

Proračun vertikalnih sila, razmaka u sredini raspona i crtanje lančanice provodnika kod nadzemnih distributivnih vodova

Radmilo Mitrić, Marko Šilj

Elektrodistribucija Pale
Pale, BiH

radmilo.mitric@edbpaale.com, marko.silj@edbpaale.com

Nada Cincar

Univerzitet u Istočnom Sarajevu Elektrotehnički fakultet
Istočno Sarajevo, BiH

nada.cincar@etf.unssa.rs.ba

Sadržaj – U ovom radu pored proračuna napreznja i provjesa u rasponu prikazane su i još neke mogućnosti programskog paketa AutoCAD, koji se koristi pri projektovanju nadzemnih distributivnih vodova, kao što su: proračun vertikalnih sila, proračun razmaka provodnika u sredini raspona i crtanje lančanice provodnika.

Takođe su dati i prilozi sa odgovarajućim kodovima, za povezivanje Excel-a i AutoCAD-a i VBA kod za crtanje lančanice u AutoCAD-u.

Obrađen je i konkretan primjer na 10(20) kV vodu (zatezno polje br. 3) za ŽRTS 10(20)/0,4 kV, 50 kVA, Orahovo, Opština Rogatica.

Ključne riječi-nadzemni distributivni vod; mahanički proračun; Excel; AutoCAD;

I. UVOD

Glavni elementi distributivnih mreža su vodovi, transformatori, potrošači, kondenzatorske baterije i prigušnice. Vodovi su dijelovi električne mreže koji povezuju postrojenja istog nazivnog napona u susjednim transformatorskim stanicama, koji se dijele na nadzemne i kablovske vodove.

Prilikom projektovanja nadzemnog voda, u početnom trenutku poznate su tačke koje vod treba da poveže. Prilikom određivanja trase voda, vodi se računa o izbjegavanju potencijalnih klizišta, rješavanju imovinsko-pravnih odnosa, mogućnosti pristupa trasi ili bar pojedinim djelovima sa saobraćajnice, svi prelazi, ukrštanja i slično da se izvede na propisan način. Tek tada, geometri snimaju uzdužni profil trase voda. Ovim snimanjem određuje se horizontalna projekcija trase na topografskim kartama, sa visinskim kotama. Ponekad je potrebno snimiti (kod složenih kosina) i visinske bočne kote, onoliko koliko prelaze konzole i to onu stranu na kojoj je teren viši. Na uzdužnom profilu se obavezno obilježavaju objekti preko kojih vod prelazi. Na uzdužnom profilu se određuju stubna mjesta i vrše sve potrebne provjere i proračuni. Nakon toga, vrši se iskoličenje stubnih mjesta, odnosno stvorili su se potrebni uslovi za gradnju voda (da bi uslovi bili dovoljni potrebno je i pribaviti sve dozvole, saglasnosti, rješenja, finansijska sredstva i sl.).

Da bi se dobilo pouzdano i ekonomično rješenje projektant nadzemnih vodova mora da riješi:

- Proračun ugiba i napreznja provodnika s obzirom na sigurnosne visine i ukrštanje sa drugim objektima (proizilazi izbor nominalne dužine stabla stuba);
- Izbor nominalne sile (stablo stuba, konzole, izolatori, temelji);
- Proračun električnog razmaka (udaljenost između provodnika u sredini raspona – odakle proističu problemi vezani za izbor konzola, raspored provodnika u glavi stuba, sigurnosna udaljenost itd.

Komplikovanost rješavanja ovakvih problema proističe iz činjenice da pojedini parametri koji se koriste pri proračunu i projektovanju (kao npr. raspon, maksimalno radno napreznje, presjek provodnika), različito ili suprotno utiče na pojedine elemente proračuna. Tako npr. smanjenje napreznja pod jednakim ostalim uslovima, utiče na smanjenje vršne sile stuba, ali se znatno povećava ugib i potreban razmak u sredini raspona (smanjuje se električni raspon), a to dalje znači povećanje broja stubova u zateznom polju ili povećanje visine stubova i širine konzola. Sa druge strane, povećanje presjeka provodnika pod jednakim drugim uslovima, dovodi do povećanja vršne sile stuba (naročito kod zateznih, ugaonih i ugaono - zateznih stubova), ali se smanjuje ugib, kao i razmak u sredini raspona (uža konzola-„teže“ uže vjetar teže otklanja). Isto tako, smanjuje se broj stubova u zateznom polju, ili smanjuje se visina stubova.

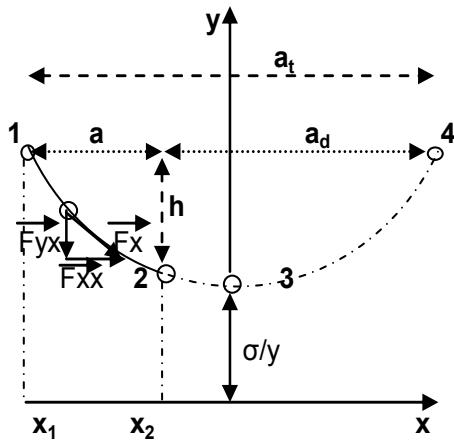
Zatezni i noseći stubovi se najčešće koriste kod izgradnje nadzemnih distributivnih mreža (ostali: ugaoni, ugaono-zatezni itd. u manjem broju). Noseći stubovi su dimenzionisani da podnesu vertikalne sile i momente savijanja koji potiču od sile vjetra na stub i provodnike. Na području ZDP "Elektrodistribucija" a.d. Pale kod upotrebe nosećih drvenih impregnisanih stubova raspored provodnika je "kosi", dok je kod upotrebe armirano-betonskih stubova raspored provodnika "horizontalni" (konzole su čelične vruće cinčane, izolatori su potporni). Na području nadležnosti pomenutog elektrodistributivnog preduzeća trase nadzemnih vodova (teren) uglavnom su "strme", posebnu pažnju treba obratiti na negativne vertikalne sile (nastoje da prekinu vezu ili da odvoje izolator od potpore). Zatezni stub je ojačan u konstrukciji i u temelju, jer on trpi pored vertikalnih sila i moment savijanja koji potiče od sile zatezanja provodnika. Rastojanje između dva zatezna stuba predstavlja zatezno polje. Zatezni stubovi u

principu dijele trasu nadzemnog voda tako da se mehanički proračun vodova vrši praktično nezavisno za svako zatezno polje.

Kod crtanja lančanice potrebno je precizirati šta se podrazumjeva pod tačkama vješanja provodnika. Za zatezni stub, tačka vješanja je pričvršćenje zateznog izolatorskog lanca za konstrukciju stuba, tj. smatramo da je izolatorski lanac sastavni dio lančanice. Kod nosećih stubova, tačka vješanja je tačka prihvatanja provodnika (na potporni izolator – češće ili noseći izolatorski lanac).

II. MEHANIČKI PRORAČUN

Na Sl. 1. prikazana je skica kosog raspona u pravougaonom koordinatnom sistemu.



Slika 1. Kosi raspon u pravouglom koordinatnom sistemu

Oznake na Sl. 1. su:

$$a = |x_2 - x_1| - \text{raspon,}$$

$$h = y_2 - y_1 - \text{visinska razlika tačaka vješanja,}$$

$$a_d = |x_2 + x_1| - \text{dodatni raspon,}$$

$$a_t = a + a_d - \text{totalni raspon;}$$

1, 2 - tačke vješanja,

3 - tjeme lančanice,

4 - fiktivna tačka vješanja totalnog raspona;

Vidi se, da za istu visinsku razliku tačaka vješanja, moguća su dva slučaja i to:

- Lijeva tačka vješanja (1) je višija od desne (2) i tada je slučaj $h < 0$ (Sl. 1)

- Lijeva tačka vješanja (1) je niža od desne (2) i tada je slučaj $h > 0$

Ukoliko je $a_d > a$ (dodatni raspon veći od stvarnog) onda su apcise tačaka vješanja istog znaka, tj. obje su pozitivne ili su obje negativne u zavisnosti od toga da li je $h > 0$ ili $h < 0$.

Prema [4] izrazi za visinsku razliku tačaka vješanja i dodatni raspon su:

$$h = \frac{2\sigma}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{a\gamma}{2\sigma} \operatorname{sh} \frac{a_d\gamma}{2\sigma} \quad (1)$$

$$a_d = 2 \frac{\sigma}{\gamma} \operatorname{arsh} \left(\frac{h}{2\sigma/\gamma} \operatorname{sh}^{-1} \left(\frac{a}{2\sigma/\gamma} \right) \right) \quad (2)$$

Jednačina linije provodnika u sopstvenom koordinatnom sistemu je:

$$y = \frac{\sigma}{\gamma} ch \frac{\gamma}{\sigma} x \quad (3)$$

Uže se tretira kao idealno gipka materijalna nit, iako je provodnik najčešće izveden kao kombinovano aluminijsko – čelično (tretira se kao homogeno sa određenim nepromjenljivim mehaničkim parametrima kao što su modul elastičnosti, temperaturni koeficijent širenja i sl.).

A. Ukupno, horizontalno i vertikalno naprezanje

Ukupno naprezanje u bilo kojoj tački V na lančanici dato je izrazom:

$$\sigma_V = y\gamma \quad (4)$$

gdje je:

- σ_V – ukupno naprezanje u bilo kojoj tački V lančanice,
- y - ordinata tačke V.

Ukupno naprezanje u tačkama vješanja (1 i 2) je:

$$\sigma_{V1} = y_1\gamma \quad i \quad \sigma_{V2} = y_2\gamma \quad (5)$$

Iz jednačine (5) se vidi da je veće naprezanje javlja u višoj tački vješanja (veća ordinata).

Vertikalno naprezanje u tačkama vješanja (1 i 2) je:

$$\sigma_{ver1} = \pm \sqrt{\sigma_{V1}^2 - \sigma^2} \quad (6)$$

$$\sigma_{ver2} = \pm \sqrt{\sigma_{V2}^2 - \sigma^2} \quad (7)$$

Znak u jednačinama (6) i (7) može se odrediti na više načina, a jedan je poređenje stvarnog i dodatnog raspona. Ako je:

- $a < a_d$ stvarni raspon je manji od dodatnog. Vertikalna sila u nižoj tački vješanja je negativna, tj.

nastoji da "izvrne" izolatorski lanac a kod potpornih izolatora da prekine vezu ili odvoji potporu od izolatora (u višoj tački vješanja ova sila je uvijek pozitivna);

- $a > a_d$ stvarni raspon je veći od dodatnog. Vertikalna sila u tačkama vješanja je pozitivna, tj. zateže izolatorski lanac na dole;
- $a = a_d$ stvarni raspon je jednak dodatnom. Vertikalna sila u tačkama vješanja je jednaka nuli.

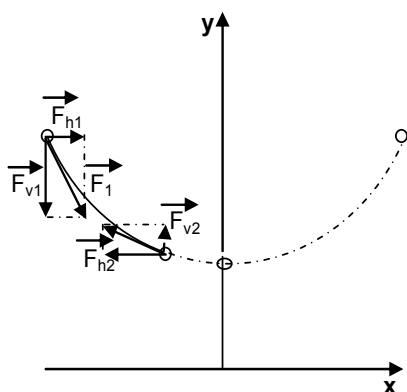
Odnosno, vertikalne komponente sila u tačkama vješanja su:

$$F_{ver1} = \sigma_{ver1} S \quad (8)$$

$$F_{ver2} = \sigma_{ver2} S \quad (9)$$

Jednačine (1) - (9) su preuzete iz [4].

Na Sl. 2. je prikazan analizirani raspon sa prikazanim silama u tačkama vješanja.



Slika 2. Kosi analizirani raspon sa prikazanim silama u tačkama vješanja

B. Proračun razmaka u sredini raspona

Razmak (udaljenost) dva provodnika, kao i udaljenost od dijelova pod naponom do stuba i uzemljenih dijelova uzimajući u obzir dejstvo vjetera i dodatno opterećenje ne smije da bude manja od vrijednosti sigurnosnih razmaka koje su date u narednoj tabeli.

TABELA I. SIGURNOSNI RAZMACI U RASPONU I U GLAVI STUBA

Nazivni napon mreže	Sigurnosni razmak	
	U rasponu (cm)	U glavi stuba (cm)
10 kV	10	12
20 kV	20	22
35 kV	25	32

Smatra se da je ovaj zahtjev ispunjen ako je udaljenost D između provodnika, odnosno između provodnika i zaštitne

užadi u sredini raspona u uslovima bez vjetera i na temperaturi $+40^\circ C$ iznosi najmanje:

$$D = k * \sqrt{f + l} + d_{sig} \quad (10)$$

gdje je:

- f – ugib provodnika odnosno zaštitnog užeta na temperaturi $+40^\circ C$ (cm), bez obzira na usvojenu maksimalnu temperaturu provodnika;

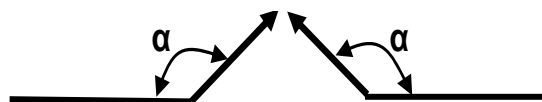
- l – dužina izolatorskog lanca od tačke učvršćenja do provodnika (cm). Za potporne izolatore, zatezne izolatorske lance, zaštitnu užad ova dužina je $l=0$;

- d_{sig} – sigurnosni razmak uzet iz tabele 1;

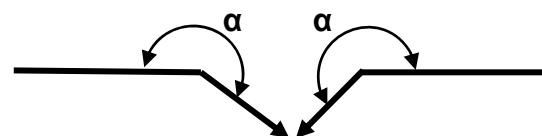
- k – koeficijent čija vrijednost zavisi od rasporeda provodnika.

Način računanja koeficijenta k opisan je u [1].

Dužinu kraka konzole (udaljenosti mjesta prihvatanja provodnika), kod ugaonih stubova, kojom se prihvataju provodnici susjednih raspona treba redukovati na sljedeći način:



Slika 3. Ugao skretanja trase ulijevo ($\alpha < 180^\circ$)



Slika 4. Ugao skretanja trase udesno ($\alpha > 180^\circ$)

$$\text{Za } \alpha < 180^\circ \quad D_{red} = D * \sin\left(\frac{360 - \alpha}{2}\right) \quad (11)$$

$$\text{Za } \alpha > 180^\circ \quad D_{red} = D * \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (12)$$

Koristeći (10), (11) i (12) može se pisati:

$$f = \left(\frac{D_{red} - d_{sig}}{k} \right)^2 - l \quad (13)$$

Odnosno:

$$a = \sqrt{\frac{8 * \sigma_{40^\circ C} * f}{\gamma_v}} \quad (14)$$

Izraz (14) predstavlja tzv. "električni raspon", odnosno najveći raspon koji se može postići sa upotrebljenim konzolama uzimajući u obzir konfiguraciju terena i klimatske uslove.

C. Crtanje lančanice

Lančanicu crtamo po jednačini (3), i to za svako zatezno polje. Pritiskom na dugme "Crtaj" nastaju sljedeći procesi:

1. Na osnovu zadatog totalnog raspona i koraka (x koordinata) računa se y koordinata lančanica. Prije toga, se sračuna tzv. kritična temperatura (temperatura na kojoj je ugib provodnika jednak ugibu na -5°C sa dodatnim teretom) po sljedećem obrascu:

$$T_k = \frac{\sigma_{\max}}{E \cdot \alpha} \left(1 - \frac{\gamma_v}{\gamma_r} \right) - 5 \quad (^{\circ}\text{C}) \quad (15)$$

gdje je:

- σ_{\max} – maksimalno radno naprezanje (daN/mm^2),
- γ_v - specifična težina provodnika (daN/m mm^2),
- γ_r - specifična težina provodnika sa ledom (daN/m mm^2),
- E - modul elastičnosti (daN/mm^2),
- α - koeficijent linearnog širenja ($1/^{\circ}\text{C}$);

Ukoliko je $T_k < 40^{\circ}\text{C}$, tada je najveći provjes na temperaturi $+40^{\circ}\text{C}$ i u jednačini (3) $\sigma = \sigma_{40^{\circ}\text{C}}$ i $\gamma = \gamma_v$

Ukoliko je $T_k \geq 40^{\circ}\text{C}$, tada je najveći provjes na temperaturi $-5^{\circ}\text{C} + \text{led}$ i u jednačini (3) $\sigma = \sigma_{\max}$ i $\gamma = \gamma_r$

Pri tome, treba voditi računa da je standardna razmjera za uzdužni profil 1:500:2000 (x koordinata se dijeli sa 2, dok se y koordinata množi sa 2).

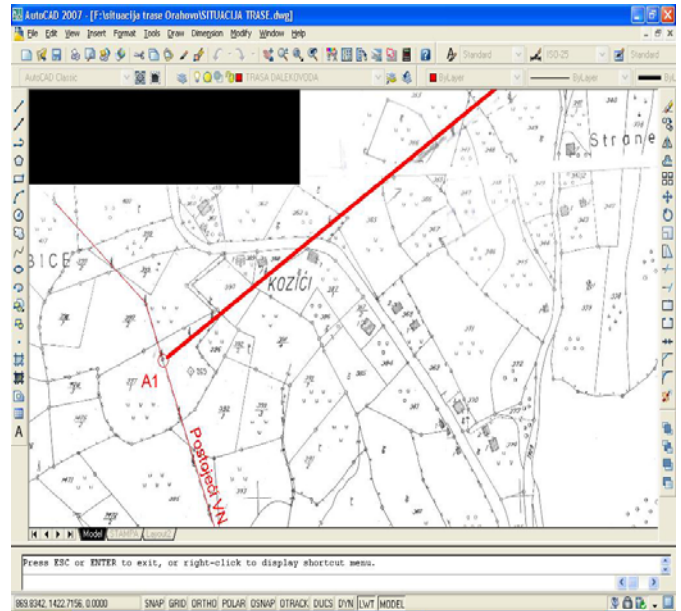
2. Nakon formiranja tabele koordinata, automatski se otvara AutoCAD, pokreće odgovarajući *Macro*, učitavaju tačke i crta se lančanica.

Lančanica se nanosi na predložena stubna mjesta uzdužnog profila i vrše se sve potrebne provjere.

III. PRIMJER PRIMJENE

Za konkretan primjer korišteno je zatezno polje broj 3, priključnog 10/20 kV/kV vazdušnog voda za ŽRTS 10 (20)/0,4 kV/kV, 50 kVA ORAHOVO, Opština Rogatica, prikazanog na odgovarajućoj geodetskoj podlozi, na Sl. 5.

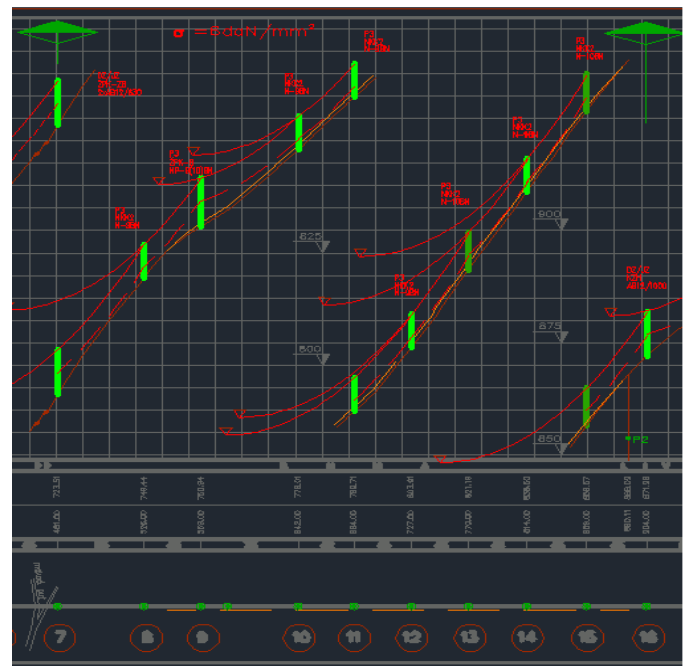
Uvećan prikaz zateznog polja br. 3, prikazan u AutoCAD-u dat je na Sl. 6.



Slika 5. Geodetska podloga zateznog polja

IV. REZULTATI PRORAČUNA

Set ulaznih podataka potreban za proračun naprezanja i ugiba provodnika, objašnjen je u [3]. Jasno je, da se uz pomoć ovakvih programskih paketa pruža mogućnost dobijanja više rješenja za neki visokonaponski vod (VN), odnosno da se izabere ono optimalno.



Slika 6. Uvećano zatezno polje br. 3

Međutim, uglavnom sva elektrodistributivna preduzeća su tipizirala opremu (stubove, konzole, izolatore, užad) tako da se broj varijanti za neki VN vod znatno smanjuje. Sem toga, prilikom izbora trase VN voda potrebno je voditi računa o:

- Rješavanju imovinsko-pravnih odnosa (npr. dozvoljava se ugradnja stuba samo na nekim dijelovima npr. na granicama parcela);
- Određivanje lomnih tačaka VN voda (da ih bude što manje, i da su na mjestima gdje je moguća ugradnja armirano-betonskih stubova – ugaono zatezni);
- Na mjestima gdje nije moguć pristup mehanizacije, ugrađuju se drveni impregnirani stubovi (nastojati da ti stubovi budu nosni).
- Zadržati tipska rješenja (linijski rastavljač se ugrađuje na početku otcjepa. Samo u izuzetnim slučajevima se

dozvoljava gradnja VN voda bez ovog rastavljača–za kraće sekundarne vodove i ukoliko je ostvarena optička vidljivost između početne i krajnje tačke voda).

Dio izlaznih rezultata dat je u tabelama III, IV i V, a set ulaznih podataka u tabeli II.

TABELA II. SET ULAZNIH PODATAKA

redni broj zateznog polja	redni broj stuba u zateznom polju	tip stuba	ovjes	visina stuba do donje konzole (m)	kota terena stubnog mjesta (m)	raspon (m)	vrsta konzole	razmak između izolatora (cm)	sigurnosna visina (m)	ugao loma (°)	raspored provodnika	dužina izolatorskog lanca (cm)
3	1	2x12/630	JZ	10.00	723.51		ŽPK	260.00	5	180	horizontalni	0
3	2	N-9BN	P3	7.50	749.44	65.00	NKK1	112.60	5	180	kosi	0
3	3	NP-9BN	P3	9.00	760.94	43.00	ŽPK	260.00	5	180	horizontalni	0
3	4	N-9BN	P3	7.50	778.01	73.00	NKK2	112.60	5	180	kosi	0
3	5	N-9BN	P3	7.50	789.71	42.00	NKK2	112.60	5	180	kosi	0
3	6	N-9BN	P3	7.50	803.91	43.00	NKK2	112.60	5	180	kosi	0
3	7	N-10BN	P3	8.50	821.19	43.00	NKK2	112.60	5	180	kosi	0
3	8	N-9BN	P3	7.50	838.60	44.00	NKK2	112.60	5	180	kosi	0
3	9	N-10BN	P3	8.50	856.57	45.00	NKK2	112.60	5	180	kosi	0
3	10	AB12/1000	Z	10.00	871.96	45.00	KZH	110.00	5	180	horizontalni	0

TABELA III. RAZMAK U SREDINI RASPONA (ELEKTRIČNI RASPON) ZA RAZMATRANO ZATEZNO POLJE

Stvarni rasponi	Visinska razlika	Razmak u sredini raspona	Električni raspon
m	cm	cm	m
65.00	23.43	186.30	87.43
43.00	13.00	186.30	87.43
73.00	15.57	186.30	87.43
42.00	11.70	112.60	48.68
43.00	14.20	112.60	48.68
43.00	18.28	112.60	48.68
44.00	16.41	112.60	48.68
45.00	18.97	112.60	48.68
45.00	16.89	111.30	48.00

TABELA V. IZRAČUNATE VRIJEDNOSTI KOORDINATA LANČANICE

Ulazni podaci za crtanje

Ukupni "crtaci raspon" (m) 400
Korak 10

KOTE ZA CRTANJE

x kota-raz.	y kota-raz.	z kota-raz.
-100	126.910839	0
-95	114.1877555	0
-90	102.1876072	0
-85	90.89904877	0
-80	80.31140773	0
-75	70.4146743	0
-70	61.19949185	0
-65	52.65714812	0
-60	44.77956699	0
-55	37.5593008	0
-50	30.98952332	0
-45	25.06402334	0
-40	19.77719874	0
-35	15.12405123	0
-30	11.10018162	0
-25	7.701785632	0
-20	4.925650348	0
-15	2.769151141	0
-10	1.230249205	0
-5	0.307489624	0
0	0	0
5	0.307489624	0
10	1.230249205	0
15	2.769151141	0
20	4.925650348	0
25	7.701785632	0
30	11.10018162	0
35	15.12405123	0
40	19.77719874	0
45	25.06402334	0
50	30.98952332	0
55	37.5593008	0
60	44.77956699	0
65	52.65714812	0
70	61.19949185	0
75	70.4146743	0
80	80.31140773	0
85	90.89904877	0
90	102.1876072	0
95	114.1877555	0
100	126.910839	0

Crtaj

TABELA IV. VRIJEDNOSTI VERTIKALNIH SILA NA NOSNIM STUBOVIMA

Br.stuba	Minimalna sila	Temp.	Maksimalna sila	Temp.
----	daN	°C	daN	°C
2	10.67	40	51.31	-5+led
3	12.42	40	60.32	-5+led
4	-1.28	-20	23.04	-5+led
5	-1.35	-20	16.59	-5+led
6	-7.47	-20	7.22	-5+led
7	8.94	40	43.10	-5+led
8	-0.42	-20	19.58	-5+led
9	8.90	40	42.73	-5+led

V. ZAKLJUČAK

Danas je praktično nemoguće zamisliti proces projektovanja distributivnih vodova, a da se ne koriste programski paketi za razne proračune u cilju određivanja optimalnog rješenja. Pored navedenog (I i II dio) program radi proračun koeficijenta mehaničke sigurnosti provodnika (zbog ograničenosti prostora nije obuhvaćen ovim radom). Isti bi trebalo proširiti i za proračun uzemljivača stubova, horizontalnih sila, izolatora, izradom odgovarajućih maski i sl.

LITERATURA

- [1] Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV, Sl. Glasnik RS, BR. 7/12,
- [2] Tehnička preporuka br. 10b, Osnovni tehnički zahtjevi za projektovanje i gradnju nadzemnih vodova 10 kV, 20 kV i 35 kV, Direkcija za distribuciju električne energije Srbije, oktobar 2003 god.
- [3] R.Mitrić, N.Cincar, A.Simović, Mehanički proračun nadzemnih distributivnih vodova sa primjerom primjene, Infotech, Jahorina 2012 god. Vol. 11, March 2012, pp. 150-155.
- [4] Željko Đurišić, Kristina Vlajinac, Deletić, Mehanički proračun nadzemnih vodova, Univerzitet u Beogradu, ETF 2008 god.
- [5] Slobodan Đukanović, Programiranje kroz aplikacije, Osnove VBA, 1-9 Termin.
- [6] Guy Hart-Davis, VBA 6 Detaljan izvornik, Kompjuter biblioteka 2000 god.
- [7] Nikola Rajaković, Dragan Tasić, Gojko Savanović, Distributivne i industrijske mreže, ETF, Akademska misao, Beograd, 2004.

ABSTRACT

In this paper, in addition to the analysis strain and sag in the range, are shown also some possibilities of AutoCAD software package, which is used in the design of overhead distribution lines, such as: analysis vertical forces, analysis spacing of the conductors in the middle of the range and drawing catenary conductor.

It also provides and reports from the respective codes, to connect Excel and AutoCAD and VBA code to draw the catenary in AutoCAD.

Processed is also a concrete example of the 10 (20) kV-term water (tension field no. 3) for TS 10 (20) / 0.4 kV, 50 kVA, Orahovo, Rogatica.

CALCULATION OF THE VERTICAL FORCE, THE SPACE IN THE MIDDLE OF THE RANGE AND DRAWING CATENARY CABLES IN OVERHEAD DISTRIBUTION LINES

Radmilo Mitrić,
Nada Cincar,
Marko Šilj.