

Ľubomír Beňa, Michal Kolcun, Dušan Medved', Marek Pavlík, Zsolt Čonka, Jozef Király

Vplyv klimatických podmienok na dynamickú ampacitu vonkajších vedení

Abstrakt: Neustále narastajúci dopyt po elektrickej energii kladie zvýšené nároky jednak na inštalovaný výkon energetických zdrojov ako aj prenosové schopnosti elektrických sietí. Vzhľadom na skutočnosť, že zvyšovanie prenosových schopností elektrických sietí výstavbou nových vedení je časovo a finančne značne náročný proces, snahou prevádzkovateľov sietí je maximálne možné využitie prenosových kapacít existujúcich vedení. Jednou z možností tohto maximálneho využitia existujúcich kapacít je aplikácia výpočtu dynamickej ampacity vedení, kedy prevádzkovatelia elektrických sietí vedia stanoviť maximálnu zaťažiteľnosť vedení v závislosti od aktuálnych klimatických podmienok. V predloženej publikácii je uvedená metodika určenia dynamickej ampacity vonkajších vedení pri rôznych klimatických podmienkach s následnou aplikáciou tejto metodiky na konkrétny vodič využívaný pri realizácii vonkajších prenosových vedení.

Kľúčové slová: ampacita; vonkajšie vedenie; klimatické podmienky

Abstract: The constantly growing demand for electricity increased demands both on the installed power of energy sources and on the transmission capabilities of electrical networks. Considering the fact that increasing the transmission capabilities of electrical networks by building new lines is a time and financially demanding process, the operators of power networks strive to use the transmission capacities of existing lines as much as possible. One of the possibilities of this maximum use of existing capacities is the application of the calculation of the dynamic ampacity of the lines, when the operators of electric networks know how to determine the maximum load capacity of the lines depending on the current climatic conditions. The presented publication presents a methodology for determining the dynamic ampacity of external lines under different climatic conditions with the subsequent application of this methodology to a specific conductor used in the implementation of external transmission lines. **(The Influence of Climatic Conditions on the Dynamic Ampacity of Overhead Power Lines)**

Keywords: ampacity; overhead power line; climatic conditions

I. ÚVOD

Ampacita vonkajších elektrických vedení je definovaná ako maximálna dovolená hodnota prúdu, ktorý môže tiecť vedením bez narušenia jeho mechanických a elektrických vlastností. Najviac používanými vodičmi vonkajších prenosových vedení sú laná so železným jadrom zabezpečujúcim potrebnú mechanickú pevnosť vedenia, vonkajšiu vrstvu lana s dobrou vodivosťou tvorí hliník. Výrobcovia týchto lán uvádzajú ich maximálnu prevádzkovú teplotu v rozsahu 90°C až 110°C. Pri dlhotrvajúcom prekročení tejto teploty sa materiál stáva krehkejší a znižuje sa jeho životnosť.

Ďalším obmedzením súvisiacim so zvyšujúcou sa teplotou vodiča je jeho predĺženie, a tým zníženie jeho výšky nad úrovňou zeme. Minimálna bezpečná výška vodičov je stanovená v normách pre rôzne typy prostredí. Minimálna povolená výška vedení a s ňou spojená maximálna teplota vodičov sú zohľadňované pri návrhu a konštrukcii vedení.

Veľkosť maximálnej dovolenej hodnoty prúdu je určená mechanickými a elektrickými vlastnosťami vodiča, jeho schopnosťou rozptýliť vznikajúce teplo vo vnútri vodiča a od okolitých podmienok. Okolité podmienky predstavujú všetky klimatické podmienky prostredia, medzi ktoré patrí okolitá teplota, rýchlosť a smer prúdenia vetra a intenzita slnečného žiarenia. Teplota vodičov je závislá na meteorologických podmienkach a veľkosti prechádzajúceho prúdu.

II. DEFINÍCIA DYNAMICKEJ AMPACITY VONKAJŠÍCH VEDENÍ

Pri prevádzkovaní elektrických vedení sa na základe normy STN EN 50 341-1 používa hodnota maximálneho povoleného prúdu určená pre najvyššiu návrhovú teplotu vodiča pri nasledovných podmienkach:

- teplota okolia +35 °C;
- rýchlosť vetra 0,5 m/s pod uhlom 45 ° na os vodiča;
- globálna intenzita slnečného žiarenia 1 000 W/m²;
- súčiniteľ absorpcie 0,5;
- súčiniteľ emisivity 0,5 [2].

Podľa normy STN EN 50 341-1, najvyššia návrhová teplota fázových vodičov na kontrolu najkratších vzdialeností sa musí uviesť v projektovej špecifikácii. Pri určovaní najvyššej návrhovej teploty vodičov treba počítať s možným rozvojom využívania vedenia aspoň v priebehu návrhového času života vedenia. Pri tých vedeniach, kde je prierez fázových vodičov určený predovšetkým prenášaným prúdom (tepelnými hľadiskami), neodporúča sa voliť najvyššiu návrhovú teplotu vodiča menšiu ako 70°C.

V niektorých prenosových sústavách sa používajú rôzne prúdové obmedzenia pre letné a zimné obdobie. Na základe dlhodobých meraní poveternostných podmienok (teplota, vietor) v trasách vedení je možné konštatovať, že po väčšinu roku zďaleka nedosahujú projektových hodnôt, vedenia teda majú značné rezervy v povolených prenosových schopnostiach. Po veľkú časť roka je skutočná ampacita o desiatky percent väčšia ako je udávaná hodnota.

Vzhľadom na to, že klimatické podmienky sa neustále časovo menia, mení sa aj maximálna dovolená hodnota prúdu vodiča, hovoríme teda o **dynamickej ampacite vodiča**.

Veľkosť prúdu, pri ktorej sa teplota vodiča ustáli na maximálnej možnej hodnote, nazveme **ustálenou dynamickou ampacitou vodiča**.

Pretože vedenie vykazuje určitú tepelnú kapacitu, je možné ju využiť ku krátkodobému preťaženiu vedenia tak, aby teplota neprekročila povolenou úroveň. Toto krátkodobé preťaženie nazveme **prechodnou dynamickou ampacitou**, ktoré je vzťahované k dobe preťaženia [2,3].

III. MATEMATICKÝ MODEL NA VÝPOČET TEPLoty VODIČA V PRECHODNOM STAVE

Vo všeobecnosti platí, že klimatické podmienky a prúdové zaťaženie vodičov vonkajších elektrických vedení sa menia v závislosti od času. V tomto prípade vodič nie je vždy v tepelnej rovnováhe, t. j. vo vodiči je nahromadené určité množstvo tepla. Teplota vodiča nie je ustálená, nakoľko prebieha prechodný dej. Všeobecnú rovnicu tepla v prípade prechodného tepelného stavu vodiča je možné vyjadriť rovnicou (1) [1]. Uvedená rovnica vyjadruje skutočnosť, že teplo akumulované vo vodiči je rovné rozdielu tepelného prírastku a tepelných strát vo vodiči, t.j.:

$$m \cdot c \cdot dT_s/dt = P_J + P_s - P_c - P_r \quad (1)$$

kde

m – hmotnosť vodiča na jednotku dĺžky (kg/m),
 c – merná tepelná kapacita vodiča (J/(kg·K)),
 P_J – oteplenie vodiča Jouleovými stratami (W/m),
 P_s – oteplenie vodiča slnečným žiarením (W/m),
 P_c – ochladenie vodiča konvekciou (W/m),
 P_r – ochladenie vodiča radiáciou (W/m).

Ododenie rovníc pre analytický výpočet časového priebehu teploty vodiča vo všeobecnosti vychádza z predpokladu, že vodič je v čase zmeny prevádzkových parametrov v tepelnej rovnováhe. Do výpočtu teploty vodiča teda vstupuje počiatočná ustálená teplota vodiča v čase zmeny prevádzkových parametrov a taktiež tzv. asymptotická teplota vodiča po skokovej zmene prevádzkových parametrov. Tieto teploty je možné určiť z riešenia ustáleného tepelného stavu vodiča.

Asymptotická teplota predstavuje maximálnu možnú teplotu, ku ktorej sa môže teplota vodiča po ustálení priblížiť, resp. vodič túto teplotu dosiahne v nekonečnom čase. Podľa analytického modelu sa vodič nikdy neohreje, resp. neochladí na túto teplotu, pretože ide o asymptotu exponenciálnej funkcie. Všeobecný priebeh teploty vodiča v závislosti od času po skokovej zmene jedného prevádzkového parametra alebo viacerých prevádzkových parametrov súčasne je možné vyjadriť rovnicou (2) [4,5]:

$$T_s \cong T_{sm} - (T_{sm} - T_{s1}) \cdot e^{-t/\tau} \quad (2)$$

kde

T_{s1} – ustálená teplota vodiča v čase $t = 0$ (°C),
 T_s – teplota vodiča v čase t (°C),
 T_{sm} – asymptotická teplota vodiča v čase $t = \infty$ (°C),
 τ – globálna časová konštanta (s),
 t – čas (s).

O čase ustálenia teploty vodiča pojednáva tzv. globálna časová konštanta. Globálna časová konštanta vyjadruje časový interval, počas

ktorého sa zmení teplota vodiča z počiatočnej (ustálenej) teploty na cca 63,2 % z asymptotickej teploty. V globálnej časovej konstante sú zahrnuté vplyvy zmien všetkých prevádzkových parametrov, t. j. klimatických podmienok, ale aj prúdu tečúceho vodičom a je ju možné určiť z rovníc (3), (4) [2,3]:

$$\tau \cong 1/(1/\pi + 1/\tau_s + 1/\tau_v + 1/\tau_r) \quad (3)$$

kde

π – časová konštanta prúdu (s),
 τ_s – časová konštanta slnečného žiarenia (s),
 τ_v – časová konštanta prúdenia (s),
 τ_r – časová konštanta vyžarovania (s).

$$\tau \cong m \cdot c \cdot (T_{sm} - T_{s1}) / (\Delta P_J + \Delta P_s - \Delta P_c - \Delta P_r) \quad (4)$$

kde

ΔP_J – zmena oteplenia vodiča vplyvom toku prúdu po skokovej zmene prúdu (W/m),
 ΔP_s – zmena oteplenia vodiča slnečného žiarenia po zmene globálnej intenzity slnečného žiarenia (W/m),
 ΔP_c – zmena ochladenia vodiča vplyvom prúdenia po skokovej zmene rýchlosti a smeru vetra alebo teploty okolia (W/m),
 ΔP_r – zmena ochladenia vodiča vplyvom vyžarovania po skokovej zmene teploty okolia (W/m).

Rovnicu (2) je možné upraviť na rovnicu (5), ktorá definuje dobu, počas ktorej sa vodič oteplí, resp. ochladí na požadovanú teplotu [2]:

$$t \cong -\tau \cdot \ln [(T_{sm} - T_s) / (T_{sm} - T_{s1})] \quad (5)$$

Rovnica (5) sa väčšinou používa v súvislosti s výpočtom doby krátkodobého prúdového preťaženia vodiča t_{max} tak, aby nebola presiahnutá jeho maximálna dovolená teplota. Inými slovami povedané, počíta sa čas, počas ktorého sa vodič pri danej hodnote prúdu oteplí na maximálnu dovolenú teplotu T_{smax} [4,5].

IV. APLIKÁCIA DYNAMICKÉHO TEPELNÉHO MODELU PRI REÁLNYCH PREVÁDZKOVÝCH PODMIENKACH VEDENIA

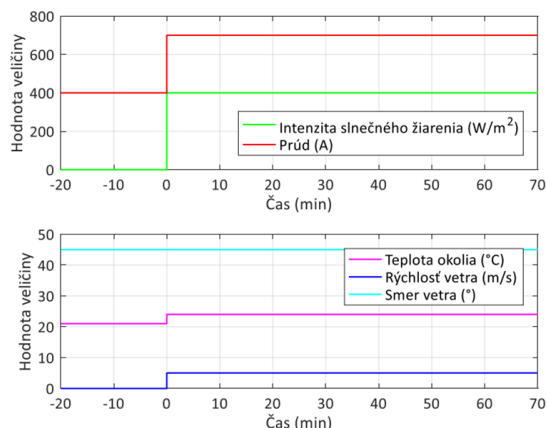
Uvedený dynamický tepelný model vodiča bude aplikovaný na lano 352-AL1/59-ST1A s parametrami podľa Tabuľky I.

TABUĽKA I
 Technická špecifikácia lana 352-AL1/59-ST1A [3]

parameter	hodnota
vonkajší priemer	26,5 · 10 ⁻³ m
koefficient absorptivity povrchu	0,35 (-)
koefficient emisivity povrchu	0,35 (-)
striedavý odpor pri teplote 20°C:	0,0816 · 10 ⁻³ ohm/m
teplotný súčiniteľ odporu:	4,03 · 10 ⁻³ 1/K,
merná tepelná kapacita ocele pri teplote 20 °C:	481 J/(kg · K)
merná tepelná kapacita hliníka pri teplote 20 °C	897 J/(kg · K)
teplotný koefficient mernej tepelnej kapacity ocele	1 · 10 ⁻⁴ 1/K
teplotný koefficient mernej tepelnej kapacity hliníka	3,8 · 10 ⁻⁴ 1/K
hmotnosť ocele na jednotku dĺžky	0,5119 kg/m
hmotnosť hliníka na jednotku dĺžky	1,116 kg/m
výška nad hladinou mora	y = 208 m
počet hliníkových drôtov vo vrstvách	11 + 17
počet oceľových drôtov vo vrstvách	3 + 9
prierez hliníkových drôtov	351,86 mm ²
prierez oceľových drôtov	58,9 mm ²
priemer hliníkových drôtov	4 mm
priemer oceľových drôtov	2,5 mm

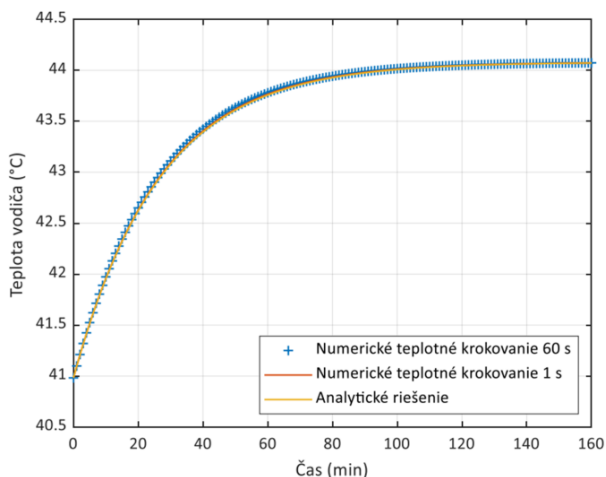
Najprv bude uvedený vplyv skokovej zmeny jednotlivých klimatických podmienok (teplota okolia, rýchlosť vetra, intenzita slnečného žiarenia) a prúdu na teplotu vodiča jednotlivu a následne sa analyzuje vplyv zmeny všetkých prevádzkových podmienok na teplotu vodiča súčasne.

Na Obr. 1 sú uvedené zvolené klimatické podmienky a prúd tečúci vodičom (pred a po skokovej zmene). Predpokladá sa, že vodič je pred zmenou parametrov v tepelnej rovnováhe. Taktiež sa uvažuje, že po zmene (počas celého skúmaného časového intervalu) sú všetky prevádzkové podmienky konštantné.



Obr. 1 Grafické zobrazenie klimatických podmienok a prúdu tečúceho vodičom pred a po ich skokovej zmene

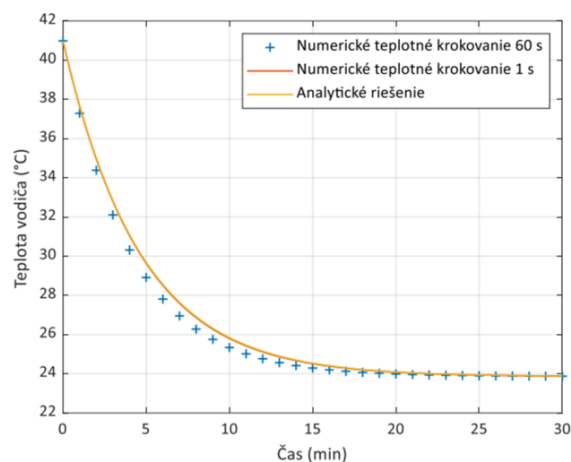
Na Obr. 2 je znázornené oteplenie vodiča ako dôsledok zvýšenia teploty okolia (z 21 °C na 24 °C).



Obr. 2 Závislosť teploty vodiča od času po skokovej zmene teploty okolia

Táto zmena má za následok zvýšenie teploty vodiča. Zvýšenie teploty okolia sa prejaví znížením tepelného výkonu odvádzaného z vodiča, t. j. znížením ochladenia vodiča radiáciou a konvekciou tepla. Medzi teplotou vodiča a teplotou okolia platí priama úmernosť. Čím vyššia je teplota okolia, tým vyššia je aj teplota vodiča a naopak.

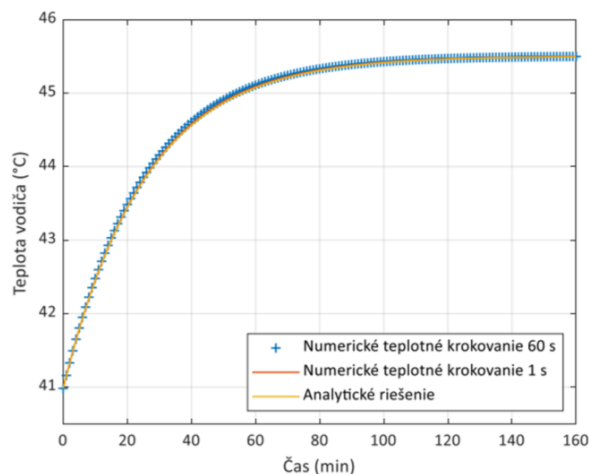
Na Obr. 3 je zobrazený priebeh ochladenia vodiča vplyvom zvýšenia rýchlosti vetra. Uvažuje sa so zmenou rýchlosti vetra z bezvetria na vietor s rýchlosťou 5 m/s pri uhle nábehu 45°.



Obr. 3 Závislosť teploty vodiča od času po skokovej zmene rýchlosti vetra

Táto zmena má za následok zvýšenie hodnoty ochladenia vodiča konvekciou, čo vedie k zníženiu asymptotickej teploty vodiča. Medzi teplotou vodiča a zmenou rýchlosti vetra platí nepriama úmernosť: čím je vyššia rýchlosť vetra, tým nižšia je teplota vodiča.

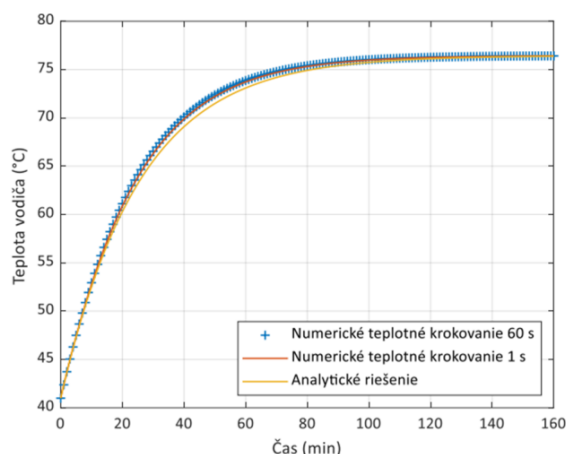
Na Obr. 4 je zobrazená otepľovacia krivka vodiča vplyvom zvýšenia intenzity slnečného žiarenia z 0 na 400 W/m².



Obr. 4 Závislosť teploty vodiča od času po skokovej zmene intenzity slnečného žiarenia

Medzi teplotou vodiča a intenzitou slnečného žiarenia platí priama úmernosť: pri zvýšení intenzity slnečného žiarenia sa zvýši teplota vodiča a naopak.

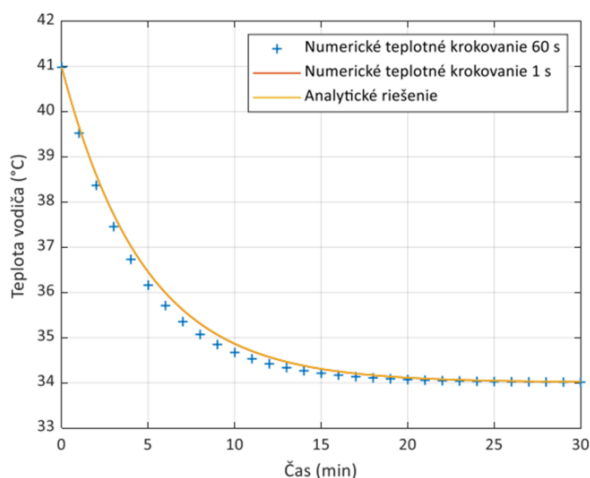
Na Obr. 5 je zobrazené oteplenie vodiča po skokovej zmene prúdu z počiatočnej hodnoty 400 A na hodnotu 700 A.



Obr. 5 Závislosť teploty vodiča od času po skokovej zmene prúdu

Je možné konštatovať, že medzi teplotou vodiča a prúdom tečúcim vodičom platí priama úmernosť, t.j. pri zvýšení prúdu sa vplyvom Jouleových strát zvýši sa aj teplota vodiča a naopak.

Na Obr. 6 je zobrazená závislosť teploty vodiča od času po súčasnej skokovej zmene všetkých prevádzkových parametrov uvedených na Obr. 1.



Obr. 6 Závislosť teploty vodiča od času po skokovej zmene všetkých prevádzkových parametrov

Ak sa menia všetky prevádzkové podmienky, budú sa na zmene teploty vodiča podieľať všetky tepelné výkony z bilančnej rovnice (1). Táto súčasná zmena všetkých parametrov vyvolá ochladenie vodiča v dôsledku najvýraznejšieho vplyvu, t. j. konvekcie, ktorá súvisí hlavne so zmenou rýchlosti vetra. Oteplenie vodiča Jouleovými stratami a slnečným žiarením nie je dostatočné, rovnako ako pokles miery ochladenia vodiča radiáciou [3].

V. ZÁVER

Cieľom publikácie bolo analyzovať vplyv klimatických podmienok na dynamickú ampacitu vonkajších elektrických vedení. Zo získaných

výsledkov vyplýva, že jednotlivé prevádzkové parametre (klimatické podmienky a prúd tečúci vodičom) majú vplyv na teplotu vodiča a menia sa v čase. Konkrétne sa skúma vplyv prevádzkových parametrov na teplotu vodiča po ich skokovej zmene, t. j. závislosť teploty vodiča od času. V prípade skokovej zmeny teploty okolia, intenzity slnečného žiarenia a prúdu platí medzi týmito parametrami a teplotou vodiča priama úmernosť. Medzi teplotou vodiča a zmenou rýchlosti vetra platí nepriama úmernosť: čím je vyššia rýchlosť vetra, tým nižšia je teplota vodiča. V prípade súčasnej zmeny všetkých prevádzkových parametrov sa podieľajú na zmene teploty vodiča všetky tepelné výkony, ktoré prispievajú k otepleniu/ochladeniu vodiča. Výsledné oteplenie/ochladenie vodiča je závislé od najvýraznejšieho vplyvu. V prípade rozoberanom v tomto článku je to vplyv konvekcie, ktorá súvisí hlavne so zmenou rýchlosti vetra.

Vďaka tomuto matematickému modelu je možné taktiež vypočítať tzv. krátkodobé preťaženie vedenia tak, aby teplota neprekročila povolenú úroveň. Nasadenie výpočtu dynamickej ampacity pri dispečerskom riadení môže významne napomôcť pri riešení kritických situácií, súvisiacich s nadmerným zaťažením vedení.

POĎAKOVANIE

Tento príspevok bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-21-0312.

LITERATÚRA

- [1] CIGRE, Working Group B2.43. „Guide for thermal rating calculation of overhead lines,“ Technical Brochure 601, 2014
- [2] Margitová, Anastázia: Zvyšovanie prenosovej schopnosti vonkajších elektrických vedení výpočtom dynamickej ampacity. Dizertačná práca. Katedra elektroenergetiky FEI TU v Košiciach, 2021
- [3] Štieberová Nikola, „Výpočet dynamickej ampacity vonkajších vedení,“ Diplomová práca, Katedra elektroenergetiky FEI TU v Košiciach, 2020
- [4] Štieberová, Nikola - Beňa, Ľubomír - Margitová, Anastázia – Kanálik Martin: Výpočet parametrov týkajúcich sa dynamickej ampacity vonkajších vedení. In: Electrical Engineering and Informatics XI : proceedings of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics of the Technical University of Košice. 2020 S. 379 - 384. - ISBN 978-80-553-3585-8
- [5] Kanálik, Martin, Margitová, Anastázia, BEŇA, Ľubomír: Temperature calculation of overhead power line conductors based on CIGRE Technical Brochure 601 in Slovakia. In: Electrical Engineering, September 2019, Volume 101, Issue 3, pp 921–933. ISSN: 0948-7921 (Print) 1432-0487 (Online). DOI: 10.1007/s00202-019-00831-8.

ADRESY AUTOROV

doc. Ing. Ľubomír Beňa, PhD., Technická Univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 042 10, Slovenská Republika, lubomir.bena@tuke.sk

Dr. h.c. prof. Ing. Michal Kolcun, PhD., Technická univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 042 10, Slovenská Republika, michal.kolcun@tuke.sk

doc. Ing. Dušan Medveď, PhD., Technická univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 042 10, Slovenská Republika, dusan.medved@tuke.sk

Ing. Marek Pavlík, PhD., Technická univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 042 10, Slovenská Republika, marek.pavlik@tuke.sk

doc. Ing. Zsolt Čonka, PhD., Technická univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 042 10, Slovenská Republika, zsolt.conka@tuke.sk

Ing. Jozef Király, PhD., Technická univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 042 10, Slovenská Republika, jozef.kiraly@tuke.sk