

Michal Špes, Ľubomír Beňa, Miroslav Mikita, Michal Kosterec, Michal Márton

## Analytická klasifikácia vplyvu okolitých podmienok na maximálnu dovolenú hodnotu prúdu vonkajších vedení

V rámci prepojenia elektrizačných sústav po nesprávnej predikcii výroby z obnoviteľných zdrojov dochádzalo k preťažovaniu prenosových vedení, z čoho vyplýva následná potreba výstavby nových prenosových vedení a maximálnom využívaní súčasne existujúcich. Jednou z možností je určovanie dovoleného prúdového zaťaženia vedení pri poznaní okolitých klimatických podmienok. Tento článok sa zaoberá určením maximálneho prúdového zaťaženia vedenia pri zmene jednotlivých okolitých činiteľov. Výpočet je vykonaný pre vodič AlFe 350/59, ktorého využitie je predovšetkým v prenosovej sústave Slovenska.

Kľúčové slová: vonkajšie prenosové vedenia, ampacita vonkajších prenosových vedení, maximálne dovolené zaťaženie

### I. ÚVOD

Ampacita vonkajších prenosových vedení je definovaná ako maximálne dovolená hodnota prúdu, ktorý môže tiecť vedením bez narušenia jeho mechanických a elektrických vlastností. Veľkosť maximálnej dovolenej hodnoty prúdu je určená mechanickými a elektrickými vlastnosťami vodiča, jeho schopnosťou rozptýliť vznikajúce teplo vo vnútri vodiča a od okolitých podmienok [1].

Nutnosť navyšovania prenosovej kapacity vonkajších prenosových vedení sa začala objavovať v posledných rokoch po masovom nasadzovaní obnoviteľných zdrojov elektrickej energie, kedy vplyvom nedostatočnej kapacity vedení severo - južnej trasy v rámci zoskupenia UCTE dochádzalo k preťažovaniu vedení pri nedostatočnej predikcii výroby z obnoviteľných zdrojov elektrickej energie [2].

Z uvedených príčin je nutná výstavba nových prenosových liniek, čo predstavuje značné finančné a aj časovo náročné riešenie. Jednou z ďalších možností je zameranie sa na určovanie maximálnej dovolenej hodnoty prúdu vedení v závislosti od okolitých podmienok prostredia, čo môže poslúžiť pre dispečerské riadenie výkonových tokov na kapacitne nepreťažené vedenia.

### II. TEORETICKÝ ÚVOD DO PROBLEMATIKY AMPACITY VONKAJŠÍCH PRENOSOVÝCH VEDENÍ

Ako bolo spomenuté v predchádzajúcej časti príspevku, pojem ampacita predstavuje maximálnu dovolenú hodnotu prúdu, ktorý môže tiecť vodičom bez narušenia jeho elektrických a mechanických vlastností. Veľkosť ampacity je závislá od elektrických a mechanických vlastností vodiča, od jeho schopnosti rozložiť vznikajúce teplo a od okolitých podmienok [3].

Okolité podmienky predstavujú všetky klimatické podmienky prostredia, v ktorom je umiestnená linka vedenia, a z toho vyplývajúci vodič. Medzi dané klimatické podmienky patrí okolitá teplota, rýchlosť a smer prúdenia vetra, intenzita slnečného žiarenia, zrážková činnosť [3].

Medzi najčastejšie používané typy lán v našej prenosovej sústave patria AlFe láná, ktoré v závislosti od napätovej hladiny, sú usporiadané samostatne alebo vo zväzku. Pre účely tohto článku sa budeme zaoberať vplyvom okolitých podmienok na veľkosť maximálne dovolenej hodnoty prúdu AlFe lana 350/59.

Parametre tohto lana sú uvedené v nasledujúcej tabuľke (Tabuľka 1)

Tabuľka 1  
Parametre skúmaného lana [4]

Typ lana	AlFe 350/59
Priemer lana (mm)	26,39
Prierez lana (mm <sup>2</sup> )	410,80
Menovitá hmotnosť (kg.km <sup>-1</sup> )	1453,01
Merná tiaž (MN.m <sup>-3</sup> )	0,03469
Maximálne dovolené namáhanie (MPa)	108,661
Modul pružnosti (MPa)	74332
Súčiniteľ teplotnej rozťažnosti (1/°C).10 <sup>-6</sup>	18,65
Menovitý jednosmerný odpor (Ω/km)	0,0835

Pre výstavbu vedení v súčasnosti platí norma ČSN EN 50341, kde sa kontroluje maximálna teplota vodiča, pričom odporúčanou maximálnou teplotou je teplota 70 °C. Samotná kontrola teploty vodiča v prípade známej hodnoty prúdu sa vykonáva pre nasledujúce podmienky:

- Prúd vodiča zodpovedá najvyššiemu zaťaženiu,
- Teplota okolia je 35°C,
- Rýchlosť vetra je 0,5 m/s pri uhle nábehu 45°,
- Globálna teplota slnečného žiarenia je 1000W/m<sup>2</sup>,
- Súčiniteľ absorpcie je 0,5 ,
- Súčiniteľ emisivity je 0,5 [5].

Na základe týchto podmienok je možné povedať, že vedenia sú navrhované pre najhoršie možné okolité podmienky tak, aby nedošlo k prekročeniu maximálne dovolenej teploty vodiča. Je nutné skonštatovať, že k uvedeným klimatickým podmienkam dochádza len zriedka, z čoho plynie rezerva pre maximálnu dovolenú hodnotu prúdu, ktorú nie je pri neustále sa meniacich okolitých podmienkach možné dosiahnuť, a teda dané vedenie môže byť preťažované.

### III. URČENIE MAXIMÁLNEJ DOVOLENEJ HODNOTY PRÚDU

Závislosť veľkosti dovolenej hodnoty prúdu na základe elektrických a mechanických vlastností vodiča môžeme za predpokladu, že nedôjde k jeho poškodeniu vplyvom vysokej teploty, považovať za konštantnú danú už pri výrobe.

V prípade hodnotenia okolitých podmienok ako činiteľov, ktoré určujú maximálne dovolené zaťaženie vodiča, je nutné vychádzať z ich premenlivosti v čase.

Rovnovážny teplotný stav vodiča pri uvažovaní okolitých podmienok je možné vyjadriť na základe nasledujúcej rovnice (1), kde ľavú časť rovnice tvoria veličiny podieľajúce sa na zvyšovaní teploty vodiča a pravú časť rovnice tvoria veličiny podieľajúce sa na ochladzovaní vodiča [6].

$$P_Z + P_S + P_C = C_V \cdot \frac{d\Theta}{dt} + P_k + P_r + P_w \quad (1)$$

Kde:

$P_Z$  [W/m] je otepľovanie vodiča prechodom prúdu

$P_S$  [W/m] je otepľovanie vodiča slnečným žiarením

$P_C$  [W/m] je otepľovanie vodiča korónou

$C_V$  [J/K] je tepelná kapacita vodiča

$P_k$  [W/m] je ochladzovanie vodiča prúdením vzduchu

$P_r$  [W/m] je ochladzovanie vodiča sálaním

$P_w$  [W/m] je ochladzovanie vodiča odparovaním vody

V prípade výpočtu sa ohrev vodiča vplyvom koróny zanedbáva. K najvýraznejšiemu tepelnému prírastku vplyvom koróny dochádza predovšetkým počas zrážok, kedy je ochladzovanie vodiča najvyššie, a teda zanedbávame aj príspevok ochladzovania vodiča vplyvom odparovania vody [6].

Pre účely tejto publikácie budeme vychádzať pri riešení uvedenej rovnice zo statického modelu, kedy nedochádza k zmene zaťaženia, k zmene teploty vodiča, a teda bilančná rovnica (1) dostane nasledovný tvar (2) [6].

$$P_Z + P_S = P_k + P_r \quad (2)$$

Pre určenie príspevku jednotlivých okolitých činiteľov na výslednú prúdovú zaťažiteľnosť vodiča budeme vychádzať z počiatkových podmienok definovaných normou ČSN EN 50341, tzn.:

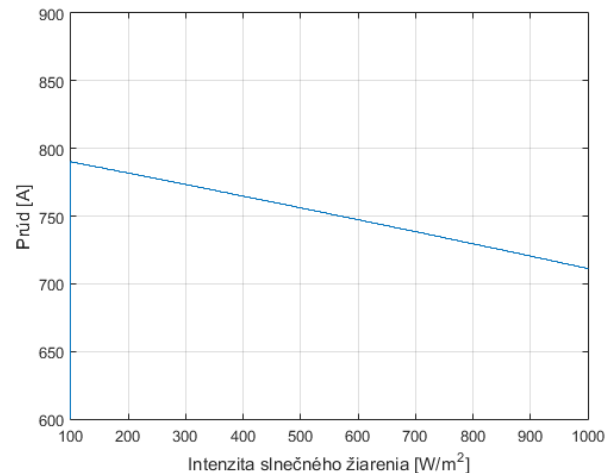
1. Budeme skúmať príspevok slnečného žiarenia pri zmene intenzity slnečného žiarenia v intervale  $100 \text{ W/m}^2 - 1000 \text{ W/m}^2$  pri konštantných okolitých podmienkach daných normou za predpokladu neprekročenia maximálnej odporúčanej teploty AlFe lana 350/59  $70^\circ\text{C}$ ,
2. Budeme skúmať príspevok okolitej teploty v intervale  $-40^\circ\text{C}$  až  $-1^\circ\text{C}$  a v intervale  $+1^\circ\text{C}$  až  $+40^\circ\text{C}$  pri konštantných okolitých podmienkach daných normou za predpokladu neprekročenia maximálnej odporúčanej teploty AlFe lana 350/59  $70^\circ\text{C}$ ,
3. Budeme skúmať príspevok rýchlosti vetra v intervale  $1 \text{ m/s}$  až  $40 \text{ m/s}$  pri konštantných okolitých podmienkach daných normou za predpokladu neprekročenia maximálnej odporúčanej teploty AlFe lana 350/59  $70^\circ\text{C}$ .

#### A. Vplyv slnečného žiarenia na maximálne dovolenú hodnotu prúdu

Slnečné žiarenie dopadajúce na skúmaný vodič je tvorené tromi zložkami, a to priamym žiarením, difúznym žiarením a odrazeným žiarením [6].

Pri určovaní tepelného prírastku je možné s postačujúcou presnosťou vylúčiť odrazené a difúzne žiarenie, ktorých vplyv predstavuje 2 až 4% [6].

Závislosť maximálnej dovolenej hodnoty prúdu na veľkosti intenzity slnečného žiarenia je na nasledujúcom obrázku (Obr. 1)



Obr. 1 Závislosť maximálne dovolenej hodnoty prúdu od intenzity slnečného žiarenia

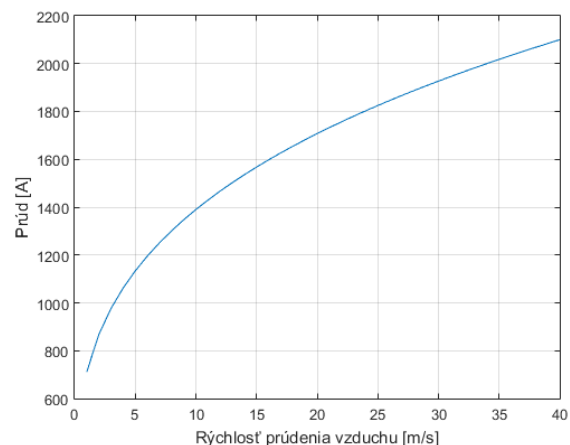
Ako vyplýva z uvedeného obrázku, pri zmene intenzity slnečného žiarenia dochádza k lineárnej zmene maximálne dovolenej hodnoty prúdu. V skúmanom intervale intenzity slnečného žiarenia ( $100 \text{ W/m}^2$  až  $1000 \text{ W/m}^2$ ) dosahovala maximálna dovolená hodnota prúdu pre daný interval  $790.07 \text{ A}$  pri najnižšej intenzite slnečného žiarenia a pri maximálnej intenzite slnečného žiarenia  $711.22 \text{ A}$  pre jeden vodič v trojvzázkovom usporiadaní. Uvedená dovolená prúdová zaťažiteľnosť vodiča pri minimálnej intenzite slnečného žiarenia predstavuje nárast v kapacite vedenia voči stavu s maximálnou intenzitou slnečného žiarenia o 11%.

#### B. Vplyv prúdenia vzduchu na maximálne dovolenú hodnotu prúdu

Prúdenie vzduchu z pohľadu znižovania teploty vodiča predstavuje odovzdávanie energie v makroskopickom meradle, t.j. medzi časticami telesa obsahujúcimi veľké množstvo molekúl. Tento dej je závislý na charaktere hydrodynamickej a hraničnej teplotnej vrstvy, ktorej tvar a veľkosť je ovplyvnená rýchlosťou a smerom prúdenia vzduchu [6].

Pri skúmaní vplyvu prúdenia vzduchu budeme sledovať zmenu maximálnej dovolenej hodnoty prúdu pri rôznej rýchlosti vetra v intervale  $1 \text{ m/s}$  až  $40 \text{ m/s}$  pri uhle nábehu vetra na vedenie  $45^\circ$ .

Závislosť maximálnej dovolenej hodnoty prúdu pri zmene rýchlosti prúdenia vzduchu je na nasledujúcom obrázku (Obr. 2).



Obr. 2 Závislosť maximálne dovolenej hodnoty prúdu od rýchlosti prúdenia vzduchu

Z priloženého obrázku vyplýva, že pri zvyšujúcej sa rýchlosti prúdenia vzduchu dochádza k exponenciálnemu nárastu maximálnej dovolenej hodnoty prúdu. K najvýznamnejšiemu nárastu maximálnej hodnoty prúdu dochádza v intervale rýchlosti prúdenia 1 m/s až 15 m/s, kde došlo k navýšeniu dovoleného zaťaženia z 711.22 A na hodnotu 1567.55 A, čo predstavuje navýšenie o 120% počiatočnej hodnoty.

V intervale skúmaného pôsobenia rýchlosti prúdenia vzduchu na maximálne dovolenú hodnotu prúdu 15 m/s až 40 m/s dochádza takmer k lineárnemu nárastu maximálnej dovolenej hodnoty prúdu z 1567.55 A až na 2099.70 A. Dané navýšenie voči hodnote ampacity pri rýchlosti prúdenia vzduchu 15 m/s predstavuje nárast dovolenej prúdovej zaťažiteľnosti o 131%.

### C. Vplyv sálania na maximálne dovolenú hodnotu prúdu

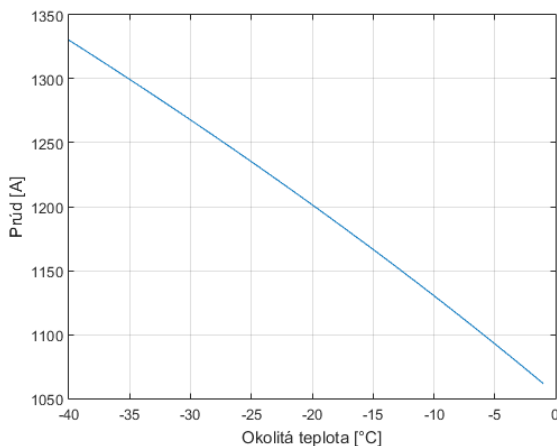
Sálanie predstavuje mechanizmus prenosu tepla, ktoré spočíva v emisiách a absorpciách elektromagnetického žiarenia. Teleso s nenulovou teplotou vyžaruje elektromagnetické žiarenie podľa Planckovho zákona [6] [7].

Celkové množstvo vyžiarenej energie z jednotky plochy telesa rastie s teplotou povrchu. V závislosti od teploty povrchu telesa sa mení spektrum žiarenia. Pri náraste tejto teploty dochádza k zmene spektra ku kratším vlnovým dĺžkam. Každé teleso okrem vlastného vyžarovania zachytáva fotóny vyžiarené okolitými predmetmi. Výsledná energetická bilancia procesu je daná rozdielom vyžiarenej a prijatej energie. Keďže množstvo vyžarovanej energie rastie s teplotou, výsledkom sálania je prenos energie z teplejších telies na telesa chladnejšie [6] [7].

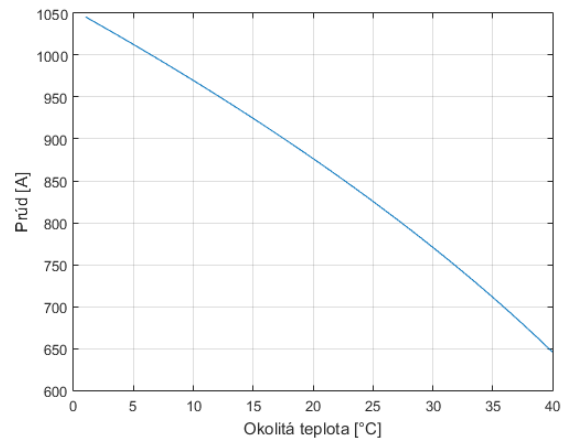
Pre štúdium vplyvu sálania na výslednú prúdovú zaťažiteľnosť budeme vychádzať z predpokladu, že teplota vodiča je konštantná, a to 70 °C. Skúmanou časťou bude vplyv teploty okolia na maximálne dovolené prúdové zaťaženie pri prevádzkovej teplote 70 °C.

Interval skúmania sa bude skladať z dvoch častí, a to v prvom rozsahu -40 °C až -1 °C, v druhom rozsahu budeme skúmať vplyv kladnej okolitej teploty a to v rozsahu 1 °C až 40 °C.

Závislosť maximálnej dovolenej hodnoty prúdu pri zmene okolitej teploty pre prvý a druhý skúmaný interval je na nasledujúcich obrázkoch (Obr. 3, Obr. 4).



Obr. 3 Závislosť maximálnej dovolenej hodnoty prúdu od okolitej teploty prvého skúmaného intervalu



Obr. 4 Závislosť maximálnej dovolenej hodnoty prúdu od okolitej teploty druhého skúmaného intervalu

Ako vyplýva z priložených obrázkov, pri zmene okolitej teploty dochádza rovnako k zmene dovolenej hodnoty prúdu pre vodič *AlFe 350/59*. Táto zmena ampacity vzniká ako priamy dôsledok úpravy činiteľa tepelného úbytku vplyvom sálania ( $P_r$ ), kde pri zvyšovaní teploty okolia dochádza k nepriamo úmernému prirodzenému odvedeniu tepla do okolia.

Z pohľadu veľkosti ampacity v prvom skúmanom intervale dochádza k poklesu dovolenej hodnoty prúdu z 1330.23 A na hodnotu 1061.63 A. V prípade druhého skúmaného intervalu došlo k poklesu dovoleného prúdu z hodnoty 1045.63 A na hodnotu 645.74 A.

Pre prvý skúmaný interval došlo k poklesu o takmer 20.19%, no v druhom skúmanom intervale pri kladnej teplote okolia je táto zmena už výraznejšia. V prípade druhého skúmaného intervalu došlo k poklesu maximálnej dovolenej hodnoty prúdu pre vodič *AlFe 350/59* o 38.24%.

## V. ZÁVER

Určovanie dovoleného prúdového zaťaženia v reálnom čase je jednou z dôležitých a vysoko aktuálnych tém v odborných kruhoch. V posledných rokoch sa objavuje potreba navýšenia kapacity prenosových sústav. Prvou možnosťou je výstavba nových vedení. Táto možnosť predstavuje ale časovo a finančne náročné riešenie. Druhým variantom je maximalizovanie využitia súčasne existujúcich prenosových vedení pri poznaní okolitých podmienok a po zohľadnení ich vplyvu na maximálne dovolené prúdové zaťaženie z pohľadu normou odporúčanej teploty.

V tomto článku sú popísané jednotlivé činitele okolia vplývajúce na maximálne dovolené prúdové zaťaženie pri maximálnej teplote vodiča 70 °C a štúdia ich vplyvu na výslednú ampacitu vedení. Výsledné prúdové zaťaženie bolo skúmané pre jeden vodič v trojzväzkovom usporiadaní jednej fázy napäťovej hladiny 400 kV.

## POĎAKOVANIE

Túto vedeckú prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied grantom VEGA 1/0132/15

## LITERATÚRA

- [1] V. Böhm, A. Popelka, Z. Vostracký, "Ampacita elektrických vedení", sborník CIRED 2010, Tábor
- [2] J. Tlustý, J. Kyncl, J. Švec, "Proudová zatížitelnost lan AlFe", ČVUT, 2005
- [3] A. K. Deb, "Powerline Ampacity System – Theory, Modelling and Applications", CRC Press, c2000. 251 s. ISBN 0-8493-1306-6.
- [4] Š. Fecko, J. Žiaran, L. Varga, "Elektrické siete - Vonkajšie silové vedenia", SVŠT Bratislava, 1990.
- [5] ČSN EN 50341-1 ED.2 (333300) Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 1 kV - Část 1: Obecné požadavky - Společné specifikace
- [6] IEEE Standard for Calculation the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors, IEEE Std 738-1993
- [7] M. Sazima, "Sdílení tepla", ČVUT, 1980

## ADRESY AUTOROV

Ing. Michal Špes, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 041 20, Slovenská Republika, Michal.Spes@tuke.sk

doc. Ing. Lubomír Beňa, PhD., Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 041 20, Slovenská Republika, Lubomir.Bena@tuke.sk

Ing. Miroslav Mikita, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 041 20, Slovenská Republika, Miroslav.Mikita@tuke.sk

Ing. Michal Kostelec, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 041 20, Slovenská Republika, Michal.Kostelec@tuke.sk

Ing. Michal Márton, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií, Vysokoškolská 4, Košice, SK 040 01, Slovenská republika, Michal.Marton.@tuke.sk