

VPLIV NEELASTIČNEGA RAZTEZKA VODNIKOV NA POVESE PRI DALJNOVODIH

Klemen DEŽELAK, Franc JAKL, Robert MARUŠA, Jože PIHLER, Gorazd ŠTUMBERGER

POVZETEK

V referatu je prikazana problematika neelastičnih raztezkov vodnikov pri nadzemnih vodih, poznano kot lezenje (tečenje, creeping) zaradi mehanskega popuščanja materiala. Neelastično raztezanje vodnikov pri daljnovodih neposredno vpliva na povečanje povesov in posledično na zmanjšanje varnostnih višin. V referatu so podani rezultati raziskave vpliva neelastičnega raztezka na vodnikih v daljšem časovnem obdobju za tip vodnika Al/Je 490/65, ki je široko uporabljen na elektroenergetskem prenosnem sistemu 400 kV Slovenije. Podane so primerjave, če ustreznih kompenzacijskih metod ob montaži vodnikov ne upoštevamo ali le delno.

ABSTRACT

Proposed paper deals with the problems regarding a non-elastic elongation of overhead conductors known as creep phenomena on account of mechanical yielding of material. Impact of non-elastic elongations of conductors is directly connected with the conductor sags and with smaller clearances between conductors and ground. Some results related to the researches in permanent elongations of conductors of the ACSR 490/65 type are presented, where compensation methods are applied as well.

1. UVOD

Pri daljnovodih, oziroma nadzemnih vodih se srečujemo s problemom neelastičnega raztezanja vodnikov, pri čemer gre za pojav mehanskega popuščanja materiala. Omenjeno je poznano pod imenom »tečenje« materiala, v starejši literaturi znano tudi pod imenom »lezenje« materiala. Tovrstne raziskave, ki so bile predmet obširnih raziskav v okviru študijske delovne skupine za vodnike mednarodne CIGRE iz Pariza, je ta pojav znan pod imenom »creeping effect« [1], [2]. Tečenje je torej pojav, pri katerem se deformacija materiala pri dolgotrajni stalni mehanski obremenitvi s časom sicer malenkostno, pa vendar nenehno povečuje [2], [3].

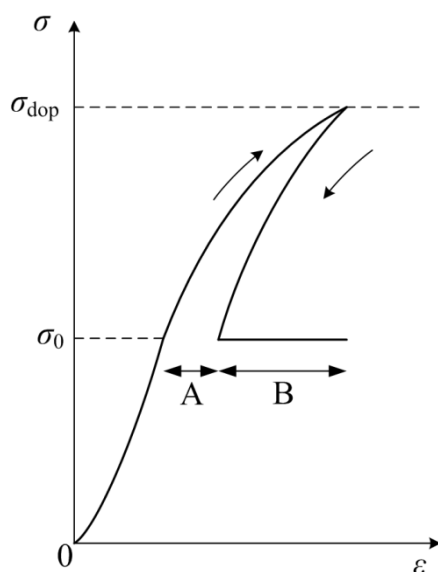
Na zmanjšanje trajne statične trdnosti materiala vpliva tudi povišanje temperature. S trajno statično trdnostjo materiala je mišljena tista najvišja napetost, pri kateri material pod določeno temperaturo še ne "teče". Z višanjem temperature se trdnost materiala zmanjšuje, razteznost pa povečuje. Podoben učinek se pojavi pri povišani mehanski trajni obremenitvi materiala oziroma vodnika [2], [3].

Posledice tečenja vodnikov se v daljšem časovnem obdobju obratovanja daljnovodov (npr. 10, 30, 50 let) odražajo v obliki povečanja povosov vodnikov in hkrati zmanjšanja varnostnih višin, oziroma varnostnih oddaljenosti vodnikov do objektov, ki so v neposredni bližini daljnovoda. Med obratovanjem daljnovoda lahko to posledično privede do neugodnih težav, in sicer kratkih stikov, škode na objektih, življenjskega ogrožanja ljudi, živali in podobno [2], [3].

Tečenje materiala ugotavljamo z laboratorijskimi raziskavami, in sicer s tako imenovanimi mirujočimi preizkusi, kjer se registrira deformacija materiala v funkciji časa pri neki izbrani mehanski obremenitvi in pri konstantni temperaturi. Ta preizkušanja so v splošnem zelo natančna in dolgotrajna, ki za praktične namene običajno trajajo nekaj tisoč ur (tri do štiri mesece). Natezni obtežilni pogoji se običajno izberejo po kriteriju EDS (Every Day Stress) s temperaturo, ki v danem trenutku vlada v laboratoriju. Dejansko pa so vodniki v vsakdanji praksi izpostavljeni različnim zunanjim vplivom (temperaturne spremembe), posledično tudi spremembam mehanskih obremenitev (poleg temperature še vplivom zimskih dodatnih obremenitev) in vplivom zaradi obratovalnih dogodkov v sistemu (tokovne obremenitve oz. preobremenitve v primeru kratkih stikov-nestacionarni pogoji). Omenjeno pa seveda ni mogoče zajeti naenkrat, zato se pri laboratorijskih preizkusih običajno odločamo za že omenjeni kriterij EDS in zaradi nižjih stroškov kar laboratorijsko temperaturo zaradi dodatnega segrevanja oz. hlajenja prostora [2] - [4]

2. METALURŠKI IN GEOMETRIJSKI RAZTEZEK

Pri vodnikih je skupni trajni neelastični raztezek ε odvisen od več parametrov, ki nastopajo sočasno in je funkcija mehanske obremenitve, časa in temperature. Vsota geometrijskega ε_g in metalurškega raztezka ε_m prinaša skupni trajni neelastični raztezek ε . Slika 1 podaja principialni diagram $\sigma - \varepsilon$ (natezna napetost – raztezek) pri vodnikih pri konstantni temperaturi. Pri kratkotrajnem nategu povsem novega vodnika dobimo raztezek A, ki ustreza geometrijskemu raztezkju in je odvisen od natezne obremenitve. Če obremenitev traja dalj časa, nastane še dodatni raztezek B, ki pomeni metalurški raztezek ε_m . Velikost tega raztezka je odvisna od natezne obremenitve, od trajanja obremenitve in od temperature [2], [3].

Slika 1: Diagram $\sigma - \varepsilon$.

Geometrijsko uleganje (raztezek ε_g) je povezano z zapleteno strukturo konstrukcijske sestave vodnikov in je v veliki meri odvisna od tehnologije izdelave vrvi same. Analitično je ta problem težko zajeti, fenomen pa ni povsem neodvisen od časa. Za praktično uporabo lahko smatramo, da je geometrijsko uleganje (nekaj ur) kratek časovni interval v primerjavi s celotno življenjsko dobo vodnika med obratovanjem daljnovoda (npr. 50 let). Kompenzacija geometrijskega uleganja (raztezek ε_g) se v pretežni meri izvrši že med samo montažo vodnikov s pomočjo ustreznih montažnih metod (s prenategom oz. s prednategom vodnikov). Pri *prenategu* (overstress) vodnike po razvlačenju napnemo z višjo natezno napetostjo od normalne (običajno 22% do 25% natezne trdnosti). Po metodi *prednatega* (prestress) pa vodnike za krajši čas (nekaj ur npr. 8 do 10 ur) obremenimo z bistveno višjo natezno napetostjo (običajno do 40% natezne trdnosti vodnika), nakar se nateg vrvi zniža na vrednost normalne montažne natezne napetosti ali na σ_{EDS} . Še posebej z drugo metodo prednatega (prestress) vrvi dosežemo skoraj popolno kompenzacijo geometrijskega uleganja (kompaktiranja) vodnika (raztezek ε_g). Zaradi tega ukrepa se nekoliko povečajo stroški pri montaži vodnikov, vendar se nekoliko večji vložek obrestuje z dolgotrajnim stabilnim delovanjem, brez problemov z varnostnimi višinami. V skladu z izsledki te raziskave bi morali investitorji razmišljati o temu, da bi zahteve po kompenzaciji neelastičnih raztezkov vgrajevali v svoje projektne naloge [2], [3].

Metalurško tečenje (raztezek ε_m) pa predstavlja trajno deformacijo materiala, ki se pod vplivom natezne obremenitve vodnika odraža v obliki trajne molekularne spremembe kristalne strukture materiala. Poznavanje pričakovane velikosti metalurškega razteзка ε_m je v daljnovodni tehniki zelo pomembno. Ta neposredno vpliva na povese vodnikov med obratovanjem daljnovoda in ga računamo kar s celotno obratovalno dobo daljnovoda (50 let). Metalurški raztezek ε_m projektno upoštevamo v montažnih tabelah, pričakovani raztezek za daljše obdobje pa ustrezno kompenziramo ob montaži vodnikov s "*korekcijsko temperaturo*" [1, 2]. Metalurško tečenje je torej pojav, ki s časom stalno napreduje, zato ga ni mogoče v

celoti eliminirati. Lahko pa ga kompenziramo za določeno obdobje npr. za dobo eksploatacije daljnovoda. Po metodi korekcijske temperature montažne tabele tako priredimo, da napenjamo vodnik z nekoliko višjimi silami. To pa pomeni, da pri montaži iz povесnih tabel vzamemo vrednosti, ki so za korekcijsko temperaturo nižje od dejanske. Oceno velikosti trajnega razteзка ε_m vodnika lahko določimo z obrazcem (1) [2], [3].

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{1h} t^n \quad (1)$$

V (1) predstavlja:

ε_m trajni raztezek vodnika (metalurško tečenje) v [$\mu\text{m}/\text{m}$]

ε_{1h} raztezek vodnika v času ene ure v [$\mu\text{m}/\text{m}$]

t skupni opazovani čas npr. 30 ali 50 let v urah [h]

n eksponent sekundarnega tečenja vodnika v log-log merilu, ki je podan z nagibom premice $\varepsilon = f(t)$

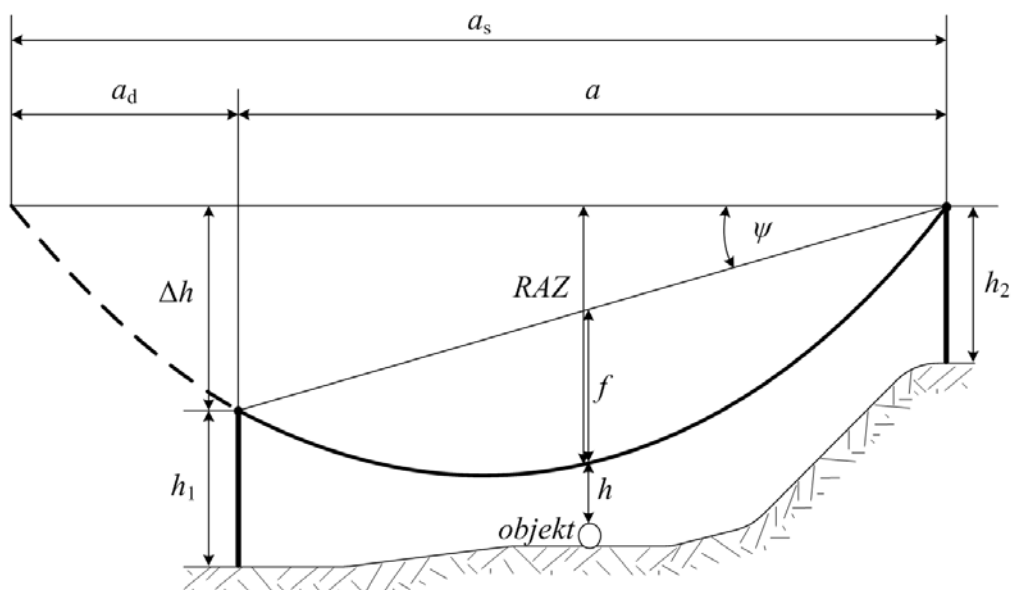
Enačba velja pri $\sigma = \text{konst.}$ in $\vartheta = \text{konst.}$, kar je možno v mejah dopustnih toleranc doseči v laboratorijskih pogojih. Enačba daje ustrezno napoved, oziroma oceno velikosti metalurškega tečenja (raztezek ε_m) za določeno življenjsko dobo vodnika pri laboratorijskih pogojih.

3. PRIKAZ IZRAČUNANIH VREDNOSTI

Če poznamo matematični algoritem za izračun točne vrednosti trajnega neelastičnega razteзка, ga lahko direktno upoštevamo v montažnih tabelah, in sicer preko korekcijske temperature ϑ_{kor} . Njeno vrednost vstavimo v tako imenovano razširjeno položajno enačbo za vodnike in zaščitne vrvi v klasični diferenčni obliki. Položajna enačba opisuje spremembe stanja daljnovodnih vodnikov in zaščitnih vrvi. Profesor Milan Vidmar je v aproksmativnem obrazcu za dolžino povešenega vodnika v razpetini videl geometrijsko dolžino vrvi l_{geom} (2), kjer je a razdalja med obesiščima, p specifična teža vrvi v ter σ natezna napetost. Znotraj razširjene položajne enačbe upoštevamo torej tako temperaturni in elastični kakor tudi trajni neelastični raztezek.

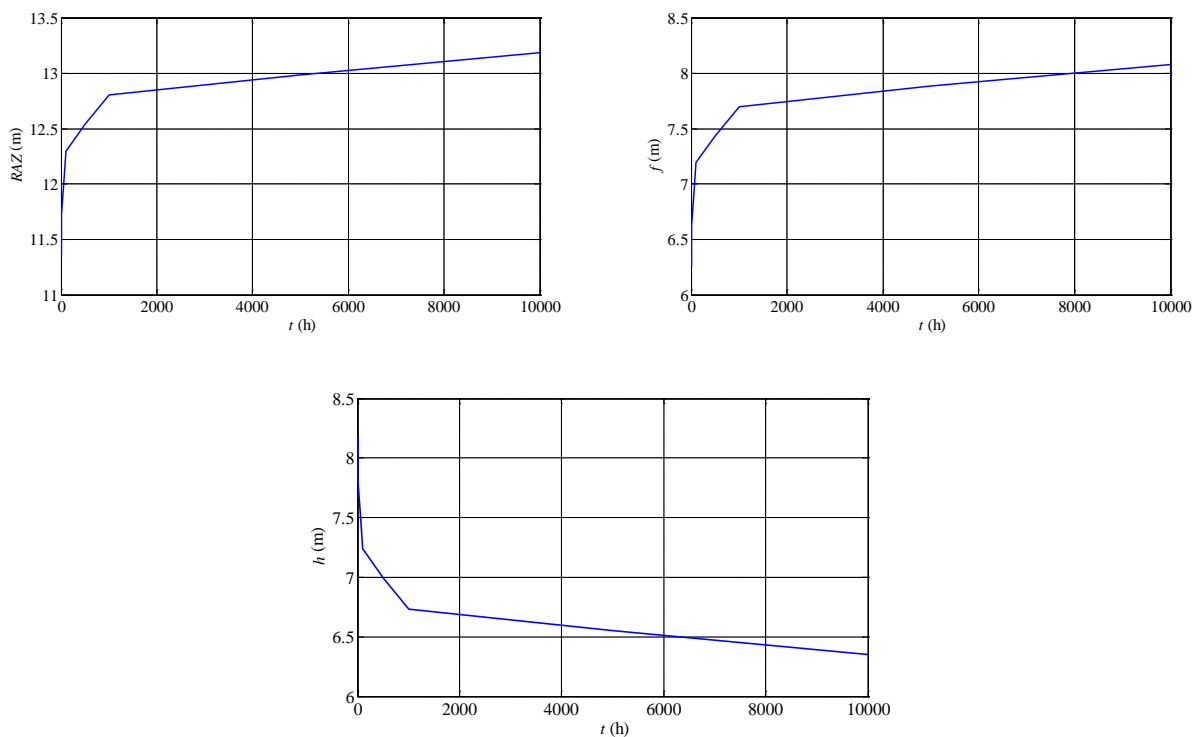
$$l_{\text{geom}} = a \left(1 + \frac{a^2 p^2}{24\sigma^2} \right) \quad (2)$$

Izračuni so izvedeni za razpetino $a = 370$ m, pri čemer je objekt od desnega stebra oddaljen za 28 m (slika 2). Prikazana je višina od temena vpetja do vodnika RAZ, povес f in varnostna razdalja do objekta pod daljnovodom h , in sicer v odvisnosti od temperature vodnika T , dopustne obremenitve σ_{dop} in tudi časa t . Korekcijska temperatura znotraj razširjene položajne enačbe torej je upoštevana in znaša $22,7$ °C, pri čemer so prikazani tudi rezultati brez njene upoštevanosti v položajni enačbi. Končno je izračunan tudi največji povес in povečanje dolžine vodnika Δl brez upoštevanja korekcijske temperature.

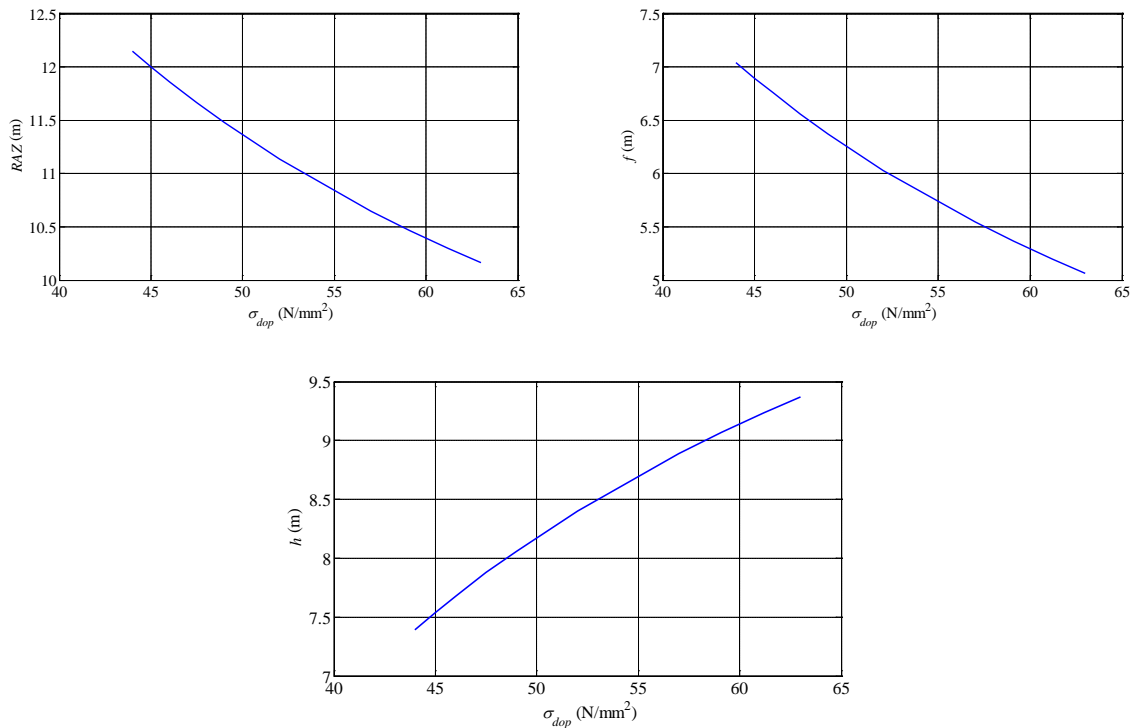


Slika 2: Prikaz obravnavanega primera (400 kV daljnovid BER - KRŠ).

Slike 3 - 4 se nanašajo na raztezek ε_g , oziroma na primere za njegovo odstranitev ter za različne primere njegovega neupoštevanja. Vse krivulje so izračunane za primere razdalj nad pripadajočim objektom znotraj razpetine. Pri tem smo začetno natezno napetost spremenili od vrednosti $\sigma = 44 \text{ N/mm}^2$ na 63 N/mm^2 .



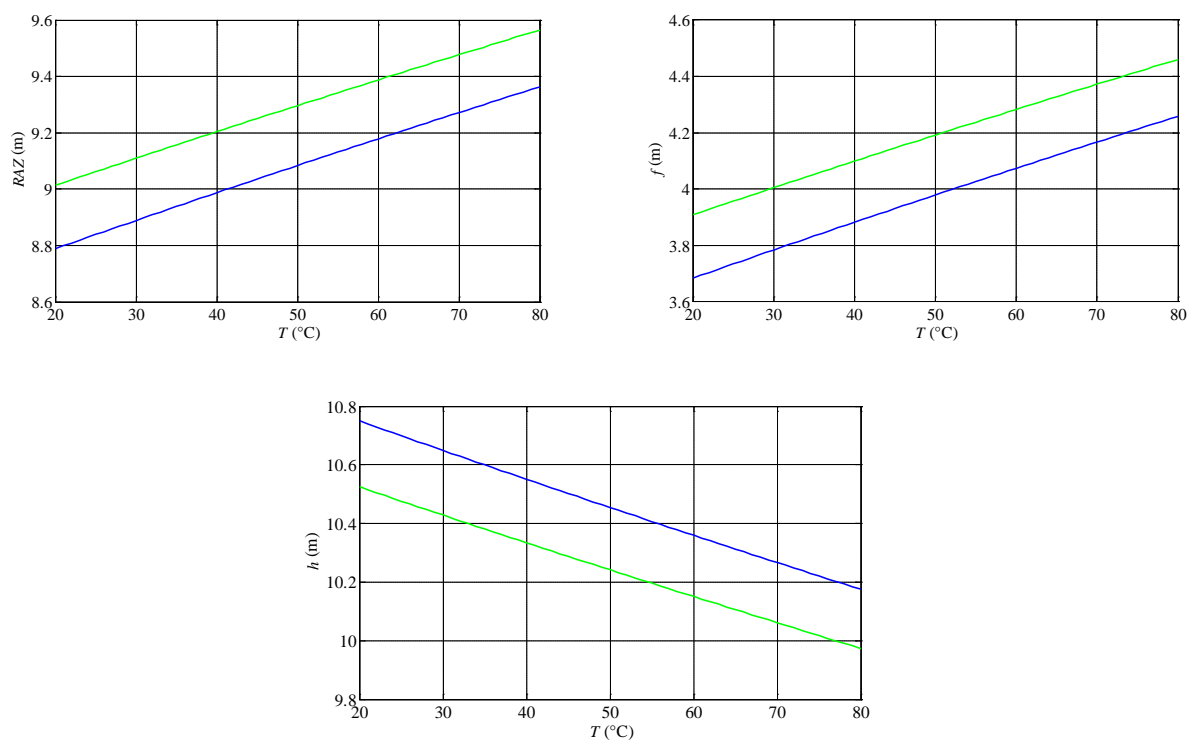
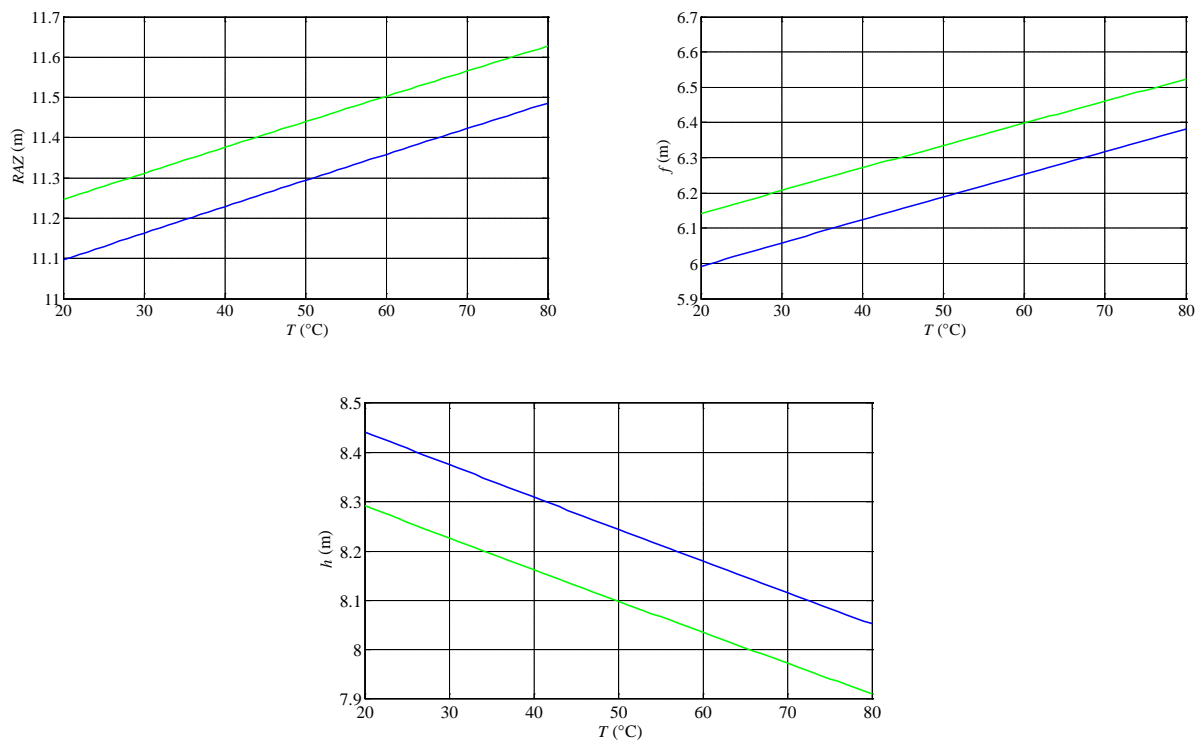
Slika 3: Razmere pri začetni natezni napetosti $\sigma = 50 \text{ N/mm}^2$.

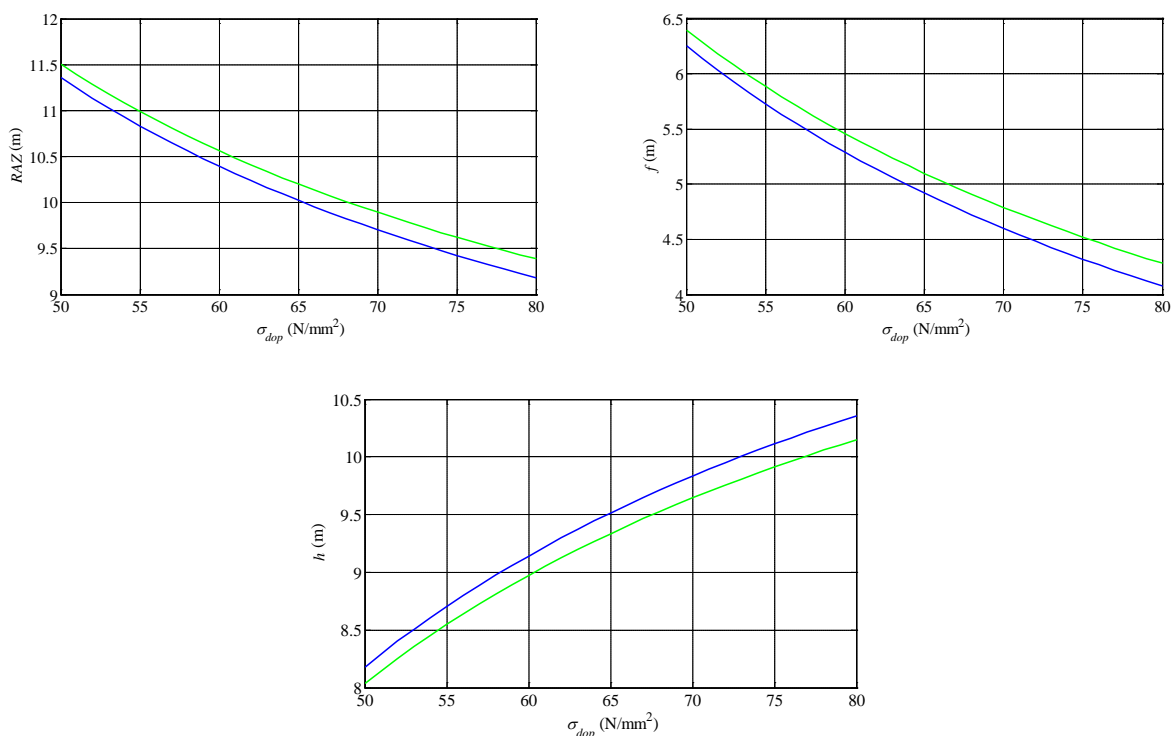


Slika 4: Razmere pri različnih začetnih nateznih napetostih.

Kakor je razvidno iz primerjave rezultatov se povese pri večji začetni natezni napetosti zmanjša tudi za več kakor 1 m. Do takšnih rezultatov je torej mogoče priti z upoštevanjem prednatega, oziroma prenattega. Po drugi strani je iz slike 3 razvidno povečevanje povesev skozi čas pri začetni natezni napetosti $\sigma = 50 \text{ N/mm}^2$. V začetni fazi je tečenje materiala precej izrazitejše kakor v nekoliko poznejši fazi.

Slike 5 - 7 se nanašajo na raztezek ε_m , oziroma na primere za njegovo odstranitev ter tudi neupoštevanje. Vse krivulje so izračunane za primere razdalj nad pripadajočim objektom znotraj razpetine, in sicer v odvisnosti od temperature vodnika (sliki 5 in 6) in dopustne obremenitve (slika 7). Poleg primerov brez upoštevanja korekcijske temperature so seveda prikazani še primeri z njenim upoštevanjem (zeleno in modro krivuljo).

Slika 5: Razmere pri $\sigma_{dop} = 80 \text{ N/mm}^2$.Slika 6: Razmere pri $\sigma_{dop} = 50 \text{ N/mm}^2$.



Slika 7: Razmere pri $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kakor je razvidno lahko z upoštevanjem korekcijske temperature vplivamo na zmanjšanja povesa, v našem konkretnem primeru do približno 0,3 m, medtem ko je na mestu največjega povesa (15,2 m) zmanjšanje povesa še nekoliko večje, in sicer približno za 0,8 m. Pri obravnavanem primeru znaša podaljšana dolžina vodnikov $\Delta l = 170 \text{ mm}$, kar ustreza neelastičnemu trajnemu raztežku $462 \text{ } \mu\text{m/m}$ ali 0,462 promila.

4. SKLEP

V članku je obravnavana problematika neelastičnih raztezkov vodnikov pri nadzemnih vodih, in sicer zaradi mehanskega popuščanja materiala. Pojav neelastičnega raztezanja vodnikov je pomembno obravnavati predvsem zaradi neposrednega vpliva na povečanje povosov, torej posledično na zmanjšanje pripadajočih varnostnih višin. Podani so rezultati raziskave vpliva neelastičnega raztežka na vodnikih tipa Al/Je 490/65, ki je široko uporabljen na elektroenergetskem prenosnem sistemu 400 kV Slovenije. Ob tem so izvedene tudi primerjave, če ustreznih kompenzacijskih metod ob montaži vodnikov ne upoštevamo ali upoštevamo le delno. Navedeno nas opozarja na previdnost pri izbiri vhodnih parametrov že pri načrtovanju oziroma pri projektiranju daljnovidov, pri izgradnji in kasnejšem sprotnem spremljanju teh parametrov med obratovanjem.

5. LITERATURA

- [1] CIGRE: "Permanent Elongation of Conductors. Predictor Equation and Evaluation Methods", CIGRE Study Committee No. 22-Overhead Lines, Paper 22-78 (WG 05) 02, 1978.
- [2] [F. Jakl: "Neelastični raztezki vodnikov na DV 2x400 kV Maribor – Kainachtal (Avstrija)", Ref. ŠK-B2-3. Osmo konferenca slovenskega komiteja CIGRE, Čatež, 2007.
- [3] F. Jakl, A. Jakl, B. Volk: " Raziskave neelastičnega raztezka vodnikov z vplivom na povese pri daljnovodih ", Ref. ŠK-B2-2. Sedma konferenca slovenskega komiteja CIGRE, Velenje, 2005.
- [4] Michael, M., Stephan, P., & Stefan, J.: "Elongation of overhead line conductors under combined mechanical and thermal stress. In Condition Monitoring and Diagnosis", International Conference on (pp. 671-674), IEEE, 2008.

NASLOV AVTORJA

doc. dr. Klemen Deželak, univ. dipl. inž. el.
prof. dr. Franc Jakl, univ. dipl. inž. el.
mag. Robert Maruša, univ. dipl. inž. el. (*)
red. prof. dr. Jože Pihler, univ. dipl. inž. el.
red. prof. dr. Gorazd Štumberger, univ. dipl. inž. el.

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

*Elektro-Slovenija, d.o.o., Hajdrihova 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

Tel: + 386 2 220 71 80

Fax: + 386 2 252 54 81 ali + 386 2 220 72 72

Elektronska pošta: klemen.dezelak@um.si