

## Dodatak C

# Zaštita stubnih transformatorskih stanica

Koautor: Zlatan Stojković

Distributivni nadzemni vodovi naponskih nivoa 10 kV i 20 kV u našoj zemlji se po pravilu grade bez zaštitnih užadi, jer bi udar u zaštitno uže izazvao povratni preskok na najbližem stubu zbog niskog preskočnog napona izolacije. U slučaju stubnih transformatorskih stanica u praksi su se mogla sresti različita rešenja prenaponske zaštite.

### C.1 Prenaponska zaštita odvodnicima prenapona

U vreme kada su se koristili odvodnici prenapona sa nelinearnim otpornicima od silicijum karbida sa internim iskrištem (u daljem tekstu SiC) odvodnici, sa kućištem od porculana, događale su se havarije odvodnika, često praćene eksplozijama kućišta. Glavni razlozi kvarova odvodnika bili su:

1. Popuštanje zaptivke između porculanskog kućišta i metalnih kapa na vrhu i dnu odvodnika dovelo je u do prodora spoljašnjeg vazduha sa mogućim sadržajem vlage. Ta pojava bi mogla da dovede do internog luka između krajeva odvodnika, što je ponekad izazivalo havarije praćene eksplozijom porculanskih kućišta, često oštećujući okolnu opremu, što je opisano u primeru u sekciji B.3.1.
2. Interna iskrišta na red vezana sa nelinearnim otpornicima su bila pravljena u vidu tanjirastih elektroda, koje su držane izolacionim odstojnicima na određenom rastojanju. Nakon reagovanja (preskoka između elektroda iskrišta), javljao se električni

luk koji je morao da se prekine u prvoj nuli struje industrijske učestanosti, koja je proticala kroz nelinearne rezistore i iskrišta. Ukoliko bi struja pražnjenja pregrejala nelinearne rezistore, njihova bi se otpornost smanjila i struja kroz iskrište se ne bi mogla prekinuti u prvoj nuli, što je dovodilo do termičkog razaranja nelinearnog rezistora od SiC.

3. Posle reagovanja odvodnika često bi na površini iskrišta dolazilo do topljenja materijala i stvaranja sitnih neravnina, što je dovodilo do nižavanja napona reagovanja. Ukoliko bi se napon reagovanja odvodnika prenapona spustio toliko da reaguje pri privremenim prenaponima, nastajala bi havarija odvodnika zbog dugotrajnog trajanja prenapona pri kome se luk na iskrištu nije mogao ugasi.

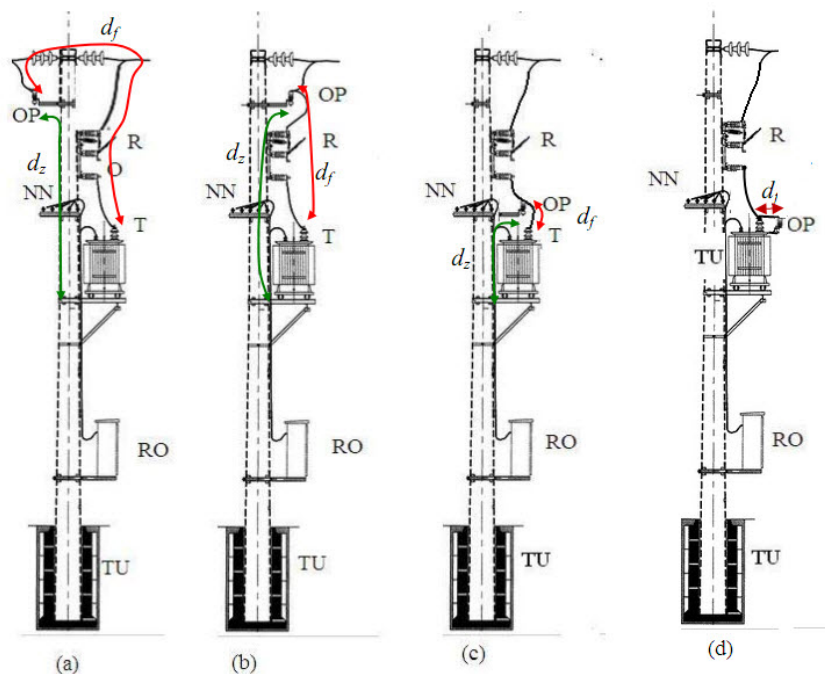
Početkom osamdesetih godina prošlog veka došlo je do masovnog prelaska na odvodnike prenapona bez iskrišta sa rezistorima od cink oksida (metal-oksidni odvodnici prenapona bez iskrišta ili kraće MO odvodnici ili ZnO odvodnici). Takođe je došlo do tehnološkog razvoja izolacionih materijala tako da su razvijena kućišta za odvodnike od novih polimernih materijala, pre svega silikonske gume. Prednosti novih MO odvodnika u silikonskim kućištima su sledeće:

- Nelinearnija volt-amperska karakteristika (V-A), tako da pri radnom naponu kroz rezistor protiče praktično kapacitivna struja, jer se rezistor ponaša kao izolator i zbog toga nije potrebno iskrište. Sa povećanjem napona naglo opada otpornost i odvodnik je u stanju pri prenaponima da propusti veliku udarnu struju pri ograničenom porastu napona.
- MO odvodnici prenapona su mnogo pouzdaniji jer nemaju unutrašnje iskrište koje menja karakteristike posle više reagovanja i postaje faktor nesigurnosti.
- Korišćenjem kućišta od silikonske gume se potpuno izbegava mogućnost eksplozije, zbog elastičnosti materijala. Pored toga, danas postoje konstrukcije odvodnika u silikonskom kućištu bez vazdušnog međuprostora između nelinearnih otpornika i kućišta. Po takvoj tehnologiji se polimerno kućište direktno postavlja na jezgro od nelinearnog otpornika.

Zbog opasnosti od eksplozije "klasični", odnosno SiC odvodnici su postavljani na udaljenosti od transformatora, da ne bi pri eksploziji oštetili prolazne izolatore transformatora. Uvođenjem MO odvodnika moglo se to rastojanje smanjiti. Na ovom primeru će biti prikazana 4 različita slučaja prenaponske zaštite transformatora.

## C.2 Uticaj mesta ugradnje odvodnika prenapona na stubnoj TS

Na slici C.1 prikazana su četiri primera postavljanja odvodnika prenapona na različitim pozicijama na stubu ispred šticebnog transformatora. Oznake na slici C.1 imaju sledeće



Slika C.1: Tri položaja odvodnika prenapona ispred transformatora na stubu

značenje:

**OP** -odvodnik prenapona,

**R** -rastavljač,

**O** -visokonaponski topljivi osigurač,

**T** -energetski transformator koji se štiti od prenapona,

**NN** -priključak na niskonaponsku nadzemnu mrežu,

**RO** -niskonaponski razvodni orman,

**TU** -temelj stuba sa uzemljivačem.

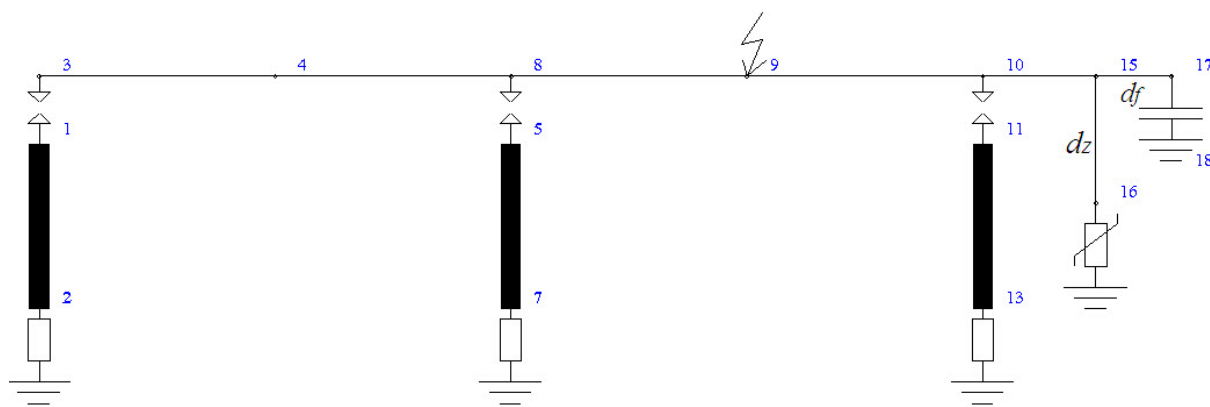
$d_f$  -dužina faznog provodnika između priključka odvodnika prenapona i uvodnog izolatora transformatora.

$d_z$  -dužina zemljovoda između priključka za uzemljenje odvodnika prenaponsa i platforme na kojoj je transformator.

Za prenaponsku zaštitu stubnih transformatora bitna je dužina zemljovoda od donjeg priključka odvodnika prenaponsa do platforme na kojoj stoji transformator  $d_z$ , za koju je galvanski vezan transformatorski stub, koja se sabira sa rastojanjem između gornjeg priključka odvodnika prenaponsa i priključka transformatora  $d_f$ . Za proračun prenaponsa na transformatoru jako je važna dužina petlje koju čini dužina zemljovoda do platforme na kojoj je postavljen transformator i dužina veze od odvodnika do transformatora, bez obzira na eventualno postojanje aparata na putu veze, kao što su rastavljač ili osigurač. Ovu veličinu ćemo zvati električna udaljenost. U slučaju (d) odvodnik je fiksiran direktno na kućište transformatora. Struja pražnjenja se vodi provodnim užetom postavljenim paralelno sa kućištem transformatora od donjeg priključka odvodnika koji je vezan za kućište transformatora do platforme na kojoj se nalazi transformator.

### C.3 Proračun prenaponsa na transformatorima na stubu

Na slici C.2 dat je ekranski prikaz iz programa GROM monofazne ekvivalentne šeme dva raspona ispred stubne transformatorske stanice. Na šemi su označene grane koje odgovaraju zemljovodu od dna odvodnika do platforme na kojoj je transformator, što je obeleženo sa  $d_z$  i dužina veze od gornjeg priključka odvodnika do prolaznog izolatora transformatora  $d_f$ .



Slika C.2: Ekranski prikaz šeme monofazna ekvivalentna šema za proračun ugroženosti stubne transformatorske stanice

#### C.3.1 Osnovni podaci o sistemu

- Nazivni napon sistema je  $U_n=10$  kV.

- Razmatrana su prva dva raspona, svaki dužine  $d=100\text{m}$ .
- Prosečne visine provodnika su  $H_f=16\text{ m}$ .
- Poprečni presk provodnika  $S = 95\text{ mm}^2$ .
- Otpor uzemljenja stuba  $R_{uz} = 15\ \Omega$ .
- Karakteristična impedansa svih faznih provodnika  $Z_f = 503\ \Omega$
- Poluprečnik stuba  $R_t = 0.3\text{ m}$ .
- Karakteristična impedansa stuba  $Z_s = 240\ \Omega$
- Podnosivi atmosferski udarni napon izolacije transformatora oblika  $1.2/50\ \mu\text{s}$  iznosi  $U_{wt} = 75\text{ kV}$ .
- Podnosivi atmosferski udarni napon izolatora na stubu iznosi  $75\text{ kV}$  i definisan je metodom V-t krive koja je opisana u poglavlju 7.5.1, na strani 237, sa zadatim koeficijentima u tom poglavlju.

Dužina preskočnog razmaka dobijena je računski za vrednost podnosivog napona od  $75\text{ kV}$  da iznosi  $0.01\text{ m}$ . Mora se naglasiti da se pri formiranju ekvivalentne šeme usvojilo da je platforma na kojoj je postavljen transformator na referentnom naponu, jer nas interesuje samo razlika napona na priključku transformatora prema masi, odnosno kućištu transformatora.

### C.3.2 Izbor odvodnika prenapona

Izbor odvodnika je urađen prema proceduri opisanoj u poglavlju 7.6.7 na strani 270.

1. korak - određivanje parametara sistema:

- nazivni napon sistema  $U_n = 10\text{ kV}$ ,
- najviši radni napon sistema  $U_m = 12\text{ kV}$ ,
- neutralna tačka uzemljena preko otpornika koji ograničava struju jednopolnog kratog spoja na  $300\text{ A}$  u trajanju od najviše  $3\text{ s}$ ,
- Trajni radni napon odvodnika  $U_C$  je fazna vrednost maksimalnog trajnog radnog napona na mestu postavljanja odvodnika. Ako je odvodnike priključen između faze i zemlje i neutralna tačka je uzemljena direktno ili preko impedanse, tada je  $U_C = U_m/1,73$ . U slučaju razmatrane mreže  $U_c = 12/1,73 = 7\text{ kV}$ .

2. korak - nenormalni uslovi rada usled privremenih prenapona  $U_t$ . U distributivnom sistemu najvažniji privremeni prenaponi su usled jednopolnog kvara. Privremeni prenaponi usled zemljospoja u mreži uzemljenoj preko otpornika iznose:

$$U_t = U_c \cdot K_f \cdot K_S$$

$K_f$  je koeficijent zemljospoja koji za ovaj slučaj ima vrednost kao kod mreže sa izolovanom neutralnom tačkom, odnosno  $K_f = 1,73$ . Usvojen je sigurnosni faktor  $K_S = 1,1$  koji povećava privremene prenapone zbog različitih mogućih uticaja. Privremeni prenapon prema zemlji iznosi  $U_t = 13,2$  kV.

3. korak: Izbor minimalnog naznačenog napona odvodnika na bazi trajnog radnog napona  $U_{Ro}$  vrši se pomoću izraza:

$$U_{Ro} = \frac{U_c}{K_o} \quad (C.1)$$

gde je  $K_o = 0,8$  faktor proizvođača.

Kada se izračuna, dobija se  $U_{Ro} = 8,7$  kV

4. korak - Izbor naznačenog napona odvodnika na osnovu privremenog prenapona pri zemljospoju  $U_t = K_S \cdot K_f \cdot U_c$ , gde je  $K_S = 1,1$  koeficijent sigurnosti, a  $K_f$  faktor zemljospoja, koji se usvaja da iznosi  $K_f = 1,73$  rj za uzemljenje preko otpornika. Na ovaj način se dobija da je privremeni prenapon  $U_t = 13,2$  kV

Trajanje zemljospoja je ograničeno na 3 s, pa se za određivanje naznačenog napona na osnovu privremenog prenapona koristi kriva podnosivih privremenih prenapona odvodnika prenapona u funkciji trajanja, koja je data na slici C.3, gde je određena vrednost podnosivog privremenog prenapona za trajanje prenapona  $t_z = 3$  s. Ovu zavisnost daju proizvođači odvodnika.

Odreden je koeficijent podnošnja privremenih prenapona u relativnim jedinicama u odnosu na naznačeni napon odvodnika  $U_r$ . Vrednost koeficijenta

$$k_t = \frac{U_t}{U_r} = 1,028 \text{ za trajanje kvara } 3 \text{ s}$$

Minimalni naznačeni napon  $U_{Rt}$  na bazi privremenog prenapona pri zemljospoju izračunava se iz izraza

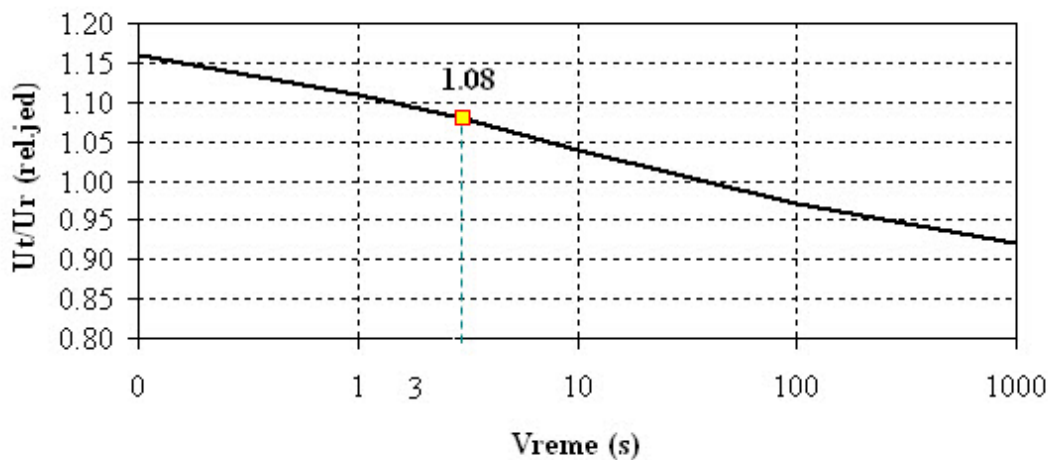
$$U_{Rt} = \frac{U_t}{k_t} = 12,8 \text{ kV}$$

5. korak - određivaje finalnog minimalnog naznačenog napona kao većeg od predhodno dva određena naznačena napona za različite kriterijume.

$$U_r = \max[U_{Ro}, U_{Rt}] = 12,8 \text{ kV}$$

Izabran je odvodnik prenapona ABB Polim-d-n naznačenog napona  $U_r = 15$  kV, sa karakteristikom preostalih napona kao u tabeli C.1 za različite temene vrednosti udarnih struja oblika  $8/20 \mu s$ .

### Sposobnost podnošenja privremenih prenapona



Slika C.3: Kriva podnosivih privremenih prenapona odvodnika u funkciji trajanja

Tabela C.1: Karakteristika preostalog napona za udarne struje standardnog oblika

Temena vrednost udarne struje (kA) oblika 8/20 $\mu$ s	1	2.5	5	10	20
maksimalna vrednost preostalg napona (kV)	34.9	37.	39.1	42	47.7

### C.3.3 Rezultati proračuna

Izvršen je proračun maksimalnih prenapona determinističkom metodom sa amplitudom struje pražnjenja  $I_{max} = 121$  kA, koja može biti prevaziđena sa verovatnoćom od 2%, u slučaju kada se usvoji rasipanje logaritma struje pražnjenja  $\sigma_{ln}(I) = 0.68$  rj. Usvojena je godišnja gustina pražnjena od  $N_G = 2.8$  udara po  $\text{km}^2$ .

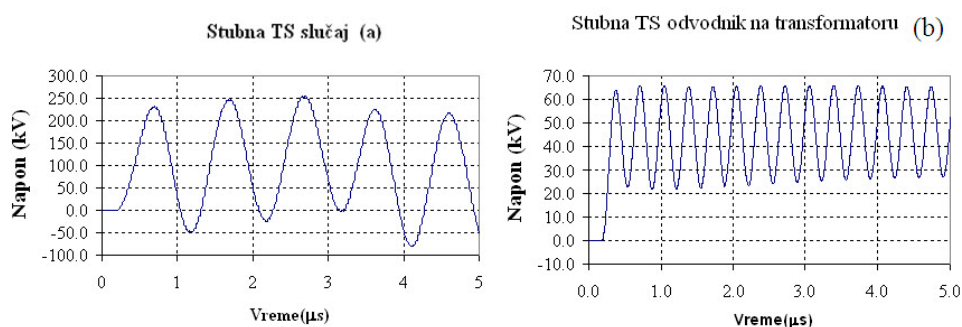
Rezultati proračuna maksimalnih prenapona  $U_{max}$  (kV), kao i srednjeg vremena između kvarova izolacije (MTBF-Mean Time Between Failures) prikazani su u tabeli C.2. Veličinu  $(d_z + d_f)$  nazvaćemo električnom udaljenošću odvodnika prenapona od transformatora. Ova veličina igra ključnu ulogu za zaštitu izolacije transformatora.

Prema usvojenim kriterijumima za male transformatore je dozvoljen srednji broj godina bez kvara transformatora  $MTBF \geq 200(\text{god})$ , tako da jedino u slučaju (d) se može smatrati da je izolacija zaštićena.

Radi ilustracije, na slici C.4 prikazani su talasni oblici napona za slučaj (a) (odvodnik sa suprotne strane od transformatora) i slučaj (d) (odvodnik montiran na samom transformatoru, kada je dužina veze između priključka odvodnika i prolaznog izolatora 50 cm).

Tabela C.2: Rezultati proračuna maksimalnih prenapona  $U_{max}$  (kV) kao i srednje vreme između kvarova izolacije (MTBF)

	Slučaj (a)	Slučaj (b)	Slučaj (c)	Slučaj (d)
$d_f$ (m)	3	2	0.5	0.5
$d_z$ (m)	4	1	1.5	0
$(d_z + d_f)$ (m)	7.1	5.7	2.4	0.3
$U_{max}$ (kV)	256	207	155	66.5
MTBF (god)	23.7	27.5	41.2	$\infty$



Slika C.4: Talasni oblici prenapona na transformatoru kada je odvodnik sa suprotne strane od transformatora (a) i kada je montiran na samom transformatoru (d)

Sa slike se može videti da je zaštita sa odvodnikom postavljenim direktno na transformator rešenje koje ograničava prenapone na 66,5 kV, što je ispod podnosivog napona izolacije transformatora koji iznosi 75 kV.

### C.3.4 Uticaj otpora uzemljenja stuba transformatorske stanice

Cilj sledeće analize je da pokaže da otpornost uzemljenja stuba koji nosi stubnu TS nema uticaja na naprezanje izolacije transformatora. Na slici C.5 dat je detaljan prikaz modela stubne TS.

Oznake na slici C.5 imaju sledeće značenje:

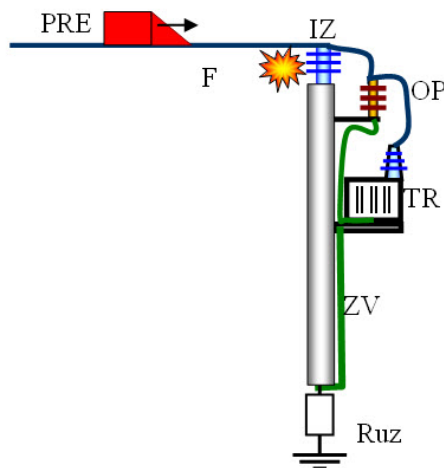
**PRE** -prenaponski talas koji se prostire po faznom provodniku,

**F** -fazni provodnik nadzemnog voda,

**IZ** - izolator između faznog provodnika i uzemljenog stuba,

**OP** -odvodnik prenapona postavljen na uzemljenoj konzoli vezanoj za stub, pomoću





Slika C.5: Detaljan prikaz modela stubne TS

zemljovoda **ZV**, donji priključak odvodnika je vezan za platformu na kojoj je transformator,

**TR** -transformator,

**ZV** -zemljovod od odvodnika prenapona, preko platforme na kojoj je transformator i za čije kućište je vezan, do uzemljivača stuba,

**Ruz** -uzemljivač stuba.

Zemljovod je provodnik koji je postavljen paralelno stubu (bez obzira da li je stub čelično rešetkasti, cevni ili armirano-betonski) koji ima ulogu da efikasno sprovede struju atmosferskog pražnjenja od odvodnika prenapona do zemlje.

Na slici C.6 dat je ekranski prikaz šeme dva raspona u programu AtpDraw i stubne transformatorske stanice

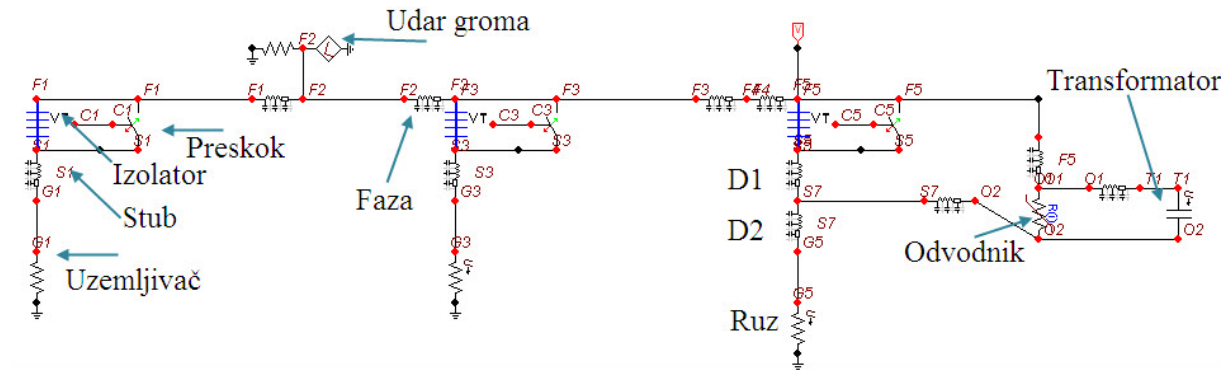
Oznake na slici C.6 imaju sledeće značenje:

**Izolator** -element koji sadrži programski kod za modelovanje preskoka napisan u jeziku **Models** koji je nadogradnja paketa EMTP-atp.

**Preskok** - kontrolisani prekidač koji naredbom iz elementa **Izolator** otvara ili zatvara kontakte.

**Stub** -model stuba u vidu kratkog voda.

**Uzemljivač** - otpornik koji zamenjuje impedansu uzemljenja.



Slika C.6: Ekranski prikaz šeme u programu AtpDraw dva raspona i stubne transformatorske stanice

**Faza** -provodnik dužine koja je jednaka polovini raspona.

**Udar groma** -Idealni strujni izvor paralelan sa otpornikom od 300  $\Omega$ , koji modeluje karakterističnu impedansu kanala groma.

**D1** -gornji deo stuba dužine 4 m od vrha do platforme za transformator.

**D2** -donji deo stuba od platforme za transformator do zemlje dužine 12 m.

**Odvodnik** -odvodnik prenapona naznačenog napona 15 kV na udaljenosti od 0.6 m od transformatorskog uvodnog izolatora (rešenje sa postavljanjem odvodnika direktno na transformator).

**Ruz** -otpornost uzemljenja stubne transformatorske stanice, koja se varira da bi se video uticaj uzemljenja na naprezanje transformatora.

Preskok se modeluje iz nekoliko koraka u programskom kodu u jeziku **Models**:

- Promenljiva  $Close = 0$  deklariše da je prekidač paralelan izolatoru otvoren.
- U svakom koraku proračuna se izračunava minimalni preskočni napon iz formule 7.78 iz poglavlja 7.5.1, odnosno:

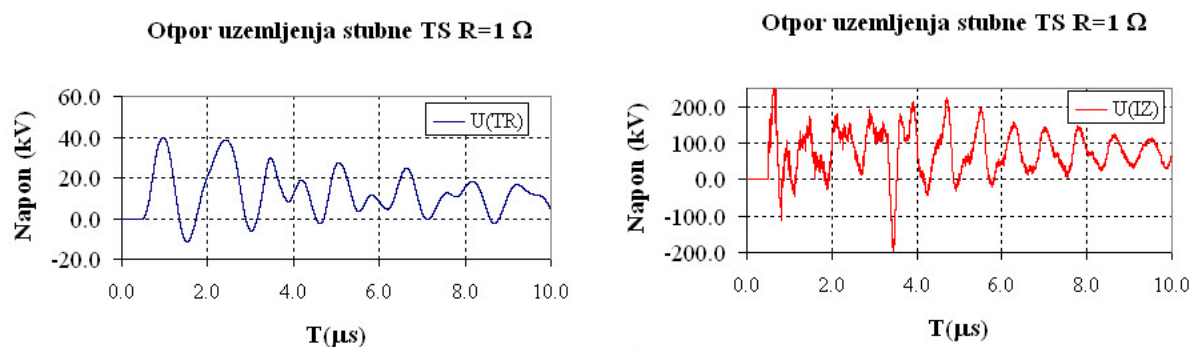
$$U(t) = d \times (K_1 + \frac{K_2}{t^{A_n}}) \quad (C.2)$$

- Izračunavaju se naponi na krajevima izolatora  $U_1$  i  $U_2$ , kao i absolutna vrednost razlike napona  $\Delta U = |U_1 - U_2|$
- Ukoliko je  $\Delta U < |U(t)| \Rightarrow Close = 0$

- Ukoliko je  $\Delta U \geq |U(t)| \Rightarrow Close = 1$ , promenljiva  $Close = 1$  ostaje do kraja proračuna nepromenljiva, odnosno prekidač paralelan izolatoru je zatvoren simulirajući preskok sa električnim lukom koji se ne gasi.

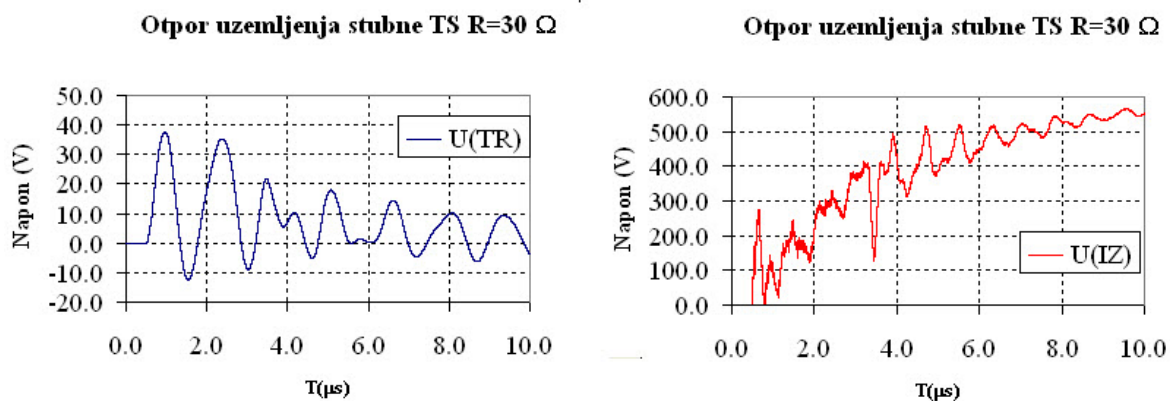
Izvršen je proračun napona na priključcima transformatora prema transformatorskom stubu i napona na faznom provodniku na vrhu stuba prema referentnoj zemlji, za otpor uzemljenja  $1 \Omega$  i  $30 \Omega$ .

Na slici C.7 prikazan je talasni oblik napona na transformatoru  $U(TR)$  i na vrhu stuba prema referentnoj zemlji  $U(RZ)$  za otpor uzemljenja stuba  $1 \Omega$ .



Slika C.7: Talasni oblik napona na transformatoru  $U(TR)$  i na vrhu stuba prema referentnoj zemlji  $U(RZ)$  za otpor uzemljenja stuba  $1 \Omega$ .

Na slici C.7 prikazan je talasni oblik napona na transformatoru  $U(TR)$  i na vrhu stuba prema referentnoj zemlji  $U(RZ)$  za otpor uzemljenja stuba  $30 \Omega$ .



Slika C.8: Talasni onlik napona na transformatoru  $U(TR)$  i na vrhu stuba prema referentnoj zemlji  $U(RZ)$  za otpor uzemljenja stuba  $1 \Omega$ .

U tabeli C.3 prikazani su maksimalni naponi na transformatoru i na faznom provodniku na vrhu stuba prema referentnoj zemlji za slučaj otpora uzemljenja  $R_{uz}=1 \Omega$  i  $R_{uz}=30 \Omega$ .

Tabela C.3: Maksimalni naponi na transformatoru i na faznom provodniku na vrhu stuba prema referentnoj zemlji za slučaj otpora uzemljenja  $R_{uz}=1\ \Omega$  i  $R_{uz}=30\ \Omega$

Ruz=1 $\Omega$		Ruz=30 $\Omega$	
U(TR)(kV)	U(Uz)(kV)	U(TR)(kV)	U(Uz) (kV)
39.57	274.5	37.78	565.3

Talasni oblici napona na transformatoru na slici C.4 i C.7, odnosno na C.8 se razlikuju jer su usvojeni različiti odvodnici prenapona. Može se uočiti da napon na transformatoru ne zavisi bitno od otpora uzemljenja stuba, dok napon faze na vrhu stuba prema referentnoj zemlji značajno raste sa porastom otpora uzemljenja.

Važno je zaključiti da je potrebno da veza između odvodnika i transformatora bude što je moguće kraća, a otpornost uzemljenja nema uticaja.

## Zahvalnica

Zahvaljujemo Elektroprivreda Srbije za finansiranje studije "Analiza atmosferskih prenapona u srednjenaponskim i niskonaponskim distributivnim mrežama", koja je rađena zajedno sa Elektrotehničkim Institutom Nikola Tesla.