

Vliv sdílení tepla radiací a prouděním na ohřev AlFe lana VVN pod zátěží

D. Rot¹, J. Kožený¹

¹Katedra elektroenergetiky a technické ekologie, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,
Univerzitní 26, Plzeň

E-mail : rot@kee.zcu.cz, kozyeny@kee.zcu.cz

Anotace:

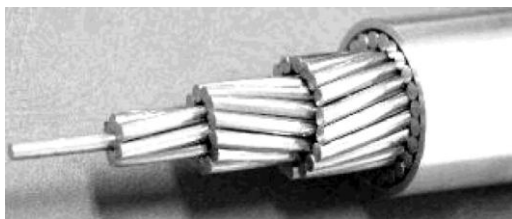
Tento článek se zabývá problematikou ampacity vodiče VVN. Motivací k tomuto příspěvku je stále se zvyšující počet obtížně říditelných obnovitelných zdrojů elektrické energie připojovaných do energetické soustavy, čímž jsou kladeny stále vyšší nároky na přenosovou soustavu a především na její efektivní řízení. Proto se objevují snahy provozovatelů energetických sítí efektivně řídit přenosovou soustavu v závislosti na přenášeném výkonu a aktuálních meteorologických podmínkách v jejím okolí. Stále více se tedy v problematice energetických distribučních sítí objevuje téma ampacity vodiče. Prvním krokem k efektivnímu řízení však je znalost, jakým způsobem se AlFe vodič za různých okolních podmínek a v závislosti na aktuálním zatížení bude chovat. Právě přiblížení chování AlFe vodiče za různých okolních podmínek si klade za cíl tento článek.

This article deals with the high voltage conductor ampacity. The motivation for this paper is the increasing number of hard-controllable renewable electricity sources connected to the power system. Due to this fact there are increasing demands put on the transmission systems and, especially, to their effective management. Therefore, there are efforts from energy network operators to effectively manage the transmission system according to the transmitted power and current weather conditions. Increasingly, therefore, the issue of conductor's ampacity gets discussed in the area of energy distribution networks. The first step towards effective management of transmission systems is to understand how AlFe ropes operate under different environmental conditions and different actual load. Exploring closer the behavior of AlFe rope under different environmental conditions is the aim of this article.

ÚVOD

Účelem tohoto příspěvku tedy je zhodnotit, jakým způsobem se bude za různých okolních podmínek (teplota vzduchu, koeficient přestupu tepla prouděním, teplota okolí a emisivita) a počátečních podmínek (hodnota procházejícího proudu) chovat AlFe lano. Snahou je tedy analyzovat a vyhodnotit vliv sdílení tepla radiací a prouděním na ohřev AlFe lana pod zátěží. K modelování byl zvolen profesionální multifyzikální software ANSYS, pomocí kterého byly prověřeny vytipované stavy přenosové soustavy při uvažování různých meteorologických podmínek v jejím okolí.

Nejdříve vznikl model válcového vodiče, na kterém byly provedeny první simulace pro stanovení základní představy o chování vodiče za různých okrajových podmínek a který byl ověřen analytickým výpočtem. Následně pak vznikl přesný model AlFe lana (54Al/7Fe) a obdržené výsledky ze všech tří zdrojů byly následně porovnány.



Obr. 1 Ilustrativní obrázek AlFe lana

MATEMATICKÝ MODEL

Nejprve byl analyticky stanoven průběh proudové hustoty ve válcovém vodiči o poloměru 0,0135 m, při $I_{ef} = 850$ A a $f = 50$ Hz. Následně vznikl model téhož válcového vodiče v software ANSYS a bylo provedeno porovnání rozložení proudové hustoty a následně i Jouleových ztrát. Po verifikaci byl vytvořen přesný model AlFe lana, který byl velice náročný a vyžádal si mnoho času. Oba modely ze software ANSYS pak byly porovnány i z hlediska celkových ztrát na 1 m délky a i toto srovnání dopadlo podle očekávání. Vzhledem ke skutečnosti a teplotnímu rozsahu, ke kterému během provozu vodiče dochází, byly obě úlohy pomocí software ANSYS řešeny jako slabě sružené. Řešení tedy spočívá ve výpočtu rozložení elektromagnetického pole (EMP) prostřednictvím vektorového potenciálu a následně řešení teplotního pole pomocí Fourier-Kirchhoffovy rovnice. V tomto příspěvku jsou ukázány výsledky pro efektivní hodnotu proudu 850 a 950 A za různých okolních podmínek.

Při řešení elektromagnetického pole je uvažován povrchový jev a EMP ve vodiči je popsáno pomocí

$$\text{rovnice } -\Delta \mathbf{A} + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mu \mathbf{J}_v \quad \text{při uvažování}$$

Dirichletovy okrajové podm. $\mathbf{A}(\Gamma, t) = \mathbf{A}_\Gamma(\Gamma, t)$, na vnější hranici/okraji okolního prostředí. Rozložení

vektorového potenciálu v AlFe lanu pak ukazuje následující obrázek.

Počáteční podmínka $A(\Omega, t = 0) = A_0(\Omega)$.

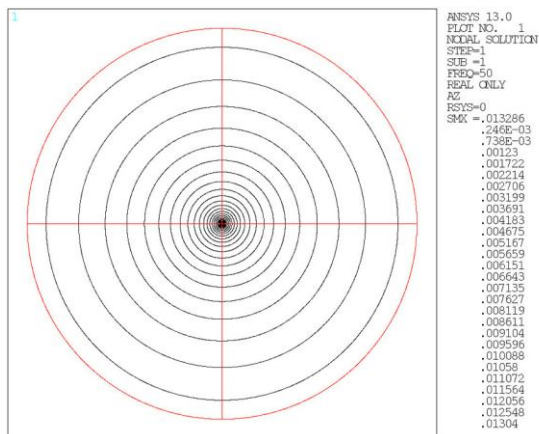
Teplotní pole bylo řešeno pomocí Fourier-Kirchhoffovy rovnice

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div}(-\lambda \text{grad} T) + w_j,$$

při uvažování smíšené okrajové podmínky

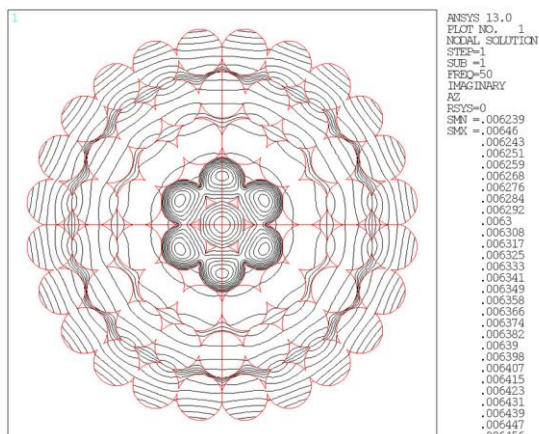
$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_{\text{gas}} - T) + \varepsilon c(T_{\text{ext}}^4 - T^4) \text{ na povrchu}$$

vodiče, tedy proudění a sálání. Pro úplnost je uvedena i použitá počáteční podmínka $T(\Omega, t = 0) = T_0$. Pro některé výpočty byla F-K rovnice použita ve stacionárním stavu.



Obr. 2 Celý model AlFe lana včetně rozložení siločar

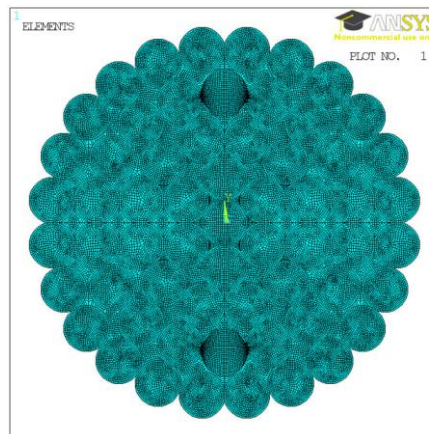
Obr. 2 ukazuje rozložení izolinií vektorového potenciálu v celém řešeném modelu AlFe lana. Obr. 3 pak ukazuje totéž v detailu vodiče. Z obrázku je zároveň možné udělat si představu o řešené geometrii AlFe lana. Průměr jednotlivých vodičů jak Al tak Fe je 3 mm, průměr jádra je pak 9 mm a průměr celého lana je 27 mm.



Obr. 3 Rozložení siločar uvnitř AlFe lana

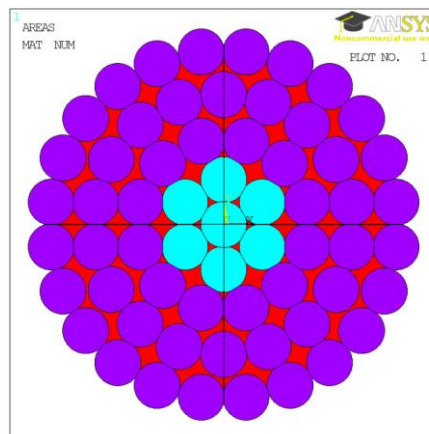
Celé AlFe lano je složeno z 54 jednotlivých vodičů Al a 7 jednotlivých vodičů Fe. Tento vodič je např. použit na vedení VVN V444 - Nošovice - Wielopole(PL).

Obr. 4 ukazuje diskretizovaný model AlFe lana, hloubka vniku pro Al je ~0,012 m, diskretizace je tedy z hlediska korektního řešení elektromagnetického pole více než dostatečná a je zaručené správné respektování povrchového jevu v celém AlFe laně.



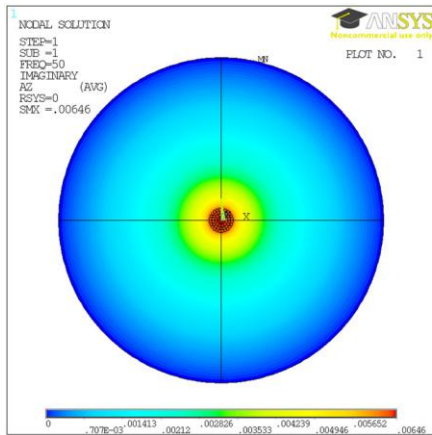
Obr. 4 Diskretizovaný model AlFe lana

Obr. 5 barevně zobrazuje jednotlivé materiály (Al, Fe, vzduchové mezery) ze kterých je model vytvořen.

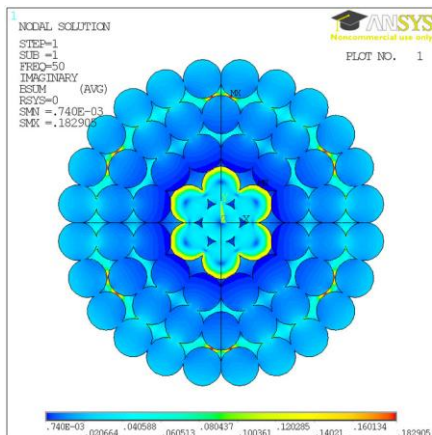


Obr. 5 Použité materiály, fialová-Al, modrá-Fe, červená-vzduch

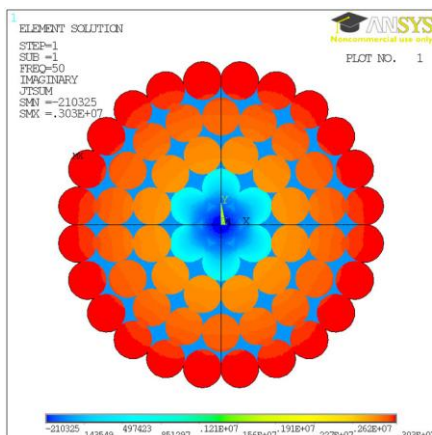
VÝSLEDKY



Obr. 6 Rozložení vektorového potenciálu v celém modelu [Wb/m]
Obr. 6 ukazuje rozložení vektorového potenciálu na celém modelu.



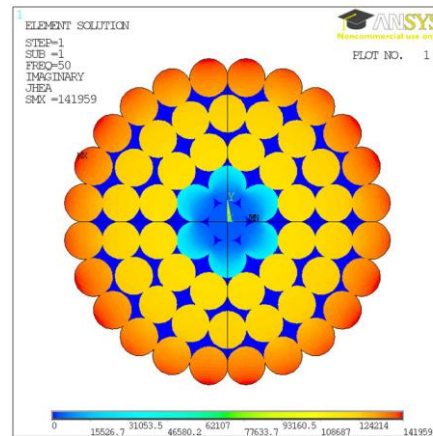
Obr. 7 Rozložení indukce ve vodiči AlFe lana [T]



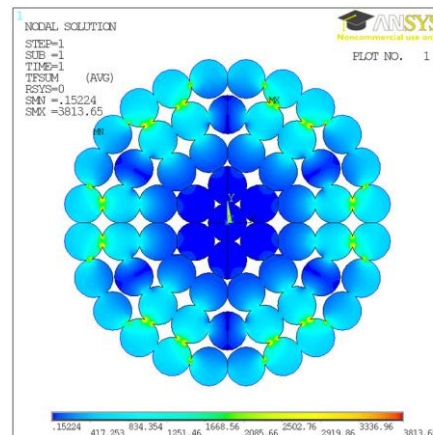
Obr. 8 Rozložení proudové hustoty ve vodiči AlFe lana [A/m²]

Obr. 8 ukazuje rozložení proudové hustoty v celém AlFe lanu s respektováním povrchového jevu.

Obr. 9 pak rozložení Jouleových ztrát. Je patrné, že rozložení koresponduje s rozložením proudové hustoty.



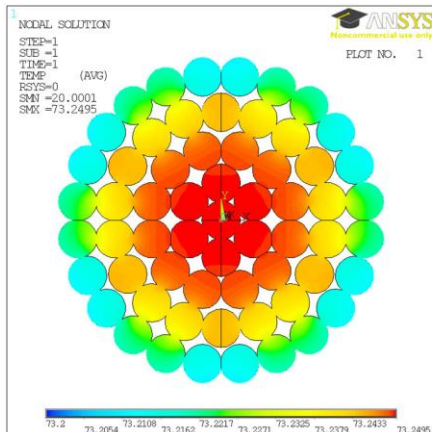
Obr. 9 Rozložení Jouleových ztrát ve vodiči AlFe lana [W/m³]



Obr. 10 Rozložení tepelného toku ve vodiči AlFe lana [W/m²]

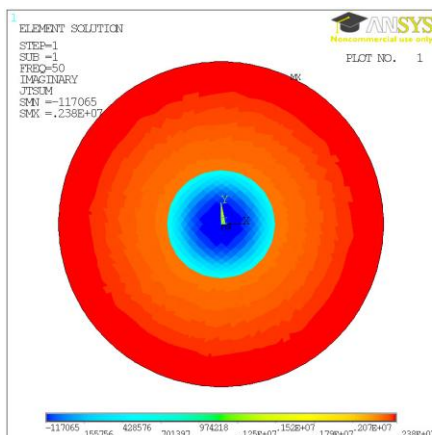
V modelu, který byl vytvořen podle skutečného AlFe vodiče vedeného pod kódovým označením 382-AL1/49-ST1A dochází k tomu, že se všechny jednotlivé vodiče vzájemně nedotýkají, což má za následek rozložení tepelného toku tak, jak ukazuje Obr. 10 tedy maxima tepelného toku v místech dotyku jednotlivých vodičů. Uvedené skutečnosti pak mají vliv i na rozložení teplotního pole ve vodiči AlFe lana.

Obr. 11 pak konkrétně ukazuje rozložení teplotního pole v ustáleném stavu. Při výpočtu tohoto teplotního pole byla uvažována konstantní hodnota koeficientu přestupu tepla prouděním $7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, příslušná teplota obtékajícího vzduchu pak byla uvažována $25 \text{ }^\circ\text{C}$, emisivita byla uvažována na hodnotě 0.3 a příslušná teplota okolních ploch byla uvažována $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

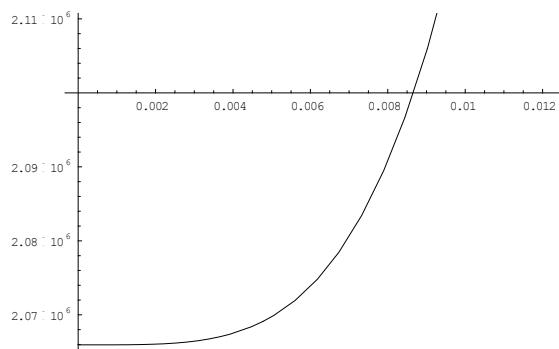


Obr. 11 Rozložení teplotního pole ve vodiči AlFe lana [°C]

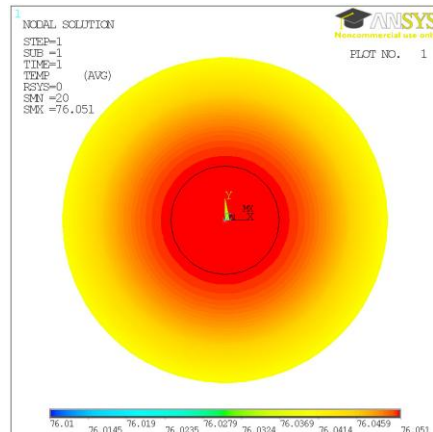
Pro úplnost a pro srovnání pak ještě uvádíme výsledky z řešení válcového vodiče (rozložení proudové hustoty a teplotního pole) za stejných parametrů jako tomu bylo v případě AlFe lana Obr. 12. Z analytických výpočtů pak uvádím průběh proudové hustoty z modelu plného válcového vodiče (bez Fe jádra) Obr. 13.



Obr. 12 Rozložení proudové hustoty ve válcovém vodiči [A/m²]



Obr. 13 Rozložení proudové hustoty určené analytickým výpočtem (hodnota proudové hustoty na okraji vodiče $2,260731 \cdot 10^6$) [A/m²]
Na svislé ose je uvedena proudová hustota [A/m²], na vodorovné ose pak poloměr [m]



Obr. 14 Rozložení teplotního pole ve zjednodušeném válcovém modelu AlFe lana

Porovnáním Obr. 14 s Obr. 13 je vidět, že teplota je na obou obrázcích téměř stejná i když v modelu AlFe lana se vytvoří větší proudová hustota než je tomu v případě válcového vodiče, což je způsobeno tím, že i když je vnější průměr celého vodiče v obou případech stejný, vodivého materiálu je v případě AlFe lana méně než v případě válcového vodiče. Při stejném proudu vloženém do obou vodičů je proudová hustota v AlFe lanu větší než ve válcovém vodiči. AlFe lano by se tedy mělo ohřívat na vyšší teplotu než je tomu v případě válcového vodiče, ale skutečnost je opačná. To je způsobeno tím, že v případě AlFe lana je větší i povrch, kterým se lano ochlazuje pomocí proudění a sálání, než je tomu v případě válcového vodiče.

Při řešení byl vytvořen skript pro program ANSYS, který dovoluje libovolně měnit okrajové a počáteční podmínky výpočtu a tím získat libovolné řešení pro zadané parametry. Tzn. ve skriptu se pouze změní požadované parametry výpočtu a výpočet pak proběhne automaticky. Parametry výpočtu je možné měnit i pomocí libovolného cyklu a tím jednoduše získávat komplexní analýzu teplot povrchu vodiče při automaticky generovaných parametrech okolí ve zvoleném rozsahu. Jen pro ukázkou uvádím následující tabulky a graf, které ukazují výslednou teplotu vodiče v ustáleném stavu pro zvolené parametry, které jsou vždy uvedeny v řádce tabulky před teplotou.

Tab. 1 ukazuje výslednou teplotu válcového vodiče pro libovolně zadané parametry. Zároveň se lze z tabulky dozvědět jaký proud (efektivní hodnota) byl do vodiče vložen a jaké byly celkové ztráty na 1 m délky vodiče.

Vodič					
	α	ϵ	T vzduchu	T okoli	T vodiče
	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]
I=850 A	1	0,1	10	10	213
	3	0,2	15	15	116
41 W/m velikost ztrát při 20 °C	5	0,3	20	20	85
	7	0,4	25	25	73
	9	0,5	30	30	67
	11	0,6	35	35	65
	13	0,7	40	40	66
I=950 A	1	0,1	10	10	245
	3	0,2	15	15	136
52 W/m velikost ztrát při 20 °C	5	0,3	20	20	100
	7	0,4	25	25	84
	9	0,5	30	30	76
	11	0,6	35	35	73
	13	0,7	40	40	72

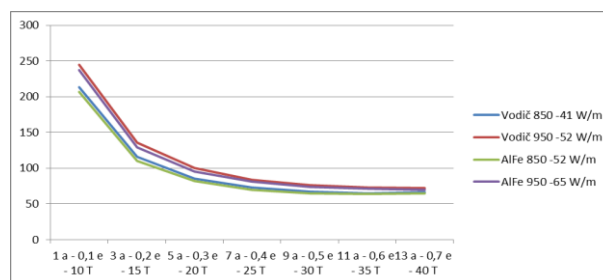
Tab. 1 Tabulka výsledné teploty válcového vodiče při daných parametrech ohřevu, uvedené ztráty na 1 m délky odpovídají počáteční teplotě vodiče 20 °C

Opětným porovnáním obou tabulek dojdeme ke stejnému závěru jako v předchozí úvaze, tedy že při různých geometriích obou vodičů jsou teploty AlFe lana i válcového vodiče podobné. Za určitých okolností by tedy bylo možné AlFe lano válcovým vodičem nahradit a dosáhnout přijatelně přesného výsledku.

AlFe					
	α	ϵ	T vzduchu	T okoli	T vodiče
	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]
I=850 A	1	0,1	10	10	207
	3	0,2	15	15	110
52 W/m velikost ztrát při 20 °C	5	0,3	20	20	82
	7	0,4	25	25	70
	9	0,5	30	30	65
	11	0,6	35	35	64
	13	0,7	40	40	65
I=950 A	1	0,1	10	10	237
	3	0,2	15	15	129
65 W/m velikost ztrát při 20 °C	5	0,3	20	20	95
	7	0,4	25	25	81
	9	0,5	30	30	74
	11	0,6	35	35	71
	13	0,7	40	40	70

Tab. 2 Tabulka výsledné teploty válcového vodiče při daných parametrech ohřevu, uvedené ztráty na 1 m délky odpovídají počáteční teplotě vodiče 20 °C

Pro zkoumané varianty vodičů a uvažovanou proudovou zátěž se celkové ztráty na 1 m délky vodiče pohybovaly mezi 40-60 W/m.

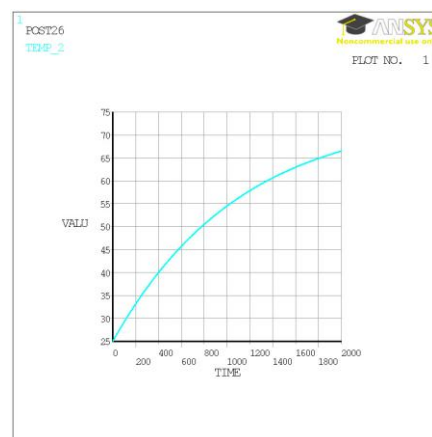


Graf 1 Průběhy teplot na povrchu AlFe lana a válcového vodiče v závislosti na parametrech ohřevu (alfa, epsilon, teplota vzduchu, teplota okolí), (svislá osa ukazuje teplotu na povrchu vodiče, vodorovná pak velikost zvolených parametrů řešení)

Všechny zde uváděné výsledky teplotního pole byly získány jeho stacionární analýzou. Nicméně vytvořený model/skript umožňuje i tranzientní řešení teplotního pole.

V tomto případě však šlo o to zjistit, jakých maximálních teplot vodiče by při zvolených parametrech bylo dosaženo.

Obr. 15 ukazuje řešení tranzientního teplotního pole, konkrétně průběh teploty ve sledovaném bodě na povrchu vodiče, je vidět že přibližně po půl hodině se začíná teplota vodiče ustalovat.



Obr. 15 Průběh ustalování teploty vodiče [°C; s]

ZÁVĚR

Snahou tohoto příspěvku bylo podhalit problematiku ampacity vodiče. Proto vznikl uvedený model AlFe lana, který bude dále testován při různých počátečních a okolních podmínkách, takových, které by mohly nastat v reálném provozu. Snahou bude především analyzovat a vyhodnotit vliv sdílení tepla sáláním a prouděním na oteplování vodiče při provozu vedení VVN. Dále budou modelovány pomocí specializovaného software vytvářené stavy přenosové soustavy při uvažování různých meteorologických podmínek (okrajových podmínek) v jejím okolí. Momentálně je

ve vytvořeném modelu/skriptu uvažována konstantní hodnota proudění i sálání po celém obvodu vodiče, ale i toto je možné individuálně po obvodu nastavit tak, aby to přesněji odpovídalo umístění AlFe vodičů na volném prostranství, především toto bude další snahou pro získání přesnějších výsledků. Momentálně tedy nebyl uvažován vliv záhytu slunečního záření a obecně různá teplota okolí pro uvažování konvekce i sálání, ale respektování těchto vlivů bude postupně do modelu zakomponováno.

Cílem je tedy vznik univerzálního skriptu pro simulaci libovolných kombinací proudového zatížení (počátečních podmínek) vodiče a stavu okolního prostředí (okrajových podmínek). Předpokládáné výsledky (určení maximální hodnoty proudu lanem pro dané hodnoty koeficientu přestupu tepla, emisního činitele, teploty vodiče, teploty okolního vzduchu a teploty okolních ploch) pak mohou pomoci při řízení provozu vedení VVN.

LITERATURA

- [1] HALLER, R., KOŽENÝ, J. Influence of thermal radiation on heat transfer in electrical equipment. *Acta Technica ČSAV*, 2010, roč. 55, č. 2, s. 209-221.
- [2] VOSTRACKÝ, Z., HALLER, R. Impact of radiation on the thermal behaviour of a overhead line rope. In *12 th International Scientific Conference Electric Power Engineering*. Ostrava : VSB - Technical University of Ostrava, 2011, s. 615-618.
- [3] VOSTRACKÝ, Z., HALLER, R., KOŽENÝ, J., SEDLÁČEK, J., ROT, D., a kol. Možnosti proudového zatěžování VVN/ZVN I. etapa, výzkumná zpráva ČEPS as. 2010
- [4] VOSTRACKÝ, Z., HALLER, R., KOŽENÝ, J., SEDLÁČEK, J., ROT, D., a kol. Možnosti proudového zatěžování VVN/ZVN II. etapa, výzkumná zpráva ČEPS as. 2011