

ZAGRIJAVANJE VODIČA UVAŽAVAJUĆI TEMPERATURNO OVISNE FIZIKALNE VELIČINE

Franc J a k l, Miro Ž u n e c, Maribor

UDK 621.3.017.21
IZVORNI ZNANSTVENI ČLANAK

Razmatra se adijabatsko zagrijavanje golih vodiča i zaštitnog užeta kod nadzemnih vodova u uvjetima kratkog spoja, pri čemu se odvođenje topline sa površine vodiča tijekom procesa zagrijavanja zanemaruje. Članak donosi pregled metodološkog pristupa sa strane studijske radne grupe za vodiče WG 22.12 Electrical Aspects of Overhead Lines u okviru studijskog komiteta za nadzemne vodove međunarodne CIGRE s odgovarajućim metodama za izračun temperature vodiča u nestacionarnim uvjetima kratkog spoja. Prikazani su rezultati izračuna temperature pri adijabatskom zagrijavanju za najnepovoljniji slučaj krakog spoja u elektroenergetskom sustavu u trajanju od 1 sekunde na različitim vodičima i zaštitnim užetima, uzimajući u obzir nekonstantne vrijednosti za specifičnu toplinu vodiča (temperaturne ovisnosti).

Ključne riječi: nadzemni vodovi, vodiči, zaštitina užad, adijabatsko zagrijavanje, promjena provjesa.

1. UVOD

U proračunima određivanja temperatura prilikom zagrijavanja golih vodiča za nadzemne vodove prilikom kratkih spojeva se za specifičnu toplinu materijala, od kojih su vodiči izrađeni, obično uzimaju temperaturno neovisne (konstantne) vrijednosti. U slučaju kombiniranih vodiča se za te vrijednosti uzimaju isto tako konstantne vrijednosti uzimajući u obzir odnos presjeka i drugih fizikalnih veličina glede vrste i konstrukcijske izvedbe takvog vodiča. Općenito su vodiči za dalekovode izloženi brojnim opterećenjima u mehaničkom i termičkom smislu, ovisno o klimatskim (meteorološkim) uvjetima i uvjetima rada. U novije vrijeme se klasičnim vodičima i gromobranskim zaštitnim užetima pridružuju još i optički vodiči različitih tehnoloških izvedbi (npr. OPGW kablovi itd.) i vodiči, koji korištenjem novijih materijala pokazuju viši stupanj korisnosti i osiguravaju bolje korištenje elektroenergetskih naprava kao cjeline. S poboljšanim mehaničkim, električnim i termičkim svojstvima te naprave dozvoljavaju veću prijenosnu snagu, a posredno omogućavaju bolje korištenje prostora u usporedbi s klasičnim rješenjima.

2. METODOLOŠKI PRISTUP MEĐUNARODNE CIGRE

U okviru studijskog komiteta za nadzemne vodove (SC Overhead Lines) međunarodne CIGRE i njene studijske radne grupe za vodiče WG 22.12 (Electrical Aspects of Overhead Lines) provedena su višegodišnja istraživanja

na području termičkog opterećenja različitih vrsta vodiča kao i u novije vrijeme OPGW-a. Ta istraživanja su se odnosila na stacionarna i nestacionarna stanja, uzimajući u obzir različite ulazne podatke glede fizikalnih osobina odnosnog vodiča i uvjeta koji dolaze iz konstrukcijske izvedbe samoga vodiča i u slučaju kombiniranih vodiča od odgovarajućih odnosa presjeka. Cilj tih istraživanja je bio utvrditi točnost proračuna nadtemperatura na osnovi odgovarajućih matematičkih algoritama, koje vodič dostigne u uvjetima kratkog spoja kod određene struje krakog spoja i pri određenom vremenu trajanja krakog spoja. Rezultati istraživanja općenito ukazuju na prilično veliku skladnost dobivenih teoretskih proračuna u usporedbi s rezultatima eksperimentalnih laboratorijskih istraživanja. To se odnosi prije svega na niža strujna opterećenja (manje strujne gustoće) i za kraća vremena trajanja kratkoga spoja. Međutim, pokazalo se da rezultati izračuna zagrijavanja vodiča ovise o točnosti ulaznih podataka, pri čemu su sve dosadašnje metode uzimale u obzir konstantnu vrijednost za specifičnu toplinu i specifičnu gustoću vodiča koji se ispituju. Prava slika se dobije tek uspoređivanjem teoretskih izračuna s rezultatima i inače malobrojnih eksperimentalnih istraživanja, gdje su gornji rubni uvjeti glede realnih fizikalnih veličina i odvoda toplote tijekom procesa zagrijavanja kod kratkog spoja (neadijabatsko zagrijavanje) već uzeti u obzir [1,2,3,4,5].

3. MATEMATIČKI ALGORITAM

Prilikom izračuna temperature, koju dostiže vodič pri adijabatskom zagrijavanju, obično se pretpostavlja temperaturna ovisnost vezana samo za električki otpor

(tzv. Jouleovi gubici), dok se za specifičnu toplinu i specifičnu gustoću uzimaju konstantne vrijednosti. Stvarno su te vrijednosti promjenljive glede temperature [6]. Za adijabatsko zagrijavanje vodiča vrijedi da sva Joulska toplina ide u podizanje temperature. Osnovna jednadžba energetskoga stanja vodiča glasi:

$$mc \frac{dT_{av}}{dt} = P_J + P_S + P_M - P_r - P_c \quad (1)$$

se reducira na slijedeću relaciju

$$mc \frac{dT}{dt} = P_J \quad (2)$$

i odgovarajućim preoblikovanjem dobijemo:

$$\frac{dT}{dt} = I^2 \frac{\rho_{dc} [1 + \alpha(T - 20)]}{A_1 A_2 \gamma \cdot c} \quad (3)$$

Krajnja temperatura vodiča pri struji kratkog spoja (termička struja I_{th} u smislu točke 3.2.2 standarda IEC 865-1 [7]) iznosi:

$$T_2 = \frac{[1 + \alpha(T_1 - 20)] e^{\frac{I_{th}^2 \rho_{dc} \alpha}{A_1 A_2 \gamma \cdot c}} - 1}{\alpha} + 20 \quad (4)$$

Specifična toplina je temperaturno promjenjiva, koju možemo izraziti slijedećim izrazom:

$$c = c_{20} [1 + \beta(T - 20)] \quad (5)$$

Rješenje jednadžbe (3) uzimanjem u obzir izraza (5) za specifičnu toplinu dobijemo:

$$\begin{aligned} & \frac{-\ln(1 + \alpha T_2 - 20\alpha)\beta + \beta\alpha T_2 + \ln(1 + \alpha T_2 - 20\alpha)\alpha}{\alpha^2} \\ & + \frac{\ln(1 + \alpha T_1 - 20\alpha)\beta - \beta\alpha T_1 - \ln(1 + \alpha T_1 - 20\alpha)\alpha}{\alpha^2} = \quad (6) \\ & = \frac{I^2 \rho t}{A_1 A_2 \gamma \cdot c} \end{aligned}$$

Gornju jednadžbu (6) riješimo korištenjem iteracijskog postupka, pri čemu je:

- I struja u vodiču [A]
- m masa vodiča na jedinicu duljine [kg/m]
- P_J toplina koja se stvara u vodiču uslijed prolaska izmjenične pogonske struje kroz vodič [W/m]
- P_S toplina koju akumulira vodič uslijed sunčave i atmosferske radijacije [W/m]
- P_M toplina koja se stvara u vodiču uslijed tzv. magnetskog efekta [W/m]
- P_r toplina koju vodič predaje okolini putem radijacije [W/m]
- P_c toplina koju vodič predaje okolini putem prirodne i prisilne konvekcije [W/m]
- c specifična toplina [J/kg K]
- T_1 početna temperatura [°C]
- T_2 konačna temperatura [°C]

- α temperaturni koeficijent otpornosti pri 20°C [K⁻¹]
- β temperaturni koeficijent specifične topline pri 20°C [K⁻¹]
- ρ_{dc} specifični otpor pri 20°C [m]
- specifična gustoća [kg/m³]
- A presjek vodiča [m²]
- t vrijeme trajanja kratkog spoja [s].

4. VARIJANTNE METODE

U dokumentu (5) međunarodne CIGRE je za izračun temperature vodiča pri adijabatskom zagrijavanju u uvjetima kratkoga spoja predloženo pet različitih metoda i to:

- **Metoda A** po IEC 865-1 [7] je primjerna samo za homogene vodiče, a ista uzima u obzir, da struja protječe samo električkim vodljivim dijelom vodiča, npr. aluminij odnosno leguru aluminija. Vrijednosti u jednadžbi 4 su: $A_1 = A_2 = A_a$, α_a , ρ_a , γ_a , c_a . U slučaju vodiča iz čistog čelika slijedi $A_1 = A_2 = A_s$, α_s , ρ_s , γ_s , c_s .
- **Metoda B** uzima u obzir još i protjecanje struje čeličnim dijelom u iznosu od 9% IACS (International Annealed Copper Standards). Vrijednosti u jednadžbi 4 su: $A_1 = A_2 = A_a + A_s$, α_{tot} , ρ_{tot} , γ_{tot} , c_{tot} .
- **Metoda C** uzima u obzir još i čelični dio s vodljivošću 6% IACS-a. Vrijednosti u jednadžbi 4 su: $A_1 = A_2 = A_a + A_s$, α_{tot} , ρ_{tot} , γ_{tot} , c_{tot} .
- **Metoda D** uzima u obzir specifičnu toplinu oba dijela kombiniranog užeta, tj. vodljivog i čeličnog dijela, ali ipak bez uzimanja u obzir električne vodljivosti čeličnog dijela. Vrijednosti u jednadžbi 4 su: $A_1 = A_a$, $A_2 = A_a + A_s$, α_a , ρ_a , γ_{tot} , c_{tot} .
- **Metoda E** uzima u obzir nekonstante vrijednosti za specifičnu toplinu. Vrijednosti u jednadžbi 4 su: $A_1 = A_a$, $A_2 = A_a + A_s$, α_a , ρ_a , γ_{tot} , c_{tot} , β_{tot} .

Pri tome vrijede slijedeće relacije, gdje indeks a znači aluminijski dio, a indeks s čelični dio vodiča:

$$\gamma_{tot} = \frac{\gamma_a A_a + \gamma_s A_s}{A_a + A_s} \quad (7)$$

$$c_{tot} = \frac{c_a \gamma_a A_a + c_s \gamma_s A_s}{\gamma_a A_a + \gamma_s A_s} \quad (8)$$

$$\rho_{tot} = \frac{\rho_a \rho_s (A_a + A_s)}{\rho_a A_s + \rho_s A_a} \quad (9)$$

$$\alpha_{tot} \approx \frac{\alpha_a \alpha_s \left(\frac{\rho_a}{A_a} + \frac{\rho_s}{A_s} \right) + \alpha_a \frac{\rho_s}{A_s} + \alpha_s \frac{\rho_a}{A_a}}{\frac{\rho_s}{A_s} + \frac{\rho_a}{A_a} + \alpha_s \frac{\rho_s}{A_s} + \alpha_a \frac{\rho_a}{A_a}} \quad (10)$$

$$\beta_{tot} = \frac{c_a \gamma_a \beta_a A_a + c_s \gamma_s \beta_s A_s}{c_a \gamma_a A_a + c_s \gamma_s A_s} \quad (11)$$

Prilikom izračuna temperature za pojedine materijale uzimaju se vrijednosti fizikalnih veličina iz tablice 1.

Tablica 1. Podaci za materijale pri 20 °C

Materijal	γ [kg/m ³]	c [J/kg K]	ρ_{dc} [Ωm]	α [K ⁻¹]	β [K ⁻¹]
Aluminij	2703	897	28.264 · 10 ⁻⁹	4.03 · 10 ⁻³	3.8 · 10 ⁻⁴
Kombinirani vodič Al/Č (ACSR)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Aluminij-ska legura	2703	909	32.7 · 10 ⁻⁹	3.6 · 10 ⁻³	4.5 · 10 ⁻⁴
Bakar	8890	383	17.241 · 10 ⁻⁹	3.9 · 10 ⁻³	3.35 · 10 ⁻⁴
Čelik	7780	481	287.36 · 10 ^{-9(*)} 191.57 · 10 ^{-9(**)}	4.95 · 10 ⁻³	1.0 · 10 ⁻⁴
Alumoweld (ACS)	6590	518	84.80 · 10 ⁻⁹	3.6 · 10 ⁻³	1.4 · 10 ⁻⁴
20 SA	5910	551	63.86 · 10 ⁻⁹	3.6 · 10 ⁻³	1.4 · 10 ⁻⁴
27 SA	5610	566	57.47 · 10 ⁻⁹	3.8 · 10 ⁻³	1.4 · 10 ⁻⁴
30 SA	4640	630	43.10 · 10 ⁻⁹	4.0 · 10 ⁻³	1.4 · 10 ⁻⁴
40 SA					

(*) bazirano na 6 % IACS vodljivosti

(**) bazirano na 9 % IACS vodljivosti

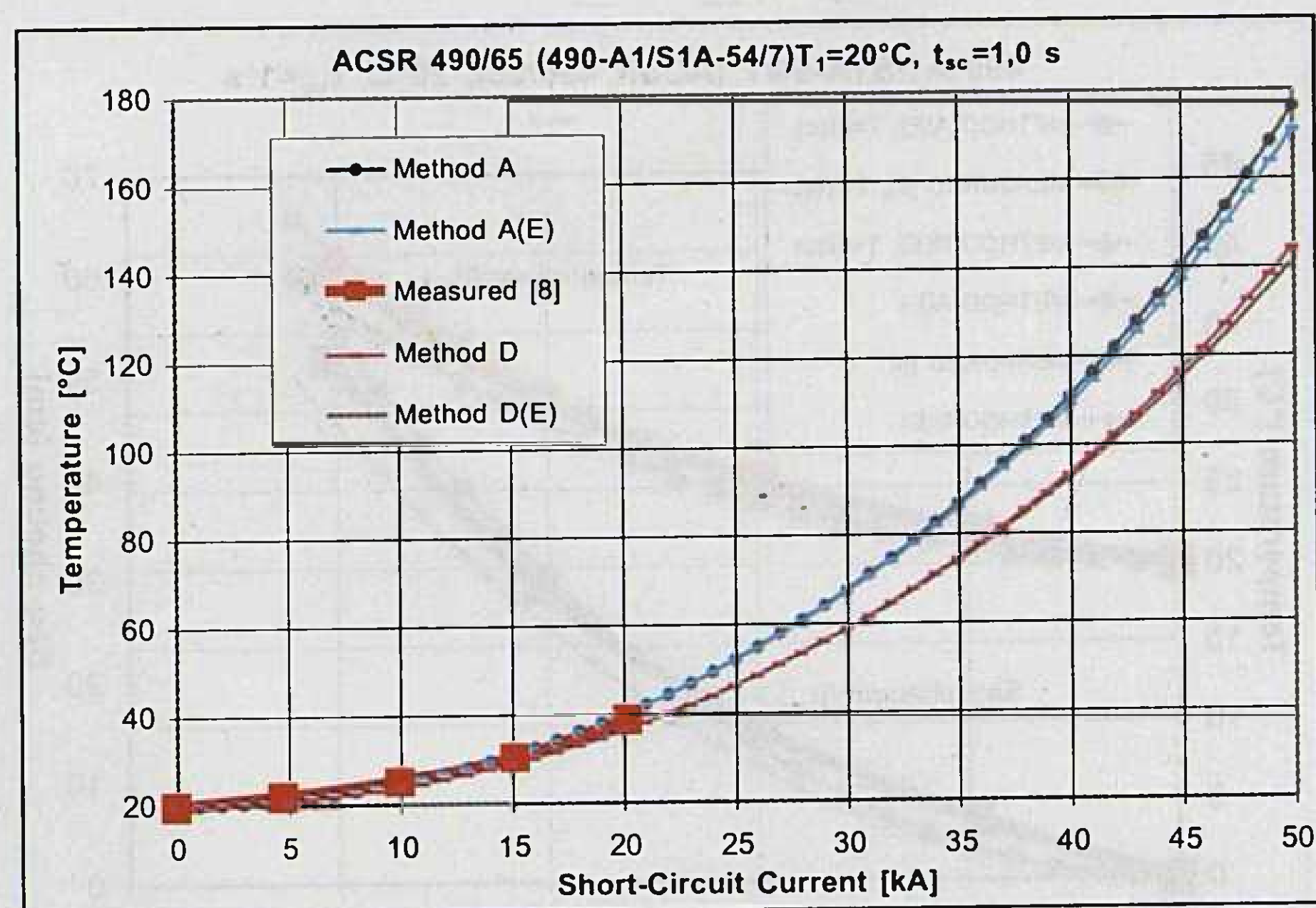
5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

U okviru studijske radne grupe CIGRE WG 22.12 bilo je istraživano adijabatsko zagrijavanje nekih tipičnih vodiča i zaštitnih užadi a rezultati su uspoređeni s eksperimentalnim laboratoriskim istraživanjima, izvršenim u okviru istraživanja navedenih u literaturi Š8Ć. U dokumentu [5] su dane krivulje adijabatskog zagrijavanja za vodič Al/Č 490/65 mm² (ACSR 490/65 mm²) po gore navedenim metodama A, B, C, D koje su uspoređivane s rezultatima istraživanja iz[8], pri početnoj temperaturi od 20 °C i vremenu trajanja kratkog spoja $t_k=1000$ ms.

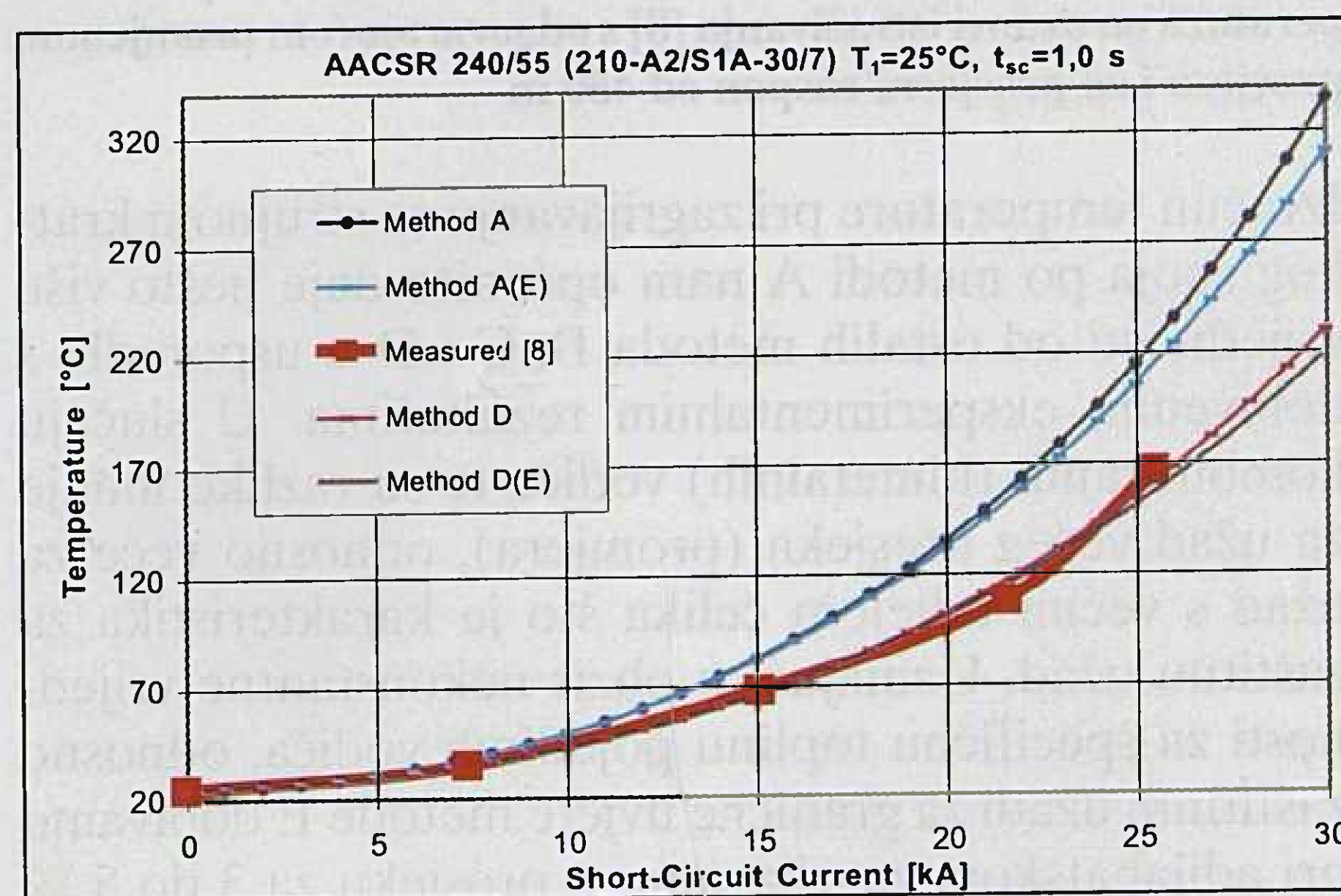
Osim navedenog, prezentirani su grafički prikazi funkcionalne ovisnosti za slijedeća zaštitna užeta i odabrane polazne kriterije:

- AlMg1E/Č 240/55 mm² (AACSR 240/55 mm²) pri početnoj temperaturi od 20°C i $t_k=350$ ms odnosno pri 25°C ter $t_k=1000$ ms
- Al/Č 120/70 mm² (ACSR 120/70 mm²) pri početnoj temperaturi od 40°C i $t_k=350$ ms
- AlMg1E/Č 120/70 mm² (AACSR 120/70 mm²) pri početnoj temperaturi od 20°C i $t_k=350$ ms
- AlMg1E/Č 120/70 mm² (AACSR 120/70 mm²) pri početnoj temperaturi od 22°C i $t_k=1000$ ms.

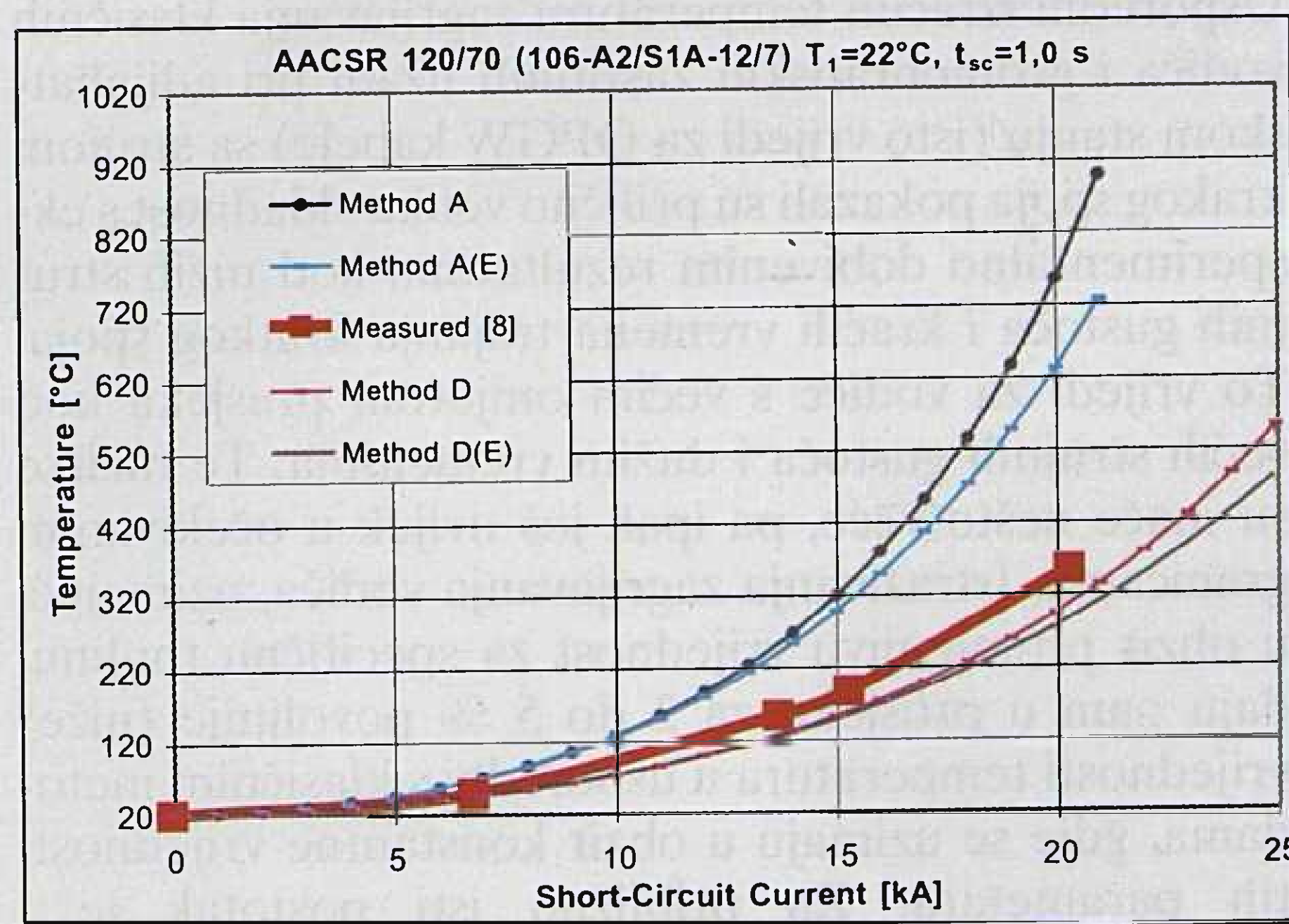
Uzorcima vodiča Al/Č 490/65 mm² i uzorcima navedenih zaštitnih gromobraskih užadi su iz elektroenergetskog prijenosnog sustava Slovenije (DV 220 kV Cirkovce-Podlog, DV 2x400 kV Maribor-Kainachtal, DV 400 kV Maribor-Krško-Zagreb, DV 400 kV Maribor-Podlog).



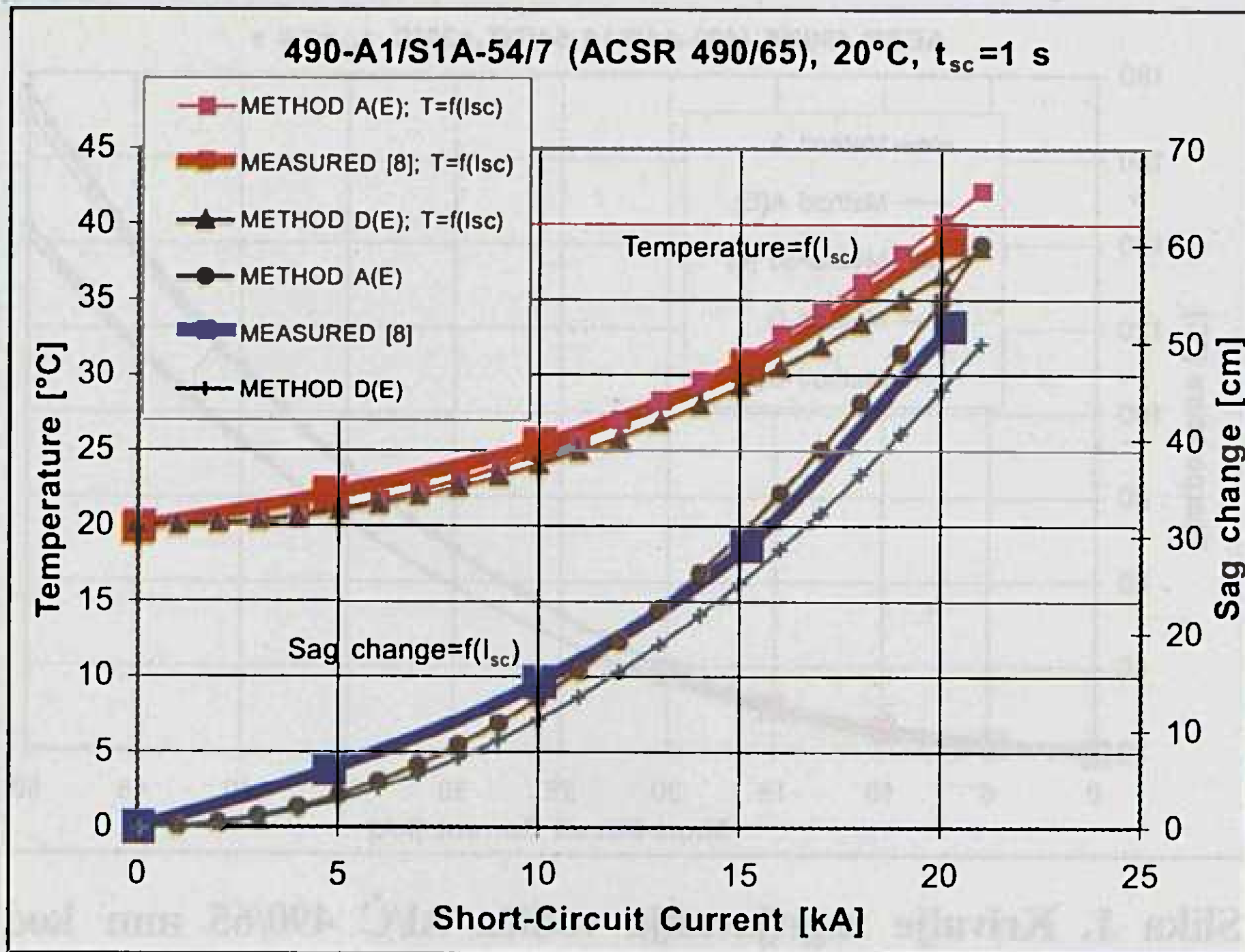
Slika 1. Krivulje zagrijavanja vodiča Al/Č 490/65 mm² kod početne temperature od 20°C i $t_k=1$ sek u ovisnosti o struji kratkog spoja po metodi A i D odnosno uzimajući u obzir promjenjivu vrijednost za specifičnu toplinu po metodi A(E) odnosno D(E) sa ucrtanim vrijednostima na osnovi istraživanja [8]



Slika 2. Krivulje zagrijavanja zaštitnih užadi AlMg1E/Č 240/55 mm² pri početnoj temperaturi od 25°C i $t_k=1$ sek u ovisnosti o struji kratkog spoja po metodi A i D odnosno uzimajući u obzir promjenjivu vrijednost za specifičnu toplinu po metodi A(E) odnosno D(E) s ucrtanim vrijednostima na osnovi istraživanja [8]



Slika 3. Krivulje zagrijavanja zaštitnih užadi AlMg1E/Č 120/70 mm² pri početnoj temperaturi od 22°C i $t_k=1$ sek u ovisnosti o struji kratkog spoja po metodi A i D, odnosno uzimajući u obzir promjenjivu vrijednost za specifičnu toplinu po metodi A(E), odnosno D(E) s ucrtanim vrijednostima na osnovi istraživanja [8]



Slika 4. Krivulje zagrijavanja za vodič Al/Č 490/65 mm pri početnoj temperaturi od 20°C i $t_k=1$ sek u ovisnosti od struje kratkog spoja i kod uvažavanja promjenjive vrijednosti za specifičnu toplinu po metodi A(E) i D(E) s unesenim vrijednostima temperatura na osnovi istraživanja [8] s odgovarajućom promjenom provjesa i za prosječni raspon od 450 m

Izračun temperature pri zagrijavanju sa strujnom kratkog spoja po metodi A nam općenito daje nešto više vrijednosti od ostalih metoda B, C i D u usporedbi s dobivenim eksperimentalnim rezultatima. U slučaju kombiniranih (bimetalnih) vodiča te su razlike manje za užad većeg presjeka (promjera), odnosno veće za užad s većim udjelom čelika što je karakteristika za zaštitnu užad. Uzmajući u obzir nekonstantne vrijednosti za specifičnu toplinu pojedinih vodiča, odnosno zaštitnih užadi za granične uvjete metode E dobivamo pri adijabatskom zagrijavanju u prosjeku za 3 do 5 % niže vrijednosti temperatura, odnosno za skoro isti postotak manju promjenu provjesa.

6. ZAKLJUČAK

Usporedni izračun temperatura zagrijavanja klasičnih vodiča i gromobranskih zaštitnih užadi pri adijabatskom stanju (isto vrijedi za OPGW kabele) sa strujom kratkog spoja pokazali su prilično veliku skladnost s eksperimentalno dobivenim rezultatima kod nižih strujnih gustoća i kraćih vremena trajanja kratkog spoja. To vrijedi za vodiče s većim omjerom presjeka kod većih strujnih gustoća i dužim vremenima. Te razlike su inače nešto veće, pa ipak još uvijek u očekivanim granicama. Istraživanja zagrijavanja vodiča, uzimajući u obzir promjenjivu vrijednost za specifičnu toplinu, daju nam u prosjeku za 3 do 5 % povoljnije (niže) vrijednosti temperatura u usporedbi s klasičnim metodama, gdje se uzimaju u obzir konstantne vrijednosti tih parametara. Za približno isti postotak je i odgovarajuća promjena provjesa. Kod izračuna se često koriste različiti ulazni podaci i od njihove točnosti ovise rezultati, koji ponekad međusobno odstupaju i tek ih eksperimentalna istraživanja mogu potvrditi ili odbaciti. Takvih istraživanja je u Republici

Sloveniji i u inozemstvu još uvijek malo i ona su prije svega rezultat studijskog i istraživačkog rada pojedina na poslijediplomskom studiju, odnosno predmet su rada malobrojnih istraživačkih institucija i nekih proizvođača materijala i opreme te vrste.

LITERATURA

- [1] R. STEPHEN, G. PIROVANO, M. J. TUNSTALL, Y. OJALA, A. McCULLOCH, F. JAKL, K. BAKIC, L. VARGA, T. O. SEPPA, H. POHLMANN, R. ARTETA, J. KATOH, M. GAUDRY: "The Thermal Behaviour of Overhead Conductors; Section 3: Mathematical Model for Evaluation of Conductor Temperature in the Unsteady State", *ELECTRA* No. 174, p.p. 58-69, Paris, October 1997
- [2] F. JAKL, A. JAKL: "Problems of Conductor Heating under Short-Circuit Conditions on Overhead Lines", *CIGRE Working Group Document (22)97(WG12)11*, Durban/South Africa, March 1997
- [3] Y. OJALA: "Conductor Temperature Rise in Short Circuit", *CIGRE Working Group Document (22)98(WG12)25-1-3/98*, Hobart/Tasmania, March 1998
- [4] *CIGRE WG22.12: "Brochure on Thermal Behaviour of Overhead Conductors"*, *CIGRE Working Group Document (22)98(WG12)25-1-5/989*, Dunbury/USA, May 1999
- [5] R. STEPHEN, M. GAUDRY, R. ARTETA, F. JAKL, R. KLEVEBORN, R. KIMATA, L. LARSEN, G. MIROSEVIC, Y. MOTLIS, Y. OJALA, H. POHLMANN, T. O. SEPPA, M. J. TUNSTALL, L. VARGA, M. VINCENT: "The Thermal Behaviour of Overhead Conductors; Section 4: Mathematical Model for Evaluation of Conductor Temperature in the Adiabatic State", *ELECTRA* No. 185, p.p. 74-87, Paris, August 1999
- [6] V. T. MORGAN: "Thermal Behaviour of Electrical Conductors; Steady, Dynamic and Fault Current Rating", *RSP-Research Study Press LTD*. Taunton, Somerset, England, 1991
- [7] *IEC 865-1: "Short-Circuit Currents-Calculation of Effects, Part 1: Definitions and Calculation Methods, Second Edition*, 1993-09
- [8] F. JAKL: "Problems of Bare Overhead Line Conductors and Ground Wires", Ph. Thesis. *University of Maribor, Slovenia, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology*, Maribor, 1992

CONDUCTOR HEATING TAKING INTO ACCOUNT PHYSICAL TEMPERATURE DEPENDENT VALUES

The paper considers the adiabatic heating of bare conductor and shielding wire OF overhead lines in the circumstances of short-circuit, whereby the heat conducted from the line surface during heating process is neglected. The paper brings an overview of the methodological approach of the study group for WG 22.12 conductors, *Electrical Aspects of Overhead Lines in the field of the Study Committee for Overhead Lines of the international CIGRE Organisation*, with corresponding calculation methods for conductor temperature in non-stationary short-circuit. The results of temperature calculation by adiabatic heating for the worst

short-circuit case in an electric power system of duration of 1 second on different conductors and shielding wires are given, taking into account non constant values for the specific heating rate of a temperature dependent conductor.

DIE LEITERERWÄRMUNG UNTER RÜCKSICHT AUF TEMPERATURABHÄNGIGE PHYSIKALE GRÖSSEN

Der Artikel erörtert die adyabatische Erwärmung blanker Leitungen und des Erdseiles von Luftleitungen in Kurzschlussumständen, wobei die Wärmeableitung von der Leiteroberfläche während der Erwärmung vernachlässigt wird. Gegeben wird die Übersicht des methodologischen Zutritts zum Problem seitens der Studienarbeitsgruppe für Leiter WG 22.12 "Electrical aspects of Overhead Lines" im Rahmen des Studiencomités für Luftleitungen der internationalen CIGRÉ mit den entsprechenden Methoden für die Berechnung der Leitertemperatur in unstätigen Kurzschlußbedingungen. Dargestellt

wurden die Ergebnisse der Temperaturberechnung beim adyabatischen Erwärmen für den ungünstigsten Fall im Stromerzeugungssystem in der Dauer von 1 Sekunde auf verschiedenen Leitern und Erdseilen, die temperaturabhängigen Änderungen der Werte der spezifischen Wärme der Leiter berücksichtigend.

Naslov pisaca:

Franc Jakl, dipl. ing.
ELES Ljubljana – Sektor za razvoj
Vetrinjska 2, 2000 Maribor, Slovenija

Miro Žunec, dipl. ing.
Elektro Maribor, Služba za obratovanje
Vetrinjska 2, 2000 Maribor, Slovenija

Uredništvo primilo rukopis:
2000-07-17.