

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Knihovna pro výpočet teploty a proudové zatížitelnosti
přenosových linek dle IEEE Standardu 738

Bc. Milan Šiler

Diplomová práce
2013

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Milan Šiler**
Osobní číslo: **I11415**
Studijní program: **N2646 Informační technologie**
Studijní obor: **Informační technologie**
Název tématu: **Knihovna pro výpočet teploty a proudové zatížitelnosti přenosových linek dle IEEE standardu 738**
Zadávací katedra: **Katedra softwarových technologií**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

V teoretické části budou popsány metody určení teplotní a proudové zatížitelnosti přenosových linek, včetně celého teoretického backgroundu. Důkladně bude popsána procedura pro určení ampacity (teplotního ratingu) linky dle IEEE Standardu 738.

Cílem implementační části je vytvoření programu pro určení teplotní a proudové zatížitelnosti dle výše zmíněného standardu. Programovací jazyk není předepsán a je zcela na volbě studenta. Funkčnost programu bude testována na reálných datech a výsledné ampacity (resp. teploty) vodiče budou porovnány s měřením a bude provedena jejich statistická analýza. V závěru bude provedena citlivostní analýza výstupů (teploty a maximální proudové zatížitelnosti) na vstupních environmentálních datech a pro různé typy vodičů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

IEEE Std 738, Standard for calculating the current-temperature of bare overhead conductors, 2006.

CIGRE Working Group, Thermal behaviour of overhead conductors, 2002.

N. Schmidt, Comparison between IEEE and CIGRE ampacity standards, IEEE Transactions on Power Delivery 14, pp. 1555-1559, 1999

Anjan K. Dep: Powerline Ampacity System: theory, modeling, and applications.

P. Pytlak, P. Musilek, E. Lozowski, Precipitation-based conductor cooling model for dynamic thermal rating systems, in: 9th Electrical Power and Energy Conference (EPEC 2009), IEEE, 2009.

Vedoucí diplomové práce:

Mgr. Jana Heckenbergerová, Ph.D.

Katedra matematiky a fyziky

Datum zadání diplomové práce:

31. října 2012

Termín odevzdání diplomové práce:

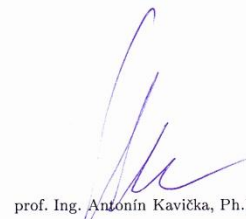
17. května 2013



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



L.S.



prof. Ing. Antonín Kavička, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2012

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 15. 5. 2013

Milan Šiler

Poděkování

Rád bych poděkoval všem učitelům a spolužákům, kteří mi pomohli se dostat až na konec magisterského studia. Obzvláště pak paní doktorce Heckenbergerové, která byla vedoucí mé diplomové práce a spoluautorem v odborných článcích v rámci studentského projektu. Ze studentů bych chtěl poděkovat jmenovitě hlavně Bc. Jiřímu Pénzešovi a Bc. Romanu Divišovi za jejich cenné rady a pomoc. Dále bych rád poděkoval rodičům, za finanční i sociální podporu během celého mého studia.

Anotace

V teoretické části budou popsány metody určení teplotní a proudové zatížitelnosti přenosových linek, včetně celého teoretického backgroundu. Důkladně bude popsána procedura pro určení ampacity (teplotního ratingu) linky dle IEEE Standardu 738.

Cílem implementační části je vytvoření programu pro určení teplotní a proudové zatížitelnosti dle výše zmíněného standardu. Programovací jazyk není předepsán a je zcela na volbě studenta. Funkčnost programu bude testována na reálných datech a výsledné ampacity (resp. teploty) vodiče budou porovnány s měřením a bude provedena jejich statistická analýza. V závěru bude provedena citlivostní analýza výstupů (teploty a maximální proudové zatížitelnosti) na vstupních environmentálních datech a pro různé typy vodičů.

Klíčová slova

IEEE Std. 738, ampacita, teplota, vodič, knihovna, DLL, C#

Title

The library for calculation of temperature and ampacity of bare overhead conductors according to IEEE Standard 738

Annotation

In theoretical part, methods for determination of temperature and ampacity of bare over conductors, including whole theoretical background. Thoroughly will describe the procedure for determining the ampacity (thermal rating) of conductor according to IEEE Standard 738.

The objective of the implementation part is creation of software to determine temperature and ampacity of conductor according to the standard mentioned above. Programming language isn't prescribed and is entirely the choice of the student. Functionality of software will be tested on real data and resulting ampacity (resp. temperature) of conductor will be compared with measurements with statistic analysis. In conclusion, sensitivity analysis of outputs (temperature and ampacity) will be made on input enviromental data and for different types of conductors.

Keywords

IEEE Std. 738, ampacity, temperature, conductor, library, DLL, C#

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	9
Úvod	10
1 IEEE Standard 738	12
1.1 O IEEE standardech.....	12
1.2 Úvod.....	12
1.3 Přehled.....	13
1.4 Jednotky a značky.....	14
1.5 Definice.....	15
1.5.1 Teplota vodiče (T_c).....	15
1.5.2 Tepelná kapacita (materiál).....	15
1.5.3 Maximální povolená teplota vodiče (T_c).....	15
1.5.4 Reynoldsovo číslo.....	15
1.5.5 Měrné teplo.....	15
1.5.6 Termální rating v ustáleném stavu (I).....	15
1.5.7 Konstanta termálního času.....	15
1.5.8 Přechodový termální rating (I).....	15
1.5.9 Směr větru (ϕ).....	16
1.6 Metody výpočtu teploty.....	16
1.7 Výpočty v ustáleném stavu (steady-state).....	17
1.7.1 Termální rating v ustáleném stavu.....	17
1.7.2 Teplota vodiče v ustáleném stavu.....	17
1.8 Přechodové (transient) výpočty.....	17
1.8.1 Přechodová teplota vodiče.....	17
1.8.2 Přechodový termální rating.....	18
1.8.3 Výpočty v poruchovém stavu.....	18
1.9 Vzorce.....	19
1.9.1 Tepelná rovnováha v ustáleném stavu.....	19
1.9.2 Tepelná rovnováha v neustáleném stavu.....	19
1.9.3 Míra tepelné ztráty nuceným prouděním.....	19

1.9.4	Přírozené proudění.....	20
1.9.5	Míra tepelné ztráty vyzařováním.....	20
1.9.6	Míra tepelného zisku ze slunce.....	20
1.9.7	Elektrický odpor vodiče.....	20
1.9.8	Tepelná kapacita vodiče	21
1.10	Rovnice pro vlastnosti vzduchu, sluneční úhly a sluneční tepelný tok	22
1.10.1	Dynamická viskozita vzduchu.....	22
1.10.2	Hustota vzduchu	22
1.10.3	Tepelná vodivost vzduchu.....	22
1.10.4	Výška slunce.....	23
1.10.5	Azimut slunce.....	23
1.10.6	Celkový tepelný tok získaný z povrchu na úrovni moře	24
1.10.7	Faktor úpravy nadmořské výšky pro celkový tepelný tok.....	25
1.11	Ukázkový výpočet	26
1.12	Vstupní data.....	26
1.12.1	Úvod	26
1.12.2	Vítr a okolní teplota.....	26
1.12.3	Hustota vzduchu, viskozita a vodivost	27
1.12.4	Emisivita a absorptivita	28
1.12.5	Zisk tepla ze slunečního záření.....	28
1.12.6	Tepelná kapacita vodiče	28
1.12.7	Maximální povolená teplota vodiče	29
1.12.8	Časový krok.....	30
2	Knihovna	31
2.1	Vývoj.....	31
2.1.1	Verze 1.0.....	31
2.1.2	Verze 2.0.....	31
2.2	Popis knihovny	32
2.2.1	UML diagramy	32
2.2.2	Třídy	34
2.2.3	XML dokumentace	35
2.2.4	Rozšiřitelnost.....	35
3	Ukázková aplikace.....	36

3.1	Požadavky a návrh.....	36
3.2	Vývoj.....	36
3.2.1	Verze 1.0.....	36
3.2.2	Verze 2.0.....	37
3.2.3	Verze 2.1.....	37
3.3	Popis aplikace.....	37
3.3.1	UML diagram	38
3.3.2	Třídy	38
3.3.3	Grafické uživatelské rozhraní.....	39
3.3.4	Vstupy a výstupy	41
3.3.5	Textová dokumentace.....	42
3.4	Ukázky zdrojového kódu.....	43
3.4.1	Použití loggeru v případě selhání výpočtu	43
3.4.2	Aplikování načtených hodnot.....	43
3.5	Shrnutí	44
4	Analýza výstupů knihovny.....	45
4.1	Zadání příkladu ve standardu	45
4.2	Výpočet příkladu dle standardu.....	45
4.2.1	Tepelná ztráta prouděním	45
4.2.2	Tepelná ztráta vyzařováním	46
4.2.3	Tepelný zisk ze slunce.....	46
4.2.4	Odpor při teplotě 100 °C	47
4.2.5	Termální rating v ustáleném stavu.....	47
4.2.6	Teplota vodiče v ustáleném stavu.....	47
4.3	Výpočet příkladu pomocí knihovny	47
4.3.1	Tepelná ztráta prouděním	47
4.3.2	Tepelná ztráta vyzařováním	48
4.3.3	Tepelný zisk ze slunce.....	48
4.3.4	Odpor při teplotě 100 °C	48
4.3.5	Termální rating v ustáleném stavu.....	48
4.3.6	Teplota vodiče v ustáleném stavu.....	48
4.4	Srovnání výsledků	49
5	Citlivostní analýza vstupů.....	50

5.1	Defaultní hodnoty	50
5.2	Parametry analýzy	50
5.3	Výsledky analýzy	50
5.3.1	Srovnání vlivu parametrů	50
5.3.2	Charakteristiky parametrů	51
5.4	Shrnutí výsledků	59
6	Další využití práce	60
6.1	Odborné články	60
6.1.1	CCECE 2013	60
6.1.2	EPE 2013	60
6.2	Další vývoj knihovny	60
6.3	Budoucí využití knihovny	61
	Závěr	62
	Literatura	63
	Příloha A - CD	66
	Příloha B - Ukázky zdrojového kódu knihovny.....	67
	Příloha C - Ukázky zdrojového kódu demo aplikace.....	68

Seznam zkratek

DTR	Dynamic Thermal Rating
STR	Static Thermal Rating
DLL	Dynamic-Link Library
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEEE-SA	IEEE Standards Association
ACSR	Aluminum Conductor Steel Reinforced
ECAR	East Central Area Reliability
AC	Alternating Current
IACS	International Annealed Copper Standard
UML	Unified Modeling Language
SGS	Studentská Grantová Soutěž
CSV	Comma-Separated Values
Vw	Velocity of Wind
D	Diameter
Lat	Latitude
R	Resistance
T	Temperature
Tc	Temperature of conductor
Ta	Temperature of ambient

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Skoková změna elektrického proudu (IEEE Standard 738, 2006)	18
Obrázek 2 - Model datové části	33
Obrázek 3 - Model funkční části	33
Obrázek 4 - Vzhled demo aplikace verze 1	37
Obrázek 5 - Model aplikace.....	38
Obrázek 6 - Zobrazení grafu v demo aplikaci	40
Obrázek 7 - Vzhled demo aplikace verze 2.1	41
Obrázek 8 - Struktura vstupních souborů	42
Obrázek 9 - Graf závislosti teploty vodiče na procházejícím proudu	52
Obrázek 10 - Graf závislosti ampacity na průměru vodiče	52
Obrázek 11 - Graf závislosti teploty vodiče na průměru vodiče	53
Obrázek 12 - Graf závislosti ampacity na teplotě vodiče pro vybrané hodnoty emisivity..	54
Obrázek 13 - Graf závislosti ampacity na teplotě vodiče pro vybrané hodnoty sluneční absorptivity	54
Obrázek 14 - Graf závislosti teploty vodiče na nadmořské výšce.....	55
Obrázek 15 - Graf závislosti teploty vodiče na rychlosti větru	56
Obrázek 16 - Graf závislosti ampacity na rychlosti větru	56
Obrázek 17 - Graf závislosti ampacity na směr větru	57
Obrázek 18 - Graf závislosti ampacity na okolní teplotě	57
Obrázek 19 - Graf závislosti ampacity na teplotě vodiče a s rozdílným ovzduším	58
Obrázek 20 - Graf závislosti teploty vodiče na hodině dne.....	58
Obrázek 21 - Graf závislosti ampacity na dni v roce	59

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Jednotky a značky	14
Tabulka 2 - Viskozita, hustota a tepelná vodivost vzduchu	22
Tabulka 3 - konstanta slunečního azimutu jako funkce "hodinového úhlu" a proměnné slunečního azimutu	24
Tabulka 4 - Sklon slunce a sluneční azimut v různých zeměpisných šířkách pro roční maximální příkon slunečního tepla.....	24
Tabulka 5 - Koeficienty pro rovnici (17).....	25
Tabulka 6 - Celkový tepelný tok získaný z povrchu na úrovni mořské hladiny kolmé ke slunečním paprskům	25
Tabulka 7 - Faktory pro násobení slunečního tepla pro velké výšky (Yellot, 1956)	26
Tabulka 8 - Ekvivalentní kombinace rychlosti větru a směru větru pro chlazení prouděním	27
Tabulka 9 - Specifické teplot materiálů.....	29
Tabulka 10 - Srovnání výsledků standardu a knihovny	49
Tabulka 11 - Vstupní parametry ohodnocené podle svého vlivu na výslednou ampacitu ..	51

Úvod

V dnešní době v prostředí s restrukturalizovanou energetikou jsou přenosové linky elektrického vedení často používány s jinou zátěžovou politikou, než pro kterou bylo původně zamýšleno. Dochází k vysokému přetěžování ve špičce, protože nároky na elektrický proud neustále stoupají (Carreras, a další, 2004). Současně dochází k nedostatečnému využívání po většinu času, protože metody výpočtu statického termálního ratingu, který se pro ně používají, počítají s velice konzervativními okolními podmínkami (Seppa, 2007). Tento problém by se dal poměrně snadno vyřešit přestavbou stávající elektrické sítě. Nicméně takové řešení vyžaduje vysoké investice a vyvolává sociální a environmentální otázky spolu s odporem veřejnosti. Přenosové společnosti se proto snaží najít nějaké alternativní přístupy, včetně efektivnějšího využívání stávajících přenosových linek (Douglass, a další, 2002), (Bracale, a další, 2007). Jedna z moderních metod známá jako systém dynamického termálního ratingu (DTR) využívá aktuální provozní podmínky a nabízí potenciální zlepšení oproti využívání standardního statického termálního ratingu (Douglass, 1988).

Jedním z mnoha důležitých omezení přenosu elektrického proudu je teplotní limit. Přehřívání vodiče (provoz při překročeném teplotním limitu) způsobuje značné snížení světlé výšky a navíc může způsobit také nevratné poškození vodiče (Musilek, a další, 2012), (Heckenbergerova, a další, 2010). Aby se předešlo těmto problémům způsobeným přehříváním linky, její vodiče jsou ohodnoceny ve smyslu maximálního proudu, který mohou bezpečně přenášet, aniž by došlo k významnému riziku přehřívání. Tato maximální proudová zatížitelnost je známá jako ampacita.

Existují dvě hlavní ratingové metody pro určení maximální povolené teploty elektrického vodiče. První, běžně používaná, je známá jako statický termální rating a používá pro výpočet ampacity elektrického vodiče velmi konzervativní scénář okolního prostředí. Tento scénář zahrnuje vysoké okolní teploty, nízkou rychlost větru a silné sluneční záření. Proto mají metody statického termálního ratingu většinou za následek nedostatečné využívání přenosové linky elektrického vedení. Nicméně z opačného úhlu pohledu, kdy se vyskytnou extrémní povětrnostní podmínky jako bezvětří, plné sluneční záření a maximální teploty vzduchu, použití statického termálního ratingu může vést k přehřívání vodiče. V takovém případě je rating vodiče vyšší než jeho skutečná ampacita a aktuální teplota vodiče překročí hranici teplotního limitu (Heckenbergerova, a další, 2011).

Druhá metoda známá jako dynamický termální rating (DTR) (Douglass, 1988) používá aktuální povětrnostní podmínky a podmínky vodiče pro ohodnocení skutečné ampacity v reálném čase. Obecně tedy systém dynamického termálního ratingu umožňuje přenášet více energie než metody statického termálního ratingu. Při průměrných podmínkách střední zeměpisné šířky může dynamický termální rating nabídnout až zdvojnásobení ampacity v porovnání se statickým termálním ratingem (Hall, a další, 1988). Nicméně použití dynamického termálního ratingu vyžaduje vysoké výdaje na monitorovací a komunikační vybavení, a proto se stále často používají statické metody.

Cílem této práce je tedy detailně popsat výpočet ampacity vodiče v ustáleném stavu podle IEEE standardu 738 (IEEE Standard 738, 2006) a na jeho základě vytvořit softwarovou knihovnu. Pro demonstraci knihovny bude její součástí i počítačový program umožňující praktickou ukázkou. Výsledky knihovny budou porovnány s výsledky uvedenými ve standardu a na jejich základě bude ohodnocena přesnost knihovny. Dále bude vytvořena citlivostní analýza jednotlivých vstupních parametrů, která umožní identifikovat kritické a méně podstatné parametry výpočtu. Na závěr bude zmíněno další využití práce a možnosti jejího budoucího rozšiřování.

1 IEEE Standard 738

První kapitola je volným překladem IEEE Standardu 738-2006 a slouží jako hlavní podklad pro celou práci. Celá kapitola a vše co je v ní uvedeno je založeno na jeho obsahu, včetně samotných zdrojů, uvedených ve standardu (IEEE Standard 738, 2006).

1.1 O IEEE standardech

IEEE Standardy jsou dokumenty vytvářené uvnitř IEEE Societies a Standards Coordinating Committees of the IEEE Standards Association (IEEE-SA) Standards Board. IEEE vytváří své normy skrze souhlasný vývojový proces, schválený American National Standards Institute, který shromažďuje dobrovolníky reprezentující různorodé úhly pohledu a snaží se dosáhnout finálního produktu. Dobrovolníci nejsou nutně členové institutu a pomáhají bez jakékoliv náhrady. Zatímco IEEE spravuje proces a vytváří pravidla na podporu spravedlnosti v souhlasném vývojovém procesu, samostatně nehodnotí, netestuje, ani neověřuje správnost informací obsažených v jeho standardech.

Použití IEEE Standardů je zcela dobrovolné. IEEE se zříká odpovědnosti za jakékoliv následky používání svých standardů.

IEEE nezaručuje ani nereprezentuje přesnost ani kvalitu materiálu obsaženého ve svých standardech a výslovně odmítá jakoukoliv záruku, včetně záruky prodejnosti nebo vhodnosti pro konkrétní účely nebo že použití materiálu obsaženého ve standardu je bez porušení patentu. IEEE standardy jsou dodávány "tak jak jsou."

1.2 Úvod

V roce 1986 byl poprvé publikován standard pro výpočet teplotní a proudové zatížitelnosti přenosových linek, IEEE Std 738-1993. Jako součást revize v roce 1993, Working Group on the Calculation of Bare Overhead Conductor Temperatures rozhodla o chybném výpočtu proudového a transientního ratingu a zahrнула do standardu svůj vlastní výpočet.

V současné revizi byly přidány SI jednotky, výpočet slunečního zahřívání byl značně upraven a bylo provedeno i mnoho redakčních změn.

Podle IEEE pokynů pro standardy jako je tento jsou v hlavní části používány jednotky SI. "Anglické" jednotky jsou použity v příloze Annex A¹, protože jsou široce využívány designéry přenosových linek v Severní Americe.

¹ Tato příloha není součástí této práce, ale pouze původního standardu.

1.3 Přehled

Účel tohoto standardu je představit metodu výpočtu vztahu proudu a teploty přenosových linek.

Povrchové teploty vodiče jsou funkcí následujících:

- a) vlastností materiálu vodiče,
- b) průměru vodiče,
- c) podmínek povrchu vodiče,
- d) podmínek okolního prostředí,
- e) a elektrického proudu ve vodiči.

První dvě z těchto vlastností jsou specifické chemické a fyzické vlastnosti. Třetí se může lišit v čase a může být závislá na okolních atmosférických podmínkách spíše než počasí. Čtvrtá, počasí, se velmi liší podle času a období. Pátá, elektrický proud ve vodiči, může být konstantní nebo se může lišit podle zátěže elektrického systému a dalších faktorech.

Rovnice vztahu elektrického proudu k teplotě vodiče mohou být použity v obou následujících případech:

- Pro výpočet teploty vodiče ze známého elektrického proudu.
- Pro výpočet proudu, který vyprodukuje maximální povolenou teplotu vodiče.

Pro účely tohoto standardu je po celou dobu výpočtu elektrický proud považován za konstantní, nebo se předpokládá, že podstoupí krokovou změnu z počátečního proudu na výsledný proud. Podmínky okolního počasí jsou považovány za konstantní v čase v ustálené a přechodové metodě výpočtu popsané v tomto standardu.

Tento standard obsahuje matematické metody a označuje zdroje hodnot, které se používají ve výpočtu teploty vodiče a termálního ratingu vodiče. Nicméně protože v povětrnostních podmínkách a provozních okolnostech jsou velké rozdíly, pro které se musí teplota vodiče a/nebo termální rating vodiče vypočítat, standard nenabízí seznam vztahů teploty a proudu pro konkrétní vodiče a povětrnostní podmínky. Každý uživatel musí vytvořit svůj vlastní odhad, které údaje o počasí a vlastnosti vodiče nejlépe vystihují jeho oblast nebo konkrétní přenosovou linku.

Výpočetní metody v tomto standardu jsou vhodné také pro výpočet teploty vodiče v poruchovém stavu.

1.4 Jednotky a značky

Tabulka 1 - Jednotky a značky

Symbol	Popis	Jednotky SI
A'	Oblast vodiče na jednotku délky	m^2/m
C	Konstanta slunečního azimutu	stupně
C_{pi}	Specifické teplo materiálu vodiče	$J/(kg \cdot ^\circ C)$
D	Průměr vodiče	mm
H_c	Výška slunce	stupně
H_e	Nadmořská výška vodiče	m
I	Elektrický proud	A
I_i	Počáteční elektrický proud před skokovou změnou	A
I_f	Koncový elektrický proud po skokové změně	A
K_{angle}	Faktor směru větru	—
K_{solar}	Korekční faktor výšky slunce	—
k_f	Termální vodivost vzduchu při teplotě T_{film}	$W/(m \cdot ^\circ C)$
Lat	Zeměpisná šířka	stupně
mC_p	Celková tepelná kapacita vodiče	$J/(m \cdot ^\circ C)$
m_i	Váha na jednotku délky materiálu vodiče	kg/m
N	Den v roce	—
$q_{cn}, q_{c1}, q_{c2}, q_c$	Tepelná ztráta prouděním na jednotku délky	W/m
q_r	Tepelná ztráta vyzařováním na jednotku délky	W/m
q_s	Tepelný zisk ze slunce	W/m
Q_s	Celková míra tepelného toku vyzařovaného sluncem a oblohou	W/m^2
Q_{se}	Celková míra tepelného toku vyzařovaného sluncem a oblohou upravená o elevaci	W/m^2
$R(T_c)$	AC odpor vodiče při teplotě T_c	Ω/m
T_a	Teplota okolního vzduchu	$^\circ C$
T_c	Teplota vodiče	$^\circ C$
T_f	Mnohonásobná konstanta teploty vodiče po skokovém zvýšení	$^\circ C$
T_i	Teplota vodiče před skokovým zvýšením	$^\circ C$
T_{film}	$(T_c + T_a)/2$	$^\circ C$
T_{low}	Minimální teplota vodiče, pro kterou známe jeho odpor	$^\circ C$
T_{high}	Maximální teplota vodiče, pro kterou známe jeho odpor	$^\circ C$
V_w	Rychlost větru	m/s
Z_c	Azimut slunce	stupně
Z_l	Azimut přenosové linky	stupně
Δt	Časový krok použitý v přechodových výpočtech	s
ΔT_c	Zvýšení teploty vodiče odpovídající časovému kroku	$^\circ C$
α	Sluneční absorptivita	—
δ	Sklon slunce	stupně
ε	Emisivita	—
τ	Termální časová konstanta vodiče	s
ϕ	Úhel mezi větrem a osou vodiče	stupně
β	Úhel mezi větrem a kolmicí na osu vodiče	stupně
ρ_f	Hustota větru	kg/m^3
θ	Efektivní úhel dopadu slunečních paprsků	stupně
μ_f	Dynamická viskozita vzduchu	Pa-s
ω	Hodiny od lokálního poledne vynásobené patnácti	stupně
χ	Proměnná solárního azimutu	—

1.5 Definice

Pro účely tohoto dokumentu platí následující termíny a definice. Termíny, které nejsou definovány v této doložce, jsou k nalezení v The Authoritative Dictionary of IEEE Standard Terms.

1.5.1 Teplota vodiče (T_c)

Teplota vodiče je považována za izotermickou (t.j. žádné osově nebo radiální teplotní odychlky) pro všechny výpočty v ustáleném stavu a všechny přechodové výpočty, v kterých časové období zájmu přesahuje jednu minutu nebo se vodič skládá z jednoho materiálu. V přechodových výpočtech pro časy kratší než jedna minuta s nehomogenními hliníkovými vodiči vyztuženými ocelí (ACSR) se hliníkové prvky považují za izotermické, ale tepelná kapacita ocelového jádra je nulová.

1.5.2 Tepelná kapacita (materiál)

Když se teplota vodiče zvýší o dT_c jako výsledek přidání množství tepla dQ_c , pak poměr dQ_c ku dT_c se nazývá tepelná kapacita vodiče.

1.5.3 Maximální povolená teplota vodiče (T_c)

Maximální teplotní limit, který je vybrán pro minimalizaci ztráty síly, průvěsu, ztráty vedení nebo kombinace předchozích.

1.5.4 Reynoldsovo číslo

Bezdimenzionální číslo rovné průměru vodiče (D) vynásobenému rychlostí větru (V_w) a vydělenému kinetickou viskozitou (μ_f/ρ_f).

1.5.5 Měrné teplo

Měrné teplo materiálu vodiče je jeho tepelná kapacita vydělená jeho hmotností.

1.5.6 Termální rating v ustáleném stavu (I)

Konstantní elektrický proud, který by docílil maximální povolenou teplotu vodiče při daných povětrnostních podmínkách a vlastnostech vodiče za předpokladu, že vodič je v tepelné rovnováze (ustálený stav).

1.5.7 Konstanta termálního času

Čas potřebný ke změně teploty vodiče o 63,2% z počáteční na cílovou teplotu, když vedený elektrický proud projde skokovou změnou.

1.5.8 Přechodový termální rating (I)

Přechodový termální rating je finální proud (I_f), který docílí maximální povolenou teplotu vodiče (T_c) ve specifickém čase po skokové změně v elektrickém proudu z nějakého počátečního proudu (I_i).

1.5.9 Směr větru (ϕ)

Směr pohybu větru relativně vůči ose vodiče. Předpokládáme, že směr větru a osa vodiče jsou v rovině paralelní k zemi. Pokud vítr fouká paralelně k ose vodiče, nazývá se "paralelní vítr". Pokud vítr fouká kolmo k ose vodiče, nazývá se "kolmý vítr."

1.6 Metody výpočtu teploty

Working Group on the Calculation of Bare Overhead Conductor Temperatures provedla studii různých metod použitých ve výpočtech tepelného přenosu a ampacit přenosových linek. Metody, které byly studovány, zahrnují také metody zahrnuté v následujících publikacích:

- a) (House, a další, 1958)
- b) (ECARCA) modifikace House and Tuttle
- c) (Mussen, 1966)
- d) (PA, NJ, and MD Interconnection, 1973)
- e) (Schurig, a další, 1930)
- f) (Hilpert, 1933)
- g) (Davis, 1978)
- h) (Morgan, 1978)
- i) (Black, a další, 1988)
- j) (Black, a další, 1983)
- k) (Foss, a další, 1983)

Matematické modely v tomto standardu jsou založeny na metodě House and Tuttle, tak jak ji modifikoval ECARCA (ECARCA). Výpočty v House and Tuttle zvažují všechny vlivy bez zjednodušení, které byly aplikovány v některých jiných výpočtech.

K rozlišení mezi laminárním a turbulentním prouděním vzduchu používá House and Tuttle metoda (House, a další, 1958) dva odlišné vzorce pro nucené proudění; přechod od jednoho k druhému je proveden na Reynoldsově čísle tisíce. Protože turbulence začíná na nějaké rychlosti větru a dosahuje svého vrcholu na nějaké vyšší rychlosti, přechod z jedné křivky na další je zakřivená čára, nikoliv nesouvislost. Jediná přechodová hodnota byla vybrána jako usnadnění při výpočtu ampacit vodiče.

Jediná přechodová hodnota způsobuje nesouvislost v proudovém rozsahu když je tato hodnota dosažena. Proto, abychom se vyhnuli této nesouvislosti objevující se při použití metody House and Tuttle (House, a další, 1958), ECARCA (ECARCA) se rozhodl pro změnu laminárního na turbulentní proudění vzduchu v bodě, ve kterém se křivky dvou vzorců [rovnice (3a) a rovnice (3b)] protínají. Vzorce pro tepelnou ztrátu nuceným prouděním mají horní limit použitelnosti na Reynoldsově čísle padesáti tisíc (McAdams, 1954). Další informace o tepelných ztrátách prouděním v části 1.12.2.

V metodě Davis (Davis, 1978) je rovnice teplotní rovnováhy vyjádřena jako bikvadratická rovnice, která může být vyřešena pro získání teploty vodiče přímo. V metodách Black and

Rehberg (Black, a další, 1985) a Wong, et. al. (Wong, a další, 1982) je vyzařování linearizováno a výsledná aproximační linearizovaná rovnice teplotní rovnováhy se řeší pomocí standardních metod lineárních diferenciálních rovnic. V metodě Foss (Foss, 1985) se používá přesněji linearizované vyzařování kvůli snížení počtu potřebných iterací. Tyto metody jsou výpočetně rychlejší než iterační metoda popsaná v tomto standardu, nicméně jejich algebraická vyjádření jsou složitější.

1.7 Výpočty v ustáleném stavu (steady-state)

1.7.1 Termální rating v ustáleném stavu

Pro holý pletený vodič, pokud známe teplotu vodiče (T_c) a povětrnostní podmínky (V_w , T_a , atd.), mohou být tepelné ztráty vzhledem k proudění a vyzařování (q_c a q_r), zisk tepla ze slunečního záření (q_s) a odpor vodiče $R(T_c)$ vypočítány podle vzorců v části 1.9. Odpovídající proud (I) ve vodiči, který produkuje tuto teplotu vodiče za těchto povětrnostních podmínek, může být nalezen pomocí rovnice teplotní rovnováhy v ustáleném stavu [rovnice (1b)]. Zatímco tento výpočet může být proveden pro jakoukoliv teplotu vodiče a jakékoliv povětrnostní podmínky, pro výpočet termálního ratingu vodiče v ustáleném stavu se často používá maximální povolená teplota vodiče (např. od 75 °C do 150 °C) a "konzervativní" povětrnostní podmínky (např. rychlost větru od 0,6 m/s do 1,2 m/s a od 30 °C do 45 °C letních okolních podmínek).

1.7.2 Teplota vodiče v ustáleném stavu

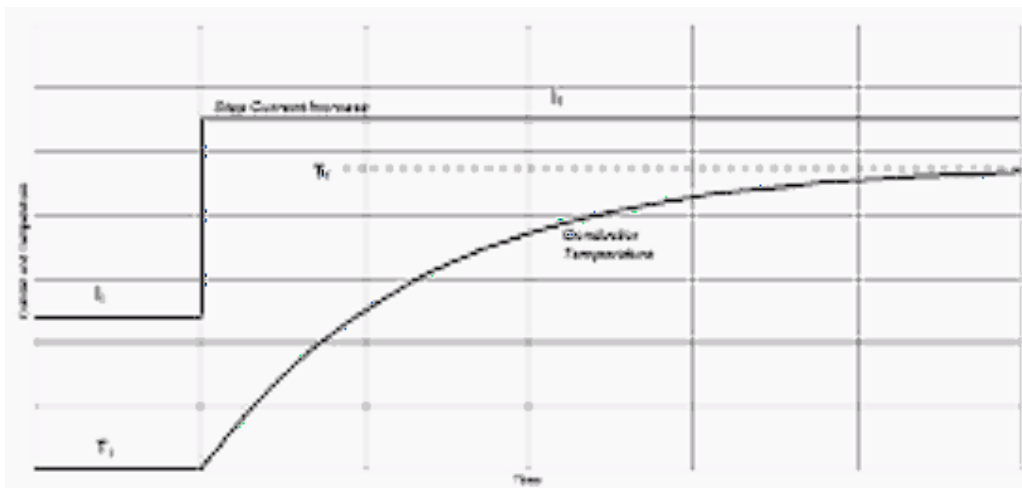
Protože míra tepelných ztrát vyzařováním a prouděním není lineárně závislá na teplotě vodiče, rovnice tepelné rovnováhy [rovnice (1b)] se pro teplotu vodiče z hlediska proudu a povětrnostních podmínek řeší iteračně. To znamená, že pro daný elektrický proud:

- a) zvolí se předpokládaná teplota vodiče,
- b) vypočítají se odpovídající tepelné ztráty,
- c) pomocí rovnice (1b) se vypočítá elektrický proud ve vodiči, které vyprodukuje tuto teplotu vodiče,
- d) vypočítaný elektrický proud ve vodiči je porovnán se změřeným elektrickým proudem,
- e) teplota vodiče se poté zvýší nebo sníží, dokud není vypočítaný elektrický proud shodný jako daný elektrický proud.

1.8 Přejchodové (transient) výpočty

1.8.1 Přejchodová teplota vodiče

Teplota přenosových linek se neustále mění v důsledku ke změnám v elektrickém proudu a počasí. Nicméně v tomto standardu jsou parametry počasí předpokládány za konstantní a jakákoliv změna v elektrickém proudu je omezena na skokovou změnu z počátečního proudu (I_i) na výsledný proud (I_f) jako na obrázku níže (Obrázek 1).



Obrázek 1 - Skoková změna elektrického proudu (IEEE Standard 738, 2006)

Bezprostředně před skokovou změnou elektrického proudu ($t = 0^-$) předpokládáme, že je vodič v tepelné rovnováze. To znamená, že součet tepelného zisku z Ohmických ztrát a slunečního ohřevu se rovná tepelným ztrátám z proudění a vyzařování.

Bezprostředně po skokové změně elektrického proudu ($t = 0^+$) se teplota vodiče nezmění (stejně tak se nezmění odpor vodiče a míra tepelných ztrát prouděním a vyzařováním), ale míra tepelného zisku z Ohmických ztrát se zvýší. Proto se v čase $t = 0^+$ začne teplota vodiče zvyšovat v dané míře podle tepelné rovnice v neustáleném stavu (2b).

Po určité době Δt se teplota vodiče zvýší o změnu teploty ΔT_c . Zvýšená teplota vodiče způsobí vyšší tepelné ztráty prouděním a vyzařováním a poněkud vyšší Ohmické vytváření tepla kvůli zvýšenému odporu vodiče. Z Δt na $2\Delta t$ se teplota vodiče stále zvyšuje, ale děje se tak nižší mírou. Po velkém množství takových časových intervalů dosáhne teplota vodiče své konečné ustálené teploty (T_f).

Během každého časového intervalu může být příslušná teplota vodiče vypočítána pomocí vzorců v části 1.9.

Přesnost v iteračních přechodových výpočtech vyžaduje, aby zvolená délka kroku byla dostatečně malá s přihlédnutím k termální časové konstantě. Vždy je opatrnější provést výpočet znovu s menším krokem a zjistit, zda se vypočítaná hodnota změní.

1.8.2 Přechodový termální rating

Přechodový termální rating se běžně počítá opakovaním předchozích výpočtů $T_c(t)$ přes rozsah hodnot I_f , poté se vybere hodnota I_f , která v přiděleném čase zvýší teplotu vodiče až na její maximální povolenou hodnotu.

1.8.3 Výpočty v poruchovém stavu

Změny teploty vodiče v důsledku "poruchového" elektrického proudu se počítají stejným způsobem jako při počítání přechodové teploty vodiče, kromě toho, že skokové zvýšení elektrického proudu je běžně poměrně velké (> 10000 A), odpovídající čas pro dosažení

maximální povolené teploty typicky krátký (< 1 s) a maximální dosažené teploty se mohou přiblížit k bodu tavení hliníku nebo mědi.

U nehomogenních vodičů jako hliníkový vodič vyztužený ocelí (ACSR) jsou zisky tepla v ocelovém jádře s nižší vodivostí mnohem nižší než v okolních hliníkových vrstvách. Výsledný teplotní rozdíl mezi jádrem a okolními hliníkovými vrstvami se zmírňuje po ne více než šedesáti sekundách od poslední skokové změny elektrického proudu.

1.9 Vzorce

1.9.1 Tepelná rovnováha v ustáleném stavu

$$q_c + q_r = q_s + I^2 R(T_c). \quad (1a)$$

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_c)}}. \quad (1b)$$

1.9.2 Tepelná rovnováha v neustáleném stavu

$$q_c + q_r + mC_p \frac{dT_c}{dt} = q_s + I^2 R(T_c). \quad (2a)$$

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{mC_p} [R(T_c)I^2 + q_s - q_c - q_r]. \quad (2b)$$

1.9.3 Míra tepelné ztráty nuceným prouděním

$$q_{c1} = \left[1,01 + 0,0372 \left(\frac{D\rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0,52} \right] k_f K_{angle} (T_c - T_a). \quad (3a)$$

$$q_{c2} = \left[0,0119 \left(\frac{D\rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0,6} k_f K_{angle} (T_c - T_a) \right]. \quad (3b)$$

Rovnice (3a) se používá pro slabý vítr, ale je nesprávná pro silný vítr. Rovnice (3b) se používá pro silný vítr, ale je nesprávná pro slabý vítr. Při jakékoliv rychlosti větru se použije vyšší výsledek těchto dvou rovnic pro míru tepelné ztráty prouděním.

Míra tepelná ztráty prouděním se potom vynásobí faktorem pro směr větru (K_{angle}), ve kterém je ϕ úhel mezi směrem větru a osou vodiče [rovnice (4a)].

$$K_{angle} = 1,194 - \cos(\phi) + 0,194 \cos(2\phi) + 0,368 \sin(2\phi). \quad (4a)$$

Alternativně se faktor pro směr větru může vyjádřit jako funkce úhlu β , který tvoří úhel mezi směrem větru a kolmice na osu vodiče. Tento úhel je doplněk k úhlu ϕ a faktor pro směr větru se potom vypočítá podle rovnice (4b).

$$K_{angle} = 1,194 - \sin(\beta) - 0,194 \cos(2\beta) + 0,368 \sin(2\beta). \quad (4b)$$

Toto je forma faktoru pro směr větru tak jak je původně popsána v Davis (Davis, 1978).

1.9.4 Přirozené proudění

Při nulové rychlosti větru se objevuje přirozené proudění jehož míra tepelné ztráty je popsána v rovnici (5).

$$q_{cn} = 0,0205\rho_f^{0,5}D^{0,75}(T_c - T_a)^{1,25}. \quad (5)$$

Bylo namítáno, že při nízkých rychlostech větru by se míra ochlazování měla počítat pomocí vektorového součtu rychlosti větru a "přirozené" rychlosti větru, tak jak uvádí Morgan (Morgan, 1978). Nicméně je doporučeno používat pro slabý vítr pouze vyšší z hodnot míry tepelných ztrát nuceným a přirozeným prouděním namísto jejich vektorového součtu, jelikož je to konzervativní.

Pro nucené i přirozené proudění se používají hodnoty hustoty vzduchu (ρ_f), viskozity vzduchu (μ_f) a koeficientu termální vodivosti vzduchu (k_f) z Tabulka 2 nebo spočítané pomocí rovnic v části 1.10, kde T_{film} se spočítá podle rovnice (6).

$$T_{film} = \frac{T_c + T_a}{2}. \quad (6)$$

1.9.5 Míra tepelné ztráty vyzařováním

$$q_r = 0,0178D\varepsilon \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right]. \quad (7)$$

1.9.6 Míra tepelného zisku ze slunce

Příklady hodnot parametrů můžete vidět v tabulkách Tabulka 4, Tabulka 5 a Tabulka 6.

$$q_s = \alpha Q_{se} \sin(\theta) A'. \quad (8)$$

Hodnota θ se pak spočítá pomocí rovnice (9).

$$\theta = \arccos[\cos(H_c) \cos(Z_c - Z_1)]. \quad (9)$$

1.9.7 Elektrický odpor vodiče

Elektrický odpor přenosové linky se liší podle frekvence, průměrné proudové hustoty a teploty. Pro 60 Hz ac při teplotách od 25 °C do 75 °C nabízí Aluminum Electrical Conductor Handbook (The Aluminum Association, 1982) hodnoty elektrického odporu pro většinu standardních hliníkových vodičů.

Tyto vypočítané hodnoty obsahují frekvenčně závislý "efekt kůže" pro všechny typy pletených vodičů, kromě jednovrstvých ACSR. Neobsahuje korekci pro proudovou hustotu závislou na efektech magnetického jádra, která je významná pro ACSR vodiče mající lichý počet vrstev hliníkových vláken. Odpor jednovrstvého ACSR vodiče se v Aluminum Electrical Conductor Handbook (The Aluminum Association, 1982) zdá být až o 20% vyšší. Odpor třívrstvého ACSR může být až o 3% vyšší než tabulkové hodnoty. Je zapotřebí technického posouzení v tepelných výpočtech zahrnujících tyto ACSR vodiče.

Odpor při teplotách nad 75 °C může být vypočítán podle metod popsanych v Aluminum Electrical Conductor Handbook (The Aluminum Association, 1982), Black and Bush (Black, a další, 1988) a Douglass, et al. (Douglass, a další, 1985)

V tomto standardu se elektrický odpor počítá výhradně jako funkce teploty vodiče, nicméně zadané hodnoty odporu mohou být také funkcí frekvence a proudové hustoty. Například hodnoty odporu vodiče na vysoké teplotě (T_{high}) a nízké teplotě (T_{low}) mohou být nalezeny v tabulkových hodnotách v Aluminum Electrical Conductor Handbook (The Aluminum Association, 1982). Odpor vodiče na jakékoliv jiné teplotě (T_c) nalezneme lineární interpolací podle rovnice (10).

$$R(T_c) = \left[\frac{R(T_{high}) - R(T_{low})}{T_{high} - T_{low}} \right] (T_c - T_{low}) + R(T_{low}). \quad (10)$$

Tato metoda výpočtu odporu dovolí uživateli vypočítat odpor na hodnotách vysoké i nízké teploty jakýmkoliv způsobem je vhodné.

Vzhledem k tomu, že měrný odpor většiny běžných kovů používaných v pletených vodičích se zvyšuje poněkud rychleji než lineárně s teplotou, bude odpor vypočítaný podle rovnice (10) poněkud vyšší (a proto i konzervativní pro výpočet ratingu) tak dlouho dokud bude teplota vodiče mezi T_{low} a T_{high} . Nicméně jakmile teplota vodiče překročí T_{high} , bude vypočtený odpor poněkud nízký (a proto nekonzervativní pro výpočet ratingu). Například, na základě měření individuálního 1350 H19 hliníkového vlákna v rozsahu teplot od 20 °C do 500 °C, použití parametrů na teplotách 25 °C a 75 °C vynesou odhad odporu vodiče, který je přibližně o 1% a 5% nižší než naměřená hodnota na 175 °C a 500 °C. Mezi 25 °C a 75 °C je chyba zanedbatelná. Podobně vynesou použití parametrů na teplotách 25 °C a 175 °C odhady, které jsou přibližně o 3% nižší na 500 °C a o 0,5% vyšší na 75 °C.

Závěrem můžeme říct, že použití dat o odporu při teplotách 25 °C a 75 °C z Aluminum Electrical Conductor Handbook (The Aluminum Association, 1982) vyhovuje hrubým výpočtům termálních ratingů v ustáleném a přechodovém stavu pro teploty vodiče až do 175 °C a může být použit pro aproximaci výpočtů v poruchovém stavu až do bodu tavení typických materiálů vodičů.

1.9.8 Tepelná kapacita vodiče

Tepelná kapacita vodiče je definována jako součin specifického tepla a váhy na jednotku délky. Pokud se vodič skládá z více než jednoho materiálu (například ACSR), pak jsou tepelná kapacita jeho jádra a vnějších vláken definovány každá tímto způsobem.

Pro výpočty přechodového termálního ratingu s délkou trvání od 5 min do 30 min zůstávají po skokové změně proudu teploty součástí vodiče přibližně stejné. Tepelná kapacita vodiče může být vypočtena jako součet tepelných kapacit jeho součástí jako je to uvedeno v rovnici (11).

$$mC_p = \sum m_i C_{pi}. \quad (11)$$

Hodnoty pro specifické teplo běžných materiálů používaných u pletených vodičů jsou vypsány v Black and Rehberg (Black, a další, 1985) a v části 1.12.6.

U nehomogenních vodičů při poruchách kratších než 60 s může být vnitřní teplotní rozdíl mezi jádrem a vnějšími vlákny zanedbán. Zejména u ACSR vodičů by mělo být poměrně nevodivé ocelové jádro zanedbáno pro skokové změny proudu kratší než 60 s. Pro skokové změny proudu delší než 60 s se tepelná kapacita jádra započítává. Pro skokové změny proudu dlouhé od 10 s do 60 s jsou vypočítané teploty vodiče poněkud konzervativní, protože každý teplotní rozdíl mezi jádrem a vnějšími vlákny klesne na nulu s vnitřní termální časovou konstantou řádově za 10 s až 20 s.

1.10 Rovnice pro vlastnosti vzduchu, sluneční úhly a sluneční tepelný tok

V následující části byla aplikována polynomiální regrese nejmenšími čtverci na tabulkové hodnoty tepelné vodivosti (1.10.3), celkového tepelného toku (1.10.6) a úpravy nadmořské výšky pro sluneční teplo (1.10.7), aby odpovídali rovnici v následující formě:

$$Y = A + BX + CX^2 + DX^3 + EX^4 + FX^5 + GX^6.$$

Algebraické rovnice jsou dány pro viskozitu (1.10.1), hustotu (1.10.2), výšku slunce (1.10.4) a azimut (1.10.5).

Pro ukázkou jsou poskytnuty tabulky běžných hodnot.

1.10.1 Dynamická viskozita vzduchu

Dynamická viskozita vzduchu je odhadována pomocí algebraické rovnice (12).

$$\mu_f = \frac{1,458 \cdot 10^{-6} (T_{film} + 273)^{1,5}}{T_{film} + 383,4}. \quad (12)$$

1.10.2 Hustota vzduchu

$$\rho_f = \frac{1,293 - 1,525 \cdot 10^{-4} H_e + 6,379 \cdot 10^{-9} H_e^2}{1 + 0,00367 T_{film}}. \quad (13)$$

1.10.3 Tepelná vodivost vzduchu

$$k_f = 2,424 \cdot 10^{-2} + 7,477 \cdot 10^{-5} T_{film} - 4,407 \cdot 10^{-9} T_{film}^2. \quad (14)$$

Tabulka 2 - Viskozita, hustota a tepelná vodivost vzduchu

Teplota T_{film}	Dynamická viskozita μ_f	Hustota vzduchu ρ_f (kg/m^3)				Tepelná vodivost vzduchu k_f
		0 m	1000 m	2000 m	4000 m	
°C	(Pa*s)					W/(m*°C)
0	0,0000172	1,293	1,147	1,014	0,785	0,0242
5	0,0000174	1,270	1,126	0,995	0,771	0,0246
10	0,0000176	1,247	1,106	0,978	0,757	0,0250
15	0,0000179	1,226	1,087	0,961	0,744	0,0254
20	0,0000181	1,205	1,068	0,944	0,731	0,0257
25	0,0000184	1,184	1,051	0,928	0,719	0,0261
30	0,0000186	1,165	1,033	0,913	0,707	0,0265

Teplota T_{film}	Dynamická viskozita μ_f	Hustota vzduchu ρ_f (kg/m ³)				Tepelná vodivost vzduchu k_f
		0 m	1000 m	2000 m	4000 m	
°C	(Pa*s)					W/(m*°C)
35	0,0000188	1,146	1,016	0,898	0,696	0,0269
40	0,0000191	1,127	1,000	0,884	0,685	0,0272
45	0,0000193	1,110	0,984	0,870	0,674	0,0276
50	0,0000195	1,093	0,969	0,856	0,663	0,0280
55	0,0000198	1,076	0,954	0,843	0,653	0,0283
60	0,0000200	1,060	0,940	0,831	0,643	0,0287
65	0,0000202	1,044	0,926	0,818	0,634	0,0291
70	0,0000204	1,029	0,912	0,806	0,625	0,0295
75	0,0000207	1,014	0,899	0,795	0,616	0,0298
80	0,0000209	1,000	0,887	0,783	0,607	0,0302
85	0,0000211	0,986	0,874	0,773	0,598	0,0306
90	0,0000213	0,972	0,862	0,762	0,590	0,0309
95	0,0000215	0,959	0,850	0,752	0,582	0,0313
100	0,0000217	0,946	0,839	0,741	0,574	0,0317

1.10.4 Výška slunce

Výška slunce (H_c) ve stupních (nebo v radiánech) je dána rovnicí (15a), kde parametry inverzní trigonometrické funkce arcsin jsou také ve stupních (nebo v radiánech).

$$H_c = \arcsin[\cos(Lat) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(Lat) \sin(\delta)]. \quad (15a)$$

Hodinový úhel (ω) je počet hodin od poledne vynásobený 15° (například 11 hodin je -15°, 14 hodin je +30°).

Sklon slunce (δ) je zobrazen v rovnici (15b).

$$\delta = 23,4583 \sin \left[\frac{284+N}{365} 360 \right], \quad (15b)$$

kde argument sinu je ve stupních.

Rovnice je platná pro všechny zeměpisné šířky, ať už pozitivní (severní polokoule) nebo negativní (jižní polokoule).

1.10.5 Azimut slunce

Azimut slunce (Z_c) je zobrazen v rovnici (16a):

$$Z_c = C + \arctan(\chi), \quad (16a)$$

kde

$$\chi = \frac{\sin(\omega)}{\sin(Lat) \cos(\omega) - \cos(Lat) \tan(\delta)}. \quad (16b)$$

Konstanta slunečního azimutu (C) (ve stupních) je funkcí "hodinového úhlu" (ω) a proměnné slunečního azimutu (χ) jak je zobrazeno v Tabulka 3.

Tabulka 3 - konstanta slunečního azimutu jako funkce "hodinového úhlu" a proměnné slunečního azimutu

"Hodinový úhel," ω (stupně)	C pro $\chi \geq 0$ (stupně)	C pro $\chi < 0$ (stupně)
$-180 \leq \omega < 0$	0	180
$0 \leq \omega \leq 180$	180	360

Tabulka 4 - Sklon slunce a sluneční azimut v různých zeměpisných šířkách pro roční maximální příkon slunečního tepla

Zeměpisná šířka	Místní čas podle slunce						
	10:00		12:00		14:00		
	H_c	Z_c	H_c	Z_c	H_c	Z_c	N
-80	32	33	33	180	32	327	350
-70	40	37	43	180	40	323	350
-60	48	43	53	180	48	317	350
-50	55	52	63	180	55	308	350
-40	60	66	73	180	60	294	350
-30	62	83	83	180	62	277	350
-20	62	96	90	180	62	264	20
-10	61	97	88	180	61	263	50
0	60	91	90	180	60	269	80
10	61	85	89	180	61	275	110
20	62	85	90	180	62	275	140
30	62	97	83	180	62	263	170
40	60	114	73	180	60	245	170
50	55	128	63	180	55	232	170
60	48	137	53	180	48	223	170
70	40	143	43	180	40	217	170
80	32	147	33	180	32	213	170

1.10.6 Celkový tepelný tok získaný z povrchu na úrovni moře

Hustota celkového toku slunečního tepla na úrovni mořské hladiny závisí na slunečním sklonu i čistotě atmosféry (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 1956).

Hustota celkového toku tepla z povrchu na úrovni mořské hladiny, tak jak je znázorněna v Tabulka 5, může být reprezentována následující regresní rovnicí (17).

Y = celkový tepelný tok, Q_s (w/m^2).

X = sklon slunce, H_c (stupně).

$$Q_s = A + BH_c + CH_c^2 + DH_c^3 + EH_c^4 + FH_c^5 + GH_c^6. \quad (17)$$

Tabulka 5 - Koeficienty pro rovnici (17)

Čistá atmosféra	
A	-42,2391
B	63,8044
C	-1,9220
D	$3,46921 \cdot 10^{-2}$
E	$-3,61118 \cdot 10^{-4}$
F	$1,94318 \cdot 10^{-6}$
G	$-4,07608 \cdot 10^{-9}$
Průmyslová atmosféra	
A	53,1821
B	14,2110
C	$6,6138 \cdot 10^{-1}$
D	$-3,1658 \cdot 10^{-2}$
E	$5,4654 \cdot 10^{-4}$
F	$-4,3446 \cdot 10^{-6}$
G	$1,3236 \cdot 10^{-8}$

Tabulka 6 - Celkový tepelný tok získaný z povrchu na úrovni mořské hladiny kolmé ke slunečním paprskům

Stupně sklonu slunce	Čistá atmosféra	Průmyslová atmosféra
H_c (stupně)	Q_s (W/m ²)	Q_s (W/m ²)
5	234	136
10	433	240
15	583	328
20	693	422
25	770	502
30	829	571
35	877	619
40	913	662
45	941	694
50	969	727
60	1000	771
70	1020	809
80	1030	833
90	1040	849

1.10.7 Faktor úpravy nadmořské výšky pro celkový tepelný tok

$$Q_{se} = K_{solar} Q_s, \quad (18)$$

kde

$$K_{solar} = A + BH_e + CH_e^2, \quad (19)$$

$$A = 1,$$

$$B = 1,148 \times 10^{-4},$$

$$C = -1,108 \times 10^{-8}.$$

Tabulka 7 - Faktory pro násobení slunečního tepla pro velké výšky (Yellot, 1956)

Nadmořská výška H_e (m)	Násobitelé pro hodnoty v tabulce 5
0	1,00
1000	1,10
2000	1,19
4000	1,28

1.11 Ukázkový výpočet

Ukázkový příklad ze standardu je popsán v kapitole 4.2 z důvodu návaznosti na analýzu a srovnání s výsledky knihovny.

1.12 Vstupní data

1.12.1 Úvod

Pečlivá volba vstupních dat pro proudově-teplotní vztahy je stejně důležitá jako samotná volba metody výpočtu a vyžaduje značný inženýrský posudek při výběru hodnot pro každou proměnnou. Tyto proměnné se řeší samostatně s vlastními hlavičkami s doporučeními jak vybrat hodnoty, aby odpovídaly konkrétním podmínkám. Mezi tato doporučení patří například jaké faktory by se měly zvážit než provedeme rozhodnutí o hodnotě parametru.

1.12.2 Vítr a okolní teplota

Povětrnostní podmínky mají značný vliv na tepelnou zátěž vodičů přenosových linek. Počasí poskytuje chlazení, principiálně pomocí tepelných ztrát prouděním (q_c) okolního vzduchu. Úroveň chlazení závisí na teplotě vzduchu a složce rychlosti větru kolmé na vodič.

Informace o počasí mohou být získány od místních institucí nebo od ostatních meteorologů. Zaznamenané rychlosti větru menší než 1,5 m/s ze záznamů meteorologů jsou často nepřesné (Surface Observatories, 1975). Většina rychlostí větru byla pořízena pomocí standardních anemometrů, které mají značnou počáteční neúčinnost, a proto jsou hodnoty při nízkých rychlostech větru pochybné.

Účinek směru větru relativně k vodiči je součástí tohoto standardu jako rovnice (4a) ve formě, v jaké ji navrhl Davis (Davis, 1978). Rozdíl mezi faktorem opravy směru větru navrhnutým od Morgan (Morgan, 1978) a Davis (Davis, 1978) je považován za minimální. Pro danou rychlost větru je tepelná ztráta prouděním u souběžného větru až o 60% nižší než u větru kolmého na vodič.

Účinek větrné turbulence a plení vodiče se zdá být ve výpočtech termálního ratingu a teploty vodiče méně důležitý. Chlazení odpařováním je důležitý faktor, ale na přenosových linkách se objevuje pouze ojediněle. Oba jsou zanedbány v tomto standardu.

Výška vodičů nad zemí má značný vliv na stínění větru. Vysokonapěťová vedení (u kterých je výška nad zemí vyšší) mohou být považována za méně stíněná stromy a terénem než nízkonapěťová.

V tomto standardu je také několik upozornění vzhledem k vhodné volbě povětrnostních podmínek pro výpočty termálního ratingu přenosových linek. Protože vítr se pro výpočty ratingu normálně považuje za kolmý k ose vodiče, hlavní starost nebo pozornost by se měla týkat volby rychlosti a směru větru.

- 1) Existuje mnoho důkazů z terénních měření, že bezvětří se může vyskytovat na omezené části vedení po dobu až několik hodin, zejména kolem západu a východu slunce. Toto je částečně pravda v silně zalesněných oblastech, kde nosná lana vodičů jsou pod úrovní vrcholů stromů. Během doby bezvětří je chlazení vodiče prouděním omezeno pouze na přirozené, které je ekvivalentní nucenému proudění o rychlosti větru 0,2 m/s.
- 2) Měření rychlostí větru v jedné lokaci budou vždy naznačovat vyšší průměrné a minimální hodnoty rychlosti větru než současná měření na více místech podél přenosové linky. Tyto náznaky rychlosti větru z měření v jedné lokaci jsou většinou špatným základem pro ratingy vedení, protože je pravděpodobné, že větrné podmínky jsou méně příznivé v jiných oblastech podél vedení.
- 3) Chlazení přenosových linek prouděním závisí na rychlosti větru i na směru větru. Jak ukazuje Tabulka 8, kolmý vítr o rychlosti 0,6 m/s zapříčiní stejné chlazení prouděním jako vítr o rychlosti 1,3 m/s pod úhlem 22,5°. Proto, pokud volíme odpovídající rychlost větru pro výpočty termálního ratingu, měli bychom zvážit úhel i rychlost větru. Konvenční předpoklad kolmého větru není konzervativní.

Tabulka 8 - Ekvivalentní kombinace rychlosti větru a směru větru pro chlazení prouděním

Rychlost větru [m/s]	Směr větru relativně vůči ose vodiče [stupně]
0,6	90
0,8	45
1,3	22,5
2,2	0

1.12.3 Hustota vzduchu, viskozita a vodivost

Hustota, viskozita a tepelná vodivost vzduchu jsou použity ve výpočtu tepelných ztrát prouděním a dají se získat z Tabulka 2. Rovnice poskytnuté v části 1.10 mohou být užitečné v počítačových programech, protože mohou snížit množství uložených dat a čas procesoru.

Bez ohledu na to, jaké tabulky nebo rovnice jsou použité, doporučuje se vybrat nejvyšší sklon slunce, který je v okolí vedení použitelný, protože to zapříčiní, že výsledky budou co možná nejkonzervativnější.

1.12.4 Emisivita a absorptivita

Reporty jako třeba Taylor and House (Taylor, a další, 1956) a House, et al. (House, a další, 1963) naznačují, že se emisivita a absorptivita zvyšují z 0,2 až na 0,9 kvůli stáří vodiče. Přesná míra růstu závisí na úrovni znečištění ovzduší a provozním napětím linky. Absorptivita je během života vodiče obecně vyšší než emisivita. Obě hodnoty rostou se stářím a znečištěním ovzduší. Hodnoty 0,5 pro obě nebo 0,9 pro absorptivitu a 0,7 emisivitu se používají v případě, že skutečné podmínky povrchu vodiče jsou neznámé.

1.12.5 Zisk tepla ze slunečního záření

Jednoduchá metoda výpočtu zisku tepla ze slunce je poskytnuta rovnicí (8) a rovnicí (9). Nejkonzervativnějších výsledků se dosáhne tím, že se předpokládá úhel dopadu paprsků 90°, což dá nejnižší hodnotu ampacity. Výsledek tak bude použitelný i v situacích, ve kterých se mohou vyskytnout extrémní podmínky.

Může být požadováno zjištění letních a zimních hodnot, v tom případě se pro hodnoty odpovídající oblasti, času v roce a času dne doporučuje použít House, et al. (House, a další, 1963) a Site Reduction Tables for Air Navigators (Sight Reduction Tables for Air Navigators).

Také je možné použít simulační modely počasí (Davis, 1978). Pro reálné systémy ratingů se mohou použít data získaná přímo z meteorologických stanic (Davis, 1978).

Zisk tepla ze slunce může zapříčinit, že při bezvětrí vodič zahřeje na až o 15 °C vyšší teplotu než vzduch. Nicméně obvykle se období s nejvyšší sluneční aktivitou spojují s výraznou větrnou aktivitou a skutečný vzestup teploty přenosové linky zřídka překročí více 5 °C až 10 °C.

1.12.6 Tepelná kapacita vodiče

Tepelná kapacita vodiče je součtem součinů specifického tepla a váhy na jednotku délky jeho součástí. Váha na jednotku délky vodiče a součástí vodiče pro všechny běžné hliníkové a složené hliníkové vodiče je uvedena v Aluminum Electrical Conductor Handbook (The Aluminum Association, 1982). Specifické teplo běžných materiálů vodičů je shrnuto níže a pochází ze zmíněného zdroje.

Pro 26/7 Drake ACSR je váha ocelového jádra a vnějšího hliníku 1,116 kg/m, respektive 0,5119 kg/m, takže celková tepelná kapacita vodiče při 25 °C je následující:

$$mC_p(Al) = 1,116 \text{ kg/m} \times 955 \text{ J/(kg} \cdot \text{°C)},$$

$$mC_p(Al) = 1066 \text{ J/(m} \cdot \text{°C)},$$

$$mC_p(St) = 0,5519 \text{ kg/m} \times 955 \text{ J/(kg} \cdot \text{°C)},$$

$$mC_p(St) = 243,7 J/(kg - ^\circ C).$$

Jak je uvedeno v Black and Byrd (Black, a další, 1983), specifické teplo materiálů vodičů je následující (Tabulka 9).

Tabulka 9 - Specifické teplot materiálů

Materiál	C_p $J/(kg - ^\circ C)$
Hliník	955
Měď	423
Ocel	476
Ocel plátovaná hliníkem	534 ²

1.12.7 Maximální povolená teplota vodiče

Protože termální rating jakéhokoliv vodiče je závislý na jeho maximální povolené teplotě a protože se tato teplota velmi liší podle technické praxe a posudku (pro ACSR se používají teploty od 50 °C do 180 °C), termální rating jakéhokoliv vodiče se také velmi liší. Proto je jedním z hlavních aspektů výpočtu termálního ratingu právě vhodný výběr nejvyšší povolené teploty vodiče.

Nejvyšší povolená teplota vodiče se běžně vybírá tak, aby nedocházelo ke ztrátě pevnosti vodiče vzhledem k žihání hliníku nebo k udržování odpovídající světlé výšky. Ztráta pevnosti vodiče a/nebo trvalé navýšení provisu kvůli dotvarování se hromadí s postupem času. Když zvážíme tyto efekty, je běžné používat vyšší maximální povolenou teplotu vodiče pro přechodové výpočty termálního ratingu než pro výpočty v ustáleném stavu. Pro výpočty v poruchovém stavu je obvykle maximální povolená teplota blízko bodu tavení materiálu vodiče.

Termální ratingy přenosových linek se obvykle vybírají buď k zamezení žihání mědi nebo hliníkových vláken nebo k zamezení nadměrného provisu vodiče vedoucímu k narušení minimální elektrické světlé výšky vůči zemi nebo ostatním vodičům.

- 1) Při výběru povětrnostních podmínek pro rating vedení, jehož účel je omezit ztrátu pevnosti vodiče v tahu kvůli žihání, může být vhodné zvážit nejvíce chráněná místa podél linky. Lokální horká místa mohou zapříčinit vysoké teploty a musí být brána v úvahu při určování, zda může dojít k mechanické závadě při silném nánosu ledu a pozdější silné zátěži větrem.
- 2) Při výběru povětrnostních podmínek pro rating vedení, jehož účel je omezit provis při vysokých teplotách, může být vhodné zvážit nejvíce chráněná místa, protože lokální horká místa podél takové části linky jsou méně důležité v určování míry provisu v celém rozsahu než průměrné podmínky všech závěsů.

² Specifické teplo závisí na poměru hliníku a oceli. Toto je typická hodnota pro vodivost 20,3% I.A.C.S.

1.12.8 Časový krok

Pro výpočet přechodové ampacity a teploty musí být časový krok dostatečně malý, aby vedl k přesnému výpočtu. Časový krok rovný 1% termální časové konstanty vodiče je zpravidla dostatečný.

2 Knihovna

Druhá kapitola je o softwarové knihovně, která je implementací IEEE standardu 738. Důraz je kladen na popis knihovny z hlediska jejího vývoje a použití a shrnuje nejdůležitější informace pro její případné další využití. Hlavní účel knihovny je poskytnout výpočty v elektronické formě případným zájemcům o vývoj aplikací zaměřených na využití dynamického termálního ratingu (DTR). Materiály použité v této kapitole jsou z vlastního zdroje.

2.1 Vývoj

Nejdůležitější částí vývoje knihovny byl IEEE standard 738, který poskytuje matematický model a metody výpočtu ampacity a teploty vodiče. Důkladný popis výpočtů a jejich porozumění byly nepostradatelnou součástí vývoje i samotné implementace.

Samotný vývoj se skládal z několika částí. Nejdříve byla vyvinuta první verze knihovny, která sloužila jako dočasné řešení, které přes svou funkčnost mělo implementační nedostatky. Po otestování funkčnosti se přešlo k vývoji druhé verze, která byla implementačně pokročilejší a dbala na čistotu kódu a strukturu.

Během vývoje knihovny se nevyskytlo mnoho problémů, jeden však stojí za povšimnutí. Při výpočtu teploty je nutné postupovat iteračně. Bylo tedy nutné sestavit rovnici pro výpočet dalšího kroku výpočtu a aplikovat Newtonovu metodu. Ostatní problémy byly spíše drobného charakteru.

2.1.1 Verze 1.0

První verze byla navržena jako statická třída, obsahující dvě hlavní veřejné statické metody pro výpočet ampacity a teploty vodiče. Ty byly pro přehlednost doplněny privátními statickými metodami, které prováděly potřebné mezivýpočty. Vzhledem k nízké úrovni členění však byly poměrně rozsáhlé a působily těžkopádně. Pojmenování proměnných bylo voleno stejně jako jejich označení ve standardu, to však mohlo být na první pohled matoucí a z programátorského hlediska špatné. Přesto však i první verze plnila svůj hlavní účel a tím byly výpočty. Proto byla použita společně s první verzí demo programu jako první veřejná publikace výsledků v rámci SGS projektu.

Navíc oproti druhé verzi obsahovala ještě další dvě veřejné metody, které vracely i výsledky mezivýpočtů z privátních metod. Důvodem implementace bylo především ladění funkčnosti a hledání chyb ve výpočtech. Tato funkcionalita nebyla později shledána jako důležitá, a proto nebyla implementována do druhé verze.

Popis první verze knihovny je také součástí (Siler, a další, 2013).

2.1.2 Verze 2.0

Druhá verze použila výpočetní části z první verze, což značně urychlilo její vývoj. Došlo však ke kompletnímu přepracování struktury. Byl kladen důraz na správná slovní pojmenování proměnných a metod, na objektovou implementaci a členění jednotlivých

metod na menší celky, které poskytují mnohem větší přehlednost. Díky tomu získala knihovna mnohem přehlednější a profesionálnější vzhled. Společně s druhou verzí knihovny byla vyvinuta i druhá verze demo aplikace, která prosazovala totožné hodnoty. Podrobný popis této finální verze knihovny naleznete v části 2.2.

2.2 Popis knihovny

Knihovna je napsaná v jazyce C#, názvy i komentáře všech prvků jsou anglicky.

Základ knihovny tvoří hlavní veřejná třída kalkulátoru, která poskytuje, stejně jako první verze, dvě veřejné metody, tentokrát je ale všechno objektově orientované, nikoliv staticky. Vedlejší část knihovny tvoří takzvané "helper" třídy, které poskytují pomocné metody pro funkčnost těch hlavních. Hlavní třída má tedy vlastní pomocnou třídu, která obsahuje hlavní pomocné metody členěné podle jednotlivých částí rovnice teplotní rovnováhy (1.9.1). Vlastní pomocné třídy mají také výpočty tepelné ztráty prouděním a tepelného zisku ze slunce, protože obsahují poměrně velké množství mezivýpočtů, což by v případě ponechání v jedné metodě působilo značně chaoticky. Naopak výpočty odporu vodiče při dané teplotě a tepelných ztrát vyzařováním jsou poměrně jednoduché a dají se zapsat jako jedna rovnice. Z tohoto důvodu zůstaly pouze v jedné třídě bez potřeby dalšího dělení.

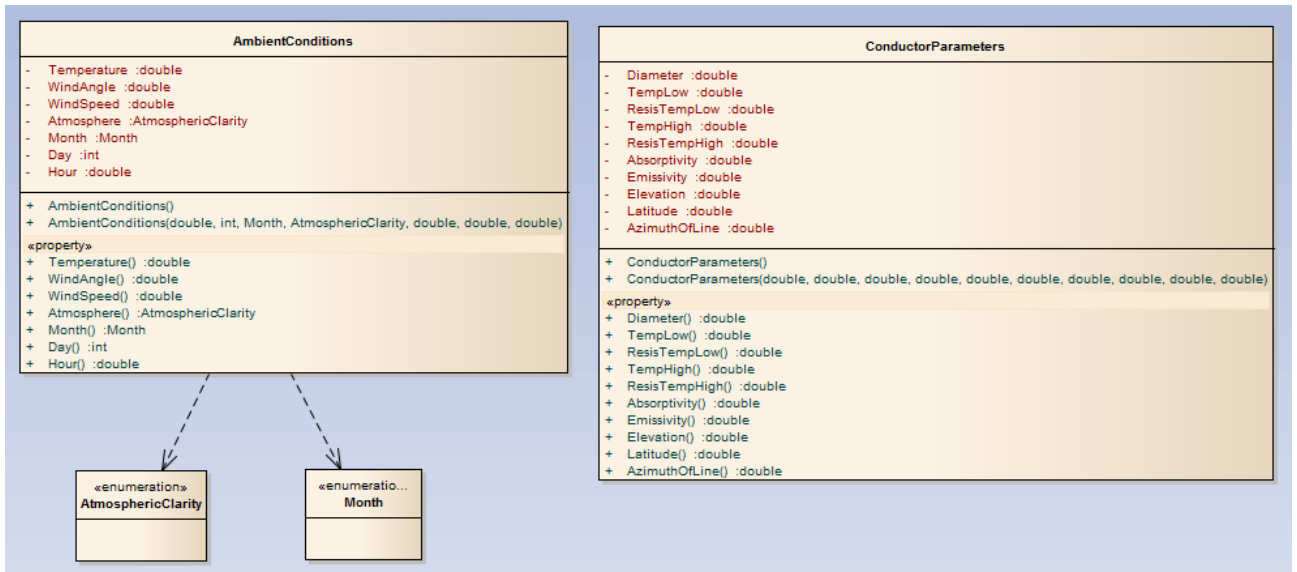
Datovou část tvoří dvě třídy obsahující parametry pro výpočet. Všechny parametry jsou mezi ně rozdělené podle logické příslušnosti a dělí se na parametry vodiče (například jeho průměr nebo umístění) a podmínky prostředí, ve kterém se linka nachází (například okolní teplota nebo povětrnostní podmínky).

Poslední částí je třída pro konverzi jednotek, která obsahuje přepočty mezi stupni a radiány.

2.2.1 UML diagramy

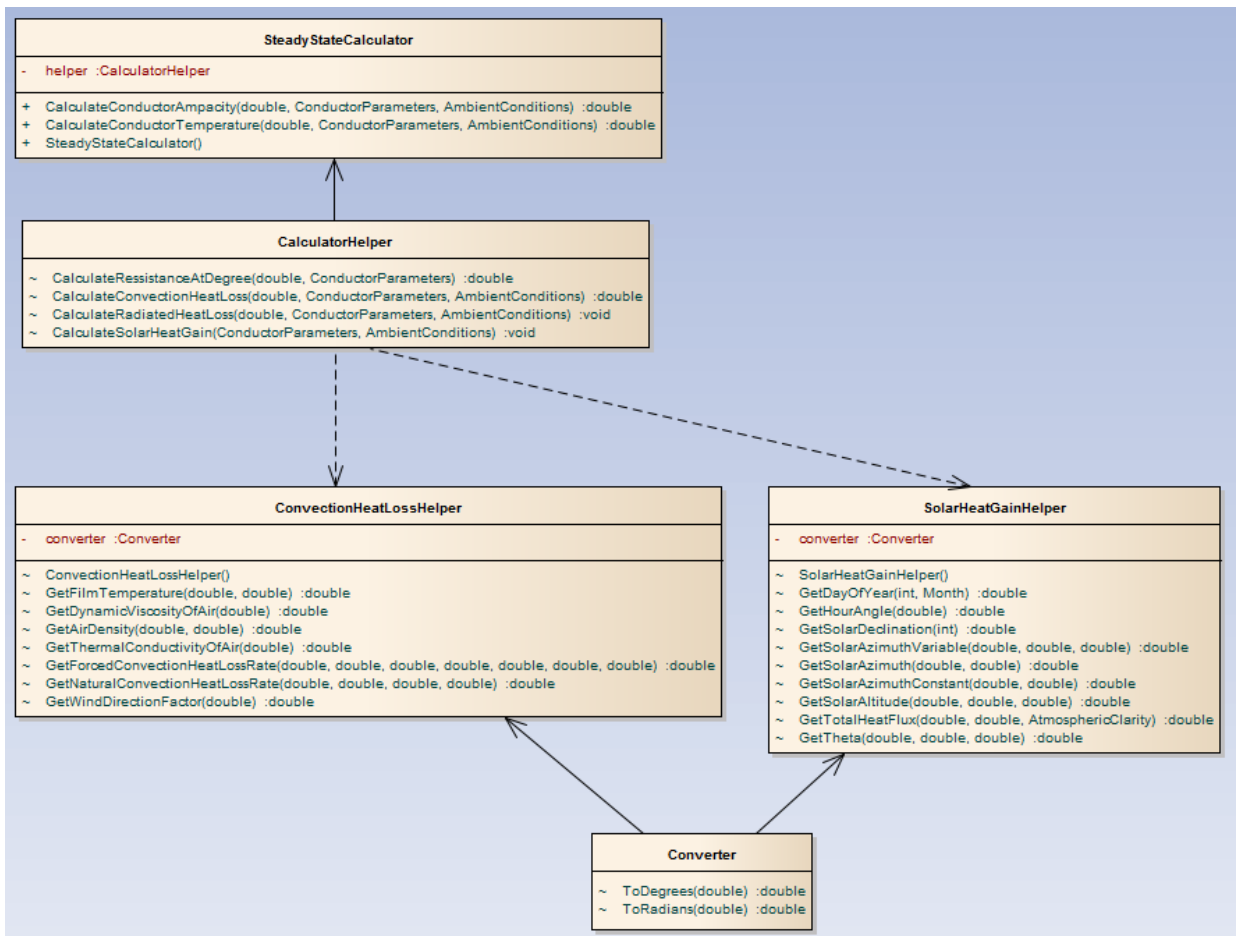
Z důvodu rozměrů je model rozdělen na dvě části. První je zaměřena na datovou část knihovny, druhá na funkční část knihovny. Vzájemné vazby mezi těmito dvěma částmi vyobrazeny nejsou, dají se však odvodit z hlaviček metod ve funkční části.

Obrázek Model datové části (Obrázek 2) zobrazuje část diagramu tříd, na které jsou vyobrazeny třídy určené pro uchování parametrů. Jedná se o veřejné třídy `AmbientConditions`, která obsahuje parametry okolního prostředí, a `ConductorParameters`, která obsahuje parametry týkající se vodiče. Zobrazeny jsou také veřejné enumy `AtmosphericClarity` a `Month`, které slouží jako datové typy v třídě `AmbientConditions`.



Obrázek 2 - Model datové části

Obrázek Model funkční části (Obrázek 3) zobrazuje část diagramu tříd, která je zaměřena na funkcionality knihovny. Jsou zde proto zobrazeny třídy obsahující výpočetní metody, ať už hlavní veřejné metody nebo jen pomocné metody pro mezivýpočty.



Obrázek 3 - Model funkční části

2.2.2 Třídy

V této části jsou podrobně popsány jednotlivé třídy a jejich funkcionality. Výpis atributů a metod naleznete v diagramech na obrázcích Obrázek 2 a Obrázek 3.

2.2.2.1 *SteadyStateCalculator*

SteadyStateCalculator je veřejná funkční třída, která slouží jako přístupový bod do knihovny. Obsahuje dvě veřejné metody, jednu pro výpočet teploty vodiče a druhou pro výpočet ampacity vodiče.

2.2.2.2 *CalculatorHelper*

CalculatorHelper je hlavní pomocná třída, která obsahuje metody pro hierarchicky nejvyšší mezivýpočty. Jsou to výpočty proměnných v balanční teplotní rovnici (1.9.1). Díky oddělení těchto výpočtů od hlavních metod pro výpočty v ustáleném stavu jsou dále využitelné i v případě implementace další veřejné třídy, například pro přechodové výpočty.

Metody pro výpočet odporu vodiče při dané teplotě a tepelné ztráty vyzařováním jsou zde vyřešeny kompletně, protože nejsou příliš rozsáhlé. Nevyžadují tedy žádné další mezivýpočty. Naopak metody pro výpočet tepelného zisku ze slunce a tepelné ztráty prouděním vyžadují větší množství mezivýpočtů, a proto mají své vlastní pomocné třídy.

2.2.2.3 *ConvectionHeatLossHelper*

ConvectionHeatLossHelper je pomocná třída pro výpočet tepelné ztráty prouděním a obsahuje všechny mezivýpočty potřebné k získání výsledku.

2.2.2.4 *SolarHeatGainHelper*

SolarHeatGainHelper je také pomocná třída. Obsahuje mezivýpočty pro výpočet tepelného zisku ze slunce.

2.2.2.5 *AmbientConditions*

AmbientConditions je datová třída. Neobsahuje tedy žádnou funkcionality a slouží pouze k uchování dat. V tomto případě se jedná o informace o proměnlivém okolním prostředí, například okolní teplotu, rychlost větru nebo čas, pro který chceme provádět výpočet.

2.2.2.6 *ConductorParameters*

ConductorParameters je datová třída. Stejně jako výše zmíněná třída také neobsahuje žádnou funkcionality a slouží pouze k uchování dat. Konkrétně se jedná o neměnné informace o vodiči, například průměr vodiče, jeho průměrnou nadmořskou výšku nebo známý elektrický odpor při určité teplotě.

2.2.2.7 *Converter*

Converter je jednoduchá třída jejíž jediný účel je konverze jednotek. Pro konkrétní účel knihovny třída obsahuje pouze metody na vzájemnou konverzi stupňů a radiánů.

2.2.2.8 *AtmosphericClarity a Month*

AtmosphericClarity a Month jsou jednoduché třídy typu enum, což je výčtový typ. Slouží k omezení parametrů daného typu na předem definované pojmenované hodnoty. Navíc přidávají díky jmennému vyjádření také značnou míru přehlednosti.

2.2.3 XML dokumentace

Součástí knihovny je i kompletní dokumentace v rámci zdrojových kódů a díky funkcím jazyka C# i její export v jazyce XML, který je možné později transformovat na uživatelsky lépe čitelnou formu.

2.2.4 Rozšiřitelnost

Vzhledem ke struktuře a čistotě kódu má knihovna velký potenciál pro rozšiřování. To je také plánované v rámci SGS projektu. Knihovna by se tak v budoucnu měla rozrůst o přechodové výpočty, které prozatím nejsou implementovány.

Největší výhodou knihovny v rámci jejího rozšiřování je bezesporu zmiňovaná struktura. Vzhledem k členění jednotlivých výpočtů lze v případě rozšiřování pouze přidat novou veřejnou třídu pro další výpočty a spousta metod potřebných pro mezivýpočty je už implementovaná a připravená k opětovnému použití.

Další velkou výhodou jsou jasná a čitelná pojmenování, z každé metody je díky tomu patrné, co vlastně dělá, a každá proměnná má jasný význam. To pomůže hlavně v případě, že by chtěl knihovnu upravovat někdo jiný, než její autor.

3 Ukázková aplikace

Třetí kapitola pojednává o ukázkové aplikaci pro knihovnu popsanou v předchozí části (2). Aplikace není nutnou součástí knihovny, slouží pouze pro demonstraci výsledků práce a případně rychlé a jednoduché použití knihovny. Materiály použité v této kapitole jsou z vlastního zdroje.

3.1 Požadavky a návrh

Cílem návrhu bylo vytvořit aplikaci, která bude demonstrovat veškerou funkcionalitu knihovny a umožní tak prezentovat výsledky práce. Další podmínkou bylo hromadné zpracování dat, které bylo potřebné pro budoucí tvorbu citlivostní analýzy i pro případné další uživatele. Vzhledem k přihlédnutí k termínům odevzdání části pro SGS projekt bylo také nutné brzy odevzdat hotový prototyp.

Na základě všech požadavků bylo rozhodnuto, že bude třeba vytvořit dvě verze. První jako prototyp, sloužící pouze k velice jednoduché demonstraci a možnosti provádět výpočty hromadně, a druhou, která bude více propracovaná, ať už z uživatelského nebo z programátorského hlediska. Pro hromadné zpracování dat je nutná podpora vstupů a výstupů z a do souboru. Jako vhodný formát byl vybrán jednoduchý textový formát CSV.

3.2 Vývoj

Když byl hotový návrh, bylo možné přejít k vývoji. Ten probíhal až na drobné potíže poměrně hladce, především díky detailně popsaným výpočtům v IEEE standardu 738. Vývoj jednotlivých verzí a jejich charakteristika je popsána níže.

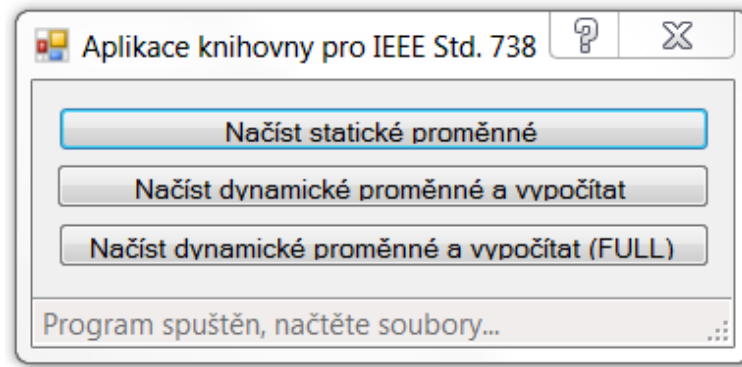
3.2.1 Verze 1.0

První verze demo programu sloužící jako prototyp byla vázaná na první verzi knihovny. Byla stejně tak jednoduchá z uživatelského hlediska a zároveň nepřehledná a neperspektivní z programátorského hlediska.

Hlavní částí jejího vývoje byl návrh struktury CSV souborů a algoritmu, který je přečte a doplní chybějící hodnoty defaultními. Jako řešení bylo zvoleno pevné značení hlavičky souboru na prvním řádku a stejně seřazené hodnoty na dalších řádcích. Nejprve se tedy přečte hlavička a získané hodnoty se uloží. Následné čtení dalších řádku probíhá tak, že se přečtená hodnota přiřadí do proměnné, které odpovídá značka na stejné pozici v hlavičce.

Nabízela také možnost tzv. kompletního výpočtu, který na rozdíl od normálního vracel i mezivýsledky z balanční tepelné rovnice. Hlavní využití bylo za účelem ladění, praktické využití nebylo dostatečně opodstatněné a ve druhé verzi tato možnost už není. V případě potřeby by bylo nutné metodu přidat také do knihovny.

Popis první verze demo aplikace pro knihovnu je také součástí (Siler, a další, 2013).



Obrázek 4 - Vzhled demo aplikace verze 1

3.2.2 Verze 2.0

Vývoj verze 2 probíhal podobně jako u knihovny. Byly tedy použity funkční části kódu, ale změněna struktura i styl. Důraz byl kladen na čistotu kódu a kvalitní návrh. Přesto však vzniklo několik drobných problémů, jejichž řešení vyústilo v ne zcela čisté řešení. Přesto lze tvrdit, že je aplikace napsaná dobře a přehledně.

Jediným problémem, který je vhodné zmínit, byla implementace grafického uživatelského rozhraní (GUI). Hlavním důvodem je, že je aplikace silně datově orientovaná, to znamená, že má na vstupu spoustu hodnot, s kterými pak pracuje. Z podstaty čistého kódu plyne, že by měl být oddělený datový model a grafické rozhraní. To s sebou přineslo problém, jak aktualizovat data v GUI na základě změny v modelu, například při zavolání metody pro obnovení defaultních hodnot nebo načtení hodnot ze souboru. Jako řešení byla použita jednodušší možnost vzhledem k tomu, že proměnných není mnoho a zpomalení aplikace vlivem této datové výměny je minimální. Po každé operaci, která manipuluje s daty, se tedy obnoví všechny vstupy v GUI bez ohledu na to, zda byly změněny jen některé.

3.2.3 Verze 2.1

Hlavní změnou v poslední verzi aplikace označené jako verze 2.1 bylo přidání možnosti zobrazování výsledků přímo v aplikaci. Grafický interface totiž nabízí možnost jednoduše a rychle měnit některé fixní parametry, avšak pro zjištění dopadu této změny bylo nutné data přenést a zobrazit v nějakém dalším programu. Proto byla implementována možnost jednoduchého a rychlého zobrazení výsledků. Bližší popis funkcionality je v následující části (3.3).

3.3 Popis aplikace

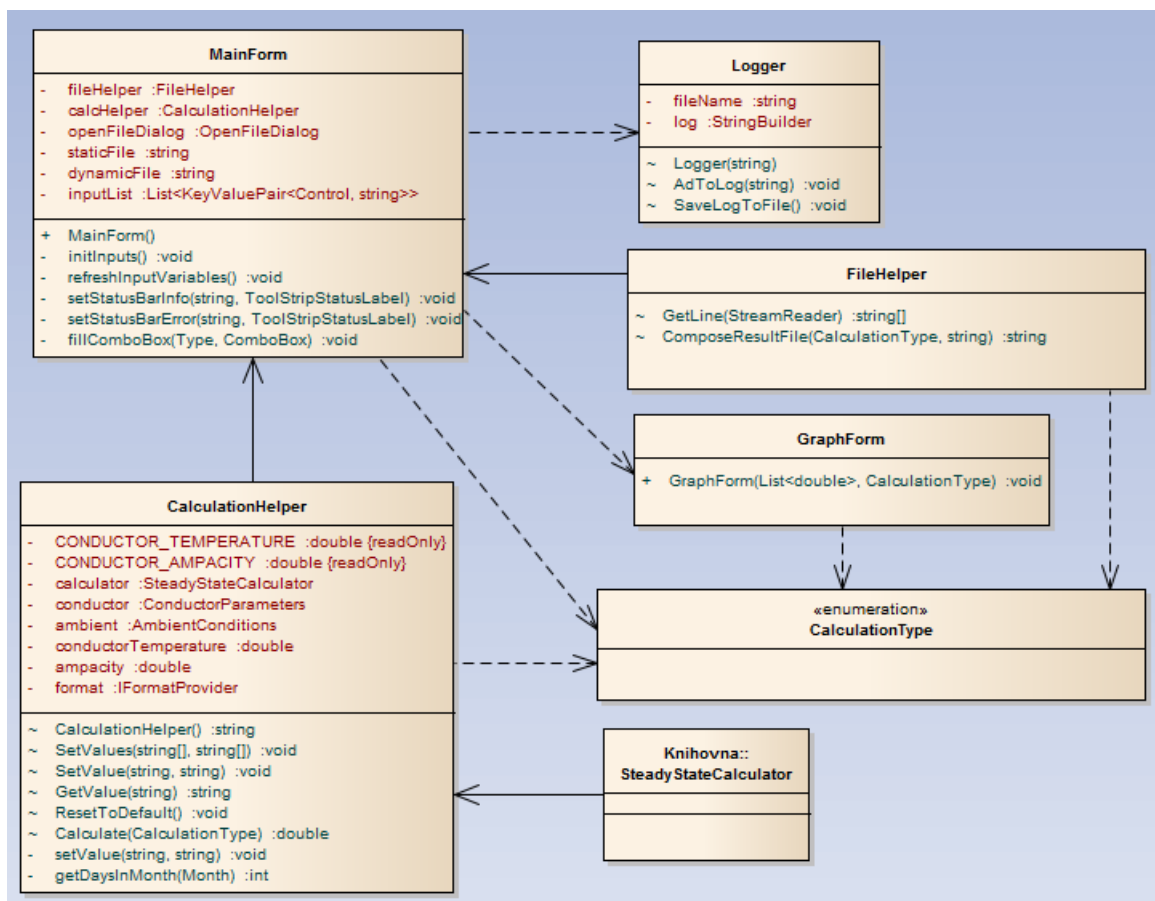
Demo aplikace je běžná aplikace typu Windows Forms napsaná v jazyce C#, obsahuje tedy grafické rozhraní, které je přívětivé pro uživatele. Celá aplikace je napsaná v angličtině, stejně tak i GUI, komentáře a XML dokumentace.

Struktura je rozdělena na dvě hlavní části. První část je třída MainForm jakožto hlavní třída, obsahující GUI a s ním spojenou funkcionalitu. Druhá část je pak CalculationHelper, který se stará o obsluhu knihovny a s ní spojené datové části.

Vedlejší část pak spočívá v třídách obsahující některé funkce týkající se práce se soubory.

3.3.1 UML diagram

Na obrázku Obrázek 5 je zachycen model aplikace. Ten není nijak složitý a odpovídá výše popsanému členění. Navíc obsahuje i veřejnou třídu knihovny z předchozího modelu pro názornost propojení demo aplikace s knihovnou.



Obrázek 5 - Model aplikace

3.3.2 Třídy

V této části jsou podrobně popsány jednotlivé třídy a jejich funkcionalita. Výpis atributů a metod naleznete v diagramech na obrázku výše (Obrázek 1).

3.3.2.1 MainForm

Jediná veřejná třída, která obsahuje a obsluhuje GUI. Prakticky to znamená, že celý formulář uživatelského rozhraní je jedna část této třídy. Druhá část je obsluha tlačítek a vstupů. Stará se o kontrolu hodnot zapisovaných do formuláře a v případě chybného formátu (například písmeno v kolonce pro průměr vodiče, který je číselný) je obnovuje na předchozí platnou hodnotu. Další funkcí je čtení vstupních souborů a předávání načtených dat třídě CalculationHelper.

3.3.2.2 CalculationHelper

CalculationHelper je pomocná třída, která se stará o veškeré výpočty a uchovává aktuální a defaultní hodnoty parametrů výpočtu. Další důležitá funkce je aplikování dat získaných ze vstupních souborů do datových tříd parametrů výpočtu. Ty jsou totiž v textovém formátu a je tedy nemožné přímo přidělit hodnotu do proměnné. K tomu slouží hlavičky v souborech, které spojí dvojice hodnot a proměnných. CalculationHelper je přečte a podle pevné definice označení parametrů v hlavičkách přidělí hodnoty na jejich místo. Také se stará o ošetření některých omezení vstupů (například hodinu je možné zadat pouze v rozmezí od 0 do 24).

3.3.2.3 FileHelper

FileHelper je jednoduchá pomocná třída, která zařizuje některé funkce spojené se soubory. Konkrétně se jedná o načtení řádku souboru a jeho následné rozdělení do pole hodnot podle oddělovače (ve formátu CSV je oddělovač čárka). Druhá funkce je složení názvu a umístění výstupních souborů na základě názvu a umístění vstupních souborů.

3.3.2.4 Logger

Logger je šikovná utilita, která umí zaznamenávat řetězce znaků a v případě potřeby je zapsat do souboru. Její konkrétní využití je pro sledování výpočtu. Během výpočtu se ukládají informace o jeho průběhu a v případě, že se vyskytne chyba, log se zapíše do souboru, kde si uživatel může přečíst, která fáze výpočtu selhala. To umožňuje snadnější lokalizaci problémů.

3.3.2.5 CalculationType

CalculationType je enum sloužící k parametrizaci některých metod. Umožňuje například použít stejnou metodu pro generování názvů a cest všech typů výstupních souborů, pouze se pomocí této třídy upřesní, o jaký soubor má jít. Metoda pak podle typu výpočtu vykoná příslušnou větev metody nebo použije jiný parametr a podobně.

3.3.2.6 GraphForm

Třída GraphForm slouží výhradně pro zobrazování grafů s výsledky. Obsahuje několik privátních metod a nenabízí prakticky žádnou možnost interakce. Jediná možnost ovlivnit zobrazovaná data jsou vstupní parametry konstruktora. Těmi jsou vstupní hodnoty pro vykreslování grafu a typ výpočtu, pro který se graf zobrazuje, pro označení nadpisu okna.

3.3.3 Grafické uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní se oproti první verzi značně rozrostlo. Hlavním rozdílem je přítomnost grafických vstupů pro statické parametry výpočtu. Uživatel si tak snadno a okamžitě může změnit parametry výpočtu a vidět dopad této změny ve výstupním souboru. Není tedy nutné vstupní soubor statických hodnot vůbec používat. S touto změnou je i spojena možnost ovládat vstupní soubor statických parametrů. Po jeho načtení máme na výběr tyto hodnoty aplikovat, což se ihned promítne i do GUI, nebo je resetovat na defaultní nastavení. Soubor navíc zůstává v paměti a je možné po ruční změně parametrů kdykoliv reaplikovat změny ze souboru.

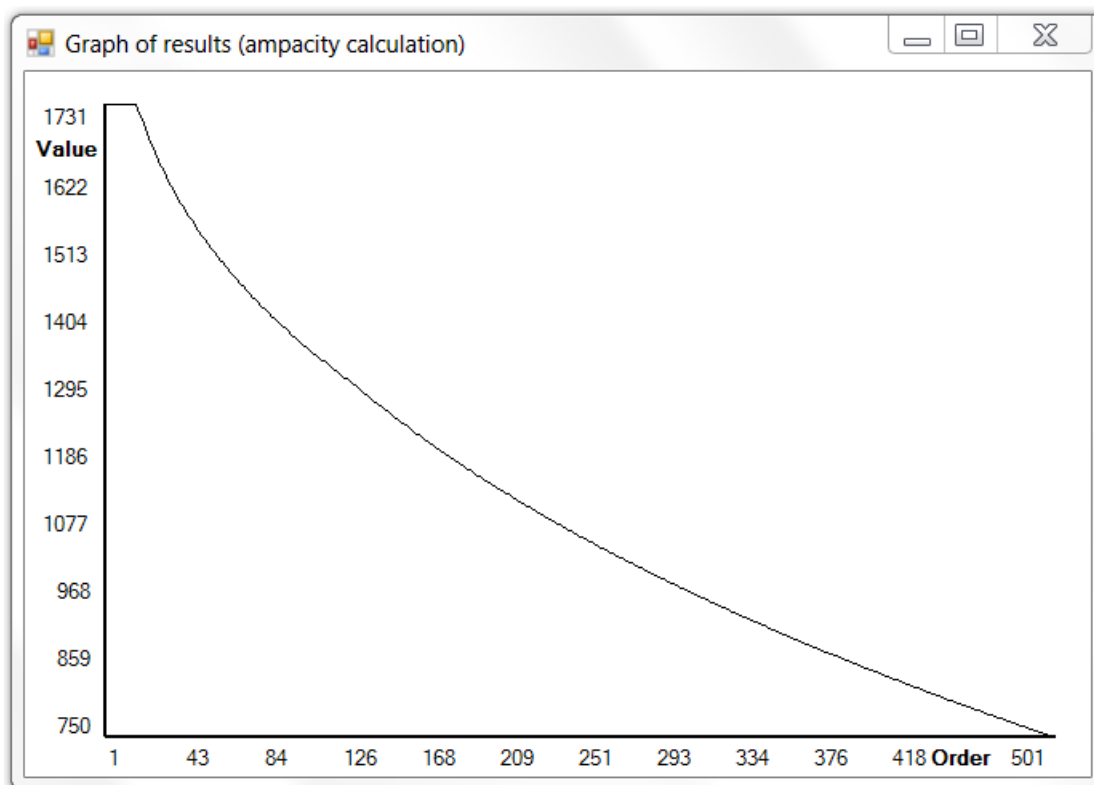
Navíc byla přidána možnost volby, zda chceme počítat teplotu vodiče, ampacitu nebo obě hodnoty. Podle zaškrtnutí příslušného checkboxu se zpřístupní i příslušné parametry (teplota vodiče při výpočtu ampacity a naopak).

Vítanou funkcí je i možnost grafického zobrazení vypočítaných hodnot. Samotný design grafu je poměrně jednoduchý a strohý. Jeho hlavní účel je možnost rychlého ověření dopadu změn fixních parametrů na výsledek. Pro tisk nebo další práci s daty je vhodnější využít specializovaný nástroj.

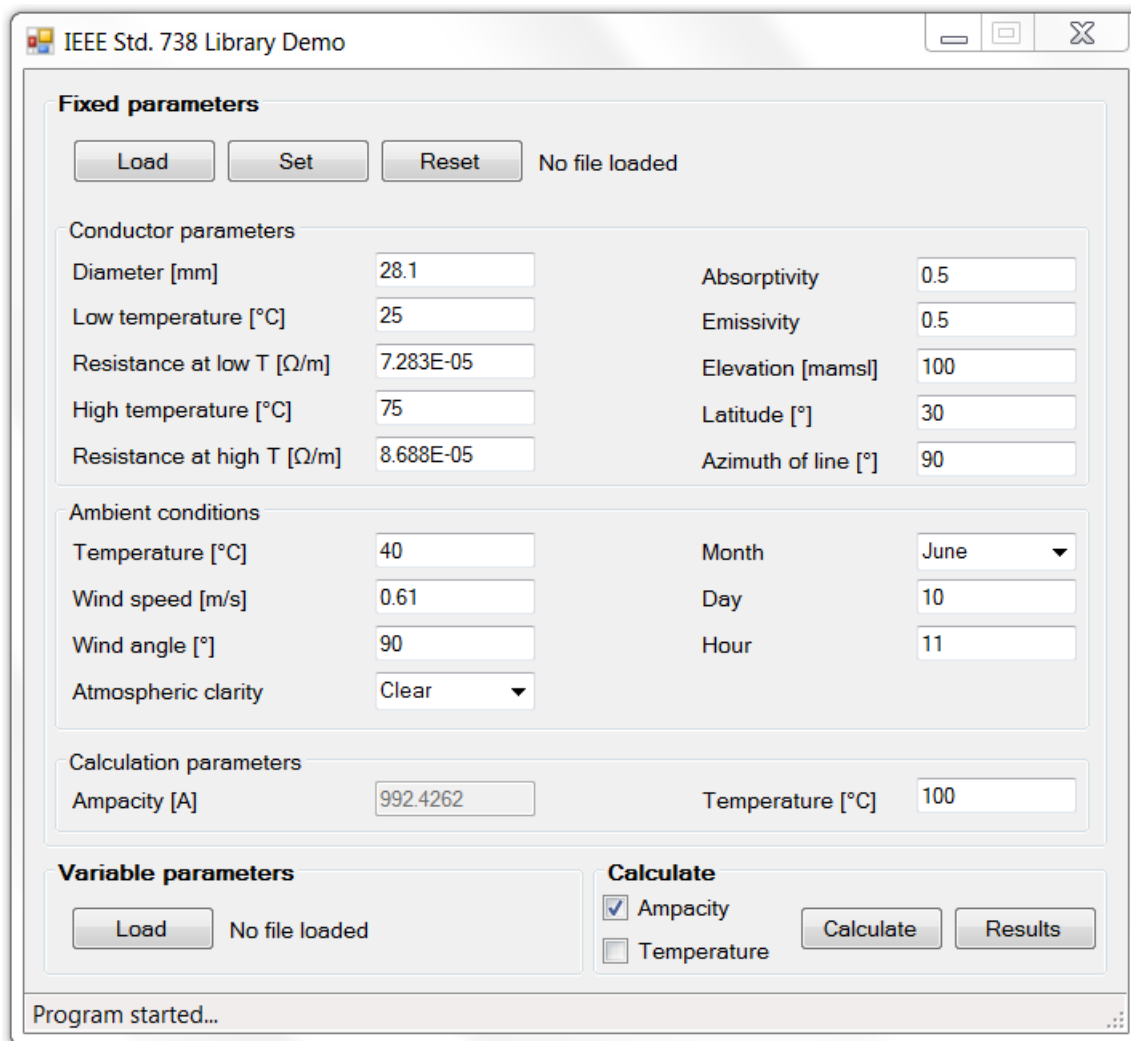
Ve spodní části obrazovky se nachází status bar, který v reálném čase informuje o dění v programu. V případě výpočtu, kde se může provádět více akcí, jeho funkci doplňuje také log. V tom se nachází podrobnější výpis informací a status bar pouze informuje o celkovém neúspěchu a odkazuje právě na zmiňovaný log.

Poslední funkcí GUI, kterou je třeba zmínit, je automatická oprava vstupních hodnot. Všechny vstupy jsou totiž číselné, některé mají navíc i jiná omezení, proto je v případě zapsání nepřijatelné hodnoty potřeba to dát uživateli najevo. To se provádí pomocí automatické opravy, jakmile uživatel zapíše nepřijatelnou hodnotu, program obnoví vstupní pole a zapíše do něj poslední zaznamenanou přijatelnou hodnotu. O této opravě informuje i status bar.

Výše popsaný vzhled GUI včetně funkce zobrazování grafu je zobrazen na obrázcích (Obrázek 6 a Obrázek 7) níže.



Obrázek 6 - Zobrazení grafu v demo aplikaci



Obrázek 7 - Vzhled demo aplikace verze 2.1

3.3.4 Vstupy a výstupy

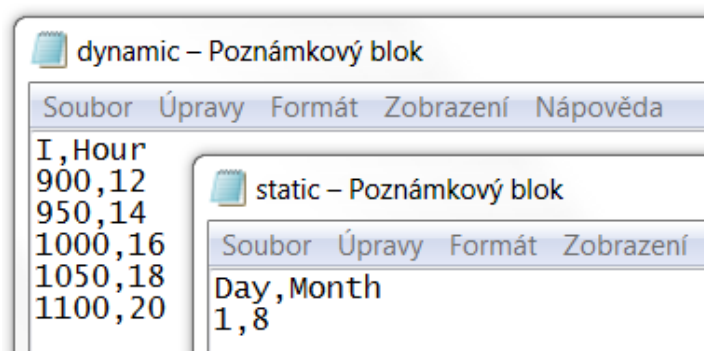
Formát souborů pro vstup a výstup je CSV. Jedná se o jednoduchý textový formát, který obsahuje na jednotlivých řádcích hodnoty oddělené čárkami.

Struktura souboru je složená ze dvou prvků, hlavičky a dat. Hlavička je vždy na prvním řádku souboru a obsahuje pevně zvolené značky parametrů, které chceme nastavit. Značky parametrů jsou pevně definované v aplikaci a je nutné je dodržovat. V případě požadavku změny nebo přidání dalších možností označení parametrů je nutné provést změnu přímo v aplikaci, konkrétně v metodě, která aplikuje načtenou hodnotu do příslušné proměnné (ukázka této metody v části 0). Datový řádek pak obsahuje hodnoty pro jednotlivé parametry v pořadí, které udává hlavička. Hodnoty jsou oddělené čárkami, desetinná čárka se píše jako tečka.

Vstupní data mají dva druhy, statická a dynamická. Statická vstupní data slouží pro určení statických parametrů výpočtu, které se během celého výpočtu nemění. To je využitelné, zejména pokud chceme použít pouze několik málo vstupních hodnot měnících se v čase a ostatní parametry jsou konstantní. Díky tomu může generovaný vstupní soubor obsahovat mnohem méně dat, než by bylo nutné v případě, že by musel každý řádek souboru obsahovat všechny parametry. Soubor se statickými daty by měl obsahovat vždy přesně dva řádky, hlavičku a jeden datový řádek. Více řádků se při jeho načítání nikdy nepřechte. Soubor s dynamickými vstupními daty slouží pro definici parametrů měnících se v čase. Ten už může obsahovat řádků více, nejméně však opět právě dva. Každý řádek pak zastupuje jeden celý výpočet a jemu odpovídající jeden výsledek ve výstupním souboru.

Výstupní soubory jsou vytvářeny vždy na stejném místě jako vstupní soubor s dynamickými vstupními daty. Mají i stejný název, pouze je k nim přidán postfix "_out" pro identifikaci výstupního souboru a "_Tc" nebo "_I" pro identifikaci typu obsahu. Tyto soubory jsou taktéž ve formátu CSV. Jedinou výjimkou ve formátu je výstupní soubor logu, který nese postfix "_error" a je v klasickém textovém formátu (.txt).

Výjimku tvoří stav, kdy uživatel nevybere žádný vstupní soubor pro dynamická data. V tom případě se provede pouze jeden výpočet a jako vstupní data se použijí statické hodnoty nastavené v uživatelském rozhraní. Výstupní soubor se v tomto případě vytvoří na stejném místě, na jakém se nachází spustitelný soubor demo aplikace. Název tohoto souboru se pak vytvoří ze základního názvu "result.csv" přidáním příslušných postfixů dle metody popsané v předchozím odstavci.



Obrázek 8 - Struktura vstupních souborů

3.3.5 Textová dokumentace

K aplikaci byla vytvořena také jednoduchá dokumentace ve stylu README dokumentů. Tato dokumentace popisuje funkcionalitu a ovládání aplikace a umožňuje tak používání knihovny i nezkušenému uživateli.

Hlavní části dokumentace jsou popis ovládání aplikace, popis vstupních a výstupních souborů včetně jejich struktury a formátu a popis funkcionality statických a dynamických parametrů.

3.4 Ukázky zdrojového kódu

Jako první krátká ukázka zdrojového kódu zajímavých funkcionalit bylo vybráno použití loggeru na konci výpočtu, který v případě zjištění chyby tuto chybu nejprve zapíše a označí výpočet jako nedokončený a následně i zapíše do souboru. Druhá ukázka obsahuje část kódu pro aplikování hodnot načtených ze souboru do datových struktur pro výpočet. Načtené hodnoty je nejprve nutné převést na číselný formát a poté se dostanou do zobrazené metody, která provede logickou kontrolu hodnot a aplikuje hodnoty nebo oznámí chybu.

3.4.1 Použití loggeru v případě selhání výpočtu

V případě selhání výpočtu se do logu zapíše vzniklá chyba a informace o nezdařeném výpočtu. Výpočet se také označí jako nedokončený.

Na konci metody pak proběhne kontrola, zda jsou oba výpočty dokončené. Pokud alespoň jeden z nich není dokončený, nastaví se do status baru informace o chybě a o vytvoření souboru logu. Pokud výpočty proběhnou v pořádku, pouze se nastaví informace o úspěchu do status baru.

```
catch (Exception ex)
{
    logger.AddToLog(ex.Message);
    ampCalcDone = false;
    logger.AddToLog("ERROR - ampacity calculation failed!");
}

if (tempCalcDone && ampCalcDone)
{
    setStatusBarItem(statusBar, "Calculation finished, output file(s) created.");
}
else
{
    setStatusBarItem(statusBar, "ERROR - view log for more informations!");
    logger.SaveLogToFile();
}
```

3.4.2 Aplikování načtených hodnot

Metoda dostane jako vstupní parametry hlavičku proměnné, která byla načtena z hlavičky souboru, a hodnotu, která byla vyparsována z datové části souboru.

Pomocí konstrukce switch se vybere příslušná větev, odpovídající hlavičce proměnné. Zde vzniká důvod, proč se označení proměnných musí pevně dodržovat. Ve vybrané větvi se provede kontrola vstupní hodnoty. Pokud odpovídá podmínce, je přiřazena do proměnné. Pokud neodpovídá podmínce, je vyvolána výjimka, která je ošetřena v místě volání metody.

```
private void setValue(string head, double value)
{
    switch (head)
    {
        case "Month":
            if (value <= 12 && value >= 1)
            {
                ambient.Month = (Month)value;
            }
            else
            {
                throw new ArgumentOutOfRangeException("Month");
            }
            break;
    }
}
```

3.5 Shrnutí

Aplikace je velice jednoduchá a poměrně přehledná, přesto nabízí důležitou základní funkcionalitu potřebnou k demonstraci knihovny. Její ovládání je intuitivní a nevyžaduje žádné větší školení. Struktura a formát souborů jsou uzpůsobeny pro snadnou manipulaci v externích programech jako je například Matlab. Jako případné vylepšení by bylo vhodné zvážit možnost vylepšení generovaných grafů. Další možnou úpravou by byla také možnost generování souborů s vstupními variabilními daty přímo v programu, například pomocí zadání celkového počtu výpočtů a intervalů jednotlivých parametrů, které se mají měnit.

4 Analýza výstupů knihovny

Čtvrtá kapitola podrobně popisuje průběh výpočtu ampacity od vstupních parametrů až k výsledku. Nejprve v podání standardu a poté totéž s výsledky knihovny. Na závěr je uvedeno srovnání těchto výsledků, na jehož základě hodnotí přesnost knihovny. Materiály použité pro analýzu výstupů jsou z části založeny na ukázkovém příkladu z (IEEE Standard 738, 2006) a z části na vlastních zdrojích. Výstupy knihovny jsou ve zkrácené formě popsány také v (Siler, a další, 2013).

4.1 Zadání příkladu ve standardu

Nalezněte termální rating (ampacitu) v ustáleném stavu pro vodič "Drake" 26/7 ACSR za následujících podmínek:

- a) Rychlost větru (V_w) je 0,61 m/s kolmo k vodiči.
- b) Emisivita (ε) je 0,5.
- c) Sluneční absorptivita (α) je 0,5.
- d) Teplota okolního vzduchu (T_a) je 40 °C.
- e) Maximální povolená teplota vodiče (T_c) je 100 °C.
- f) Průměr vodiče (D) je 28,1 mm.
- g) Ac odpor vodiče [$R(T_c)$] je:
 - a. $R(25\text{ °C}) = 7,283 \times 10^{-5} (\Omega/m)$,
 - b. $R(75\text{ °C}) = 8,688 \times 10^{-5} (\Omega/m)$.
- h) Linka směřuje od východu na západ, takže azimut přenosové linky ($Z1$) je 90°.
- i) Zeměpisná šířka (Lat) je 30° severně.
- j) Atmosféra (Atm) je čistá.
- k) Výška slunce (H_c) pro 11 hodin 10. června.
- l) Průměrná nadmořská výška vodiče je 100 m.

4.2 Výpočet příkladu dle standardu

Všechny vstupní hodnoty jsou vypočítány na základě vzorců v kapitole 1.9 a vstupů definovaných výše.

4.2.1 Tepelná ztráta prouděním

Tepelná ztráta prouděním se vypočítá pomocí rovnice (5).

$$T_{film} = \frac{100+40}{2} = 70\text{ °C}.$$

$$\rho_f = 1,029\text{ kg/m}^3 \text{ (Tabulka 2).}$$

$$q_{cn} = 0,02050 \times (1,029)^{0,5} \times (28,1)^{0,75} \times (100 - 40)^{1,25} = 42,4\text{ W/m}.$$

Protože je rychlost větru vyšší než 0, vypočítá se tepelná ztráta nuceným prouděním pro kolmý vítr pomocí rovnice (3a) a (3b). Upraví se pro směr větru a porovná s tepelnou

ztrátou přirozeným prouděním. Nejvyšší tepelná ztráta prouděním z vypočtených hodnot se použije pro výpočet termálního ratingu.

$$\mu_f = 2,04 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \text{ (Tabulka 2).}$$

$$\rho_f = 1,029 \text{ kg/m}^3 \text{ (Tabulka 2).}$$

$$k_f = 0,0295 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)} \text{ (Tabulka 2).}$$

$$q_{c1} = \left[1,01 + 0,0372 \left(\frac{28,1 \times 1,029 \times 0,61}{2,04 \times 10^{-5}} \right)^{0,52} \right] \times 0,0295 \times (100 - 40) = 82,3 \text{ W/m.}$$

$$q_{c2} = 0,0119 \left(\frac{28,1 \times 1,029 \times 0,61}{2,04 \times 10^{-5}} \right)^{0,6} \times 0,0295 \times (100 - 40) = 76,9 \text{ W/m.}$$

Podle instrukcí vybereme nejvyšší hodnotu tepelné ztráty prouděním.

$$q_c = 82,3 \text{ W/m.}$$

Protože je vítr kolmý na osu vodiče, je násobič směru větru (K_{angle}) 1,0 a hodnota použitá pro výpočet ratingu zůstává stejná.

4.2.2 Tepelná ztráta vyzařováním

Tepelná ztráta vyzařováním se vypočítá pomocí rovnice (7).

$$q_r = 0,0178 \times 28,1 \times 0,5 \times \left[\left(\frac{373}{100} \right)^4 - \left(\frac{313}{100} \right)^4 \right] = 24,4 \text{ W/m.}$$

4.2.3 Tepelný zisk ze slunce

Pro výpočet tepelného zisku ze slunce potřebujeme nejprve spočítat potřebné parametry a následně je dosadit do rovnice (8).

Pořadí dne v roce pro 10. červen je následující.

$$N = 161.$$

Sklon slunce pro 10. červen se vypočítá pomocí rovnice (15b).

$$\delta = 23,4583 \times \sin \left[\frac{284+161}{365} \times 360 \right] = 23,02^\circ.$$

Výška slunce se vypočítá pomocí rovnice (15a).

$$H_c = \arcsin[\cos(30) \times \cos(23,0) \times \cos(-15) + \sin(30) \times \sin(23,0)] = 74,8^\circ.$$

Pro výpočet azimutu slunce potřebujeme nejprve získat proměnnou azimutu slunce z rovnice (16b).

$$\chi = \frac{\sin(-15)}{\sin(30) \times \cos(-15) - \cos(30) \times \tan(23,0)} = -2,24.$$

Podle tabulky (Tabulka 3) získáme hodnotu konstanty azimutu slunce.

$$C = 180^\circ.$$

Pomocí výše vypočítaných parametrů můžeme z rovnice (16a) získat azimut slunce.

$$Z_c = 180 + \arctan(-2,24) = 114^\circ.$$

Vypočítaný azimut a výšku slunce dosadíme do rovnic (9) a (18) a následně vypočítáme tepelný zisk ze slunce pomocí rovnice (8).

$$\theta = \arccos[\cos(75) \times \cos(114 - 90)] = 76,3^\circ.$$

$$Q_{se} = 1023 \text{ W/m}^2.$$

$$A' = 28,1/1000 = 0,0281.$$

$$q_s = 0,5 \times 1023 \times \sin(76,3) \times 0,0281 = 14,0 \text{ W/m}.$$

4.2.4 Odpor při teplotě 100 °C

$$R(100) = 7,283 \times 10^{-5} + \left[\frac{8,688 \times 10^{-5} - 7,283 \times 10^{-5}}{50} \right] \times 75 = 9,390 \times 10^{-5} \text{ } \Omega/m.$$

4.2.5 Termální rating v ustáleném stavu

Pomocí rovnice (1b) a předchozích výsledků můžeme vypočítat termální rating vodiče.

$$I = \sqrt{\frac{82,3 + 24,4 - 14,0}{9,390 \times 10^{-5}}}.$$

$$I = 994 \text{ A}.$$

4.2.6 Teplota vodiče v ustáleném stavu

Teplota vodiče v ustáleném stavu pro daný elektrický proud, povětrnostní podmínky a parametry vodiče se nedá snadno vypočítat ručně, protože je potřeba opakovaných výpočtů proudu ze zkušebních hodnot teploty vodiče, které konvergují k výsledku.

4.3 Výpočet příkladu pomocí knihovny

Pro zjednodušení srovnání obsahuje výpočet pomocí knihovny pouze hlavní mezivýsledky, pomocí kterých se srovnává celková přesnost.

4.3.1 Tepelná ztráta prouděním

$$q_c = 81,57 \text{ W/m}.$$

Výsledek výpočtu tepelné ztráty prouděním je mírně pod hodnotou získanou ze standardu. Odchylka je v řádu desetin wattů na metr, což není mnoho. Ve prospěch knihovny hraje i fakt, že jde o odchylku směrem ke konzervativnějším hodnotám, proto by na případné problémy s přehříváním měla spíše pozitivní vliv. Výpočet se tedy dá považovat za dostatečně přesný.

4.3.2 Tepelná ztráta vyzařováním

$$q_r = 24,406 \text{ W/m.}$$

Vypočítaná tepelná ztráta vyzařováním odpovídá téměř přesně výsledku ze standardu. Rozdíl v řádu tisícinných wattů na metr může být způsoben vlivem zaokrouhlování ve standardu, případně jinou nepatrnou odchylkou. Tato část výpočtu může být tedy považována za přesnou.

4.3.3 Tepelný zisk ze slunce

$$q_s = 14,177 \text{ W/m.}$$

Vypočítaný tepelný zisk ze slunce se od výsledku ve standardu mírně odlišuje. Rozdíl je v řádu desetin wattů na metr, což je poměrně nízká hodnota. Dá se tedy považovat za dostatečně přesný. Odchylky ve výpočtu jsou pravděpodobně způsobeny numerickým výpočtem všech mezivýpočtů. Naopak ve standardu jsou pro některé mezivýpočty použity hodnoty z tabulek, což ovlivňuje přesnost výsledku.

4.3.4 Odpor při teplotě 100 °C

$$R(100 \text{ °C}) = 9,3905 \times 10^{-5} \text{ } \Omega/\text{m.}$$

Vypočítaný odpor odpovídá naprosto přesně výsledku ze standardu, který je s největší pravděpodobností pouze zaokrouhlen na menší počet desetinných míst. Případná odchylka je tedy zanedbatelně malá a výpočet přesný.

4.3.5 Termální rating v ustáleném stavu

$$I = 988,727 \text{ A.}$$

Výsledná ampacita je o něco vyšší, řádově jde o jednotky ampérů. Je však nutné brát ohled na fakt, že výsledek je nižší a tím pádem konzervativnější, než ve výpočtu v knihovně. Na případné problémy s přehříváním by tedy tato odchylka neměla vliv, naopak by je mírnila. Z pohledu optimálnějšího využití linky je naopak snížení ampacity zanedbatelně malé, když totiž tuto hodnotu porovnáme s rozdíly oproti statické ampacitě vodiče, jde stále o výrazné zvýšení efektivity využití. Ze statistického hlediska je odchylka pouze 0,5%, což je dostatečně nízká hodnota. Výpočet ampacity tedy můžeme považovat za dostatečně přesný.

4.3.6 Teplota vodiče v ustáleném stavu

S použitím výsledné ampacity jako vstupu pro výpočet teploty vodiče a původními parametry příkladu byla získána následující teplota.

$$T_c = 99,9999 \text{ °C.}$$

Za předpokladu správnosti výpočtu ampacity lze tedy výpočet teploty považovat za naprosto správný.

4.4 Srovnání výsledků

Celkové srovnání výsledků a příslušné odchylky jsou zobrazeny v následující tabulce.

Tabulka 10 - Srovnání výsledků standardu a knihovny

Parametr	Výsledek ve standardu	Výsledek z knihovny	Odchylka
q_c	82,3	81,57	0,73
q_r	24,4	24,406	-0,006
q_s	14,0	14,177	-0,177
$R(100\text{ }^\circ\text{C})$	0,00009390	0,000093905	-0,000000005
I	994	988,727	5,273

Z tabulky je patrné, že odchylka výsledků je velice malá. Rozdíl mezi výslednými hodnotami ampacity je pouhých 0,5%, což je v porovnání s rozdílem při použití statického ratingu zanedbatelné. Navíc je tento rozdíl směrem ke konzervativnějším hodnotám, což je bezpečnější. Knihovna se dá proto považovat za dostatečně přesnou. Tato drobná odchylka se dá přisuzovat rozdílům mezi numerickými výpočty některých parametrů a mezi přímým dosazením z tabulek ve výpočtu ve standardu.

Pro přesnější ohodnocení přesnosti knihovny by bylo třeba provést četná měření a následně statistické srovnání výsledků.

5 Citlivostní analýza vstupů

Pátá kapitola se zaměřuje na citlivostní analýzu jednotlivých vstupních parametrů. Cílem je tedy popis vlivu daného parametru na výslednou ampacitu nebo teplotu vodiče. Hlavním výstupem jsou tedy grafy charakteristik těchto parametrů na zvoleném intervalu, krátké srovnání jejich vlivu na výstupní hodnoty a určení významnosti tohoto vlivu. Materiály použité v této kapitole jsou z vlastního zdroje. Tato analýza je také součástí (Siler, a další, 2013).

5.1 Defaultní hodnoty

Defaultní hodnoty slouží jako základní nastavení parametrů, kterých se netýká aktuální charakteristika. To znamená, že všechny parametry mají své defaultní hodnoty, jeden parametr má hodnoty z intervalu pro analýzu (definované v části 5.2) a vždy buď ampacita nebo teplota vodiče je výstupní parametr, který se počítá. Pro tyto účely byly použity hodnoty z příkladu v části 4.1, které slouží i jako defaultní hodnoty knihovny.

5.2 Parametry analýzy

Parametry analýzy jsou intervaly, které byly zvoleny pro demonstraci vlivu jednotlivých vstupních parametrů na výstupní hodnotu ampacity nebo teploty vodiče.

Byly zvoleny následující intervaly:

- průměr vodiče 10 - 50 mm;
- úhel větru 0 - 90°;
- nadmořská výška 0 - 1500 m.n.m.;
- čas během celého dne s intervalem 1 hodina;
- čas během celého roku s intervalem 1 den;
- elektrický proud 500 - 1500 A;
- zeměpisná šířka 0 - 90°;
- teplota okolního vzduchu 10 - 50 °C;
- maximální povolená teplota vodiče 40 - 180 °C;
- rychlost větru 0 - 5 m/s.

Pro zbývající parametry bylo vzhledem k jejich charakteru zvoleno pouze několik hodnot:

- atmosféra: čistá a průmyslová;
- emisivita: 0,23, 0,5, 0,7 a 0,91;
- absorptivita 0,23, 0,5, 0,7 a 0,91.

5.3 Výsledky analýzy

5.3.1 Srovnání vlivu parametrů

Úroveň vlivu je charakterizována na základě rozdílu mezi maximální a minimální ampacitou, které bylo při analýze dosaženo. Srovnání vlivů je provedeno v tabulce níže

(Tabulka 11). Srovnání výsledků ukazuje těsnou vazbu mezi maximální povolenou teplotou vodiče a ampacitou. Mezi významné parametry okolního prostředí patří hlavně okolní teplota, vítr a denní doba. Z ostatních parametrů je významný také průměr vodiče. Parametry charakterizující pozici vodiče jako zeměpisná šířka nebo azimut přenosové linky mají pouze malý vliv na výsledky. U některých parametrů je nutné vzít v úvahu i jejich možný reálný rozsah, ten se totiž může od rozsahu v citlivostní analýze dost lišit. Hlavními parametry, které mají teoreticky vyšší potenciál než je uvedeno ve výsledcích, jsou například rychlost větru, průměr vodiče a okolní teplota.

Tabulka 11 - Vstupní parametry ohodnocené podle svého vlivu na výslednou ampacitu

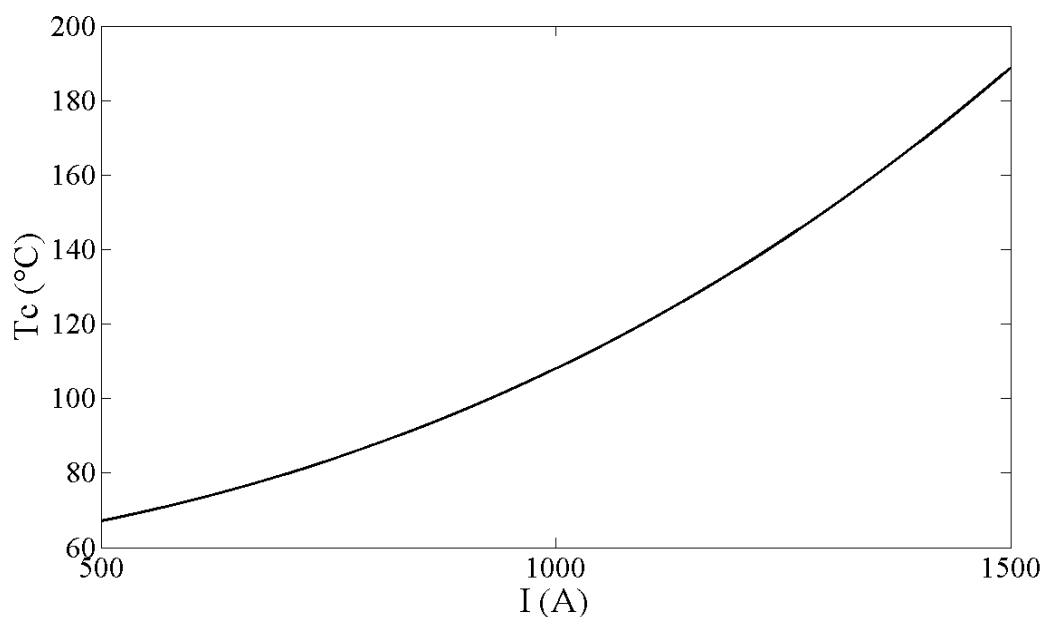
Vliv	Rozdíl (A)	Parametr
Vysoký	1299	Maximální povolená teplota vodiče
	981	Rychlost větru
	517	Hodina dne
	423	Průměr vodiče
	331	Okolní teplota
Střední	321	Úhel větru
	209	Emisivita
	84	Absorptivita
Nízký	51	Nadmořská výška
	19	Zeměpisná šířka
	11	Den v roce (měsíc a den)
	8	Čistota atmosféry
	2	Azimut přenosové linky

5.3.2 Charakteristiky parametrů

Tato část obsahuje xy grafy zobrazující funkční závislost mezi vybraným vstupním parametrem a výstupním parametrem, kterým je teplota vodiče nebo ampacita, popis této závislosti a její možné důsledky.

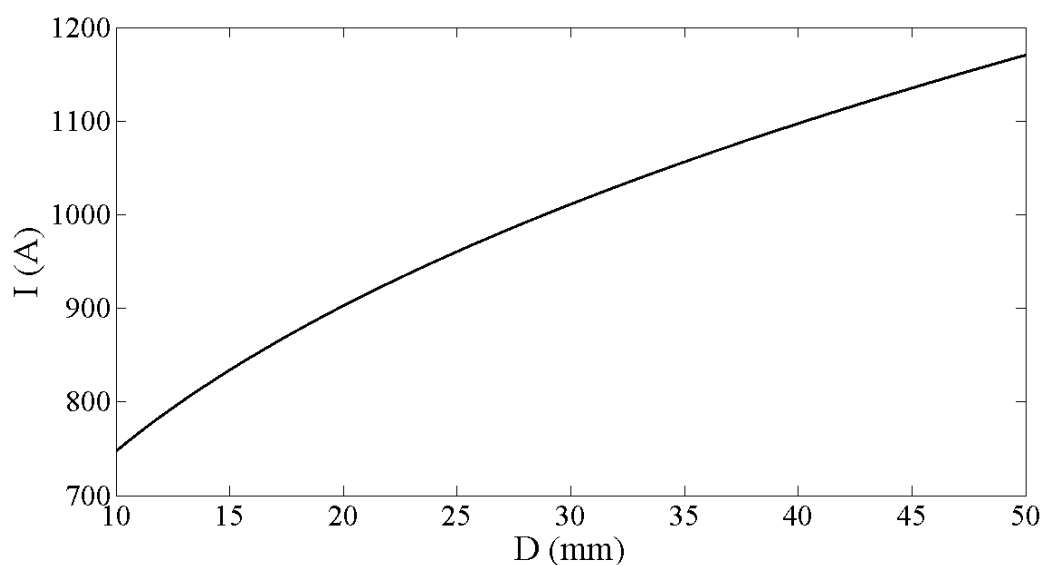
5.3.2.1 Parametry vodiče

Maximální povolená teplota vodiče byla prozkoumána jako první, kvůli jejímu nejvyššímu vlivu na ampacitu. Tato funkční závislost, zobrazená na obrázku (Obrázek 9) níže, je téměř kvadratická. To je velice důležité při vysokých hodnotách proudu procházejícího vodičem, protože v takovém případě může i malá změna proudu způsobit drastické zvýšení teploty vodiče a následkem toho by mohlo dojít k překročení teplotního limitu.

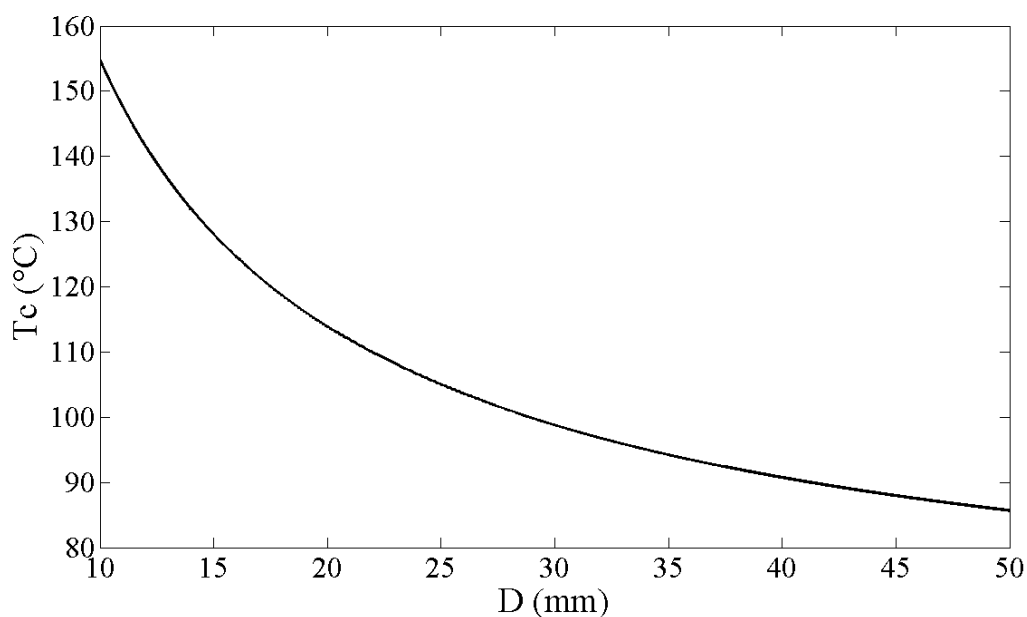


Obrázek 9 - Graf závislosti teploty vodiče na procházejícím proudu

Další dva grafy (Obrázek 10 a Obrázek 11) ukazují, že teplota vodiče i ampacita mají logaritmickou závislost na průměru vodiče. Použití vodiče s větším průměrem tedy při ponechání ostatních parametrů konstantních snižuje průměrnou teplotu vodiče a zvyšuje ampacitu. Je také třeba zvážit možnost použití vyšších průměrů než je zobrazeno na grafu. Vzhledem k charakteru funkční závislosti sice bude vliv průměru klesat, přesto má však potenciál pro vyšší vliv. Pro praktické použití by bylo nutné zvážit poměr ceny vodiče s vyšším průměrem, kvality vedení kvůli vyšší váze vodiče a získaného vyššího potenciálu.

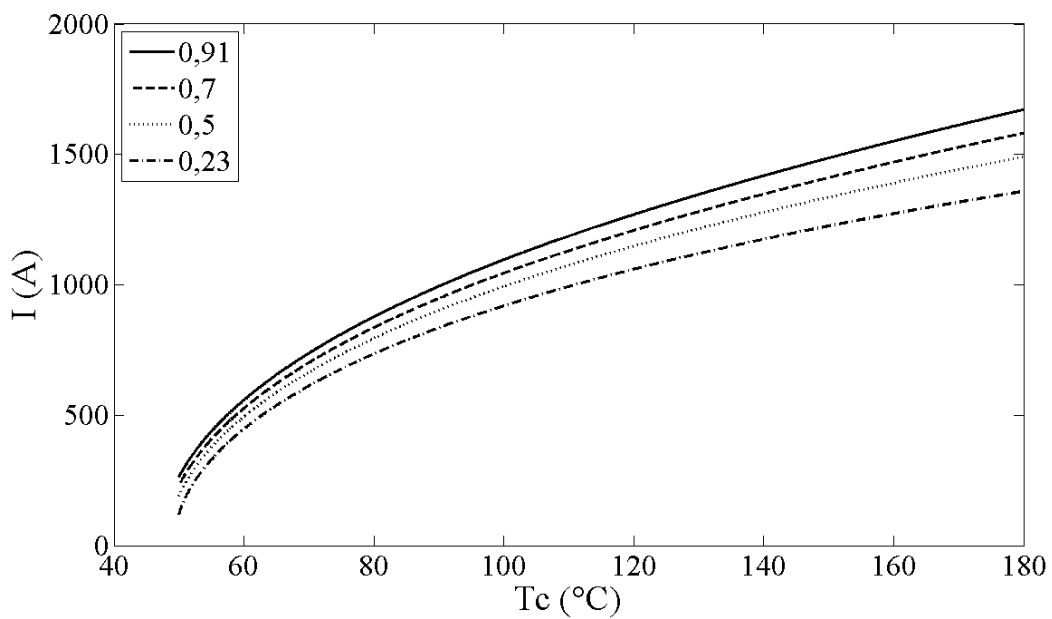


Obrázek 10 - Graf závislosti ampacity na průměru vodiče

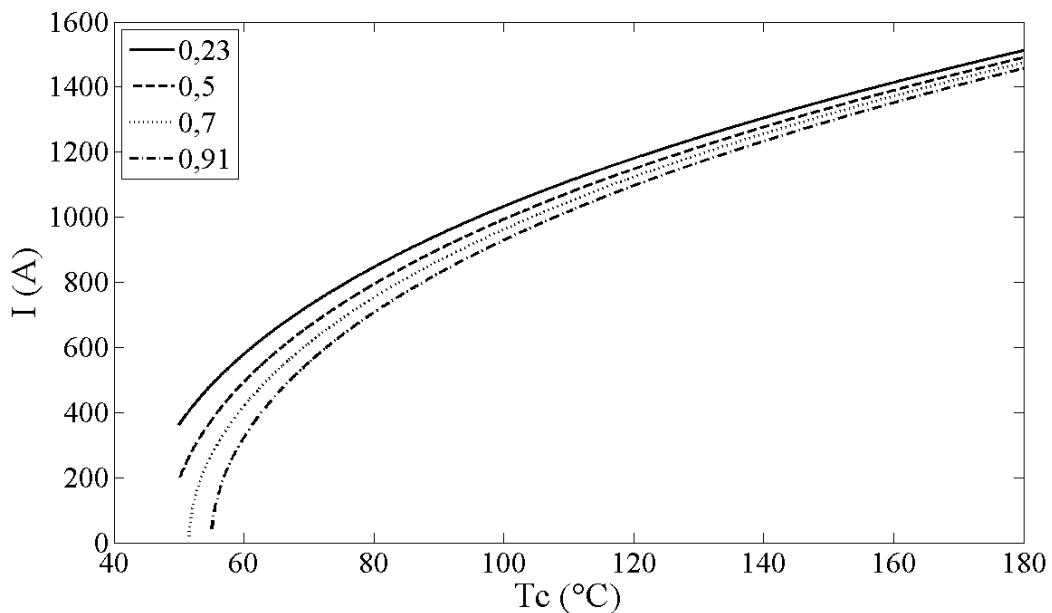


Obrázek 11 - Graf závislosti teploty vodiče na průměru vodiče

Závislosti na sluneční absorptivitě a emisivitě jsou zachyceny na následujících grafech (Obrázek 12 a Obrázek 13). Ani jeden z těchto parametrů však nemá zásadní vliv na výsledek výpočtu. Nicméně pokud předpokládáme teplotu vodiče 150 °C a emisivita se pohybuje v rozmezí od 0,23 do 0,91, ampacita se pohybuje od 1225 A do 1485 A, což není zcela zanedbatelný rozdíl. Rozdíl v ampacitě se ještě zvýší, pokud sluneční absorptivita stoupne z 0,23 na 0,91 při fixní maximální teplotě vodiče 55 °C. Dostane se tak až na hodnotu 467 A. Z grafů je také patrné, že vliv absorptivity se snižuje s rostoucí teplotou. Naopak vliv emisivity s rostoucí teplotou stoupá, proto je nutné její vliv nepodcenit, především u vodičů přizpůsobených pro vyšší teploty.



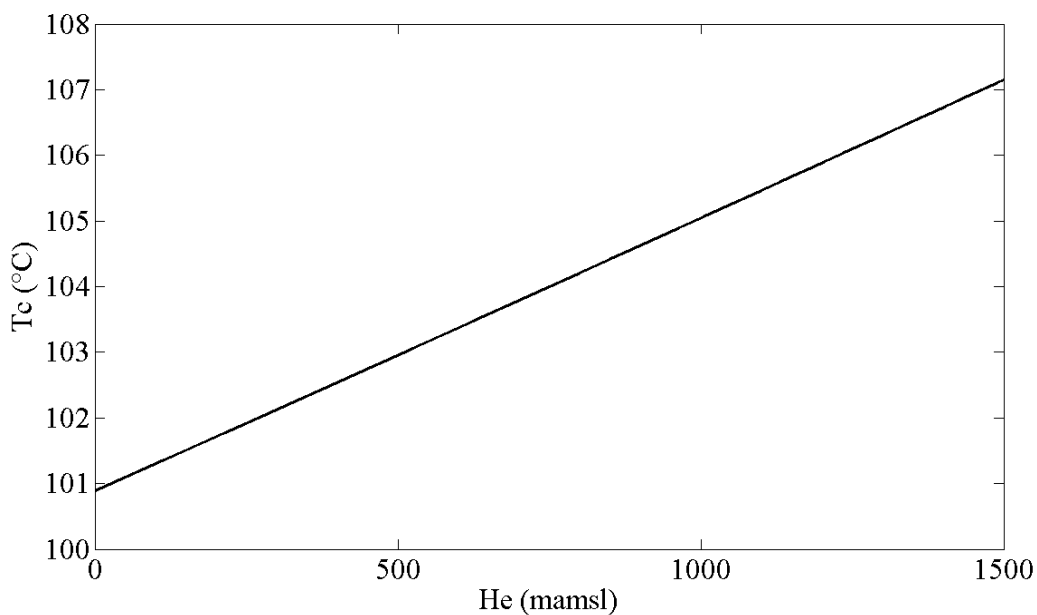
Obrázek 12 - Graf závislosti ampacity na teplotě vodiče pro vybrané hodnoty emisivity



Obrázek 13 - Graf závislosti ampacity na teplotě vodiče pro vybrané hodnoty sluneční absorptivity

5.3.2.2 Parametry polohy linky

První z parametrů popisujících polohu vodiče je nadmořská výška. Její vliv nepatří mezi největší, přesto by ve vysokých polohách mohl hrát určitou roli. Jak můžeme vidět na dalším obrázku (Obrázek 14), její funkční závislost má lineární tvar a proto úměrně s rostoucí nadmořskou výškou roste i její účinek a vodič se více zahřívá. V praxi ale s rostoucí nadmořskou výškou také klesají okolní teploty, díky čemuž dochází k vyššímu ochlazení vodiče a vliv nadmořské výšky se vyvažuje.

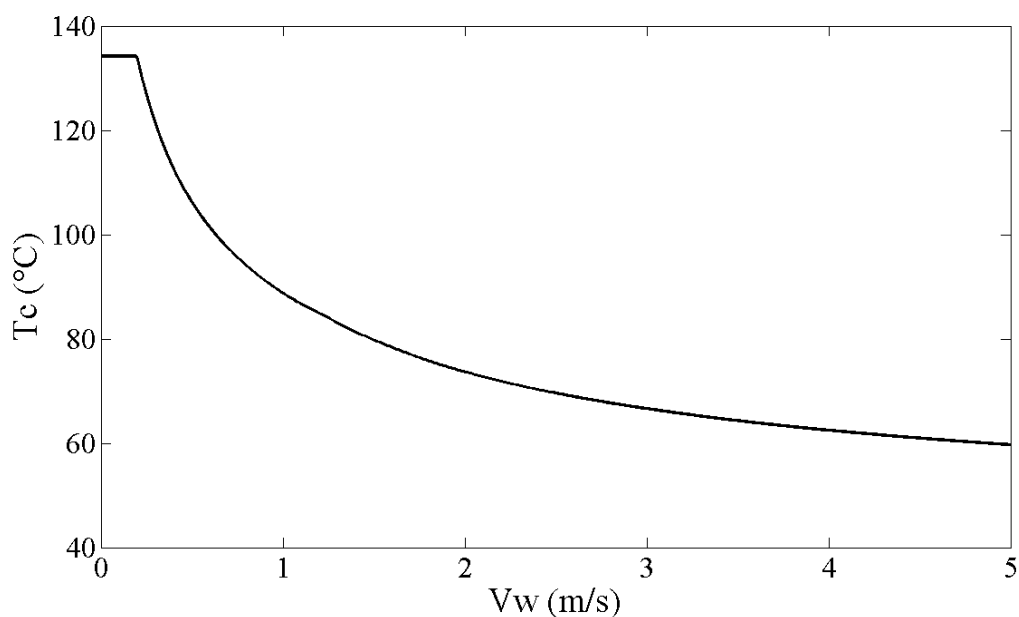


Obrázek 14 - Graf závislosti teploty vodiče na nadmořské výšce

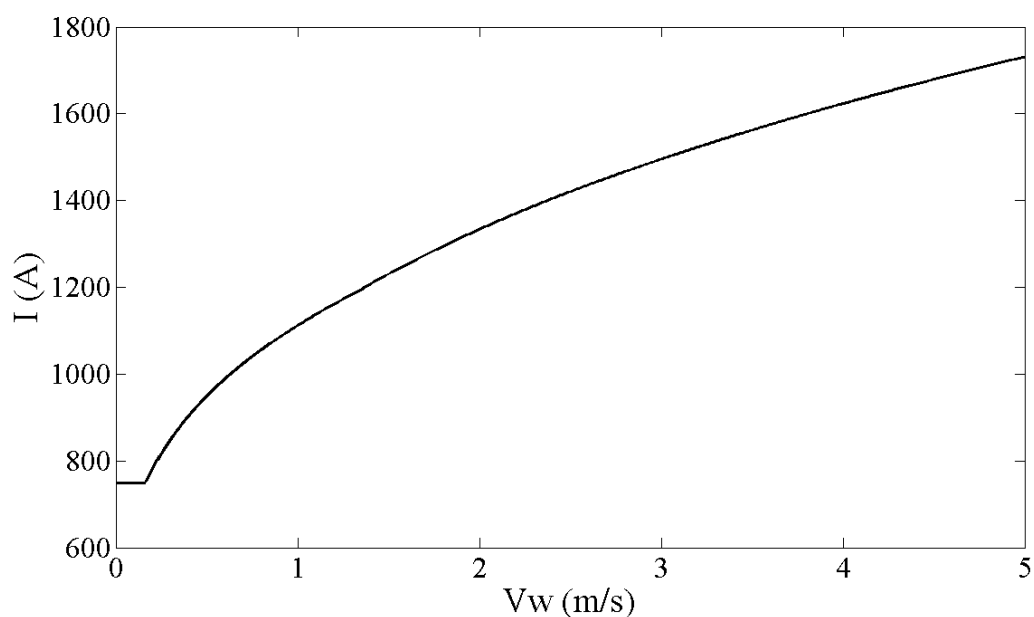
Další dva parametry (zeměpisná šířka a azimut přenosové linky), které popisují polohu linky, mají zanedbatelný význam ve výpočtech termálního ratingu. Proto zde nejsou uvedeny žádné grafy jejich funkčních závislostí. Jejich vliv se dá popsat trigonometrickými funkcemi.

5.3.2.3 Parametry okolního prostředí

Dalšími parametry jsou vlastnosti větru, konkrétně jeho rychlost a směr. Další graf (Obrázek 15) zobrazuje vztah mezi rychlostí větru a teplotou vodiče. Podobný ale zrcadlový graf (Obrázek 16) má závislost ampacity. Její tvar je vzhledem k charakteru vztahu teploty vodiče a ampacity více rostoucího charakteru. Výsledná křivka obou grafů je dána jako maximální hodnota ze tří různých rovnic odpovídajících žádnému, slabému a silnému větru. Při bezvětří vzniká nejvyšší teplota vodiče. S rostoucí rychlostí větru se vodič chladí logaritmicky. To značí také možný vyšší potenciál chlazení vodiče při vyšší rychlosti větru než jaká je použita v citlivostní analýze, ale jen do určité hranice, na které se růst vzhledem k charakteru téměř zastaví.

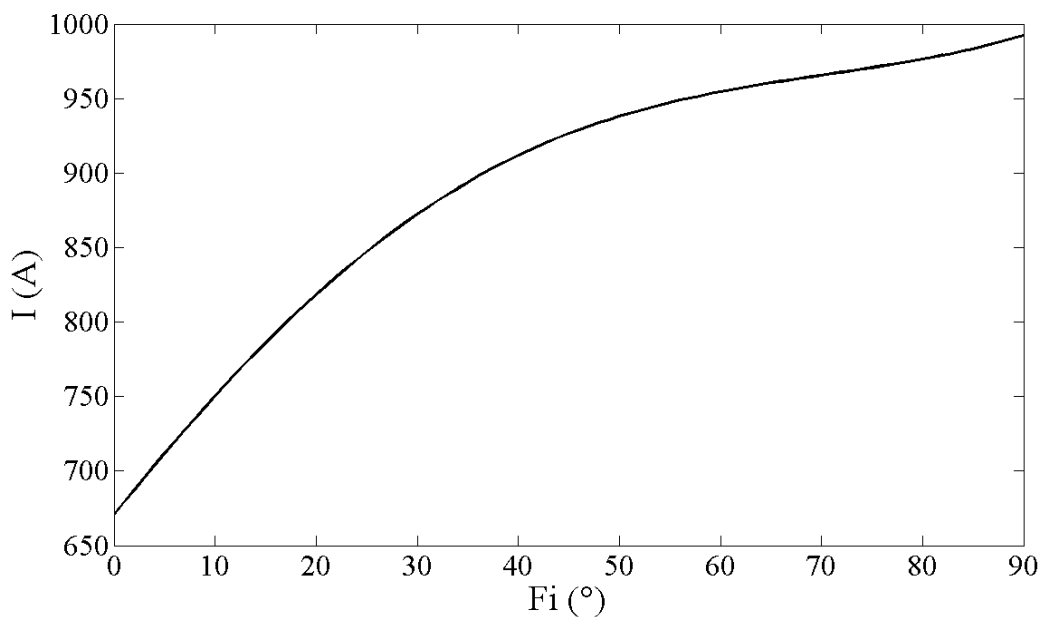


Obrázek 15 - Graf závislosti teploty vodiče na rychlosti větru



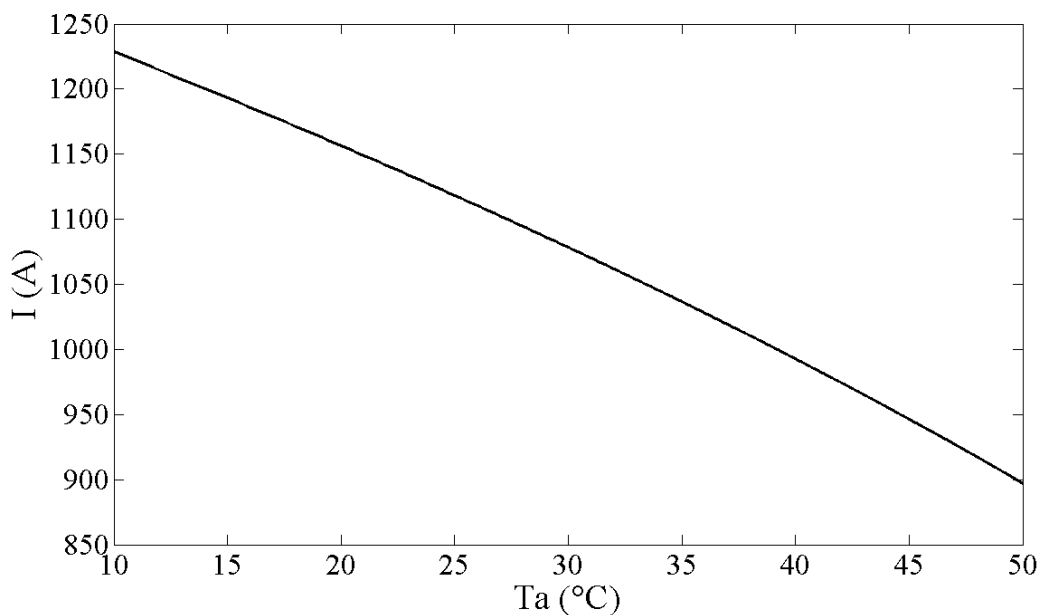
Obrázek 16 - Graf závislosti ampacity na rychlosti větru

K určení efektu směru větru je potřeba vypočítat úhel dopadu větru na osu vodiče. Funkční závislost teploty vodiče na úhlu dopadu větru je zobrazena na grafu níže (Obrázek 17). Paralelní nebo téměř paralelní vítr poskytuje nejmenší účinek chlazení a může vést k přehřívání. Naopak pokud vítr dopadá vzhledem k ose vodiče alespoň pod úhlem 40°, je míra chlazení velice výrazná. Nejvyššího efektu pak docílíme pomocí silného větru s rychlostí přes 5 m/s, který fouká kolmo k vedení.



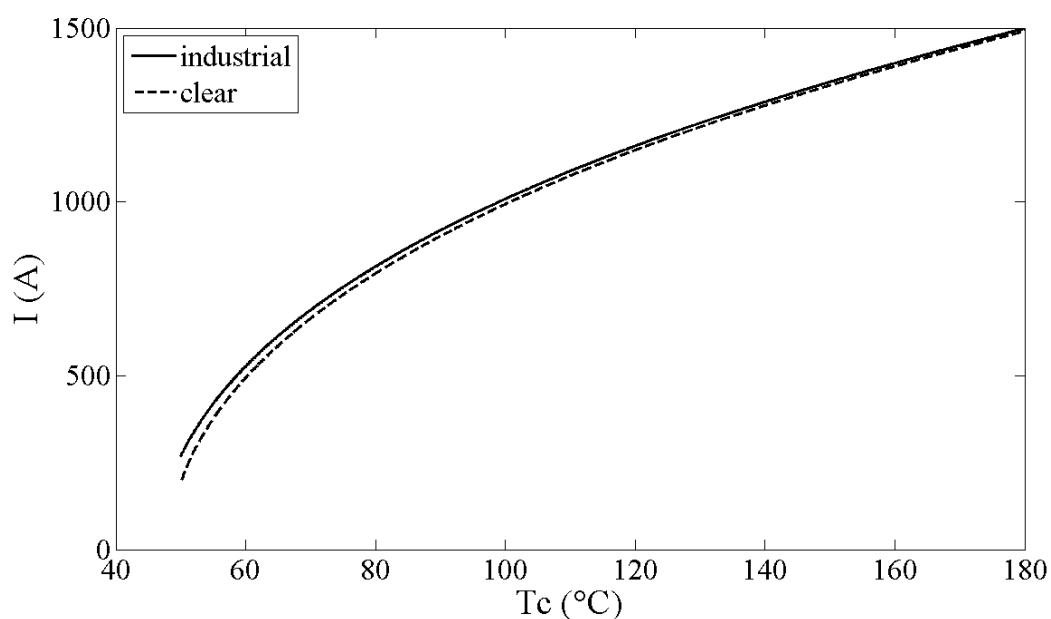
Obrázek 17 - Graf závislosti ampacity na směr větru

Okolní teplota je jeden z nejvýznamnějších vstupních parametrů. Její vliv na teplotu vodiče je lineární. Když okolní teplota vzroste o 5 °C, vnitřní teplota vodiče stoupne také o 5 °C. Její vliv na ampacitu není vzhledem k charakteru závislosti teploty vodiče a ampacity zcela lineární, ale velice se tomu blíží, jak je vidět na obrázku níže (Obrázek 18).



Obrázek 18 - Graf závislosti ampacity na okolní teplotě

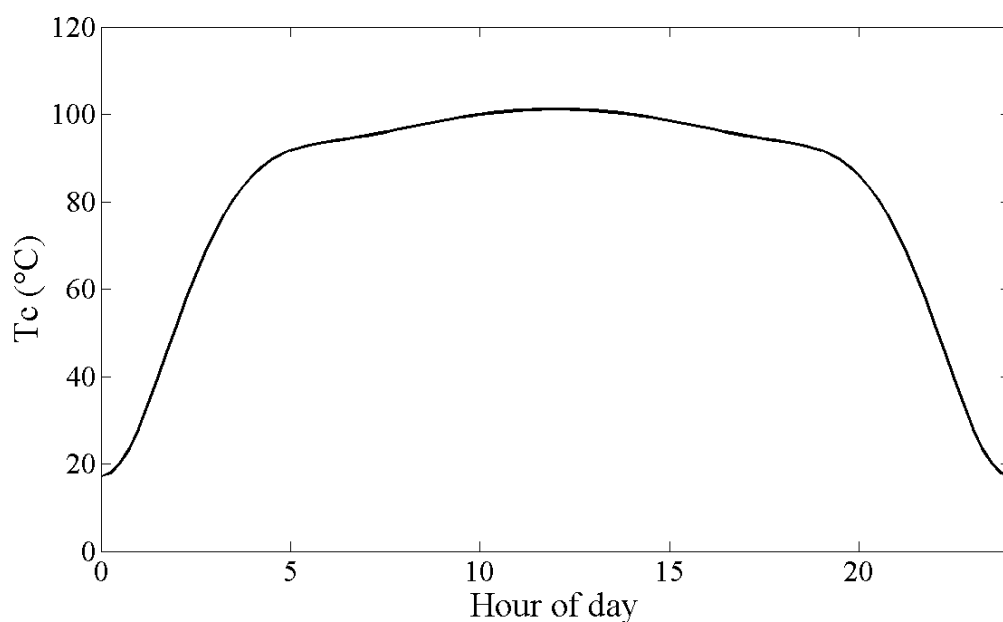
Jak je vidět na dalším obrázku (Obrázek 19), parametr popisující čistotu ovzduší nemá téměř žádný vliv na výpočty termálního ratingu. Rozdíl ve výsledných ampacitách mezi čistou a průmyslovou atmosférou se za předpokladu teploty vodiče 55 °C pohybuje kolem 45 A.



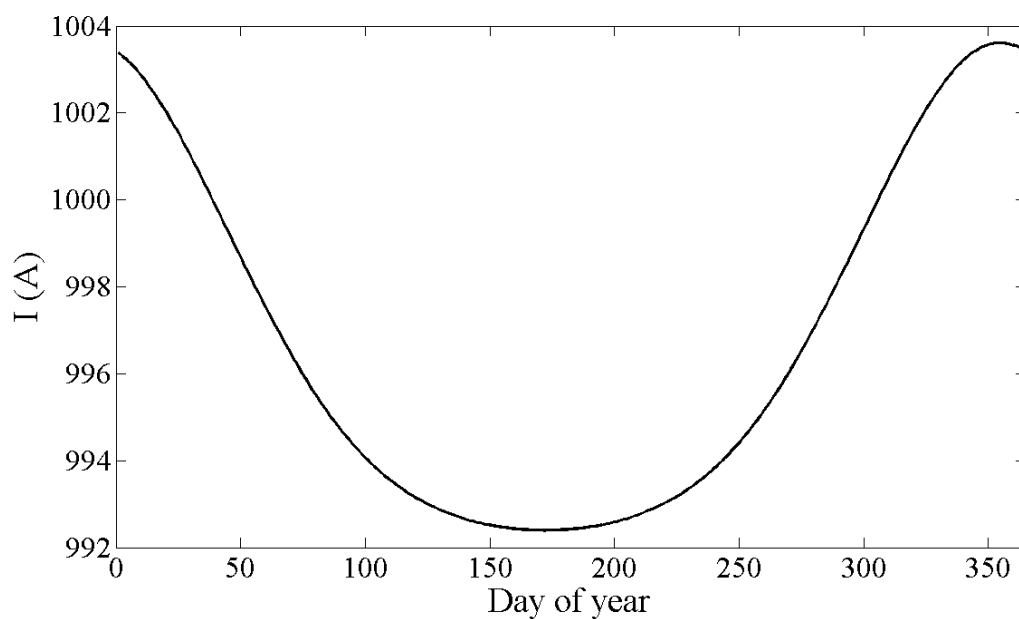
Obrázek 19 - Graf závislosti ampacity na teplotě vodiče a s rozdílným ovzduším

5.3.2.4 Parametry času

Zajímavý vztah lze nalézt mezi výstupními parametry a parametry času. Další grafy (Obrázek 20 a Obrázek 21) ukazují závislost na denním čase a dni v roce. První závislost odpovídá slunečnímu cyklu během dne, druhá odpovídá ročnímu slunečnímu cyklu. Nejvyšší hodnoty teploty vodiče se dají očekávat kolem poledne na začátku července. Naopak nejvyšší hodnoty ampacity by se měly vyskytovat kolem půlnoci v půlce prosince.



Obrázek 20 - Graf závislosti teploty vodiče na hodině dne



Obrázek 21 - Graf závislosti ampacity na dni v roce

5.4 Shrnutí výsledků

Výsledky této analýzy ukazují, že hodnoty vstupních parametrů mají přímý dopad na výsledky výpočtů. Z parametrů má největší vliv maximální povolená teplota vodiče, rychlost větru, denní hodina, průměr vodiče a okolní teplota. Přesnost hodnot některých vstupních parametrů je velice důležitá pro praktické využití dynamického termálního ratingu, protože i jejich malá odchylka může způsobit velké změny ve výsledcích. Například malá změna ve směru větru může způsobit značnou změnu v teplotě vodiče a případně způsobit přehřívání, zvláště pokud se jedná o kritickou část intervalu možných hodnot.

6 Další využití práce

V této kapitole je zmíněno jakým dalším způsobem byla tato práce využita a jaký je její plánovaný budoucí vývoj a případné využití.

6.1 Odborné články

V rámci SGS projektu byly na toto téma napsány dva odborné články, které byly i úspěšně odprezentovány na mezinárodních vědeckých konferencích. Oba články a příslušné konference jsou popsány níže.

6.1.1 CCECE 2013

CCECE je mezinárodní vědecká konference nesoucí název Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, která se v roce 2013 konala v Regině v Kanadě. Tématem článku byla citlivostní analýza pro výpočet ampacity a teploty vodiče. Ta byla vzhledem k omezení rozsahu článku zkrácena a v celém rozsahu je uvedena až v této práci v části 5. Článek dále obsahuje i teoretický základ zmíněných výpočtů, avšak pouze okrajově. Hlavní výsledky práce a z nich plynoucí závěry analýzy však zůstaly stejné. (Siler, a další, 2013)

6.1.2 EPE 2013

EPE je mezinárodní vědecká konference s názvem Electric Power Engineering, kterou v roce 2013 pořádala VŠB - Technická Univerzita Ostrava a která konala se v Koutech nad Desnou v České Republice. Tématem článku byla knihovna pro IEEE standard 738. Pro účely článku byla k dispozici pouze první verze knihovny popsána v části 2.1.1 společně s první verzí demo aplikace popsané v části 3.2.1. Součástí článku byl i teoretický popis výpočtů, na rozdíl od článku pro CCECE ale o něco podrobnější. Přesto však nekompletní, který se objevuje v této práci. Výsledek práce ale zůstal totožný, protože knihovna byla z výpočetního hlediska kompletní už v první verzi. (Siler, a další, 2013)

6.2 Další vývoj knihovny

Další vývoj knihovny je plánován v rámci SGS projektu. Jako nejdůležitější prvek, který je v plánu implementovat, jsou výpočty v přechodovém stavu (transient). Ty jsou výpočetně i implementačně složitější, proto nebyly zahrnuty do části SGS projektu a této práce. Společně s novými výpočty bude pravděpodobně potřeba vytvořit i nové uživatelské rozhraní, které bude odpovídat s nimi spojeným požadavkům.

V případě dostatečných prostředků by bylo možné implementovat také vytváření souborů se vstupními hodnotami přímo v programu. Například pomocí zadání intervalů hodnot a velikostí kroku pro příslušné proměnné nebo pomocí zadání celkového počtu výpočtů a intervalů pro jednotlivé proměnné. Takový soubor by se pak použil namísto vstupního souboru s dynamickými hodnotami. Další možností by bylo na základě definovaných intervalů a dalších parametrů vytvořit pouze výstupního souboru, který by obsahoval jak vstupní tak i výstupní hodnoty.

Dalším možným rozšířením by bylo vylepšení vykreslování výsledků do grafů. Bylo by možné přidat například možnost přiblížit konkrétní část grafu nebo vylepšit jeho celkový design.

6.3 Budoucí využití knihovny

Budoucí využití je v nejbližší době plánováno pouze na rozšiřování v rámci SGS projektu. Přesto však existuje vysoký potenciál využití knihovny v dalších výzkumných projektech a programech, které by na nich byly postavené. Knihovna je napsána v rozšířeném a perspektivním jazyce C#, je napsána přehledně a obsahuje dokumentaci. Proto nic nebrání ani jejímu rozšiřování, ani jejímu dalšímu využití. Vyloučeno není ani praktické použití knihovny nebo nějaké její budoucí verze při využívání dynamického termálního ratingu.

Závěr

Práce je zaměřena na problematiku neefektivního využívání přenosových linek elektrického vedení, konkrétně na metodu určení dynamického termálního ratingu. Tato metoda umožňuje efektivnější využití stávající elektrické sítě bez nutnosti její přestavby, která by byla nákladná a nesla s sebou i další problémy.

V teoretické části je detailně popsána metoda určení ampacity vodiče v ustáleném stavu společně s obecným popisem dalších souvisejících výpočtů, například výpočtu ampacity v přechodovém stavu.

V praktické části je důkladně popsána vytvořená knihovna včetně obecného popisu jejího vývoje. Součástí je také popis ukázkového programu, který slouží pro demonstraci funkčnosti knihovny. Stejně jako v případě knihovny je obecně popsán i jeho vývoj. Následuje srovnání výsledků knihovny a standardu na vzorovém příkladu, včetně rozboru a srovnání, na jejichž základě je definována i přesnost knihovny. Ta se jeví jako dostatečně přesná. Poslední částí je citlivostní analýza vstupních parametrů. Ta odhaluje kritické body ve výpočtu a ukazuje, které parametry musí být voleny s obzvláště vysokou přesností. Na druhé straně ukazuje také parametry, které nejsou příliš důležité a mohou být v případě nutnosti i odhadovány.

Závěr práce tvoří zmínka o dalším, minulém i budoucím, využití práce.

V příloze práce jsou pak další ukázky kódu ze všech částí práce, tedy z knihovny, programu a vedlejšího projektu, který není přímou součástí práce.

V příloženém CD jsou zdrojové kompletní kódy, obrázky grafů a elektronická verze práce.

S aktuální podobou práce jsem spokojen. Knihovna i ukázková aplikace jsou napsány jednoduše a čistě. Analýza knihovny i citlivostní analýza jsou provedeny důkladně. Výsledky práce dopadly dle očekávání.

Rezervy vidím v budoucím vývoji a rozšíření práce, hlavně výpočtů v přechodovém stavu. Ukázková aplikace by se dala v případě jejího širšího využívání také vylepšit, hlavně možnost zadávat i variabilní vstupní parametry namísto nutnosti použít vstupní soubor. Stejně tak zobrazování výsledků do grafů by se dalo vylepšit, především z hlediska designu. Dále by bylo možné provést důkladnější analýzu výsledků knihovny porovnáním s reálnými měřeními, nejlépe i v reálném čase.

Literatura

- American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. 1956.** *Heating, Ventilating and Air-Conditioning Guide*. New York : autor neznámý, 1956.
- Black, W. Z. a Bush, R. A. 1988.** Conductor Temperature Research. *EPRI Report EL 5707*. 1988.
- Black, W. Z. a Byrd, W. R. 1983.** Real-time ampacity model for overhead lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 7, 1983, Sv. PAS-102.
- Black, W. Z. a Rehberg, W. R. 1985.** Simplified model for steady-state and real-time ampacity of overhead conductors. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*. 104, 1985.
- Bracale, A., a další. 2007.** Probabilistic index for increasing hourly transmission line rating. *Int. Journal of Emerging Electric Power Systems*. 2007, Sv. 119.
- Carreras, B. A., a další. 2004.** Evidence for self-organized criticality in a time series of electric power system blackouts. *IEEE Transactions On Circuits And Systems*. 2004, Sv. 51, 9.
- Davis, M. W. 1978.** A new thermal rating approach: the real time thermal rating system for strategic overhead conductor transmission lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1978, Sv. PAS97.
- Douglass, D. A. a Edris, A. A. 2002.** Maximize use of existing route. *Transm. Dist. World*. [Online] 2002.
- Douglass, D. A. 1988.** Weather-dependent versus static thermal line ratings (power overhead lines). *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1988, Sv. 3, 2.
- Douglass, D. A., Kirkpatrick, L. A. a Rathbun, L. S. 1985.** AC resistance of ACSR-Magnetic and temperature effects. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 6, 1985, Sv. PAS-104.
- ECARCA.** Transmission Conductors Thermal Ratings. *Report by Transmission Advisory*.
- Foss, S. D. 1985.** Dynamic Thermal Line Ratings Phases C,D, & E. *Final Report No. EP81-6 to Empire State Electric Energy Research Corp*. 1985.
- Foss, S. D., Lin, S. H. a Fernandez, R. A. 1983.** Dynamic Thermal Line Ratings-Part 1-Dynamic ampacity rating algorithm. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. PAS-102, 1983, Sv. 6.
- Hall, J. F. a Deb, A. K. 1988.** Prediction of overhead transmission line ampacity by stochastic and deterministic models. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 1988, Sv. 3, 2.

- Heckenbergerova, J., a další. 2010.** *Identification of critical aging segments and hotspots of power transmission line.* Prague, Czech Republic : 9th International Conference of Environmental and Electrical Engineering, 2010.
- Heckenbergerova, J., Musilek, P. a Filimonenkov, K. 2011.** *Assessment of Seasonal Static Thermal Ratings of Overhead Transmission Conductors.* Detroit, MI, USA : IEEE PES GM, 2011.
- Hilpert, R. 1933.** *Warmeabgabe von geheizten Drahten und Rohren im Luftstrom.* *Forsch, Geb. Ingenieurw.* 5, 1933, Sv. 4.
- House, H. E. a Tuttle, P. D. 1958.** *Current carrying capacity of ACSR.* *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.* 1958.
- House, H. E., a další. 1963.** *Emissivity of Weathered Conductors after Service in Rural and Industrial Environments.* *AIEE Transactions.* 1963.
- IEEE Standard 738. 2006.** *Standard for calculating the current-temperature of bare overhead conductors.* 2006.
- McAdams, W. H. 1954.** *Heat Transmission. 3rd ed. New York: McGraw-Hill.* 1954.
- Morgan, V. T. 1978.** *The Current carrying capacities of overhead line conductors.* Los Angeles : IEEE/PES Summer Meeting, 1978.
- Musilek, P., Heckenbergerova, J. a Bhuiyan, M. M. I. 2012.** *Spatial Analysis of Thermal Aging of Overhead Transmission Conductors.* *IEEE Trans. on Power Delivery.* 2012, Sv. 27, 3.
- Mussen, G. A. 1966.** *The Calculation of Current Carrying Capacity of Overhead Conductors.* *Alcan Reseach and Developement Limited.* 1966.
- PA, NJ, and MD Interconnection. 1973.** *Determination of Bare Overhead Conductor Ratings.* *Conductor Rating Task Force.* 1973.
- Seppa, T. P. 2007.** *Reliability and real time transmission line rating.* Ridgefield, CT, USA : The Valley Group - A Nexans Company Tech. Rep., 2007.
- Schurig, O. R. a Frick, C. U. 1930.** *Heating and Current Carrying Capacity of Bare Conductor for Outdoor Service.* *General Electric Review.* 3, 1930, Sv. 33.
- Sight Reduction Tables for Air Navigators. HO pub. no. 249.** místo neznámé : U.S. Navy Hydrographic Office. Sv. II a III.
- Siler, M. a Heckenbergerova, J. 2013.** *IEEE Std. 738 Library for calculating the current-temperature of conductors.* Kouty nad Desnou, Czech Republic : EPE, 2013.

Siler, M., Heckenbergerova, J. a Musilek, P. 2013. *Sensitivity analysis of conductor current-temperature calculations*. Regina, Saskatchewan, Canada : CCECE, 2013.

Surface Observatories, Federal Meteorological Handbook No. 1. 1975. Washington, DC : autor neznámý, 1975.

Taylor, C. S. a House, H. E. 1956. Emissivity nad its effects on the current carrying capacity of stranded aluminum conductors. *AIEE Transactions*. 1956, Sv. 75.

The Aluminum Association. 1982. *Aluminum Electrical Conductor Handbook*. Washington, DC : autor neznámý, 1982.

Wong, T. Y., Findlay, J. A. a McMurtie, A. N. 1982. An On-Line Method for Transmission Ampacity Evaluation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 2, 1982, Sv. PAS-101.

Yellot, J. I. 1956. Power from Solar Energy. *ASME Transactions*. 6, 1956, Sv. 79.

Příloha A - CD

Přiložené CD obsahuje tuto práci v elektronické formě, kompletní softwarové řešení popsané v této práci, XML dokumentaci knihovny, jednoduchou textovou dokumentaci aplikace a všechny obrázky grafů citlivostní analýzy.

Příloha B - Ukázky zdrojového kódu knihovny

Ukázka zdrojového kódu jedné z veřejných metod knihovny

```
/// <summary>
/// Calculates maximum allowable electrical current of conductor in given
/// conditions.
/// </summary>
/// <param name="conductorTemperature">conductor temperature</param>
/// <param name="conductor">informations about conductor and its
/// location</param>
/// <param name="ambient">informations about ambient conditions</param>
/// <returns>returns maximum allowable electrical current (A) in given
/// conditions</returns>
public double CalculateConductorAmpacity(double conductorTemperature,
ConductorParameters conductor, AmbientConditions ambient)
{
    double conductorAmpacity = 0;
    double solarHeatGain = 0;
    double radiatedHeatLoss = 0;
    double convectionHeatLoss = 0;
    double conductorResistance = 0;

    solarHeatGain = helper.CalculateSolarHeatGain(conductor, ambient);

    radiatedHeatLoss = helper.CalculateRadiatedHeatLoss(
        conductorTemperature, conductor, ambient);

    convectionHeatLoss = helper.CalculateConvectionHeatLoss(
        conductorTemperature, conductor, ambient);

    conductorResistance = helper.CalculateResistanceAtDegree(
        conductorTemperature, conductor);

    conductorAmpacity = Math.Sqrt(
        (convectionHeatLoss + radiatedHeatLoss - solarHeatGain)
        / conductorResistance);

    return conductorAmpacity;
}
```

Příloha C - Ukázky zdrojového kódu demo aplikace

Ukázka metody pro generování cest a názvů souborů

```
public string ComposeResultFile(string fileName, CalculationType type)
{
    string path, file;
    string[] fileSplit;

    path = System.IO.Path.GetDirectoryName(fileName);
    file = System.IO.Path.GetFileName(fileName);
    fileSplit = file.Split('.');

    if (type == CalculationType.Ampacity)
    {
        return path + "\\\" + fileSplit[0] + "_out_I." + fileSplit[1];
    }
    else if (type == CalculationType.Temperature)
    {
        return path + "\\\" + fileSplit[0] + "_out_Tc." + fileSplit[1];
    }
    else if (type == CalculationType.Log)
    {
        return path + "\\\" + fileSplit[0] + "_error.txt";
    }
    else
    {
        throw new InvalidEnumArgumentException("type");
    }
}
```

Ukázka části metody pro získání hodnoty proměnné v textovém formátu

```
public string GetValue(string head)
{
    switch (head)
    {
        case "I":
            return ampacity.ToString(format);
        case "D":
            return conductor.Diameter.ToString(format);
        case "Tc":
            return conductorTemperature.ToString(format);
        case "Ta":
            return ambient.Temperature.ToString(format);
        case "Vw":
            return ambient.WindSpeed.ToString(format);
        case "Fi":
            return ambient.WindAngle.ToString(format);
        case "He":
            return conductor.Elevation.ToString(format);
        case "Eps":
            return conductor.Emissivity.ToString(format);
        case "Atm":
            return ((int)ambient.Atmosphere).ToString(format);
        case "Alfa":
            return conductor.Absorptivity.ToString(format);
    }
}
```