



Univerzitet u Beogradu
Elektrotehnički fakultet
Odsek za energetiku
Smer: Elektroenergetski sistemi

Računarske vežbe:

**PROJEKTOVANJE POMOĆU RAČUNARA U
ELEKTROENERGETICI**

-zaštita od udara groma-

Dr Zlatan Stojković
Elektrotehnički fakultet, Beograd

Mr Aleksandra Grujić
Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija
Beograd

Goran Dobrić
Elektrotehnički fakultet, Beograd

Beograd, 2011.

VEŽBA BR. 1 – GROMOBRANSKA ZAŠTITA NADZEMNIH VODOVA

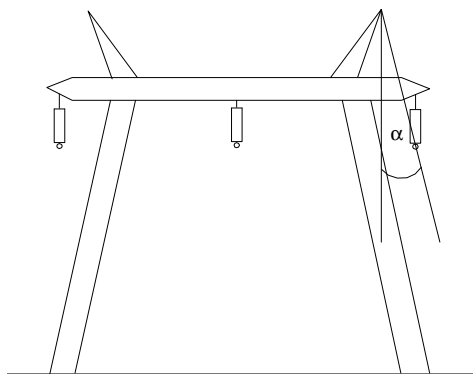
Teorijska osnova

Sa stanovišta ponašanja pri atmosferskim pražnjenjima stubovi nadzemnih vodova se mogu podeliti u tri grupe:

1. čelično-rešetkasti ili armirano-betonski sa zaštitnom užadi.
2. čelično-rešetkasti ili armirano-betonski bez zaštitne užadi.
3. drveni stubovi bez zaštitne užadi.

U ovoj vežbi će biti analiziran slučaj čelično-rešetkastog stuba sa zaštitnom užadi. Do atmosferskog pražnjenja, u tom slučaju, može doći u stub, u zaštitno uže ili u fazni provodnik mimo zaštitnog užeta.

Uloga zaštitnog užeta je da smanji verovatnoću atmosferskog pražnjenja u fazni provodnik. Zbog toga je međusobni položaj zaštitnog užeta i faznog provodnika veoma bitan. Taj položaj jednoznačno određuje zaštitni ugao koji je prikazan na slici 1.1. Prema važećim preporukama maksimalna vrednost zaštitnog ugla iznosi 30° bez obzira na nazivni napon voda. Ovakva metoda analize efikasnosti zaštite nadzemnog voda se zove geometrijska metoda.



Slika 1.1 - definicija zaštitnog ugla α

U slučaju geometrijske metode je verovatnoća pražnjenja mimo zaštitnog užeta:

$$\log P = \frac{\alpha \sqrt{h}}{A} - B \quad (1.1)$$

gde su:

P – verovatnoća pražnjenja mimo zaštitnog užeta

h – efektivna visina zaštitnog užeta iznad zemlje

α – zaštitni ugao

A – empirijska konstanta koja se usvaja da je 90

B – empirijska konstanta koja se usvaja da je 4.

Osim geometrijske metode, postoje i elektrogeometrijske metode koje uvažavaju uticaj amplitude struje pražnjenja na udarno rastojanje. Opšti izraz po kome se u elektrogeometrijskoj metodi računa udarno rastojanje je:

$$R_u = k \cdot I_0^n \quad (1.2)$$

gde su:

R_u – udarno rastojanje

k, n – koeficijenti koji zavise od korišćenog modela

I_0 – amplituda struje atmosferskog pražnjenja

Poseban oblik elektroteometrijske metode je generička metoda koja uvažava i geometriju (dimenzije) objekta koji se štiti. U ovoj vežbi se koriste dva modela generičke metode:

$$\text{Model Erikson: } R_u = 0,67 \cdot H^{0,6} \cdot I_0^{0,74} \quad (1.3)$$

$$\text{Model Petrov-Waters: } R_u = 0,8 \cdot [(H + 15) \cdot I_0]^{2/3} \quad (1.4)$$

gde su:

R_u – udarno rastojanje

$H(m)$ – visina zaštitnog užeta

$I_0(kA)$ – amplituda struje atmosferskog pražnjenja

Na slici 1.2 je prikazano određivanje atraktivne površine faznog provodnika nadzemnog voda po elektroteometrijskoj metodi za tri vrednosti amplitude struje atmosferskog pražnjenja. Šrafiranim delom je prikazan presek atraktivne površine faznog provodnika. Kada bi se vrh skokovitog lidera pre poslednjeg skoka našao u atraktivnoj zoni faznog provodnika, došlo bi do udara groma u provodnik. Što je struja pražnjenja veća, atraktivna zona faznog provodnika je manja. Pri nekoj graničnoj struji (I_{gr}) bi ta atraktivna površina nestala, odnosno ne bi postojala verovatnoća udara groma u fazni provodnik.

Takođe je potrebno napomenuti da postoji minimalna struja pražnjenja koja bi izazvala preskok na izolatoru faznog provodnika nakon udara groma. Svaka struja pražnjenja manja od minimalne ne izaziva preskok, a svaka veća izaziva preskok na izolatoru. Minimalna struja koja izaziva preskok na izolatoru se računa prema izrazu:

$$I_m = \frac{4 \cdot U_{pod}}{Z_c} \quad (1.5)$$

gde su:

I_m – minimalna struja koja izaziva preskok

Z_c – karakteristična impedansa provodnika

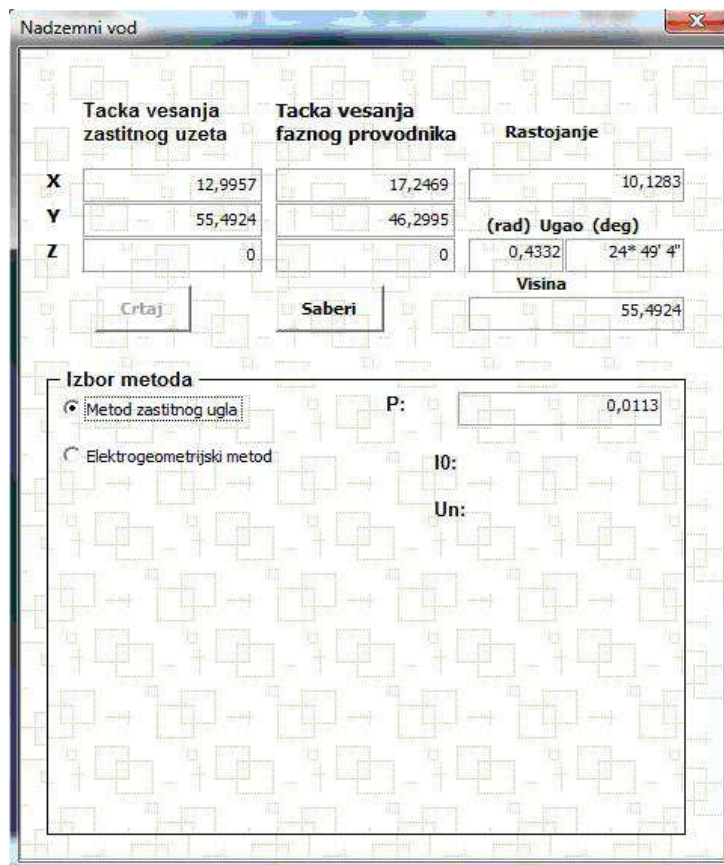
U_{pod} – podnosivi atmosferski napon izolatora

U slučaju da je granična struja manja od minimalne struje koja izaziva preskok, ne postoji opasnost od isključenja voda kao posledica udara groma.

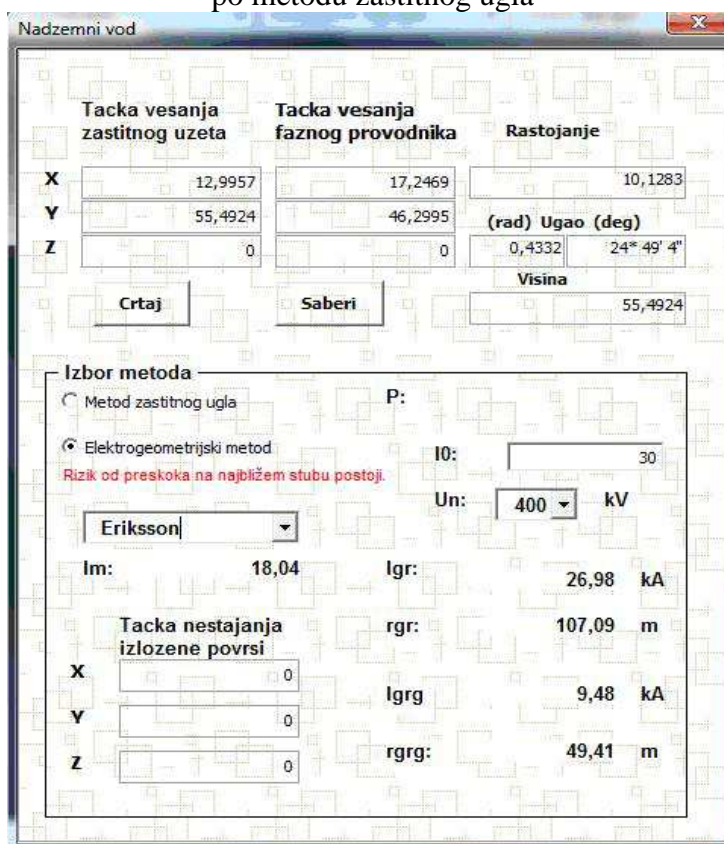
Programski alat

U AutoCAD-u je nacrtan jedan dvostruki nadzemni vod nazivnog napona 400kV. Otvaranjem AutoCAD aplikacije *NadzemniVod* automatski se pokreće program za proračun i crtanje zaštitnih zona nadzemnog voda. U daljem tekstu su opisani koraci koje je potrebno proći prilikom korišćenja ovog programskog alata.

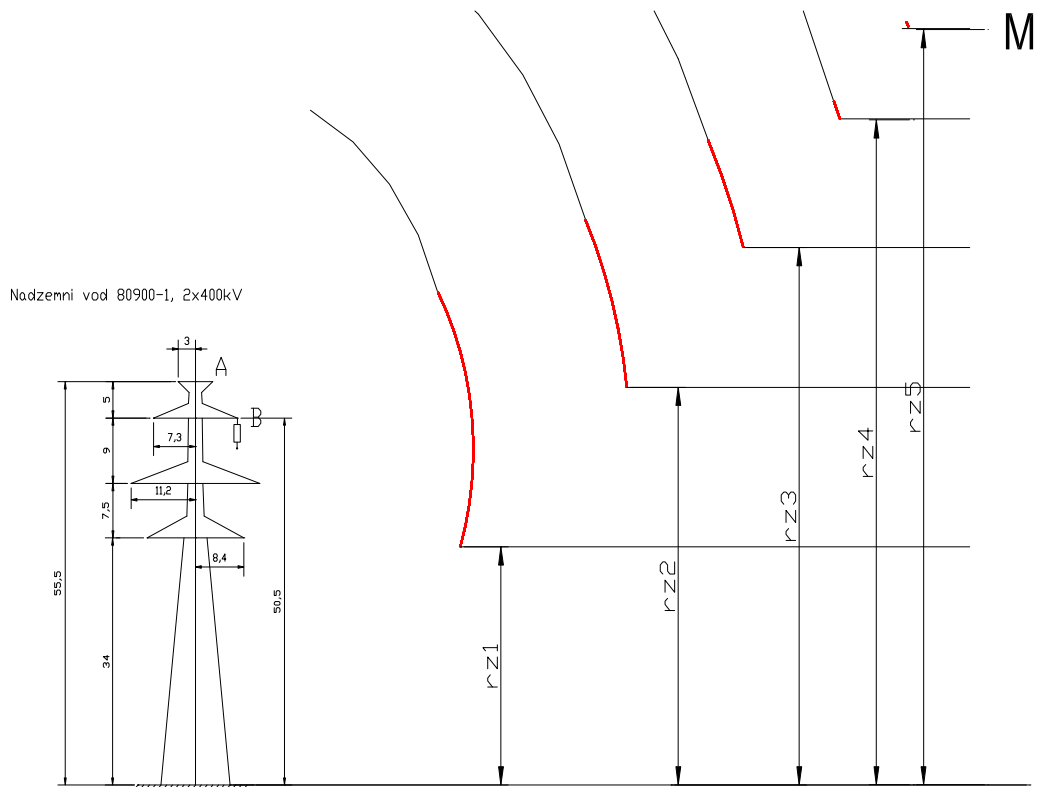
1. Od korisnika se traži da duplim klikom mišem na crtežu nadzemnog voda obeleži tačku vešanja zaštitnog užeta i tačku vešanja faznog provodnika respektivno. Nakon izvršenja tog koraka otvara se prozor kao na slici 1.3.
2. Program automatski očitava koordinate užeta i provodnika (može se videti na slici 1.3) i proračunava zaštitni ugao. Ukoliko je zaštitni ugao manji od 30° , proračunava se i verovatnoća udara groma mimo zaštitnog užeta (P). Ukoliko je zaštitni ugao veći od 30° ispisuje se poruka o neefikasnosti zaštite.
3. Korisnik takođe može izabrati i elektrogeometrijski metod kada se otvara prozor kao na slici 1.4. Potrebno je izabrati odgovarajući naponski nivo ($Un[kV]$) na osnovu koga se, prema izrazu (1.5), proračunava minimalna struja koja izaziva preskok pri udaru groma u fazni provodnik ($Im[kA]$). Postoji mogućnost izbora modela Erikson i modela Petrov-Waters, odnosno izbora izraza (1.3) ili (1.4) za proračun udarnog rastojanja. Da bi se proračunalo udarno rastojanje potrebno je uneti i amplitudu struje pražnjenja ($I_0[kA]$). Program automatski proračunava granično udarno rastojanje prema izrazu (1.6) i graničnu amplitudu struje ($rgrg[m]$ i $Igr[kA]$).
4. Pritiskom na dugme *Crtaj*, korisnik se vraća u AutoCAD prozor gde program automatski iscrtava atraktivnu zonu faznog provodnika. Na slici 1.5 je prikazan primer iscrtane atraktivne zone faznog provodnika (podebljana crvena linija).
5. Desnim klikom se ponovo otvara prozor kao na slici 1.4. Potrebno je povećavati amplitudu struje pražnjenja sve dok atraktivna zona provodnika ne nestane (tačka M na slici 1.5). Desnim klikom na tačku M se očitavaju njene koordinate i geometrijski se proračunava granično udarno rastojanje i granična amplituda struje ($rgrg[m]$ i $Igrg[kA]$).



Slika 1.3 – prozor programa za proračun zaštitne zone nadzemnog voda po metodu zaštitnog ugla



Slika 1.4 – prozor programa za proračun zaštitne zone nadzemnog voda po elektrogeometrijskom metodu



Slika 1.5 – atraktivna zona faznog provodnika

Zadatak

Pokrenuti aplikaciju *NadzemniVod*.

- Za nadzemni vod 80900-1 2x400kV proračunati zaštitni ugao i verovatnoću pražnjenja mimo zaštitnog užeta.
- Za model Erikson pronaći granične vrednosti udarnog rastojanja i amplitude struje pražnjenja menjajući vrednosti amplitude struje pražnjenja dok se ne dođe do tačke kada nestaje atraktivna zona faznog provodnika.
- Ponoviti tačku b. za model Petrov-Waters.

Rezultate upisati u tabele.

$\alpha(^{\circ})$	
P(%)	

<i>Eriksson</i>				<i>Petrov-Waters</i>			
$I_{gr}(kA)$	$r_{gr}(m)$	$I_{grg}(kA)$	$r_{grg}(m)$	$I_{gr}(kA)$	$r_{gr}(m)$	$I_{grg}(kA)$	$r_{grg}(m)$

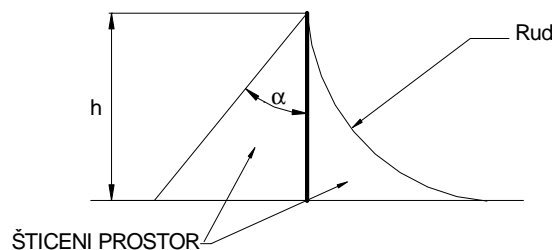
VEŽBA BR. 2 – GROMOBRANSKA ZAŠTITA OBJEKATA OPŠTE NAMENE

Teorijska osnova

Gromobranska zaštita objekata se može izvesti sa određenom verovatnoćom zaštite. Ne postoji 100% zaštita od atmosferskog pražnjenja. U zavisnosti od verovatnoće zaštite od atmosferskog pražnjenja definišu se 4 nivoa zaštite. Koji nivo zaštite je potreban konkretnom objektu zavisi od broja atmosferskih pražnjenja na jediničnoj površini godišnje na mestu na kome se nalazi objekat i od ekvivalentne prihvatne površine tog objekta, zavisi od tipa konstrukcije objekta, sadržaja i namene objekta i posledica od udara groma u objekat.

Prihvatni sistem gromobranske zaštite može biti izveden u vidu štapne hvataljke, štapne hvataljke sa ranim startovanjem i štapne hvataljke sa kružnim prstenom. Takođe se može izvesti preko zaštitne mreže koja se formira na krovu objekta pomoću elektroprovodnih traka određenih dimenzija. U ovoj vežbi će se analizirati zaštitne zone štapnih hvataljki.

Zaštitne zone štapnih hvataljki zavise od amplitude struje pražnjenja, odnosno od nivoa zaštite. Zone zaštite se mogu modelovati pomoću zaštitnog ugla ili pomoću metode kotrljajuće sfere. Na slici 2.1 je prikazana štapna hvataljka sa zaštitnom zonom definisanom preko zaštitnog ugla (levo) odnosno kotrljajuće sfere (desno). Potrebno je napomenuti da štapna hvataljka sa uređajem za rano startovanje, pre nego što dođe do udara groma, izbacuje uzlazni strimer i praktično povećava zonu zaštite, a štapna hvataljka sa kružnim prstenom se ponaša kao Frenklinova štapna hvataljka 60% veće visine. Ni jedna ni druga hvataljka nisu našle širu zastupljenost u propisima i standardima većine zemalja EU.



Slika 2.1 – štapna hvataljka sa definisanom zaštitnom zonom

Na slici 2.1 su:

h – visina štapne hvataljke

R_{ud} – udarno rastojanje (zavisi od amplitude struje pražnjenja, odnosno od nivoa zaštite)

α – zaštitni ugao (zavisi od nivoa zaštite i visine štapne hvataljke)

Zaštitni ugao zavisi od visine štapne hvataljke i od potrebnog nivoa zaštite i kreće se u opsegu od 25° do 55° . Niže štapne hvataljke i manji zaštitni nivo podrazumevaju veći zaštitni ugao.

Zaštitna zona prema metodi kotrljajuće sfere zavisi od amplitude struje pražnjenja, odnosno od zaštitnog nivoa. Veći zaštitni nivo podrazumeva manje amplitude struje pražnjenja, odnosno manje udarno rastojanje (poluprečnik kotrljajuće sfere) što je kritičniji slučaj. Zavisnost udarnog rastojanja od amplitude struje pražnjenja se može iskazati izrazom:

$$R_{ud} = E \cdot I^f \quad (2.1)$$

gde su:

R_u – udarno rastojanje

E, f – koeficijenti koji zavise od korišćenog modela

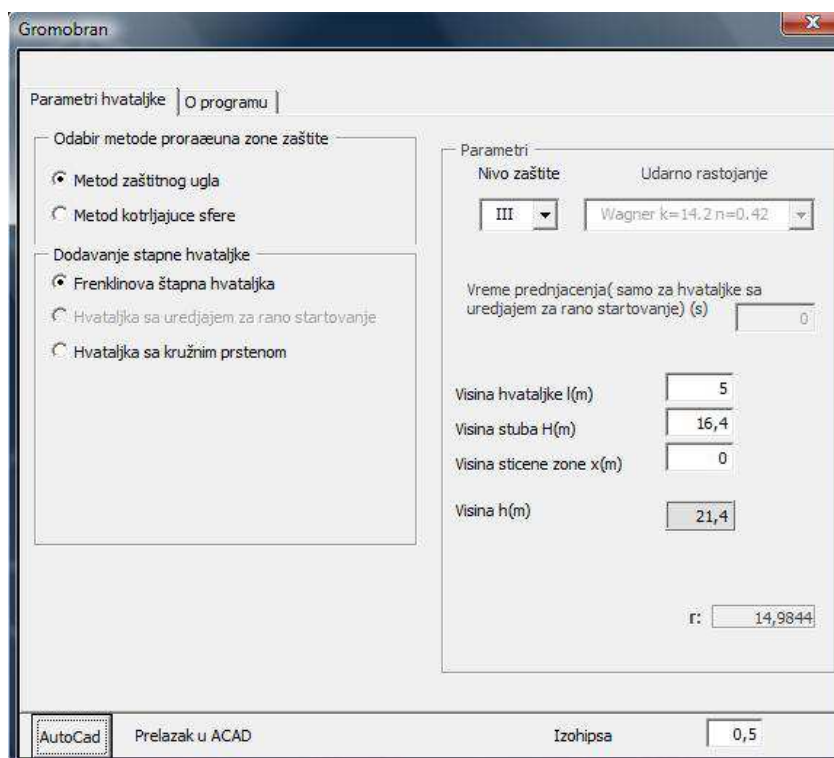
I_0 - amplituda struje atmosferskog pražnjenja

Koeficijenti E i f u izrazu (2.1) zavise od korišćenog modela (Armstrong i Whitehead, Brown i Whitehead, Love, Wagner, Mousa i IEEE 1995) i kreću se u opsegu $E=6,7\div 14,2$ i $f=0,42\div 0,8$ [1].

Programski alat

U AutoCAD-u je nacrtan jedan stambeni objekat visine 16,4 m. Otvaranjem AutoCAD aplikacije *StambeniObjekat* automatski se pokreće program za crtanje zaštitnih zona stambenog objekta. U daljem tekstu su opisani koraci koje je potrebno proći prilikom korišćenja ovog programskog alata.

1. Pokretanjem aplikacije otvara se prozor kao na slici 2.2. Korisnik ima mogućnost izbora metode zaštitnog ugla i metode kotrljajuće sfere. Takođe se može izabrati vrsta štapne hvataljke (Frenklinova, sa uređajem za rano startovanje i sa kružnim prstenom). Korisnik bira potreban nivo zaštite i, ako se proračun radi po metodi kotrljajuće sfere, model za proračun udarnog rastojanja. Potrebno je uneti visinu štapne hvataljke, visinu objekta (stuba) kao i visinu štice zone (u slučaju da se želi crtati zaštitna zona do površine zemlje potrebno je u ovo polje uneti vrednost 0). U polju *izohipsa* se može definisati korak iscrtavanja zaštitne zone.

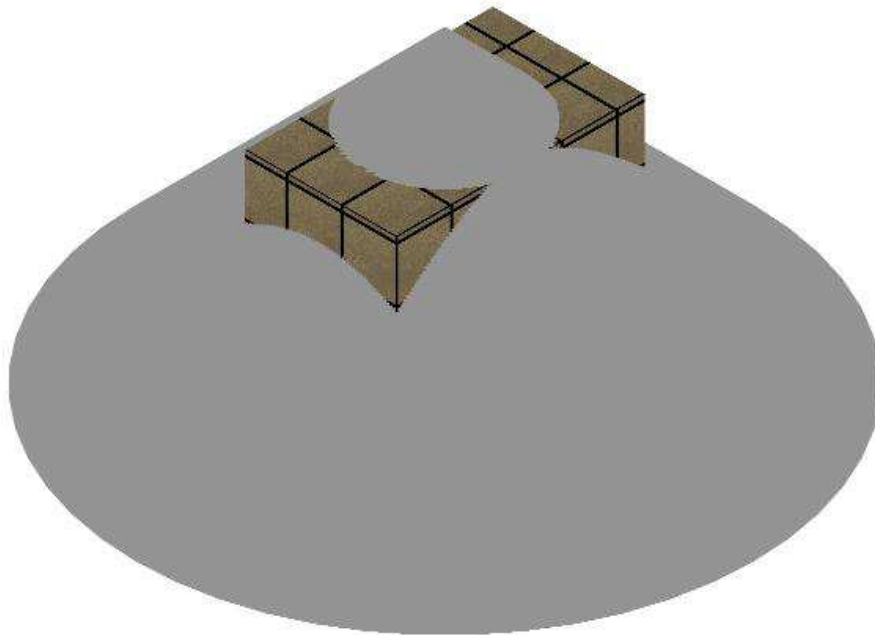


Slika 2.2 – prozor programa za definisanje zaštitne zone štapnih hvataljki

2. Pritiskom na dugme *AutoCad*, korisnik se vraća u prozor AutoCAD-a u kome je nacrtan objekat. Potrebno je podesiti pogled na objekat od gore (*View*→*3D Views*→*Top*). Duplim klikom na željeno mesto se postavlja definisana štapna

hvataljka i iscrtava se njena zaštitna zona. Ponovo se može podesiti željeni pogled i u 3D sagledati zaštitna zona definisane štapne hvataljke. Komandom *View*→*3D Orbit* se proizvoljno može podešavati ugao posmatranja. Desnim klikom se ponovo otvara prozor kao na slici 2.2. Može se definisati nova štapna hvataljka čija se zaštitna zona na isti način iscrtava na objektu i omogućava uporednu analizu.

Primer zaštitne zone jedne štapne hvataljke određene primenom ovog programskog alata je prikazan na slici 2.3. Za dobijanje 3D prikaza sa slike 2.3 je korišćena opcija renderovanja u AutoCAD-u.



Slika 2.3 – zaštitna zona štapne hvataljke postavljene na sredini krova stambenog objekta

Zadatak

Pokrenuti aplikaciju *StambeniObjekat*.

- a. Po metodi zaštitnog ugla analizirati uticaj nivoa zaštite na zaštitnu zonu Frenklinove štapne hvataljke. Postaviti dve štapne hvataljke visine 6 m na dva ugla objekta. Jednu hvataljku definisati za II nivo, a drugu za IV nivo zaštite.
- b. Ponoviti zadatak pod a, tako što se ovaj put za isti nivo zaštite (npr. III) menja visina štapne hvataljke sa 4 m na 8 m.

Zadaci će biti pregledani na računaru na licu mesta. Potrebno je analizirati razlike koje se uočavaju u zonama zaštite.

VEŽBA BR. 3 – GROMOBRANSKA ZAŠTITA OBJEKATA POSEBNE NAMENE

Teorijska osnova

U ovoj vežbi se razmatraju štapni gromobran i zaštitna užad kao prihvatni sistem gromobranske zaštite visokonaponskih postrojenja.

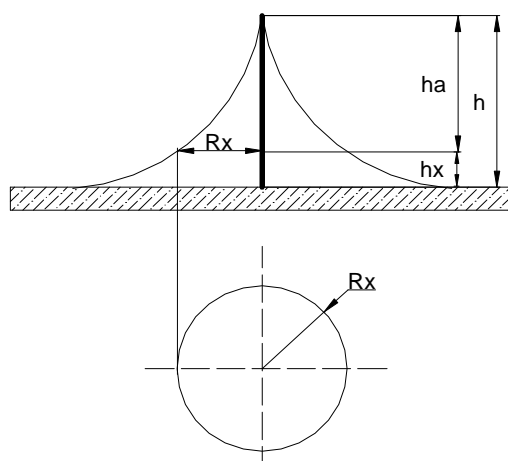
U našoj zemlji su u upotrebi metode ruskih autora koje se koriste pri projektovanju gromobranske zaštite visokonaponskih postrojenja i drugih objekata po metodi kotrljajuće sfere. Zona zaštite štapnog gromobrana visine $h(m)$ iznad zemlje, odnosno $h_a(m)$ iznad štíćenog objekta čija je visina $h_x(m)$, predstavlja krug poluprečnika $R_x(m)$ na visini $h_x(m)$ (slika 3.1). Poluprečnik zaštitne zone se određuje sledećim izrazom (TP-25 ZEP):

$$R_x = h_a \cdot \frac{1,6}{1 + \frac{h_x}{h}} \cdot p \quad (3.1)$$

gde je:

$$p = 1 \text{ za } h \leq 30 \text{ m}$$

$$p = 5,5 \sqrt{h} \text{ za } h > 30 \text{ m}$$



Slika 3.1 – definicija zaštitne zone štapnog gromobrana

Poluprečnik zaštitne zone zaštitnog užeta se određuje prema izrazu (3.2):

$$r_x = \frac{0,8 \cdot h_a}{1 + h_x / H} \quad \text{za } H \leq 30 \text{ m} \quad (3.2)$$

Veličine iz izraza (3.2) su definisane na slici 3.2.

Osim navedenog geometrijskog metoda (ne uvažava amplitudu struje pražnjenja), za proračun zaštitne zone se koristi i generički metod po modelu Hilleman-a. Prema Hilleman-u, poluprečnik zaštitne zone se računa po izrazu (3.3):

$$r_x = \sqrt{r_s^2 - (r_g - H)^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_g - h_x)^2} \quad (3.3)$$

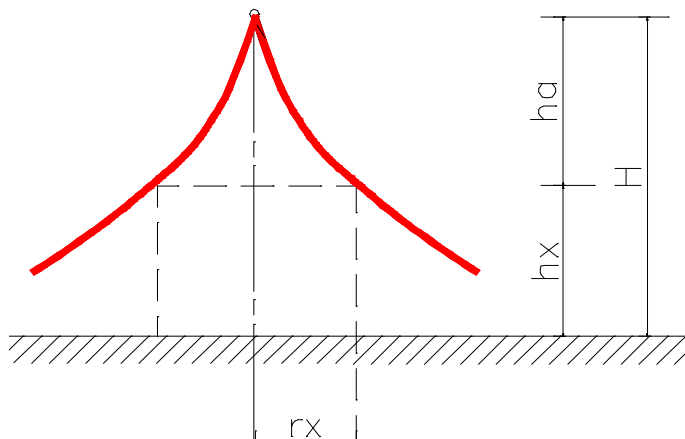
gde su:

r_x – poluprečnik zaštitne zone na visini h_x

H – visina štapne hvataljke (užeta)

h_x – visina na kojoj se traži poluprečnik r_x

r_g, r_c, r_s – rastojanja koja zavise od autora (Young, Love, CIGRE, IEEE 1995)



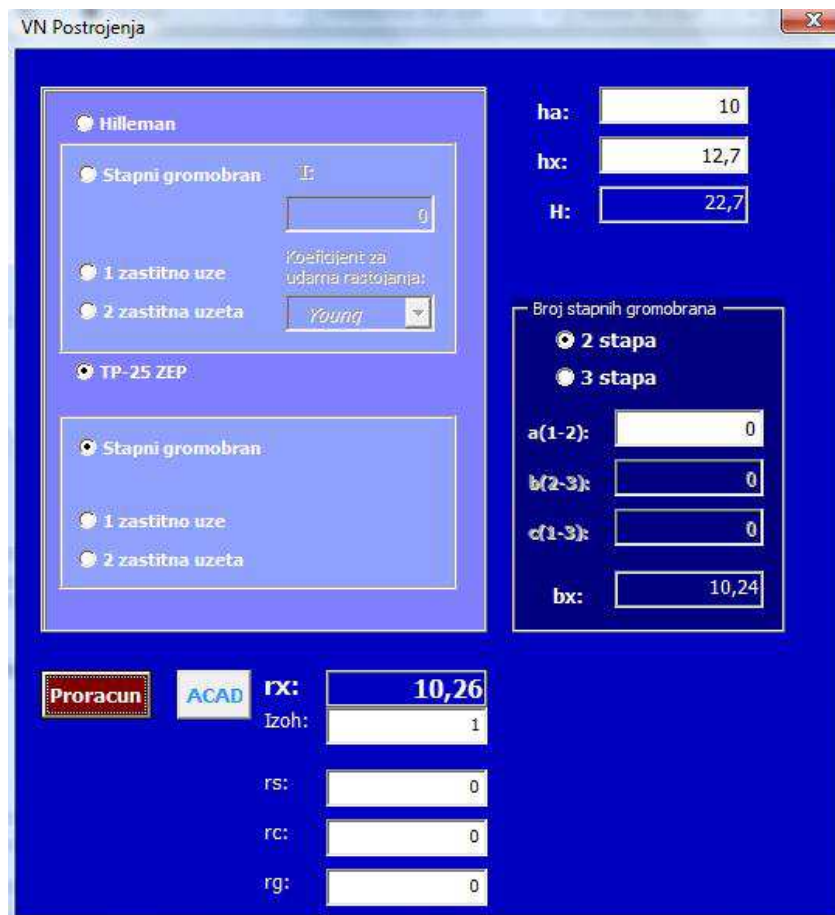
Slika 3.2 – zaštitna zona zaštitnog užeta

Programski alat

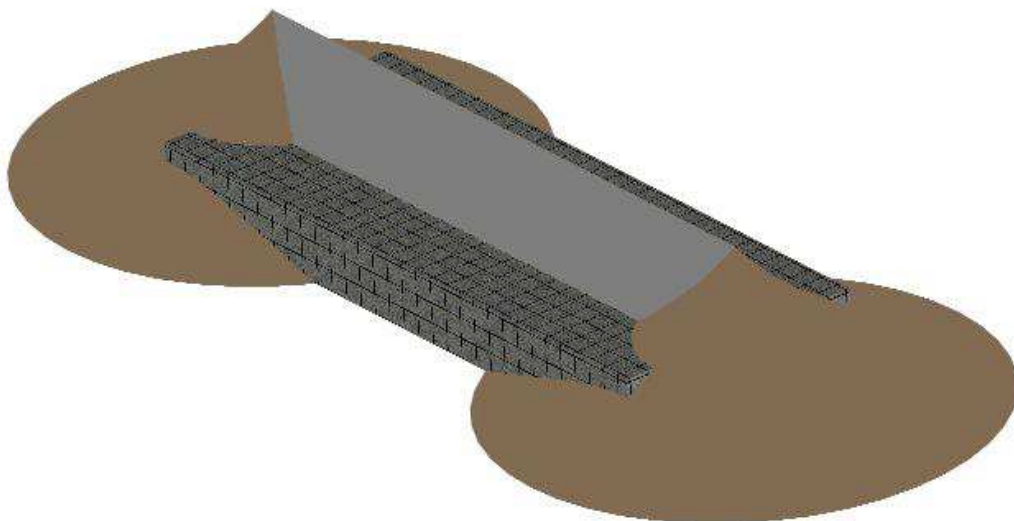
U AutoCAD-u je nacrtano visokonaponsko (VN) postrojenje 220/110/10 kV. Maksimalna visina postrojenja je 12,7 m. Otvaranjem AutoCAD aplikacije *VNPostrojenje* automatski se pokreće program za crtanje zaštitnih zona VN postrojenja. U daljem tekstu su opisani koraci koje je potrebno proći prilikom korišćenja ovog programskog alata.

1. Pokretanjem aplikacije otvara se prozor kao na slici 3.3. Korisnik ima mogućnost izbora modela Hilleman ili TP-25 ZEP. Takođe se može birati vrsta prihvatnog sistema, štapna hvataljka ili zaštitno uže.
2. Potrebno je definisati visinu štice objekta i visinu štapne hvataljke odnosno užeta iznad štice objekta (h_x i h_a prema slikama 3.1 i 3.2). Visina H je ukupna visina i jednaka je zbiru h_x i h_a .
3. Pritiskom na taster *Proračun* vrši se proračun poluprečnika zaštitne zone r_x na visini h_x . U polju *Izoh* se može definisati korak iscrtavanja zaštitne zone. U slučaju da je izabran model Hillemana pritiskom na taster *Proračun* proračunavaju se i rastojanja r_g, r_c, r_s .
4. Pritiskom na taster *ACAD* korisnik se vraća u prozor AutoCAD-a gde duplim klikom postavlja definisanu hvataljku na željenu poziciju (u slučaju zaštitnog užeta potrebno je definisati položaj oba kraja užeta). Nakon iscrtavanja zaštitne zone, komandom *View*→*3D Orbit* se proizvoljno može podešavati ugao posmatranja.
5. Desnim klikom se ponovo otvara prozor sa slike 3.3 i omogućava se definisanje novog prihvatnog sistema ponavljajući prethodne korake.

Primer zaštitne zone dve štapne hvataljke i zaštitnog užeta određene primenom ovog programskog alata je prikazan na slici 3.4. Za dobijanje 3D prikaza sa slike 3.4 je korišćena opcija renderovanja u AutoCAD-u.



Slika 3.3 – prozor programa za definisanje gromobranske zaštite visokonaponskih postrojenja



Slika 3.4 – zaštitna zona dve štapne hvataljke i zaštitnog užeta postavljenih iznad objekta

Zadatak

Pokrenuti aplikaciju *VNPostrojenje*.

- a. Po modelu TP-25 ZEP definisati štapnu hvataljku visine $h_a=15$ m i $h_x=12,7$ m. Postaviti dve ovakve hvataljke na uglove objekta RP 110 kV.
- b. Kao u tački a, definisati zaštitno uže kao prihvatni sistem i postaviti ga između dve hvataljke definisane pod a.

Zadaci će biti pregledani na računaru na licu mesta. Potrebno je uočiti uticaj zaštitnog užeta na zaštitnu zonu prilikom zaštite objekata velike dužine.

LITERATURA

- [1] Andrew R.Hileman: Insulation Coordination for Power Systems, Marcel Dekker, New York, Basel, 1999
- [2] Stojković Z.: Projektovanje pomoću računara u elektroenergetici – primena programskih alata, monografija, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Akademska misao, Beograd, jul 2009, str. 529.
- [3] Stojković Z, Stankić Ž.: AutoCAD-based concept for estimating lightning protection zone of transmission lines and structures; International Journal of Electrical Engineering Education (IJEED), Vol.43, No.4, Oct 2006, pp. 299-317.
- [4] Stojković Z., Stankić Ž.: Projektovanje gromobranske zaštite objekata opšte i posebne namene, 27. Savetovanje JUKO-CIGRE, Ref. C4-01, Zlatibor, 29. maj – 03. jun 2005.
- [5] Stojković Z., Grujić A., Tenbohlen S.: Projektovanje gromobranske zaštite razvodnih postrojenja i nadzemnih vodova, 28. Savetovanje JUKO-CIGRE, Ref. C4-01, Vrnjačka Banja, 30. septembar – 05. oktobar 2007.
- [6] Stojković Z., Grujić A.: Programski alat za projektovanje gromobranske zaštite razvodnih postrojenja, rad je poslat na razmatranje za 30. Savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, STK C4, 29. maj – 03. jun 2011.