

Analitički algoritam za određivanje trajno dozvoljenih opterećenja horizontalnih sabirnica sa pravougaonim poprečnim presekom

Dardan Klimenta, Bojan Perović, Dejan Anđelković i Andreja Todorović
 Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici
 Univerzitet u Prištini
 Kosovska Mitrovica, Srbija
 dklimenta@hotmail.com

Sadržaj—U ovom radu je predložen analitički algoritam za određivanje trajno dozvoljenih opterećenja horizontalno instaliranih sabirnica sa pravougaonim poprečnim presekom. Analitički algoritam je implementiran u programski kod koji uz trajno dozvoljeno opterećenje neke sabirnice izračunava njenu temperaturu i pojedinačne koeficijente razmene toplote za svaku od njenih stranica, kao i njima odgovarajuće snage gubitaka. Empirijske korelacije su korišćene za izračunavanje koeficijenata razmene toplote putem prirodne i prinudne konvekcije između stranica sabirnice sa pravougaonim poprečnim presekom i okolnog vazduha. Takođe, razmatrani su uticaji Sunčevog zračenja i gubitaka toplote putem zračenja sa spoljašnje površine sabirnice. Za nelinearnu stacionarnu termičku analizu, tj. validaciju analitičkog algoritma korišćena je metoda konačnih elemenata (FEM). Svi numerički proračuni bazirani na FEM-u izvršeni su pomoću COMSOL-ovog modula za razmenu toplote.

Ključne reči—empirijske korelacije; FEM; razmena toplote; sabirnica; trajno dozvoljeno opterećenje;

I. UVOD

U razvodnim postrojenjima sabirnice povezuju vodove preko kojih se dovodi električna energija sa vodovima preko kojih se ista odvodi. Sabirnice se izrađuju od neizolovanih punih, šupljih i profilisanih bakarnih ili aluminijumskih provodnika. U razvodnim postrojenjima nazivnog napona do 35 kV koriste se provodnici sa kružnim i pravougaonim poprečnim presekom ili "U" profili, dok se u razvodnim postrojenjima nazivnog napona jednakog ili višeg od 110 kV koriste použeni ili cevasti provodnici. Izbor poprečnog preseka sabirnice vrši se: (i) u odnosu na struju u normalnom pogonu I_{op} – trajno dozvoljeno termičko naprezanje, (ii) s obzirom na porast temperature za vreme tropolnog kratkog spoja – kratkotrajno dozvoljeno termičko preopterećenje i (iii) s obzirom na mehanička naprezanja za vreme tropolnog kratkog spoja.

Trajno dozvoljena struja sabirnice I_{cp} određuje se iz uslova jednakosti između generisane količine toplote u materijalu sabirnice (Joule-ovih gubitaka) i dovedene količine toplote sabirnici (Sunčevog zračenja) sa jedne, i odvedene količine toplote od sabirnice (gubitaka toplote putem konvekcije i zračenja sa spoljašnje površine sabirnice) sa druge strane. Pri izboru poprečnog preseka sabirnice njena trajno dozvoljena

struja I_{cp} mora da bude veća od pogonske struje I_{op} . Prema propisima, bez obzira na vrstu materijala od kojeg je sabirnica izrađena, razlika između tablične trajno dozvoljene temperature sabirnice T_{cpT} (65 ili 70 °C) i tablične temperature okolnog vazduha $T_{\infty T}$ (35 ili 40 °C) iznosi 30 °C.

Takođe, trajno dozvoljenu struju I_{cp} treba razlikovati od nazivne struje sabirnice I_{nom} . Trajno dozvoljena struja I_{cp} se dobija preračunavanjem nazivne struje I_{nom} na stvarne uslove na mestu ugradnje sabirnice, tj. pomoću izraza [1]-[4]: $I_{cp} = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5 \cdot I_{nom}$; gde je: C_1 koeficijent korekcije opterećenja zbog razlike u vrednostima specifičnih električnih provodnosti/otpornosti materijala sabirnice; C_2 koeficijent korekcije opterećenja zbog razlike između trajno dozvoljene temperature sabirnice T_{cp} i njoj odgovarajuće tablične vrednosti T_{cpT} i/ili razlike između srednje dnevne temperature okolnog vazduha T_{∞} i njoj odgovarajuće tablične vrednosti $T_{\infty T}$; C_3 koeficijent korekcije opterećenja zbog međusobnog termičkog uticaja pljoštimice ili vertikalno (duže od 2 m) vođenih provodnika u paketu jedne faze; C_4 koeficijent korekcije opterećenja zbog dopunskog skin (površinskog) efekta u faznim provodnicima postavljenim na mala međuosna rastojanja; C_5 koeficijent korekcije opterećenja zbog uticaja svojstvenih mestu ugradnje sabirnice kao što su nadmorska visina, geografska širina i sl.

U klasičnom postupku izbora poprečnog preseka sabirnice pojavljuju se trajno dozvoljena temperatura sabirnice T_{cp} i tablična trajno dozvoljena temperatura sabirnice T_{cpT} [1]-[4]. Međutim, to odstupa od ustaljenog pravila da u proračunu trajno dozvoljenog opterećenja nekog provodnika figuriše samo jedna, i to tablična vrednost njegove trajno dozvoljene temperature.

Prema tome, u ovom radu je predložen postupak za određivanje trajno dozvoljenog opterećenja sabirnice u kojem figuriše tablična trajno dozvoljena temperatura T_{cpT} i gde se ne pojavljuju koeficijenti korekcije C_1 - C_5 . Trajno dozvoljeno opterećenje neke sabirnice zavisi od oblika i dimenzija poprečnog preseka iste, broja provodnika i načina njihovog vođenja u paketu jedne faze, rastojanja između paketa faznih provodnika, specifične električne otpornosti materijala sabirnice, boje i fizičkih karakteristika spoljašnje površine sabirnice (koeficijenata emisije i apsorpcije toplotnog zračenja),

ambijentnih uslova (količine Sunčevog zračenja, temperature okolnog vazduha, brzine i pravca vetra) i termofizičkih karakteristika vazduha.

Faktori od kojih zavisi trajno dozvoljeno opterećenje sabirnice modelirani su odgovarajućim graničnim uslovima konvekcije (prirodne ili prinudne) i zračenja, kao i izvorima toplote lociranim u materijalu i izvan materijala sabirnice [5], [6]. Za izračunavanje trajno dozvoljenog opterećenja sabirnice, temperature sabirnice i pojedinačnih koeficijenata razmene toplote za svaku od stranica sabirnice, kao i njima odgovarajućih snaga gubitaka, razvijen je i primenjen MATLAB program BUSBAR.m u koji je ugrađen set empirijskih korelacija sličan onome iz [5].

II. REŠAVANA JEDNAČINA

Za stacionarnu razmenu toplote ($\partial T_s/\partial t=0$), temperaturu sabirnice T_s jednaku tabličnoj trajno dozvoljenoj temperaturi T_{cpT} iste ($T_s=T_{cpT}$) i maksimalnu količinu Sunčeve toplote koju u jedinici vremena može da apsorbuje spoljašnja površina dužnog metra sabirnice ($\alpha \cdot S_{pM} \cdot Q_{tsun,s}$) važi:

$$\alpha \cdot S_{pM} \cdot Q_{tsun,s} + Q_{tg}(T_{cpT}) = [2 \cdot h_{cs} \cdot S_S + h_{cT} \cdot S_T + h_{cB} \cdot S_B + h_r(T_{cpT}) \cdot S_{ol}] \cdot (T_{cpT} - T_\infty) \quad (1)$$

gde je: α koeficijent apsorpcije toplotnog zračenja za spoljašnju površinu sabirnice, S_{pM} maksimalna projektovana površina dužnog metra sabirnice u m^2 , $Q_{tsun,s}$ količina Sunčeve toplote koja u jedinici vremena dospeva na spoljašnju površinu sabirnice u $W \cdot m^{-2}$, Q_{tg} snaga kojom se električna energija pretvara u toplotu u dužnom metru sabirnice u W , h_{cs} koeficijent razmene toplote putem prirodne/prinudne konvekcije između bočnih stranica sabirnice i okolnog vazduha u $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, S_S površina jedne bočne stranice sabirnice u m^2 , h_{cT} koeficijent razmene toplote putem prirodne/prinudne konvekcije između gornje stranice sabirnice i okolnog vazduha u $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, S_T površina gornje stranice sabirnice u m^2 , h_{cB} koeficijent razmene toplote putem prirodne/prinudne konvekcije između donje stranice sabirnice i okolnog vazduha u $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, S_B površina donje stranice sabirnice u m^2 , h_r koeficijent razmene toplote ekvivalentan zračenju između spoljašnje površine sabirnice i okolnog vazduha u $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, a S_{ol} spoljašnja površina dužnog metra sabirnice u m^2 .

Za centralno-evropske zemlje, trajno dozvoljena opterećenja sabirnica, koje su predviđene za ugradnju u zidana postrojenja, određuju se pod sledećim pretpostavkama [1]-[5]: (i) da okolni vazduh miruje; (ii) da su površine neobojenih provodnika slabo-oksidisane i da koeficijent emisije toplotnog zračenja za njih iznosi $\epsilon=0.40$ – ako su izrađene od bakra i $\epsilon=0.35$ – ako su izrađene od aluminijuma; ili (iii) da su površine provodnika obojene i da koeficijent emisije toplotnog zračenja za njih približno iznosi $\epsilon=0.90$.

Takođe, za centralno-evropske zemlje, trajno dozvoljena opterećenja sabirnica, koje su predviđene za ugradnju u postrojenja na otvorenom, određuju se pod sledećim pretpostavkama [1]-[5]: (i) da se okolni vazduh slabo kreće, tj. da brzina vetra iznosi $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (ii) da količina Sunčeve toplote koja u jedinici vremena dospeva na spoljašnju površinu

provodnika iznosi $Q_{tsun,s}=1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; (iii) da su površine neobojenih provodnika normalno-oksidisane, da koeficijent emisije toplotnog zračenja za njih iznosi $\epsilon=0.60$ – ako su izrađene od bakra i $\epsilon=0.50$ – ako su izrađene od aluminijuma i da koeficijent apsorpcije toplotnog zračenja za njih iznosi $\alpha=0.45$ – ako su izrađene od bakra i $\alpha=0.35$ – ako su izrađene od aluminijuma; ili (iv) da su površine provodnika obojene, da koeficijent emisije toplotnog zračenja za njih približno iznosi $\epsilon=0.90$ i da koeficijent apsorpcije toplotnog zračenja za njih iznosi $\alpha=0.70$.

III. ANALITIČKI ALGORITAM

Analitički algoritam, odnosno program BUSBAR.m, bazira se na uslovu jednakosti između generisane količine toplote u sabirnici i dovedene količine toplote sabirnici sa jedne, i odvedene količine toplote od sabirnice sa druge strane. Uz početak, zaglavlje i kraj, program BUSBAR.m se sastoji od sledećih blokova:

Ulaz: (i) učitavaju se ulazne datoteke Temperature.m, Density.m, Capacity.m, Viscosity.m, Conductivity.m i Prandtl.m od kojih svaka ima po 85 diskretnih vrednosti preuzetih iz [6], tj. učitavaju se vrednosti temperature, gustine, specifične toplote, dinamičke viskoznosti, specifične toplotne provodnosti i Prandtl-ovog broja za vazduh; (ii) vrši se izbor vrste konvekcije uz spoljašnju površinu sabirnice: 1 – za prirodnu konvekciju ili 2 – za prinudnu konvekciju; (iii) ako se izabere prirodna konvekcija, onda treba izabrati: 1 – za slučaj kada je temperatura sabirnice T_s viša od temperature vazduha T_∞ ili 2 – za slučaj kada je temperatura sabirnice T_s niža od temperature vazduha T_∞ ; (iv) ako se izabere prinudna konvekcija, onda treba izabrati: 1 – za slučaj kada je pravac vetra normalan na podužnu osu sabirnice ili 2 – za slučaj kada je pravac vetra paralelan podužnoj osi sabirnice; (v) unosi se vrednost za širinu sabirnice W_b u m; (vi) unosi se vrednost za visinu sabirnice H_b u m; (vii) unosi se nazivna vrednost za struju sabirnice $I=I_{nom}$ u A; (viii) unosi se vrednost za tabličnu trajno dozvoljenu temperaturu sabirnice T_{cpT} u K; (ix) unosi se vrednost za specifičnu električnu otpornost materijala sabirnice na temperaturi od 293.15 K, tj. za ρ_{e20} u $\Omega \cdot m$; (x) unosi se vrednost za temperaturni koeficijent specifične električne otpornosti materijala sabirnice α_L u K^{-1} ; (xi) unosi se vrednost za koeficijent dopunskih gubitaka usled površinskog (skin) efekta k_s ; (xii) unosi se vrednost za temperaturu okolnog vazduha T_∞ u K; (xiii) unosi se vrednost za brzinu vetra v_∞ u $m \cdot s^{-1}$; (xiv) unosi se vrednost koeficijenta razmene toplote putem prirodne/prinudne konvekcije tipična turbulentnom strujanju gasova h'_c u $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$; (xv) unosi se vrednost za koeficijent emisije toplotnog zračenja za spoljašnju površinu sabirnice ϵ ; (xvi) unosi se vrednost za koeficijent apsorpcije toplotnog zračenja za spoljašnju površinu sabirnice α ; (xvii) unosi se vrednost za količinu Sunčeve toplote koja u jedinici vremena dospeva na spoljašnju površinu sabirnice $Q_{tsun,s}$ u $W \cdot m^{-2}$.

1. blok naredbi: (i) izračunava se površina poprečnog preseka sabirnice S kao: $S=W_b \cdot H_b$; (ii) izračunava se zapremina dužnog metra sabirnice V kao: $V=S \cdot l=S$; (iii) izračunava se površina jedne bočne stranice sabirnice S_S kao: $S_S=H_b \cdot l=H_b$;

(iv) izračunava se površina gornje stranice sabirnice S_T kao: $S_T=W_b \cdot l=W_b$; (v) izračunava se površina donje stranice sabirnice S_B kao: $S_B=W_b \cdot l=W_b$; (vi) izračunava se spoljašnja površina dužnog metra sabirnice S_{o1} kao: $S_{o1}=2 \cdot S_S+S_T+S_B$; (vii) izračunava se dužina dijagonale poprečnog preseka sabirnice D_H kao: $D_H=(W_b^2+H_b^2)^{1/2}$; (viii) izračunava se maksimalna projektovana površina dužnog metra sabirnice S_{pM} kao: $S_{pM}=D_H \cdot l$; (ix) izračunava se specifična električna otpornost kojom se materijal sabirnice suprostavlja proticanju jednosmerne struje na temperaturi T_{cpT} kao: $\rho_{dc}(T_{cpT})=\rho_{e20} \cdot [1+\alpha_L \cdot (T_{cpT}-293.15)]$; (x) izračunava se specifična električna otpornost kojom se materijal sabirnice suprostavlja proticanju naizmenične struje na temperaturi T_{cpT} kao: $\rho_{ac}(T_{cpT})=k_s \cdot \rho_{dc}(T_{cpT})$; (xi) izračunava se maksimalna količina Sunčeve toplote koju u jedinici vremena može da apsorbuje spoljašnja površina sabirnice Q_{tsunM} , kao: $Q_{tsunM}=\alpha \cdot S_{pM} \cdot Q_{tsun,s}$.

2. blok naredbi: otvara se spoljašnja iteraciona petlja iz koje se ne izlazi sve dok apsolutna vrednost razlike (T'_s-T_{cpT}) ne postane veća od zadate relativne tačnosti $E_1=0.1$.

3. blok naredbi: (i) izračunava se zapreminska snaga izvora toplote lociranih u materijalu sabirnice $Q_{ig,v}$ kao: $Q_{ig,v}=\rho_{ac}(T_{cpT}) \cdot (I/S)^2$; (ii) izračunava se snaga kojom se električna energija pretvara u toplotu u dužnom metru sabirnice Q_{ig} kao: $Q_{ig}=Q_{ig,v} \cdot V$; (iii) tekućem indeksu iteracije J dodeljuje se vrednost 0; (iv) prvoj promenljivoj rezervisanoj za koeficijent konvekcije između neke od bočnih stranica sabirnice i vazduha h'_{cs} dodeljuje se vrednost h'_c ; (v) prvoj promenljivoj rezervisanoj za koeficijent konvekcije između gornje stranice sabirnice i vazduha h'_{cT} dodeljuje se vrednost h'_c ; (vi) prvoj promenljivoj rezervisanoj za koeficijent konvekcije između donje stranice sabirnice i vazduha h'_{cB} dodeljuje se vrednost h'_c ; (vii) prvoj promenljivoj rezervisanoj za koeficijent razmene toplote ekvivalentan zračenju između spoljašnje površine sabirnice i vazduha h'_r dodeljuje se vrednost h'_c ; (viii) na osnovu izračunatih vrednosti za Q_{ig} , Q_{tsunM} , S_S , S_T , S_B i S_{o1} i unešenih vrednosti za h'_c i T_∞ procenjuje se vrednost temperature sabirnice kao: $T'_s=(Q_{ig}+Q_{tsunM})/[h'_c \cdot (2 \cdot S_S+S_T+S_B+S_{o1})]+T_\infty$; (ix) promenljivoj rezervisanoj za temperaturu sabirnice T'_s dodeljuje se 0.

4. blok naredbi: otvara se unutrašnja iteraciona petlja iz koje se ne izlazi sve dok apsolutna vrednost razlike (T'_s-T_s) ne postane veća od zadate relativne tačnosti $E_2=0.001$.

5. blok naredbi: ako je vrednost promenljive T'_s različita od 0, onda se: (i) promenljivoj h'_{cs} dodeljuje vrednost druge promenljive rezervisane za isti koeficijent konvekcije h''_{cs} ; (ii) promenljivoj h'_{cT} dodeljuje vrednost druge promenljive rezervisane za isti koeficijent konvekcije h''_{cT} ; (iii) promenljivoj h'_{cB} dodeljuje vrednost druge promenljive rezervisane za isti koeficijent konvekcije h''_{cB} ; (iv) promenljivoj h'_r dodeljuje vrednost druge promenljive rezervisane za isti koeficijent razmene toplote ekvivalentan zračenju h''_r ; (v) promenljivoj T'_s dodeljuje vrednost promenljive T_s .

6. blok naredbi: (i) izračunava se srednja temperatura vazduha u konvektivnom graničnom sloju uz površinu sabirnice T_{film} kao [6]: $T_{film}=(T'_s+T_\infty)/2$; (ii) izračunava se temperaturni koeficijent zapreminskog širenja vazduha β kao

[6]: $\beta=1/T_{film}$; (iii) poziva se potprogram CSCURVE koji pomoću kubni splajn interpolacije i nizova diskretnih vrednosti iz para ulaznih datoteka: Temperature.m-Density.m, Temperature.m-Capacity.m, Temperature.m-Viscosity.m, Temperature.m-Conductivity.m i Temperature.m-Prandtl.m aproksimira temperaturnu zavisnost gustine ρ , specifične toplote c_t , dinamičke viskoznosti μ , specifične toplotne provodnosti k_t i Prandtl-ovog broja Pr za vazduh, respektivno, i koji promenljivoj: ρ , c_t , μ , k_t i Pr dodeljuje vrednost gustine, specifične toplote, dinamičke viskoznosti, specifične toplotne provodnosti i Prandtl-ovog broja za vazduh na temperaturi T_{film} , respektivno; (iv) izračunava se kinematička viskoznost vazduha ν kao: $\nu=\mu/\rho$.

7. blok naredbi: ako se razmatra problem razmene toplote putem prirodne konvekcije, onda se ima: (i) za bočne stranice sabirnice [7]:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 9.81 \cdot \beta \cdot (T'_s - T_\infty) \cdot H_b^3 \cdot Pr / \nu^2, \quad (2)$$

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 \cdot Ra^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad \text{za } Ra \leq 10^2, \quad (3)$$

$$Nu = 0.68 + \frac{0.67 \cdot Ra^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad \text{za } Ra > 10^2, \quad (4)$$

$$h''_{cs} = (h'_{cs} + Nu \cdot k_t / H_b) / 2, \quad (5)$$

gde su Ra , Gr i Nu odgovarajući Rayleigh-jev, Grashof-ov i Nusselt-ov broj, respektivno; (ii) za gornju i donju stranicu sabirnice [6], [8], [9]: Ra se dobija pomoću jednačine (2) posle zamene H_b sa W_b ,

$$Nu = 0.54 \cdot Ra^{1/4} \quad \text{za } Ra \leq 8 \cdot 10^6, \quad T_s > T_\infty \text{ i } T_s < T_\infty, \quad (6)$$

$$Nu = 0.15 \cdot Ra^{1/3} \quad \text{za } Ra > 8 \cdot 10^6, \quad T_s > T_\infty \text{ i } T_s < T_\infty, \quad (7)$$

$$Nu = 0.27 \cdot Ra^{1/4} \quad \text{za } T_s < T_\infty \text{ i } T_s > T_\infty, \quad (8)$$

$$h''_{cT} = \frac{h'_{cT} + Nu \cdot k_t}{2 \cdot W_b} \quad \text{i} \quad h''_{cB} = \frac{h'_{cB} + Nu \cdot k_t}{2 \cdot W_b} \quad (9)$$

gde su h'_{cT} i h'_{cB} odgovarajući koeficijenti konvekcije i gde se u jednačinama (6), (7) i (8) prvi uslov za temperaturu odnosi na gornju, a drugi na donju stranicu sabirnice.

8. blok naredbi: ako se razmatra problem razmene toplote putem prinudne konvekcije, onda se ima: (i) za bočne stranice sabirnice [6], [8], [10], [11]:

$$Re = v_\infty \cdot H_b / \nu, \quad (10)$$

$$Nu = 0.205 \cdot Re^{0.731} \cdot Pr^{1/3} \quad \text{za vetar } \perp \text{ na sabirnicu,} \quad (11)$$

$$Nu = 0.664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad \text{za vetar } \parallel \text{ sabirnici,} \quad (12)$$

$$h''_{cs} = (h'_{cs} + Nu \cdot k_t / H_b) / 2, \quad (13)$$

gde je Re odgovarajući Reynolds-ov broj; (ii) za gornju i donju stranicu sabirnice i oba pravca vetra u odnosu na podužnu osu sabirnice [6], [7], [11]:

$$Re = v_{\infty} \cdot W_b / \nu, \quad (14)$$

$$Nu = 0.664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \text{ za } Re \leq 5 \cdot 10^5, \quad (15)$$

$$Nu = (0.037 \cdot Re^{4/5} - 871) \cdot Pr^{1/3} \text{ za } Re > 5 \cdot 10^5, \quad (16)$$

$$h''_{cT} = \frac{h'_{cT}}{2} + \frac{Nu \cdot k_l}{2 \cdot W_b} \text{ i } h''_{cB} = \frac{h'_{cB}}{2} + \frac{Nu \cdot k_l}{2 \cdot W_b} \quad (17)$$

gde su h'_{cT} i h'_{cB} odgovarajući koeficijenti konvekcije.

9. blok naredbi: (i) izračunava se koeficijent h''_r kao:

$$h''_r = [h'_r + \sigma_{SB} \cdot \epsilon \cdot (T_s^2 + T_{\infty}^2) \cdot (T'_s + T_{\infty})] / 2, \quad (18)$$

gde je $\sigma_{SB} = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ Stefan-Boltzmann-ova konstanta; **(ii)** na osnovu izračunatih vrednosti za Q_{tg} , Q_{tsunM} , S_s , S_T , S_B , S_{o1} , h''_{cS} , h''_{cT} , h''_{cB} i h''_r i unešene vrednosti za T_{∞} izračunava se vrednost temperature sabirnice T''_s kao: $T''_s = (Q_{tg} + Q_{tsunM}) / (2 \cdot h''_{cS} \cdot S_s + h''_{cT} \cdot S_T + h''_{cB} \cdot S_B + h''_r \cdot S_{o1}) + T_{\infty}$; **(iii)** ako je apsolutna vrednost razlike $(T'_s - T''_s)$ veća od zadate relativne tačnosti $E_2 = 0.001$, onda se zbog proračuna u sledećoj iteraciji promenljivoj T_s dodeljuje izračunata vrednost T''_s ; **(iv)** tekući indeks iteracije J povećava se za 1; **(v)** ako je $J > 100$, onda se prinudno izlazi iz unutrašnje iteracione petlje i štampa poruka "Postoji problem sa uslovom za izlazak iz petlje ili se radi o besmislenom unosu ulaznih podataka!".

10. blok naredbi: (i) ako je apsolutna vrednost razlike $(T'_s - T_s)$ postala veća od zadate relativne tačnosti $E_2 = 0.001$, onda se unutrašnja iteraciona petlja zatvara a program nastavlja svoj tok; u suprotnom se tok programa vraća na 4. blok naredbi, tj. na početak unutrašnje iteracione petlje; **(ii)** ako je apsolutna vrednost razlike $(T''_s - T_{cpT})$ postala veća od zadate relativne tačnosti $E_1 = 0.1$ i ako je $T''_s \leq T_{cpT}$, onda se vrednost struje sabirnice $I = I_{nom}$ povećava za 1 A, tj. $I = I_{nom} + 1$; **(iii)** ako je apsolutna vrednost razlike $(T''_s - T_{cpT})$ postala veća od zadate relativne tačnosti $E_1 = 0.1$ i ako je $T''_s > T_{cpT}$, onda se vrednost struje sabirnice $I = I_{nom}$ umanjuje za 1 A, tj. $I = I_{nom} - 1$; **(iv)** ako je apsolutna vrednost razlike $(T''_s - T_{cpT})$ postala veća od zadate relativne tačnosti $E_1 = 0.1$, onda se spoljašnja iteraciona petlja zatvara a program nastavlja svoj tok; u suprotnom se tok programa vraća na 2. blok naredbi, tj. na početak spoljašnje iteracione petlje.

11. blok naredbi: (i) promenljivim T_s , h_{cS} , h_{cT} , h_{cB} , h_r i I_{cp} dodeljuju se konačno izračunate vrednosti T''_s , h''_{cS} , h''_{cT} , h''_{cB} , h''_r i I , respektivno; **(ii)** izračunavaju se snage kojim se toplota razmenjuje prirodnom ili prinudnom konvekcijom između svake od stranica sabirnice i okolnog vazduha, tj. $Q_{th,sS} = h_{cS} \cdot (T_s - T_{\infty})$ – za dve bočne stranice, $Q_{th,sT} = h_{cT} \cdot (T_s - T_{\infty})$ – za gornju stranicu i $Q_{th,sB} = h_{cB} \cdot (T_s - T_{\infty})$ – za donju stranicu; **(iii)** izračunava se snaga kojom se toplota razmenjuje zračenjem između spoljašnje površine sabirnice i okolnog vazduha, tj. $Q_{tr,s} = h_r \cdot (T_s - T_{\infty})$.

Izlaz: prikazuju se vrednosti za: **(i)** zapreminsku snagu izvora toplote lociranih u materijalu sabirnice $Q_{lg,v}$ u $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$; **(ii)** snagu kojom se električna energija pretvara u toplotu u dužnom metru sabirnice Q_{tg} u W ; **(iii)** maksimalnu količinu Sunčeve toplote koju u jedinici vremena može da apsorbuje spoljašnja površina sabirnice po dužnom metru Q_{tsunM} u $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ i W ; **(iv)**

temperaturu sabirnice T_s u K ; **(v)** koeficijente razmene toplote putem prirodne ili prinudne konvekcije između stranica sabirnice i okolnog vazduha h_{cS} , h_{cT} i h_{cB} u $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ i njima odgovarajuće snage $Q_{th,sS}$, $Q_{th,sT}$ i $Q_{th,sB}$ u $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ i W , respektivno; **(vi)** koeficijent razmene toplote ekvivalentan zračenju između spoljašnje površine sabirnice i okolnog vazduha h_r u $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ i njemu odgovarajuću snagu $Q_{tr,s}$ u $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ i W ; i **(vii)** trajno dozvoljenu struju I_{cp} u A .

IV. NUMERIČKA VALIDACIJA RAZVIJENOG ALGORITMA

Numerička validacija analitičkog algoritma za slučajeve prirodne i prinudne konvekcije izvršena je u COMSOL-u primenom termičke FEM analize na sabirnice sa pravougaonim poprečnim presekom iz [5]. U tabeli I su dati rezultati simulacija izvršenih za slučaj prirodne konvekcije, dok su u tabeli II dati rezultati simulacija izvršenih za slučaj prinudne konvekcije.

Dimenzije (W_b i H_b), struje sabirnica (nazivne I_{nom} ili pretpostavljene I_{ass}) i koeficijenti dopunskih gubitaka usled površinskog efekta (k_s) za razmatrane sabirnice dati su u tabelama I i II. Specifična električna otpornost legure aluminijuma 6101-T61 na $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i njoj odgovarajući temperaturni koeficijent respektivno iznose $\rho_{e20} = 2.998 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ i $\alpha_L = 0.00383 \text{ K}^{-1}$ [5]. Koeficijenti razmene toplote putem prirodne i prinudne konvekcije tipični turbulentnom strujanju gasova iznose $h'_c = 12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ i $h'_c = 300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, respektivno [6]. Prema [5], količina Sunčeve toplote koja u jedinici vremena dospeva na spoljašnju površinu sabirnice je $Q_{tsun,s} = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Za termičku FEM analizu sabirnica korišćena je i specifična toplotna provodnost materijala sabirnice k_t , koja za leguru aluminijuma 6101-T61 iznosi $k_t = 218.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [12].

Za slučaj instalacije pravougaonih sabirnica od legure aluminijuma 6101-T61 u zidanim postrojenjima, validacija analitičkog algoritma je izvršena saglasno referenci [5], tj. za sledeće uslove na mestu ugradnje: instalaciju horizontalno-nasatice i horizontalno-pljoštimice, tabličnu trajno dozvoljenu temperaturu sabirnice $T_{cpT} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$, tabličnu temperaturu okolnog vazduha $T_{\infty T} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$, brzinu vetra $v_{\infty} = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (prirodna konvekcija), koeficijent emisije toplotnog zračenja za spoljašnju površinu sabirnice $\epsilon = 0.35$, bez uticaja Sunčevog zračenja ($\alpha = 0$) i učestanost naizmenične struje $f = 60 \text{ Hz}$.

Za slučaj instalacije pravougaonih sabirnica od legure aluminijuma 6101-T61 u postrojenjima na otvorenom, validacija analitičkog algoritma je izvršena za sledeće uslove na mestu ugradnje: instalaciju horizontalno-nasatice i horizontalno-pljoštimice, tabličnu trajno dozvoljenu temperaturu sabirnice $T_{cpT} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$, tabličnu temperaturu okolnog vazduha $T_{\infty T} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$, brzinu vetra $v_{\infty} = 0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (prinudna konvekcija), koeficijent emisije toplotnog zračenja za spoljašnju površinu sabirnice $\epsilon = 0.5$, koeficijent apsorpcije toplotnog zračenja za spoljašnju površinu sabirnice $\alpha = 0.35$, količinu Sunčeve toplote koja u jedinici vremena dospeva na spoljašnju površinu sabirnice $Q_{tsun,s} = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ i učestanost naizmenične struje $f = 60 \text{ Hz}$.

TABELA I. NAZIVNA I TRAJNO DOZVOLJENA OPTEREĆENJA PRAVOUGAONIH SABIRNICA ZA SLUČAJ INSTALACIJE U ZIDANIM POSTROJENJIMA.^a

W _b	H _b	60 Hz k, na 70 °C	I _{nom} iz priručnika	I _{cp} i T _{cp}		
				Ref. [5]	BUSBAR	COMSOL
m / in	m / in	-	A	A	A / °C	A / °C
Sabirnice instalirane horizontalno-nasatice						
0.00635 / 0.25	0.0508 / 2	1.014	545	535	545 / 69.91	545 / 69.92
0.00635 / 0.25	0.1524 / 6	1.092	1381	1374	1371 / 70.09	1371 / 70.11
0.009525 / 0.375	0.1016 / 4	1.100	1191	1178	1186 / 70.06	1186 / 70.08
0.009525 / 0.375	0.2032 / 8	1.210	2098	2108	2081 / 70.07	2081 / 70.11
0.0127 / 0.5	0.1016 / 4	1.140	1369	1356	1364 / 70.06	1364 / 70.08
0.0127 / 0.5	0.2032 / 8	1.259	2393	2407	2376 / 70.09	2376 / 70.13
Sabirnice instalirane horizontalno-pljoštimice						
0.0508 / 2	0.00635 / 0.25	1.014	530	534	519 / 70.01	519 / 70.03
0.1524 / 6	0.00635 / 0.25	1.092	1270	1333	1287 / 69.91	1287 / 69.95
0.1016 / 4	0.009525 / 0.375	1.100	1130	1157	1125 / 70.07	1125 / 70.09
0.2032 / 8	0.009525 / 0.375	1.210	1820	2025	1993 / 69.92	1993 / 69.96
0.1016 / 4	0.0127 / 0.5	1.140	1300	1332	1299 / 70.07	1299 / 70.09
0.2032 / 8	0.0127 / 0.5	1.259	2050	2313	2279 / 69.90	2279 / 69.94

a. Opterećenja se odnose na sabirnice od legure aluminijuma 6101-T61 i generisana su za sledeće parametre: T_{air}=40 °C, T_{cp}=70 °C, v_w=0 m·s⁻¹, ε=0.35, α=0 i f=60 Hz.

TABELA II. PRETPOSTAVLJENA I TRAJNO DOZVOLJENA OPTEREĆENJA PRAVOUGAONIH SABIRNICA ZA SLUČAJ INSTALACIJE U POSTROJENJIMA NA OTVORENOM.^a

W _b	H _b	60 Hz k, na 70 °C	I _{ass}	I _{cp} i T _{cp}			
				Pravac vetra ⊥ na osu sabirnice		Pravac vetra osi sabirnice	
				BUSBAR	COMSOL	BUSBAR	COMSOL
m / in	m / in	-	A	A / °C	A / °C	A / °C	A / °C
Sabirnice instalirane horizontalno-nasatice							
0.00635 / 0.25	0.0508 / 2	1.014	545	845 / 69.93	845 / 69.97	675 / 69.96	675 / 69.99
0.00635 / 0.25	0.1524 / 6	1.092	1381	1962 / 69.92	1962 / 69.99	1323 / 70.07	1323 / 70.15
0.009525 / 0.375	0.1016 / 4	1.100	1191	1752 / 69.92	1752 / 69.96	1278 / 69.90	1278 / 69.95
0.009525 / 0.375	0.2032 / 8	1.210	2098	2916 / 69.90	2916 / 69.98	1894 / 70.08	1894 / 70.17
0.0127 / 0.5	0.1016 / 4	1.140	1369	2013 / 69.89	2013 / 69.94	1486 / 69.89	1486 / 69.94
0.0127 / 0.5	0.2032 / 8	1.259	2393	3331 / 69.90	3331 / 69.97	2190 / 70.09	2190 / 70.16
Sabirnice instalirane horizontalno-pljoštimice							
0.0508 / 2	0.00635 / 0.25	1.014	530	680 / 69.92	680 / 69.95	675 / 69.96	675 / 69.99
0.1524 / 6	0.00635 / 0.25	1.092	1270	1324 / 69.90	1324 / 69.98	1316 / 69.90	1316 / 69.97
0.1016 / 4	0.009525 / 0.375	1.100	1130	1306 / 69.91	1306 / 69.97	1278 / 69.90	1278 / 69.95
0.2032 / 8	0.009525 / 0.375	1.210	1820	1917 / 69.91	1917 / 70.01	1883 / 69.91	1883 / 69.99
0.1016 / 4	0.0127 / 0.5	1.140	1300	1538 / 69.90	1538 / 69.96	1486 / 69.89	1486 / 69.94
0.2032 / 8	0.0127 / 0.5	1.259	2050	2241 / 69.90	2241 / 70.00	2177 / 69.90	2177 / 69.98

a. Opterećenja se odnose na sabirnice od legure aluminijuma 6101-T61 i generisana su za sledeće parametre: T_{air}=40 °C, T_{cp}=70 °C, v_w=0.6 m·s⁻¹, ε=0.5, α=0.35, Q_{sun,s}=1000 W·m⁻² i f=60 Hz.

Vrednosti trajno dozvoljene temperature sabirnica dobijene za slučajeve prirodne i prinudne konvekcije pomoću programa

BUSBAR.m i COMSOL-a razlikuju se od temperature T_{cp}=70 °C za približno ±0.2 °C. Ove razlike su zanemarljive a posledica su zadate relativne tačnosti E₁=0.1 i generisanja samo celobrojnih vrednosti za trajno dozvoljenu struju I_{cp}.

Treba naglasiti da COMSOL-ov modul za razmenu toplote kao ulazne podatke koristi deo izlaznih podataka generisanih programom BUSBAR.m. Na primer, u COMSOL-u se struja sabirnice ne može direktno uneti, već se njen uticaj obuhvata preko zapreminske snage izvora toplote lociranih u materijalu sabirnice koja se dobija programom BUSBAR.m. Takođe, COMSOL kao ulazne podatke koristi i koeficijente konvekcije generisane pomoću programa BUSBAR.m.

V. PRIMENA RAZVIJENOG ALGORITMA

Analički algoritam, odnosno program BUSBAR.m, koristi se jednostavno i brzo generiše trajno dozvoljeno opterećenje sabirnice, kao i ostale parametre koji su potrebni za njenu termičku FEM analizu u COMSOL-u. Dati algoritam/program se primenjuje lako kada su koeficijenti dopunskih gubitaka usled površinskog efekta za razmatrane sabirnice poznati i kada su ambijentni uslovi na mestu ugradnje istih standardizovani.

TABELA III. NAZIVNA I TRAJNO DOZVOLJENA OPTEREĆENJA PRAVOUGAONIH ALUMINIJUMSKIH SABIRNICA ZA SLUČAJ INSTALACIJE U ZIDANIM POSTROJENJIMA.

W _b ^c ili H _b ^d	H _b ^c ili W _b ^d	50 Hz k, na 65 °C	Obojene sabirnice ^a		Neobojene sabirnice ^b	
			I _{nom} ^c / I _{nom} ^d	I _{cp} ^c / I _{cp} ^d	I _{nom} ^c / I _{nom} ^d	I _{cp} ^c / I _{cp} ^d
m	m	-	A/A	A/A	A/A	A/A
0.012	0.005	1.000	160/144	173/176	139/118	149/153
0.012	0.010	1.000	257/231	275/275	224/190	236/237
0.020	0.005	1.000	254/229	259/266	214/182	219/228
0.020	0.010	1.005	393/354	399/404	331/281	338/345
0.030	0.005	1.000	356/320	362/373	295/251	302/316
0.030	0.010	1.010	536/482	545/557	445/378	457/470
0.040	0.005	1.005	456/410	461/477	376/320	381/401
0.040	0.010	1.017	677/609	686/703	557/473	569/590
0.050	0.005	1.006	556/500	559/580	455/387	459/484
0.050	0.010	1.025	815/734	823/846	667/567	677/705
0.060	0.005	1.010	655/590	656/680	533/453	534/565
0.060	0.010	1.033	951/856	957/985	774/658	782/817
0.080	0.005	1.017	851/766	847/877	688/585	683/722
0.080	0.010	1.050	1220/1098	1220/1256	983/836	984/1033
0.100	0.005	1.025	1050/945	1033/1070	846/719	826/874
0.100	0.010	1.083	1480/1332	1464/1508	1190/1012	1174/1232
0.100	0.015	1.150	1800/1620	1785/1831	1450/1233	1435/1495
0.120	0.010	1.113	1730/1557	1699/1752	1390/1182	1354/1423
0.120	0.015	1.188	2090/1881	2060/2116	1680/1428	1645/1718
0.160	0.010	1.150	2220/1998	2180/2237	1780/1513	1724/1801
0.160	0.015	1.238	2670/2403	2619/2680	2130/1811	2075/2158
0.200	0.010	1.188	2710/2439	2647/2700	2160/1836	2085/2158
0.200	0.015	1.290	3230/2907	3157/3213	2580/2193	2491/2569

a. Opterećenja se odnose na sabirnice od aluminijuma ENAW-1350A i generisana su za sledeće parametre: T_{air}=35 °C, T_{cp}=65 °C, v_w=0 m·s⁻¹, ε=0.9, α=0, ρ₂₀=2.86·10⁻⁸ Ω·m, α₁=0.004 K⁻¹ i f=50 Hz.

b. Opterećenja se odnose na sabirnice od aluminijuma ENAW-1350A i generisana su za sledeće parametre: T_{air}=35 °C, T_{cp}=65 °C, v_w=0 m·s⁻¹, ε=0.35, α=0, ρ₂₀=2.86·10⁻⁸ Ω·m, α₁=0.004 K⁻¹ i f=50 Hz.

c. Za sabirnice instalirane horizontalno-nasatice.

d. Za sabirnice instalirane horizontalno-pljoštimice.

Pošto se provodnici sa pravougaonim poprečnim presekom koriste isključivo u zidanim postrojenjima nazivnog napona do 35 kV, ovde se neće razmatrati slučaj instalacije istih u

razvodnim postrojenjima na otvorenom. Trajno dozvoljena opterećenja aluminijumskih provodnika izračunata su pod prethodno datim pretpostavkama za centralno-evropske zemlje. Trajno dozvoljena opterećenja pravougaonih aluminijumskih sabirnice za slučaj instalacije u zidanim postrojenjima data su u tabeli III.

VI. ZAKLJUČAK

Razvijen je računarski program koji može da izračuna trajno dozvoljeno opterećenje neke horizontalno instalirane sabirnice sa pravougaonim poprečnim presekom, njenu temperaturu i ostale parametre koji se dalje mogu koristiti za njenu termičku FEM analizu u softverskim paketima kao što su COMSOL i ANSYS. Program BUSBAR.m bazira na zakonu o održanju energije i može izračunati trajno dozvoljeno opterećenje sabirnice za bilo koji materijal sabirnice i bilo koje ambijentne uslove. Uticaji vetra i Sunčevog zračenja su razmatrani samo prilikom validacije analitičkog algoritma, a razlog za to je činjenica da se u praksi sabirnice sa pravougaonim poprečnim presekom koriste isključivo u zidanim postrojenjima. Prema tome, u ovom radu su prevashodno razmatrani procesi razmene toplote putem prirodne konvekcije i zračenja između spoljašnje površine sabirnice i okolnog vazduha, kao i generisanje toplote u materijalu sabirnice. Takođe, program BUSBAR.m pomoću kubni splajn interpolacije formira temperaturne zavisnosti termofizičkih karakteristika vazduha i automatizuje postupak odabira vrednosti za njih. Sve ove opcije čine razvijeni program izuzetno korisnim.

U poređenju sa vrednostima koje su dobili R. T. Coneybeer, W. Z. Black i R. A. Bush [5], pokazano je da se opterećenja generisana programom BUSBAR.m bolje slažu sa njima odgovarajućim tabličnim vrednostima. Prilikom validacije analitičkog algoritma dobijeno je da razlike između generisanih i tabličnih opterećenja iznose između 0 i $\pm 11.17\%$. Slična odstupanja su dobijena i u tački V, a najveća su bila za pljoštimice instalirane provodnike. Sve to navodi na zaključak da se u praksi već godinama koriste tabele sa termički nekorektnim opterećenjima i da ih treba korigovati.

Predloženi postupak proračuna trajno dozvoljenih opterećenja sabirnice isključuje grube aproksimacije, naučno je zasnovan, vrlo je jednostavan i daje tačnije rezultate u odnosu na tradicionalni koji se bazira na korišćenju tabela sa korekcionim faktorima opterećenja. Takođe, otvara se mogućnost da se i za druge tipove sabirnice razviju i primene analitički algoritmi i programi zasnovani na empirijskim korelacijama.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Vladi Republike Srbije za finansiranje ovog rada u okviru projekta TR 33046.

LITERATURA

- [1] "Stromschienen aus Aluminium; Bemessung für Dauerstrom" (in English: "Aluminium bus bars; design for continuous current"), ÖNORM DIN 43670: 1975-12.
- [2] "Stromschienen aus Aluminium; Bemessung für Dauerstrom" (in English: "Aluminium bus bars; design for continuous current"), ÖNORM DIN 43670: 1978-05-01.
- [3] "Stromschienen aus Kupfer; Bemessung für Dauerstrom" (in English: "Copper bus bars; design for continuous current"), ÖNORM DIN 43671: 1975-12.
- [4] "Stromschienen aus Kupfer; Bemessung für Dauerstrom" (in English: "Copper bus bars; design for continuous current"), ÖNORM DIN 43671: 1978-05-01.
- [5] R. T. Coneybeer, W. Z. Black, R. A. Bush, "Steady-state and transient ampacity of bus bar", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, Issue 4, pp. 1822-1829, 1994.
- [6] D. Klimenta, "Termički procesi u elektroenergetici – opšti deo", FTN u K. Mitrovici, K. Mitrovica, 2012. godine.
- [7] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine, "Fundamentals of heat and mass transfer", 6th Edition, John Wiley & Sons Inc., New York, 2007.
- [8] V. S. Arpaci, A. Selamet, S. H. Kao, "Introduction to heat transfer", Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 2000.
- [9] J. P. Holman, "Heat transfer", 8th Edition, McGraw-Hill International Editions, Mechanical Engineering Series, Singapore, 1999.
- [10] F. Kreith, R. M. Manglik, M. S. Bohn, "Principles of heat transfer", 7th Edition, Cengage Learning, USA, 2011.
- [11] M. M. Yovanovich, P. Teertstra, "Laminar forced convection modeling of isothermal rectangular plates", Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 15, Issue 2, pp. 205-211, April-June 2001.
- [12] "Aluminum electrical conductor handbook – Chapter 13: Bus conductor design and application", Third Edition, Aluminum Association Inc., Washington D.C., USA, 1989.

ABSTRACT

An analytical algorithm to determine the continuously permissible loads of horizontally installed bus bars with a rectangular cross-section is proposed in this paper. The analytical algorithm has been implemented in a computer program code that along with the continuously permissible load can compute the bus bar temperature and the individual heat transfer coefficient for each side of the bus bar, as well as their corresponding power losses. Natural and forced convection correlations for rectangular bus bars are applied. The effects of the solar radiation and radiative heat losses from the bus surface are taken into consideration as well. Finite element method (FEM) has been used for the non-linear steady-state thermal analysis, that is, for validation of the analytical algorithm. All FEM-based numerical computations were carried out using the COMSOL Heat Transfer Module.

AN ANALYTICAL ALGORITHM TO DETERMINE THE CONTINUOUSLY PERMISSIBLE LOADS OF HORIZONTAL BUS BARS WITH A RECTANGULAR CROSS-SECTION

Dardan Klimenta, Bojan Perović, Dejan Anđelković and Andreja Todorović