

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ

TECHNICKÉ V PRAZE



FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

STANOVENÍ PROUDOVÉ

ZATÍŽITELNOSTI SVAZKOVÉHO

ALFE VODIČE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

SRPEN 2021

BC. MARTIN

SIROVÝ



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sirový** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **461395**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Stanovení proudové zatížitelnosti svazkového AIFe vodiče

Název diplomové práce anglicky:

Determination of Bundled ACSR Conductor Ampacity

Pokyny pro vypracování:

- 1) Provedení rešerše současných poznatků týkajících se proudové zatížitelnosti slaněných vodičů větších průřezů. Analýza a teoretický rozbor proudové zatížitelnosti těchto vodičů v uspořádání do svazku (skin a proximity efekt). Vliv symetrického a nesymetrického uspořádání vodičů ve svazku.
- 2) Sestavení výpočetního postupu zatížitelnosti jak pro samostatný lanový vodič, tak pro vodiče v uspořádání do svazku s využitím nových poznatků a metodik.
- 3) Aplikace postupu pro výpočet zatížitelnosti u typických konfigurací propojení v provedení s ACSR (AIFe) vodiči používaných v rozvodnách PS jak pro případ samostatného lanového vodiče, tak pro vodiče ve svazku (dvojsvazek, trojsvazek, čtyřsvazek). Porovnání vypočtených hodnot s aktuálně platnými hodnotami limitů ve standardech PS.
- 4) Posouzení metody i pro vodiče jiných průřezů - rozsah platnosti a závěrečné shrnutí.

Seznam doporučené literatury:

- [1] IGLESIAS, Javier; JAKL Franc. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines. Cigré, 2014. ISBN: 978-2-85873-302-6.
- [2] IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors, in IEEE Std 738-2012 (Revision of IEEE Std 738-2006 - Incorporates IEEE Std 738-2012 Cor 1-2013), ISBN: 978-0-7381-8887-4
- [3] FIALA, Karel. Technická norma ČEPS TN/58: Vodiče pro rozvodny přenosové soustavy. Praha, 2020.
- [4] FIALA, Karel. Technická norma ČEPS TN/72: Typové řešení rozvodn 420 kV ve stanicích PS. Praha, 2019.
- [5] STEPHEN, R., et al. Thermal Behaviour of Overhead Conductors. Cigré, 2002.
- [6] DORISON, E., et al. Large Cross Section and Composite Screen Design. Cigré, 2005.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Špetlík, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **11.02.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **13.08.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2022**

Ing. Jan Špetlík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji mému vedoucímu práce Ing. Janu Špetlíkovi za poskytnutí cenných informací, vedení a pomoc při tvorbě této práce. Dále děkuji Ing. Karlu Fialovi za podporu a pomoc při řešení nejen výpočetních problémů a za poskytnutí nezbytných informací a rad k dokončení této práce. V neposlední řadě děkuji své rodině za jejich podporu a trpělivost během celé doby mého studia.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 8. srpna 2021

.....

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem výpočetního programu pro stanovení maximálního proudového zatížení lanových propojů v rozvodnách 420 kV. V první části práce je proveden teoretický rozbor problematiky týkající se fyzikálních jevů ovlivňujících ampacitu vedení. Ve druhé části je popsán a navržen výpočetní program pro nejčastěji využívané svazkové vodiče v rozvodnách ČEPS a.s. V závěru práce jsou shrnuty výsledky a je provedeno porovnání s aktuálně používaným výpočetním postupem společnosti ČEPS a.s.

Klíčová slova: Ampacita vedení, zatížitelnost svazkových vodičů, rozvodny 420 kV, nesymetrické svazkové vodiče, proximity efekt

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the design of a program for determining the maximum current load of bundled ACSR conductor connections in 420 kV substations. In the first part of the work is a theoretical analysis of issues related to physical phenomena affecting the ampacity of lines. The second part describes and proposes a computer program for the most commonly used bundled conductors in substations ČEPS a.s. At the end of the work, the results are summarized and a comparison is made with the currently used calculation procedure of ČEPS a.s.

Keywords: Conductor ampacity, ampacity of bundled conductors, 420 kV substations, asymmetrical bundled conductors, proximity effect

OBSAH

ÚVOD	9
KAPITOLA 1: TEORETICKÝ ÚVOD DO PROBLEMATIKY	10
1.1 DOVOLENÁ PROVOZNÍ TEPLOTA VODIČE	10
1.2 AMPACITA VEDENÍ	10
1.3 MODEL VODIČE ACSR	11
1.4 ZATÍŽITELNOST VEDENÍ A ROZVODEN	11
1.4.1 Statická zatížitelnost.....	12
1.4.2 Dynamická zatížitelnost	13
1.4.3 Výsledná zatížitelnost.....	13
1.5 SOUČASNÝ STAV V ČEPS A VÝPOČET ZATÍŽITELNOSTI	14
1.6 SKIN EFEKT	14
1.7 PROXIMITY EFEKT	16
1.8 VLIV METEORICKÝCH PODMÍNEK	17
1.9 TEPELNÝ MODEL VENKOVNÍHO VEDENÍ	17
1.9.1 Rozložení teploty v průřezu vodiče	18
1.9.2 Ohřev vodiče vlivem slunečního záření	18
1.9.3 Přenos tepla konvekci (prouděním).....	20
1.10 PŘENOS TEPLA RADIACÍ (ZÁŘENÍM)	22
1.11 VLIV SYMETRICKÉHO A NESYMETRICKÉHO USPOŘÁDÁNÍ VODIČŮ VE SVAZKU	23
1.12 POSTUP VÝPOČTU DLE METODIKY CIGRE 601	26
1.12.1 Tepelné ztráty v ustáleném stavu	26
1.12.2 Tepelné ztráty v přechodném stavu	27
1.12.3 Joulovy ztráty	28
1.12.3.1 Vliv R_{dc}	28
1.12.3.2 Vliv AC proudu	29
KAPITOLA 2: SESTAVENÍ VÝPOČETNÍHO POSTUPU ZATÍŽITELNOSTI JAK PRO SAMOSTATNÝ LANOVÝ VODIČ, TAK PRO VODIČE V USPOŘÁDÁNÍ DO SVAZKU	33
2.1 VÝPOČETNÍ MODEL	33
2.2 VÝPOČETNÍ MODEL PRO SAMOSTATNÝ VODIČ	39
2.3 VÝPOČETNÍ MODEL PRO SVAZKOVÉ VODIČE	39
2.3.1 Vstupní konfigurace svazkových vodičů:	39
KAPITOLA 3: APLIKACE PRO VÝPOČET ZATÍŽITELNOSTI U TYPICKÝCH KONFIGURACÍ PROPOJENÍ V PROVEDENÍ S ASCR (ALFE) VODIČI POUŽÍVANÝCH V ROZVODNÁCH PS	42
3.1.1 Výpočet koeficientu skin efektu	43
3.1.2 Výpočet Joulových ztrát.....	43
3.1.3 Výpočet solárního ohřevu.....	44
3.1.4 Celkový ohřev vodiče	44
3.1.5 Výpočet chlazení konvekci	44
3.1.6 Výpočet chlazení radiací.....	47
3.1.7 Zatížitelnost pro dané klimatické podmínky	47
3.1.8 Výpočet koeficientu skin efektu	48
3.1.9 Výpočet Joulových ztrát.....	48
3.1.10 Výpočet solárního ohřevu	49

3.1.11	Celkový ohřev vodiče.....	49
3.1.12	Výpočet chlazení konvekcí	50
3.1.13	Výpočet chlazení radiací.....	52
3.1.14	Zatížitelnost pro dané klimatické podmínky	52
3.1.15	Výpočet koeficientu skin efektu u svazkového vodiče.....	53
3.1.16	Výpočet Joulových ztrát.....	54
3.1.17	Výpočet solárního ohřevu.....	55
3.1.18	Celkový ohřev vodiče.....	55
3.1.19	Výpočet chlazení konvekcí	55
3.1.20	Výpočet chlazení radiací.....	57
3.1.21	Zatížitelnost pro dané klimatické podmínky	58
KAPITOLA 4: POSOUZENÍ METODY I PRO VODIČE JINÝCH PRŮŘEZŮ – ROZSAH PLATNOSTI A ZÁVĚREČNÉ SHRNUÍ		60
LITERATURA		62
PŘÍLOHA A: PŘÍKLAD SEZNAMU SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		64
A.1	SEZNAM SYMBOLŮ	64
A.2	SEZNAM ZKRATEK.....	64
PŘÍLOHA B: VÝPOČETNÍ MODEL SVAZKOVÉHO VODIČE		66

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1 – Lano ACSR 758-AL1/43-ST1A [2]	11
Obrázek 1-2 Ilustrace skin efektu [10]	15
Obrázek 1-3 Ilustrace vzájemného vlivu ozařování vodičů ve svazku [8]	23
Obrázek 1-4 - Nesymetrické uspořádání [16]	24
Obrázek 1-5 - Symetrické uspořádání [16]	24
Obrázek 1-6 Ilustrace rozložení proudové hustoty v symetrickém svazku [8]	25
Obrázek 2-1 Ukázka symetrického trojsvazku z výpočetního modelu	34
Obrázek 2-2 - Ukázka vodiče ACSR 758-AL1/43-ST1A ve výpočetním modelu	40
Obrázek 3-1- Ukázka vlivu skin efektu ve vodiči ACSR 758-AL1/43-ST1A	48
Obrázek 3-2 ukázka rozložení proudové hustoty v nesymetrickém svazku [16]	53
Obrázek 3-3 - Ukázka rozložení proudů v symetrickém trojsvazku 100x 100 mm	54

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Vlastnosti vodiče ACSR 758-AL1/43-ST1A [TN58 – příloha 2]	11
Tabulka 2 - Koefficienty pro výpočet přirozené konvekce [16]	20
Tabulka 3 - Vypočtené hodnoty Kprox a zatížitelnosti dle výpočetního programu	59
Tabulka 4 - Vypočtené hodnoty Kprox a zatížitelnosti dle výpočetního programu	60

ÚVOD

Tato práce se zabývá výpočtem zatížitelnosti svazkových vodičů v rozvodnách 420 kV. Cílem této práce je stanovení proudové zatížitelnosti lanových propojů v rozvodnách ČEPS a.s, které jsou tvořeny lany ACSR 758-AL1/43-ST1A. Vypočtené hodnoty budou porovnány s hodnotami aktuálně používanými ve společnosti ČEPS a.s. a na základě porovnání bude provedeno zhodnocení přesnosti současného způsobu výpočtu. Výpočetní model bude respektovat vlastnosti vodiče samotného i vlastnosti celého svazku a bude navržen pro nejčastěji používané svazkové konfigurace v rozvodnách 420 kV.

KAPITOLA 1: TEORETICKÝ ÚVOD DO PROBLEMATIKY

1.1 Dovolená provozní teplota vodiče

Jedná se o maximální teplotu vodiče, při které může vodič trvale pracovat. Teplota je specifikována výrobcem a stanovuje se s ohledem na hospodárny provoz daného vodiče. Závisí na použité izolaci, provozních podmínkách, velikosti protékajícího elektrického proudu a okolních klimatických podmínkách. Vlivem tepelné roztažnosti dochází při oteplení vodiče k jeho prodloužení. Z tohoto důvodu je nutné při navrhování konkrétní aplikace prověřit maximální průhyb vodiče nad terénem, dle jeho maximální možné teploty.

Při návrhu systému je nutné uvažovat i toto prodloužení, aby byly zajištěny dostatečné bezpečnostní vzdálenosti.

1.2 Ampacita vedení

Ampacita vedení vychází z anglického názvu Ampere Capacity, což lze volně přeložit jako proudová zatížitelnost. Jde tedy o maximální možné trvalé zatížení vodiče s ohledem na jeho hospodárny provoz a s ohledem na bezpečnost provozu. Ampacita vychází mj. z dovolené provozní teploty, uvažované pro konkrétní klimatické podmínky. V praxi se rozlišuje statický výpočet ampacity, který je dán pro definované neměnné podmínky a dynamický výpočet, který respektuje aktuální změny okolních klimatických podmínek a v jejich závislosti upravuje ampacitu pro konkrétní zkoumaný provozní stav. Pomocí dynamického výpočtu je tedy možné efektivněji využívat přenosové kapacity vedení.

Existuje velké množství výpočetních modelů. Některé metody se zaměřují na výpočet oteplení obecného vedení, s pokud možno co nejuniverzálnějším výpočtem, aplikovatelným na široké spektrum aplikací. Tyto modely jsou však méně přesné. Přesnější výpočetní modely jsou navrženy na konkrétní typy vodičů, vedení a provozní podmínky. Tato práce se bude zabývat optimalizací výpočetních metod pro výpočet ampacity venkovních vodičů používaných na napěťových hladinách 220 kV a 400 kV.

1.3 Model vodiče ACSR

Cílem výpočetního modelu je stanovení proudové zatížitelnosti lanových propojů v rozvodnách ČEPS a.s. Tyto propoje jsou realizovány pomocí lan ACSR 758-AL1/43-ST1A. V následující tabulce jsou uvedeny vlastnosti uvažovaného vodiče.

označení	průřez			počet drátů		průměr drátů		průměr		DC odpor	součinitel délkové roztlačnosti
	AL	ST	celkový			AL	ST	duše	celkový		
	mm ²	mm ²	mm ²	AL	ST	mm	mm	mm	mm	Ω/km	1/K
758-AL1/43-ST1A	758,09	43,1	801,19	12+18+	1+6	2,9	2,8	8,4	36,5	0,038 4	2,11E-05
				18+24		4,12					

Tabulka 1 - Vlastnosti vodiče ACSR 758-AL1/43-ST1A [TN58 – příloha 2]

Vodič se skládá z ocelové duše, která se nepodílí na vedení elektrického proudu a je proto z výpočtu vynechána a ze čtyř vrstev hliníkových drátů. První dvě vrstvy jsou složeny z drátů o průměru 2,9 mm. Dvě vnější vrstvy obsahují dráty o průměru 4,12 mm. Jednotlivé vrstvy vodiče jsou vůči sobě v podélném pohledu vzájemně natočeny, aby došlo k částečnému omezení skin efektu a proximity efektu [19].



Obrázek 1-1 – Lano ACSR 758-AL1/43-ST1A [2]

1.4 Zatížitelnost vedení a rozvoden

V současném stavu se v přenosové soustavě vyskytují různé typy vedení z hlediska možného přetěžování.

Zmodernizovaná, nebo nově postavená vedení jsou dimenzována tak, aby splňovala předepsané bezpečné vzdálenosti při ohřevu vodičů do 80 °C. U těchto vedení je nutné jak správné dimenzování křížovatek jednotlivých vedení, tak i vhodný návrh výškového profilu vedení s ohledem na terén a objekty pod vedením. Takto navržená vedení umožňují krátkodobé přetěžování.

Další kategorií tvoří vedení, která jsou posouzená příslušnou studií na maximální provozní teplotu vodiče 40 °C.

Poslední kategorií tvoří vedení, u kterých bylo příslušnou studií prokázáno, že nesplňují bezpečnostní limity vzdáleností při 40 °C, nebo ještě nedošlo k odbornému posouzení o splnění požadovaných limitů bezpečnostních vzdáleností v celé jeho délce. [3]

V přenosové soustavě se taktéž nachází různé druhy a provedení rozvodů. Specifickým typem rozvodny jsou tzv. zapouzdřené rozvodny. U tohoto typu již nejsou jednotlivé spoje realizovány jako ACSR lana ve vzduchu. Jediné lanové spoje se nachází na přívodech a vývodech z GIS. Proto bude tato práce zaměřena pouze na výpočet lanových propojů k vývodům, nikoli k určení zatížitelnosti uvnitř rozvodny. U modernějších typů jsou přípojnice v rozvodnách zhotoveny z trubek, které mají mnohem větší možné proudové zatížení než lanové spoje. Většina rozvodů přenosové soustavy je však již zmodernizována, nebo jejich modernizace probíhá. Výrobci přístrojů pro vybavení rozvodů v dnešní době bez problémů dosahují proudové zatížitelnosti jednotlivých přístrojů až 4 000 A. Přetížitelnost jednotlivých zařízení tedy není limitujícím faktorem. Nejkritičtější prvkem při výpočtu zatěžování a případného přetěžování v rozvodnách jsou tedy lanové spoje v rozvodnách, které takto vysokých hodnot nedosahují. Výpočtem zatížitelnosti těchto propojů se proto zabývá tato práce. [3]

1.4.1 Statická zatížitelnost

Statická zatížitelnost odpovídá hodnotě proudu, kterým je možno trvale zatěžovat určité vedení, nebo přístroj. Tato zatížitelnost je stanovena v projektu ke konkrétnímu vedení, ve kterém jsou uvažovány místní klimatické podmínky. Dalším limitem je připojení vedení v rozvodnách, které je řešeno technickou normou ČEPS TN 58 a vychází z klimatických podmínek předepsaných v této normě. Neposledním limitem statické zatížitelnosti je dovolené zatížení samotných přístrojů, umístěných v rozvodnách.

Výsledná statická proudová zatížitelnost je určena jako minimum ze všech hodnot zatížitelností přístrojů v jednotlivých polích rozvodny, připojených k danému vedení a samotné zatížitelnosti vedení.

Statická zatížitelnost není ovlivněna aktuálními klimatickými podmínkami a představuje základní představu o možnostech využití kapacity linky. [3]

1.4.2 Dynamická zatížitelnost

Statická zatížitelnost je základní hodnota proudu, kterým je možné dané vedení zatěžovat. Vzhledem k měnícím se klimatickým podmínkám v jednotlivých dnech a hodinách je výhodné upravovat zatížitelnost vedení v reálném čase. Dynamická zatížitelnost tedy představuje takový proud, kterým je možné zatěžovat dané vedení, nebo propojení v rozvodnách, s ohledem na momentální klimatické podmínky v okolí. Při tomto zatěžování lze naplno využít přenosovou kapacitu linky. Predikce dynamického zatěžování je založena na hodnotách klimatických podmínek z minulých let v daném dni a měsíci, z meteorologických předpovědí a z aktuálních dat, poskytovaných ČHMU. Tato data jsou následně zpracovávána ve výpočetním modelu vedení a rozvodu a na jejich základě dochází k určení možné velikosti dynamického zatížení konkrétních úseků vedení a propojení v rozvodnách.

Dynamické zatěžování je možné použít pouze u zmodernizovaných, nebo nových vedení. Ve výjimečných případech lze tento způsob zatěžování použít i u vedení, která jsou posouzená příslušnou studií na maximální provozní teplotu vodiče 40 °C.

Při výrazně teplém počasí, kdy teploty přesahují hranici 35 °C, může docházet k poklesu dynamické hodnoty zatížitelnosti pod hodnotu statické zatížitelnosti. V takovém případě je nutné zatěžovat dané vedení dle dynamické zatížitelnosti. [3]

1.4.3 Výsledná zatížitelnost

Výsledná zatížitelnost je stanovena na základě výpočetního programu, který uvažuje aktuální topologii sítě, statickou zatížitelnost a dynamickou zatížitelnost. Na základě změny vstupních dat pro stanovení zatížitelností dojde k přepočtení celé soustavy a vyhodnocení jednotlivých nejslabších částí. Výpočetní program uvažuje všechny úseky polí v normálním i náhradním provozu.

Vzhledem k velmi složité predikci aktuální rychlosti větru v jednotlivých rozvodnách i podél celého vedení a k jeho možné náhlé změně rychlosti a směru je ve výpočtech ochlazování vodičů větrem zanedbáno. Ze stejného důvodu je zanedbán i ohřev slunečním osvitěm. Proto je ve výpočetních programech ponechána dostatečná bezpečnostní rezerva.

Dalším limitem pro výslednou zatížitelnost může být zejména na zahraničních vedeních aktuální situace v sousedních přenosových soustavách. Zde může dojít k dočasnému omezení zatížitelnosti dané linky vlivem aktuálních klimatických podmínek, nebo i k dlouhodobému nastavení snížené zatížitelnosti z důvodu horšího technického stavu v sousedních přenosových soustavách, nebo z důvodu odstavení některého z vedení sousedních PS. [3]

1.5 Současný stav v ČEPS a výpočet zatížitelnosti

V současném stavu je výpočet zatížitelnosti svazkového vodiče řešen pouze jako jmenovitá zatížitelnost použitého lana, násobená počtem lan ve svazkových vodičích. Do nedávné doby byl tento způsob výpočtu postačující, nicméně s nárůstem moderních technologií přichází i větší možnost monitoringu potřebných úseků a vedení. Vzhledem k neustále se zvyšujícímu tlaku na kvalitu služeb a spolehlivost přenosové soustavy je potřeba upřesnit tento výpočet. Přesnější určení zatížitelnosti lanových propojů v rozvodnách pomůže zároveň i k využití maximální možné kapacity přenosové linky při respektování všech bezpečnostních požadavků. Z tohoto důvodu se práce zaměřuje na tvorbu výpočetního modelu pro konkrétní typy svazkových vodičů, které jsou reálně používány v rozvodnách přenosové soustavy ČR, nebo se o jejich použití uvažuje. [3]

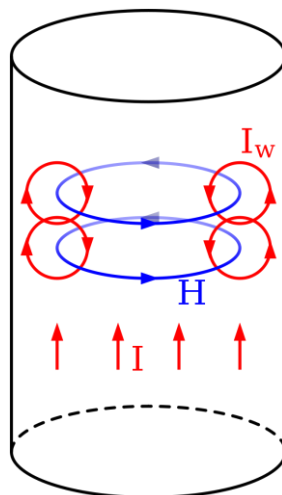
1.6 Skin efekt

Skin efekt vzniká v harmonických obvodech vlivem nerovnoměrného rozložení proudové hustoty v řezu vodiče. V případě stejnosměrného proudu dochází k přenosu konstantního elektrického výkonu a všechny elektrony proudí jedním směrem. Výsledné magnetické pole je proto konstantní a elektrický proud je schopen protékat v celém průřezu vodiče. V případě harmonických systémů dochází k vytlačování proudové hustoty proměnným magnetickým polem, v důsledku zvyšování odporu jádra vodiče. [4]

Dle indukčního zákona dochází vlivem tohoto proměnného magnetického pole ve vodiči k indukci malé smyčky vířivých proudů. Tyto vířivé proudy se superponují k primárnímu magnetickému poli, vytvořeného tokem elektrického proudu vodičem. Dle Lencova pravidla pak indukované vířivé proudy uvnitř objemu vodiče působí proti změnám energie a snižují hodnoty magnetického toku a tím i elektrického proudu.

Vznik vířivých proudů je závislý na frekvenci protékajícího proudu, měrné elektrické vodivosti a permeabilitě materiálu. V případě, kdy tyto tři součinitelé dosahují dostatečně velkých

hodnot, může proudová hustota uvnitř vodiče klesnout prakticky k nule. Na povrchu vodiče naopak proudová hustota exponenciálně roste [5].



Obrázek 1-2 Ilustrace skin efektu [11]

Průběh proudové hustoty ve vodiči lze získat ze vztahu:

$$J(f) = J_{max} \cdot e^{-\frac{d}{\delta}} \quad (1-1)$$

kde

d = průměr vodiče (mm)

δ = hloubka vniku (mm)

Koeficient hloubky vniku popisuje hodnotu, kdy intenzita magnetického pole poklesne na 37 % své povrchové hodnoty f_{max} [6]. Hloubku vniku u materiálů používaných v energetice lze ovlivnit pouze úhlovou rychlostí, tedy frekvencí. V těchto materiálech, při síťové frekvenci, vychází hloubka vzniku přibližně na 10 mm. Vodiče používané v PS mají několikanásobně větší poloměr, proto je nutné tyto ztráty při výpočtu uvažovat[4]. Hloubku vniku lze spočítat z rovnice[13]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (1-2)$$

kde

ω = úhlová rychlost (rad/s)

μ = permeabilita materiálu vodiče (H/m)

Jedním z opatření proti skin efektu je rozdělení velkého vodiče na několik menších. Tato jednotlivá vlákna v laně mohou být zároveň navinuta tak, aby procházela střídavě celým průřezem vodiče. Za předpokladu vzájemné izolace jednotlivých vláken dojde ke zlepšení rozložení proudové hustoty. Vzájemná izolace vláken je v praxi často tvořena povrchovou oxidací jednotlivých vláken v laně. Nejedná se ovšem o dokonalou izolaci, ale pouze o navýšení přechodového odporu mezi vlákny v laně. Tato povrchová oxidace je zároveň silně závislá na stáří lana a prostředí, ve kterém se lano nachází.

1.7 Proximity efekt

Proximity efekt (efekt blízkosti) způsobuje nerovnoměrnou distribuci proudové hustoty uvnitř vodiče, vlivem vzájemného ovlivňování magnetických polí jednotlivých vodičů ve svazkovém uspořádání. V případě, kdy vodiče vedou elektrický proud stejným směrem, dochází ke zvyšování proudové hustoty v částech vodiče, které jsou od sebe nejvíce vzdáleny. Tím dochází k omezení průřezu vodiče, který je schopen přenášet elektrický proud a k nárůstu Joulových ztrát [9].

Tento nárůst Joulových ztrát lze vyjádřit pomocí koeficientu proximity efektu dle vztahu:

$$R_{ac} = k_{proximity} * R_{dc} \quad (1-3)$$

Obecně lze říci, že čím je mezi jednotlivými vodiči menší vzdálenost, tím je proximity efekt výraznější. Proximity efekt závisí na frekvenci elektrické soustavy, průřezu, materiálu a struktuře použitého vodiče. V praxi se proximity efekt omezuje rozdělením jednoho plného vodiče na několik menších, spletených vodičů (např. AlFe lana). V tomto případě je však nutné zahrnout do výpočtu vlastnosti a uspořádání jednotlivých dílčích vodičů, včetně vzájemných přechodových odporů. Při analýze přechodových odporů mohou nastat dva extrémní stavy:

- Při zanedbatelně malém přechodovém odporu se bude lano chovat jako jeden koaxiální vodič. V tomto případě se proximity efekt projeví v plné míře.

- Pokud bude přechodový odpor lana nekonečně velký, budou se vodiče chovat jako soustava jednotlivých, navzájem izolovaných vodičů. V tomto případě se proximity efekt projeví zcela minimálně.

V praxi závisí přechodový odpor především na vzniku oxidace jednotlivých vodičů. Toto je však dlouhotrvající postupný proces, jehož rychlost je ovlivněna mnoha faktory. Pro výpočet je tedy doporučeno uvažovat nejhorší možnou variantu – přechodový odpor jednotlivých vodičů je zanedbatelně malý [9].

1.8 Vliv meteorických podmínek

Klimatické podmínky mají zásadní vliv na proudovou zatížitelnost vodiče. Jejich důsledkem dochází k ochlazování, případně k ohřívání vodiče. Mezi meteorologické parametry ovlivňující proudovou zatížitelnost vodiče patří okolní teplota, rychlost větru a jeho směr a sluneční záření.

V případě, že je vodičem přenášen konstantní výkon a jeho teplota se nemění, lze tento stav definovat jako ustálený [1].

1.9 Tepelný model venkovního vedení

Při analyzování klimatických vlivů na vedení lze vycházet z následující rovnice:

$$M \cdot c_P \cdot \frac{dT_{AV}}{dt} = P_j + P_s + P_M - P_R - P_C \quad (Wm^{-1}) \quad (1-4)$$

kde

M	= poměrná hmotnost vodiče (kg/m)
c_P	= měrná tepelná kapacita (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
P_j	= Joulovy ztráty (W/m)
P_s	= Výkon dodaný slunečním zářením (W/m)
P_M	= výkon dodaný magnetickým polem (W/m)
P_R	= výkon odvedený sáláním (W/m)
P_C	= výkon odvedený konvekcí (W/m)

V rovnici jsou uvedeny všechny prvky, které mohou významným způsobem ovlivnit teplotu vodiče. Na levé straně rovnice jsou uvedeny parametry popisující tepelné vlastnosti vodiče a změna teploty v časové závislosti. Na pravé straně se nacházejí tepelné zdroje, které přispívají

k oteplování vodiče a tepelné ztráty, které vodič ochlazují. Pokud je $\frac{dT_{AV}}{dt} = 0$ jedná se o statický stav, kdy je teplota vodiče ustálená na jedné neměnné hodnotě. [1]

1.9.1 Rozložení teploty v průřezu vodiče

Při vysokých proudových hustotách, větších než 2 A.mm^{-2} , je potřeba uvažovat radiální a axiální změny teploty k vyhodnocení správného průhybu vodiče. Tepelné rozložení je nutné uvažovat především kvůli závislosti odporu vodiče a velikosti tepelných ztrát. Průhyb vodiče je závislý především na teplotě jádra a velikosti přenosu tepla konvekcí a radiací, které závisí na teplotě povrchu vodiče. Z tohoto důvodu je nutné umět určit teplotu jádra i teplotu pláště vodiče.

Teplo, které je generováno ve vnitřních vrstvách vodiče, je odváděno na povrch vodiče pomocí kondukcí, konvekcí a radiací. Tento přenos tepla však závisí na mnoha proměnných, které se velmi obtížně určují. Přenos tepla závisí na přesném místě vzniku tepla, styčné ploše jednotlivých drátů v laně, míře oxidace, případně korozi jednotlivých drátů, velikosti vzduchové mezery mezi dráty atd.

Pro výpočet rozdělení teploty ve vodiči je definováno několik způsobů analytických postupů. Za předpokladu, že uvažujeme rovnoměrnou generaci tepla uvnitř vodiče, můžeme použít zjednodušený vzorec [13]:

$$T_c - T_s = \frac{P_T}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left[\frac{1}{2} - \frac{D_1^2}{D^2 - D_1^2} \cdot \left(\ln \frac{D}{D_1} \right) \right]$$

kde

- T_c = teplota povrchu vodiče (°C)
- T_s = teplota jádra (°C) (1-5)
- P_T = celkový tepelný zisk vodiče (W/m)
- λ = efektivní radiální termální vodivost (W/m)

1.9.2 Ohřev vodiče vlivem slunečního záření

Teplo, získané z dopadu slunečního záření na vodič, je přímo úměrné průřezu tohoto vodiče, absorptivitě povrchu vodiče a intenzitě dopadajícího slunečního záření [12]. Obecný výkon dodaný tímto ohřevem lze spočítat rovnicí:

$$P_S = \alpha_S \cdot I_T \cdot D \quad (Wm^{-1}) \quad (1-6)$$

kde

- α_S = koeficient absorptivity
- I_T = Intenzita dopadajícího slunečního záření (W/m^2)
- D = průměr vodiče (m)

Hodnota koeficientu α_S se pohybuje mezi hodnotou 0,2 a 0,9. Konkrétní hodnota závisí na povrchovém stavu lana. Nový vodič v čistém prostředí může dosáhnout hodnot blízkých 0,2. Naopak starší, zoxidované vodiče v průmyslovém znečištěném prostředí dosahují spíše hodnot blízkých 0,9. Nárůst koeficientu u nového vodiče může trvat jen několik měsíců, proto se tento koeficient špatně určuje. Jednou z možných metod určení koeficientu α_S je měření absorptivity jednotlivých vzorků, vystavených klimatickým podmínkám a predikce vývoje absorptivity. V praxi však obvykle nebývá dostatek času k realizaci laboratorních měření, která jsou časově náročná. Je proto možné předpokládat koeficient absorptivity 0,8 a výše [12].

Měření intenzity dopadajícího slunečního záření je v dnešní době relativně levné a rozšířené. Není proto problém monitorovat intenzitu dopadajícího slunečního záření v jednotlivých oblastech vedení a rozvodu a predikovat jejich vývoj. Tímto systémem lze dosáhnout dynamického výpočtu, který bude respektovat změnu intenzity dopadajícího slunečního záření během celého roku. Stále zde ale zůstávají lokální podmínky, které je třeba respektovat. Intenzita dopadajícího slunečního záření nebude stejná podél celého vedení. Rozdíly mohou nastat v závislosti na jednotlivých prostředích, kterými vedení prochází. Záleží zde především na orientaci vedení, zastavěnosti okolí a odrazivosti povrchu pod vedením. Během dne může také docházet ke vzájemnému stínění jednotlivých vodičů ve svazku. Ohledně stínění je doporučeno uvažovat nejhorší možný případ – ke vzájemnému stínění nebude docházet [13].

Při zahrnutí všech podmínek lze dostat přesnější rovnici pro výpočet výkonu, dodaného dopadajícím slunečním zářením [13]:

$$P_S = \alpha_S \cdot D \left[I_B \cdot (\sin(\eta) + \frac{\pi}{2} \cdot F \cdot \sin(H_S)) + I_d \cdot (1 + \frac{\pi}{2} \cdot F) \right] \quad (Wm^{-1}) \quad (1-7)$$

kde

- I_B = přímé dopadající sluneční záření (W/m^2)
- I_d = difuzní sluneční záření (W/m^2)
- F = odražené sluneční záření od povrchu země (W/m^2)

V případě tvorby výpočetního modelu je požadavek na používání konstant dle standardů technických norem ČEPS, proto bude v navrženém modelu použita konstanta dopadajícího slunečního záření na vodič $I = 1120 \text{ W/m}^2$.

1.9.3 Přenos tepla konvekcí (prouděním)

Přenos tepla konvekcí je jedním z nejvýznamnějších faktorů, přispívajících k ochlazení vodiče. Lokální účinek chlazení vodiče závisí na Nusseltově čísle.

Při nižších rychlostech větru se stává dominantní přirozená konvekce. K tomuto stavu dochází při rychlostech větru do $0,5 \text{ ms}^{-1}$. Hodnota $0,5 \text{ ms}^{-1}$ bývá také někdy uvažována jako výchozí hodnota pro výpočet zatížitelnosti vodičů. Vzhledem k tomu, že v okolí této rychlosti větru dochází k velmi výrazným změnám ve výsledné zatížitelnosti vodiče, je doporučeno vycházet při výpočtech z hodnot vyšších. Obvykle je uvažována rychlost větru $0,6 \text{ ms}^{-1}$. [13]

V případě nízkých rychlostí větru lze vycházet z následující rovnice:

$$Nu_{nat} = A \cdot (Gr \cdot Pr)^m \quad (1-8)$$

kde hodnoty A a m vycházejí z následující tabulky a jsou závislé na hodnotě součinu $Gr \cdot Pr$.

Gr.Pr		A	m
Od	Do		
10^{-1}	10^2	1,02	0,148
10^2	10^4	0,850	0,188
10^4	10^7	0,480	0,250
10^7	10^{12}	0,125	0,333

Tabulka 2 - Koeficienty pro výpočet přirozené konvekce [16]

Tyto koeficienty jsou založeny na velkém množství experimentálních měření. [16]

Při nízkých rychlostech větru je fyzika chování přestupu tepla a jeho následného odvedení do okolí velmi komplikovaná. Existují různé modely, popisující tento přestup tepla, pro jejich použití je ale nutná znalost momentálního směru větru po celé délce vedení. Při nízkých rychlostech větru

je určení jeho směru problematické a monitoring směru a rychlosti větru při takto nízkých rychlostech a po celé délce vedení je pro praxi příliš komplikovaný. Je proto doporučeno vycházet při výpočtech z vyšších hodnot rychlosti větru. [16][13]

S narůstající rychlostí větru začíná převažovat nucená konvekce. Hranicí pro přechod z přirozené konvekce na konvekci nucenou je rychlost větru $0,5 \text{ ms}^{-1}$. V tomto případě lze Nusseltovo číslo vypočítat dle následujících vztahů:

Pro úhel větru $\delta \leq 24^\circ$:

$$\frac{Nu_\delta}{Nu_{\theta_0}} = 0,42 + 0,68 \cdot (\sin^2(\delta))^{1,08} \quad (1-9)$$

Pro úhel větru $\delta > 24^\circ$:

$$\frac{Nu_\delta}{Nu_{\theta_0}} = 0,42 + 0,58 \cdot (\sin^2(\delta))^{0,90} \quad (1-10)$$

V současné době jsou ve vývoji metody, s jejichž pomocí lze danou variabilitu eliminovat. Jedním z možných řešení je tzv. efektivní rychlost větru [13]. V praxi se však stále uvažuje s rychlostí větru dle platných norem.

Výkon, přenesený pomocí konvekce lze vyjádřit rovnicí [13]:

$$P_c = \pi \cdot \lambda_f \cdot (T_s - T_a) \cdot Nu_\delta \quad (1-11)$$

kde

λ_f = tepelná vodivost vzduchu při teplotě vzduchu T_f (W/K.m)

T_s = teplota na povrchu vodiče

T_a = teplota jádra vodiče

Pokud teplota okolního vzduchu T_f nepřekročí $300 \text{ }^\circ\text{C}$, lze tepelnou vodivost λ_f vypočítat dle vztahu [13]:

$$\lambda_f = 2,368 \cdot 10^{-2} + 7,23 \cdot 10^{-5} T_f - 2,763 \cdot 10^{-8} T_f^2 \quad (1-12)$$

kde

$$T_f = 0,5 \cdot (T_s + T_a) \quad (1-13)$$

1.10 Přenos tepla radiací (zářením)

Tepelný výkon, přenesený pomocí radiace, lze rozdělit na dvě složky. Teplo, vyzařované přímo na zem a okolí a teplo vyzařené přímo na oblohu. Při použití Stefan-Boltzmannova zákona lze popsat tepelný výkon vyzařený z vodiče pomocí rovnice [14][15]:

$$P_r = \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot F_{c-g} \cdot \varepsilon_s \cdot \left[(T_s + 273)^4 - (T_g + 273)^4 \right] + \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot F_{c-sky} \cdot \varepsilon_s \cdot \left[(T_s + 273)^4 - (T_{sky} + 273)^4 \right] \quad (1-14)$$

kde

- σ_B = Stefan-Boltzmannova konstanta
- ε_s = emisivita povrchu vodiče
- T_s = teplota na povrchu vodiče
- T_g = teplota země pod vodičem
- T_{sky} = teplota oblohy nad vodičem
- F_{c-g} = energie vyzařovaná do země a okolí
- F_{c-sky} = energie vyzařovaná na oblohu

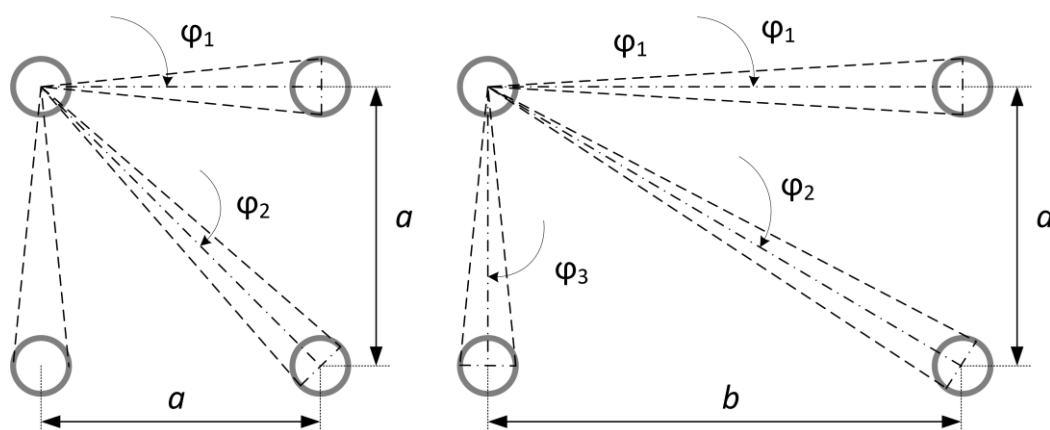
S dostatečnou přesností lze definovat $T_s = T_g$. Pak lze předchozí rovnice zjednodušit do tvaru [13]:

$$P_r = \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot \varepsilon_s \cdot (F_{c-g} + F_{c-sky}) \cdot \left[(T_s + 273)^4 - (T_g + 273)^4 \right] \quad (1-15)$$

Součet energie vyzařované do země a okolí a energie vyzařované na oblohu je roven jedné. Zápis předchozí rovnice bude proto vypadat následovně:

$$P_r = \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot \varepsilon_s \cdot [(T_s + 273)^4 - (T_g + 273)^4] \quad (1-16)$$

Výše uvedený vztah platí pro samostatný vodič, vyzařující teplo do okolí. V případě svazkových vodičů nedochází k vyzařování do celého okolního prostoru, jelikož každý vodič ozařuje část svého povrchu blízké okolní vodiče, u kterých je předpokládána stejná teplota.



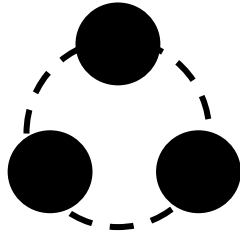
Obrázek 1-3 Ilustrace vzájemného vlivu ozařování vodičů ve svazku [9]

Na obrázku je vidět znázornění vzájemného vlivu vodičů ve svazku. Část pláště každého vodiče je zastíněna okolními vodiči ve svazku. Výpočetní model je proto nutné upravit tak, aby bylo zohledněno vzájemné stínění vodičů.

Z výše uvedených vzorců je patrné, že přenos tepla radiací je mnohem významnější při vysokých teplotách vodiče. Rozdíl ve vyzařovaném výkonu při 50 °C a při 150 °C může být i více než desetinásobný. I z tohoto důvodu je ochlazování vodiče radiací mnohem nižší než ochlazování vodiče konvekcí.

1.11 Vliv symetrického a nesymetrického uspořádání vodičů ve svazku

Při výpočtu proximity efektu hraje výraznou roli uspořádání jednotlivých vodičů ve svazku. V případě symetrického svazku jsou jednotlivé lana uspořádána v pravidelném n-úhelníku a leží na kružnici. V nesymetrickém svazku leží vodiče v jedné rovině se stejnými rozestupy.



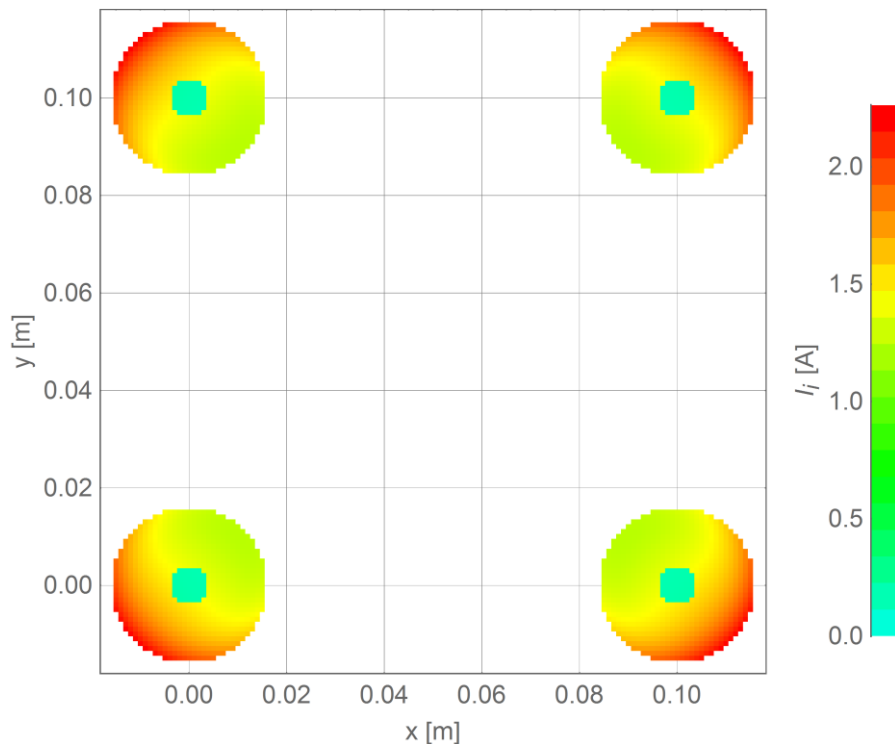
Obrázek 1-5 - Symetrické uspořádání [17]



Obrázek 1-4 - Nesymetrické uspořádání [17]

Vlivem proximity efektu dochází ke zvyšování R_{ac} v každém vodiči. V případě symetrického uspořádání vodičů ve svazku jsou všechny vzájemné indukčnosti působící mezi jednotlivými vodiči stejně velké a vliv proximity efektu je stejně velký na každý vodič ve svazku. Tento jev lze vidět na obr 1-6.

U nesymetrického uspořádání dochází navíc vlivem rozdílných vzdáleností mezi jednotlivými lany ve svazku k nesymetrickému rozdělení tekoucích proudů. Působením proximity efektu dochází k vytlačování proudů do krajních vodičů svazku, které jsou poté více proudově namáhány. Při dimenzování nesymetrických svazků je nutné tento vliv zahrnout, jelikož může dojít ke zmenšení proudové zatížitelnosti svazku až o desítky procent jmenovitého zatížení. Tento jev je významnější se zmenšující se vzdáleností mezi jednotlivými lany ve svazku. Rozložení proudové hustoty v jednotlivých lanech svazku je znázorněno na obr 1-6. [9]



Obrázek 1-6 Ilustrace rozložení proudové hustoty v symetrickém svazku [9].

V současné době se především kvůli snížené zatížitelnosti od plochých svazků ustupuje a je tendence jejich nahrazení symetrickými svazky [1].

Výpočet hodnoty proximity efektu je závislý na typu použitého lana, jeho materiálu i typu svazku. Vzhledem k vysoké variabilitě těchto kombinací není dosud známo žádné publikované analytické vyjádření, které by dávalo univerzální návod na výpočet koeficientu proximity efektu. Jednu z možných cest nabízí technická příručka Cigre [13], která uvádí výpočet pomocí Besselových funkcí. Tento typ výpočtu ovšem zanedbává některé faktory a není zcela přesný. Výpočet byl používán především v dobách před masivním rozvojem výpočetní techniky. Dnes lze ale s výhodou použít výpočetní programy na namodelování konkrétního modelu vodiče s dosažením větší přesnosti výpočtu. Hodnotu koeficientu proximity efektu je proto vhodné zjišťovat dle matematických modelů, například metodou elementárních vodičů.

Z tohoto důvodu by bylo vhodné stávajících platných metodik rozšířit o vypočítané koeficienty proximity efektu pro nejčastěji používaná lana v symetrickém i nesymetrickém uspořádání, pro následný snazší postup při určování zatížitelnosti jednotlivých vedení, či částí rozvodů. S použitím těchto koeficientů by bylo dále možné postupovat pouze s použitím analytických výpočtů.

Vliv skinefektu u svazkových a samostatných vodičů zůstává stejný, k navýšení střídavého odporu R_{ac} dojde vlivem proximity efektu ve svazkovém vodiči.

Uspořádání svazkových vodičů bude mít vliv i na přijímání a odvod tepla vlivem venkovních vlivů. V nesymetrickém uspořádání dopadá sluneční záření na všechny vodiče ve svazku a dochází tak k většímu ohřevu než u symetrických svazků, kde se uplatní jev vzájemného stínění vodičů. Na druhé straně dochází v případě svazkových vodičů ke vzájemnému předávání tepla mezi jednotlivými lany. Přestup tepla konvekcí je nejvýraznější a výrazně závisí na rychlosti a směru větru. V dalších kapitolách této práce bude podrobněji rozebrán vliv vzájemného tepelného působení vodičů ve svazku.

1.12 Postup výpočtu dle metodiky cigre 601

Tato metodika se zabývá výpočtem oteplení venkovních vodičů. Zohledňuje provoz při vysokém zatížení vodičů a vysoké provozní teplotě, včetně dynamických metod výpočtu pro venkovní vlivy. Metodika vychází z TB 207[1], která se věnuje výpočtům zatížení vodičů při nízkých povětrnostních podmínkách a konstantních vnějších vlivech. Ve výpočetním modelu je použito vylepšených postupů pro výpočet rozložení teploty ve vodiči, pro dosažení realističtějších hodnot. Použitá zpřesnění výpočetního modelu pomohou přesněji určit prodloužení (a tím i prohnutí) vodičů, provozovaných při vysoké zátěži ve vysoké teplotě. V důsledku toho je možné přesněji vypočítat dynamickou ampacitu vodiče a využít maximální možnou kapacitu uvažovaného vedení. [13]

1.12.1 Tepelné ztráty v ustáleném stavu

Ohřev venkovních vodičů závisí mj. na vnějších atmosférických vlivech, působících na vodič. Jedná se především o rychlost a směr větru, teplotu okolí a velikost slunečního záření. Za předpokladu, že budou všechny tyto jevy konstantní a proud tekoucí vodičem se nebude měnit, lze definovat výpočet pro ustálený stav. S respektováním vlivu korony a magnetických ztrát ve vodiči bude výpočet vypadat následovně [13]:

$$P_J + P_S + P_M + P_i = P_c + P_r + P_w \quad (1-17)$$

kde

- P_J = Joulovy ztráty (W/m)
- P_S = výkon dodaný slunečním zářením (W/m)
- P_M = výkon dodaný magnetickým polem (W/m)
- P_i = výkon dodaný korunou (W/m)
- P_r = výkon odvedený sáláním (W/m)
- P_c = výkon odvedený konvekcí (W/m)
- P_w = výkon odvedený odpařováním (W/m)

Ohřev pomocí korony je nejvýznamnější především při vysoké vlhkosti, vzhledem k přenosu tepla konvekcí je však zanedbatelný. Výkon odvedený díky odpařování může mít podstatný vliv na teplotu vodiče. S přihlédnutím k nízké pravděpodobnosti, že bude celá linka dlouhodobě mokrá, není tento výkon z hlediska bezpečnosti uvažován. Rovnice se zjednoduší na tvar:

$$P_J + P_S + P_M = P_c + P_r \quad (1-18)$$

Při zahrnutí ohřevu magnetickým polem do Joulových ztrát zvýšením odporu vodiče lze rovnici dále zjednodušit na [13]:

$$P_J + P_S = P_c + P_r \quad (1-19)$$

Tato rovnice je ve většině případů výpočtu ustáleného stavu dostatečně přesná.

1.12.2 Tepelné ztráty v přechodném stavu

Obecně se jak okolní podmínky, tak výkon přenášený vodičem s časem mění. Obecnou rovnici tepla lze popsat jako:

$$\textit{Teplo uložené ve vodiči} = \textit{Ohřev vodiče} - \textit{Tepelné ztráty}$$

Teplo uložené ve vodiči způsobuje změnu teploty vodiče s určitou časovou konstantou, která je závislá na vlastnostech materiálu vodiče. Tepelnou bilanci vodiče lze tedy vypočítat jako v ustáleném stavu s přihlédnutím k časově závislým charakteristikám. [13]

Lze uvažovat několik variant změny vnějších vlivů na vodič. Jednou z často zkoumaných variant je analýza změny teploty při skokové změně proudu za neměnných atmosférických podmínek. Za uvažování těchto podmínek lze spočítat čas, za který vodič dosáhne určité teploty. Tuto analýzu je možné využít k předvídání krizových situací. Zohledněním změn rychlosti a směru větru, okolní teploty a slunečního záření lze podrobněji analyzovat chování vodiče v čase a použít hodnoty pro zpřesnění dynamického výpočtu. Nevýhodou je nutnost instalování měřících zařízení po celé délce zkoumaných vedení.

Zvláštním případem je výpočet oteplení vodiče při zkratu. Tyto děje jsou obvykle tak rychlé, že je jakýkoliv vliv okolních atmosférických podmínek zanedbatelný. Tento stav se nazývá adiabatický a neuvažuje se v něm žádné ochlazování vodiče. Rovnice se zjednoduší do tvaru:

$$\textit{Teplo uložené ve vodiči} = \textit{Ohřev vodiče}$$

Průchodem velkého proudu vodičem při zkratu dochází k velmi rychlému ohřevu vodiče a je nutné tento stav dostatečně rychle eliminovat. V opačném případě by mohlo dojít k poškození vodiče. [13]

1.12.3 Joulovy ztráty

Joulovy ztráty odpovídají energii, generované průchodem proudu vodičem. Tato energie je přeměňována na teplo a výrazně přispívá k ohřevu vodiče. Generovanou energii lze rozdělit na energii generovanou DC proudem a energii generovanou skin efektem při použití AC proudu. [13]

1.12.3.1 Vliv R_{dc}

Joulovy ztráty na jednotku délky lze při zanedbání průchodu střídavého proudu vyjádřit následovně:

$$P_j = I^2 \cdot R_{dc} \quad (1-20)$$

kde

I = efektivní hodnota proudu (A)

R_{dc} = činný odpor vodiče

Činný odpor vodiče R_{dc} (Ω/m) je závislý na měrném odporu ρ použitého materiálu, jehož hodnota závisí na teplotě. Hodnotu měrného odporu při libovolné teplotě lze spočítat dle vzorce:

$$\rho = \rho_{20} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (T_{AV} - 20) + \zeta_{20} \cdot (T_{AV} - 20)^2]$$

kde

ρ = měrný odpor (Ωm) (1-21)

$\rho_{20}, \alpha_{20}, \zeta_{20}$ = teplotní koeficienty při teplotě 20 °C

T_{av} = průměrná teplota vodiče (°C)

Výsledný odpor R_{dc} dostaneme dle vztahu:

$$R_{dc} = \frac{\rho}{A} \quad (1-22)$$

1.12.3.2 Vliv AC proudu

V důsledku použití AC proudu dochází k vytlačování proudu tekoucího vodičem na okraj vodiče a tím k nárůstu proudové hustoty na okraji vodiče. Tento jev je známý jako skin efekt a v jeho důsledku dochází ke zvýšení odporu vodiče. Vztah pro Joulovy ztráty je proto nutné přepsat do následující podoby:

$$P_J = k_{sk} \cdot I^2 \cdot R_{dc} \quad (1-23)$$

kde

k_{sk} = koeficient vlivu skin efektu

Koeficient skin efektu vzrůstá s narůstajícím průřezem vodiče a s narůstající frekvencí AC proudu. [13]

Intenzita elektrického pole vztažená na jednotku elektrického proudu je komplexní číslo, jehož reálná část je definována:

$$\left(\frac{E}{I}\right)_R = \text{Real} \left[\frac{\rho \cdot (1 - j)}{D \cdot \pi \cdot \delta} \cdot \left(\frac{J_0}{J_1}\right) \right] \quad (1-24)$$

kde

- D = průměr vodiče (m)
- δ = hloubka vniku
- J_0 = Besselova funkce prvního druhu a 0 pořadí
- J_1 = Besselova funkce prvního druhu a 1 pořadí

Hloubka vniku je definována jako vzdálenost od povrchu vodiče, ve které klesne proudová hustota pod 37 % z hodnoty proudové hustoty na povrchu vodiče. Její hodnotu lze vypočítat ze vztahu:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{4 \cdot f \cdot \pi^2 \cdot \mu_r \cdot 10^{-7}}} = 503,3 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu_r}} \quad (1-25)$$

V případě výpočtu hloubky vniku v celém vodiči se uvažuje pouze relativní permeabilita vodivého materiálu vodiče. Potom lze uvažovat $\mu_r \approx 1$. V případě, kdy je požadován samostatný výpočet pro hloubku vniku v jádře a ve vodivém plášti vodiče, je možno uvažovat relativní permeabilitu obou materiálů. R_{AC} by pak byl dán dvěma paralelními odpory $R_{AC(Al)}$ a $R_{AC(Fe)}$. [13]

J_1 a J_2 lze určit z obecného vyjádření Besselovy funkce:

$$J_n = x^n \cdot \sum \left[\frac{(-1)^m \cdot x^{2m}}{2^{2m+n} \cdot m! \cdot (m+n)!} \right] \quad (1-26)$$

kde

- m = $\langle 0, \infty \rangle$
- n = pořadí Besselovy funkce
- x = proměnná Besselovy funkce

Při respektování běžně používaných síťových frekvencí a rozsahu vodičů v ES lze vyjádřit J_0 a J_1 s dostatečnou přesností jako:

$$J_0(x) = \left[1 - \left(\frac{x}{2}\right)^2 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^4 - \frac{1}{36} \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^6 \right] \quad (1-27)$$

a

$$J_1(x) = \left[\frac{x}{2} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^3 + \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^5 - \frac{1}{144} \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^7 \right] \quad (1-28)$$

kde:

$$x = \frac{(1-j) \cdot D}{2 \cdot \delta} \quad (1-29)$$

Podrobný výpočet skin efektu je popsán v metodice Cigre TB 601, kde jsou uvedeny i všechny potřebné koeficienty pro odvození výpočtu. V této práci byl však navrhnout výpočetní model, který respektuje fyzikální vlastnosti požadovaného lana typu ACSR. V kapitole 3 bude provedeno porovnání matematického výpočetního modelu s postupem dle technické metodiky TB 601. [13]

V případě použití svazkových vodičů dochází ke zvýšení R_{ac} vlivem proximity efektu. V tomto případě je nutné do výpočtu zavést ještě koeficient proximity efektu k_{prox} , který je pro jeden samostatný vodič roven jedné. [13]

$$P_j = k_{sk} \cdot k_{prox} \cdot I^2 \cdot R_{dc} \quad (1-30)$$

kde

k_{sk} = koeficient proximity efektu

Výsledný vztah pro výpočet Joulových ztrát bude vypadat následovně:

$$P_j = k_{sk} \cdot k_{prox} \cdot I^2 \cdot R_{dc} \cdot [1 + \alpha(T_{AV} - 20)] \quad (Wm^{-1}) \quad (1-31)$$

kde

I = efektivní hodnota proudu (A)

R_{dc} = činný odpor vodiče při teplotě 20 °C (Ω/m)

T_{av} = průměrná teplota vodiče (°C)

Vzhledem k chybějícím analytickým výpočtům pro koeficient proximity efektu je součástí této práce navržen program pro výpočet koeficientu zohledňujícího vliv proximity efektu i skinefektu. S tímto koeficientem je dále počítáno dle platných norem a příruček, které již obsahují následné postupy pro přesné určení zatížitelnosti vodiče.

KAPITOLA 2: SESTAVENÍ VÝPOČETNÍHO POSTUPU ZATÍŽITELNOSTI JAK PRO SAMOSTATNÝ LANOVÝ VODIČ, TAK PRO VODIČE V USPOŘÁDÁNÍ DO SVAZKU

2.1 Výpočetní model

Obecný postup výpočtu zatížitelnosti samostatného vodiče lze realizovat pomocí dostupných norem a metodik. Tyto návody ovšem pracují s velkým množstvím koeficientů, které vychází jak z konkrétních výpočtů, tak i z dlouhodobých zkušeností a měření. Z tohoto důvodu je velmi komplikované použít dostupné výpočty na jiný typ vodiče, než pro který je výpočet, či daný koeficient určen. Metodika CIGRE TB 601 [13] nabízí výpočetní postup pro vodič typu „hollow, helical stranded“. Do této kategorie vodičů lze zařadit i zkoumané ACSR lano. Při výpočtu samostatného vodiče bude porovnána hodnota vypočtená dle příručky s hodnotou vyplývající z matematického modelu pro konkrétní vodič. Vzhledem k návrhu koeficientů v metodice CIGRE TB 601, založeného i na konkrétních měřeních, lze předpokládat vyšší hodnotu koeficientu skin efektu oproti teoretickému matematickému modelu. Tento rozdíl může být zapříčiněn především vzájemným přechodovým odporem mezi jednotlivými dráty v laně, který lze jen těžko odhadovat a který je silně závislý na stáří vodiče a prostředí ve kterém se nachází.

Výpočetní algoritmus vychází z impedanční matice zapsané do rovnice:

$$[U] = [Z][I] \quad (2-1)$$

kde matice jednotkového potenciálu $[U]$ obsahuje napětí v jednotlivých drátech lana, $[Z]$ je impedanční matice a $[I]$ je matice proudů, tekoucích jednotlivými dráty. Výpočet je prováděn v poměrných hodnotách. K získání jednotlivých proudů, tekoucích v drátech lana, je nutné rovnici upravit do následujícího tvaru inverzní impedanční matice:

$$[I] = [Z]^{-1}[U] \quad (2-2)$$

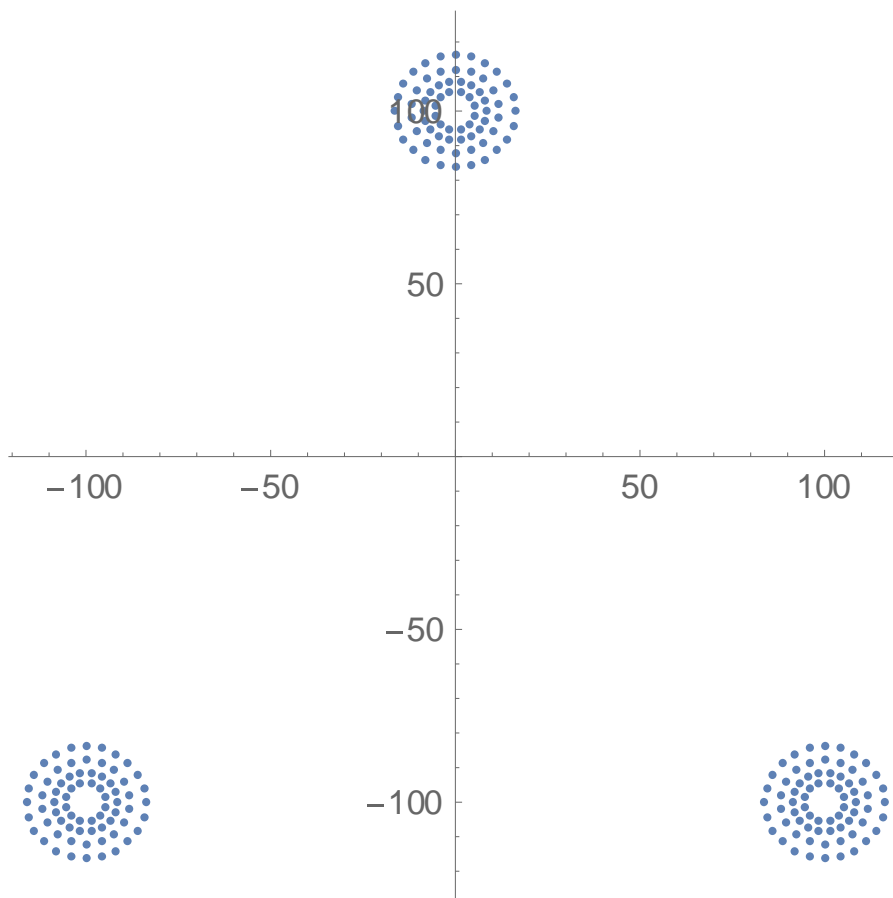
Definice impedanční matice probíhá ve více krocích. K samotné definici matice je nutné vytvořit dvě submatice, které obsahují pouze diagonální prvky a pouze prvky mimo diagonálu. Diagonální prvky obsahují hodnoty dle následujícího vzorce:

$$Z_{i,i} = \frac{\rho}{\pi \cdot r_{i,i}^2} + j \cdot \omega \cdot 0,46 \cdot \text{Log} \frac{Dg}{\xi \cdot r_{i,i}} \quad (2-3)$$

Reálná část vzorce představuje rezistanci daného vodiče v laně na jednotku délky. Jelikož je lano složeno z drátů různých průměrů, není možné tuto rezistanci vyjádřit jako konstantu. Tato část je frekvenčně nezávislá. Imaginární část rovnice představuje vlastní indukčnost počítaného vodiče v laně. Hodnota Dg představuje hloubku fiktivního vodiče. Tato hloubka je v našich podmínkách stanovena na 800 m. [19]

Do jmenovatele výpočtu vlastní indukčnosti vodiče byl přidán koeficient ξ , který vyjadřuje nerovnoměrné rozložení proudu po průřezu vodiče. Pro uvažované lano ACSR 758-AL1/43-ST1A je tento koeficient $\xi = 0,81$. [17]

Jelikož je výpočet vlastní i vzájemné indukčnosti závislý na vzájemné vzdálenosti jednotlivých drátů a na jejich průřezích, je nutné nadefinovat ještě vzdálenostní matici. Ta je v programu vypočtena ze souřadnic jednotlivých drátů, přičemž na diagonále matice jsou poloměry jednotlivých drátů.



Obrázek 2-1 Ukázka symetrického trojsvazku z výpočetního modelu

Prvky mimo diagonálu jsou vypočteny podle vzorce:

$$Z_{i,j} = j \cdot \omega \cdot 0,46 \cdot \text{Log} \frac{Dg}{d_{i,j}} \quad (2-4)$$

Jednotlivé dráty v laně jsou v tomto případě uvažovány jako navzájem izolované. Z tohoto důvodu obsahují prvky mimo diagonálu pouze imaginární část, která reprezentuje vzájemnou indukčnost mezi každým drátem v počítaném svazkovém uspořádání.

Součtem těchto dvou impedančních submatic je výsledná impedanční matice. Z impedanční matice je v dalším kroku vypočtena inverzní impedanční matice $[Z]^{-1}$.

Matice fázorů napětí je definována z napětí v jednotlivých drátech ve svazku. Tato napětí jsou konstantní a jsou rovna jedné.

Pomocí rovnice (2-4) je nalezeno řešení pro rozložení proudů v poměrných jednotkách v jednotlivých drátech v řezu celým svazkovým vodičem. Toto rozložení proudů respektuje jak koeficient skin efektu, tak koeficient proximity efektu. V případě, kdy je počítáno pouze samostatné lano, se koeficient proximity efektu rovná jedné. Poslední řádek matice $[I]$ obsahuje úbytek napětí.

V dalším kroku dojde k přiřazení vypočtených proudů zpět k jednotlivým souřadnicím drátů tak, aby každému pomyslnému drátu, reprezentovaného bodem v souřadnicovém systému, byla přiřazena hodnota daného proudu, která daným drátem protéká.

Z matice $[I]$ je následně vypočten koeficient respektující proximity efekt a skin efekt pomocí definice koeficientu:

$$P_{AC} = \rho \sum_{i=1}^n \frac{i_i^2}{S_i} \quad (2-5)$$

, kde n je počet všech drátů v počítané konfiguraci

$$P_{DC} = \frac{\rho \cdot I^2}{k \cdot S_{Al}} \quad (2-6)$$

, kde k je počet lan ve svazku a S_{Al} je celková plocha hliníku v řezu lana.

Jelikož je výpočet proveden v poměrných jednotkách, musí být součet všech proudů tekoucích svazkovým vodičem roven jedné. Vztah poté lze zjednodušit na tvar:

$$P_{DC} = \frac{\rho}{k \cdot S_{Al}} \quad (2-7)$$

Výsledný koeficient je dán podílem jednotlivých ztrátových výkonů:

$$k_{prox} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \quad (2-8)$$

Po dosazení je dán výsledný vztah

$$k_{prox} = k \cdot S_{Al} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{i_i^2}{S_i} \quad (2-9)$$

Vypočtený koeficient je dále využitý jako vstupní parametr do výpočetního postupu dle příručky Cigre TB 601. Ve výpočtu dle této příručky není uvažováno vzájemné oteplování vodičů ve svazku. V případě jednotlivých konfigurací dochází k vzájemnému předávání části tepla okolním vodičům.

Proto byl do výpočetního programu vložen algoritmus pro zohlednění přestupu tepla mezi jednotlivými vodiči ve svazku.

V případě samostatného vodiče se přestup tepla radiací vypočítá dle vzorce (2-10). Vodič tedy může vyzařovat teplo do všech stran podél jeho dráhy. Pokud vodiče umístíme do svazku, dojde k částečnému zastínění tohoto prostoru, jelikož okolní vodiče mají stejnou, nebo velmi podobnou teplotu. Je tedy nutné přepočítat prostor, do kterého je možné odvádět teplo radiací. [13]

Na základě geometrického rozložení lan ve svazku je možné vyjádřit výsledný výkon odvedený do okolí následovně:

- Symetrický čtyřsvazek:

$$P_r = (\pi - 2 \cdot \text{Arctg}(r \cdot a) - 2 \cdot \text{Arctg}(r \cdot b)) - 2 \cdot \text{Arctg}(r \cdot \sqrt{a^2 + b^2}) \cdot d \cdot \sigma \cdot \eta \cdot (T_s^4 - T_a^4) [9] \quad (2-11)$$

- Symetrický trojsvazek:

$$P_r = (\pi - 4 \cdot \text{Arctg}(r \cdot a)) \cdot d \cdot \sigma \cdot \eta \cdot (T_s^4 - T_a^4) \quad (2-12)$$

- Nesymetrický trojsvazek:

V případě nesymetrického svazku dochází k nerovnoměrnému ochlazování jednotlivých lan. Krajní lana jsou méně stíněná, a proto u nich dochází k lepšímu ochlazování. Prostřední lano je naopak stíněno oběma krajními lany. Z hlediska bezpečnosti je výpočet navržen na nejvyšší teplotu, která se ve svazku může objevit a je proto navržen pro výpočet teploty na středním vodiči. Po vyjádření vychází stejný výpočet jako pro symetrický trojsvazek. Z hlediska geometrického uspořádání se jedná stále o stejné omezení vyzařované plochy, jen došlo k posunu stínícího vodiče v prostoru.

$$P_r = (\pi - 4 \cdot \text{Arctg}(r \cdot a)) \cdot d \cdot \sigma \cdot \eta \cdot (T_s^4 - T_a^4) \quad (2-13)$$

- Dvojsvazek:

$$P_r = (\pi - 2 \cdot \text{Arctg}(r \cdot a)) \cdot d \cdot \sigma \cdot \eta \cdot (T_s^4 - T_a^4) \quad (2-14)$$

Další komplikace při výpočtu svazkového vodiče nastává při výpočtu konvekce. U symetrických svazků, tvořených čtyřmi lany, jsou horní dvě lana umístěna nad spodními lany. Při chlazení konvekcí dochází k předání tepelné energie do vzduchu a tím dojde k jeho ohřevu. Ohřátý vzduch stoupá vzhůru a může omezovat účinnost chlazení konvekcí u horní řady vodičů. Výpočet šíření teplého vzduchu prostorem, uvažování turbulentních jevů a proměnlivou rychlost větru a jeho směr je vzhledem k velké proměnlivosti okolního prostředí v praxi nerealizovatelný. Proto je část tepla, která omezuje účinnost chlazení horní vrstvy svazku odvozena jako polovina celkové předané energie celého svazku do vzduchu v situaci, kdy nedochází k vzájemnému tepelnému ovlivňování vodičů. Z hlediska bezpečnosti je uvažováno, že celá polovina předané energie přispěje k ohřátí okolního vzduchu kolem lan v horní vrstvě svazku. Chlazení vzduchu okolními vlivy, ani jeho míšení s okolním, chladnějším vzduchem není uvažováno. Jev ohřívání horní vrstvy svazkového vodiče se projevuje pouze v uspořádání, kdy jsou lana přímo nad sebou. Ve výpočtu symetrického trojsvazku není tato složka ohřevu uvažována, jelikož se předpokládá přímý vzestup teplého vzduchu. Takto upravený výpočet zároveň poskytuje jistou bezpečnostní rezervu při dimenzování zatížitelnosti svazkového vodiče.

Po doplnění metodiky Cigre TB 601 o vzájemné ohřívání vodičů ve svazku lze navržený postup považovat za dostatečně přesný pro potřeby této práce. Ve výpočetním modelu jsou použity výše uvedené, upravené vzorce pro jednotlivé typy svazkových vodičů.

V dalším kroku je vypočten ohřev dodaný slunečním zářením. Tento výpočet je oproti metodice mírně zjednodušený, jelikož je při výpočtu vycházeno z normy TN 58, kde je definována intenzita dopadajícího slunečního záření na 1120 W/m². Z metodiky je proto využitý pouze výpočet (1-7), pro přepočet intenzity slunečního záření na tepelný výkon dodaný vodiči.

Výpočet Joulových ztrát je využit ve stejné podobě, jak jej prezentuje metodika Cigre TB 601, s dosazením vypočteného koeficientu proximity efektu a skin efektu z výpočetního modelu.

Výsledná zatížitelnost je poté dána vzorcem:

$$I = \sqrt{\frac{P_r + P_c - P_s}{R_{ac}}} \quad (2-15)$$

Výpočetní model je nastaven tak, aby bylo možné měnit prostorové rozložení lana, jeho materiál i průřez. Po naprogramování nového typu lana je proto možné použít výpočetní model i pro další aplikace v přenosové i distribuční soustavě. Stejným způsobem lze měnit jednotlivé konfigurace svazkových vodičů, nebo provádět výpočet pouze se samostatným lanem. Výpočetní model nabízí možnost volby mezi symetrickým a nesymetrickým uspořádáním s možností změny počtu lan v uvažovaném svazku. Model je založený na teoretických výpočtech a je proto potřeba počítat i s jistou rezervou ve výpočtech. Metodiky, které jsou dostupné a popisují výpočet skin efektu a u některých typů lan i proximity efektu ve svazkovém provedení vycházejí často z výpočtů, které jsou upravovány koeficienty. Tyto koeficienty jsou definovány dlouhodobým měřením a porovnáváním vodičů v praktických aplikacích.

Vzhledem ke standardům ČEPS se dle TN 58 železné jádro nepodílí na vedení elektrického proudu. Vlivem skin efektu v laně a horší měrné vodivosti železa oproti hliníku, je proud tekoucí železným jádrem velmi malý. Zanedbání vlivu železného jádra však způsobí mírné ovlivnění elektromagnetických interakcí v jednotlivých vodičích lana. Tyto interakce mají vliv na celkový výsledek jak proximity efektu, tak skin efektu. Při uvážení přesnosti předpovědi okolních klimatických podmínek, na kterých podstatně závisí celková přesnost výpočtu zatížitelnosti, se jedná o zanedbatelnou nepřesnost.

Dalším možným způsobem zpřesnění je zavedení koeficientu přechodového odporu lana. Ten v praxi závisí především na stáří lana, na prostředí, ve kterém se nachází a na množství maziva [9]. Při předpokladu nejmenšího přechodového odporu nedochází k částečné eliminaci proximity efektu a je tak dána bezpečnostní rezerva při výpočtu.

2.2 Výpočetní model pro samostatný vodič

V případě samostatného lanového vodiče se neuplatní vliv proximity efektu. Pro tento případ tedy lze vycházet při výpočtu podle dostupných metodik. V této práci bude výpočet skin efektu použit dle ČSN IEC 60287-1-1 [18]. Výsledná zatížitelnost vedení bude poté vypočtena dle metodiky CIGRE TB 601 [13]. Následně bude vypočtená hodnota porovnána s hodnotou z výpočetního modelu.

2.3 Výpočetní model pro svazkové vodiče

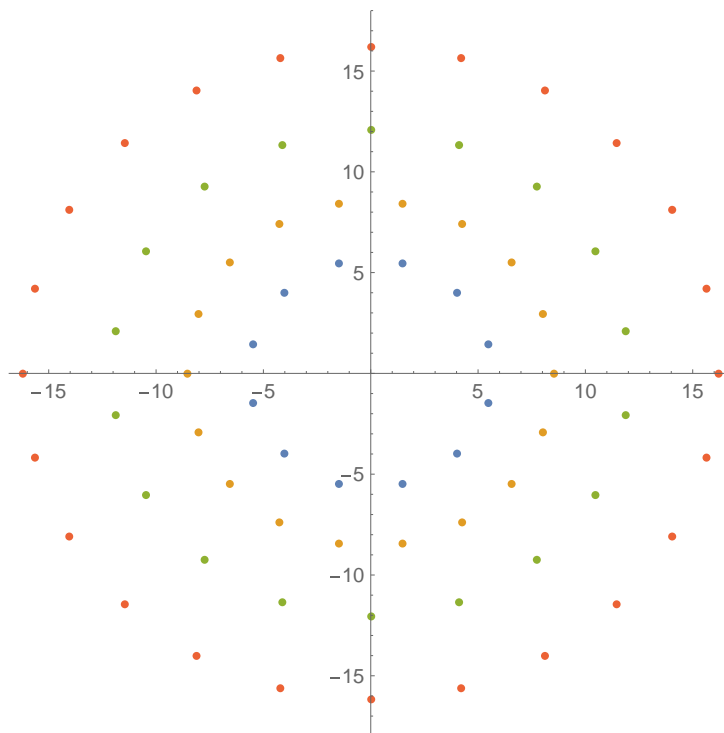
Předmětem této části práce je studie zatížitelnosti svazkových vodičů používaných v rozvodnách 420 kV. V praxi se v rozvodnách lze setkat s různými variantami konfigurací svazkových vodičů. V této části budou napočítány všechny používané i všechny případně realizovatelné konfigurace. Výchozím typem vodiče použitého ve výpočtech je lano ACSR 758-AL1/43-ST1A. Ve výpočtu budou řešena jak symetrická, tak nesymetrická uspořádání. V případě nesymetrického vodiče je třeba brát v úvahu různé rozložení tekoucích proudů ve svazku. Vlivem proximity efektu dochází k vytlačování tekoucího proudu k okrajům svazku. Proto krajními vodiči teče větší elektrický proud, než vodiči uprostřed svazku. Nesymetrické konfigurace přetrvávají v přenosové soustavě především z historických důvodů. Tyto konfigurace byly využívány především kvůli snazší manipulaci s nimi a kvůli jednoduššímu připojení těchto svazků v rozvodnách. Další výhodou bylo pohodlnější připojení klepaček na lanové přetahy a větší dostupnost plochých rozpěrek. [17]

2.3.1 Vstupní konfigurace svazkových vodičů:

Vstupním požadavkem jsou základní, běžně používané konfigurace svazkových vodičů, vyskytujících se v rozvodnách přenosové soustavy ČR

- dvojsvazek s krokem 200 mm a 400 mm
- nesymetrický trojsvazek s krokem 200 mm
- symetrický trojsvazek s krokem 100 mm, 200 mm a 400 mm
- symetrický čtyřsvazek s krokem 100 mm, 200 mm a 400 mm

Jedním z dalších parametrů potřebných pro výpočet zatížitelnosti dle dostupných metodik, je koeficient proximity efektu a skin efektu. Tento výpočet je pro svazkové vodiče realizován pomocí navrženého výpočetního programu. V první části je nutné nadefinovat konkrétní lano, pro které je výpočet určen. Příklad navrženého lana ACSR 758-AL1/43-ST1A je na obrázku 2-2.



Obrázek 2-2 - Ukázka vodiče ACSR 758-AL1/43-ST1A ve výpočetním modelu

Matematický model bere v úvahu jednotlivé dráty v laně i jejich průřezy. Na základě definice počítaného lana dojde k výpočtu vzdáleností mezi jednotlivými dráty v laně i v okolních lanech. Tyto vzdálenosti jsou potřebné pro výpočet magnetických vlastností samotných vlastních drátů i pro výpočet vzájemného působení magnetických interakcí mezi vodiči.

Při výpočtu svazkových vodičů již nelze postupovat dle obecně platné metodiky, či normy. Výpočet svazkového vodiče je natolik variabilní, že je vhodné použít výpočet navržený pro přesně specifikované lano a konfiguraci svazku.

Tento výpočet je založený na působení vzájemné a vlastní indukčnosti jednotlivých drátů v laně.

KAPITOLA 3: APLIKACE PRO VÝPOČET ZATÍŽITELNOSTI U TYPICKÝCH KONFIGURACÍ PROPOJENÍ V PROVEDENÍ S ASCR (ALFE) VODIČI POUŽÍVANÝCH V ROZVODNÁCH PS

V této části bude vypočítána maximální zatížitelnost samostatného vodiče. Jelikož se jedná o samostatný vodič, proximity efekt se zde neuplatní. Neuplatní se zde ani vlivy okolních vodičů, jako je například vzájemný ohřev, či stínění. Teoreticky by tak měl mít samostatný vodič vyšší zatížitelnost, než jednotlivé vodiče ve svazku. Jelikož bylo nutné navrhnout program pro výpočet koeficientu proximity efektu a skin efektu u svazkových vodičů, byl do programu přidán i výpočet pro samostatný vodič. Je tedy možné porovnat výsledky z uvažované metodiky s vypočtenými výsledky z matematického modelu.

Výpočet ampacity samostatného vodiče je proveden dle metodiky CIGRE TB 601 [13]. Vstupní parametry jsou zvoleny dle aktuálně platných norem a zásad pro výpočet zatížitelnosti vodičů ČEPS, které jsou převzaty z normy TN 58.

Vstupní parametry do výpočtu:

Teplota okolí	$T_a = 40 \text{ }^\circ\text{C}$
Nadmořská výška	$y = 1000 \text{ m n. m.}$
Rychlost proudění větru	$v = 0,6 \text{ ms}^{-1}$
Intenzita slunečního záření	$Q_s = 1120 \text{ Wm}^{-2}$
Lineární teplotní součinitel odporu	$\alpha = 4,03 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (dle [13], tab. 6)
Kvadratický teplotní součinitel odporu	$\xi = 8 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$ (dle [13], tab. 6)
Měrný odpor na jednotku délky	$\rho_{20} = 0,0384 \text{ } \Omega\text{km}^{-1}$
Součinitel emisivity absorpce	$\alpha_s = 0,5$
Součinitel emisivity	$\epsilon_s = 0,5$
Efektivní radiální termální vodivost	$\lambda = 3,5 \text{ W/m.K}$
Jmenovitý proud vodiče	$I_n = 1265 \text{ A}$
Průřez hliníku vodiče	$S_{al} = 758,09 \text{ mm}^2$
Průměr vodiče	$D = 36,5 \text{ mm}$
Průměr drátu Al v poslední vrstvě	$d = 4,12 \text{ mm}$
Maximální dovolená teplota vodiče	$T_{av} = 95 \text{ }^\circ\text{C}$
Průměr ocelové duše vodiče	$d_{Fe} = 8,4 \text{ mm}$

Vypočtený koeficient skin efektu
a proximity efektu pomocí
výpočetního modelu

$$k_{s2} = 1,0379$$

3.1.1 Výpočet koeficientu skin efektu

V první variantě je skin efekt K_s vypočten dle dle normy ČSN IEC 60287-1-1 pro typ vodiče „hollow, helical stranded“

Koeficient K_s dle [18] **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, tab. 2:

$$K_s = \frac{D - d_{Fe}}{D + d_{Fe}} \cdot \left(\frac{D + 2 \cdot d_{Fe}}{D + d_{Fe}} \right) = \frac{36,5 - 8,4}{36,5 + 8,4} \cdot \left(\frac{36,5 + 2 \cdot 8,4}{36,5 + 8,4} \right) = 0,882 \quad (3-1)$$

$$x_{s4} = \left(\frac{8 \cdot \pi \cdot f \cdot K_s}{RDC} \cdot 10^{-7} \right)^2 = \left(\frac{8 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,882}{2,77 \cdot 10^{-5}} \cdot 10^{-7} \right)^2 = 16 \quad (3-2)$$

$$x_s = \sqrt[4]{x_{s4}} = 2 \quad (3-3)$$

Dle ČSN IEC 60287-1-1 [18] pro $x_s = 2$ vypočítat k_{sk} dle následujícího vztahu:

$$k_{sk1} = \frac{x_{s4}}{192 + 0,8 \cdot x_{s4}} + 1 = \frac{16}{192 + 0,8 \cdot 16} + 1 = 1,07816 \quad (3-4)$$

3.1.2 Výpočet Joulových ztrát

Joulové ztráty závisí významně na teplotě vodiče, proto je nutné přepočítat měrný odpor vodiče na požadovanou teplotu.

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot (T_a - 20) + \xi_{20} \cdot (T_a - 20)^2) \\ &= 0,0384 \cdot (1 + 4,03 \cdot 10^{-3} \cdot (40 - 20) + 8 \cdot 10^{-7} \cdot (40 - 20)^2) \\ &= 4,15 \cdot 10^{-2} \Omega m \end{aligned} \quad (3-5)$$

Stejnoseměrný odpor R_{dc} uvažuje pouze ztráty vodičem, pokud by jím procházel pouze stejnosměrný proud.

$$R_{dc} = \frac{\rho}{A} = \frac{4.15 \cdot 10^{-2}}{758,09} = 5,475 \cdot 10^{-5} \Omega/m \quad (3-6)$$

Rozšířením R_{dc} o koeficient skin efektu lze dostat hodnotu střídavého odporu, který reprezentuje skutečný odpor vodiče v daných podmínkách.

$$R_{ac} = R_{dc} \cdot k_{sk1} = 5,475 \cdot 10^{-5} \cdot 1,07816 = 5,903 \cdot 10^{-5} \Omega/m \quad (3-7)$$

Výsledné Joulovy ztráty pro zadané klimatické podmínky:

$$P_J = I_n^2 \cdot R_{ac} = 1265^2 \cdot 5,903 \cdot 10^{-5} = 94,45 \text{ W/m} \quad (3-8)$$

3.1.3 Výpočet solárního ohřevu

Hodnota koeficientu α_s byla určena dle technické normy TN 58. [19]

$$P_s = \alpha_s \cdot Q_s \cdot D \cdot 10^{-3} = 0,5 \cdot 1120 \cdot 36,5 \cdot 10^{-3} = 20,44 \text{ W/m} \quad (3-9)$$

3.1.4 Celkový ohřev vodiče

Celkový tepelný zisk vodiče vyvolaný průchodem proudu a působením okolních vlivů:

$$P_t = P_s + P_J = 20,44 + 94,5 \text{ W} = 114,89 \text{ W/m} \quad (3-10)$$

3.1.5 Výpočet chlazení konvekcí

Pro výpočet chlazení pomocí konvekce je nutné znát teplotu na povrchu vodiče. Tato hodnota závisí mj. na přechodových tepelných odporech mezi jednotlivými drátky v laně.

$$T_S = T_{AV} - \left(\frac{1}{2} \cdot \left(\left(\frac{P_t}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \right) \cdot \left(\frac{1}{2} - \left(\ln \left(\frac{D}{d_{Fe}} \cdot \left(\frac{d_{Fe}^2}{D^2 - d_{Fe}^2} \right) \right) \right) \right) \right) \right) = 93,91 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3-11)$$

Teplotu na rozhraní vodič - vzduch lze určit z následujícího vztahu:

$$T_f = \frac{1}{2} \cdot (T_S + T_a) = \frac{1}{2} \cdot (93,91 + 40) = 66,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3-12)$$

Pro teploty do 300 °C lze tepelnou vodivost vzduchu vypočítat následovně:

$$\begin{aligned} \lambda_f &= 2,368 \cdot 10^{-2} + 7,23 \cdot 10^{-5} \cdot T_f - 2,763 \cdot 10^{-8} \cdot T_f^2 \\ &= 2,368 \cdot 10^{-2} + 7,23 \cdot 10^{-5} \cdot 66,9 - 2,763 \cdot 10^{-8} \cdot 66,9^2 = 0,0284 \text{ W/K} \cdot \text{m} \end{aligned} \quad (3-13)$$

Výpočet pro určení hustoty vzduchu v dané nadmořské výšce na plášti vodiče:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{1,293 - (1,525 \cdot 10^{-4} \cdot y) + 6,379 \cdot 10^{-9} \cdot y^2}{1 + 0,00367 \cdot T_f} \\ &= \frac{1,293 - (1,525 \cdot 10^{-4} \cdot 1000) + 6,379 \cdot 10^{-9} \cdot 1000^2}{1 + 0,00367 \cdot 66,9} = 0,921 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \end{aligned} \quad (3-14)$$

V tomto případě je uvažovaná nadmořská výška určena dle TN 58 na 1000 m.n. [19]

Výpočet dynamické viskozity vzduchu:

$$\begin{aligned} \mu_f &= (17,239 + (4,635 \cdot 10^{-2} \cdot T_f) - 2,03 \cdot 10^{-5} \cdot T_f^2) \cdot 10^{-6} \\ &= (17,239 + (4,635 \cdot 10^{-2} \cdot 66,9) - 2,03 \cdot 10^{-5} \cdot 66,9^2) \cdot 10^{-6} \\ &= 2,02513 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s} \end{aligned} \quad (3-15)$$

Výpočet kinematické viskozity vzduchu:

$$v_f = \frac{\mu_f}{\gamma} = \frac{2,02513 \cdot 10^{-5}}{0,921} = 2,1997 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (3-16)$$

Vztah pro výpočet Reynoldsova čísla:

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot 10^{-3}}{v_f} = \frac{0,6 \cdot 36,5 \cdot 10^{-3}}{2,2225 \cdot 10^{-5}} = 995,6 \quad (3-17)$$

Dalším faktorem, podílejícím se na přestupu tepla z vodiče do okolí, je tzv. drsnost povrchu vodiče R_s .

$$R_s = \frac{d}{2 \cdot (D - d)} = \frac{4,12}{2 \cdot (36,5 \cdot 4,12)} = 0,06362 \quad (3-18)$$

Koeficienty B a n vychází z velikosti hodnoty Reynoldsova čísla.

$$B = 0,641 \quad (\text{dle [13], tab. 4}) \quad (3-19)$$

$$n = 0,471 \quad (\text{dle [13], tab. 4}) \quad (3-20)$$

Nusseltovo číslo lze pro rychlost větru nad $0,5 \text{ ms}^{-1}$ vypočítat z následujícího vztahu:

$$Nu_{90} = B \cdot Re^n = 0,641 \cdot 995,6^{0,671} = 16,5561 \quad (3-21)$$

Jelikož v této hodnotě Nusseltova čísla není zahrnutý směr větru δ , je vhodné tuto hodnotu přepočítat s uvažovaným úhlem větru k ose vodiče:

$$\begin{aligned} Nu_{\delta} &= Nu_{90} \cdot \left(0,24 + 0,58 \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi}{180} \cdot \delta\right) \right)^{0,9} \right) \\ &= 16,5561 \cdot \left(0,42 + 0,58 \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi}{180} \cdot 90\right) \right)^{0,9} \right) = 16,5561 \end{aligned} \quad (3-22)$$

Dle TN 58 [19] **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** je hodnota směru větru zvolena na 90° .

Výsledný výkon, odvedený chlazením konvekci, je získán dle následujícího vzorce:

$$P_c = \pi \cdot \lambda_f \cdot (T_s - T_a) \cdot Nu_{\delta} = \pi \cdot 0,0279 \cdot (93,91 - 40) \cdot 16,5561 = 72,3 \text{ W/m} \quad (3-23)$$

3.1.6 Výpočet chlazení radiací

Výpočet chlazení radiací závisí především na rozdílu teploty vodiče a teploty okolního vzduchu. Výsledný výkon odvedený pomocí přestupu tepla radiací lze vyjádřit takto:

$$\begin{aligned} P_r &= \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot \epsilon_S \cdot ((T_S + 273)^4 - (T_a + 273)^4) \cdot 10^{-3} & (3-24) \\ &= \pi \cdot 36,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,5 \cdot ((93,91 + 273)^4 - (40 + 273)^4) \cdot 10^{-3} = 27,71 \text{ W/m} \end{aligned}$$

Z výsledků je vidět, že výkon odvedený radiací je výrazně menší, než výkon odvedený konvekcí. I tak se stále jedná o výraznou složku ochlazování vodiče.

3.1.7 Zatížitelnost pro dané klimatické podmínky

Z výše uvedených výpočtů jsou známy všechny potřebné hodnoty pro výpočet konečné zatížitelnosti vodiče.

$$I_V = \sqrt{\frac{P_C + P_r - P_s}{R_{ac}}} = \sqrt{\frac{76,39 + 30,27 - 20,44}{5,903 \cdot 10^{-5}}} = 1213,27 \text{ A} \quad (3-25)$$

V případě postupu dle normy vychází zatížitelnost jednoho lana na 1213 A. Tato hodnota je dle předpokladu nižší, než jmenovitá zatížitelnost vodiče. I z tohoto důvodu je nutné při návrhu dané aplikace vždy uvažovat oteplení vodiče.

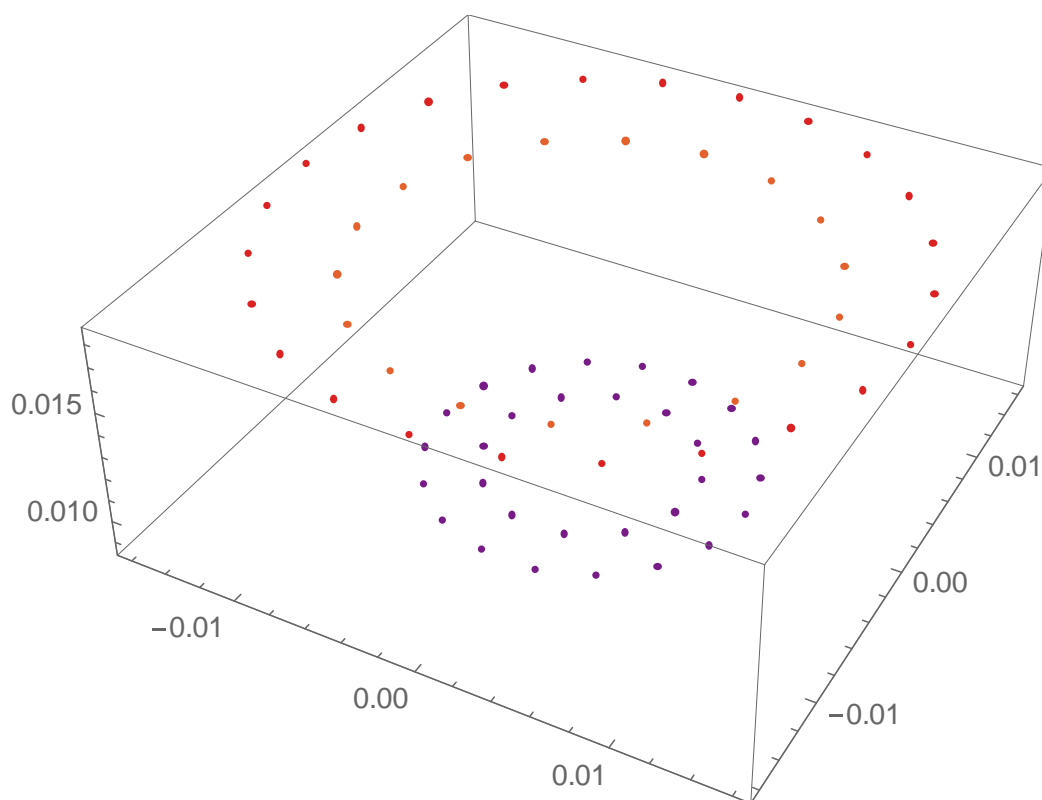
Ve výpočtu je použita hodnota rychlosti větru $v = 0,6 \text{ ms}^{-1}$, která vychází z normy TN 58 tak, aby vyhověla požadavkům ČEPS a.s. a je obvykle ve výpočtech uvažována. Již při mírném poklesu rychlosti větru dojde k velmi výrazné změně v zatížitelnosti vodiče. Je proto vhodné zvolit při návrhu aplikace určitou rezervu.

Dále je proveden obdobný výpočet pro stejný typ vodiče. Je v něm použit koeficient skin efektu dle výpočetního programu navrženého pro vodič ACSR. Vypočtená hodnota koeficientu skin efektu je nižší, než dle normy ČSN IEC 60287-1-1. To může být zapříčiněno především teoretickým podkladem, ze kterého výpočet vychází. V normě je výpočet založen mj. na zkušenostech a pozorovaných měřeních. Pro případ samostatného vodiče je tedy lepší využít výpočet dle dostupné normy. V případě svazkových vodičů již tento postup možný není.

3.1.8 Výpočet koeficientu skin efektu

V tomto případě bude použit koeficient skin efektu dle navrženého výpočetního programu. Stejně jako v předchozím případě jsou v programu nastaveny stejné fyzikální i klimatické podmínky a je počítáno samostatné lano ACSR.

$$k_{sk2} = 1,0379 \quad (3-26)$$



Obrázek 3-1- Ukázka vlivu skin efektu ve vodiči ACSR 758-AL1/43-ST1A

3.1.9 Výpočet Joulových ztrát

Joulové ztráty závisí významně na teplotě vodiče, proto je nutné přepočítat měrný odpor vodiče na požadovanou teplotu. V tomto případě zůstane výpočet nezměněný, jelikož nedochází ke změnám fyzikálních vlastností lana.

$$\begin{aligned}
\rho &= \rho_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot (T_a - 20) + \xi_{20} \cdot (T_a - 20)^2) \\
&= 0.0384 \cdot (1 + 4,03 \cdot 10^{-3} \cdot (40 - 20) + 8 \cdot 10^{-7} \cdot (40 - 20)^2) \\
&= 4,15 \cdot 10^{-2} \Omega m
\end{aligned}
\tag{3-27}$$

Stejnoseměrný odpor R_{dc} uvažuje pouze ztráty vodičem, pokud by jím procházel pouze stejnosměrný proud. Vzhledem k nezměněnému měrnému odporu vodiče zůstane i stejnosměrný odpor vodiče stejný jako v předchozím případě.

$$R_{dc} = \frac{\rho}{A} = \frac{4,15 \cdot 10^{-2}}{758,09} = 5,475 \cdot 10^{-5} \Omega/m
\tag{3-28}$$

Rozšířením R_{dc} o koeficient skin efektu lze dostat hodnotu střídavého odporu, který reprezentuje skutečný odpor vodiče v daných podmínkách. Zde došlo k mírnému poklesu střídavého odporu lana a tudíž i k poklesu celkových Joulových ztrát.

$$R_{ac} = R_{dc} \cdot k_{sk2} = 5,475 \cdot 10^{-5} \cdot 1,0379 = 5,683 \cdot 10^{-5} \Omega/m
\tag{3-29}$$

Výsledné Joulovy ztráty pro zadané klimatické podmínky:

$$P_J = I_n^2 \cdot R_{ac} = 1265^2 \cdot 5,683 \cdot 10^{-5} = 90,9 \text{ W/m}
\tag{3-30}$$

3.1.10 Výpočet solárního ohřevu

Hodnota koeficientu α_s byla určena dle technické normy TN 58. [19]

$$P_s = \alpha_s \cdot Q_s \cdot D \cdot 10^{-3} = 0,5 \cdot 1120 \cdot 36,5 \cdot 10^{-3} = 20,44 \text{ W/m}
\tag{3-31}$$

3.1.11 Celkový ohřev vodiče

Celkový tepelný zisk vodiče vyvolaný průchodem proudu a působením okolních vlivů:

$$P_t = P_s + P_J = 20,44 + 90,9 \text{ W} = 111,34 \text{ W/m}
\tag{3-32}$$

3.1.12 Výpočet chlazení konvekcí

Pro výpočet chlazení pomocí konvekce je nutné znát teplotu na povrchu vodiče. Tato hodnota závisí mj. na přechodových tepelných odporech mezi jednotlivými drátky v laně.

$$T_S = T_{AV} - \left(\frac{1}{2} \cdot \left(\left(\frac{P_t}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \right) \cdot \left(\frac{1}{2} - \left(\ln \left(\frac{D}{d_{Fe}} \cdot \left(\frac{d_{Fe}^2}{D^2 - d_{Fe}^2} \right) \right) \right) \right) \right) \right) = 93,94 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3-33)$$

Teplotu na rozhraní vodič – vzduch lze určit z následujícího vztahu:

$$T_f = \frac{1}{2} \cdot (T_S + T_a) = \frac{1}{2} \cdot (93,94 + 40) = 67 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3-34)$$

Pro teploty do 300 °C lze tepelnou vodivost vzduchu vypočítat následovně:

$$\begin{aligned} \lambda_f &= 2,368 \cdot 10^{-2} + 7,23 \cdot 10^{-5} \cdot T_f - 2,763 \cdot 10^{-8} \cdot T_f^2 \\ &= 2,368 \cdot 10^{-2} + 7,23 \cdot 10^{-5} \cdot 67 - 2,763 \cdot 10^{-8} \cdot 67^2 = 0,0284 \text{ W/K} \cdot \text{m} \end{aligned} \quad (3-35)$$

Výpočet pro určení hustoty vzduchu v dané nadmořské výšce na plášti vodiče:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{1,293 - (1,525 \cdot 10^{-4} \cdot y) + 6,379 \cdot 10^{-9} \cdot y^2}{1 + 0,00367 \cdot T_f} \\ &= \frac{1,293 - (1,525 \cdot 10^{-4} \cdot 1000) + 6,379 \cdot 10^{-9} \cdot 1000^2}{1 + 0,00367 \cdot 67} = 0,921 \text{ kg/m}^3 \end{aligned} \quad (3-36)$$

V tomto případě je uvažovaná nadmořská výška určena dle TN 58 na 1000 m.n. [19]

Výpočet dynamické viskozity vzduchu:

$$\begin{aligned} \mu_f &= (17,239 + (4,635 \cdot 10^{-2} \cdot T_f) - 2,03 \cdot 10^{-5} \cdot T_f^2) \cdot 10^{-6} \\ &= (17,239 + (4,635 \cdot 10^{-2} \cdot 67) - 2,03 \cdot 10^{-5} \cdot 67^2) \cdot 10^{-6} = 2,0252 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s} \end{aligned} \quad (3-37)$$

Výpočet kinematické viskozity vzduchu:

$$v_f = \frac{\mu_f}{\gamma} = \frac{2,0252 \cdot 10^{-5}}{0,921} = 2,1999 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (3-38)$$

Vztah pro výpočet Reynoldsova čísla:

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot 10^{-3}}{v_f} = \frac{0,6 \cdot 36,5 \cdot 10^{-3}}{2,1999 \cdot 10^{-5}} = 995,5 \quad (3-39)$$

Dalším faktorem, podílejícím se na přestupu tepla z vodiče do okolí je tzv. drsnost povrchu vodiče R_s .

$$R_s = \frac{d}{2 \cdot (D - d)} = \frac{4,12}{2 \cdot (36,5 \cdot 4,12)} = 0,06362 \quad (3-40)$$

Koeficienty B a n vychází z velikosti hodnoty Reynoldsova čísla.

$$B = 0,641 \text{ (dle [13], tab. 4)} \quad (3-41)$$

$$n = 0,471 \text{ (dle [13], tab. 4)} \quad (3-42)$$

Nusseltovo číslo lze pro rychlost větru nad $0,5 \text{ ms}^{-1}$ vypočítat z následujícího vztahu:

$$Nu_{90} = B \cdot Re^n = 0,641 \cdot 995,5^{0,671} = 16,5554 \quad (3-43)$$

Jelikož v této hodnotě Nusseltova čísla není zahrnutý směr větru δ , je vhodné tuto hodnotu přepočítat s uvažovaným úhlem větru k ose vodiče:

$$\begin{aligned} Nu_{\delta} &= Nu_{90} \cdot \left(0,24 + 0,58 \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi}{180} \cdot \delta\right) \right)^{0,9} \right) \\ &= 16,5554 \cdot \left(0,42 + 0,58 \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi}{180} \cdot 90\right) \right)^{0,9} \right) = 16,5554 \end{aligned} \quad (3-44)$$

Dle TN 58 [19] je hodnota směru větru zvolena na 90° .

Výsledný výkon, odvedený chlazením konvekci, je získán dle následujícího vzorce:

$$P_c = \pi \cdot \lambda_f \cdot (T_s - T_a) \cdot Nu_\delta = \pi \cdot 0,0279 \cdot (93,94 - 40) \cdot 16,5554 = 79,67 \text{ W/m} \quad (3-45)$$

3.1.13 Výpočet chlazení radiací

Výpočet chlazení radiací závisí především na rozdílu teploty vodiče a teploty okolního vzduchu. Výsledný výkon odvedený pomocí přestupu tepla radiací lze vyjádřit takto:

$$\begin{aligned} P_r &= \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot \epsilon_s \cdot ((T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4) \cdot 10^{-3} \\ &= \pi \cdot 36,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,5 \cdot ((93,94 + 273)^4 - (40 + 273)^4) \cdot 10^{-3} = 27,74 \text{ W/m} \end{aligned} \quad (3-46)$$

Z výsledků je vidět, že výkon odvedený radiací je výrazně menší, než výkon odvedený konvekcí. I tak se stále jedná o výraznou složku ochlazování vodiče.

3.1.14 Zatížitelnost pro dané klimatické podmínky

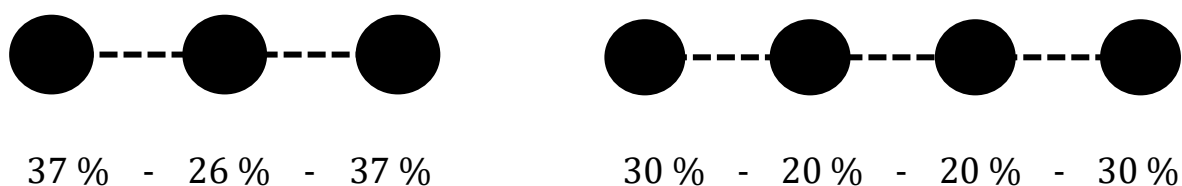
Z výše uvedených výpočtů jsou známy všechny potřebné hodnoty pro výpočet konečné zatížitelnosti vodiče.

$$I_V = \sqrt{\frac{P_c + P_r - P_s}{R_{ac}}} = \sqrt{\frac{76,39 + 30,27 - 20,44}{5,683 \cdot 10^{-5}}} = 1237,06 \text{ A} \quad (3-47)$$

Při výpočtu skin efektu dle ČSN IEC 60287-1-1 vychází hodnota $k_{s1} = 1,07816$. Dle výpočetního modelu vychází koeficient skin efektu $k_{s2} = 1,0379$. Vzhledem k nižší hodnotě skin efektu ve výpočetním modelu jsou v této variantě také nižší střídavé Joulovy ztráty. V důsledku toho vychází v souladu s teoretickými předpoklady zatížitelnost vodiče vyšší v případě použití výpočetního modelu. Rozdíl v zatížitelnosti vodiče dle výpočetního modelu a dle ČSN IEC 60287-1-1 činí 24 A. Při proudech, které těmito vodiči běžně protékají a při uvážení proměnlivosti klimatických podmínek v okolí vodiče lze tyto výsledky považovat za téměř totožné. Navržený výpočetní model lze pro tento případ považovat za funkční.

V případě výpočtu svazkových vodičů s nesymetrickými konfiguracemi dochází vlivem proximity efektu k nesymetrickému vytlačování elektrického proudu. Proto v krajních vodičích dosahuje proudová hustota vyšších hodnot než v prostředním vodiči. Při správném návrhu zatížitelnosti je nutné tuto problematiku zahrnout do návrhu. V matematickém modelu byl výpočet rozložení proudové hustoty stanoven na základě poměrů protékajících proudů vodiči dle

podkladů pro XVII. poradu techniků rozvoden 2019 [17]. Výsledné rozložení elektrického proudu v jednotlivých lanech odpovídá při svazkové vzdálenosti 200 mm následujícím poměrům:



Obrázek 3-2 ukázka rozložení proudové hustoty v nesymetrickém svazku [17]

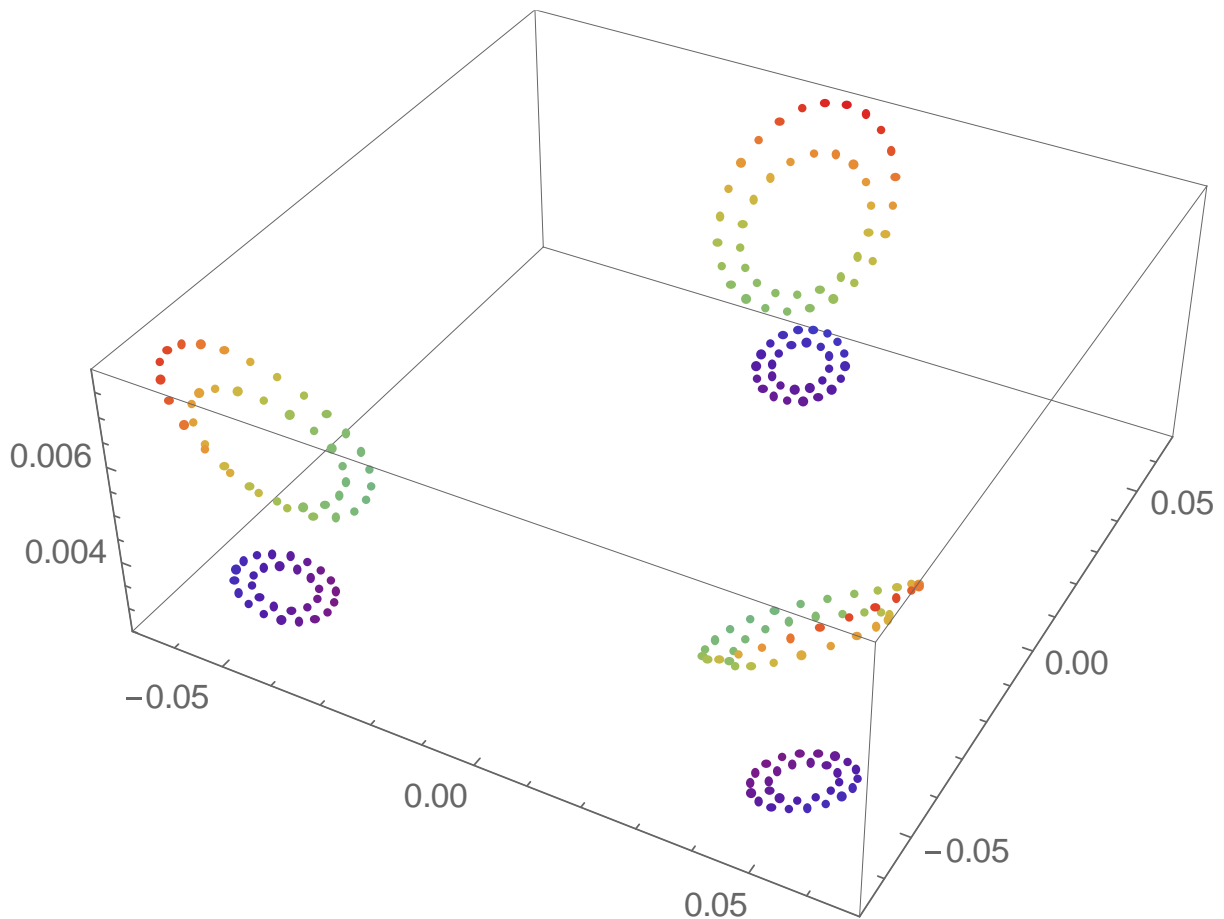
Rozložení proudové hustoty je závislé i na vzdálenosti lan ve svazku, proto je v matematickém modelu uveden výpočet pro přesné určení rozložení poměrů ve svazkovém vodiči.

Z výše uvedených obrázků plyne, že při návrhu zatížitelnosti nesymetrického svazkového vodiče je nutné zatížitelnost dimenzovat dle krajních vodičů, které jsou oproti vnitřním vodičům více proudově namáhány. Ve výpočetním modelu je proto u každého nesymetrického svazku vypočteno zatížení v krajních vodičích a výsledná zatížitelnost je dále určena s uvažováním vytlačení části elektrického proudu do krajních vodičů.

3.1.15 Výpočet koeficientu skin efektu u svazkového vodiče

V této kapitole bude provedena ukázka výpočtu symetrického svazkového vodiče. Hodnota skin a proximity efektu bude zvolena dle výstupu z výpočetního modelu pro takto nakonfigurovaný svazkový vodič. Počítaným svazkovým vodičem bude trojsvazek o vzdálenosti jednotlivých vodičů ve svazku 200 mm.

$$k_{sk3} = 1,0497 \quad (3-48)$$



Obrázek 3-3 - Ukázka rozložení proudů v symetrickém trojsvazku 100x 100 mm

3.1.16 Výpočet Joulových ztrát

Joulové ztráty závisí významně na teplotě vodiče, proto je nutné přepočítat měrný odpor vodiče na požadovanou teplotu. V tomto případě zůstane výpočet nezměněný, jelikož nedochází ke změnám fyzikálních vlastností lana.

$$\begin{aligned}
 \rho &= \rho_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot (T_a - 20) + \xi_{20} \cdot (T_a - 20)^2) \\
 &= 0.0384 \cdot (1 + 4,03 \cdot 10^{-3} \cdot (40 - 20) + 8 \cdot 10^{-7} \cdot (40 - 20)^2) \\
 &= 4,15 \cdot 10^{-2} \Omega m
 \end{aligned}
 \tag{3-49}$$

Stejnoseměrný odpor R_{dc} uvažuje pouze ztráty vodičem, pokud by jím procházel pouze stejnosměrný proud. Vzhledem k nezměněnému měrnému odporu vodiče zůstane i stejnosměrný odpor vodiče stejný jako v předchozím případě.

$$R_{dc} = \frac{\rho}{A} = \frac{4,15 \cdot 10^{-2}}{758,09} = 5,475 \cdot 10^{-5} \Omega/m \quad (3-50)$$

Rozšířením R_{dc} o koeficient skin efektu lze dostat hodnotu střídavého odporu, který reprezentuje skutečný odpor vodiče v daných podmínkách. Zde došlo k mírnému poklesu střídavého odporu lana a tudíž i k poklesu celkových Joulových ztrát.

$$R_{ac} = R_{dc} \cdot k_{sk3} = 5,475 \cdot 10^{-5} \cdot 1,0497 = 5,747 \cdot 10^{-5} \Omega/m \quad (3-51)$$

Výsledné Joulovy ztráty pro zadané klimatické podmínky:

$$P_J = I_n^2 \cdot R_{ac} = 1265^2 \cdot 5,747 \cdot 10^{-5} = 91,97 \text{ W/m} \quad (3-52)$$

3.1.17 Výpočet solárního ohřevu

Hodnota koeficientu α_s byla určena dle technické normy TN 58. [19]

$$P_s = \alpha_s \cdot Q_s \cdot D \cdot 10^{-3} = 0,5 \cdot 1120 \cdot 36,5 \cdot 10^{-3} = 20,44 \text{ W/m} \quad (3-53)$$

3.1.18 Celkový ohřev vodiče

Celkový tepelný zisk vodiče vyvolaný průchodem proudu a působením okolních vlivů:

$$P_t = P_s + P_J = 20,44 + 91,97 \text{ W} = 112,411 \text{ W/m} \quad (3-54)$$

3.1.19 Výpočet chlazení konvekci

Pro výpočet chlazení pomocí konvekce je nutné znát teplotu na povrchu vodiče. Tato hodnota závisí mj. na přechodových tepelných odporech mezi jednotlivými drátky v laně.

$$T_s = T_{AV} - \left(\frac{1}{2} \cdot \left(\left(\frac{P_t}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \right) \cdot \left(\frac{1}{2} - \left(\ln \left(\frac{D}{d_{Fe}} \cdot \left(\frac{d_{Fe}^2}{D^2 - D_{Fe}^2} \right) \right) \right) \right) \right) \right) = 93,93 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3-55)$$

Teplotu na rozhraní vodič – vzduch lze určit z následujícího vztahu:

$$T_f = \frac{1}{2} \cdot (T_s + T_a) = \frac{1}{2} \cdot (93,93 + 40) = 66,97 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3-56)$$

Pro teploty do 300 °C lze tepelnou vodivost vzduchu vypočítat následovně:

$$\begin{aligned} \lambda_f &= 2,368 \cdot 10^{-2} + 7,23 \cdot 10^{-5} \cdot T_f - 2,763 \cdot 10^{-8} \cdot T_f^2 \\ &= 2,368 \cdot 10^{-2} + 7,23 \cdot 10^{-5} \cdot 66,97 - 2,763 \cdot 10^{-8} \cdot 66,97^2 = 0,028398 \text{ W/K} \cdot \text{m} \end{aligned} \quad (3-57)$$

Výpočet pro určení hustoty vzduchu v dané nadmořské výšce na plášti vodiče:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{1,293 - (1,525 \cdot 10^{-4} \cdot y) + 6,379 \cdot 10^{-9} \cdot y^2}{1 + 0,00367 \cdot T_f} \\ &= \frac{1,293 - (1,525 \cdot 10^{-4} \cdot 1000) + 6,379 \cdot 10^{-9} \cdot 1000^2}{1 + 0,00367 \cdot 68,9} = 0,921 \text{ kg/m}^3 \end{aligned} \quad (3-58)$$

V tomto případě je uvažovaná nadmořská výška určena dle TN 58 na 1000 m.n. [19]

Výpočet dynamické viskozity vzduchu:

$$\begin{aligned} \mu_f &= (17,239 + (4,635 \cdot 10^{-2} \cdot T_f) - 2,03 \cdot 10^{-5} \cdot T_f^2) \cdot 10^{-6} \\ &= (17,239 + (4,635 \cdot 10^{-2} \cdot 68,9) - 2,03 \cdot 10^{-5} \cdot 68,9^2) \cdot 10^{-6} = 2,02518 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s} \end{aligned} \quad (3-59)$$

Výpočet kinematické viskozity vzduchu:

$$v_f = \frac{\mu_f}{\gamma} = \frac{2,02518 \cdot 10^{-5}}{0,921} = 2,1998 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (3-60)$$

Vztah pro výpočet Reynoldsova čísla:

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot 10^{-3}}{v_f} = \frac{0,6 \cdot 36,5 \cdot 10^{-3}}{2,1998 \cdot 10^{-5}} = 995,5 \quad (3-61)$$

Dalším faktorem, podílejícím se na přestupu tepla z vodiče do okolí je tzv. drsnost povrchu vodiče R_s .

$$R_s = \frac{d}{2 \cdot (D - d)} = \frac{4,12}{2 \cdot (36,5 \cdot 4,12)} = 0,06362 \quad (3-62)$$

Koeficienty B a n vychází z velikosti hodnoty Reynoldsova čísla.

$$B = 0,641 \quad (\text{dle [13], tab. 4}) \quad (3-63)$$

$$n = 0,471 \quad (\text{dle [13], tab. 4}) \quad (3-64)$$

Nusseltovo číslo lze pro rychlost větru nad $0,5 \text{ ms}^{-1}$ vypočítat z následujícího vztahu:

$$Nu_{90} = B \cdot Re^n = 0,641 \cdot 995,5^{0,671} = 16,5556 \quad (3-65)$$

Jelikož v této hodnotě Nusseltova čísla není zahrnutý směr větru δ , je vhodné tuto hodnotu přepočítat s uvažovaným úhlem větru k ose vodiče:

$$\begin{aligned} Nu_{\delta} &= Nu_{90} \cdot \left(0,24 + 0,58 \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi}{180} \cdot \delta\right) \right)^{0,9} \right) \\ &= 16,5556 \cdot \left(0,42 + 0,58 \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi}{180} \cdot 90\right) \right)^{0,9} \right) = 16,5556 \end{aligned} \quad (3-66)$$

Dle TN 58 [19] je hodnota směru větru zvolena na 90° .

Výsledný výkon, odvedený chlazením konvekcí, je získán dle následujícího vzorce:

$$P_c = \pi \cdot \lambda_f \cdot (T_s - T_a) \cdot Nu_{\delta} = \pi \cdot 0,0279 \cdot (93,93 - 40) \cdot 16,5556 = 79,66 \text{ W/m} \quad (3-67)$$

3.1.20 Výpočet chlazení radiací

Výpočet chlazení radiací závisí především na rozdílu teploty vodiče a teploty okolního vzduchu. Výsledný výkon odvedený pomocí přestupu tepla radiací lze vyjádřit takto:

$$(3-68)$$

$$P_r = \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot \epsilon_S \cdot ((T_S + 273)^4 - (T_a + 273)^4) \cdot 10^{-3}$$

$$= \pi \cdot 36,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,5 \cdot ((93,93 + 273)^4 - (40 + 273)^4) \cdot 10^{-3} = 27,64 \text{ W/m}$$

Z výsledků je vidět, že výkon odvedený radiací je výrazně menší, než výkon odvedený konvekcí. I tak se stále jedná o výraznou složku ochlazování vodiče.

3.1.21 Zatížitelnost pro dané klimatické podmínky

Z výše uvedených výpočtů jsou známy všechny potřebné hodnoty pro výpočet konečné zatížitelnosti vodiče.

$$I_V = \sqrt{\frac{P_C + P_r - P_s}{R_{ac}}} = \sqrt{\frac{79,66 + 27,64 - 20,44}{5,747 \cdot 10^{-5}}} = 1229,3 \text{ A} \quad (3-69)$$

Zatížitelnost jednoho lana ve svazku je tedy 1229,3 A. Jelikož se jedná o symetrický trojsvazek, kde dochází k rozdělení proudů mezi vodiče v poměru 1/3, lze výslednou celkovou maximální zatížitelnost svazku dostat vynásobením

$$I_{V\text{svazku}} = 3 \cdot I_V \quad (3-70)$$

$$I_{V\text{svazku}} = 3 \cdot 1229,3 = 3687,9 \text{ A} \quad (3-71)$$

Výsledná maximální zatížitelnost trojsvazku v symetrickém uspořádání se vzdáleností mezi jednotlivými lany 200 mm je 3687,9 A. Při postupu dle aktuálně platné TN 58 vychází maximální zatížitelnost svazkového vodiče následovně:

$$I_{V\text{svazku}} = 3 \cdot I_n \quad (3-72)$$

$$I_{V\text{svazku}} = 3 \cdot 1265 = 3795 \text{ A} \quad (3-73)$$

Při porovnání obou výsledků lze získat rozdíl 107,1 A v zatížitelnosti jednoho svazkového vodiče o stejné konfiguraci. V případě nesymetrických svazkových vodičů a v případě kratších vzájemných vzdáleností mezi lany ve svazku bude výsledný rozdíl ještě výraznější.

Dle TN 58 se za aktuálně nastavených podmínek hodnota maximální zatížitelnosti svazkového vodiče vypočítá jako n-násobek nejvyššího proudového zatížení jednoduchého vodiče. V příloze 11 normy TN 58 v tabulce P11-2 jsou uvedeny nejvyšší možné proudové

zatížitelnosti lanových vodičů používaných v rozvodnách. Hodnoty uvedené v tabulce odpovídají jmenovitým hodnotám maximálního zatížení vodiče, stanovených výrobcem. V současném stavu je tedy výpočet zatížitelnosti svazkového, nebo samostatného vodiče, založen pouze na jeho jmenovité hodnotě a nejsou zde řešeny elektromagnetické vlivy, omezující proudovou zatížitelnost. Výsledná proudová zatížitelnost dle TN 58 a vypočítaná proudová zatížitelnost dle výpočetního modelu je uvedena v následující tabulce:

Zatížitelnost svazkového vodiče		Dvojsvazek	Trojsvazek		Čtyřsvazek
		Symetrický	Symetrický	Nesymetrický	Symetrický
100x100 mm	Kprox (%)	1.05557	1.08346	1.09152	1.1154
	Ampacita lana (A)	1226	1210	1205	1140
	Ampacita svazku (A)	2453	3630	3179	4560
200x200 mm	Kprox (%)	1.04234	1.04967	1.06145	1.05774
	Ampacita lana (A)	1234	1229	1222	1171
	Ampacita svazku (A)	2468	3687	3341	4684
400x400 mm	Kprox (%)	1.03902	1.041	1.05054	1.04289
	Ampacita lana (A)	1236	1233	1228	1177
	Ampacita svazku (A)	2471	3701	3426	4712

Tabulka 3 - Vypočtené hodnoty Kprox a zatížitelnosti dle výpočetního programu

Z výsledků lze vidět nižší hodnoty zatížitelnosti svazkových i samostatných vodičů, vypočtených dle výpočetního modelu. Tento rozdíl je dán především zanedbáním elektromagnetických dějů v lanových vodičích při výpočtu dle TN 58.

KAPITOLA 4: POSOUZENÍ METODY I PRO VODIČE JINÝCH PRŮŘEZŮ – ROZSAH PLATNOSTI A ZÁVĚREČNÉ SHRNU TÍ

Cílem této práce bylo navržení výpočetního modelu pro svazkové vodiče v rozvodnách 420 kV. Tyto hodnoty byly doposud dle standardů ČEPS počítány pouze jako n-násobek vodičů ve svazku se zanedbáním elektromagnetických vlivů ve vodičích i ve svazku. Výpočetní model byl navržen pro lanový vodič ACSR 758-AL1/43-ST1A. Tento vodič je běžně používán v rozvodnách PS o napětí 420 kV. Ve výpočetním modelu byly navrženy běžně používané kombinace svazkových vodičů s obvyklými rozměry. Pro každou kombinaci byl spočítán příslušný koeficient, zahrnující proximity efekt a skin efekt. Na jejich základě byly doloženy jednotlivé zatížitelnosti svazkových vodičů dle metodiky CIGRE TB 601. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3:

Zatížitelnost svazkového vodiče		Dvojsvazek	Trojsvazek		Čtyřsvazek
		Symetrický	Symetrický	Nesymetrický	Symetrický
100x100 mm	Kprox (%)	1.05557	1.08346	1.09152	1.1154
	Ampacita lana (A)	1226	1210	1205	1140
	Ampacita svazku (A)	2453	3630	3179	4560
200x200 mm	Kprox (%)	1.04234	1.04967	1.06145	1.05774
	Ampacita lana (A)	1234	1229	1222	1171
	Ampacita svazku (A)	2468	3687	3341	4684
400x400 mm	Kprox (%)	1.03902	1.041	1.05054	1.04289
	Ampacita lana (A)	1236	1233	1228	1177
	Ampacita svazku (A)	2471	3701	3426	4712

Tabulka 4 - Vypočtené hodnoty Kprox a zatížitelnosti dle výpočetního programu

Z uvedených hodnot je patrné, že maximální možná zatížitelnost, vypočtená dle výpočetního modelu je nižší, než hodnoty uvedené v TN 58. Tento rozdíl je způsoben především zanedbáním elektromagnetických vlivů vodičů ve výpočtu dle TN 58. Zavedení proximity efektu a skin efektu do výpočtu zapříčinilo korekci Joulových ztrát, které jsou vyšší, než při zanedbání těchto elektromagnetických jevů. V důsledku navýšení Joulových ztrát došlo k poklesu zatížitelnosti jak samostatného lanového vodiče, tak i svazkového vodiče ve všech konfiguracích. Nejvýraznější pokles zatížitelnosti lze pozorovat u nesymetrických svazkových vodičů s malou vzdáleností mezi lany. Zde se již ve velké míře uplatňuje proximity efekt a výrazně omezuje maximální zatížitelnost svazku.

Navržený model je tedy platný především pro vodič ACSR 758-AL1/43-ST1A. V případě potřeby výpočtu jiného průřezu vodiče je možné nadefinovat konkrétní vodič do výpočetního modelu. Další metody výpočtu poté bude možné aplikovat i pro vodiče jiných průřezů.

Je doporučeno přidat hodnoty proximity efektů, uvedené v tabulce 3 do normy TN 58 a upravit výsledné výpočty právě o tyto střídavé ztráty ve vodičích. Dále je doporučeno přepočítat uvedené hodnoty v TN 58 pro konkrétní typy svazkových vodičů, ze kterých lze dále vycházet zejména při kontrole maximálního možného proudového zatížení v konkrétních rozvodnách. Výsledné hodnoty lze použít také při dynamickém zatěžování.

LITERATURA

- [1] STEPHEN, R., et al. Thermal Behaviour of Overhead Conductors. Cigré, 2002.
- [2] M.indiamart [online]. [cit. 2021-7-15]. Dostupné z: <https://m.indiamart.com/impcat/acsr-conductor.html>
- [3] KLAJBL, Dalibor. Zatížitelnost vedení a transformátorů PS: Proces určení aktuální zatížitelnosti a její použití. ČEPS a.s. Praha, 2021.
- [4] Arrow [online]. [cit. 2021-7-15]. Dostupné z: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/the-skinny-on-the-skin-effect>.
- [5] Západočeská univerzita v Plzni [online]. [cit. 2021-7-15]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~ledv/ZSTE/2020/Elektricky%20a%20magneticky%20skinefekt.pdf>
- [6] Vysoké učení technické v Brně [online]. [cit. 2021-7-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=191215
- [7] ČSN EN ISO 12718: Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení vířivými proudy. 2009.
- [8] Circuit Globe [online]. [cit. 2021-7-15]. Dostupné z: <https://circuitglobe.com/proximity-effect.html>
- [9] MÜLLER, Zdeněk, Josef TLUSTÝ a Martin ČERNĀN. Analýza proudové zatížitelnosti svazkových vodičů do částí propojení v rozvodnách 420 kV. Praha, 2019. České vysoké učení technické v Praze.
- [10] Ampacita venkovních vedení [online]. [cit. 2021-7-15]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/PRE/PRE_pr02_ampacita.pdf
- [11] Skin Efekt. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-7-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Skin_efekt
- [12] V. T. Morgan, "Rating of bare overhead conductors for continuous currents", Proc. IEE(Lond), Vol. 114, pp. 1473-1482, 1967.
- [13] CIGRE, Paris, "Guide for the selection of weather parameters for bare overhead conductor ratings", Technical Brochure 299, August 2006
- [14] IGLESIAS, Javier a Franc JAKL. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines. Cigré, 2014. ISBN 978-2-85873-302-6.
- [15] M. Kang, M. Strobach and C. M. Franck, "Radial temperature distribution of AAAC overhead line in stationary and transient conditions". 18th International Symposium on High Voltage Engineering, Seoul, August 2013
- [16] W.H. McAdams, "Heat Transmission", McGraw-Hill, New York, 1954.
- [17] FIALA, Karel. Svazkové vodiče: XVII. Porada techniků rozvoden. 2019.
- [18] ČSN IEC 60287-1-1: Elektrické kabely - Výpočet dovolených proudů. 2019.
- [19] FIALA, Karel. Technická norma ČEPS TN/58: Vodiče pro rozvodny přenosové soustavy. Praha, 2020.

- [20] IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, c1993. ISBN 15-593-7338-5.
- [21] FIALA, Karel. Technická norma ČEPS TN/72: Typové řešení rozvoden 420 kV ve stanicích PS. Praha, 2019.
- [22] DORISON, E., et al. Large Cross Section and Composite Screen Design. Cigré. (PDF272)

PŘÍLOHA A: PŘÍKLAD SEZNAMU SYMBOLŮ A ZKRATEK

A.1 Seznam symbolů

μ_0 ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)	permeabilita vakua
ω ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	úhlová rychlost
μ ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)	permeabilita materiálu vodiče
c_p ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	permitivita vakua
λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$)	efektivní termální vodivost
α_s (–)	koeficient absorptivity
λ_f ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	tepelná vodivost vzduch při teplotě T_f
σ_B (–)	Stefan Boltzmannova konstanta
ε_s (–)	emisivita povrchu vodiče
ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	měrný elektrický odpor
α (–)	lineární teplotní součinitel odporu
ξ (–)	kvadratický teplotní součinitel odporu

A.2 Seznam zkratk

PS	přenosová soustava
ČEPS a.s.	Česká Energetická Přenosová Soustava
GIS	Zapouzdřená rozvodna
ACSR	Aluminium-conductor steel-reinforced cable (AlFe)
TN	technická norma
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav

PŘÍLOHA B: VÝPOČETNÍ MODEL SVAZKOVÉHO VODIČE

SetOptions[EvaluationNotebook[],Background->Black,FontColor->White]

cm=0.01;

mm=0.001;

mm2=10^-6;

m=1;

Needs["SymbolicC"]

S=758.09mm2; (*785AL1/43ST1A*)

Rv1=2.9/2*mm;(*poloměr vodičů v 1. a 2. vrstvě *)

Rv2=4.12/2*mm;(*poloměr vodičů ve 3. a 4. vrstvě*)

a=200mm;(*rozteč svazku vodorovná*)

b=200mm;(*rozteč svazku svislá*)

Dg=800m;(*hloubka fiktivního vodiče*)

Si1=6.605mm2;(*průřez vodičů v 1. a 2. vrstvě*)

Si2=13.332mm2;(*průřez vodičů v 1. a 2. vrstvě*)

Rho=0.0285*10^-6;(*ρ hliníku*)

Sal=758.09*mm2;(*průřez Al vodičů *)

Ksi=0.81;

f=50;

ω=2.Pi*f;

TypSvazku=0;(*Symetrický svazek = 1, Nesymetrický svazek = 0*)

PocetLanVeSvazku=4;

In[19]:= (*1. vrstva A*)

x1[i_]=5.66mm*Cos[(Pi*i)/6+Pi/12];

y1[i_]=5.66mm*Sin[(Pi*i)/6+Pi/12];(*pozice jednotlivých drátů v laně*)

```
Xvrstva1=Table[x1[i],{i,0,11}];
```

```
Yvrstva1=Table[y1[i],{i,0,11}];
```

```
Vrstva1=Transpose@{Xvrstva1,Yvrstva1};(*pozice jednotlivých drátů v laně - seznam souřadnic - 1. vrstva*)
```

```
ListPlot[Vrstva1,AspectRatio->1]
```

```
In[25]:=
```

```
(*2. vrstva A*)
```

```
x2[i_]=8.56mm*Cos[(Pi*i)/9];
```

```
y2[i_]=8.56mm*Sin[(Pi*i)/9];
```

```
Xvrstva2=Table[x2[i],{i,0,17}];
```

```
Yvrstva2=Table[y2[i],{i,0,17}];
```

```
Vrstva2=Transpose@{Xvrstva2,Yvrstva2};(*pozice jednotlivých drátů v laně - seznam souřadnic - 2. vrstva*)
```

```
(*ListPlot[{Vrstva1,Vrstva2},AspectRatio=1]*)
```

```
In[30]:= (*3. vrstva A*)
```

```
x3[i_]=12.07mm*Cos[(Pi*i)/9+Pi/18];
```

```
y3[i_]=12.07mm*Sin[(Pi*i)/9+Pi/18];
```

```
Xvrstva3=Table[x3[i],{i,0,17}];
```

```
Yvrstva3=Table[y3[i],{i,0,17}];
```

```
Vrstva3=Transpose@{Xvrstva3,Yvrstva3};(*pozice jednotlivých drátů v laně - seznam souřadnic - 3. vrstva*)
```

```
(*ListPlot[{Vrstva1,Vrstva2,Vrstva3},AspectRatio=1]*)
```

```
In[35]:=
```

```
(*4. vrstva A*)
```

```
x4[i_]=16.19mm*Cos[(Pi*i)/12];
```

```
y4[i_]=16.19mm*Sin[(Pi*i)/12];
```

```
Xvrstva4=Table[x4[i],{i,0,23}];
```

```
Yvrstva4=Table[y4[i],{i,0,23}];
```

```
Vrstva4=Transpose@{Xvrstva4,Yvrstva4};(*pozice jednotlivých drátů v laně - seznam souřadnic - 4. vrstva*)
```

```
ListPlot[{Vrstva1,Vrstva2,Vrstva3,Vrstva4},AspectRatio->1]
```

```
LanoAlFe=lanoA=Join[Vrstva1,Vrstva2,Vrstva3,Vrstva4];
```

```
(*1-svazek symetrický*)
```

```
svazek1S=LanoAlFe;
```

```
(*2-svazek symetrický*)
```

```
VypLana=Reap[Sow[For[i=1,i<=Length[LanoAlFe],i++,Sow[
```

```
LanoAlFe[[i]]+{-0.5*a,0}
```

```
]]]][[2,1]];
```

```
lanoA1=VypLana/.Null->Sequence[];
```

```
VypLana=Reap[Sow[For[i=1,i<=Length[LanoAlFe],i++,Sow[
```

```
LanoAlFe[[i]]+{0.5*a,0}
```

```
]]]][[2,1]];
```

```
lanoA2=VypLana/.Null->Sequence[];
```

```
svazek2S=Join[lanoA1,lanoA2];
```

```
(*3-svazek symetrický*)
```

```
VypLana=Reap[Sow[For[i=1,i<=Length[LanoAlFe],i++,Sow[
```

```
LanoAlFe[[i]]+{0,0.5*b}
```

```
]]]][[2,1];
```

```
lanoA1=VypLana/.Null->Sequence[];
```

```
VypLana=Reap[Sow[For[i=1,i<=Length[LanoAlFe],i++,Sow[
```

```
LanoAlFe[[i]]+{-0.5*a,-0.5*b}
```

```
]]]][[2,1];
```

```
lanoA2=VypLana/.Null->Sequence[];
```

```
VypLana=Reap[Sow[For[i=1,i<=Length[LanoAlFe],i++,Sow[
```

```
LanoAlFe[[i]]+{0.5*a,-0.5*b}
```

```
]]]][[2,1];
```

```
lanoA3=VypLana/.Null->Sequence[];
```

```
svazek3S=Join[lanoA1,lanoA2,lanoA3];
```

```
(*4-svazek symetrický*)
```

```
VypLana=Reap[Sow[For[i=1,i<=Length[LanoAlFe],i++,Sow[
```

```
LanoAlFe[[i]]+{-0.5*a,0.5*b}
```

```
]]]][[2,1];
```

```
lanoA1=VypLana/.Null->Sequence[];
```

```
VypLana=Reap[Sow[For[i=1,i<=Length[LanoAlFe],i++,Sow[
```

```
LanoAlFe[[i]]+{0.5*a,0.5*b}
```

```
]]]][[2,1];
```

```
lanoA2=VypLana/.Null->Sequence[];
```

```
VypLana=Reap[Sow[For[i=1,i<=Length[LanoAlFe],i++,Sow[
```

```
LanoAlFe[[i]]+{-0.5*a,-0.5*b}
```

```
]]]][[2,1];
```

```
lanoA3=VypLana/.Null->Sequence[];
```

```
VypLana=Reap[Sow[For[i=1,i<=Length[LanoAlFe],i++,Sow[  
LanoAlFe[[i]]+{0.5*a,-0.5*b}  
]]][[2,1]]];
```

```
lanoA4=VypLana/.Null->Sequence[];
```

```
svazek4S=Join[lanoA1,lanoA2,lanoA3,lanoA4];
```

(*3-svazek nesymetrický*)

```
VypLana=Reap[Sow[For[i=1,i<=Length[LanoAlFe],i++,Sow[  
LanoAlFe[[i]]+{-a,0}  
]]][[2,1]]];
```

```
lanoA1=VypLana/.Null->Sequence[];
```

```
VypLana=Reap[Sow[For[i=1,i<=Length[LanoAlFe],i++,Sow[  
LanoAlFe[[i]]+{0,0}  
]]][[2,1]]];
```

```
lanoA2=VypLana/.Null->Sequence[];
```

```
VypLana=Reap[Sow[For[i=1,i<=Length[LanoAlFe],i++,Sow[  
LanoAlFe[[i]]+{a,0}  
]]][[2,1]]];
```

```
lanoA3=VypLana/.Null->Sequence[];
```

```
svazek3N=Join[lanoA1,lanoA2,lanoA3];
```

(*4-svazek nesymetrický*)

```
VypLana=Reap[Sow[For[i=1,i<=Length[LanoAlFe],i++,Sow[  
LanoAlFe[[i]]+{-1.5*a,0}
```

```
]]]][[2,1]];
```

```
lanoA1=VypLana/.Null->Sequence[];
```

```
VypLana=Reap[Sow[For[i=1,i<=Length[LanoAlFe],i++,Sow[
```

```
LanoAlFe[[i]]+{-0.5*a,0}
```

```
]]]][[2,1]];
```

```
lanoA2=VypLana/.Null->Sequence[];
```

```
VypLana=Reap[Sow[For[i=1,i<=Length[LanoAlFe],i++,Sow[
```

```
LanoAlFe[[i]]+{0.5*a,0}
```

```
]]]][[2,1]];
```

```
lanoA3=VypLana/.Null->Sequence[];
```

```
VypLana=Reap[Sow[For[i=1,i<=Length[LanoAlFe],i++,Sow[
```

```
LanoAlFe[[i]]+{1.5*a,0}
```

```
]]]][[2,1]];
```

```
lanoA4=VypLana/.Null->Sequence[];
```

```
svazek4N=Join[lanoA1,lanoA2,lanoA3,lanoA4];
```

```
In[80]:=
```

```
svazek=If[TypSvazku==1,
```

```
If[PocetLanVeSvazku==1,svazek1S,If[PocetLanVeSvazku==2,svazek2S,If[PocetLanVeSvazku==3,svazek3S,If[PocetLan  
VeSvazku==4,svazek4S,"špatná hodnota PocetLanVeSvazku S"]]]],
```

```
If[PocetLanVeSvazku==3,svazek3N,If[PocetLanVeSvazku==4,svazek4N,"špatná hodnota PocetLanVeSvazku N"]]]];
```

```
ListPlot[svazek,AspectRatio->1]
```

```
In[83]:=
```

```
(*rozdíl souřadnic jednotlivých bodů*)
```

```
radkysnull=Reap[For[j=1,j<=Length[svazek],j++,Sow[For[i=1,i<=Length[svazek],i++,Sow[
```

```

svazek[[i]]-svazek[[j]]
]
]]]
][[2,1]];
radky=radkysnull/.Null->Sequence[];
Length[radky];

(*Vzdálenosti mezi jednotlivými vodiči*)
In[86]:= PocCyklu=72*PocetLanVeSvazku;
matice=Reap[For[i=1,i<=Length[radky],i++,Sow[
Sqrt[{radky[[i,1]]^2+{radky[[i,2]]^2}

]];][[2,1]];
Length[matice];
maticeVzdalenosti=Partition[matice,PocCyklu];
maticeVzdalenosti//MatrixForm;

In[91]:= listpromatici1=Table[Rv1,30];
listpromatici2=Table[Rv2,42];(*Příprava diagonály do matice vzdáleností matice*)
diagonalaJedenVodic=Join[listpromatici1,listpromatici2];
diagonala01=Table[diagonalaJedenVodic,PocetLanVeSvazku];
diagonala1=Flatten[diagonala01];
Length[diagonala1];

maticediagonalni=DiagonalMatrix[diagonala1];

```



```
vzdalenostniMatice=maticeVzdalenosti+maticediagonalni;
```

```
vzdalenostniMatice//MatrixForm;(*hotová matice obsahující vzdálenosti mezi všemi dráty ve svazku*)
```

```
(*Vypocet L matice*)
```

```
MatIndukcnosti=maticediagonalni;
```

```
For[j=1,j<=PocCyklu,j++,Sow[For[i=1,i<=PocCyklu,i++,
```

```
MatIndukcnosti[[i,j]]=I*0.001* $\omega$ *0.46*Log[10,Dg/vzdalenostniMatice[[i,j]]]
```

```
]]];
```

```
For[i=1,i<=PocCyklu,i++,Sow[
```

```
MatIndukcnosti[[i,i]]=Rho/(Pi*vzdalenostniMatice[[i,i]]^2)*1000+I* $\omega$ *0.001*0.46*Log[10,Dg/(Ksi*vzdalenostniMatice[[i,i]])]
```

```
]]];
```

```
MatrixForm[MatIndukcnosti];
```

```
(*Pridani radku do L matice*)
```

```
radekdeltaU1=Table[{1},PocCyklu];
```

```
radekdeltaU=Insert[radekdeltaU1,0,PocCyklu+1];
```

```
Maticevypocet=Insert[MatIndukcnosti,radekdeltaU1,PocCyklu+1];
```

```
(*Pridani sloupce do L matice*)
```

```
sloupecMatice=Join[Table[{-1},PocCyklu],{0}];
```

```
Lmatice1=MapThread[Append,{Maticevypocet,sloupecMatice}];
```

```
(*inverzní L matice*)
```

```
Lmatice=Partition[Flatten[Lmatice1],PocCyklu+1];
```

```
inLmatice=Inverse[Lmatice];
```

```

Det[inLmatice];

inLmatice;

MatrixForm[inLmatice];

trNulovaMatice=Join[Table[{0,PocCyklu},{1}]];
NulovaMatice=Join[Table[0,PocCyklu},{1}];

Length[NulovaMatice];

maticeli=inLmatice.NulovaMatice>(*Matice proudů v jednotlivých lanech*)

Total[maticeli]-maticeli[[Length[maticeli]]];(*Kontrola, zda je suma li = 1*)

Total[Delete[maticeli,-1]];

In[120]:=

(*Rozdělení zpět do lan*)

Maticel=Abs[Delete[maticeli,-1]];

MatrixForm[maticeli];

MatrixForm[Maticel];

Length[maticeli];

Length[Maticel];

Graf=Reap[For[i=1,i<=Length[Maticel],i++,Sow[

{svazek[[i,1]],svazek[[i,2]],Maticel[[i]]}

]];][[2,1]];

In[126]:= ListPointPlot3D[Graf,ColorFunction->"BlueGreenYellow",AspectRatio->Automatic,BoxRatios->Automatic,PlotStyle->PointSize[0.005]]

```

```
ListPointPlot3D[Graf,ColorFunction->"Rainbow",PlotStyle->PointSize[0.008]]
```

```
(*Výpočet Kprox*)
```

```
Suma=Reap[Sow[For[i=1,i<=PocCyklu,i++,Sow[  
(Maticel[[i]]^2)/(Pi*(vzdalenostniMaticel[[i,i]]^2))  
]  
]  
]][[2,1]]/.Null->Sequence[];
```

```
Kprox1=PocetLanVeSvazku*Sal*Total[Suma];
```

```
Kprox=Kprox1[[1]];
```

```
Total[Suma];
```

```
ListPlot[svazek,PlotRange->{{-1.5a-50,1.5a+50},{-0.5b-50,0.5b+50}}];
```

```
Print["Rozměry svazku: ",Style[a*100]," x ",Style[b*100]," [cm]"]
```

```
Print["kprox: ",Style[Kprox]," [%]"]
```

```
(*Tepelný model vodiče*)
```

```
 $\rho_{20}=0.0384;$ 
```

```
 $\alpha_{20}=4.03 \cdot 10^{-3};$ 
```

```
 $\xi_{20}=8 \cdot 10^{-7};$ 
```

```
 $\alpha_s=0.5;$ (*Součinitel emisivity absorpce*)
```

```
 $\epsilon_s=0.5;$ (*Součinitel emisivity*)
```

```
 $Q_s=1120$  ;(*Intenzita slunečního záření W/m2*)
```

$\sigma_B = 5.67 \cdot 10^{-8}$; (*Stefan-Boltzmanova konstanta*)

$T_{av} = 95$; (*Maximalni dovolena teplota vodice*)

$T_a = 40$; (*Teplota okoli*)

$y = 1000$; (*Nadmořská výška*)

$\alpha = 4.03 \cdot 10^{-3}$; (*Lineární teplotní součinitel odporu*)

$\xi = 8 \cdot 10^{-7}$; (*Kvadratický teplotní součinitel odporu*)

$d = 36.5$; (*Prumer vodice [mm]*)

$d_p = 4.12$; (*Prumer dratku v posledni vrstve [mm²]*)

$d_{fe} = 8.4$; (*Prumer ocelove duse vodice [mm]*)

$v = 0.6$; (*Rychlost větru*)

$\delta = 90$; (*Úhle větru působícího na vodič*)

$\lambda = 3.5$; (*Dle TB601*)

$I_{in} = 1265$; (* I_{in} [A]*)

$\alpha_{konv} = 500$;

$C_p = 0.241$;

(*Joulový ztráty*)

$\rho = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot (T_a - 20) + \xi_{20} \cdot (T_a - 20)^2)$;

$R_{dc} = (\rho \cdot 10^{-6}) / S_{al}$;

$R_{ac} = R_{dc} \cdot K_{prox}$;

$P_j = R_{ac} \cdot I_{in}^2$;

(*Sluneční záření*)

$P_s = \alpha_s \cdot Q_s \cdot d \cdot 0.001$;

(*Konvekce*)

$$P_t = P_s + P_j;$$

$$T_s = T_{av} - \left(\frac{1}{2} * \left(\frac{P_t}{(2 * \pi * \lambda)} \right) * \left(\frac{1}{2} - \left(\log \left[\frac{d}{d_{fe}} \right] * \frac{d_{fe}^2}{(d^2 - d_{fe}^2)} \right) \right) \right);$$

$$T_f = \frac{1}{2} * (T_s + T_a);$$

$$\lambda_f = 2.368 * 10^{-2} + 7.23 * 10^{-5} * T_f - 2.763 * 10^{-8} * T_f^2;$$

$$\gamma = \frac{1.293 - (1.525 * 10^{-4} * y) + 6.379 * 10^{-9} * y^2}{1 + 0.00367 * T_f};$$

$$\mu_f = (17.239 + (4.635 * 10^{-2} * T_f) - 2.03 * 10^{-5} * T_f^2) * 10^{-6};$$

$$v_f = \mu_f / \gamma;$$

$$Re_i = (v * d * 0.001) / v_f;$$

$$R_s = dp / (2 * (d - dp));$$

$$B = \text{If}[R_s \leq 0.05, \text{If}[Re_i \leq 2650, 0.641, 0.178], \text{If}[Re_i \leq 2650, 0.641, 0.048]]; (*Dle tab 4 v TB 601*)$$

$$n = \text{If}[R_s \leq 0.05, \text{If}[Re_i \leq 2650, 0.471, 0.633], \text{If}[Re_i \leq 2650, 0.471, 0.800]]; (*Dle tab 4 v TB 601*)$$

$$Nu_{90} = B * Re_i^n;$$

$$Nu_{\delta} = \text{If}[\delta > 24, Nu_{90} * (0.42 + 0.58 * \sin[\delta * \pi / 180]^{0.9}), Nu_{90} * (0.42 + 0.68 * \sin[\delta * \pi / 180]^{1.08});$$

$$P_{cideal} = \pi * \lambda_f * (T_s - T_a) * Nu_{\delta};$$

$$J_{ohrev} = 0.001 P_{cideal} * 60 / 2;$$

$$T_2 = (J_{ohrev} + C_p * T_a) / C_p;$$

$$T_{vys} = (T_2 + T_a) / 2;$$

$$Pc4=Pi*\lambda f*(Ts-Tvys)*Nu\delta;$$

$$Pc=If[TypSvazku==1,$$

If[PocetLanVeSvazku==1,PcIdeal,If[PocetLanVeSvazku==2,PcIdeal,If[PocetLanVeSvazku==3,PcIdeal,If[PocetLanVeSvazku==4,Pc4,"špatná hodnota PocetLanVeSvazku S"]]]],

If[PocetLanVeSvazku==3,PcIdeal,If[PocetLanVeSvazku==4,PcIdeal,"špatná hodnota PocetLanVeSvazku N"]]]];

$$Pc4=Pi*\lambda f*(Ts-Tvys)*Nu\delta;$$

(*Radiace*)

$$Pr0=Pi*d*\sigma B*es*((Ts+273)^4-(Ta+273)^4)*10^-3;$$

(*Sálání pro 4-svazek*)

$$Prkoef4=(Pi-2*ArcTan[(d*0.001)/2*a]-2*ArcTan[(d*0.001)/2*b]-2*ArcTan[(d*0.001)/2*sqrt[a^2+b^2]])*d*0.001*es*\sigma B*((Ts+273.15)^4-(Ta+273.15)^4);$$

(*Sálání pro 3-svazek a plochý 4-svazek*)

$$Prkoef3=(Pi-4*ArcTan[(d*0.001)/2*a])*d*0.001*es*\sigma B*((Ts+273.15)^4-(Ta+273.15)^4);$$

(*Sálání pro 2-svazek*)

$$Prkoef2=(Pi-2*ArcTan[(d*0.001)/2*a])*d*0.001*es*\sigma B*((Ts+273.15)^4-(Ta+273.15)^4);$$

(*Zatizitelnost*)

$$Pr=If[TypSvazku==1,$$

If[PocetLanVeSvazku==1,Pr0,If[PocetLanVeSvazku==2,Prkoef2,If[PocetLanVeSvazku==3,Prkoef3,If[PocetLanVeSvazku==4,Prkoef4,"špatná hodnota PocetLanVeSvazku S"]]]],

If[PocetLanVeSvazku==3,Prkoef3,If[PocetLanVeSvazku==4,Prkoef3,"špatná hodnota PocetLanVeSvazku N"]]]];

Iv=Sqrt[(Pc+Pr-Ps)/Rac];

p1troj=Log[10,a/(Ksi*(d/2*0.001))]/(Log[10,1/2]+3*Log[10,a/(Ksi*(d/2*0.001))]);

p2troj=(Log[10,1/2]+Log[10,a/(Ksi*(d/2*0.001))])/(Log[10,1/2]+3*Log[10,a/(Ksi*(d/2*0.001))]);

p2ctyr=Log[10,a/(Ksi*(d/2*0.001))]/(4*Log[10,(2*a)/(d/2*0.001)]+Log[10,1/(2a)]);

p1ctyr=1/2 (1-2*p2ctyr);

(*Trojsvazek*)

Isv3n=2*Iv+Iv/p1troj*p2troj;

(*print zatizitelnoist svazku je ... procent*)

pomer3=Isv3n/(PocetLanVeSvazku*Iv);

(*Ctyrsvazek*)

Isv4n=2*Iv+2 Iv/p1ctyr*p2ctyr;

pomer4=Isv4n/(PocetLanVeSvazku*Iv);

IvypSv=If[TypSvazku==1,

If[PocetLanVeSvazku==1,PocetLanVeSvazku*Iv,If[PocetLanVeSvazku==2,PocetLanVeSvazku*Iv,If[PocetLanVeSvazku==3,PocetLanVeSvazku*Iv,If[PocetLanVeSvazku==4,PocetLanVeSvazku*Iv,"špatná hodnota PocetLanVeSvazku S"]]]],

If[PocetLanVeSvazku==3,Isv3n,If[PocetLanVeSvazku==4,Isv4n,"špatná hodnota PocetLanVeSvazku N"]]]];

```

ListPlot[svazek,AspectRatio->1];

Print["Rozměry svazku: ",Style[a*100]," x ",Style[b*100]," [cm]"]

Print["kprox: ",Style[Kprox]," [%]"]

If[TypSvazku==1,

If[PocetLanVeSvazku==1,Print["Vypočtené zatížení lana: ",Style[Iv]," [A]"],

If[PocetLanVeSvazku==2,Print["Vypočtené zatížení lana: ",Style[Iv]," [A]"],

If[PocetLanVeSvazku==3,Print["Vypočtené zatížení lana: ",Style[Iv]," [A]"],

If[PocetLanVeSvazku==4,Print["Vypočtené zatížení lana: ",Style[Iv]," [A]"],

"špatná hodnota PocetLanVeSvazku S"]]]],

If[PocetLanVeSvazku==3,Print["Vypočtené zatížení krajního lana: ",Style[Iv]," [A] a vnitřního lana:"
,Style[Iv/p1troj*p2troj]," [A] "],

If[PocetLanVeSvazku==4,Print["Vypočtené zatížení krajního lana: ",Style[Iv]," [A] a vnitřního lana:"
,Style[Iv/p1ctyr*p2ctyr]," [A]"],"špatná hodnota PocetLanVeSvazku N"]]]

Print["Jmenovité zatížení lana: ",Style[ProudIn]," [A]"]

Print["Vypočtené zatížení svazku: ",Style[IvypSv]," [A]"]

```