

ANALITIČKO PREDSTAVLJANJE I SIMULACIJA TALASA ATMOSFERSKOG POREKLA

1. Pomoću programa za elektromagnetne prelazne procese ATP-EMTP (Alternative Transients Program - ElectroMagnetic Transients Program) simulirati udarne naponske talase atmosferskog porekla:

- a) prikazati talas neograničenog trajanja čije je čelo beskonačno strmo (DC type 11) $U_m=100$ kV,
- b) trajanje talasa iznosi $T=10$ μ s, čelo je takođe beskonačno strmo (DC type 11) $U_m=100$ kV,
- c) talas je linearno rastućeg čela trajanja 1μ s i beskonačnog konstantnog začelja, isti talas i ograničiti na trajanje od 10 μ s (Slope-RAMP type 13) $U_m=50$ kV,
- d) talas je linearno rastućeg čela trajanja 3μ s i linearno opadajućeg začelja, a trajanje talasa iznosi 10 μ s (Slope-RAMP type 13) $U_m=30$ kV,
- e) naponski talas amplitude 100 kV definisan sa dve eksponencijalne funkcije u obliku (Surge type 15)

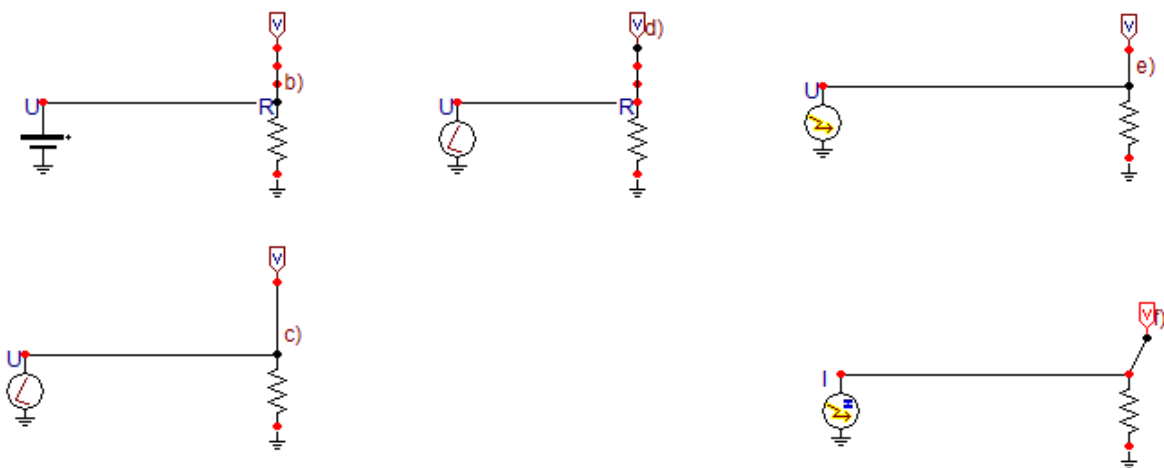
$$U(t) = U \cdot (e^{-0,0138 \mu s^{-1} \cdot t} - e^{-3,24 \mu s^{-1} \cdot t})$$

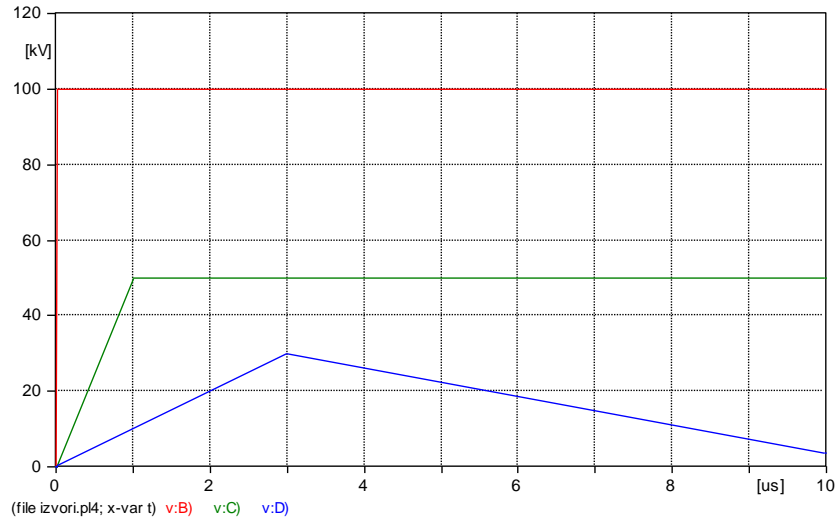
- f) Elektrotehnički standard JUS IEC 1312- 111997 “Zaštita od elektromagnetskog impulse atmosferskog pražnjenja - Deo I: Opšti principi”:

$$i(t) = \frac{I}{h} \cdot \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1 + (t/\tau_1)^{10}} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)$$

gde je: I-temena vrednost struje, h - korekcionni faktor temene vrednosti struje, t - vreme, τ_1 - vremenska konstanta čela i τ_2 vremenska konstanta začelja. Za struju prvog udara, a za treći i četvrti nivo zaštite, amplituda struje treba da iznosi 100 kA, vremenska konstanta čela $\tau_1=19$ μ s, a vremenska konstanta začelja $\tau_2=458$ μ s. Ovako odabrane vremenske konstante trajanja čela i talasa daju standardni talas oblika $10/350$ μ s, kada se trajanje čela i trajanje talasa struje definišu na standardan način. Treba primetiti da je struja atmosferskog pražnjenja definisana jednom eksponencijalnom funkcijom.

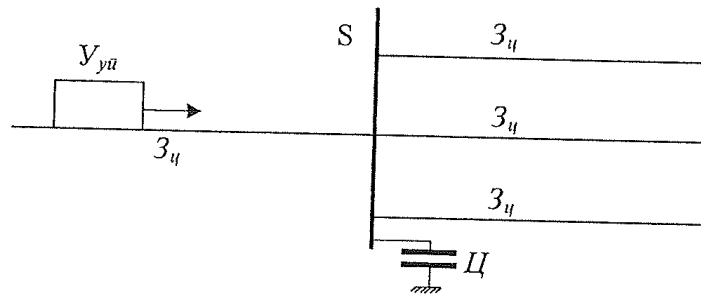
Rešenje



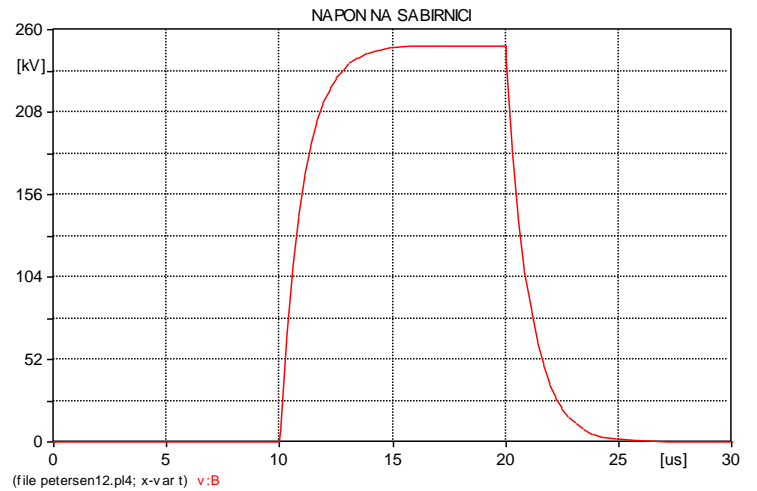
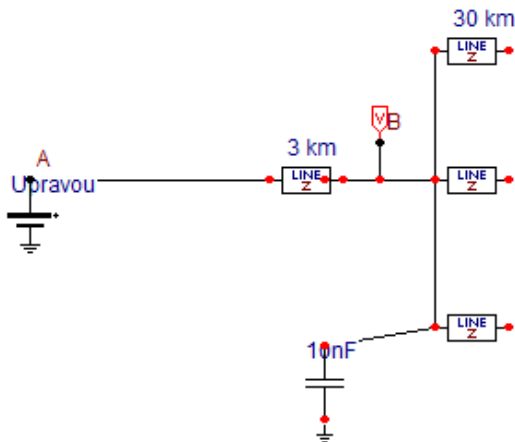


PRIMENA PETERSENOVOG PRAVILA

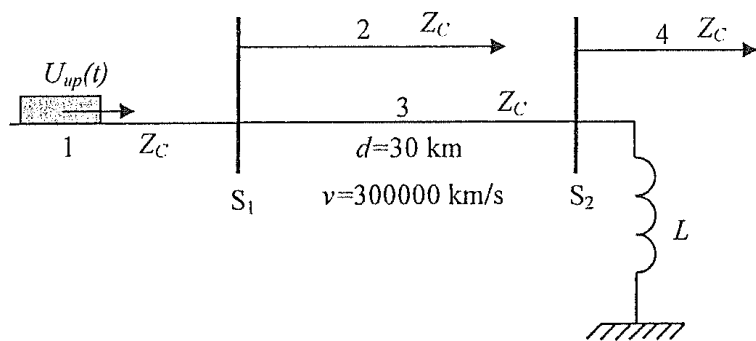
2. Za postrojenje sa slike primenorn Petersenovog pravila i koeficijenta prelaMmanja odrediti promenu napona na sabirnicama, ako po nadzemnom vodu 1 nailazi prenaponski talas atmosferskog porekla, pravougaonog oblika, amplitude 500 kV i trajanja 10 μ s. Karakteristične impedanse svih vodova su 400Ω , a kapacitet sabrnica je 10 nF. Ako je podnosivi napon izolacije postrojenja 170 kV, proceniti da li bi postrojenje bilo ugroženo od ovog prenapona.



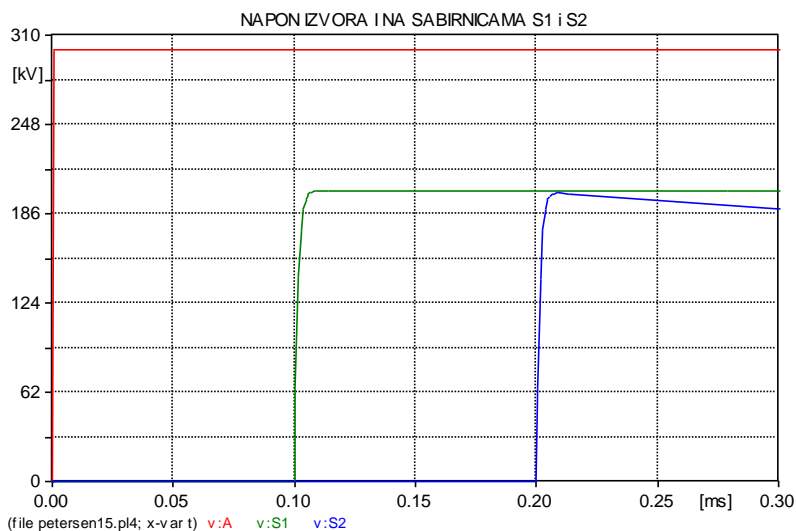
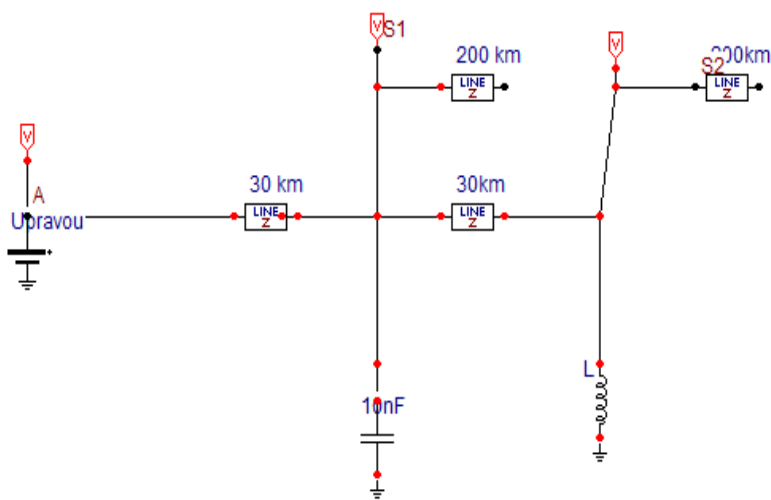
Rešenje Petersen12



3. Na slici je prikazan deo elektroenergetskog Sistema, koji se sastoji od dva rayvodna postojenja, međusobno raydvojena vodom dužine d . Kapacitet sabirnica S_1 je 10 nF , karakteristilne impedance svih vodova su 390Ω , a induktivnost transformatora priključenog na sabirnice S_2 iznosi $0,3 \text{ H}$. Kapacitet drugih sabirnica zanemariti. Ako je talas beskonačnog strmog čela i trajanja i amplitude 300 kV odrediti oblik i amplitude napona na sabirnicama S_1 i S_2 .

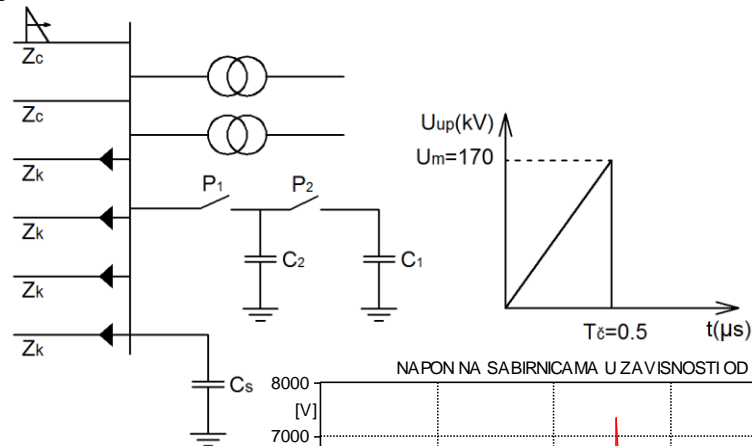


Rešenje Petersen15

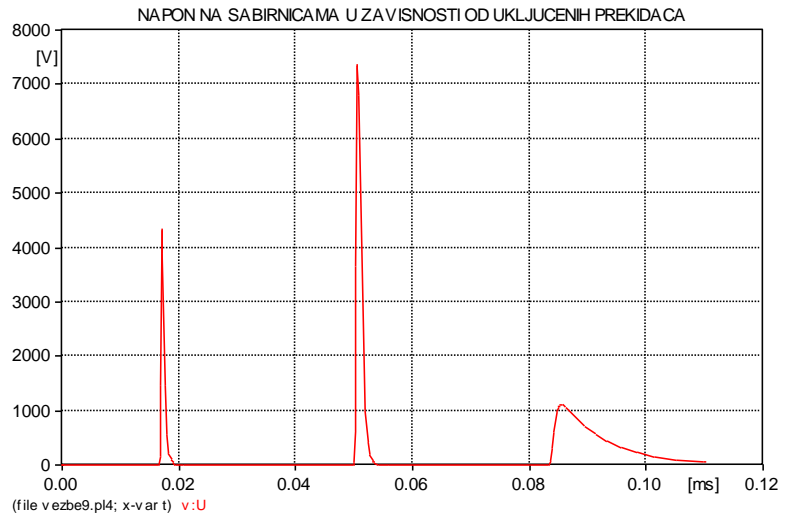
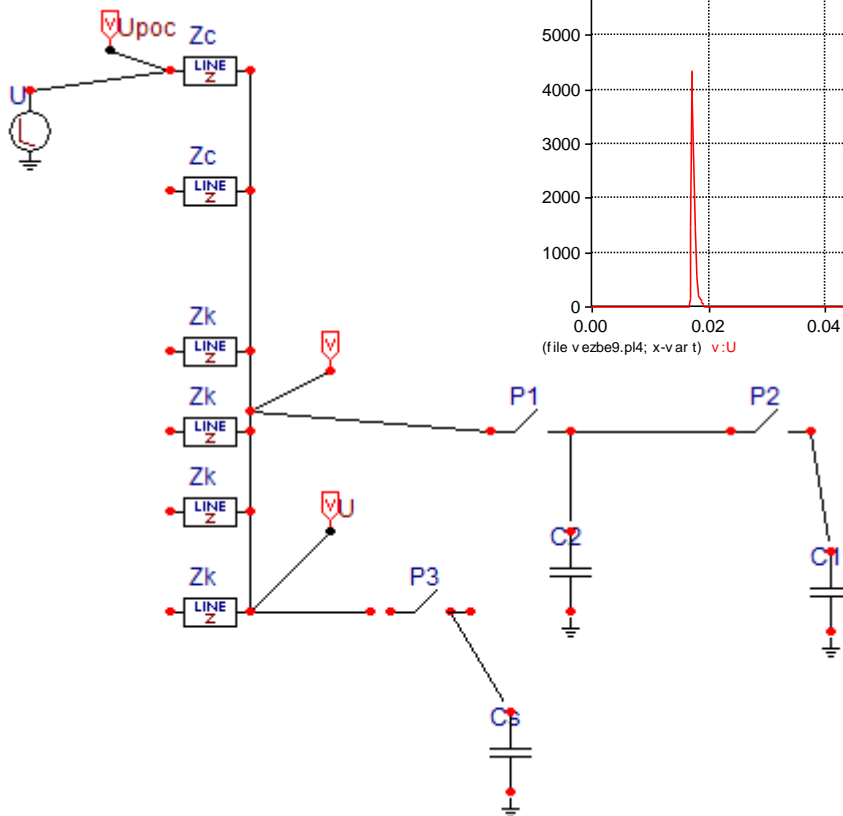


4. (9. zadatak sa računskih vežbi) Na slici je data šema postrojenja nazivnog napona 35 kV, pored vodova i kablova na sabirnice su vezana 2 transformatora velikih impedansi i dve baterije kondenzatora za kompenzaciju reaktivne energije. Snage ovih baterija su $S_1= 250,3$ kVA i $S_2= 12,5$ kVA (sve pojave posmatrati monofazno). Karakteristične impedanace vazdušnih vodova su $Z_c= 400 \Omega$, a karakteristične impedanace kablovskih vodova su $Z_k= 50 \Omega$. Ukupna kapacitivnost sabirnica je $C_s=10$ nF. Po jednom vazдушnomvodu nailazi prenaponski talas kao na slici. Odrediti oblik i amplitudu prenapona na sabirnicama u sledećim slučajevima:

- Prekidač P1 je zatvoren, prekidač P2 je zatvoren;
- Prekidač P1 je zatvoren, prekidač P2 je otvoren;
- Prekidač P1 je otvoren.

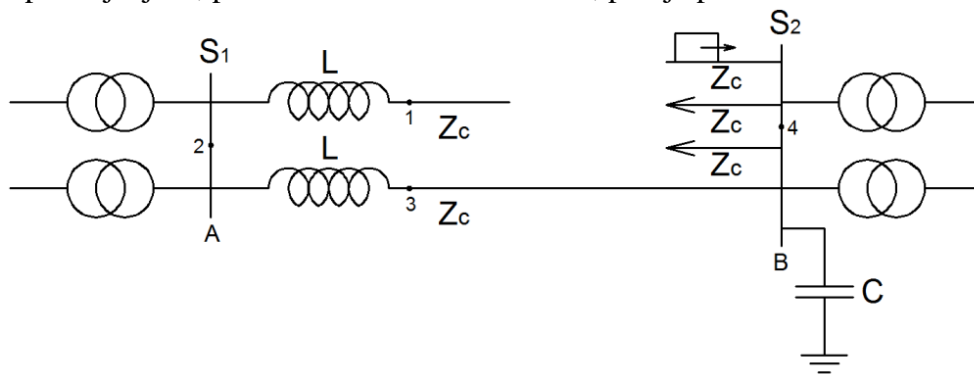


Rešenje Vezbe9

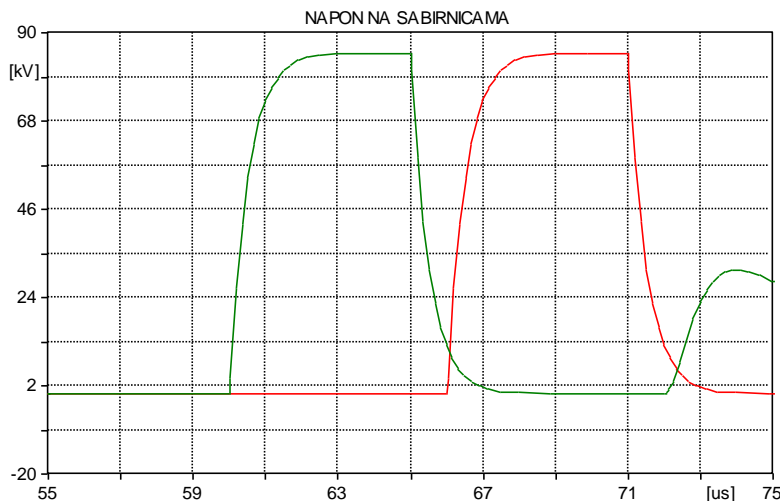
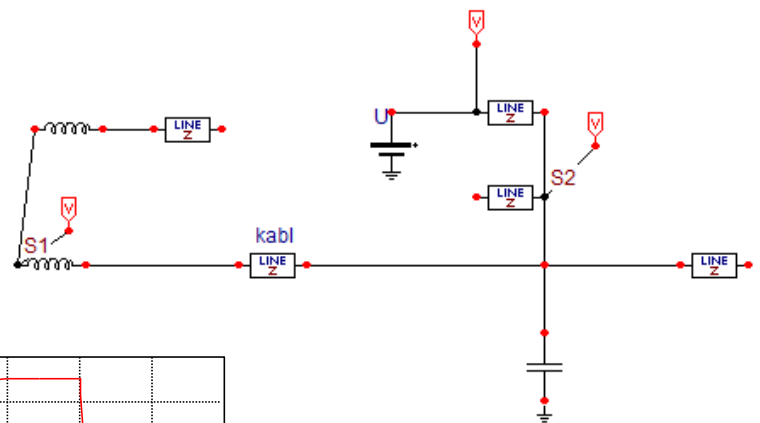


5. (13. i 14. zadatak sa računskih vežbi) Na slici je prikazan deo EES-a koji se sastoji iz dva razvodna postrojenja povezana vodom V_2 dužine d . Vod V_1 je pogođen atmosferskim pražnjenjem. Prenaponski talas atmosferskog porekla se zamenjuje pravougaonim talasom amplitude U_m i trajanja T . Odrediti oblike i veličinu prenapona na sabirnicama S_1 u postrojenju A i na sabirnicama S_2 u postrojenju B. Smatrati da se pri prostiranju prenaponskog talasa duž voda V_2 ne događa prigušenje i izobličenje talasa. Smatrati da transformatori imaju beskonačno veliku ulaznu impedansu. Posebni podaci: $d = 18$ km, $U_m = 170$ kV, $T = 5$ μ s, $Z_c = 400$ Ω , induktivnost L za ograničavanje struje kratkog spoja je $L = 2$ mH, kapacitivnost sabirnica S_2 je $C = 5$ nF, dok je kapacitivnost sabirnica S_1 zamenarljiva. Pri rašavanju zadatka ne treba uzimati u obzir efekte višestrukih refleksija, već posmatrati pojave u periodu za koji talas može da pređe dvostruku dužinu voda V_2 .

Za istu sliku uraditi slučaj slučaj kada prenaponski talas nailazi po jednom od vazdušnih vodova u postrojenju B, prelama se na sabirnicama S_2 , putuje po vodu V_2 i nailazi na postrojenje A.



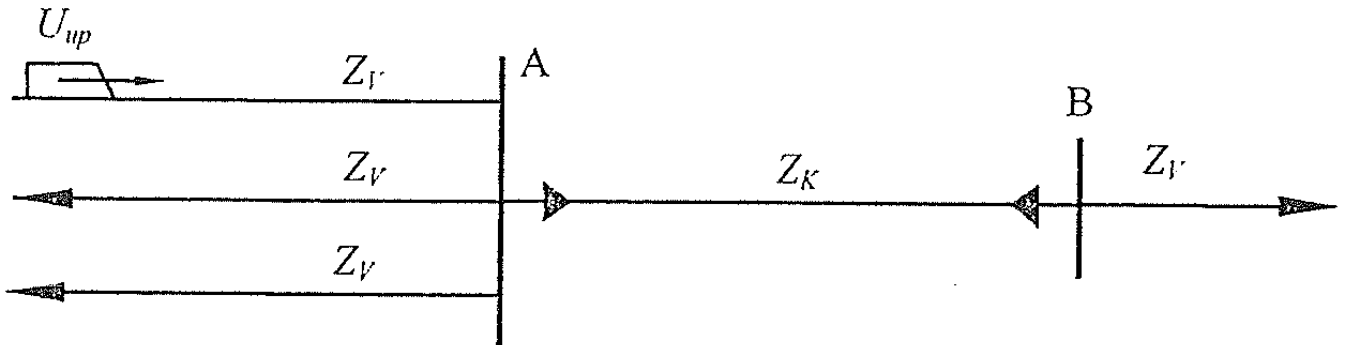
Rešenje Vezbe9



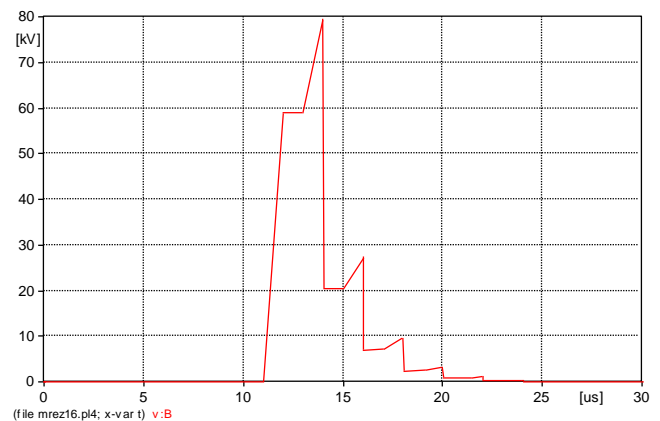
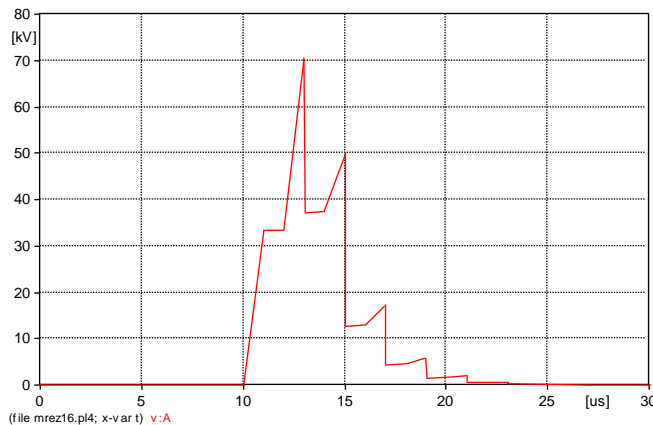
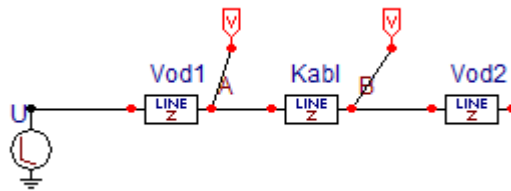
(file vezbe14.pl4; x-var t) v:S1 v:S2

METOD MREŽNOG DIJAGRAMA

6. Na postrojenju sa slike nailazi prenaponski talas kosog čela, amplitude 180 kV, trajanja čela 1 μs i trajanja talasa 3 μs . Primenom ATP-a odrediti oblik napona u tačkama A i B. Karakteristična impedansa kabla je 50Ω , a vazdušnih vodova 390Ω . Dužina kabla iznosi 150 m, a brzina prostiranja talasa po kablu je $150 \text{ m}/\mu\text{s}$. Nadzemni vodovi su veoma dugi, Podnosivi udarni napon izolacije postrojenju iznosi 90 kV. Da li je postrojenje ugroženo od prenapona?

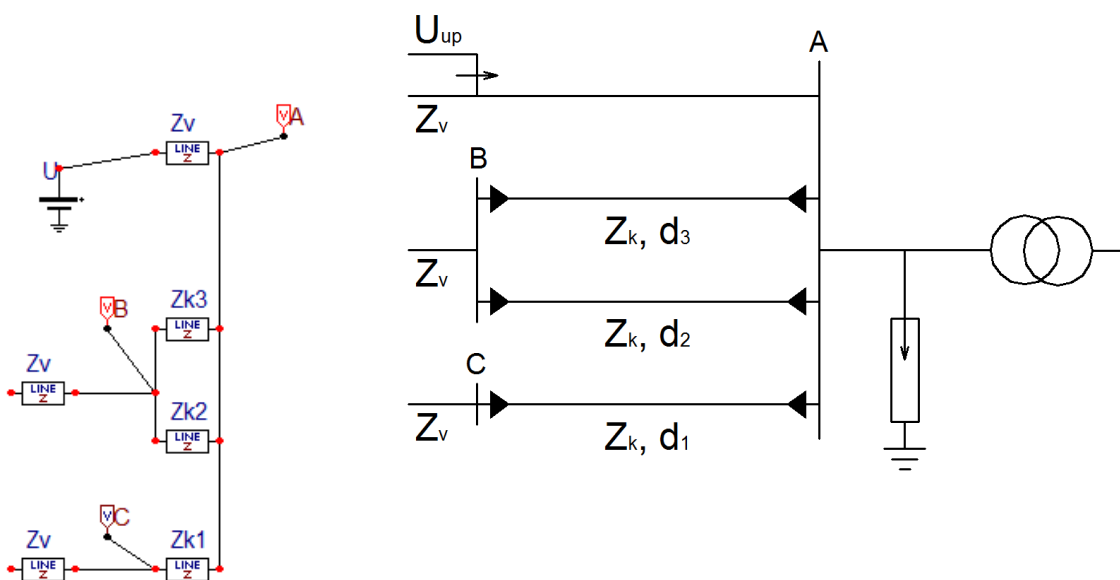


Rešenje Mrez16

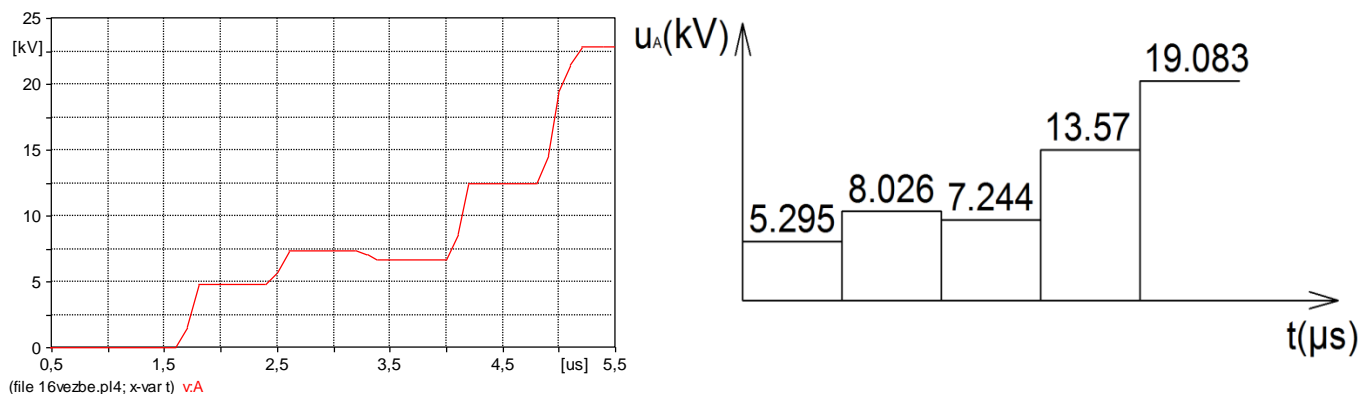


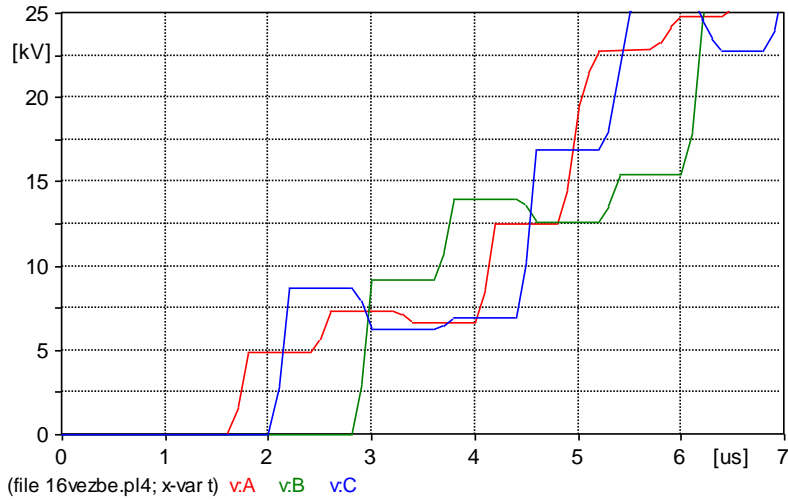
BERŽERONOV METOD

7. (16. sa vežbi) Na slici je prikazano razvodno postrojenje nazivnog napona 110 kV. Na sabirnice su priključena tri kablovska voda. Po vazдушnom vodu se prostire prenaponski talas koji se zamenjuje talasom pravougaonog čela i beskonačnog trajanja, amplitude U_m . Odrediti vremenski oblik napona na sabirnicama i proveriti da li je transformator ugrožen. Posebni podaci: dužine kablovskih vodova su $d_1=60$ m, $d_2=d_3=180$ m, na kablove se nastavljaju vrlo dugački vazdušni vodovi, karakteristična impedansa vazdušnog voda je $Z_v=410 \Omega$, a kablovskog voda $Z_k=45 \Omega$. Brzina prostiranja talasa po vodovima je $v_k=150$ m/ μ s. Amplituda prenaponskog talasa je $U_m=75$ kV i ograničena je udarnim podnosivim naponom vazdušnog voda $U_i=75$ kV. Podnosivi napon transformatora je 75 kV, transformator se zamenjuje beskonačno velikom impedansom.

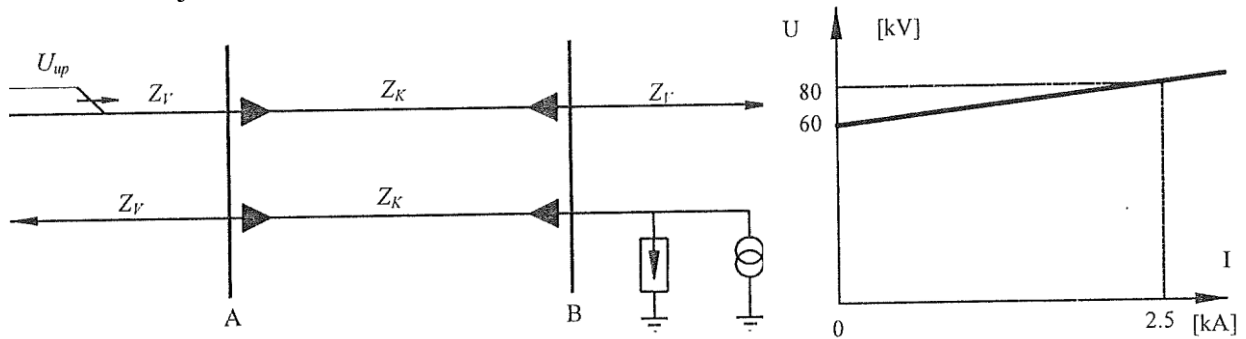


Rešenje

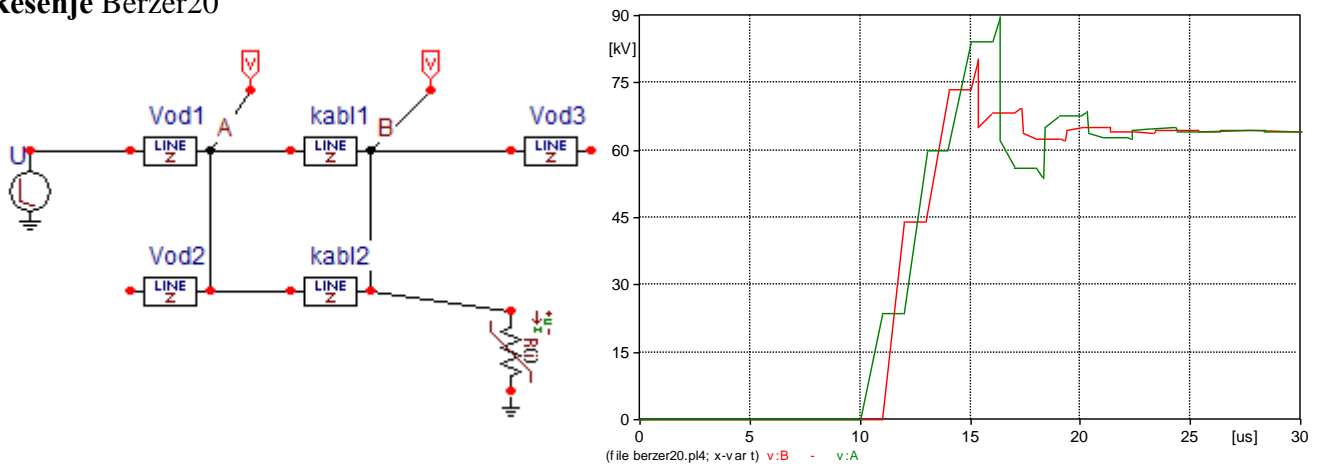


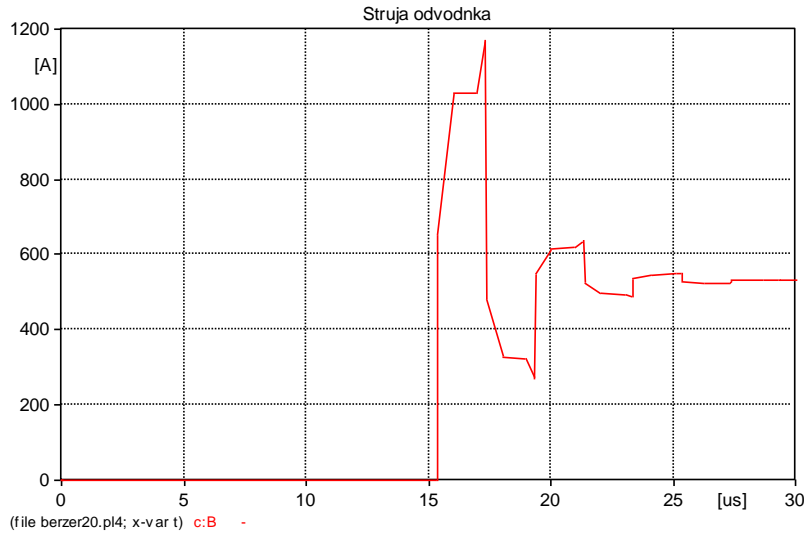


8. Na postrojenje naznačenog napona 35 kV nailazi prenaponski talas beskonačnog trajanja, kosog čela, amplitude 200 kV i strmine 200 kV/μs. Karakteristične impedance svih vodova iznose 390Ω dok su impedance kablova 52Ω. Dužine kablova su 150m a brzina prostiranja talasa je 150 m/μs. Stoprocentni napon reagovanja silicijum – karbidnog odvodnika prenapona iznosi 80 kV. V-A karakteristika odvodnika prenapona je prikazana na slici. Ulazna impedansa transformatora je beskonačna.



Rešenje Berzer20





ODVODNIK PRENAPONA

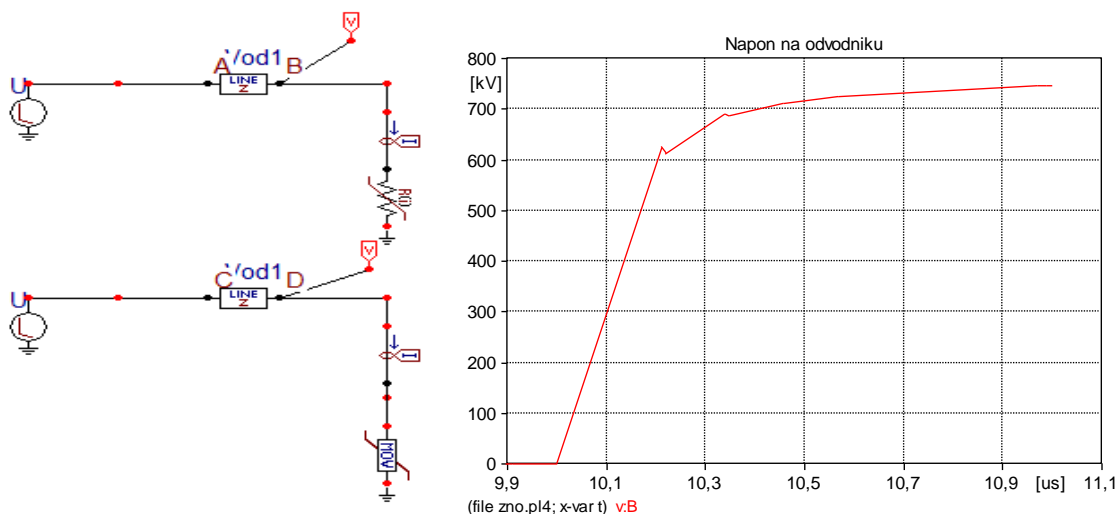
9. (Modelovanje ZnO odvodnika prenapona) Odrediti oblik napona na transformatoru naznačenog napona 400 kV koji se štiti pomoću cink oksidnog odvodnika prenapona priključenog neposredno uz priključke transformatora. Prenaponski talas koji nailazi na transformator ima strminu 1500 kV/μs. Karakteristična impedansa faznog provodnika je 316 Ω. Podnosivi napon izolacije vodaje 1425 kV.

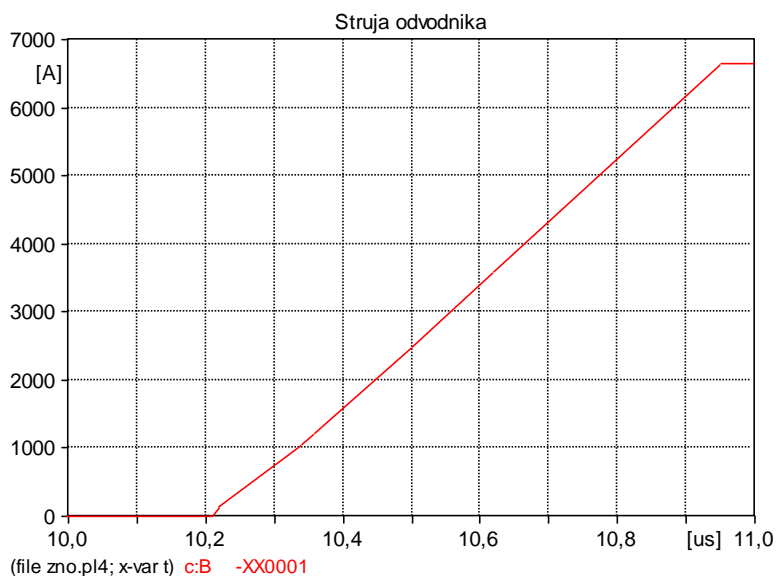
Parametri ZnO odvodnika su:

- najviši trajno dozvoljeni fazni napon iznosi 265 kV (efektivno),
- najviši dozvoljeni napon u trajanju od 1 s je 378 kV (efektivno),
- zaštitni nivo za sklopni prenapon (1 kA) je 636 kV (temena vrednost),
- voltamperska karakteristika je:

$$U = 685 \cdot I^{0,0491} [kV], I [kA]$$

Rešenje ZnO





10. Talas linearno rastuće čela i konstantnog začelja, amplitude 2000 kV, i strmine $a=1000$ kV/ μ s, nailazi po provodniku nadzemnog voda karakteristične impedanse 300Ω i dužine 300 m na priključak metal oksidnog odvodnika prenapona. Preostali napon odvodnika jednak je $U_{pr}=823$ kV. Pretpostavljeno je da je karakteristika sa skoro konstantnom vrednošću napona (menja se od 823 kV pri 0A do 825 kV pri 10 kA) zbog toga što u softverskom alatu ATP-EMTP otpornost odvodnika iz numerickih razloga ne može biti jednaka nuli. Napominje se da je otpornost odvodnika jednaka nagibu karakteristike, pa je u ovom slučaju ona veoma mala i iznosi $0,2\Omega$.

Ovakva karakteristika odvodnika je nerealna i bliska je idealnoj (vodoravnoj) karakteristici, a izabrana je u ovom zadatku radi lakšeg objašnjenja fizičke pojave.

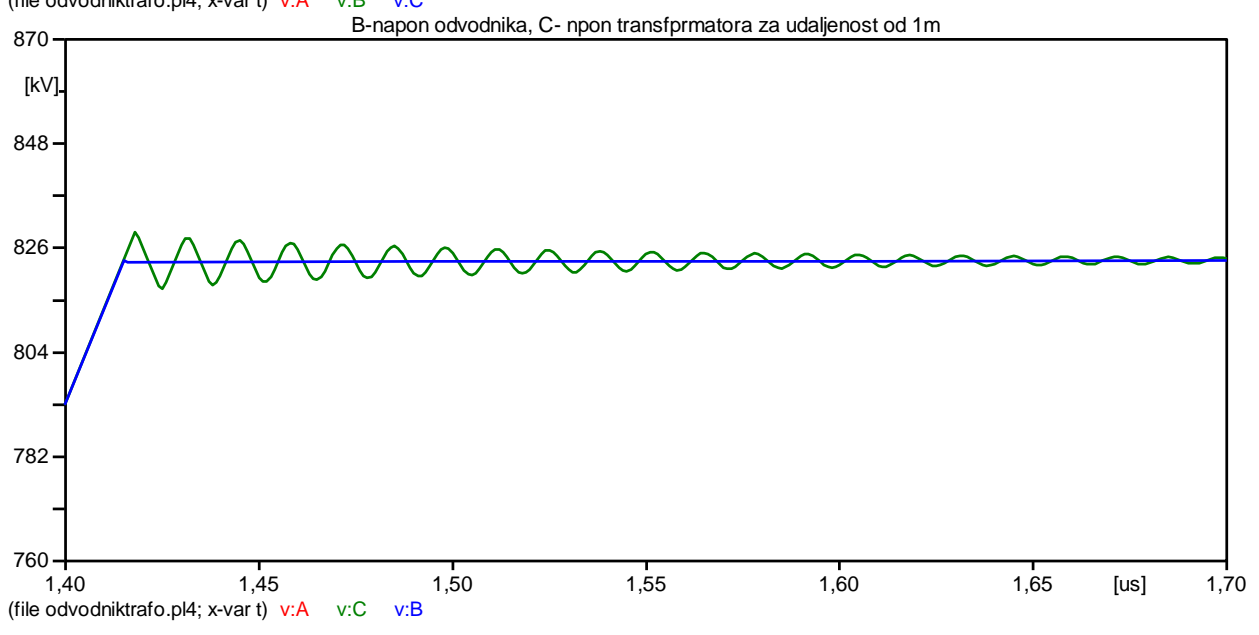
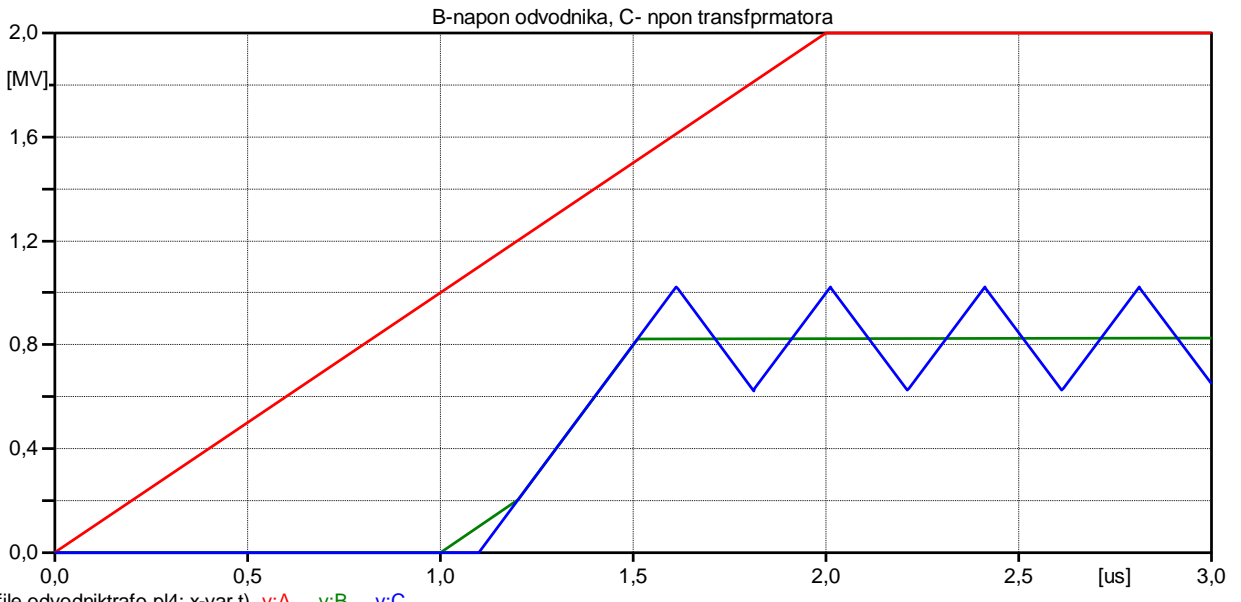
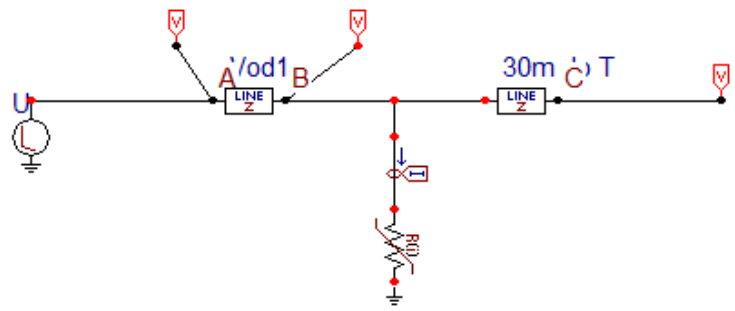
Odvodnik je od energetskog transformatora udaljen 30 m, a karakteristična impedansa spojnog provodnika iznosi 300Ω . Brzina prostiranja talasa po vodu je 300 m/ μ s. Podnosivi udarni atmosferski napon energetskog transformatora iznosi 1425 kV, ali zbog uticaja starenja, na kraju životnog veka, prema standardu IEC 60071-2, treba smatrati da je za 15 % niži, tj. da iznosi $U_{pod}=1239$ kV.

Programom ATP-EMTP analizirati napon na odvodniku i napon na transformatoru, zanemarujući dužinu i induktivnost odvodnika i spojnih veza od priključka do odvodnika i od podnožja odvodnika do zemlje. Energetski transformator modelovati beskonačnom impedansom.

Rešenje OdvodnikTrafo

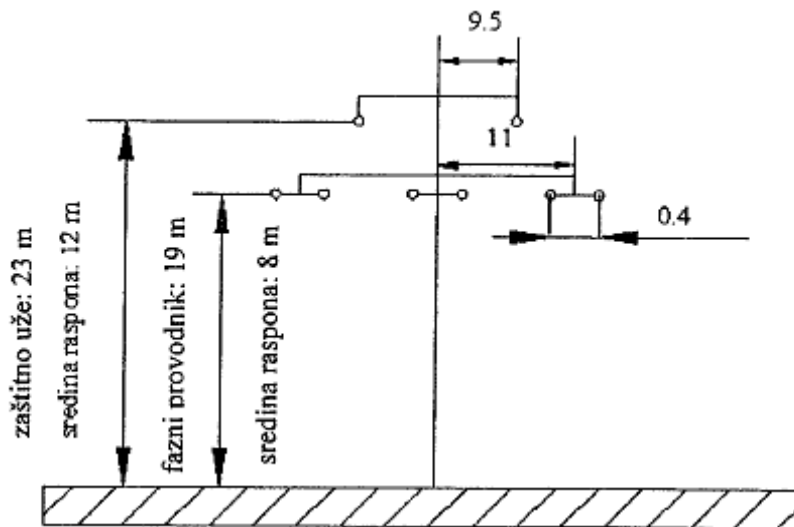
Može se izračunati zaštitna zona transformatora, maksimalna dozvoljena udaljenost odvodnika prenapona od energetskog transformatora:

$$l_{\max} = \frac{U_{pod} - U_{pr}}{2a} v = \frac{1239 - 823}{2 \cdot 1000} 300 = 62,4 \text{ m}$$



IZRAČUNAVANJE PARAMETARA NADZEMNIH VODOVA

11. Nadzemni vod nazivnog napona 400 kV ima dva zaštitna užeta i trofazni sistem sa dva provodnika po fazi. Stub je portalni i njegova geometrija je prikazana na slici. Spoljni prečnik zaštitnog užeta je 1,6 cm, a fazni provodnika 2,6 cm. Specifični otpor zemlje je $100 \Omega\text{m}$, a parametre vod treba izračunati za frekvenciju od 50 Hz. Omski otpor pri jednosmernoj struji iznosi $0,053 \Omega/\text{km}$, a zaštitnog užeta $0,36 \Omega/\text{km}$. Potrebno je uzeti u obzir skin efekat. Odnos debljine aluminisjkog dela provodnika prema provodniku je $T/D=0,231$, što znači da je unutrašnji poluprečnik provodnika zamišljenog kao aluminijumska cev oko čeličnog jezgra $R_{in}=1,3 \text{ mm}$. Za zaštitnu užad $T/D=0$, jer se radi o punom čeličnom provodniku ($R_{in}=0$ i $R_{out}=0,8 \text{ mm}$).



Rešenje Vod1

a) Beržeronov model voda (Z, ν)

U fajlu Vod1.pch u folderu EEUG/ATPDRAW/LCC su rezultati:

$$\begin{aligned} R_0 &= 2.17525\text{E-}01 & Z_0 &= 4.62712\text{E+}02 & V_0 &= 2.25628\text{E+}05 \\ R_+ &= 3.15800\text{E-}02 & Z_+ &= 2.80496\text{E+}02 & V_+ &= 2.88548\text{E+}05 \end{aligned}$$



Line/Cable Data

Model | Data

System type
Overhead Line #Ph: 3

Transposed
 Auto bundling
 Skin effect
 Segmented ground
 Real transf. matrix

Units
 Metric
 English

Standard data
Rho [ohm*m] 100
Freq. init [Hz] 50
Length [km] 1

Model
Type
 Bergeron
 PI
 JMarti
 Semlyen
 Noda

Comment: Order: 0 Label: Hide

OK Cancel Import Save As Run ATP View Verify Edit icon Help



Line/Cable Data

Model | Data

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.7	1.3	0.053	-11	19	8	40	0	2
2	2	0.7	1.3	0.053	0	19	8	40	0	2
3	3	0.7	13.	0.053	11	19	8	40	0	2
4	0	0	0.8	0.36	-9.5	23	12	0	0	0
5	0	0	0.8	0.36	9.5	23	12	0	0	0

Add row Delete last row Insert row copy

↑ Move ↓

OK Cancel Import Save As Run ATP View Verify Edit icon Help

Verify Data

Circuit specification

Phase	Circuit
1	1
2	1
3	1

Select

Line Model Frequency Scan
 Power Frequency Calculation

Line Model Frequency scan

Min freq [Hz]:
 Max freq [Hz]:
 Points/Dec:

View old case

View Model

Edit View

Scaling:

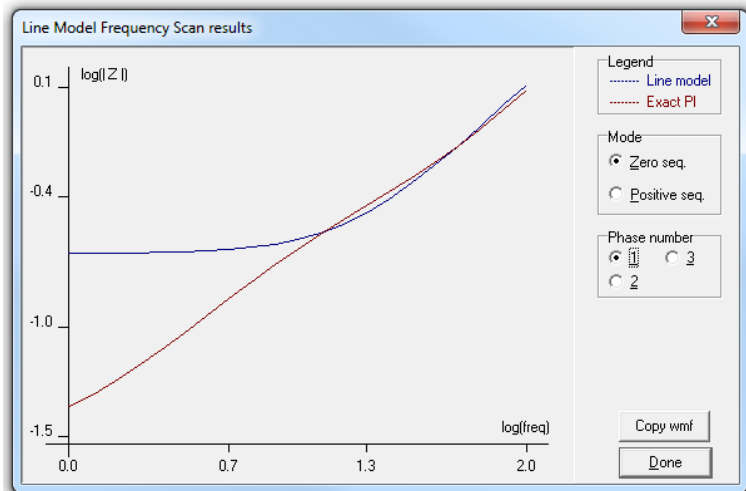
X: 17.92 Y: 28.51

Power Frequency results

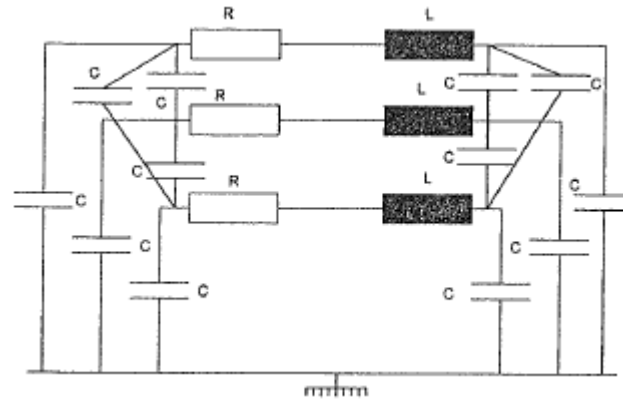
Short circuit impedances and open circuit line charging

Circuit	R0 [ohm]	X0 [ohm]	R+ [ohm]	X+ [ohm]	Q0 [MVA]	Q+ [MVA]
1	0.2175	0.6443	0.03158	0.3054	0.4815	0.621

Calculated at frequency [Hz]: 50
 Reference line voltage [kV]: 400



b) PI model voda



U fajlu Vod1.LIS u folderu EEUG/ATPDRAW/LCC su rezultati u vidu matrica:

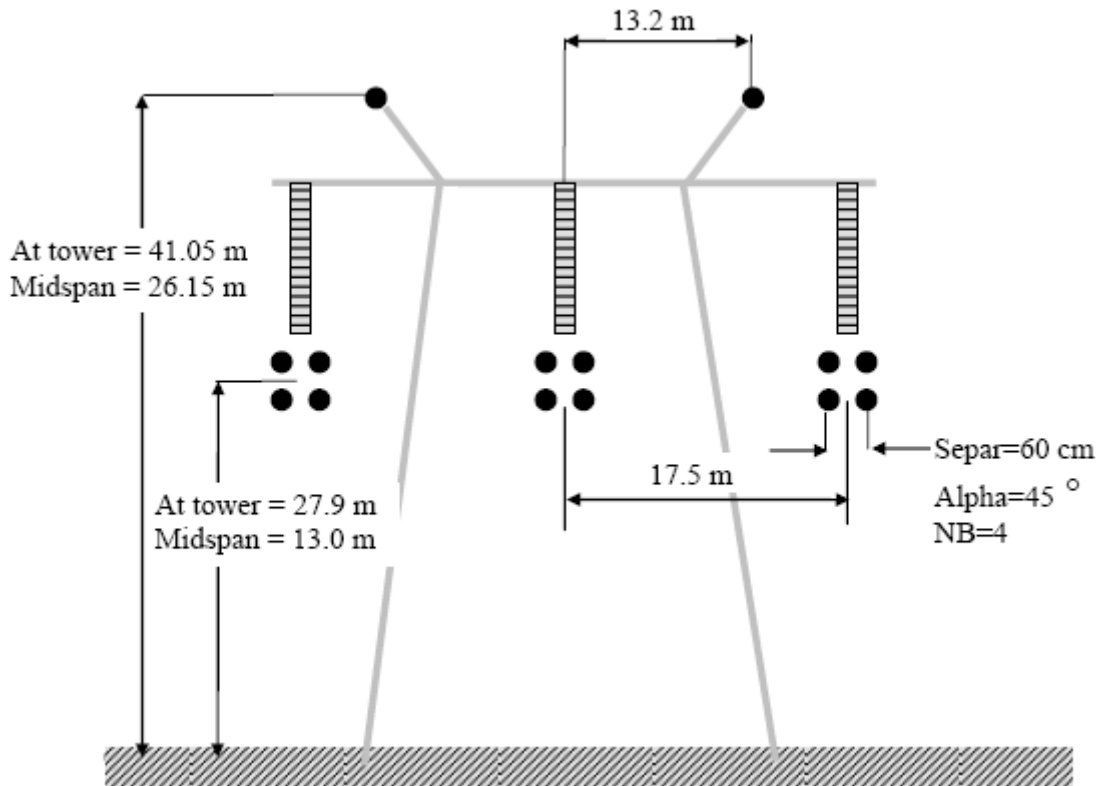
Inverted susceptance matrix, in units of [ohm-kmeter] for the system of physical conductors.

Rows and columns proceed in the same order as the sorted input.

```

1 4.287049E+05
2 4.876741E+04 4.287049E+05
3 2.156252E+04 4.876741E+04 2.969592E+05
4 2.326604E+05 5.051291E+04 2.212311E+04 4.287049E+05
5 4.710638E+04 2.326604E+05 5.051291E+04 4.876741E+04 4.287049E+05
6 2.102138E+04 4.710638E+04 2.326604E+05 2.156252E+04 4.876741E+04 2.969592E+05
7 1.053195E+05 5.996253E+04 2.849816E+04 1.071513E+05 5.817574E+04 2.782456E+04 4.733513E+05
8 2.782456E+04 5.817574E+04 1.071513E+05 2.849816E+04 5.996253E+04 1.053195E+05 3.758026E+04 4.733513E+05
    
```

12. Na osnovu podataka sa slike definisasti parametre Jmarti modela 750 kV nadzemnog voda.



DC resistance = 0.0585 Ω /km

Outside diameter of the conductors = 3.105 cm.

Inner radius of the tube = 0.55 cm

ATPDraw calculates the thickness/diameter value internally (T/D = 0.32).

Sky wires are made from steel reinforced conductors, thus tubular assumption applies here, too:

DC resistance = 0.304 Ω /km

Outside diameter of the sky wire = 1.6 cm

Inner radius of the tube = 0.3 cm

ATPDraw calculates the thickness/diameter value internally (T/D = 0.187).

The resistivity of the soil equals to 20 Ω m. The conductor separation in the bundle is 60 cm.

Rešenje Vod2

Line/Cable Data: LIN750_2

Model | **Data** | Nodes

System type
Overhead Line #Ph: 3
 Transposed
 Auto bundling
 Skin effect
 Segmented ground
 Real transf. matrix
Units: Metric English

Standard data
Rho [ohm*m] 20
Freq. init [Hz] 0.005
Length [km] 162.7
 Set length in icon

Model
Type: Bergeron PI JMarti Semlyen Noda
Data: Decades 7 Points/Dec 10
Freq. matrix [Hz] 1000 Freq. SS [Hz] 50
 Use default fitting

Comment: Order: 0 Label: Hide

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.55	1.55	0.0585	-17.5	27.9	13	60	45	4
2	2	0.55	1.55	0.0585	0	27.9	13	60	45	4
3	3	0.55	1.55	0.0585	17.5	27.9	13	60	45	4
4	0	0.3	0.8	0.304	-13.2	41.05	26.15	0	0	0
5	0	0.3	0.8	0.304	13.2	41.05	26.15	0	0	0

U fajlu Vod2.ALC u folderu EEUG/ATPDRAW/LCC su rezultati u vidu matrica:

```

BEGIN NEW DATA CASE
JMARTI SETUP
$ERASE
BRANCH  IN__AOUT__AIN__BOUT__BIN__COUT__C
LINE CONSTANTS
METRIC
  10.323  0.0585 4          3.1  -17.5   27.9   13.   60.   45.   4
  20.323  0.0585 4          3.1   0.0   27.9   13.   60.   45.   4
  30.323  0.0585 4          3.1   17.5   27.9   13.   60.   45.   4
  00.313  0.304 4          1.6  -13.2  41.05  26.15  0.0  0.0   0
  00.313  0.304 4          1.6   13.2  41.05  26.15  0.0  0.0   0
BLANK CARD ENDING CONDUCTOR CARDS
  20.      1.E3          84.6          1
  20.      50.          84.6          1
  20.      0.005        84.6          7 10  1
BLANK CARD ENDING FREQUENCY CARDS
BLANK CARD ENDING LINE CONSTANT
DEFAULT
$PUNCH
BLANK CARD ENDING JMARTI SETUP
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD

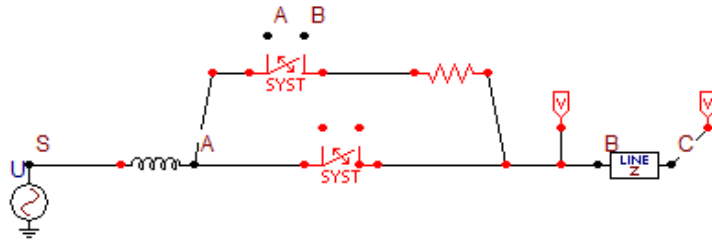
```

Sistemski - Statistički prekidač

Ukoliko se vremena uključenja ili isključenja prekidača menjaju slučajno, po nekom zakonu raspodele, ond aje prekidač statističi (STATISTICS). Ukoliko se trenutak uključenjamenja linearno između zadatog početka i kraja u ekvidistantnim intervalima , prekidač je sistemski (SYSTEMATIC). Rezultati nisu grafici već vršne vrednosti napona, struja, snage, energije i trenutaka kada oni nastaju.

13. Analizirati prenapone pri uključenju voda u praznom hodu, kada postoji otpornik za ograničavanje prenapona. Izvor je monofazni amplitude 343 kV i frekvencije 50 Hz. Induktivnost je 84 mH. Karakteristična impedansa monofaznog voda je 306Ω , a dužina 204 km. Prekidač ima otpornik za uključenje od 200Ω . Glavni kontakti se uvek zatvaraju 5 ms posle pomoćnih, vezanih na red sa otpornikom za uključenje. Proračunati napone i statistiku koji nastaju u 10 simulacija, ako se trenuci uključenja glavnih kontakata menjaju za po 1 ms.

Rešenje: sistemski



Component: SW_SYST.SUP

Attributes

SYSTEMATIC SWITCH

Switch type: Slave

Tdelay: -0.005

Component: SW_SYST.SUP

Attributes

SYSTEMATIC SWITCH

Switch type: Independent

Tbeg: 0.01

INCT: 0.001

NSTEP: 10

NODE	PHASE	NAME
SW_F	1	
SW_T	1	

Order: 0 Label:

Comment:

Output: 0 - No

Buttons: OK, Cancel, Help

Annotations:

- prvo uključenje u 10 ms
- svako naredno za 10+1 ms
- 10 simulacija uključenja

ATP Settings

Simulation | Output | Switch/UM | Format | Record | Variables

Switch study

- Statistic study:
- Systematic study:
- Num. = 10

Switch controls

- ISW: 1
- IEST: 1
- IDIST: 0
- IMAX: 0
- IDICE: 1
- KSTOUT: -1
- NSEED: 0

Universal machines

Initialization

- Automatic:
- Manual:

Units

- SI:
- Per unit:

Interface

- Prediction:
- Compensation:

Buttons: OK, Help

Tekstualna datoteka sa rešenjima statičke analize se može pronaći naredbom **ATP/Edit Lis-file:**

Variable maxima : 354411.115 365723.304

Times of maxima : .02022 .02067

Variable minima : -357821.08 -368820.24

Times of minima : .03 .03

Statistical distribution of peak voltage at node "B ". The base voltage for per unit printout is V-base = 3.43000000E+05

Interval number	voltage in per unit	voltage in physical units	Frequency (density)	Cumulative frequency	Per cent .GE. current value
20	1.0000000	3.43000000E+05	0	0	100.000000
21	1.0500000	3.60150000E+05	1	1	90.000000
22	1.1000000	3.77300000E+05	3	4	60.000000
23	1.1500000	3.94450000E+05	2	6	40.000000
24	1.2000000	4.11600000E+05	1	7	30.000000
25	1.2500000	4.28750000E+05	1	8	20.000000
26	1.3000000	4.45900000E+05	1	9	10.000000
27	1.3500000	4.63050000E+05	1	10	.000000

Mean = 1.15000000E+00 1.14863490E+00

Variance = 9.58333333E-03 8.27819283E-03

Standard deviation = 9.78945010E-02 9.09845747E-02

Statistical distribution of peak voltage at node "C ". The base voltage for per unit printout is V-base = 3.43000000E+05

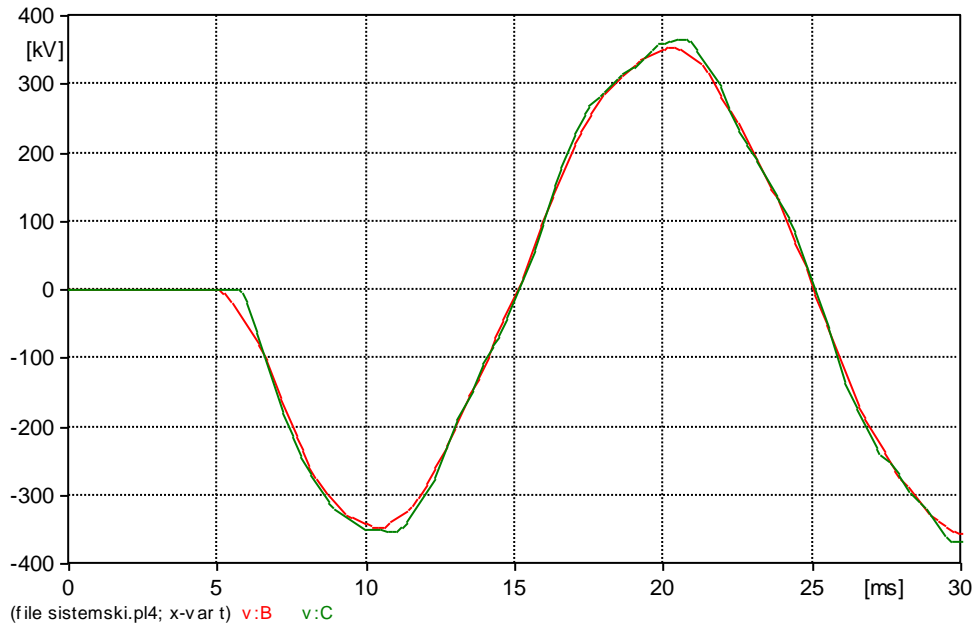
Interval number	voltage in per unit	voltage in physical units	Frequency (density)	Cumulative frequency	Per cent .GE. current value
21	1.0500000	3.60150000E+05	0	0	100.000000

22	1.1000000	3.77300000E+05	2	2	80.000000
23	1.1500000	3.94450000E+05	0	2	80.000000
24	1.2000000	4.11600000E+05	2	4	60.000000
25	1.2500000	4.28750000E+05	2	6	40.000000
26	1.3000000	4.45900000E+05	1	7	30.000000
27	1.3500000	4.63050000E+05	0	7	30.000000
28	1.4000000	4.80200000E+05	0	7	30.000000
29	1.4500000	4.97350000E+05	0	7	30.000000
30	1.5000000	5.14500000E+05	2	9	10.000000
31	1.5500000	5.31650000E+05	0	9	10.000000
32	1.6000000	5.48800000E+05	1	10	.000000

Mean = 1.27500000E+00 1.28120675E+00

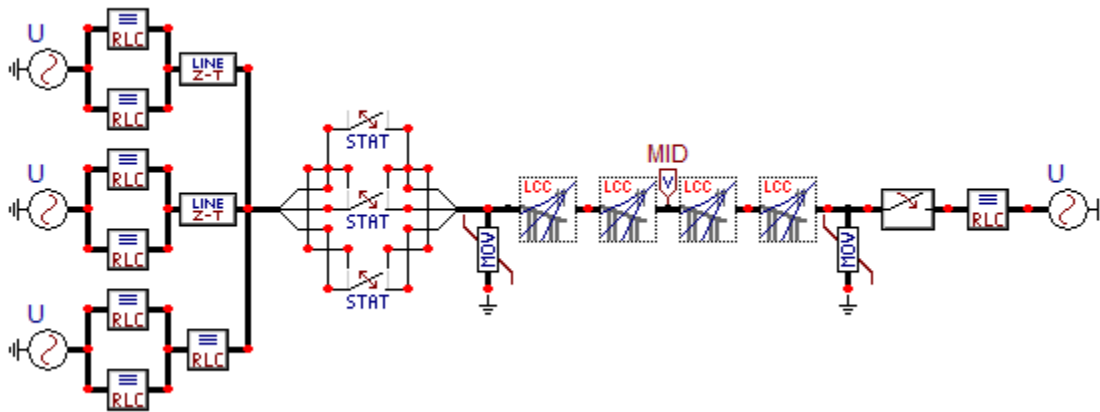
Variance = 3.05555556E-02 3.04044238E-02

Standard deviation = 1.74801475E-01 1.74368643E-01



14. Analizirati performanse prekidača, njihovu sinhronizaciju, na 400 kV dalekovodu. Smatra se da su parametri Jmarti modela dalekovoda poznati u primeru.

Rešenje staticki



The following is a distribution of peak overvoltages among all output nodes of the last data card that have the same base voltage.

This distribution is for the maximum of the peaks at all output nodes with $V\text{-base} = 3.43000000\text{E}+05$

Interval number	voltage in per unit	voltage in physical units	Frequency (density)	Cumulative frequency	Per cent .GE. current value
25	1.2500000	4.28750000E+05	0	0	100.000000
26	1.3000000	4.45900000E+05	8	8	92.000000
27	1.3500000	4.63050000E+05	1	9	91.000000
28	1.4000000	4.80200000E+05	1	10	90.000000
29	1.4500000	4.97350000E+05	2	12	88.000000
30	1.5000000	5.14500000E+05	4	16	84.000000
31	1.5500000	5.31650000E+05	6	22	78.000000
32	1.6000000	5.48800000E+05	6	28	72.000000
33	1.6500000	5.65950000E+05	4	32	68.000000

34	1.7000000	5.83100000E+05	2	34	66.000000
35	1.7500000	6.00250000E+05	1	35	65.000000
36	1.8000000	6.17400000E+05	2	37	63.000000
37	1.8500000	6.34550000E+05	1	38	62.000000
38	1.9000000	6.51700000E+05	2	40	60.000000
39	1.9500000	6.68850000E+05	7	47	53.000000
40	2.0000000	6.86000000E+05	2	49	51.000000
41	2.0500000	7.03150000E+05	6	55	45.000000
42	2.1000000	7.20300000E+05	4	59	41.000000
43	2.1500000	7.37450000E+05	5	64	36.000000
44	2.2000000	7.54600000E+05	9	73	27.000000
45	2.2500000	7.71750000E+05	22	95	5.000000
46	2.3000000	7.88900000E+05	2	97	3.000000
47	2.3500000	8.06050000E+05	0	97	3.000000
48	2.4000000	8.23200000E+05	2	99	1.000000
49	2.4500000	8.40350000E+05	0	99	1.000000
50	2.5000000	8.57500000E+05	0	99	1.000000
51	2.5500000	8.74650000E+05	1	100	.000000

Summary of preceding table follows: Grouped data Ungrouped data

Mean = 1.89800000E+00 1.89985720E+00

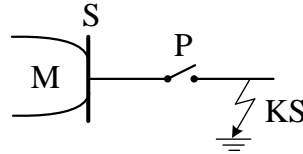
Variance = 1.15829293E-01 1.11891283E-01

Standard deviation = 3.40337028E-01 3.34501544E-01

SKLOPNI PRENAPONI

15. (Sabirnički KS)

Na slici je prikazano isključenje sabirničkog kratkog spoja (kratkog spoja na odvodu neposredno iza sabirnica). Sabirnice se napajaju iz mreže naznačenog napona 400 kV.



Kratak spoj iza sabirnica koje se napajaju iz mreže

Parametri sistema su:

- ekvivalentna induktivnost mreže: $L = 5 \text{ mH}$,
- ekvivalentna otpornost mreže $R = 2 \Omega$,
- kapacitivnost sabirnica $C = 10 \mu\text{F}$,
- temena fazna vrednost elektromotorne sile mreže $E_m = \sqrt{2} \cdot 35 / \sqrt{3} = 28,58 \text{ kV}$.

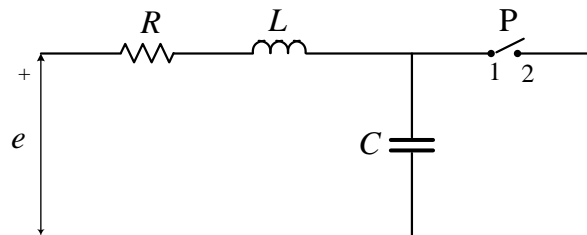
Ekvivalentna elektromotorna sila mreže se menja po prostoperiodičnom zakonu:

$$e(t) = E_m \cos(\omega t + \varphi)$$

gde je ω industrijska učestanost i φ početna faza elektromotorne sile.

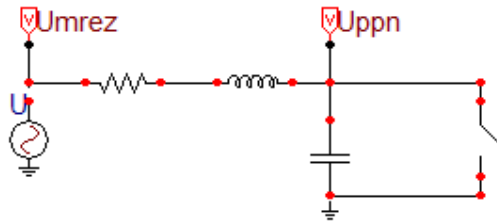
Odrediti maksimalnu vrednost prelaznog povratnog napona pri isključenju sabirničkog kratkog spoja

- bez uvažavanja napona na električnom luku.
- sa uvažavanjem napona na električnom luku $\Delta U_G = 4 \text{ kV}$.

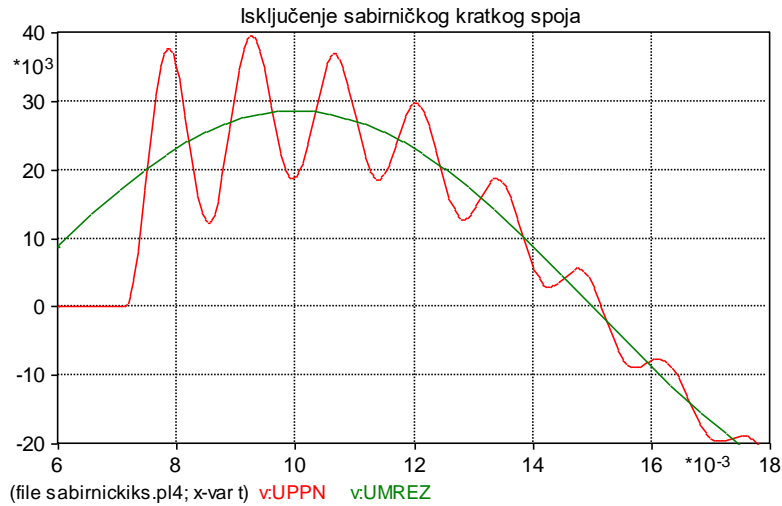


Monofazna ekvivalentna šema za proračun prelaznog povratnog napona pri isključenju sabirničkog kratkog spoj

Rešenje: SabirničkiKS



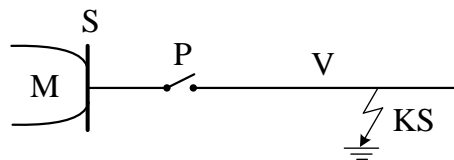
Slika Ekvivalentna šema problema u ATP-EMTP



Slika Rezultati simulacije u ATP-EMTP

16. (Blizak KS)

Na slici 3 je prikazano isključenje bliskog kratkog spoja (kilometarskog kvara) na vodu koji se desio na rastojanju $d=5$ km od prekidača. Sabirnice se napajaju iz mreže naznačenog napona 35 kV.



Slika 3: Blizak kratak spoj (kilometarski kvar) na vodu

Parametri sistema su:

- ekvivalentna induktivnost mreže: $L_1 = 5$ mH,
- ekvivalentna otpornost mreže $R_1 = 2\Omega$,
- kapacitivnost sabirnica $C_1 = 10\mu\text{F}$,
- temena fazna vrednost elektromotorne sile mreže $E_m = \sqrt{2} \cdot 35 / \sqrt{3} = 28,58\text{kV}$,
- podužna induktivnost voda $l_v = 0,8$ mH/km,

- podužna otpornost voda $r_v = 0,6 \Omega/\text{km}$,
- podužna kapacitivnost voda $c_v = 0,19 \cdot 10^{-6} \mu\text{F}/\text{km}$.

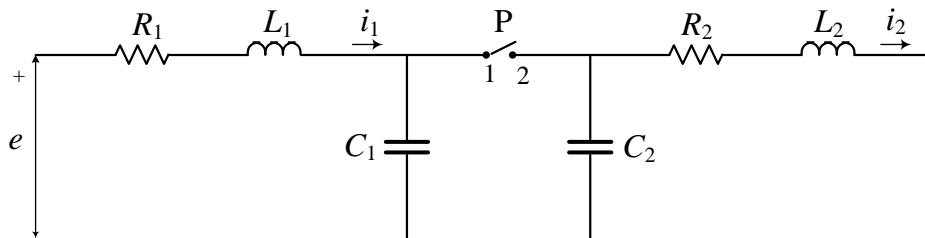
Ekvivalentna elektromotorna sila mreže se menja po prostoperiodičnom zakonu:

$$e(t) = E_m \cos(\omega t + \varphi)$$

gde je ω industrijska učestanost i φ početna faza elektromotorne sile.

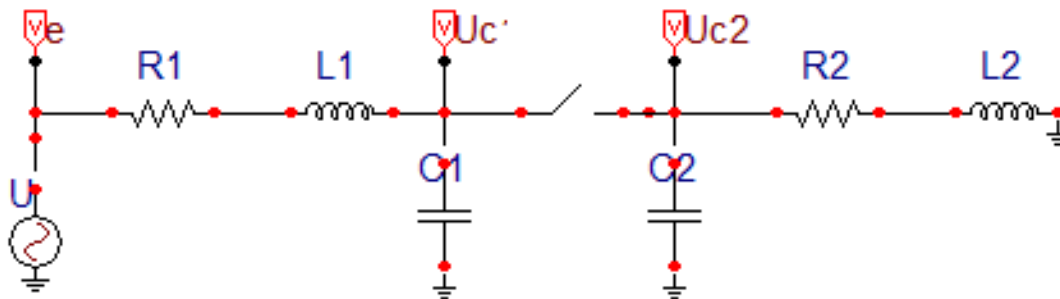
Odrediti vrednost prvog maksimuma prelaznog povratnog napona pri isključenju bliskog kratkog spoja u sledećim slučajevima:

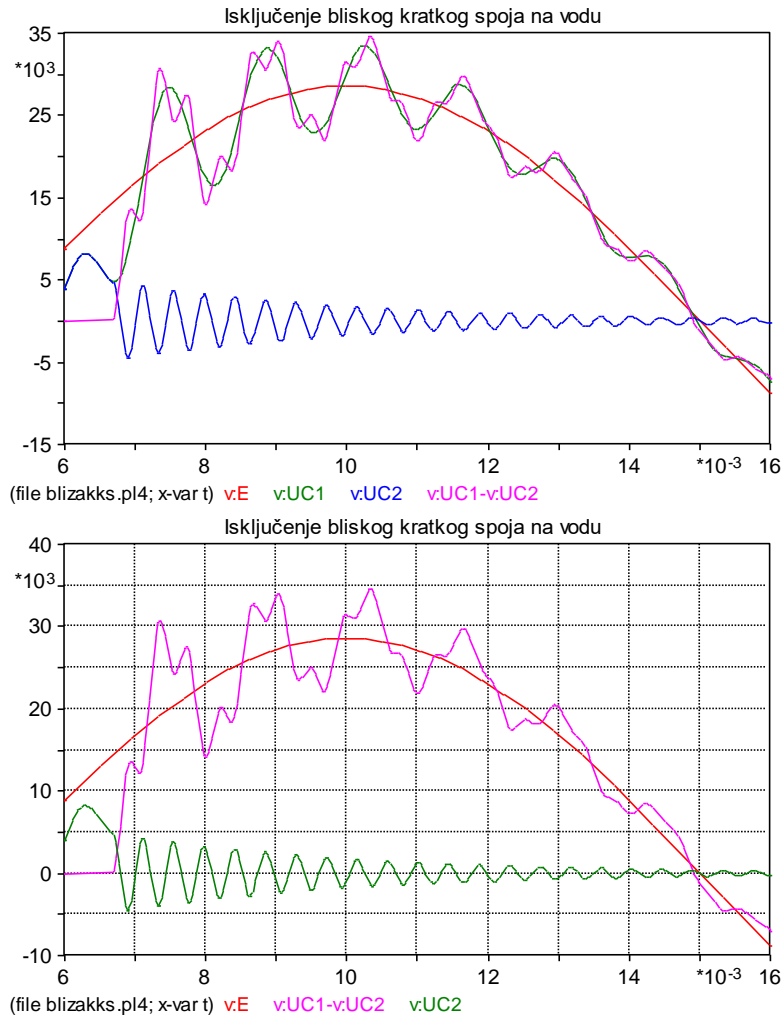
- vod je predstavljen ekvivalentnom šemom sa koncentrisanim parametrima,
- vod je predstavljen ekvivalentnom šemom sa raspodeljenim parametrima.



Slika Monofazna ekvivalentna šema za proračun prelaznog povratnog napona pri isključenju bliskog kratkog spoja na vodu

Rešenje: BlizakKS

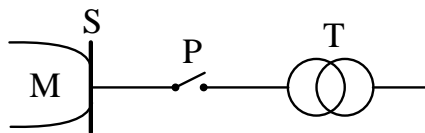




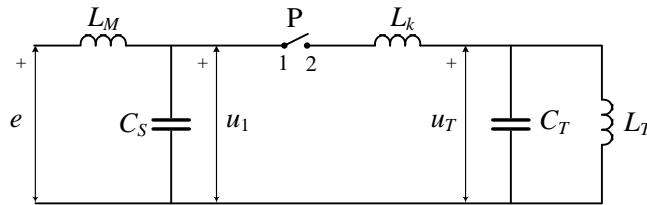
17. (TRprazanHod)

Odrediti koliki se prenaponi mogu dobiti pri isključenju sa mreže transformatora koji je radio u režimu praznog hoda (slika 5). Prekidač može trenutno da prekine struju praznog hoda čija je vrednost manja od 10 A. Podaci o transformatoru su:

- naznačena snaga transformatora $S_n=30$ MVA,
- naznačeni napon $U_n=121$ kV,
- struja praznog hoda $i_{ph}=3$ %
- prenosni odnos $m=121/36,5$ kV/kV,
- ekvivalentna ulazna kapacitivnost namotaja jedne faze $C_T=10^{-8}$ F

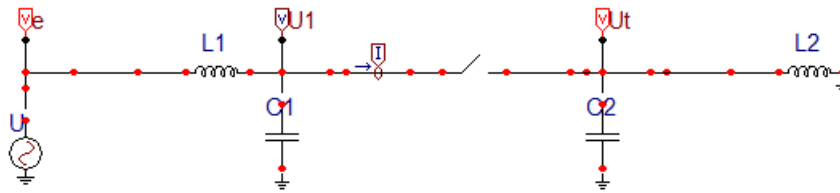


Slika Isključenje transformatora u praznog hodu

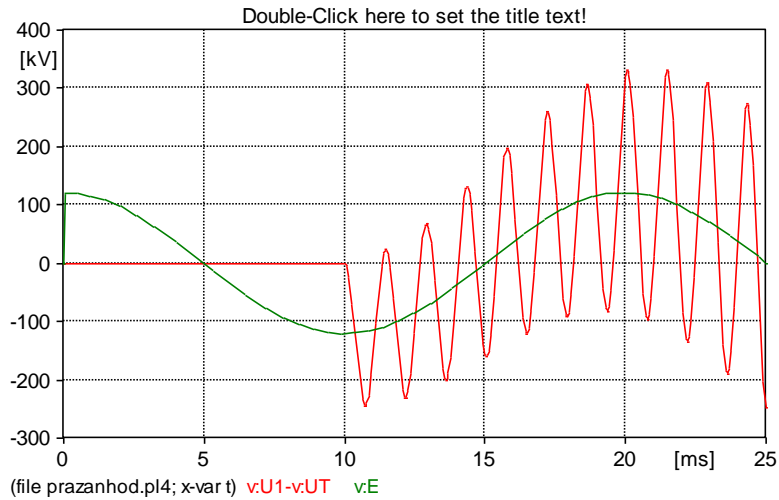


Slika Monofazna zamenska šema za analizu isključenja transformatora u praznom hodu

Rešenje: TRprazanHod



Slika 3: Ekvivalentna šema problema u ATP-EMTP

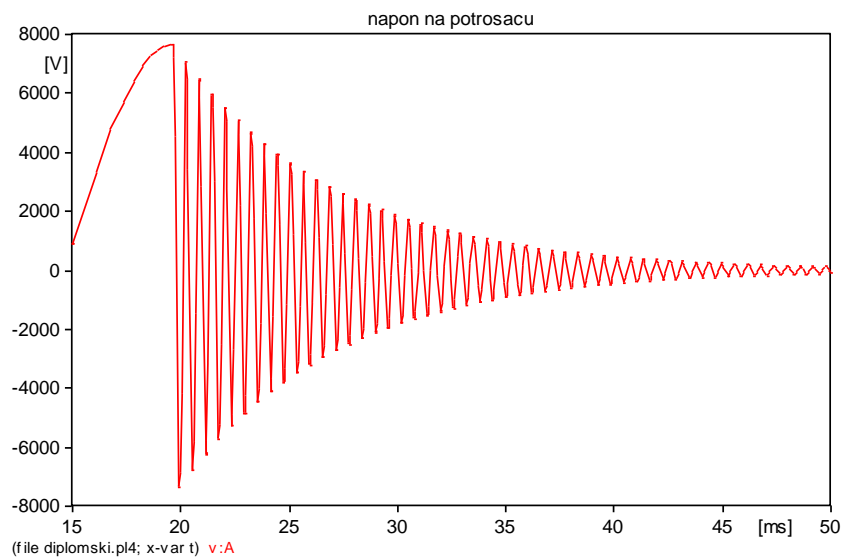
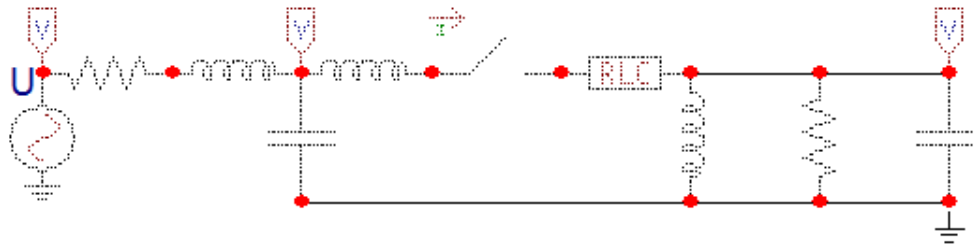


18. (Prekidanje malih induktivnih struja)

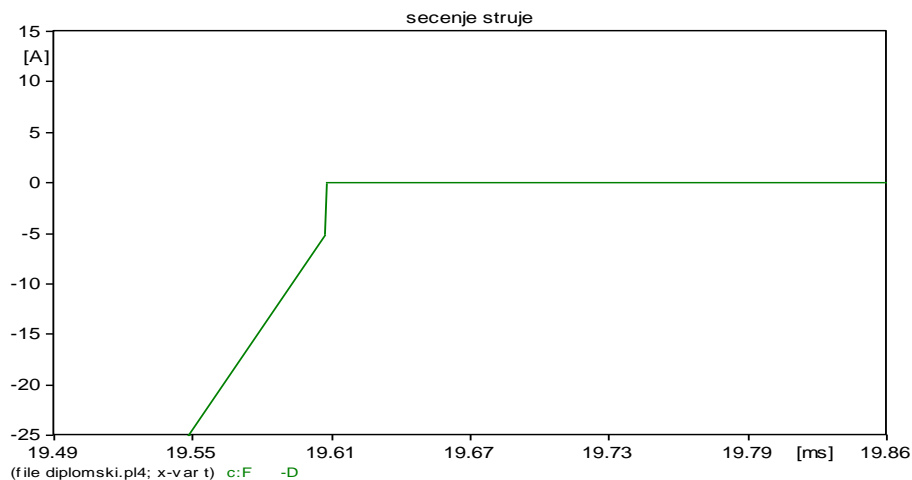
Prikazati napon na induktivnom potrošaču koji nastaje zbog naglog sečenja male induktivne struje primenom programskog alata ATP. Takođe izvršiti i poređenje ovako dobijenog prenapona sa naponom koji se dobija na induktivnom potrošaču u slučaju kada ne dolazi do sečenja struje.

Parametar elemenata na slici su sledeći:

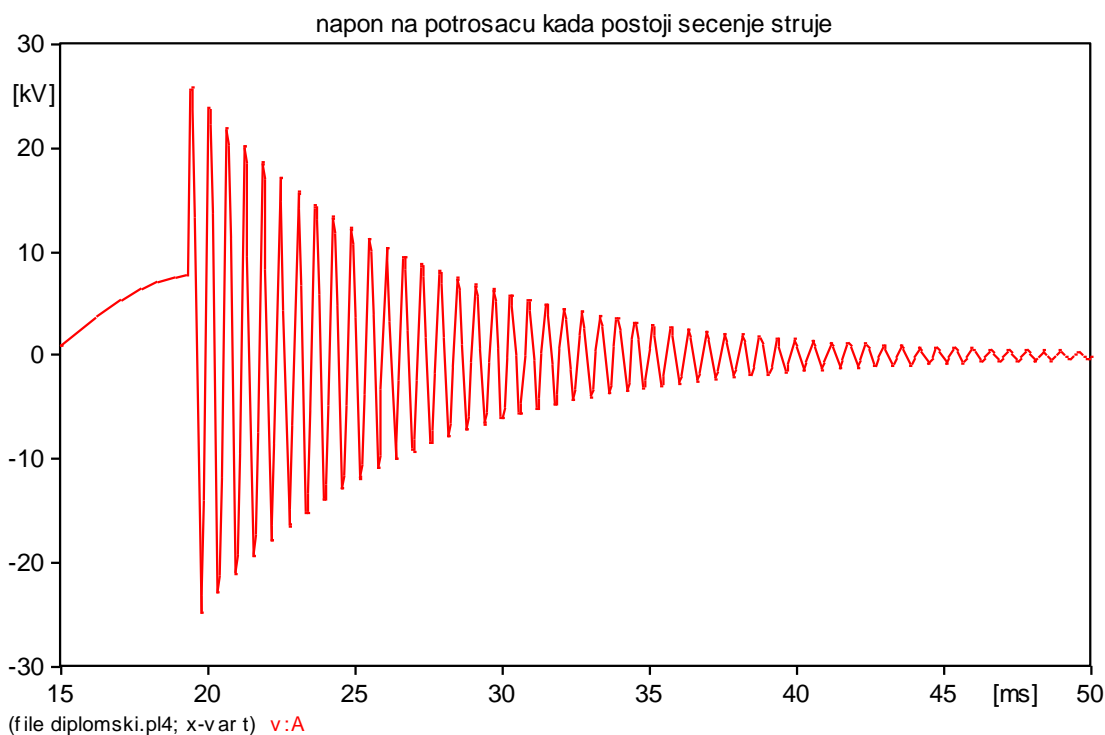
- napon mreže: $U_n=10$ kV,
- induktivnost mreže: $L_1=1,3$ mH,
- kapacitivnost mreže: $C_1=3$ nF,
- otpornost mreže: $R_1=0,4$ Ω ,
- induktivnost spojnog kabla od sabirnica od prekidača na strani mreže: $L_{v1}=20$ μ H,
- induktivnost spojnog kabla od prekidača do induktivnog potrošača: $L_{v2}=23$ μ H,
- omska otpornost spojnog kabla: $R_v=0,5$ Ω ,
- kapacitivnost induktivnog potrošača: $C_2=0,76$ μ F,
- induktivnost induktivnog potrošača: $L_2=23$ mH,
- omska otpornost induktivnog potrošača: $R_2=91$ k Ω .



Napon na induktivnom potrošaču u slučaju kada ne dolazi do sečenja struje



Struja kroz prekidač

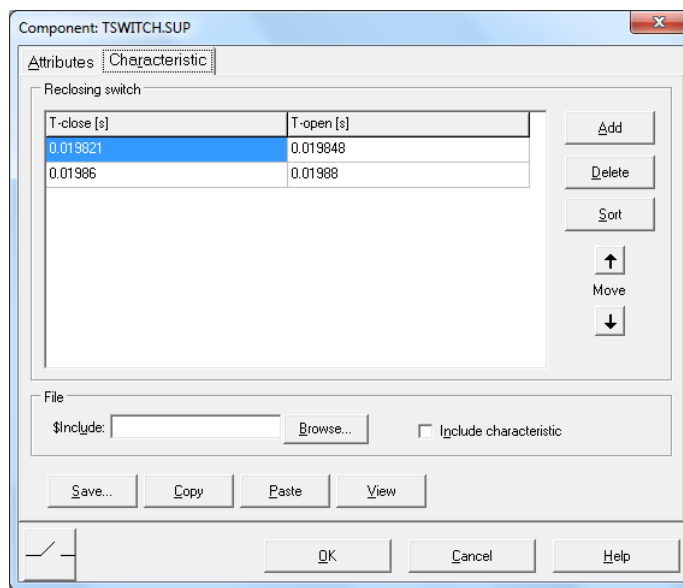


Napon na induktivnom potrošaču u slučaju kada dolazi do sečenja struje

Slučaj ponovnog paljenja električnog luka:

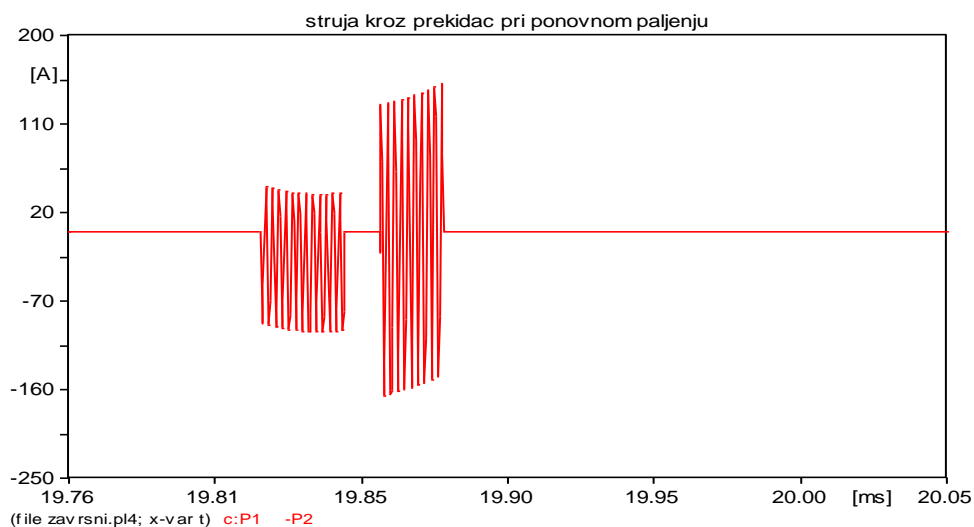
Mogućnost da izvršimo ovaj proračun daje nam kartica Characteristic u prozoru za dijalog vremenski kontrolisanog prekidača.

Parametri prvog uključjenja i isključenja zadaju se na kartici Attributes, a drugo, treće ili bilo koje ponovno uključjenje i isključenje zadaje se na kartici Characteristic. Ova kartica prikazana je na sledećoj slici:



Podlašavanje kartice Characteristic

Nakon pokretanja simulacije dobija se vremenski tok struje kroz prekidač kao na sledećem grafiku :



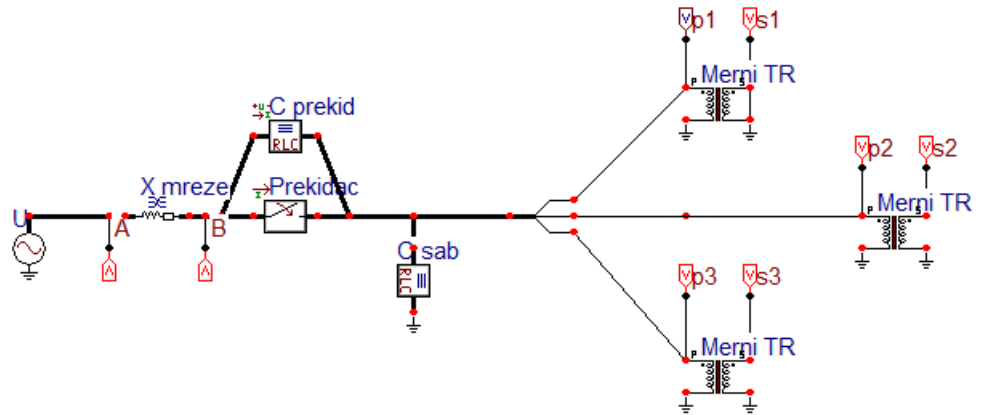
Struja kroz prekidač kada dolazi do ponovnih paljenja

19. (Ferorezonansa)

Ispitati pojavu ferorezonanse na šemi prikanoj na slici. Trofazna mreža nazivnog napona 400 kV prikazana je naponskim izvorom i reaktansom nultor i direktnog redosleda. Fazna efektivna vrednost napona izvora je 231 kV. Reaktansa nultog redosleda iznosi 10Ω , a direktnog 6Ω . Prekidač je uključen i isključuje se u trenutku 0,020s. Prekidač sadrži kondenzator za olkšavanje gašenja električnog luka i popravljjanje nejednake raspodele napona na prekidnim

elementima od 700 pF. Kapacitet sabirnica je 170 pF. Na sabirnice su priključena tri monofazna naponska transformatora koji svode napon na 100 V. Kriva efektivne vrednosti napona u funkciji efektivne vrednosti struje data je u priloženoj tabeli. Efektivna vrednost struje magnećenja pri naznačenom naponu je 0,004 A, a fluks iznosi 1040 Wb. Aktivni gubici snage u magnetnom kolu se zadaju preko otpora čija je vrednost $1e8 \Omega$.

I_{eff} [A]	U_{eff} [V]
0.0014144	162960
0.0024752	203640
0.0038896	223200
0.0056577	244320
0.007072	252600
0.0106082	262560
0.0141442	271920
0.0212164	280200
0.0282885	287280
0.056577	299520
0.099	309720
0.212164	318840



Rešenje: Ferorezonansa

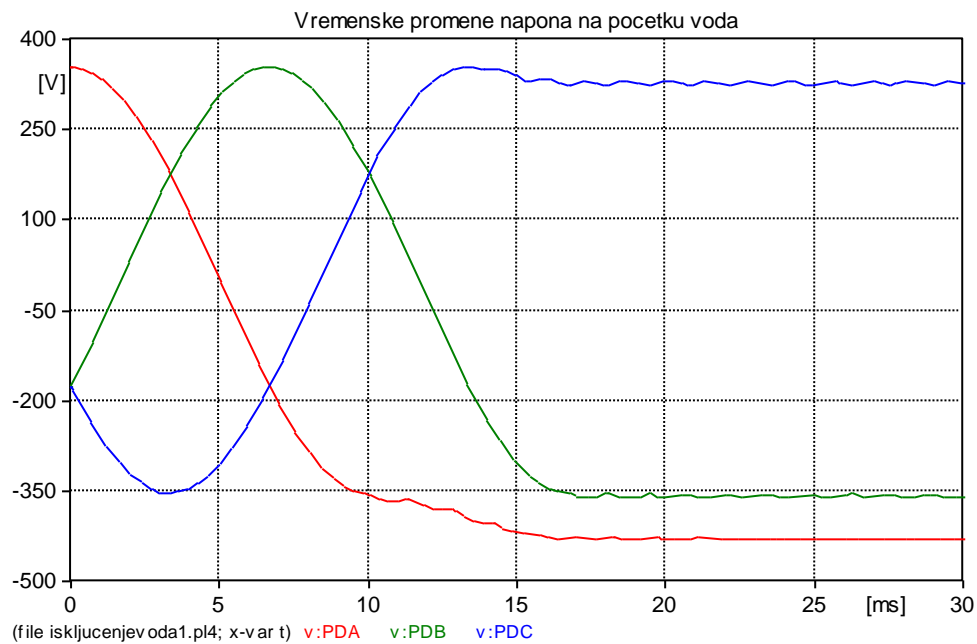
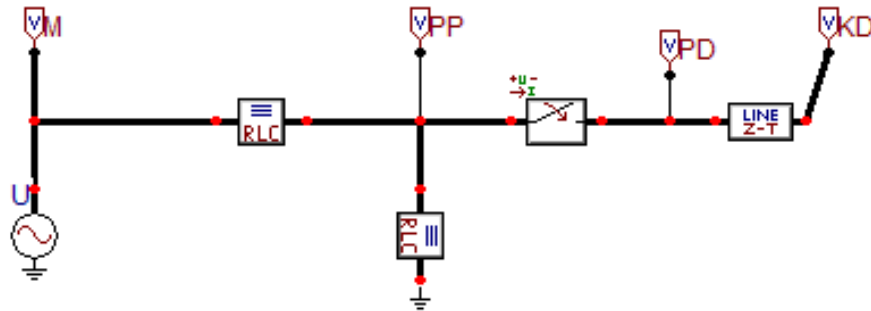
20. (Isključenje voda u praznom hodu)

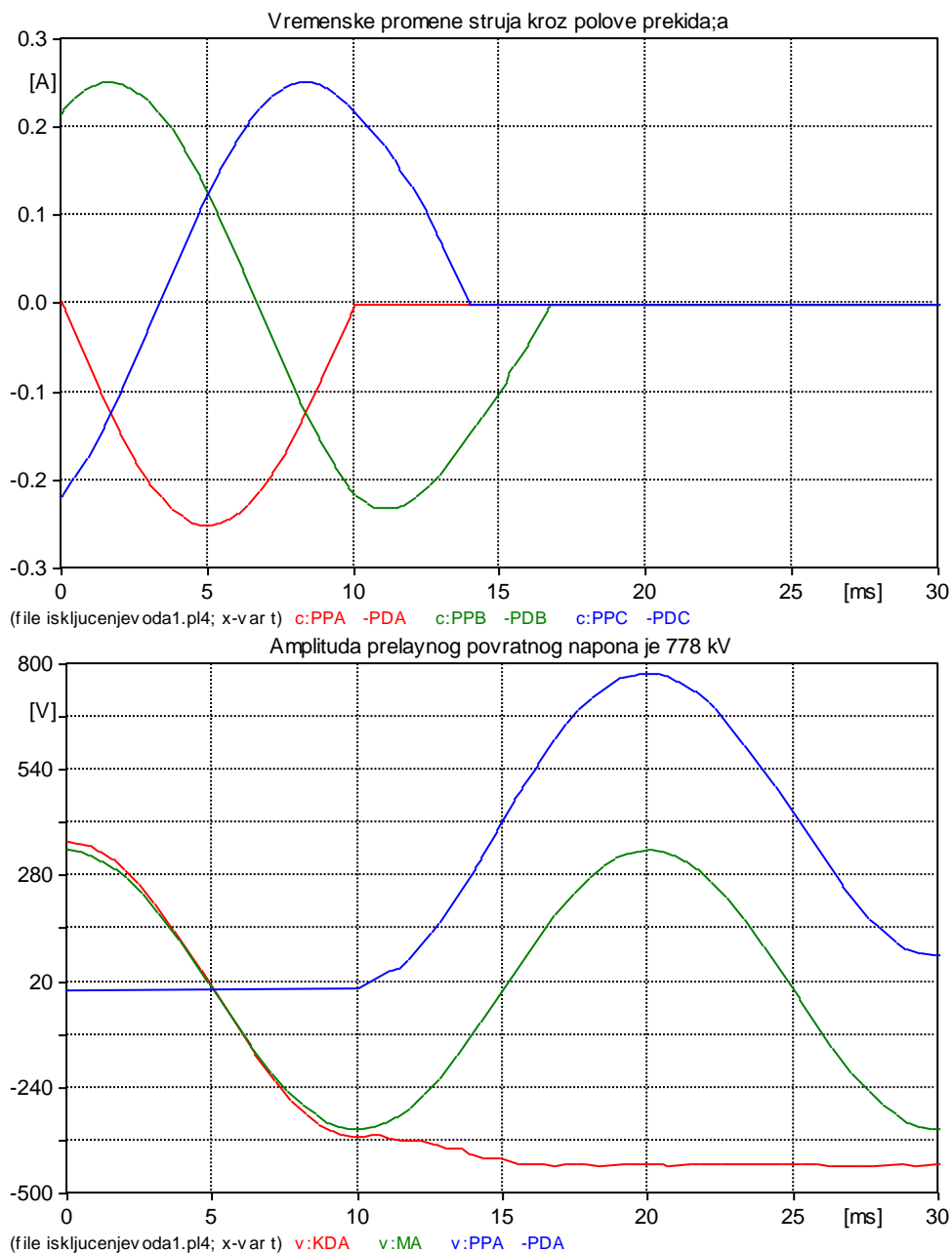
Analizirati isključenje 400 kV voda Beograd - Đerdap u praznom hodu u toku 30 ms. Izračunati zaostale napone u sve tri faze i prikazati napone na vodu, kao i struje kroz prekidača u sva tri pola. Sva tri pola prekidača otvaraju se sinhrono u trenutku 7 ms. Mreža se predstavlja sa izvorom naizmeničnog napona maksimalne vrednosti 343 kV, 50 Hz, induktivnošću 84 mH i otočnom granom koja se sastoji od otpornosti 100Ω i kapaciteta $1,5 \mu\text{F}$. Podužni parametri 204 km dugog dalekovoda su:

nulti: $0,528 \Omega/\text{km}$, 628Ω , $270 \text{ m}/\mu\text{s}$,
 direktni: $0,058 \Omega/\text{km}$, 306Ω , $300 \text{ m}/\mu\text{s}$.

Rešenje Isključenjevoda1

Ovakav slučaj je prekidanje male kapacitivne struje neopterećenog voda. Slično se javlja i kod isključenja kabla i kondenzatorske baterije. Kapacitivna struja prednjači u odnosu na napon i postaje nula u trenutku kada je napon maksimalan. Ako se desi da se kontakti prekidača razdvoje u trenutku kada struja nije jednaka nula javlja se gorenje električnog luka.





21. (Isključenje voda u praznom hodu)

Analizirati isključenje nadzemnog 204 km dugačkog voda sa brzim automatskim ponovnim uključenjem. Mreža nazivnog napona 400 kV ima snagu trofaznog kratkog spoja $S=6066$ MVA.

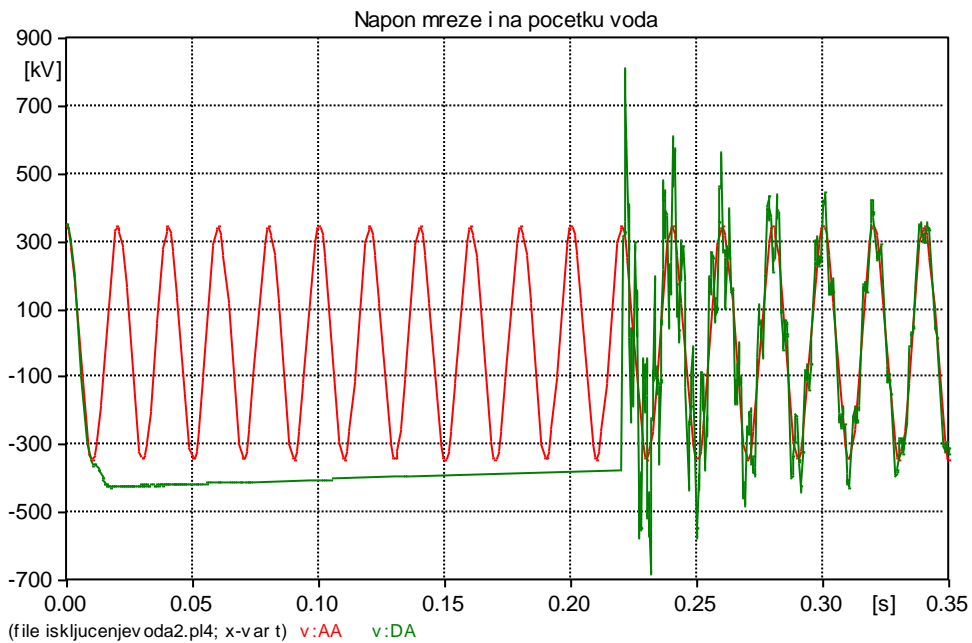
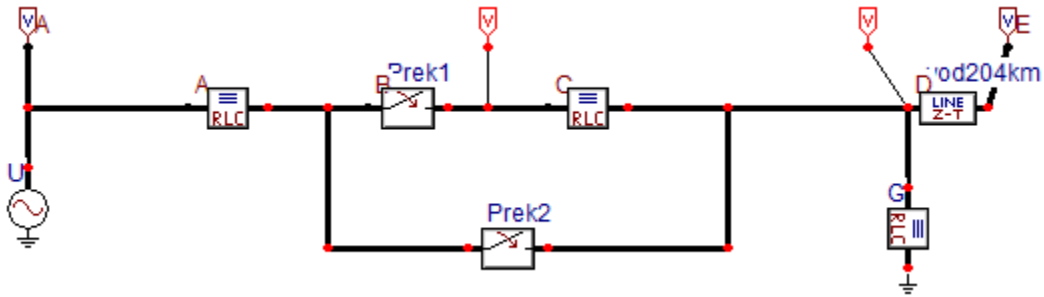
nulti: $0,000528 \Omega/\text{km}$, 628Ω , $270 \text{ m}/\mu\text{s}$,

direktni: $5,8 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{km}$, 306Ω , $300 \text{ m}/\mu\text{s}$.

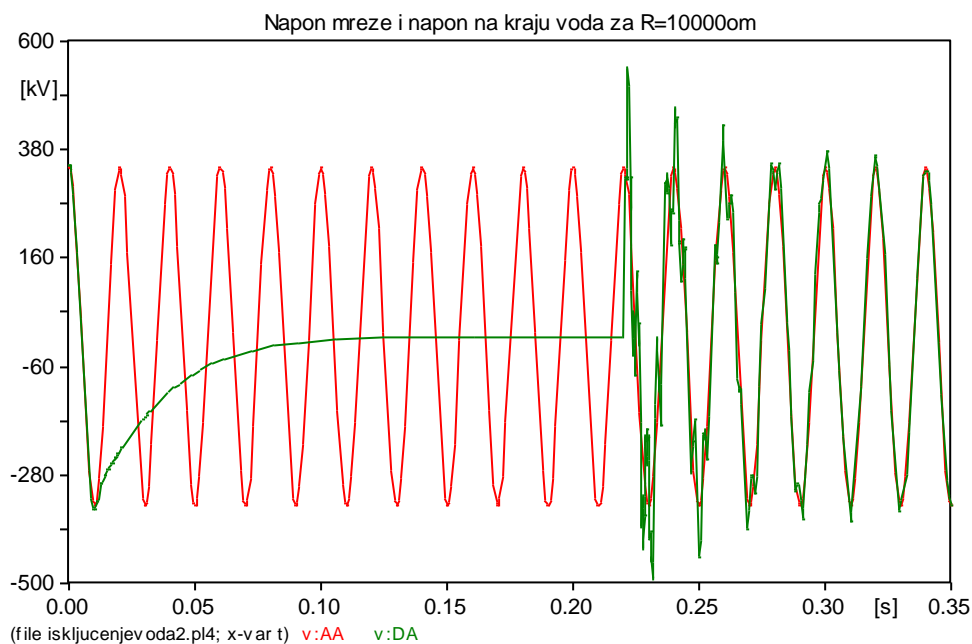
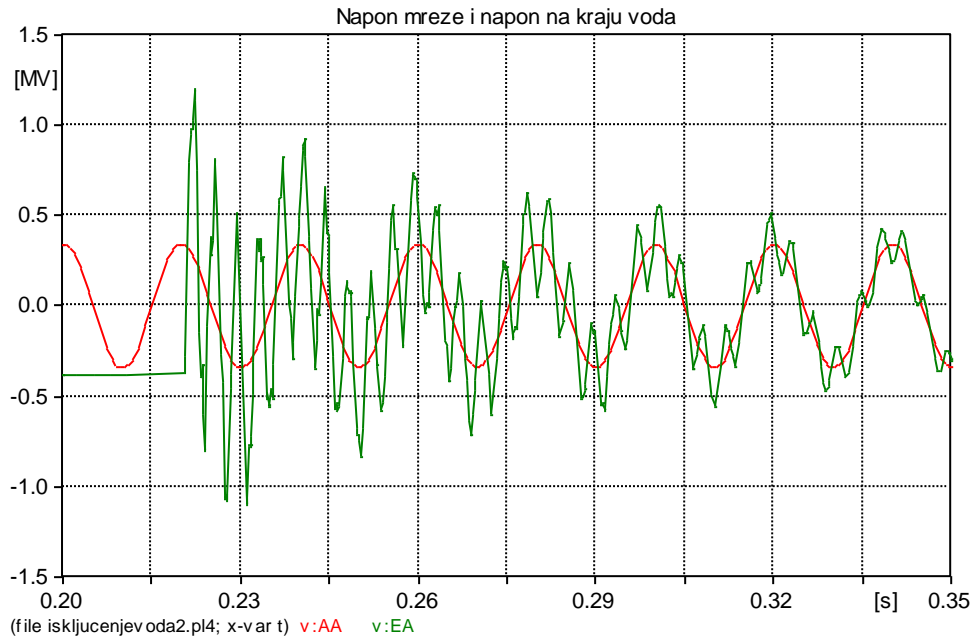
Svi polovi prekidača isključuju se istovremeno nakon 7ms. Petnaest milisekundi nakon isključenja uređaj za automatsko ponovno uključenje uključuje kontakte prekidača i dovodi vod pod napon. Simulirati korakom od $30 \mu\text{s}$ napone na početku i kraju voda u trajanju 0,35 s.

Analizirati i prikazati napone u fazi A, kao i napon mreže. Analizirati uticaj odvodnosti voda pomoću otpornosti od $10^6 \Omega$ do $10^4 \Omega$.

Rešenje Isključenjevoda2



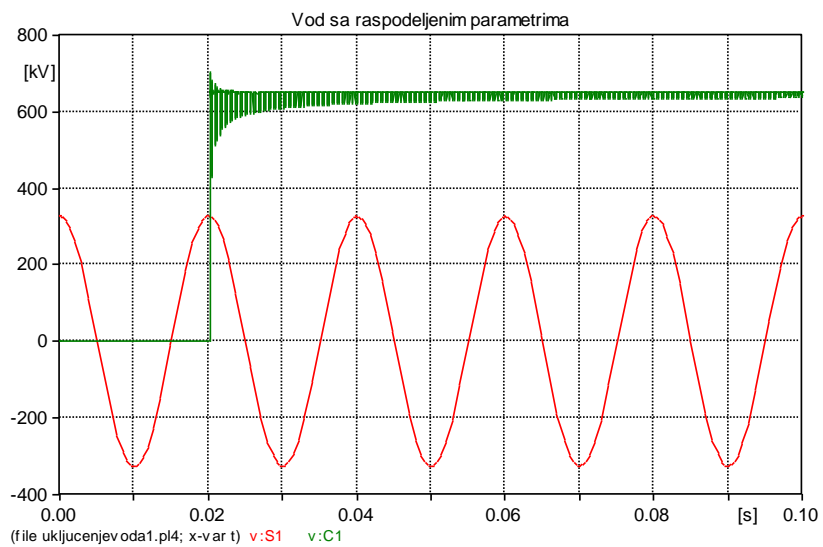
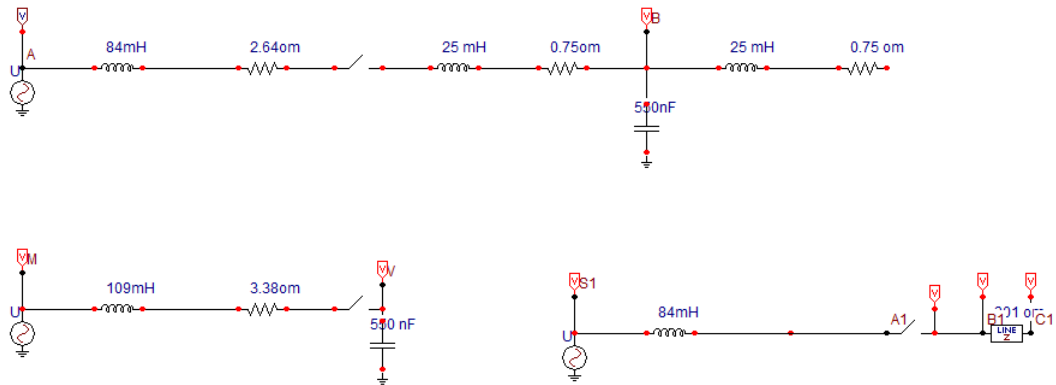
Najkritičniji trenutak je 0,22 ms, jer je napon mreže maksimalan, a napon na vodu isto maksimalan ali suprotnog polariteta. Amplituda napona na početku voda je 786,9 kV, a amplituda napona mreže je 343 kV. Tranzijentni faktor prenapona je 2,29. Amplituda napon na kraju voda je 1173,3 kV, pa je koeficijent prenapona 3,42. Ta vrednost je viša od vrednosti za početak voda, a razlog je odbijanje talasa na kraju voda i povišenje komponenti usled Ferantijevog efekta. Ovako dobijena vrednost napona je opasna jer podnosivi sklopni udarni napon izolacija je 950 kV. Ako bi otočna otpornost voda bila 10000Ω , onda bi se vod znatno brže rasteretio pa bi maksimalna vrednost napona na kraju voda bila 739,5 kV.



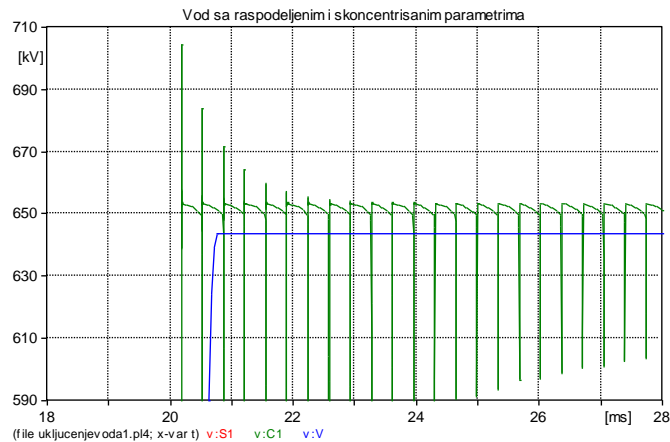
22. (Uključenje voda u praznom hodu)

Analizirati prenapone pri uključenju voda u praznom hodu, koji je bez zaostalog opterećenja. Nazivni napon mreže je 400 kV, induktivnost mreže 84 mH, a otpornost ima vrednost 10% reaktanse. Vod se prekidačem dovodi pod napon kada je trenutna vrednost napona mreže maksimalna. Podužni direktni parametri 50 km dugog dalekovoda su: 0,003 Ω /km, 1 mH/km, 11 nF/km. Karakteristična impedansa je 301 Ω , a brzina prostiranja talasa po vodu e 291,3 m/ μ s. Primeniti monofazni model voda sa koncentrisanim i sa raspedeljenim parametrima.

Rešenje uključenjevoda1



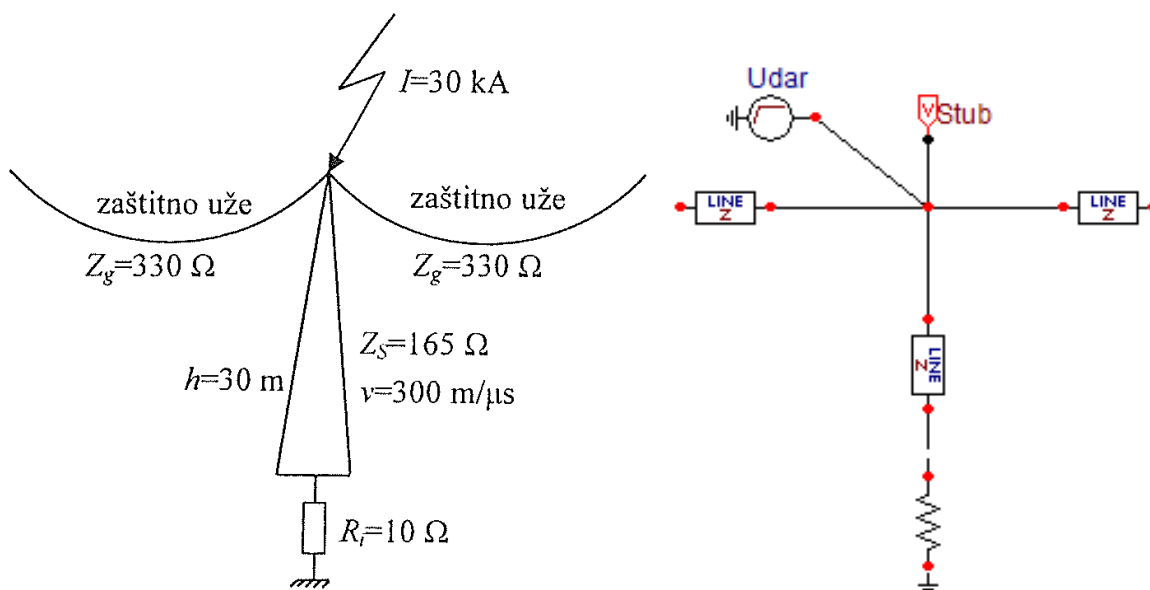
Amplituda napona na kraju voda je 676,6 kV, pa je koeficijent prenapona 2,07. Ovakav rezultat je tačniji jer se prenaponski talas prostire po vodu, dok kod skoncentrisanog voda ne postoji prelamanje i odbijanje talasa.



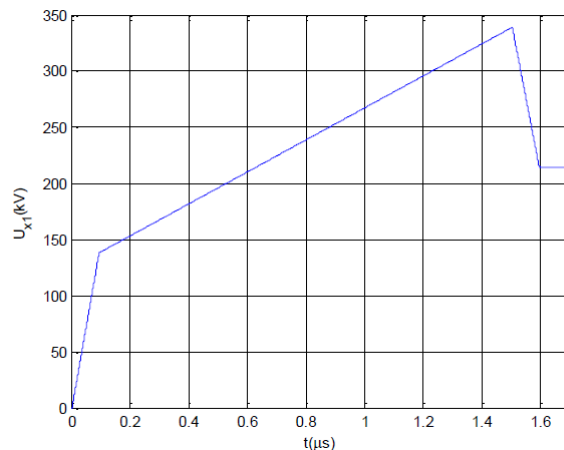
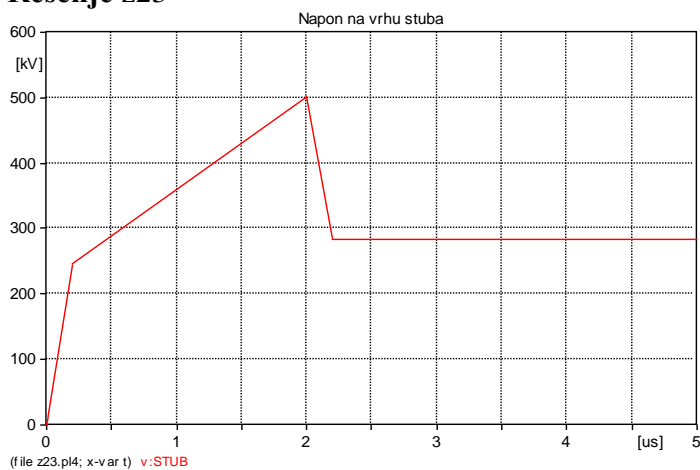
Amplituda napona na kraju voda sa skoncentrisanim parametrima je 643,8 kV, pa je koeficijent prenapona 1,97.

ATMOSFERSKA PRAŽNENJA U NADZEMNE VODOVE

23. (sličan 23. sa vežbi) Prikazati napon na vrhu čelico-rešetkastog stuba, koji nastaju pri udaru groma u vrh stuba. Struja groma je linearno- rastućeg čela i konstantnog začelja, beskonačnog trajanja. Trajanje čela je $2 \mu\text{s}$, a amplituda strujnog talasa iznosi 30 kA . Koeficijent međusobne sprege između provodnika i zastitnog užeta je $0,3$. Vod ima jedno zaštitno uže, koje se prostire na obe strane stuba. Karakteristična impedansa zaštitnog užeta je 330Ω . Stub predstaviti kratkim vodom karakteristične impedanse 165Ω , a visina stuba je 30 m . Brzina prostiranja talasa po stubu i zaštitnom užetu je $300 \text{ m}/\mu\text{s}$. Impulsna otpornost uzemljivaca iznosi 10Ω . Zanemariti uticaj faznih provodnika.

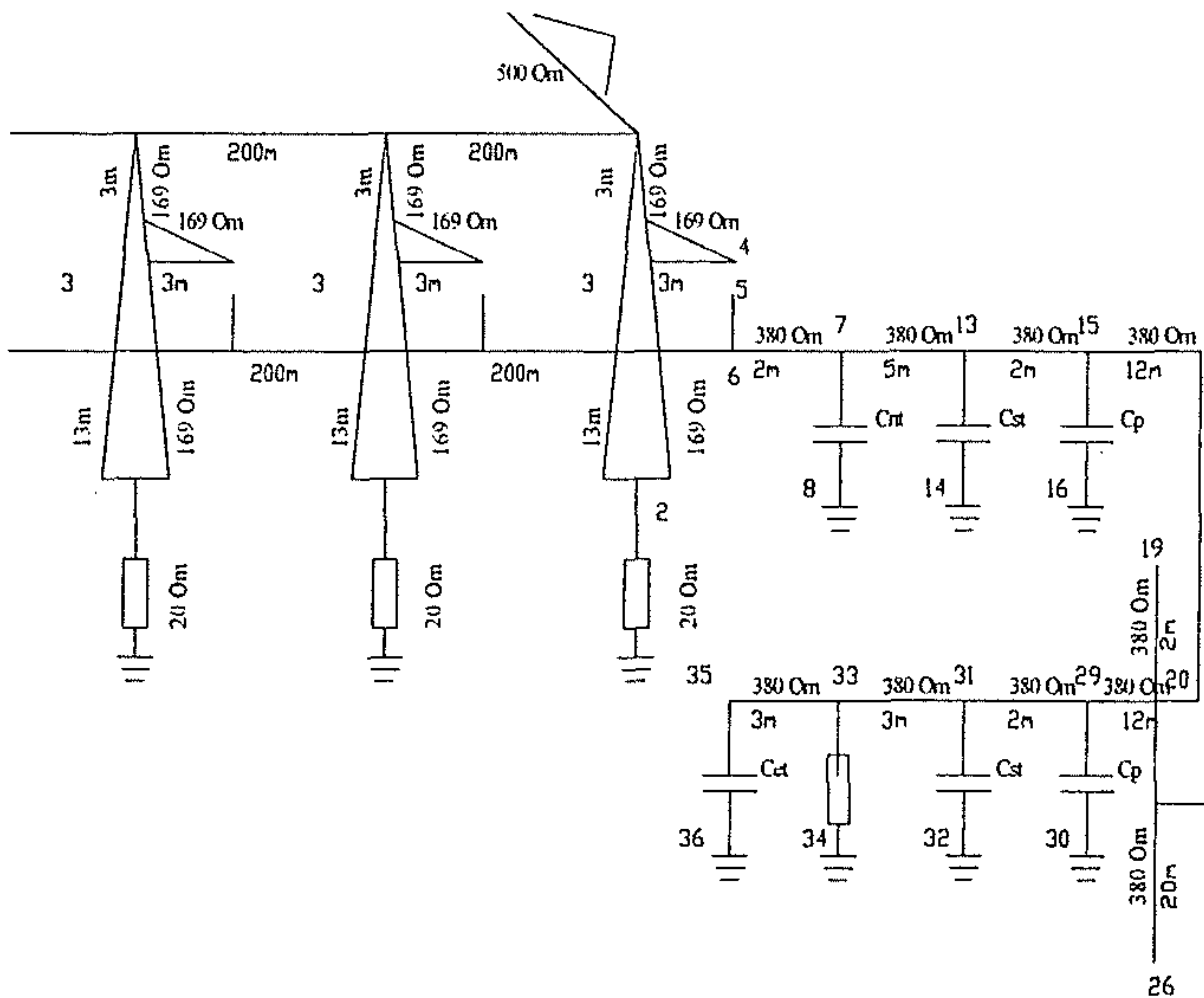


Rešenje z23



24. Na slici je prikazana zamenska šema 110 kV postrojenja. Prikazana su dva raspona (tri stuba). Šema postrojenja je, sa aspekta atmosferskih pražnjenja, najnepovoljnija moguća - usled remonta ili kvara na sabirnice su priključeni samo jedan vod i jedno transformatorsko polje. Vrednosti karakterističnih impedansi i dužine prikazani su na slici, a brzina prostiranja talasa po svim provodnicima je 300 m/ μ s. Za transformator naznačenog napona 123 kV odabran je stupanj izolacije 550 kV. To je vrednost udrnog atmosferskog podnosivog napona. Podaci o svim ostalim elementima postrojenja potrebnih za koordinaciju izolacije dati su na slici.

- Potrebno je izvršiti koordinaciju izolacije energetskog transformatora u odnosu na atmosferske prenapone, primenjujući softverski alat ATP-EMTP.
- Analizirati slučaje kada ne postoji zemljovodno uže.
- Analizirati slučajeve kada se pražnjenje dogodi na sredini raspona u zemljovodno uže i u fazni provodnik.



Rešenje:

Šema postrojenja je sa aspekta atmosferskih pražnjenja najnepovoljnija moguća – usled remonta ili kvara na sabirnice su priključeni samo jedan vod i jedno transformatorsko polje.

U proračunu će biti izračunat napon na elementima postrojenja u slučaju kada grom udara u prvi stub do stanice, jer su tada parametri amplitude i struje groma najveći. Veliki broj istraživača se složio da za amplitudu struje groma treba uzeti 121 kA, a za strminu 43 kA/μs jer je verovatnoća njihovog premašenja, prema Bergerovoj raspodeli izmerenih vrednosti, manja od 2%.

Jedini mogući postupak koordinacije izolacije za opremu sa neobnovljivom (čvrstom) izolacijom je deterministički, jer se ne sme dozvoliti nijedan proboj. Klasičan (deterministički) postupak se izvodi tako što se odabere podnosivi udarni napon celokupne opreme, koji je u ovom slučaju 550 kV. Zatim se bira odvodnik prenapona tako da ograniči napon kod energetskog transformatora na 478 kV. On je manji zbog koeficijenta sigurnosti od 1,15 koji se preporučuje usled starenja izolacije. Cilj simulacije je da utvrdi da li je najvažniji element, energetski transformator, zaštićen, odnosno da li koordinacija izolacije pravilna.

Potrebno je formirati simulacioni model. Tačnost simulacije prelaznih procesa u visokonaponskim postrojenjima usled atmosferskih pražnjenja u priključne vodove zavisi od izabrane zamenske šeme kojom se elementi postrojenja modeluju. Model za analizu atmosferskih prenapona u visokonaponskim postrojenjima obuhvata sledeće elemente:

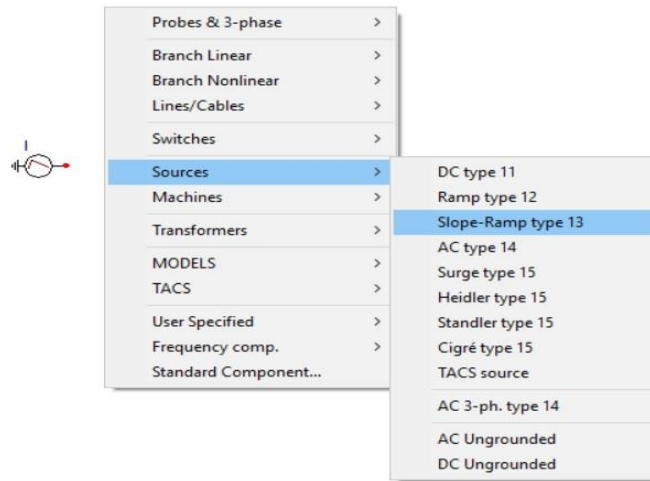
- vazdušni vod, priključen na sabirnice postrojenja, po kome nailaze prenaponski talasi.
- vod se modeluje kao monofazni sa određenim rasponima. Najčešće je dovoljno modelovati prva dva raspona ispred postrojenja. Vod se predstavlja faznim provodnicima i zaštitnom užadi ukoliko ona postoje,
- stubovi se modeluju kao kratki vodovi, sa otpornostima uzemljenja i preskočnim karakteristikama izolacije,
- rasklopna oprema, merni i energetski transformatori modeluju se samo ulaznim kapacitivnostima,
- u postrojenju je važno modelovati sve povezne vodove između elemenata, kao i spust od faznog provodnika i odvodnika prenapona i vezu odvodnika prenapona sa uzemljivačem.

Pri proračunima prenapona u elektroenergetskim sistemima atmosfersko pražnjenje se modeluje preko strujnog talasa koji nailazi po kanalu groma. Strujni talas je modelovan kao talas linearno rastućeg čela i linearno opadajućeg začelja. Budući da se radi o klasičnom metodu koordinacije izolacije, usvaja se strujni talas sledećih karakteristika:

- amplituda talasa: 121 kA,
- strmina talasa: 43,3 kA/μs,
- trajanje čela: 2,8 μs,

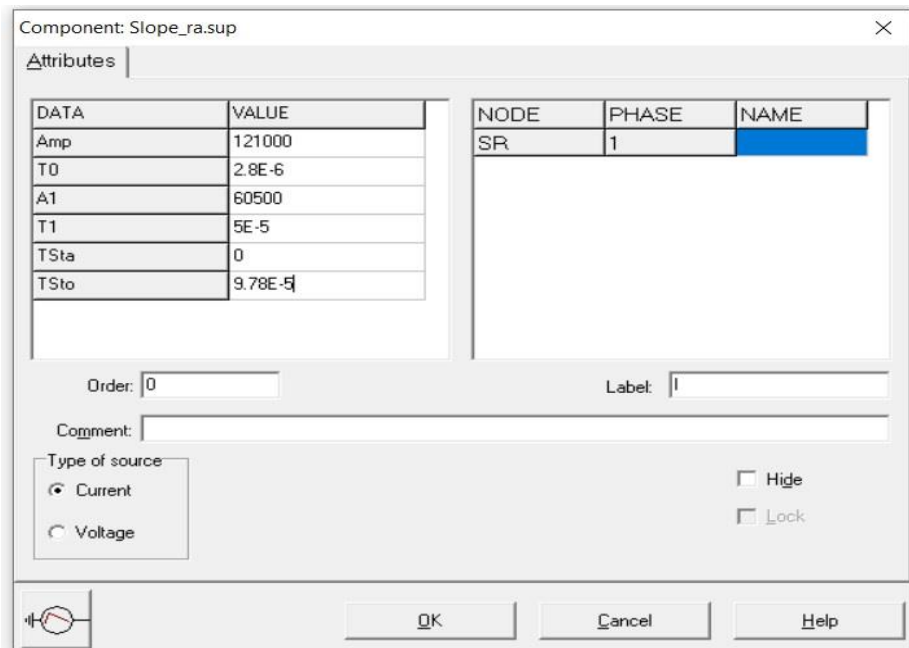
- trajanje začelja: 50 μ s.

Kanal groma se modeluje neograničeno dugačkim vodom karakteristične impedanse Z_g po kome nailazi prenaponski talas. Kako se ovde radi o strujnom talasu predstavljinom strujnim generatorom, to je karakteristična impedansa kanala groma u simulacionom modelu vezana otočno strujnom generatoru. Prosečne vrednosti karakteristične impedanse iznose 100 do 500 Ω pri velikim amplitudama struja. U ovom primeru izabrana je vredn



Izbor modela izvora atmosferskog pražnjenja

Na sledećoj slici prikazan je prozor za podešavanje parametara strujnog talasa.



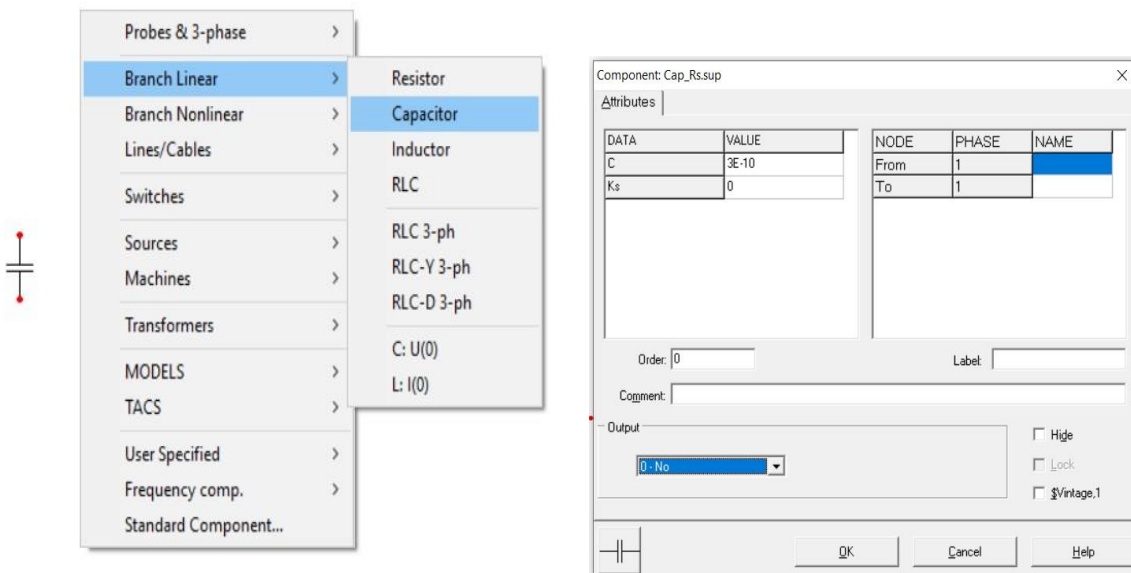
Prozor za podešavanje parametara strujnog talasa

Značenja parametara u prozoru za podešavanje:

- Amp – amplituda izvora,
- T0 – trajanje čela u sekundama,
- A1 – vrednost funkcije u amperima u trenutku T1,
- T1 – vreme u sekundama, koje definiše opadajući nagib,
- TSto – trenutak kada se aktivira izvor,
- TSto – trenutak kada izvor postaje neaktivan.

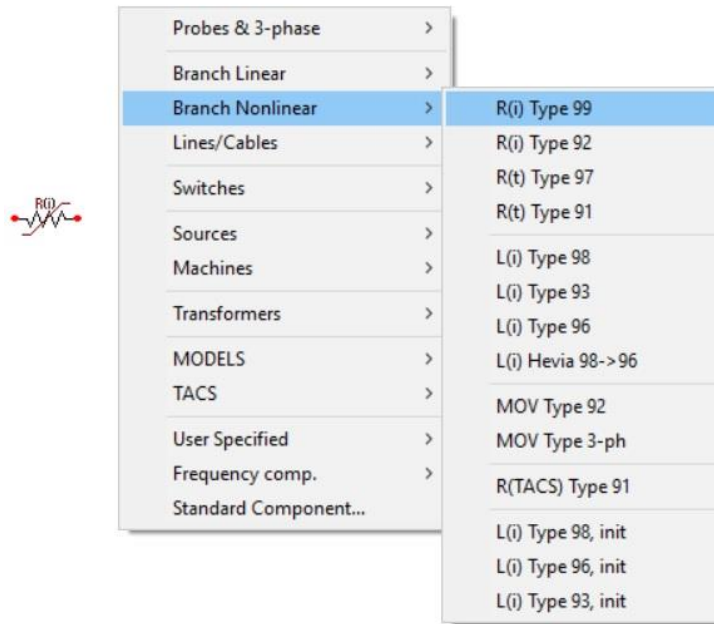
Naponski, strujni i energetska transformatori, kao i prekidači su modelovani svojim ulaznim kapacitivnostima:

- Cnt – kapacitivnost naponskog transformatora, 300 pF,
- Cst – kapacitivnost strujnog transformatora, 700 pF,
- Cet – kapacitivnost energetskog transformatora, 3 nF,
- Cp – kapacitivnost prekidača u zatvorenom položaju, 500 pF.

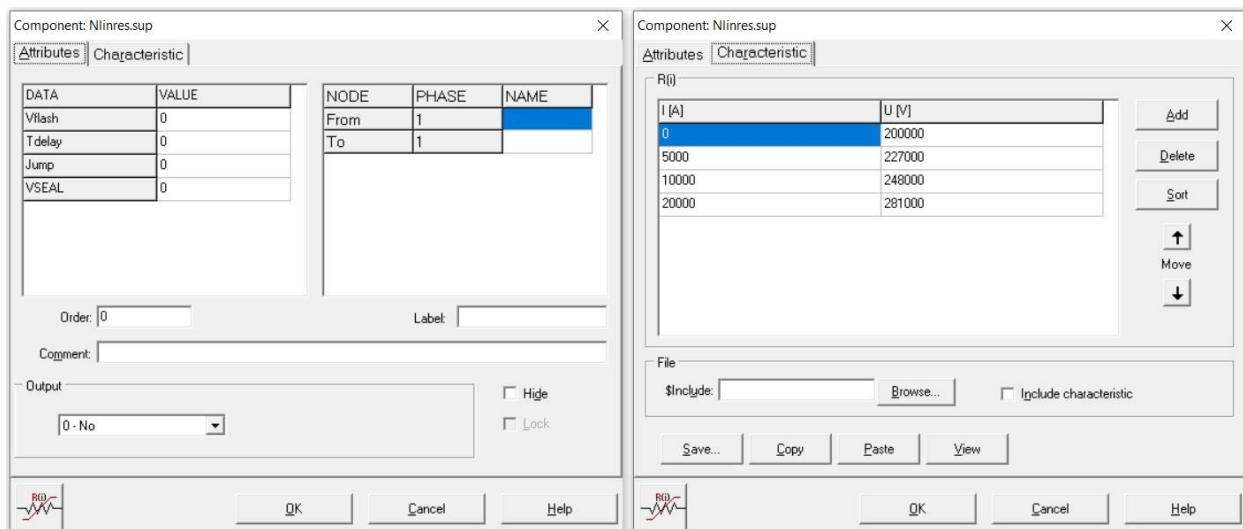


Izbor i podešavanje kapacitivnosti

Odvodnik prenapona u simulacionom modelu modelovan je pseudolinearnim otpornikom, koji ima oznaku „NLINRES – nonlinear current – dependent resistor TYPE 99“. Na slici 5.5 je prikazano kako pronaći ovaj model. Zavisnost napona od struje definisana je pravolinijskim segmentima. Kartica elemenata ima dve stranice, koje su prikazane na slici 5.6 i u koje se upisuju odgovarajući parametri.



Izbor modela odvodnika prenapona

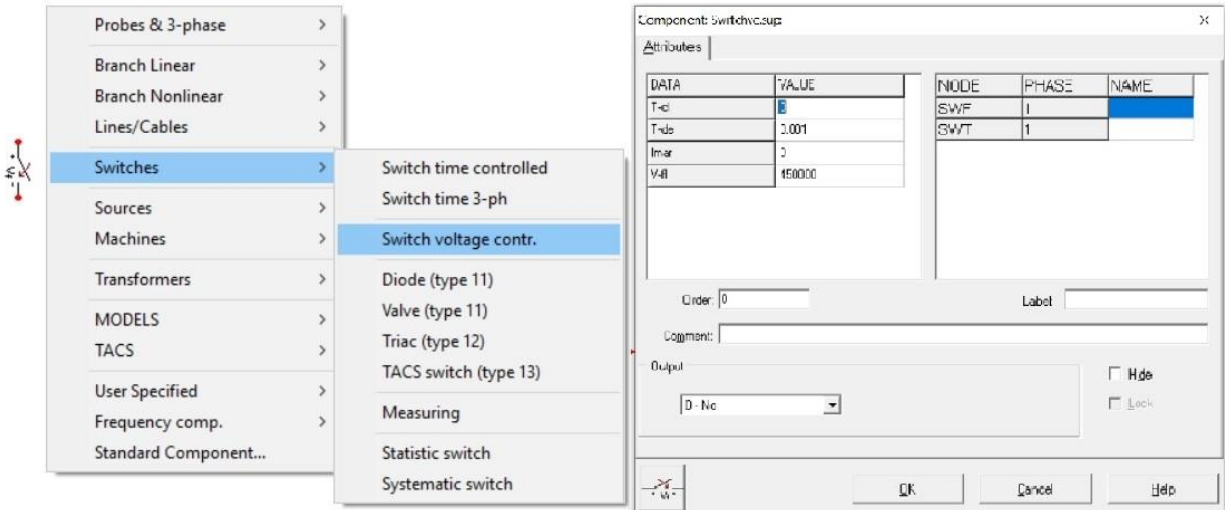


Prozor za podešavanje modela odvodnika prenapona

Parametri na kartici Attributes su sledeći:

- Vflash – preskočni napon iskrišta,
- Tdelay – minimalno vreme u sekundama u toku kojeg je iskrište kratko spojeno,
- Jump – proračun počinje na segmentu broj Jump i iznosi 0,
- VSEAL – iznosi 0.

Parametri na kartici Characteristic formiraju karakteristiku odvodnika prenapona. Izolacija je u ovom primeru modelovana na najjednostavniji način – kao naponski kontrolisan prekidač „SWITCHVC Voltage-controlled switch“ čiji su izbor i podešavanje prikazani na sledećoj slici.



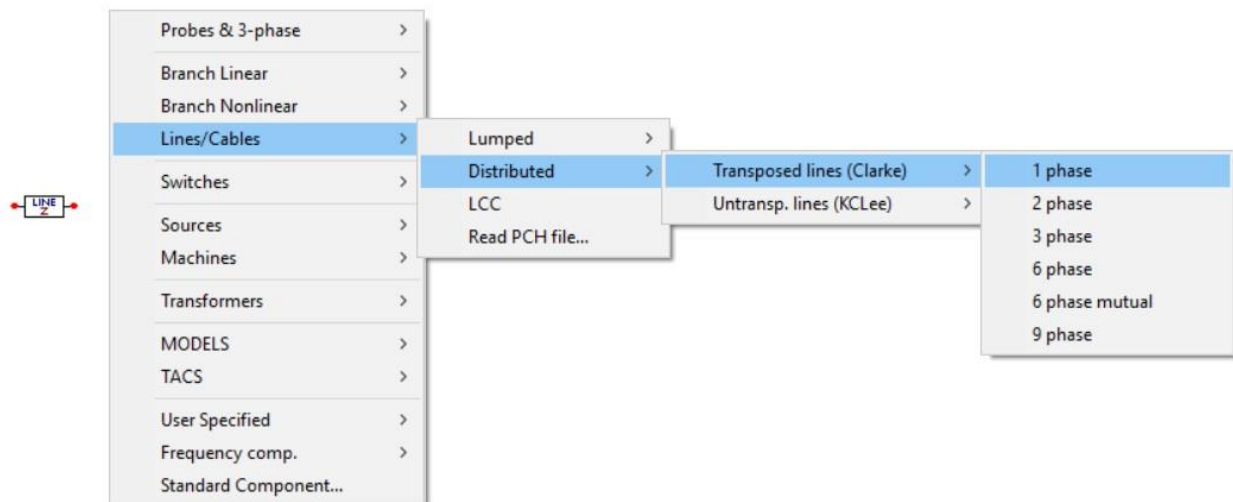
Izbor i podešavanje naponski kontrolisanog prekidača

Parametri naponski kontrolisanog prekidača su:

- T-cl – vreme u sekundama posle kojeg se prekidač zatvara, u ovom slučaju 0,
- T-de – minimalno vreme u sekundama koje prekidač ostaje zatvoren, 0,001,
- Imar – iznosi 0,
- Vflash – preskočni napon koji ovde približno iznosi 450000 V.

U stvarnosti, karakteristika izolacije je složenija jer je za kratka čela talasa preskočni napon viši.

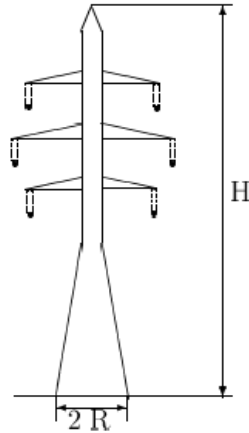
Sve sabirnice se modeluju kao monofazni vodovi sa raspodeljenim parametrima.



Izbor monofaznog voda sa raspodeljenim parametrima

Dalekovodni stubovi su modelovani kao kratki vodovi konstantne karakteristične impedanse na čijem se drugom kraju nalazi otpornost uzemljenja. Dobijanje karakteristične impedanse stuba tipa Jela sledećim izrazom:

$$Z_s = 30 \ln \left[\frac{2(H^2 + R^2)}{R^2} \right]$$



Stub tipa Jela sa oznakama dimenzija

- $H = 20,6 \text{ m}$,
- $R = 1,75 \text{ m}$,
- $Z_s = 169 \Omega$.

Sva uzemljenja stubova modelovana su kao otpornici vrednosti 20Ω .

Fazni provodnici su modelovani kao vodovi sa raspodeljenim parametrima, uz pretpostavku da je do povratnog preskoka došlo na najvišem provodniku. Fazni provodnik se modeluje karakterističnom impedansom Z_f i određenom dužinom d .

$$Z_f = 60 \ln \frac{2H_{ef}f}{R_{ekv}}$$

$$H_{ef} = H_v - \frac{2}{3}f_p$$

- H_{ef} - efektivna visina faznog provodnika iznad zemlje,
- H_v - visina vešanja provodnika na stubu,
- f_p - ugib faznog provodnika na sredini raspona,
- R_{ekv} – ekvivalentni poluprečnik snopa,
- $R_u = 0,0085 \text{ m}$,
- $H_{st} = 17,3 \text{ m}$,
- $f = 4,6 \text{ m}$,
- $H_{ef} = 14,3 \text{ m}$,
- $Z_f = 487 \Omega$.

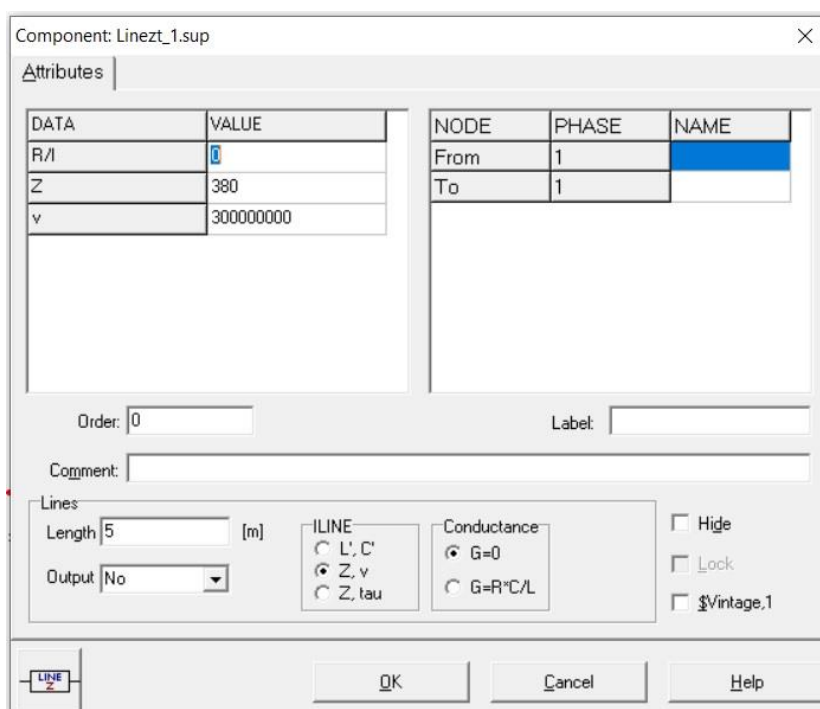
Karakteristična impedansa zaštitnog užeta se računa prema formulama:

$$Z_u = 60 \ln \frac{2H_{ef}f}{R_u}$$

Gde su:

$$H_{ef} = H_{st} - \frac{2}{3}f$$

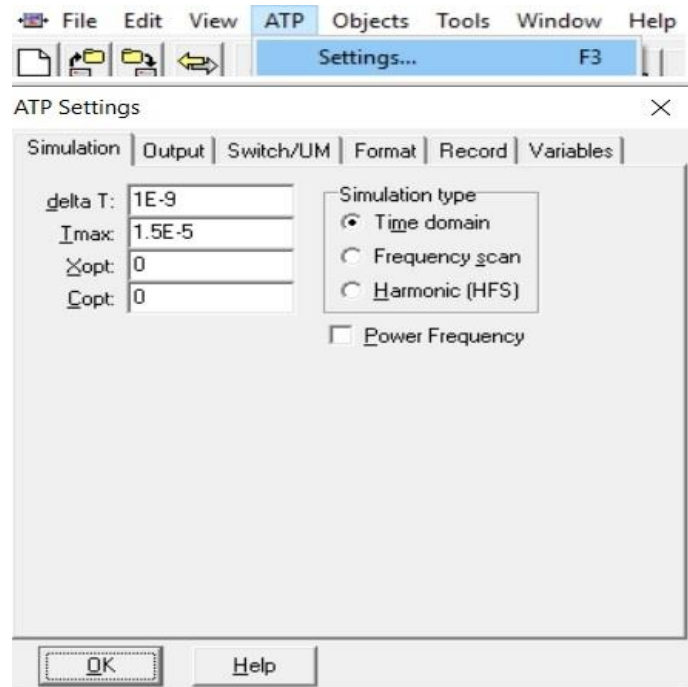
- H_{ef} - efektivna visina zaštitnog užeta iznad zemlje,
- H_{st} - visina stuba,
- f - ugib zaštitnog užeta na sredini raspona,,
- R_u – poluprečnik užeta
- $R_u = 0,0045 \text{ m}$,
- $H_{st} = 20,6 \text{ m}$,
- $f = 0,2 \text{ m}$,
- $H_{ef} = 20,46 \text{ m}$,
- $Z_u = 547 \Omega$.



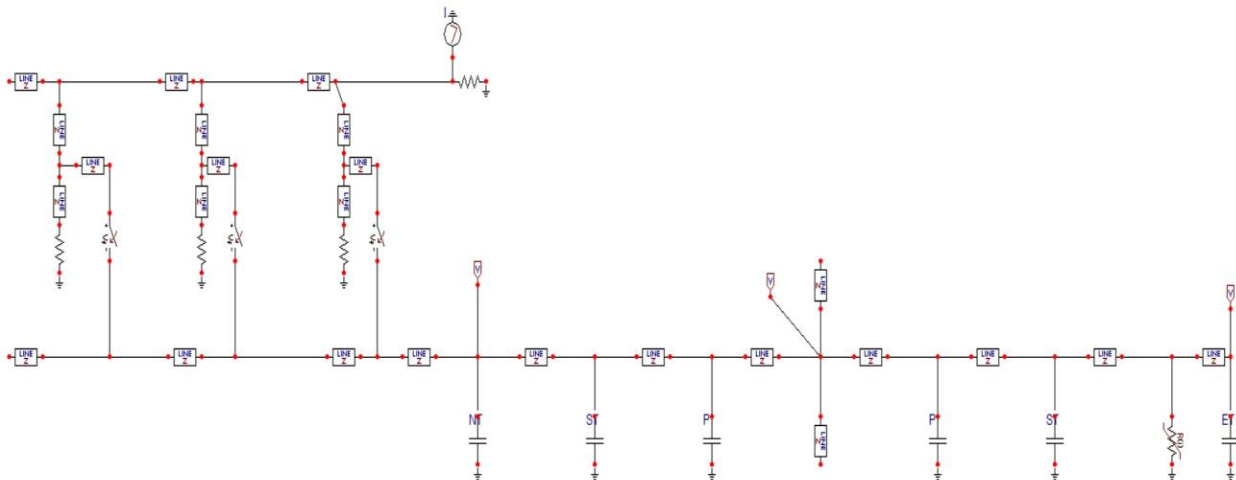
Prozor za podešavanje voda sa raspodeljenim parametrima

Podužne otpornosti svih faznih provodnika, sabirnica, kao i zaštitne užadi, jednaki su nuli.

Brzina prostiranja talasa ista je za sve elemente i približno je jednaka brzini svetlosti, odnosno 300 000 km/s. Pre izvođenja simulacija neophodno je izvršiti podešavanja vezana za vremenski korak i trajanje simulacije. Ovo podešavanje prikazano je na sledećoj slici.

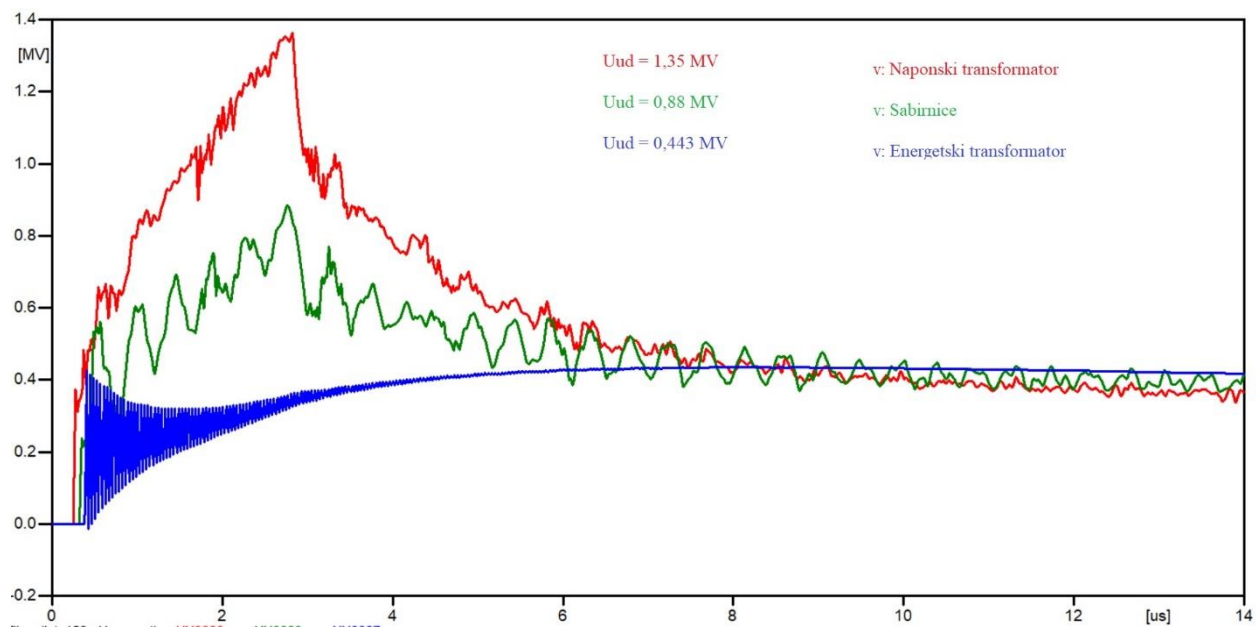


Simulacioni model prikazan je na slici ATP Settings



Simulacioni model postrojenja, definisan programom ATP/EMPT

Nakon formiranja i podešavanja simulacionog modela, sledi i pokretanje (run) simulacije. Za dobijanje grafika korišten je programski alat PlotXY. Na narednoj slici prikazani su naponi na naponskom transformatoru (čvor 7), sabirnicama (čvor 20) i energetsom transformatoru (čvor 35).



Naponske karakteristike na naponskom transformatoru, sabirnicama i energetskom transformatoru