tok 1A, VN navitje ima odprte sponke (slika 18).

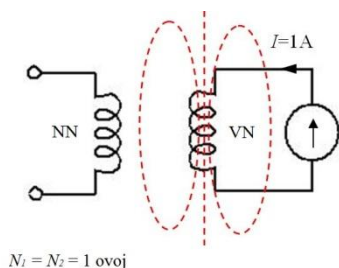
$$\Lambda_1 = \frac{2W_{mag}}{I^2} \quad (I = 1 A) \quad (13)$$



Slika 18: Slika prikazuje princip določitve magnetne prevodnosti NN navitja Teslovega transformatorja

S podobnim postopkom dobimo magnetno prevodnost VN navitja (Λ_2) (slika 19).

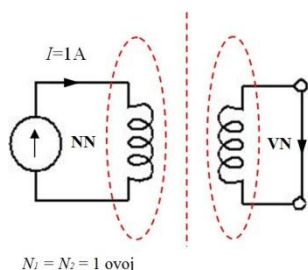
$$\Lambda_2 = \frac{2W_{mag}}{I^2} \quad (I=1A) \quad (14)$$



Slika 19: Slika prikazuje princip določitve magnetne prevodnosti VN navitja Teslovega transformatorja

Za določitev medsebojne magnetne prevodnosti med NN in VN navitjem (Λ_m) je treba določiti magnetno prevodnost pri kratko sklenjenem VN navitju (Λ_{12}) (slika 20).

$$\Lambda_{12} = \frac{2W_{mag}}{I^2} \quad (I = 1A) \quad (15)$$



Slika 20: Določitev kratkostične magnetne prevodnosti med NN in VN navitjem Teslovega transformatorja

Medsebojna magnetna prevodnost med NN in VN navitjem je določena z enačbo (16), faktor elektromagnetne povezave med navitjema k pa z enačbo (17):

$$\Lambda_m = \frac{\Lambda_1 + \Lambda_2 - \Lambda_{12}}{2} \quad (16)$$

$$k = \frac{\Lambda_m}{\sqrt{\Lambda_1 \Lambda_2}} \quad (17)$$

Induktivnosti lahko izrazimo z magnetnimi prevodnostmi in številom obojev (18), (19), (20).

$$L_1 = \Lambda_1 N_1^2 \quad (18)$$

$$L_2 = \Lambda_2 N_2^2 \quad (19)$$

$$M = \Lambda_m N_1 N_2 \quad (20)$$

Ob upoštevanju uglašenosti obeh nihajnih krogov TT (21) vidimo, da števili NN in VN obojev (N_1 in N_2) nastopata v parih (22).

$$\omega_{10} = \omega_{20} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (21)$$

ω_{10} ... lastna krožna frekvenca NN nihajnega kroga [s^{-1}]
 ω_{20} ... lastna krožna frekvenca VN nihajnega kroga [s^{-1}]

Z vstavitvijo enačb (18) in (19) v (21) dobimo izraz za mogoče pare obojev $N_1 - N_2$ (22).

$$N_2 = N_1 \sqrt{\frac{\Lambda_1 C_1}{\Lambda_2 C_2}} \quad (22)$$

Po navadi nam dimenzija žice VN navitja (a_2) določa število VN obojev N_2 (23). Žico je treba izbrati tako, da bo z njo čim lažje navijati. Predvsem se je treba izogniti izbiri žice, katere premer je manjši od 0,3 mm ($a_2 > 0,3$ mm). V našem primeru smo izbrali lakirano okroglo žico s premerom $a_2 = 0,45$ mm.

$$\frac{d_2}{b_{g2}} = \frac{d_2}{N_2 a_2} = 0,3 \rightarrow N_2 = \frac{d_2}{a_2 0,3} \quad (23)$$

Iz slike 16 (slika 16) lahko odčitamo vrednost $d_2 = 125$ mm, kar nam da računsko vrednost VN obojev N_2 .

$$N_2 = \frac{125}{0,45 \cdot 0,3} = 925 \text{ obojev}$$

Dejansko je bilo navitih 915 obojev.

Parametri Teslovega transformatorja, izračunani s pomočjo postopkov, opisanih v tem poglavju, so zbrani spodaj.

$$C_1 = 9,67 \cdot 10^{-9} \text{ F}$$

$$C_2 = 19,5 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

$$\Lambda_1 = 3,584 \cdot 10^{-7} \text{ H}$$

$$\Lambda_2 = 3,316 \cdot 10^{-8} \text{ H}$$

$$\Lambda_m = 2,227 \cdot 10^{-8} \text{ H}$$

$$N_1 = 13 \text{ obojev}$$

$$N_2 = 915 \text{ obojev}$$

$$L_1 = 60,50 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

$$L_2 = 27,76 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

$$M = 264,9 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

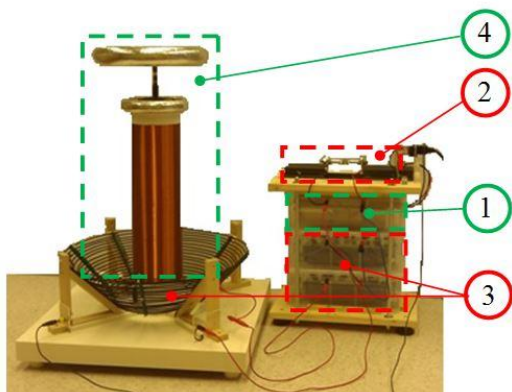
$$k = 0,204$$

3 REZULTATI

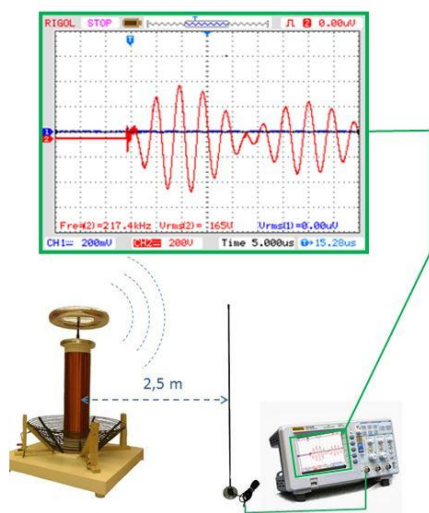
Namen našega dela je bil določiti parametre Teslovega transformatorja in ga nato tudi izdelati (slika 21).

Postopki določanja parametrov so se pokazali dovolj natančni in primerni za načrtovanje TT, kar dokazuje tudi dokaj dobro ujemanje merjenih in računskih vrednosti (sliki 22 in 23). Slika 22 prikazuje oddani val

TT, ki smo ga z osciloskopom posneli na oddaljenosti 2,5 m.



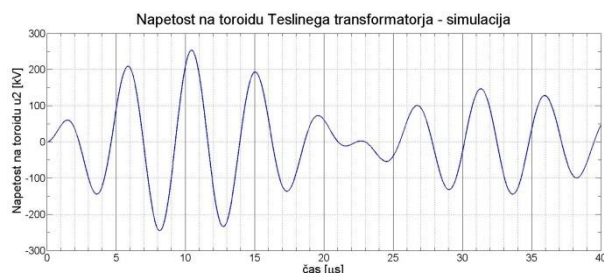
Slika 21: Izdelan Teslov transformator: 1 – napajalni transformator (NST), 2 – iskrišče, 3 – NN nihajni krog, 4 – VN nihajni krog



Slika 22: Shematski prikaz meritve oddanega vala Teslovega transformatorja na razdalji 2,5 m

Vršne vrednosti napetosti na toroidu TT nismo mogli izmeriti, smo pa s pomočjo simulacije in dolžine leaderjev (~300 mm) lahko ocenili, da se ta giblje med 150 in 250 kV.

Slika 23 prikazuje potek napetosti na toroidu TT, ki smo jo dobili s pomočjo simulacije v programu MATLAB 7.



Slika 23: Simulacija napetosti toroida Teslovega transformatorja s pomočjo programa MATLAB 7

4 SKLEP

Prikazane so metode določanja parametrov in smernice za izdelavo elementov TT. Na podlagi rezultatov lahko sklepamo, da so opisani postopki primerni za določanje parametrov Teslovega transformatorja. Točnost računskih postopkov za določanje kapacitivnosti in induktivnosti lahko ocenimo na 10 %. Točnost samega odziva TT, časovno gledano, pa je znotraj 2 % [1]. Prav tako moramo upoštevati še tehnološko toleranco pri sami izdelavi. Zaradi naštetih razlogov je pri izdelavi TT nujno predvideti ukrepe za umerjanje izdelanega TT. Najpogosteje se uporablja umerjanje s pomočjo števila NN ovojev N_l . Natančnejše umerjanje dosežemo s prilagoditvijo vrednosti kondenzatorja C_l . Nadaljnja raziskovanja TT bi lahko pokazala možnosti za praktično uporabo na področju visokonapetostne tehnike.

LITERATURA

- [1] M. Trbušić, J. Pihler: Teoretična obravnava Teslovega transformatorja, Prispevek na 23. posvetovanju »Komunalna energetika«, Maribor, 2014.
- [2] K. Lenasi, Stresanje transformatorjev – poudarek na vzporedni TF vezavi, Priročnik za transformatorje – Etra 33, Ljubljana, 2004.
- [3] W. M. Haynes, CRC Handbook of chemistry and physics, CRC Press LLC, Boca Raton – NW, 2013.
- [4] M. Tilbiry, The ultimate Tesla coil design and construction guide, McGraw Hill, 2008.
- [5] D. C. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 4.2, <http://www.femm.info/wiki/HomePage> (nazadnje obiskano 5. 6. 2014).

Mislav Trbušić je diplomiral leta 2011 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Od leta 2011 do 2013. je delal kot projektant energetskih transformatorjev v podjetju Kolektor Etra. Od leta 2014 kot zunanji sodelavec sodeluje z Laboratorijem za energetiko na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru.

Jože Pihler je diplomiral leta 1978 na Visoki tehniški šoli v Mariboru. Leta 1991 je magistriral, leta 1995 pa doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru, kjer je zaposlen kot redni profesor. Njegovo področje delovanja so električne naprave, proizvodnja električne energije in visoka napetost. Vodi Laboratorij za energetiko UM FERI. Je član mednarodnih elektrotehniških združenj CIGRE - Paris in IEEE - New York; član mednarodnega tehničnega komiteja IEC SC32A za visokonapetostne varovalke ter domačih Zveze inženirjev in tehnikov-EZ Maribor, SLOKO CIGRE ter predsednik tehničnega odbora SIST za visoko napetost in član drugih tehničnih odborov.