

**PRORAČUN STRUJNOG OPTEREĆENJA NADZEMNIH VODOVA
SA Al/Č PROVODNICIMA ZA POTREBE PROJEKTOVANJA****CALCULATION OF PERMISSIBLE CURRENT LOAD (100% LOAD FACTOR) OVERHEAD LINES
WITH ALUMINIUM STEEL CONDUCTORS IN DESIGNING PURPOSES**

Miladin TANASKOVIĆ, Honorarni konsultant, Beograd, Srbija*
Dragoslav PERIĆ, Akademija tehničkih strukovnih studija Beograd,
odsek Primenjene inženjerske nauke Požarevac, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Različiti analitički pristupi su posvećeni proračunu trajno dozvoljenog strujnog opterećenja kod nadzemnih vodova sa Al/Č provodnicima. U ovom radu navedeni su i poređeni metodološki pristupi proračunu strujnih opterećenja objavljeni u IEC publikaciji, nastali iz temeljnih istraživanja u poslednjoj deceniji prošlog veka i internoj standardizaciji za delatnost distribucije električne energije nastaloj u prvoj deceniji ovog veka. Cilj ovog rada je da na osnovu prikazanih analitičkih pristupa za proračun trajno dozvoljenog strujnog opterećenja predloži jedan postupak proračuna za potrebe izrade tehničke dokumentacije kod projektovanja nadzemnih vodova, kao i da ponudi primenu programa za tabelarne proračune (*spreadsheet*) za realizaciju ovih proračuna u računarskom okruženju.

Ključne reči: nadzemni vodovi sa Al/Č provodnicima, trajno dozvoljeno strujno opterećenje, programi za tabelarne proračune

ABSTRACT

Different analytical approaches are dedicated to the calculation of the permissible current load (100% load factor) for overhead lines with Aluminium Steel conductors. This paper presents and compares comparative methodological approaches to the calculation of current loads published in the IEC publication, derived from basic research in the last decade of the last century and internal standardization for the electricity distribution activity created in the first decade of this century. The aim of this paper is to propose, based on the presented analytical approaches for the calculation of the permanently allowed current load, a calculation procedure for the preparation of technical documentation for the design of overhead lines, as well as to offer the implementation of spreadsheet programs for the realization of these calculations in a computer environment.

Keywords: Overhead lines with Aluminium Steel conductors, Permissible current load (100% load factor), spreadsheets

1. UVOD

Određivanje trajno dozvoljenog strujnog opterećenja nadzemnih vodova sa Al/Č provodnicima važno je kako za proces planiranja, tako i za proces operativnog upravljanja u distributivnim mrežama. Naime, vremenska konstanta Al/Č provodnika koji se koriste u distributivnim mrežama ima vrednost reda veličine od 5 do 8 minuta, tako da su toplotni kapaciteti nedovoljni da se maksimalno dozvoljeno strujno opterećenje pri promenljivom dijagramu opterećenja može koristiti u operativnom upravljanju. Zbog toga je proračun i deklarisanje vrednosti trajno dozvoljenog strujnog opterećenja od prvorazrednog značaja za distributivnu praksu.

U prošlosti je prva standardizacija analitičkog pristupa posvećenog razmatranju trajno dozvoljenog strujnog opterećenja kod nadzemnih vodova sa Al/Č provodnicima urađena u [1]. Potpuni teorijski model i analitički metod za proračun zagrevanja i hlađenja Al/Č provodnika kod nadzemnih vodova u stacionarnom stanju [2] objavljen je u poslednjoj deceniji prošlog veka. Primena fundamentalnih istraživanja iz [2] za proračun strujne opteretljivosti nadzemnih vodova sa Al/Č provodnicima u distributivnim mrežama izložena je u [3], [4] i [5]. Međutim, određivanje trajno dozvoljenog strujnog opterećenja u distributivnoj praksi u normativnom smislu dato je u [6] i [7]. Dozvoljena strujna opterećenja nadzemnih vodova sa Al/Č provodnicima u [6] definisana su isključivo kao

* Dr Miladin Tanasković, dipl. inž. el, Honorarni konsultant, Beograd, tel. +381(0)11/3165340, E-mail: tanasfam@gmail.com

termički dozvoljene struje za predefinisane ambijentalne uslove i izračunata su prema kataloškim vrednostima za standardne ambijentalne uslove koje uobičajeno na isti način definišu proizvođači opreme. S druge strane, u [7] je za iste kataloške vrednosti strujnih opterećenja za standardne ambijentalne uslove moguće izračunati dozvoljena strujna opterećenja nadzemnih vodova sa Al/Č provodnicima na osnovu empirijski određenih sačinilaca promene strujnog opterećenja i za različite temperature vazduha i brzine vetra, kao i uvažiti uticaj sunčevog zračenja.

Cilj ovog rada je da za potrebe projektovanja nadzemnih vodova i izračunavanja strujnih opterećenja nadzemnih vodova sa Al/Č provodnicima predloži standardizovani postupak zasnovan na dostupnim standardima ili tehničkim izveštajima i novi metodološki pristup primenom programa za tabelarne proračune [9]. U radu je za potrebe projektovanja metodološki predloženi standardizovani pristup prema [1], koji je poređen sa proračunom trajno dozvoljenih strujnih opterećenja prema [3, 4, 5] i postupkom datim u [7]. Pri izlaganju sva tri metodološka pristupa zadržane su oznake veličina prema referenciranoj literaturi da bi se izbegle neusaglašenosti u izrazima za iste fizičke veličine.

2. ODREĐIVANJE TRAJNO DOZVOLJENOG STRUJNOG OPTEREĆENJA NADZEMNIH VODOVA SA Al/Č PROVODNICIMA

2.1 Proračun prema Tehničkom izveštaju IEC 1597

Trajno dozvoljeno strujno opterećenje kod nadzemnih vodova izvedenih sa Al/Č provodnicima I_{td} određuje se iz jednačine ravnoteže toplotne snage zagrevanja i hlađenja provodnika [1]:

$$P_j + P_{sol} = P_{rad} + P_{conv} \quad (1)$$

gde je:

P_j [W/m] – toplotna snaga zagrevanja zbog Džulovih gubitaka,

P_{sol} [W/m] – toplotna snaga zagrevanja zbog Sunčevog zračenja,

P_{rad} [W/m] – toplotna snaga hlađenja zbog odvođenja toplote zračenjem (radijacijom) i

P_{conv} [W/m] - toplotna snaga hlađenja zbog odvođenja toplote strujanjem (konvekcijom).

Kako je toplotna snaga zagrevanja zbog Džulovih gubitaka

$$P_j = R_T \cdot I_{td}^2 \quad (2)$$

onda je trajno dozvoljeno strujno opterećenje iz (1) i (2):

$$I_{td} = \left[\frac{P_{rad} + P_{conv} - P_{sol}}{R_T} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Otpornost provodnika pri naizmeničnoj struji pri stacionarnom stanju R_T je:

$$R_T = R_{20} \cdot [1 + \alpha_R \cdot (\theta_2 - \theta_1)], \quad (4)$$

gde je:

R_{20} [Ω/m] – otpornost provodnika pri naizmeničnoj struji na temperaturi ambijenta θ_1 i uzima se kao tablični podatak,

α_R [$1/^\circ C$] – koeficijent promene otpornosti provodnika sa temperaturom ($\alpha_R = 0,00403$ $1/^\circ C$),

θ_1 [$^\circ C$] – temperatura ambijenta ($\theta_1 = 20$ $^\circ C$) i

θ_2 [$^\circ C$] – stacionarna temperatura ($\theta_2 = 80$ $^\circ C$ ili $\theta_2 = 100$ $^\circ C$).

Toplotna snaga zagrevanja zbog Sunčevog zračenja određuje se iz:

$$P_{sol} = \delta \cdot d \cdot I_{sz} \quad (5)$$

gde je:

δ - koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja $\delta = 0,5$,

d [m] – prečnik provodnika i

I_{sz} [W/m^2] – intenzitet sunčevog zračenja i za Srbiju ima vrednosti:

- $I_{sz} = 532$ W/m^2 – zima
- $I_{sz} = 1096$ W/m^2 – leto.

Toplotna snaga hlađenja zbog odvođenja toplote zračenjem je:

$$P_{rad} = \sigma \cdot \pi \cdot d \cdot K_\epsilon \cdot (T_2^4 - T_1^4), \quad (6)$$

gde je:

σ [$W/(m^2 \cdot K^4)$] – Stefan-Boltzmanov-a konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ $W/(m^2 K^4)$),

K_ε - koeficijent emisivnosti prema apsolutno crnom telu ($K_\varepsilon = 0,6$),

T_1 [K] – apsolutna temperatura ambijenta ($T_1 = 293$ K tj. $\theta_1 = 20$ °C) i

T_2 [K] – stacionarna temperatura ($T_2 = 353$ K tj. $\theta_2 = 80$ °C ili $T_2 = 373$ K tj. $\theta_2 = 100$ °C).

Toplotna snaga hlađenja zbog odvođenja toplote strujanjem je:

$$P_{conv} = \pi \cdot \lambda \cdot N_u \cdot (T_2 - T_1), \quad (7)$$

gde je:

λ [W/(m·K)] - koeficijent toplotne provodnosti tankog sloja (filma) okolnog vazduha oko provodnika ($\lambda = 0,02585$ W/(m·K)) i

N_u – Nusselt-ov broj koji se određuje iz:

$$N_u = 0,65 \cdot R_e^{0,2} + 0,23 \cdot R_e^{0,61}, \quad (8)$$

gde je R_e Reynolds-ov broj koji se određuje iz:

$$Re = 1,644 \cdot 10^9 \cdot \nu \cdot d \cdot [T_1 + 0,5 \cdot (T_2 - T_1)]^{-1,78}, \quad (9)$$

gde je ν [m/s] – brzina vetra upravno na provodnik ($\nu = 0,6$ m/s ili $\nu = 1,0$ m/s).

Iz prethodnih izraza se može zaključiti da se odvođenje toplote strujanjem sa površine provodnika u [1] uvek razmatra kao prinudna konvekcija.

2.2 Proračun sa uvažavanjem odvođenja toplote sa provodnika prirodnom i prinudnom konvekcijom

Metodološki pristup koji je obrađen u ovom poglavlju zasnovan je na fundamentalnim istraživanjima V. T. Morgana objavljenim u [2]. Normalni pogon nadzemnog voda se karakteriše stacionarnim stanjem pri kome je uspostavljena ravnoteža između snage zagrevanja provodnika i snage odvođenja toplote sa provodnika u okolinu pri maksimalno dozvoljenoj temperaturi provodnika θ_{pm} . Maksimalno dozvoljena temperatura provodnika θ_{pm} je ograničena dozvoljenim gubitkom mehaničke čvrstoće provodnika, pre svega gubitka čvrstoće na zatezanje. Ovaj gubitak za Al/Č provodnike može da nastane pri temperaturi iznad 100 °C, a naši propisi predviđaju da se računa sa $\theta_{pm} = 80$ °C.

Osnovna jednačina toplotnog ravnotežnog stanja u normalnom pogonu nadzemnog voda ima opšti oblik:

$$P_j + P_{sz} = P_{kon} + P_{zr} + P_{op}, \quad (10)$$

gde je:

P_j [W/m] - snaga zagrevanja usled Džulovih gubitaka,

P_{sz} [W/m] - snaga zagrevanja usled sunčevog zračenja,

P_{kon} [W/m] - snaga odvođenja toplote konvekcijom (strujanjem vazduha),

P_{zr} [W/m] - snaga odvođenja toplote zračenjem,

P_{op} [W/m] - snaga odvođenja toplote provođenjem (kondukcijom).

Snaga zagrevanja usled Džulovih gubitaka određuje se iz izraza (2) i (4).

Snaga zagrevanja provodnika usled direktnog sunčevog zračenja P_{sz} može da se odredi pomoću izraza:

$$P_{sz} = \alpha_{sz} \cdot I_{sz} \cdot d_p, \quad (11)$$

gde je:

α_{sz} - koeficijent apsorpcije provodnika, koji ima vrednost: $\alpha_{sz} = 0,55$ do $\alpha_{sz} = 0,95$ (manje vrednosti se odnose na novi, a veće na stari provodnik);

I_{sz} [W/m²] - intezitet sunčevog zračenja čije su vrednosti za zimu i leto date u poglavlju 2 ovog članka;

d_p [m] - spoljašnji prečnik Al/Č provodnika.

Za najrasprostranjenije nadzemne distributivne vodove izvedene golim Al/Č provodnicima snaga odvođenja toplote provođenjem $P_{op} \approx 0$, jer se direktno odvođenje toplote (kondukcija) vrši samo preko opreme za prihvatanje provodnika na stubu, što je zanemarljivo malo.

Snaga odvođenja toplote zračenjem P_{zr} po jedinici dužine ($\ell = 1$ m) zagrejanog Al/Č provodnika, iznosi:

$$P_{zr} = k_{zr} \cdot S \cdot (\theta_p - \theta_a) = k_{zr} \cdot \pi \cdot d_p \cdot (\theta_p - \theta_a), \quad (12)$$

$$k_{zr} = \frac{\sigma \cdot \varepsilon_{zr} \cdot \left[(273 + \theta_p)^4 - (273 + \theta_a)^4 \right]}{(\theta_p - \theta_a)}, \quad (13)$$

gde je:

k_{zr} [W/m²·K] - koeficijent odvođenja toplote zračenjem,

S [m²] - spoljašnja površina Al/Č provodnika,

σ [W/(m²·K⁴)] – Stefan-Boltzman-ova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ W/(m²K⁴),

$\pi \cdot d_p$ [m] - obim okruglog provodnika, spoljašnjeg prečnika d_p ,

ε_{zr} - relativna konstanta toplotnog zračenja, koja iznosi:

- $\varepsilon_{zr} \approx 0,3$ za nove (polirane) provodnike i
- $\varepsilon_{zr} \approx 0,9$ za patinirane provodnike koji su u eksploataciji više od 10 godina,

θ_p (θ_a) [°C] - temperatura provodnika (ambijenta).

Vrednosti koeficijenta apsorpcije provodnika α_{sz} i relativne konstante toplotnog zračenja ε_{zr} , koji zavise od stanja (oksidacije) spoljašnje površine provodnika, kreću se u približno istim granicama, ali se u proračunima obično usvaja nešto veća vrednost za α_{sz} , jer spektralni sastav sunčevog zračenja i spektralni sastav toplotnog zračenja koje emituje provodnik nisu jednaki. Kod proračuna vezanih za planiranje, obično se računa da je vod na sredini eksploatacionog veka (10 do 15 godina), pa može da se usvoji: $\varepsilon_{zr} = 0,6$ i $\alpha_{sz} = 0,9$.

Konvekcija je proces odvođenja toplote sa površine Al/Č provodnika strujanjem vazduha. Konvekcija može da bude prirodna ili prinudna (vetar), ali u realnim uslovima ovo strujanje se javlja kao kombinovano. Naime, na visini tačke prihvatanja Al/Č provodnika na stubu računa se da uvek postoji i prinudno strujanje vazduha, tako da se obično kod proračuna dozvoljenih strujnih opterećenja nadzemnog voda računa sa minimalnom brzinom vetra od $v = 0,6$ m/s.

Snaga odvođenja toplote konvekcijom P_{kon} po jedinici dužine ($\ell = 1$ m) zagrejanog Al/Č provodnika, iznosi:

$$P_{kon} = k_{kon} \cdot S \cdot (\theta_p - \theta_a) = k_{kon} \cdot \pi \cdot d_p \cdot (\theta_p - \theta_a) \quad (14)$$

gde je:

k_{kon} [W/m²·K] - koeficijent odvođenja toplote konvekcijom,

S [m²] - površina Al/Č provodnika,

d_p [m] - prečnik Al/Č provodnika,

θ_p [°C] - temperatura provodnika,

θ_a [°C] - temperatura ambijenta (vazduha).

Koeficijent odvođenja toplote k_{kon} u izrazu (14) predstavlja količinu toplote koja se u jedinici vremena odvodi konvekcijom sa jedinične površine za jediničnu razliku temperature, i računa se pomoću Nusselt-ovog broja Nu :

$$k_{kon} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_p} \quad (15)$$

gde je:

d_p [m] - prečnik Al/Č provodnika,

λ [W/K·m] - koeficijent provođenja toplote vazduha koji iznosi:

$$\lambda = 2,42 \cdot 10^{-2} + 7,2 \cdot 10^{-5} \cdot 0,5 \cdot (\theta_p + \theta_a). \quad (16)$$

Nusselt-ov broj za odvođenje toplote prirodnom konvekcijom Nu se prema [3] računa pomoću izraza:

$$Nu = 0,439 \cdot Gr^{0,25} = 0,439 \cdot \left[\frac{g \cdot \beta \cdot \ell^3 \cdot (\theta_p - \theta_a)}{\nu_v^2} \right]^{0,25}, \quad (17)$$

gde je:

Gr - Grashofov broj koji uzima u obzir pogonske sile nastale usled razlike u gustini čestica vazduha,

g [m/s²] - ubrzanje usled sile zemljine teže - gravitaciona konstanta $g = 9,81$ m/s²,

β [1/K] - koeficijent zapreminskog širenja vazduha $\beta = 3,661 \cdot 10^{-3}$ 1/K,

ν_v [m²/s] - kinematska viskoznost vazduha data izrazom:

$$\nu_v = 1,32 \cdot 10^{-5} + 9,5 \cdot 10^{-8} \cdot 0,5 \cdot (\theta_p + \theta_a). \quad (18)$$

Nusseltov broj za odvođenje toplote prinudnom konvekcijom Nu kada vetar deluje na provodnik brzinom v [m/s] i pod napadnim uglom φ_v [°], može da se proračuna pomoću izraza:

$$Nu = C \cdot (Re)^n \cdot \left[0,42 + E \cdot (\sin \varphi_v)^p \right], \quad (19)$$

gde je:

v [m/s] – brzina vetra;

φ_v [°] – napadni ugao vetra;

Re - Reynoldsov broj koji se računa prema izrazu:

$$Re = \frac{v \cdot d_p}{\nu_v} \quad (20)$$

C i n - konstante čije vrednosti zavise od Reynoldsovog broja, tabela 1.

E i p - konstante koje zavise od napadnog ugla vetra φ_v :

$E = 0,68$ i $p = 1,08$ za $\varphi_v \leq 24^\circ$,

$E = 0,58$ i $p = 0,9$ za $24^\circ < \varphi_v \leq 90^\circ$.

Tabela 1. Parametri za proračun Nusseltovog broja za prinudnu konvekciju

Konst. ↓	$Re \leq 35$	$35 < Re \leq 5000$	$5000 < Re \leq 50000$	$50000 < Re \leq 200000$
C	0,795	0,583	0,148	0,0208
n	0,384	0,471	0,633	0,814

Iz izraza (19) se vidi da je najnepovoljniji slučaj odvođenja toplote sa provodnika prinudnom konvekcijom kada je $\varphi_v = 0^\circ$, odnosno kada vetar duva paralelno sa osom provodnika, dok pri $\varphi_v = 90^\circ$ Nusselt-ov broj ima najveću vrednost i tada su optimalni uslovi za odvođenje toplote.

Vrednost trajno dozvoljene struje Al/Č provodnika I_{td} za $\theta_p = \theta_{pm}$ može se odrediti pomoću izraza:

$$I_{td} = \sqrt{\frac{d_p \cdot \pi \cdot k_{kon} \cdot (\theta_{pm} - \theta_a) + d_p \cdot \pi \cdot k_{zr} \cdot (\theta_{pm} - \theta_a) - d_p \cdot \alpha_{sz} \cdot I_{sz}}{R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta_{pm} - 20)]}} \quad (21)$$

Prema izrazu (21) može da se proračuna i naznačena vrednost dozvoljenog strujnog opterećenja voda I_{nd} , koju u skladu sa važećim standardima daje proizvođač radi ispitivanja i garancije, i u našim uslovima se odnosi na temperaturu ambijenta (vazduha) $\theta_a = 40$ °C, sa direktnim sunčevim zračenjem, bez vetra (prirodna konvekcija).

2.3 Proračun prema TP 10-b

Trajno dozvoljeno strujno opterećenje nadzemnog voda I_{td} [A] izvedenog Al/Č provodnicima proračunava se prema [7]:

$$I_{td} = k_{op} \cdot k_{\theta_v} \cdot k_v \cdot k_{sz} \cdot I_{nd} \quad (22)$$

gde je:

k_{op} - sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja voda od faktora opterećenja m , i za nadzemne vodove iznosi:

$$k_{op} = 1, \quad (23)$$

k_{θ_v} - sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja voda od temperature vazduha θ_v , i u opsegu

$0^\circ \text{C} \leq \theta_v \leq +40^\circ \text{C}$ proračunava se prema izrazu:

$$k_{\theta_v} = 1 + 0,009 \cdot (40 - \theta_v), \quad (24)$$

k_v - sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja voda od brzine vetra v dat je u tabeli 2. i ima vrednosti:

- za potrebe planiranja razvoja distributivnog konzuma $k_v = 1,191$ što odgovara brzini vetra od $v = 0,6$ m/s;
- za potrebe operativne energetike distributivnog konzuma prema tabeli 2.

k_{sz} - sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja voda dat je u tabeli 2. i ima vrednosti:

- za potrebe planiranja razvoja distributivnog konzuma $k_{sz} = 1,18$ što odgovara brzini vetra od $v = 0,6$ m/s;
- za potrebe operativne energetike distributivnog konzuma prema tabeli 2.
- $k_{sz} = 1$ u svim slučajevima kada je nadzemni vod izložen direktnom sunčevom zračenju:
 - slučaj konstantnog (industrijskog) opterećenja;
 - za potrebe operativne energetike distributivnog konzuma u letnjim mesecima (jun - septembar).

I_{nd} [A] - naznačena vrednost dozvoljenog strujnog opterećenja voda koja se uzima iz tabele 3. za referentne uslove koji su dati u istoj tabeli.

Tabela 2. Sačinioci promene dozvoljenog strujnog opterećenja zbog vetra k_v i uticaja direktnog sunčevog zračenja k_{sz}

v [m/s]		0	0,6	1	2	3	4	5	6
Al/Č	k_v	1	1,191	1,295	1,459	1,567	1,648	1,713	1,799
	k_{sz}	1,291	1,18	1,146	1,109	1,092	1,083	1,076	1,068
$k_{sz} = 1$ ako je vod izložen direktnom sunčevom zračenju									

U tabeli 3. dati su podaci o dozvoljenim strujnim opterećenjima nadzemnih vodova izvedenih alučeličnim provodnicima, i to naznačene vrednosti I_{nd} koje odgovaraju standardnim uslovima datim u istoj tabeli i maksimalno dozvoljene vrednosti I_{dozZ} u zimskom periodu i I_{dozL} u letnjem periodu koje odgovaraju ambijentalnim uslovima datim u istoj tabeli. Odnos ovih struja iznosi: $I_{dozZ} \approx 1,9 \cdot I_{nd}$, $I_{dozL} \approx 1,3 \cdot I_{nd}$, $I_{dozL} \approx 0,68 \cdot I_{dozZ}$.

Tabela 3. Dozvoljena strujna opterećenja nadzemnih vodova u zimskom i letnjem periodu

Naznačeni presek Al/č provodnika [mm ²]	I_{nd} [A]	I_{dozZ} [A]	I_{dozL} [A]
50/8	170	323	220
70/12	235	447	305
95/15	290	550	377
$\theta_p = 80 \text{ }^\circ\text{C}$; $k_{op} = 1$			
I_{nd} - naznačena vrednost dozvoljenog strujnog opterećenja za $\theta_v = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 0 \text{ m/s}$; direktno sunčevo zračenje			
I_{dozZ} - dozvoljeno strujno opterećenje u zimskom periodu za $\theta_v = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 0,6 \text{ m/s}$; bez direktnog sunčevog zračenja			
I_{dozL} - dozvoljeno strujno opterećenje u letnjem periodu za $\theta_v = 30 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 0,6 \text{ m/s}$; direktno sunčevo zračenje			

3. POREĐENJE REZULTATA PRORAČUNA RAZLIČITIM METODOLOŠKIM PRISTUPIMA

Poređenje rezultata proračuna trajno dozvoljenog strujnog opterećenja nadzemnih vodova sa Al/Č provodnicima, za tri prethodno navedena metodološka pristupa, dato je u tabeli 4. i urađeno je za provodnik Al/Č 70/12 mm² za zimski i letnji period prema ambijentalnim uslovima navedenim u istoj tabeli. Maksimalno dozvoljena temperatura provodnika θ_{pm} je 80 °C. Proračuni za metodološki pristup iz poglavlja 2.2 urađeni su za provodnik starosti 10 – 15 godina i za napadni ugao vetra $\varphi_v = 90^\circ$.

Tabela 4. Tabela uporednih vrednosti trajno dozvoljenih strujnih opterećenja nadzemnih vodova za Al/Č provodnik 70/12 mm² u zimskom i letnjem periodu

Period u godini	$I_{td2.1}$ [A]	$I_{td2.2}$ [A]	$I_{td2.3}$ [A]
Zimski period	409,1	410,4	447,0
Letnji period	300,5	291,1	305,0
Zimski period $\theta_v = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 0,6 \text{ m/s}$; bez direktnog sunčevog zračenja			
Letnji period $\theta_v = 30 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 0,6 \text{ m/s}$; direktno sunčevo zračenje			

Iz vrednosti za strujna opterećenja data u tabeli 4. evidentno je dobro podudaranje metodoloških pristupa iz poglavlja 2.1 i 2.2 za oba perioda u godini, dok je prisutna značajna razlika u rezultatima proračuna između ova dva metodološka pristupa i metodološkog pristupa u poglavlju 2.3 za zimski period.

4. PRORAČUN STRUJNOG OPTEREĆENJA POMOĆU PROGRAMA ZA TEBELARNE PRORAČUNE

Pod praktičnim inženjerskim proračunima (u daljem tekstu: IPR) u ovom radu podrazumevaju se proračuni pri projektovanju i rešavanju standardnih inženjerskih problema, kao što je dimenzionisanje i specificiranje opreme. IPR po pravilu imaju jasno definisan postupak proistekao iz višestruke primene, obezbeđuju dovoljnu tačnost za praktične potrebe i ne zahtevaju previše vremena. IPR zahtevaju precizan izveštaj kao značajan sastavni deo tehničke dokumentacije. Do pojave personalnih računara za izradu IPR koristili su se:

- papir i odgovarajuća pisaljka uz veliki broj razvijenih postupaka, od množenja višecifrenih brojeva do matričnog računa,
- logaritamske tablice i tablice vrednosti ili grafici funkcija,
- namenski dijagrami i nomogrami,
- logaritmi („šiberi“), koji su kao „pozitivan nedostatak“ tražili od inženjera da uvek zna red veličine,

- kalkulatori („digitroni“) sa velikim brojem matematičkih funkcija, sada dostupni i kao programi za personalne računare i mobilne telefone, a izveštaji o proračunima pisali su se rukom ili pomoću pisače mašine.

Personalni računari sa programima za obradu teksta preuzeli su pisanje izveštaja od pisaaćih mašina (i daktilografa). Na tržištu se, međutim, nije pojavio i značajan broj korisničkih programa za IPR, jer nije bili dovoljno IPR sa velikim brojem korisnika, da bi se razvoj programa isplatio, a kada su se pojavili bili su previše skupi i strogo namenski. Inženjerima su na raspolaganju bili dostupni programski jezici opšte namene (BASC, C) ili za istraživanje (FORTRAN, MATLAB), pomoću kojih su se mogle isprogramirati formule za proračune, ali je generisanje izveštaja komplikovano, pa je korišćenje kalkulatora i dalje bilo racionalnije rešenje.

Od softverskih alata (programa, aplikacija) za IPR pogodni su oni koji omogućavaju korisničko programiranje [8] (*end-use programming, end-user development*), odnosno razvoj korisničkih programa/aplikacija (KPR). KPR su aplikacije koje kreira/razvija sâm korisnik koji dobro poznaje konkretan IPR, i u određenoj meri, ali ne na profesionalnom nivou i principe programiranja, kao i alat/aplikaciju u kojoj izrađuje svoju aplikaciju. Korisnički razvijene programe koristi manji broj korisnika u odnosu na uobičajene komercijalne programe, i od njih se zahteva da poznaju IPR koji računaju i osnove korišćenja aplikacije u kojoj korisnički program razvijen. Postoje različiti alati i pristupi za razvoj KPR, pri čemu su programi za tabelarne proračune [9, 12] posebno pogodni.

Programi za tabelarne proračune (TPR) ili unakrsna izračunavanja ili radne tabele ili engleski *spreadsheet* klasifikuju se u dve kategorije programskih jezika: kao vizuelni jezici, jer se struktura programa definiše vizuelno, rasporedom sadržaja (varijabli) u više tabela, i kao funkcionalni jezici, jer se definisanje vrednosti varijabli ostvaruje pisanjem programskog kôda koji se sastoji od pozivanja ugrađenih ili korisnički definisanih funkcija. Korišćenje funkcija u TPR ne treba mešati sa pisanjem programskog kôda u programskim jezicima dograđenim u većini velikih aplikacija, (najčešće Visual Basic for Application – VBA, Java Script, C, ...), radi profesionalnog proširivanja ovih aplikacija. Kod TPR se dograđeni programski jezik (VBA, Java Script) koristi i za pisanje korisnički definisanih funkcija (UDF – *user defined function*), i to je razlog zašto eventualno treba pri razvoju KPR poznavati i principe programiranja.

Tabela u TPR (list, *sheet, worksheet*, radna tabela) izgleda kao papir izdelfen na redove (*rows*) i kolone (*columns*) – slika 1. Deo radne tabele u preseku reda i kolone naziva se ćelija (*cell*). Svaka ćelija jednoznačno je određena kolonom i redom u kojima se nalazi. Ćelija iz kolone D i reda 6 označava se sa D6. Oznaka kao što je D6 naziva se adresa ćelije (*reference*). Radna tabela se sastoji od više listova koji su inicijalno označeni sa Sheet1, Sheet2, itd.

Pravougaoni skup ćelija naziva se opseg (*range*). Opseg je jednoznačno određen adresama ćelija na krajevima dijagonale opsega. Na primer, A4:E22 na slici 1 je opseg sa ulaznim podacima. Najveći opseg je čitava radna tabela, a najmanji jedna ćelija. Opsegu i ćeliji se može pridružiti i naziv (*range name*). Na opseg i ćeliju može se ukazivati bilo nazivom, bilo adresom. U ćeliju može da se upiše tekst, broj ili formula. Upisivanje se vrši u ćeliju koja je naglašena svojim okvirom - to je aktivna ili radna ćelija (*current cell, active cell*). Niz znakova koji se upisuje u aktivnu ćeliju vidi se u samoj ćeliji i redu za uređivanje sadržaja ćelije (*formula bar*) koja se nalazi pri vrhu prozora. Po završetku upisa u ćeliju kucanjem tastera ENTER ili promenom aktivne ćelije, niz znakova u redu za uređivanje ostaje nepromenljiv i predstavlja sadržaj ćelije (*contents of cell*). U samoj ćeliji ostaje u opštem slučaju promenjeni niz znakova koji predstavlja vrednost (*value*) ćelije. Svakoć ćeliji pridružen je sadržaj i vrednost ćelije. Kada je u ćeliju uneta formula, prvi znak sadržaja je znak jednakosti (=), a vrednost ćelije jednaka je vrednosti izračunate formule. U ostalim slučajevima, sadržaj i vrednost ćelije po pravilu su identični. Sadržaj formule sastoji se od brojeva, operatora i funkcija. U radne tabele je ugrađen veliki broj funkcija, a korisniku je omogućeno da definiše i nove - korisničke funkcije.

Uređivanje radne tabele je skup postupaka za ostvarivanje željenih sadržaja ćelija radne tabele. Korisnik uređuje radnu tabelu kroz interaktivni rad sa programom, primenjujući odgovarajući skup komandi i tehnika. Za efikasno kreiranje radne tabele, korisnik treba da poznaje osnovne komande za uređivanje [10]: 1) Promena aktivne ćelije (pomeranje pokazivača aktivne ćelije); 2) Uređivanje sadržaja ćelije; 3) Obeležavanje (*select*) delova radne tabele; 4) Umetanje i uklanjanje redova i kolona; 5) Premeštanje, kopiranje i brisanje opsega i ćelija; 6) Kopiranje na dole i na desno; 7) Apsolutno i relativno ukazivanje na ćeliju i opseg; 8) Zadavanje naziva ćelije i opsega. Pored navedenog, pri razvoju KPR za IPR koristi se: 1) posebna organizacija redova i kolona [11], 2) imenovanje ćelija i opsega i 3) neke specifične tehnike uređivanja ćelija.

Za IPR kolone se organizuju u tri grupe. Prva grupa (slika 1) počinje od kolone A i sadrži dve do tri kolone za naslove, iza kojih slede kolone na čiji se vrh upisuju naslovi: Naziv/Opis, Oznaka, Vrednost, Jedinica. Ovu grupu treba označiti kao površinu za štampanje (*Print Area*), pošto ona predstavlja i izveštaj o izvršenom proračunu. Sledeća grupa kolona služi za dokumentovanje (kôda) razvijenog KPR, kao i za beleške tokom razvoja. Sadrži obavezno sadržaj ćelija sa

formulama (tekst formule) koji se dobija upotrebom funkcije FORMULATEXT. Ova grupa se sakriva za krajnjeg korisnika KPR. Treća grupa je uputstvo za krajnjeg korisnika, kao i prostor za njegove beleške.

A	B	C	D	E
1	Veličina/Opis	Oznaka	Vrednost	Jedinica
2	TRAJNO DOZVOLJENE STRUJE ALUČELIČOG PROVODNIKA			
3	Proračuni su urađeni prema Technical Report IEC 1597			
4	Ulazni podaci			
5	površina poprečnog preseka provodnika (samo Al)	S_{Al}	70	mm ²
6	otpornost provodnika pri naizmeničnoj struji na 20 °C	R_{T20}	0,413	Ω
7	koeficijent promene otpornosti provodnika sa temperaturom	α_R	0,00403	1/°C
8	temperatura ambijenta - zimi	θ_{1Z}	0	°C
9	temperatura ambijenta - leti	θ_{1L}	30	°C
10	stacionarna temperatura (80 °C ili 100 °C).	θ_2	80	°C
11	direktno sučevo zračenje zimi (1 - da, 0 - ne)	k_{sz}	0	
12	koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja	δ	0,50	
13	prečnik provodnika	d	11,7	mm
14	intezitet Sunčevog zračenja - zimi	I_{sz}	532,00	W/m ²
15	intezitet Sunčevog zračenja - leti	I_{sL}	1.096,00	W/m ²
16	Stefan-Boltzmanova konstanta	σ_{SB}	5,67E-08	W/(m ² K ⁴)
17	koeficijent emisivnosti prema apsolutno crnom telu	K_e	0,60	
18	apsolutna temperatura ambijenta - zimi	T_{1Z}	273,00	K
19	apsolutna temperatura ambijenta - leti	T_{1L}	303,00	K
20	apsolutna stacionarna temperatura	T_2	353,00	K
21	koeficijent toplote provodnosti tankog sloja (filma)	λ	0,02585	W/(m K)
22	brzina vetra upravno na provodnik ($v = 0,6$ ili $1,0$ m/s).	v	0,6	m/s
23				
24	Rekapitulacija rezultata - Trajno dozvoljeno strujno opterećenje			
25		- zimi I_{dZ}	409,11	A
26		- leti I_{dL}	300,59	A
27	Proračun			
28	Otpornost provodnika pri naizmeničnoj struji za temperaturu provodnika pri stacionarnom stanju			
29	$R_T = R_{T20} \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta_2 - 20)]$	- zimi R_{TZ}	5,1286E-04	Ω/m
30		- leti R_{TL}	5,1286E-04	Ω/m
31	Toplotna snaga za grevanja zbog Sunčevog zračenja			
32	$P_{sol} = \delta \cdot d \cdot I_{sz}$	- zimi P_{solZ}	0,00	W/m
33		- leti P_{solL}	6,41	W/m
34	Toplotna snaga hlađenja zbog odvođenja toplote zračenjem			
35	$P_{rad} = \sigma_{SB} \cdot \pi \cdot d \cdot K_e \cdot (T_2^4 - T_1^4)$	- zimi P_{radZ}	12,47	W/m
36		- leti P_{radL}	8,88	W/m
37	Reynolds-ov broj			
38	$Re = 1,644 \cdot 10^9 \cdot v \cdot d \cdot [T_1 + 0,5 \cdot (T_2 - T_1)]^{1,38}$	- zimi ReZ	417,03	
39		- leti ReL	383,69	
40	Nusselt-ov broj			
41	$N_u = 0,65 \cdot Re^{0,2} + 0,23 \cdot Re^{0,61}$	- zimi N_{uZ}	11,29	
42		- leti N_{uL}	10,81	
43	Toplotna snaga hlađenja zbog odvođenja toplote strujanjem			
44	$P_{conv} = \pi \cdot \lambda \cdot N_u \cdot (T_2 - T_1)$	- zimi P_{convZ}	73,37	W/m
45		- leti P_{convL}	43,88	W/m
46	Trajno dozvoljeno strujno opterećenje			
47		- zimi I_{dZ}	409,11	A
48	$I_{d} = \left[\frac{P_{rad} + P_{conv} - P_{sol}}{R_T} \right]^{1/2}$	- leti I_{dL}	300,59	A
49				

Slika 1. Izveštaj za proračun trajno dozvoljenih strujnih opterećenja nadzemnih vodova za Al/Č provodnik 70/12 mm² u zimskom i letnjem periodu

Redovi se organizuju u celine određene naslovima i podnaslovima. Na početku su ulazne veličine i deo posvećen rekapitulaciji izlaznih veličina, koji sa svojim sadržajima čine skraćeni izveštaj IPR. Redovi i kolone se grupišu odgovarajućim komandama TPR (*Group, Ungroup*), kako bi se lako mogle sakrivati i razotkrivati (klikom na kvadratiće sa znakovima + i -). Svaki red se odnosi na jednu ulaznu ili izlaznu veličinu ili međurezultat, ako je potrebno da se on nađe u izveštaju. Za veličine za koje je potrebno da se napiše izraz/jednačina iz koje se računaju dodaje se još jedan red ispod. Ovi izrazi obično se uređuju u nekom drugom programu i pri kopiranju u TPR poželjno ih je preneti kao kompletan objekat ili kao sliku dovoljnog kvaliteta. Kolona Naziv/Opis veličine se podešava da ima automatski prelom reči u više redova jedne ćelije (*Word Wrap*), a po potrebi se koristi i ručni prelom (Alt+Enter). Pri unosu teksta u kolonu Oznaka treba koristiti specijalne znake (grčki alfabet, specijalne znake, pisanje u indeksu).

Ključni prethodni korak za unos formula u kolonu Vrednost je imenovanje ćelija (varijabli). Ćelije se mogu imenovati pojedinačno ili grupno. Pri pojedinačnom imenovanju izabiramo ćeliju koju treba da imenujemo i pokrenuti komandu *Define Name*, pri čemu prihvatamo ili korigujemo naziv predložen na osnovu vrednosti iz kolone Oznaka. Pri grupnom imenovanju obeležavamo ćelije koje želimo da imenujemo i ćelije levo od njih – iz popunjene kolone Oznaka i pokrećemo komandu *Create Name*, a potom po potrebi korigujemo nazive (*Name Manager*). Korekcije naziva treba da obezbede preglednost i lak unos naziva u formule. Zato treba, na primer, za veličinu I_{td} koristiti naziv I_td, kao pregledniju od Itd, a za veličinu α_R – alfa_R, ili alfaR, jer se grčka slova teže unose sa tastature. Za preglednost i razdvajanje formula treba koristiti i dodatne razmake ili ručni prelom na redove (Alt+Enter) za razdvajanje celina formule – jednom rečju, treba koristiti tehnike koje se koriste pri pisanju koda u standardnim programskim jezicima.

Na slici 1. dat je primer izveštaja za proračun. U koloni Vrednost (D) za ulazne podatke naznačene su ćelije u koje korisnik unosi podatke, a ostali podaci izračunavaju se na osnovu formula. Na primer, veličina u redu 47 ima oznaku I_{tdZ} . Ćelija D47 imenovana je kao I_tdZ, njen sadržaj je formula:

$$=SQRT((PradZ + PconvZ - PsoLZ) / RTZ)$$
 a njena (izračunata) vrednost je 409,11 A.

5. ZAKLJUČAK

Uvek je preporučljivo da se za izradu proračuna bilo koje vrste kod izrade projektne dokumentacije koriste standardizovani postupci koji su objavljeni u nacionalnoj ili inostranoj literaturi jer takav pristup omogućava standardizacije metodologije proračuna. U ovom radu se za proračun strujnih opterećenja nadzemnih vodova sa Al/Č provodnicima za potrebe izrade tehničke dokumentacije, u nedostatku nacionalnog standarda, preporučuje Technical Report IEC 1597. Takođe, u radu je opisan postupak izrade praktičnih inženjerskih proračuna u programima za tabelarne proračune i dat je primer urađenog proračuna trajno dozvoljenog strujnog opterećenja.

6. LITERATURA

- [1] Technical Report IEC 1597, 1995, "Overhead electrical conductors – Calculation methods for stranded bare conductors", First edition
- [2] Morgan V. T, 1995, „Thermal Behaviours of Electrical Conductors“, Research Studies Press Ltd., Tounton, Somerset, England
- [3] Tasić D, 2002, "Termički aspekti strujne opteretljivosti provodnika nadzemnih elektroenergetskih vodova ", Monografija, Elektronski fakultet Niš
- [4] Tasić D, Rajaković N, 2006, "Strujna opteretljivost nadzemnih vodova u distributivnim mrežama", XXII Savetovanje JUKO CIGRE, R 31.09, Vrnjačka Banja
- [5] Tanasković M, Bojković T, Perić D, 2007, "Distribucija električne energije", Akademska misao, Beograd
- [6] Interni Standardi EDB, 2011, "Planiranje elektrodistributivne mreže, Konceptijske postavke za planiranje elektrodistributivne mreže, S.B1.0.130/02", II izdanje
- [7] Zbirka tehničkih preporuka ED Srbije, 2003, "TP-10b Osnovni tehnički zahtevi za projektovanje i gradnju nadzemnih vodova 10 kV, 20 kV i 35 kV", I izdanje
- [8] End-user development, 2020, https://en.wikipedia.org/wiki/End-user_development, pristupljeno 2020-01-18
- [9] Spreadsheet, 2020, <https://en.wikipedia.org/wiki/Spreadsheet>, pristupljeno 2020-01-18
- [10] Perić D, 2003, "Aplikativni softver u poslovanju i tehnici", Viša elektrotehnička škola, 2003.
- [11] Perić D, Obradović S, 2008, "Projektovanje elektrodistributivnih postrojenja programiranjem u radnim tabelama", Regionalna konferencija CIRED
- [12] 10 best spreadsheet software options to try in 2020, <https://www.jotform.com/blog/best-spreadsheet-software/>, pristupljeno 2020-06-09