

IZRAČUN TEMPERATURE VODNIKA DALJNOVODA

Klemen DEŽELAK, Damjan DEŽELAK, Gorazd ŠTUMBERGER, Franc JAKL

POVZETEK

Temperatura vodnika daljnovoda v obratovanju predstavlja enega izmed osnovnih mejnih pogojev za obratovanje daljnovoda. Dopustno segrevanje vodnika namreč ne sme preseči dovoljenih vrednosti, ker vpliva na poslabšanje mehanskih lastnosti vodnika in povese. V članku smo se osredotočili predvsem na ugotovitve CIGRE, medtem ko so rezultati grafično prikazani s pomočjo programskega paketa Matlab, v okviru katerega so opravljeni tudi vsi izračuni.

ABSTRACT

Temperature of the overhead power line conductor during operation represents one of the basic limit parameter for overhead power line operating. The allowed conductor heating must be under the limit values, because of high impact to the mechanical parameters of the conductors and conductor sagging. In the paper, all of the results are obtained with the CIGRE method, while obtained results are shown in program package Matlab.

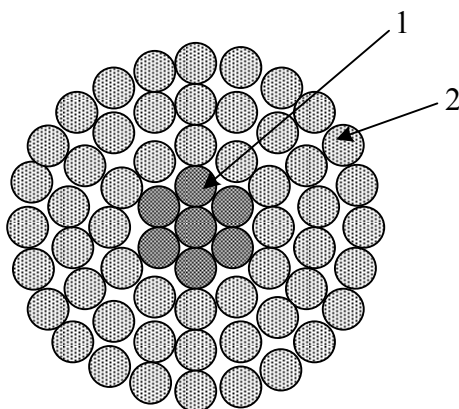
1. UVOD

Cilj prispevka je ugotoviti, kolikšna je temperatura vodnika pri določeni tokovni obremenitvi ter pri različnih vplivih okolja. Segrevanje vodnika namreč ne sme preseči dovoljene vrednosti tako v smislu poslabšanja mehanskih lastnosti vodnika kot tudi dopustnih povosov [1], [2]. Stacionarna temperatura vodnika je dosežena takrat, ko je doseženo razmerje med dovedeno in odvedeno toploto vodnika, kar je opazno tudi v toplotni enačbi [1]. V nalogi se osredotočamo predvsem na ugotovitve CIGRE [1], na podlagi katerih pridemo do želenih rezultatov. Za grafični prikaz rezultatov smo uporabili programa MatLAB, v okviru katerega so opravljeni vsi izračuni.

Temperaturo vodnika določimo s pomočjo enačbe termičnega ravnotežja vodnika, kar je prikazano v drugem poglavju. Enačba termičnega ravnotežja zajema moč sevanja zaradi jouskih izgub, s sončnim sevanjem dovedena moč ter moči, oziroma prispevka ohlajanja s konvekcijo in radiacijo [1]. Pri segrevanju vodnika ima največji vpliv moč segrevanja zaradi jouskih izgub, medtem ko največji prispevek k ohlajanju vodnika prispeva moč konvekcije.

2. ENAČBA TERMIČNEGA RAVNOTEŽJA VODNIKA

V Slovenskem elektroenergetskem sistemu se za prenos električne energije v 400 kV omrežju uporablja vodnik Al/Je 490/65 [2]. Konstrukcijo vodnika oziroma prečni prerez prikazuje slika 1. Vodnik je sestavljen iz 1+6 žic iz jeklenega dela (nosilni del) ter 12+18+24 žic iz aluminijskega dela (prevodni del).



Slika 1: Vodnik AL/Je 490/65

Temperatura vodnika v obratovanju predstavlja enega izmed osnovnih mejnih pogojev za obratovanje daljnovoda. Pri obremenjevanju s konstantnim tokom se vodnik pri konstantnih klimatskih pogojih postopoma segreva, pri čemer v določenem času doseže stacionarno temperaturo, temperatura pa se viša po eksponencialnem zakonu. Stacionarna temperatura vodnika je dosežena takrat, ko je doseženo razmerje med dovedeno in odvedeno toploto vodnika. V splošnem pa vsi naštetí parametri niso konstantni, zaradi česar se tudi temperatura vodnika časovno spreminja [1].

Toplotno enačbo v stacionarnem stanju [1], opisuje enačba (1), kjer je P_j moč segrevanja zaradi joulskih izgub v vodniku, P_s moč, dovedena s sončnim sevanjem, P_i moč dovedena, kot posledica korone, P_c moč, oddana s konvekcijo, P_r moč, oddana z radiacijo ter P_w moč oddana zaradi izhlapevanja vode.

$$P_j + P_s + P_i = P_c + P_r + P_w \quad (1)$$

Stacionarno stanje temperature vodnika je v praksi nemogoče doseči, saj tokovi niso konstantni, ampak se nenehno spreminjajo, tako kot tudi vplivni dejavniki. Stacionarno stanje lahko razumemo kot tisto stanje, pri katerem je prehodni oziroma tranzientni pojav že izzvenel. Osnovna enačba (2), ki opredeljuje trenutno temperaturo vodnika, je zapisana v diferencialni obliki [1]. Pri tem je P_j moč segrevanja zaradi joulskih izgub v vodniku, P_s moč, dovedena s sončnim sevanjem, P_i moč dovedena, kot posledica korone, P_c moč, oddana s

konvekcijo, P_r moč, oddana z radiacijo, P_w oddana moč zaradi izhlapevanja vode, m masa vodnika, c_p specifična toplota vodnika ter T_s temperatura vodnika.

$$P_j + P_s + P_i = P_c + P_r + P_w + mc_p \frac{dT_s}{dt} \quad (2)$$

Enačba (1) se od (2) razlikuje le v dodatnem diferencialnem členu, ki predstavlja količino moči, ki jo vodnik zaradi toplotne vztrajnosti kompenzira. Ta je odvisna od časovne spremembe temperature vodnika T_s , mase vodnika m na enoto dolžine ter specifične toplote materiala c_p , posledično pa pripelje do rezultata, da je sprememba temperature vodnika časovno odvisna [1]. V tem delu bomo prispevka P_i in P_w v (1) in (2), zaradi zanemarljivega vpliva na končni rezultat [1], zanemarili.

Moč segrevanja zaradi joulskih izgub v vodniku lahko določimo z enačbo (3), pri tem je I vrednost toka v [A], r_{20} dolžinska srednja ohmska upornost pri 20°C v [Ω/km], α_{20} temperaturni koeficient pri 20 °C v [1/K] ter T_s temperatura vodnika v [K].

$$P_j = \left(I \sqrt{1,0123 + 2,36 \cdot 10^{-5} I} \right)^2 r_{20} (1 + \alpha_{20} (T_s - 20)) \quad (3)$$

Segrevanje vodnika zaradi sončnega sevanja P_s v [W/km] lahko določimo s (4), kjer je α absorpcijski faktor vodnika, H je moč sončnega sevanja v [W/m^2] [3], [4] ter d premer vodnika v [m].

$$P_s = 1000 \alpha H d \quad (4)$$

Znano je da vodnik oddaja toploto tudi s pomočjo gibanja zraka okoli njega. Zaradi česar je ob močnejšem vetru hlajenje boljše – prisilna konvekcija [1], [5]. Po drugi strani pa se lahko vodnik hladi tudi z naravno konvekcijo. Smer in hitrost vetra določa, ali se vodnik hladi s prisilno ali z naravno konvekcijo. Prisilno konvekcijsko ohlajanje $P_{c,p} = P_c$ v [W/km] izračunamo po (5), kjer je λ_f toplotna prevodnost zraka v [W/mK], T_s temperature vodnika v [°C], T_{ok} temperature okolice v [°C] ter Nu korekcijsko Nusseltovo število [5].

$$P_{c,p} = 1000 \pi \lambda_f (T_s - T_{ok}) Nu \quad (5)$$

Odvajanje toplote s sevanjem P_r v [W/km] določa Stefan – Boltzmannov zakon, kjer je d premer vrvi, σ_{sb} Stefan – Boltzmannova konstanta [5], katera znaša $5,67 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$], T_s absolutna temperatura vodnika, T_{ok} absolutna temperatura okolice ter ε emisijski faktor vodnika.

$$P_r = 1000 \pi d \varepsilon \sigma_{sb} \left[(T_s + 273)^4 - (T_{ok} + 273)^4 \right] \quad (6)$$

3. STACIONARNO STANJE

Tabela 1 prikazuje vrednosti parametrov iz termične enačbe pri različnih vrednosti toka. Pri tem je sončno sevanje enako 550 W/m^2 , hitrost delovanja vetra 5 m/s ter kot delovanja vetra 90° . Hlajenje vodnika je torej najboljše pri prisilnem konvekcijskem ohlajanju, s smerjo delovanja vetra na vodnik 90° . Če se temperatura okolice poveča za 10°C , se tudi temperatura vodnika poveča za približno 10°C . Vidimo, da imajo joulske izgube in konvekcija približno konstantne vrednosti, saj le – te niso odvisne od temperature ampak so odvisne predvsem od vrednosti toka. Nekoliko se povečuje predvsem radiacija, medtem ko je prispevek sončnega segrevanja konstanten.

Tabela 1: Vrednosti parametrov iz termične enačbe pri različnih vrednosti toka

I [A]	T_{ok} ($^\circ\text{C}$)	T_s ($^\circ\text{C}$)	$(P_j + P_s)$ [W/m]	$(P_r + P_c)$ [W/m]	P_j [W/m]	P_s [W/m]	P_c [W/m]	P_r [W/m]
300	-10	-5,4	27,823	27,823	12,374	15,449	26,104	1,719
	0	4,7	28,107	28,107	12,658	15,449	26,143	1,964
	10	14,8	28,391	28,391	12,942	15,449	26,158	2,233
	20	24,8	28,672	28,672	13,223	15,449	26,196	2,477
	30	34,9	28,957	28,957	13,507	15,449	26,162	2,795
	40	44,9	29,238	29,238	13,789	15,449	26,159	3,079
600	-10	1,0	66,013	66,013	50,564	15,449	61,750	4,263
	0	11,3	67,180	67,180	51,731	15,449	62,285	4,895
	10	21,5	68,336	68,336	52,886	15,449	62,792	5,543
	20	31,7	69,491	69,491	54,042	15,449	63,239	6,252
	30	41,9	70,647	70,647	55,198	15,449	63,621	7,026
	40	52,1	71,802	71,802	56,353	15,449	63,935	7,868
900	-10	12,3	132,903	132,903	117,454	15,449	123,692	9,211
	0	22,8	135,598	135,598	120,149	15,449	125,084	10,514
	10	33,4	138,319	138,319	122,869	15,449	126,313	12,005
	20	43,8	140,988	140,988	125,539	15,449	127,466	13,522
	30	54,2	143,657	143,657	128,208	15,449	128,482	15,175
	40	64,6	146,327	146,327	130,877	15,449	129,354	16,973

Tabela 2 prikazuje vrednosti parametrov iz termične enačbe pri različnih hitrostih delovanja vetra. Pri tem je vrednost toka 300 A , sončno sevanje 550 W/m^2 ter kot delovanja vetra 90° . V kolikor se spreminja hitrost delovanja vetra, opazimo da je hlajenje vodnika boljše, za primere z večjo hitrostjo delovanja vetra večja. Hitrost vetra ne vpliva bistveno na Joulske izgube, medtem ko se z večanjem hitrosti delovanja vetra konvekcijsko ohlajanje

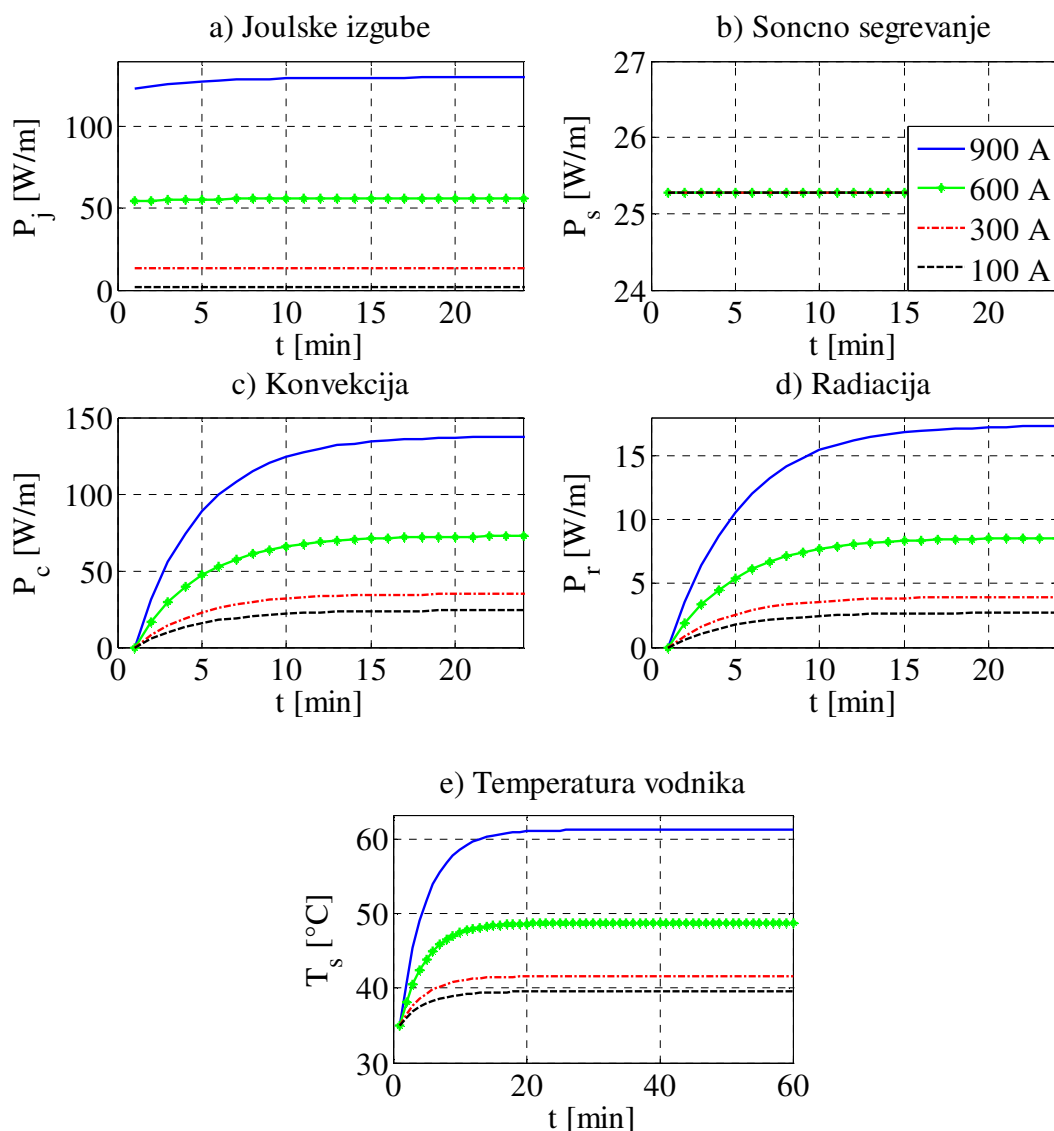
izboljšuje. Dodatno lahko opazimo, da se z večanjem hitrosti delovanja vetra radiacijsko ohlajanje manjša.

Tabela 2: Vrednosti parametrov iz termične enačbe pri različnih hitrostih delovanja vetra

v [m/s]	T_{ok} (°C)	T_s (°C)	$(P_j + P_s)$ [W/m]	$(P_r + P_c)$ [W/m]	P_j [W/m]	P_s [W/m]	P_c [W/m]	P_r [W/m]
1	-10	1,6	28,020	28,020	12,571	15,449	23,509	4,511
	0	11,7	28,304	28,304	12,855	15,449	23,224	5,080
	10	21,7	28,585	28,585	13,136	15,449	22,940	5,646
	20	31,7	28,867	28,867	13,417	15,449	22,614	6,252
	30	41,6	29,145	29,145	13,696	15,449	22,306	6,839
	40	51,5	29,424	29,424	13,974	15,449	21,967	7,456
3	-10	-3,7	27,871	27,871	12,422	15,449	25,493	2,377
	0	6,4	28,155	28,155	12,706	15,449	25,456	2,699
	10	16,4	28,436	28,436	12,987	15,449	25,433	3,003
	20	26,5	28,720	28,720	13,271	15,449	25,337	3,383
	30	36,5	29,002	29,002	13,552	15,449	25,265	3,737
	40	46,6	29,286	29,286	13,836	15,449	25,105	4,180
5	-10	-5,4	27,823	27,823	12,374	15,449	26,104	1,719
	0	4,7	28,107	28,107	12,658	15,449	26,143	1,964
	10	14,8	28,391	28,391	12,942	15,449	26,158	2,233
	20	24,8	28,672	28,672	13,223	15,449	26,196	2,477
	30	34,9	28,957	28,957	13,507	15,449	26,162	2,795
	40	44,9	29,238	29,238	13,789	15,449	26,159	3,079

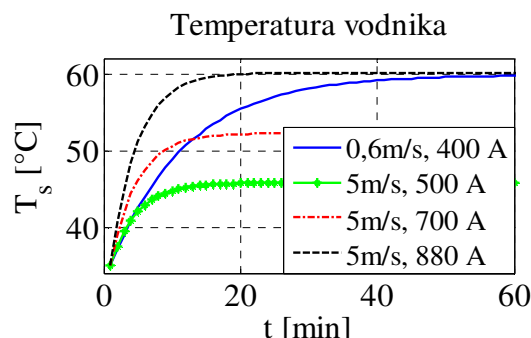
4. DINAMIČNO STANJE

Slika 2 prikazuje vrednosti parametrov iz termične enačbe vodnika ter temperature vodnika, pri različnih vrednostih tokov, pri čemer je sončno sevanje 900 W/m^2 , hitrost delovanja vetra 5 m/s , kot delovanja vetra 90° ter temperatura okolice 35°C . V kolikor povečamo obremenitev vodnika iz 300 A na 600 A (100%), se joulske izgube povečajo za 4 – krat, medtem ko je sončno segrevanje zaradi konstantnega sončnega sevanja konstantno. Konvekcijsko ohlajanje se poveča in sicer za 2 - krat, prav tako pa se poveča radiacijsko ohlajanje za 2 – krat. Pri povečanju toka se torej poveča temperatura vodnika in sicer za 17,15 %.



Slika 2: Vrednosti parametrov iz termične enačbe vodnika ter temperature vodnika, pri različnih vrednostih tokov

Slika 3 prikazuje za koliko je mogoče povečati tok vodnika pri spremembi hitrost delovanja vetra. V primeru, da je hitrost delovanja vetra 0,6 m/s in se le - ta poveča za 8,3 – krat, lahko povečamo tok po daljnovedu za 2,2 – krat.



Slika 3: Temperatura vodnika pri spremembi toka in hitrosti delovanja vetra.

5. SKLEP

Primarna funkcija nadzemnih vodov je prenos električne energije. Napetost je običajno konstantna, zato je energija, ki jo prenašamo, odvisna od vrste bremena, oziroma toka in tudi vplivov okolja. Kadar govorimo o vplivu okolja na vodnik, mislimo predvsem na temperaturo okolice, veter ter sonce. Velik vpliv na segrevanje vodnika pa povzroča tudi amplituda toka ter čas trajanja le - tega. V prispevku je prikazano, da je pri daljnovodnih vrveh, poleg prestopa toplote z radiacijo pomemben predvsem vpliv konvekcije na ohlajanje vodnika. V nekoliko manjši meri se znotraj termične enačbe vodnika odraža vpliv sončnega sevanja na segrevanje vodnika.

6. LITERATURA

- [1] CIGRE, Working group WG 22.12: The thermal behaviour of overhead conductors, section 1 in 2: mathematical model for evaluation of conductor temperature in the steady state and mathematical model for evaluation of conductor temperature in the unsteady state, August 2002
- [2] Miro Žunec – magistrska naloga: Modeliranje segrevanja vodnikov in OPGW kablov pri nadzemnih vodih, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor 2002
- [3] Rai, G.D.: Solar Energy Utilisation, Khanna Publisher, 1980
- [4] Denis Lenardič – priročnik: Fotonapetostni sistemi, Ljubljana, Agencija poti, 2009
- [5] Horst Herr: Nauk o toploti, Tehniška založba Slovenije 1997

NASLOV AVTORJEV

Klemen Deželak, univ. dipl. inž. el.
Damjan Deželak, univ. dipl. inž. el.
red. prof. dr. Gorazd Štumberger, univ. dipl. inž. el.
prof. dr. Franc Jakl, univ. dipl. inž. el.

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

Tel: + 386 2 220 71 80 Fax: + 386 2 252 54 81 ali + 386 2 220 72 72
Elektronska pošta: klemen.dezelak@uni-mb.si