

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Simulace tepelného pole kabelu v závislosti na jeho
proudovém zatížení**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří VLČEK**
Osobní číslo: **E13B0296P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Simulace tepelného pole kabelu v závislosti na jeho proudovém zatížení**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Proveďte stručnou rešerši vlivů působících na kabely během jejich provozu.
2. Vytvořte model kabelu a simulujte tepelné zatížení v závislosti na různém způsobu uložení.
3. Zhodnoťte výsledky simulace s výpočty dle platných norem ČSN.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. Platné normy ČSN.
2. Míka, Stanislav, Příkryl, Petr a Brandner Marek. Speciální numerické metody: numerické metody řešení okrajových úloh pro diferenciální rovnice. 1. vyd. Plzeň: Vydavatelský servis, 2006, 305 s. Texty z aplikované matematiky. ISBN 80-86843-13-0.
3. Mayer, Daniel a Ulrych Bohuš. Základy numerického řešení elektrických a magnetických polí. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 205 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michal Čermák
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015
Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na seznámení s tepelnými vlastnostmi vodičů v závislosti na procházejícím proudu. Práce se dále zabývá rešerší platných ČSN zejména stanovením hodnot dovoleného proudu izolovaným vodičem či kabelem, tepelnými ztrátami v kabelech a jejich původem a to jak pro stejnosměrné, tak i střídavé obvody, vlastnostmi šíření tepelné energie, oteplování vodiče v souvislosti s různými typy zatížení, seznámení s programovým vybavením užívající metodu konečných prvků Agros2D a na závěr realizací praktických simulací a porovnání s výpočty dle platné ČSN.

Klíčová slova

Teplené pole kabelu, proudové zatížení, měrný odpor, přenos tepla, simulace, Agros2D, výpočty, metoda konečných prvků

Abstract

This bachelor's thesis is aimed to introduce thermal properties of cables depending on the permissible current load. It deals with summary of valid Czech national standards, especially determination of allowable current flowing through the insulated conductor or cable, heat losses in cables and their origin in DC and AC circuits, thermal energy diffusion, calculation of conductor heat flux related to different type of a current load, familiarization with the program Agros2D using finite element method and realization of practical simulations and comparison with calculations based on valid Czech national standards.

Key words

Thermal field of cable, current load, resistivity, heat transfer, simulation, Agros2D, calculations, finite elements method

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 28.5.2016

Jiří Vlček

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Čermákovi, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Firmě Kabex a.s. za poskytnutí informací o kabelových vodičích. Doc. Pavlu Karbanovi, Ph.D. za přínosné poznatky a odbornou konzultaci. Celému týmu vývojářů, který se podílel na realizaci softwaru Agros2D a na závěr děkuji své rodině za podporu během mého studia na vysoké škole.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
1 DIMENZOVÁNÍ ELEKTRICKÉHO VEDENÍ	12
1.1 DIMENZOVÁNÍ PODLE DOVOLENÉHO OTEPLENÍ VODIČE.....	12
1.1.1 Dovolená provozní teplota.....	13
1.1.2 Dovolený proud vodiče.....	13
1.2 METODY PRO STANOVENÍ DOVOLENÝCH PROUDŮ.....	14
1.3 REŠERŠE PLATNÝCH ČSN 33 2000-5-523 DOVOLENÉ PROUDY[2].....	15
1.3.1 Účel a princip.....	15
1.3.2 Referenční hodnoty tabulek vycházejících z normy ČSN 33 2000-5-523:.....	15
1.3.3 Seskupení obsahující více než jeden obvod.....	16
1.3.4 Počet zatížených vodičů, střední a ochranný vodič.....	18
1.3.5 Paralelní vodiče.....	19
1.3.6 Změny podmínek odvodu tepla na trase.....	19
2 TEPELNÉ A ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI KABELŮ	19
2.1 JOULEOVO TEPLA A PŘÍKON.....	19
2.2 ODPOROVÉ VLASTNOSTI VODIČE.....	20
2.3 MĚRNÝ ODPOR VODIČE PRO STEJNOSMĚRNÉ OBVODY.....	21
2.4 MĚRNÝ ELEKTRICKÝ ODPOR VE STRÍDAVÝCH OBVODECH.....	22
2.4.1 Povrchový jev – Skinefekt.....	23
2.4.2 Jev blízkosti.....	26
2.5 ZPŮSOBY PŘENOSU TEPLA.....	27
2.5.1 Přenos tepla vedením (kondukcí).....	27
2.5.2 Prouděním (konvekcí).....	28
2.5.3 Přenos tepla zářením (radiací).....	28
2.6 OTEPLENÍ A OCHLAZOVÁNÍ VODIČE.....	29
2.6.1 Oteplení vodiče v závislosti na ustáleném proudu.....	29
2.6.2 Ochlazování vodiče.....	31
2.6.3 Přerušovaný chod.....	32
3 SIMULACE TEPELNÝCH POLÍ	33
3.1 ÚVOD.....	33
3.2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ.....	33
3.3 AGROS2D.....	34
3.3.1 Preprocesor.....	34
3.3.2 Procesor a řešení.....	34
3.3.3 Postprocesor.....	35
3.4 SEZNÁMENÍ SE SIMULOVANÝM KABELEM.....	35
3.4.1 Značení a popis.....	35
3.4.2 Rozměry.....	36
3.4.3 Materiály a vlastnosti půdy.....	36
3.5 ÚVOD K PRAKTICKÝM SIMULACÍM.....	37
3.6 SIMULACE OTEPLENÍ KABELU V ZÁVISLOSTI NA PROUDOVÉM ZATÍŽENÍ.....	37
3.7 SIMULACE OTEPLENÍ KABELU V ZÁVISLOSTI NA RŮZNÝCH PARAMETRECH PŮDY.....	39
3.8 SIMULACE OTEPLENÍ KABELU V ZÁVISLOSTI NA GEOMETRICKÉM USPOŘÁDÁNÍ.....	40
3.9 SIMULACE OTEPLENÍ KABELU V PŘÍPÁDECH KDY DOCHÁZÍ K PŘESAHU ROZSAHU ČSN.....	43
ZÁVĚR	45
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	47
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratk

α	součinitel teplotní roztažnosti	K^{-1}
B	konstanta	-
c	měrné teplo vodiče	$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$
ČSN	české státní normy	
d	průměr	mm
δ	hloubka vniku	mm
ε	emisivita	-
f	frekvence	Hz
γ	Elektrická vodivost	S
I	elektrický proud	A
I_{dov}	dovolený proud	A
I_N	jmenovitý proud	A
$i(t)$	okamžitá hodnota proudu	A
J	proudová hustota	A/m^2
K	konstanta	-
k_s	činitel povrchového zhuštění proudu	-
k_p	činitel jevu blízkosti	-
$k_1, k_2, až k_i$	přepočítací součinitele	-
l	délka	m
λ	tepelná vodivost	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
MKP	metoda konečných prvků	
μ	permeabilita	H/m
μ_0	permeabilita vakua	H/m
μ_r	relativní permeabilita	-
N	střední vodič	
ω	úhlová rychlost	rad/s
P	výkon	W
PE	ochranný vodič	
PEN	funkce ochranného a středního vodiče sloučená	
$p(t)$	okamžitá hodnota výkonu	W
Q	tepelná práce	J

q	okamžitá hodnota náboje	C
q	hustota tepelného toku	W.m ²
r	poloměr vodiče	mm
R	elektrický odpor	Ω
R_{AC}	odpor střídavého obvodu	Ω
R_{DC}	odpor stejnosměrného obvodu	Ω
ρ	měrný odpor	$\Omega.m$
ρ	hustota	kg/m ³
S	plocha	m ²
S_p	povrch vodiče	m ²
σ	Stefanova-Boltzmannova konstanta	W.m ⁻² .K ⁻⁴
t	čas	s
T	tepelný odpor	m ² .K/W
T	termodynamická teplota	K
τ	časová konstanta	s
V	objem	m ³
W	Práce	J
γ_s	činitel skin efektu	-
γ_p	činitel efektu přiblížení	-

Úvod

Nedílnou součástí distribuce elektrické energie je její vedení, které se realizuje v nízko napěťových hladinách hlavně kabelovým rozvodem. Kabely jsou tvořeny z vodičů, jejichž účel je vést elektrický proud a izolantů, které slouží k udržení rozdílu potenciálů mezi vodivým jádrem a okolním prostředím. Protože jsou vodiče nedokonalé, mají malý vnitřní odpor a tím na nich vznikají tepelné ztráty. S těmi je nutno počítat při dimenzování, protože jejich vlivem může dojít k poškození izolační vlastností materiálů.

Předkládaná bakalářská práce se zabývá simulacemi tepelného pole kabelu v závislosti na jeho proudovém zatížení. Pro lepší porozumění dané problematice, je práce fundamentálně rozčleněna na jednotlivé na sebe navazující kapitoly, s jejichž obsahem nás seznámí v dalších odstavcích.

Na začátku, práce popisuje dimenzování elektrického vedení a definuje základní pojmy jako dovolený proud a nejvyšší provozní teplota. Dále obsahuje rešerši platných ČSN pro stanovení dovolených proudů kabelů a izolovaných vodičů.

Druhá kapitola shrnuje poznatky o ztrátách ve vodičích, odporových vlastnostech stejnosměrných a střídavých obvodů a druhy přenosů tepla a jejich podíl na výměně. Celou kapitolu završuje odvození výpočtu tepelných změn kabelu.

Třetí cílová část bakalářské práce seznamuje se simulovaným kabelem, metodou konečných prvků a softwarem Agros2D, ve kterém je provedena realizace simulace tepelného pole kabelu v závislosti na proudovém zatížení, vlastnostech půdy, geometrickém uspořádání a následně dojde k využití nabitých znalostí ke stanovení dovolených proudů pro uložení, které přesahuje rozsah ČSN. Pod každou z uvedených částí simulovaných úloh, následuje krátké zhodnocení výsledků, jejich porovnání s výpočty dle platných ČSN 2000-5-523 a vyvození celkového závěru.

1 Dimenzování elektrického vedení

Elektrická vedení jsou důležitou součástí každého elektrického zařízení a mají za úkol rozvést elektrickou energii od výrobce ke spotřebiteli. Jednotlivé průřezy pro provozní účely volíme, tak aby vyhovovala různým často protichůdným kritériím, přičemž za nejdůležitější pro provozní účely jsou stanoveny následující:

- a) provozní teplota musí být v dovořených mezích podle platných ČSN,
- b) průřezy vodičů musí být v hospodárně navrženy,
- c) vodiče musí vydržet mechanické namáhání,
- d) úbytek napětí musí být v daných mezích,
- e) schopnost odolat dynamickým a tepelným účinkům zkratových proudů,
- f) a spolehlivou funkci ochrany před úrazem elektrickým proudem.[1]

Účel této bakalářské práce je seznámit s tepelnými vlastnostmi kabelu vyvolanými proudovými účinky, proto se dále budeme zabývat pouze dimenzováním podle dovoleného oteplení vodiče.

1.1 Dimenzování podle dovoleného oteplení vodiče

Dimenzuje se z důvodu zajištění dostatečně dlouhé doby života vodičů a izolace podléhajícím dlouhodobým tepelným účinkům procházejících proudů za normálního provozu.[2]

Respektive každý vodič musí mít schopnost trvale přenášet jmenovité proudové zatížení tak, aby nedocházelo k jeho nadměrnému oteplení. Oteplení, jak bude zmíněno podrobněji v dalších kapitolách, vzniká vlivem Jouleových ztrát průchodem elektrického proudu nedokonale vodivou drahou s tím, že odpovídající teplota vodiče se ustálí na hodnotě, kdy vzniklé Jouleovo teplo se rovná teplu odvedenému. Lze to popsat vztahem:

$$P = R \cdot I^2 = \frac{\Delta\theta_{dov}}{T} \quad (1.1)$$

Kde	P	ztrátový výkon (W);
	R	elektrický odpor (Ω);
	I	elektrický proud (A);
	$\Delta\theta_{dov}$	dovolené oteplení ($^{\circ}\text{C}$);
	T	tepelný odpor ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$).[3]

Tepelný odpor udává schopnost materiálu působit proti pronikání tepla. Je analogií elektrického odporu a platí, že čím větší tepelný odpor, tím pomalejší je prostup tepla

materiálem a naopak. Mnoho kabelů je složených z různých materiálů vrstvených na sebe v takovém případě se odpory jednotlivých vrstev sčítají obdobně jako odpor elektrický.[1][3]

$$\Delta\vartheta_{dov} = \vartheta_{dov} - \vartheta_0 \quad (1.2)$$

Kde ϑ_{dov} je trvalá dovolená provozní teplota (°C);
 ϑ_0 teplota okolí (°C).

1.1.1 Dovolená provozní teplota

Dovolená trvalá provozní teplota kabelu se určuje podle materiálu izolace z příslušných tabulek ČSN (více v kapitole o ČSN 33 2000-5-523), pro normální dlouhodobý provoz a udává hodnotu teploty při, jejímž překročení dochází ke změnám izolačních vlastností materiálu.

Například při běžném trvalém provozu, kde dochází k vyššímu zatížení kabelů, než je dovoleno má izolace tendenci rychleji stárnout a tím zkracovat svoji životnost. Proto musí platit:

$$\vartheta \leq \vartheta_{dov} \quad (1.3)$$

Kde ϑ provozní teplota kabelu (°C).

Analogií vztahu (1.3) jsou pro jednotlivé teploty ekvivalentní proudy.

$$I \leq I_{dov} \quad (1.4)$$

Kde I provozní proud kabelu (A);

I_{dov} dovolený proud (A).

Přičemž dovolený proud, který vyvolá dovolené provozní oteplení vodiče, lze určit ze vztahu:

$$I_{dov} = \sqrt{\frac{\Delta\vartheta_{dov}}{\rho \cdot T}} \quad (1.5)$$

Z předchozích odstavců můžeme logicky odvodit, že návrh průřezu pro dovolená oteplení vodiče závisí na více faktorech a to zejména na:

- konstrukci a materiálu vodiče
- druhu provozu
- uložení
- teplotě okolí
- prostředí[1]

1.1.2 Dovolený proud vodiče

Udává hodnotu proudu, kterým lze dlouhodobě při normálním provozu 100% zatížit

kabel, aniž by došlo k překročení nejvyšší dovolené provozní teploty izolace. [2]

Dovolený proud nebo také jmenovitou proudovou zatížitelnost uvádí každý výrobce pro uložení na vzduchu s uvažovanou teplotou 30 °C. Jak již bylo zmíněno, kromě protékajícího proudu mají na oteplení vliv i další faktory jako teplota okolí a možnosti odvádět teplo z povrchu kabelu, které závisí na uložení vedení. Abychom získali dovolený proud pro jiné, nežli referenční uložení kabelu musíme příslušný jmenovitý proud upravit přepočítacími součiniteli uvedených v příslušných tabulkách ČSN. Výpočet vypadá takto:

$$I_{dov} = I_N \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_i \quad (1.6)$$

Kde

I_N je jmenovitý zatěžovací proud udaný výrobcem (viz předchozí odstavec) v (A);
 k_1, k_2 , až k_i jednotlivé přepočítací součinitele určující reálnou hodnotu zatížení (-).[3]

1.2 Metody pro stanovení dovolených proudů

Dovolené proudy lze určit následujícími způsoby:

- Podle tabulek a kritérií stanovených v ČSN 33 2000-5-523,
- způsoby popsaných v IEC 60287,
- na základě zkoušky,
- výpočtem podle potvrzené a uznané metody. [2]

Znaky a rozdíly mezi ČSN 33 2000-5-523 a IEC 60287

Následující kapitoly se zabývají a shrnují určování dovoleného proudu podle ČSN 33 2000-5-523 a IEC 60287. Hlavní znaky a rozdíly budou shrnuty v následujících odstavcích.

ČSN 33 2000-5-523 se zabývá především instalacemi v budovách a jejich okolí.

Vychází z užšího seznamu zvolených budovních instalací a normou uznaných referenčních hodnot určených pro naši zeměpisnou šířku. Doslovný rozsah platnosti této normy je udáván pouze pro kabely bez pancíře a izolované vodiče, jejichž jmenovité napětí nepřekročí 1kV střídavého nebo 1,5 kV stejnosměrného napětí. Dále se vyznačují především rychlostí pro stanovení dovoleného proudu z jednoduchých tabulek, které upravují přepočítací součinitel. Avšak protože je norma vystavená především pro instalace v budovách a jejich okolí, dochází poměrně často k přesazení rozsahu jejich platnosti. Mnohdy se norma sama, pro určité situace odkazuje na výpočetní metody dle IEC 60287, jejichž rozsah je mnohem širší. [2]

Použití IEC 60287 je vhodné například v případech, kdy dochází k oteplení vodiče vlivem slunečního či infračerveného záření, či v situaci, kdy je potřeba určit přesnější hodnoty

tepelného odporu půdy na základě průzkumu okolí vodiče, anebo určit hodnoty dovoleného proudu pro vodiče s pancířem.[5]

1.3 Rešerše platných ČSN 33 2000-5-523 dovolené proudy[2]

„Platí pouze pro kabely bez pancíře a izolované vodiče, jejichž jmenovité napětí nepřesahuje 1kV střídavého nebo 1,5kV stejnosměrného napětí.“[2]

1.3.1 Účel a princip

Norma je určená k zajištění dostatečně dlouhé živostnosti vodičů a izolace a proto se musí se dimenzovat podle tepelných účinků jmenovitých proudů vedených po dlouhá časová období v normálním provozní stavu.

Za normálního dlouhodobého provozu nesmí tepelné účinky zatěžovacího proudu, přesáhnout nejvyšší dovolenou provozní teplotu uvedenou pro různé materiály v tabulce 52-A (viz tab. 1.1) této normy.

Tab. 1.1 – Tabulka 52-A – Nejvyšší provozní teploty pro různé druhy izolací.[2]

Typ izolace	Nejvyšší dovolená provozní teplota (viz poznámka 1) °C
Polyvinylchlorid (PVC)	70 vodič
Zesítný polyetylén (XLPE) a etylén propylén (EPR)	90 vodič
Minerální (s PVC pláštěm nebo bez pláště ale přístupný dotyku)	70 plášť
Minerální (bez pláště nepřístupný dotyku a bez styku s hořlavými látkami)	105 plášť (viz poznámku 2)

Tato podmínka se považuje za splněnou, pokud zatěžovací proud kabelů a izolovaných vodičů nepřesáhne odpovídající hodnoty z tabulek této normy 52-B1, 52-B2 a 52-C1 až 52-C12, které upravíme podle příslušných korekčních součinitelů z tabulek 52-D1 až 52-D3 a 52-E1 až 52-E5.[2]

1.3.2 Referenční hodnoty tabulek vycházejících z normy ČSN 33 2000-5-523:

Teplota okolí pro uložení kabelů nebo izolovaných vodičů:

- v zemi: 20°C;
- ve vzduchu: 30°C.

Pro odlišné referenční hodnoty se musí použít přepočítací součinitele z tabulek 52-D1 a 52-D2.

Podmínka se nemusí dodržet pro kabely v zemi, pokud dochází k překročení teploty

půdy 25°C jen na pár týdnů v roce. Dále platí, že pokud jsou kabely či izolované vodiče vystaveny infračervenému nebo slunečnímu záření není s těmito přírůstků teplot v tabulkách 52-D1 a 52-D2 uvažováno.

Tepelný odpor půdy pro uložení v zemi:

- celosvětově uznávaná hodnota 2,5 K.m.W⁻¹

Udává schopnost materiálu odvádět vzniklé teplo z okolí vodiče.

Pro vyšší než referenční hodnoty se musí použít přepočítací součinitele z tabulky 52-D3 pro snížení dovoleného proudu vodiče, nebo lze půdu obklopující kabely nahradit odlišným materiálem s požadovanými vlastnostmi.[2]

1.3.3 Seskupení obsahující více než jeden obvod

Snižující součinitele zabývající se problematikou seskupení najdeme v tabulkách 52-E1 až 52-E5, pro různé druhy uložení, kde upravují hodnoty dovolených proudů z tabulek 52-C1 až 52-C2. Součinitele lze uplatnit pouze na seskupení kabelů nebo izolovaných vodičů se stejnou maximální provozní teplotou.

Pro seskupení s různými maximálními teplotami se určuje dovolený proud podle nejnižší nejvyšší dovolené provozní teploty s korekčním činitelem pro dané seskupení.

Pokud kabel v provozních podmínkách vede méně než 30% jeho maximálního proudového zatížení, lze ho vynechat z určování redukčního součinitele pro seskupení.[2]

Způsoby uložení podle tabulky 52-B1

Podle norem existuje sedm referenčních způsobů uložení kabelů a izolovaných vodičů tyto označených abecedně A až G, jenž jsou shrnuty v tabulkách 52-B1 (viz Tab. 1.2) s odkazem na příslušně korekční součinitele. Pro tato referenční uložení byly stanoveny dovolené proudy výpočtem nebo zkouškou.[2]

Referenční způsob uložení A až D

Dovolené proudy a jejich hodnoty bereme z tabulek 52-C1 až 52-C12 a jsou určený pro obvody s následujícím počtem vodičů:











- **dva izolované vodiče nebo jednožilové kabely nebo jeden dvoužilový kabel;**
- **tři izolované vodiče nebo tři jednožilové kabely nebo jeden třížilový kabel.**[2]

Pokud se nachází v seskupení odlišný počet vodičů, je nutné použít přepočítací součinitele z tabulek 52-E1 až 52-E3.[2]

Referenční způsob uložení E a F

Zabývá se uložení na kabelových lávkách, hácích a podobných konstrukcích. Dovolené proudy pro tato uložení z tabulek 52-C7 až 52-C12 se musí násobit jak v případě jednoduchých obvodů, tak i seskupení příslušnými korekčními součiniteli z tabulek 52-E4 a 52-E5. [2]

Tab. 1.2 – Tabulka 52-B1 – Přehled referenčních způsobů uložení[2]

Referenční způsoby uložení		Tabulky a sloupce							Součinitel okolní teploty	Redukční součinitel seskupení
		Dovolené proudy jednotlivých obvodů					Počet žil	1, 2 a 3		
		Izolace z PVC		Izolace z XLPE/EPR		minerální izolace				
		2	3	2	3	1, 2 a 3				
1	2	3	4	5	6	7	8	9		
	Místnost Izolované vodiče v trubce v tepelně izolační stěně	A1	52-C1 sl. 2	52-C3 sl. 2	52-C2 sl. 2	52-C4 sl. 2	-	52-D1	52-E1	
	Místnost Vícežilové kabely v trubce v tepelně izolační stěně	A2	52-C1 sl. 3	52-C3 sl. 3	52-C2 sl. 3	52-C4 sl. 3	-	52-D1	52-E1	
	Izolované vodiče v trubce na dřevěné stěně	B1	52-C1 sl. 4	52-C3 sl. 4	52-C2 sl. 4	52-C4 sl. 4	-	52-D1	52-E1	
	Vícežilové kabely v trubce na dřevěné stěně	B2	52-C1 sl. 5	52-C3 sl. 5	52-C2 sl. 5	52-C4 sl. 5	-	52-D1	52-E1	
	Jednožilové nebo vícežilové kabely na dřevěné stěně	C	52-C1 sl. 6	52-C3 sl. 6	52-C2 sl. 6	52-C4 sl. 6	70 °C plášť 52-C5 105 °C plášť 52-C6	52-D1	52-E1	
	Vícežilové kabely v trubkách v zemi	D	52-C1 sl. 7	52-C3 sl. 7	52-C2 sl. 7	52-C4 sl. 7	-	52-D2	52-E3	
	Vícežilové kabely na vzduchu	E	Měď 52-C9 Hliník 52-C10	Měď 52-C11 Hliník 52-C12	Měď 52-C11 Hliník 52-C12	Měď 52-C11 Hliník 52-C12	70 °C plášť 52-C7 105 °C plášť 52-C8	52-D1	52-E1	
	Jednožilové dotýkající se kabely na vzduchu	F	Měď 52-C9 Hliník 52-C10	Měď 52-C11 Hliník 52-C12	Měď 52-C11 Hliník 52-C12	Měď 52-C11 Hliník 52-C12	70 °C plášť 52-C7 105 °C plášť 52-C8	52-D1	52-E1	
	Vzdálenost od zdi není menší než 0,3násobek průměru kabelu									
	Vzdálenost od zdi není menší než 0,3násobek průměru kabelu									

Seskupení s různými průřezy

Za takové seskupení se rozumí skupina jednotlivých vodičů obsahující průřezy, větší než jsou tři po sobě jdoucí normalizované hodnoty. Proto nelze uplatnit součinitele seskupení uvedených touto normou a lze je pouze využít na skupiny podobných a stejně zatěžovaných kabelů, protože jsou závislé na jejich celkovém počtu a promíšení průřezů. Pro seskupení s různými průřezy tedy, nelze vytvořit obecné tabulky přepočítacích součinitelů, a proto musí být stanoveny pro každou takovou skupinu zvlášť. Bohužel problematika výpočtových metod přesahuje rozsah platnosti popisovaných norem.

Pro seskupení v elektroinstalačních a protahovacích kanálech a elektroinstalačních trubkách se určuje, kvůli bezpečnosti redukční součinitel, jenž se rovná:

$$F = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (1.7)$$

Kde F redukční součinitel seskupení;

n počet vícežilových kabelů nebo obvodů v seskupení.

Činitel vycházející z uvedené rovnice omezí u malých průřezů možnost přetížení, ale zároveň hrozí, že velké průřezy v seskupení, nebudou plně využity, proto není výhodné klást kabely různých průřezů do jednoho seskupení, a je výhodnější stanovit výpočtem přesnější hodnotu redukčního součinitele pro danou skupinu.[2]

1.3.4 Počet zatížených vodičů, střední a ochranný vodič

Počet zatížených vodičů je takový, kterým teče zatěžovací proud.

U vícefázových vodičů vedoucí vyvážené proudy bez vyšších harmonických, lze střední vodič N pro určování dovoleného proudu zanedbat. Pokud je střední vodič v takovém obvodu protékán proudem vlivem nevyváženého vícefázového obvodu, není nutné mít obavy o zvýšení teploty kabelu, protože oteplení na středním vodiči se kompenzuje, snížením proudového zatížení vodičů fázových. Pro tuto aplikaci je nutné střední vodič dimenzovat podle nejvyššího dovoleného proudu fázových vodičů.

Jestliže střední vodič je zatěžován proudem, který neodpovídá snížení ve fázových vodičích, může být příčinou výskyt vyšších harmonických proudů třífázových obvodů, proto se s ním musí počítat pro určení oteplení vodiče a zároveň jeho průřez nesmí být menší než vodičů fázových. Touto problematikou se ještě budeme zabývat v kapitole účinky harmonických proudů na vyvážené trojfázové síti.

S ochrannými vodiči PE se pro stanovení hodnot neuvažuje. Pro vodič PEN plnící jak funkci středního a ochranného vodiče platí stejná pravidla jako pro střední vodič N .

Redukčními součiniteli pro vyšší harmonické proudy se zabývá příloha C.[2]

1.3.5 Paralelní vodiče

Paralelními vodiči se rozumí dva či více vodičů napájených paralelně z jedné fáze. Musí vyhovovat podmínce, že musí být přijata patřičná opatření, která způsobí, že zatěžovací proud se rovnoměrně rozdělí mezi vodiči, a nebože vlivem zatěžovacího proudu nedojde k překročení maximální provozní teploty vodiče.[2]

1.3.6 Změny podmínek odvodu tepla na trase

Pokud v různých místech vedení dochází ke změnám podmínek pro ochlazování instalace, musí se dovolený proud určit podle části s nejobtížnějším odvodem tepla.[2]

2 Tepelné a elektrické vlastnosti kabelů

2.1 Jouleovo teplo a příkon

Využívá se v tepelných elektrických spotřebičích, v jiných aplikacích např. ve vedení elektrického proudu je nežádoucí, protože dochází při přenosu ke ztrátě elektrické energie a vlivem vyvinutého tepla může dojít k poškození elektrického přístroje, zejména jeho izolačních vlastností.[6]

Princip a vztahy

Při průtoku proudu vodičem vznikají na jeho odporové dráze činné tepelné ztráty, které lze popsat obecným vztahem:

$$dQ = i^2 \cdot R \cdot dt \quad (2.1)$$

Pokud se jedná o stejnosměrný (stacionární) proud Joulovy ztráty odpovídají vztahu:

$$Q = I^2 \cdot R_{DC} \cdot t \quad (2.2)$$

Při průchodu střídavým (nestacionárním) efektivním proudem, odporem ve střídavém odporu za změnu času se Joulovy ztráty rovnají:

$$dQ = i(t)^2 \cdot R_{AC} \cdot dt \quad (2.3)$$

Pro střídavý harmonický proud:

$$Q = \int_0^t i(t)^2 \cdot R_{AC} \cdot dt \quad (2.4)$$

Kde Q je tepelná práce (J);
 i(t) okamžitý elektrický proud (A);
 I stejnosměrný proud (A);
 R_{AC} odpor (Ω);
 t čas (s).

Za normálního stavu prochází ve většině elektrických vedením zatěžovací provozní proud s průmyslovým kmitočtem (50Hz), ale může dojít i k případům tzv. krátkodobě zvýšených proudů (nadproudy, zkratové proudy atp.). Všechny tyto proudy při průchodu vodičem generují tzv. Jouleovy tepelné ztráty a ty vznikají v důsledku činného odporu proudové dráhy.[6][7]

Elektrický výkon

Obecně se elektrický výkon udává jako práce za čas. Výkon, lze vyjádřit jako přenos elektrického náboje mezi dvěma místy s různým potenciálem.[8]

$$p(t) = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u(t) \cdot i(t) = R \cdot i^2 \quad (2.5)$$

Kde p je okamžitý elektrický výkon (W);
 W elektrická práce (J);
 q elektrický náboj (C).

2.2 Odporové vlastnosti vodiče

Udává schopnost vodiče vést elektrický proud. Jeho hodnota je závislá na materiálu, tvaru resp. průřezu a délce vodiče a lze jej stanovit ze vztahu (2.6).

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.7)$$

Kde R_{DC} je odpor vodiče (Ω);
 l délka vodiče (m);
 ρ měrný elektrický odpor ($\Omega \cdot m$);
 S průřez vodiče (mm^2).

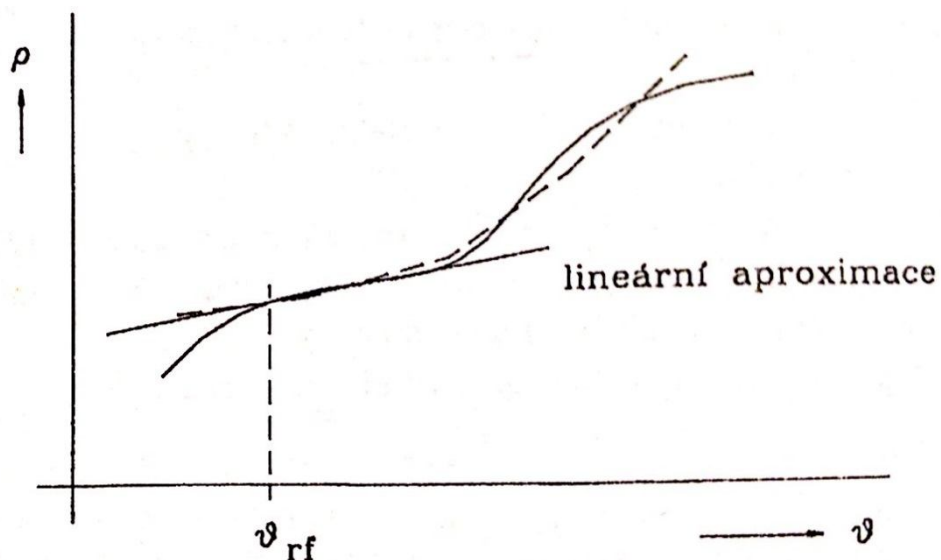
Elektrická vedení mají proměnnou délku svých vodičů, a proto se v energetické praxi používá měrný elektrický odpor, který je uvedený na jeden kilometr délky vodiče. Odpor pro dané vedení se poté stanoví násobením měrného odporu a jeho délky. Uvedenou problematikou se budou zabývat následující kapitoly.[12]

2.3 Měrný odpor vodiče pro stejnosměrné obvody

Udává schopnost materiálu klást odpor při průchodu elektrického proudu na jednotkovou délku. V tabulkách je často určený jako konstantní parametr vodiče pro zvolenou referenční teplotu $20^\circ C$. Jeho průběh je však nelineárně závislý na širokém rozsahu teplot (Obr. 2.1 a vztah (2.8)).

$$\rho = \rho(\vartheta) \quad (2.8)$$

Kde ϑ je teplota ($^\circ C$).



Obr. 2.1 – Nelineární průběh měrného odporu v závislosti na teplotě[7]

Pro kovy platí, že se zvyšující se teplotou roste i měrný odpor vodiče a lze jeho závislost na teplotě lze aproximovat lineární řadou (2.9).

$$\rho = \rho_{ref}(1 + \alpha_1\Delta\vartheta + \alpha_2\Delta\vartheta^2 + \alpha_3\Delta\vartheta^3 + \dots) \quad (2.9)$$

Kde α je teplotní součinitel rezistivity (K^{-1});

$\Delta\vartheta$ rozmezí teplot ($^{\circ}C$), které se určí podle

$$\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_{ref} \quad (2.10)$$

V elektrotechnické praxi se zpravidla setkáváme s užším rozsahem provozních teplot vodičů, řádově několik desítek stupňů Celsia (referenční hodnota bývá pro tyto aplikace $20^{\circ}C$) a proto lze ze vztahu (2.9) zanedbat řády vyšší lineární aproximace. A kombinací (2.9) a (2.10) dostaneme (2.11).

$$\rho_{DC} = \rho_{ref}(1 + \alpha_1(\vartheta - 20)) \quad (2.11)$$

Převrácená hodnota měrného odporu se nazývá měrná vodivost neboli konduktivita a udává schopnost vodiče vést elektrický proud.[7][12]

Tab. 2.1 – Tabulka měrných odporů a teplotních součinitelů pro měď a hliník [7]

Kov	Cu	Al
ρ [$\Omega.m$]	$17,86.10^{-9}$	$23,4.10^{-9}$
α [K^{-1}]	$4,1.10^{-3}$	$4,2.10^{-3}$
$\Delta\vartheta$ [$^{\circ}C$]	20-500	20-400

2.4 Měrný elektrický odpor ve střídavých obvodech

V harmonických obvodech dochází vlivem kmity k nerovnoměrnému rozložení proudové hustoty v průřezu vodiče. Vytlačování je způsobené proměnným magnetickým polem, které zvyšuje odpor jádra vodiče oproti stejnému obvodu protékanému stejnosměrným proudem. Tento jev se nazývá povrchový jev nebo také skin efekt a pro výpočet odporu se stanovuje tzv. činitel povrchového zhuštění, popřípadě činitel skin efektu.[9]

V obvodech kde leží dva a více paralelních vodičů vzniká i tzv. jev přiblížení. Který vzniká na stejném principu jako povrchový jev – vlivem proměnného magnetického pole vodiče. A je nutné s ním počítat při stanovení elektrického odporu jádra. Pro stanovení odporu vodiče se určuje i tzv. činitel jevu blízkosti.[7]

Pro stanovení měrného elektrického odporu tedy platí vztah (2.12).

$$\rho_{AC} = k_s \cdot k_b \cdot \rho_{DC} \quad (2.12)$$

Kde ρ_{AC} je měrný odpor střídavého obvodu ($\Omega \cdot m$);
 k_s činitel povrchového zhuštění proudu (-);
 k_p činitel jevu blízkosti (-);
 ρ_{DC} měrný odpor stejnosměrného obvodu, viz předchozí kapitola ($\Omega \cdot m$).[7]

Nebo podle ČSN IEC 287-1-1

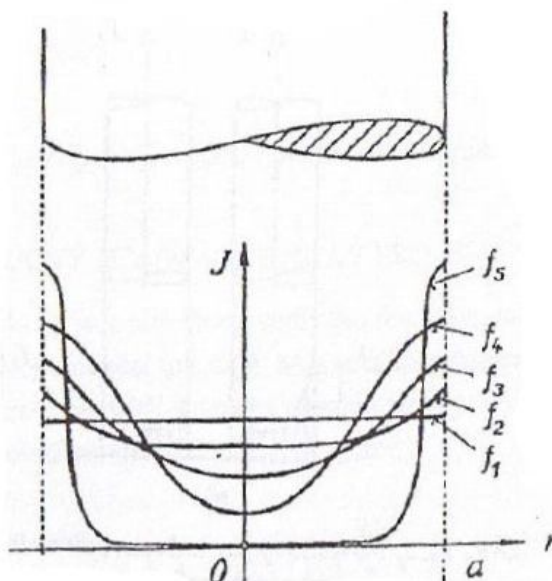
$$\rho_{AC} = \rho_{DC}(1 + y_s + y_p) \quad (2.13)$$

Kde y_s je činitel skin efektu (-), jeho výpočet se modifikuje podle konstrukčních parametrů kabelu;
 y_p činitel efektu přiblížení (-), obdobně jako u činitele skin efektu jeho výpočet záleží na typech použitých kabelů a vlastnostech jader.[5]

2.4.1 Povrchový jev – Skinefekt

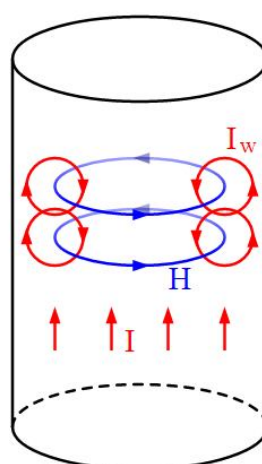
V obvodech zatížených harmonickými proudy má kmitočet vliv na rozložení proudové hustoty v jádře vodiče. Díky tomuto jevu se zvyšuje odpor vodiče a tím dochází i ke zvýšení Joulových ztrát což vede k horšímu přenosu elektrické energie a nežádoucímu oteplení vodiče (viz přechozí kapitoly).

Rozložení proudové hustoty ve vodiči v závislosti na kmitočtu je zmíněno na Obr. 2.2 Kde platí ($f_1 < f_2 < f_3 < f_4 < f_s$), s tím, že f_1 je nulová frekvence stejnosměrného proudu.



Obr. 2.2 – Rozložení proudové hustoty ve vodiči pro různé frekvence[10]

Tento jev vzniká vlivem průchodu časově proměnného proudu vodičem, jehož následkem dochází ke genezi magnetického indukčního toku (orientovaným podle pravidla pravé ruky) uvnitř vodiče. Vzniklý magnetický tok má časově proměnný charakter a tato časová změna způsobí vznik uzavřených smyček vířivých proudů. Tyto proudy blíže ke středu jádra působí proti směru toku a blíže k povrchu mají souhlasný charakter s protékajícím proudem. (Obr. 2.3) Z tohoto důvodu se vodič chová jako dutý.



Obr. 2.3 - Schéma vodiče protékaného proudem a vznik vířivých proudů vlivem časově proměnného magnetického toku[9]

Průběh proudové hustoty v harmonickém obvodu lze ve vodiči popsat podle vztahu:

$$J(f) = J_{max} \cdot e^{-\frac{d}{\delta}} \quad (2.14)$$

Kde d je průměr vodiče (mm);
 δ tzv. hloubka vniku (mm).

Z toho maximální proudová hustota na povrchu vodiče se dostane ze vztahu:

$$J_{max} = \frac{I}{2\pi \cdot r \cdot \delta \cdot (1 - \frac{\delta}{2r})} \quad (2.15)$$

Kde r je poloměr vodiče (mm);

Hloubka vniku je koeficient, který určuje hloubku pod povrchem vodiče, kde proudová hustota exponenciálně klesne na hodnotu $0,37J_{max}$. Přesný vztah pro určení hloubky vniku zde nebudu uvádět, ale zjednodušený všeobecně uznávaný výpočet vypadá následovně:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (2.16)$$

Kde ω je úhlová rychlost, která se určí ze vztahu $\omega=2\pi \cdot f$ (rad/s);
 μ permeabilita, která se určí podle $\mu= \mu_0 \cdot \mu_r$ (H/m);
 μ_0 permeabilita vakua o konstantní hodnotě, jenž se rovná $4\pi \cdot 10^{-7}$ (H/m);
 μ_r relativní permeabilita je materiálová bezrozměrná konstanta (-);

Pro materiály pro výrobu jader vodičů tzn. měď a hliník, lze hloubku vniku ovlivnit pouze úhlovou rychlostí, tedy frekvencí. Při průmyslovém kmitočtu 50 Hz bývá hloubka vniku pro tyto materiály přibližně 10 mm, a proto se povrchový jev uplatňuje pouze u vodičů s poloměrem mnohonásobně větším než 10 mm. To znamená, že pro naši simulaci se budou ztráty způsobené činitelem skin efektu zanedbávat. [7][9][10]

Součinitel zhuštění proudu, který nám upravuje rovnici pro výpočet rezistivity ve střídavém obvodu (2.13), lze získat ze vztahu (2.17).

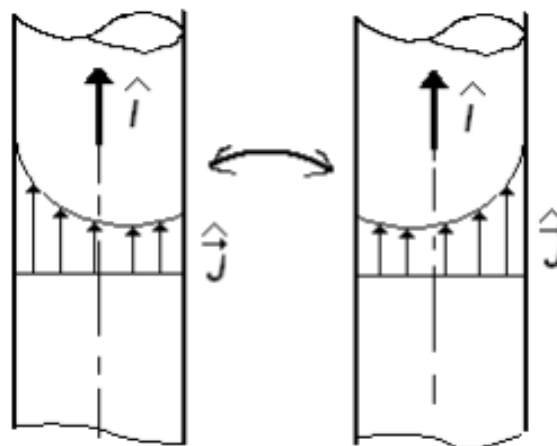
$$k_s = 0,5d \sqrt{\frac{\mu_r \cdot f}{\rho}} + 0,2 \quad (2.17)$$

Kde d je průměr vodiče (mm).[9]

2.4.2 Jev blízkosti

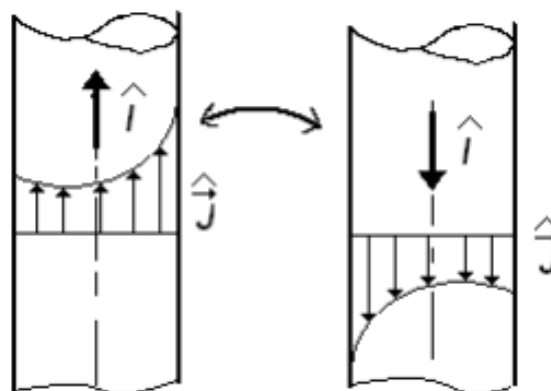
Jak již bylo zmíněno, v paralelních vodičích uložených blízko sebe se v každém z nich projeví, vlivem střídavého elektrického proudu proměnné magnetické pole v čase, které má za následek vytlačování proudu na povrch vodiče. Pro názorné vysvětlení vedle sebe položíme dva paralelní vodiče, kterými teče proud v souhlasném směru, pak se jejich magnetické pole vyruší a dojde k vytlačování proudu do odlehlejších částí průřezu vodičů. (Obr. 2.4)

Obr. 2.4 - Jev blízkosti pro souhlasnou orientaci proudů[14]



V opačném případě dojde k vzájemnému zesílení magnetických polí a proud je vytlačován zejména do přilehlých partií vodičů (Obr. 2.5).[7]

Obr. 2.5 - Jev blízkosti pro opačnou orientaci proudů[14]



2.5 Způsoby přenosu tepla

Obsah této kapitoly, bude shrnutí základních principů přestupu tepla a jejich vlastností, pro jednotlivé typy prostředí. Sdílení tepla je děj, jehož vlivem dochází přenosu tepelné energie mezi soustavami nebo mezi soustavou a okolím. Způsoby výměny, lze rozdělit zhruba do třech skupin:

- Vedením (kondukcí)
- Prouděním (konvekcí)
- Zářením (radiací)

2.5.1 Přenos tepla vedením (kondukcí)

K výměně tepla tímto způsobem dochází zpravidla v pevných látkách, ale zároveň i v kapalinách a plynech současně s prouděním (konvekcí). Teplo je kinetická energie neuspořádaných kmitů jednotlivých částic, které se nepřemísťují, ale oscilují kolem svých rovnovážných poloh, přičemž k přenosu dochází vlivem vzájemných srážek sousedních molekul a platí, že směr toku je od oblasti s vyšší teplotou do míst s nižší.

Tepelný tok při výměně tepla vedením je daný Fourierovým zákonem, který popisuje, „Množství tepla procházející tělesem je přímo úměrné teplotnímu spádu, době a průtokové ploše kolmé na směr teplotního toku a lze jej vyjádřit vztahem“ [16][17]

$$q = \frac{dP}{dS} = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \quad (2.18)$$

Kde	q	je hustota tepelného toku (W.m ⁻²);
	λ	teplotní vodivost (W.m ⁻¹ .K ⁻¹);
	T	teplota (K);
	P	tepelný tok (W);
	S	plocha kolmá k průchodu tepelného toku (m ²); [16]

Součinitel tepelné vodivosti udává schopnost látky vést teplo vedením, tzn. přenášet kinetickou energii mezi částicemi bez přídavného proudění. Zároveň je závislá na mnoho fyzikálních veličinách, proto se obtížně určuje, její hodnotu pro jednotlivé materiály zjišťujeme z technických tabulek a je stěžejním parametrem pro výpočet tepelného pole v Agrosu2D. [18]

2.5.2 Prouděním (konvekci)

K přenosu dochází pouze v kapalinách a plynech a jak již bylo zmíněno při styku pevného tělesa a kapaliny se podílí na výměně tepla s vedením. Bohužel Agros2D neumí simulovat přenos tepla prouděním a proto tento princip probereme pouze stručně.

Ve spojitém látkovém prostředí kapaliny nebo plynu rozlišujeme dva základní typy konvekce, jimiž jsou samovolné a nucené proudění. K samovolnému proudění dochází vlivem teplotní roztažnosti, snížením hustoty látky v místě ohřevu, začne tekutina snižovat svojí viskozitu oproti místu s nižší teplotou a má tendenci stoupat a vytlačovat chladnější část plynu nebo kapaliny a dochází k samovolné konvekci. [17][18][19]

2.5.3 Přenos tepla zářením (radiací)

Je třetím typem tepelné výměny, která na rozdíl od ostatních typů nevyžaduje látkové prostředí. Teplo se přenáší vlivem elektromagnetických vln. Část tohoto záření se při dopadu na jiné těleso pohltí (a způsobí jeho oteplení) a také odrazí. Zda-li se vlny odrazí či pohltí, ovlivňuje jakost a také barva materiálu a bezrozměrný parametr, který vyjadřuje schopnost vstřebávat či odrážet vlny nazývaný se emisivita. V absolutně černém tělese je maximální pohltivost a emisivita se rovná jedné, naopak nule přiřazujeme těleso absolutně bílé. Výkon vyzařovaného tělesa lze vyjádřit obecně následujícím vztahem:

$$P_t = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot T^4 \quad (2.19)$$

- Kde P_t je vyzářený výkon (W);
 σ Stefanova-Boltzmannova konstanta $5,67 \cdot 10^{-8}$ (W.m⁻².K⁻⁴);
 ε emisivita, nabývá hodnot pouze od 1 k 0 (-);
 S povrch pláště tělesa (m²);
 T termodynamická teplota předmětu (K).

Obdobně vypadá i vztah pro pohlcení záření z jiného tepelného zdroje, pak píšeme

$$P_a = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot T_0^4 \quad (2.20)$$

- Kde P_a je výkon přijatého záření (W);
 T_0 teplota zdroje záření (K).

V realitě dochází k obou jevům současně a proto celkový výkon odevzdaný zářením, pokud neuvažujeme s odrazem záření je

$$P = P_t - P_a = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S (T^4 - T_0^4) \quad (2.21)$$

- Kde P je celkový výkon (W).[17]

2.6 Oteplení a ochlazování vodiče

2.6.1 Oteplení vodiče v závislosti na ustáleném proudu

Pro analýzu oteplení se uvažuje vodič, protékáný proudem o stejném průřezu po celé jeho délce. V takovém případě dochází k rovnoměrnému rozložení teploty v objemu vodiče a ztráty v každém časovém okamžiku dt jsou úměrné:

$$dQ = \alpha_0 S_p \Delta\vartheta dt + c V d\vartheta \quad (2.22)$$

Kde α_0 je součinitel přestupu tepla ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$);
 S_p povrch vodiče – Pozor, nejedná se o průřez (m^2);
 $\Delta\vartheta$ okamžité oteplení vodiče proti okolí ($^{\circ}\text{C}$);
 c měrné objemové teplo vodiče ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$);
 V objem vodiče (m^3);
 dQ zdroj tepla.

Rovnice (2.22) pro oteplení vodiče se skládá ze tří částí a vyjadřuje rovnováhu množství tepel. Výraz na levé straně rovnice určuje zdrojové množství tepla, které se vyvine ve vodiči za časový interval dt , v tomto případě jsou to zmiňované Jouleovy ztráty, které lze vypočítat ze vztahu (viz kapitola Jouleovo teplo) nebo jeho analogií:

$$dQ = qVdt = \rho J^2 V dt \quad (2.23)$$

Kde q je tepelná ztráta ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$);
 J proudové hustota ($\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$).

První výraz zprava $\alpha_0 S_p \Delta\vartheta dt$ odpovídá teplu, které unikne z plochy vodiče do okolí vlivem rozdílu teplot za stejně dlouhý časový interval dt .

Druhý tvar z pravé strany $c V d\vartheta$ udává množství tepla potřebné k nashromáždění ve vodiči, aby došlo k jeho zvýšení o $d\vartheta$.

Aby mohla být vyřešena rovnice (2.22) musí se použít metoda separace proměnných, z které vyplývá:

$$dt = \frac{c \cdot V}{R \cdot I^2 - \alpha_0 S_p \Delta\vartheta} \cdot d\vartheta \quad (2.24)$$

$$t = -\frac{c \cdot V}{\alpha_0 S_p} \cdot \ln(R \cdot I^2 - \alpha_0 S_p \Delta\vartheta) + K \quad (2.25)$$

Konstanta K se určí pro počáteční podmínky o hodnotách $t = 0$ a $\Delta\vartheta = 0$

$$K = \frac{c \cdot V}{\alpha_0 S_p} \cdot \ln(R \cdot I^2) \quad (2.26)$$

Dosazením vztahu (2.26) do rovnice (2.25) získáme:

$$t = -\frac{c \cdot V}{\alpha_0 S_p} \cdot \ln\left(1 - \frac{\alpha_0 S_p \Delta\vartheta}{R \cdot I^2}\right) \quad (2.27)$$

Vyjádřením $\Delta\vartheta$ z předchozí rovnice získáme:

$$\Delta\vartheta = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 S_p} \cdot \ln\left(1 - e^{-\frac{\alpha_0 S_p t}{c \cdot V}}\right) \quad (2.28)$$

Zjednodušíme značení ze vztahu (2.28) přiřazením:

$$\vartheta_\infty = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 S_p} \quad (2.29)$$

$$\tau = -\frac{1}{\lambda} = \frac{c \cdot V}{\alpha_0 S_p} \quad (2.30)$$

Kde τ je časová konstanta (s);

ϑ_∞ oteplení vodiče při dosažení ustáleného stavu (°C).

A získáme výsledný vztah, díky kterému lze popsat charakteristiku (viz Obr. 2.6):

$$\Delta\vartheta = \vartheta_\infty (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2.31)$$

Nutno podotknout, že součinitel přestupu tepla α_0 a měrné objemové teplo c , jsou teplotně závislé veličiny, proto se výpočet zpravidla liší od reálných hodnot naměřené oteplovací charakteristiky, toto platí zejména v případě časové konstanty τ .

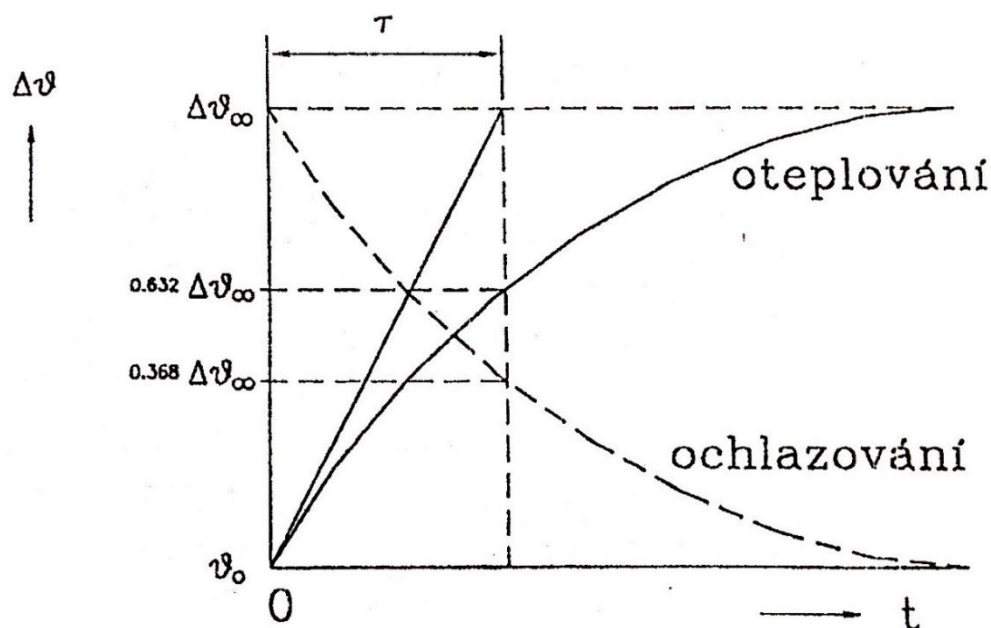
Pokud vodič dosáhne oteplení v ustáleném stavu ϑ_∞ , bude platit pro rovnici (2.22) následující vztah:

$$dQ = \alpha_0 S_p \Delta\vartheta dt \quad (2.32)$$

Protože

$$\frac{d\vartheta}{dt} = 0 \quad \text{při} \quad \Delta\vartheta = \Delta\vartheta_\infty \quad (2.33)$$

V takovém případě tepelná rovnováha vyjadřuje, že veškeré teplo vzniklé ve vodiči se odevzdává do okolí.[7]



Obr. 2.6 – Charakteristika oteplení a ochlazování vodiče[7]

2.6.2 Ochlazování vodiče

Pro vysvětlení ochlazování, se uvažuje vodič, který se ohřál nad teplotu okolí. V tomto čase se odpojí zdroj elektrické energie a vodičem přestane procházet zatěžovací proud, ten se začne ochlazovat, v tom momentě bude pro rovnici (2.22) platit následující vztah:

$$0 = \alpha_0 S_p \Delta\vartheta dt + c V d\vartheta \quad (2.34)$$

dQ nabývá nulové hodnoty z důvodu poklesu proudu k nule. Upravíme vztah podle stejného postupu jako v předešlém případě a získáme:

$$t = -\frac{c \cdot V}{\alpha_0 S_p} \cdot \frac{d\vartheta}{\Delta\vartheta} \quad (2.35)$$

Po separaci proměnných

$$t = -\frac{c \cdot V}{\alpha_0 S_p} \cdot \ln(\Delta\vartheta) + B \quad (2.36)$$

Uřídíme integrační konstantu B s uvažováním počátečních podmínek $t=0$ a $\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{max}$

$$B = \frac{c \cdot V}{\alpha_0 S_p} \cdot \ln(\Delta\vartheta_{max}) \quad (2.37)$$

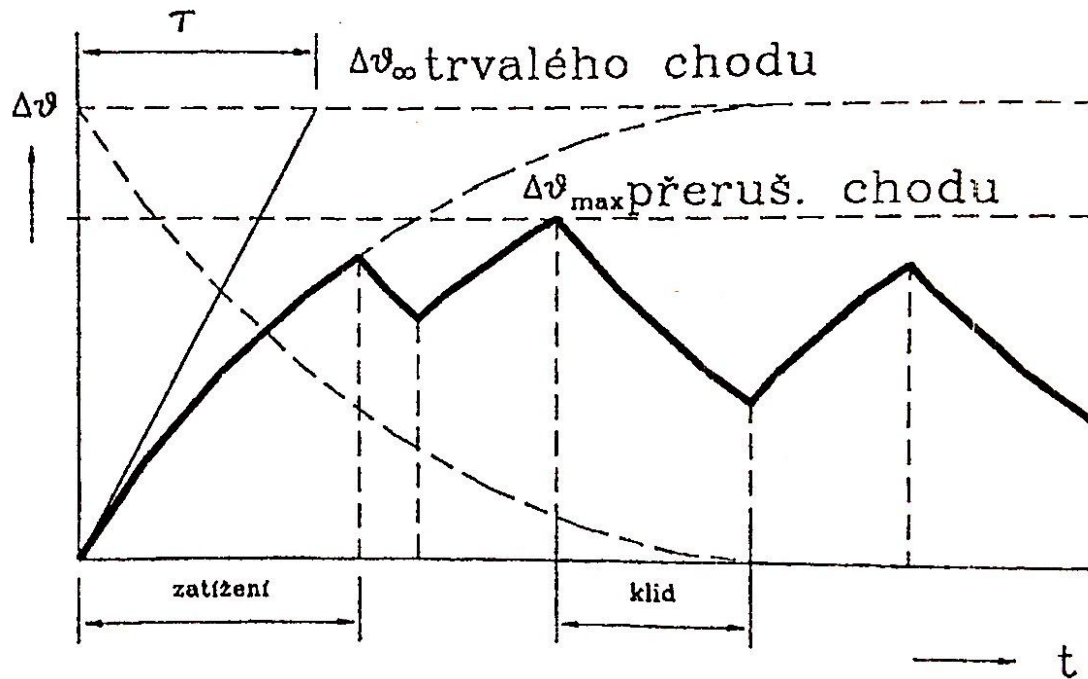
Po dosazení (2.36) do (2.35) a úpravě:

$$t = -\frac{c \cdot V}{\alpha_0 S_p} \cdot \ln\left(\frac{\Delta\vartheta}{\Delta\vartheta_{max}}\right) \quad (2.38)$$

Časová konstanta zůstává stejná jako v případě (2.30) a finální úprava vztahu určuje, že ochlazovací křivka je zrcadlená ke křivce oteplovací (viz Obr. 2.6).[7][15]

2.6.3 Přerušovaný chod

V provozu se lze setkat se stavy, kdy dochází k přerušovanému chodu. Tzn., že se střídají stavy, kdy je kabel zatěžován elektrickým proudem a kdy není (viz Obr. 2.7). V takovém případě hraje roli na oteplení vodiče poměr těchto klidových a zatěžovacích dob. Přičemž jejich vlivem zařízení nikdy nemusí dosáhnout maximální teploty ustáleného stavu a jeho maximální provozní teplota může být dimenzována na nižší hodnoty, než při dlouhodobém zatížení.[7]



Obr. 7 – Závislost oteplení na čase při přerušovaném chodu[7]

3 Simulace tepelných polí

3.1 Úvod

Díky moderní výpočetní technice se nedílnou a nepostradatelnou součástí vývoje elektrických zařízení, ale nejen jich, stávají softwary pro řešení jednotlivých fyzikálních polí či jejich kombinací. Použití těchto softwarů přináší mnohé výhody zejména zvýšení kvality a snížení ceny jejich vývoje.

Většina takto provedených simulačních programů je založená na metodě konečných prvků, která je implementována v mnoha sofistikovaných a velmi drahých profesionálních softwarech. Jejich hlavními zástupci lze jmenovat například Ansys či COMSOL. Nicméně v posledních letech byla na Západočeské univerzitě vyvinuta alternativa, pro volné použití ve vědě, šířená pod GNU GLP2 licencí, ke komerčním programům podnázvem Agros2D, kterým se dále budeme zabývat.[20]

Tab. 3.1 – Vlastnosti jednotlivých simulačních programů[20]

Produkt	Licence	Geometrie	Platforma	Max. řád polynomu	Skript.	Fyzikální vlastnosti
Ansys	prop.	2D/3D	Windows, Linux (část.), Osx (část.)	2	Ansys	lineární, nelineární
Comsol	prop.	2D/3D	Windows, Linux, Osx	5	Comsol Script (Matlab komp.)	lineární, nelineární
QuickField	prop.	2D	Windows	1	ActiveX objekty	lineární, nelineární
FEMM	Aladdin	2D	Windows, Linux (Wine)	1	LUA	lineární, nelineární pouze BH charakteristika
Agros2D + Hermes2D	GPL v2	2D	Windows, Linux, Osx	10	Python	lineární (Hermes2D nelineární)

3.2 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP) je numerická metoda pro realizaci řešení složitých výpočtů diferenciálních rovnic fyzikálních polí na vytvořeném modelu reálného problému. Princip spočívá v diskretizaci spojitého prostředí do konečného či určitého počtu prvků vytvořením sítě. Jednotlivé parametry jsou následně zjišťovány pro jednotlivé uzlové body.[21]

Tuto metodu prakticky využívá software Agros2D pro výpočet vlastností 2D fyzikálních polí, jehož funkce a bližší popis proberu v následujících kapitole.

3.3 Agros2D

Používá se k především k řešení 2D polí v kartézském nebo osově symetrickém uspořádání a umožňuje poměrně rozsáhlé možnosti skriptování často prováděných úkonů. Dále program obsahuje knihovnu Hermes2D sloužící k realizaci výpočtů parciálních diferenciálních rovnic a je založená na adaptivní metodě konečných prvků vyššího řádu přesnosti. Pro realizaci geometrického uspořádání využívá knihovnu OpenGL s možností importovat geometrii z CAD dokumentů. Analýza fyzikálních polí se dělí do třech základních kroků, jimiž jsou preprocesor, procesor (udává se také solution) a postprocesor. [20]

3.3.1 Preprocesor

Slouží k vytváření geometrického modelu řešeného problému a k definici materiálových parametrů a okrajových podmínek.

V Agros2D se pro vytvoření geometrického modelu zařízení, používají tzv. uzly, hrany a značky oblastí. Vložení bodů se provádí přidržet klávesy control (Ctrl) plus levé tlačítko myši. Dva různé uzly lze propojit pomocí hran opět přidržet klávesy control a označením levým tlačítkem myši dvou různých uzlů. Pokud si potřebujeme nakreslit zařízení, na jehož realizaci nám nestačí práce s uzly a hranami, lze importovat výkres z CAD dokumentu s příponou DXF.[20]

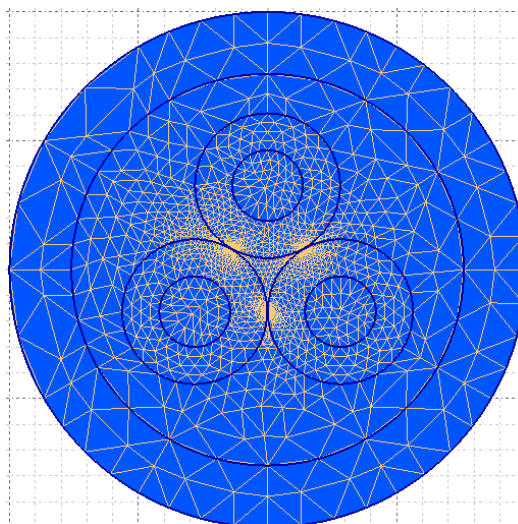
Značky oblastí mají za úkol přiřadit jednotlivým plochám modelu specifické materiály, které jsou definované pomocí jednoduchého vyskakovacího okna s charakteristickými parametry pro jednotlivá fyzikální pole. V případě našeho použití se jedná zejména o tepelnou vodivost, měrné teplo, hustotu a množství tepla.

Okrajové podmínky se následně přiřazují jednotlivým okrajovým hranám objektu, které obsahují další parametry určené v místech přechodu. V případě tepelného pole kabelu lze vybírat z podmínek pro teplotní tok a teplotu.

3.3.2 Procesor a řešení

V procesoru se zpracovávají výše zmíněné údaje. Začíná se zpravidla vytvořením diskretizací geometrie do určitého konečného počtu prvků, které vytvoří síť (viz Obr. 3.1) a následně řeší algebraické soustavy rovnic pro její jednotlivé uzly.

V Agros2D se využívá program Triangle pro vytvoření nestrukturované kvalitní trojúhelníkové sítě. Tento přístup vychází z Delaunayovi triangulace, který procesor využívá při výpočtech automatického zjemnění sítě a řádu polynomu na elementu dle potřeby (tzv. hp-adaptivita). Pro řešení vzniklých soustav algebraických rovnic se aplikuje tzv. UMFPACK.[21]



Obr. 3.1 – Ukázka trojúhelníkové sítě simulovaného kabelu vytvořené v programu Agros2D

3.3.3 Postprocesor

Umožňuje shrnutí výsledků vypočtených dat, na jejichž základě lze vytvářet závěry, grafy závislostí veličin či barevné mapy, na kterých lze zobrazovat např. pole vektorů, kontury, v případě přechodových jevů, díky výbornému grafickému znázornění i videa dějů fyzikálních polí a spoustu dalších možností. Dále Agros2D umožňuje exportovat jednotlivé grafy, obrázky či videa do všeobecně používaných formátů.[21]

3.4 Seznámení se simulovaným kabelem

3.4.1 Značení a popis

V současnosti se zavádí nově kabelové značení vedení podle ČSN 34 7409, avšak stále se hojně vyskytuje starší typ, který ve svém katalogu uvádí i firma Kabex a.s., s jejíž kabelem se seznámíme v následujících odstavcích.

Označení kabelu 1-CXKE-R 3x1.5/0-/-/ PC č. KBX 7402 REV. V.

Firma Kabex a.s. používá vlastní značení podložené starší normou, a proto zmíněný typ kabelu lze určit z jejich katalogových tabulek (Tab. 3.2 a 3.3 viz příloha). Jedná se o tří žilový silový kabel s průřezem měděného jádra $1,5 \text{ mm}^2$ do 1 kV jmenovitého napětí s izolací ze síťovaného polyethylenu. Plášť oranžové barvy má průměr 10 mm a je vyrobený z bez halogenového oheň nešířícího polymeru s požární odolností kategorie oheň nešířící kabel bez dodatkového označení.

3.4.2 Rozměry

Dimenze kabelu a jeho jednotlivých vrstev byly určeny počtem deseti měření a zprůměrované hodnoty jednotlivých vrstev byly použity pro sestavení geometrického modelu pro simulační program Agros2D. Rozměry jsou uvedeny v tabulce (Tab. 3.4).

Tab. 3.4 – Naměřené rozměry I-CXKE-R 3x1.5/0/-/

Měřené součásti	průměr jádra	průměr žíly	šířka výplně	poloměr výplně	šířka pláště	průměr pláště
rozměry [mm]	1,38	2,83	0,88	7,81	1,25	10,00
	1,35	2,85	0,81	7,45	1,28	9,99
	1,37	2,79	0,98	7,66	1,09	10,01
	1,41	2,79	0,80	7,65	1,15	10,02
	1,38	2,80	0,83	7,58	1,12	9,98
	1,36	2,81	0,97	7,78	1,24	10,00
	1,35	2,81	0,89	7,85	1,29	10,01
Aritmetický průměr	1,37	2,81	0,88	7,68	1,20	10,00

3.4.3 Materiály a vlastnosti půdy

Aby mohla být vytvořena simulace tepelného pole kabelu. Musí se nejprve získat pro jednotlivé materiály jejich parametry. Jedná se zejména o tři základní jimiž jsou tepelná vodivost, hustota a měrné teplo. Výčet jednotlivých vrstev, materiálu a jejich vlastností je v tabulce (Tab. 3.5). Parametry půdy v závislosti na vlhkosti a prostředí, ve kterých jsou kabely uloženy, udává tabulka (Tab. 3.6).

Tab. 3.5 – Parametry materiálu jednotlivých vrstev I-CXKE-R 3x1.5/0/-/

Popis	Materiál	Tepelná vodivost λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Hustota ρ [kg/m ³]	Měrné teplo C_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
jádro	měď	386	8940	383
žilová směs	KBX XLPE 110	0,330	920	2300
výplňová směs	KBX FILL 200	0,340	1550	1386
plášťová směs	KBX HM4 301	0,382	1550	1908

Tab. 3.6 – Parametry půdy v závislosti na podmínkách prostředí[4]

Zemina	Tepelná vodivost λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Hustota ρ [kg/m ³]	Měrné teplo C_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
vlhká půda	1,4	1400	1836
mírně zvlhlá půda	1,0	1400	1836
suchá půda, řídké deště	0,5	800	1209
suchá půda, velmi řídké deště	0,4	800	1209

3.5 Úvod k praktickým simulacím

Tato kapitola se bude zabývat praktickými simulacemi v Agrosu2D, kabelu/ů z katalogu firmy Kabex a.s., které jsou představeny v předchozích kapitolách. Na těchto kabelech se budou zkoumat, vlivy proudového zatížení, geometrického uspořádání a geologických podmínek půdy na oteplení v čase. Následovat bude zhodnocení výsledků a jejich porovnání s výpočty dle platných ČSN.

Nominální výkon, kterým lze kabel dlouhodobě zatížit, je součin dovoleného proudu a jmenovitého napětí. Jeho hodnota je 13,2 kW, přičemž ztráty, které se změní na teplo, v tomto kabelu se v Agrosu2D budou zadávat pomocí tepelného množství, které se udává jako poměrem ztrátového výkonu na jednotku objemu. Tuto hodnotu lze získat ze vztahu (3.1) a bude upravována pro různé simulace specificky zvoleným elektrickým proudem.

$$p = \frac{R.I^2}{V} = \frac{\rho.I^2}{\pi.r^4} \quad (3.1)$$

Kde p je tepelné množství (W/m^3);

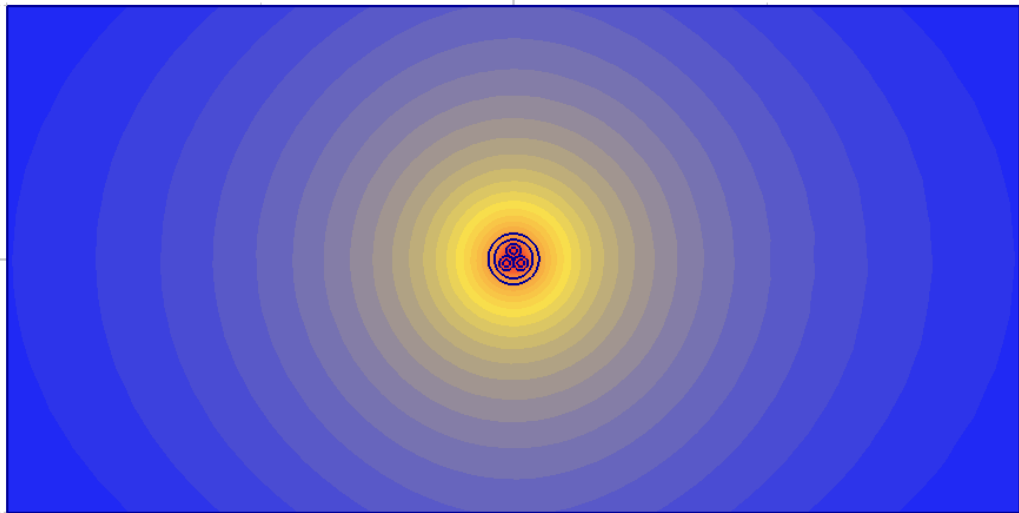
r poloměr (mm).

Dle ČSN 2000-5-523 se udává jmenovitý dovolený proud pro tento druh kabelu 23 A pro uložení na vzduchu při referenční teplotě okolí 30 °C. V zemi se uvažuje půda s výchozím tepelným odporem 2,5 K.m.W⁻¹, jenž odpovídá suché zemi s velmi řídkými dešti (podle Tab. 3.6) a referenční teplotou okolí 20 °C. Těmto hodnotám odpovídá dovolený proud 22 A. Kabely budou zatěžovány po dobu sedmi a půl hodiny, tzn. 30 000 sekund. Použité simulační parametry budou zmíněny v každé kapitole popřípadě, na ně bude odkázáno.

Některé použité parametry jsou tepelně závislé veličiny (například tepelná vodivost mědi) v simulacích, však budeme tyto parametry se zvyšující se teplotou považovat za konstantní a zadávat hodnoty veličin platné pro 20 °C. Takto vzniklé chyby budou zanedbány, a proto se mohou výsledné hodnoty simulace lišit od skutečných průběhů.

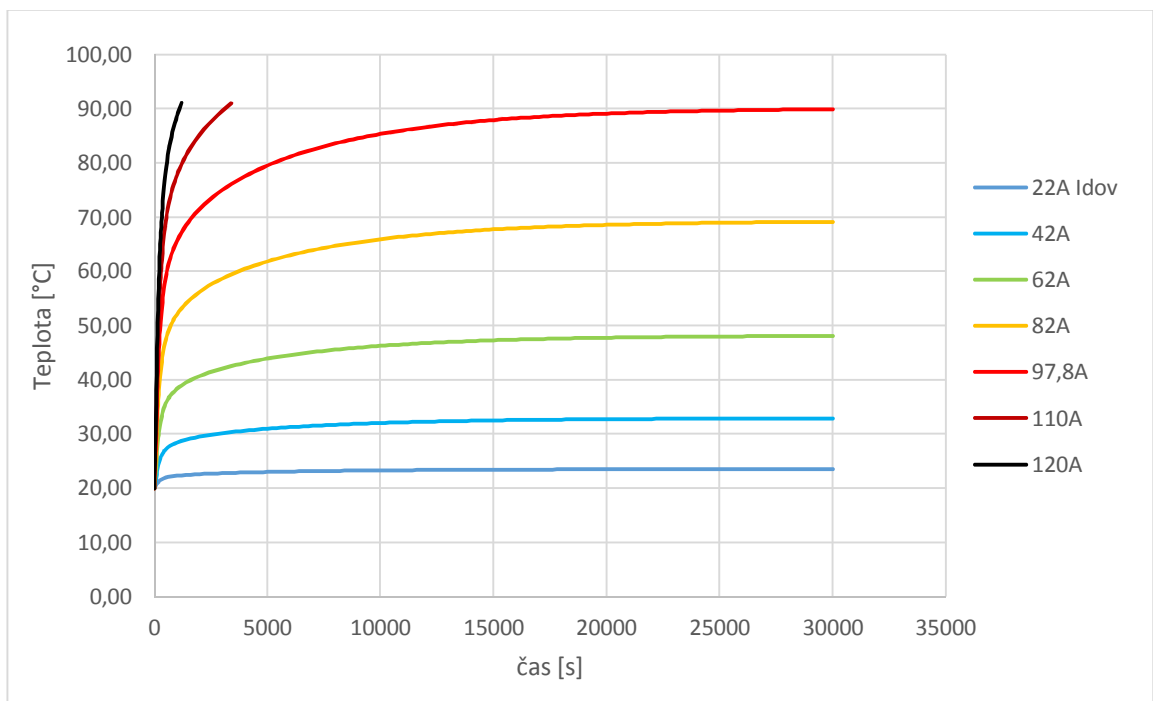
3.6 Simulace oteplení kabelu v závislosti na proudovém zatížení

V této simulaci zjišťuje, jakým proudem je nutné zatížit kabel s XLPE izolací v uložení ve velmi suché zemi (vlastnosti viz Tab. 3.6) s parametry tepelného odporu odpovídající referenčním 2,5 K.m.W⁻¹, teplotou okolí 20°C, aby došlo k překročení nejvyšší dovolené provozní teploty v našem případě 90°C (pro XLPE dle Tab. 1.1), která odpovídá 363,15 K. Ukázka simulovaného kabelu je na obrázku (Obr. 3.2).



Obr. 3.2 – Ukázka uložení simulovaného kabelu pro oteplení v ustáleném stavu

Tepelné množství se bude měnit pomocí proudové zátěže, po 20 A od jmenovitého proudu 22 A (vypočteného z ČSN 2000 523-5) až po hodnotu proudu (97,8 A) kdy bude docházet k ohřátí na nejvyšší dovolenou provozní teplotu (90 °C). Následně se provedou další dvě simulace pro vyšší proudy 110 a 120A, které budou zjišťovat, v jakých časech dojde k překročení dovolené provozní teploty kabelu.



Obr. 3.3 – Závislost teploty kabelu na proudovém zatížení v čase

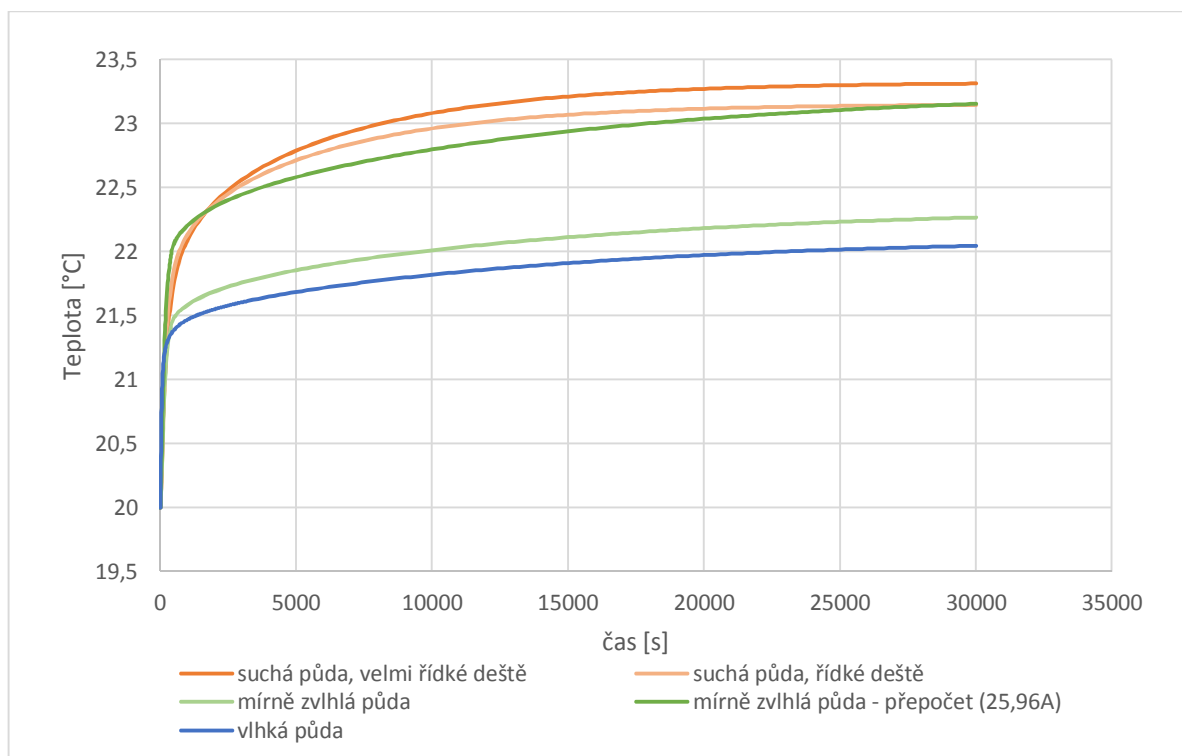
Zhodnocení výsledků:

Jak lze vidět z grafu (Obr. 3.3), hodnota dovoleného proudu (22 A) stanovená podle ČSN je značně poddimenzována, pravděpodobně z hlediska bezpečnosti a možnosti zkratů. Dále lze stanovit, že veškeré hodnoty zatěžovacích proudů až do hodnoty 98,7 A nedosáhly nejvyšší provozní teploty. Z toho důvodu se dá považovat tento proud za skutečný dovolený proud pro toto uložení. Hodnota proudu stanovená dle ČSN musí tedy přesáhnout svojí hodnotu 4,5 krát, aby došlo k oteplení na hraniční teplotu 90 °C.

V případech extrémního proudové zatížení (110 a 120 A), lze vidět rychlý exponenciální nárůst teploty. Kdy 110 A dosáhlo maximální provozní teploty za 50 minut a 120 A za pouhých 20 minut. Tyto případy zatížení mohou nastat pouze za předpokladu, že budeme kabel provozovat v přerušovaném provozu či v podmínkách, kde se počítá se sníženou životností kabelu.

3.7 Simulace oteplení kabelu v závislosti na různých parametrech půdy

V této části se obdobně jako v předchozí kapitole se bude zabývat oteplení v čase změnou vlastností půdy v okolí jednoho kabelu (Obr 3.2) podle tabulky (Tab. 3.6), při konstantním zatížení jmenovitým proudem 22 A. Avšak dovolený proud nebude přepočtený dle ČSN, aby se snáze mohl srovnat vliv jednotlivých parametrů půdy na teplotu v grafu (Obr. 3.4).



Obr. 3.4 – Závislost teploty kabelu na různých parametrech půdy v čase

Zhodnocení výsledků:

Z výsledků simulací (Obr. 3.4) lze stanovit, že na průběhu a tvar oteplovací charakteristiky se ze všech parametrů nejvíce podílí tepelná vodivost, která určuje odvod tepla z okolí kabelu. Pro její převrácenou hodnotu (tzn. tepelný odpor) se udávají přepočítací činitele v tabulce 52-D3 dle ČSN 2000-5-523.

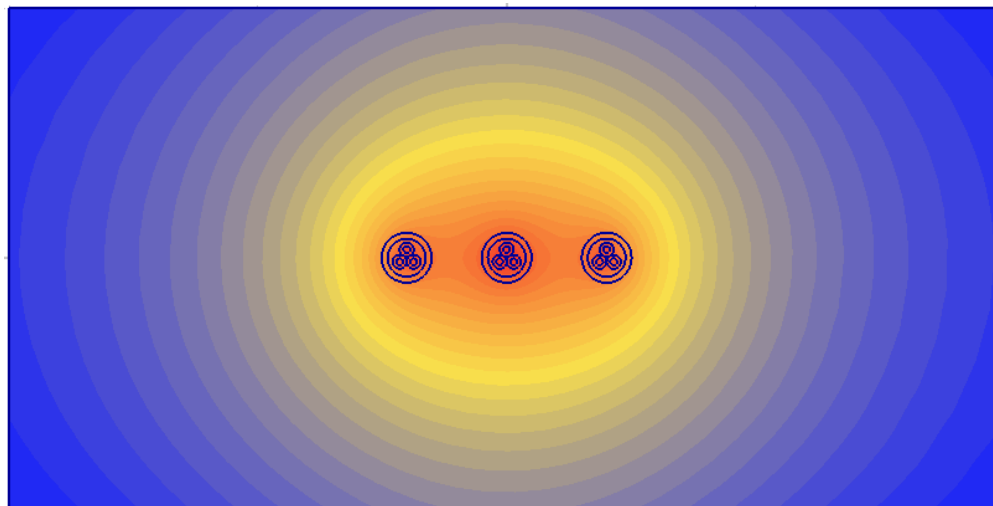
Nejvyšší oteplení můžeme pozorovat v půdě s vysokým referenčním tepelným odporem (dle ČSN 2000-5-523) – suchá půda s řídkými dešti, kde dochází ke ztíženému odvodu tepla. V půdách s vyšším podílem vlhkosti (tzn. nižším tepelným odporem) je možné kabel více proudově zatížit, protože se kabel stačí ochlazovat. Tomuto faktu odpovídají i zvyšující se přepočítací činitele z tabulky 52-D3.

Jako příklad je uveden přepočet dle uvedených ČSN, pro mírně zvlhlou půdu (viz Obr 3.4). Její tepelné vodivosti ($\lambda = 1 \text{ W/m.K}$) odpovídá zvyšující součinitel ($k = 1,18$), který upraví hodnotu dovoleného proudu na 25,96 A. Lze pozorovat, že tvar charakteristiky mírně zvlhlé půdy – přepočet, zůstává totožný vlivem dalších parametrů půdy, ale došlo ke zvýšení teploty vlivem proudového zatížení. Z toho lze vyvodit, že úprava dle ČSN je poměrně přesná a provozní teplota simulace se v ustáleném stavu se liší pouze přibližně o 0,2 °C, vůči referenční přepočtené suché půdě s řídkými dešti.

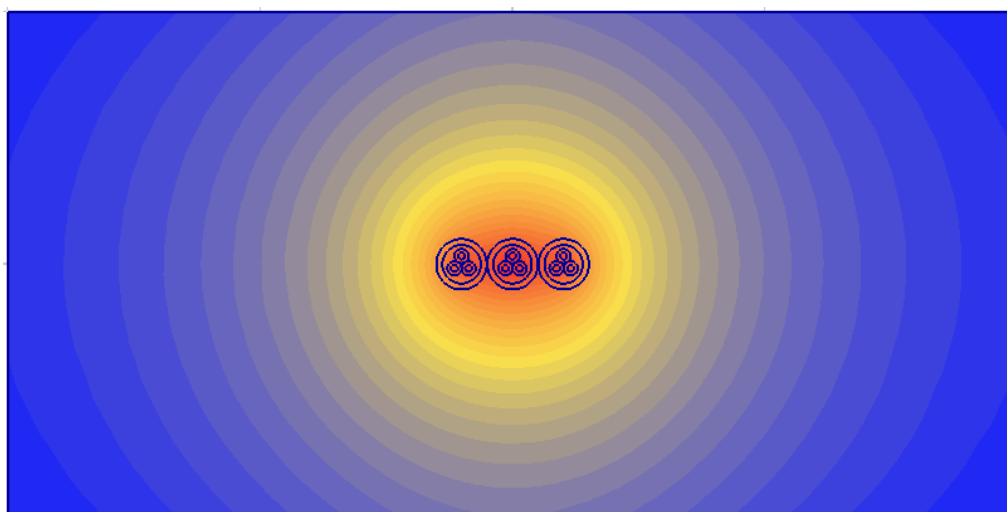
3.8 Simulace oteplení kabelu v závislosti na geometrickém uspořádání

Tento úsek se bude zabývat oteplením v čase v závislosti na geometrickém uspořádání třech totožných kabelů.

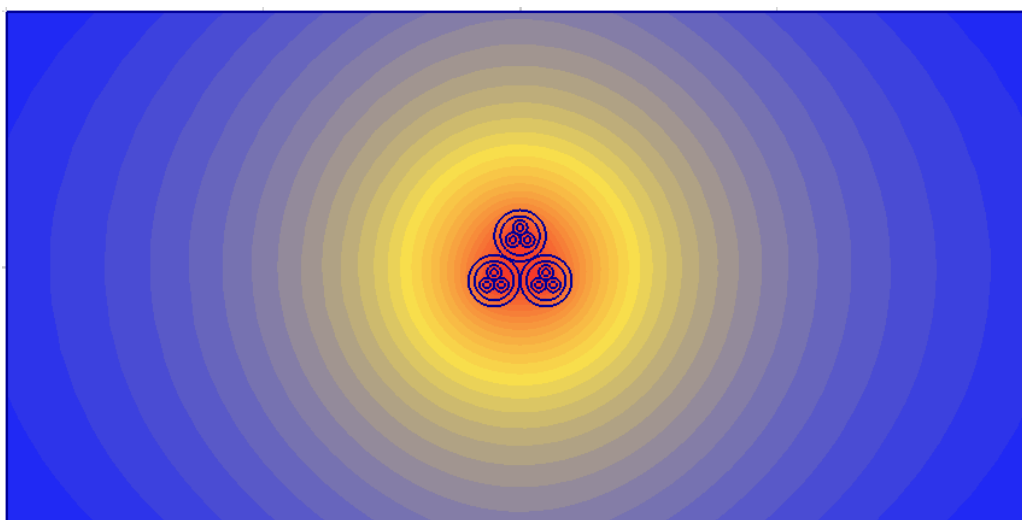
Každý kabel v různých uloženích bude, simulován pro dvě konstantní zatížení. První bude odpovídat hodnotě dovoleného proudu 22 A pro samostatný kabel v zemi v referenčních podmínkách (viz úvod k simulacím), aby mohlo být snáze zhodnoceno, které uložení má vyšší vliv na oteplení kabelu a druhé bude náležet přepočtenému proudovému zatížení, dle tabulky 52-E2 uvedené v ČSN 2000-5-523. Ukázky jednotlivých geometrií jsou na obrázcích (Obr. 3.2, 3.5, 3.6 a 3.7).



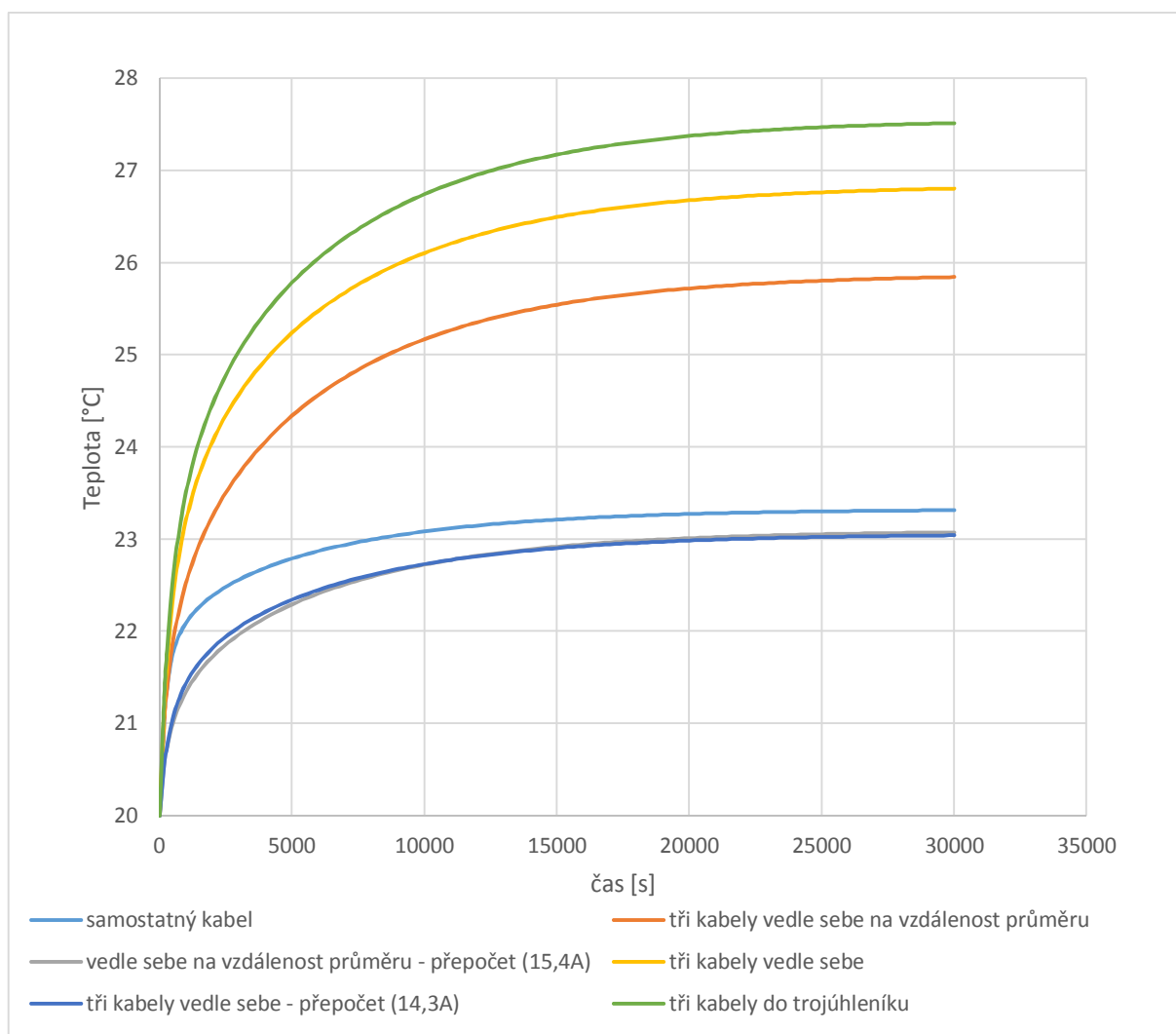
Obr. 3.5 – Ukázka simulace pro uložení třech kabelů vedle sebe na vzdálenost průměru



Obr. 3.6 – Ukázka simulace pro uložení třech kabelů vedle sebe



Obr. 3.7 – Ukázka simulace pro uložení třech kabelů do trojúhelníku



Obr. 3.8 – Závislost teploty kabelu/ů na geometrickém uspořádání

Zhodnocení a porovnání výsledků:

Z grafu (Obr 3.8) lze vidět, že nejvyššího oteplení dosáhlo uložení třech kabelů uložených do trojúhelníku (Obr. 3.7) a následovalo uložení kabelů těsně vedle sebe (Obr. 3.6) a těsně vedle sebe s mezerou (Obr. 3.5) na vzdálenost průměru vodiče (10 mm). Všechny tři uložení byly zatíženy nejprve proudem, který odpovídá dovolenému proudu jednotlivého vodiče (22 A) a následovně hodnoty uložení kabelů těsně vedle sebe a vedle sebe s mezerou byly přepočítány dle tabulky 52-E3 z ČSN 2000-5-523. V případě trojúhelníku úprava nebyla možná, protože dochází k přesahu rozsahu normy.

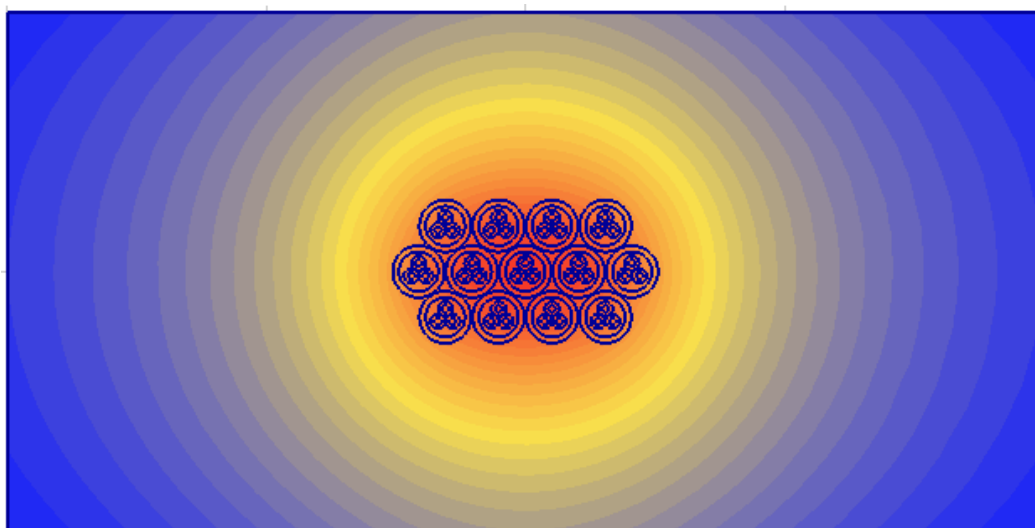
Z výsledků simulací lze vyvodit, že uložení do trojúhelníku se musí, zatížit méně než seskupení těsně vedle sebe a to zase méně než vedle sebe s mezerou o velikosti průměru kabelu. Tento fakt, potvrzují i přepočítací činitele z tabulky 52-E3, které se snižují při bližším kontaktu vodičů uvedené pro uložení vedle sebe.

Upravené dovolené proudy nabývají hodnot pro uložení těsně vedle sebe (14,3 A) a vedle sebe s mezerou o velikosti průměru kabelu (15,4 A). Lze vidět, že po úpravě jsou tyto dva průběhy téměř totožné a s výsledky simulace samostatného kabelu se liší řádově o desetiny stupně Celsia. Z toho důvodu lze stanovit závěr, že přesnost pro orientační stanovení dovoleného proudu dle ČSN 2000-5-523 je dostatečná.

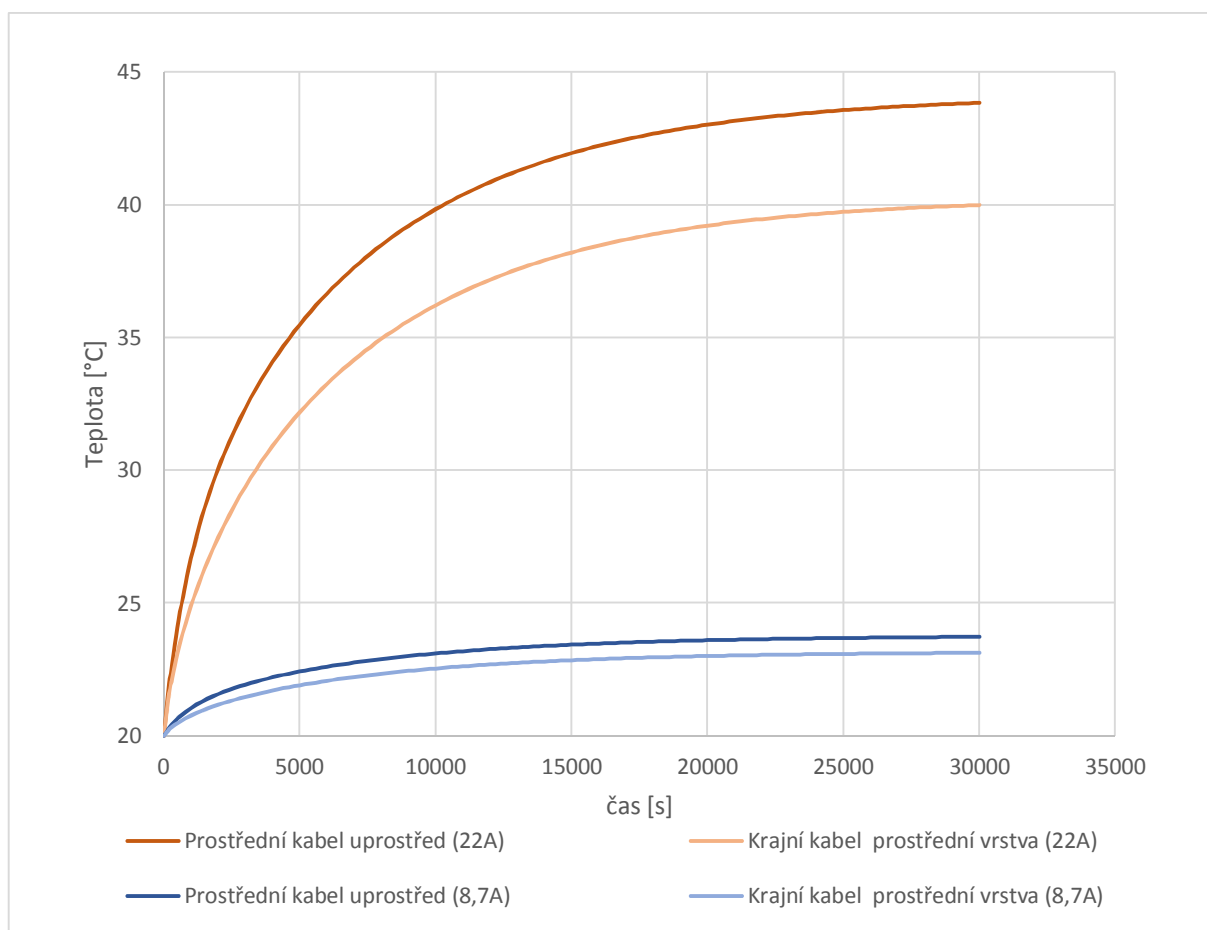
V případech, kde dochází k přesahu norem (seskupení do trojúhelník atp.) lze využít znalosti z přechozích kapitol a experimentálně pomocí simulací zjistit dovolený proud pro jedinečné seskupení. Tímto tématem se zabývá následující kapitola (3.9).

3.9 Simulace oteplení kabelu v případech kdy dochází k přesahu rozsahu ČSN

Jak bylo zmíněno, v závěru kapitoly 3.8, mnohdy nastávají případy, kdy seskupení přesáhne rozsah ČSN. V takových případech lze využít praktických vlastností softwaru založených na MKP. Jako příklad zde uvedena simulace, vrstveného uložení kabelů v zemi na sebe (obr. 3.9). Nejprve jednotlivé kabely seskupení budou zatíženy dovoleným proudem 22 A, čímž dojde k nárůstu provozní teploty. Teplota na základě nabytých znalostí z předchozích simulací bude omezena na ustálenou provozní hodnotu jednoho vodiče v zemi (23,5 °C - kap. 3.6 a 3.7) snižováním zatěžovacího proudu seskupení.



Obr. 3.9 – Ukázka simulace pro uložení vrstvených kabelů



Obr. 3.10 – Závislost teploty v čase vrstvených kabelů na sebe

Zhodnocení a závěr

Z grafu (Obr 3.10) a obrázku (Obr. 3.9) lze vidět, že největší teploty dosáhl prostřední kabel vrstveného seskupení, jehož teplota v ustáleném stavu nabývá 43,85 °C, při dovoleném proudu jednoho vodiče ve výchozím uložení 22 A. Z nabytých znalostí vyplývá, že proud musíme snižovat tak, aby nejvyšší teplota seskupení kabelů nepřesáhla svojí maximální provozní hodnotu. I v případě, když jí nebude přesahovat, bude chtít snížit zatěžovací proud pro každý kabel, tak aby nejvyšší teplota seskupení nepřesáhla 23,5 °C, které vyhovují poddimenzovaným hodnotám uvedených v ČSN. Takového proudového zatížení odpovídá experimentálně zjištěná hodnota 8,7 A pro každý kabel v seskupení.

Jak je patrné, použití MKP, lze využít pro velmi přesné navrhování různých speciálních uložení přesahující rozsahy ČSN, se kterými se lze v praxi běžně setkat. Pomocí simulace, bez nutnosti přepočtů lze pro odlišné nežli referenční parametry zjistit, jak rozdílně můžeme zatěžovat kabely například uprostřed seskupení, u nichž dochází k vyššímu oteplení oproti krajním snáze chlazeným kabelům. Na základě těchto informací pak lze jednotlivým kabelům upravit i jejich hodnoty proudového zatížení.

Závěr

Aktuálně se stále více používají programy využívající principu metody konečných prvků. Využívání těchto softwarů sebou nese velké množství výhod a to zejména významnou úsporu času, kterou by zabraly ruční výpočty a fyzických zdrojů potřebných k vývoji či návrhu konečného produktu. Zároveň v případě programů využívajících MKP (Agros2D) není pro uživatele klíčové znát pochod vnitřních algoritmů, avšak tato nevědomost může uživateli značně zkomplikovat práci a znemožnit další editaci dat či úpravy výpočtových algoritmů.

Problematickou částí pro realizaci numericky přesných modelů, je získávání skutečných hodnot parametrů jednotlivých materiálů, které ani výrobce ve většině případů neuvádí. Proto se musí počítat s přibližnými hodnotami a na uživateli závisí, aby rozhodl o pravdivosti výsledků. Další chybou specificky v Agrosu2D je teplotní závislost jednotlivých parametrů materiálů, tento faktor se musí brát v potaz hlavně v případech simulací, kde dochází k širokému rozmezí měnících se teplot.

Simulace oteplení kabelu v závislosti na zkoumaných vlastnostech, byla provedena na principech uvedených v teoretické části prostřednictvím výpočtového prostředí Agros2D v kapitole 3. Z výsledků části 3.6 bylo zjištěno, že dovolené proudy uvedené ČSN 2000-5-523, jsou značně poddimenzovány, a aby došlo k ohřátí kabelu na nejvyšší provozní teplotu, musí se kabel zatěžovat přibližně 4,5 krát větším proudem než je skutečný dovolený.

V kapitole 3.7 je zkoumán vliv vlhkosti půdy na odvod tepla z okolí vodiče a je proveden přepočítání dovoleného proudu dle hodnot tepelného odporu okolní půdy s poměrně přesným výsledkem přepočtu z tabulky 52-D3, kdy se hodnoty teploty lišili řádově o desetiny stupně Celsia od teploty referenčního uložení.

Obdobně vycházely i výsledky z části 3.8, které stanovují, že přepočtené výsledky z tabulky 52-E3 ČSN 2000-5-523 jednotlivých geometrií jsou, téměř totožné s rozdílem, že se odlišují od referenčního uložení jednoho kabelu opět v řádu desetin stupňů Celsia. Z těchto výsledků lze stanovit závěr, že ČSN 2000-5-523 se téměř shodují s výsledky simulací a proto, lze předpokládat správnost uvedených principů.

Závěrem dodávám, že normy pracují jen s omezeným množstvím informací a nedokáží řešit specifické případy, se kterými se v praxi setkáváme. Takovou ukázkou využití je simulace v části 3.9, kde svazky a vrstvení několika řad kabelů na sebe není v normách uvedeno. Právě v takových případech je velký přínos využití MKP. Práce potvrdila podobnost výsledku, z toho vyplývá, že na problematiku více svazků a nestandardního geometrického uspořádání se může postup aplikovat.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Dimenzování vodičů* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/padesatka/dimenzovani-vodicu.pdf>
- [2] ČSN 33 2000-5-523 Elektrická zařízení Část 5 – Výběr a stavba elektrických zařízení Oddíl 523 – Dovolené proudy
- [3] HEJTMÁNKOVÁ, Pavla. Západočeská univerzita v Plzni. Podpůrný text pro výuku předmětu Projektování energetických celků. [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~hejtman/PEC/Prednasky/pred4.pdf>
- [4] VOČKO, Jan. *Dimenzování silových kabelů z hlediska tepelného namáhání* [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <https://www.fel.cvut.cz/cz/education/prace/00011.pdf>
Bakalářská práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Jan Kyncl.
- [5] ČSN IEC 287-1-1 – Elektrické kabely – Výpočet dovolených proudů – Část 1: Rovnice pro výpočet dovolených proudů (100% zatížitelnost) a výpočet ztrát
- [6] Jouleovo teplo. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Jouleovo_teplo
- [7] RUSŇÁK, Štěpán a Petr ŘEZÁČEK. *Elektrické přístroje 1*. 2. přeprac. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2001. ISBN 80-708-2825-0.
- [8] Elektrický výkon. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%BD_v%C3%BDkon
- [9] Skin efekt. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Skin_efekt
- [10] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. 3. vyd.-přeprac. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001. ISBN 80-708-2826-9.
- [11] Elektrický odpor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%BD_odpor
- [12] Rezistivita. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Rezistivita>
- [14] *Jev přiblížení* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: http://feil.vsb.cz/kat410/www453/soubory/texty/ucebni_texty/ep_komb/ep1-cv5.pdf
- [15] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985. 436 s.
- [16] MICHEJEV, M. A. *Základy sdílení tepla*. 1. vyd. Praha: Průmyslové vydavatelství, Spálená 51, Praha 2. 1952. 384 s.
- [17] VOLF, Ivo, Miroslava JAREŠOVÁ a Miroslav OUHRABKA. *Přenos tepla* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/texttz.pdf>
- [18] *Přenos tepla* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.kfy.zcu.cz/dokumenty/FYSV/PrenosTepla.pdf>

- [20] KARBAN, Pavel. *Agros2D – aplikace pro řešení fyzikálních polí* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z:
<http://www.abclinuxu.cz/clanky/agros2d-aplikace-pro-reseni-fyzikalnich-poli>
- [21] Metoda konečných prvků. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-04-30]. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF
- [22] *Katalog kabelů firmy Kabex a.s.* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z:
<http://data.kabex.quonia.cz/ke-stazeni/KATALOG.pdf>

Přílohy

Příloha A –

Tab. 3.2 – Princip staršího značení kabelových vedení s praktickou ukázkou

0	-	1	2	3	4	-	5	dimenze	6
1	-	C	X	K	E	-	R	3x1,5	

Tab. 3.3 – Kódové označení kabelů z katalogu firmy Kabex a.s.[22]

0. jmenovité napětí	1	0,6/1kV
1. materiál a provedení jádra	C	Cu jádro tř. 1 + jádro třídy ě od průřezu 25 mm ² včetně
	C2	Cu lanované jádro tř. 2 - značí se pouze do průřezu 16 mm ² včetně
	C5	Cu jemně lanované jádro tř. 5 - značí se pouze do průřezu 16 mm ² včetně
	S	CuSn jádro tř. 1
	S2	CuSn lanované jádro tř. 2 + jádro třídy ě od průřezu 25 mm ² včetně
	S5	CuSn jemně lanové jádro tř. 5
2. typ izolace jádra	Y	PVC izolace
	X	izolace ze síťovaného polyethylenu
	H	izolace z bezhalogenového oheň nešířícího polymeru
3. provedení kabelu	K	kabel
	F	kabel celkově stíněný ALPET fólií + CuSn kolektorový vodič
	FO	kabel celkově stíněný opletem CuSn drátky + příložený CuSn lanovaný vodič
	KF	kabel s Cu stíněním, provedeným dvojitým ovinem Cu fólií, pro dosažení vysokého stínícího efektu
4. materiál pláště	E	plášť z bezhalogenového oheň nešířícího polymeru
	Y	plášť z PVC
5. požární odolnost	R	oheň nešířící kabel
	V	ohniodolný kabel
6. dodatkové označení	/st/	prvek je samostatně stíněný ALPET fólií s příložným CuSn drátkem
	/sto/	prvek je samostatně stíněný opletem CuSn drátky + CuSn lanovaný příložený vodič
	/WB/	kabel je opatřen bariérou proti pronikání kapalin duší kabelu
	/ZE/	kabel je opatřen lehkým pancéřem, opletem FeZn drátky
	/AR/	kabel je opatřen armováním z FeZn či Al drátů v kombinaci s ovinem FeZn
	/o/	označuje barvu pláště kabelu, např.: o – oranžová, h – hnědá, š – šedá, m – modrá, mo – modrooranžová, modrý pruh (30%) oranžová (70%), om – oranžovomodrá, oranžový pruh (30%) modrá (70%)
	/--/	pro doplňující a pozměňující informace, např.: změna popisu kabelu, vyžádané a konzultované změny konstrukce atd., pokud je značka prázdná „-/“ , není pro konkrétní typ využita.