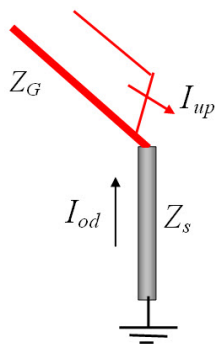


Poglavlje 7

Modelovanje elemenata

7.1 Modelovanje atmosferskog pražnjenja

Atmosfersko pražnjenje se pri proračunima prenapona u elektroenergetskom sistemu modeluje preko strujnog talasa koji nailazi po kanalu groma koji se zamenjuje vodom konstantne karakteristične impedanse. Karakteristična impedansa kanala groma se kreće u opsegu od $Z_G = 200 \Omega$ do $Z_G = 3000 \Omega$, stim što veće vrednosti odgovaraju manjim amplitudama struja. Pri proračunima se usvaja karakteristična impedansa kanala groma 300 do 400Ω . Na slici 7.1 predstavljen je model kanala groma pri udaru u stub u vidu voda karakteristične impedanse Z_G koji je spojen sa vrhom stuba karakteristične impedanse Z_S , koji je uzemljen tako da je otpornost uzemljivača $R_{uz} = 0$. Ukupna struja po kanalu groma se može rastaviti na dve komponente struje. Jedna komponenta se kreće u vidu putujućeg talasa od oblaka ka objektu (stubu), a druga komponenta, koja se odbija od uzemljivača, kreće se ka oblaku. Ukupna struja se dobija superpozicijom, kao na slici 7.1.



Slika 7.1: Tumačenje procene amplitude struje u dobro uzemljen objekt

Smatra se da je karakteristična impedansa stuba po svojoj vrednosti bliska karak-

terističnoj impedansi kanala groma, pa su usvojene da su identične. Pod tim uslovom se strujni talas koji dolazi po kanalu groma ne reflektuje od vrha stuba. Po kanalu groma dolazi upadni talas amplitude I_{up} koji se prostire bez izobličenja po stubu, dolazi do uzemljivača stuba i totalno se odbija, jer je otpor uzemljenja stuba mnogo manji nego karakteristična impedansa stuba (bar 20 puta). Zbog toga je ukupna amplituda struje groma u dobro uzemljeni objekat:

$$I_m = I_{up} + I_{od} \quad (7.1)$$

odnosno:

$$I_m \approx 2I_{up} \quad (7.2)$$

Struja I_m je amplituda struje koja se dobija kao rezultat merenja bilo preko sistema za lokaciju pražnjenja ili sa eksperimentalnih poligona na kojima su rađena istraživanja parametara struje pražnjenja. Ako je poznata amplituda struje I_m u dobro uzemljeni objekat, tada se može odrediti vrednost upadne komponente struje po kanalu groma:

$$I_{up} \approx \frac{I_m}{2} \quad (7.3)$$

Vidi se da je upadna komponenta struje približno jednaka polovini ukupne struje groma u dobro uzemljeni objekat.

Atmosferski upadni talas se može predstaviti upadnim naponskim talasom, koji se prostire po kanalu groma, čija amplituda ima vrednost:

$$U_{up} = Z_G \frac{I_m}{2} \quad (7.4)$$

gde je I_m amplituda struje u dobro uzemljeni objekat.

Pri koordinaciji izolacije modelujemo kanal groma po kome se prostire upadna komponenta struje I_{up} ili naponski talas U_{up} . Sistem daje odziv na upadnu komponentu struje ili napona u zavisnosti od konfiguracije sistema, kao i načina na koji su elementi spojeni sa zemljom. To znači da ako se pražnjenje odvija u objekat koji je uzemljen preko velike impedanse, tada će struja pražnjenja biti manja.

Prenaponi koji imaju najopasnije delovanje na izolaciju vodova i razvodnih postrojenja su atmosferski prenaponi, koji nastaju pri direktnom atmosferskom pražnjenju u nadzemne vodove, elemente razvodnih postrojenja ili u njihovu blizinu. Da bi se ispitala sposobnost izolacije da podnese udarne naponske talase atmosferskog porekla ili sklopne prenapone u laboratorijskim uslovima, grade se uređaji koji proizvode udarne napone koji se nazivaju udarnim generatorima. Udarni generatori su nezaobilazni elemenat svake laboratorije za visoki napon. Talasni oblik napona koji daju udarni generatori treba da je što sličniji stvarnom obliku atmosferskih pražnjenja. Na osnovu registracija talasnih

oblika struja pražnjena [6], [39] predložen je oblik napona na osnovu koga se definišu bitne karakteristike oblika struje prvih negativnih atmosferskih udara, kao na slici 6.2, na strani 176. Oblici struje se menjaju od udara do udara, zavise i od polaritetam ali predstavljeni oblik se često može uočiti na snimcima struje pražnjenja. Za proračune i laboratorijska ispitivanja pogodniji je jednostavniji oblik, stoga je razvijen veći broj različitih modela.

7.1.1 Dvostruko eksponencijalni oblik strujnog i naponskog talasa

Talasni oblik napona ili struje dat dvostruko eksponencijalnom funkcijom je jednostavan, veoma se lako realizuje u laboratorijskim uslovima, a ima sličan oblik kao i realni talasni oblici. Po definiciji, pod udarnim naponom, atmosferskim ili sklopnim, podrazumeva se naponski talas određenog polariteta koji ima brz porast na čelu do maksimalne vrednosti, a zatim sporije opada do nule.

Analitičko predstavljanje naponskih udarnih talasa preko dve eksponencijalne funkcije dato je sledećom relacijom:

$$u(t) = U_o(e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2}) \quad (7.5)$$

gde su:

U_o teorijski maksimalan napon koji daje generator,

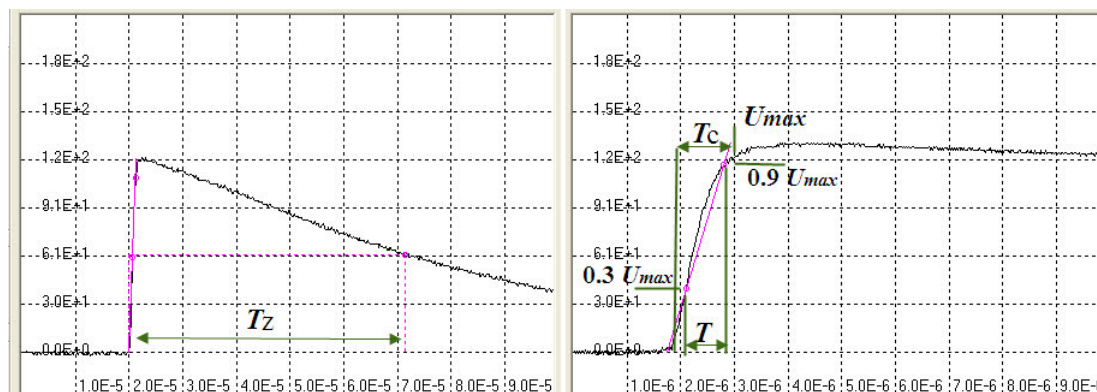
T_1 vremenska konstanta opadanja talasa na začelju,

T_2 vremenska konstanta porasta talasa na čelu.

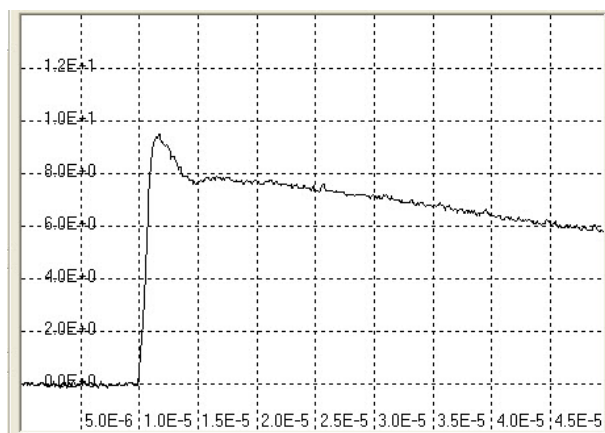
Realni talasi koji su dobijeni u laboratoriji za visoki napon imaju na početku talasa konkavni deo. Na slici 7.2 levo prikazan je kompletan registrovan talas u laboratoriji na kome se vide i čelo i začelje, a na slici desno prikazan je samo deo talasa na kome se može videti procedura određivanja čela talasa.

Previšenje napona je pojava oscilatorno prigušene oscilacije na vrhu talasa, koja ne sme da bude veća od 10% od amplitude talasa. Na slici 7.3 prikazan je snimak udarnog napona sa značajnim previšenjem koje je veće od 10 %.

Vreme čela talasa T_c se definiše kao vreme potrebno da talas poraste od vrednosti $0.3 U_{max}$ do vrednosti $0.9 U_{max}$ podeljeno sa 0.6, odnosno $T_c = T/0.6$. Kod ispitivanja visokonaponske opreme standardnim udarnim atmosferskim naponom prema standardu [14] vreme čela je $T_c = 1.2 \mu s \pm 30\%$. Vreme začelja se definiše kao vreme za koje talas opadne na polovinu vrednosti T_z , što je prikazano na slici 7.2, levo. Vreme začelja iznosi za ispitivanja standardnim udarnim atmosferskim naponom $T_z = 50 \mu s \pm 20\%$.



Slika 7.2: Kompletan talas na kome se vide i čelo i začelje (levo), deo talasa na kome se može videti procedura određivanja čela talasa (desno)



Slika 7.3: Registrovan udarni naponski talas sa previšenjem

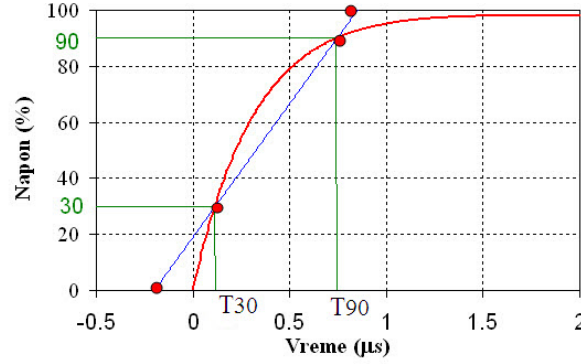
7.1.2 Određivanje vremenskih konstanti čela i začelja

Da bi odredili vremenske konstante potrebne za izbor elemenata udarnog naponskog generatora, razlaže se ukupan talas predstavljen dvostrukom eksponencijalnom funkcijom na dve nezavisne eksponencijalne funkcije koje odgovaraju čelu i začelju talasa.

Na slici 7.4 prikazan je samo deo eksponencijalnog talasa koji odgovara porastu napona na čelu. Ovaj talas se može prikazati sledećom eksponencijalnom funkcijom:

$$u(t) = U_o(1 - e^{-t/T_2}) \quad (7.6)$$

Vreme čela talasa se definiše kao vreme potrebno da linearizovano čelo talasa poraste od vrednosti 0% do vrednosti 100% od punog udarnog napona. Linearizovano čelo talasa se dobija kao prava koja prolazi kroz tačku kada talas postiže 30% od pune vrednosti i tačku kada talas postiže 90% pune vrednosti napona. Trenutak početka linearizovanog



Slika 7.4: Definicija čela atmosferskog udarnog talasa

čela talasa obeležen je sa T_0 , a trenutak kada linearizovan talas dostiže maksimum obeležen je sa T_{100} . Vreme čela talasa se može izračunati na osnovu izraza:

$$T_c = \frac{T_{90} - T_{30}}{0,6} \quad (7.7)$$

Vremenska konstanta čela talasa se može izračunati na osnovu vremena potrebnog da eksponencijalni talas postigne 30% i 90% od pune vrednosti napona, pod uslovom da je vreme začelja neuporedivo duže od vremena čela, odnosno:

$$0,3U_0 = U_0(1 - e^{-\frac{T_{30}}{T_2}}) \Rightarrow 0,7 = e^{-\frac{T_{30}}{T_2}} \quad (7.8)$$

$$0,9U_0 = U_0(1 - e^{-\frac{T_{90}}{T_2}}) \Rightarrow 0,1 = e^{-\frac{T_{90}}{T_2}} \quad (7.9)$$

$$(7.10)$$

U gornjem sistemu jednačina se smatra da je vremenska konstanta začelja T_1 neuporedivo duža od vremenske konstante čela T_2 i da se može smatrati neograničeno dugom. Iz gornjeg sistema jednačina deljenjem gornje jednačine sa donjom može se izračunati razlika $T_{90} - T_{30}$, odnosno:

$$T_{90} - T_{30} = T_2 \ln(7) \quad (7.11)$$

Vodeći računa o izrazu 7.7 i da je vrednost $\ln(7) = 1.946$ dobija se da je:

$$T_c = (1.946/0.6) \times T_2 = 3.243 \times T_2 \quad (7.12)$$

Vremenska konstanta čela je:

$$T_2 = T_c/3.243 \quad (7.13)$$

Začelje talasa se može modelovati nezavisno od čela, smatrajući da je čelo mnogo kraće od začelja i da je praktično čelo završeno u trenutku maksimuma napona, proglašavajući da je trenutak $t=0$ početak začelja. U tom slučaju začelje talasa se može modelovati eksponencijalnom funkcijom 7.14:

$$u(t) = U_o e^{-\frac{t}{T_1}} \quad (7.14)$$

Vreme začelja je vreme potrebno da talas opadne na polovnu svoje početne vrednosti, odnosno:

$$0.5U_o = U_o e^{-\frac{T_z}{T_1}} \quad (7.15)$$

Kada se izvrši logaritmovanje obe strane, posle preračunavanja se dobija odnos vremenske konstante začelja i vremena začelja:

$$T_z = T_1 \cdot \ln(2) \text{ ili } T_z = 0.693 \cdot T_1 \quad (7.16)$$

Vremenska konstanta začelja je:

$$T_1 = T_z / 0.693 \quad (7.17)$$

Za standardni atmosferski udarni napon čije je vreme čela $T_c = 1.2 \mu s$ i vreme začelja $T_z = 50 \mu s$, vremenske konstante čela i začelja su:

$$\begin{aligned} T_2 &= 0.37 \mu s \\ T_1 &= 72.15 \mu s \end{aligned} \quad (7.18)$$

Maksimalna vrednost napona U_{max} je manja od U_o i može se odrediti tražeći maksimalnu vrednost funkcije 7.5.

Trenutak nastupanja maksimalne vrednosti napona t_m se dobija izjednačavanjem prvog izvoda funkcije 7.5 sa nulom, odnosno:

$$u'(t_m) = U_o \left(-\frac{1}{T_1} e^{-\frac{t_m}{T_1}} + \frac{1}{T_2} e^{-\frac{t_m}{T_2}} \right) = 0 \quad (7.19)$$

Izraz 7.19 se može napisati u sledećem obliku:

$$\frac{1}{T_1} e^{-\frac{t_m}{T_1}} = \frac{1}{T_2} e^{-\frac{t_m}{T_2}} \quad (7.20)$$

Deljenjem kompletnog izraza sa desnom stranom se dobija:

$$\frac{T_2}{T_1} e^{-t_m(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2})} = 1 \text{ odnosno } \frac{T_2}{T_1} = e^{t_m(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2})} \quad (7.21)$$

Logaritmovanjem obe strane i izračunavanjem trenutka pojave maksimalne vrednosti t_m se dobija:

$$\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = t_m \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (7.22)$$

Posle izračunavanja se dobija:

$$t_m = \frac{\ln(\frac{T_2}{T_1})}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (7.23)$$

Za standardni atmosferski udarni talas sa parametrima prema 7.18 posle izračunavanja se dobija da je $t_m = 1.96 \mu s$.

Maksimalna vrednost napona U_{max} u trenutku t_m iznosi:

$$U_{max} = u(t_m) = U_o(e^{-t_m/T_1} - e^{-t_m/T_2}) \quad (7.24)$$

Kada se izračuna, dobija se vrednost maksimalnog napona za t_m :

$$t_m = 0.968 \times U_o \quad (7.25)$$

U nekim zemljama se koriste naponski talasi oblika $1/50$ za ispitivanje izolacije visokonaponske elektroenergetske opreme, a za ispitivanje elemenata prenaponske zaštite telekomunikacionih uređaja se koriste talasi različitog oblika, na primer oblika $0,3/50$, $10/700$ itd.

7.1.3 Uprošćen eksponencijalni oblik

U proračunima se može koristiti uprošćeni eksponencijalni oblik talasa koji uvek daje nešto kritičnije rezultate nego dvostruki eksponencijalni talas jer se ovom metodom ne modeluje opadanje talasa na začelju. Uprošćeni eksponencijalni talas se dobija prema izrazu:

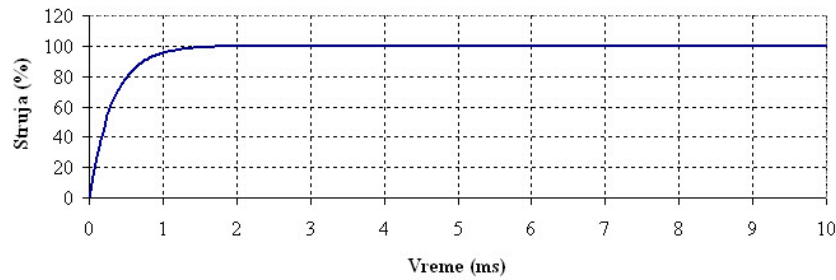
$$I(t) = I_{max}(1 - e^{-t/T_2}) \quad (7.26)$$

U izrazu 7.26 I_{max} predstavlja amplitudu strujnog talasa. Može se smatrati da se maksimalna vrednost struje uspostavlja posle $t > 3 \times T_2$, sa greškom od $\Delta I \approx 5\%$.

Pri proračunima atmosferskih prenapona na elektroenergetskim postrojenjima najčešće se još u toku uspona strujnog talasa počinje javljati opadanje naponskog odziva zbog delovanja prenaponske zaštite i preskoka. Zbog toga začelje talasa najčešće ne igra bitnu ulogu u proračunima, jer se maksimalni prenapon u postrojenju obično pojavljuje za vreme trajanja čela talasa. Na slici 7.5 prikazan je oblik strujnog talasa datog relacijom 7.26.

Vreme čela talasa se određuje na isti način kao kod talasa modelovanog sa dve eksponencijalne funkcije.

Talas modelovan jednom eksponencijalnom funkcijom

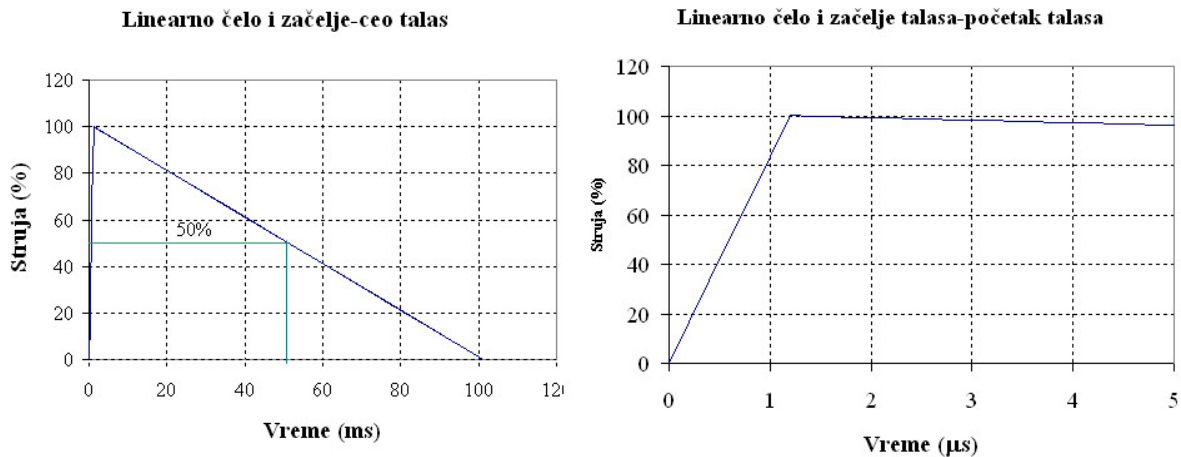


Slika 7.5: Talas eksponencijalnog čela i konstantnog začelja

7.1.4 Talas linearnog čela i linearnog začelja

Pri proračunima atmosferskih prenapona se dobijaju slični rezultati primenom talasa linearno rastućeg čela i linearno opadajućeg začelja kao i pri primeni eksponencijalnog talasa istih parametara.

Talas linearno rastućeg čela i linearno opadajućeg začelja prikazan je na slici 7.6.



Slika 7.6: Talas linearno rastućeg čela i linearno opadajućeg začelja

Na slici 7.6 označeni su sa T_c vreme trajanja čela talasa i sa T_z vreme opadanja do polovine maksimalne vrednosti amplitude talasa. Analitički izraz za ovakav talas ima oblik:

$$I(t) = \left\{ \begin{array}{ll} a_1 t \cdot h(t) & \text{za } t < T_c \\ a_1 t \cdot h(t) - (a_1 + a_2)(t - T_c)h[t - T_c] & \text{za } T_c \leq t < 2T_z \\ 0 & \text{za } t \geq 2T_z \end{array} \right\} \quad (7.27)$$

gde su:

a_1 – strmina struje na čelu talasa,

a_2 – brzina opadanja struje na začelju.

$$a_1 = \frac{I_{max}}{T_c} \quad (7.28)$$

$$a_2 = \frac{I_{max}}{2(T_z - T_c)} + a_1 \quad (7.29)$$

$h(t)$ – jedinična odskočna funkcija.

Prvi član u izrazu 7.27 definiše čelo talasa, drugi član opisuje začelje talasa, a treći član definiše deo funkcije koji posle vremena $2T_2$ poništava talas da se ne bi produžio kao negativna linearna funkcija.

7.1.5 Talas linearnog čela i konstantnog začelja

Iz istog razloga kao i kod eksponencijalnog talasa najčešće je dovoljno koristiti talas konstantnog začelja, kao na slici 7.7. Analitički izraz za ovaj oblik talasa je:



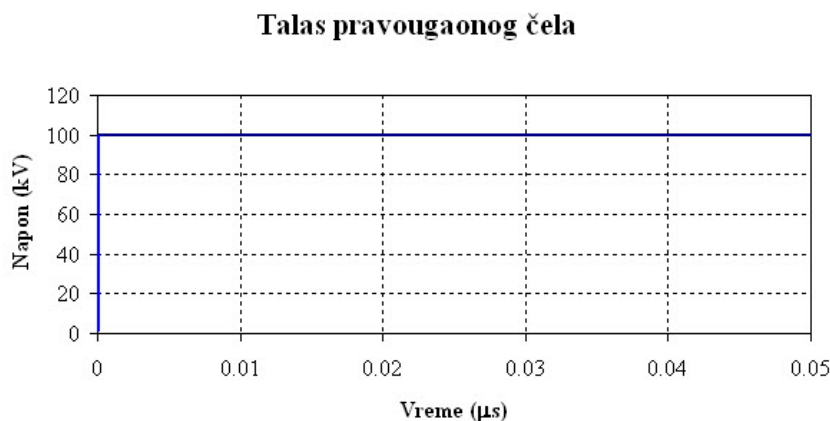
Slika 7.7: Talas linearnog čela i konstantnog začelja

$$I(t) = a_1[t \cdot h(t) - (t - T_1)h(t - T_1)] \quad (7.30)$$

Pri statističkoj analizi atmosferskih prenapona gornji oblik talasa je najpovoljniji, jer u njemu figurišu samo strmina i amplituda struje, tako da se celokupna statistička analiza može izvršiti na bazi samo dve slučajne promenljive, koje imaju dominantan uticaj na rezultate proračuna rizika kvara izolacije.

7.1.6 Talas beskonačne strmine čela i konstantnog začelja

U praktičnoj analizi često se koristi uprošćen oblik talasa u vidu odskočne funkcije, kao na slici 7.8.



Slika 7.8: Talas beskonačne strmine čela i konstantnog začelja

Opšti oblik talasa dat je analitičkim izrazom:

$$I(t) = I_{max}h(t) \quad (7.31)$$

Rezultati dobijeni modelom talasa sa beskonačnom strminom čela su najkritičniji sa stanovišta ugroženosti izolacije, pa je korisno prvu procenu visine prenapona izvršiti primenom ovakvog talasa, a zatim detaljniju analizu primenom nekog od ranije navedenih modela.

Pravougaoni talas je pogodan za edukativne svrhe za ispitivanja osetljivosti rezultata na različite modele elemenata.

7.1.7 CIGRE talas sa konkavnim čelom

CIGRE talas sa konkavnim čelom [6] služi za predstavljanje realnijeg oblika talasa koji se javljaju u prirodi.

Čelo struje

Talasni oblik čela struje po ovoj metodi definisan je izrazom prema [6]:

$$I(t) = A \cdot t + B \cdot t^n \quad (7.32)$$

gde je: t - vreme (μs). Ostale oznake imaju sledeće značenje:

t_f -vreme čela (μs),

S_m -maksimalna strmina (kA/ μs),

t_n -trenutak kada struja postiže 90 % od amplitude struje, kada je pretpostavljeno da je strmina struje maksimalna,

I - amplituda struje (kA).

$$\begin{aligned} s_n &= S_m \frac{t_f}{I} \\ n &= 1 + 2(s_n - 1)(2 + \frac{1}{s_n}) \\ t_n &= 0.6t_f \left[\frac{3s_n^2}{1 + s_n^2} \right] \\ A &= \frac{1}{n-1} \left[0.9 \left(\frac{I}{t_n} \right) \cdot n - S_m \right] \\ B &= \frac{1}{t_n^n \cdot (n-1)} [S_m t_n - 0.9I] \end{aligned}$$

Osnovna pretpostavka je da maksimalna strmina struje nastupa u trenutku kada je struja 90 % od amplitude u trenutku t_n koje zavisi od eksponenta n .

Začelje struje

Izraz za začelje struje dat je relacijom:

$$I = I_1 e^{-\frac{t-t_n}{t_1}} - I_2 e^{-\frac{t-t_n}{t_2}} \quad (7.33)$$

gde su:

$$t_1 = \frac{t_h - t_n}{\ln(2)}$$

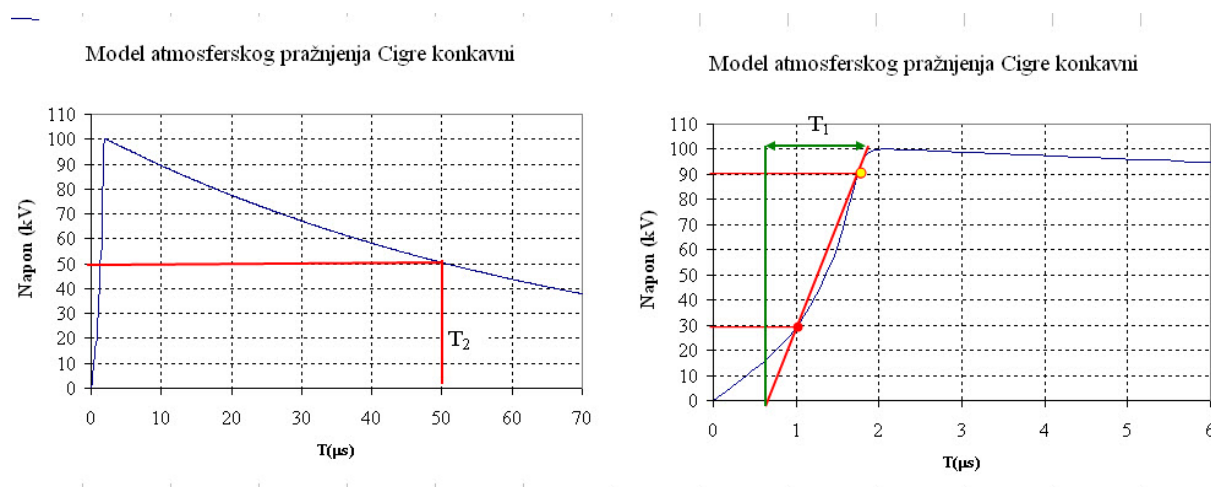
t_h – vreme opadanja na polovinu vrednosti

$$t_2 = 0.1 \frac{I}{S_m}$$

$$I_1 = \frac{t_1 \cdot t_2}{t_1 - t_2} \left[S_m + 0.9 \frac{I}{t_2} \right]$$

$$I_2 = \frac{t_1 \cdot t_2}{t_1 - t_2} \left[S_m + 0.9 \frac{I}{t_1} \right]$$

Talasni oblik CIGRE konkavne struje realizovan u programu EMTP-atp za podešene parametre generatora $T_f = 1.2 \mu s$ i $T_h = 50 \mu s$ i maksimalnom strminom napona na čelu $S_{max} = 1.41 \cdot 10^{11}$ (A/s), koji posle proračuna daje tačno parametre talasa vreme čela $T_1 = 1.2 \mu s$ (slika desno) i vreme začelja $T_2 = 50 \mu s$ (slika levo), na slici 7.9.



Slika 7.9: Talasni oblik struje opisan CIGRE konkavnim modelom -začelje levo i čelo desno

7.1.8 Haidlerova funkcija

U naučnim istraživanjima se često koristi Haidlerova (Heidler) funkcija [18], [19], [20], [21], [22]. Iako je ova funkcija u analitičkom obliku složena isto kao i CIGRE konkavna funkcija, našla je primenu zajedno sa CIGRE konkavnom funkcijom u programskom paketi ATPDraw u okviru programa EMTP-atp, stoga će na ovom mestu biti opisana.

Hajdlerov model struje u kanalu groma može se analitički predstaviti u sledećem obliku:

$$I = \frac{I_{max}}{K} \frac{\left(\frac{t}{T_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{T_1}\right)^n} e^{-\frac{1}{T_2}} \quad (7.34)$$

gde je:

I_{max} -maksimalna vrednost struje groma (kA),

K -koeficijent korekcije,

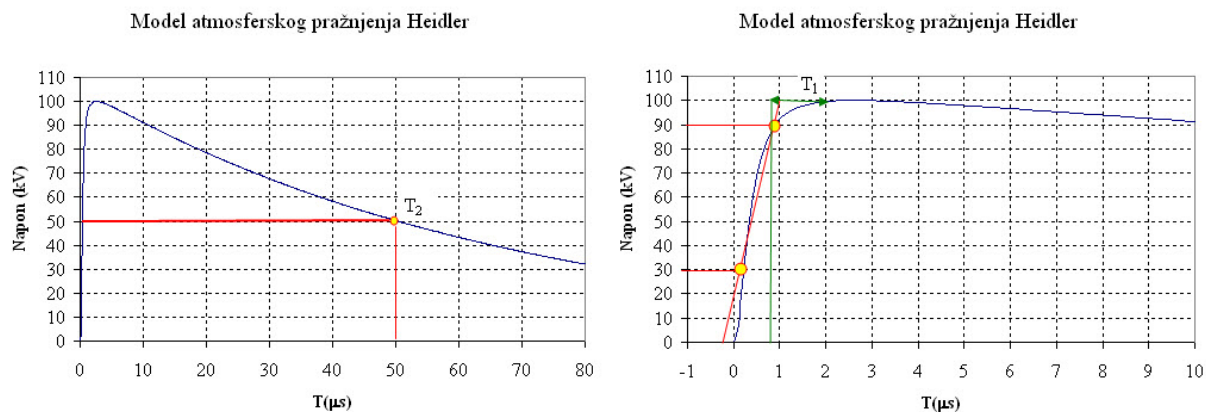
n -eksponent za koji se predlaže vrednost koja zavisi od oblika talasa.

t -vreme (μs),

T_1 -vremenska konstanta čela (μs), iznosi $2.6 \mu s$ za talas oblika $1.2/50 \mu s$,

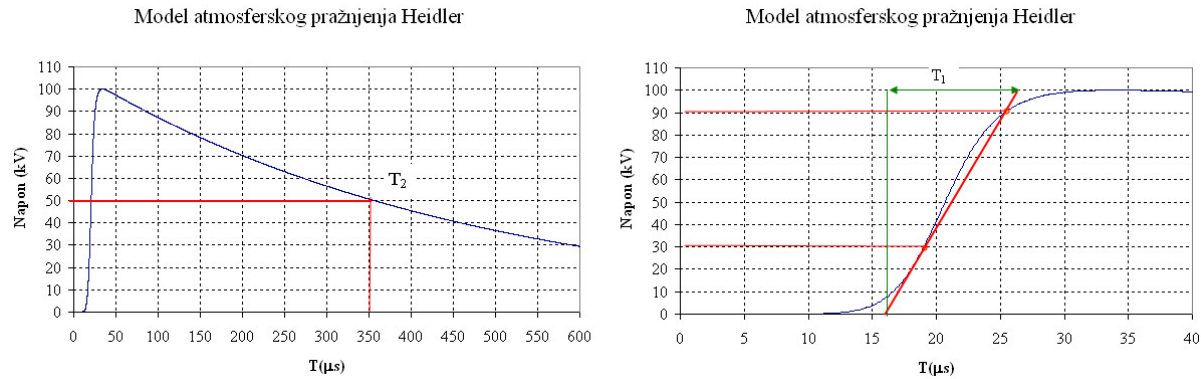
T_2 -vremenska konstanta začelja (μs). iznosi $6.7 \mu s$ za talas oblika $1.2/50 \mu s$.

Na slici 7.10 predstavljen je Heidlerov model prvog negativnog talasa oblika $1.2/50 \mu s$.



Slika 7.10: Heidlerov model talasa $1.2/50 \mu s$

Za ispitivanja niskonaponskih prenaponskih zaštitini uređaja (skraćenica SPD od engl. Surge Protective Devices) koriste se talasi $10/350 \mu s$ koji odgovaraju pozitivnim strujnim impulsima. Na slici 7.11 prikazan je talas oblika $10/350 \mu s$ dobijen pomoću programa EMTP-atp.



Slika 7.11: Talasni oblik dobijen pomoću Heindlerove funkcije za standardni pozitivan talas oblika 10/350 μs

Za standardni talas su odabrani sledeći parametri talasa:

$$\begin{aligned}
 n &= 10 \\
 T_f &= 34 \mu s \\
 T_2 &= 460 \mu s \\
 K &= 1
 \end{aligned}
 \tag{7.35}$$

Ovi parametri se razlikuju od parametara koji su preporučeni u [20] i [15], što je posledica razlika u postupka proračuna u programu EMTP-atp u odnosu na druge postupke.

7.1.9 Zaključna razmatranja

Za proračun atmosferskih prenapona u cilju koordinacije izolacije elektroenergetskih mreža i postrojenja prednost treba dati talasu linearno rastućeg čela i linearno opadajućeg za-čelja. Postoji više razloga za takav izbor:

- Ovakav talas je jednostavan u pogledu definisanja parametara,
- strmina čela talasa, koja je ključan faktor zbog pada napona na induktivitetima elemenata, definisana je direktno pravom koja definiše čelo talasa, tako da je strmina konstantna u toku kompletnog trajanja čela,
- realni talasi se toliko međusobno razlikuju, da nema smisla koristiti složene matematičke modele za pojave koje imaju tako izraženo rasipanje karakteristika,

- konkavni deo na samom početku talasa ima neznatan uticaj na prenaponske pojave,
- metoda opasnih parametara koja predstavlja efikasnu statističku metodu, podrazumeva korišćenje talasa linearnog čela.

7.2 Modelovanje provodnika

7.2.1 Modelovanje zaštitnog užeta

Zaštitno uže se modeluje kao provodnik karakteristične impedanse Z_u i dužine d između dva susedna stuba.

Karakteristična impedansa zaštitnog užeta je:

$$Z_u = 60 \ln \frac{2H_{ef}}{R_u} \quad (7.36)$$

gde su:

$$H_{ef} = H_{st} - \frac{2}{3}f \quad (7.37)$$

H_{ef} – efektivna visina zaštitnog užeta iznad zemlje,

H_{st} – visina stuba,

f – ugib zaštitnog užeta na sredini raspona,

R_u – poluprečnik užeta.

Primenom izraza 7.37 obuhvata se efekat promene visine užeta duž raspona.

Pri proračunu prostiranja talasa duž raspona po zaštitnom užetu uvažava se u obzir korona, prema ranije opisanom postupku. Za sve napone ispod kritičnog napona korone ne uvažava se dopunsko kašnjenje talasa. Kritični napon korone se određuje primenom sledećeg izraza [9]:

$$E_{kr} = 23,3m\delta\left[1 + \frac{0,62}{\delta R_u^{0,38}}\right] \quad (7.38)$$

gde su:

m – koeficijent glatkosti provodnika, koji je u granicama $0,82 - 0,94$, dok za zaprljane i uvlažene provodnike može da ima vrednosti čak i do $0,6$. Pošto se sa većim koeficijentom glatkosti dobija i viša kritična vrednost korone, može se usvojiti $m = 0,94$, čime se dobija na sigurnosti.

δ – specifična gustina vazduha, koja ima vrednost 1 pri standardnim uslovima ispitivanja pri pritisku 1033 milibara, temperaturi od 20°C i vlažnosti od 11g vodene pare na 1m^3 vazduha.

$$\delta = \frac{p}{1013} \cdot \frac{273 + 20}{273 + t} \quad (7.39)$$

gde su:

δ - koeficijent svođenja preskočnog napona na normalne atmosferske uslove

p - atmosferski pritisak izražen u mBar,

t - temperatura izražena u $^{\circ}\text{C}$.

Pod normalnim atmosferskim uslovima se podrazumeva pritisak na visini mora, pri temperaturi ambijenta od 20°C

Promene ovog koeficijenta se zanemaruju do visine od 1000 m.

Kritična vrednost napona korone dobija se iz izraza [51]:

$$U_{kr} = E_{kr} R_u Z_u / 60 \quad (7.40)$$

Modelovanje korone po zaštitnom užetu je izuzetno važno kod analize atmosferskih pražnjenja duž raspona, kada usled prostiranja talasa po zaštitnom užetu do stuba dolazi do značajnog izobličenja talasa usled korone.

7.2.2 Modelovanje faznog provodnika

Model faznog provodnika je identičan modelu zaštitnog užeta. Jedina razlika se pojavljuje kod vodova sa provodnicima u snopu. Kod ovakvih vodova se proračun karakteristične impedanse vrši korišćenjem izraza za ekvivalentni prečnik provodnika u snopu, na osnovu kojeg se proračunava kapacitet voda. Za slučaj voda sa n provodnika u snopu identičnog poluprečnika R_p raspoređenih u obliku pravilnog mnogougla ekvivalentni poluprečnik provodnika se može izračunati prema formuli:

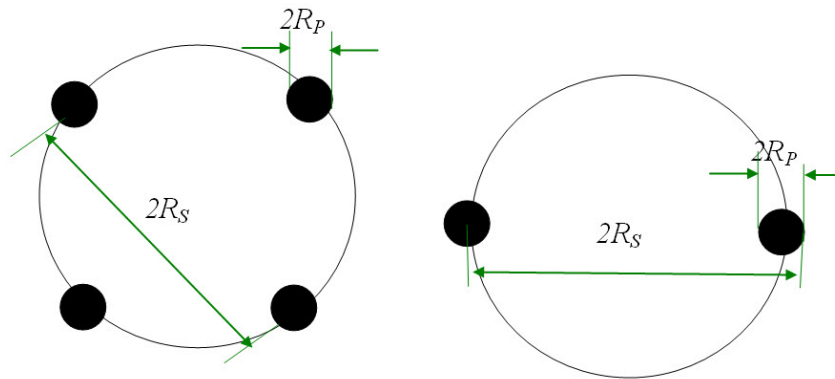
$$R_{ekv} = [n R_p R_s^{n-1}]^{1/n} \quad (7.41)$$

gde su:

R_s – poluprečnik kruga opisan iz centra snopa koji prolazi kroz centar svakog od provodnika raspoređenih u temenima pravilnog mnogougla,

R_p – poluprečnik pojedinih provodnika unutar snopa.

Na slici 7.12 levo je nacrtan sistem sa 4 provodnika u snopu, a desno sa dva provodnika u snopu.



Slika 7.12: Skica 4 provodnika snopu (levo) i 2 provodnika u snopu (desno)

Karakteristična impedansa faznog provodnika se računa po izrazu:

$$Z_f = 60 \ln \frac{2H_{ef}}{R_{ekv}} \quad (7.42)$$

gde su:

$$H_{ef} = H_v - \frac{2}{3} f_p \quad (7.43)$$

H_{ef} – efektivna visina faznog provodnika iznad zemlje,

H_v – visina vešanja provodnika na stubu,

f_p – ugib faznog provodnika na sredini raspona,

Kritično električno polje se računa na identičan način kao kod zaštitnog užeta, odnosno:

$$E_{kr} = 23,3m\delta \left[1 + \frac{0,62}{\delta R_{ekv}^{0,38}} \right] \quad (7.44)$$

Kritična vrednost napona korone dobija se na osnovu izraza [51]:

$$U_{kr} = kE_{kr}R_{ekv}Z_f/60 \quad (7.45)$$

gde je:

k – koeficijent koji uvažava efekat slabljenja polja kod provodnika u snopu. On se dobija iz izraza:

$$k = \frac{n}{1 + (n - 1)\frac{R_p}{R_s}} \quad (7.46)$$

7.3 Modelovanje dalekovodnog stuba

7.3.1 Određivanje karakteristične impedanse stuba

Kod proračuna prelaznih procesa usled atmosferskih pražnjenja i njihovog delovanja na izolaciju elektroenergetskih objekata, jedan od vrlo važnih elemenata je dalekovodni stub. Dalekovodni stub se najčešće modeluje kao kratak vod konstantne karakteristične impedanse na čijem se drugom kraju nalazi otpornost uzemljenja.

Za određivanje karakteristične impedanse dalekovodnog stuba koriste se analitičke metode, kao i eksperimenti na modelima ili stvarnim stubovima, opisani u [65]. Stub se može modelovati cilindrom ili konusom, a karakteristična impedansa se može tretirati kao da se kontinualno menja sa visinom, što je opisano u [56] ili da je konstantna. Prema [65] model stuba se razlikuje za slučaj vertikalnog udara direktno u vrh stuba i za slučaj pražnjenja u sredinu raspona kada strujni talas nailazi po zaštitnom užetu.

U [10] daje se veoma jednostavan empirijski izraz za karakterističnu impedansu vertikalnog cilindra dobijen na osnovu eksperimentalnih istraživanja:

$$Z_s = 60 \left[\ln \frac{2\sqrt{2H}}{R} - 2 \right] \quad (7.47)$$

gde su:

H – visina cilindra,

R – poluprečnik cilindra.

U slučaju da se stub sastoji iz n vertikalnih cilindara istog poluprečnika, tada se karakteristična impedansa prema [10] izračunava na osnovu izraza:

$$Z_s = \frac{1}{n} \{ Z_{s1} + Z_{s2} + \dots + Z_{sn} \} \quad (7.48)$$

gde se sopstvena impedansa svakog cilindra Z_{si} računa prema izrazu:

$$Z_{si} = 60 \left[\ln \frac{2\sqrt{2H_i}}{R_i} - 2 \right], i = 1, \dots, n \quad (7.49)$$

Međusobna impedansa vertikalnih cilindara se računa na sledeći način:

$$Z_{s,m} = 60 \left[\ln \frac{2\sqrt{2H_i}}{D_m} - 2 \right] \quad (7.50)$$

U gornjim izrazima je:

H_i – visina i -tog cilindra u (m) ,

R_i – poluprečnik i -tog cilindra u (m) ,

D_m – rastojanje između cilindara u (m) .

Ukoliko cilindri nisu vertikalno postavljeni, već su nagnuti, tada se može odrediti ekvivalentno rastojanje između cilindara:

$$D_m = D_V^{1/3} \cdot D_Z^{2/3} \quad (7.51)$$

gde su:

D_V – rastojanje između cilindara na vrhu stuba,

D_Z – rastojanje između cilindara na zemlji.

Za praktičnu primenu su veoma pogodni izrazi dati u [1] za tipične konstrukcije stubova. Zbog geometrije stubova se smatra da je brzina prostiranja talasa po stubovima oko 85% od brzine svetlosti.

Za stub tipa jelka, sa oznakama dimenzija na slici 7.13, karakteristična impedansa se može izračunati na osnovu sledećeg izraza:

$$Z_s = 30 \ln \left[\frac{2(H^2 + R^2)}{R^2} \right] \quad (7.52)$$

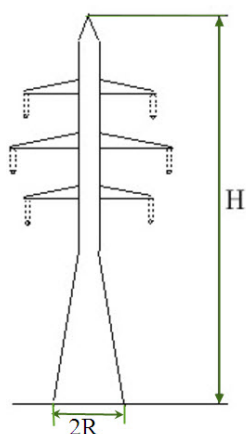
gde su:

H – visina stuba u (m) ,

R – poluprečnik osnove stuba u (m) .

Za slučaj portalnog stuba, datog na slici 7.14, karakteristična impedansa se računa prema izrazu:

$$Z_s = \frac{1}{2} [Z_1 + Z_m] \quad (7.53)$$



Slika 7.13: Stub tipa jelka sa oznakama dimenzija

gde su:

$$Z_1 = 60 \ln \frac{H}{R} + 90 \frac{R}{H} - 60 \quad (7.54)$$

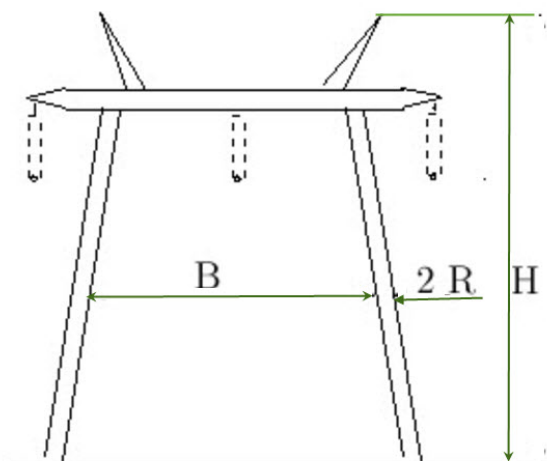
$$Z_m = 60 \ln \frac{H}{B} + 90 \frac{B}{H} - 60 \quad (7.55)$$

Prema oznakama na slici 7.14 su:

H – visina stuba,

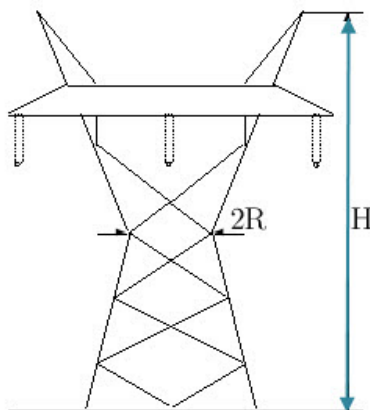
R – ekvivalentni poluprečnik kraka stuba,

B – razmak između krakova na polovini visine stuba.



Slika 7.14: Skica portalnog stuba sa oznakama dimenzija

Na slici 7.15 prikazana je skica Y stuba sa označenim osnovnim dimenzijama. Karakteristična impedansa ovakvog stuba se računa primenom sledećeg izraza:



Slika 7.15: Skica Y stuba sa oznakama dimenzija

$$Z_s = 60 \left[\ln \frac{2H\sqrt{2}}{R} - 1 \right] \quad (7.56)$$

gde je R ekvivalentni poluprečnik stuba na najužem mestu.

7.3.2 Modelovanje geometrije stuba

Prilikom proračuna atmosferskih prenapona usled atmosferskih pražnjenja u vodove razlikuju se dva slučaja:

- proračun ugroženosti elemenata postrojenja usled atmosferskih pražnjenja u vodove povezane sa postrojenjem,
- proračun broja preskoka na vodovima usled atmosferskih prenapona.

Kada se analizira ugroženost postrojenja od atmosferskih prenapona, tada se koriste samo monofazni modeli vodova i postrojenja. U slučaju proračuna kvarova u postrojenjima, analiziraju se kvarovi aparata (najčešće energetskih ili naponskih transformatora), svaki kvar izolacije predstavlja trajan kvar koji zahteva isključenje. Zato je za analizu postrojenja moguće koristiti jednopolne modele.

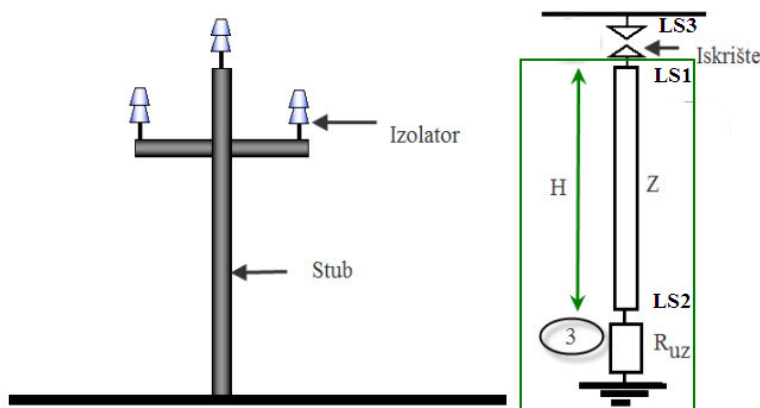
Ukoliko se analizira ugroženost vodova, a zanima nas da li se pojavljuju i međufazni kvarovi kada do preskoka na izolaciji ne dolazi samo između najugroženije faze i stuba, nego kada se pojavljuju preskoci na više faza ili preskoci na rasponu, tada se moraju

koristiti trofazni modeli. Ovo je posebno važno kod visokonaponskih vodova (nazivnih napona 110 kV ili više), kod kojih se koriste prekidači koji imaju posebne mehanizme za pogon kontakata za svaki pol nezavisno. U slučaju jednofaznih preskoka na takvim vodovima, prekidači mogu da isključe samo fazu na kojoj je nastao preskok, a tehnikom brzog automatskog ponovnog uključanja (brzo APU), kvar se u većini slučajeva eliminiše, i vod se može vratiti u pogon gotove bez ikakvih smetnji kod potrošača.

Za potrebe određivanja efikasnosti zaštite vodova odvodnicima prenapona razvijeni su trofazni modeli stubova koji omogućavaju modelovanje preskoka na sve tri faze stuba, kao i preskoke na rasponu.

Monofazni modeli stubova

Razlikujemo dva monofazna modela stuba. Prvi monofazni model stuba se koristi za modelovanje stubova u mrežama bez zaštitnog užeta. Na slici 7.16 prikazana je levo skica konstrukcije stuba, a desno model stuba. Ovo su modeli koji se uglavnom koriste u mrežama srednjih napona.



Slika 7.16: Skica konstrukcije stuba(levo) i model stuba (desno)

Stub se modeluje ekvivalentnm vodom dužine H čija je karakteristična impedansa Z . Na donjem kraju stuba nalazi se otpornost uzemljenja R_{UZ} . Na gornjem kraju stuba nalazi se iskrište koje se modeluje preskočnom karakteristikom. Model preskoka dat je izrazom:

$$\begin{aligned} R &= 0 & \Delta U &\geq U_{diel}(t) \\ R &= \infty & \Delta U &< U_{diel}(t) \end{aligned} \quad (7.57)$$

gde je:

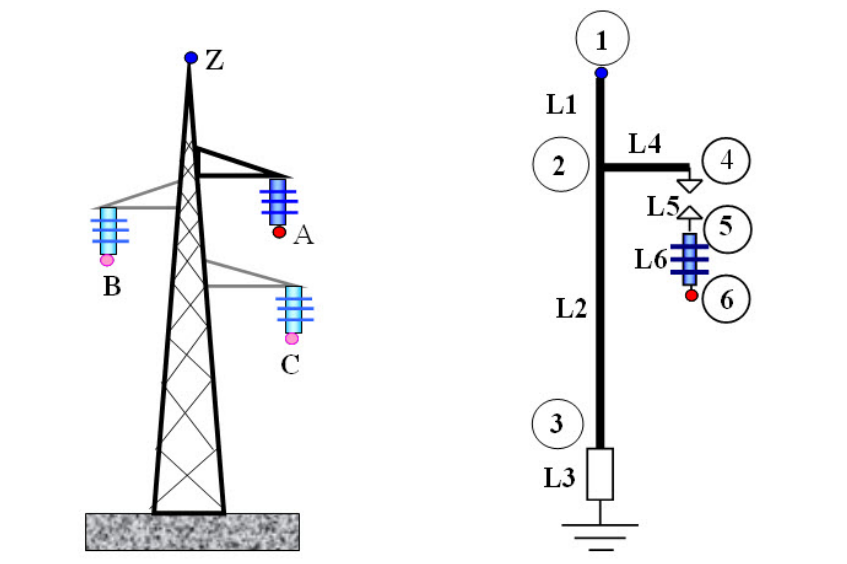
ΔU -razlika napona između faznog provodnika i tačke u kojoj je izolator pričvršćen za stub.

$U_{diel}(t)$ -dielektrička izdržljivost vazduha između krajeva izolatora koji su na različitim potencijalima, koja zavisi od vremena proteklog od trenutka nailaska naponskog talasa na izolator, kao i od oblika i brzine uspostavljanja napona.

Modelovanje preskoka detaljno je objašnjeno u poglavlju 7.5, na strani 236.

U ekvivalentnoj šemi monofazni model stuba bez zaštitnog užeta se modeluje sa 3 grane, kao na slici 7.16, desno.

Model stuba jela koji sa zaštitnim užetom je složenijeg oblika, koji je prikazan na slici 7.17. Na slici levo prikazana je skica konstrukcije realnog stuba, a na slici desno ekvivalentna monofazna šema. Konzola i izolatori koji su svetlije boje na slici levo nisu uključeni u model.



Slika 7.17: Skica konstrukcije realnog stuba sa užetom (levo) i model stuba sa užetom (desno)

Na slici 7.17 oznake pojedinih grana na šemi stuba desno imaju sledeće značenje:

$L1$ — gornji deo stuba od zaštitnog užeta do konzole,

$L2$ — donji deo stuba,

$L3$ — otpor uzemljenja,

L4– konzola stuba,

L5– model preskoka u vidu iskrišta,

L6– model izolatorskog lanca nakon preskoka (praktično kratak vod koji modeluje kanal električnog luka posle preskoka).

Čvorovi označeni brojevima u kružićima imaju sledeće značenje:

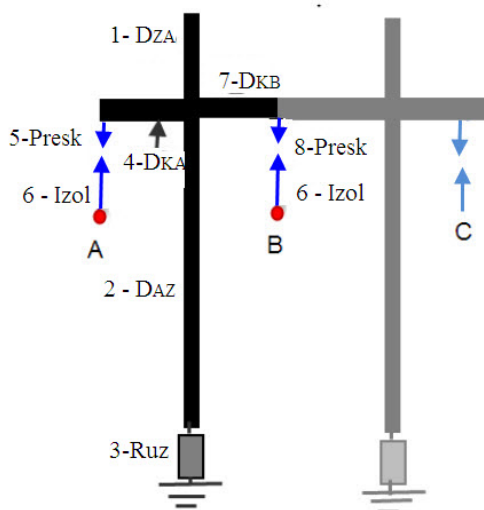
1. vrh stuba na kome je učvršćeno zaštno uže,
2. spoj stuba sa najvišom konzolom,
3. spoj stuba sa uzemljivačem,
4. tačka vešanja izolatorskog lanca,
5. pomoćna tačka prema kojoj se odvija preskok, koja je fizički spojena sa donjom armaturom na potencijalu faze,
6. tačka na fazi.

Izolator se modeluje sa dva elementa. Između tačaka 4 i 5 smešteno je iskrište, a preskok preko izolatorskog lanca nakon reagovanja iskrišta koji se modeluje kanalom luka smešten je između tačaka 5 i 6. Ovakav model je napravljen jer kod vodova vrlo visokih napona izolatorski kod kojih lanci mogu imati dužinu više metara. U slučaju vodova nižih napona može se usvojiti model voda u kome je u tački 5 smešten fazni provodnik, a tačka 6 ne postoji. Sve grane imaju istu karakterističnu impedansu Z_s . Otpornost uzemljenja stuba je R_{uz} . Model izolatora se sastoji od modela preskoka koji je prikazan kao iskrište i modela kratkog voda (grana 6) koji ima istu karakterističnu impedansu Z_s kao i ostali delovi stuba.

Trofazni modeli stubova

Prilikom modelovanja trofaznih stubova razlikujemo dva glavna tipa:

- stubovi sa vertikalnim rasporedom provodnika (jednosistemi - "jelka" i dvosistemi - "bure"),
- stubovi sa horizontalnim rasporedom provodnika (Y i portalni stubovi).



Slika 7.18: Skica trofaznog portalnog stuba

Na slici 7.18 prikazana je skica trofaznog portalnog stuba sa označenim pojedini granama koje se koriste u modelu.

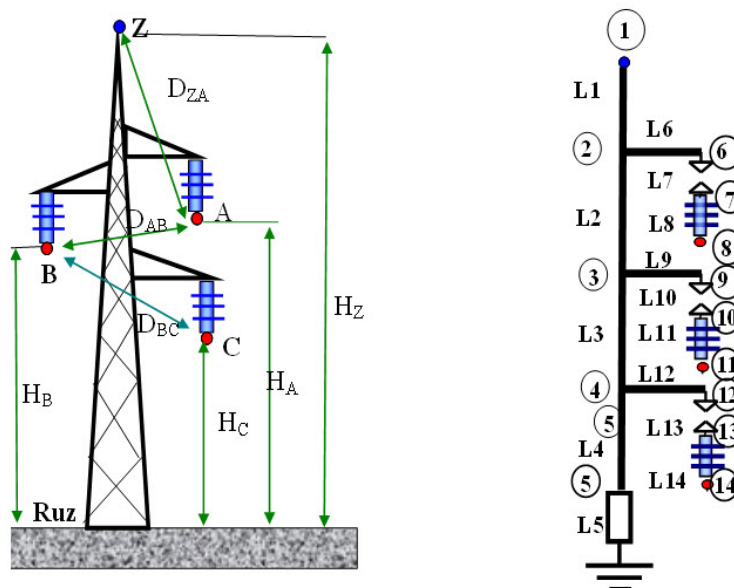
Na slici 7.18 oznake imaju sledeće oznake:

1. gornji deo stuba od zaštitnog užeta do gornje konzole, dužine D_{ZA} ,
2. donji deo stuba od konzole do zemlje, dužine D_{AZ} ,
3. otpor uzemljenja,
4. konzola faze A stuba, dužine D_{KA} ,
5. preskok na fazi A ,
6. model izolatorskog lanca nakon preskoka na fazi A ,
7. horizontalna konzola do faze B stuba, dužine D_{KB} ,
8. preskok na fazi B ,
9. model izolatorskog lanca nakon preskoka na fazi B ,

Na slici 7.18 svetlije prikazani su elementi portalnog stuba koji ne ulaze u model, jer je model potpuno simetričan, tako da je dovoljno posmatrati samo faze A i B .

Na slici 7.19 prikazana je skica stuba sa vertikalnim rasporedom provodnika. U slučaju dvosistenskog voda model stuba je potpuno identičan, jer se pri proračunu rizika

kvara razmatra samo jedan trofazni sistem. Drugi sistem je potpuno simetričan, tako da smatramo da se identične pojave događaju na drugom sistemu.



Slika 7.19: Skica trofaznog stuba sa vertikalnim rasporedom provodnika tipa "bure" ili "jela"

Oznake na slici 7.19 imaju sledeće značenje:

1. gornji deo stuba od zaštitnog užeta do gornje konzole, dužine $L1$,
2. srednji deo stuba od gornje do srednje konzole, dužine $L2$,
3. srednji deo stuba od srednje konzole do donje konzole, dužine $L3$,
4. donji deo stuba od donje konzole do zemlje, dužine $L4$,
5. otpor uzemljenja R_{UZ} , označen kao $L5$ (otpornik se modeluje kao element koji nema dužinu),
6. konzola faze A stuba, dužine $L6$,
7. preskok na fazi A , označen kao $L7$,
8. model izolatorskog lanca nakon preskoka na fazi A , označen kao $L8$
9. konzola faze B stuba, dužine $L9$,
10. preskok na fazi B , označen kao $L10$,
11. model izolatorskog lanca nakon preskoka na fazi B , označen kao $L11$,

12. konzola faze C stuba, dužine L_{12} ,
13. preskok na fazi B , označen kao L_{13} ,
14. model izolatorskog lanca nakon preskoka na fazi B , označen kao L_{14} .

Svi elementi stuba osim otpora uzemljenja i preskoka modeluju se ekvivalentnim vodovima karakteristične impedanse Z_c određene prema poglavlju 7.3.1. Brzina prostiranja po elementima voda usvaja se da je 80% brzine svetlosti. Elementi stuba koji se ne modeluju kao ekvivalentni vodovi su samo otpori uzemljenja stubova i grane koje modeluju preskoke. Grane koje modeluju izolatorski lanac nakon preskoka se takođe zamenjuju ekvivalentnim vodovima identične karakteristične impedanse kao i ostali elementi stuba, mada te grane ustvari predstavljaju model kanala preskoka preko izolatorskog lanca.

7.4 Model uzemljivača

Impedansa uzemljivača može biti modelovana na različite načine pri proračunima prelaznih procesa usled atmosferskih pražnjenja. Koriste se sledeći modeli [47], [48]:

- Konstantna omska otpornost uzemljivača koja se koristi kod konstrukcija manjih dimenzija (na primer uzemljivači dalekovodnih stubova, kada je specifična otpornost zemlje relativno mala, pa ne dolazi do jonizacije tla.
- U slučaju dalekovodnih stubova na tlu velikog specifičnog otpora dolazi do jonizacije tla, što povoljno utiče na smanjenje otpora rasprostiranja.
- Kod složenih konstrukcija uzemljivača postrojenja moraju se koristiti približne formule za procenu efektivne dužine uzemljivača sa koje se struja odvodi zbog uticaja prostiranja talasa po podzemnim provodnicima koji najveći deo struje odvede u blizini mesta priključka vertikalnog spusta po kome dolazi udarna struja, a sa udaljavanjem sve manji deo struje se odvodi.

7.4.1 Približne formule za otpornost rasprostiranja pri industrijskoj frekvenciji

Na ovom mestu su date približne formule pogodne za inženjersku praksu pri analizi uzemljivača kod delovanja naizmeničnih struja industrijske učestanosti.

Dugačak pravolinijski provodnik

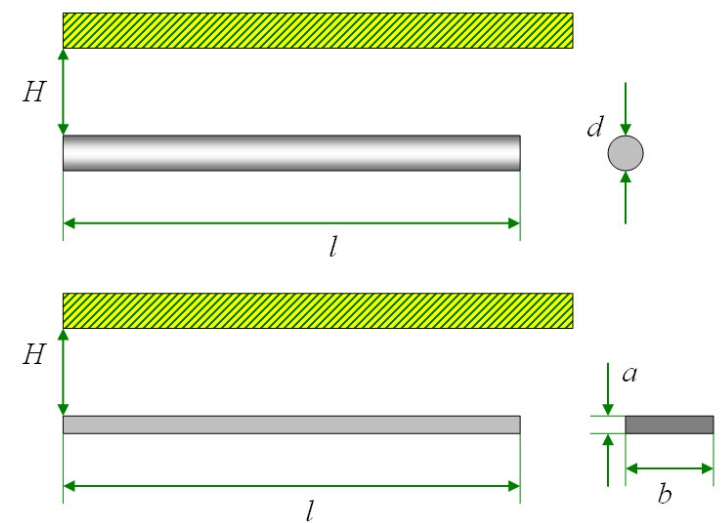
Ukoliko se koristi dugačak pravolinijski uzemljivač zakopan na određenoj dubini, otpornost rasprostiranja uzemljivača u ustaljenom stanju određuje se pomoću sledećeg izraza za okrugao provodnik:

$$R_{uz} = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{l}{Hd} \text{ za } H > 0 \quad (7.58)$$

$$R_{uz} = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{2 \cdot l}{d} \text{ za } H = 0 \quad (7.59)$$

Objašnjenje oznaka dato je na slici 7.20.

Oznake imaju sledeće značenje:



Slika 7.20: Skica linearnog uzemljivača od okruglog provodnika ili trake pravougaonog preseka

ρ - specifična otpornost zemlje (Ωm),

l - dužina uzemljivača u (m),

H - dubina ukopavanja u odnosu na površinu zemlje,

d - prečnik provodnika u slučaju kružnog poprečnog preseka, a ekvivalentni prečnik u slučaju pravougaonog provodnika sa stranicama a i b .

$$d = \frac{2}{\pi}(a + b) \quad (7.60)$$

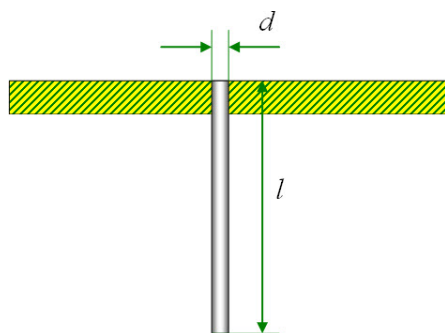
Ukoliko je uzemljivač postavljen plitko, manje od 0.5 m, a postoji mogućnost isušivanja zemlje u površinskom sloju u toku leta, odnosno zamrzavanja tla u toku zimskog perioda, tada se može koristiti aproksimacija da je $H = 0$.

U većini praktičnih slučajeva je ispunjen uslov da je $l \gg d$. U tom slučaju se može koristiti približni izraz:

$$R_{uz} = \frac{2\rho}{l} \quad (7.61)$$

Vertikalna sonda

Vertikalne sonde se koriste da smanje udarnu impedansu dugačkih horizontalnih uzemljivača ili složenijih horizontalnih uzemljivačkih struktura. Na slici 7.21 prikazana je skica vertikalnog štapnog uzemljivača.



Slika 7.21: Skica vertikalnog štapnog uzemljivača

Otpornost rasprostiranja usamljenog vertikalnog štapa koji je najčešće dužine od $l = 1$ do 3 m dat je približnim izrazom kada je $d \ll l$:

$$R_{uz} = \frac{\rho}{l} \quad (7.62)$$

Prstenasti uzemljivač

Otpor uzemljenja za prstenaste uzemljivače koji nisu u obliku kruga izračunava se tako što se prvo izračuna ekvivalentnih prečnik kruga, koji ima istu površinu kao i površina posmatranog prstenastog uzemljivača.

$$D_{ekv} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 1.13 \cdot \sqrt{A} \quad (7.63)$$

gde je:

D_{ekv} - prečnik zamišljenog kruga prstenastog uzemljivača,

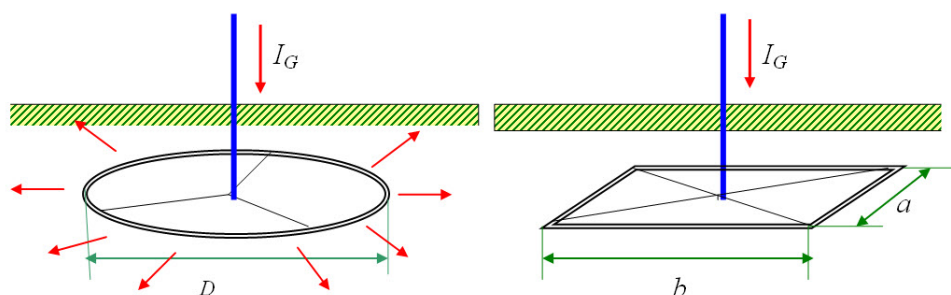
A - površina pravougaonog uzemljivača ili uzemljivača drugačijeg oblika.

Formula za izračunavanje otpora rasprostiranja prstenastog uzemljivača dobija se iz sledećeg izraza:

$$R_{uz} = \frac{2\rho}{3D_{ekv}} \quad (7.64)$$

Na slici 7.22 levo je prikazan kružni prstenasti uzemljivač, a desno pravougaoni trakasti ili žičani uzemljivač.

Oznake imaju sledeće značenje:



Slika 7.22: Uzemljivač u obliku kružnog prstena (levo) i pravougaoni trakasti ili žičani uzemljivač (desno)

D - prečnik prstena, koji je jednak D_{ekv} u izrazu 7.64,

a i b - dimenzije pravougaonika od trake ili žice koji čini uzemljivač,

A - površina pravougaonika $A = a \times b$.

Mrežasti uzemljivač

U slučaju mrežastog uzemljivača koristi se sledeća empirijska relacija:

$$R_{uz} = \frac{\rho}{2D_{ekv}} \text{ gde je } D_{ekv} = 1.13 \cdot \sqrt{A} \quad (7.65)$$

Pločasti uzemljivač

Za pločasti uzemljivač u obliku pravougaonika, čije su stranice dužine a i b , otpornost rasprostiranja je:

$$R_{uz} = \frac{\rho}{4.5\sqrt{a \cdot b}} \quad (7.66)$$

Temeljni uzemljivaci

Temeljni uzemljivači ugrađeni su u betonske temelje objekta. Velika prednost temeljnih uzemljivača sastoji je u tome što se nalaze u betonu, koji ih štite od korozije, pa je njihovo vreme trajanja praktično neograničeno. Temeljni uzemljivač omogućava pouzdan kontakt uzemljivača sa tlom. Promena uslova kao što je vlažnost tla ili eventualno površinsko zaleđivanje tla ne utiču na otpornost rasprostiranja. Temeljni uzemljivač se ugrađuje u spoljašnje zidove temelja objekta u obliku zatvorene konture. Kod većih objekata se ugrađuju i u poprečne unutrašnje zidove objekta.

Kod proračuna otpora rasprostiranja temeljnog uzemljivača razmatra se ukupna zapremina razmatranog temelja V u obliku polusfere u zemlji. Izraz za otpor rasprostiranja uzemljivača ima oblik prema [47]:

$$R_{uz} = \frac{\rho}{\pi D_{ekv}} \quad (7.67)$$

gde je:

$$D_{ekv} = 1.56 \cdot \sqrt[3]{V} \quad (7.68)$$

Sve predhodne formule odnose se na homogeno tlo i otpornost rasprostiranja u ustaljenom režimu. Sve formule su približne, jer nema smisla insistirati na tačnosti formula, kada se tlo modeluje da je idealno homogeno. U realnosti tlo ne može biti idealno homogeno, a specifična otpornost tla se menja u zavisnosti od meteoroloških prilika, pre svega od vlažnosti tla.

7.4.2 Udar na impedansa uzemljenja

Proračun udarnih karakteristika uzemljivača predstavlja složen problem zbog velikog broja različitih faktora koji na njih utiču. Najvažniji uticaj na ove karakteristike imaju konstruktivni parametri uzemljivača, električne karakteristike tla, kao i oblik, amplituda i mesto injektiranja strujnog impulsa.

a) Definicija udarnih karakteristika uzemljivača

Ponašanje uzemljivača prilikom odvođenja struje groma definisano je njegovim udarnim karakteristikama. Injektiranje udarne struje u uzemljivač dovodi do pojave vremenski promenljivih napona i struja duž uzemljivača.

Udar na impedansa uzemljivača određuje se kao odnos napona u čvoru u koji se uvodi struja i injektirane struje:

$$z(t) = \frac{u(t)}{J_g(t)} \quad (7.69)$$

gde su:

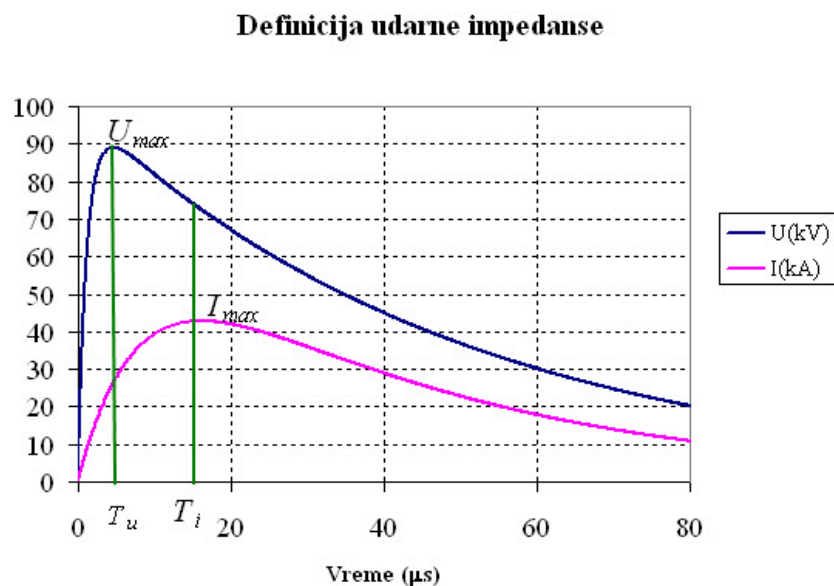
t – posmatrani vremenski trenutak,

$u(t)$ – napon na mestu injektiranja u trenutku t ,

$J_g(t)$ – udarna struja koja se uvodi u uzemljivač,

$z(t)$ – udarna impedansa uzemljivača u trenutku t .

Udarna impedansa uzemljivača definisana izrazom 7.69 predstavlja vremenski promenljivu veličinu. Na slici 7.23 prikazani su vremenski tokovi struje groma koja se uvodi u uzemljivač i napona na mestu injektiranja.



Slika 7.23: Definicije udarne impedanse u odnosu na udarnu struju koja se uvodi u uzemljivač i odziva uzemljivača

Oznake na slici 7.23 imaju sledeće značenje:

U_{max} – maksimalna vrednost napona na mestu injektiranja,

T_u – trenutak maksimalne vrednosti napona,

T_i – trenutak maksimalne vrednosti struje,

I_{max} – maksimalna vrednost struje groma,

i –talasni oblik injektirane struje groma,

u –talasni oblik napona na mestu injektiranja struje groma.

Definišemo sledeće veličine:

I_{T_u} – vrednost struje groma u trenutku maksimalne vrednosti napona na mestu injektiranja,

U_{Ti} – vrednost napona na mestu injektiranja u trenutku maksimalne vrednosti struje na mestu injektiranja u uzemljivač.

U projektantskoj praksi često se koristi pojam konvencionalne impedanse uzemljivača Z_k . U literaturi se mogu sresti tri definicije ove karakteristične veličine uzemljivača. Prema prvoj definiciji konvencionalna impedansa uzemljivača predstavlja odnos napona na mestu injektiranja i injektirane struje u trenutku kada injektirana struja dostiže maksimalnu vrednost [43]:

$$Z_k = \frac{U_{Ti}}{I_{max}} \quad (7.70)$$

gde su:

Z_k – konvencionalna impedansa uzemljivača. slici 7.23.

Prema drugoj definiciji konvencionalna impedansa uzemljivača predstavlja odnos napona na mestu injektiranja i injektirane struje u trenutku kada napon na mestu injektiranja dostiže maksimalnu vrednost:

$$Z_k = \frac{U_{max}}{I_{Tu}} \quad (7.71)$$

Oznake u izrazu 7.71 su objašnjene na slici 7.23. Prema trećoj definiciji konvencionalna impedansa uzemljivača predstavlja odnos maksimalnih vrednosti napona na mestu injektiranja i maksimalne vrednosti injektirane struje:

$$Z_k = \frac{U_{max}}{I_{max}} \quad (7.72)$$

Danas je prihvaćen postupak proračuna konvencionalne impedanse uzemljivača prema izrazu 7.72 zbog jednostavnosti proračuna. Za određivanje konvencionalne impedanse uzemljivača, prema ovom izrazu, dovoljno je poznavati samo maksimalne vrednosti napona na mestu uvođenja struje u uzemljivač i maksimalne vrednosti injektirane struje.

Odnos udarne impedanse uzemljivača i stacionarne otpornosti rasprostiranja predstavlja impulsni (udarni) koeficijent uzemljivača:

$$\alpha(t) = \frac{z(t)}{R_S} \quad (7.73)$$

gde su:

$z(t)$ – udarna impedansa uzemljivača definisana izrazom 7.69,

R_S – stacionarna otpornost rasprostiranja uzemljivača,

$\alpha(t)$ - udarni koeficijent uzemljivača u vremenskom trenutku t .

Udarni koeficijent uzemljivača određuje se kao odnos konvencionalne impedanse uzemljivača i stacionarne otpornosti rasprostiranja [43]:

$$\alpha_k = \frac{Z_k}{R_S} \quad (7.74)$$

gde su:

Z_k – konvencionalna impedansa uzemljivača,

R_S – stacionarna otpornost rasprostiranja uzemljivača,

α_k – udarni koeficijent uzemljivača.

Udarni koeficijent uzemljivača je izuzetno značajna veličina za inženjersku praksu, jer na jednostavan način uvažava promenu impedanse uzemljivača pri proticanju udarne struje.

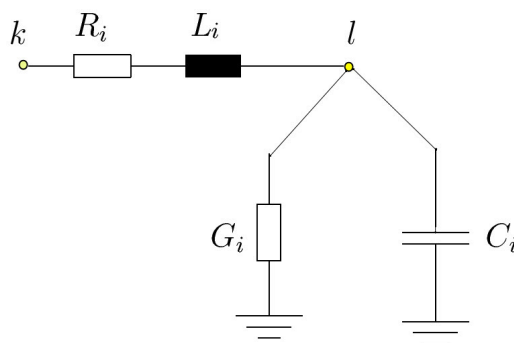
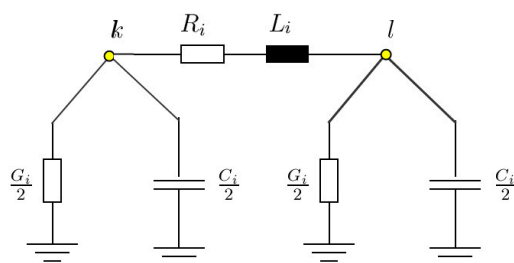
Koeficijent α_k može biti veći od 1 ili manji od 1 u zavisnosti od efekata koji izazivaju frekvencijsku zavisnost impedanse uzemljenja. Efekti koji izazivaju frekvencijsku zavisnost impedanse uzemljenja su sledeći:

- induktivni efekat dugačkih provodnika uzemljivača,
- efekat jonizacije tla u slučaju velike specifične otpornosti tla,
- površinski efekat koji utiče na raspodelu struje koja otiče sa uzemljivača u slučaju udarnih struja, kada je u pitanju višeslojno tlo različitih specifičnih otpornosti slojeva.

b) Induktivni efekat dugačkih provodnika uzemljivača

Induktivni efekat je izražen kod dugačkih trakastih uzemljivača. On se može objasniti jednim od načina modelovanja uzemljivača u prelaznom periodu [43]. Svaki uzemljivač se može rastaviti na određen broj pravolinijskih elemenata. Svaki pravolinijski element se može modelovati koncentrisanim parametrima pomoću odgovarajuće zamenske šeme (Γ , Π , T - šema).

Na slici 7.24 je prikazan uzemljivač, čiji je i -ti element koji je dat krajnjim čvorovima k i l , modelovan obrnutom Γ - šemom.

Slika 7.24: Obrnuta Γ – šema elementa uzemljivačaSlika 7.25: Zamenska Π – – šema deonice uzemljivača

Na slici 7.25 prikazana je zamenska Π šema grane uzemljivača.

Na slici 7.26 prikazana je zamenska T šema grane uzemljivača.

Oznake na slikama imaju sledeće značenje:

R_i - redna otpornost elementa,

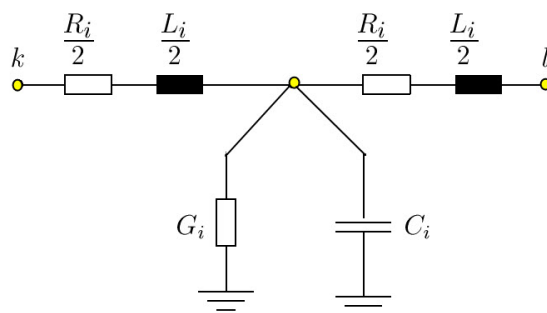
L_i - sopstvena induktivnost elementa,

G_i - provodnost elementa prema referentnoj zemlji,

C_i - kapacitivnost elementa prema referentnoj zemlji.

Parametri uzemljivača se mogu modelovati kao frekventijski nezavisni ili frekventijski zavisni. Pri tome, u zavisnosti od strukture tla u koje je uzemljivač položen, potrebno je obuhvatiti slučajeve jednoslojnog i dvoslojnog tla. Višeslojna struktura tla se dovoljno tačno može svesti na dvoslojnu strukturu tla.

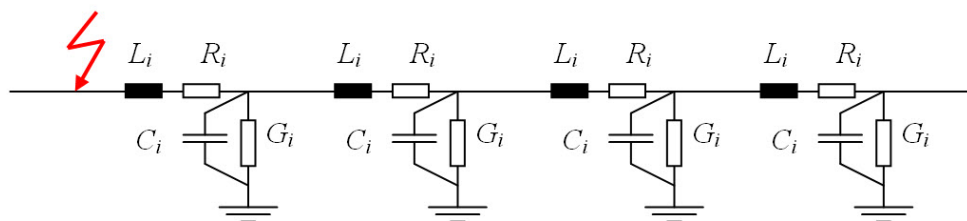
Kapacitivnosti u zamenskoj šemi se najčešće mogu zanemariti, jer imaju uticaj samo pri jako visokim učestanostima. Pri nižim učestanostima dominantnu ulogu imaju serijski



Slika 7.26: T – šema elementa uzemljivača

induktiviteta L_i i odvodnosti prema referentnoj zemlji G_i . Serijske otpornosti provodnika R_i uzemljivača se mogu zanemariti.

Na slici 7.27 prikazan je horizontalni linijski uzemljivač predstavljen koncentrisanim rednim induktivitetima L_i rednim otpornicima R_i , otočnim odvodnostima G_i i kapacitivnostima C_i .



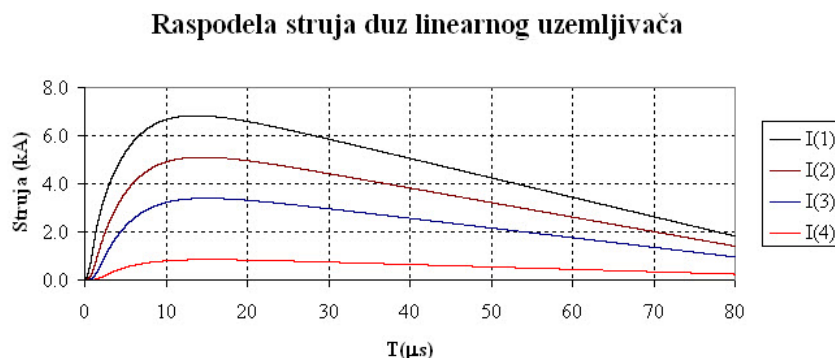
Slika 7.27: Zamenska šema horizontalnog linijskog uzemljivača predstavljenog koncentrisanim parametrima

Na slici 7.28 prikazani su talasni oblici struja duž pravolinijskog trakastog uzemljivača dužine $l=40$ m u tlu specifične otpornosti $\rho = 100 \Omega$ na dubini ukopavanja 0.5 m. U oznaci za struju $I(i)$ indeksi $i = 1, 2, 3, 4$ označavaju redni broj elementarne deonice od mesta injektiranja struje.

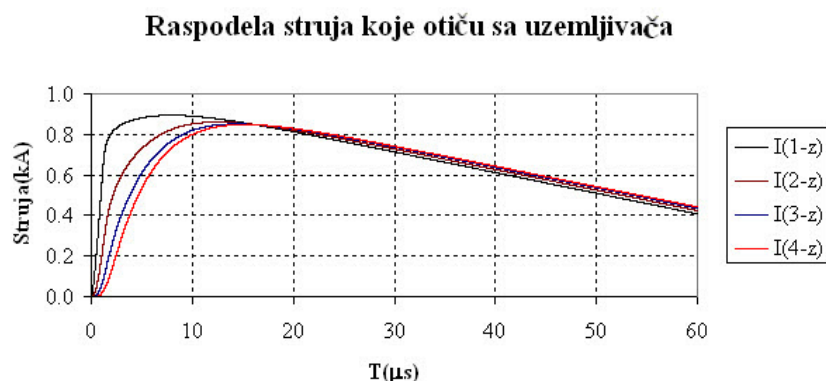
Na slici 7.29 prikazani su talasni oblici struja koje otiču kroz koncentrisane omske otpore prema referentnoj nuli sa istog pravolinijskog trakastog uzemljivača. Oznake imaju isto značenje.

Može se uočiti da se amplituda struje duž linearnog uzemljivača smanjuje, ali je struja odvođenja gotovo identična duž celog uzemljivača zbog toga što je induktivni i omski pad napona duž linearnog uzemljivača vrlo mali.

Izvršena je analiza uticaja dužine pravolinijske uzemljivačke trake kada se injektiranje struje vrši na jednom kraju trake, pri različitim specifičnim otporima tla. Rezultati analize su prikazani na slici 7.30.



Slika 7.28: Talasni oblici struja duž deonice pravolinijskog trakastog uzemljivača u zavisnosti od posmatrane deonice u odnosu na tačku udara



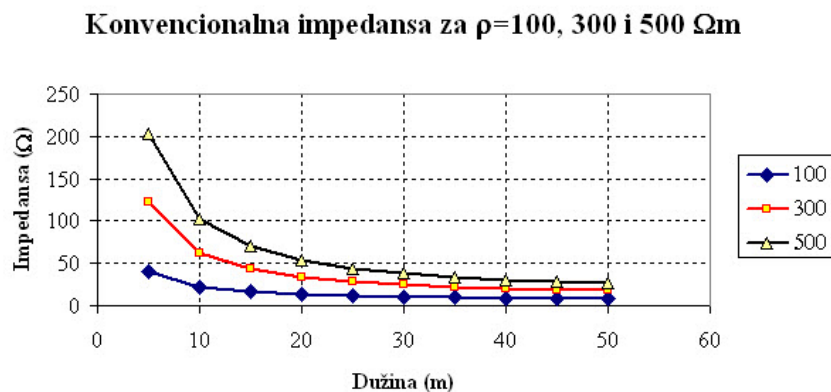
Slika 7.29: Talasni oblici struja koje otiču sa pravolinijskog trakastog uzemljivača

Na osnovu dobijenih rezultata prema slici 7.30 se može uočiti da dužine traka igraju ulogu samo za dužine do 30 m, a preko tih dužina produžavanje traka ima mali efekat.

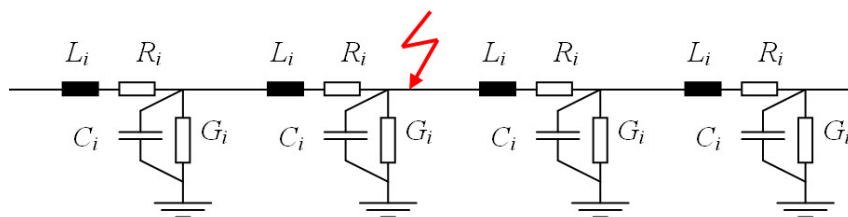
Preporučuje se da se koriste najmanje dve uzemljivačke trake od mesta injektiranja struje groma, pa je napravljen model kao na slici 7.31 na osnovu koga je ispitan uticaj mesta injektiranja struje.

Izvršeno je upoređivanje impulsne impedanse uzemljivača za slučaj kada je uzemljivač sastavljen od jedne trake u koju se injektira struja na jednom kraju i od iste trake kada se struja injektira u sredini trake. Izvršeno je variranje dužine uzemljivača simetrično u odnosu na tačku injektiranja. Upoređenje je izvršeno za specifičnu otpornost zemlje od $500 \Omega\text{m}$ i $100 \Omega\text{m}$. Na slici 7.32 prikazani su grafički rezultati proračuna za identičnu ukupnu dužinu trake, kada se injektira u sredinu pa se odvodi sa dve trake levo i desno, ili kada se injektira na kraj trake, pa je odvođenje sa jedne trake.

Može se uočiti da u slučaju malog specifičnog otpora tla postoje značajna prednost



Slika 7.30: Uticaj dužine pravolinijske uzemljivačke trake na impulsnu impedansu uzemljivača

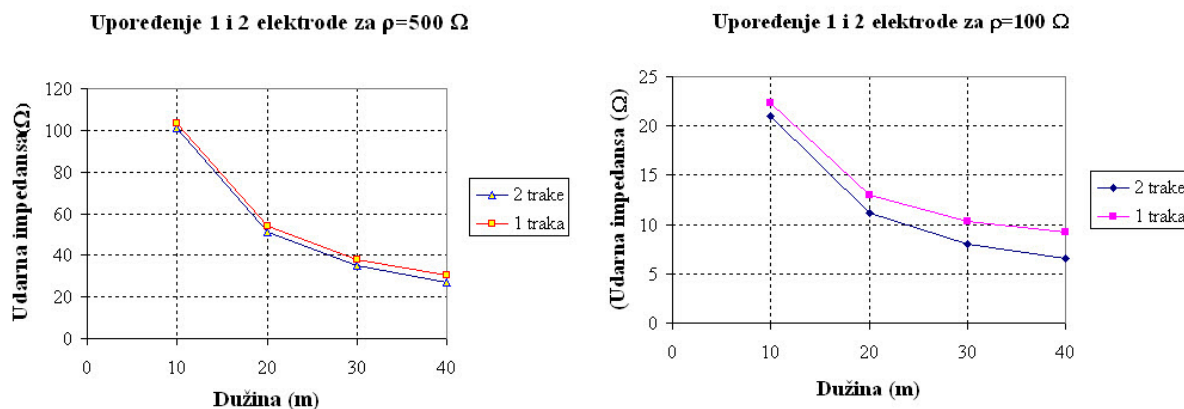


Slika 7.31: Model pravolinijskog trakastog uzemljivača sa koji se sastoji od dve grane od mesta priključka spusnog provodnika

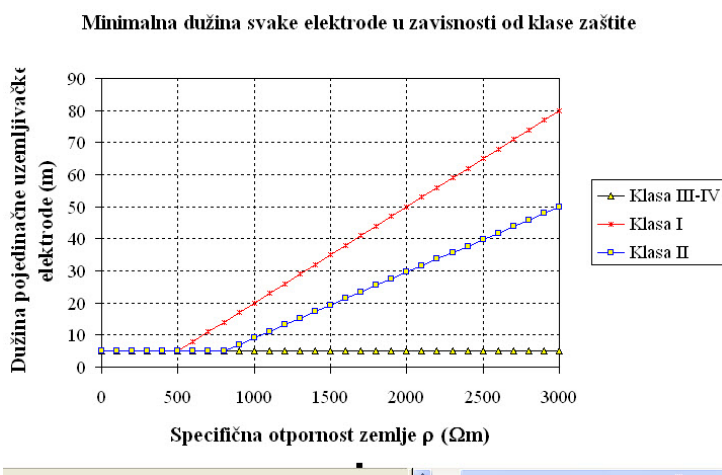
kada se struja dovodi na sredinu trake, dok su u slučaju velike specifične otpornosti tla te razlike značajno manje.

Prema međunarodnom standardu usvojenom u našoj zemlji [17], zavisnost minimalnih dozvoljenih pojedinačnih uzemljivačkih elektroda od specifičnog otpora tla za potrebe gromobranske zaštite je data na slici 7.33. Prema standardu, neophodno je za gromobransku zaštitu da postoje bar 2 elektrode koje odvede struju sa mesta injektiranja. Pod klasom gromobranske zaštite LPL (Lightning Protection Level) podrazumeva se stepen zaštite koji zavisi od važnosti objekta, odnosno od dozvoljenog rizika oštećenja elemenata objekta.

U Tabeli 7.1 prikazana je podela prenaponske zaštite na klase prema prihvatljivoj verovatnoći kvara usled udara groma.



Slika 7.32: Grafičko upoređenje proračuna kada se koristi traka sa injektiranjem struje na sredini (2 trake) ili na jednom kraju (jedna traka)



Slika 7.33: Minimalna dužina pojedinačnog uzemljivača u funkciji specifičnog otpora tla i zahtevane klase gromobranske zaštite

Tabela 7.1: Podela prenaponske zaštite na klase prema prihvatljivoj verovatnoći kvara usled udara groma

Karakteristika objekta	klasa zaštite LPL	Verovatnoća oštećenja
Bez zaštite	-	1
Postoji zaštita	IV	0.2
	III	0.1
	II	0.05
	I	0.02

c) Modelovanje jonizacije tla

U predelima velike specifične otpornosti tla, posebno u kamenitim oblastima, javlja se proces jonizacije tla, posebno u vazдушnim šuplinama. Ako se uvaži jonizacija tla, otpornost rasprostiranja uzemljivača zavisi od amplitude struje koja se sa uzemljivača odvodi u tlo. Izrazi po kojima se računa otpornost rasprostiranja uzemljivača sa prisustvom jonizacije dati su u standardu [13].

Otpornost rasprostiranja se računa na sledeća dva načina, u zavisnosti kolika je struja kroz uzemljivač:

a) Ako je struja kroz uzemljivač manja od granične pri kojoj dolazi do jonizacije $I < I_g$, otpornost je jednaka stacioarnoj otpornosti pri struji pogonske učestanosti od 50 Hz (R_o):

$$R = R_o \quad (7.75)$$

b) Ako je struja kroz uzemljivač veća od granične pri kojoj dolazi do jonizacije $I \geq I_g$, otpornost se računa prema sledećem izrazu:

$$R(I) = \frac{R_o}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}} \quad (7.76)$$

I_g je granična struja u kA pri kojoj dolazi do jonizacije, koja se računa prema izrazu:

$$I_g = \frac{E_o \cdot \rho}{2\pi \cdot R_o^2} \quad (7.77)$$

E_o je jonizacioni gradijent za koji se uzima vrednost 400 kV/m,

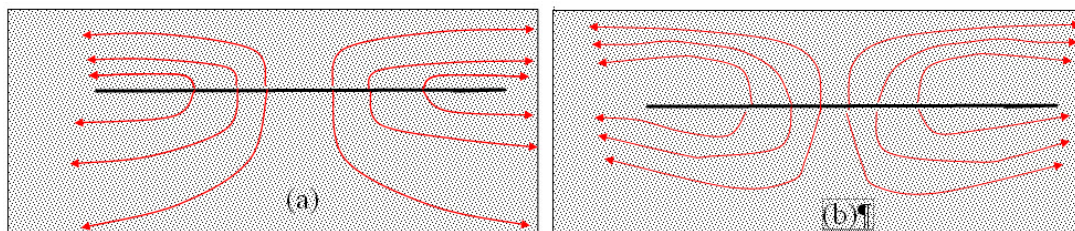
ρ je specifična otpornost tla u kome se nalazi uzemljivač.

Izraz 7.76 je predložen pre više od 30 godina. Zbog složenog postupka eksperimentalnog istraživanja ima vrlo malo rezultata koji bi doprineli razvoju tačnijem modela uzemljivača u uslovima jonizacije.

d) Objašnjenje uticaja višeslojnog tla na udarni koeficijent

Na ovom mestu će biti fizički objašnjeni uticaji povišene frekvencije pri homogenom i višeslojnom tlu.

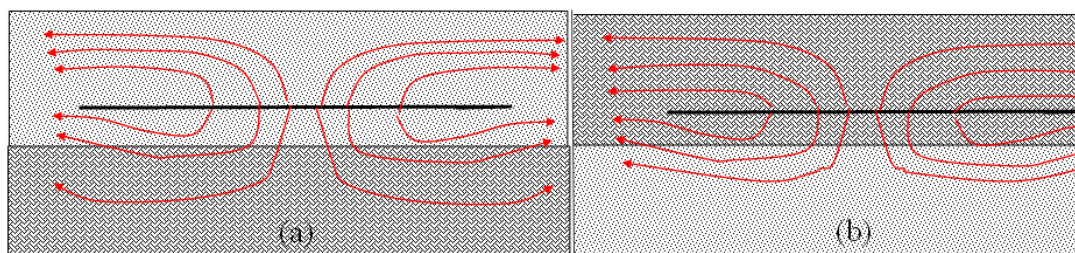
Na slici 7.34 skicirane su strujnice oko trakastog uzemljivača u homogenom tlu pri industrijskoj frekvenciji, slika (a) i pri udarnoj struji, slika (b).



Slika 7.34: Skica strujnica oko trakastog uzemljivača u homogenom tlu pri industrijskoj frekvenciji, slika (a) i pri udarnoj struji, slika (b)

Pri nižim frekvencijama strujnice teže da se ravnomerno rasporede po dubini zemlje 7.34 slika (a), dok se pri udarnim strujama strujnice sabijaju bliže površini zemlje usled površinskog efekta - slika (b). To izaziva porast udarne impedanse uzemljivača u odnosu na stacionarnu vrednost, odnosno udarni koeficijent je veći od 1.

Na slici 7.35 skicirane su strujnice oko trakastog uzemljivača u nehomogenom tlu kada je površinski sloj manje specifične otpornosti (humus), a dublji sloj je kamenit 7.35 slika (a). Na slici 7.35 (b) desno gonji sloj je lošije provodljiv (suva zemlja ili pesak), a donji sloj provodljiviji (vlažna podloga zbog podzemnih voda).



Slika 7.35: Skica strujnica oko trakastog uzemljivača u nehomogenom tlu pri udarnoj struji, kada je površinski sloj provodljiviji - slika (a) i pri udarnoj struji kada je dublji sloj provodljiviji, slika (b)

Na slici 7.35 (a) veći broj strujnica sabijen je u površinskom sloju koji je manje otpornosti, pa je impulsna impedansa uzemljenja manja od stacionarne vrednosti kada su strujnice ravnomerno raspoređene po oba sloja. Naprotiv, kada je donji sloj zemlje ispod uzemljivačke trake znatno većeg specifičnog otpora (kamenito zemljište), a gornji sloj se sastoji od dobro provodnog zemljišta (humus), strujnice se sabijaju u prostoru bolje provodnog tla ispod površine, gde inače strujnice teže da se koncentrišu zbog površinskog efekta, pa je udarni koeficijent manji od 1. Veća gustina strujnica pri višim učestanostima nastaje tamo gde ih površinski efekat potiskuje, u odnosu na nisku frekvenciju, kada bi se strujnice raspoređivale ravnomerno i kroz gonji i kroz donji sloj.

Naprotiv, na slici 7.35 (b) se može uočiti da se veći broj strujnica sabija u slabije provodljivom površinskom sloju, pa je impulsna impedansa uzemljenja veća od stacionarne vrednosti (udarni koeficijent veći od 1).

7.5 Model preskoka na vazdušnoj izolaciji

Preskoci na dalekovodima se dešavaju usled delovanja tri vrste prenapona:

- prenaponi industrijske učestanosti,
- sklopni udarni naponi,
- atmosferskih udarni naponi.

Za sve tri vrste prenapona koriste se različiti modeli preskoka. Napon industrijske učestanosti je od značaja prilikom analize privremenih prenapona, posebno u slučaju kada izolacija radi u uslovima zagađene atmosfere. Udarne sklopni prenaponi su kritični za dimenzionisanje izolacije na dalekovodima veoma visokih nazivnih napona (engl. Extra High Voltages - EHV od 550 kV do 1000 kV i Ultra High Voltages - UHV preko 1000 kV). Udarne atmosferski prenaponi su od značaja za mreže niskih, srednjih i visokih napona u opsegu nazivnih napona od 0.4 kV do 400 kV. Udarne atmosferski prenaponai, kao i neki tipovi sklopnih i privremenih prenapona mogu biti od značaja u telekomunikacionim žičanim mrežama. Danas se uglavnom koriste optičke mreže u telekomunikacijama, tako da je taj problem eliminisan.

Određivanje preskočnog napona pri delovanju udarnih atmosferskih i sklopnih napona je složen zadatak jer udarni preskočni napon zavisi od velikog broja faktora od kojih su najvažniji:

- talasni oblik i polaritet napona,
- strmina čela talasa napona,
- oblik elektroda,
- slučajno rasipanje preskočnih napona,
- atmosferski uslovi.

Za matematičko modelovanje vremena do preskoka na vazdušnoj izolaciji dalekovoda prilikom delovanja udarnih atmosferskih prenapona najčešće se koriste sledeće tri metode:

1. metoda volt - sekundne krive izolacije (V-t karakteristika),
2. metoda destruktivnog efekta, odnosno metoda kritične površine kao pojednostavljene metode destruktivnog efekta,

3. metoda progresivnog lidera.

Upotreba ove tri metode se predlaže u [6], [8] i [13].

7.5.1 Metoda volt - sekundne krive izolacije (V-t karakteristika izolacije)

Metoda volt - sekundne preskočne krive izolacije u vazduhu je najstarija, prihvaćena [26] kao preporučeni model. Po ovoj metodi zavisnost preskočnog napona od vremena do preskoka se određuje eksperimentalno za određenu elektrodnu konfiguraciju u vazduhu na taj način što se izolaciona struktura ispituje udarnim naponom uvek istog oblika, ali različite amplitude talasa. Na taj način se dobijaju talasi istog oblika, ali različite strmine čela. Kada se izolaciona struktura ispituje serijom talasa različite amplitude, dobija se preskočni napon u funkciji strmine talasa. Ono što se mora naglasiti je da se metoda volt - sekundne preskočne krive izolacije primenjuje samo za jedan nepromenljiv oblik talasa (na primer kod visokonaponskih mreža za atmosferskih udarni napon standardnog oblika $1,2/50 \mu s$). Ukoliko bi se primenio drugačiji talas, metoda gubi na tačnosti. Pri atmosferskim pražnjenjima u nadzemne vodove, posebno kada se događaju višestruke refleksije u sistemu, talasni oblik napona koji napreže izolaciju odstupa od standardnog atmosferskog napona kojim se vrši ispitivanje izolacije opreme u laboratorijskim uslovima, tako da se metoda V-t karakteristike može smatrati grubom aproksimacijom. Princip formiranja volt-sekundne karakteristike ilustrovan je na slici 7.36.

Oznake na slici 7.36 imaju sledeće značenje:

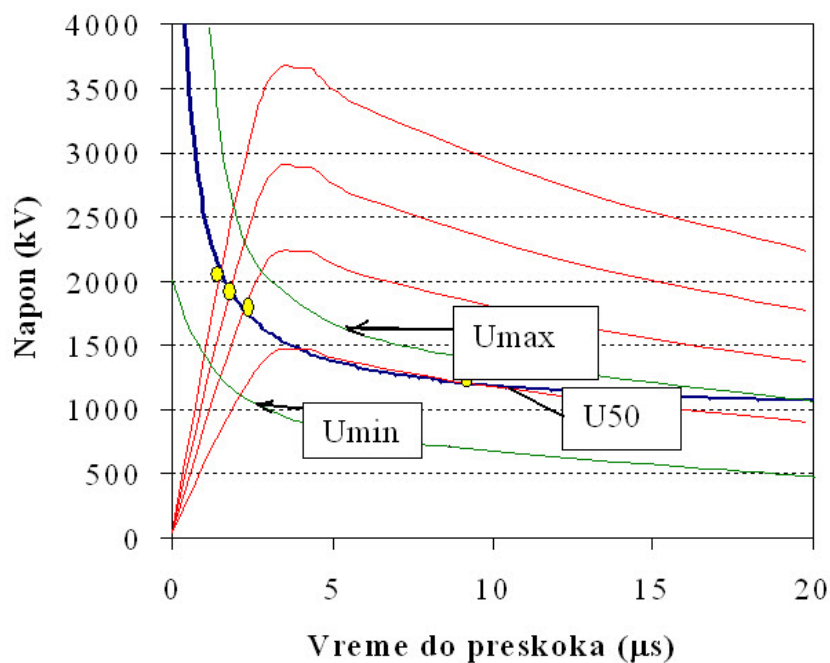
U_{50} –označava krivu 50% preskočnog napona u funkciji vremena do preskoka,

U_{min} –označava krivu podnosivog napona ispod koje nikada ne dolazi do preskoka,

U_{max} –označava krivu 100% preskočnog napona iznad koje uvek dolazi do preskoka.

U procenama godišnjeg broja preskoka na dalekovodima se često zanemaruje slučajna priroda preskoka, već se smatra da za vrednost napona ispod 50% preskočnog napona nema preskoka, a iznad tog napona se preskok uvek događa.

Drugi prilaz, koji daje kritičnije rezultate, radi sa podnosivim naponom izolacije U_{min} kao graničnim naponom ispod koga ne dolazi do preskoka, a svaka pojava napona iznad ovog napona izaziva preskok na izolaciji. Ovo je pesimistički pristup koji daje najkritičnije rezultate.



Slika 7.36: Dobijanje volt-sekundne karakteristike izolacije u vazduhu

Volt-sekundna karakteristika je data u analitičkom obliku kao hiperbolička funkcija prema [1] sledećom relacijom:

$$U(t) = K_1 + \frac{K_2}{t^{A_n}} \quad (\text{kV}) \quad (7.78)$$

gde se prema [1] preporučuju sledeće vrednosti empirijskih konstanti K_1 , K_2 i A_n :

$$K_1 = 400d \quad (7.79)$$

$$K_2 = 710d \quad (7.80)$$

$$A_n = 0.75 \quad (7.81)$$

u kojima d predstavlja međuelektrodni razmak u [m].

Ukoliko se raspolaze eksperimentalnim rezultatima, tada se mogu za određenu dispoziciju elektroda odrediti konstante K_1 i K_2 tako da se dobije analitička funkcija koja reprezentuje eksperimentalnu zavisnost. Dovoljno je raspolagati sa preskočnim naponima $U(t_1)$ i $U(t_2)$ u dva vremenska trenutka t_1 i t_2 .

$$U(t_1) = K_1 + \frac{K_2}{t_1^{A_n}} \quad (7.82)$$

$$U(t_2) = K_1 + \frac{K_2}{t_2^{A_n}} \quad (7.83)$$

Rešavanjem gornjeg sistema jednačina po K_1 i K_2 se dobija:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{U_1 \cdot t_1^{A_n} - U_2 t_2^{A_n}}{t_1^{A_n} - t_2^{A_n}} \\ K_2 &= \frac{U(t_1) - U(t_2)}{t_1^{-A_n} - t_2^{-A_n}} \end{aligned} \quad (7.84)$$

Poželjno je da prvi vremenski trenutak odgovara vremenu do preskoka primenom vrlo strmih talasa, na primer od $1-3 \mu s$, a da drugi vremenski trenutak odgovara vremenu do preskoka pri dejstvu sporih talasa, na primer $10-20 \mu s$.

Izraz 7.78 je najstariji model preskoka na vazdušnoj izolaciji, pa je iz tog razloga i najviše korišćen. Postoje rezultati eksperimentalnih istraživanja na izolatorskim lancima koji su bili snabdeveni zaštitnim armaturama, [30] koji mogu biti podloga za proračune.

7.5.2 Metoda destruktivnog efekta

Glavno ograničenje u primeni volt-sekundne karakteristike je što je ona kalibrisana za primenu talasa standardnog oblika (u slučaju atmosferskih prenapona $1.2/50 \mu s$). U slučaju nestandardnih oblika udarnih talasa, za svaki oblik talasa bi bilo potrebno izvršiti eksperimentalna istraživanja i odrediti druge koeficijente koji definišu krivu. Pri atmosferskim praznjenjima u stub po pravilu se javljaju nestandardni oblici talasa. Zbog toga je razvijena metoda koja se može primenjivati i u slučaju nestandardnih talasa, kod koje preskočni napon ne zavisi samo od visine napona, već i od vremena delovanja napona. Metoda koja omogućava modelovanje preskoka pri primeni nestandardnih napona koji nisu oscilatorni, prikazana je u [31], [32], [33]. Ova metoda je data u analitičkom obliku u izrazu:

$$DE = \int_{t_o}^t [u(t) - U_o]^{k_d} dt \quad (7.85)$$

gde su:

$u(t)$ – vremenska funkcija primenjenog napona,

k_d – empirijska konstanta,

DE – destruktivni efekat, mera naprezanja izolacije,

t_o – trenutak kada primenjeni naponski talas prvi put pređe U_o ,

U_o minimalni napon koji dovodi do preskoka pri neograničeno dugom delovanju (jednosmerni preskočni napon).

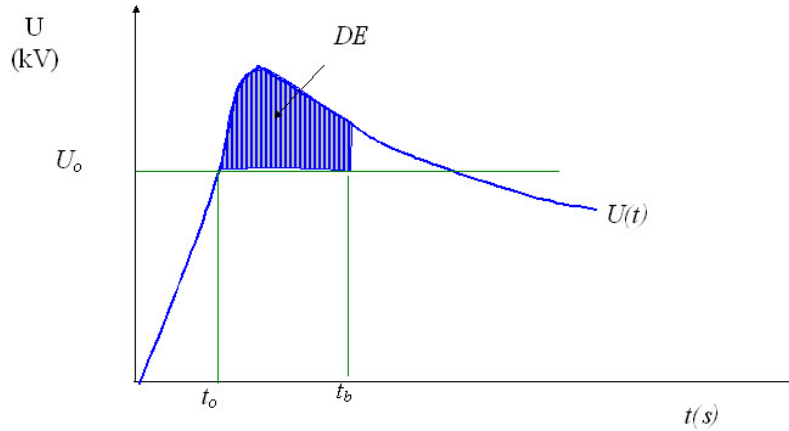
Kada DE postane veće od neke kritične vrednosti A_{crit} , dolazi do preskoka. Ako se to dogodi u trenutku t_b , tada je t_b trenutak uspostavljanja preskoka.

Kod metode destruktivnog efekta najveća teškoća je u određivanju empirijskih koeficijenata. Značajno uprošćenje se može postići kada se usvoji da je koeficijent $k_d=1$, kao u izrazu:

$$DE = \int_{t_o}^t [u(t) - U_o] dt \quad (7.86)$$

Oznake u izrazu 7.86 imaju identično značenje kao u 7.85.

Metodu destruktivnog efekta se u ovom slučaju zove metoda kritične površine, a grafička interpretacija metode prikazana je na slici 7.37.



Slika 7.37: Grafička interpretacija metode kritične površine

Na osnovu slike 7.37 se vidi da integral krive napona iznad minimalnog preskočnog napona predstavlja merilo naprezanja izolacije. Na slici je šrafirana površina između minimalnog preskočnog napona U_o i krive udarnog napona $u(t)$ iznad U_o merilo destruktivnog efekta DE . Kada se postigne u trenutku t_b da površina $DE > A_{crit}$, dolazi do preskoka.

Za praktičnu primenu usvojeni su izrazi za konstante u funkciji dužine razmaka prema [22] u sledećim okvirima:

$$\begin{aligned} U_o &= (435 \div 498) \times d \\ A_{crit} &= (380 \div 560) \times d \end{aligned} \quad (7.87)$$

Predlažu se koeficijenti koji su dobijeni laboratoriskim ispitivanjem izolacionih lanaca za 400 kV dalekovode [30] u sledećem obliku:

$$U_o = 495 \times d \quad (7.88)$$

$$A_{crit} = 520 \times d \quad (7.89)$$

gde je:

d - rastojanje između iskrišta (m),

A_{crit} - kritični destruktivni efekat ($\text{kV} \times \mu\text{s}$).

Izraz za proračun površine može se izraziti na sledeći način:

$$DE = \int_{t_o}^{t_{crit}} [u(t) - E_{crit} \cdot d] dt \quad (7.90)$$

gde je: E_{crit} kritično električno polje pri kome dolazi do preskoka pri jednosmernom naponu, $E_{crit} = 495 \text{ kV/m}$.

7.5.3 Metoda progresivnog lidera

Metoda progresivnog lidera bazira se na modelovanju stvarnih fizičkih procesa u među-elektrodnom prostoru za vreme delovanja udarnih naponskih talasa. Metoda je posebno pogodna za velike međuelektrodne razmake. Vreme koje je potrebno da bi se između elektroda javio preskok može se računati preko izraza 7.91:

$$T_t = T_C + T_S + T_L \quad (7.91)$$

gde je:

T_C - vreme razvijanja korone [μs], gde se pod koronom podrazumeva lokalna jonizacija vazduha u prostoru neposredno uz provodnik bez izraženog zagrevanja vazduha, sa impulsnim strujama amplitude ispod 1 mA,

T_S -vreme razvijanja strimera [μs], koji predstavljaju duže jonizovane svetleće kanale koji mogu biti dužine više santimetara, sa strujama koje ne zagrevaju prostor i deluju impulsno i same se gase bez obzira na prisustvo napona.

T_L - vreme razvijanja lidera [μs], koji predstavljaju jonizovane kanale sa značajnim strujama koje greju prostor i imaju tendenciju sa se produžavaju u skokovima. Struja lidera može biti od nekoliko od nekoliko A do više desetina A.

Prema [8] vreme T_C se najčešće može zanemariti. U skoro svim modelima koji se koriste se pretpostavlja da je faza razvijanja strimera završena kada jačina električnog polja dostigne vrednost E_0 [6], [34]. Trenutak kada jačina električnog polja dostigne

vrednost E_0 dobija se kao $T_C + T_S$. Zbog toga će se u proračunima smatrati da dok je jačina električnog polja u međuelektrodnom prostoru manja od E_0 nema pojave lidera, a kada jačina električnog polja prevaziđe vrednost E_0 lider počinje da se razvija brzinom v koja će kasnije biti definisana. Pri tome, ako u bilo kom trenutku jačina električnog polja padne ispod vrednosti E_0 smatra se da nema daljeg razvoja lidera i da njegova dužina ostaje konstantna sve dok vrednost električnog polja ne poraste iznad E_0 . Kada vrednost jačine električnog polja ponovo poraste iznad vrednosti E_0 lider nastavlja da se izdužuje.

Brzina razvijanja lidera između elektroda se može modelovati preko izraza 7.92 za manje vrednosti jačine električnog polja E_0 i za konfiguraciju elektroda šiljak-šiljak.

$$v = K \cdot d \left[\frac{u(t)}{x} - E_0 \right] \quad (7.92)$$

gde su:

K - empirijska konstanta $K = 400$,

d -rastojanje između elektroda izraženo u [m],

$u(t)$ vremenski promenljiv napon na razmaku elektroda [kV],

x -nepremošćeni deo razmaka elektroda [m],

E_0 -jačina električnog polja pri kojoj počinje razvoj lidera, preporučena vrednost je $E_0=545$ [kV/ m].

Za veće vrednosti električnog polja koristi se sledeći izraz:

$$v = K_L \cdot u(t) \left[\frac{u(t)}{x} - E_0 \right] \quad (7.93)$$

gde su:

K_L - empirijska konstanta $K_L = 0,7785$,

E_0 -jačina električnog polja pri kojoj počinje razvoj lidera, preporučena vrednost je $E_0=535$ [kV/ m].

Izraz 7.93 može se koristiti za izolatore za nadzemne vodove, sa vrednostima koje su date u tabeli 7.2, prema [6].

Najčešće korišćen izraz za proračun brzine razvoja lidera je:

Tabela 7.2: Vrednosti empirijskih konstanti za metodu progresivnog lidera prema izrazu 7.93

Oblik elektroda	Polaritet	$K_L[m^2/(kV^2s)]$	$E_0[kV/m]$
Potporni i štapni izolatori	+	0.8	600
	-	1	670
Kapasti izolatori	+	1.2	520
	-	1.3	600

$$v = K \cdot d \cdot \left[\frac{u(t)}{x} - E_0 \right] e^{K_1 \cdot u(t)/d} \quad (7.94)$$

gde je:

K empirijska konstanta, usvojena vrednost $K = 170$,

K_1 empirijska konstanta, usvojena vrednost $K_1 = 0.0015$,

Sušтина прораčuna је да се одреди брзина развјања лидера у појединим временским интервалима коришћењем неког од израза 7.92, 7.93 или 7.94. На основу брзине развјања лидера и протеклог времена одређује се издужење лидера у појединим корацима прораčuna. На основу издужења лидера у појединим временским периодима могуће је одредити укупну дужину лидера у датом моменту и одузимањем дужине лидера од дужине међuelektroдног растојања добија се нова вредност непремоштеног дела међuelektroдног простора x . Прораčун се наставља све док дужина лидера не постане једнака дужини међuelektroдног растојања, када се сматра да је дошло до прескока на изолацији.

У свим претходно дефинисаним изразима за прораčун брзине развоја прогресивног лидера, у међuelektroдном простору појављује се јачина електричног полја при којој почиње развој лидера, тзв. критична вредност јачине електричног полја (E_0). Одређивање вредности коефицијента E_0 није једноставно јер ова вредност зависи од конфигурације електрода, поларитета применјеног пренапонског таласа и растојања између електрода.

7.5.4 Vrednosti napona razornog pražnjenja

Pod razornim pražnjenjem se podrazumeva pojava da izolacija izgubi izolaciona svojstva prilikom delovanja napona višeg od određene vrednosti. Pri tome se trajan gubitak izolacionog svojstva naziva probojem i događa se kod čvrste izolacije. Taj tip izolacije nazivamo neobnovljivom izolacijom. U slučaju gasovitih ili tečnih dielektrika izolaciona svojstva se obnavljaju potpuno ili delimično i takve dielektrike nazivamo obnovljivim. Proces razornog pražnjenja u tom slučaju nazivamo preskokom.

Vrednost napona razornog pražnjenja ima slučajnu prirodu. Ponekad se pri procesu koordinacije izolacije slučajna priroda u statističkim proračunima uvažava, ali se značajno pojednostavljenje proračuna u tehničkim analizama postiže kada se definiše preskočni napon preko jedne reprezentativne vrednosti.

Prema obliku prenapona koji deluju na izolaciju prenaponi se dele na:

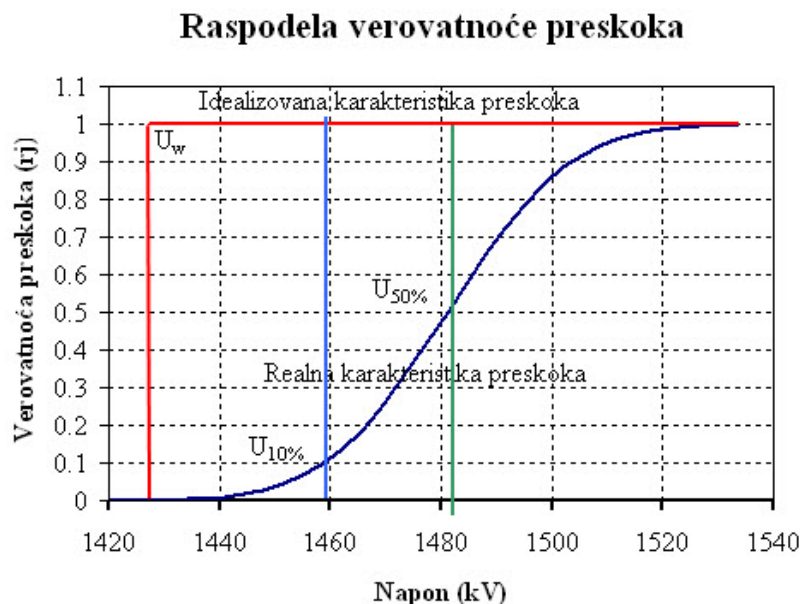
- prenapone dugog čela (sklopni prenaponi),
- prenapone kratkog čela (atmosferski prenaponi),
- prenapone vrlo kratkog čela (prenaponi unutar gasom izolovanih postrojenja usled sklopnih operacija).

Preskočni naponi zavise od oblika i strmine čela talasa atmosferskog pražnjenja. Pošto su naponi na izolaciji na stubovima nadzemnih vodova najčešće unipolarni (ne menjaju polaritet u toku delovanja), u laboratorijskim uslovima se simuliraju udarnim naponskim talasima veoma strmog čela koji postepeno opadaju na začelju. Standardni oblik ispitnog napona je sa trajanjem čela $T_f = 1.2 \mu s \pm 30\%$, a začelja (vremena da talas opadne na polovinu amplitude) $T_t = 50 \mu s \pm 20\%$.

Prema definiciji podnosivog napona [11], postoje dva tipa podnosivih napona:

- Konvencionalni podnosivi udarni naponi, koji podrazumevaju da je ukupan procenat razornih pražnjenja izolacije u odnosu na broj delovanja udarnih naponskih talasa nula. To znači da od ukupnog broja izlaganja ispitivanog objekta udarnim talasima, u 100 % slučajeva izolacija objekat mora da izdrži taj napon. Ovaj tip podnosivog napona se odnosi na neobnovljivu izolaciju kod koje je kvar izolacije trajan. Ovakav kvar nazivamo probojem izolacije.
- Statistički podnosivi napon je kada postoji određeni broj razornih pražnjenja koji se toleriše. U ovom slučaju radi se o samoobnovljivoj izolaciji kod koje se razorno pražnjenje definiše kao preskok. Preskok na izolaciji u vazduhu je slučajan proces koji se može definisati kumulativnim zakonom raspodele verovatnoće, kao na slici

7.38. Na istoj slici prikazana je vrednost podnosivog napona koja iznosi 1425 kV za mrežu nazivnog napona 400 kV.



Slika 7.38: Kriva verovatnoće preskoka sa definisanim pojedinim vrednostima preskočnih napona

Kriva 7.39 dobijena je na osnovu eksperimentalnog istraživanja u laboratoriji za visoki napon [30] za slučaj jednostrukog izolatorskog lanca od 19 članaka za mrežu 400 kV. Mogu se definišati sledeće vrednosti preskočnih napona:

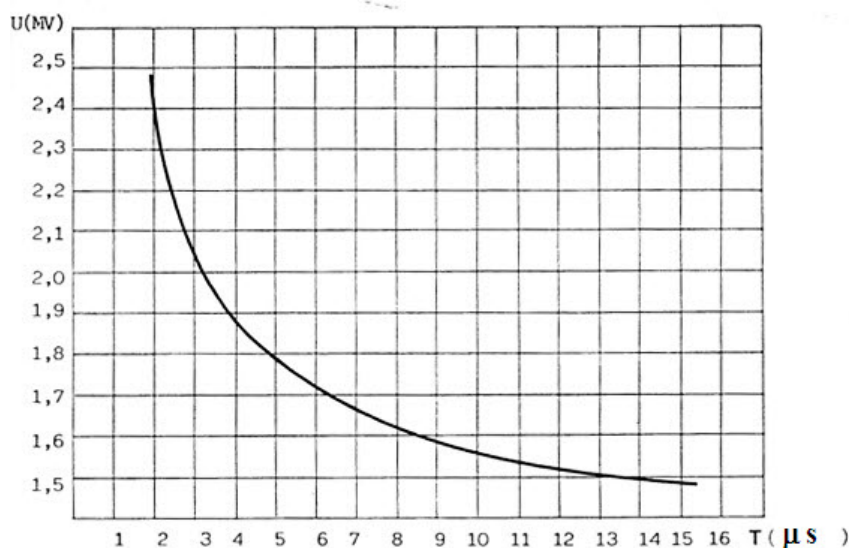
U_w -podnosivi napon, koji izolacija podnosi sa velikom verovatnoćom (dozvoljen je 1 preskok od 15 udara),

$U_{10\%}$ - napon koji izolacija podnosi u 10% udara, koji se naziva statistički podnosivi napon,

$U_{50\%}$ -napon koji izolacija podnosi u 50% udara,

$U_{90\%}$ - napon koji izolacija podnosi u 90% udara, koji se smatra preskočnim naponom.

Kriva 7.39 dobijena je na osnovu eksperimentalnog istraživanja u laboratoriji za visoki napon [30] za slučaj jednostrukog izolatorskog lanca od 19 članaka opremljenih zaštitnim armaturama, za mrežu 400 kV. Određen je podnosivi napon izolacije od $U_w = 1425$ kV pri kome nije bilo ni jednog preskoka, izmereni su još naponi $U_{10\%} = 1462$ kV, i $U_{50\%} = 1485$ kV. Standardno odstupanje preskočnog napona je $\sigma = 1.2\%$. Na osnovu tih podataka nacrtana je teorijska kriva 7.38 normalne raspodele verovatnoće sa parametrima raspodele koji su eksperimentalno određeni.



Slika 7.39: Eksperimentalno dobijena volt-sekundna preskočna karakteristika jednostrukog izolatorskog lanca sa 19 članaka

Oblik volt-sekundne krive zavisi od konstrukcije lanaca i broja članaka, ali generalno ima sličan oblik.

Eksperimentalna istraživanja preskočnih karakteristika su složena, dugotrajna i skupa. Zog toga se eksperimentalno dobijene krive mogu koristiti kao osnova za pravljenje matematičkih modela, koji se mogu kalibrisati pomoću dobijenih eksperimentalnih rezultata.

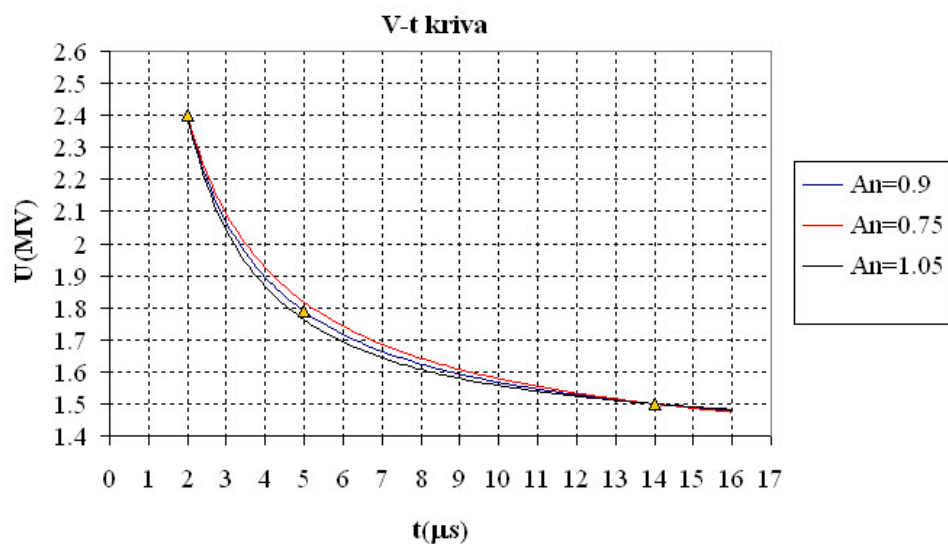
Rezultati istraživanja preskočnih napona sa slike 7.39 iz [30] iskorišćeni su za kalibraciju modela datog izrazom 7.78. Izračunati su koeficijenti koji definišu hiperboličnu funkciju na bazi dve zadate tačke koje su očitane sa dijagrama 7.39. Očitane tačke su date u tabeli 7.3. Proračunate V-t krive na osnovu 7.78 izračunate su za 3 vrednosti

Tabela 7.3: Očitane tačke sa eksperimentalne V-t krive

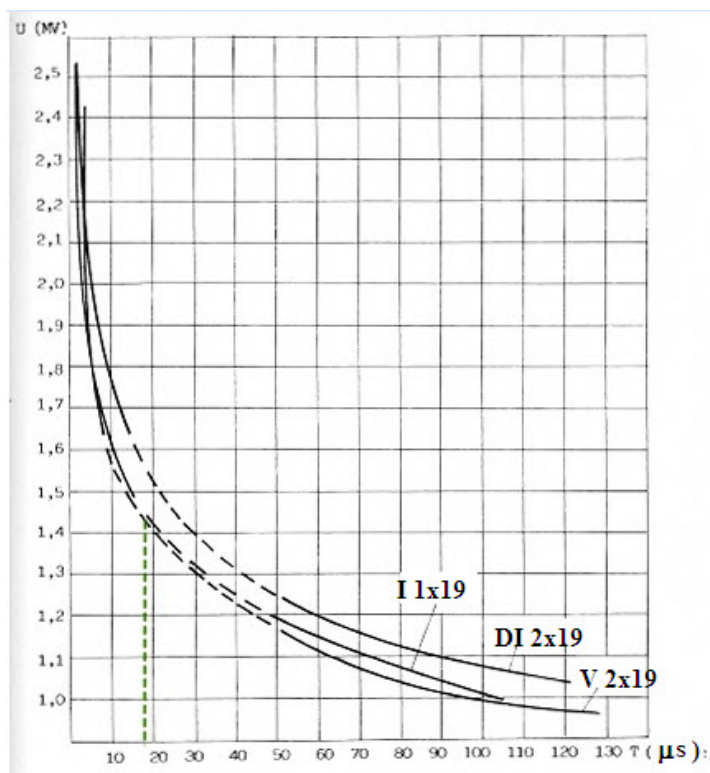
T(μs)	U(MV)
2	2.4
14	1.5

ekspozenta $A_n = 0.75$, $A_n = 0.9$ i $A_n = 1.05$. Upoređenjem dijagrama sa originalnom krivom zaključeno je da se najbolje slaganje krive sa slike 7.39 i izračunate krive dobija za $A_n = 0.9$. Izračunate krive su date na slici 7.40 za 3 vrednosti eksponenta A_n .

Na slici 7.41 prikazano je više eksperimentalno dobijenih V-t karakteristika za različite konstrukcije izolatorskih lanaca za 400 kV na osnovu eksperimentalnih istraživanja u laboratoriji za visoki napon koja su opisana u izveštaju [30].



Slika 7.40: Izračunate krive V-t karakteristika za 3 vrednosti eksponenta A_n



Slika 7.41: Više volt-sekundnih preskočnih karakteristika izolatorskih lanaca za 400 kV (I1x19 jednostruki labac, DI 2x19 dvostruki lanac, V 2x19 dvostruki lanac u V spoju od 19 članaka)

7.5.5 Rizik kvara izolacije

U praktičnoj primeni razlikujemo dva pojma koja se odnose na procenu ugroženosti izolacije:

- broj preskoka na 100 km voda, u slučaju analize nadzemnih vodova sa obnovljivom izolacijom,
- broj godina bez kvara izolacije, u slučaju kvarova izolacije uređaja, koja je neobnovljiva.

Rizik kvara određenog izolacionog elementa koji je izložen prenaponu prema zemlji računa se korišćenjem izraza:

$$R = \int_0^{\infty} f(U_n) \times P(U_n) dU_n \quad (7.95)$$

gde su:

$f(U_n)$ - gustina verovatnoće pojave prenapona,

$P(U_n)$ - kumulativna verovatnoća preskoka pri udarnom naponu vrednostu U .

U gornjem izrazu se koristi normalizovana vrednost prenapona, odnosno:

$$U_n = \frac{U - U_{mo}}{\sigma_U} \quad (7.96)$$

gde su:

U - vrednost prenapona u (kV)

U_n - normirani prenapon u (rj)

U_{mo} - matematičko očekivanje prenapona (kV),

σ_U - srednje kvadratno odstupanje (kV).

Srednje kvadratno odstupanje σ se daje najčešće u %, pa u tom slučaju važi:

$$\sigma_U = \frac{\sigma}{100} \times U_{mo}$$

gde je σ srednje kvadratno odstupanje prenapona izraženo u procentima.

7.5.6 Primer proračuna rizika

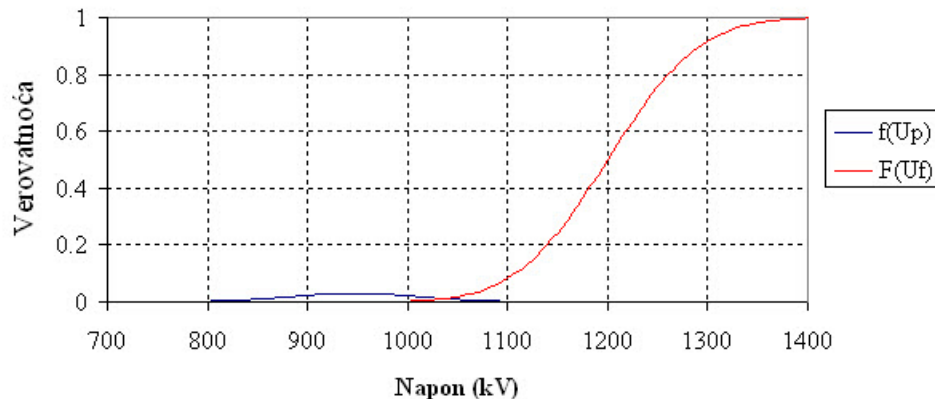
Izvršen je proračun rizika preskoka za sistem 400 kV, pri podacima datim u tabeli 7.4.

Tabela 7.4: Tabela podataka za proračun rizika preskoka

Naziv veličine	Oznaka	Vrednost
Očekivana vrednost prenapona	U_{mo} (kV)	950
Srednje kvadratno odstupanje prenapona	σ_p (%)	8
Očekivana vrednost preskočnog napona	U_f (kV)	1200
Srednje kvadratno odstupanje preskočnog napona	σ_f (%)	6

Na slici 7.42 prikazana je gustina raspodele prenapona $f(U_p)$ i kumulativna funkcija raspodele preskočnih napona $F(U_p)$ za 400 kV sistem u kome nastaju sklopni prenaponi, koji su po pretpostavci raspodeljeni po normalnom zakonu raspodele. Kumulativna funkcija verovatnoće preskoka prikazana je u punoj razmeri.

Proračun rizika preskoka na izolaciji usled sklopnih prenapona

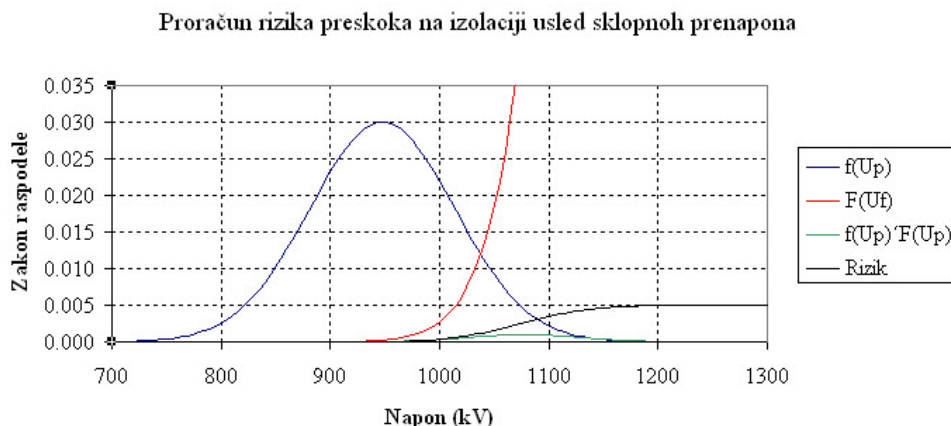


Slika 7.42: Gustina zakona raspodele prenapona $f(U_p)$ i funkcija verovatnoće u punoj razmeri

Na slici 7.43 prikazana je uvećana gustina raspodele, funkcija verovatnoće preskoka, kao i proizvod $f(U_p) \times F(U_p)$ i rizik preskoka izračunat po izrazu 7.95, koji predstavlja površinu ispod krive $f(U_p) \times F(U_p)$.

7.5.7 Sklopni preskočni napon

U slučaju sklopnih udarnih talasa kojima se ispituje izolacija za mreže visokih i vrlo visokih napona (400 kV i više), rastojanja između elektroda su veća, pa se mehanizam preskoka



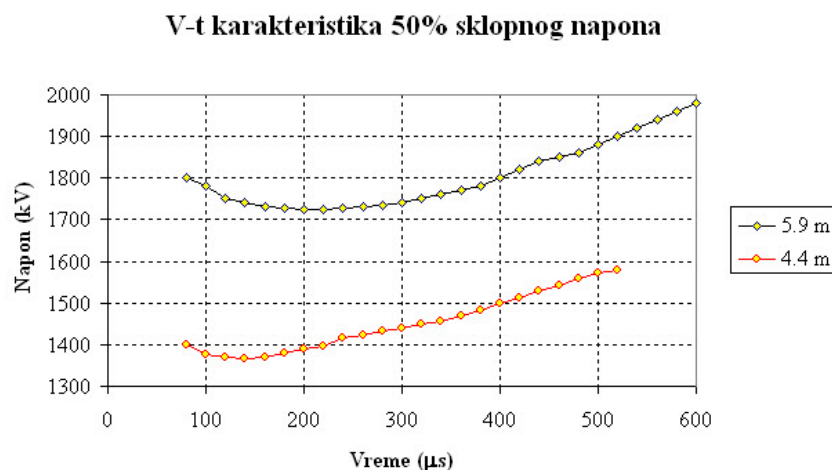
Slika 7.43: Uvećana gustina raspodele, funkcija verovatnoće preskoka, kao i proizvod $f(U_p) \times F(U_f)$ i rizik preskoka izračunat po izrazu 7.95

razlikuje u odnosu na atmosferske udarne talase. Jedan od standardnih oblika sklopnog udanog talasa ima oblik $250/2500 \mu s$. Kod sklopnog udarnog napona V-t karakteristika ima specifičan "U" oblik sa minimalnom vrednošću preskočnog napona koji nastaje u opsegu $150-300 \mu s$ trajanja čela. Minimum V-t krive naziva se "kritičan preskočni napon", kome odgovara "kritično vreme do preskoka", koje se produžava sa porastom rastojanja između elektroda. V-t kriva 50% preskočnog napona se uvek odeduje za pozitivne talase, kojima odgovara niži preskočni napon. U slučaju talasa koji izaziva preskok u oblasti minimalnog preskočnog napona, tada se preskok obično događa na začelju talasa.

Na slici 7.44 prikazane su dve V-t karakteristike za različita rastojanja između elektroda za pozitivan sklopni talas, na osnovu eksperimenata iz [105]. Tumačenje V-t krive može se vršiti za dva slučaja:

- Slučaj kada do preskoka dolazi pri delovanju strmih talasa, kada zbog brzine porasta napona proces jonizacije kasni za porastom električnog polja, pa se sa produženjem čela talasa smanjuje preskočni napon. Ovo je slučaj kod atmosferskih udarnih talasa.
- Slučaj kada je čelo talasa relativno sporo (sklopni prenaponi), a razmaci između elektroda dugački. U ovom slučaju razvoj strimera se usporava ukoliko je strmina talasa mala, jer se smanjuje struja kroz strimere koja se kapacitivno zatvara prema drugoj elektrodi. Zbog toga je potreban viši napon za izazivanje preskoka pri dužem vremenu čela kod dugih razmaka između elektroda.

Na osnovu eksperimentalnih istraživanja za elektrodnu konfiguraciju štap-ploča predlaže se izraz za 50% preskočni napon za međuelektrodna rastojanja do 25 m u obliku koji je dat u [12].



Slika 7.44: V-t karakteristika za slučaj sklopnog udarnog talasa za dva različita preskočna razmaka

$$U_{50RP} = 500 \cdot d^{0.6} \quad (7.97)$$

gde je:

U_{50RP} - 50% preskočni napon (kV-temena vrednost) za elektrode štap-ploča (RP od engl. rod-plate),

d -međuelektrodno rastojanje (m).

Gornji izraz se odnosi za terene na nadmorskoj visini do 1000 m.

Za bilo koju drugu konfiguraciju elektroda koriste se koeficijenti oblika prema [12]. Na slici 7.45 prikazane su geometrije izolatora na konzoli (a) i provodnik unutar prozora (b).

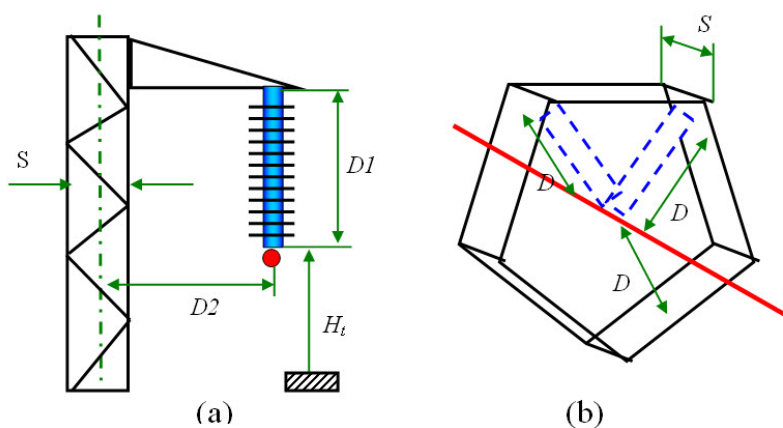
U Tabeli 7.5 prikazan je faktor oblika elektroda za proračun preskočnog napona za stubove nadzemnih vodova.

Dobijanje 50% preskočnog napona iz elektrodne konfiguracije šiljak-ploča u realne konstruktivne konfiguracije kod nadzemnih vodova vrši se na osnovu izraza 7.98.

$$U_{50\%} = U_{50RP} \times K \quad (7.98)$$

Statistički podnosivi napon $U_{10\%}$ se računa prema izrazu :

$$U_{10\%} = \frac{U_{50}}{1 - 1.3\sigma} \quad (7.99)$$



Slika 7.45: Parametri geometrija stuba sa izolatorima (a) izolator na konzoli, (b) provođniku unutar prozora

Tabela 7.5: Faktor oblika elektroda za proračun preskočnog napona

Slika	Parametar	Tipičan raspon vrednosti	Referentna vrednost
(a)	K	1,36 do 1,58	1,45
	$D2/D1$	1 do 2	1,5
	$H_t/D1$	3,34 do 10	6
	$S/D1$	0,167 do 0,2	0,2
(b)	K	1,22 do 1,32	1,25
	$H_t/D1$	6 do 6,7	6
	$S/D1$	0,4 do 0,1	0,2

Srednje kvadratno odstupanje kod usvojene normalne raspodele udarnih napona dato je u tabeli 7.6.

Tabela 7.6: Srednje kvadratno odstupanje kod normalne raspodele udarnih napona

Vrsta udarnog napona	Srednje kvadratno odstupanje σ u %
Atmosferski udarni napon	3
Sklopni udarni napon	6

7.6 Model odvodnika prenapona

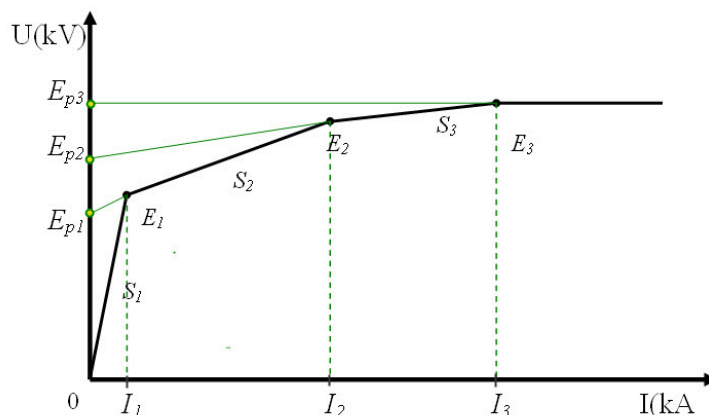
7.6.1 Modelovanje nelinearnog otpornika

Odvodnik prenapona predstavlja osnovni zaštitni element izolacije visokonaponske opreme u postrojenju od prenapona. Na ovom mestu dato je matematičko modelovanje odvodnika prenapona pri proceni ugroženosti izolacije od atmosferskih prenapona. Klasičan ili **SiC** odvodnik prenapona se sastoji od nelinearnog otpornika na kome se u širokom opsegu struja koje se pojavljuju pri atmosferskim pražnjenjima menja pad napona u relativno uskim granicama. Da bi se nelinearni otpornik odvojio od mreže u normalnom pogonu koriste se iskrišta. Iskrište reaguje pri pojavi prenapona, tako da se fazni provodnik preko nelinearnog otpornika spaja sa zemljom.

Novi tip odvodnika prenapona (metal-oksidni ili **ZnO** odvodnik) nema iskrišta, već samo nelinearni otpornik, koji ima znatno nelinearniju karakteristiku, tako da pri radnom naponu provodi vrlo malu struju u zemlju.

Volt-amperska karakteristika nelinearnog otpornika odvodnika prenapona može se prikazati u linearno-segmentnom obliku, kao na slici 7.46. Pojedini segmenti su označeni kao $s_1, s_2, \dots, s_n$.

Svaki linearni segment karakteristike preostalog napona je produžen do ordinatne ose. Svaka od prava nastalih produžavanjem segmenta predstavlja karakteristiku odvodnika u linearizovanom obliku na posmatranom segmentu. Odsecci pojedinih segmenata na ordinati obeleženi su sa $E_{p1}, E_{p2}, \dots, E_{pn}$.



Slika 7.46: Linearno-segmentni oblik volt-amperske karakteristike nelinearnog otpornika odvodnika prenapona

Karakteristika preostalog napona na proizvoljnom segmentu s_i može se napisati u

obliku linearne funkcije:

$$u(i) = \frac{E_{j+1} - E_j}{I_{j+1} - I_j} \cdot i + E_{p_j} \quad (j = 2, 3, \dots, n) \quad (7.100)$$

gde su:

i —trenutna vrednost struje kroz odvodnik,

$I_1, \dots, I_j, I_{j+1}$ —granice segmenata na kojima je volt-amperska karakteristika linearizovana.

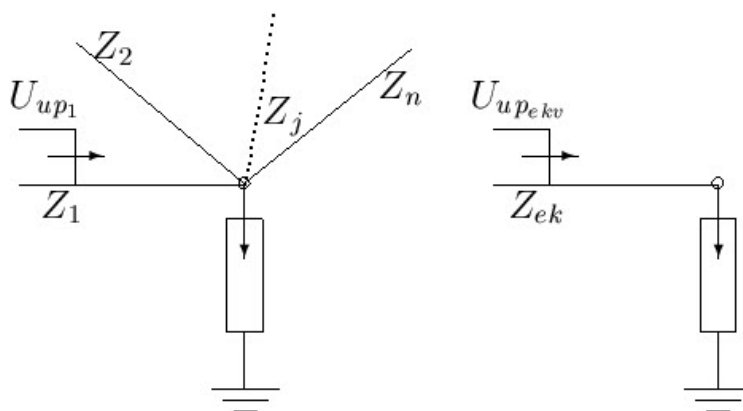
Ako se uvede oznaka:

$$R_{odv_j} = \frac{E_{j+1} - E_j}{I_{j+1} - I_j} \quad (j = 2, 3, \dots, n) \quad (7.101)$$

izraz 7.100 se može napisati u identičnom obliku kao inverzna karakteristika voda po Beržeronovoj grafoanalitičkoj metodi, odnosno:

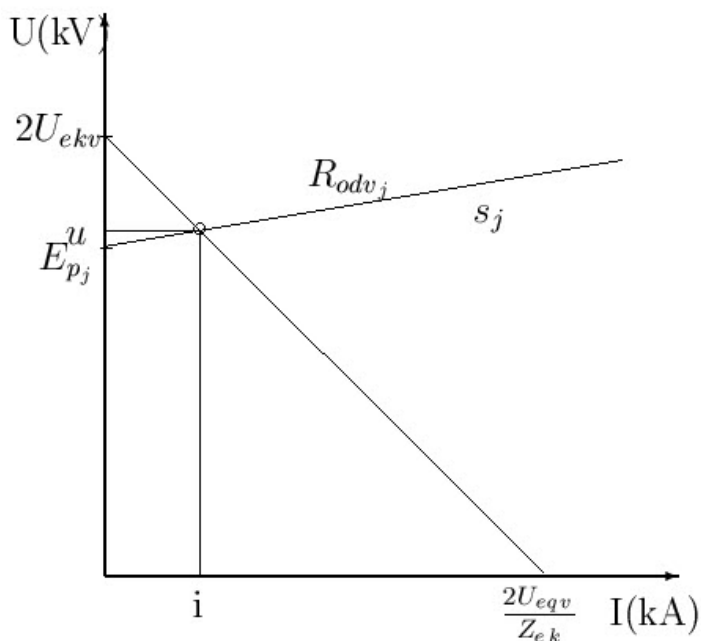
$$u(i) = R_{odv_j} i + E_{p_j} \quad (j = 2, 3, \dots, n) \quad (7.102)$$

Na slici 7.47 je prikazano više vodova koji se susište u čvornu tačku u kojoj je priključen odvodnik prenapona (levo), kao i ekvivalentan vod kojim je zamenjeno više vodova (desno).



Slika 7.47: Odvodnik prenapona priključen na više vodova (levo) i ekvivalentan vod priključen na odvodnik (desno)

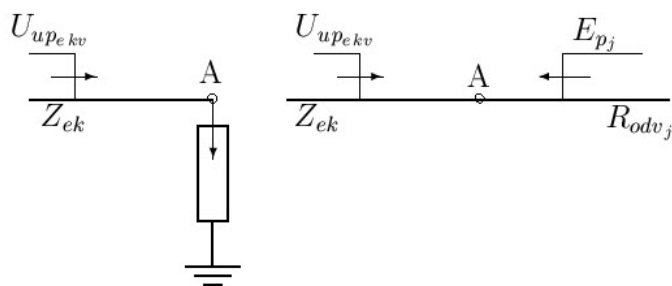
Na slici 7.48 prikazane su prave koje predstavljaju karakteristiku ekvivalentnog voda i karakteristiku odvodnika prenapona po Beržeronovoj metodi. Na slici je prikazana samo



Slika 7.48: Beržeronov dijagram koji služi za modelovanje odvodnika prenapona na segmentu s_j

jedna od pravih koja reprezentuju odvodnik prenapona na segmentu s_j koji važi na opsegu struja između I_j i I_{j+1} .

Na osnovu dijagrama na slici 7.48 se može zaključiti da se odvodnik na segmentu s_j može modelovati kao neograničeno dugačak vod karakteristične impedanse R_{odvj} po kome nailazi prenaponski talas čija je amplituda E_{pj} , kao na slici 7.49 desno. Na slici 7.49 levo prikazan je nailazak prenaponskog talasa U_{upekv} po ekvivalentnom vodu prema odvodniku prenapona.

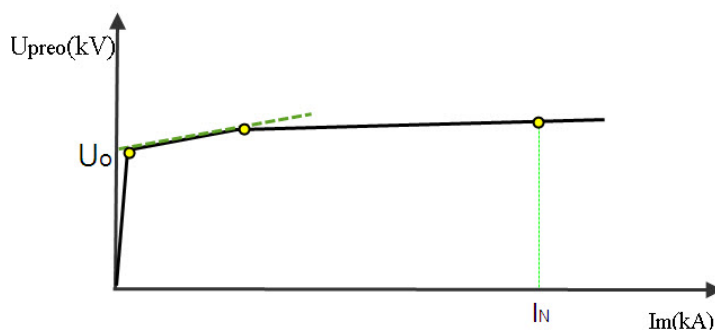


Slika 7.49: Model odvodnika prenapona na segmentu s_j nelinearne volt-amperske karakteristike putem ekvivalentnih vodova

Pri proračunu prelaznog procesa potrebno je prvo odrediti segment na kome se seku karakteristika voda i karakteristika odvodnika, a nakon toga se preostali napon na odvodniku izračunava na osnovu preseka karakteristika. Posle izračunavanja napona u presečnoj tački rešavanjem dve linearne jednačine sa dve nepoznate, dobija se preostali napon na odvodniku na osnovu sledećeg izraza:

$$u_{odv} = U_{up_{ekv}} \frac{2R_{odv_j}}{R_{odv_j} + Z_{ekv}} + E_{p_j} \frac{2Z_{ekv}}{Z_{ekv} + R_{odv_j}} \quad (7.103)$$

Ovim postupkom dobijen je jednostavan model nelinearnog otpornika odvodnika prenapona za koji je potrebno poznavati samo nekoliko tačaka na volt-amperskoj krivoj preostalog napona. Proizvođači najčešće daju podatke za odvodnik u obliku tabele preostalog napona za nekoliko vrednosti udarnih struja standardnog oblika, prema preporukama IEC (međunarodne elektrotehničke komisije) i to najčešće 50 %, 100 % i 200 % od nazivne struje odvođenja. Poželjno je izvršiti testiranje preostalog napona sa udarnom strujom istog oblika, ali niže amplitude (0,1 kA i 1 kA) da bi se sagledalo ponašanje odvodnika u režimu malih udarnih struja. Linearnom interpolacijom prvog segmenta do unapred usvojene vrlo male vrednosti struje mogu se dobiti realni rezultati, sa neznatno višim prenaponima, bez poznavanja tačne karakteristike preostalog napona u oblasti vrlo malih struja kao na slici 7.50.

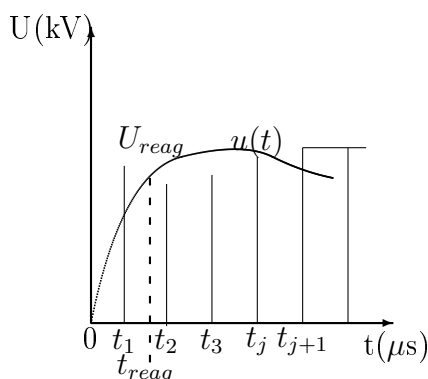


Slika 7.50: Aproximacija karakteristike odvodnika u oblasti malih struja

7.6.2 Modelovanje iskrišta odvodnika prenapona

Iskrište odvodnika prenapona se modeluje samo kod odvodnika prenapona koji se rade sa iskrištem. To su stari odvodni prenapona sa otpornicima od silicijum karbida (SiC odvodnici) ili linijski odvodnici prenapona za vodove sa eksternim iskrištem. Iskrište odvodnika prenapona modeluje se na taj način što se odvodnik pre reagovanja zamenjuje beskonačno velikim otpornikom. Posle reagovanja se uvodi opisani postupak određivanja preostalog napona. U svakom koraku proračuna se pre nego što je odvodnik reagovao upoređuje napon u tački priključenja odvodnika sa naponom reagovanja na učitanoj volt-sekundnoj

karakteristici napona reagovanja iskrišta. Kada napon u posmatranoj tački poraste iznad napona reagovanja, prelazi se na proračun preostalog napona odvodnika Beržeronovom metodom karakteristika. Na slici 7.51 prikazana je tipična volt-sekundna karakteristika napona reagovanja odvodnika prenapona predstavljena u linearno segmentnom obliku U_{reag} i talasni oblik napona $u(t)$. Trenutak reagovanja odvodnika t_{reag} se određuje linearnom interpolacijom. Napon reagovanja se određuje iz volt-sekundne karakteristike iskrišta u trenutku t_{reag} .



Slika 7.51: Modelovanje reagovanja iskrišta SiC odvodnika prenapona

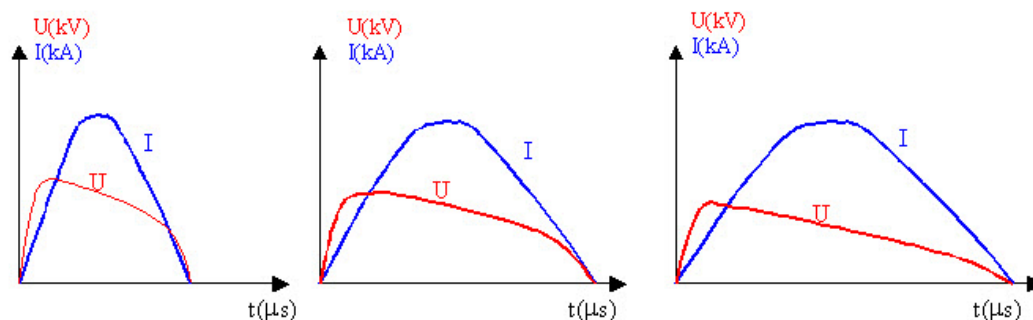
U slučaju metal-oksidnih odvodnika bez iskrišta metoda proračuna je identična, jedino se smatra da je napon reagovanja odvodnika jednak nuli, jer ovi odvodnici imaju nelinearni otpornik direktno uključen pod napon.

7.6.3 Modelovanje dinamičke karakteristike preostalog napona

Uočeno je da preostali napon odvodnika zavisi od strmine čela primenjenog talasa, kao i od njegovog trajanja. Ova pojava je znatno izraženija kod **ZnO** odvodnika prenapona nego kod **SiC** odvodnika. Ova pojava nastaje iz dva razloga:

- uticaj grejanja nelinearnog otpornika, koji sa povećanjem temperature smanjuje svoju otpornost zbog negativnog temperaturnog koeficijenta materijala otpornika,
- uticaj induktivnosti stuba odvodnika, koji pri velikim strminama čela strujnih talasa dovodi do povećanog pada napona na rezistoru.

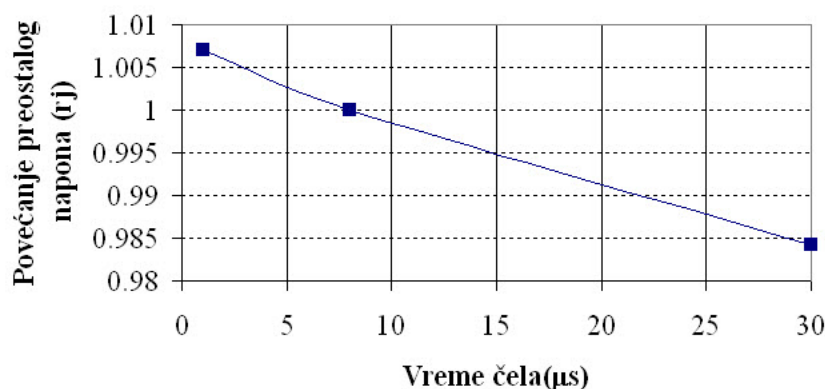
Na slici 7.52 prikazana su tri slučaja ispitivanja rezistora odvodnika prenapona udarnim strujama različitih strmina čela. Krajnji levi slučaj je ispitivanje strmim strujnim talasom, srednji slučaj ispitivanje standardnim strujnim talasom trajanja čela 8 μs , a desno ispitivanje talasom dužeg čela (sklopni udarni strujni talas).



Slika 7.52: Tri slučaja ispitivanja odvodnika prenapona strujnim talasima različitog trajanja čela talasa.

Oba uticaja se uzimaju u obzir preko dodatnog koeficijenta K_t kojim se množi preostali napon odvodnika za određenu vrednost struje, a koji zavisi od trajanja čela talasa. Zavisnost koeficijenta K_t od trajanja čela talasa prikazana je na slici 7.53.

Zavisnost preostalog napona od trajanja čela struje



Slika 7.53: Koeficijent promene preostalog napona u zavisnosti od trajanja čela talasa

Uticaj koeficijenta K_t se uzima u obzir samo kod ZnO odvodnika prenapona, dok se kod klasičnog odvodnika zanemaruje, jer kod odvodnika sa iskrištem presudnu ulogu ima volt-sekundna karakteristika reagovanja iskrišta, koja ima znatno izraženiju nelinearnost.

U tabeli 7.7 prikazane su tabelarne vrednosti koeficijenta povećanja prenapona dobijene standardnim ispitivanjem odvodnika sa 3 različita čela struje [49] za odvodnik naznačenog napona 55 kV.

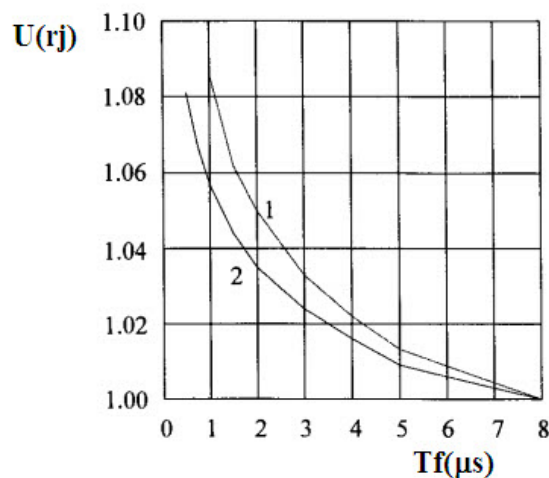
U svakom koraku proračuna se određuje preostali napon na odvodniku primenom 7.103, koji se množi sa koeficijentom $K_t(\%)/100$ određenim sa dijagrama 7.53 za vreme t

Tabela 7.7: Rezultati tipskih ispitivanja preostalih napona za 3 standardna strujna talasa različitih trajanja čela amplitude talasa 10 kA

U_R	U_C (kV)	Trajanje čela struje		
(kV)	(kV)	$1\mu s$	$8/20\ \mu s$	$30/60\ \mu s$
55	44	Preostali naponi (kV)		
		115.2	114.4	112.6
		Preostali naponi (rj) u odnosu na talas $8/20\ \mu s$		
		1.007	1.000	0.984

proteklo od nailaska prenaponskog talasa na odvodnik do posmatranog trenutka.

Prema [51] prikazana je kriva zavisnosti relativnog povećanja preostalog napona na rezistoru od čela talasa, na slici 7.54.



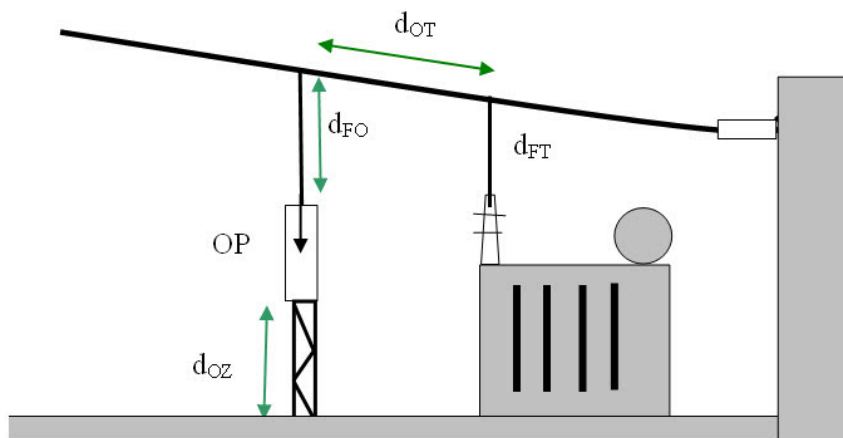
Slika 7.54: Zavisnosti relativnog povećanja preostalog napona na rezistoru od čela talasa (1-eksperimentalna kriva, 2 -teorijska kriva)

7.6.4 Modelovanje odvodnika prenapona za postrojenja

Najčešća uloga odvodnika prenapona je zaštita energetskih transformatora. U ranijoj praksi, iako se zna da je potrebno maksimalno približiti odvodnik prenapona objektu zaštite, zbog nepouzdanosti konstrukcije starijih tipova odvodnika prenapona u porculanskom kućištu, postojala je opasnost od eksplozije, koja je mogla da mehanički ošteti prolazne izolatore transformatora. Zbog toga se nalazilo neko optimalno rastojanje koje je dovoljno

daleko da ne ugrožava objekat zaštite, a sa druge strane dovoljno blizu da formira zaštitni zonu u kojoj je štićeni objekat.

Na slici 7.55 prikazan je tipičan klasičan način razmeštaja prenaponske zaštite i energetskog transformatora. Odvodnik prenapona ima posebnu vezu od faznog provodnika do gornjeg priključka odvodnika prenapona, a transformator ima svoju vezu do priključka na prolaznom izolatoru.



Slika 7.55: Skica klasičnog prilaza nadzemnog voda transformatoru sa odvojenim spustevima za odvodnik prenapona i za priključak transformatora

Oznake na slici 7.55 imaju sledeće značenje:

d_{FO} - dužina veze od faze do gornjeg priključka odvodnika prenapona,

d_{OZ} - dužina zemljovoda od donjeg priključka odvodnika prenapona do uzemljivača,

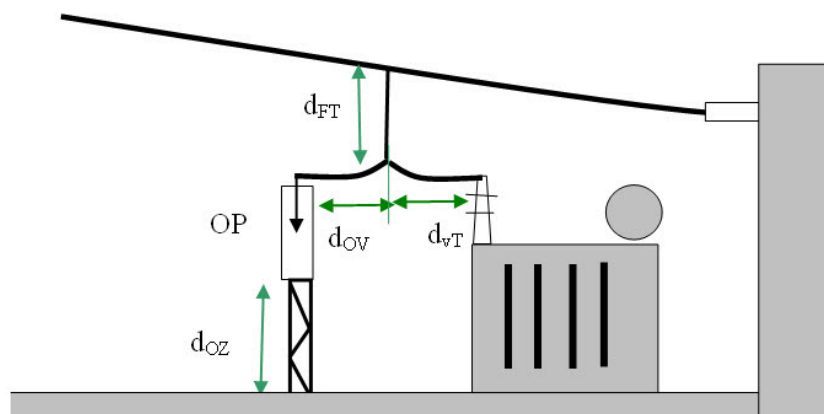
d_{OT} - dužina faznog provodnika od konektora za vezu za odvodnik prenapona do konektora za vezu za energetski transformator,

d_{FT} - dužina veze od faze do prolaznog izolatora transformatora,

OP - oznaka za odvodnik prenapona.

Uvođenjem metal-oksidnih odvodnika prenapona u kućištu od silikonske gume značajno se smanjila opasnost od razornih eksplozija odvodnika prenapona, pa se rastojanje između odvodnika i štićenog objekta mogla smanjiti na meru uslovljenu prostornim i konstruktivnim ograničenjima.

Na slici 7.56 prikazan je način skraćivanja električne veze između odvodnika prenapona i transformatora, a da se sačuva prostorna udaljenost koja može biti diktirana različitim projektantskim uslovima.



Slika 7.56: Mogućnost skraćivanja električne veze između odvodnika i transformatora

Oznake na slici 7.56 imaju sledeće značenje:

d_{FT} - dužina veze od faze do račve od koje se odvajaju veza za odvodnik i za transformator,

d_{OV} - dužina veze od račve do gornjeg priključka odvodnika prenapona

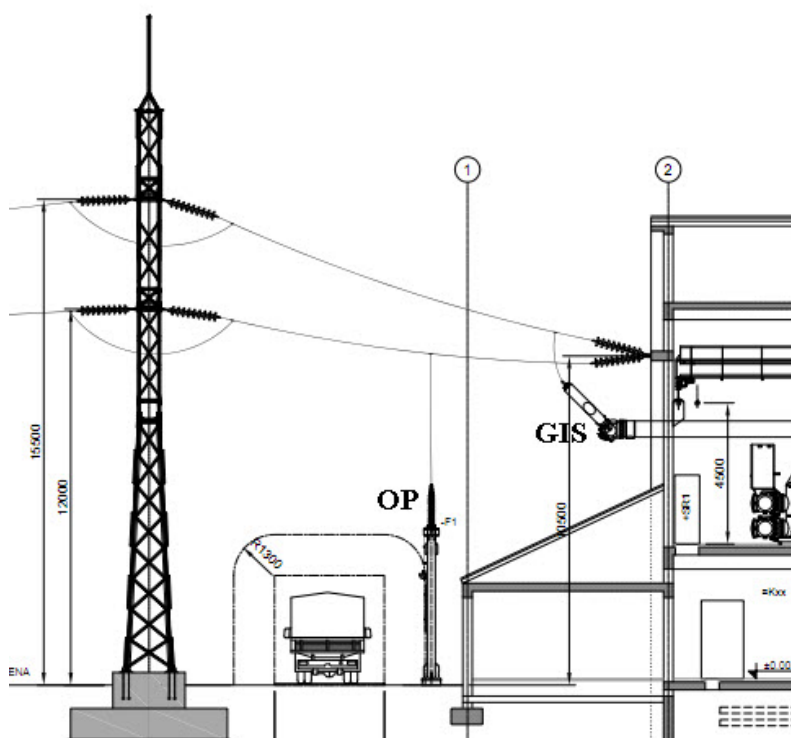
d_{OZ} - dužina zemljovoda od donjeg priključka odvodnika prenapona do uzemljivača,

Tipična dispozicija postrojenja sa odvodnikom prenapona za zaštitu transformatora prikazana je na slici 7.57. Na slici oznaka OP označava odvodnik prenapona, GIS gasom izolovano postrojenje.

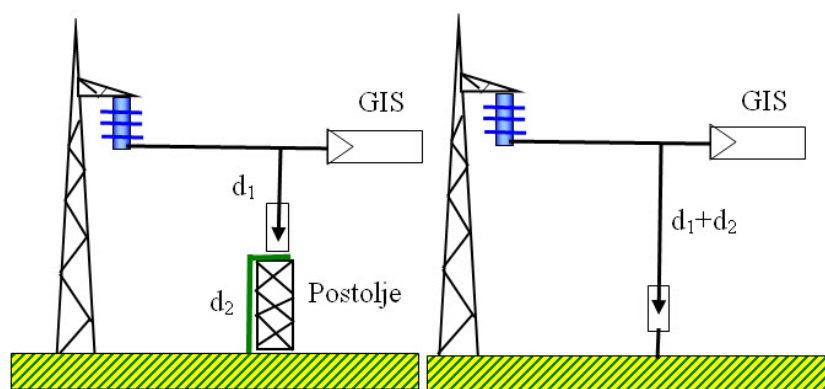
Na slici 7.58 prikazana je zamenska šema u kojoj je odvodnik prenapona spojen vezom za fazni provodnik dužine d_1 , a oznaka d_2 označava dužinu zemljovoda od donjeg priključka do spoja sa uzemljivačem. Metalno postolje koje nosi odvodnik se nikada ne koristi za odvođenje struje pražnjenja. Na slici desno spust do odvodnika je ekvivalentiran tako da se koristi model odvodnika sa jednom priključnom tačkom, dok je druga tačka direktno uzemljena.

Ovakav model odvodnika se naziva odvodnikom sa jednim priključkom.

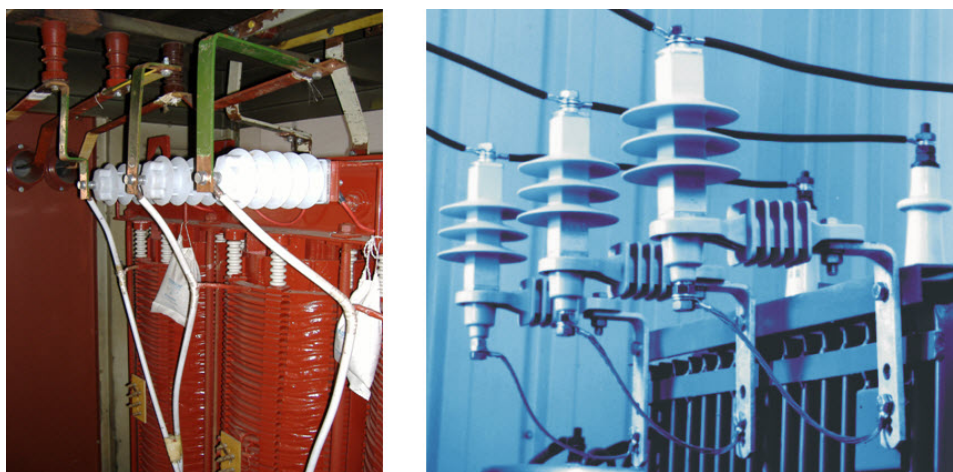
Specijalno izvođenje odvodnika prenapona je kada se odvodnici prenapona postave direktno na energetski transformator. Na slici 7.59 prikazana su dva slučaja primene. Levo je primenjen odvodnik prenapona na suvom transformatoru, a desno na uljnom. Važno je napomenuti da struja odvođenja mora da se vodi posebnim provodnikom, a ne sme da protiče kroz uzemljene delove transformatora kao što su magnetno kolo suvog transformatora ili kućište uljnog.



Slika 7.57: Skica prilaza nadzemnog voda



Slika 7.58: Ekvivalentiranje spoja odvonika sa faznim provodnikom



Slika 7.59: Primena odvodnika prenapona direktno na srednjenaponskim transformatorima (levo-suvi transformator, desno-uljni transformator)

7.6.5 Modelovanje odvodnika prenapona sa dva priključka

Kod do sada korišćenog modela odvodnika prenapona sa jednim priključkom u programu za analizu atmosferskih prenapona, upadni talasi se javljaju samo na jednom kraju odvodnika, a drugi kraj se nalazi na potencijalu zemlje. U praksi se uvek pojavljuje spojna veza od faze do gornjeg priključka odvodnika i od donjeg priključka veza koja se zove zemljovod, do spoja sa uzemljivačem. U ovom slučaju se može odvodnik modelovati da je vezan prema zemlji, a sa gornje strane se saberu dužina zemljovoda i dužina provodnika koja čini vezu faze do odvodnika, što daje identične rezultate. Međutim, postoje konfiguracije u kojima odvodnik prenapona mora da se modeluje sa dva priključka, Takav slučaj je kada se izolacija vodova štiti odvodnicima koji su postavljeni paralelno izolatorima. Ovakvi odvodnici se nazivaju linijskim odvodnicima, koji su opisani u poglavlju L. Kod kod linijskih odvodnika prenapona, pri pojavi struja pražnjenja, oba kraja nalaze se na potencijalima različitim od potencijala zemlje, jer je jedan kraj na povišenom potencijalu konzole stuba, a drugi kraj na potencijalu faznog provodnika. Stoga se ovakav model odvodnika naziva modelom sa dva priključka. Kod ovog tipa odvodnika se na oba kraja javljaju upadni talasi, kao sto je prikazano na slici 7.60.



Slika 7.60: Model rednog odvodnika prenapona između dva elementa

Na slici 7.60 oznake imaju sledeće značenje:

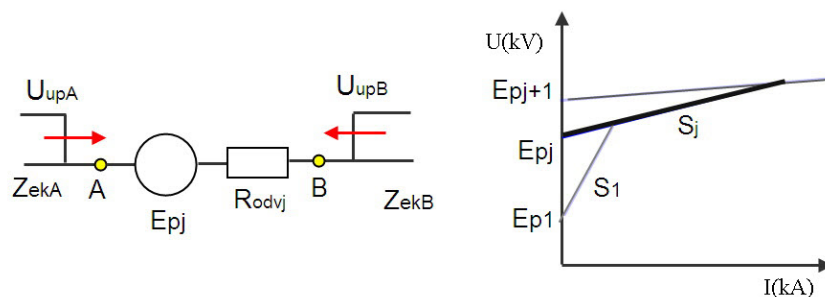
U_{upA} – upadni naponski talas koji se prostire ka tački A ,

U_{upB} – upadni naponski talas koji se prostire sa suprotne strane odvodnika prenapona ka tački B ,

Z_{ekA} , Z_{ekB} – ekvivalentne karakteristične impedanse vodova koji su priključeni na krajnjim tačkama odvodnika A i B .

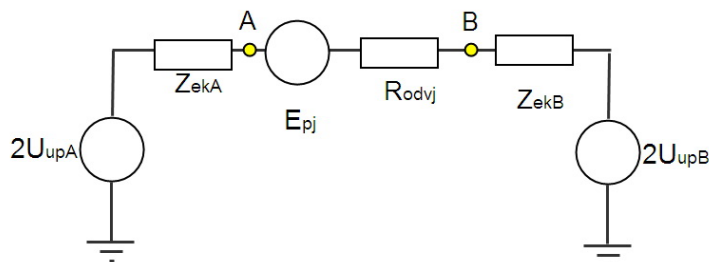
Zamenska šema modela odvodnika za jedan linearizovani segment karakteristike preostalog napona prikazan je na slici 7.61 (levo). Na istoj slici desno prikazana je linearizovana karakteristika preostalog napona odvodnika prenapona za segment j .

Sa slike 7.61 se može uočiti da se odvodnik prenapona modeluje rednim elementom koji sadrži izvor čija je elektromotorna sila E_{pj} koja odgovara preseku j -tog linearnog



Slika 7.61: Zamenska šema modela odvodnika za jedan linearizovani segment karakteristike preostalog napona (levo) i dijagram karakteristike preostalog napona u linearizovanoj formi (desno)

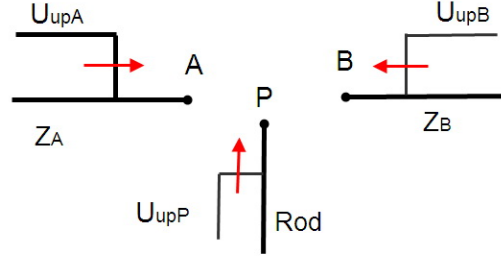
segmenta čiji je nagib S_j sa ordinatnom osom. Nagib j -tog linearnog segmenta definisan je dinamičkom otpornošću odvodnika prenapona na tom segmentu koji je dat izrazom 7.101. Za rešavanje šeme sa slike 7.61 može se koristiti Petersenovo pravilo [43], kojim se dobija šema kao na slici 7.62. U slučaju redne veze elemenata može se koristiti modifikacija



Slika 7.62: Šema modela odvodnika za jedan linearizovani segment karakteristike preostalog napona po Petersenovom pravilu

Petersenovog pravila koja je uvedena u [28], a koja se koristi u slučajevima kada se neki element koji se modeluje koncentrisanim elementima nalazi između dva voda koja su modelovana raspoređenim parametrima. U tom slučaju se uvodi treća (pomoćna) tačka P u koju je priključen redni element zamenjen beskonačnim vodom po kome se prostire upadna komponenta napona čija je amplituda $U_{upP} = E_{pj}/2$. Upadna komponenta napona po fiktivnom vodu jednaka je polovini elektromotorne sile ekvivalentnog generatora koji simulira preostali napon pri nultoj struji j tog segmenta odvodnika prenapona, jer napon E_{pj} predstavlja ukupnu elektromotornu silu ekvivalentnog generatora, a ne komponentu putujućeg talasa. Metoda modifikovanih koeficijenata prelamanja opisana je u poglavlju 3.4.

Koeficijenti prelamanja u tački A na sve ostale vodove za upadni talas koji nailazi



Slika 7.63: Ekvivalentna šema rednog odvodnika za jedan linearizovani segment karakteristike preostalog napona po metodi modifikovanih koeficijenata prelamanja

u tačku **A** su:

$$\begin{aligned}
 \alpha_{AA} &= \frac{2(Z_B + R_{odj})}{Z_A + Z_B + R_{odj}} \\
 \alpha_{AB} &= \frac{2Z_B}{Z_A + Z_B + R_{odj}} \\
 \alpha_{AP} &= \frac{2R_{odj}}{Z_A + Z_B + R_{odj}}
 \end{aligned} \tag{7.104}$$

Napuni u čvorovima A, B i P usled nailaska talasa U_{upA} samo u tačku A su:

$$\begin{aligned}
 U_A^1 &= \alpha_{AA} U_{upA} \\
 U_B^1 &= \alpha_{AB} U_{upA} \\
 U_P^1 &= \alpha_{AP} U_{upA}
 \end{aligned} \tag{7.105}$$

Koeficijenti prelamanja u tački B na sve ostale vodove za upadni talas koji nailazi u tačku **B** su:

$$\begin{aligned}
 \alpha_{BB} &= \frac{2(Z_A + R_{odj})}{Z_A + Z_B + R_{odj}} \\
 \alpha_{BA} &= \frac{2Z_A}{Z_A + Z_B + R_{odj}} \\
 \alpha_{BP} &= -\frac{2R_{odj}}{Z_A + Z_B + R_{odj}}
 \end{aligned} \tag{7.106}$$

Napuni u čvorovima A, B i P usled nailaska talasa U_{upB} samo u tačku B su:

$$\begin{aligned}
 U_A^2 &= \alpha_{BA} U_{upB} \\
 U_B^2 &= \alpha_{BB} U_{upB} \\
 U_P^2 &= \alpha_{BP} U_{upB}
 \end{aligned} \tag{7.107}$$

Na kraju je posmatran upadni talas u pomoćnoj tački P obeležen kao U_{upP} , koji nailazi po ekvivalentnomvodu koji ima otpornost R_{odvj} koja odgovara j -tom segmentu odvodnika prenapona. Koeficijenti prelamanja u tom slučaju su:

$$\begin{aligned}\alpha_{PP} &= \frac{2(Z_A+Z_B)}{Z_A+Z_B+R_{odj}} \\ \alpha_{PA} &= \frac{2Z_A}{Z_A+Z_B+R_{odj}} \\ \alpha_{BP} &= -\frac{2Z_B}{Z_A+Z_B+R_{odj}}\end{aligned}\tag{7.108}$$

Napuni u čvorovima A, B i P usled nailaska talasa U_{upP} samo u pomoćnu tačku B su:

$$\begin{aligned}U_A^3 &= \alpha_{PA}U_{upP} \\ U_B^3 &= \alpha_{PB}U_{upP} \\ U_P^3 &= \alpha_{PP}U_{upP}\end{aligned}\tag{7.109}$$

Kada se superponiraju komponente izračunatih napona pri delovanju pojedinih komponenti upadnih talasa, dobijaju se stvarne vrednosti napona u tačkama A i B, kao i preostalog napona na odvodniku prenapona (odnosno u pomoćnoj tački P):

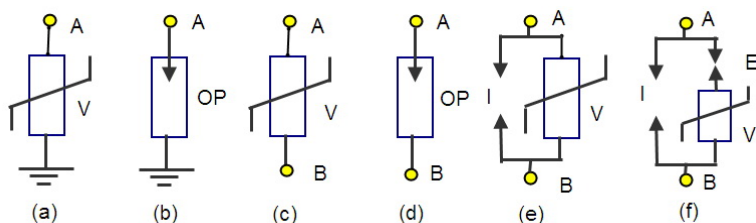
$$\begin{aligned}U_A &= U_A^1 + U_A^2 + U_A^3 \\ U_B &= U_B^1 + U_B^2 + U_B^3 \\ U_P &= U_P^1 + U_P^2 + U_P^3\end{aligned}\tag{7.110}$$

7.6.6 Opšti model odvodnika prenapona

Opšti model linijskog odvodnika prenapona se može podeliti na više opcija:

- (a) Model odvodnika bez iskrišta vezan prema zemlji,
- (b) Model odvodnika sa internim iskrištem vezan prema zemlji,
- (c) Model odvodnika bez iskrišta vezan redno između dve tačke,
- (d) Model odvodnika sa eksternim iskrištem vezan redno između dve tačke,
- (e) Model odvodnika bez eksternog iskrištem vezan redno između dve tačke, paralelno izolaciji modelovanoj kao ekvivalentno iskrište,
- (f) Model odvodnika sa eksternim iskrištem vezan redno između dve tačke, paralelno izolaciji modelovanoj kao ekvivalentno iskrište.

Na slici 7.64 prikazane su ekvivalentne šeme nabrojanih modela odvodnika.



Slika 7.64: Ekvivalentne šeme modela odvodnika

Oznake na ekvivalentnoj šemi 7.64 imaju sledeće značenje:

A, B –priključne tačke odvodnika prenapona,

V –varistor, ZnO odvodnik,

OP –odvodnik prenapona sa internim iskrištem, odnosno SiC odvodnik prenapona,

I – iskrište koje modeluje izolaciju paralelnu linijskom odvodniku prenapona,

EI – eksterno iskrište linijskog odvodnika prenapona.

U slučaju primene linijskih odvodnika prenapona bez eksternog iskrišta mogu se koristiti modeli (c) i (e). U slučaju primene odvodnika prenapona sa eksternim iskrištem mogu se koristiti modeli (d) i (f). Modeli (e) i (f) omogućavaju simulacije pojava preskoka na izolaciji na stubovima koji su snabdeveni odvodnicima prenapona kada je izabran pogrešan odvodnik prenapona čiji je zaštitni nivo viši od preskočnog napona izolacije.

Za modelovanje preskoka na izolaciji voda i na eksternom iskrištu mogu se koristiti sva tri modela preskoka, koji su opisani na strani 236. Preporučuje se primena istog modela za modelovanje preskoka na eksternom iskrištu i na izolaciji voda. Za uobičajene proračune model izolacije paralelan odvodniku ne treba uopšte uzimati u obzir, jer odvodnik mora da spreči pojavu preskoka na izolaciji stuba sa kojom je paralelno postavljen.

7.6.7 Izbor ZnO odvodnika prenapona

Izbor ZnO odvodnika prenapona prema [37] se vrši u tri koraka:

1. Određivanje parametara sistema
2. Provera nenormalnih uslova rada
3. Izbor naznačenog napona

Određivanje parametara sistema

Najvažniji parametar sistema je **maksimalni dozvoljeni radni napon** U_m , koji je obično 5 – 10 % viši od naznačenog napona sistema. Ovaj napon predstavlja efektivnu linijsku vrednost napona.

Drugi važan faktor je visina i trajanje privremenog prenapona U_t . Privremeni prenaponi se najčešće određuju kao prenapon na neoštećenom faznom provodniku pri zemljospoju u mreži. Ako se ne raspolaže tačnim podacima o podešenosti zaštite, prema IEC preporukama se usvaja da je trajanje zemljospoja u prenosnoj mreži do 3 s i u distributivnoj mreži do 10 s za sisteme sa uzemljenom neutralnom tačkom. Ako sistem radi sa izolovanom neutralnom tačkom, tada trajanje zemljospoja može biti od nekoliko sekundi do nekoliko sati. Opasnost kod privremenih prenapoma usled zemljospoja sa lukom je da jednopolni kvar preraste u dvopolni, koji zaštita isključuje i potrošači ostaju bez napajanja.

Provera nenormalnih uslova rada

Ponekad se mogu u sistemu pojaviti okolnosti pri kojima se u uzemljenom sistemu na nekim mestima mogu pojaviti viši naponi na neoštećenim faznim provodnicima od očekivanih (na primer pri razemljivanju neutralnih tačaka pojedinih transformatora koji rade paralelno), što čini ovaj sistem neefikasno uzemljenim.

Ako postoje uslovi za istovremeni nastanak i privremenih prenapona usled zemljospoja i ispada opterećenja, tada takav slučaj treba uzeti u obzir.

Izbor naznačenog napona odvodnika

Naznačeni napon odvodnika se određuje na dva načina:

1. Na osnovu trajnog radnog napona U_c koji je jednak faznoj vrednosti maksimalnog trajno dozvoljenog radnog napona U_m , odnosno: $U_c = U_m/\sqrt{3}$
2. Na osnovu privremenog prenapona pri zemljospoju $U_t = K_f \cdot U_c \cdot K_S$, gde je K_f faktor zemljospoja, koji se usvaja za direktno uzemljene sisteme da iznosi maksimalno 1,4, a za izolovane sisteme 1,73. K_S je faktor sigurnosti koji se najčešće usvaja da ima vrednost $K_S = 1,1$ za nazivne napone mreža $U_n \leq 110$ kV, a $K_S = 1,05$ za nazivne napone $U_n > 110$ kV.

Naznačeni napon na bazi trajnog radnog napona određuje se iz izraza:

$$U_{Ro} = \frac{U_c}{K_o} \quad (7.111)$$

gde su:

K_o –faktor izrade ili faktor proizvođača. Za odvodnike koje proizvodi ABB faktor izrade je $K_o = 0,8$.

U_{Ro} –naznačeni napon odvodnika određen na bazi trajnog radnog napona.

Naznačeni napon na bazi privremenog prenapona se određuje iz izraza:

$$U_{Rt} = \frac{U_t}{K_t} \quad (7.112)$$

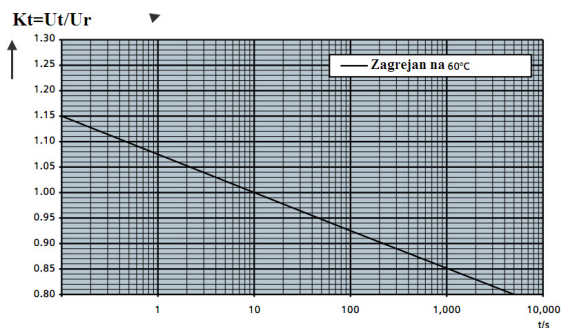
gde je:

K_t –koeficijent koji uvažava sposobnost odvodnika da podnosi privremene prenapone. Ovaj koeficijent zavisi od privremenog prenapona koga odvodnik može određeno vreme da podnese i predstavlja multipl naznačenog napona odvodnika (ovaj koeficijent se izražava u relativnim jedinicama u odnosu na naznačeni napon odvodnika). Na slici 7.65 prikazana je zavisnost sposobnosti podnošenja privremenih prenapona kao odnos U_t/U_r .

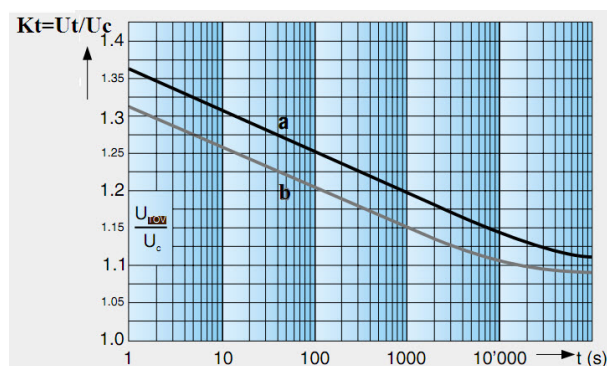
Koeficijent K_t se daje grafički u funkciji trajanja privremenog prenapona. Neki proizvođači definišu K_t kao multipl maksimalnog dozvoljenog trajnog napona odvodnika U_c . U tom slučaju se dobija na bazi privremenog prenapona U_t trajno dozvoljeni radni napon U_{ct} iz izraza:

$$U_{ct} = \frac{U_t}{K_t} \quad (7.113)$$

Iz kataloga se za dobijeno U_{ct} određeno na bazi privremenog prenapona određuje naznačeni napon odvodnika U_{Rt} . Najčešće je odnos koji se naziva faktorom proizvođača $U_c/U_R = 0,8$, mada može imati i druge vrednosti.



Slika 7.65: Dijagram u kome se K_t određuje na osnovu odnosa U_t/U_r



Slika 7.66: Određivanje faktora sposobnosti izdržavanja privremenih prenapona na osnovu $K_t = U_t/U_c$

Na slici 7.66 prikazan je dijagram u kome se K_t određuje na osnovu odnosa U_t/U_c .

Koeficijent $K_t = U_t/U_c$ izdržljivosti odvodnika na privremene prenapone u odnosu na U_c kao funkcija njihovog trajanja t na temperaturi okoline (temperaturi vazduha izvan odvodnika) od 45°C . Kriva **a** se odnosi na odvodnik bez prethodnog opterećenja, kriva **b** na odvodnik, prethodno opterećen energijom E dobijenom izlaganjem udarnim strujnim talasima. t je vreme trajanja prenapona industrijske frekvencije.

Ukoliko postoje i drugi privremeni prenaponi, mogu se odrediti i drugi naznačeni naponi odvodnika u odnosu na te prenapone.

Finalni izbor odvodnika vrši se na bazi najvišeg naznačenog napona odvodnika između U_{Ro} i U_{Rt} .

$$U_R = \max\{U_{Ro}, U_{Rt}\} \quad (7.114)$$

7.6.8 Izbor karakteristika odvodnika prenapona

U tekstu su prikazane detaljno tehničke karakteristike prema standardu [38] sa objašnjenjima značenja tih karakteristika

Izbor klase odvodnika. Klasa odvodnika se obeležava sa 2 slova. Prvo slovo se odnosi na sistem u koji se ugrađuje, a drugo na očekivana energetska naprezanja.

1. -Klasa odvodnika D za distributivne mreže (naponi ispod 52 kV), S-postrojenja (naponi iznad 72 kV).
2. -Energetske klase H-(visoka), M-(srednja), L-niska).

Tabela 7.8: Klasifikacija odvodnika

Klasa odvodnika	Postrojenja			distribucija		
Oznake	SH	SM	SL	DH	DM	DL
Nazivna struja pražnjena u kA oblika $8/20 \mu s$	20	10	10	10	5	2.5

I_n -Nazivna struja odvođenja je atmosferska udarna struja oblika $8/20\mu s$ sa kojom se određuje preostali napon koji predstavlja zaštini nivo odvodnika. nazivni napon odvodnika

U_r -naznačeni napon odvodnika je maksimalno dozvoljeni 10-sekundni efektivni prenapon industrijske frekvencije koji se može primeniti između krajeva odvodnika. Približno se može dobiti kada se trajno podnosivi napon U_c podeli faktorm proizvođač, koji kod nekih proizvođača se definiše da iznosi 0.8 rj.

Q_{th} -Maksimalna specificirana količina elektriciteta koja termički može biti preneti kroz odvodnik u roku od 3 minuta u testu termičkog oporavka bez izazivanja termičkog pobega.

I_m -Temena vrednost atmosferske udarne struje oblika $4/10 \mu s$ koja se koristi za ispitivanje podnosivosti struje na direktna atmosferska pražnjenja.

I_L -Amplituda dugotrajnog talasa za ispitivanje podnosivosti odvodnika na naprezanja pri višestrukim udarima, radi se pomoću posebnog generatora za pravougaone talase. Tipični oblici talasa su trajanja do 2ms i amplitude nekoliko stotina A. Danas se zamenjuje testom višestrukog (ponavljajućeg) prenosa naelektrisanja kroz odvodnik Q_{rs} . Preneto naelektrisanje se izražava u C.

Q_{rs} -Sposobnost ponavljajućeg prenosa količine naelektrisanja je definisana kao udarno strujno naprezanje koje MO otpornici odvodnika mogu da izdrže dvadeset puta bez mehaničkog ili neprihvatljivog električnog oštećenja. Oblik strujnog talasa kojim se vrši ispitivanje je atmosfrski udarni talas oblika $8/20 \mu s$.

U_{tov} -Podnosivi napon industrijske frekvencije pri privremenim prenaponima daje se grafički ili tablično. Pri izboru odvodnika prenapona treba koristiti krivu kada je odvodnik bio predhodno izložen udaima (odnosno ima povišenu temperaturu). U zavisnosti od trajanja privremenih prenapona (po pravilu jednoloni zemljospoj), sa krive se bira koeficijent podnosivog TOV, na osnovu koga se bira U_r , kao što je predhodno pokazano.

7.7 Model prekidača

Pri proračunima brzih elektromagnetnih prelaznih pojava u elektroenergetskim sistemima razlikujemo dva modela prekidača:

- Idealan prekidač
- Realan prekidač

Pod idealnim prekidačem podrazumeva se prekidač koji ima dva stanja:

Uključen -otpornost između kontakata je nula,

Isključen -otpornost između kontakata je beskonačno velika.

Kod trofaznog modela prekidača svaki pol može da ima uključeno ili isključeno stanje.

Realan prekidač uzima u obzir procese u električnom luku, tako da prelaz iz uključenog u isključeno stanje predstavlja složeni kontinualan proces, koji se može modelovati na različite načine. Postoje dva glavna pristupa modelovanju realnih prekidača:

Fizički model - Model električnog luka baziran na nelinearnim i nestacionarnim procesima koji se opisuju diferencijalnim jednačinama. Fizički procesi zavise od toga koji se mehanizam za gašenje luka koristi. Ti procesi su:

1. termodinamički procesi u luku,
2. hidraulični ili pnematski procesi strujanja tečnosti ili gasova,
3. jonizacioni procesi,

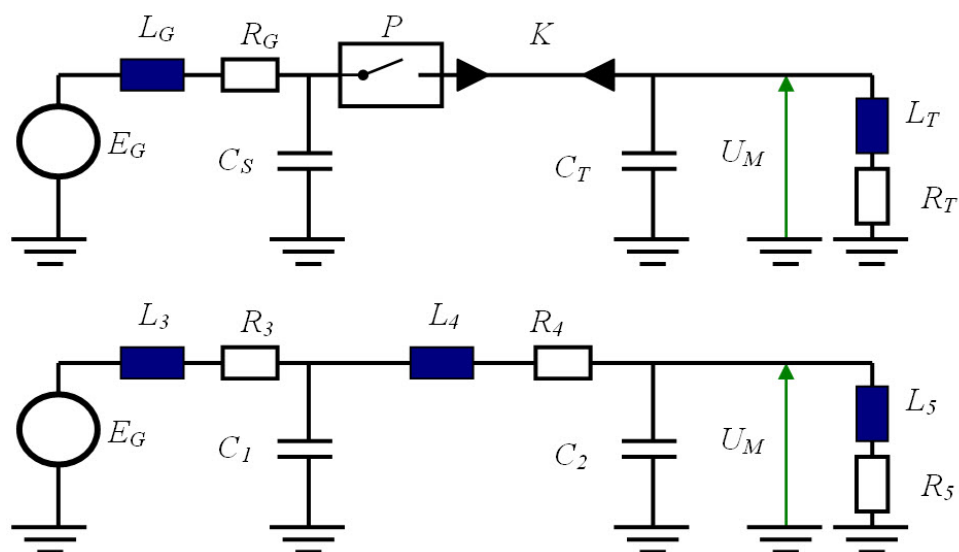
Model crne kutije (black box model) - matematički model baziran na spoljašnjim karakteristikama, ne ulazeći u fizičku prirodu procesa unutar prekidača. Model crne kutije se formira na osnovu eksperimentalnih istraživanja u laboratorijama velike snage, u kojima se prate spoljašnje karakteristike koje se mogu lako izmeriti (vremenske promene napona i struja na krajevima prekidača, koje zavise od karakteristika električnog luka).

U većini inženjerskih studija elektromagnetnih prelaznih režima koristi se model idealnog prekidača.

Razlikujemo dva modela idealnog prekidača u zavisnosti od mreže u kojoj je uključen.

7.7.1 Model prekidača u monofaznoj koncentrisanoj mreži

U mreži sa koncentrisanim parametrima ne uvodi se posebna grana koja modeluje prekidač, već se koristi postojeća induktivna grana ili kombinovano induktivno-otporna grana u tu svrhu. S obzirom da u modelovanju pasivnih delova elektroenergetskih mreža figurišu samo induktivno-otporne ili kapacitivne grane, zbog same prirode mreža uvek se može naći induktivna grana koja modeluje prekidač. Na primer, tipična jednopolna šema kojom se modeluje prekidanje malih induktivnih struja (na primer isključenje transformatora u praznom hodu), data je šemom kao na slici 7.67. Na slici gore prikazana je realna šema u kojoj je nacrtan prekidač i kabl, a na slici dole prekidač i kabl su zamenjen induktivno-otpornom granom koja zamenjuje prekidač. Oznake na gornjoj i donjoj slici



Slika 7.67: Monofazna šema za modelovanje prekidanja malih induktivnih struja

7.67 date su na dva načina. Na gornjoj slici oznaka elementa je data slovom koje asocira na prirodu elementa, a na donjoj slici su indeksi dati brojevima.

E_G -ekvivalentna elektromotorna sila napojnog sistema,

L_G, L_3 -ekvivalentna induktivnost napojnog sistema,

R_G, R_3 -ekvivalentna otpornost usled gubitaka u napojnom sistemu,

C_S, C_1 -kapacitivnost sabirnice,

P -prekidač

K -kabl koji spaja sabirnice sa indukivnim potrošačem (neopterećeni transformator),

C_T, C_2 -ekvivalentna kapacitivnost kabla i ulazna kapacitivnost namotaja transformatora,

U_M -mereni napon na transformatoru,

L_T, L_5 -induktivnost magnećenja transformatora,

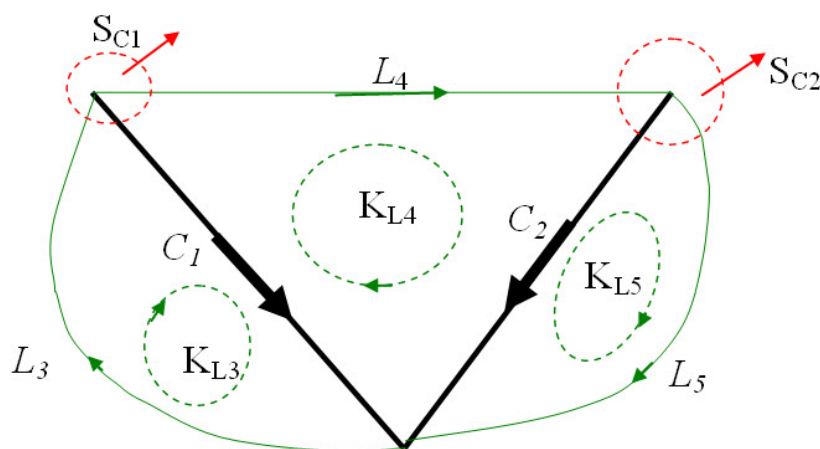
R_T, R_5 -ekvivalentna otpornost usled gubitaka u gvožđu transformatora u praznom hodu,

L_4 -induktivnost kablovske veze,

R_4 -otpornost kablovske veze.

Ukoliko je prekidač vezan za koncentrisanu induktivnost, onda se otvaranje prekidača modeluje brisanjem grane sa induktivnošću u modelu stanja mreže, dok se zatvaranje prekidača modelije uvođenjem grane sa induktivnošću. Prekidač u kolu na slici 7.67 prikazan je granom L_4 . Prekidanjem grane L_4 automatski se prekida i grana R_4 , tako da se ova grana može posmatrati kao jedan elemenat, što u realnosti i jeste.

Pri zatvorenom prekidaču u šemi na slici 7.67 graf mreže ima oblik kao na slici 7.68.



Slika 7.68: Graf mreže za modelovane isključenja male induktivne struje pri zatvorenom prekidaču

Za posmatrani graf se odredi jedno stablo. Pod osnovnim snopom se podrazumeva snop koji sadrži samo po jednu granu stabla, a sve ostale grane su grane ko-stabla. Ori-jentacija snopa se slaže sa orijentacijom grane stabla koja definiše osnovni snop. Grane odabranog stabla su prikazane debljim crnim linijama (grana C_1 i C_2), a grane ko-stabla tanjim zelenim linijama (grane L_3 , L_4 i L_5). Osnovne konture su označene zelenim isprekidanim linijama (K_{L3} , K_{L4} i K_{L5}). Osnovni snopovi su obeleženi crvenim isprekidanim krugovima sa oznakom grane koja definiše snop (SC_1 i SC_2).

Formiranje matrica incidencija

Matrica nezavisnih snopova prikazana je sledećim izrazom:

$$\begin{bmatrix} Q_f \end{bmatrix} = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & L_3 & L_4 & L_5 \\ \begin{matrix} S_{C1} \\ S_{C2} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (7.115)$$

Matrica osnovnih kontura ima sledeći oblik:

$$\begin{bmatrix} B_f \end{bmatrix} = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & L_3 & L_4 & L_5 \\ \begin{matrix} K_{L3} \\ K_{L4} \\ K_{L5} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (7.116)$$

Matrica kapacitivnosti i induktivnosti ima sledeći oblik:

$$\begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_5 \end{bmatrix} \quad (7.117)$$

Matrica otpornosti ima sledeći oblik:

$$[R] = \begin{bmatrix} R_3 & 0 & 0 \\ 0 & R_4 & 0 \\ 0 & 0 & R_5 \end{bmatrix} \quad (7.118)$$

Matrica veza ima sledeći oblik:

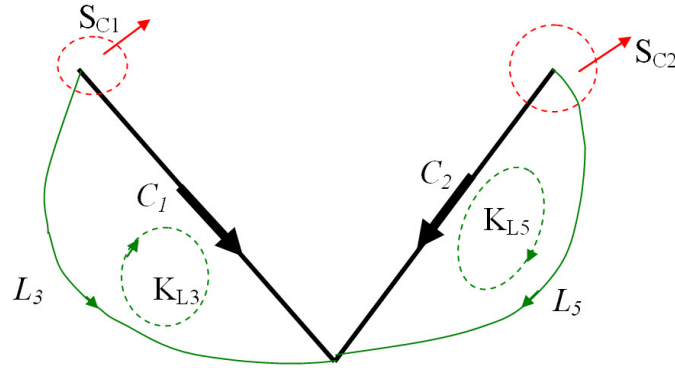
$$[K] = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.119)$$

Jednačine stanja u konačnom obliku su:

$$\begin{bmatrix} du_1/dt \\ du_2/dt \\ di_3/dt \\ di_4/dt \\ di_5/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_5 \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & R_3 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & R_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & R_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (7.120)$$

Vrsta i kolona u matricnom obliku jednačina stanja koje odgovaraju grani sa prekidačem (grana sa elementom L_4 , odnosno R_4) su uokvireni jer se u slučaju isključenja elementi matrice koji su uokvireni modifikuju.

U slučaju otvorenog prekidača graf mreže izgleda kao na slici 7.69. U ovom slučaju graf se raspada na dva subgrafa, koji su potpuno odvojeni.



Slika 7.69: Graf mreže u slučaju otvorenog prekidača

Sada u matricama incidencija u kolonama koje odgovaraju koloni u kojoj se nalazi prekidač se sada nalaze nule na mestu grane koja odgovara prekidaču. U našem slučaju u koloni koja odgovara elementu L_4 elementi postaju nula. Takođe i u vrsti koja odgovara elementu L_4 elementi postaju nula.

Jednačine stanja za slučaj isključenog prekidača imaju oblik:

$$\begin{bmatrix} du_1/dt \\ du_2/dt \\ di_3/dt \\ di_4/dt \\ di_5/dt \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_5 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & R_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (7.121)$$

U matrici kapaciteta i induktiviteta umesto člana L_4 na glavnoj dijagonali trebalo bi da stoji 0. Međutim, prilikom inverzije dobila bi se singularna matrica. Član L_4 ne igra

nikakvu ulogu, jer kada se množi sa matricom proporcionalnih elemenata (provodnosti i otpornosti), svi elementi koloni koja odgovara članu $R_4 = 0$ su takođe nule, pa taj član nema uticaje na rezultate.

7.7.2 Modelovanje trofaznog prekidača u koncentrisanoj mreži

U slučaju trofaznog prekidača model se svodi na trofazni model induktivne grane sa sopstvenim i međusobnim induktivitetima, kao i sa otpornostima usled gubitaka.

$$[L] = \begin{bmatrix} L_F & L_M & L_M \\ L_M & L_F & L_M \\ L_M & L_M & L_F \end{bmatrix} \quad (7.122)$$

Matrica otpornosti usled gubitaka redne induktivno-otporne grane ima oblik:

$$[R] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \quad (7.123)$$

Model stanja u pojednostavljenom obliku za opšti slučaj, samo za induktivnu granu koja modeluje prekidač data je u sledećem obliku:

$$\begin{bmatrix} \frac{du_c}{dt} \\ \frac{di_A}{dt} \\ \frac{di_{B)}}{dt} \\ \frac{di_C}{dt} \\ \dots \\ \frac{di_n}{dt} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} C & \vdots & 0 & \vdots \\ \vdots & L_F & L_M & L_M & \vdots \\ 0 & L_M & L_F & L_M & \\ \vdots & L_M & L_M & L_F & \vdots \\ \dots & & & & \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} G & & K & 0 & \vdots \\ \vdots & R & 0 & 0 & \\ -K^t & 0 & R & 0 & \vdots \\ \boxed{0 & 0 & 0 & R} \\ \dots & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{u_c}{i_A} \\ \frac{i_{B)}}{i_C)} \\ \dots \\ i_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{j_G}{e_A} \\ \frac{e_B}{e_C} \\ \dots \\ e \end{bmatrix} \right\} \quad (7.124)$$

Predpostavka je da se otvaraju kontakti faze **C**. Zbog toga su označene liijama vrste i kolone koje odgovaraju fazi **C**.

Oznake u 7.124 imaju sledeće značenje:

du_c/dt - vektor izvoda napona na svim kondenzatorima u mreži napisan u sažetom obliku,

di_j/dt -vektor izvoda struja u fazama $j = A, B, C$ posmatranog prekidača koji komutira,

C - submatrica svih kapacitivnosti mreže,

G - submatrica svih provodnosti paralelnih kapacitivnostima mreže,

j_G - ekvivalentne struje strujnih generatora po metodi kompenzacije kod mežovitih mreža,

e_A, e_B, e_C - trenutne vrednosti elektromotornih sila u granama sa induktivnostima koje odgovaraju prekidačima,

e -vektor trenutnih vrednosti elektromotornih sila ostalih izvora.

Horizontalnim linijama su odvojeni vektori struja kroz tri faze koje odgovaraju prekidaču koji komutira, koji su jedini dati po fazama, od svih ostalih napona i struja. Isto važi i za elektromotorne sile u granama koje komutiraju, koje su horizontalnim linijama odvojene od ostalih

U slučaju kada se prekidač otvara na fazi **C** sistem jednačina stanja dobija sledeću formu:

$$\begin{bmatrix} \frac{du_c}{dt} \\ \frac{di_A}{dt} \\ \frac{di_{B})}{dt} \\ \frac{di_C}{dt} \\ \dots \\ \frac{di_n}{dt} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} C & \vdots & 0 & \vdots \\ \vdots & L_F & L_M & 0 & \vdots \\ 0 & L_M & L_F & 0 & \\ \vdots & 0 & 0 & 1 & \vdots \\ \dots & & & & \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} G & K & 0 & 0 \\ \vdots & R & 0 & 0 \\ -K^t & 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & 0 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c \\ i_A \\ i_{B}) \\ i_C) \\ \dots \\ i_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j_G \\ e_A \\ e_B \\ e_C \\ \dots \\ e \end{bmatrix} \right\} \quad (7.125)$$

Može se uočiti da u vrstama i kolonama koje odgovaraju granama koje se prekidaju elementi se zamenjuju nulama, osim na glavnoj dijagonali matrice induktiviteta koja odgovara sopstvenoj induktivnosti faze, gde je stavljen broj 1, mada može biti bilo koji broj.

7.7.3 Modelovanje paljenja luka između kontakata prekidača

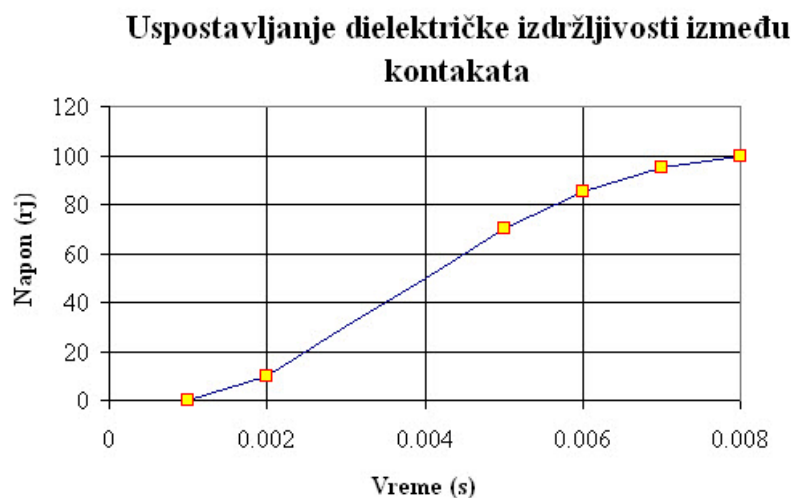
Iako je model idealnog prekidača veoma jednostavan, kada je prekidač otvoren, otpornost između kontakata je beskonačna, a kada je zatvoren, otpornost između kontakata je nula, a u kolo se ubacuje induktivna grana koja je prekinuta otvaranjem prekidača.

Ipak, modelovanje idealnog prekidača zahteva pažnju zbog određivanja uslova za otvaranje prekidača (gašenje luka između kontakata) i zatvaranje prekidača (paljenje luka između kontakata).

U slučaju otvaranja prekidača mogu se razlikovati sledeće pojave:

1. isključenje struje kratkog spoja,
2. isključenje radne struje,
3. isključenje struje praznog hoda transformatora ili reaktora (mala induktivna struja)
4. isključenje struje praznog hoda vodova, kablova ili kondenzatora (mala kapacitivna struja)

U svim ovim slučajevima nakon otvaranja kontakata počinje da se uspostavlja dielektrička izdržljivost između kontakata, čija brzina uspostavljanja zavisi od brzine razdvajanja kontakata, ali i od procesa hlađenja međukontaktne prostora, što zavisi od tipa sklopnog aparata i medijuma za gašenje luka. Porast dielektričke izdržljivosti se može samo grubo procenjivati ili odrediti kroz veoma složena laboratorijska ispitivanja u specijalnim laboratorijama velike snage. Na slici 7.70 prikazan je oblik krive uspostavljanja dielektričke izdržljivosti u linearno segmentnom obliku u međukontaktne prostoru prekidača. Kriva porasta dielektričke izdržljivosti se zadaje sa nekoliko tačaka u kojima je data dielektrička izdržljivost za vreme mereno od početka otvaranja kontakata. Dielektrička izdržljivost se između tačaka menja po linearnom zakonu. Napon na slici 7.70 je dat u relativnim jedinicama u odnosu na maksimalni podnosivi napon između kontakata kada su kontakti otvoreni.



Slika 7.70: Usvojen dijagram uspostavljanja dielektričke izdržljivosti u linearno segmentnom obliku

Simulacija eventualnog ponovnog paljenja luka između kontakata prekidača se može vršiti pojednostavljeno tako što se porast dielektričke izdržljivosti aproksimira linearnom funkcijom na kompletnom vremenskom intervalu otvaranja kontakata.

$$U_{diel}(t) = v_k E_d(t - t_0) \quad (7.126)$$

gde je:

$U_{diel}(t)$ -dielektrička izdržljivost između kontakata,

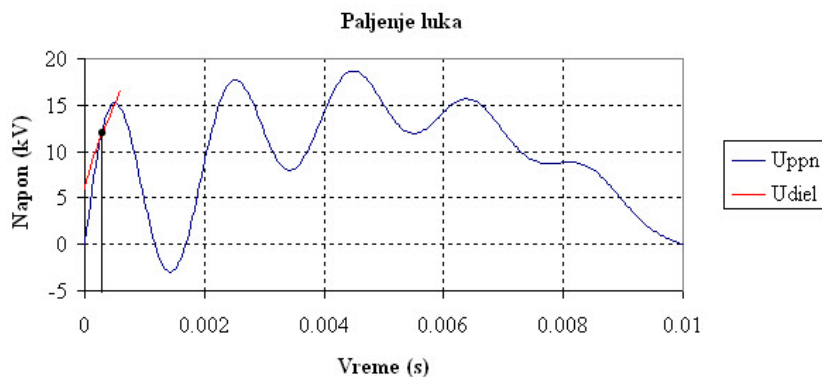
v_k - brzina razdvajanja kontakata, koja može da bude vremenski promenljiva, mada se najčešće usvaja da je konstantna,

E_d - probojni napon po jedinici dužine prostora između kontakata, koji je potrebno eksperimentalno odrediti,

t -vreme proteklo od početka otvaranja kontakata,

t_o -početak otvaranja kontakata.

Na slici 7.71 prikazan je proces određivanja trenutka ponovnog paljenja luka t_p kada dielektrička izdržljivost između kontakata U_{diel} postane manja od prelaznog povratnog napona koji se uspostavlja između kontakata U_{pp} .



Slika 7.71: Određivanje trenutka ponovnog paljenje luka

U toku proračuna se u svakom trenutku upoređuje dielektrička izdržljivost između kontakata U_{diel} sa izračunatim naponom između kontakata U_{pp} . U trenutku kada napon između kontakata postane veći od dielektričke izdržljivosti, smatramo da dolazi do ponovnog paljenja luka i matrice sistema jednačina stanja se vraćaju na prvobitni oblik.

U slučaju više prekidnih mesta u jednom prekidaču, takav se prekidač ekvivalentira sa jednim prekidnim mestom kod koga je brzina razdvajanja kontakata multipl broja prekidnih mesta. Ceo ostali postupak proračuna ostaje nepromenjen.

7.7.4 Kriterijum gašenja luka

Kod idealnog prekidača se prekidanje struje vrši pri prolazu struje kroz nulu ili u specijalnom slučaju prekidanja malih induktivnih struja moguće je da dođe do naglog prekidanja

struje pri vrednosti koja je različita od nule. Ovaj proces nazivamo sečenjem struje. Sečenje struje se modeluje na taj način što se unapred zadaje struja sečenja I_s . Ukoliko trenutna apsolutna vrednost struje kroz pol prekidača postane manja od struje sečenja, na tom polu prekidača se modeluje otvaranja kontakata, odnosno prekid grane u kolu. Uslov za isključenje je:

$$|i(t)| \leq I_s \Rightarrow \text{sečenje struje} \quad (7.127)$$

Razlikujemo dva slučaja:

- slučaj prvog sečenja struje industrijske učestanosti u ustaljenom stanju,
- slučaj gašenja luka za vreme trajanja prelaznog procesa nakon predhodnog sečenja struje.

Kada dođe do gašenja luka, grana u kojoj postoji električni luk se prekida, tako da se menjaju matrice koeficijenata u normalnom sistemu diferencijalnih jednačina stanja.

Prilikom isključivanja malih induktivnih struja svi tipovi sklopnih aparata teže da dejstvom otpora luka smanje struju do nule pre njenog prirodnog prolaska kroz nulu. Pri tome neki aparati to uspevaju da učine efikasnije od drugih. Kod vakuumskih aparata se sečenje struje može povezati sa nestabilnošću emisije elektrona sa kontakta koji je u tom trenutku negativan, što izaziva sečenje struje. Kod ostalih tipova sklopnih aparata sečenje struje se povezuje sa intenzivnim strujanjem medijuma za gašenje luka, koji hladi električni luk i odnosi jonizovane čestice sa njegove površine, povećavajući otpornost luka na velike vrednosti i izazivajući nestabilnu interakcijom luka sa električnim kolom u kome se prekida struja, što izaziva raspirujuće oscilacije, prema [45]. Kada struja opadne ispod određenog nivoa, dolazi do nestabilnih oscilacija sa frekvencijom reda veličine 100 kHz. Oscilacije se vrlo brzo raspiruju, tako da se može smatrati da do sečenja struje dolazi gotovo odmah posle nastanka nestabilnih oscilacija. Vrednost komponente naizmenične struje industrijske učestanosti u trenutku kada dolazi do sečenja struje obeležena je kao i_s . Proces prekidanja sa karakterističnim veličinama prikazan je na slici 7.72, prema [45].

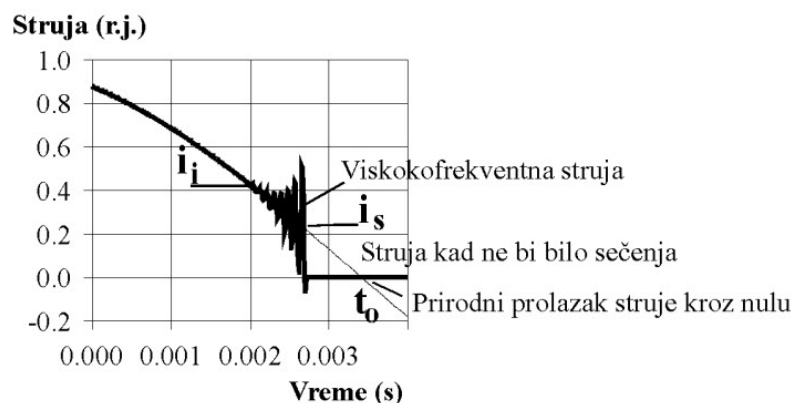
Na slici 7.72 oznake imaju sledeće značenje:

i_i -trenutak kada počinje proces nestabilnih oscilacija,

i_s -trenutna vrednost struje industrijske učestanosti neposredno pre sečenja, odnosno prolaska visokofrekventne komponente struje kroz nulu,

t_o - trenutak prirodnog prolaska struje industrijske učestanost kroz nulu.

Pri simulacijama prelaznih režima koristeći model idealnog prekidača, ne može se predvideti i simulirati nastanak visokofrekvencijskih raspirujućih oscilacija, čije je trajanje



Slika 7.72: Nestabilne oscilacije u kolu pre sečenja struje

jako kratko, tako da usvajamo model po kome se struje industrijske učestanosti, kada dostigne vrednost i_s , naglo prekida.

Posle gašenja luka usled sečenja male induktivne struje, između kontakata sklop-nog aparata uspostavlja se prelazni povratni napon U_{ppn} usled dejstva mreže u kojoj je sklopni aparat priključen. Prelazni povratni napon se sastoji iz dve komponente. Jednu komponentu čini napon na kontaktu aparata sa napojne strane, a drugu sa strane potrošača. Ukupan napon koji napreže međukontaktni prostor dobija se kao razlika ova dva napona. Između kontakata prekidača koji se razdvajaju uspostavlja se dielektrička izdržljivost. Ukoliko prelazni povratni napon raste brže od dielektričke izdržljivosti, dolazi do ponovnog paljenja luka između kontakata prekidača. Na slici 7.73 prikazani su prelazni povratni naponi kada dolazi i kada ne dolazi do ponovnog paljenja luka pri različitoj brzini uspostavljanja dielektričke izdržljivosti.

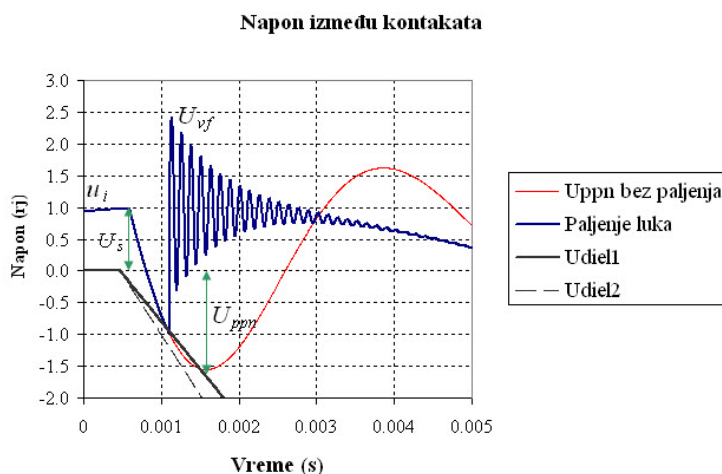
Mora se razlikovati proces prvog gašenja luka, kada dolazi do sečenja struje i kasnijih gašenja luka posle ponovnih paljenja luka. U prvom gašenju luka struja koja se prekida je industrijske frekvencije koja se sporo približava nuli, tako da kod prekidača sa nezavisnom karakteristikom gašenja luka kod koje intenzitet gašenja ne zavisi od struje koja se prekida, gašenje je olakšano zbog ohlađenosti i dejonizacije prostora zbog male struje. Kada su u pitanju visokofrekvencijske struje kod naknadnih paljenja luka, kada se struja visoke frekvencije približava nuli, prostor ne stiže da se ohladi i dejonizuje i zato je otežano gašenje luka visoke frekvencije.

Na slici 7.73 oznake imaju sledeće značenje:

u_i - trenutna vrednost napona sa strane izvora,

u_s - vrednost napona izvora u trenutku sečenja struje,

U_{ppn} -maksimalna vrednost prelaznog povratnog napona između kontakata prekidača na-



Slika 7.73: Vremenski tok napona između kontakata i porasta dielektričke izdržljivosti kada dolazi i kad ne dolazi do ponovnog proboja između kontakata

kon gašenja luka u slučaju kada ne bi bilo ponovnog paljenja luka,

u_{diel1} -promena dielektričke izdržljivosti međukontaktnog prostora u toku razmicanja kontakata,

u_{diel2} -promena dielektričke izdržljivosti međukontaktnog prostora za veću brzinu razmicanja kontakata,

U_{vf} -visokofrekvencijske oscilacije koje nastaju neposredno posle paljenja luka u konturi koju čine C_1 , L_4 i C_2 , odnosno grana sa prekidačem i okolnim kapacitivnostima opreme.

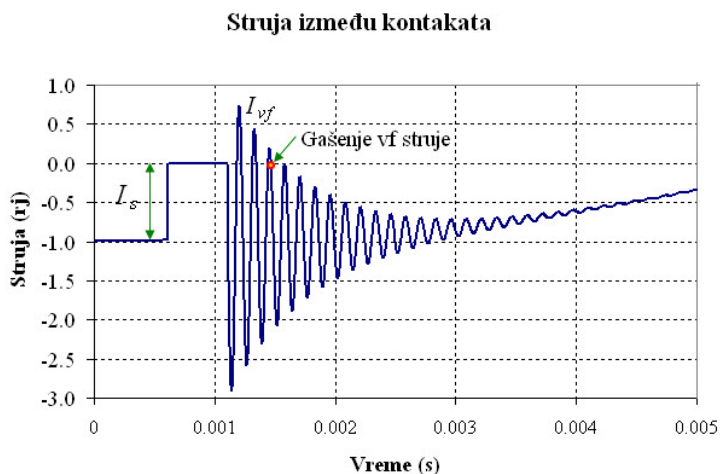
Na slici 7.74 prikazan je vremenski tok struje prilikom sečenja struje, kada ne dolazi do ponovnog paljenja luka.

Na slici 7.74 oznake imaju sledeće značenje.

I_s -trenutna vrednost struje u trenutku sečenja (struja sečenja),

I_{vf} - visokofrekvencijska struja u trenutku ponovnog paljenja luka.

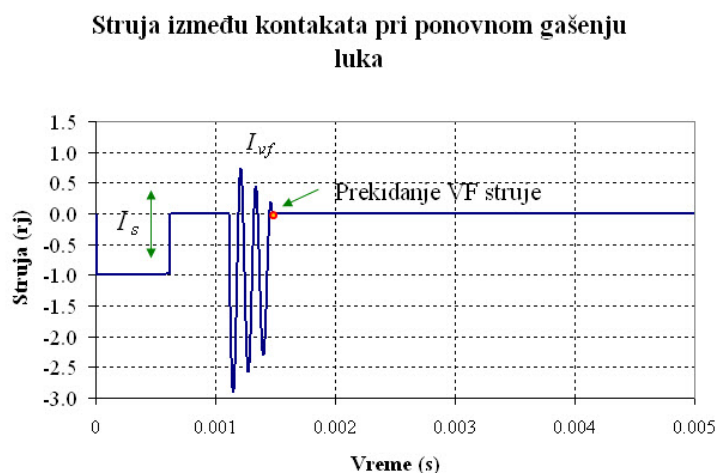
Gašenje luka visokofrekvencijske struje moguće je samo pod određenim uslovima kada ona prolazi kroz nulu. Gašenje luka visokofrekvencijske struje je otežano u odnosu na struju industrijske frekvencije zbog toga što se VF struja mnogo brže približava nuli, tako da hlađenje i dejonizacija električnog luka ne može zbog inercije da prati brzinu opadanja struje. Stoga postoje granične strmine struje pri približavanju nuli koje prekidač može da prekine. To se u praksi manifestuje tako da prekidač ne prekida visokofrekvencijsku



Slika 7.74: Vremenski tok struje između kontakata posle sečenja struje i ponovnog paljenja luka

struju u prvoj nuli, već kasnije kada se zbog prigušenja smanjila amplituda oscilacija, kao i strmina približavanja struje nuli.

Na slici 7.75 prikazan je slučaj kada dolazi do sečenja struje, ponovnog paljenja luka kada dielektrička izdržljivost postane veća od prelaznog povratnog napona, kao i kada dolazi do ponovnog gašenja visokofrekventne struje između kontakata pri prolazu kroz jednu od nula VF struje.

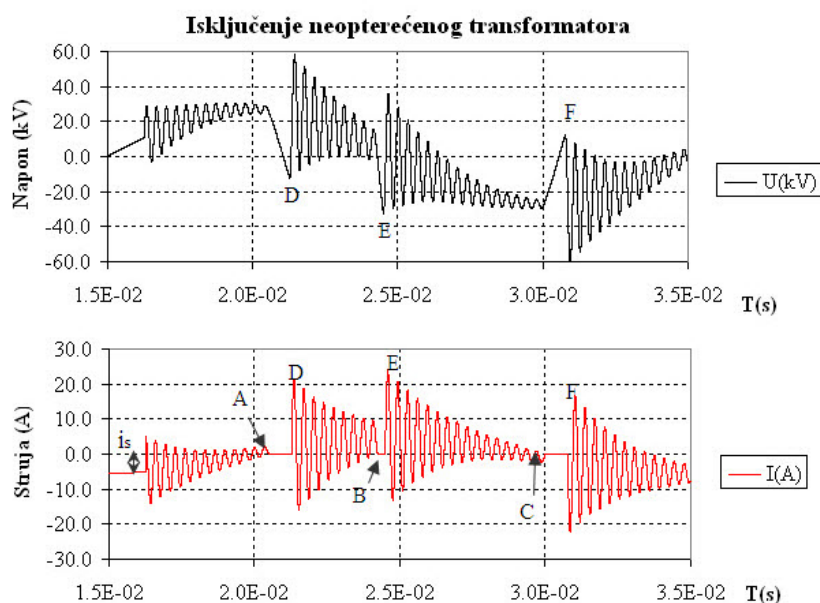


Slika 7.75: Vremenski tok struje između kontakata posle sečenja struje i ponovnog paljenja luka i gašenja luka u nuli VF struje

Na slici 7.74 označena je nula struje u kojoj VF struja može da bude prekinuta, a na slici 7.75 prikazana je VF struja koja se prekida.

Na slici 7.76 prikazan je numerički simuliran proces višestrukog gašenja i paljenja luka, koji je karakterističan za proces prekidanja malih induktivnih struja vakuumskim prekidačima. Usvojeni su sledeći kriterijumi gašenja luka:

- Luk se prvi put gasi u trenutku kada trenutna vrednost struje industrijske učestalosti koja se seče iznosi $i_s = 5$ A, koliko obično proizvođači vakuumski prekidača garantuju,
- pri narednim gašenjima luka usvojeno je da do prekida visofrekvencijske struje dolazi kada brzina opadanja struje prema nuli iznosi 20000 A/s.



Slika 7.76: Proces višestrukog paljenja i gašenja luka

Na slici 7.76 oznake imaju sledeće značenje:

i_s -vrednost sečene struje usvojena da iznosi 5 A,

A, B, C -trenutci gašenja luka, kada je brzina opadanja struje neposredno pre prolaska kroz nulu 20 kA/s,

D, E, F -trenutci ponovnog paljenja luka.

Zakon uspostavljanja dielektričke izdržljivosti usvojen je da ima oblik:

$$u_{diel}(t) = U_i + \Delta U \cdot (t - t_i) \quad (7.128)$$

gde su:

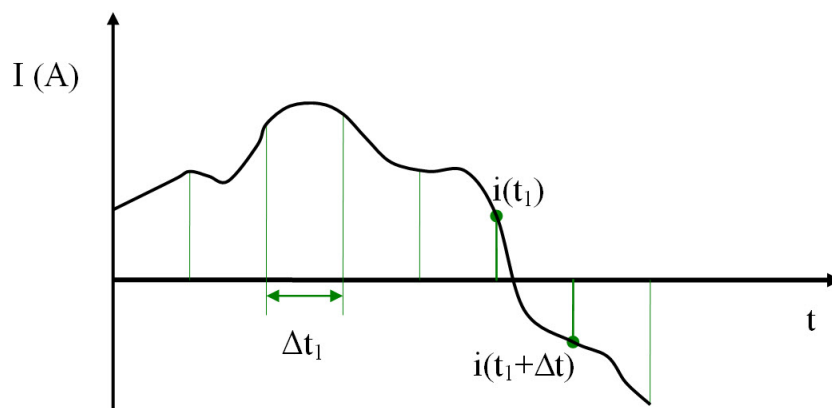
U_i -početna dielektrička izdržljivost nakon gašenja luka,

ΔU -brzina porasta dielektričke izdržljivosti u toku vremena zbog razdvajanja kontakata,

t_i -trenutak kada je došlo do gašenja luka.

Problem vremenskog koraka kod modelovanja prekidača

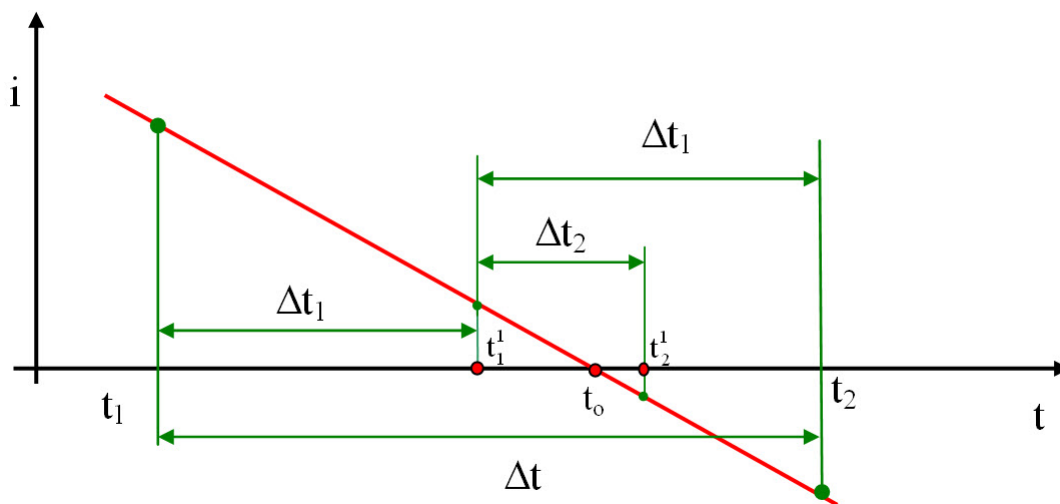
Kod numeričkog rešavanja prelaznog procesa prolazak struje kroz nulu detektuje se promenom znaka struje u dva susedna koraka proračuna. Ako se znaci struje razlikuju, znači da je do prolaska struje kroz nulu došlo između ta dva koraka. Ukoliko bi deklarirali da se u koraku pre ili u koraku posle stvarnog prolaska struje kroz nulu gasi luk i struji dodeljuje nulta vrednost, javili bi se prenaponi usled numeričkog sečenja struje, jer struja naglo sa vrednosti različite od nule dobija nultu vrednost. Na slici 7.77 prikazan je proces detekcije nule struje.



Slika 7.77: Detekcija nule struje na bazi promene polariteta i numeričko sečenje struje

Zbog toga se u blizini nulte vrednosti struje korak proračuna smanjuje da bi sa manjim korakom vršio proračun i detektovala nulta vrednost struje. Optimalna metoda za traženje nule struje je metoda polovljenja segmenata. Ova metoda je ilustrovan na slici 7.78.

Metoda polovljenja segmenata je iterativni postupak. Posmatramo struju u dva trenutka t_1 i $t_2 = t_1 + \Delta t$, gde interval Δt predstavlja korak proračuna. Ukoliko su struje u tim trenucima različitog znaka, znači da je između te dve tačke došlo do prolaska struje kroz nulu. Interval između t_1 i t_2 se polovi i za oba nova intervala vremena $\Delta t_1 = \Delta t/2$ se ispituje znak struje na krajevima intervala. Određuje se na kojim od intervala dužine Δt_1 struja ima različite predznake. Novi interval je određen između tačaka $t_1^1 = t_1 + \Delta t_1$ i t_2 . Sada se taj interval polovi i određuju novi intervali dužina $\Delta t_2 = \Delta t_1/2$. Struja menja predznak na intervalu dužine Δt_2 između tačaka t_1^1 i $t_2^1 = t_1^1 + \Delta t_2$.



Slika 7.78: Prikaz metode polovljenja segmenata

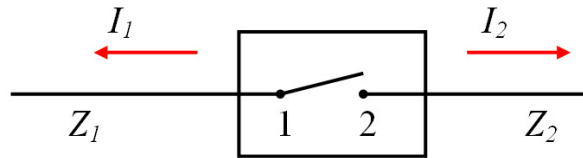
Postupak se ponavlja dok se ne nađe trenutak kada vrednost struje na granici intervala postane manja od unapred zadate vrednosti, kada se usvaja da u tom trenutku struja prolazi kroz nulu. Stvarni trenutak nule struje je t_o .

Mora se naglasiti da ovakav način određivanja nule struje može da se primeni samo u mreži sa koncentrisanim parametrima, gde se jednačine stanja mogu rešavati sa promenljivim korakom.

7.7.5 Model prekidača u mreži sa raspoređenim parametrima

Ukoliko se trofazna mreža može opisati sa dovoljnom tačnošću raspoređenim parametrima, tada bi se pojavio problem modelovanja prekidača u faznim koordinatama, sa pojedinačnim otvaranjem i zatvaranjem pojedinih polova, jer je ostatak mreže je modelovan u komponentnim sistemima. Zbog toga je razvijem model prekidača za kolo sa raspoređenim parametrima u komponentnim sistemima, koji može da vrši pojedinačne komutacije pojedinih polova prekidača. Jedino ograničenje modela je nemogućnost promene koraka proračuna pri približavanju struje nuli u procesu isključenja.

Na slici 7.79 je prikazan deo mreže sa prekidačem u monofaznoj predstavi. Oznake



Slika 7.79: Monofazna zamenska šema prekidača sa oznakama smerova struja

na slici 7.79 imaju sledeće značenje:

Z_1 -karakteristična impedansa voda levo od prekidača

Z_2 -karakteristična impedansa voda desno od prekidača

Vodovi 1 i 2 mogu biti realni vodovi, a mogu biti i ekvivalentni vodovi pomoću kojih se zamenjuje koncentrisana induktivnost transformatora ili generatora. Između tačaka 1 i 2 nalazi se priključen prekidač, koji može biti u otvorenom ili zatvorenom položaju. Napon tačke 1 može se prikazati preko upadne i reflektovane komponente napona na sledeći način:

$$U_1 = U_{up1} + U_{od1} \quad (7.129)$$

gde su:

U_{up1} -upadna komponenta napona u tačku 1 po vodu 1,

U_{od1} -odbijena komponenta napona iz tačke 1 po vodu 1.

Ukupna struja na vodu 1, sa smerom kao na slici 7.79 je:

$$I_1 = \frac{U_{od1} - U_{up1}}{Z_1} \quad (7.130)$$

Napon u tački 1 na osnovu predhodnih izraza može se izraziti na sledeći način:

$$U_1 = 2U_{up1} + Z_1 I_1 \quad (7.131)$$

Na potpuno isti način može se izraziti napon u tački 2 na drugom priključku prekidača:

$$U_2 = 2U_{up2} + Z_2 I_2 \quad (7.132)$$

gde su:

U_{up2} -upadna komponenta napona u tačku 2 po vodu 2,

I_2 -struja na vodu 2 sa smerom kao na slici 7.79.

Umesto mreže u monofaznom sistemu mogu se posmatrati tri nezavisne mreže u komponentnim sistemima. Primenom trofazne matrice transformacije obeležene kao $[P]$ može se odrediti napon u komponentnim sistemima iz napona u faznim koordinatama na sledeći način:

$$[U_K] = [P][U_F] \quad (7.133)$$

gde je:

$[U_K], (K = \alpha, \beta, 0)$ - vektor od tri elementa napona u komponentnim sistemima,

$[U_F], (F = A, B, C)$ -vektor od tri elementa napona u faznim koordinatama,

$[P]$ - kvadratna matrica transformacije trećeg reda data izrazom 4.22 u poglavlju 4.2.2.

Napon tačke 1 u komponentnim sistemima može se izraziti na sledeći način:

$$[U_{1K}] = 2[U_{up1k}] + [Z_{1K}][I_{1K}] \quad (7.134)$$

gde je:

$[U_{1K}]$ - vektor napona tačke 1 u komponentnim sistemima,

$[U_{up1k}]$ -vektor upadnih komponenti napona ka tački 1 u komponentnim sistemima,

$[I_{1K}]$ -vektor struja na vodu 1 u komponentnim sistemima,

$[Z_{1K}]$ - dijagonalna matrica karakterističnih impedansi voda 1 u komponentnim sistemima.

Pri proračunu se smatra da su karakteristične impedanse u sva tri komponentna sistema frekvencijski nezavisne.

Primenom inverzne transformacije u fazne koordinate može se odrediti napon tačke 1 u faznim koordinatama.

$$[U_{1F}] = 2[U_{up1F}] + [P]^{-1}[Z_{1K}][I_{1K}] \quad (7.135)$$

$[U_{1F}]$ -vektor napona tačke 1 u faznim koordinatama,

$[U_{up1F}]$ - vektor upadnih komponenti napona u tački 1 u faznim koordinatama.

Ukoliko je prekidač zatvoren, struje u komponentnim sistemima povodu 1 mogu se izraziti preko napona u komponentnim sistemima u tački 2, uz uslov da je $I_{1K} = -I_{2K}$ prema smerovima struja na slici 7.79.

$$[I_{1K}] = [Z_{2K}]^{-1} \{2 \cdot [U_{up2K}] - [U_{2K}]\} \quad (7.136)$$

gde je:

$[Z_{2K}]^{-1} = [1/Z_{2K}]$ -dijagonalna matrica čiji su elementi recipročne vrednosti karakterističnih impedansi u komponentnim sistemima za vod 2.

Struja u komponentnim sistemima može se izraziti preko faznih napona množenjem sa matricom transformacije.

$$[I_{1K}] = [Z_{2K}]^{-1} \cdot [P] \cdot [K] \cdot \{2[U_{up2F}] - [U_{2F}]\} \quad (7.137)$$

$[U_{2F}]$ -vektor napona tačke 2 u faznim koordinatama,

$[U_{up2F}]$ - vektor upadnih komponenti napona u tački 2 u faznim koordinatama,

$[K]$ - dijagonalna matrica trećeg reda sledećeg oblika:

$$[K] = \begin{bmatrix} K_A & 0 & 0 \\ 0 & K_B & 0 \\ 0 & 0 & K_C \end{bmatrix} \quad (7.138)$$

elementi matrice $[K]$ imaju sledeće vrednosti:

$K_i = 0$, ($i = A, B, C$) -ako je prekidač na fazi i otvoren,

$K_i = 1$, ($i = A, B, C$) -ako je prekidač na fazi i zatvoren.

Sređivanjem predhodnih izraza dobija se:

$$[U_{1F}] = 2[U_{up1F}] + [K] \cdot [P]^{-1}[Z_{1K}][Z_{2K}]^{-1}[P][K] \cdot \{2[U_{up2F}] - [U_{2F}]\} \quad (7.139)$$

Ukoliko je prekidač na nekoj fazi zatvoren, ispunjen je uslov da su naponi u tačkama 1 i 2 identični, odnosno:

$$U_{1F} = U_{2F}, \text{ za faze } (F = A, B, C) \quad (7.140)$$

Ukoliko je prekidač na nekoj fazi otvoren, odgovarajući elemenat u matrici $[K]$ postaje jednak nuli, pa se na taj način eliminiše uticaj struje $[I_{2F}]$ na napon u tački 1 na fazi koja je otvorena. Kako se vektori napona $[U_{2F}]$ i $[U_{up2F}]$ množe matricom $[K]$, ako je prekidač na nekoj fazi otvoren, elementi vektora $[U_{2F}]$ i $[U_{up2F}]$ množe se nulom iz matrice $[K]$, pa time gube uticaj vrednosti na vektor $[U_{1F}]$.

Uvažavajući uslov $U_{1F} = U_{2F}$ za ($F = A, B, C$), može se umesto napona $[U_{2F}]$ pisati $[U_{1F}]$. Tada se napon može izraziti na sledeći način:

Zamenom vektora $[U_{2F}]$ sa $[U_{1F}]$ u izrazu 7.139 dobija se:

$$\begin{aligned} [U_{1F}] &= 2 \{ [I] + [K] \cdot [P]^{-1}[Z_{1K}][Z_{2K}]^{-1}[P][K] \}^{-1} \cdot [U_{up1F}] \\ &+ 2 \cdot [K] \cdot [P]^{-1}[Z_{1K}][Z_{2K}]^{-1}[P][K] \cdot [U_{up2F}] \end{aligned} \quad (7.141)$$

gde je $[I]$ jedinični vektor.

Umesto u faznim koordinatama, naponi u tački 1 mogu biti izraženi u komponentnim sistemima. U tom slučaju se dobija sledeći izraz:

$$\begin{aligned} [U_{1K}] &= 2 \{ [P] + [P][K] \cdot [P]^{-1}[Z_{1K}][Z_{2K}]^{-1}[P][K] \}^{-1} [P]^{-1} \cdot [U_{up1k}] \\ &+ 2[P] \cdot [K] \cdot [P]^{-1}[Z_{1K}][Z_{2K}]^{-1}[P][K][P]^{-1} \cdot [U_{up2k}] \end{aligned} \quad (7.142)$$

Napon u komponentnim sistemima u tački 2 dobija se na isti način:

$$\begin{aligned} [U_{2K}] &= 2 \{ [P] + [P][K] \cdot [P]^{-1}[Z_{2K}][Z_{1K}]^{-1}[P][K] \}^{-1} [P]^{-1} \cdot [U_{up2k}] \\ &+ 2[P] \cdot [K] \cdot [P]^{-1}[Z_{2K}][Z_{1K}]^{-1}[P][K][P]^{-1} \cdot [U_{up1k}] \end{aligned} \quad (7.143)$$

Opisanim postupkom mogu se odrediti naponi u komponentnim sistemima na krajevima prekidača kako pri otvorenim, tako i pri zatvorenim kontaktima prekidača na pojedinim fazama. Na taj način uopšte nije potrebno vršiti transformaciju napona iz komponentnih u fazne koordinate, već se celokupni proračun može vršiti u komponentnim sistemima. Matricom $[K]$ uvažena je nesimetrija.

Mogu se uvesti sledeće oznake kvadratnih matrica 3 reda:

$$\begin{aligned} [A_{12}] &= 2 \{ [P] + [P][K][P]^{-1}[Z_{1K}][Z_{2K}]^{-1}[P][K] \}^{-1} [P]^{-1} \\ [B_{12}] &= 2[P][K][P]^{-1}[Z_{1K}][Z_{2K}]^{-1}[P][K][P]^{-1} \\ [A_{21}] &= 2 \{ [P] + [P][K][P]^{-1}[Z_{2K}][Z_{1K}]^{-1}[P][K] \}^{-1} [P]^{-1} \\ [B_{21}] &= 2[P][K][P]^{-1}[Z_{2K}][Z_{1K}]^{-1}[P][K][P]^{-1} \end{aligned} \quad (7.144)$$

Sada se proračun vektora napona u komponentnim sistemima na krajevima prekidača sa proizvoljnim uključenim kontaktima po polovima može prikazati jednostavnim matičnim operacijama.

$$\begin{aligned} [U_{1K}] &= [A_{12}][U_{up1k}] + [B_{12}][U_{up2k}] \\ [U_{2K}] &= [A_{21}][U_{up2k}] + [B_{21}][U_{up1k}] \end{aligned} \quad (7.145)$$

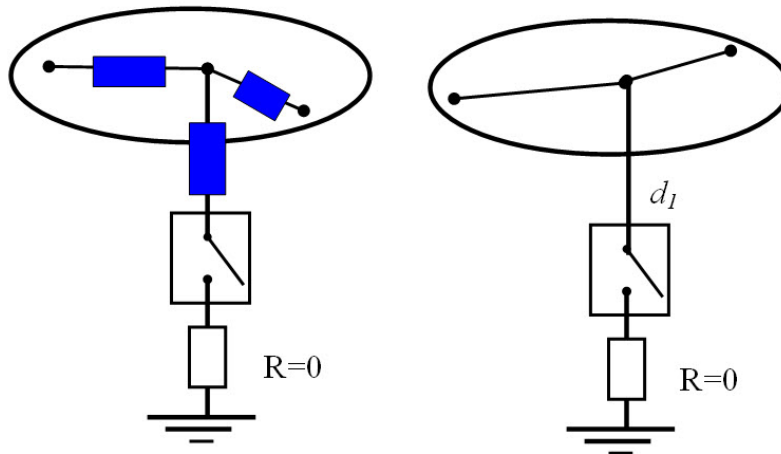
Matrice kvadratnog oblika trećeg reda $[A_{12}], [A_{21}], [B_{12}], [B_{21}]$ dobijene na osnovu izraza 7.144. Ove matrice se izračunavaju pre početka proračuna prelaznog procesa za određeno stanje prekidača. Ukoliko se u toku proračuna prelaznog procesa vrši zatvaranje ili otvaranje kontakata prekidača na nekoj od faza, vrši se ponovno izračunavanje matrica koje odgovaraju novom stanju prekidača. To znači da se gornje matrice izračunavaju onoliko puta koliko puta se određuje stanje prekidača. Najčešće se pri jednoj komutaciji sa rasipanjem trenutaka uključenja ili isključenja na različitim fazama samo tri puta izračunavaju gornje matrice u koracima proračuna u kojima se vrši promena stanja prekidača. Uvođenjem matrice implicitno se postavlja uslov da je struja na fazi na kojoj je prekidač otvoren jednaka nuli.

Ovakav model idealnog prekidača pogodan je za proračune prelaznih procesa metodom ekvivalentnih vodova u svim slučajevima kada se može zanemariti uticaj električnog luka na tok prelaznog procesa i kada se ne posmatraju pojave pri kojima se javljaju prenaponi usled sečenih struja.

7.7.6 Modelovanje kvara

Modelovanje kvara se vrši postavljanjem prekidača očno između faze i zemlje. Na slici 7.80 prikazan je prekidač u mreži sa koncentrisanim parametrima (levo) i raspoređenim

parametrima (desno).



Slika 7.80: Modelovanje kvarova prema zemlji

Model kvara se modeluje uvek na kraju induktivne grane (u mreži sa koncentrisanim parametrima) ili pomoću voda dužine $d = \Delta t \cdot v$, gde je Δt elementarni korak proračuna, a v brzina prostiranja. Ukoliko se kvar događa na kraju voda, u tom slučaju ne treba umetati dodatni vod. Drugi kontakt prekidača prema zemlji vezan je za otpornik čija je otpornost nula. Dok su kontakti otvoreni, nema kvara. Kada se kontakti zatvore, modeluje se kvar. U zavisnosti od broja kontakata koji su zatvoreni, zavisi da li će kvar biti jednopolni, dvopolni ili tropolni. Ne mogu se na ovaj način modelovati međufazni kvarovi bez dodira sa zemljom.

7.7.7 Rasipanje trenutaka uključenja kontakata

U procesu uključenja prekidača, posle dobijanja naloga za uključenje, mehanizam počinje da deluje na približavanje kontakata, koji se ubrzavaju, dostižu maksimalnu brzinu i pre završetka zatvaranja počinje njihovo kočenje da ne bi došlo do njihovog oštećenja usled udarca. Brzina zatvaranja kontakata zavisi od nazivnog napona prekidača, medijuma za gašenje luka i pogonskog mehanizma za pokretanje kontakata. Pri modelovanju zatvaranja prekidača razlikujemo tri bitna vremenska trenutka:

T_0 -početak zatvaranja prekidača (početak mehaničkog približavanja kontakata),

T_E -trenutak uspostavljanja električnog kontakata, odnosno trenutak kada dođe do predpaljenja električnog luka pre mehaničkog dodira,

T_M -trenutak mehaničkog dodira kontakata.

Na slici 7.81 prikazani su pojedini karakteristični vremenski trenuci posmatrani u toku jedne poluperiode [104] napona industrijske učestanosti. Pri tome je gustina raspodele trenutaka početka zatvaranja kontakata ravnomerna raspodeljena duž jedne poluperiode napona industrijske učestanosti, sa gustinom raspodele date izrazom:

$$\omega(t) = \frac{1}{T/2} \text{ (1/s)}$$

gde je $T = 0.02$ s trajanje periode industrijske učestanosti. Na slici je prikazana jedna poluperioda napona koji vlada između kontakata, kao i opadanje podnosivog napona međukontaktne razmaka u toku približavanja kontakata.

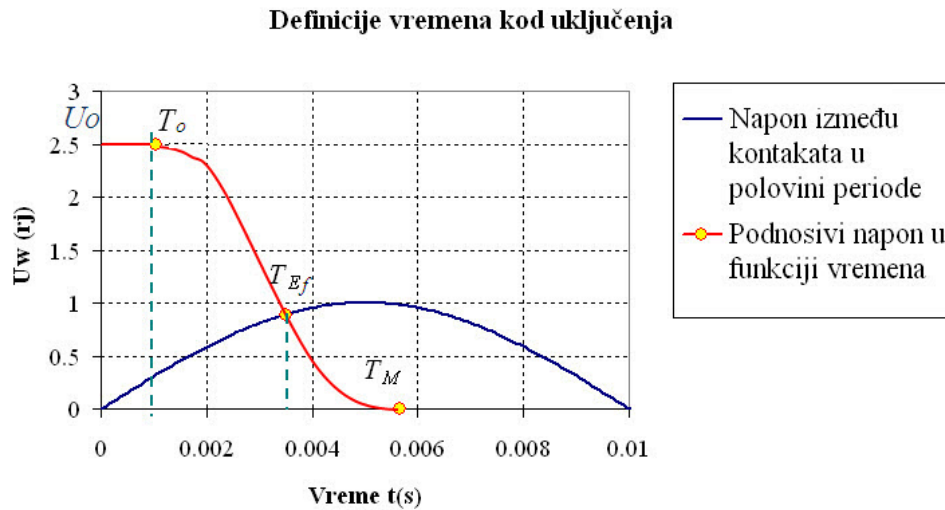
Podnosivi napon između kontakata se smanjuje od konstantne vrednosti U_O kada su kontakti potpuno razdvojeni, do preseka sa krivom napona između kontakata. U trenutku T_E podnosivi napon seče krivu napona koji vlada između otvorenih kontakata. U tom trenutku dolazi do paljenja električnog luka između kontakata. Proces paljenja električnog luka pre galvanskog dodira kontakata se naziva predpaljenjem električnog luka. U daljem procesu prekidač se u modelu tretira kao zatvoren, postoji galvanska veza između kontakata preko luka, ali sami kontakti nastavljaju da se približavaju do mehaničkog dodira, [106].

Vreme zatvaranja kontakata se može prikazati u vidu sume 3 člana:

$$T_{zstv} = T_o + T_{Ef} + \Delta t_f \quad (7.146)$$

gde su:

T_{zstv} - ukupno vreme zatvaranja do uključenja faze,



Slika 7.81: Definicija pojedinih vremenskih trenutaka u toku procesa uključenja

T_o - trenutak početka zatvaranja kontakata, koji ima uniformnu raspodelu, odnosno verovatnoća početka zatvaranja je identična u celoj periodu,

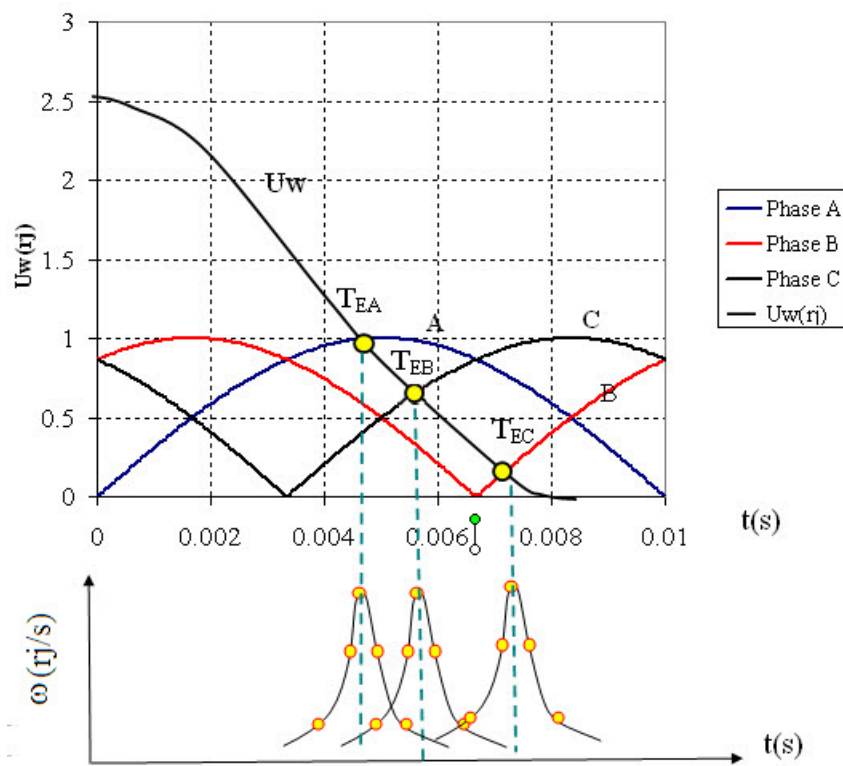
T_{Ef} - vreme od T_o do predpaljenja luka na fazi f , $f=A, B, C$,

Δt_f - slučajno odstupanje trenutka paljenja oko trenutka T_{Ef} .

U slučaju trofaznih prekidača, predpostavlja se da zatvaranje kontakata započinje u istom trenutku za sve tri faze, ali trenutci predpaljenja luka imaju slučajnu prirodu za koju predpostavljamo da ima raspodelu prema Gausovom zakonu. Slučajno rasipanje mehaničkog kretanja kontakata se može obuhvatiti istim slučajnim procesom rasipanja zajedno sa preskočnim naponom. Na slici 7.82 prikazano je opadanje podnosivog napona između kontakata U_w i apsolutne vrednosti faznih napona između kontakata na fazama A, B i C (gore). Ispod su nacrtane gustine raspodela verovatnoća odstupanja preskoka od očekivanih tačaka predpaljenja električnog luka T_{Ef} na fazama A, B i C sa normalnom gustinom raspodele prema izrazu 7.147.

$$\omega(\Delta t_f) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t_f}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (7.147)$$

Umesto kontinualne raspodele, odstupanja se u numeričkom proračunu definišu za određene diskretne vrednosti definisane neparnim brojem tačaka (tačka sa maksimalnom verovatnoćom pojavljivanja u trenutku preseka krive U_w sa faznim naponom T_{Ef} koja se naziva očekivanom tačkom paljenja luka i po nekoliko pari tačaka sa obe strane koje predstavljaju slučajno odstupanje od očekivanog trenutka paljenja luka. Kao optimalan broj tačaka se usvaja 5 ekvidistantnih tačaka $(-2\sigma, -1\sigma, 0, 1\sigma, 2\sigma)$, gde je σ srednje kvadratno odstupanje za normalnu raspodelu.



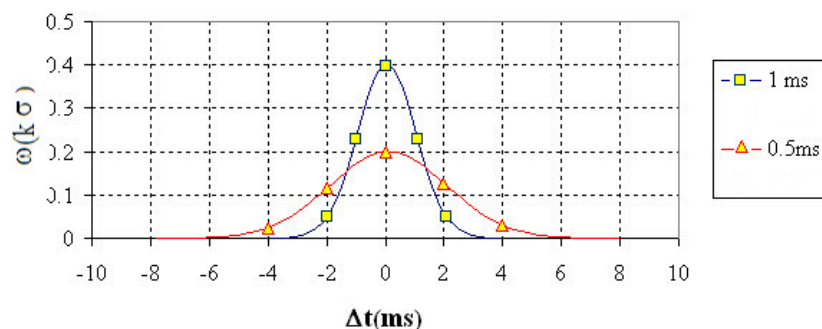
Slika 7.82: Model predpaljenja električnog luka pri zatvaranju trofaznog prekidača

Na slici 7.83 prikazana je gustina raspodele odstupanja trenutka paljenja električnog luka u odnosu na očekivani trenutak T_{Ef} .

Umesto kontinualne krive, gustine verovatnoće se definišu diskretnim tačkama koje su obeležene na dijagramu. Zbog transformacije gustine raspodele na vremenskom intervalu Δt u verovatnoću predpaljenja u jednoj tački, dolazi do malih grešaka zbog usrednjavanja, koje su utoliko manje ukoliko je uvedene veći broj odstupanja, odnosno ukoliko je vremenski interval Δt manji. U tabeli 7.9 su date vrednosti verovatnoće događaja uključenja u zadatom vremenu u funkciji vremenskog razmaka od očekivanog trenutka uključenja. Sabiranjem verovatnoća pojavljivanja predpaljenja luka u svakoj od faza dobija se vrednost 1. Date su krive za dve vrednosti srednjeg kvadratnog odstupanja $\sigma = 1$ ms i $\sigma = 0.5$ ms.

Tabela 7.9: Vrednosti verovatnoće uključenja $P(\Delta t)$ u funkciji vremenskog odstupanja od očekivanog trenutka uključenja ΔT_{Ef}

Δt (ms)	-2σ	-1σ	0	1σ	2σ
$P(rj)$	0.0511	0.241	0.417	0.241	0.0511

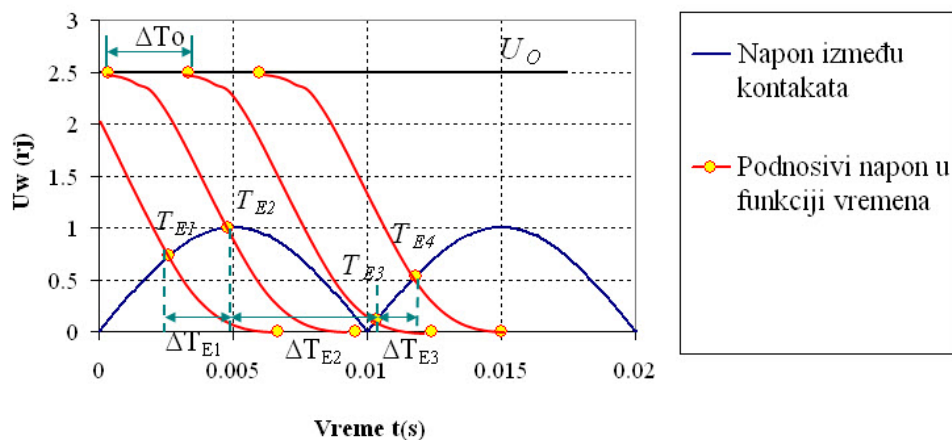


Slika 7.83: Gustina raspodele rasipanja trenutaka predpaljenja električnog luka u odnosu na očekivani trenutak paljenja T_{Ef} za 2 vrednosti srednjeg kvadratnog rasipanja σ

7.8 Računanje verovatnoće nastanka prenapona

Početak pokretanja kontakata, koji je direktna posledica dobijanja komande za zatvaranje prekidača, odvija se po uniformnoj raspodeli verovatnoće duž kompletne periode, jer je potpuno svejedno u kom se vremenskom trenutku u toku periode započinje proces uključanja. Ovo jedino ne važi ako je prekidač sa kontrolisanim trenutkom uključanja, što se primenjuje samo u specijalnim slučajevima. Raspodela verovatnoće predpaljenja električnog luka se ne odvija po uniformnoj raspodeli, što se može videti sa slike 7.84. Napon U_O je podnosivi napon kada su kontakti u otvorenom položaju. Ako se početak zatvaranja kontakata u ponovljenim simulacijama sistematski pomera za ΔT , dobijaju se tačke očekivanog predpaljenja električnog luka $T_{E1}, T_{E2} \dots T_{En}$ koje više nisu uniformno raspoređene.

Određivanje trenutaka predpaljenja luka



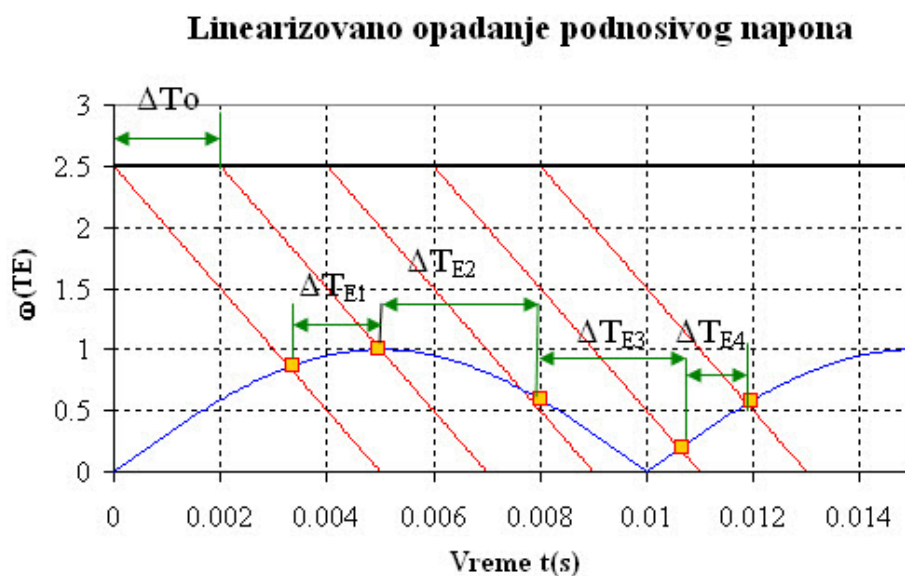
Slika 7.84: Određivanje trenutaka predpaljenja luka za različite trenutke započinjanja zatvaranja kontakata

Neka postoji n_{to} tačaka početka pokretanja kontakata pri zatvaranju prekidača T_0 unutar jedne poluperiode, prema slici 7.81, odnosno 7.84. U tom slučaju vremenski korak sa kojim se varira kriva opadanja dielektričke izdržljivosti je:

$$\Delta T_o = \frac{0.5T}{n_{to}} \quad (7.148)$$

gde je T perioda napona industrijske učestanosti koja iznosi $T = 0.02$ s. Dovoljno je razmatrati samo jednu poluperiodu, ali se mora voditi računa da ako je kretanje kontakata započeto u jednoj poluperiodi, zatvaranje kontakata se može desiti u drugoj poluperiodi napona između kontakata. Usvaja se da ne postoji razlika u preskočnim naponima između pozitivne i negativne poluperiode, pa se zato posmatra apsolutna vrednost napona između kontakata. Uobičajeni broj tačaka variranja krive podnosivog napona y poluperiodi je $n_{to} = 20$.

Na slici 7.85 prikazan je uprošćeni postupak određivanja verovatnoće predpaljenja električnog luka u međukontaktom prostoru, ukoliko smatramo da se smanjivanje međukontaktog rastojanja i podnosivog napona između kontakata vrši po linearnom zakonu. Ova pretpostavka ne utiče bitno na rezultate zbog toga što se predpaljenje luka najčešće događa na linearnom delu krive. Sa druge strane, teško je tačno odrediti krivu preskočnog napona, a hodograf brzine kontakata se jednostavno meri. Može se uvesti pretpostavka o proporcionalnosti podnosivog napona između kontakata u hladnom stanju (posle duge pauze nakon isključenja) i udaljenosti između kontakata.



Slika 7.85: Određivanja verovatnoće predpaljenja električnog luka u međukontaktom prostoru za slučaj linearnog smanjivanje međukontaktog podnosivog napona

Iako su trenutci početka zatvaranja kontakata ekvidistantni, razlika vremena predpaljenja luka između dve susedne funkcije opadanja podnosivog napona između kontakata

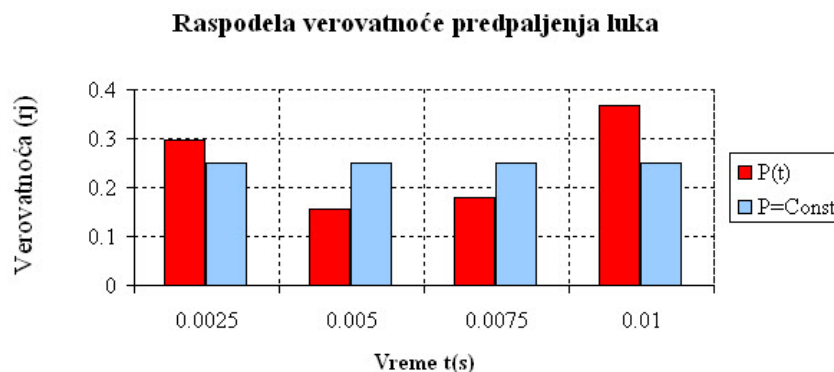
se razlikuju, kao na primer $\Delta T_{E1} < \Delta T_{E2}$, a $\Delta T_{E3} > \Delta T_{E4}$. Vremena paljenja električnog luka na delu poluperiode gde se napon smanjuje imaju manju verovatnoću nego da delu poluperiode gde napon između kontakata raste.

Verovatnoća predpaljenja električnog luka se može izračunati iz izraza:

$$P(T_o) = \frac{1}{0.5T} \times \frac{\Delta T_o}{\Delta T_{Ei}} \text{ za } i = 1, 2, 3, \dots, n_{to} \quad (7.149)$$

U izrazu 7.149 trenutak početka zatvaranja kontakata T_o se sistematski varira duž jedne poluperiode.

Na slici 7.86 prikazan je histogram raspodele uzimajući obzir razliku verovatnoće predpaljenja luka za različite trenutke u toku poluperiode $P(t)$, kao i slučaj kada je ravnomerna raspodela trenutaka predpaljenja ($P=\text{const}$).



Slika 7.86: Histogram približnih verovatnoća paljenja luka u određenim intervalima $P(t)$ i ravnomerna raspodela verovatnoće paljenja $P=\text{Const}$.

Sklopni prenaponi su najviši kada do predpaljenja luka između kontakata dođe u trenutku kada je napon koji vlada između kontakata najviši. Zbog toga je važno modelovati trenutke paljenja luka vodeći računa o fizičkim zbivanjima između kontakata. Kod srednjenaponskih prekidača (na primer vakuumskih), kontakti se kreću velikom brzinom i imaju mali hod, a svi su pokretani iz jednog mehanizma, tako da možemo smatrati da se dielektrička izdržljivost gotovo vertikalno smanjuje od napona U_o to trenutka predpaljenja luka i fizičkog dodira kontakata.

Kod visokonaponskih prekidača hod kontakata je duži, pa su zato efekti predpaljenja luka izraženiji.

Visina prenapona pri uključenju prekidača zavisi najviše od razlike napona koja vlada između kontakata neposredno pre paljenja luka. Verovatnoća pojave prenapona je direktno funkcionalno vezana za verovatnoću pojava predpaljenja električnog luka između kontakata.

$$P(U_{max}) = P(T_0) \cdot P(\Delta t_A) \cdot P(\Delta t_B) \cdot P(\Delta t_C) \quad (7.150)$$

gde su:

$P(U_{max})$ - verovatnoća pojavljivanja prenapona,

$P(T_0)$ -verovatnoća očekivanih trenutaka paljenja luka P_{Ef} izračunata po izrazu 7.149 za faze $f = A, B, C$,

$P(n_{if} \cdot \Delta t)$ -verovatnoća odstupanja od trenutka predpaljenja luka T_{Ef} na fazi $f = A, B, C$ koja se dobija kao $\omega(n_{if} \cdot \Delta t)$, gde je $n_{if} = (-n_m, -n_{m-1}, -2, -1, 0, 1, 2, n_{m-1}, n_m)$ za posmatranu fazu f . Ukupan broj varijacija za svaku fazu je $2 \cdot n_m + 1$. Za slučaj 5 tačaka postoje 2 tačke sa obe strane i jedna u sredini krive raspodele, kada je odstupanje od očekivanog trenutka paljenja 0.

n_m -maksimalan broj elementarnih koraka odstupanja od očekivanog trenutka predpaljenja luka T_{Ef} , gde je $n_m \cdot \Delta t \leq 3\sigma$. n_m se odnosi na broj tačaka odstupanja sa jedne strane krive zakona raspodele, ne računajući tačku kada je odstupanje 0.

Δt - elementarni korak variranja vremena odstupanja od očekivanog paljenja luka T_{Ef} , koji je srazmeran srednjem kvadratnom odstupanju σ , odnosno $\Delta t = k\sigma$, pri čemu je na slici 7.82 $k = 1$.

Tabela 7.9 napravljena je za preporučeni slučaj kada su izabrani sledeći uslovi prelaska sa kontinualne raspodele vremena rasipanja oko očekivanih na diskretnu raspodelu verovatnoća:

$$\begin{aligned} k &= 1 \\ n_m &= 2 \\ \Delta t &= \sigma \end{aligned}$$

Proračuni zakona raspodele maksimalnih prenapona se mogu raditi na dva načina:

- Sistematskim variranjem trenutaka uključenja
- Slučajnim izvlačenjem trenutaka uključenja (Monte Karlo simulacija)

7.8.1 Sistematsko variranje trenutaka uključenja

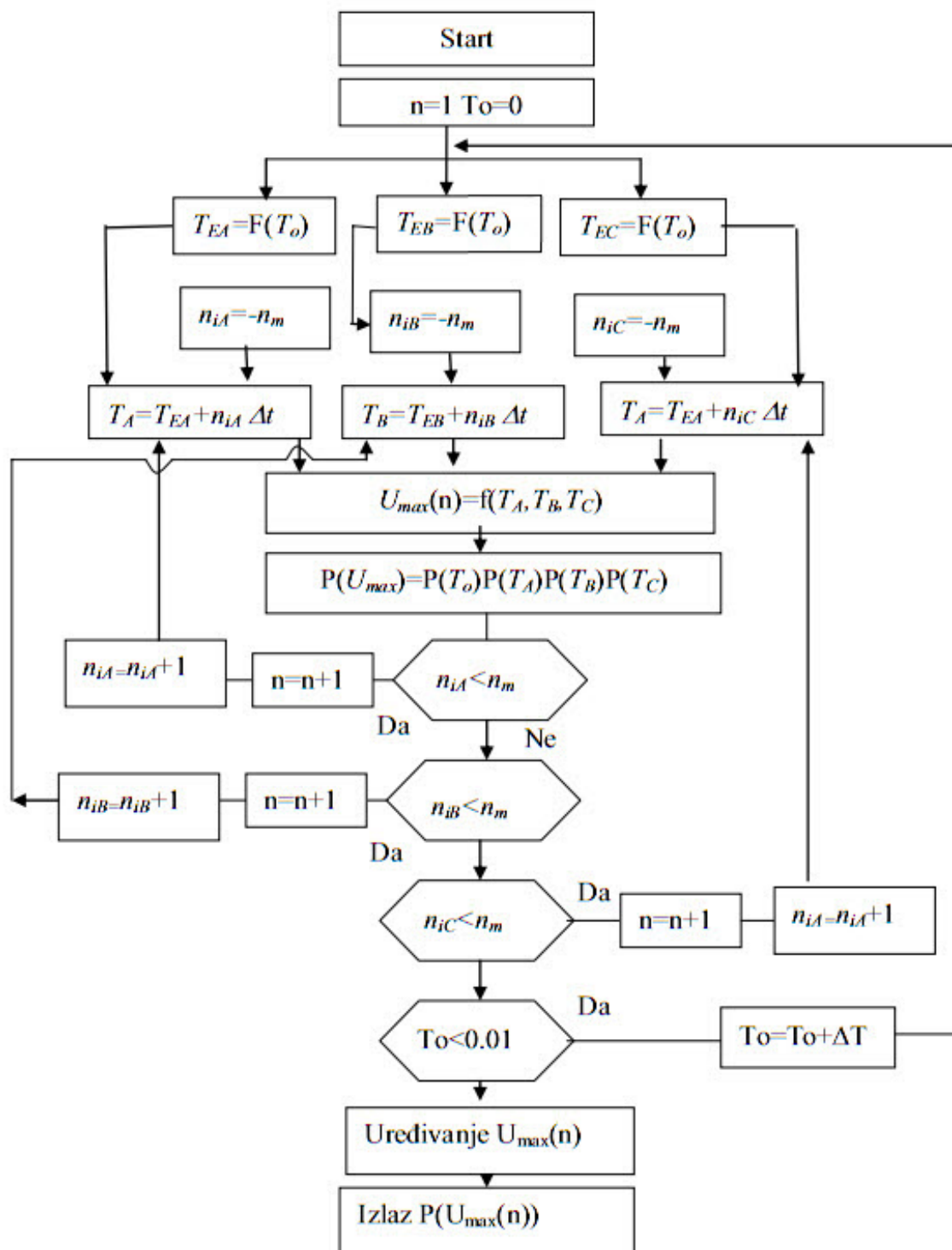
Pri sistematskom variranju trenutaka uključenja mogu se razlikovati sledeći koraci:

1. Variranje trenutka početka zatvaranja kontakata T_0 od 0 do 0.01 s sa korakom ΔT . Ukupan broj koraka je $n_{to} = 0.01/\Delta T$. Tekući trenutak početka zatvaranja kontakata $T_0 = n_T \cdot \Delta T$.
2. Za svako T_0 određivanje očekivanog trenutka predpaljenja luka na svakom od polova prekidača T_{Ef} , $f = A, B, C$.
3. Variranje slučajnog rasipanja oko očekivanog trenutka paljenja luka na fazi A T_{EA} . Trenutak paljenja luka je $T_A = n_{iA} \cdot \Delta T$. Varira se celobrojna promenljiva n_{iA} od vrednost $-n_m$ do vrednosti n_m .
4. Za svaki trenutak paljenja luka na fazi A $T_A = n_{iA} \cdot \Delta T$ iz predhodnog koraka, vrši se variranje slučajnog rasipanja oko očekivanog trenutka paljenja luka na fazi B T_{EB} . Trenutak paljenja luka je $T_B = n_{iB} \cdot \Delta T$. Na isti način se varira se celobrojna promenljiva n_{iB} od vrednost $-n_m$ do vrednosti n_m .
5. Postupak se ponavlja za fazu C na isti način varirajući celobrojnu promenljivu n_{iC} od vrednost $-n_m$ do vrednosti n_m , koja definiše trenutak paljenja luka na fazi C $T_C = n_{iC} \cdot \Delta T$.
6. Formirana je kombinaciju brojeva koji se variraju koja je bitna za proračun prenapona:

n_T -broj koji definiše trenutak početka zatvaranja kontakata T_0 i odgovarajućeg očekivanog trenutka paljenja luka na fazama T_{EA}, T_{EB} , i T_{EC} ,

n_{iA}, n_{iB}, n_{iC} - brojevi koji definišu trenutke predpaljenja luka na fazama A, B i C uvažavajući slučajno rasipanje.
7. Izračunavaju se maksimalni prenaponi $U_{max}(n)$, gde je n redni broj kombinacije brojeva n_T, n_{iA}, n_{iB} i n_{iC} .
8. Za predhodnu kombinaciju brojeva izračunava se verovatnoća pojave prenapona $P(U_{max}(n)) = P(n_T) \cdot P(n_{iA}) \cdot P(n_{iB}) \cdot P(n_{iC})$
9. Vektor maksimalnih napona $[U_{max}(i = 1..n)]$ se uređuje po rastućem redosledu, zajedno sa korespondentnim vektorom verovatnoća pojavljivanja maksimalnih napona $[P\{U_{max}(i = 1..n)\}]$.

Ukupan broj varijacija trenutaka uključenja je $n = n_T \cdot (2 \cdot n_m + 1)^3$. Na primer, za tipičan slučaj kada je $n_{To} = 20$, $n_m = 2$, $n = 20 \cdot 5^3 = 2500$. Na slici 7.87 prikazan je blok dijagram proračuna. Velika ušteda u vremenu proračuna, sa malim uticajem na rezultate, postiže se kada se definiše da na fazi A ne postoji rasipanje trenutaka paljenja luka, već samo na fazama B i C u odnosu na fazu A. U tom slučaju bi broj kombinacija uglova bio $n = n_T \cdot (2 \cdot n_m + 1)^2$. U tom slučaju bi bilo potrebno samo 500 simulacija.



Slika 7.87: Blok dijagram sistematskog proračuna

7.8.2 Monte Karlo simulacija

Pri primeni Monte Karlo simulacije koristi se generator slučajnih brojeva iz kojeg se dobija slučajna promenljiva. Kao generator slučajnih brojeva koriste se programi koji proizvode pseudo-slučajne brojeve koji se sastoje od dugačkih nizova slučajnih brojeva. Program za generisanje pseudo-slučajnih brojeva ima jednu inicijalnu promenljivu (seme), od koje zavisi slučajni niz koji nastaje. Za jednu vrednost inicijalne promenljive dobija se isti niz slučajnih brojeva. Ako se za seme koristi računarski sat, tada se generiše niz slučajnih brojeva koji se nikada ne ponavlja.

Po pravilu generatori slučajni brojeva generišu u opsegu od 0 do 1 sa ravnomernom raspodelom verovatnoće. Ukoliko želimo ravnomernu raspodelu brojeva u opsegu od a do b , gde je $b > a$, tada se rezultat iz generatora slučajnih brojeva koji generiše slučajan broj X_{rnd} iz opsega $[0,1]$ dobija slučajan broj X_{ab} iz opsega $[a,b]$ na sledeći način:

$$X_{ab} = a + X_{rnd} \cdot (b - a) \quad (7.151)$$

U slučaju kada želimo da dobijemo slučajan broj raspoređen po određenoj raspodeli, na primer normalnoj, definisanoj kumulativnom funkcijom $y = F(x)$, gde je y izlazna veličina koja se kreće od 0 do 1, tada se koristi metoda inverzne transformacije $x = F(y)^{-1}$.

Kumulativna Gausova raspodela verovatnoće je data izrazom:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right)^2\right) dt \quad (7.152)$$

Na slici 7.88 prikazan je način dobijanja normalizovane slučajne veličine x_n raspoređene po Gausovoj, odnosno normalnoj raspodeli, prema sledećem izrazu.

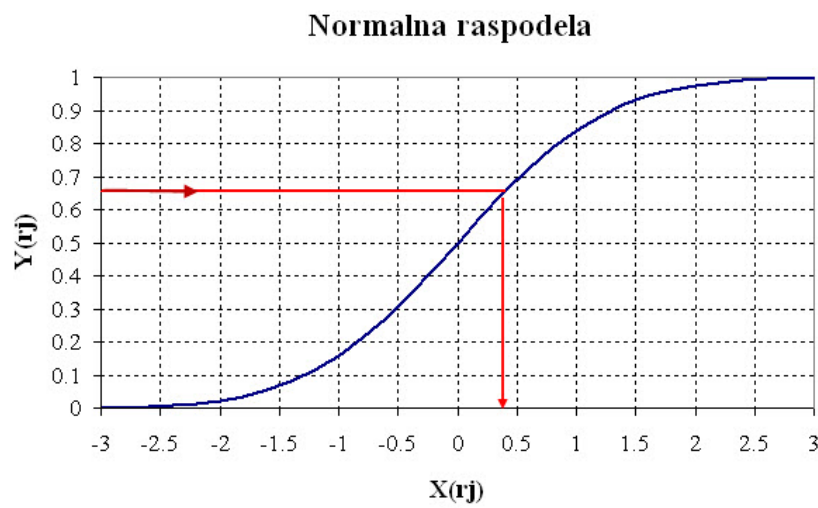
$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot t_n^2\right) dt \quad (7.153)$$

Za slučajno izabranu izabranu veličinu y koja je ravnomerno raspoređena u opsegu od 0 do 1, sa kumulativne funkcije verovatnoće se određuje na apscisnoj osi slučajna promenljiva x raspoređena po normalnoj raspodeli u opsegu od -3 do +3. Ako je izabrana ulazna slučajna promenljiva $y = 0.654$, izlazna slučajna promenljiva raspoređena po normalnom zakonu je $x = 0.4$. Na ovaj način se može generisati proizvoljan broj normalizovanih slučajnih promenljivih.

U slučaju kada promenljiva x nije normirana, tada se slučajna promenljiva x dobija iz normalizovane promenljive x_n pomoću izraza:

$$x = x_n \cdot \sigma + \mu \quad (7.154)$$

gde su:



Slika 7.88: Postupak inverzne transformacije za dobijanje normalizovane slučajne promenljive sa normalnim zakonom raspodele

σ - srednje kvadratno odstupanje,

μ -matematičko očekivanje.

7.8.3 Primena Monte Karlo simulacije na određivanje raspodele prenapona

Postupak proračuna u slučaju primene Monte Karlo simulacije za proračun sklopnih prenapona sastoji se iz sledećih koraka.

- Slučajan izbor trenutka početka zatvaranja kontakata $T_o = 0.01 \cdot X_{rnd}$, gde je X_{rnd} slučajna promenljiva iz opsega od 0 do 1,
- određivanje trenutka paljenja električnog luka T_{Ef} na fazama $f = A, B, C$, na osnovu slike 7.81,
- Određivanje trenutaka paljenja luka $T_f = T_{Ef} + \Delta t_{rnd}$, za faze $f=A, B$ i C , gde je Δt_{rnd} slučajno rasipanje trenutaka predpaljenja luka,
- Proračun prenapona za slučajno izabrane T_o i trenutke paljenja luka na pojedinim fazama T_f .
- registrovanje maksimalnih prenapona i ponavljanje postupka sve dok se ne ustaovi konvergencija izračunatih maksimalnih prenapona U_{max} .

U gornjem tekstu se slučajno rasipanje trenutaka paljenja luka na pojedinim fazama određuje preko izraza za uniformnu raspodelu promenljive Δt_{rnd} na opsegu od -3σ do 3σ .

$$\Delta t_{rnd} = -3 \cdot \sigma + 6 \cdot \sigma \cdot X_{rnd} \quad (7.155)$$

Proračuni se ponavljaju i izračunavaju se maksimalne vrednosti prenapona, koje se upoređuju sa srednjim vrednostima predhodno izračunatih prenapona. Kada je razlika $U_{max}(n)$ između rezultata u n -tom koraku i srednje vrednosti $U_{max}(mean)$ manja od unapred odabrane dozvoljene razlik ε , proračun se prekida i prikazuje se frekvencija pojava prenapona u pogodno izabranim opsezima.