

Dodatak N

Razvoj delila za udarne napone

N.1 Omsko delilo napona

Za merenje i registraciju udarnih napona u laboratorijama za visoki napon koriste se delila napona. U opštem slučaju delila napona se dele na sledeće tipove:

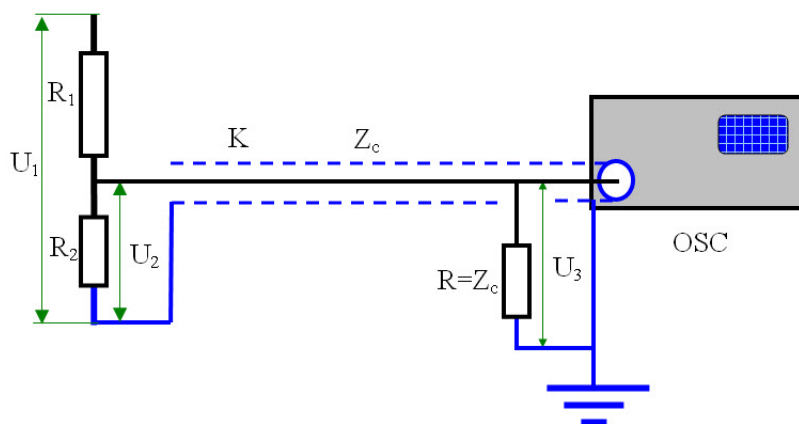
1. omska delila,
2. kapacitivna delila,
3. paralelna mešovita delila (otpornici i kondezatori u paralelnoj vezi),
4. redna mešovita delila (otpornici i kondezatori vezani na red).

Najvažniji parametar delila je odnos deljenja $m = U_1/U_2$, gde je U_1 napon na kompletnom delilu, a U_2 napon na niskonaponskoj grani. Osnovni zahtev koji treba da ispuni delilo za udarne napone je da odnos deljenja ne zavisi od oblika i frekvencije talasa, kao i od ambijentalnih uslova. Najteže je postići frekvencijsku nezavisnost odnosa deljenja za određeni opseg frekvencija. Ispitivanje kvaliteta delila vrše se određivanjem odziva delila. Odziv delila se može određivati na dva načina:

- amplitudni odziv (odziv na odskočnu funkciju napona),
- frekvencijski odziv (odziv na sinusne funkcije čija se učestanost menja u širokom opsegu).

Omska delila napona su najjednostavnija delila kod kojih se i visokonaponska (R_1) i niskonaponska grana (R_2) sastoje od čisto omskih otpora (uz zanemarljive parazitne kapacitivnosti i induktivnosti).

Jedno od najvažnijih merenja koja se sprovode korišćenjem delila napona je snimanje udarnih napona. Kao merni uređaj se najčešće koristi osciloskop koji registruje talasni oblik udarnog napona. Da bi se izvršilo merenje udarnog napona, mora se osciloskop priključiti preko koaksijalnog kabla za niskonaponsku granu delila, kao što je prikazano na slici N.1. Predpostavlja se da osciloskop ima beskonačno veliku ulaznu impedansu, mada realno ulazna otpornost osciloskopa je reda veličine $M\Omega$ i ulazna kapacitivnost reda desetak pF.



Slika N.1: Merenje udarnog napona pomoću delila i osciloskopa priključenog preko koaksijalnog kabla

U_1 napon na visokonaponskom priključku delila,

U_2 napon na izlazu iz delila (napon na niskonaponskoj strani),

U_3 napon na kraju koaksijalnog kabla na ulazu u osciloskop,

R_1 otpornost visokonaponske grane delila,

R_2 otpornost niskonaponske grane delila,

K koaksijalni kabl za prenos niskonaponskog signala do osciloskopa,

Z_c karakteristična impedansa koaksijalnog kabla,

$R = Z_c$ završni otpornik na kraju koaksijalnog kabla povezan između centralne žile i plašta, čija je otpornost jednaka karakterističnoj impedansi kabla,

OSC osciloskop koji služi kao instrumenat za registraciju napona.

Koaksijalni kabl ima centralnu žilu koja prenosi signal i metalni plašt postavljen preko izolacije centralne žile, koji služi kao povratni put za mereni signal, kao i za zaštitu

centralne žile od elektromagnetnih uticaja. Centralna žila označena je crnom punom linijom, a plašt plavom isprekidanom linijom. Plašt koaksijalnog kabla je na jednoj strani povezan sa tačkom uzemljenja delila napona. Na drugoj strani plašt koaksijalnog kabla vezan je za kućište osciloskopa.

Završni otpornik ima ulogu da spreči refleksije talasa od ulaza u osciloskop, koji se može smatrati da ima beskonačno veliku ulaznu impedansu. Završni otpornik čija je otpornost jednaka karakterističnoj impedansi kabla ponaša se kao neograničeno dugačak vod koji se nastavlja na koaksijalni kabl, a u tački priključka se ne događaju refleksije zbog identičnih karakterističnih impedansi. Na taj način se postiže potpuno izbegavanje refleksije talasa od kraja kabla. Ulazna impedansa koaksijalnog kabla merena na mestu priključka kabla na delilo napona dobija se kao odnos napona i struja na tom mestu:

$$Z_{ul} = \frac{U_2}{I_k} \quad (\text{N.1})$$

gde je I_k struja koja ulazi u koaksijalni kabl. Pošto se koaksijalni kabl zatvoren karakterističnom impedansom ponaša kao neograničeni vod, ulazna impedansa kabla jednaka je njegovoj karakterističnoj impedansi, odnosno:

$$Z_{ul} = Z_c = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (\text{N.2})$$

gde je L_1 podužni induktivitet, a C_1 podužna kapacitivnost koaksijalnog kabla. Vreme prostiranja talasa kroz kabl je:

$$\Delta t = \frac{d}{v} \quad (\text{N.3})$$

gde je d dužina kabla, a v brzina prostiranja, odnosno,

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (\text{N.4})$$

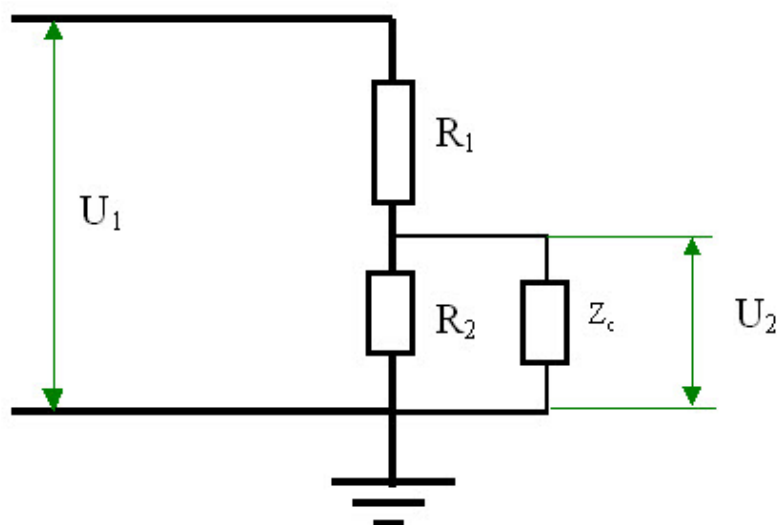
Ulazna impedansa koaksijalnog kabla koji je završen omskim otpornikom otpornosti koja je jednaka karakterističnoj impedansi kabla može se ekvivalentirati koncentrisanim omskim otpornikom čija je vrednost jednaka karakterističnoj impedansi kabla, prema Petersenovom pravilu. Na slici N.2 prikazana je šema sa ekvivalentnom otpornošću niskonaponske grane.

Odnos deljenja delila sa ekvivalentni otporom dat je izrazom:

$$m = \frac{R_1 + R_{2e}}{R_{2e}} \quad (\text{N.5})$$

gde je:

$$R_{2e} = \frac{R_2 Z_c}{R_2 + Z_c} \quad (\text{N.6})$$



Slika N.2: Zamenska šema ekvivalentnog delila kod koga je koaksijalni kabl zajedno sa završnim otpornikom zamenjen jednim skoncentrisanim omskim otporom

R_{2e} je ekvivalentna otpornost paralelne veze niskonaponske grane delila i karakteristične impedanse koaksijalnog kabla (slika N.2).

Kada se vrše merenja udarnog napona, ne smeju u mernom kolu postojati dva mesta uzemljenja. Ako se uzemlje i delilo napona i instrument, javila bi se dva povratna puta za struje, jedan kroz plašt kabla, a drugi kroz zemlju. Da bi se to izbeglo, uzemljuje se ili niskonaponska grana delila ili instrument kao na slici N.1.

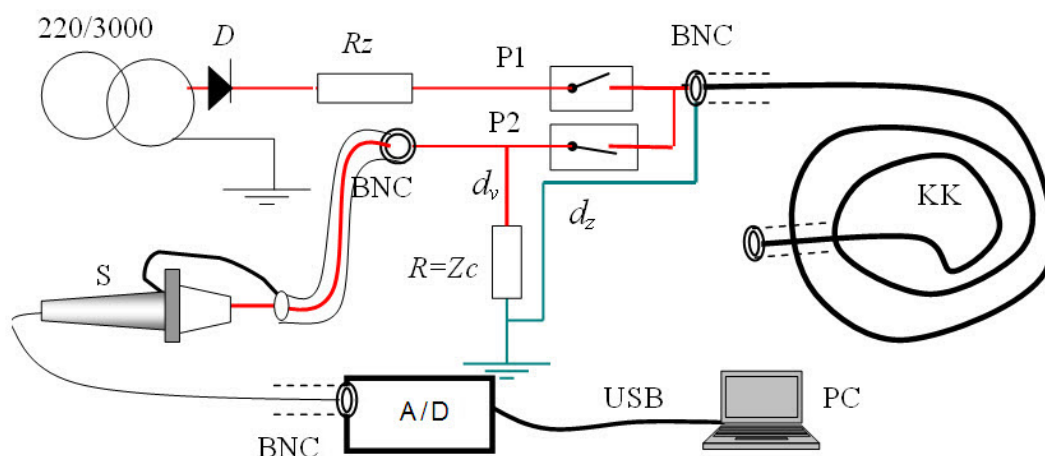
Teorijski gledano, omska delila napona bi trebalo da imaju idealne karakteristike, ali je te karakteristike teško postići kod delila za veoma visoke napone zbog postojanja parazitnih kapaciteta i induktiviteta.

Omski otpornici se mogu napraviti da budu bezinduktivni, ali se parazitne kapacitivnosti ne mogu izbeći. Kvalitet delila se određuje odzivom delila na zadatu funkciju napona. Najpogodnije je određivati odziv delila na talas pravougaonog čela. U slučaju kada treba meriti veoma visoke napone, na primer reda veličine 1 MV, delilo napona treba da ima odnos deljenja takav da napon na niskonaponskoj strani bude prihvatljiv za merni instrument. U tom slučaju i za testiranje delila treba koristiti visokonaponski pravougaoni talas.

N.2 Visokonaponski generator pravougaonih talasa

Jedan od načina generisanja visokonaponskog pravougaonog talasa je da se dugačak koaksijalni kabl otvoren na jednom kraju napuni visokim jednosmernim naponom (kao kondenzator), a da se zatim isprazni kroz otpornik koji ima otpornost brojno jednaku karakterističnoj impedansi kabla, na kome se dobija pravougaoni talas kojim se testira delilo.

Ispitivanje generatora za proizvodnju pravougaonog impulsa pomoću dugačkog koaksijalnog kabla (u daljem tekstu step generator) izvršeno je prema šemi na slici N.3. Prikazan je generator pravougaonih talasa napona oko $3 \times \sqrt{2}$ kV. Oznake na slici imaju



Slika N.3: Šema za testiranje step generatora

sledeće značenje:

230/3000 - transformator male snage odnosa preobražaja 220/3000 V,

D -dioda,

R_z -zaštitni otpornik optimalne vrednosti kao karakteristična impedansa kabla Z_k (na primer 75Ω),

P1 -prekidač sa minimalnim iskrenjem koji prvi zatvara da bi napunio koaksijalni kabl KK naponom, kao kondenzator,

KK -kotur koaksijalnog kabla,

P2 -prekidač koji zatvara kada se otvori P1 da bi se praznio koaksijalni kabl kroz otpornik čija je vrednost brojno jednaka karakterističnoj impedansi kabla,

$R = Z_c$ -otpornik čija je vrednost jednaka karakterističnoj impedansi kabla,

d_z -dužina veze između plašta kabla i priključka otpornika $R = Z_c$, koji se uzemljuje.

d_v -dužina provodnika od izlaza prekidača P2 do otpornika $R = Z_c$. Dužina d_v kao i d_z treba da budu što je moguće kraće da bi se smanjila induktivnost petlje koju čini provodnik d_z i provodnik d_v .

BNC - konektori za koaksijalne kablove,

S - visokonaponska sonda odnosa deljenja 1000:1 predviđena za udarne napone,

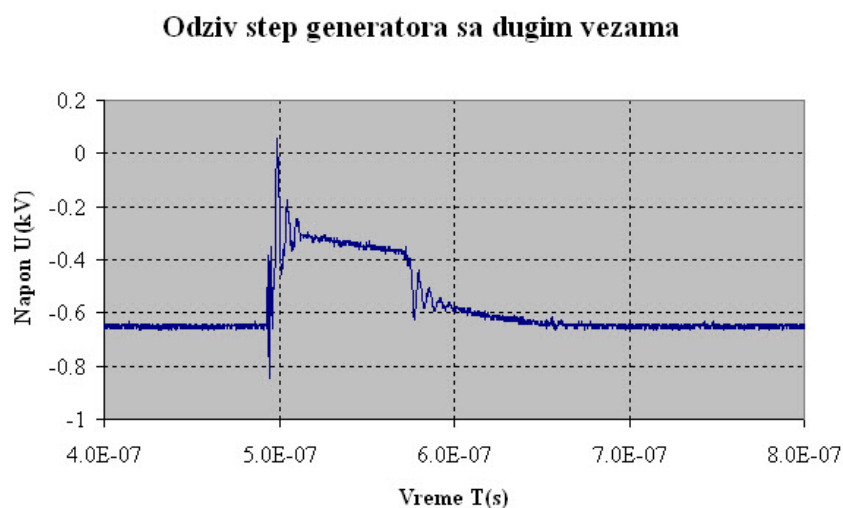
A/D - PC osciloskop kartica (A/D konvertor) sa BNC ulazom i USB izlazom za PC,

PC - laptop koji treba da bude za vreme udarnih ispitivanja odvojen od mrežnog napajanja.

N.3 Rezultati testiranja step generatora

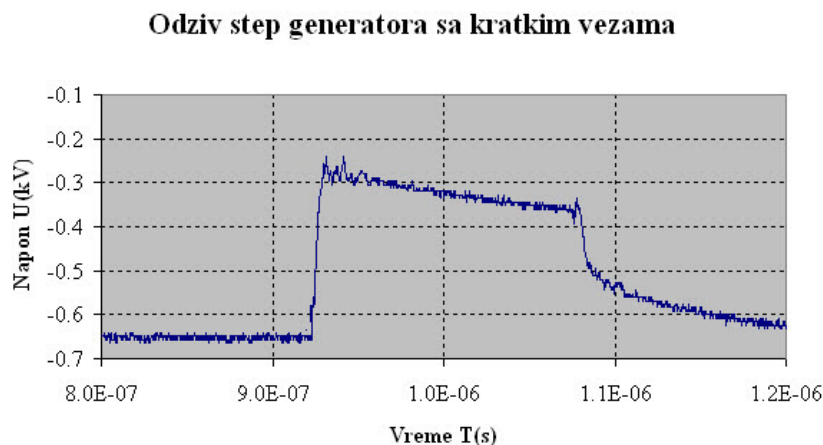
N.3.1 Testiranje bez priključenog delila

Izvršeno je testiranje step generatora sa dugačkim vezama od plašta koaksijalnog kabla do uzemljenja d_z i od prekidača P2 do otpornika $R = Z_c$ obeležen kao d_v . Step generator nije bio vezan za delilo napona. Rezultat testiranja prikazan je na slici N.4.



Slika N.4: Snimak oblika koji daje step generator sa dugačkim vezama d_z i d_v

Posle skraćivanja veza oblik dobijenog impulsa prikazan je na slici N.5.



Slika N.5: Grafik napona koji daje step generator sa kratkim vezama d_z i d_v

Može se uočiti prigušenje oscilacija usled induktivnosti veza. Zbog toga sve provodnike za vezivanje elemenata treba skratiti na minimalne vrednosti, dužina reda veličine 2 do 3 cm.

N.3.2 Testiranja step generatora sa priključenim delilom

Izvršeno je testiranje step generatora koji je vezan običnim provodnikom postavljenim na visini od oko 8 m do delila napona. Da bi se sprečile višestruke refleksije talasa na provodniku između step generatora i delila, odmah iza step generatora, a ispred provodnika za vezu sa delilom, postavljen je niz dodatnih otpornika radi utvrđivanja optimalne vrednosti otpornosti za prigušenje višestrukih refleksija. Napravljen je niz od 10 otpornika od $100\ \Omega$ koji čine R_{dod} i ispitivani su talasni oblici napona u mernim tačkama M1 na vrhu delila, M2 na niskonaponskoj strani i M3 na mernom instrumentu za različite vrednosti R_{dod} premošćavanjem nepotrebnih otpornika.

Merna mesta imaju sledeće značenje:

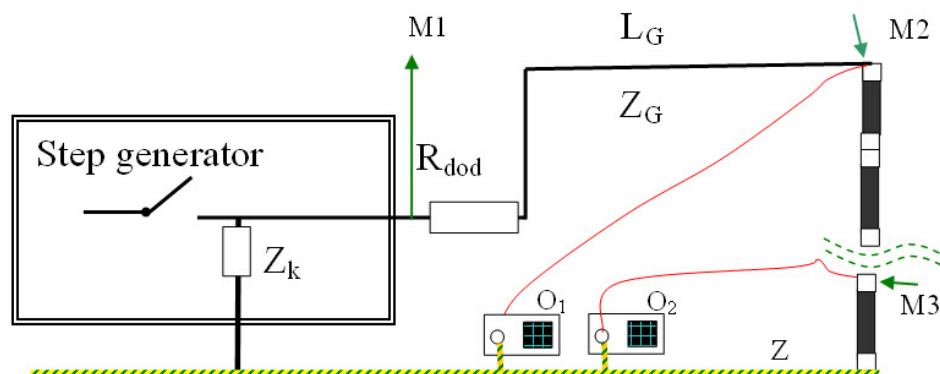
M1 - tačka neposredno iza prekidača koji uključuje rasterećenje na step generatoru,

M2 - tačka na vrhu delila,

M3 - tačka na niskonaponskoj grani delila (otpornik R2),

Z_k - otpornik koji ima vrednost karakteristične impedanse koaksijalnog kabla za generisanje pravougaoanog talasa,

Z_G - karakteristična impedansa provodnika koji spaja step-generator sa vrhom delila napona,



Slika N.6: Šema veza step generatora i delila napona sa oznakama mernih mesta

L_G - dužina provodnika koji spaja step-generator sa vrhom delila napona, koji iznosi oko 10 m,

R_{dod} - otpornik za sprečavanje refleksija,

O_1, O_2 - osciloskopi br. 1 i 2 za snimanje napona u tačkama M2 i M3,

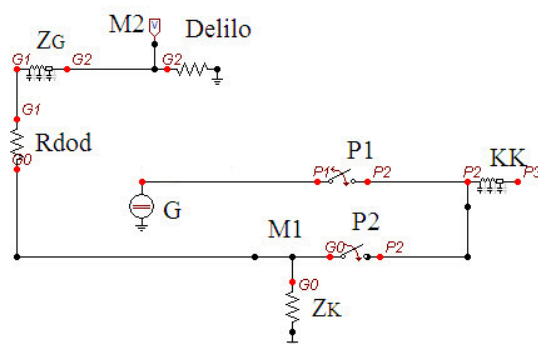
Z - zemljovod koji spaja tačku uzemljenja delila i tačku uzemljenja otpornika Z_k .

Mora se naglasiti da se snimanje napona mora raditi sa dva odvojena osciloskopa. U slučaju kada bi snimali sa dvokanalnim osciloskopom, kod snimanja visokofrekvencijskih pojava javljale bi se cirkularne struje kroz provodnike za uzemljenje i preko plašteva koaksijalnih kablova i koaksijalnih konektora kroz masu osciloskopa, što bi izazivlo dodatne smetnje u signalima.

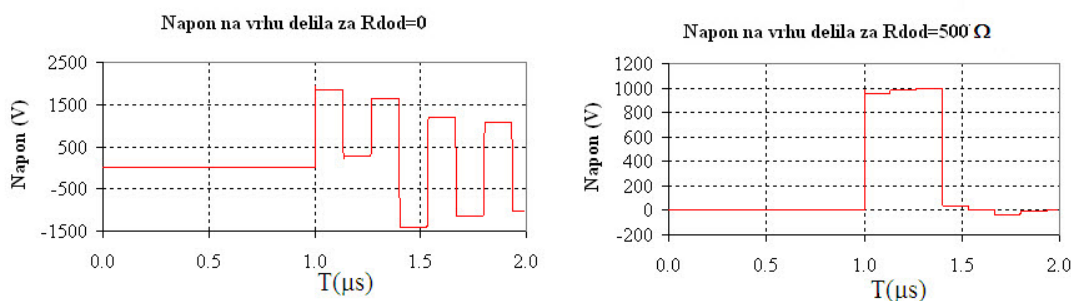
N.3.3 Numerička simulacija testiranja

Formirana je šema u programu ATPDraw za simulaciju napona na vrhu delila prilikom rasterećenja step generatora. Šema je prikazana na slici N.7. Proračuni su rađeni za vrednosti otpornosti $R_{dod} = 0$ i $R_{dod} = 500 \Omega$. Oznake imaju isto značenje kao na slici N.3 i N.6 koje prikazuju kompletnu šemu step generatora i šemu veza sa delilom.

Na slici N.8 prikazani su prelazni naponi u tački M1 na vrhu delila kada je $R_{dod} = 0 \Omega$ (levo) i kada je $R_{dod} = 500 \Omega$ (desno). Može se uočiti da kada je otpornik $R_{dod} = 0 \Omega$ nastaju veoma izražene oscilacije napona na vrhu delila. U realnosti se oštri uglovi pravougaonih talasa prigušuju i naponski talasi dobijaju zaobljen oblik, što je posledica skin efekta i nije uključeno u program. Naprotiv, kada je $R_{dod} = 500 \Omega$ oscilacije potpuno nestaju i dobija se skoro idealan pravougaoni talas amplitude koja je jednaka amplitudi napona punjenja generatora.



Slika N.7: Zamenska šema u ATPDraw za testiranje uticaja otpornika za sprečavanje refleksije talas



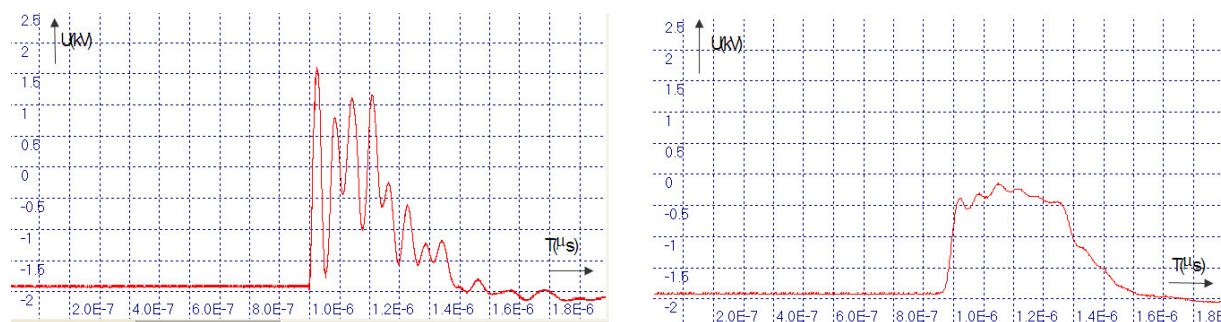
Slika N.8: Izračunat naponi u tački M2 na vrhu delika kada je $R_{dod} = 0 \Omega$ (levo) i kada je $R_{dod} = 500 \Omega$ (desno)

N.3.4 Eksperimentalna određivanje dodatnog otpornika

Izvršena su merenja napona na vrhu delila bez R_{dod} i sa eksperimentalno određenom optimalnom vrednošću prigušnog otpornika $R_{dod} = 500 \Omega$.

Na slici N.9 prikazan je napon na vrhu delila kada je $R_{dod} = 0$ (levo) i kada je $R_{dod} = 500 \Omega$. Mogu se uočiti značajne oscilacije kada je dodatni otpornik $R_{dod} = 0$, koje se gotovo u potpunosti prigušuju kada je $R_{dod} = 500 \Omega$.

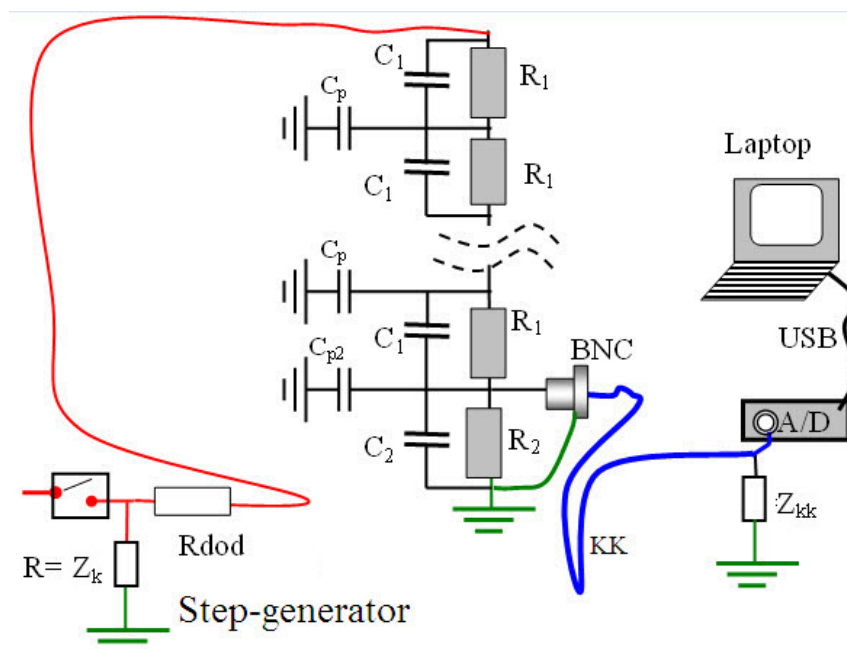
Do razlika u obliku izračunatih i izmerenih talasnih oblika napona dolazi zbog toga što je delilo napona modelovano kao otpornik otpornosti $R_{del} = 16 \times 4000 \Omega = 64000 \Omega$, a zanemareni su parazitne kapacitivnosti. Pokazuje se da parazitne kapacitivnosti imaju veoma važan uticaj na odziv delila.



Slika N.9: Izmeren napon na vrhu delila u tački M2 bez dodatnog otpornika (levo) i sa otpornikom $R_{dod} = 500 \Omega$ (desno)

N.4 Detaljna šema delila napona

Omsko delilo napona zbog svojih parazitnih kapacitivnosti prema zemlji i rednih kapacitivnosti između priključaka otpornika ima složenu ekvivalentnu šemu. Na slici N.10 prikazana je šema za određivanje odziva delila kada je uzeta u obzir složena struktura ekvivalentne šeme.



Slika N.10: Šema za određivanje odziva delila kada se uzimaju u obzir parazitne kapacitivnosti prema zemlji i redne kapacitivnosti između priključaka otpornika

Oznake na slici imaju sledeće značenje

C_1 -kapacitivnost jednog otpornika visokonaponske grane delila,

R_1 -otpornost jednog otpornika visokonaponske grane delila,

C_p -parazitna kapacitivnost jednog otpornika visokonaponske grane delila, koja se menja sa visinom postavljanja otpornika,

R_2 -otpornost niskonaponske grane delila,

C_2 -kapacitivnost niskonaponske grane delila,

BNC -priključak koaksijalnog kabla za mereje napona na niskonaponskoj grani delila otpornosti R_2 ,

Z_k -završni otpornik koaksijalnog kabla za generisaje pravougaonog talasa, koji služi za sprečavanje refleksija, čija je otpornost jednaka karakterističnoj impedansi kabla za generisanje pravougaonog talasa.

Z_{kk} -završni otpornik koaksijalnog kabla prema osiloskopu, za sprečavanje refleksija od kraja kabla, čija je otpornost jednaka karakterističnoj impedansi kabla KK.

Ostale oznake su ranije objašnjene.

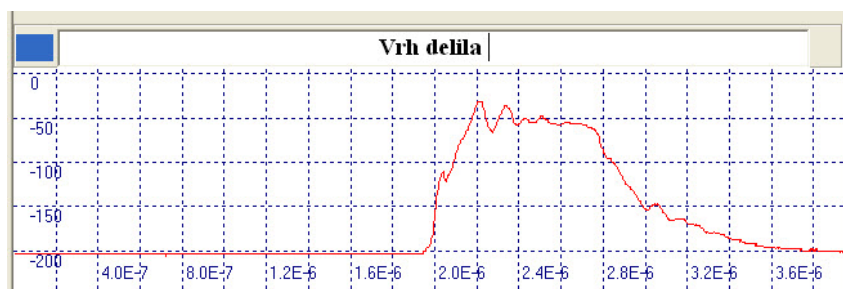
N.5 Odziv meren duž omskog delila

Izvršeno je merenje odziva delila direktno pomoću sonde 1:10 od vrha delila, na 8. etaži, 4. etaži i na 1. etaži (niskonaponska grana). Ustanovljeno je da se na niskonaponskoj grani dobijaju neodgovarajući odzivi, a oblik odziva se kvario sa približavanjem niskonaponskoj grani.

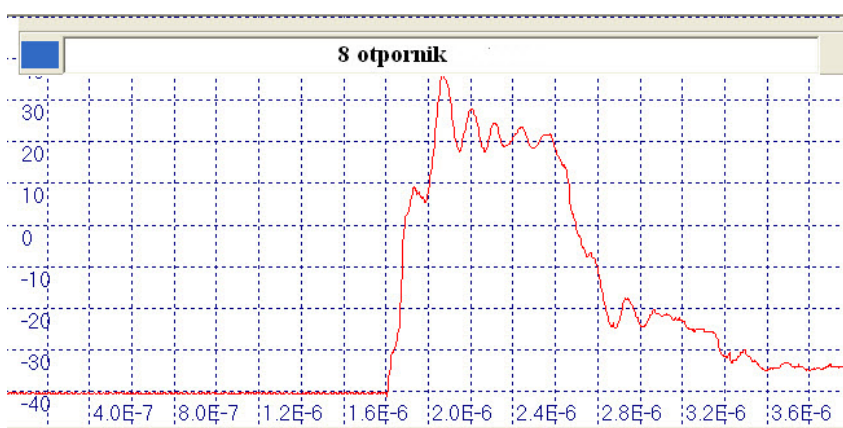
Može se uočiti da se pojavljuju dodatne oscilacije približavanjem niskonaponskoj grani delila. Ustanovljeno je da se oscilacije mogu značajno smanjiti skraćivanjem veza za uzemljenje i za merenje. Što se merenje napona vrši bliže niskonaponskoj grani, oscilacije u odzivu delila postaju izraženije. To se tumači postojanjem parazitnih kapaciteta prema zemlji, koji remete zahtevanu linearnu raspodelu napona po otpornicima od vrha delila do zemlje.

N.6 Mešovito delilo napona

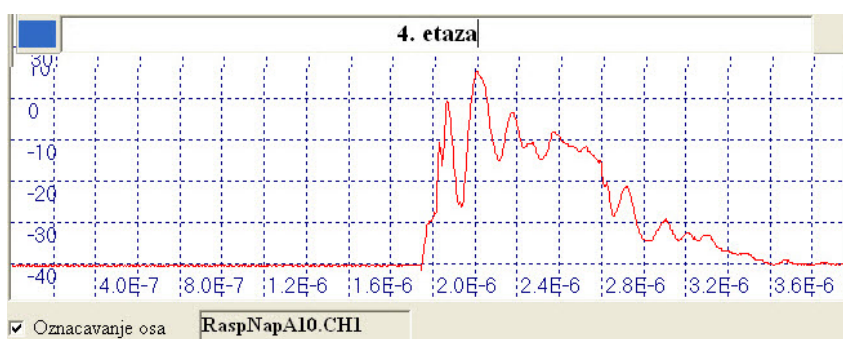
Da bi se kompenzovale parazitne kapacitivnosti otpornika prema zemlji, postavljaju se kondenzatori paralelni otpornicima, koji svojim kapacitetom dominiraju i određuju linearnu raspodelu napona od vrha delila do zemlje. Pravljena su eksperimentalna istraživanja



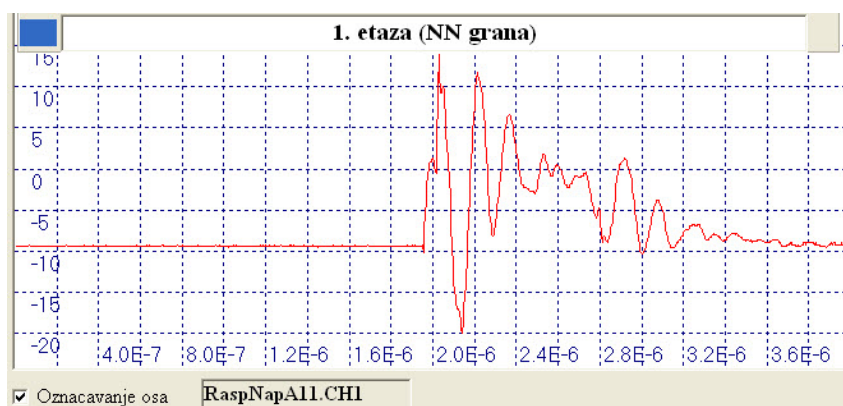
Slika N.11: Ulazni napon na vrhu delila



Slika N.12: Odziv na 8. etaži delila



Slika N.13: Odziv na 4. etaži delila



Slika N.14: Odziv na NN grani delila delila

naponskog odziva na kraju koaksijalnog kabla koji je priključen na niskonaponsku granu delila za dva slučaja:

- slučaj kada je na kraju koaksijalnog kabla priključen prilagodni otpornik prema zemlji, čija je otpornost jednaka karakterističnoj impedansi kabla,
- slučaj kada je redno ispred koaksijalnog kabla priključen prilagodni otpornik, čija je otpornost jednaka karakterističnoj impedansi kabla.

Korišćeni su specijalni bezinduktivni kondenzatori paralelno sa svakim otpornikom. Na slici N.15 prikazana je fotografija bezinduktivnog keramičkog kondenzatora.



Slika N.15: Fotografija bezinduktivnog keramičkog kondenzatora

N.6.1 Koaksijalni kabl završen prilagodnim otpornikom ispred mernog instrumenta

Na slici N.16 prikazana je šema merenja odziva preko koaksijalnog kabla koji je završen prilagodnim otpornikom prema zemlji, ispred osciloskopa, čija je otpornost jednaka karakterističnoj impedansi kabla.

Oznake na slici N.16 imaju sledeće značenje:

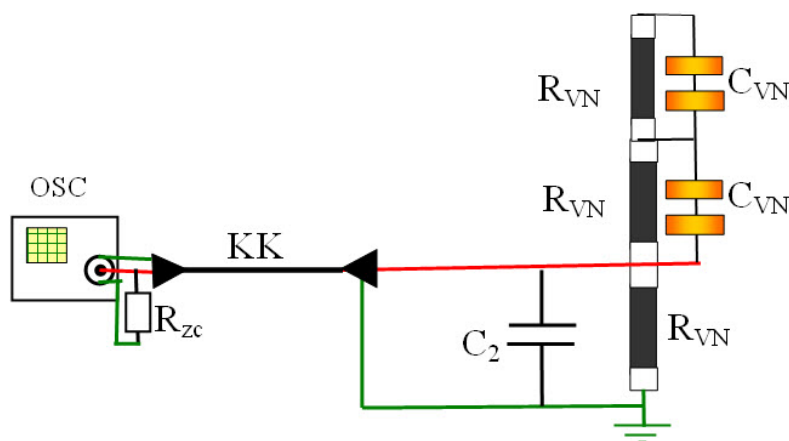
OSC -Osciloskop,

KK - koaksijalni kabl karakteristične impedanse 50Ω ,

R_{VN} -otpornik visokonaponske grane delila,

C_{VN} -kondenzator paralelan otporniku visokonaponske grane delila.

C_2 -kondenzator niskonaponske grane delila



Slika N.16: Veza sa osciloskopom preko koaksijalnog kabla koji je završen prilagodnim otpornikom prema zemlji

R_{zc} -prilagodni otpornik za sprečavanje refleksija koji je u isto vreme otpornik niskonaponske grane delila (postavljen paralelno sa $R_{VN} \gg R_{zc}$). R_{VN} u niskonaponskoj grani je nepotreban, ali je u konkretnom slučaju iz konstruktivnih razloga bilo povoljno da postoji taj otpornik.

Osnovni uslov koji treba da bude ispunjen kod mešovitih delila je da vremenska konstanta visokonaponske i niskonaponske grane budu međusobno jednake, odnosno:

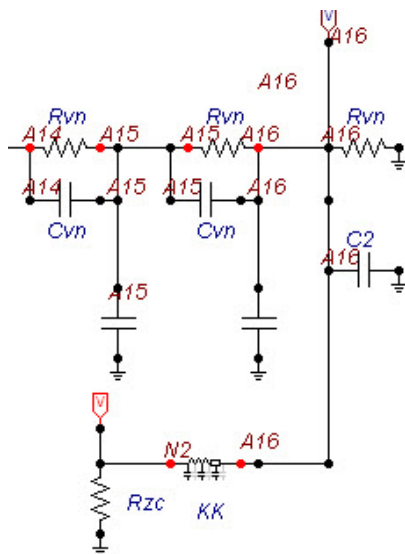
$$R_1 C_1 = R_{2e} C_2 \quad (\text{N.7})$$

R_1 i C_1 su ukupna otpornost i kapacitivnost visokonaponske grane, a R_{2e} i C_2 su ekvivalentna otpornost otpornika R_{VN} paralelno sa završnim otpornikom R_{zc} i kapacitivnost niskonaponske grane delila. Ukoliko se visokonaponska grana sastoji od n identičnih elementarnih delova, sa otpornicima vrednosti R_1/n i kondenzatorima $C_1 \times n$ tada je ispunjen uslov N.7 za kompletnu visokonaponsku granu i za svaki elementarni deo visokonaponske grane. Parametri delila za ovaj slučaj su dati u tabeli N.1.

Tabela N.1: Parametri mešovitog delila

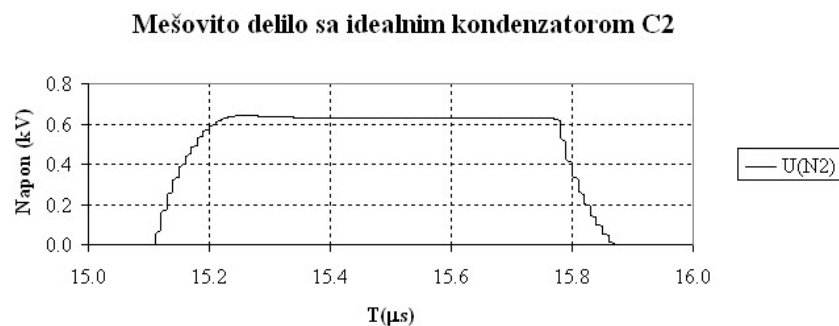
Parametri visokonaponskih etaža		
Kapacitet pojedinačne etaže	C_1 (F)	$2.4 \cdot 10^{-9}$
Otpornost pojedinačne etaže	R_1 (Ω)	4000
Broj etaža	n	16
Parametri niskonaponske grane		
Kapacitet NN grane	C_2 (F)	$0.194 \cdot 10^{-6}$
Otpornost prilagodnog otpornika	R_{zc} (Ω)	50
Otpornost NN grane	R_2 (Ω)	4000
Ekvivalentna otpornost NN grane	$R_{2e} = R_2 R_{zc}$ (Ω)	49.38

Na slici N.17 prikazan je deo ekranskog prikaza šeme za niskonaponsku granu delila, za proračun odziva korišćenjem EMTP-atp programa.



Slika N.17: Deo ekranskog prikaza šeme za niskonaponsku granu delila

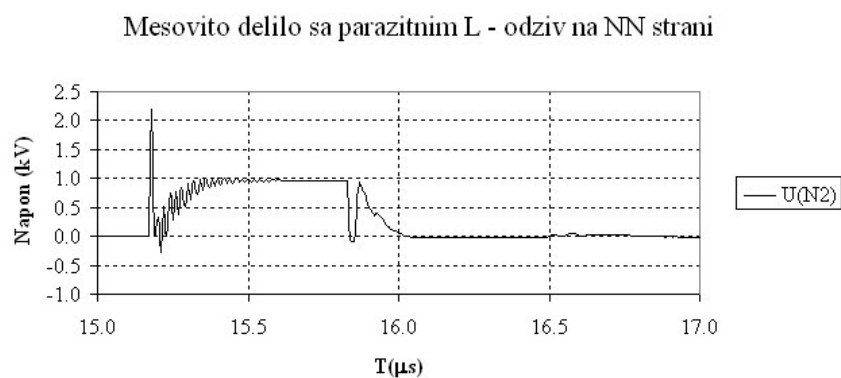
Na slici N.18 prikazan je izračunat talasni oblik na kraju koaksijalnog kabla, kada je predpostavljeno da kondenzator C_2 bezinduktivan.



Slika N.18: Napon na kraju koaksijalnog kabla (tačka N2) kada je kondenzator C_2 bezinduktivni

Naponski odnos deljenja izračunat za ovaj slučaj na osnovu odnosa napona je $U(2)/U(1) = 1 : 1033$.

Proračun je ponovljen za slučaj da kondenzator C_2 ima usvojenu parazitnu induktivnost $L_c = 0.01 \mu\text{H}$. Rezultati su prikazani na slici N.19. Ispitivanjem osetljivosti je utvrđeno da induktivitet otpornika R_{zc} nema bitan uticaj na odziv. Na tržištu nije bilo moguće naći bezinduktivne kondenzatore kapacitivnosti reda $0.1 \mu\text{F}$.

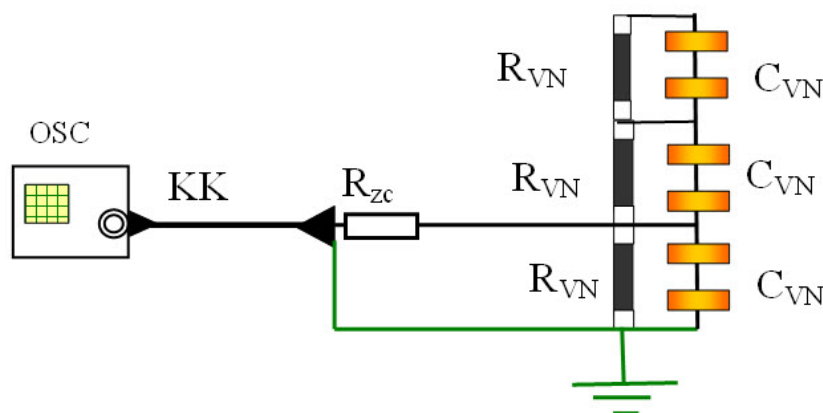


Slika N.19: Rezultati proračuna odziva kada kondenzator C_2 u niskonaponskoj grani ima parazitni induktivitet

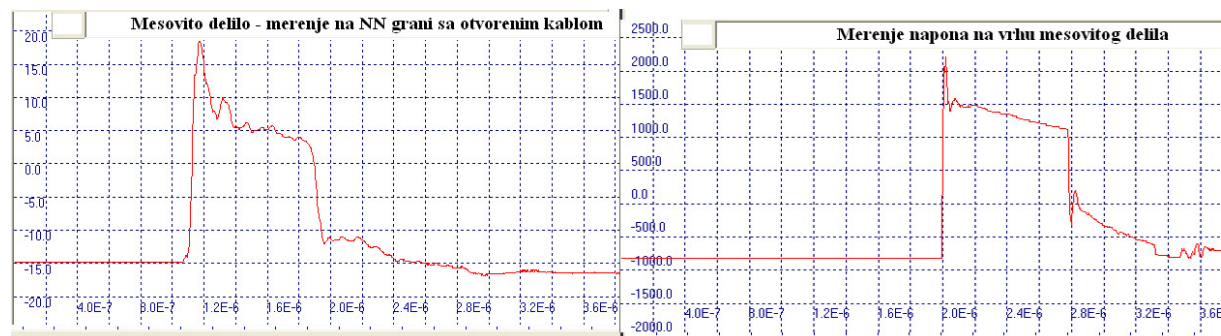
Može se uočiti da su pri vrlo malim parazitnim induktivitetima u kondenzatoru C_2 izražene smetnje u odzivu delila. Pošto postoje teškoće u nabavci kondenzatora C_2 velikog kapaciteta (reda veličine $0.1 \mu\text{F}$), ova konstrukcija delila je odbačena.

N.6.2 Delilo sa otvorenim kablom na mernom kraju

Pokazalo se da je mešovito delilo napona paralelnog tipa zatvoreno prilagodnim otpornikom jednakim karakterističnoj impedansi koaksijalnog kabla, jako osetljivo na parazitne induktivnosti kondenzatora u niskonaponskoj grani delila. Zbog toga je ispitan slučaj kada je niskonaponska grana delila identična sa jednom od 16 visokonaponskih grana, sa bezinduktivnim kondenzatorima. Signal sa niskonaponske grane, preko prilagodnog otpornika R_{zc} vodi se do osciloskopa preko koaksijalnog kabla, bez završne impedanse na kraju. Otpornik R_{zc} ima otpornost koja je jednaka karakterističnoj impedansi kabla. Šema sistema je prikazana na slici N.20. Odziv delila na niskom naponu je prikazan na slici N.21 sa leve strane. Sa desne strane je prikazan ulazni napon na visokonaponskoj strani delila.



Slika N.20: Mešovito delilo napona sa niskonaponskom granom identičnom visokonaponskoj grani i rednim prilagodnim otpornikom



Slika N.21: Odziv delila merenog na niskom naponu preko dugačkog kabla koji je na drugom kraju bez završne impedanse (levo), i napon na vrhu delila (desno)

Izmereni odziv ima jako previšenje na početku talasa, ali i originalni signal na vrhu delila ima takođe previšenje. Redno vezani otpornik R_{zc} jednak je karakterističnoj impedansi kabla. U slučaju visokofrekventnih signala, kao što su atmosferski udarni naponi,

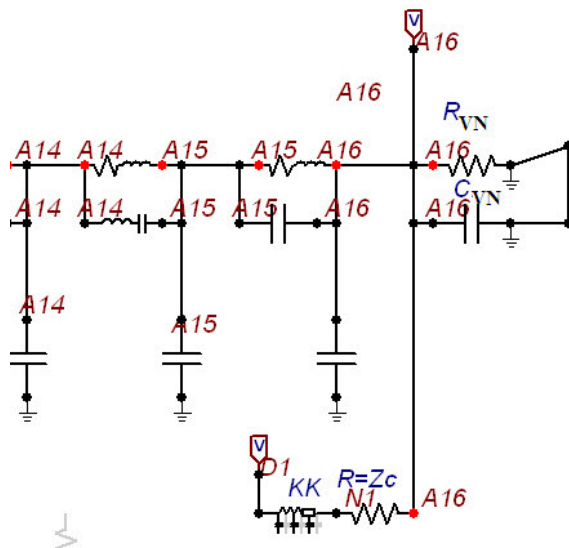
kada se visokofrekventni signal reflektuje od kraja kabla, vraća se prema otporniku R_{zc} koji se ponaša kao da je na strani delila uzemljen, jer je vezan za kondenzator velikog kapaciteta C_{VN} u niskonaponskoj grani delila. Ovaj efekat je moguć samo za koaksijalne kablove relativno male dužine. Registrovano trajanje čela talasa na vrhu delila nije bilo moguće izmeriti, pa je usvojeno $T_v = 0$ s, a trajanje čela izmerenog na niskonaponskoj grani je $T_m = 33.8$ ns.

Problem ovakve konstrukcije delila je što napon nije dovoljno umanjen. Odnos deljenja ovoga delila je 1:16, što bi značilo da za ulazni signal od 1600 kV izlazni signal bi bio oko 100 kV.

N.6.3 Numeričko modelovanje odziva mešovitog delila za različite dužine koaksijalnog kabla

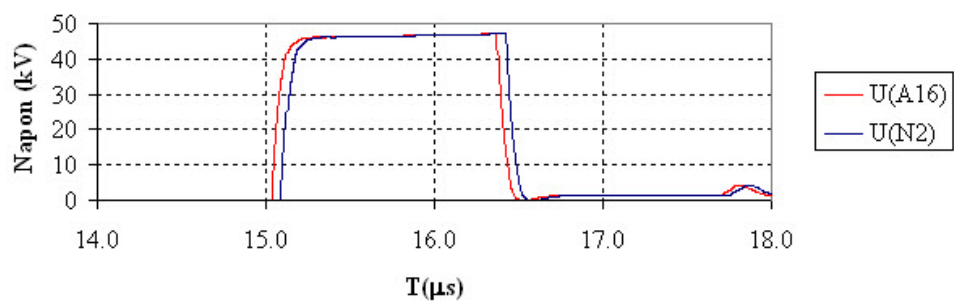
Ustanovljeno je da pri korišćenju kratkih kablova redni otpornik može da priguši refleksija, kada je u pitanju mešovito delilo sa kondenzatorima velikog kapaciteta u NN grani delila.

Na slici N.22 prikazana je niženaponska grana delila sa parametrima identičnim kao što su parametri jedne etaže visokonaponske grane delila, tj $R_{VN} = 4000\Omega$ i $C_{VN} = 2.8 \text{ nF}$

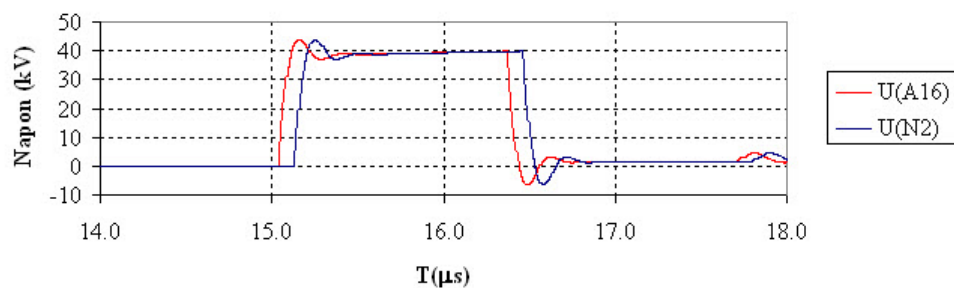


Slika N.22: Zamenska šema donjeg dela delila sa niskonaponskom granom jednakoj visokonaponskoj

Dužina koaksijalnog kabla je varirana da bi se ustanovio odziv u tački A16 i na kraju koaksijalnog kabla kod osciloskopa. Redna otpornost R_{zc} ima vrednost 50Ω isto kao karakteristična impedansa kabla. Na slikama N.23, N.24 i N.25 prikazani su odzivi za koaksijalni kabl 8 m, 14 m i 25 m.

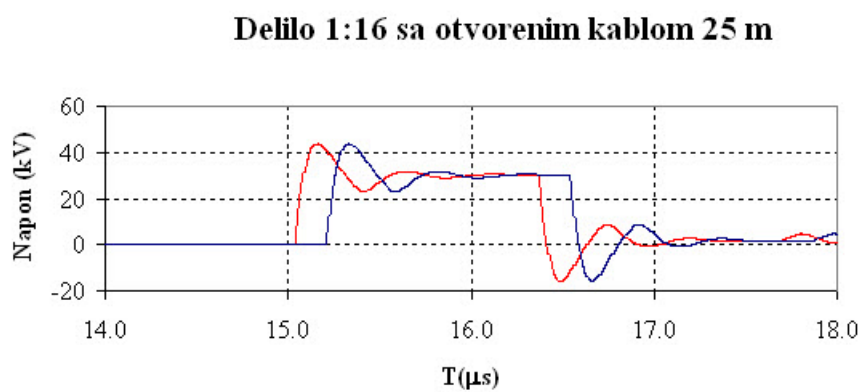
Delilo 1:16 sa otvorenim kablom 8 m

Slika N.23: Talasni oblik napona u tački A16 i na kraju kabla u tački N2 za dužinu kabla 8 m

Delilo 1:16 sa otvorenim kablom 14 m

Slika N.24: Talasni oblik napona u tački A16 i na kraju kabla u tački N2 za dužinu kabla 14 m

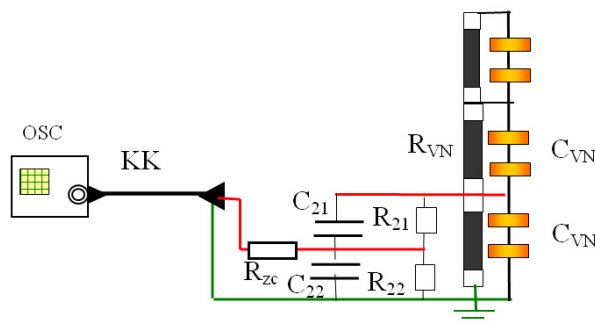
Uočeno je da za kablove kraće do 8 m ne postoji uticaj reflektovanih talasa i nema premašjenja na čelu. Što su duži kablovi, premašenje je veće, kao i oscilacije iza završetka talasa.



Slika N.25: Talasni oblik napona u tački A16 i na kraju kabla u tački N2 za dužinu kabla 25 m

N.7 Uvođenje dodatnog delila u NN granu delila

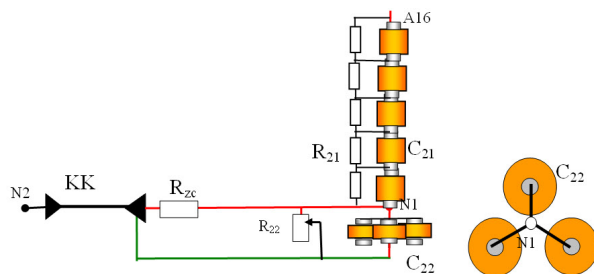
Napravljeno je dodatno delilo u niskonaponskoj grani analiziranog mešovitog delila, kao na slici N.26, koje je postavljeno paralelno sa niskonaponskom granom. Cilj dodatnog mešovitog delila je da snizi napon na prihvatljiv nivo i sprovede ga do mernog instrumenta. Dodatno delilo je postavljeno paralelno u niskonaponskoj grani, kao mešovito delilo sa bezinduktivnim kondenzatorima i velikim vrednostima otpora. Uslov da mešovito delilo ne unosi izobličenje je da bude vremenska konstanta ekvivalentne impedanse niskonaponske grane $R_{2e}C_{2e} = R_1C_1$. Ukoliko se izabere da je otpornost dodatnog delila $R_{21} \gg R_{VN}$ i kapacitivnost dodatnog delila $C_{21} \ll C_{VN}$, tada je uticaj dodatnog delila zanemarljiv. U tom slučaju je potrebno samo da bude ispunjen uslov $R_{21}C_{21} = R_{22}C_{22}$.



Slika N.26: Delilo napona sa dodatnim delilom u NN grani

Za dodatno delilo koriste elementi $R_{21} = 5 \times 10 \text{ k}\Omega$, $R_{22} = 2 \text{ k}\Omega$, $C_{21} = 0.1 \text{ nF}$ i $C_{22} = 6 \text{ nF}$.

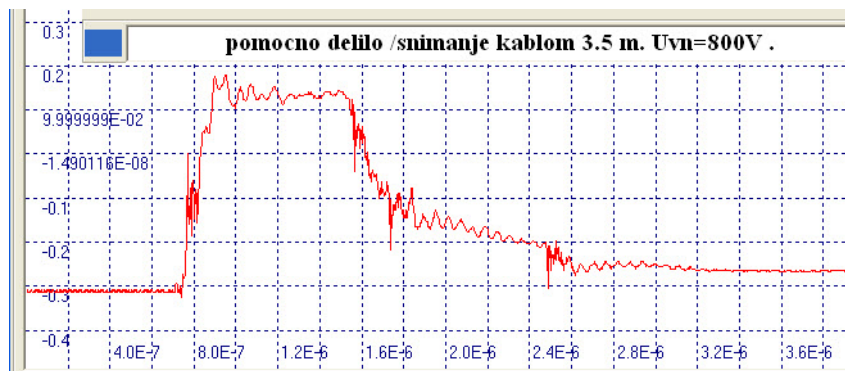
Na slici N.27 prikazan je samo detalj niskonaponske grane, jer je visokonaponska grana već ranije objašnjena.



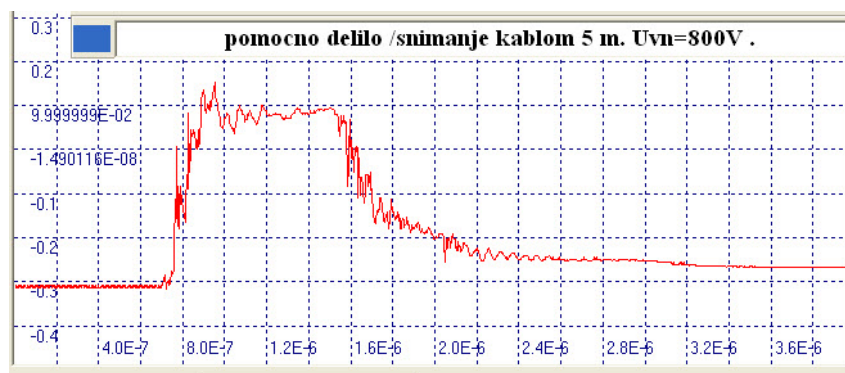
Slika N.27: Izvođenje samo dodatnog delila na niskonaponskoj grani

N.8 Rezultati snimanja odziva sa dodatnim delilom

Na sledećim slikama prikazan su odzivi sa pomoćnog delila za različite dužine koaksijalnog kabla do osciloskopa. Produžavanje kablova vršeno je nastavljajanjem pomoću BNC konektora.



Slika N.28: Odziv na kraju niskonaponskog kabla dužine 3.5 m



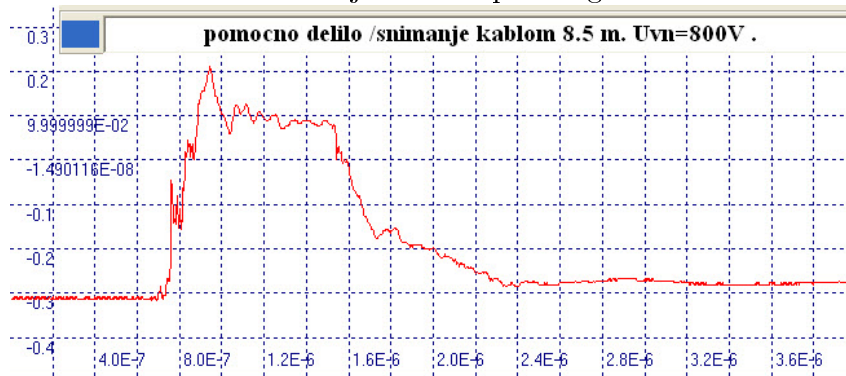
Slika N.29: Odziv na kraju niskonaponskog kabla dužine 5 m

Visokofrekvencijske oscilacije se mogu eliminisati numeričkim ili hardverskim filtriranjem, a posledica su parazitnih induktiviteta otpornika koji su obični grafitni slojni otpornici za niski napon.

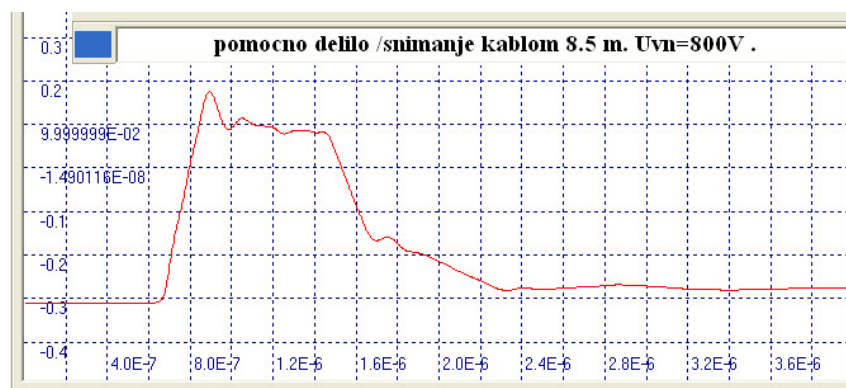
Izvršeno je numeričko filtriranje izlaznog signala za slučaj kabla dužine 8.5 m. Na slici N.32 prikazan je odziv delila dužine 8.5 m posle numeričkog filtriranja.

Za veće dužine koaksijalnog kabla se povećava previšenje odziva na početku talasa.

Slika N.30: Odziv na kraju niskonaponskog kabla dužine 7 m



Slika N.31: Odziv na kraju niskonaponskog kabla dužine 8.5 m



Slika N.32: Odziv na kraju niskonaponskog kabla dužine 8.5 m posle numeričkog filtriranja