

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv dynamického zatěžování na spojky přípojnic

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Tato předkládaná diplomová práce je zaměřena na provedení simulace oteplení lanových spojek přípojnic a řešení aktuálního stavu problematiky pro dynamické zatěžování těchto spojek. Součástí diplomové práce jsou výstupy z konkrétních simulací pro různé klimatické stavy zatížení. Tyto simulace byly vytvořeny v prostředí programu COMSOL a ověřují teoretické předpoklady.

Klíčová slova

Lanová spojka trubkových vodičů přípojnice, dynamická zatížitelnost vodičů, Jouleovy ztráty, simulace v COMSOL.

Abstract

The Master thesis is aimed on the making of simulation of bus-bar joints heating and on the information research in the area of the dynamic line rating of mechanical bus-bar joints. The part of the thesis is outputs from the exemplary simulations which are made under different climate conditions. These simulations are made in program COMSOL and verify the theoretical presumptions.

Key words

Mechanical bus-bar joint, dynamic line rating, Joule's losses, simulation in COMSOL.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 5.5.2015

Aleš Boublík

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jaroslavu Šnajdrovi za odborné rady, připomínky a cenné konzultace.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD.....	11
1. ELEKTRICKÉ STANICE.....	12
1.1 ROZVODNÉ ZAŘÍZENÍ STŘÍDAVÉHO ELEKTRICKÉHO PROUDU	12
1.2 SOUČÁSTI ROZVODNÉHO ZAŘÍZENÍ	12
1.3 SYSTÉMY PŘÍPOJNIC.....	13
1.4 MECHANICKÉ SPOJKY VODIČŮ PŘÍPOJNIC.....	13
2. OTEPLOVÁNÍ LANOVÝCH PŘÍPOJNICOVÝCH SPOJEK.....	14
2.2 JOULEOVY ZTRÁTY VE VODIČÍCH PŘI PRŮCHODU STEJNOSMĚRNÝM PROUDEM	14
2.3 JOULEOVY ZTRÁTY V HOMOGENNÍCH A NEMAGNETICKÝCH VODIČÍCH PŘI PRŮCHODU STŘÍDAVÝM PROUDEM	15
2.4 ŠÍŘENÍ TEPLA VODIČEM	16
2.4.1 <i>Vedení</i>	16
2.4.2 <i>Proudění</i>	17
2.4.3 <i>Sálání</i>	18
2.4.4 <i>Sluneční záření</i>	19
2.4.5 <i>Výměna tepelné energie mezi tělesy zářením</i>	20
2.4.6 <i>View Factor</i>	21
2.4.7 <i>Vypařování vody, koróna</i>	24
3. ZATÍŽITELNOST VODIČŮ	25
3.1 STATICKÉ HODNOCENÍ ZATÍŽENÍ.....	25
3.2 DYNAMICKÉ HODNOCENÍ ZATÍŽENÍ.....	25
3.3 TECHNOLOGIE ZVYŠOVÁNÍ PŘENOSOVÉ KAPACITY	25
3.3.1 <i>Řešení pomocí monitorování v reálném čase</i>	26
3.4 DIMENZOVÁNÍ VODIČŮ	27
3.5 STÁRNUTÍ KONTAKTNÍHO ÚSTROJÍ.....	28
4. TVORBA MODELU OHŘEVU LANOVÉ SPOJKY	31

4.1 TVORBA 3D CAD MODELU.....	31
4.2 POPIS PROGRAMU COMSOL	32
4.3 SIMULACE V PROGRAMU COMSOL	33
4.3.1 Simulace se zřetelem na vliv kontaktů.....	34
4.3.2 Simulace pro znázornění skin efektu v proudovodných lanech.....	36
4.3.3 Simulace ohřevu průchodem střídavého proudu.....	39
4.3.4 Simulace se zřetelem na předávání tepla sáláním (view factor analýza)	44
4.3.5 Simulace se zřetelem na sluneční ohřev.....	47
4.3.6 Simulace se zřetelem na emisivitu povrchu.....	49
4.4 SROVNÁNÍ SIMULACE S ANALYTICKÝM VÝPOČTEM	50
4.5 NÁVRH ZADÁNÍ NÁSLEDUJÍCÍ ETAPY.....	52
ZÁVĚR	53
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	54

Seznam symbolů a zkratek

Δv	Oteplení vodiče [K]
α, β, γ	Teplotní součinitelé [-]
\bar{q}	Hustota tepelného toku [W/m^2]
A_i, A_j	Plocha [m^2]
c_p	Měrná tepelná kapacita [J/K]
D	Průměr [m]
F_{ij}	View factor [-]
g	Gravitační zrychlení [m^2/s]
Gr	Grashofovo číslo [-]
H	Celkové záření [W/m^2]
I	Elektrický proud [A]
I_s	Intenzita slunečního záření [W/m^2]
J	Proudová hustota [A/m^2]
J	Radiozita [W/m^2]
k	Faktor provedení [-]
k_{AC}	Činitel povrchového jevu [-]
L	Délka, rozměr [m]
L	Lorenzovo číslo [$W\Omega/K^2$]
n_i, n_j	Normály ploch
Nu	Nusseltovo číslo [-]
P	Činný výkon, ztráty [W]
P_{jDC}	Jouleovy ztráty ve vodiči pro střídavý proud [W]
P_{jDC}	Jouleovy ztráty ve vodiči pro stejnosměrný proud [W]
Pr	Prandtlovo číslo [-]
R	Odpor vodiče [Ω]
R_0	Odpor vodiče při teplotě 0 °C [Ω]
Re	Reynoldsovo číslo [-]
R_j	Rezistance spoje [Ω]
R_r	Referenční hodnota spoje [Ω]
S	Průřez, Plocha [m^2]
T	Teplota [K]

T_{amb}	Teplota okolí [K]
T_c	Teplota vodiče [K]
$T_{c(n)}$	n -tá hodnota teploty vodiče [K]
$T_{c(n+1)}$	$n+1$. iterace teploty vodiče
$T_{max, min}$	Maximální, minimální teplota [K]
V	Objem [m^3]
w	Rychlost objemu tekutiny [m/s]
α	Koeficient přestupu tepla prouděním [$W/m^2 \cdot K$]
δ	Tloušťka mezní vrstvy [m]
δ_{Al}	Hloubka vniku hliníku [m]
ΔT	Rozdíl teplot [K]
$\Delta U_{j,r}$	Úbytky napětí [V]
ε	Emisivita sálání [-]
λ	Tepelná vodivost [W/mK]
ρ	Měrný odpor [$\Omega \cdot m$]
ρ	Hustota [kg/m^3]
σ_B	Stefan-Boltzmannova konstanta [$W/(m^2 \cdot K^4)$]
ν	Kinematická viskozita [m^2/s]
$q_{i \rightarrow j}$	Celková míra vyzáření a zachycení
θ_i, θ_j	Úhel [°]

Úvod

V této práci se zabývám popisem lanových spojek trubkových vodičů přípojníc. Popisuji jejich ohřev vlivem průchodu proudu a vlivem klimatických podmínek, dále se zabývám také šířením tepla vodičem.

V další části popisuji dynamickou zatížitelnost vodičů, protože proudová zatížitelnost vodičů není stálá, ale mění se v závislosti na změnách klimatických podmínek a dalších parametrů. Toto téma je v poslední době velice diskutovanou záležitostí, protože energetika jako celek je ovlivňována zásadními událostmi. Zcela se otevřel trh s elektřinou a plynem, podíl obnovitelných zdrojů na výrobě elektřiny stále stoupá, mění se veřejné postoje k jaderné energetice, nároky na přenosovou soustavu se neustále zvyšují a diskuze o využití primárních zdrojů a paliv v Evropě se vyhrocují.

V poslední části se nachází výstupy ze simulací, které jsem vytvořil v prostředí programu COMSOL. V těchto konkrétních simulacích se zabývám změnou zatížitelnosti a teploty vodiče v ustálených stavech vlivem změny jednotlivých klimatických podmínek.

1. Elektrické stanice

Elektrizační soustava je tvořena výrobkami, přenosem, rozvodem a spotřebiči elektrické energie. Elektrické stanice tvoří základní spojovací prvek mezi výrobkami, rozvodnou sítí a ve vlastní rozvodné síti mezi sítí a spotřebiči. Hlavní úkol elektrických stanic je transformace napětí a rozdělení elektrické energie na různé hodnoty napětí. Další funkcí je přeměna střídavého napětí na stejnosměrné napětí a opačně.

1.1 Rozvodné zařízení střídavého elektrického proudu

V elektrické stanici plní rozvodné zařízení důležitý úkol, tj. rozvod elektrické energie při stejném napětí. Zahrnuje všechny přístroje nutné k rozvodu elektrické energie [1].

Rozvodná zařízení jsou dimenzována na tyto základní veličiny:

- největší provozovací napětí patřící ke jmenovité (normalizované) hodnotě,
- jmenovitý proud,
- zkratová odolnost [2].

Jmenovité proudy pro přípojnice a odbočky pro rozvodná zařízení jsou: 100, 200, 400, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000, 12500, 16000, 20000 [A] [1].

1.2 Součásti rozvodného zařízení

Základní prvky, které tvoří rozvodná zařízení, jsou přípojnice a odbočky. Základní schéma rozvodného zařízení se volí tak, aby byly splněny požadavky na provoz, bezpečnost a hospodárnost.

Přípojnicové vodiče jsou holé vodiče, mohou být tuhé nebo lanové, jejich profil je dán proudovým zatížením, který je na ně kladen. Dále jsou na ně kladeny požadavky na pevnost a zkratové poměry [1]. Přípojnice jsou tvořeny vodiči, ke kterým je energie přivedena přívodními odbočkami a odvedena ke spotřebičům skrze napájecí nebo vývodové odbočky [2]. Pokud mluvíme o přípojnicovém systému, máme na mysli soubor více fází přípojnic.

Přístroje, sloužící ke spínání, měření, ochraně vývodů, přívodů elektrické energie, spínačů přípojnic apod., jsou propojeny a dohromady tvoří systémy odboček [2].

1.3 Systémy přípojníc

Přípojnice se v rozvodných zařízeních na hladinách NN a VN vyrábí především z holých tyčí z elektrovodného hliníku [2]. Elektrovodný hliník má čistotu až 99,5%, jeho elektrická vodivost je zhruba 60% vodivosti mědi, avšak je až tři krát lehčí než měď.

Profil tyčí je různý, může být plochý, kruhový, či jiný v závislostech na kladených požadavcích. V rozvodných zařízeních VVN venkovního provedení se nejčastěji používala ocelohliníková AlFe lana, popř. svazkové vodiče s rozpěrkami. Avšak v poslední době, kdy se velká část rozveden provozuje více než 40 let, dochází k rekonstrukcím elektrických stanic. A pro vodiče přípojníc se kvůli svým vlastnostem, zejména pak díky úspoře místa, volí holé trubkové vodiče přípojníc.

Holé vodiče přípojníc jsou lehké a dosahují větší tvrdosti než kabely se stejnou ampacitou. Tím dosahujeme většího volného rozpětí, menšího počtu podpěrných bodů a na body základny jsou vyvíjeny menší zatížení než u kabelů [3].

Provozní stav (zatěžovací proud a napětí) a poruchový stav (tepelné a dynamické účinky zkratového proudu) udává požadavky kladené na průřez a uspořádání přípojnicových systémů. V případě značného proudového zatížení se používají paralelní tyče [1].

Díky tomu, že jsou tvořeny ze slitin hliníku, které odpovídají normě, mají vysokou elektrickou vodivost a jsou trvale odolné vůči korozi. Čím čistší hliník je, tím lépe odolává korozi. Pro elektrické přípojnice se používají slitiny splňující normu ČSN EN 755-2. Mají hladký povrch, nevyžadují údržbu a mají velmi dlouhou životnost [3].

Přírodní vlastnosti hliníku jsou takové, že hliníková přípojnice nepotřebuje téměř žádnou údržbu. Jelikož jsou odolné vůči korozi, tak se nemusí ošetřovat ochrannými nátěry či laky, tím se také přispívá k ochraně životního prostředí [3]. V elektrických stanicích se však holé vodiče lakují výraznou barvou zejména kvůli bezpečnosti osob.

1.4 Mechanické spojky vodičů přípojníc

Mechanických spojek se vyrábí celá řada. Dělí se podle toho, jakou funkci mají plnit. Mohou to být například spojky pro svorníky, praporce přístrojů, odbočování, zkratovací soupravy, rozpěrky a jiné. Mechanické spojky pro vodiče přípojníc mohou být buď pevné nebo kluzné. Většinou slouží k upevnění či podepření vodičů, nebo ke spojení vodičů na podpěrných izolátorech.

Svorky musí být vyrobeny z takových materiálů, aby byly schopny splňovat

vyhovující fyzikální požadavky na přenos elektrického proudu. A nesmí kvůli nim docházet k nežádoucímu vzájemnému elektrochemickému působení s vodičem.

Poměrný přechodový odpor svorky musí být menší, nebo stejný, jako odpor stejné délky vodiče, pro který je svorka určena. Svorky musí mít oteplení menší, než má příslušný vodič, na který bude svorka instalována. Svorky musí odolat takovým zkratovým proudům, aby byly schopny přenášet krátkodobý zkratový proud alespoň po dobu 1 sekundy [4].

2. Oteplování lanových přípojnicových spojek

Jelikož se při průchodu elektrického proudu vodičem ohřívají tzv. Jouleovým teplem, ohřívají se tímto teplem i lanové přípojnicové spojky. Mechanické přípojnicové spojky jsou vyrobeny z elektricky vodivého materiálu, kterými taktéž proud prochází.

2.2 Jouleovy ztráty ve vodičích při průchodu stejnosměrným proudem

Při průchodu stejnosměrného proudu vodičem vzniká ztrátový výkon [5], který je popsán vztahem:

$$P = \int_V J^2 \cdot \rho \cdot dV [W] \quad (2.1)$$

kde J vyjadřuje proudovou hustotu [A/m^2], ρ vyjadřuje měrný odpor [$\Omega \cdot m$], V vyjadřuje objem vodiče [m^3].

Pakliže bereme v úvahu homogenní vodič o délce l a průřezu S , pak můžeme rovnici (1) zapsat jako:

$$P = J^2 \cdot \rho \cdot V = J^2 \cdot \rho \cdot l \cdot S = RI^2 [W], \quad (2.2)$$

kde R vyjadřuje odpor vodiče a I proud protékající vodičem.

S rostoucím oteplením vodiče Δv se zvětšuje i jeho odpor. V takovém případě lze odpor vodiče spočítat jako:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta v + \beta \cdot \Delta v^2 + \gamma \cdot \Delta v^3 + \dots) [\Omega], \quad (2.3)$$

kde R_0 odpovídá hodnotě odporu vodiče při $0^\circ C$, α, β, γ jsou pak teplotní součinitelé.

Pokud se pohybujeme s výpočty v rozmezích teplot od 0 do 100 °C, tak se obvykle respektuje pouze první člen, takže se předchozí vztah zjednodušuje:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta v) \quad [\Omega]. \quad (2.4)$$

Pokud bychom uvažovali výpočet pro nehomogenní vodič, tak se určení Jouleových ztrát stává velmi obtížně řešitelnou úlohou.

2.3 Jouleovy ztráty v homogenních a nemagnetických vodičích při průchodu střídavým proudem

Při průchodu střídavého sinusového proudu vodičem se ztráty zvětšují vlivem nerovnoměrně rozděleného proudu po průřezu vodiče [5]. Proudová hustota se blíže k povrchu zvětšuje, ale ve vnitřních částech se její hodnota zmenšuje. Dále dochází k fázovému posunu mezi proudovou hustotou v různých částech průřezu. Z toho důvodu je celkový proud, který prochází vodičem o průřezu S , určen geometrickým součtem proudů, které prochází všemi elementy ds příčného průřezu vodiče.

Tento jev popisuje rovnice:

$$I = \int_{(S)} J \, ds \quad [A], \quad (2.5)$$

kde J je vektor proudové hustoty v ploše vytvořené elementy ds .

Jouleovy ztráty ve vodiči jednotkové délky tedy odpovídají rovnici:

$$P_{j \, AC} = \int_{(S)} J^2 \cdot \rho \cdot dS \quad [W], \quad (2.6)$$

což můžeme pro případ stejnosměrného proudu napsat jako vztah:

$$P_{j \, DC} = J^2 \cdot \rho \cdot S \quad [W]. \quad (2.7)$$

Z těchto rovnic plyne poměr, který porovnává Jouleovy ztráty průchodem střídavého proudu určité efektivní hodnoty ku ztrátám při průchodu stejnosměrného proudu stejné hodnoty. Tento poměr se nazývá tzv. činitel povrchového jevu nebo činitel zhuštění:

$$k_{AC} = \frac{P_{j \, AC}}{P_{j \, DC}} \quad (2.8)$$

2.4 Šíření tepla vodičem

Tepelná energie se ve vodiči přenáší třemi způsoby: vedením, prouděním a sáláním. Vodič se těmito procesy může ve svém objemu buď ohřívat či ochlazovat. Dále kromě průchodu proudu je vodič ohříván, nebo ochlazován vlivy prostředí jako jsou např. teplota okolí, sluneční záření, odpařování vody nebo koróza.

2.4.1 Vedení

Přenos tepelné energie vedením je způsoben díky vzájemným interakcím mezi sousedícími molekulami, přesněji řečeno díky jejich náhodnému pohybu. Vedení tepla se projevuje jak v pevných látkách, kapalinách, tak i v plynech a není k tomu zapotřebí pohybu či průtoku dané látky.

S rostoucí teplotou vzroste i intenzita náhodného pohybu molekul, a tím se na molekulární úrovni zvýší kinetická energie látky. Sousedící molekuly do sebe narážejí a interagují. Dochází k přenosu energie z molekul s vyšší kinetickou energií na molekuly s nižší kinetickou energií. U kovů se navíc do vedení tepelné energie zapojují i volné elektrony.

Naštěstí není třeba podrobně zkoumat molekulární procesy, abychom odvodili výpočetní postupy vedení tepla. Stačí nám znát jedinou materiálovou konstantu společně s lokálním tepelným gradientem v závislosti na souřadnicích v daném směru. Tepelný gradient ve směru x je tedy dán vztahem $\frac{dT}{dx}$ [K/m] [6].

Tato skutečnost může být vyjádřena vztahem, který popisuje Fourierův zákon.

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \quad (2.9)$$

V rovnici (2.9) vyjadřuje \vec{q} [W/m^2] lokální hustotu tepelného toku, která může být pro izotropní materiály, mající stejnou tepelnou vodivost, zapsána ve vektorovém tvaru. Znaménko minus odráží fakt, že se předává tepelná energie z míst s vyšší teplotou do míst s nižší. Veličina λ [W/mK] značí tepelnou vodivost látky. Tepelná vodivost bývá nejvyšší u pevných látek, u kapalin je nižší a nejnižších hodnot dosahuje u plynů [6].

Dle [6] dosahuje tepelná vodivost za normálních atmosférických podmínek u plynů $0,015 < \lambda < 0,15 W/mK$, u kapalin $0,1 < \lambda < 0,65 W/mK$ a u pevných látek $1 < \lambda < 450 W/mK$. Ukázkové hodnoty např. pro vzduch $\lambda = 0,0246 W/mK$, pro vodu v kapalném stavu $\lambda = 0,6 W/mK$, pro měď $\lambda = 395 W/mK$, či pro hliník $\lambda = 220 W/mK$.

2.4.2 Proudění

Proudění odpovídá přenosu tepla v kapalině nebo plynu. Proces volného proudění funguje tak, že pokud je prostor vyplněn tekutinou, která má v celém svém rozsahu stejnou teplotu, je tekutina v klidu. Ovšem pokud je do tohoto prostoru vloženo těleso s vyšší či nižší teplotou, nastane výměna tepla mezi tělesem a tekutinou v prostoru. Tekutina pak mění svou hustotu v závislosti na teplotě. Části tekutiny s nižší hustotou (vyšší teplotou) stoupají vzhůru a naopak. Čím více tepla bude takto sdíleno, tím více bude tekutina proudit.

Obecně se proudění tekutin dá rozdělit na laminární a turbulentní. Při laminárním proudění se tekutina pohybuje, aniž by se jednotlivé části promíchávaly. Pakliže je při laminárním proudění překročen kritický poměr mezi setrvačnými a třecími silami, vznikne proudění turbulentní. Při turbulentním proudění se jednotlivé částice pohybují neuspořádaně a části tekutiny se promíchávají. Přenos energie je větší při turbulentním proudění [7].

Přestup tepla z tělesa do svého okolí (tekutiny) může být vyjádřen rovnicí (2.10).

$$P_C = \alpha \cdot S \cdot (T - T_{amb}) [W] \quad (2.10)$$

Kde $\alpha [W/m^2 \cdot K]$ je koeficient přestupu tepla prouděním, $S [m^2]$ představuje plochu tělesa, $T [K]$ odpovídá teplotě tělesa (stěny) a $T_{amb} [K]$ značí teplotu okolí (tekutiny). Velikost koeficientu přestupu tepla prouděním závisí na více faktorech, např. na konkrétním materiálu, geometrii nebo hrubosti povrchu tělesa, či směru a rychlosti obtékání tělesa tekutinou [6].

Vztah (1) podléhá představě, že termický odpor, kterému je tekutina vystavena, lze nahradit za odpor nepohybující se tenké vrstvy o tloušťce mezní vrstvy δ . Přičemž platí následující vztah (2.11).

$$\delta \approx \frac{\lambda}{\alpha} [m] \quad (2.11)$$

Kde $\lambda [W/mK]$ je tepelná vodivost tekutiny. V závislosti na tomto poznatku lze koeficient přestupu tepla prouděním α určit, avšak obecně je tento součinitel určován experimentálně. V praxi se využívají inženýrské korelace mezi bezrozměrnými čísly, které umožňují tento koeficient odvodit na základě již provedených experimentů. Tím se značně snižuje nárok na počet parametrů ovlivňujících výpočty přenosů tepelné energie pro geometricky podobná tělesa a rozdílné látky. Jedním ze základních bezrozměrných podobnostních čísel je Nusseltovo číslo [6].

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (2.12)$$

Kde L je charakteristický rozměr tělesa. K odvození korelace Nusseltova čísla musí

být bráno v potaz, že může nastat přirozené proudění nebo nucené proudění. Přirozené proudění vzniká při rozdílu tlaků v tekutině, většinou v důsledku rozdílu teplot. U nuceného proudění vzniká pohyb díky vnějším silám, což může být např. zvýšení tlaku čerpadla [6].

Průtoková charakteristika u nuceného proudění je popsána Reynoldsovým číslem.

$$Re = \frac{wL}{\nu} \quad (2.13)$$

Kde w je rychlost velkého objemu tekutiny. ν značí kinematickou viskozitu tekutiny.

Průtoková charakteristika u přirozeného proudění je popsána Grashofovým číslem.

$$Gr = \frac{L^3 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T}{\nu^2} \quad (2.14)$$

Kde g je gravitační zrychlení, β značí koeficient objemové tepelné expanze, ΔT je rozdíl teplot stěny a tekutiny.

Dalším významným podobnostním číslem je Prandtlovo číslo.

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu}{\frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}} \quad (2.15)$$

Kde ρ je hustota, c_p je měrná tepelná kapacita.

Na základě podobnostních čísel je koeficient přestupu tepla prouděním α možno vyjádřit z korelací v následujícím tvaru:

$$\text{pro nucené proudění} \quad Nu = f_1(Re, Pr) \quad (2.16)$$

$$\text{pro přirozené proudění} \quad Nu = f_2(Gr, Pr). \quad (2.17)$$

Následující tabulka ukazuje typické hodnoty koeficientů přestupu tepla α .

α [$W/m^2 \cdot K$]	
2-25	pro přirozené proudění v plynech
10-1000	pro přirozené proudění v kapalinách
25-250	pro nucené proudění v plynech
50-20000	pro nucené proudění v kapalinách
2500-100000	pro vroucí a kondenzující tekutiny

Tab. 2.1: Typické hodnoty koeficientů přestupu tepla α [7]

2.4.3 Sálání

Energie vyzařovaná ve formě elektromagnetického vlnění jakýmkoliv tělesem do svého okolí se nazývá sálání. Na rozdíl od předávání tepla vedením či prouděním je energie

sáláním předávána i bez přítomnosti propojujícího přenosového média, jelikož elektromagnetické vlnění prostupuje i skrze vakuum.

Každé těleso vyzařuje energii ve formě sálání odpovídající své povrchové teplotě. Nejvíce sálavé energie vyzařuje tzv. černé těleso. Energie vyzářená z reálných těles je vždy menší než sálání vyzářené černým tělesem [6].

Vyzářený výkon takového tělesa popisuje Stefan-Boltzmannův zákon.

$$\frac{P_r}{S} = \sigma_B \cdot T^4 \quad (2.18)$$

Pro ostatní tělesa, která nejsou ideální černá tělesa, se do vztahu (2.18) zavádí koeficient emisivity sálání. Taková tělesa lze nazývat též jako šedá.

$$\frac{P_r}{S} = \varepsilon_e \cdot \sigma_B \cdot T^4 \quad (2.19)$$

Pokud těleso o vyšší teplotě vyzařuje energii do svého chladnějšího okolí, rovnice přechází na tvar:

$$P_r = \varepsilon_e \cdot \sigma_B \cdot S \cdot (T^4 - T_{amb}^4) \quad (2.20)$$

Kde P_r [W] je celkový vyzářený výkon, ε_e [-] odpovídá koeficientu emisivity sálání, σ_B značí Stefan-Boltzmannovu konstantu, která je velikostně vyjádřena jako $5,6703 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$, S [m^2] je velikost plochy, T [K] je teplota tělesa, T_{amb} [K] je teplota okolí [6].

Koeficient emisivity záření reálných těles se pohybuje v rozmezí $0 \leq \varepsilon \leq 1$, přičemž 1 připadá právě na černé těleso. Tento koeficient se velice složitě určuje a závisí na více faktorech, např. materiálu povrchu, teplotě, směru záření, vlnové délce. Dle [6] jsou příkladnými hodnotami koeficientu sálání pro silně zoxidovanou ocel $\varepsilon \approx 0,96$, pro leštěnou ocel $\varepsilon \approx 0,3$, pro leštěný hliník $\varepsilon \approx 0,04$.

2.4.4 Sluneční záření

Tepelný zisk P_S závisí na rozměrech vodiče, absorpci záření, intenzitě slunečního záření, další vliv má např. sklon slunečního záření k horizontu. Celkové sluneční záření je složeno ze složky přímého, difúzního a odraženého záření. Při obloze bez mraků převládá složka přímého záření. Při zatažené obloze převládá difúzní záření, které vzniká právě rozptylem přímého záření v mracích a odrazem na částech v atmosféře. Odražená složka vzniká odrazy od různých povrchů, např. budov, terénu [9].

Dle [8] se pro výpočty nejčastěji uvažují dny s oblohou bez mraků, v čase kolem poledne. Intenzita slunečního záření pak dosahuje hodnot v rozmezí od 1000 do 1280 W/m^2 .

Protože je měření složky slunečního záření odděleně finančně i technicky náročné, měří se pouze celkové sluneční záření, z kterého také vychází rovnice (2.21).

$$P_S = \varepsilon_S \cdot I_S \cdot D \text{ [W/m]} \quad (2.21)$$

Kde $\varepsilon_S [-]$ je absorpce slunečního záření, celková hodnota intenzity slunečního záření $I_S \text{ [W/m}^2\text{]}$, průměr vodiče $D \text{ [m]}$.

V případě že vodičem neprochází žádný proud, je jeho teplota rovna součtu teploty okolí a teploty způsobené slunečním zářením. Spojení těchto teplot se nazývá Net Radiation Temperature. Rozdíl mezi teplotou vodiče, na který působí sluneční záření, a teplotou okolí se nazývá Net Radiation Gain [8].

Zvláštní případ může nastat v zimě, kdy je země pokryta sněhem a sluneční paprsky se po svém dopadu odráží na vodič. V takových případech se může celkově přijaté záření zvýšit až o polovinu [8].

2.4.5 Výměna tepelné energie mezi tělesy zářením

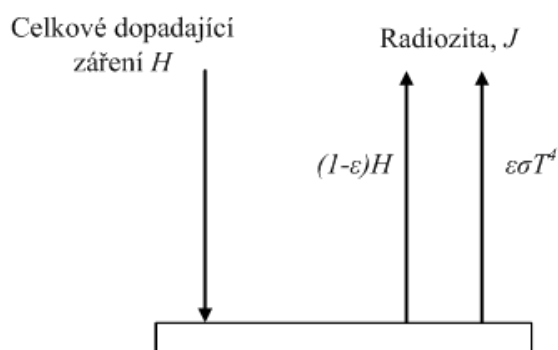
Zatím bylo popsáno, jak se projevuje záření jednoho tělesa (jeho povrchu). Ve skutečnosti se jedná spíše o výměny tepla zářením, které se děje mezi plochami jednoho či více těles. Tyto výměny závisí především na geometrii ploch a jejich orientaci, dále pak na vlastnostech emisivity a na teplotách. Předpokládáme, že plochy jsou od sebe odděleny médiem, které nijak nebrání těmto výměnám. Takové médium nijak neodráží, nepohlcuje, a ani nerozptyluje přenos elektromagnetických vln. Vakuum přesně splňuje tyto vlastnosti a většina plynů rovněž. K výpočtům výměny tepla zářením mezi tělesy je třeba zaměřit se na pojmy radiozita a „view factor analýza“ [13].

Radiozita představuje celkovou hustotu tepelného toku záření opouštějícího konkrétní plochu. Někdy je tento výraz vyjádřen jako intenzita záření opouštějící danou plochu. Oba tyto výrazy mají rozdílné jednotky, je proto třeba dbát na to, jaká veličina je myšlena, aby nedocházelo k záměně.

Radiozita odpovídá dvěma složkám. Jedna složka představuje záření opouštějící plochu, druhá představuje složku odraženou. Kombinace obou složek do jedné pomáhá určovat tepelnou výměnu mezi více plochami [7].

Tento fakt lze vyjádřit rovnicí (2.22),

$$J = \varepsilon\sigma T^4 + (1 - \varepsilon)H \quad (2.22)$$



Obr. 2.1: Radiozita plochy [14]

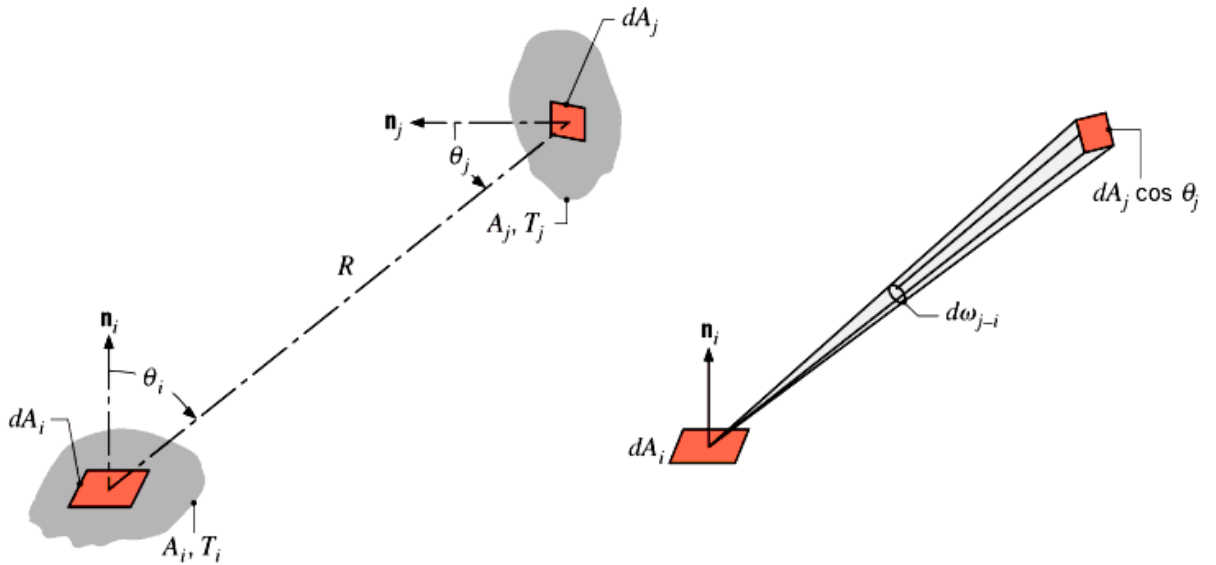
kde J značí radiozitu, $\varepsilon\sigma T^4$ je záření opouštějící plochu a H je celkové záření dopadající na těleso. H je neznámá proměnná a závisí na okolních plochách. Takže pokud je nějaká plocha i zasažena zářením z jiné plochy j , je pak energie záření na ploše i vyjádřena rovnicí (2.23).

$$H_{ji} = F_{ij} \cdot A_j \cdot J_j \quad (2.23)$$

2.4.6 View Factor

Dle [13] je view factor F_{ij} používán ke zjištění parametrů, které odpovídající zlomku záření opouštějící jednu plochu např. i a jsou zachyceny na druhé ploše např. j . Velikost tohoto faktoru se pohybuje v rozmezí 0 (pro velice vzdálená tělesa či plochy nebo pro plochy, které na sebe nemohou vyzařovat) až 1 (pro přilehlá tělesa či plochy nebo pro plochy, které na sebe vyzařují).

Abychom mohli F_{ij} vyjádřit, musíme uvažovat libovolně orientované plochy A_i a A_j . Tyto plochy rozdělíme na elementární plošky dA_i a dA_j , které jsou spojeny přímkou o délce R . Přímka svírá s elementárními ploškami úhly θ_i a θ_j , respektive s normálami ploch n_i a n_j . Popsanou situaci lze vidět na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: View factor spojený s výměnou tepla zářením mezi elementy ploch dA_i a dA_j [13]

Celková míra, která září z plochy i a je zachycena plochou j , může být vypočtena jako dvojitý integrál přes obě tyto plochy. Přitom připouštíme, že plocha i vyzařuje a odráží rozptýleně.

$$q_{i \rightarrow j} = J_i \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cdot \cos \theta_j}{\pi R^2} \cdot dA_i \cdot dA_j \quad (2.24)$$

Kde J_i představuje celkovou hustotu zářivého toku. J_i je po celé ploše A_i stejná. Jelikož vycházíme z toho, že view factor je zlomek z toho, co je vyzářeno z A_i a zachyceno v A_j , lze napsat tvar (2.25).

$$F_{ij} = \frac{q_{i \rightarrow j}}{A_i \cdot J_i} \quad (2.25)$$

Dosazením rovnice (2.25) do výrazu (2.26) získáme následující vztah.

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cdot \cos \theta_j}{\pi R^2} \cdot dA_i \cdot dA_j \quad (2.26)$$

Stejně tak platí vztah, kdy je energie vyzářena naopak z plochy A_j a zachycena plochou A_i .

$$F_{ji} = \frac{1}{A_j} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cdot \cos \theta_j}{\pi R^2} \cdot dA_i \cdot dA_j \quad (2.27)$$

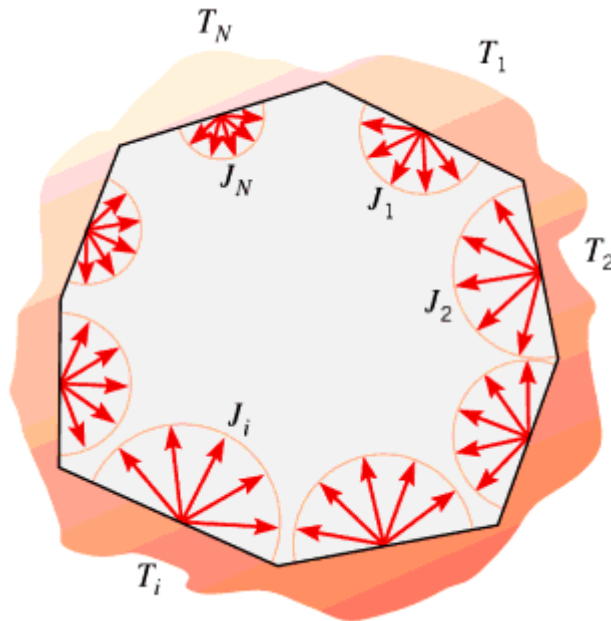
Za těchto předpokladů lze určovat view factor jedné plochy, pokud známe view factor té druhé, takže platí vztah (8).

$$A_i \cdot F_{ij} = A_j \cdot F_{ji} \quad (2.28)$$

Další důležité pravidlo, týkající se view factor, se nazývá součtové pravidlo. Platí vztah (2.29), který může být aplikován na N ploch v přilehlých oblastech, jak je znázorněno na obrázku 2.

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (2.29)$$

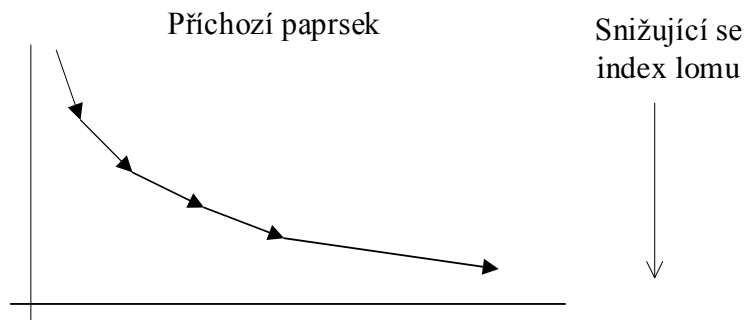
Toto pravidlo vychází z faktu, že veškeré záření vycházející z plochy i musí být zachyceno přilehlými plochami. Zde se vyskytuje i další pojem F_{ii} , který představuje součet zlomků záření, které pocházejí z plochy i a jsou opět zachyceny touto plochou. K výpočtům výměny záření radiací mezi N přilehlými plochami je nutné využít maticových zápisů [13].



Obr. 2.3: Výměna zářením pro N přilehlých ploch [13]

Pro zobrazení výsledků radiozity může být použita např. metoda raytracing. Tato metoda umožňuje odhadovat dráhy vln skrze systémy, kde se mění rychlost, absorpční charakteristiky a odrazivost ploch. Vlny se v takovém prostředí mohou ohýbat, měnit směr nebo se odrážet a analýza takových stavů se stává velmi složitou. Raytracing pracuje za předpokladu, že vlna může být vymodelována jako velké množství velmi krátkých paprsků, které na sebe navazují. Tímto způsobem lze říci, že každá část paprsku bude v daném úseku směřovat přímo, nebude nijak zakřivená. Algoritmus této metody tedy vždy po krátkém úseku znovu pomocí lokální derivace vypočítá nový směr paprsku, po kterém paprsek směřuje v dalším intervalu (lze vidět na obrázku č. 2.4). V každém intervalu je paprsek zvětšen o velmi

malou hodnotu. Tento děj se opakuje s tolika paprsky do té doby, než jsme schopni odhadnout chování celého systému [14].



Obr. 2.4: Stopování paprsku pomocí metody raytracing

K vyjádření výsledků radiozity mohou být použity i další metody jako je např. přímá integrace, metoda hemisphere, metoda hemicube nebo progresivní metoda. Jednotlivé metody se od sebe liší převážně rychlostí dosažení výsledků, a tím i náročností na výpočetní techniku.

2.4.7 Vypařování vody, koróna

Ochlazování může být způsobeno odpařováním vody z povrchu vodiče. Tento jev nastává tehdy, pokud je vodič zcela pokryt vodou. Stav, kdy prší nebo je velká vlhkost ovzduší, se na ochlazování vodiče vypařováním vody nepodílí. Proto se tento aspekt při výpočtech většinou zanedbává [6].

Ohřev korónou se ve většině případů zanedbává, protože není tento vliv nijak významný. K tomuto ohřevu dochází pouze v důsledku vysoké intenzity elektrického pole. Výskyt koróny dále zvyšují srážky, silný vítr, ochlazování prouděním či odpařování vody [9].

3. Zatížitelnost vodičů

3.1 Statické hodnocení zatížení

Statické tepelné hodnocení vodičů je typicky založeno na analýze historických statistik počasí v daném regionu, a s tím souvisejících podmínek. Dalším faktorem je zatížení vodičů na přenášený výkon, kdy se opět kalkuluje s nejvyššími dovolenými hodnotami. Podle [15] bývají rovněž stanovena rozličná typová zatížení na různé roční doby, jako je letní a zimní období. Dle [10] je hodnocení založeno na podmínkách, kdy jsou vodiče nejvíce ohřívány plným slunečním zářením, kdy okolní prostředí dosahuje vysokých teplot, a kdy jsou vodiče málo ochlazovány nucenou konvekcí související s malými rychlostmi větru zhruba kolem $0,6 \text{ m/s}$.

V tomto případě jsou vodiče dimenzovány tak, aby při těchto podmínkách a daném zatížení plnily svou funkci. Není proto nutné nijak monitorovat stav podmínek tam, kde se vodiče nacházejí.

3.2 Dynamické hodnocení zatížení

Dynamické tepelné hodnocení vodičů je na rozdíl od statického založeno na aktuálním počasí, a tím na venkovních podmínkách, a dále na aktuálním zatížení vodičů, což se týká přenášeného výkonu. Z toho vyplývá, že je třeba v reálném čase monitorovat stav okolního prostředí a jeho vliv na vodiče, aby bylo možno opět v reálném čase kalkulovat, jaký maximální výkon lze v daném čase přenášet. Je zřejmé, že v takovém případě by bylo možné díky lepším podmínkám okolního prostředí, tedy např. nižší okolní teploty nebo vyšší rychlosti větru, přenášet větší výkon vodičem, aniž bychom překročili dovolené oteplení vodiče. Pokud by se tyto faktory zmíněným způsobem v reálném čase sledovaly, bylo by možné dle potřeb systémových operátorů zvyšovat maximální zatížitelnost vodičů, ovšem nejspíše by se tak dělo na úkor bezpečnostní rezervy dané existujícími normami [10].

Zvyšování přenosové kapacity pomocí monitorování stavu linky v reálném čase je zacíleno na zvýšení proudové zatížitelnosti vodiče.

3.3 Technologie zvyšování přenosové kapacity

Kapacita přenosové linky je měřena výkonem v jednotkách MVA, který je schopna přenést. Zdánlivý výkon, který je dán v MVA, je tedy výsledkem součinu mezi Volty a

Ampéry. Navýšení kapacity linky mezi dvěma body může být zvýšeno, buď zvýšením proudu, nebo zvýšením napětí, či zvýšením obou veličin současně. Současné zvýšení napětí i proudu bude pravděpodobně vyžadovat výměnu vodičů a celkovou přestavbu struktury přenosové linky. Toto navýšení by bylo velice náročné a drahé a nejspíše by se jevila jako vhodnější varianta výstavba linky zcela nové. Jinými slovy by to znamenalo vyměnit celé existující vedení za vedení nové. Z toho vyplývá, že pro zvýšení kapacity již fungujících linek, lze využít samostatné navýšení proudu nebo napětí, ale ne obojí najednou [11].

Jiný možný způsob, jak dodat vyšší výkon, je postavit další linku vedle současného koridoru s vedením nebo přidat linku přímo na již fungující stojící vedení. Tento způsob nemusí být v praxi vždy realizovatelný [11].

3.3.1 Řešení pomocí monitorování v reálném čase

Cílem monitorování zařízení je optimalizování ampacity již existujících linek. Takováto optimalizace musí být schopna rozpoznat to, že výkonový tok linkou může být omezen celkovou stabilitou, napětím a tepelnými omezeními. Proudové zatížení je také omezeno vyžeháním vodiče. V současné době jsou používána zařízení, která monitorují přenosové linky, a zachycují údaje k získání lepších znalostí na celkovou zatížitelnost vodičů [11].

Pro efektivní využití naměřených dat, musí tyto údaje splňovat několik podmínek. Údaje musí být:

- analyzovány korektně,
- poslány bezpečně a v co nejkratším čase do kontrolního centra,
- prezentovány ve formě, která je použitelná pro operátora linky, např.: „15 MVA rezervního zatížení bude dostupných po dobu 20 minut“ [11].

Správnost časového údaje, po který nastane předpověď dané situace, je velice důležitým faktorem.

Dle [12] může být zisk ampacity odhadnut z rozdílu mezi teplotou okolí, na jakou se vodiče dimenzují (např. 35 °C), a průměrnou okolní teplotou v dané lokalitě (např. 10 °C). V průměru pak může být tepelné zatížení navýšeno pomocí systému monitorování v reálném čase až o 10 či 15 %.

Při navyšování ampacity v elektrickém obvodu je důležité hlídat, jestli jsou všechny jeho prvky na navýšení zátěže dimenzovány a není-li nutná výměna nějakého prvku (např. vypínače, transformátory, mechanické spojky, atd.) [11].

Nasazení zařízení pro monitorování linky v reálném čase může být velice rychlou záležitostí, záleží především na legislativě. Dynamické hodnocení linky může být implementováno během několika měsíců v provozu, záleží to hlavně na přenastavení ochranných prvků. Monitorovací zařízení dovoluje použití linky k rozsáhlejšímu využití bez větších úprav infrastruktury dané linky [11]. Zejména se jedná o teplotní čidla či laserová měřidla průvėsů lan [15].

Tyto způsoby navyšování kapacity můžou v závislosti na daném vedení přinést znatelné či pouze malé změny přenášeného výkonu. V posledních letech se stále častěji diskutuje téma spolehlivosti přenosových systémů [11].

3.4 Dimenzování vodičů

Dle [2] se vodiče silnoprúdeho elektrického rozvodu musí na provozní poměry dimenzovat tak, aby:

- jejich provozní teplota nepřesahovala dovolenou teplotu,
- průřezy vodičů byly v hospodárných mezích,
- vodiče měly dostatečnou pevnost,
- úbytek napětí byl v daných mezích,
- schopnost odolávat dynamickým a tepelným účinkům zkratových proudů.

Dovolená provozní teplota závisí na konstrukci a materiálu daného vodiče. V případě kabelů zároveň na izolaci vodiče. Dalším velmi důležitým parametrem je teplota okolí. V tabulce 3.1 jsou uvedeny dovolené provozní a maximální teploty vodičů, ze kterých se odvozují návrhy proudové zatížitelnosti.

Pokud není vodič trvale zatížen na plných sto procent, může se jeho provozní teplota stanovit podle skutečného zatížení [2].

Ovšem obecně se dimenzování vodičů provádí na nejnepříznivější klimatické podmínky v dané oblasti [15]. Při návrhu, který vychází z těchto hraničních klimatických podmínek, není možné určit ampacitu vedení pro okamžité podmínky. Proto je snaha využít nové způsoby zatěžování vedení s ohledem na okamžité klimatické podmínky a celkovou dynamiku u probíhajících dějů.

Druh vodiče	Základní dovolená provozní teplota [°C]	Nejvyšší dovolená provozní teplota [°C]	Nejvyšší dovolená teplota [°C]	
			Při proudovém přetížení	Při zkratu
Holé vodiče plné nebo slaněné Al, Cu	30	80	180	200
mech. zatížené	30	80	180	300
mech. nezatíž.	30	80	180	200
Slitina Al	30	80	150	170
Ocel mech. zatížená	30	80	180	250
Ocel mech. nezatížená	30	80	180	300

Tab.3.1: Dovolené provozní a maximální teploty vybraných vodičů ve °C [2]

3.5 Stárnutí kontaktního ústrojí

Elektrické spoje či kontakty se mohou v procesu přenosu elektrické energie stát slabým článkem řetězce. Elektrické kontakty podléhají procesu stárnutí. Elektrická rezistivita se během tohoto procesu zvyšuje. Kvůli tomuto jevu může vzrůst teplota takového spoje či kontaktu díky vyšším ztrátám, až na takovou úroveň, že se zničí samotný spoj nebo např. okolní izolace. Spolehlivost celého systému bude tedy silně ovlivněna spolehlivostí těchto spojů.

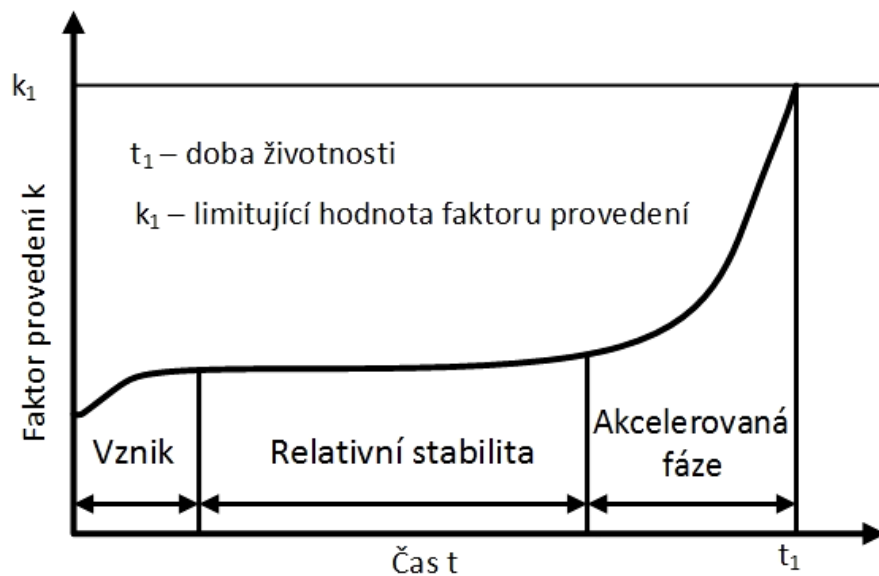
Elektrická zařízení a jejich komponenty mají být po dobu své životnosti spolehlivé a bezúdržbové. K tomu abychom byli schopni určit v jakém stavu je daný elektrický spoj, který slouží již řadu let, je nutné znát, jak se takový spoj při svém stárnutí chová [16].

Stárnutí kontaktů začíná již při samotné montáži kontaktních vrstev. Vzhledem k drsnosti použitých kontaktních materiálů nedojde ke spojení kontaktních vrstev v celé ploše kontaktů, ale jen na určitých místech. Tato místa následně slouží k přenosu proudu. Vyhraněné úseky budou postupně znehodnocovány chemickými reakcemi mezi vodivým materiálem a okolním prostředím. Proto se budou vodivé povrchy zmenšovat a rezistance se bude zvyšovat. Při spojení odlišných materiálů může být stárnutí způsobeno také elektrickými a tepelnými procesy migrování. V tomto případě se jedná o to, že se atomy z jednoho vodiče přemísťují do druhého a přitom se vytváří intermetalická fáze, která má vyšší rezistivitu než

čistý materiál vodiče [16].

Oba procesy způsobují zvýšení rezistance, což odpovídá charakteristice stárnutí na obrázku 3.1. Dle [16] lze využít metodiku, která určuje tzv. faktor provedení kontaktního systému. Tímto faktorem můžeme stanovit kvalitu kontaktů.

Po montáži se na malých kouscích kontaktní plochy objeví vrstvy oxidu, či nějakého znečištění. Chemické reakce budou tyto kousky rozšiřovat a tím snižovat kontaktní plochu. První část – vznik – je indikován nárůstem rezistance spoje. Během fáze vzniku se vytvoří omezené oblasti. Produkty chemických reakcí se usazují na povrchu omezených oblastí a začnou se chovat jako ochranná vrstva [16].



Obr. 3.1: Změna kvality kontaktů během doby životnosti [16]

Další chemické reakce se dějí pomaleji, protože reakční látky musí migrovat skrz ochrannou vrstvu.

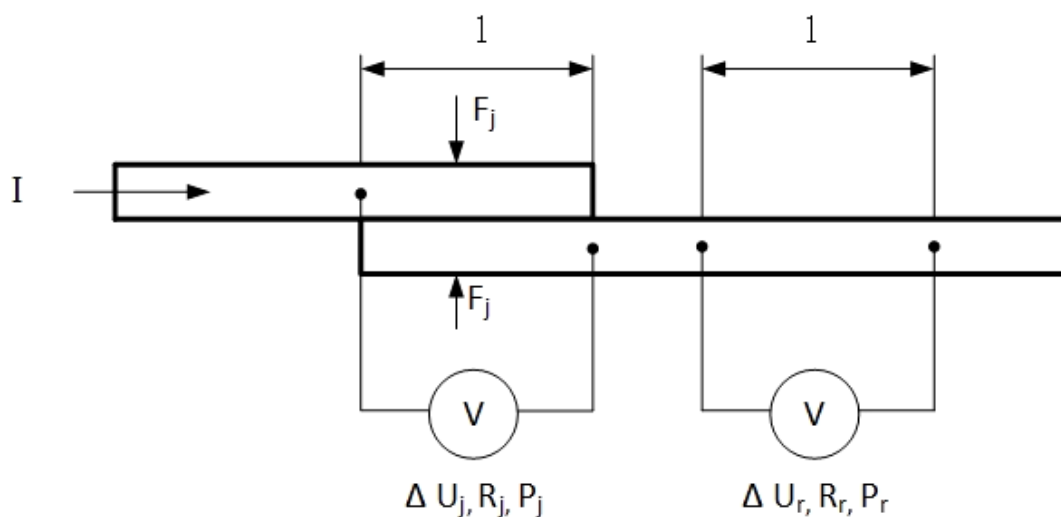
Ochranné vrstvy tedy brání v rychlosti nárůstu rezistance především v druhé části charakteristiky. Nicméně ztráty P_j ve spoji se s teplotou \mathcal{G}_j zvyšují.

$$\Delta \mathcal{G}_j \approx P_j = R_j \cdot I^2 \quad (3.1)$$

Výsledkem vyšší teploty je vyšší rychlost chemických reakcí a děj přechází v akcelerovanou fázi stárnutí. Zde se již rezistance spoje výrazně zvýší. Teplota v daných místech může být tak vysoká, že se dostane na bod tavení daného materiálu. Tento jev závisí na provedení a zátěži spoje.

Je známo, že doba životnosti spoje závisí značně na proudovém zatížení, vodivém materiálu, teplotě okolí a kvalitě montáže. Pro srovnání různých typů spojů je zaveden faktor provedení k .

Tento faktor je dán podílem úbytku napětí mezi kontakty a ekvivalentní délkou vodiče nebo odvozených veličin rezistancí spoje R_j a referenční hodnotou R_r či Joulovo ztrátami (obr. 3.2) (rovnice 3.2). Faktor provedení je použit k popisu stárnutí elektrických spojů [16].



Obr. 3.2: Princip měření vlivu kontaktů [16]

$$k = \frac{R_j}{R_r} = \frac{\Delta U_j}{\Delta U_r} = \frac{P_j}{P_r} \quad (3.2)$$

4. Tvorba modelu ohřevu lanové spojky

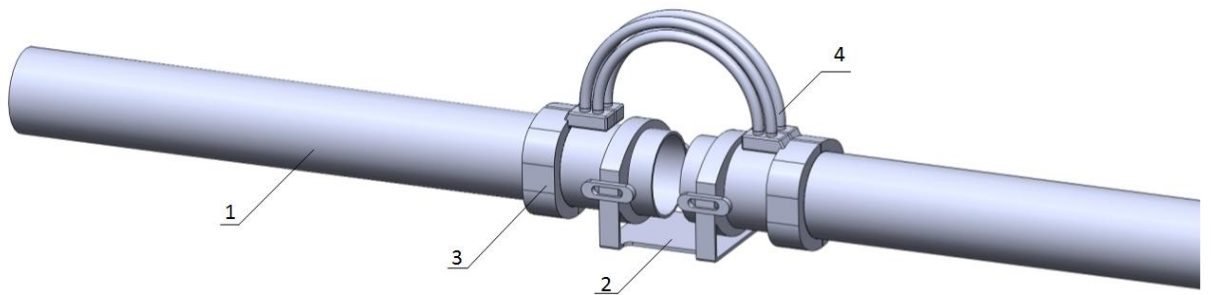
4.1 Tvorba 3D CAD modelu

Podle dostupných technických výkresů jsem vytvořil zjednodušený 3D model lanové spojky trubkových vodičů přípojnice v prostředí programu SolidWorks. Jedná se o spojku, která je určena pro použití na hladině napětí 400 kV a hodnota jmenovitého proudu, který může spojkou protékat je 4 000 A. Spojka se skládá z kluzné a pevné části a proudovodných lan. Proudovodná lana jsou celkem čtyři, každé lano je schopné přenést 1 000 A jmenovitého proudu.

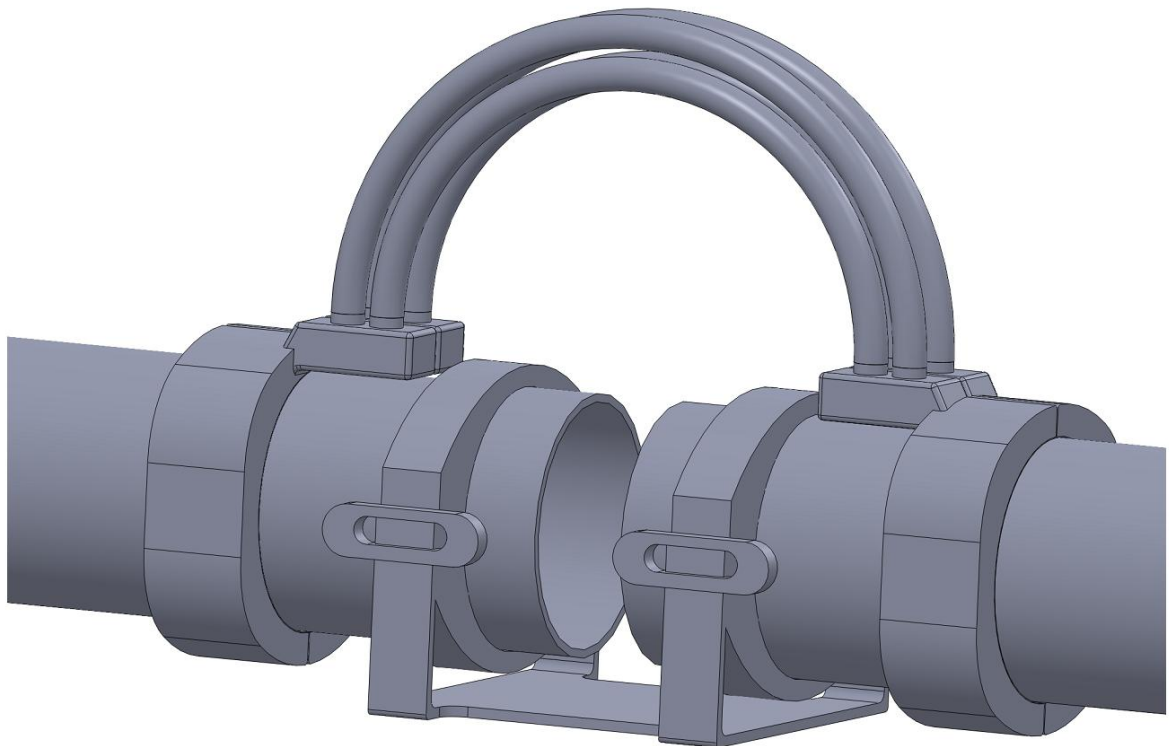
Díly, z kterých se spojka skládá, byly vytvořeny jednotlivě v programu Solidworks. Ty byly následně spojeny v celou sestavu, přičemž mezi jednotlivými díly byly nadefinovány vzájemné vazby tak, aby vznikl výsledný model.

Z důvodu zjednodušení simulace ohřevu v programu COMSOL byly v modelu zanedbány šroubové spoje a díry pro dané šrouby. Dále byla částečně upravena geometrie celého modelu tak, aby bylo možné v další fázi lépe nadefinovat mesh, což je síť modelu v prostředí programu COMSOL.

Trubkové vodiče byly vytvořeny o průměru 250 mm, tloušťce stěny 8 mm a délce 2 metrů. Poloměr hliníkových proudovodných lan je 16 mm.



Obr. 4.1: Celkový pohled na 3D model spojky s popisem jednotlivých částí:
 1-trubkový vodič, 2-kluzná část-tvořená podstavou a objímkou, 3-pevná část-tvořená objímkou a
 patou objímky, 4-proudovodná lana



Obr. 4.2: Bližší pohled na sestavený 3D model spojky

4.2 Popis programu COMSOL

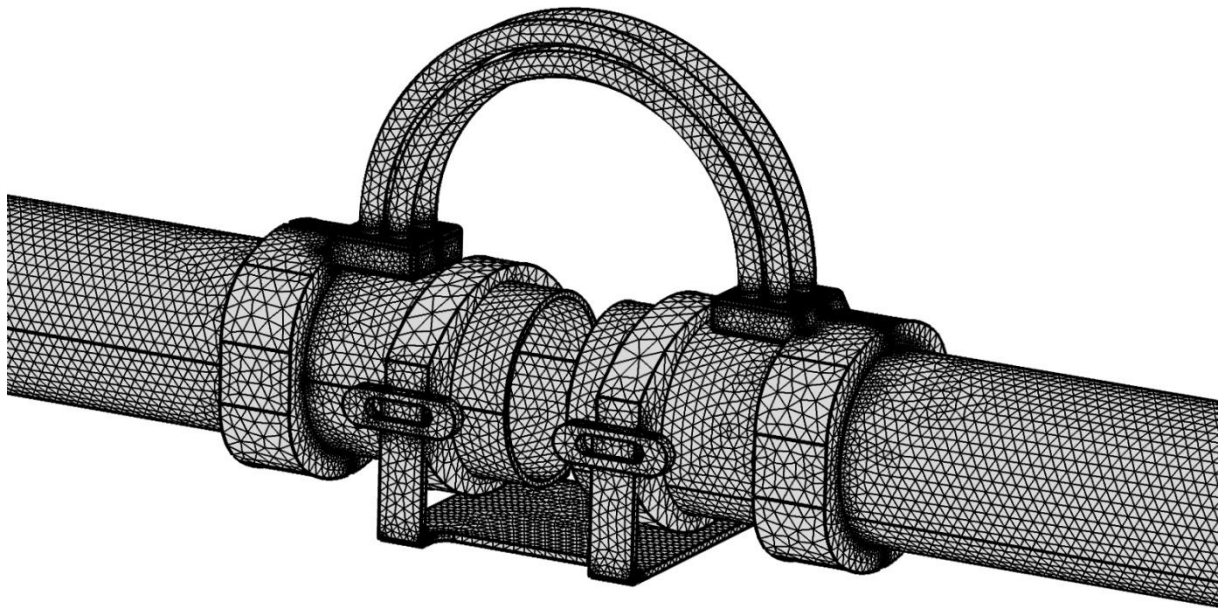
Pro simulaci oteplení vodiče byl zvolen program COMSOL. Je to software, který je vytvořen speciálně pro řešení různých fyzikálních jevů např. elektromagnetických, elektrostatických, teplotních a deformačních polí. COMSOL se skládá z preprocesoru, solveru

a postprocesoru. Preprocesor je nástroj, který slouží uživateli k definování geometrie modelu. Geometrii modelu lze vytvořit přímo v prostředí COMSOL, ovšem možnosti tohoto programu jsou ve vytváření geometrie omezeny. Proto lze vložit (importovat) do prostředí COMSOL geometrii z jiného CAD softwaru (např. Solidworks), která byla předem vytvořena. Dále se v preprocesoru definují okrajové podmínky, síť a vlastnosti daných materiálů. Solver je nástroj, který je určen pro samotný výpočet rozložení pole. Pro řešení soustav rovnic je využívána metoda sdružených gradientů [19]. Postprocesor je nástrojem umožňujícím vykreslení a prohlížení různých typů výsledků v závislosti na tom, jak byla simulace na počátku nastavena.

4.3 Simulace v programu Comsol

Model spojky byl importován do prostředí programu COMSOL. Zde jsem nastavil parametry materiálů, z nichž se model skládal. Byly vybrány materiály s přednastavenými parametry z knihovny programu COMSOL. Konkrétně šlo o materiál hliník, ten byl použit pro trubkový vodič přípojnice, pevnou část lanové spojky a proudovodná lana. Pro kluznou část lanové spojky byl vybrán materiál nerezové oceli.

Následně byla zvolena síť jednotlivých dílů, tzv. mesh. Mesh umožňuje rozdělení celého modelu na malé útvary či jednodušší tvary na tzv. síťové elementy. Tyto elementy lze vytvořit různými způsoby. V modelu byla vybrána pro různé části různorodá síť podle potřeby. Na různých částech geometrie byla zvolena různá velikost minimálních rozměrů daných elementů. Síť musí být volena co možná nejjednodušeji, protože pro každý bod, který vznikne spojením síťových elementů, se vytváří vlastní rovnice, která se podílí na výsledném řešení. Výsledné řešení je získáno právě z maticových zápisů daných rovnic všech bodů v systému. Z tohoto důvodu lze tvrdit, že čím více takových bodů vznikne, tím větší nároky jsou kladeny na výpočetní techniku. Avšak na druhou stranu v kritických místech modelu (např. proudovodná lana, místa přechodu mezi trubkovým vodičem a spojkou, atd.) by měla být síť co možná nejhustější a nejpřesnější, protože pro čím více bodů je výsledné řešení vypočítáno, tím kvalitnější odhad skutečnosti se nám dostane.

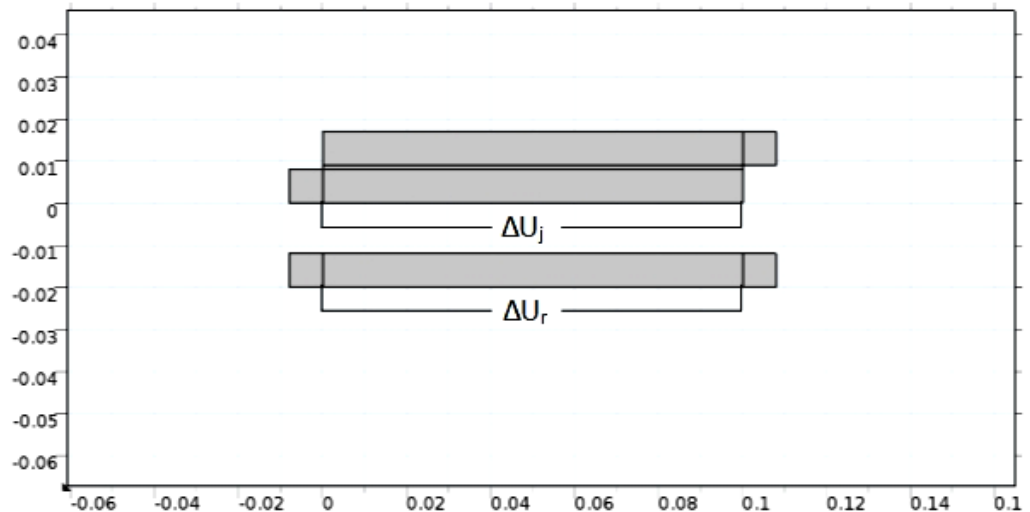


Obr. 4.3: Model spojky pokrytý sítí

4.3.1 Simulace se zřetelem na vliv kontaktů

Jak bylo popsáno v teoretické kapitole, stárnutí kontaktů jsou procesy způsobující zvýšení rezistance kontaktního materiálu. Kvalitu kontaktů můžeme stanovit pomocí tzv. faktoru provedení.

Pro úspěšné začlenění vlivu kontaktního ústrojí do simulace oteplení bylo třeba vytvořit planární 2D model, dle obrázku 3.2, kde je znázorněn princip simulace kontaktů. Tento model musel odpovídat dané sestavě. Kontaktní vrstva byla nasimulována pomocí 1 mm tenké vrstvy materiálu. Jelikož trubkové vodiče mají 8 mm silnou stěnu, byl vytvořen pás o šířce 8 mm. Délka pásu byla dána šířkou objímky přípojnicové spojky, což odpovídá 100 mm. Na obrázku 4.4 je pak znázorněn pohled na 2D simulaci. Zde došlo k porovnání samotného pásu přípojnice s pásy přípojníc, mezi nimiž je kontaktní vrstva.



Obr. 4.4: Model kontaktního ústrojí

Základní hodnotou pro koeficient kvality kontaktů k_0 byla dle [17] laboratorně stanovena hodnota mezi $k_0 = 0,6$ až $k_0 = 0,9$. V praxi se obvykle výchozí hodnota dobře nainstalovaných kontaktů odhaduje od $k_0 = 0,7$ až $k_0 = 1$.

Díky metodice modelování kontaktů v programu COMSOL bylo možné odečítat Jouleovy ztráty P_j a P_r , a stanovit tak faktor provedení, a s tím i stanovit elektrickou vodivost kontaktní vrstvy σ [S/m].

Dále pak na základě Wiedemann-Franzova zákona [18],

$$\frac{\lambda}{\sigma} = L \cdot T \quad (4.1)$$

popisujícího přibližný vztah mezi tepelnou (λ) a elektrickou vodivostí (σ) materiálu v závislosti na jeho teplotě T , kde L značí Lorenzovo číslo (cca $2,44 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W\Omega}{K^2} \right]$), byla dopočítána tepelná vodivost λ [W/(m · K)].

Následující tabulka 4.1 ukazuje různé hodnoty veličin pro různé hodnoty faktorů provedení. Pro výpočet byla stanovena výchozí hodnota $k_0 = 0,753$, což zhruba odpovídá střední hodnotě laboratorně stanovených faktorů provedení dle [17]. Této hodnotě odpovídá elektrická vodivost $\sigma = 2,6 \cdot 10^5 \text{ S/m}$ a tepelná vodivost $\lambda = 1,86 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$. Všechny hodnoty jsou počítány při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

k_0	$P_j \text{ [W/m]}$	$P_r \text{ [W/m]}$	$\sigma \text{ [S/m]}$	$\lambda \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]}$
12,283	65,091	5,299	2,60E+03	0,019
3,688	19,546	5,299	10,00E+03	0,072
1,827	9,685	5,299	2,60E+04	0,186
0,753	3,992	5,299	2,60E+05	1,860
0,585	3,101	5,299	2,60E+06	18,597

Tab. 4.1: Srovnání hodnot pro různé faktory provedení

4.3.2 Simulace pro znázornění skin efektu v proudovodných lanech

Zřetel musí být brán na vliv skin efektu vzhledem k použitému materiálu hliníku, jehož hloubka vniku je dána vztahem (4.1). Pro simulaci jsou pro hliník brány hodnoty $\sigma = 3,774 \cdot 10^7 \text{ S/m}$.

$$\delta_{Al} = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \cong 12 \text{ mm} \quad (4.1)$$

V samotných trubkových vodičích se vliv skin efektu zřejmě neprojeví. Trubkové vodiče mají tloušťku stěny 8 mm . Avšak v proudovodných lanech se skin efekt uplatní, protože průměr těchto vodičů je 32 mm .

Proto aby byl v simulaci ohřevu proudovodných lan lanové spojky respektován skin efekt, byla vytvořena 2D planární úloha, kde jsem stanovil koeficient zhuštění elektrického proudu k_{AC} .

$$k_{AC} = \frac{P_{jAC}}{P_{jDC}} \quad (4.2)$$

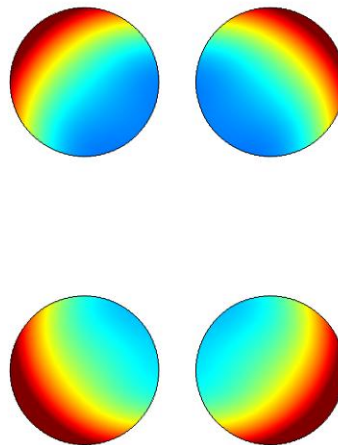
V této úloze byl vytvořen model jednoho lana. Na to navazovalo vytvoření sestavy čtyř vodičů představující proudovodná lana. Oba případy simulace byly zatíženy stejnosměrným proudem a proudem o kmitočtu 50 Hz . Za pomoci plošné integrace

Jouleových ztrát bylo možné udělat v obou případech mezi těmito ztrátami poměr a dostat tak činitel povrchového jevu. V simulaci byly získány hodnoty P_{jAC} a P_{jDC} . Dosadíme-li tyto hodnoty do rovnice 4.2, získáme hodnotu k_{AC} .

Tento činitel se následně využije k navýšení rezistivity materiálu hliníkových lan, která budou využita pro výpočet ohřevu. Celkové zhuštění elektrického proudu činilo 7,64 %. Takže činitel povrchového jevu je vyčíslen na $k_{AC} = 1,0764$.

I přes předpoklad, že by se neměl skin efekt v trubkových vodičích projevit, se pomocí simulace ukázalo, že i zde hraje svou roli. Činitel povrchového jevu byl zde vyčíslen na hodnotu $k_{AC} = 1,028$.

freq=50 (Hz) Surface: Current density norm (A/m²)

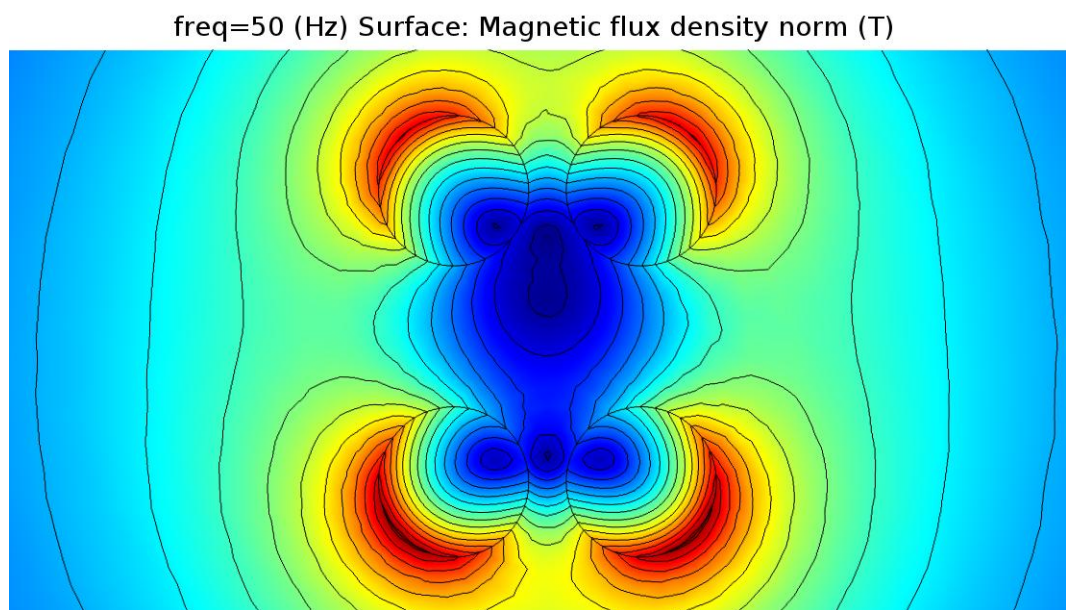


Obr. 4.5: Proudová hustota v proudovodných lanech

Na obrázku 4.5 můžeme vidět vytlačování elektrického proudu k povrchu jednotlivých vodivých lan, jedná se o vliv skin efektu. Elektrický střídavý proud, který prochází vodičem, kolem sebe uzavírá siločáry magnetického toku. Část tohoto toku se uzavírá i v samotném vodiči, a tím v něm vznikají vířivé proudy, které mají blíže ke středu vodiče opačný směr než původní elektrický proud. Takto vzniklé vířivé proudy tedy snižují výslednou hodnotu proudu, protože působí proti směru původního elektrického proudu.

Dále si lze všimnout, že proudová hustota je v horních dvou lanech nižší, hlavně směrem blíže ke středu, než je proudová hustota ve spodních lanech. To je způsobeno tím, že kratší lana mají menší odpor a přenáší se skrze ně vyšší hodnota proudu.

Obrázek 4.6 představuje magnetické pole v prostoru kolem proudovodných lan. Magnetické pole je silnější tam, kde je vyšší počet magnetických siločar. Toto pole je opět hustší v místech, kde je vyšší proudová hustota. Lze opět pozorovat rozdíl mezi horními a spodními lany.

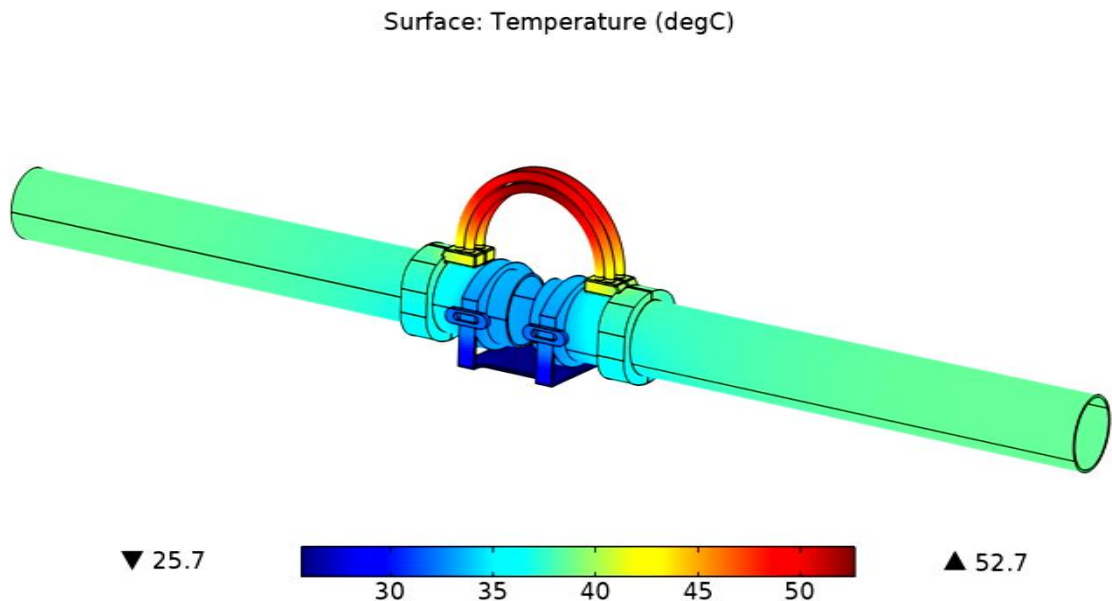


Obr. 4.6: Hustota magnetického toku v proudovodných lanech

4.3.3 Simulace ohřevu průchodem střídavého proudu

Dále byly nastaveny okrajové podmínky tak, aby byl nasimulován tok střídavého proudu o síťové frekvenci 50 Hz skrze trubkový vodič přípojnice, který je převeden přes lanovou spojku, a to způsobilo zahřívání tělesa v důsledku Joulových ztrát. To program COMSOL umožňuje nasimulovat prostřednictvím různých typů fyzikálních modulů, kde se využije fyzika elektrického proudu a fyzika pro přenos tepla. Proud byl nastaven na efektivní hodnotu $4\,000\text{ A}$, tedy na jmenovitou hodnotu, pro kterou je spojka určena. U 3D modelu byly vytvořeny přípojnicové trubky o délce dvou metrů, takže vznikla dostatečná vzdálenost na to, aby nebyla simulovaná úloha nijak negativně teplotně ovlivněna nedostatečnou délkou trubkových vodičů.

Při simulaci byl brán zřetel na ochlazování tělesa do svého okolí sáláním a prouděním. Dále byl uvažován vliv kontaktní vrstvy. Avšak zanedbán byl např. ohřev slunečním zářením a výměna tepelné energie mezi částmi modelu pomocí sálání (view factor analýza).

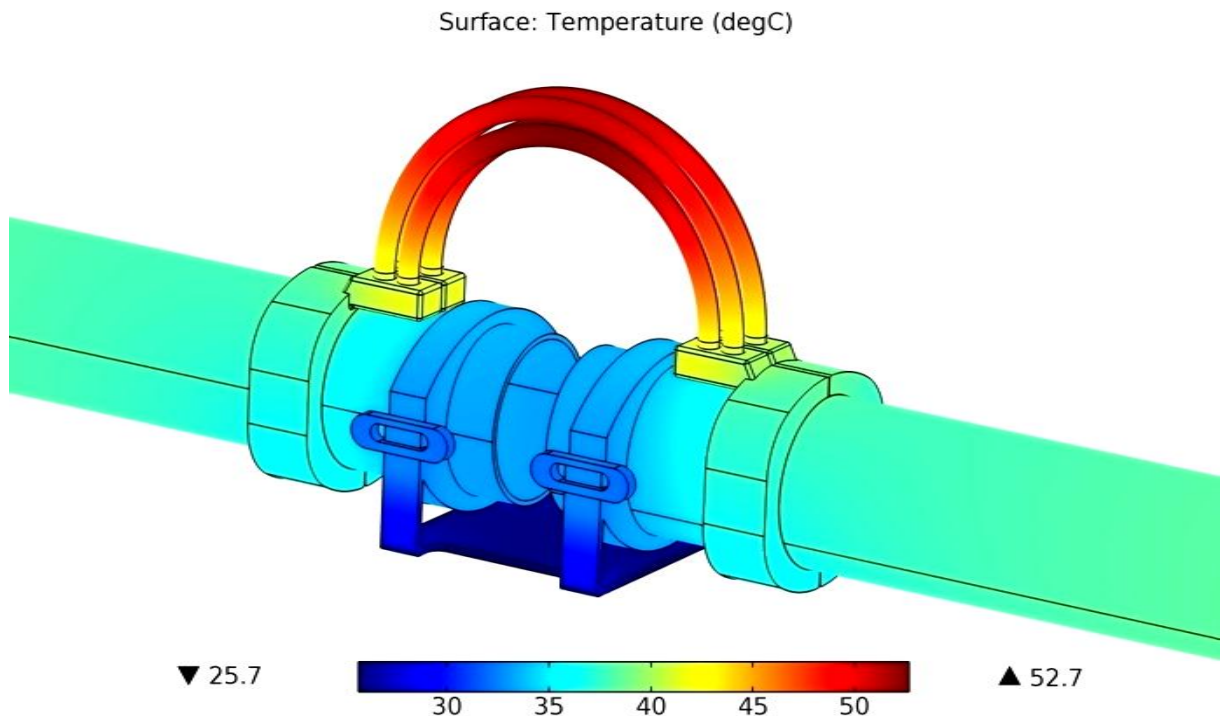


Obr. 4.7: Model spojky při průchodu stejnosměrným proudem o velikosti $4\,000\text{ A}$
stupnice dole - povrchová teplota [$^{\circ}\text{C}$]

Celkovým výstupem simulace bylo grafické znázornění celého modelu a jeho lokální absolutní velikosti teploty v čase, kdy již došlo k ustálení teploty.

Nastavená teplota okolí u této simulace byla $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Koeficienty pro přestup tepla byly voleny tak, jak bylo popsáno v kapitolách proudění a sálání. Tedy pro proudění koeficienty přestupu teploty byly zvoleny v rozmezí 3 až $10\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ a pro sálání byl u všech částí zvolen

koeficient emisivity 0,5. Tyto hodnoty byly stanoveny podle podkladů dodaných školitelem a zároveň odpovídají obvykle uvažovaným podmínkám dle [15], což odpovídá rychlosti větru 0,5 m/s pod úhlem 45°. Hodnoty pro materiál kontaktní vrstvy byly elektrická vodivost $\sigma = 2,6 \cdot 10^5 \text{ S/m}$, tepelná vodivost pro tuto vrstvu byla vyčíslena na $\lambda = 1,86 \text{ [W/(m \cdot K)]}$. Tyto hodnoty jsem bral v dalších simulacích jako výchozí.

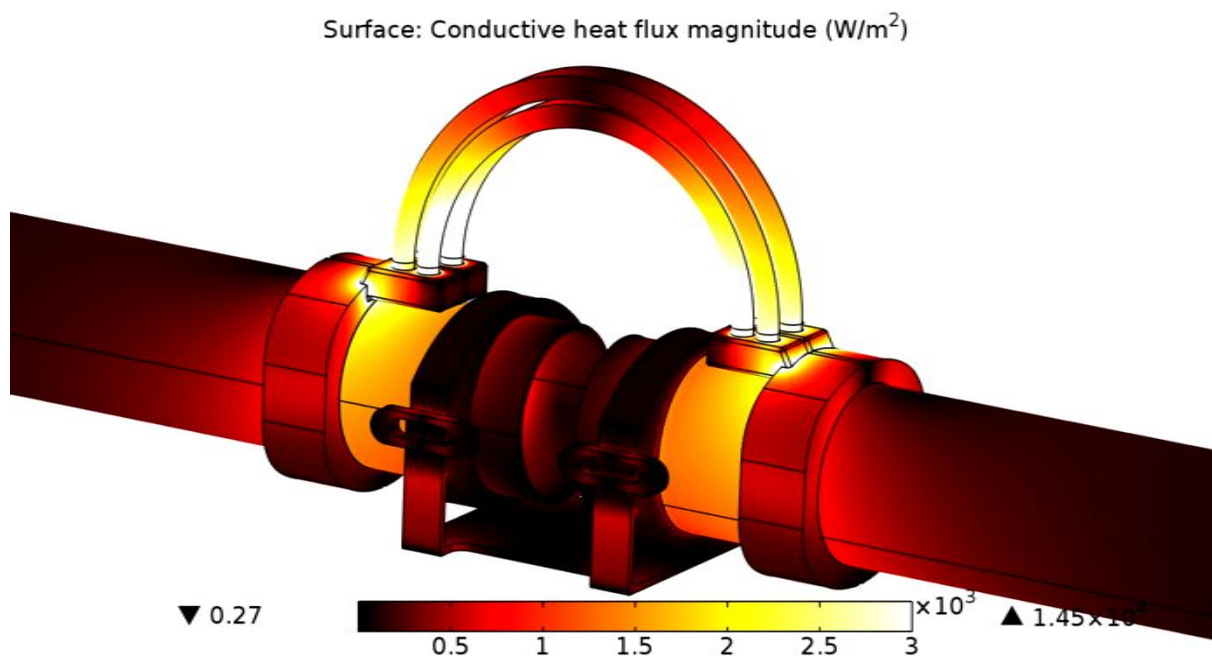


Obr. 4.8: Přibližný pohled na sestavu lanové spojky

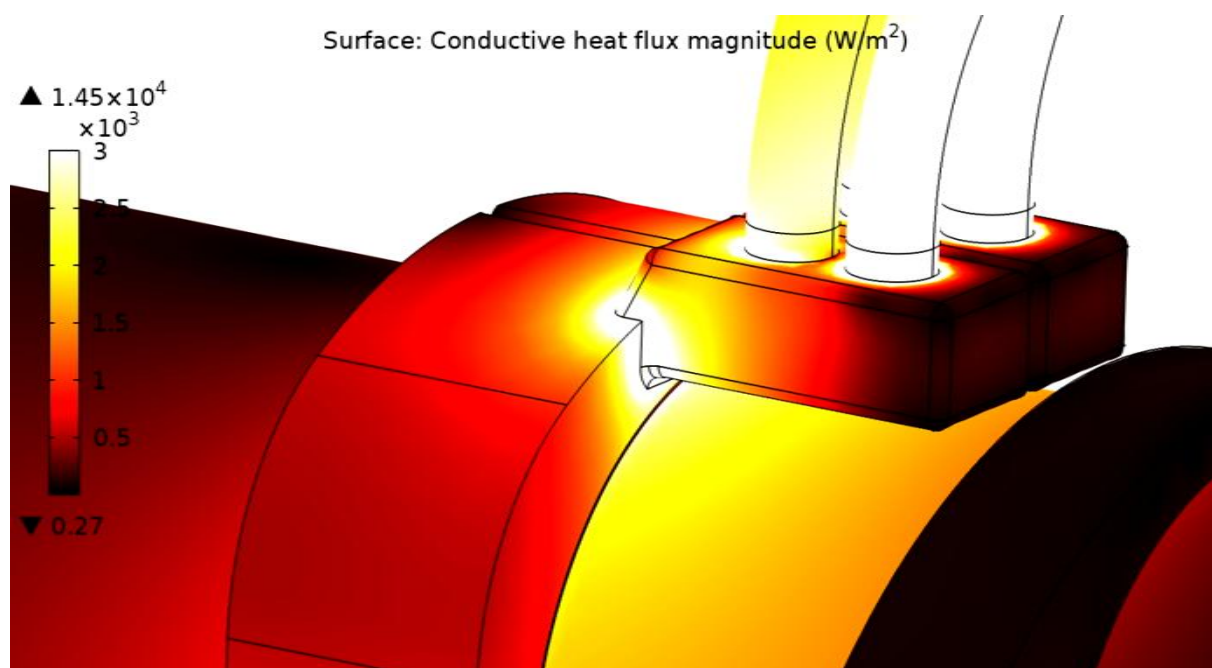
Výsledkem simulace je znázornění celkové absolutní teploty lanové spojky. Na obr 4.8 můžeme vidět, že nejvíce ohřátá místa spojky jsou právě proudovodná lana (maximální hodnota je 52,66 °C), nejméně pak trubkové vodiče přípojnice s podstavou (zde je minimální hodnota 25,65 °C). Z grafického výstupu jasně vyplývá, že teplota roste v místech přestupu trubkových vodičů na pevnou část lanové spojky a dále v samotných proudovodných lanech, kde se průřez proudovodné dráhy sníží. Dále je patrné, že dolní proudovodná lana, která jsou kratší oproti horním lanům, mají menší elektrický odpor a vznikají na nich větší ztráty, čili se více ohřívají. Kluzná část spojky, která je připevněná k izolátoru či podpěře, přes níž proud neprochází, pak pracuje jako chladič celé spojky.

Pokud uvažujeme, že jsou proudovodná lana vyrobena ze slané hliníku a celkově jsou považována jako nejslabší článek lanové spojky pro přenos proudu, pak je zřejmé, že pro přenos střídavého proudu o velikosti 4 000 A jmenovitých jsou dostačujícím prvkem spojky. V dané simulaci za nastavených podmínek v žádném případě nedošlo k překročení maximální dovolené provozní teploty.

Pomocí postprocesoru je možné vykreslit další výsledky této simulace. Zároveň můžeme sledovat tepelný tok na povrchu modelu. Nejsvětlejší místa značí největší odvod tepla pomocí vedení mimo proudovou dráhu. Tato místa ukazují na největší chlazení. Na obrázku 4.9 a 4.10 lze rozpoznat, že část trubky mezi objímkou, v které jsou umístěna lana, a úchytkou, na kterou jsou připevněny trubkové vodiče, slouží jako chladič celé soustavy. Je tomu tak z důvodu, protože tato část není proudově namáhána.

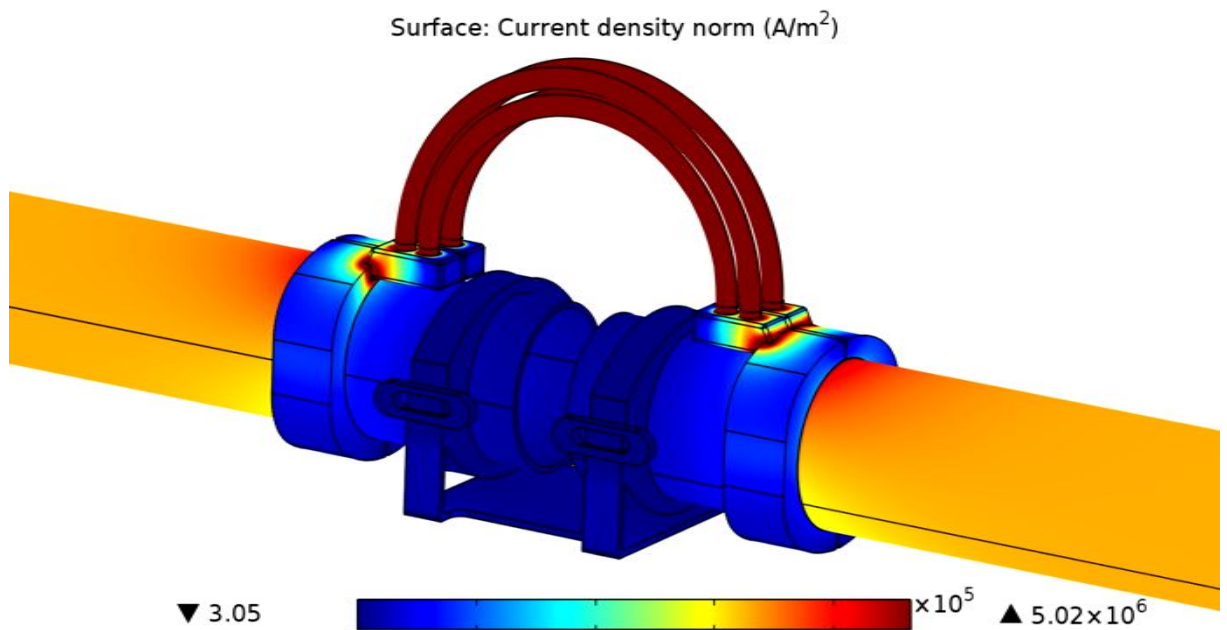


Obr. 4.9: Odvod tepla pomocí vedení



Obr. 4.10: Odvod tepla pomocí vedení

V dalším pohledu se můžeme přesvědčit o rozložení proudové hustoty na povrchu celé sestavy. Obrázek 4.11 zobrazuje barevný kontrast mezi nejvíce a nejméně zatíženými oblastmi sestavy. Červeně znázorněná místa jsou proudově zatížena nejvíce, naopak místa zabarvená do modra jsou nejméně proudově zatíženy. Na pohled je jednoznačné, že proud přechází trubkovými vodiči skrze objímku do proudovodných lan a skrze ně opět přes objímku do druhého trubkového vodiče. Na tomto obrázku také můžeme pozorovat zhuštění proudu v místě paty objímky, kde se zužuje cesta pro přenos proudu.

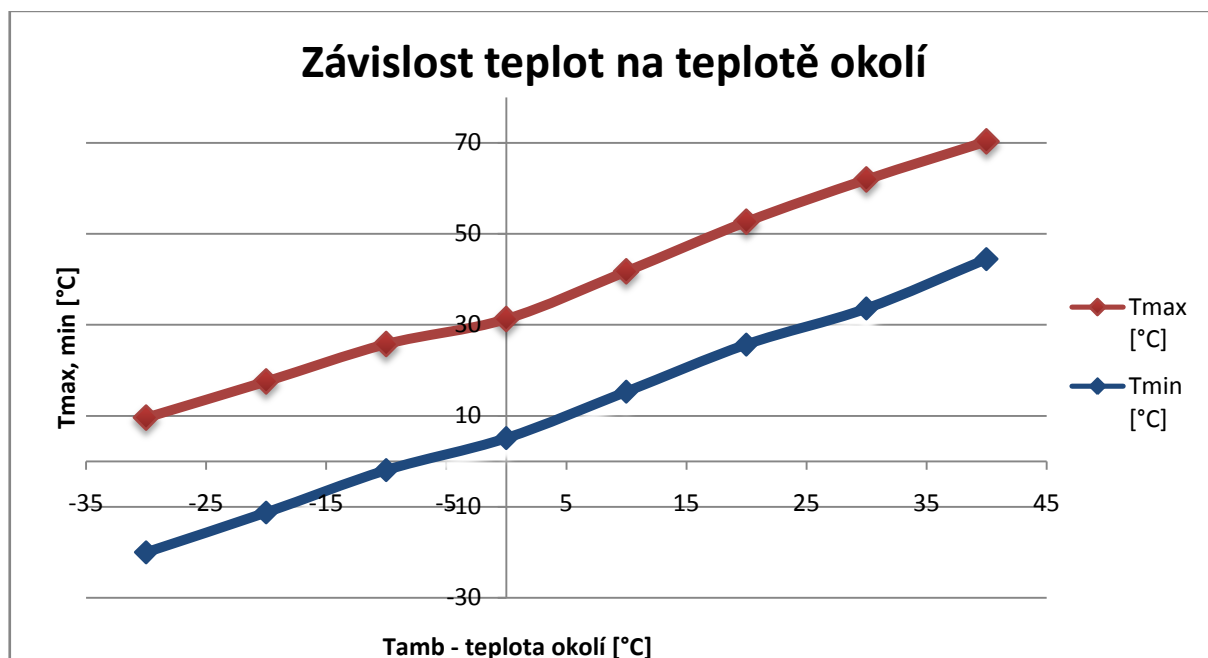


Obr. 4.11: Proudová hustota na povrchu modelu

Dále jsem vytvořil sérii simulací, při kterých byly zanechány již dříve nastavené parametry, jako je proudové zatížení, vliv kontaktů či chlazení, ovšem docházelo ke změně okolní teploty v rozsahu od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tento postup je přejat z [15]. Při zmíněných simulacích došlo k zaznamenání minimální a maximální povrchové teplotě lanové spojky. Hodnoty byly vyneseny do tabulky 4.2 a následně do grafického vyjádření (Obr. 4.12). T_{amb} značí teplotu okolí, T_{max} značí nejvyšší teplotu proudovodných lan, T_{min} značí nejnižší teplotu na podstavě lanové spojky.

$T_{\text{amb}}\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
$T_{\text{max}}\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	9,62	17,57	25,74	31,25	41,73	52,66	61,96	70,29
$T_{\text{min}}\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	-20,03	-11,28	-1,96	5,07	15,27	25,65	33,56	44,43

Tab. 4.2: Tabulka hodnot teploty



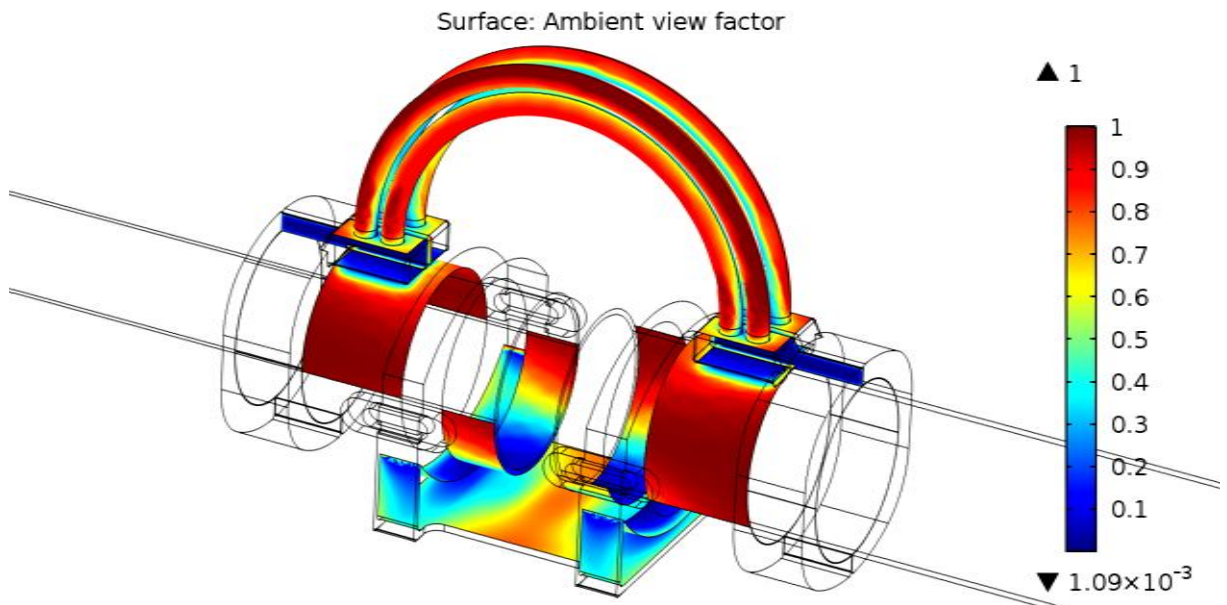
Obr. 4.12: Závislost teplot modelu na teplotě okolí

Z obrázku 4.12 je vidět patrný vliv, který má teplota okolí na celou soustavu lanové spojky. Při zvýšení teploty okolí o $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ se zvyšuje teplota spojky úměrně tedy o $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota okolí hraje jeden z nejdůležitějších vlivů, podle kterých by se měly vodiče obecně dimenzovat. Zároveň se jedná o jedinou veličinu, o které máme dlouhodobé záznamy.

4.3.4 Simulace se zřetelem na předávání tepla sáláním (view factor analýza)

Jak bylo již popsáno v teoretické kapitole, tepelná energie se předává mezi jednotlivými částmi soustavy také pomocí sálání mezi jednotlivými plochami. V simulaci dynamického ohřevu by se tedy měl na tento jev klást zřetel. Proto jsem vytvořil simulaci, která tuto problematiku řeší. Výpočet tohoto děje byl řešen u těch ploch modelu, kde může k uvedenému jevu docházet. Jedná se zejména o proudovodná lana a část podstavy lanové spojky. Dále se jedná o pevnou objímku spojky, kde k sobě obě části této objímky těsně přiléhají přes malou vzduchovou mezeru.

Koeficient emisivity a absorpce byl opět nastaven na hodnotu 0,5. Byl ponechán vliv kontaktního ústrojí a teplota okolí byla nastavena na 20 °C.



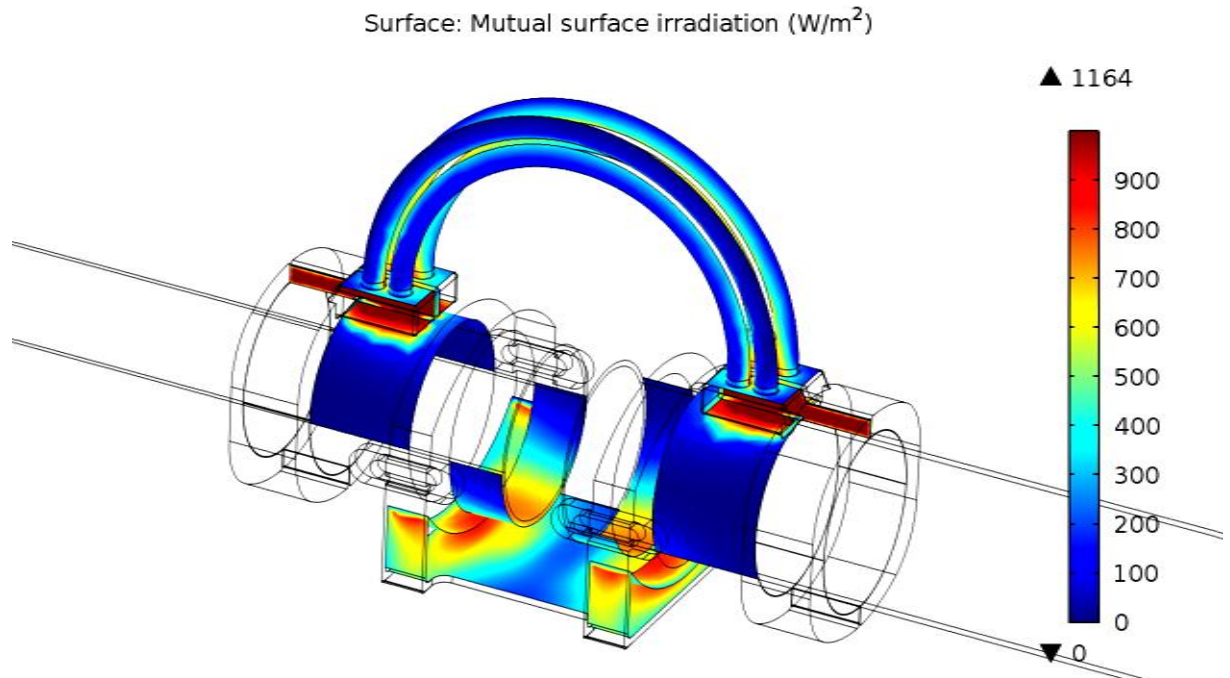
Obr. 4.12: view factor pro okolní prostředí

Na obrázku 4.12 je vykreslena hodnota view factor pro pohled z okolního prostředí. Pro každý bod plochy byl vyčíslen view factor v hodnotě od 0 do 1. Hodnoty blíží se nule znamenají pro plochu to, že záření, které by na ni mohlo z venkovního okolí dopadat je minimální. U mnou vypracovaného modelu lze skutečnost odůvodnit tím, že tyto části jsou skryty před pohledem z okolí dalšími částmi sestavy. Příkladem těchto hodnot blížících se nule je například část pevné objímky, kde k sobě obě části této objímky těsně přiléhají přes vzduchovou mezeru. Čili na tyto plochy se bude z venkovního okolí záření obtížně dostávat.

Hodnoty blíží se jedné jsou naopak z okolního prostředí dobře vidět, tedy nejsou skryty dalšími částmi sestavy. Příkladem takových součástí jsou části trubkových vodičů nebo

vnější strany proudovodných lan.

Lze tedy soudit, že plochy, které jsou navzájem skryty před okolním prostředím, si mezi sebou budou předávat více tepelné energie sáláním než plochy, které jsou více odkryty.

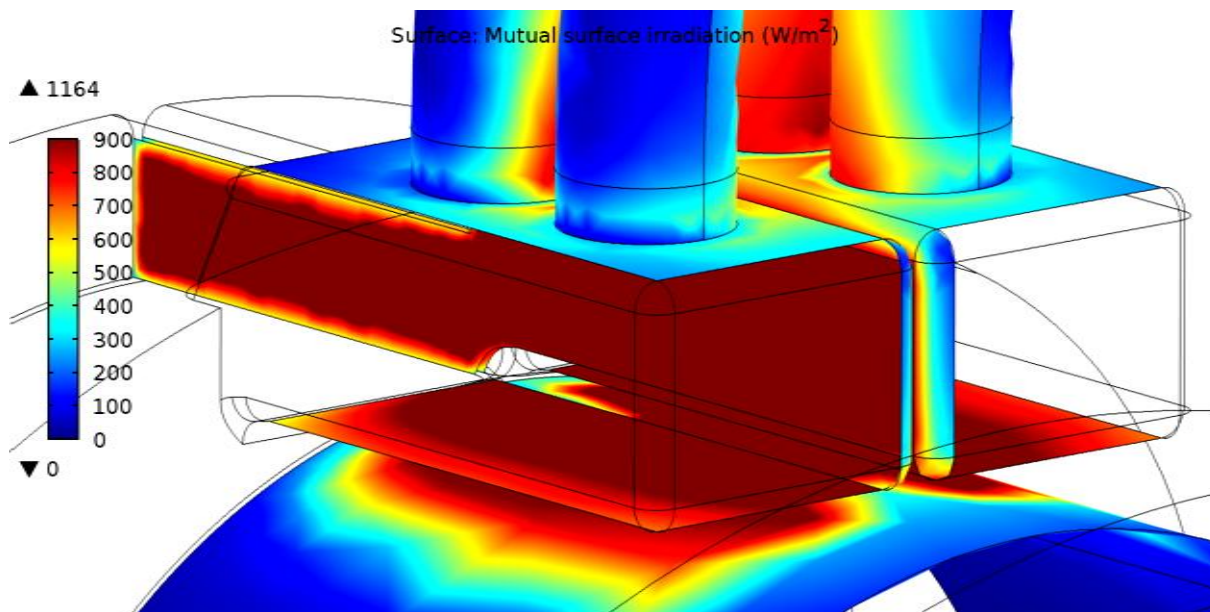


Obr. 4.13: Vzájemné ozáření ploch

Na obrázku 4.13 je možno vidět vzájemné ozáření ploch. Plochy, které na sebe mohou nejvíce vyzařovat, si předávají nejvíce tepelné energie. Nejvíce se tento jev uplatní u části pevné objímky, kde k sobě obě části této objímky těsně přiléhají přes vzduchovou mezeru. Dále se uplatní u podstavy sestavy a u vnitřních stran proudovodných lan. K tomuto jevu také dojde mezi trubkovým vodičem a patou objímky, což je místo, kde dochází k zúžení objímky do místa, kde jsou napojena proudovodná lana.

Dalším faktorem pro tuto výměnu je vzdálenost, tvar i teplota plochy, ze které se záření sálá. Z tohoto důvodu není např. tento jev tak intenzivní v místě podstavy sestavy oproti proudovodným lanům nebo objímce, kde teplota dosahuje vyšší hodnoty. A také čím vzdálenější plochy jsou, tím méně záření se dostane do protilehlé plochy.

Dále musíme vzít v potaz, že při nízkých rozdílech teplot jako je v našem případě se sálání celkově projevuje malým podílem přenosu energie. Sálání se více uplatňuje při vyšších rozdílech teploty.



Obr. 4.14: Vzájemné ozáření ploch

Na obrázku 4.14 je detailnější pohled na patu objímky, kde dochází k největšímu předávání tepla pomocí sálání.

Pro srovnání byly vybrány různé body na sestavě a jejich teploty zaneseny do tabulky.

Plocha	Teplota před view factor [°C]	Teplota po view factor [°C]
max. hodnota na laně	52,66	53,25
vnitřní strana paty objímky	41,61	42,07
trubkový vodič pod patou	36,03	36,49
podstava	25,65	25,99
trubkový vodič nad podstavou	33,16	33,48

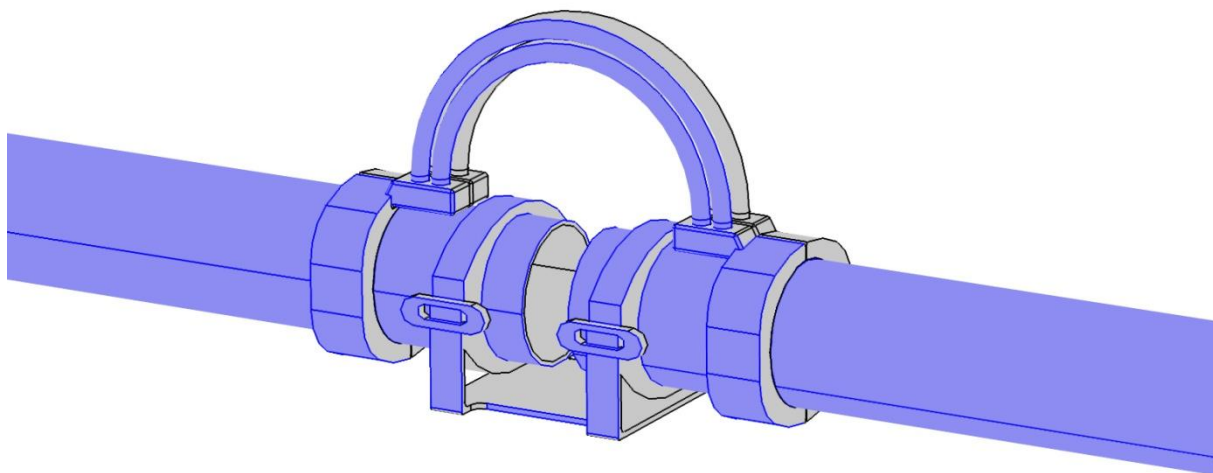
Tabulka 4.3: Srovnání teplot

Vliv této analýzy byl aplikován na tepelný model. Dané podmínky jsem nezměnil, aby bylo možné výstup z tohoto výpočtu porovnat s předchozím. Výchozí podmínky jsou tedy 4 000 A jmenovitého proudu, kmitočet 50 Hz a teplota okolí 20 °C. V porovnání s předchozí situací, kdy nebyla výměna tepelné energie mezi plochami pomocí sálání uvažována, je při daných podmínkách vliv této výměny nepatrný. Předchozí maximální teplota byla na proudovodných laněch a měla hodnotu 52,66 °C, nyní je hodnota 53,25 °C, což je zhruba o šest desetin stupně teplota vyšší. Tento vliv může být jistě při těchto rozdílech teplot zanedbán.

4.3.5 Simulace se zřetelem na sluneční ohřev

Dále je důležité uvažovat vliv slunečního záření na ohřev sestavy lanové spojky. Proto jsem vytvořil simulaci, v které je uvažován vliv slunečního ohřevu. Tato situace lze vytvořit pomocí okrajové podmínky simulující dopadající záření s nastavenou intenzitou odpovídající intenzitě slunečního záření. Vycházel jsem opět z výchozích podmínek simulace, aby bylo možné výsledky porovnat.

Okrajová podmínka pro dopadající sluneční záření byla aplikována na boční plochy modelu (obr. 4.15). Tímto způsobem byla vytvořena simulace, kdy Slunce svítí na model z boční strany.



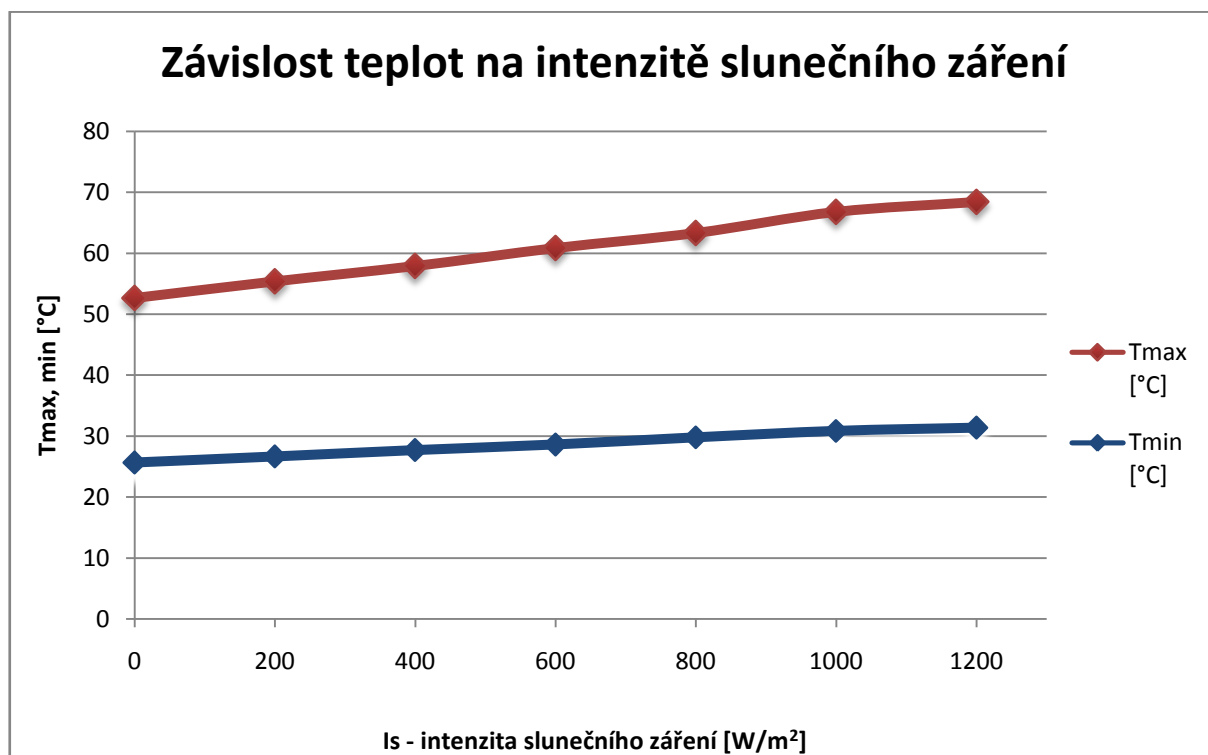
Obr. 4.15: Vybrané boční plochy modelu

Intenzita slunečního záření I_s byla měněna v rozmezí 0 až 1200 W/m^2 dle [15]. Ostatní parametry zůstaly neměnné. Získané výsledky jsou vyneseny do tabulky 4.4. Byla zaznamenána vždy nejvyšší a nejnižší teplota modelu. Nejvyšší teplota odpovídá proudovodnému lanu ozářenému slunečním zářením, nejmenší teplota pak podstavě lanové spojky.

Získané výsledky byly následně vyneseny do grafického vyjádření.

I_s [W/m^2]	0	200	400	600	800	1000	1200
T_{max} [$^{\circ}C$]	52,66	55,39	57,92	60,87	63,31	66,78	68,43
T_{min} [$^{\circ}C$]	25,65	26,64	27,69	28,61	29,78	30,84	31,37

Tabulka 4.4: Srovnání teplot dle intenzity slunečního záření



Obr. 4.16: Závislost teplot modelu na intenzitě slunečního záření

Z grafické závislosti je patrné, že nejvyšší rozdíly se projevují v krajních bodech simulace. Nulová intenzita slunečního záření napodobuje noční oblohu a naopak během dne může sluneční záření dosahovat svého maxima. Vliv intenzity slunečního záření na teplotu modelu se pohybuje v nejvyšším rozmezí zhruba o 16 $^{\circ}C$. V našich klimatických podmínkách nedosahuje intenzita slunečního záření vyšších hodnot. Proto lze tuto klimatickou veličinu považovat za méně významnou než teplotu okolního prostředí, ale přesto ji nelze zanedbat při výpočtech dimenzování.

4.3.6 Simulace se zřetelem na emisivitu povrchu

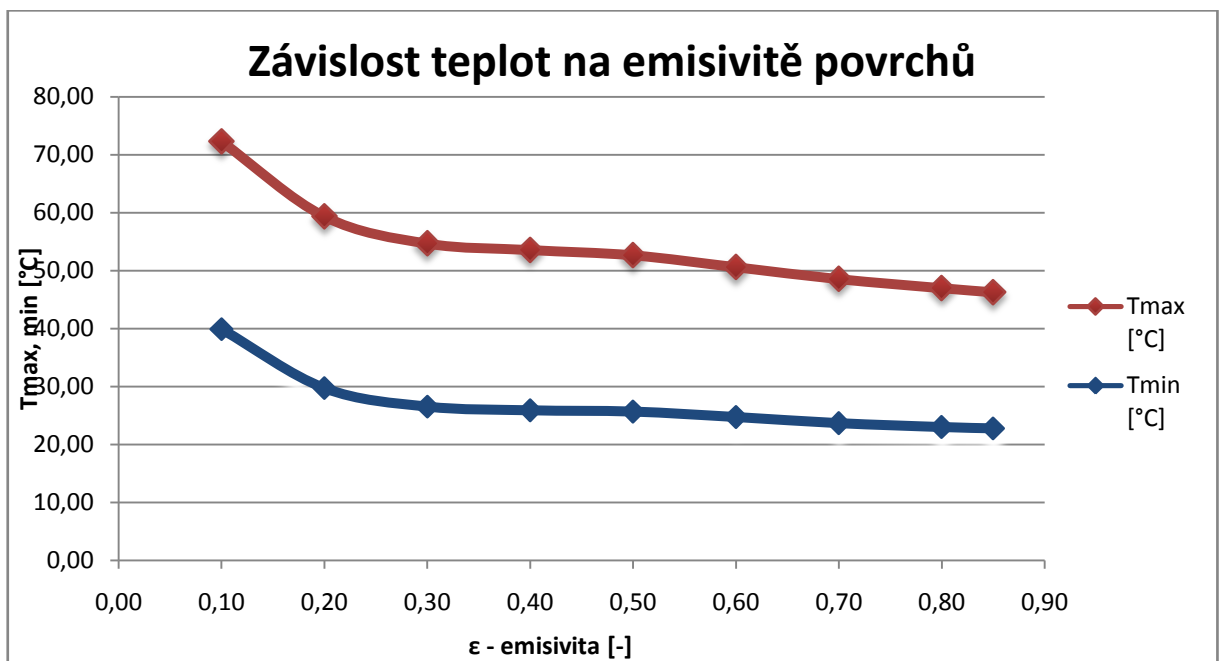
Výpočet byl prováděn z výchozích podmínek za změny parametru součinitele emisivity a ostatní parametry byly považovány za neměnné. Změna součinitele emisivity byla prováděna v rozsahu 0,1 ÷ 0,85. Tento postup je přejat z [15]. Vliv slunečního záření zde nebyl uvažován.

Série těchto citlivostních analýz si klade za cíl zjistit vztah mezi emisivitou a teplotou modelu v závislosti na oxidaci kovových materiálů, tedy jejich povrchů, z nichž je model lanové spojky přípojnice tvořen.

Získané výsledky byly následně vyneseny do grafického vyjádření.

ε [-]	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,85
Tmax [°C]	72,29	59,35	54,68	53,57	52,66	50,61	48,55	46,99	46,28
Tmin [°C]	39,87	29,70	26,51	25,87	25,65	24,71	23,65	22,98	22,75

Tabulka 4.5: Srovnání teplot dle emisivity



Obr. 4.17: Závislost teplot dle emisivity

Hodnota koeficientu emisivity výrazně ovlivňuje teplotu vodiče, jak lze vidět na obr. 4.17. Pokud se bude koeficient emisivity snižovat, tak míra tepla vyzařovaného z vodiče bude také klesat a teplota ve vodiči se bude naopak zvyšovat. Míra vyzařovaného tepla bude také záviset na rozdílu teplot, jelikož byla simulace nastavena na teplotu okolního prostředí 20 °C, není rozdíl teploty okolí a tělesa nijak markantní.

4.4 Srovnání simulace s analytickým výpočtem

Pro možnost srovnání výstupu simulace jsem provedl analytický výpočet oteplení trubkového vodiče a vodiče proudovodného lana. Analytický výpočet jsem prováděl na 1 metr délky vodiče. Za tímto účelem jsem sestavil rovnici, která na jedné straně odpovídá zdrojům tepelné energie a na straně druhé odvodu této energie do okolí vodiče. Uvažoval jsem stav v noci, tedy bez vlivu slunečního záření. Řešení jsem určoval pro teplotu okolí 20 °C, jmenovitý proud 4 000 A. Činitel povrchového jevu pro trubkový vodič se rovná hodnotě 1,028, pro proudovodné lano jde o hodnotu 1,0764. Koeficient přestupu tepla sáláním byl volen pro trubkový vodič 4,25 a pro proudovodné lano 9,4. Koeficient emisivity sálání 0,5. Za pomoci metody prosté iterace jsem určil přibližné řešení rovnice.

Rovnici jsem sestavil takto.

$$P_j = P_c + P_r \quad (4.3)$$

$$k_{AC} \cdot R \cdot I^2 = \alpha \cdot S \cdot (T_c - T_{amb}) + \sigma_B \cdot \varepsilon_e \cdot S \cdot (T_c^4 - T_{amb}^4) \quad (4.4)$$

Následně jsem rovnici upravil do numerické podoby s rozložením rovnice do dvou řádek pro snazší zápis a dostal tvar 4.5 a 4.6. Platí tedy, že $n+1$. iterace se na základě n -té hodnoty teploty vodiče rovná:

$$T_{c(n+1)} = \frac{k_{AC} \cdot R \cdot I^2 - \alpha \cdot S \cdot (T_{c(n)} - T_{amb})}{(\alpha \cdot S) + T_{c(n)}} \quad (4.5)$$

$$\alpha = \alpha + \frac{(\sigma_B \cdot \varepsilon_e \cdot (T_{c(n)}^4 - T_{amb}^4))}{T_{c(n)} - T_{amb}} \quad (4.6)$$

Uvedu zde příklad výpočtu pro trubkový vodič a proudovodné lano. Po dosažení všech dílčích hodnot do rovnice 4.5 jsem dostal tvar 4.6, do kterého jsem postupně dosazoval hodnoty kroků a odhadoval řešení. Rozdíly mezi iteracemi jsou odhad chyby výpočtu, čili přesnost numerické metody.

Výsledky iterací v jednotlivých krocích a rozdíly mezi jednotlivými kroky jsem uvedl do tabulky 4.6. Snažil jsem se dosáhnout rozdílu mezi jednotlivými iteracemi, tak aby byl menší než 0,01 °C.

Trubkový vodič			Proudovodné lano		
Krok - Odhad $T_{c(n)}$ [K]	Iterace - $T_{c(n+1)}$	Rozdíl iterací	Krok - Odhad $T_{c(n)}$ [K]	Iterace - $T_{c(n+1)}$	Rozdíl iterací
30	1,145	-	40	0,405	-
35	0,560	0,585	45	0,259	0,146
40	0,110	0,450	50	0,140	0,119
41	0,032	0,078	55	0,044	0,096
41,2	0,017	0,015	56	0,026	0,018
41,3	0,009	0,008	57	0,010	0,016
41,4	0,002	0,007	57,5	0,002	0,008

Tabulka 4.6: Příklad výsledných odhadů řešení pro rovnici 4.6

Díky tomuto analytickému výpočtu lze tvrdit, že odhadovaná teplota trubkového vodiče přípojnice při teplotě okolí $T_{amb} = 20\text{ °C}$ je $T_{c(n)} \cong 41,4\text{ °C}$. Pokud tento údaj srovnám s výchozí simulací uvedenou v kapitole 4.3.3 dojdou k závěru, že simulace odpovídá reálnému fyzikálnímu řešení, protože teplota T_c v simulaci u trubkového vodiče vychází cca 38 °C .

Stejným postupem jsem určoval oteplení u proudovodných lan. U provedených analytických výpočtů jsem dospěl k výsledku $T_{c(n)} \cong 57,5\text{ °C}$. V porovnání s proudovodným lanem, kde se teplota T_c pohybuje zhruba okolo hodnoty 53 °C , jsem dospěl k závěru, že i v tomto případě odpovídá simulace fyzikální realitě.

Rozdíl mezi analytickým výpočtem oteplení trubkového vodiče a proudovodného lana oproti simulaci modelu je dán zvýšenou chladiivostí, která vzniká tepelnou vodivostí mimo proudem zatěžované části, zejména do masivní hliníkové objímky. Výpočet je prováděn pro samotné nekonečně dlouhé vodiče, které nejsou spojeny s nezatíženými částmi, tak jako je tomu v simulaci. Dále vznikají nepřesnosti ve výpočtu, související se změnou velikostí všech koeficientů v závislosti na změně teploty.

4.5 Návrh zadání následující etapy

V následující etapě by mohla být práce rozšířena o kapitoly, které by se dále zabývaly dynamickou zatížitelností. Vzhledem k pracím, které jsem již provedl, se nabízí více možných směrů pokračování výzkumu. Kapitoly by mohly mít takovouto náplň:

- 1) Citlivost na změnu rychlosti a směru větru. Dále také změna úhlu větru, který na vodič působí. Účinek větru má na teplotu vodičů podstatný účinek.
- 2) Detailnější analýza vlivu kontaktního ústrojí na teplotu spojkové soustavy. V současné práci jsem uvažoval vliv nově dobře nainstalovaných kontaktů. V další etapě by mohlo být nasimulováno více výpočtů pro různé hodnoty koeficientů kontaktního ústrojí a jejich srovnání.
- 3) Zaměření se na proudovou zatížitelnost spojkové soustavy. V další fázi by mohl být brán zřetel na změnu proudu, který prochází spojkovou sestavou. V práci se zabývám jmenovitým proudem, následující etapa by mohla být zaměřena na vyšší proudy tak, aby spojková soustava nepřekračovala provozní teploty dané normou.
- 4) Provedení měření spojkové soustavy v terénu pomocí termovizní kamery pro praktické srovnání s počítačovou simulací. I přesto, že by srovnání mohlo způsobit potíže např. kvůli stavu kontaktního ústrojí.

Závěr

V práci jsem se zaměřil na vliv dynamického zatěžování na lanové spojky trubkových přípojníc. Toto jsem provedl za využití trojrozměrného modelu vybrané spojkové sestavy. Model byl úměrně zjednodušen pro výpočty pomocí metody konečných prvků v programu COMSOL. V práci jsem se zabýval zejména ohřevem lanové spojky průchodem jmenovitého proudu a vlivem klimatických podmínek na spojkovou sestavu. V práci jsem dospěl k několika závěrům.

Zjistil jsem, že provozní teplota při jmenovitém zatížení o hodnotě 4 000 A, která v nejslabším článku lanové spojky, tedy na proudovodných lanech, v žádném případě nepřesahuje provozní teplotu udávanou normou. Teplota okolí, která má patrný vliv na celou soustavu lanové spojky, hraje jeden z nejdůležitějších klimatických vlivů. Při zvýšení teploty okolí se zvyšuje teplota spojky úměrně. Vliv výměny tepelné energie mezi plochami lanové spojky pomocí sálání je při daných podmínkách teploty okolí 20 °C zanedbatelný. Intenzita slunečního záření hraje v oteplení lanové spojky podstatný vliv, a proto se nesmí zanedbat, avšak v našich klimatických podmínkách není tento jev tak podstatný jako teplota okolí. Hodnota koeficientu emisivity výrazně ovlivňuje teplotu vodiče. Tato závislost je dána oxidací kovových materiálů, tedy jejich povrchů, z kterých je model lanové spojky trubkové přípojnice tvořen.

Rozdíl mezi analytickým výpočtem oteplení trubkového vodiče a proudovodného lana oproti simulaci modelu je dán zvýšenou chladivostí modelu spojky. Tato chladivost vzniká odvodem tepelné energie mimo proudem zatěžované části, zejména do masivní hliníkové objímky. Pro další řešení tohoto problému by bylo vhodné provést kontrolní měření lanových spojek např. termovizní kamerou. Na základě dosažených výsledků by bylo možné spojkovou sestavu optimalizovat.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SCHEJBAL, Konstantin a Jiřina MERTLOVÁ. *Elektroenergetika II*. Vyd. 1. Plzeň: Vydavatelství Západočeské univerzity, 1998, 2 sv. ISBN 80-7082-451-42.
- [2] MERTLOVÁ, Jiřina a Lucie NOHÁČOVÁ. *Elektrické stanice a vedení*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, 2008, 168 s. ISBN 978-80-7043-724-7.
- [3] EGE - TRADING S.R.O. *Hliníkové přípojnice*. Praha, 2013. Dostupné z: http://www.ege.cz/storage/132_Pripojnice_pro_vysokonapetove_stanice_finalA4.pdf.
- [4] ELBA. *SVORKY PRE ROZVODNE VN A VVN: katalóg*. Kremnica, 2007.
- [5] DOLEŽEL, I. Neharmonické výkony. Přednáška. Plzeň: ZČU FEL, 29.10.2013.
- [6] *VDI heat atlas*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2010, xxi, 1585 s. ISBN 978-3-540-77876-9.
- [7] ÇENGEL, Yunus A. a GHAJAR, Afshin J. *Heat and mass transfer: fundamentals & applications*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, ©2011. xix, 924 s. ISBN 978-0-07-339812-9.
- [8] CIGRE W.G. B2.12 and I.C. on Large Electric Systems, Guide for Selection of Weather Parameters for Bare Overhead Conductor Ratings. CIGRE, 2006.
- [9] CIGRE W.G. 22.12, Thermal Behaviour of Overhead Conductors. CIGRE, 2002.
- [10] ADAPA, R., D.A. DOUGLASS, A. PHILLIPS, A. PHILLIPS a Fernando P. COSSÍO. Dynamic thermal ratings: monitors and calculation methods. In: *Proceedings of the Inaugural IEEE PES 2005 Conference and Exposition in Africa*. 2005, s. 33-65. DOI: 10.1002/9781118166123.ch2.
- [11] CIGRE J.W.G. B2.C1, Increasing Capacity of Overhead Transmission Lines: Needs and Solutions. CIGRE, 2010.
- [12] R. Stephen, « Real Time Monitoring », *Electra* n°197, August 2001.
- [13] INCROPERA, Frank P. *Introduction to heattransfer*. 5th ed. Danvers: John Wiley, c2007, xxv, 901 s. ISBN 978-0-471-45727-5.
- [14] HOWELL, John R. *Thermalradiationheat transfer*. 5th ed. BocaRaton: CRC Press, c2011, xxx, 957 s. ISBN 978-1-4398-0533-6.
- [15] TLUSTÝ, Josef, Jan KYNCL, Ladislav MUSIL, Jan ŠPETLÍK, Jan ŠVEC, Petr HAMOUZ, Zdeněk MÜLLER a Miroslav MÜLLER. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04940-2.

- [16] BERGMANN, R., H. LOBL, H. BOHME a S. GROSSMANN. Model to assess the reliability of electrical joints. In: *Electrical Contacts - 1996. Proceedings of the Forty-Second IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Joint with the 18th International Conference on Electrical Contacts.*
- [17] BLUMENROTH, Falk, et al. Ageing of high current joints in power transmission and distribution systems. In: *19th International Conference on Electricity Distribution.* 2007.
- [18] *Wiedemann – Franz law* [online]. 11.9.2014 [cit. 2015-03-06]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Wiedemann%E2%80%93Franz_law.
- [19] Introduction to Comsol Multiphysics. *Introduction to Comsol Multiphysics* [online]. 2013, . [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.comsol.com/shared/downloads/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>