

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Dynamický ohřev kabelových vodičů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2012/2013

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

Jméno a příjmení: **Martin KUPILÍK**  
Osobní číslo: **E10B0091P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Dynamický ohřev kabelových vodičů**  
Zadávací 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. Zpracujte literární rešerši aktuálního stavu problematiky.
2. Proveďte teoretickou analýzu tepelné bilance vodiče.
3. Proveďte měření teploty zatíženého vodiče.
4. Porovnejte vypočtené a naměřené výsledky.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. Rada J. a kol.: Elektrotepelná technika; Praha; SNTL, 1985.
2. Odborné publikace IEEE a CIGRE.
3. Kreidl, M.: Měření teploty - senzory a měřicí obvody; Praha; BEN - technická literatura, 2005.
4. Lysenko, V.: Detektory pro bezdotykové měření teplot; Praha; BEN - technická literatura, 2006.


Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Jaroslav Šnajdr**

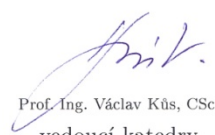
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na dynamické oteplení kabelových vodičů. Popisuje způsob dimenzování vodičů v praxi. Jsou zde zpracovány základní parametry, které mají vliv na oteplení vodiče a také odvození rovnice popisující tepelnou rovnováhu vodiče. Dále je v práci popsána a provedena simulace dynamického oteplení dvou kabelových vodičů. Tato simulace je poté porovnána s měřením dynamického oteplení, které bylo provedeno pomocí termokamery. Cílem této práce je zhodnotit, zda je možné použít výsledky simulace v praxi.

## **Klíčová slova**

dynamické oteplení vodiče, kabel, rezistivita, součinitel přestupu tepla, simulace, COMSOL, termokamera, měření

## **Abstract**

This bachelor's thesis is aimed at the dynamic heating of cable conductors. It describes how the dimensioning of the conductors is made. It also explains which basic parameters influence the heating of the conductors and which equation describes the heating. The thesis contains the dynamic heating simulation of the two cable conductors. The simulations are compared to the measurements performed by the thermal imaging camera. The purpose of the thesis is to evaluate the using of the simulation in a practice.

## **Key words**

Dynamic heating of conductor, cable, resistivity, heat transfer coefficient, simulation, COMSOL, thermal imaging camera, measurement

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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.

V Plzni dne 3.6.2013

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jaroslavu Šnajdrovi za umožnění vypracování této práce, za věnovaný čas a informace poskytnuté při konzultacích a také za pomoc při řešení problémů při práci s programem COMSOL a pomoc při měření s termokamerou. Firmě Kabex a.s. za poskytnutí kabelových vodičů potřebných pro měření. Dále děkuji své rodině za podporu během mého studia na vysoké škole.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>12</b>
<b>1 PROBLEMATIKA DYNAMICKÉHO ZATĚŽOVÁNÍ KABELU</b> .....	<b>13</b>
1.1 DIMENZOVÁNÍ VODIČŮ PODLE DOVOLENÉ PROVOZNÍ TEPLoty .....	13
1.1.1 Charakteristika vodiče .....	13
1.1.2 Charakteristika provozu .....	14
1.1.3 Charakteristika prostředí .....	14
1.1.4 Charakteristika uložení .....	16
<b>2 TEORETICKÝ ÚVOD</b> .....	<b>19</b>
2.1 ZÁKLADNÍ POJMY, DEFINICE A PARAMETRY POTŘEBNÉ PRO OTEPLENÍ .....	19
2.1.1 Práce a výkon elektrického proudu, Joulov zákon .....	19
2.1.2 Povrchový jev (skin efekt) .....	20
2.1.3 Konduktivita .....	23
2.1.4 Tepelná vodivost .....	24
2.1.5 Hustota .....	25
2.1.6 Měrná tepelná kapacita .....	25
2.1.7 Součinitel přestupu tepla .....	25
2.2 ODVOZENÍ ROVNICE POPISUJÍCÍ TEPELNOU ROVNOVÁHU VODIČE .....	27
2.2.1 Oteplení vodiče procházeného proudem .....	27
2.2.2 Oteplení při přerušovaném chodu .....	30
2.2.3 Krátkodobé oteplení .....	31
2.2.4 Výpočet oteplení izolovaného vodiče [8] .....	32
2.2.5 Kritický poloměr izolace .....	34
2.3 SILOVÉ KABELY .....	35
2.3.1 Materiál jader silových kabelů .....	35
2.3.2 Konstrukce jader [19] .....	36
2.3.3 Značení silových kabelů a vodičů [19][20] .....	36
2.4 ZPŮSOB MĚŘENÍ TEPLoty, SENZORY TEPLoty .....	38
2.4.1 Kovové odporové senzory teploty .....	38
2.4.2 Polovodičové odporové senzory teploty .....	40
2.4.3 Termoelektrické články .....	41
2.4.4 Bezdotykové měření teploty .....	42
<b>3 SIMULACE OTEPLENÍ JEDNODUCHÉHO KABELOVÉHO VODIČE</b> .....	<b>44</b>
3.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ .....	44
3.1.1 Úvod .....	44
3.1.2 Princip metody .....	44
3.2 PARAMETRY A PROVEDENÍ SIMULOVANÝCH KABELŮ .....	46
3.2.1 Jednožilový kabel CY .....	46
3.2.2 Jednožilový kabel AY .....	47
3.3 POPIS SIMULACE V PROGRAMU COMSOL .....	48
3.3.1 Model .....	49
3.3.2 Materiály .....	50
3.3.3 Síť .....	51
3.3.4 Elektromagnetické pole .....	52



3.3.5	<i>Výpočet závislosti hustoty ztrát na teplotě</i> .....	53
3.3.6	<i>Teplotní pole</i> .....	55
3.4	<b>VÝSLEDKY SIMULACE</b> .....	56
3.4.1	<i>Rozložení proudové hustoty</i> .....	56
3.4.2	<i>Rozložení ztrát</i> .....	58
3.4.3	<i>Výsledné oteplení vodičů</i> .....	58
3.4.4	<i>Porovnání oteplení pro všechna zatížení</i> .....	62
<b>4</b>	<b>MĚŘENÍ DYNAMICKÉHO OTEPLENÍ</b> .....	<b>64</b>
4.1	<b>POSTUP MĚŘENÍ</b> .....	64
4.2	<b>VÝSLEDKY MĚŘENÍ</b> .....	65
4.2.1	<i>Kabel CY, zatížení 45 A</i> .....	65
4.2.2	<i>Kabel CY, zatížení 52 A</i> .....	66
4.2.3	<i>Kabel CY, zatížení 63 A</i> .....	67
4.2.4	<i>Kabel AY, zatížení 200 A</i> .....	67
4.2.5	<i>Porovnání oteplení kabelů pro všechna zatížení</i> .....	68
<b>5</b>	<b>POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ A SIMULACE</b> .....	<b>70</b>
5.1	<b>KABEL CY, ZATÍŽENÍ 45 A</b> .....	70
5.2	<b>KABEL CY, ZATÍŽENÍ 52 A</b> .....	71
5.3	<b>KABEL CY, ZATÍŽENÍ 63 A</b> .....	71
5.4	<b>KABEL AY, ZATÍŽENÍ 200 A</b> .....	72
	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>73</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>74</b>
	<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.</b>

## Seznam symbolů a zkratk

$AY$	jednožilový kabel s hliníkovým jádrem	
$A$	Ochlazovací povrch vodiče	$m^2$
$\alpha_0$	součinitel přestupu tepla	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$\alpha$	lineární teplotní součinitel odporu	[-]
$c$	měrná tepelná kapacita	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$c_p$	měrná tepelná kapacita za stálého tlaku	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$c_v$	měrná tepelná kapacita za stálého objemu	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$CY$	jednožilový kabel s měděným jádrem	$CY$
$E$	elektrická intenzita	$V/m$
$f$	frekvence	$Hz$
$\gamma$	konduktivita	$S/m$
$h$	hloubka vniku	$m$
$I, i$	proud	$A$
$I_n$	jmenovitý proud	$A$
$I_z$	dovolený proud	$A$
$J$	proudová hustota	$A/m^2$
$l$	délka	$m$
$\lambda$	tepelná vodivost	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$\lambda_s$	součinitel. tepelné vodivosti suché látky	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$\lambda_v$	součinitel. tepelné vodivosti vlhké látky	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$m$	hmotnost	$kg$
$\mu$	permeabilita prostředí	$H/m$
$MKP$	metoda konečných prvků	
$\omega$	úhlový kmitočet proudu	$rad/s$
$P_p$	výpočtový výkon	$W$
$Q$	teplo	$J$
$R$	elektrický odpor	$\Omega$
$r$	poloměr	$m$
$\rho$	rezistivita	$\Omega.m$

---

$S$	plocha	$m^2$
$t$	čas	s
$T$	termodynamická teplota	K
$\tau$	časová konstanta	s
$\vartheta$	teplota	$^{\circ}C$
$\Delta\vartheta$	okamžité oteplení tělesa proti okolí	K
$\Delta\vartheta_{\infty}$	maximální oteplení	K
$\vartheta_z$	dovolená provozní teplota jader vodičů	$^{\circ}C$
$U$	tozdíl potenciálů, napětí	V
$V$	objem	$m^3$
$W$	práce	J

## Úvod

Přivedení elektrické energie k místu spotřeby se provádí prostřednictvím elektrického vedení. To je tvořeno vodičem, kterým je veden elektrický proud a izolací. Účel izolace je udržovat rozdíl napětí (potenciálů) mezi vodičem a okolím. Vodiče nejsou dokonalé (tj. supravodiče) a průchodem elektrického proudu vznikají ztráty a vodiče se zahřívají. Zahřívání je nutno zohlednit při dimenzování vodičů.

Tato bakalářská práce se zabývá dynamickým oteplením kabelových vodičů. Popisuje, jakým způsobem se použité vodiče v praxi dimenzují, které platné normy se používají pro dimenzování a jakým způsobem se vypočítává dovolený zatěžovací proud.

V této práci jsou také shrnuty a vysvětleny parametry, které mají vliv na oteplení vodiče. Důležitou součástí práce je také část, která popisuje odvození rovnice popisující tepelnou rovnováhu vodiče. Dále popisuje použité materiály, konstrukci a systém značení kabelových vodičů.

Třetí část se zabývá popisem metody konečných prvků a její použití při simulaci dynamického oteplení dvou jednožilových kabelových vodičů s plným jádrem a aplikace programu COMSOL při této simulaci.

V další části je popsáno měření oteplení, výsledné oteplení a použití termokamery při tomto měření. Poslední část práce se zabývá porovnáním výsledků simulace a výsledků měření a zkoumání rozdílů mezi nimi.

Cílem této práce je zhodnotit, zda je možné simulaci použít v praxi při navrhování vedení nebo rozvodů. V případě nepotvrzení simulace měřením provést diskusi nad odlišnostmi simulace a uvést důvody nepřesnosti simulace.

Současným světovým trendem je provozování vodičů podle dynamických podmínek okolí. Vodiče se proto mohou více zatěžovat než je uvedeno v normě. Tento způsob provozu vedení zlepšuje hospodárnost využití vedení. Simulace a její porovnání s měřením má za úkol dokázat možnost tohoto provozu vedení.

# 1 Problematika dynamického zatěžování kabelu

Vodiče se musí v provozních poměrech dimenzovat tak, aby:

- a) jejich provozní teplota nebyla vyšší, než je povoleno podle ČSN
- b) průřezy vodičů byly v hospodárných mezích
- c) byly vodiče dostatečně mechanicky pevné
- d) úbytek napětí ve vodičích byl ve stanovených mezích
- e) vodiče odolávaly dynamickým a tepelným účinkům zkratových proudů

Tato práce se zabývá oteplením vodiče, proto zde budu rozebírat pouze dimenzování podle přípustného oteplení.

## 1.1 Dimenzování vodičů podle dovolené provozní teploty

Z ekonomických a bezpečnostních důvodů nesmí oteplení vodičů dosáhnout velkých hodnot. Vysoké teploty vedou ke změně vlastností materiálů. Spoje vodičů zvyšují vlivem vyšší teploty svůj přechodový odpor. Izolace vlivem vyšší teploty stárne a znehodnocuje se. Proto se podle norem stanovuje nejvyšší dovolená trvalá provozní teplota  $\vartheta_{dov}$  a tím proud, kterým lze vodič trvale zatížit.

Provozní teplota  $\vartheta_z$  a tím i přípustné zatížení vodičů v normálních provozních stavech (tj. ustálená teplota) závisí na:

- a) charakteristice vodiče nebo kabelu
- b) charakteristice provozu
- c) charakteristice prostředí
- d) charakteristice uložení

### 1.1.1 Charakteristika vodiče

Základní charakteristikou vodičů je dovolená provozní teplota jader vodičů  $\vartheta_z$ . Je závislá na druhu izolace a jmenovitém napětí a je dána normativně v ČSN, viz Tab. 1.7. Další charakteristické veličiny jsou časové oteplovací konstanty potřebné pro dimenzování při krátkodobém nebo přerušovaném chodu nebo zatížení a činný odpor.

### 1.1.2 Charakteristika provozu

Základní charakteristikou provozu je proud  $I$  a jeho časový průběh. Při výpočtu tohoto proudu se za základ bere výpočtový výkon  $P_p$  a jeho účinník. Základní typické časové průběhy zatížení jsou:

- a) zatížení s malými a pomalými změnami tj. stálé zatížení
- b) krátkodobý chod
- c) krátkodobé zatížení
- d) přerušovaný chod
- e) přerušované zatížení

### 1.1.3 Charakteristika prostředí

Prostředí okolo vodiče má zásadní vliv na odvod tepla a tím i na dovolený jmenovitý proud  $I_n$ . Mezi charakteristiky prostředí patří:

- a) druh prostředí (voda, vzduch, půda)
- b) teplota prostředí [ $^{\circ}\text{C}$  nebo K]
- c) tepelný odpor půdy [ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$  nebo  $\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$  ]

Je třeba rozlišovat hodnoty základní a hodnoty maximální skutečné. Základní hodnoty jsou výchozími pro stanovení proudu  $I_n$ . Skutečné maximální hodnoty se pak použijí pro přepočet tohoto proudu na  $I_z$  pomocí přepočítávacích činitelů. Je-li např. teplota okolí vyšší než teplota základní (Tab. 1.2, Tab. 1.3) odvod tepla z vodiče je ztížen. Aby nebyla překročena teplota  $\vartheta_z$ , je potřeba proudovou zatížitelnost takového vodiče upravit. V opačném případě, pokud teplota okolí menší než základní, je možné proudovou zatížitelnost zvýšit.

Skutečná teplota okolí však není konstantní veličinou a mění se během roku i dne. Závisí na mnoha faktorech, a tudíž nelze tuto skutečnost pro dimenzování využít.

Podobné důsledky má i tepelný odpor půdy, kde je vodič uložen. Pokud je skutečný tepelný odpor větší než základní hodnota, je vodič méně ochlazován a je potřeba snížit zatížitelnost vodiče pod  $I_n$  a naopak. Tepelný odpor je také veličinou závislou na mnoha jiných faktorech. A těmito faktory jsou: typ půdy (písčítá, hlinitá, jílovitá), měrná hmotnost půdy, obsah vlhkosti aj.

Tab. 1.1 - Informativní hodnoty měrného tepelného odporu půdy různého složení a vlhkosti (tab. 52-NF8 z [1])

Půda nebo jiný materiál		Měrný tepelný odpor [K.m/W]
Půda mírně zvlhlá		
	jílovitá (8 - 12 % vlhkosti)	1,10
	hlinitá (4 - 8 % vlhkosti)	1,40
	píščita (2 - 5 % vlhkosti)	0,70
Půda vlhká		
	jílovitá (30 - 40 % vlhkosti)	0,70
	hlinitá (20 - 30 % vlhkosti)	0,75
	píščita (10 - 20 % vlhkosti)	0,50
	Černá zem (30 - 40 % vlhkosti)	0,45
	Žula	0,35
	Vápenec	0,60
	Křída	1,00
	Beton	0,80 - 1,1
	Zed' z vlhkých cihel	1,10
	Zed' ze suchých cihel	1,90
	Zed' z kamene	0,50

Tepelný odpor se mění se vzdáleností podél kabelu. Závisí na hloubce, na výšce spodní vody, intenzitě srážek, teplotě, nadmořské výšce. Závisí také na způsobu provozu, protože ztrátami v kabelu se ohřívá půda v jeho okolí a vysušuje se a tím roste tepelný odpor. Proto se pro dimenzování používá maximálních hodnot.

Tab. 1.2 - Přepočítávací součinitelé pro okolní teploty vzduchu odlišné od 20 °C (tab. 52-NF22 z [1])

Nejvyšší dov. prov. tep. jádra [°C]	Teplota prostředí [°C]									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
65	1,11	1,05	1	0,94	0,88	0,82	0,75	0,67	0,58	0,47
70	1,10	1,05	1	0,95	0,89	0,84	0,77	0,71	0,63	0,55
75	1,09	1,04	1	0,95	0,90	0,85	0,80	0,74	0,67	0,60
80	1,08	1,04	1	0,96	0,91	0,87	0,82	0,76	0,71	0,65
90	1,07	1,04	1	0,96	0,93	0,89	0,85	0,80	0,76	0,71

Tab. 1.3 - Přepočítávací součinitelé pro okolní teploty vzduchu odlišné od 30 °C (tab. 52-NF20 z [1])

Nejvyšší dov. pov. tep. jádra [°C]	Teplota prostředí [°C]									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
60	1,29	1,22	1,15	1,08	1	0,91	0,82	0,71	0,58	0,41
65	1,25	1,2	1,13	1,07	1	0,93	0,85	0,76	0,65	0,53
70	1,22	1,17	1,12	1,06	1	0,94	0,87	0,79	0,71	0,61
75	1,2	1,15	1,11	1,05	1	0,94	0,88	0,82	0,74	0,67
80	1,18	1,14	1,1	1,05	1	0,95	0,89	0,84	0,77	0,71
85	1,17	1,13	1,09	1,04	1	0,95	0,9	0,85	0,8	0,74
90	1,15	1,12	1,08	1,04	1	0,96	0,91	0,87	0,82	0,76
95	1,11	1,08	1,06	1,03	1	0,97	0,94	0,91	0,88	0,85

Tab. 1.4 - Přepočítávací součinitelé proudové zatížitelnosti pro půdu s různým měrným tepelným odporem (tab. 52-NF8 z [1])

Druh kabelu		Měrný tepelný odpor půdy [K.m/W]							
		0,4	0,6	0,7	0,8	1	1,5	2	2,5
Celoplastové kabely		1,1	1,05	1	0,96	0,9	0,76	0,71	0,64
Kabely s papírovou izolací a kovovým pláštěm	1 kV	1,16	1,05	1	0,96	0,89	0,76	0,67	0,62
	6 kV	1,14	1,05	1	0,96	0,9	0,78	0,69	0,63
	10 kV								
Trojplášťové kabely 22 a 35 kV		1,09	1,04	1	0,97	0,92	0,82	0,74	0,68
Jednožilové kabely 22 a 35 kV		1,14	1,05	1	0,96	0,9	0,78	0,69	0,63

### 1.1.4 Charakteristika uložení

Charakteristika uložení je způsob uložení vodičů. Zda jsou uloženy přímo v zemi, ve tvárnících, v kabelových kanálech různých typů, vodorovný nebo svislý způsob uložení, počet vodičů a jejich seskupení. Tyto vlastnosti mají vliv na ochlazování vodiče a tím i na odvod tepla. Například pokud uložíme několik vodičů vedle sebe (Tab. 1.6), dochází k jejich vzájemnému tepelnému ovlivňování. Při svislém uložení (Tab. 1.5) stoupá teplý vzduch vzhůru po povrchu vodiče a tím se zhoršuje jeho ochlazování. Proto je bohužel možné vodiče zatěžovat menším proudem než je  $I_n$ , jinak by došlo k překročení teploty  $\vartheta_z$ . K výpočtu výsledného dovoleného proudového zatížení se používají přepočítávací činitele.

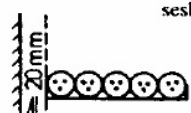
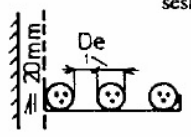
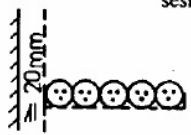
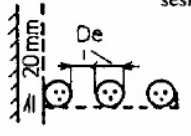

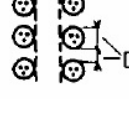


Tab. 1.5 - Přepočítávací součinitelé trvalé proudové zatížitelnosti pro kabel uložený jednotlivě ve svislé poloze (tab. 52-NF34 z [1])

Poměr h/D	Přepočítací součinitel
do 20	0,95
od 20 do 40	0,9
nad 40	0,85

h - vzdálenost mezi sousedními přichytkami  
 D - průměr kabelu

Tab. 1.6 - Přepočítávací součinitelé proudové zatížitelnosti při seskupení několika vícežilových kabelů v jedné vrstvě na vzduchu (tab. 52-NF29 z [1])

Způsob uložení podle tab. 52-B2		Počet kabelů							
		Počet lávek	1	2	3	4	6	9	
Neperforované lávky (poznámka 3)	H	 seskupené těsně	1	0,95	0,85	0,80	0,75	0,70	0,70
			2	0,95	0,85	0,75	0,75	0,70	0,65
			3	0,95	0,85	0,75	0,70	0,65	0,60
	H	 seskupené volně	1	1,00	0,95	0,95	0,95	0,90	–
			2	0,95	0,95	0,90	0,90	0,85	–
			3	0,95	0,95	0,90	0,90	0,85	–
Perforované lávky (poznámka 3)	J	 seskupené těsně	1	1,00	0,90	0,80	0,80	0,75	0,75
			2	1,00	0,85	0,80	0,75	0,75	0,70
			3	1,00	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65
	J	 seskupené volně	1	1,00	1,00	1,00	0,95	0,90	–
			2	1,00	1,00	0,95	0,90	0,85	–
			3	1,00	1,00	0,95	0,90	0,85	–
Svislé perforované lávky (poznámka 4)	K	 seskupené těsně	1	1,00	0,90	0,80	0,75	0,75	0,70
			2	1,00	0,90	0,80	0,75	0,70	0,70
	K	 seskupené volně	1	1,00	0,90	0,90	0,90	0,85	–
			2	1,00	0,90	0,90	0,85	0,85	–

Při dimenzování provozní teploty je potřeba dodržovat  $I_p < I_z$ , kde  $I_p$  je provozní proud.

Dovolené zatížení vodiče:

$$I_z = k_1 \cdot k_2 \dots k_i \cdot I_n \tag{1.1}$$

$I_n$  je jmenovité proudové zatížení vodiče [A] pro daný typ a průřez.

$k_1, k_2 \dots k_i$  jsou přepočítávací součinitelé pro příslušný vodič nebo kabel, pro danou teplotu prostředí, pro dané podmínky a způsob uložení, které se liší od základního způsobu uložení. Jsou uvedeny v Tab. 1.3, Tab. 1.4, Tab. 1.5, Tab. 1.6 a v [3]

Tab. 1.7 - Dovolené provozní a maximální teploty vodičů pro různé druhy izolace (tab. 43-NA1 z [2])

Druh izolace vodiče	Zkratka názvu	Značka	Základní teplota okolního vzduchu	Nejvyšší dovolená provozní teplota	Nejvyšší dovolená teplota	
					při proudovém přetížení	při zkratu
Polyvinylchlorid měkčený	PVC	y	30	70	120	140-160
Elastomery na bázi přírodního nebo syntetického kaučuku	guma pryž kaučuk	G	30	60-120	120-150	200-250
do 10 kV		G	30	60		150
Etylenpropylenová pryž	PER		30	90	130	250
Polyetylén	PE	E	30	70		130-150
Zesítěný polyetylén	XE	X	30	90	120	250
Polytetrafluoretylén	PTFE		90	200	300	300
propylén	FEP		90	200	250	250
Napuštěný papír						
normální		N	30	80	120	200
nemigrující		M	30	80	120	300
do 6 kV		N	30	80		200
do 10 kV		N	30	75		150
22 kV		N	30	70		150
35 kV		N	30	65		150
Skleněné vlákno			90	130	180	300
Holé vodiče plné nebo slaněné Al nebo Cu			30	80	180	
mechanicky zatížené			30	80	180	300
mechanicky nezatížené			30	80	180	200
Slitina Al			30	80	150	170
Ocel mech. zatížená			30	80	180	250
Ocel mech. nezatížená			30	80	180	300

Přepočítávací součinitelé pro různé způsoby uložení, jmenovitý dovolený proud  $I_n$  a jiné přepočítávací součinitelé jsou podrobně uvedeny v [3].

## 2 Teoretický úvod

### 2.1 Základní pojmy, definice a parametry potřebné pro oteplení

#### 2.1.1 Práce a výkon elektrického proudu, Joulův zákon

Při průchodu elektrického proudu  $i(t)$  vodičem konají síly elektrického pole práci, která se vypočítá podle vztahu:

$$W = \int_A^B Q_0 \vec{E} \cdot \vec{dr} = Q_0 \cdot U_{AB} \quad [\text{J}] \quad (2.1)$$

Posune-li se za čas  $dt$  průřezem vodiče náboj  $i(t)dt$ , je práce  $dW$  sil elektrického pole dána vztahem:

$$dW = ui \cdot dt \quad (2.2)$$

kde  $u$  je rozdíl potenciálů (napětí) na vodiči.

Tato práce se přemění na teplo  $dQ$ . Vodič se tedy průchodem proudu zahřívá. Výsledné teplo, které se uvolní při průchodu proudu  $i(t)=I$  vodičem o odporu  $R$  v časovém intervalu  $(t_1, t_2)$ , dostaneme integrací:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} ui \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} Ri^2(t) \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} RI^2 \cdot dt = RI^2 \Delta t \quad [\text{J}] \quad (2.3)$$

Tento vztah se nazývá Joulův zákon a platí i pro časově proměnné proudy  $i(t)$

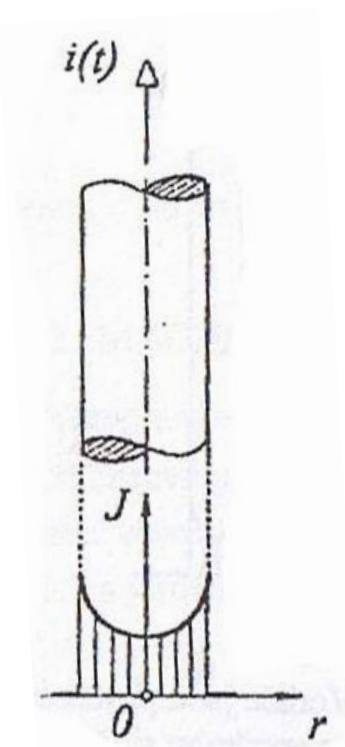
Výkon sil elektrického pole při průchodu proudu  $I$  mezi dvěma body o potenciálním rozdílu  $U$ , tj. elektrický výkon spotřebovaný na odporu  $R$  vodiče (tzv. Joulovy ztráty), je dán vztahem (tzv. Joulův zákon) [11]

$$P = \frac{dW}{dt} = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R} \quad (2.4)$$

### 2.1.2 Povrchový jev (skin efekt)

Povrchový jev, neboli skinefekt, je další faktor, který ovlivňuje oteplení vodiče. Projevuje se u vodičů, kterými protéká časově proměnný proud  $i(t)$ . Proudová hustota se ve vodiči rozloží nerovnoměrně, jak můžeme vidět na

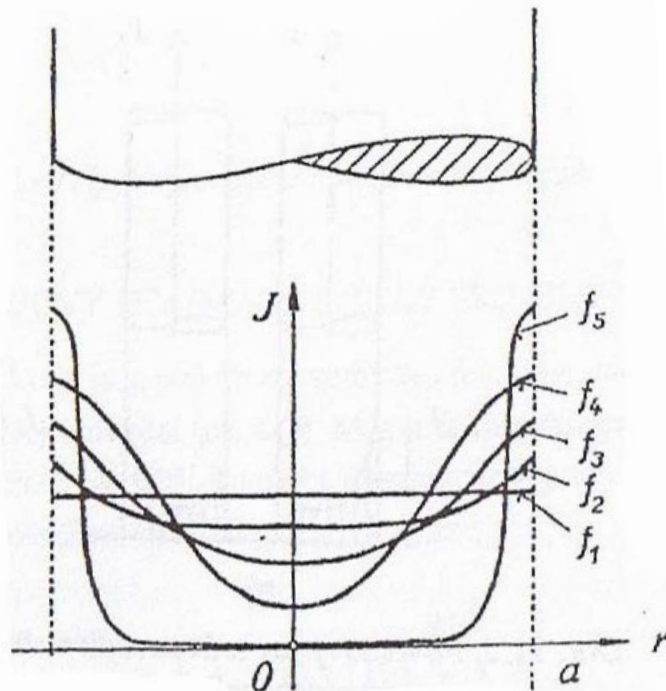
Obr. 2.1. S rostoucí hloubkou pod povrchem vodiče proudová hustota klesá. Také dochází k jejímu časovému posuvu.



Obr. 2.1 - Rozložení proudové hustoty pod vlivem skin efektu [4]

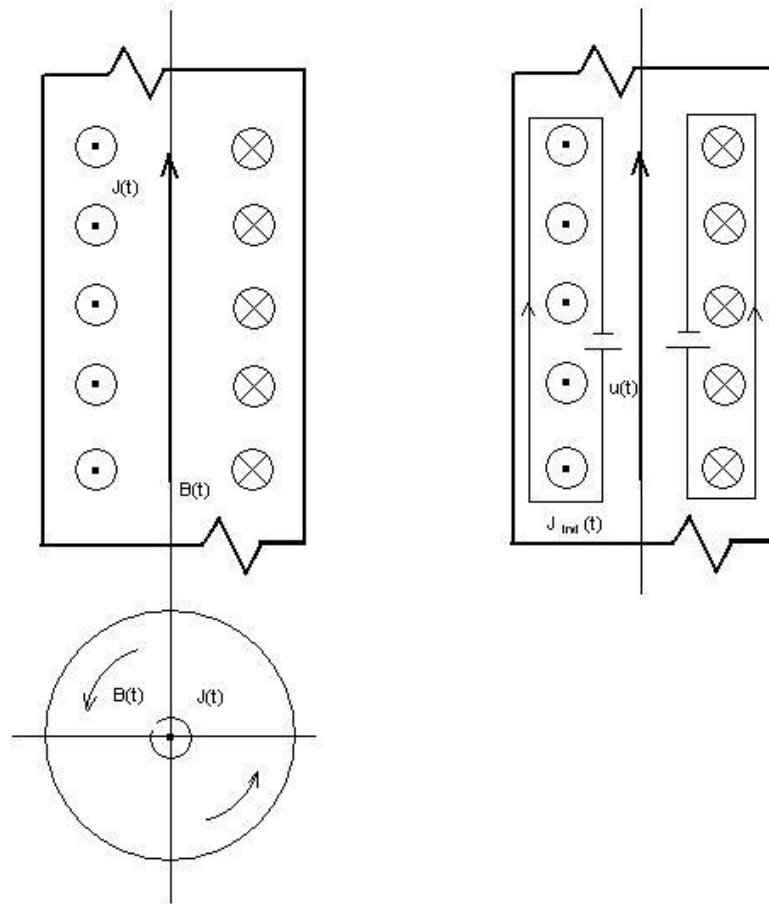
Pokud by se proud v čase neměnil, tak by se proudová hustota rozložila ve vodiči rovnoměrně. Pokud bude časová změna proudu větší, povrchový jev bude také větší. Je-li proud harmonicky proměnný, je povrchový jev výraznější, čím vyšší je jeho kmitočet. Přitom může být fázový posuv proudové hustoty mezi hodnotou na povrchu a uvnitř i  $180^\circ$ . To znamená, že v určitém okamžiku prochází proudová hustota na povrchu jedním směrem a v jisté hloubce pod povrchem směrem opačným. Při vysokých kmitočtech je povrchový jev nejvýraznější. Proud se koncentruje do tenké povrchové vrstvy (Obr. 2.1), zatím co vnitřkem vodiče proud skoro neprochází. Vodič se tak chová jako by bylo dutý. Povrchový jev zvyšuje odpor vodiče. Na Obr. 2.2 je rozložení proudové hustoty pro stejnosměrný proud a pro

harmonicky proměnné proudy různých frekvencí ( $f_2 < f_3 < f_4 < f_5$ ).



Obr. 2.2 - Rozložení proudové hustoty při různých frekvencích.[4]

Budeme-li uvažovat vodič kruhového průřezu protékáný časově proměnným proudem, zjistíme, že proudová hustota, jež je funkcí času, vyvolává uvnitř vodiče magnetickou indukci (orientovanou podle pravidla pravé ruky). Vzniklý magnetický tok je rovněž funkcí času a jeho časová změna vytváří ve smyčkách podle indukčního zákona elektromotorickou sílu, která touto smyčkou začne protlačovat proud. Tento proud má podle indukčního zákona směr opačný ke změnám, které jej způsobují. Takto indukovaný proud má proto ve vnitřních vrstvách směr, který působí proti proudu protékajícímu vodičem, a v povrchových vrstvách směr s tímto proudem shodný.



Obr. 2.3 - Základní schéma vodiče protékaného proudem a vznik indukovaného proudu v důsledku časově proměnného magnetického toku

Jak již bylo uvedeno, elektrický povrchový jev zvětšuje odpor vodiče. Odpor vodiče zvětšený vlivem skinefektu se nazývá efektivní odpor. Rostoucí odpor vodiče vlivem elektrického povrchového jevu znamená zvýšení Joulových ztrát, což vede jednak k zmenšení účinnosti přenosu elektrické energie a jednak k nežádoucímu ohřívání vodiče a to zejména u vysokofrekvenčních zařízení. Povrchový jev je charakterizován hloubkou vniku:

$$h = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}} \quad (2.5)$$

$\omega$  - úhlový kmitočet proudu

$\mu$  - permeabilita prostředí

$\gamma$  - měrná elektrická vodivost

Hloubka vniku je vzdálenost od rozhraní, v níž klesne amplituda na  $e^{-1}$  (tj. na 36,8%) své hodnoty na rozhraní.

V praxi se nejvíce jako vodič proudu používá měď (Cu) nebo hliník (Al). Při běžné průmyslové frekvenci (v České republice) 50 Hz je hloubka vniku přibližně 10 mm a skin efekt se výrazněji projeví u vodičů, které mají poloměr větší než 10 mm. [4][6]

Tab. 2.1 - Hloubka vniku při různých frekvencích, v různých materiálech

Hloubka vniku $\delta$ [mm]							
$f$	$\gamma_{Cu}=5,7.107$ [S/m]	$\gamma_{Al}=3,7.107$ [S/m]	$\gamma_{Fe}=1,4.107$ [S/m]				
	$\mu_r=1$	$\mu_r=1$	$\mu_r=50$	$\mu_r=100$	$\mu_r=500$	$\mu_r=1000$	$\mu_r=5000$
50	9,43	11,7	2,69	1,9	0,85	0,6	0,27
100	6,67	8,27	1,9	1,35	0,6	0,43	0,19
500	2,98	3,7	0,85	0,6	0,27	0,19	0,09
$10^3$	2,11	2,62	0,6	0,43	0,19	0,13	0,06
$10^4$	0,67	0,83	0,19	0,13	0,06	0,043	0,019
$10^5$	0,21	0,26	0,06	0,043	0,019	0,013	0,006
$10^6$	0,07	0,08	0,02	0,013	0,006	0,004	0,002

### 2.1.3 Konduktivita

Konduktivita neboli měrná elektrická vodivost je fyzikální veličina. Značí se  $\gamma$  a její jednotkou je [S/m]. Charakterizuje, jak je daná látka schopná vést elektrický proud. Pokud má látka vysokou konduktivitu, znamená to, že daná látka je dobrý elektrický vodič. Naopak pokud má látka nízkou konduktivitu, je to látka špatně elektricky vodivá. Její hodnoty se mění v rozmezí víc než dvaceti řádů. Vodiče mají konduktivitu v rozmezí  $10^6$  až  $10^8$  S/m zatímco nevodíče mohou mít konduktivitu i menší než  $10^{-14}$  S/m.

V praxi se také můžeme setkat s pojmem rezistivita, která se také nazývá měrný elektrický odpor. Rezistivita je převrácenou hodnotou konduktivity a značí se  $\rho$  a její jednotkou je [ $\Omega \cdot m$ ].

Konduktivita i rezistivita jsou teplotně závislé. Nad Debyeho teplotou (ležící pro většinu kovů v rozmezí 100 až 400 K) roste odpor u kovů přibližně lineárně s teplotou.

$$R_{\vartheta} = R_0(1 + \alpha\vartheta) \quad (2.6)$$

$\alpha$  - je lineární teplotní součinitel odporu a  $\vartheta$  je teplota v  $^{\circ}C$

U většiny kovů roste měrná elektrická vodivost mírně se stoupajícím tlakem. Rezistivita má významnou roli při výpočtu odporu vodiče. Vzhledem, k tomu, že oteplení vodiče je přímo závislé na jeho odporu (a také na proudu, který jím prochází), je rezistivita jedním z hlavních faktorů při oteplení vodiče. [7]

#### 2.1.4 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost je vlastnost látky projevující se tím, že se jí může sdílet teplo vedením. Je to fyzikální vlastnost látky. Udává množství tepla, které přejde vedením jednotkovou plochou při jednotkovém teplotním spádu (1 °C/1 m). Značí se  $\lambda$  a její jednotkou je [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>].

Tepelná vodivost závisí na stavu látky. Důležité faktory jsou: struktura, hustota, teplota, vlhkost, tlak. Tepelná vodivost tuhých látek, které mají kompletní krystalickou strukturu, s rostoucí teplotou klesá. Patří mezi ně kovy, zvláště čisté kovy, např. stříbro, měď, neboť u nich vedení tepla uskutečňují hlavně volné elektrony. Proto kovy s velkou elektrickou vodivostí mají současně i velkou tepelnou vodivost. Tuto závislost vysvětluje Wiedemannův-Franzův zákon, který vyjadřuje, že podíl tepelné vodivosti  $\lambda$  a (elektrické) konduktivity  $\gamma$  kovů je za dané termodynamické teploty  $T$  pro všechny kovy při nepřilíš nízkých teplotách přibližně stejný. Znění Wiedemannův-Franzova zákona:

$$\frac{\lambda}{\gamma} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e}\right)^2 T = KT \quad (2.7)$$

Tepelná vodivost kovů se pohybuje v rozmezí 2,3 - 420 [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]. Ostatní pevné látky kromě tuhy mají podstatně menší součinitel tepelné vodivosti než kovy. Nejmenší součinitel tepelné vodivosti mají plyny. Proto také pevné látky, v nichž je velký počet malých mezer nebo dutin (pórů) obsahujících vzduch, vedou teplo velmi špatně. Používají se jako dobré tepelné izolanty, například skelná nebo čedičová vlna, korek apod. Jejich tepelná vodivost  $\lambda$  je menší než 0,25 [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]. Tepelná vodivost takových látek však značně závisí na jejich vlhkosti. Rozlišuje se u nich proto součinitel tepelné vodivosti suché látky  $\lambda_s$  a součinitel tepelné vodivosti vlhké látky  $\lambda_v$ . [7]



### 2.1.5 Hustota

Hustota je fyzikální veličina, která vyjadřuje hmotnost objemové jednotky látky. Značí se  $\rho$  a její jednotka je  $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$ .

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (2.8)$$

Hustota většiny látek s rostoucí teplotou klesá. Hustota kapalin a plynů se s rostoucí teplotou snižuje a s rostoucím tlakem zvyšuje. [7]

### 2.1.6 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita (ve starší literatuře označováno jako měrné teplo nebo specifické teplo) je množství tepla, které je potřeba k ohřátí 1 kg látky o jeden teplotní stupeň. Značí se  $c$  a její jednotkou je  $[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$  nebo  $[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}]$ . Měrná tepelná kapacita pevných a kapalných látek se mění s teplotou. U plynů a par je situace složitější. Měrná tepelná kapacita závisí nejen na teplotě, ale také na tlaku a zejména na podmínkách, za kterých se teplo plynu předává. Podle toho rozeznáváme měrnou tepelnou kapacitu  $c_p$  za stálého tlaku a měrnou tepelnou kapacitu  $c_V$  za stálého objemu. [7]

$$c = \frac{Q}{m\Delta t} \quad [\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}] \quad (2.9)$$

### 2.1.7 Součinitel přestupu tepla

Přestup tepla je fyzikální jev, při kterém dochází přestupu tepla z jedné látky do látky druhé (látky s různou teplotou). Vyjadřujeme jej součinem rozdílu teploty tělesa  $T_s$  a tekutiny  $T$  a součinitele přestupu  $\alpha_0$ . V praxi má hlavní význam přestup tepla prouděním při obtékání tuhých těles tekutinou. Teplo se přenáší z tuhého tělesa na tekutinu, případě vyšší teploty tuhého tělesa než je teplota tekutiny, nebo naopak v případě nižší teploty tělesa. Celkové teplo  $Q$  předané z tuhého tělesa tekutině je vyjádřeno tzv. Newtonovým vztahem:

$$Q = \alpha_0 S (T_s - T) \quad [\text{J}] \quad (2.10)$$

$S$  - Plocha přenosu tepla  $[\text{m}^2]$

$T_s$  - Teplota povrchu tuhého tělesa

$T$  - Teplota tekutiny

$\alpha_0$  - Součinitel přestupu tepla, Má jednotku [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ].

Součinitel přestupu tepla  $\alpha_0$  je experimentálně zjištěný parametr, který závisí na několika proměnných.

Jedním z parametrů je charakter proudění a způsob jeho vzniku. Jeden způsob vzniku proudění je volné proudění, které vzniká v důsledku samotného rozdílu teplot mezi stěnou a kapalinou. Část tekutiny, která je nejbližší k tuhému tělesu, se ohřívá, tím se snižuje její hustota a tato teplejší část se pohybuje proti směru gravitačního pole. Druhým způsobem vzniku proudění je působením vnějších sil (např. čerpadlem, ventilátorem).

Dále se také proudění dělí podle druhu proudění. Rozlišujeme dva druhy a to laminární a turbulentní. Při laminárním proudění se části tekutiny pohybují bez promíchávání. Vzhledem k tomu že součinitele teplotní vodivosti tekutin jsou malé, je i součinitel přestupu  $\alpha_0$  malý. Druhý způsob proudění je proudění turbulentní, při kterém se částice tekutiny pohybují neuspořádaně. Toto proudění vznikne při překročení kritického poměru mezi setrvačnými a třecími silami z laminárního proudění. Přenos energie při turbulentním proudění je větší než při laminárním proudění proto součinitel přestupu tepla  $\alpha_0$  je při turbulentním proudění větší než při proudění laminárním.

Další proměnná, která ovlivňuje součinitel přestupu tepla  $\alpha_0$  je samotný druh tekutiny, která obklopuje tuhé těleso. Přenos tepla ovlivňují tepelně fyzikální vlastnosti tekutin. Jsou to: tepelná vodivost  $\lambda$ , teplotní vodivost  $a$ , měrná tepelná kapacita  $c$ , hustota  $\rho$ , viskozita  $\eta$ .

Na součinitel přestupu tepla  $\alpha_0$  má vliv i samotný tvar, typ a uspořádání povrchu. Součinitel je různý i pro podélné, příčné a šikmé obtékání povrchu. Z předchozích odstavců je zřejmé, že součinitel přestupu tepla  $\alpha_0$  je funkcí mnoha proměnných:

$$\alpha_0 = f(w, \rho, \beta, \Delta T, c, \eta, \lambda, L, \dots) \quad (2.11)$$

Z tohoto důvodu je hodnota součinitele přestupu tepla  $\alpha_0$  obvykle určována experimentálně, protože její analytické vypočtení vyžaduje zjednodušování. [8][12]

Tab. 2.2 - Typické hodnoty součinitele přestupu tepla [8]

Typ proudění	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> .K]
Volné proudění plynů	2 -25
Volné proudění kapalin	10 -1000
Nucené proudění plynů	25 -250
Nucené proudění kapalin	50 -20000
Var a kondenzace	2500 -100000

## 2.2 Odvození rovnice popisující tepelnou rovnováhu vodiče

### 2.2.1 Oteplení vodiče procházeného proudem

Prochází-li úsekem dlouhého vodiče s odporem  $R$  [ $\Omega$ ] elektrický proud  $I$  [A], pak v každém časovém okamžiku  $dt$  vznikají ve vodiči tepelné ztráty:

$$dQ = RI^2 dt \quad (2.12)$$

Toto teplo se dělí na dvě části. Teplo které se odvede ochlazováním ve stejné době do okolí. Je to množství  $\alpha_0 A \Delta\vartheta dt$ .

- $\alpha_0$  [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] - Součinitel přestupu tepla
- $A$  [m<sup>2</sup>] - Ochlazovací povrch vodiče
- $\Delta\vartheta$  [K] - Okamžité oteplení tělesa proti okolí

Druhá část tepla v tělese zůstává a zvyšuje jeho teplotu o  $d\vartheta$ . Teplo k tomu spotřebované určuje vztah  $cV d\vartheta$ .

- $c$  [J/m<sup>3</sup>.K] - Objemová tepelná kapacita uvažovaného úseku vodiče
- $V$  [m<sup>3</sup>] - Objem úseku vodiče

Platí rovnice:

$$RI^2 = \alpha_0 A \Delta\vartheta dt + cV d\vartheta \quad (2.13)$$

Rovnici řešíme pomocí separace proměnných

$$dt = \frac{cV}{RI^2 - \alpha_0 A \Delta\vartheta} d\vartheta \quad (2.14)$$

$$t = -\frac{cV}{\alpha_0 A} \ln \left[ \frac{RI^2}{cV} - \frac{\alpha_0 A \Delta\vartheta}{cV} \right] + K \quad (2.15)$$

Integrační konstantu  $K$  určíme z počáteční podmínky v okamžiku  $t=0$  je také oteplení  $\Delta\vartheta = 0$

$$K = \frac{cV}{\alpha_0} \ln \frac{RI^2}{cV} \quad (2.16)$$

Po dosazení konstanty  $K$  je výsledné řešení rovnice (2.15), pak

$$\Delta\vartheta = \frac{RI^2}{\alpha_0 A} \left[ 1 - e^{\left(\frac{-\alpha_0 A}{cV} t\right)} \right] \quad (2.17)$$

Zavedeme označení

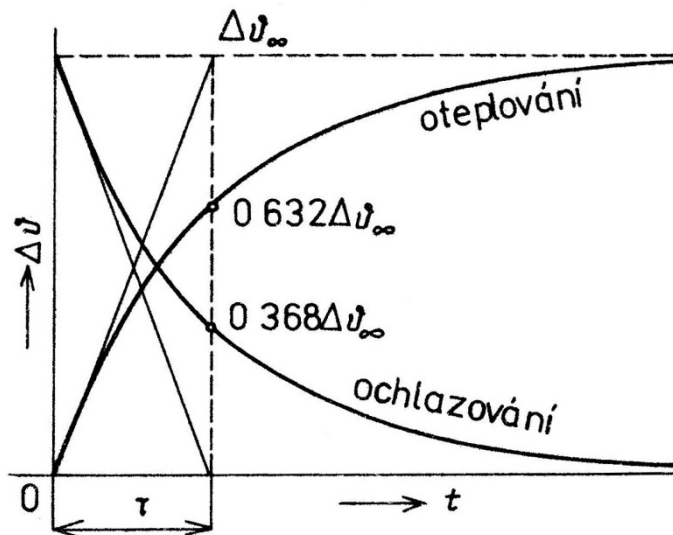
$$\Delta\vartheta_\infty = \frac{RI^2}{\alpha_0 A} \quad (2.18)$$

$$\tau = \frac{cV}{\alpha_0 A} \quad (2.19)$$

A dostaneme rovnici

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_\infty \left[ 1 - e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} \right] \quad (2.20)$$

Křivka časového průběhu oteplení má exponenciální charakter. Z počáteční nulové hodnoty narůstá stále pomaleji, až se za dobu  $t \rightarrow \infty$  ustálí na hodnotě maximálního oteplení  $\Delta\vartheta_\infty$ . Časovou konstantu  $\tau$  lze přitom definovat jako dobu, za kterou by těleso dosáhlo ustáleného oteplení  $\Delta\vartheta_\infty$ , kdyby se všechno uvolněné teplo spotřebovalo jen na zvyšování teploty vodiče, tj. kdyby bylo  $\alpha_0 = 0$ .



Obr. 2.4 - Oteplovací a ochlazovací charakteristika[14]

Z rovnice (2.20) také plyne, že za dobu  $t = \tau$  od začátku průchodu proudu  $I$  dosáhne vodič oteplení:

$$\Delta\vartheta_{\tau} = \Delta\vartheta_{\infty}(1 - e^{-1}) = 0,623\Delta\vartheta_{\infty} \quad (2.21)$$

Časová konstanta  $\tau$  není konstanta v pravém slova smyslu. Součinitel přestupu tepla  $\alpha_0$  je mírně závislý na oteplení a stejně tak se může měnit i objemová tepelná kapacita  $c$ . Proto většinou měřená oteplovací křivka nesouhlasí přesně s křivkou vypočtenou.

Prochází-li stále stejný proud vodičem po velmi dlouho dobu, těleso dosáhne teplotně ustáleného stavu. V ustáleném stavu je

$$\frac{\Delta\vartheta}{dt} = 0, \quad \Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\infty} \quad (2.22)$$

takže rovnice (2.13) nabude tvaru

$$RI^2 = \alpha_0 A \Delta\vartheta dt \quad (2.23)$$

Dosažením tohoto nejvyššího možného oteplení povrchu  $\Delta\vartheta_{\infty}$  za daných podmínek nastává tepelná rovnováha. Veškeré teplo vznikající ve vodiči se jeho povrchem předává do okolí (zpravidla do ovzduší). [6][14]

### 2.2.2 Oteplení při přerušovaném chodu

Pokud přerušíme obvod, proud obvodem přestane procházet  $I=0$ . Protože předchozím průchodem proudu ohřátý přístroj předává akumulované teplo dále do okolí, přístroj se ochlazuje a jeho teplota klesá. Základní rovnice (2.13) má nyní tvar:

$$0 = \alpha_0 A \Delta\vartheta dt + cV d\vartheta \quad (2.24)$$

Provedeme separaci proměnných a rovnici integrujeme

$$t = -\frac{cV}{\alpha_0 A} \ln \frac{\Delta\vartheta}{\Delta\vartheta_1} + B, \quad (\Delta\vartheta_1 = 1 \text{ K}) \quad (2.25)$$

Integrační konstantu  $B$  určuje opět počáteční podmínka

$$t = 0, \Delta\vartheta = \Delta\vartheta_\infty \quad (2.26)$$

$$B = \frac{cV}{\alpha_0 A} \ln \frac{\Delta\vartheta}{\Delta\vartheta_1} \quad (2.27)$$

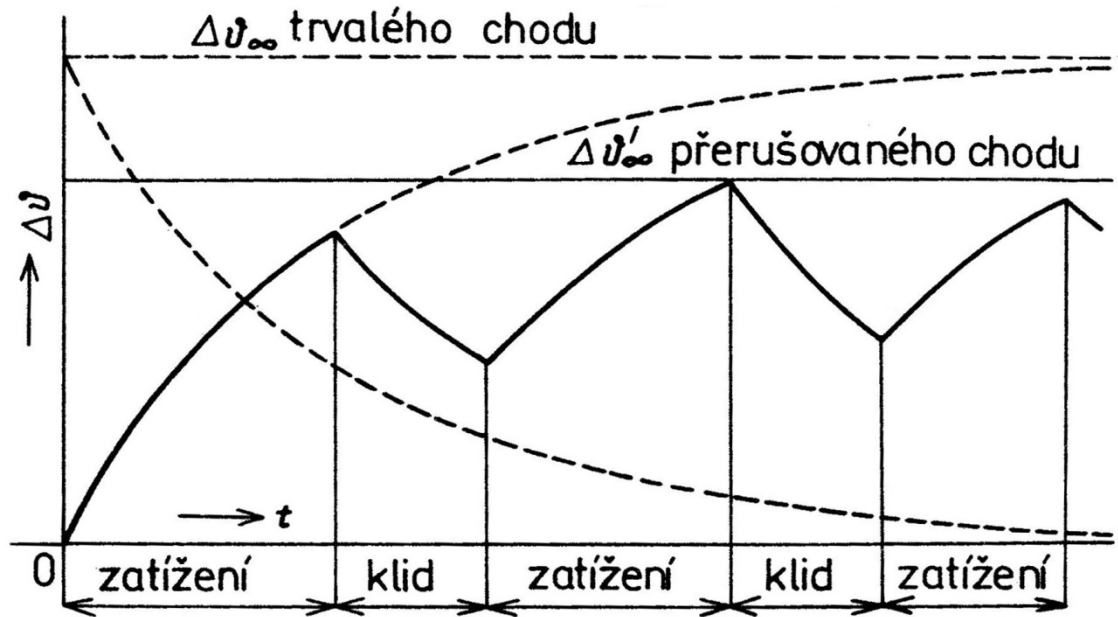
Po dosazení a úpravě řešení rovnice (2.32)

$$t = -\frac{cV}{\alpha_0 A} \ln \frac{\Delta\vartheta}{\Delta\vartheta_1} \quad (2.28)$$

Odtud oteplení

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_\infty e^{-\frac{\alpha A t}{cV}} = \Delta\vartheta_\infty e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.29)$$

Protože časová konstanta  $\tau$  je opět určena vztahem (2.19), je ochlazovací exponenciála (na Obr. 2.5 nakreslena přerušovaně) křivkou zrcadlovou ke křivce oteplovací.[6][14]



Obr. 2.5 - Oteplení při přerušovaném chodu [14]

### 2.2.3 Krátkodobé oteplení

Pokud prochází vodičem proud po dobu kratší než  $0,2 \tau$ , můžeme zanedbat odvod tepla do okolí a veškeré teplo vzniklé ve vodiči se využije na zvýšení teploty vodiče. Rovnice (2.20) se zjednoduší na vztah:

$$RI^2 = cVd\vartheta \quad (2.30)$$

Integrací při vstupní podmínce  $t = 0$ ,  $\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{kd} = 0$  dostáváme pro velikost krátkodobého oteplení  $\Delta\vartheta_{kd}$  za dobu  $t_{kd}$  vztah

$$\Delta\vartheta_{kd} = \frac{RI^2}{cV} t_{kd} \quad (2.31)$$

Jde-li o vodič průřezu  $S$  [m<sup>2</sup>] a délky  $l$  [m], lze rovnici (2.31) upravit na

$$\Delta\vartheta_{kd} = \frac{\rho l I^2}{c l S^2} t_{kd} = \frac{\rho}{c} \left( \frac{l}{S} \right)^2 t_{kd} = \frac{\rho J^2}{c} t_{kd} \quad (2.32)$$

S rovnicí (2.31) počítáme pouze tehdy, pokud jde o nepravidelné těleso, u něhož nacházíme nejmenší průřez, kterým prochází celý proud. Nejčastěji používáme rovnici (2.32), v níž se nachází údaj rezistivity  $\rho$  [ $\Omega \cdot \text{m}$ ] a proudové hustoty  $J$  [ $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ]. V tomto případě počítáme oteplení v jediném průřezu. Jde-li o vodič konstantního průřezu po celé délce, dostáváme oteplení pro celé těleso. Mění-li se průřez, počítáme oteplení v místě nejmenšího průřezu, tj. v místě největší proudové hustoty a největšího oteplení.

Krátkodobý ohřev nastává při přechodném stavu nebo při zkratu. Obě rovnice (2.31) a (2.32), platí jen pro případ, kdy známe efektivní hodnotu proudu  $I$  během doby ohřevu  $t_{kd}$ . Mění-li se velikost proudu s časem, musíme rovnici zpřesnit náhradou:

$$I^2 t_{kd} = \int_0^{t_{kd}} i^2(t) dt \quad (2.33)$$

Nejnepříznivější je případ zkratu po dlouhodobém průchodu jmenovitého proudu, kdy krátkodobé oteplení navazuje na oteplení jmenovitým proudem. Výsledná teplota proudové dráhy  $\vartheta_{kd}$  je pak součet teploty okolí  $\vartheta_0$ , oteplení jmenovitým proudem  $\Delta\vartheta_\infty$  a oteplením krátkodobého  $\Delta\vartheta_{kd}$ . [6][14]

$$\vartheta_{kd} = \vartheta_0 + \Delta\vartheta_\infty + \Delta\vartheta_{kd} \quad (2.34)$$

## 2.2.4 Výpočet oteplení izolovaného vodiče [8]

Mějme vodič o poloměru  $r_1$  [m] a délce  $l$  [m]. Je obalen izolací o tloušťce  $d$  [m] a má tepelnou vodivost  $k$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ]. Vodič je protékán proudem  $I$  [A] a má odpor  $R$  [ $\Omega$ ]. Izolovaný vodič je vystaven mediu o teplotě  $T_\infty$  [ $^\circ\text{C}$ ] a součiniteli přestupu tepla  $\alpha_0$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ].

Budeme předpokládat, že tepelný přenos je v ustáleném stavu. Přenos tepla je jednorozměrný a teplotní symetrie je středová. Také budeme uvažovat, že tepelné vodivosti jsou neměnné. Tepelný odpor mezi vodičem a izolací je zanedbatelný.

Teplo je vytvářeno ve vodiči a jeho teplota roste jako výsledek odporového ohřevu. Předpokládáme, že teplo je vytvářeno a rozvedeno rovnoměrně do vodiče a je odvedeno do okolního prostředí v radiálním směru. V ustáleném stavu je tepelný přenos rovný teplu generovanému ve vodiči.

$$Q = RI^2 \quad [\text{W}] \quad (2.35)$$



Pro výpočet oteplení izolovaného vodiče je nutné vytvořit tzv. tepelnou síť. Tepelná síť pro tento problém obsahuje odpor vedení izolace a odpor proudění pro vnější povrch (tep. síť je znázorněna na Obr. 2.6). Hodnoty těchto odporů se vypočítají podle následujících vzorců. [5]

$$A = 2\pi r_2 l \quad [\text{m}^2] \quad (2.36)$$

kde  $r_2$  je součet poloměru vodiče a tloušťky izolace tzn.  $r_2 = r_1 + d$

$$R_{\text{proudění}} = \frac{1}{\alpha_0 A} \quad [^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}] \quad (2.37)$$

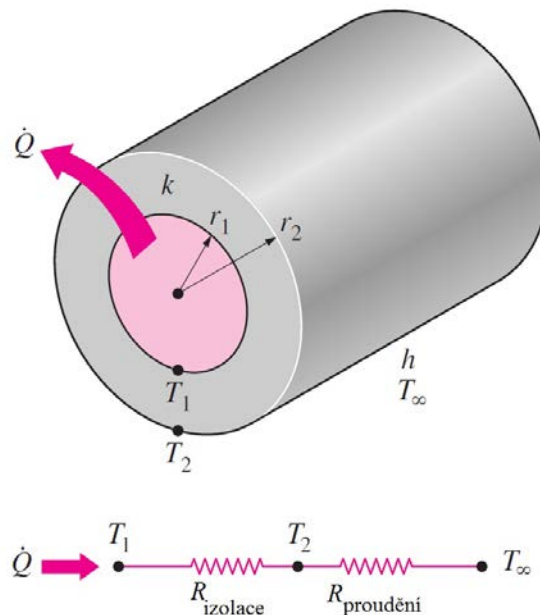
$$R_{\text{izolace}} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi k l} \quad [^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}] \quad (2.38)$$

$$R_{\text{celkový}} = R_{\text{izolace}} + R_{\text{proudění}} \quad [^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}] \quad (2.39)$$

Pak teplota na rozhraní je určena z rovnice

$$Q = \frac{T_1 - T_{\infty}}{R_{\text{celkový}}} \quad (2.40)$$

$$T_1 = T_{\infty} + QR_{\text{celkový}} \quad (2.41)$$



Obr. 2.6 - Tepelná síť pro izolovaný vodič [8]

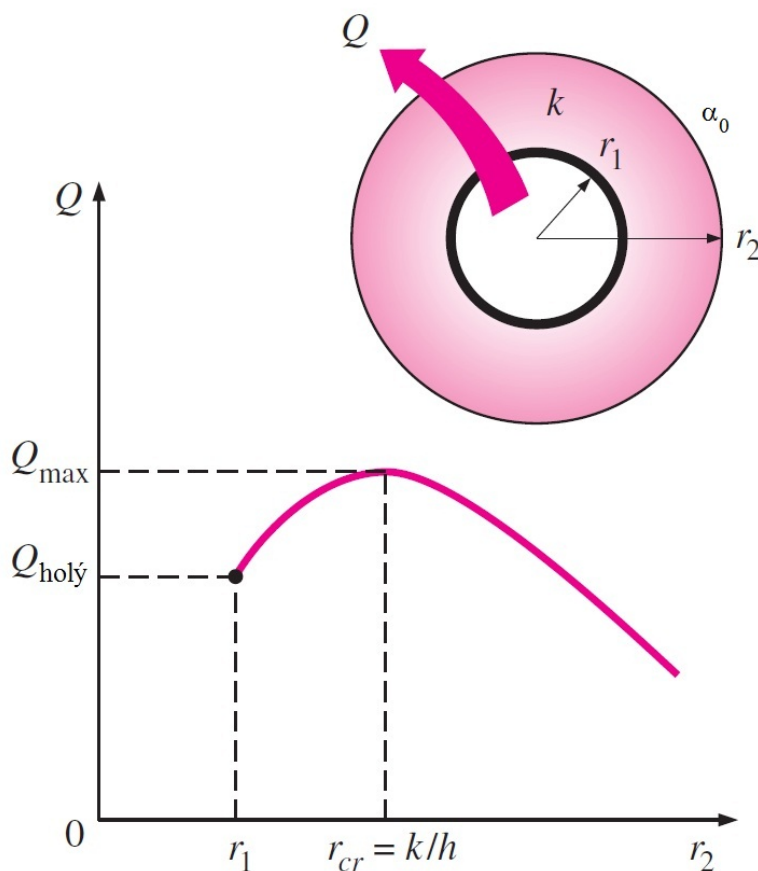
## 2.2.5 Kritický poloměr izolace

Z předchozího odstavce je patrné, že izolace má vliv na oteplení vodiče. Izolace zvyšuje odpor vedení tepla v izolaci, ale na druhou stranu snižuje odpor proudění média (obklopující vodič), protože zvyšuje vnější ochlazovací povrch značený jako  $A$  [ $\text{m}^2$ ]. Tepelný přenos z vodiče se může zvýšit nebo snížit v závislosti na tom, který efekt převažuje.

Množství tepla přeneseného z izolovaného vodiče je podle rovnice (2.40)

$$Q = \frac{T_1 - T_\infty}{R_{\text{izolace}} + R_{\text{proudění}}} = \frac{T_1 - T_\infty}{\ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\frac{2\pi k l}{r_1} + \frac{1}{\alpha_0 (2\pi r_2 l)}}} \quad (2.42)$$

Změna množství tepla  $Q$  v závislosti na  $r_2$  je zakresleno na Obr. 2.7



Obr. 2.7 - Závislost  $Q$  na  $r_2$  [8]

Hodnota  $r_2$  kdy  $Q$  dosáhne maxima lze odvodit z podmínky  $\frac{dQ}{dr_2} = 0$ . Po vyřešení diferenciální rovnice pro  $r_2$  dostaneme kritický poloměr izolace pro válcový vodič.

$$r_{kritický} = \frac{k}{\alpha_0} \quad (2.43)$$

Z rovnice (2.50) vidíme, že kritický poloměr izolace je závislý na tepelné vodivosti izolace  $k$  a součiniteli přestupu tepla  $\alpha_0$ . Hodnota odevzdaného tepla z válce se zvyšuje při zvyšování izolace  $r_2 < r_{kritický}$ . Dosahuje maxima při  $r_2 = r_{kritický}$ . Při překročení kritického poloměru se začíná hodnota odevzdaného tepla zmenšovat. [8]

## 2.3 Silové kabely

### 2.3.1 Materiál jader silových kabelů

#### 2.3.1.1 Měď

Měď pro elektrotechnické účely se nazývá elektrovodná měď a její základní vlastnost je elektrická vodivost (závislá na chem. čistotě). Největší vliv na elektrickou vodivost mají přísady železa, fosforu a křemíku. V České republice platí pro vlastnosti mědi **ČSN 42 3001 Měď elektrovodná Cu 99,9 E**, která je platná od 1. 6. 1991. Norma podle zpracování a mechanických vlastností rozeznává tři stavy, jak je uvedeno v Tab. 2.3. [19]

Tab. 2.3 - Vlastnosti elektrovodné mědi

Stav	Měkká	Polotvrdá	Tvrdá
Minimální konduktivita [ $10^6 \text{ S.m}^{-1}$ ]	57	56,6	56
Maximální rezistivita [ $10^{-6} \Omega.\text{m}^{-1}$ ]	0,01754	0,01769	0,01786
Minimální pevnost v tahu [MPa]	240-190	300-250	400-300

#### 2.3.1.2 Hliník

Hliník je druhým (po mědi) nejpoužívanějším a nejdůležitějším elektrovodným materiálem. Vyrábí se z horniny bauxitu, jehož podstatná složka je kysličník hlinitý  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . V České republice jsou stanoveny vlastnosti hliníku v **ČSN 42 4004 Hliník tvářený 42 4004**

**pro elektrotechniku AI 99,5**, která je platná od 1. 5. 1979. Norma podle zpracování a mechanických vlastností rozeznává tři stavy, jak je uvedeno v Tab. 2.4. [19]

Tab. 2.4 - Vlastnosti hliníku

Stav	Měkký	Polotvrký	Tvrký
Minimální konduktivita [ $10^6 \text{ S.m}^{-1}$ ]	34-35	33-34	32-33
Maximální rezistivita [ $10^6 \Omega.\text{m}^{-1}$ ]	0,02899	0,02985	0,03077
Minimální pevnost v tahu [MPa]	240-190	300-250	400-30

### 2.3.2 Konstrukce jader [19]

Jádra kabelů mohou být vyrobena dvojnásobem:

1. Plná jádra, která jsou tvořena jedním vodičem
2. Složená jádra, která jsou tvořena lanem, tedy větším počtem drátů

Hlavním rozdílem je ohebnost. U plného vodiče dochází k deformaci materiálu silou úměrnou jeho mechanické pevnosti. U lana mohou dráty měnit svoji polohu a dochází k vzájemnému posuvu. Ohýbání je tedy ulehčeno. Hlavní vliv na ohebnost lana má síla drátů, z nichž je lano složeno. Při větším počtu menších drátů je lano sice dražší, ale ohebnější. Taková lana se označují jako jemná nebo velmi jemná.

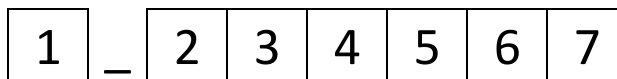
Podle profilu můžeme rozlišovat dvojí provedení jader (platí pro plná i složená jádra)

1. Kruhová jádra - Běžné provedení u holých vodičů pro venkovní vedení. U jednožilových vodičů nebo kabelů všech průřezů a u vícežilových kabelů menších průřezů.
2. Sektorová jádra - profil má tvar kruhové výseče se zaoblenými hranami. Používá se u tří a čtyřžilových kabelů. Tento způsob lépe využívá prostor, kabel má pak menší průměr než s kruhovými jádry.
3. Můžeme se setkat i s jinými profily jader, jako jsou například oválná jádra kabelů vvn

### 2.3.3 Značení silových kabelů a vodičů [19][20]

V České republice se k určení typu izolovaných vodičů a kabelů z hlediska konstrukce používají písmenové značky někdy kombinované s číslicemi doplněné počtem a průřezem žil

a údajem jmenovitého napětí.



Tab. 2.5 - Značení silových kabelů

Pořadí	Parametr	Písmeno/číslo	Materiál/typ
1.	Jmenovité napětí	bez ozn.	750 KV
		1, 3, 6, 10, 22, 35	Hodnota v Kv
2.	Materiál jádra	C	Cu
		A	Al
		CV	Cu vodotěsné
		AV	Al vodotěsné
3.	Materiál izolace	B	Kaučuk vulkanizát (zvýš. Tep. Odolnost)
		G	Kaučuk vulkanizát (běžný typ)
		H	Kaučuk vulkanizát na bázi EPR
		U	Vulkanizát z chloroprenového kaučku
		Y	PVC - běžný typ
		X	Zesítný PE
		E	Lineární PE
4.	Charakteristické označení	A	Kulatý jednožilový
		D	Důlní
		V	Vlečný
		Z	Svařovací
		L	Lehká šňůra
		S	Střední šňůra
		T	Těžká šňůra
		F	Stíněný
		K	Silový kabel
5.	Materiál pláště	B	Kaučuk vulkanizát (zvýš. Tep. Odolnost)
		G	Kaučuk vulkanizát (běžný typ)
		H	Kaučuk vulkanizát na bázi EPR
		U	Vulkanizát z chloroprenového kaučku
		Y	PVC - běžný typ
		F	Kovové pletení nebo vinutí
		O	Olověný plášť
		Z	Zdravotně nezávadný plášť
		C	Kovové stínění Cu, koncentrický vodič Cu
		VC	Měděné stínění s ochranou proti podélnému šíření vody pod pláštěm
		YE	PE + PVC
		OY	Olověný plášť + PVC

		VE	PE plášť s bariérou proti příčnému proniknutí vlhkosti
6.	Obaly nad pláštěm	P	Pancíř z ocelových pásků
		D	Pancíř z ocelových drátů
		Z	Pancíř z ocelových drátů nemagnetický
		Y	PVC - běžný typ
		E	Lineární PE
7.	Zvláštní označení	m	Mrazuvzdorný
		spec	Speciální kabel
		s	Samonosný
		z	Závěsný
		o	Oválný
		l	Lištový

## 2.4 Způsob měření teploty, senzory teploty

Blok, který je v přímém styku s měřeným prostředím, se nazývá senzor teploty. Je to funkční prvek tvořící vstupní blok měřicího řetězce. Pojem senzor teploty je ekvivalentní pojmu snímač teploty (samostatná konstrukční součást teploměrového zařízení, která obsahuje teplotní čidlo), ale také pojmu čidlo teploty (část snímače převádějící teplotu na jinou vhodnou fyzikální veličinu). Stejně tak se jako senzor označuje detektor tepelného záření nebo teploměr (zařízení k měření teploty).

Senzory teploty se podle fyzikálního principu dělí na: odporové, termoelektrické, polovodičové s PN přechodem, dilatační, optické, radiační, chemické, šumové, akustické, magnetické.

Podle styku s měřeným prostředím se senzory dělí na dotykové a bezdotykové.

Dle transformace signálu se senzory teploty dělí na aktivní, které se působením teploty chovají jako zdroj elektrické energie (termočlánky) a na pasivní, u kterých je nutné elektrické napájení pro transformaci teploty na jinou fyzikální veličinu. [16]

### 2.4.1 Kovové odporové senzory teploty

Kovové odporové snímače teploty pracují na principu teplotní závislosti odporu kovu. Základní materiálovou konstantou je teplotní součinitel odporu  $\alpha$ . Určuje závislost odporu kovu na jeho teplotě. Pro malý rozsah teplot od 0 °C až 100 °C lze používat s určitou nejistotou lineární vztah:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (2.44)$$

kde  $R_0$  je odpor čidla při teplotě 0 °C. Stanovíme střední hodnotu teplotního součinitele odporu  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 R_0} \quad (2.45)$$

kde  $R_{100}$  je odpor čidla při teplotě 100 °C.

Další základní parametr odporových snímačů teploty je poměr odporů čidla  $R_{100}$  při teplotě 100 °C a kde  $R_0$  při teplotě 0 °C. Tento poměr se označuje písmenem  $W$ .

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \quad (2.46)$$

Pro větší rozsahy teplot již lineární vztahy nelze použít. Nejrozšířenější materiály jsou: platina, nikl, Balco (Ni-Fe), měď, molybden a pro extrémně nízké teploty od 0,5 K slitiny Rh-Fe, Pt-Co. [16]

Tab. 2.6 - Materiály používané pro kovové snímače teplot [16]

Materiál	$\alpha \cdot 10^2 [\text{K}^{-1}]$	Teplotní rozsah [°C]	Poměr odporů $W_{100}$
Platina	0,385 - 0,391	-20 až 850	1,3850
Nikl	0,617 - 0,675	-70 až +150 (+200)	1,6180
NiFe	0,518 - 0,527	-100 až +200	1,4620
Měď	0,426 - 0,433	-50 až +150	1,4260

#### 2.4.1.1 Odporové platinové snímače teploty

Platina je prvek, který je chemicky netečný, časově stálý a má vysokou teplotu tání. Pro čistotu platiny u provozních snímačů teploty (Pt 100) je normou IEC-751 (IEC-ČSN 751) předepsán poměr elektrického odporu  $W_{100}=1,385$ .

### 2.4.1.2 Odporové niklové snímače teploty

Výhodou niklových snímačů je velká citlivost, rychlá odezva a malé rozměry. Nevýhodou je omezený teplotní rozsah a vůči platině značná nelinearita, horší dlouhodobá stabilita a odolnost vůči působení prostředí.

### 2.4.1.3 Odporové měděné snímače teploty

Měď se používá v teplotním rozsahu  $-200\text{ °C}$  do  $+200\text{ °C}$ . Pro závislost odporu měděného čidla na teplotě lze v rozsahu teplot  $-50\text{ °C}$  do  $+150\text{ °C}$  použít lineární vztah (2.44) kde  $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$ . Vzhledem k malé rezistivitě mědi (6krát menší než u platiny) a snadné oxidaci mědi se měděné snímače teploty běžně nevyrábějí. Výhodnou aplikací teplotní závislosti mědi je např. přímě měření teploty měděného vinutí elektrických strojů prostřednictvím měření odporu vinutí (samozřejmě při vypnutém napájení motoru). [16]

## 2.4.2 Polovodičové odporové senzory teploty

Stejně jako kovové odporové senzory využívají polovodičové odporové senzory teplotní závislosti odporu. Teplotní součinitel odporu polovodiče je záporný. Polovodičové odporové senzory teploty se dělí na termistory a monokrystalické odporové senzory.

### 2.4.2.1 Termistory

Termistor (thermally sensitive resistor) je teplotně závislý odpor. Je vyrobený z polovodičových feroelektrických keramických materiálů. Vyrábí se ve tvaru disku, destičky, kapky, válečku aj.

Výhody termistoru jsou velká teplotní citlivost, malé rozměry. Nevýhodou je nelineární charakteristika.

Dělí se na amorfnní a polykrystalické. V závislosti na materiálu má termistor velký záporný teplotní součinitel odporu. Tento termistor se nazývá negastor neboli NTC termistor (Negative Temperature Coefficient) nebo velký kladný teplotní součinitel odporu tzv. pozistor neboli PTC termistor (Positive Temperature Coefficient). [16]



### 2.4.3 Termoelektrické články

Termoelektrické články jsou založeny na Seebeckově jevu. Je to jev převodu tepelné energie na elektrickou. Seebeckův jev vzniká tím, že v teplejší části vodiče mají nositelé náboje větší energii, a proto difundují ve větším množství do chladnějších míst než nositelé z chladnějších míst do teplejších. Tím vzniká jednostranná převaha nábojů kladných nebo záporných.

Jednotlivé páry termoelektrických materiálů pro výrobu termoelektrických článků jsou ve světě normalizovány. Jsou to materiály zajišťující přijatelnou nelinearitu závislosti termoelektrického napětí na teplotě pro daný teplotní rozsah, odolnost proti korozi, chemickým vlivům a ionizačnímu záření. Označení jednotlivých termoelektrických článků se dle doporučení IEC provádí velkými písmeny (Tab. 2.7). [16]

Tab. 2.7 - Typy termoelektrických článků a základní údaje dle IEC 584.1 (ČSN EN 60584-1) (kromě typu G,C), dlouhodobé a krátkodobé využití závisí od konstrukce snímače a průměru termoelektrických vodičů [16]

KÓD	složení	dlouhodobě [°C] přibližné hodnoty	krátkodobě [°C] přibližné hodnoty	přibližná hodnota $\alpha$ [ $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ] při 100 °C	přibližná hodnota $\alpha$ [ $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ] při 500 °C	přibližná hodnota $\alpha$ [ $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ] při 1000 °C
<b>K</b>	NiCr (+) NiAl (-)	0 až +110	-180 až +1350	42	43	39
<b>T</b>	Cu(+) CuNi (-)	-185 až +300	-250 až +400	46	-	-
<b>J</b>	Fe (+) CuNi (-)	+20 až +700	-180 až +750	540	56	59
<b>N</b>	NiCrSi (+) NiSiMg (-)	0 až +1100	-270 až +1300	30	38	39
<b>E</b>	NiCr (+) NuNi (-)	0 až +800	-40 až +900	68	81	-
<b>R</b>	PtRh13 (+) Pt (-)	0 až +1600	-50 až +1700	8	10	13
<b>S</b>	PtRh10 (+) Pt (-)	0 až +1550	-50 až +1750	8	9	11
<b>B</b>	PtRh30 (+) Pt (-)	+100 až +1000	+100 až +1820	1	5	9
<b>G</b> <b>(W)</b>	W (+) WRh(-)	+20 až +230	0 až +2600	5	16	21
<b>C</b> <b>(W5)</b>	WRh5 (+) WRh26 (-)	+50 až 1820	+20 až +2300	15	18	18

#### 2.4.4 Bezdotykové měření teploty

Bezdotykové měření teploty se také označuje jako infračervená pyrometrie. Je to měření povrchové teploty na základě vysílaného elektromagnetického záření tělesem a přijímaného senzorem (detektorem). Rozsah měření je od 0,4  $\mu\text{m}$  do 25  $\mu\text{m}$ .

- od 0,4  $\mu\text{m}$  do 0,78  $\mu\text{m}$  - oblast viditelného spektra
- od 0,78  $\mu\text{m}$  do 1  $\mu\text{m}$  - oblast blízkého infračerveného spektra
- od 2  $\mu\text{m}$  do 3  $\mu\text{m}$  - oblast krátkovlnného infračerveného spektra
- od 3  $\mu\text{m}$  do 5  $\mu\text{m}$  - oblast středovlnného infračerveného spektra
- od 5  $\mu\text{m}$  do 25  $\mu\text{m}$  - oblast dlouhovlnného infračerveného spektra

Elektromagnetické záření od 2  $\mu\text{m}$  do 25  $\mu\text{m}$  se označuje jako tepelné záření. Uvedené rozsahy pokrývají měření teplot v rozsahu od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+10000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

##### Výhody bezdotykové měření teploty:

- zanedbatelný vliv měřicí techniky na měřený objekt
- možnost měření teploty na rotujících nebo pohybujících se objektech
- měření teploty z bezpečné vzdálenosti (elektrická zařízení, hutní objekty aj.)
- možnost měření velmi rychlých změn teploty
- možnost měřit a dále číslicově zpracovat teploty celých povrchů těles (termografie, termovize)

##### Nevýhody bezdotykového měření teplot:

- nejistoty měření způsobené neznalostí správné hodnoty emisivity povrchu tělesa
- nejistoty měření způsobené neznalostí správné hodnoty prostupnosti prostředí mezi čidlem a objektem
- nejistoty měření způsobené nepřesnou korekcí parazitního odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt

##### Senzory (detektory) pro bezdotykové měření teplot se dělí na:

- tepelné detektory infračerveného záření
- kvantové detektory infračerveného záření
- úhrnné pyrometry (pyrometry na celkové záření)
- monochromatické pyrometry
- pásmové pyrometry
- poměrové pyrometry

- vícepásmové pyrometry
- pyrometry s automatickou korekcí emisivity
- pyrometry s optickými vlnovody v infračervené oblasti
- termovize

#### 2.4.4.1 Termovize

Termovizní systémy se dělí na :

- termovizní systémy s opticko-mechanickým rozkladem obrazu
- termovizní systémy s maticovým detektorem

Opticko-mechanický rozklad obrazu se provádí snímání jednotlivých bodů. Zorné pole termovize se postupně zaměřuje na všechny body (plošky) měřeného objektu. Dráha rozkladu se provádí pohyblivými optickými částmi kamery (otočné hranoly nebo zrcadla). Výroba těchto systémů pro civilní účely dnes skončila.

Nyní se používají chlazené a nechlazené maticové mikrobolometrické a kvantové (QWIP) FPA detektory (1D-řádkové a 2D-plošné). Chlazení FPA matice se provádí tzv. Stirlingovým chladičem (hermeticky uzavřený chladič systém se dvěma písty s plynným heliem, pracující na principu kompresorové mikrochladičky) nebo termoelektrickým chladičem pracujícím na principu Peltierova jevu. Zpracování signálů je realizováno přímo na čipu prostřednictvím multiplexerů a 14bitových A/D převodníků. V závislosti na typu kamery lze signál různě zpracovat. Například vykreslení teplotního profilu v libovolném místě obrazu, vyhodnocení střední a maximální hodnoty teploty ve zvolené oblasti obrazu, vyhodnocení teploty v libovolném místě na obraze, barevné zobrazení zvolených izoterm, změnu barevné palety atd.

V termovizní technice se používají dvě hlavní pásma vlnových délek a to krátkovlnné (2  $\mu\text{m}$  až 5  $\mu\text{m}$ ) a dlouhovlnné (7  $\mu\text{m}$  až 13  $\mu\text{m}$ ). Dosahované rozlišení je cca 0,1  $^{\circ}\text{C}$ . [16][17]

#### **Aplikace termovizního systému:**

- měření dynamických teplotních polí vzorků při tepelném zatěžování
- měření rozložení teploty v okolí motorů automobilů
- lokalizace úniku tepla a zjišťování tepelných ztrát na vytápěných objektech
- rozložení teploty na živých objektech
- měření rozložení teploty na pláštích průmyslových pecí
- měření rozložení teploty mikroelektronických obvodů

- lokalizace vadných spojů na VN rozvodech
- lokalizace potrubí v zemi
- v kriminalistice, vojenské technice

## 3 Simulace oteplení jednoduchého kabelového vodiče

### 3.1 Metoda konečných prvků

#### 3.1.1 Úvod

Metoda konečných prvků (MKP, anglicky FEM - Finite elements method) byla nejdříve určena pro strojírenství, ale dnes se používá ve všech oblastech elektrotechnického průmyslu.

Pro výpočet fyzikálních polí existuje mnoho programů. Většina jich pochází z komerční oblasti (Ansys, Comsol) nebo také programy šířené pod GNU licenci (Agros2D). Programy Ansys i Comsol mohou simulovat nejen elektrická, magnetická, elektromagnetická, tepelná pole, ale také proudění plynů a kapalin.

Výhoda těchto dvou programů spočívá v možnosti tato fyzikální pole mezi sebou vzájemně kombinovat (například elektro-tepelné problémy).

#### 3.1.2 Princip metody

Metoda je založena na popsání konkrétního fyzikálního problému diferenciálními rovnicemi a jejich řešení. Pokud by se jednalo o základní fyzikální úlohy na geometricky jednoduchých tělesech, analytické řešení by nepředstavovalo problém. Pro řešení fyzikálně komplexních problémů se složitou geometrií se ukázala být jako vhodnější numerická aproximační metoda, označovaná jako metoda konečných prvků.

Princip je jednoduchý. Spočívá v rozdělení geometricky definovaný objekt (který je předmětem výpočtu) na konečný počet částí (elementů), vyplňujících s dostatečnou přesností jeho tvar. Jednotlivé elementy jsou vzájemně spojeny v tzv. uzlech, matematických bodech o známých souřadnicích v prostoru. Pro jednoduchost se dá říct, že jsou počítány hodnoty neznámých parametrů právě v těchto uzlech.

Jestliže jsou vlastnosti každého z těchto elementů popsány jednoduchou matematickou

funkcí, dostáváme pro popis vlastností celého objektu soustavu rovnic. Řešení diferenciálních rovnic je převedeno na řešení soustavy algebraických rovnic, jejichž neznámé představují parametry předmětného fyzikálního problému. Soustava rovnic popisující celý počítaný objekt potom představuje řádově tisíce až miliony rovnic.

Analýza fyzikálního pole je zpravidla rozdělena do tří etap:

- Pre-Processing
- Solution
- Post-Processing

### 3.1.2.1 Pre-processing

V této fázi se vytváří fyzikální (geometrický) model. Volí se materiálové vlastnosti a generuje se výpočetní síť. Většinou se zde také aplikují i okrajové podmínky (kolmost a rovnoběžnost magnetických toků atd.) a zatížení (proud, proudová hustota, úbytek napětí).

- **Tvorba modelu**

Model může být jedno, dvou nebo trojrozměrný (1D,2D,3D). U většiny moderních programů lze importovat předem připravený model. Také zde můžeme zvolit, zda je model symetrický. Symetrie usnadní výpočet.

- **Volba atributů úlohy**

Zde se nastavují informace o materiálu, volba typu elementů atd.

- **Zadávání materiálových vlastností**

Materiálové vlastnosti u MKP systémů představují velmi široký pojem. Pro výpočty multifyzikální podoby je potřeba znát nejen mechanické vlastnosti materiálu, ale i jejich závislost na teplotě, elektrické vlastnosti, změny v závislosti na čase (přechodové děje). Pro oblast elektromagnetismu je to elektrická vodivost a permeabilita.

### 3.1.2.2 Solution

Zde probíhá volba typu analýzy (statická, harmonická, přechodová). Výběr solveru ("řešiče") optimalizovaného pro dané fyzikální pole a nastavení požadované přesnosti. Podle typu úlohy se pak volí výpočetní časy, frekvence.

### 3.1.2.3 Post-Processing

V této závěrečné části se provádí vyhodnocení řešené úlohy. K dispozici je několik způsobů jak zobrazit vypočtené výsledky. Často se používá zobrazení mapy elektromagnetického pole nebo vynesení závislosti veličin na čase, teplotě. [18]

## 3.2 Parametry a provedení simulovaných kabelů

### 3.2.1 Jednožilový kabel CY

Jako první simulovaný objekt byl vybrán jednožilový kabel CY s plným kruhovým měděným jádrem s jednoduchou PVC izolací (Obr. 3.1).

Tab. 3.1 - Rozměry kabelu CY

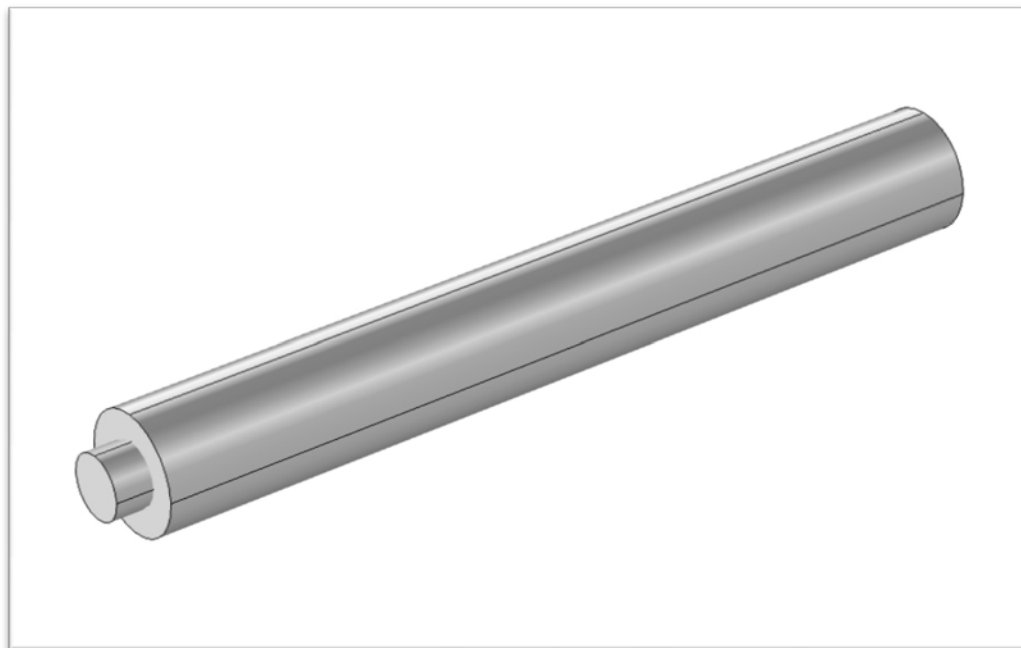
Poloměr jádra [mm]	0,87
Průřez [mm <sup>2</sup> ]	2,38
Tloušťka izolace [mm]	0,7
Délka [cm]	100

Tab. 3.2 - Materiál kabelu CY

Jádro	Měď
Izolace	PVC

Tab. 3.3 - Fyzikální parametry kabelu CY

	Tepelná kapacita [J/(kg*K)]	Tepelná vodivost [W/(m*K)]	Elektrická vodivost [S/m]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
Jádro	350	385	6,0606*10 <sup>7</sup>	8940
Izolace	1433	0,1775	0	1375



Obr. 3.1 - 3D model simulovaného kabelu CY

### 3.2.2 Jednožilový kabel AY

Jako druhý simulovaný objekt byl vybrán jednožilový kabel CY s plným kruhovým hliníkovým jádrem s jednoduchou PVC izolací (Obr. 3.3).

Tab. 3.4 - Rozměry kabelu AY

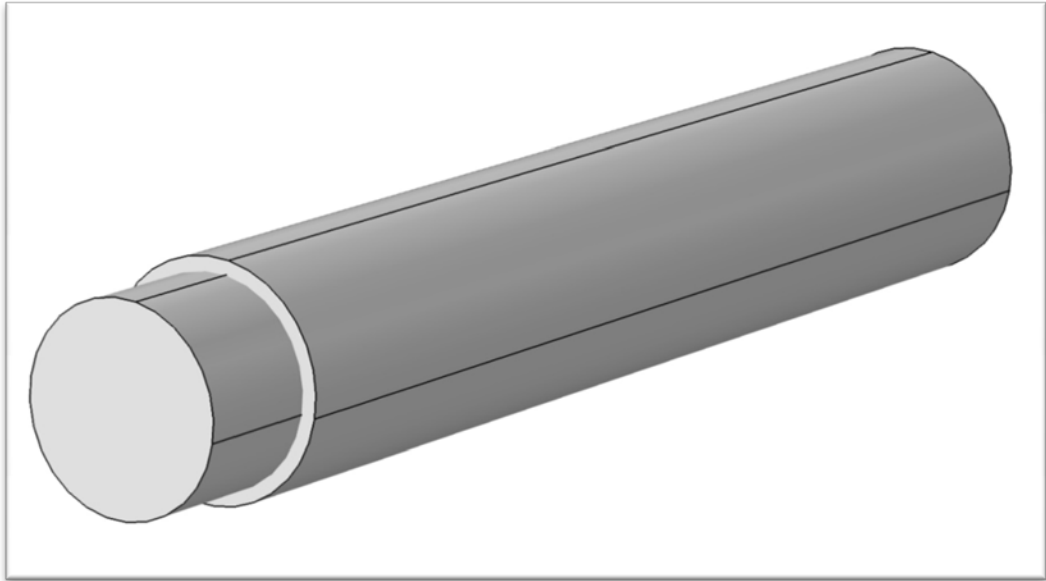
Poloměr jádra [mm]	3,75
Průřez [mm <sup>2</sup> ]	44,17
Tloušťka izolace [mm]	1
Délka [cm]	100

Tab. 3.5 - Materiál kabelu AY

Jádro	Hliník
Izolace	PVC

Tab. 3.6 - Fyzikální parametry kabelu AY

	Tepelná kapacita [J/(kg*K)]	Tepelná vodivost [W/(m*K)]	Elektrická vodivost [S/m]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
Jádro	650	160	$3,7736 \cdot 10^7$	2700
Izolace	1433	0,1775	0	1375



Obr. 3.2 - 3D model simulovaného kabelu AY

### 3.3 Popis simulace v programu COMSOL

Pro simulaci oteplení vodiče byl zvolen program COMSOL. Je to software pro řešení elektromagnetických, elektrostatických, teplotních a deformačních polí. COMSOL se stejně jako jiné simulační softwary skládá z preprocesoru, solveru a postprocesoru. Preprocesor umožňuje uživateli definovat geometrii modelu (je možné importovat i CAD soubory), okrajové podmínky a vlastnosti materiálu. Solver zajišťuje samotný výpočet rozložení pole. Pro řešení soustav rovnic využívá metodu sdružených gradientů. V postprocesoru je možné vykreslovat různé typy výsledků jako např. řešenou veličinu, gradienty, isolinie, grafy nebo exportovat video soubory (např. pro časově závislé úlohy). Program COMSOL používá v uživatelském prostředí anglický jazyk, proto jsou v závorkách uvedeny originální anglické názvy.

Samotná simulace oteplení vodiče lze realizovat několika způsoby. Jako nesdružený fyzikální problém, částečně sdružený fyzikální problém nebo plně sdružený fyzikální problém.

- **Nesdružený problém**

U nesdruženého fyzikálního problému se řeší jednotlivé části simulace odděleně. U simulace oteplení se vyřeší nejdříve elektrické pole, vypočtou se konstantní ztráty ve vodiči (neměnné s teplotou) a tyto ztráty se poté aplikují do tepelného pole.



- **Částečně sdružený problém**

Jednotlivé části simulace jsou částečně propojené. Pro tuto simulaci byl vybrán tento způsob výpočtu. U simulace oteplení se nejprve vyřeší elektrické pole, z kterého se vypočtou ztráty závislé na teplotě a ty se poté aplikují do teplotního pole jako nestacionární zdroj tepla.

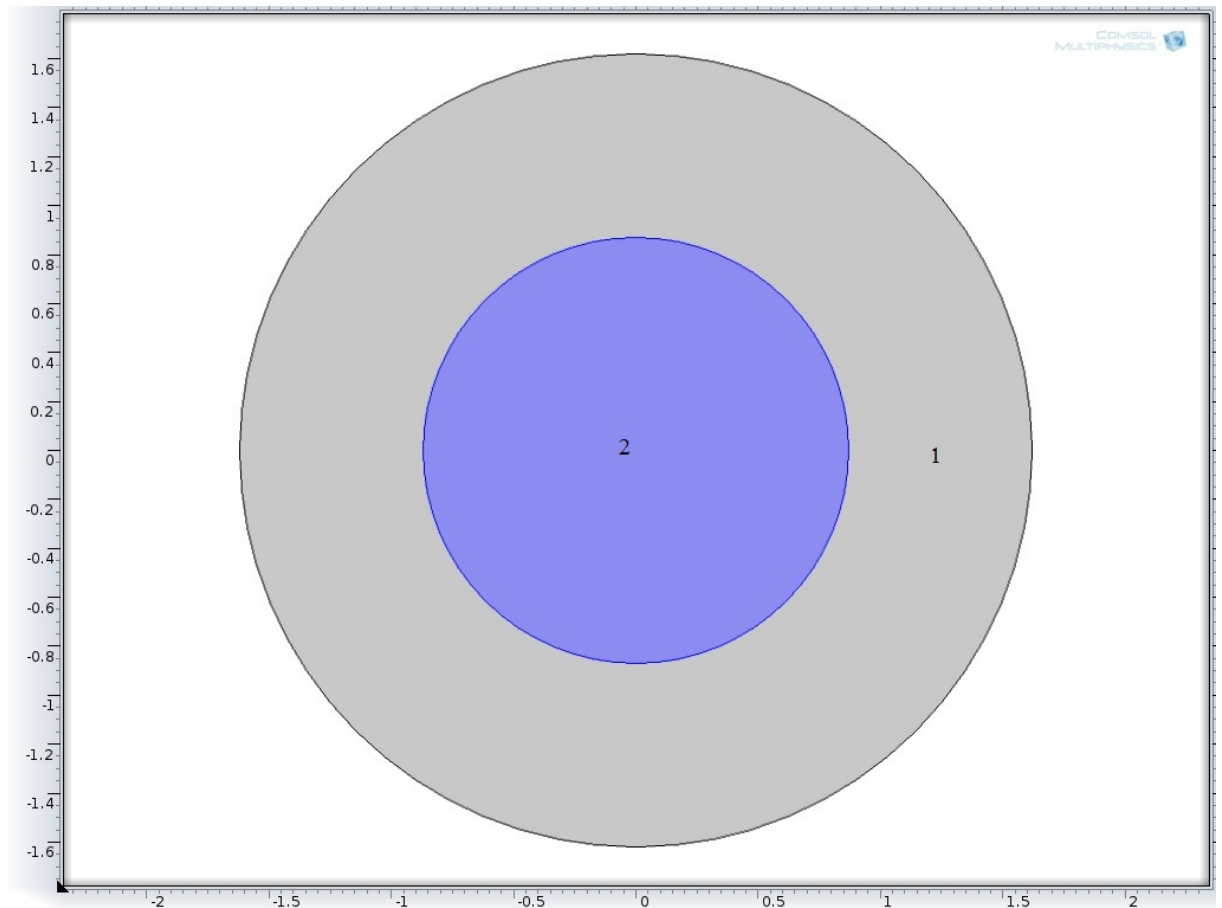
- **Plně sdružený problém**

Jednotlivé části simulace jsou plně propojené. Parametry potřebné pro výpočet jsou mezi částmi předávány mezi sebou jako například změna rezistivity.

Jak již bylo výše uvedeno, simulaci oteplení jednožilového kabelu (CY, AY) s plným kruhovým jádrem (měď, hliník) a s jednoduchou PVC izolací, jsem řešil jako částečně sdružený fyzikální problém. CY kabel byl zatěžován třemi různými proudy (45A, 52A, 63A), z důvodu porovnání průběhů oteplení. AY kabel byl zatěžován proudem 200A. Simulace jsem řešil jako 2D s výpočtem dvou oddělených fyzikálních polí. Jako první bylo vyřešeno statické elektromagnetické pole (magnetic and electric fields). Vzhledem k tomu, že rezistivita je závislá na teplotě, je nutné vypočítat ztráty závislé na teplotě. Tyto ztráty byly poté aplikovány do teplotního pole (heat transfer in solids) jako proměnný zdroj tepla (závislý na teplotě) a z tohoto pole jsem poté určil výsledné oteplení. V následujících podkapitolách bude podrobněji popsán samotný postup simulace.

### 3.3.1 Model

Použil jsem 2D model řezu jednožilového kabelu s plným jádrem s PVC izolací, jak je vidět na Obr. 3.3. Rozměry jsou uvedené v Tab. 3.1. Pro AY kabel je model podobný.



Obr. 3.3 - Příklad 2D modelu řezu jednožilového kabelu CY

### 3.3.2 Materiály

Na prostřední oblast (oblast 2) modelu byla zvolena měď nebo hliník, podle toho zda se jednalo o kabel CY nebo AY. Na vnější oblast (oblast 1 - izolace) byl jako materiál zvolen PVC. Rezistivita materiálu jádra byla lineárně teplotně závislá podle rovnice (3.1). Materiálové parametry potřebné pro simulaci jsou uvedeny v Tab. 3.3 a Tab. 3.6

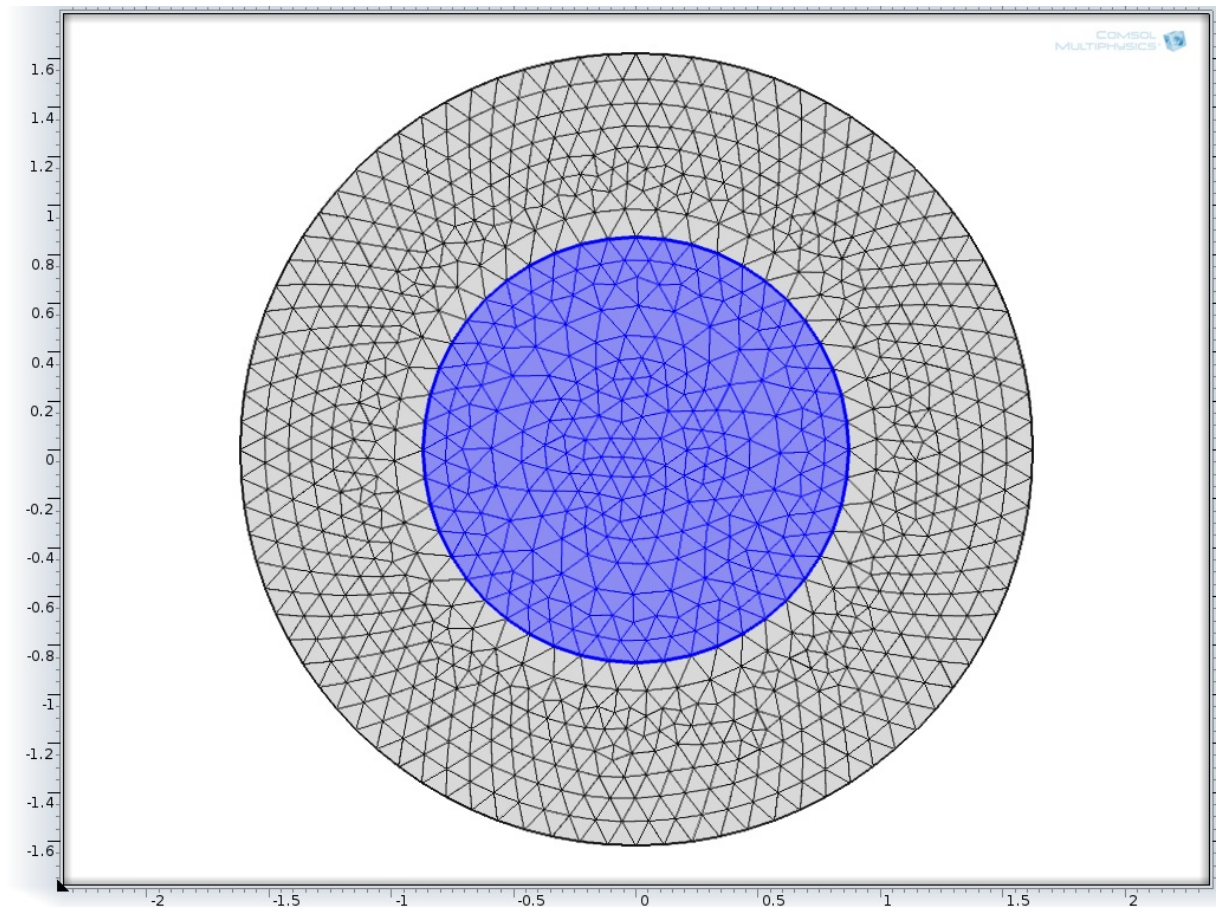
$$\rho = \rho_0(1 + \alpha(T - T_{ref})) \quad (3.1)$$

Koeficient  $\alpha$  měl hodnotu 0,0039. Určuje, jak se mění rezistivita s teplotou vodiče.

### 3.3.3 Síť

#### 3.3.3.1 Kabel CY

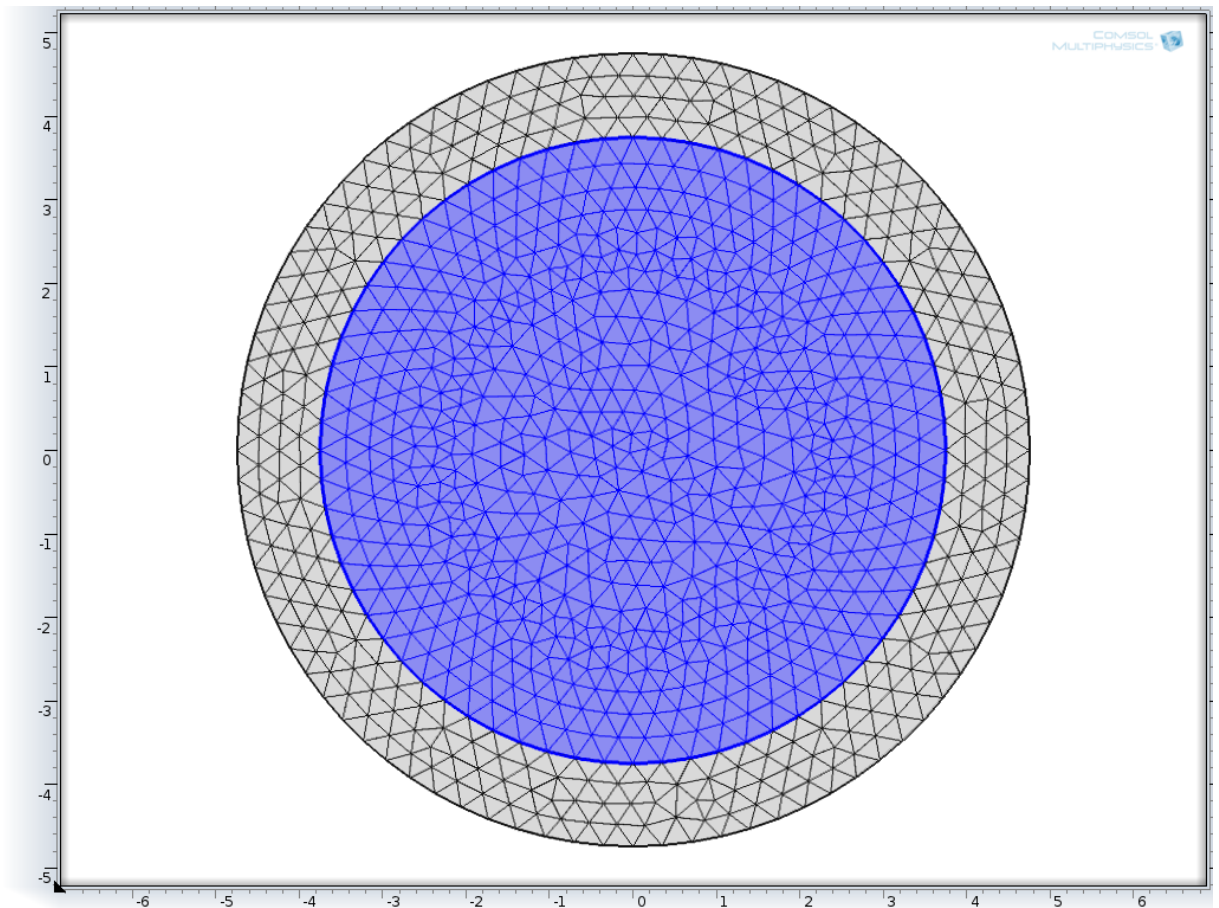
Jako síť (anglicky mesh) jsem zvolil volnou trojúhelníkovou síť (extra fine free triangular mesh) s minimální velikostí elementu  $1,95 \cdot 10^{-4}$  mm a maximální velikostí elementu 0,052 mm a byla pro obě oblasti stejná.



Obr. 3.4 - Síť kabelu CY

#### 3.3.3.2 Kabel AY

Jako síť (anglicky mesh) byla zvolena volná trojúhelníková síť (finer free triangular mesh) s minimální velikostí elementu 0,00119 mm a maximální velikostí elementu 0,352 mm a byla pro obě oblasti stejná.



Obr. 3.5 - Síť kabelu CY

### 3.3.4 Elektromagnetické pole

Jako jedna okrajová podmínka jsem zvolil magnetickou izolaci (magnetic insulation) a byla aplikována na okraj PVC izolace (oblast 1). Druhá okrajová podmínka je vstupní proud, který byl aplikován na prostřední oblast (jádro). Kabel CY byl zatěžován třemi různými proudy (45 A, 52 A, 63 A) a kabel AY byl zatěžován proudem 200 A. Frekvence byla 50 Hz.

Simulace jsem počítal v ustáleném stavu se změnou parametru. Parametr, který se měnil, byla teplota vodiče v rozmezí od 24 °C do 90 °C a počet kroků je 20. To znamená, že program spočítá simulaci 20x pro různé hodnoty teploty vodiče. V post-processingu byla vypočtena hustota ztrát (ztráty na jednotku objemu) pro každou hodnotu teploty vodiče (Tab. 3.7.)

Tab. 3.7 - Tabulka hustot ztrát pro různé teploty, jádra a proudy

Teplota	Hustota Ztrát [W/m <sup>3</sup> ]			
	Měděné jádro			Hliníkové jádro
	45 A	52 A	63 A	200A
297	6000299,2	8012251,4	11760586,5	551590,5
301	6080354,0	8119149,2	11917493,8	558946,5
304	6160408,7	8226047,0	12074401,1	566302,5
308	6240463,5	8332944,8	12231308,5	573658,6
311	6320518,3	8439842,7	12388215,8	581014,7
315	6400573,0	8546740,5	12545123,1	588370,8
318	6480627,8	8653638,3	12702030,5	595727,0
321	6560682,6	8760536,1	12858937,8	603083,3
325	6640737,3	8867434,0	13015845,2	610439,5
328	6720792,1	8974331,8	13172752,5	617795,8
332	6800846,9	9081229,6	13329659,9	625152,1
335	6880901,7	9188127,5	13486567,3	632508,4
339	6960956,5	9295025,3	13643474,7	639864,8
342	7041011,2	9401923,2	13800382,0	647221,2
346	7121066,0	9508821,0	13957289,4	654577,7
349	7201120,8	9615718,9	14114196,8	661934,1
353	7281175,6	9722616,7	14271104,2	669290,6
356	7361230,4	9829514,6	14428011,6	676647,1
360	7441285,2	9936412,5	14584919,0	684003,6
363	7521340,0	10043310,3	14741826,4	691360,2

### 3.3.5 Výpočet závislosti hustoty ztrát na teplotě

K výpočtu závislosti hustoty ztrát na teplotě jsem použil program Excel. Z tabulky hustoty ztrát (Tab. 3.7) byl pomocí programu Excel vykreslen graf a zvolil jsem lineární typ regrese.

- Kabel CY - zatížení 45 A

$$y = 23046x - 847841 \quad (3.2)$$

- Kabel CY - zatížení 52 A

$$y = 30774x - 1000000 \quad (3.3)$$

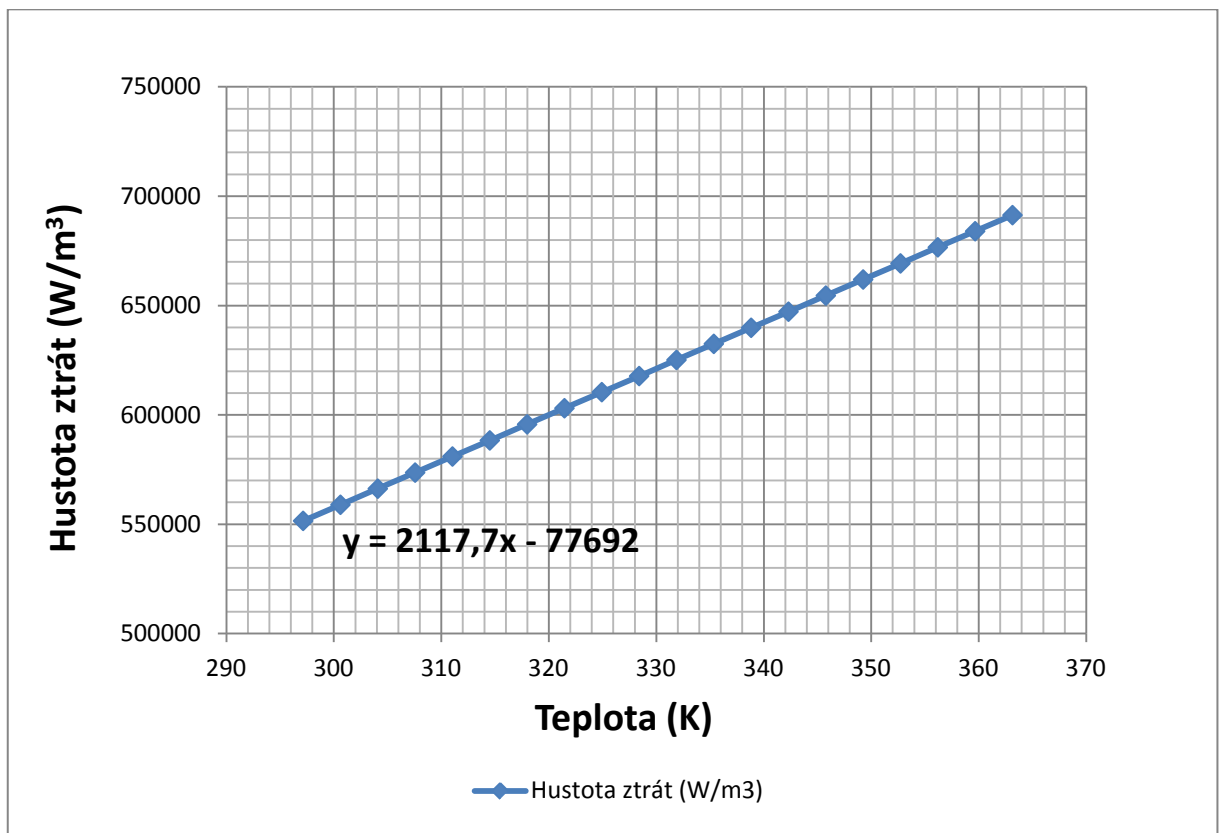
- Kabel CY - zatížení 63 A

$$y = 45170x - 2000000 \quad (3.4)$$

- Kabel AY - zatížení 200 A

$$y = 2117,7x - 77692 \quad (3.5)$$

Tyto rovnice jsem poté použil jako zdroj při řešení teplotního pole.



Obr. 3.6 - Příklad závislosti hustoty ztrát na teplotě pro AY kabel zatížený proudem 200 A

### 3.3.6 Teplotní pole

Po výpočtu rovnice hustoty ztráty bylo potřeba vyřešit teplotní pole (heat transfer in solids). První okrajová podmínka je přirozené ochlazování (convective cooling), kde se aplikuje součinitel přestupu tepla. Druhá okrajová podmínka je tepelný zdroj (heat source), ve kterém jsem použil rovnice z kapitoly 3.3.5. Proměnná  $x$  jsem nahradil proměnnou  $T$ , která označuje teplotu. Třetí okrajová podmínka byla radiace do okolí (surface to ambient radiation), kde bylo potřeba nastavit teplotu a hodnotu emisivity.

Vzhledem k tomu že se řeší dynamické oteplení, zvolil jsem transientní typ simulace (time dependent). Z kapitoly 3.3.5 je zřejmé, že hustota ztrát se s teplotou mění podle výše uvedeného vztahu. Během simulace se tedy zvětšuje hodnota vydané tepelné energie tepelného zdroje v závislosti na jeho teplotě, což představuje, že se rezistivita zvětšuje s teplotou.

V následujících podkapitolách budou podrobněji rozebrány aplikované okrajové podmínky.

#### 3.3.6.1 Kabel CY, zatížení 45 A

Počáteční teplota kabelu byla 24 °C. Hodnota přirozeného ochlazování (convective cooling)  $\alpha_0$  byla 16 [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] o teplotě 20 °C. Tepelný zdroj obsahoval rovnici (3.2). V okrajové podmínce radiace do okolí byla nastavena emisivita  $\varepsilon = 0,98$  a teplota 20 °C.

Časový rozsah transientní simulace byl od 0 do 265 sekund s počtem hodnot 100. Tento časový rozsah odpovídá provedenému měření v kapitole 4.

#### 3.3.6.2 Kabel CY, zatížení 52 A

Počáteční teplota kabelu byla 23,5 °C. Hodnota přirozeného ochlazování (convective cooling)  $\alpha_0$  byla 17,5 [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] o teplotě 20 °C. Tepelný zdroj obsahoval rovnici (3.3). V okrajové podmínce radiace do okolí byla nastavena emisivita  $\varepsilon = 0,98$  a teplota 20 °C.

Časový rozsah transientní simulace byl od 0 do 124 sekund s počtem hodnot 100. Tento časový rozsah odpovídá provedenému měření v kapitole 4.

### 3.3.6.3 Kabel CY, zatížení 63A

Počáteční teplota kabelu byla 24 °C. Hodnota přirozeného ochlazování (convective cooling)  $\alpha_0$  byla 16,5 [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] o teplotě 20 °C. Tepelný zdroj obsahoval rovnici (3.4). V okrajové podmínce radiace do okolí byla nastavena emisivita  $\varepsilon = 0,98$  a teplota 20 °C.

Časový rozsah transientní simulace byl od 0 do 66 sekund s počtem hodnot 100. Tento časový rozsah odpovídá provedenému měření v kapitole 4.

### 3.3.6.4 Kabel AY, zatížení 200 A

Počáteční teplota kabelu byla 26 °C. Hodnota přirozeného ochlazování (convective cooling)  $\alpha_0$  byla 11,5 [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] o teplotě 22 °C. Tepelný zdroj obsahoval rovnici (3.5). V okrajové podmínce radiace do okolí byla nastavena emisivita  $\varepsilon = 0,98$  a teplota 22 °C.

Časový rozsah transientní simulace byl od 0 do 901 sekund s počtem hodnot 250. Tento časový rozsah odpovídá provedenému měření v kapitole 4.

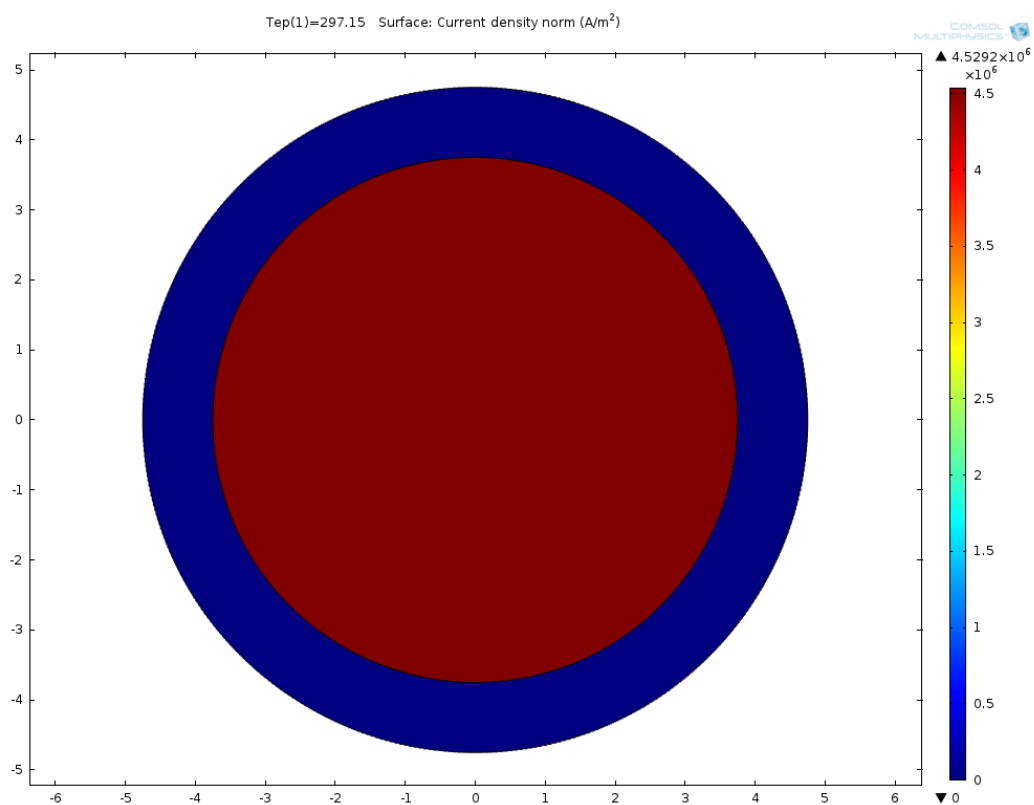
## 3.4 Výsledky simulace

### 3.4.1 Rozložení proudové hustoty

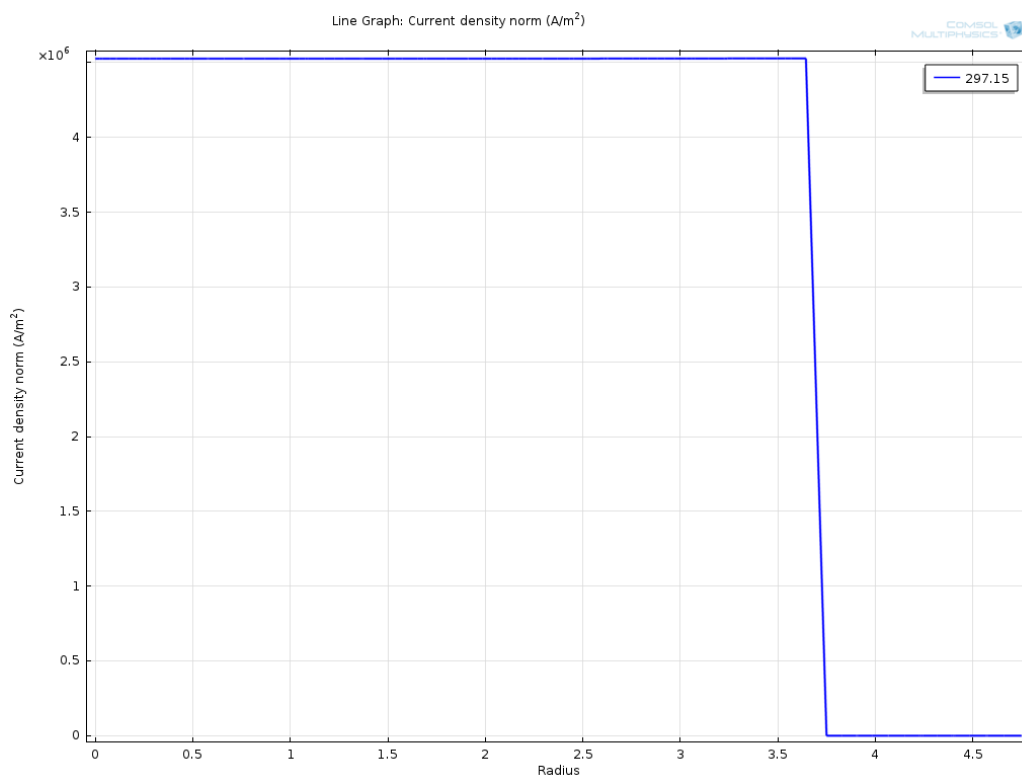
Na Obr. 3.7 je zobrazena proudová hustota při teplotě 24 °C (297,15 K) u kabelu AY. Na Obr. 3.8. je zobrazena závislost proudové hustoty na poloměru pro teplotu 24 °C (297,15 K).

Výše uvedené obrázky dokazují, že proudová hustota je v jádře kabelu AY konstantní. Proudová hustota pro vodič s menším poloměrem (např. druhý simulovaný kabel CY) bude při stejné frekvenci také konstantní.





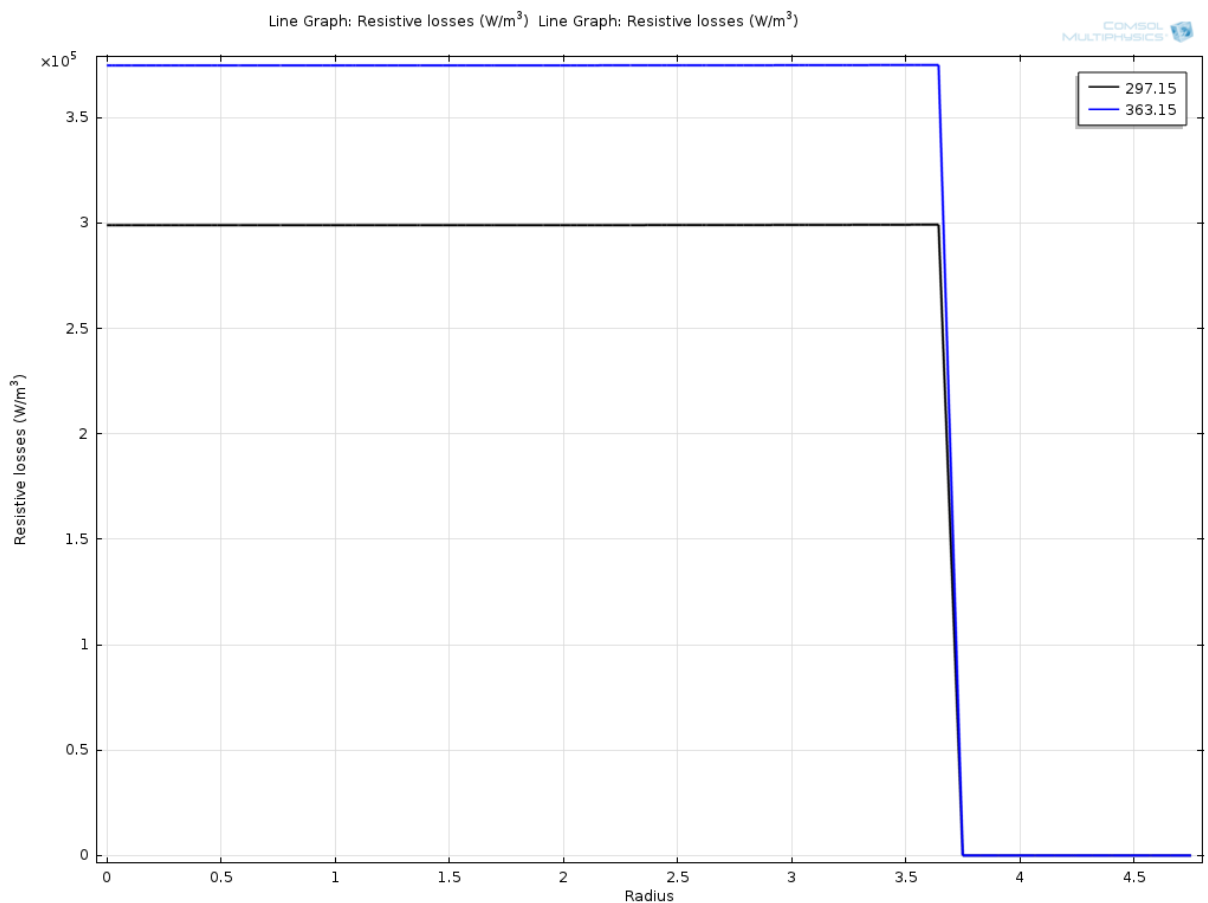
Obr. 3.7 - Proudová hustota při teplotě 24 °C (297,15 K)



Obr. 3.8 - Graf proudové hustoty v závislosti na poloměru při teplotě 24 °C (297,15 K)

### 3.4.2 Rozložení ztrát

Na Obr. 3.9 je zobrazena závislost ztrát na poloměru pro teploty 24 °C (297,15 K) a 90 °C (363,20 K) u kabelu AY zatěžovaného proudem 200 A. Ztráty v jádře jsou v závislosti na poloměru konstantní. To odpovídá konstantnímu rozložení proudové hustoty v hliníkovém jádře. Závislost ztrát na teplotě včetně lineární regrese je zobrazeno na Obr. 3.6.



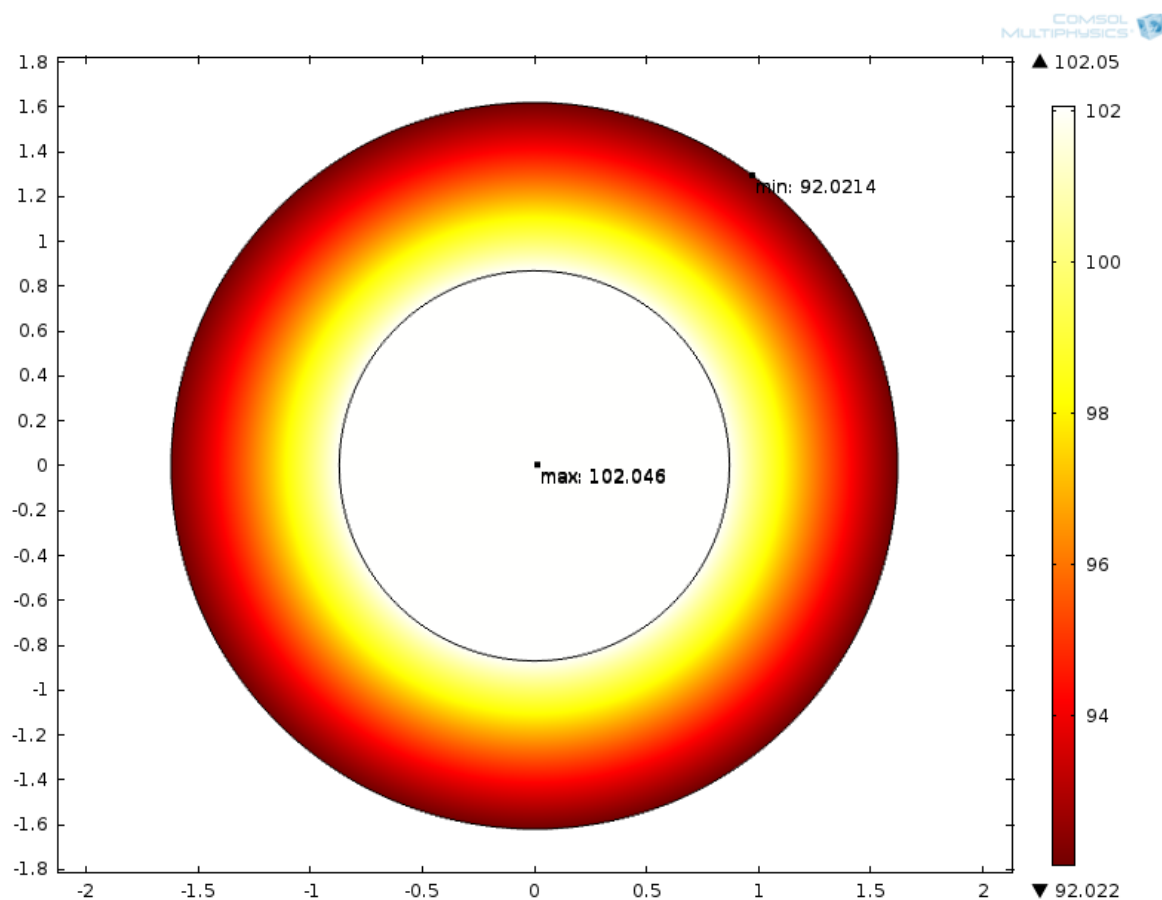
Obr. 3.9 - Graf závislosti ztrát na poloměru

### 3.4.3 Výsledné oteplení vodičů

V této kapitole jsou zobrazeny konečné výsledky dynamického oteplení kabelu CY a kabelu AY s PVC izolací.

Na Obr. 3.10 je zobrazeno rozložení teploty u kabelu CY zatíženého proudem 45 A po 265 sekundách. Můžeme zde vidět, že rozdíl mezi teplotou v jádře a na povrchu je přibližně

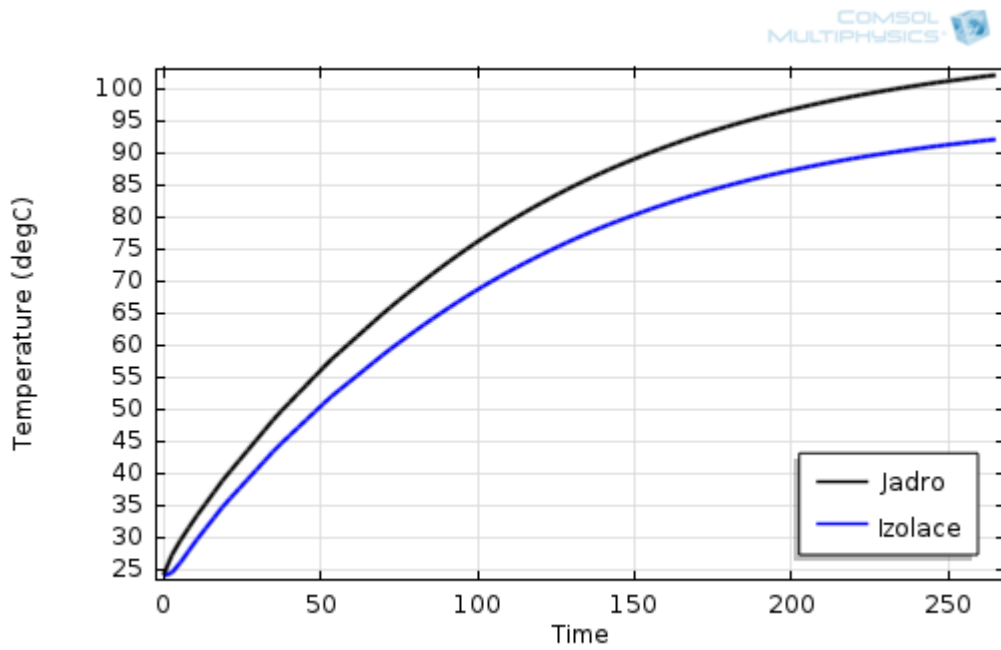
10 °C.



Obr. 3.10 - Rozložení teploty kabelu CY po 265 sekundách

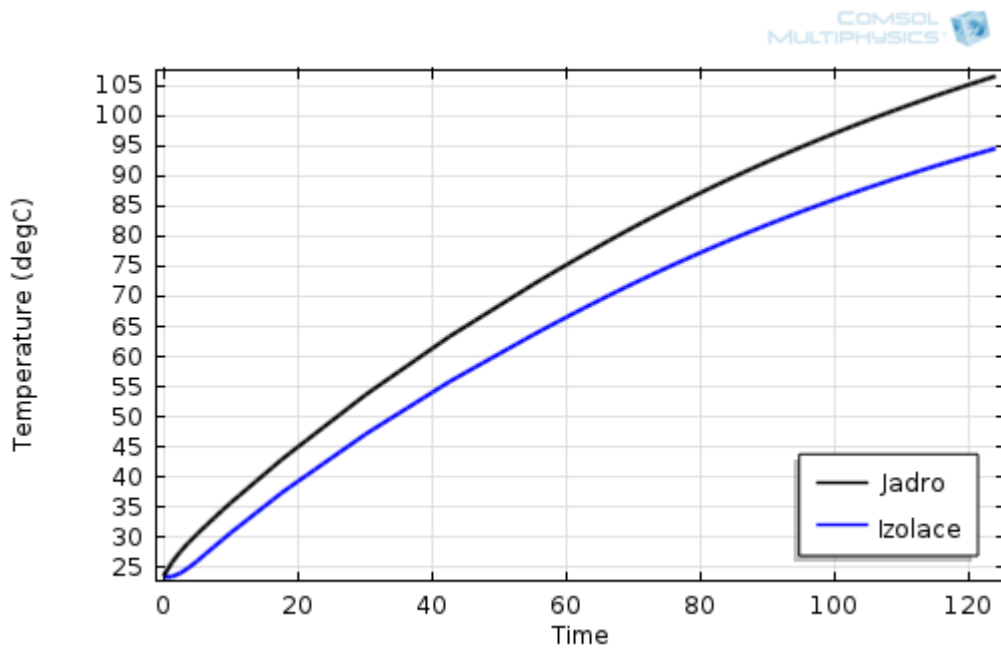
V následujících podkapitolách bude zobrazeno oteplení v závislosti na čase pro oba kabely a různé proudové zatížení.

### 3.4.3.1 Kabel CY, zatížení 45 A



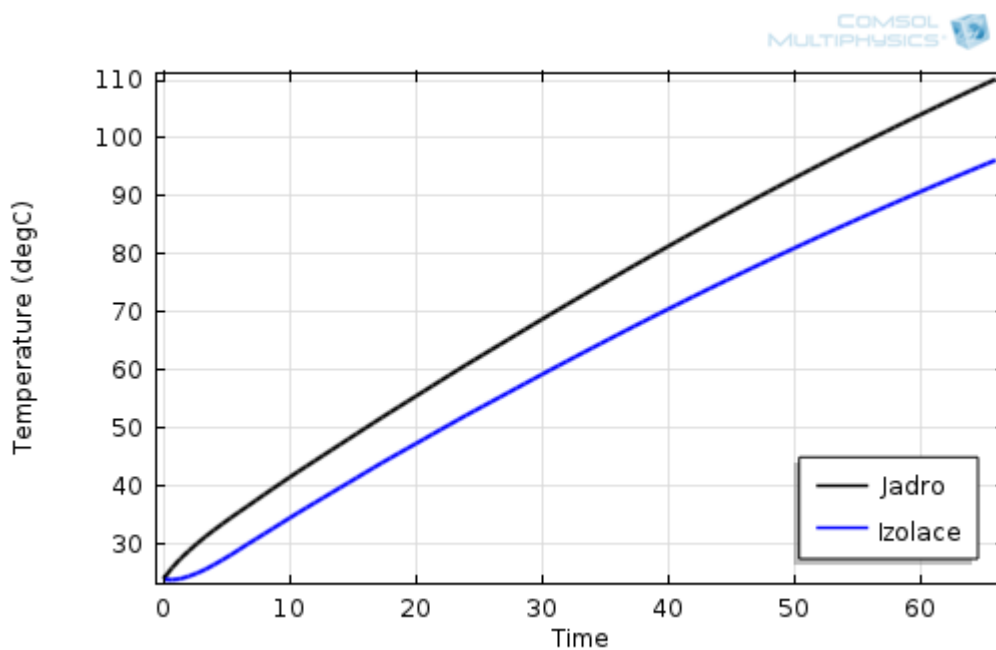
Obr. 3.11 - Závislost teploty na čase

### 3.4.3.2 Kabel CY, zatížení 52 A



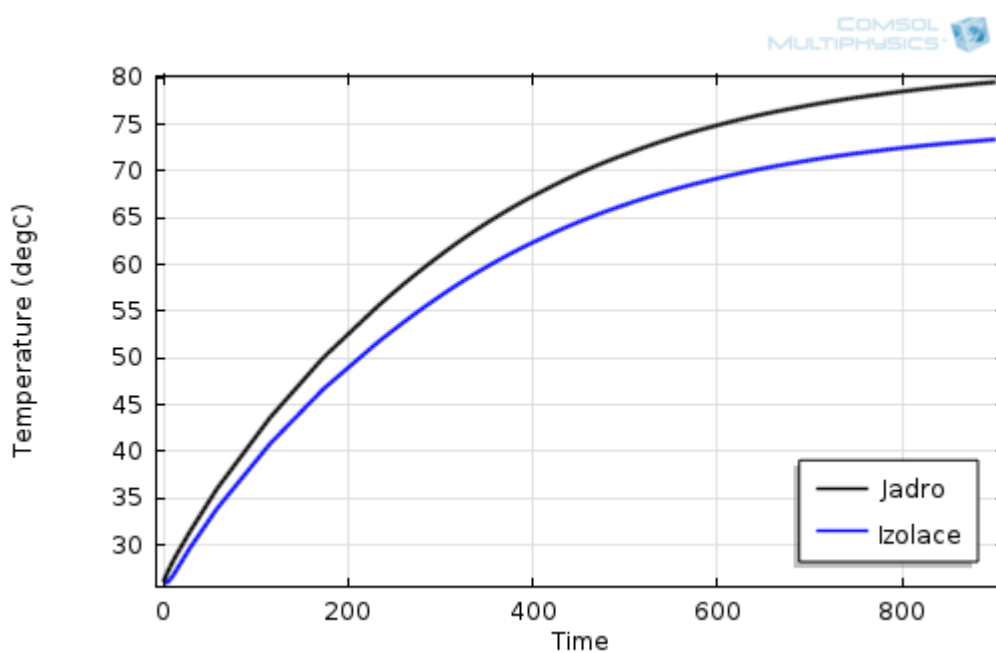
Obr. 3.12 - Závislost teploty na čase

### 3.4.3.3 Kabel CY, zatížení 63 A



Obr. 3.13 - Závislost teploty na čase

### 3.4.3.4 Kabel AY, zatížení 200 A



Obr. 3.14 - Závislost teploty na čase

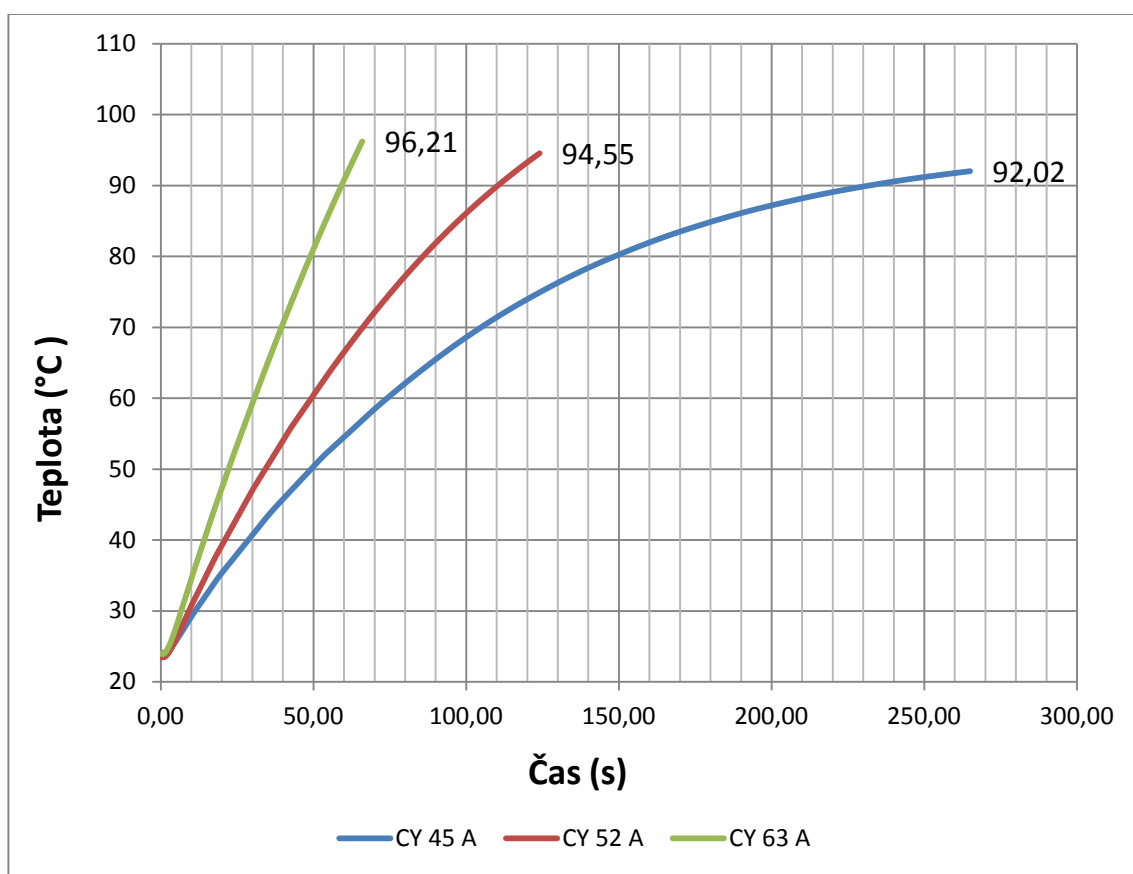
### 3.4.4 Porovnání oteplení pro všechna zatížení

Na následujících obrázcích si je zobrazena závislost teploty na okraji izolace (nejmenší teplota v modelu) na čase.

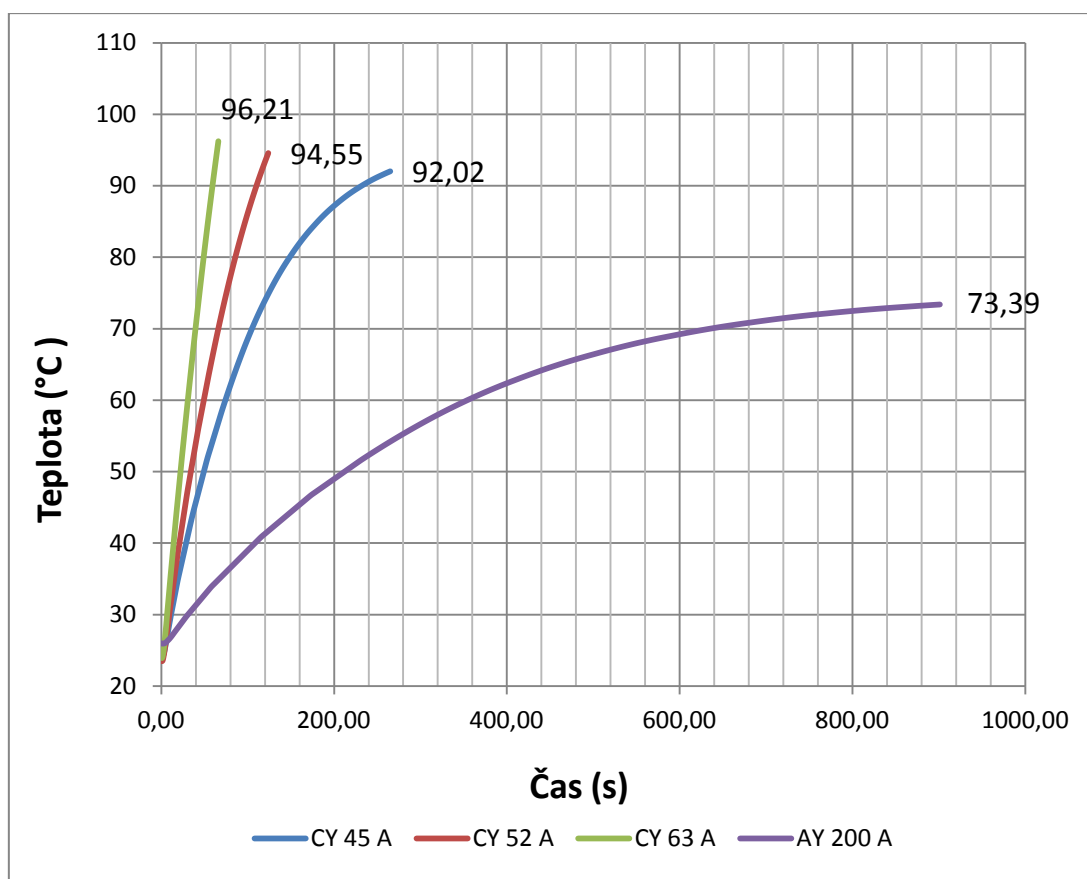
Na Obr. 3.15 můžeme vidět tři různé průběhy teplot pro různá proudová zatížení. Z obrázku je patrné, že při zatížení 45 A se izolace kabelu CY oteplí na maximální povolenou hodnotu 90 °C přibližně za 240 sekund. Při zatížení 63 A se izolace oteplí na 90 °C přibližně za 60 sekund. To znamená, že zvýšení proudu o 18 A způsobí přibližně 3,3krát rychlejší oteplení.

Na Obr. 3.16 je zobrazené porovnání oteplení kabelu CY a kabelu AY. Je zjevné, že kabel AY maximální povolené hodnoty 90 °C nedosáhne, ačkoliv byl zatěžován proudem 200A. To je způsobené větším průřezem tohoto kabelu.

Můžeme vidět, že průběh teploty stoupá exponenciálně, jak je popsáno v kapitole 2.2.



Obr. 3.15 - Závislost teploty (okraj izolace) na čase pro 3 různá zatížení kabelu CY



Obr. 3.16 - Závislost teploty (okraj izolace) na čase pro 3 různá zatížení kabelu CY a AY

## 4 Měření dynamického oteplení

Měření dynamického oteplení jsem provedl v laboratoři elektrických přístrojů. Parametry a provedení simulovaných kabelů jsou uvedeny v kapitole 3.2. Měděný kabel CY jsem měřil pro tři různé proudy (45 A, 52 A, 63 A). Hliníkový kabel AY jsem změřil pro jednu hodnotu proudu 200 A.

Pro změření teploty jsem použil termokameru FLIR T 335. Pro proudové zatížení kabelů jsem použil napěťový zdroj MEGGER s rozsahem proudu 0-500 A.



Obr. 4.1 - Způsob měření dyn. oteplení

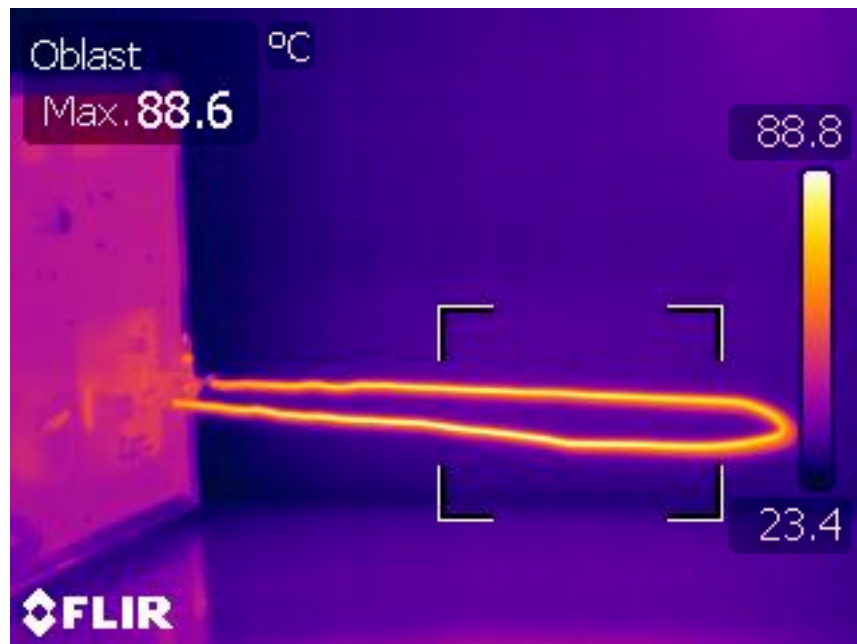
### 4.1 Postup měření

Jednotlivé kabelové vodiče jsem nejprve připojil ke zdroji MEGGER. Poté jsem nastavil konstantní zatěžovací proud. Termokamerou jsem snímal teplotu kabelu. Po dosažení maximální povolené teploty kabelu (přibližně 90 °C) jsem zdroj vypnul, aby nedošlo k



poškození izolace.

Na termokameře bylo nastavena emisivita  $\varepsilon = 0,98$ , bylo tak provedeno na základě srovnávacího měření s termočlánkem. Vzhledem k tomu, že jsem použil napěťový zdroj, musel jsem výstupní proud regulovat. S rostoucí teplotou vodiče se zvětšoval odpor a proud obvodem klesal. Napětí jsem proto musel zvětšovat, aby byla dodržena podmínka konstantního proudu kabelem.

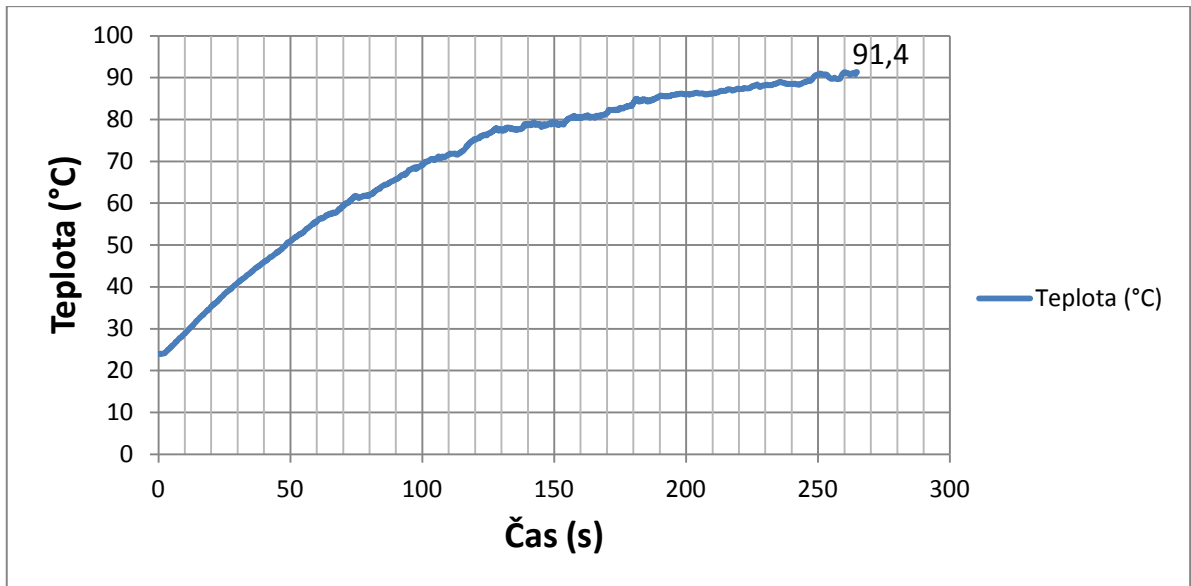


Obr. 4.2 - Zobrazení otepleného kabelu v infračervené oblasti

## 4.2 Výsledky měření

### 4.2.1 Kabel CY, zatížení 45 A

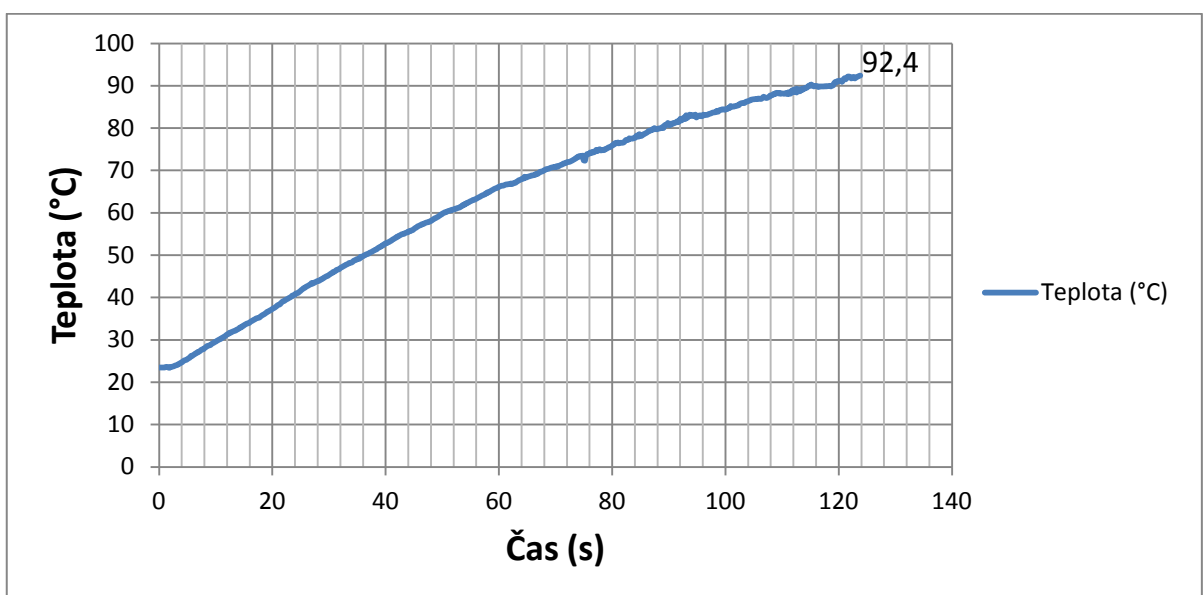
Na Obr. 4.3 je zobrazena závislost teploty kabelu CY na čase při zatížení 45 A. Z obrázku je patrné, že kabel CY se z počáteční teploty (24 °C) oteplí na maximální povolenou teplotu izolace (90 °C) za přibližně 250 sekund. Můžeme vidět, že průběh teploty stoupá exponenciálně, jak je popsáno v kapitole 2.2.



Obr. 4.3 - Průběh oteplení kabelu CY při zatížení 45 A

#### 4.2.2 Kabel CY, zatížení 52 A

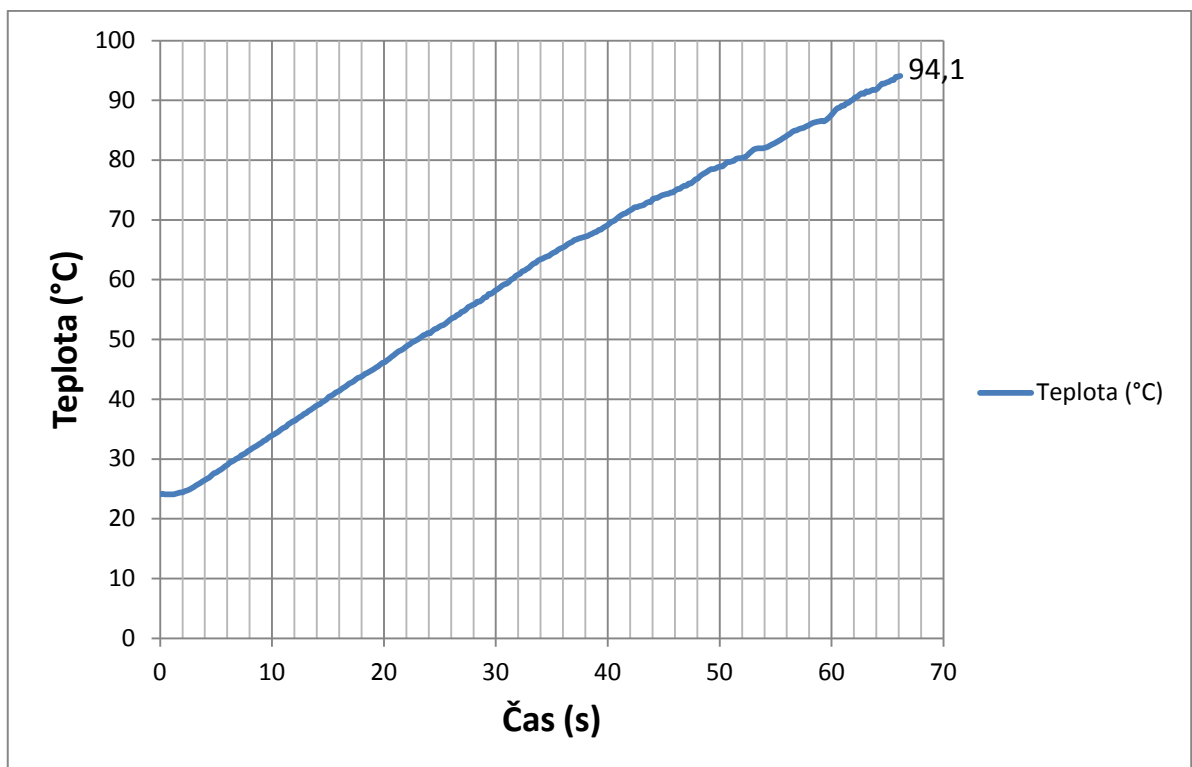
Na Obr. 4.4 je zobrazena závislost teploty kabelu CY na čase při zatížení 52 A. Z obrázku je patrné, že kabel CY se z počáteční teploty (23,5 °C) oteplí na maximální povolenou teplotu izolace (90 °C) za přibližně 120 sekund. Průběh oteplení je část exponenciály.



Obr. 4.4 - Průběh oteplení kabelu CY při zatížení 52 A

#### 4.2.3 Kabel CY, zatížení 63 A

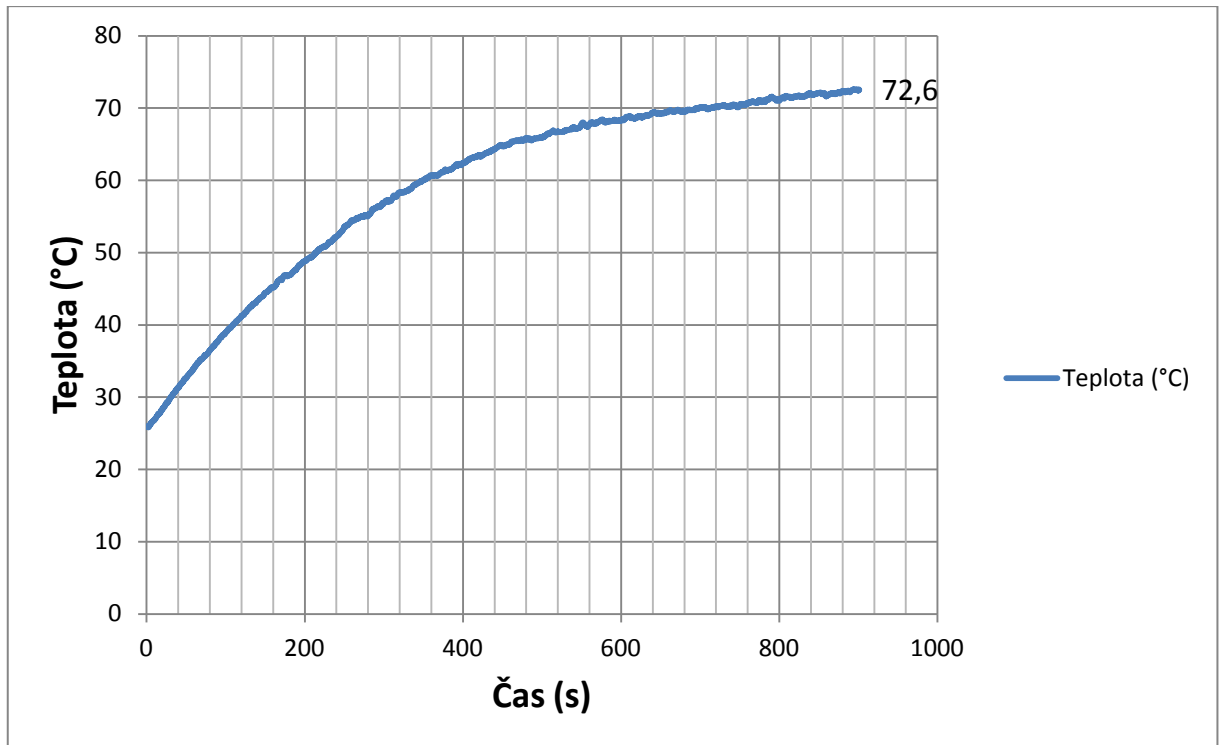
Na Obr. 4.5 je zobrazena závislost teploty kabelu CY na čase při zatížení 63 A. Z obrázku je patrné, že kabel CY se z počáteční teploty (24 °C) oteplí na maximální povolenou teplotu izolace (90 °C) za přibližně 62 sekund. Můžeme vidět, že průběh připomíná spíše přímku, to je způsobeno tím, že měření bylo zastaveno po dosažení teploty přibližně 90 °C. Pokud by měření probíhalo až do ustálení teploty, průběh by byl také exponenciální.



Obr. 4.5 - Průběh oteplení kabelu CY při zatížení 63 A

#### 4.2.4 Kabel AY, zatížení 200 A

Na Obr. 4.6 je zobrazena závislost teploty kabelu AY na čase při zatížení 200 A. Z obrázku je patrné, že kabel AY maximální dovolené teploty izolace (90 °C) nedosáhne. To je způsobené velkým průřezem hliníkového jádra. Průběh oteplení zde také připomíná exponenciálu.



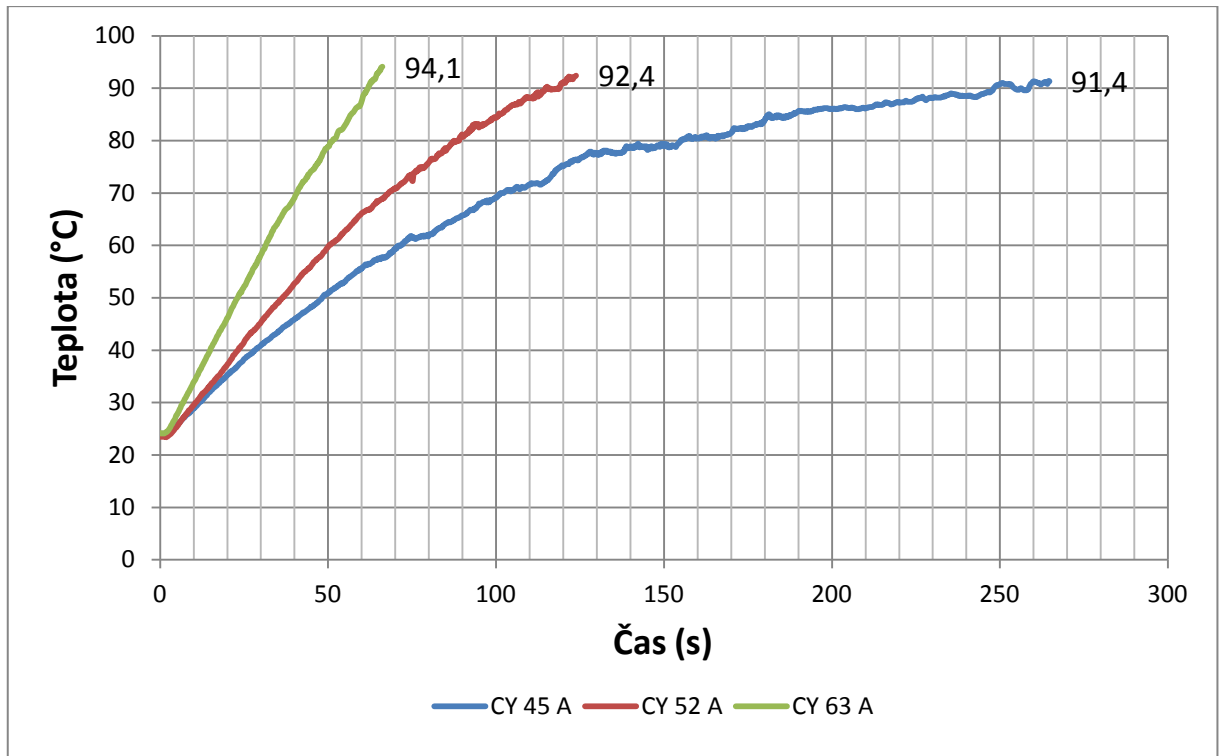
Obr. 4.6 - Průběh oteplení kabelu AY při zatížení 200 A

#### 4.2.5 Porovnání oteplení kabelů pro všechna zatížení

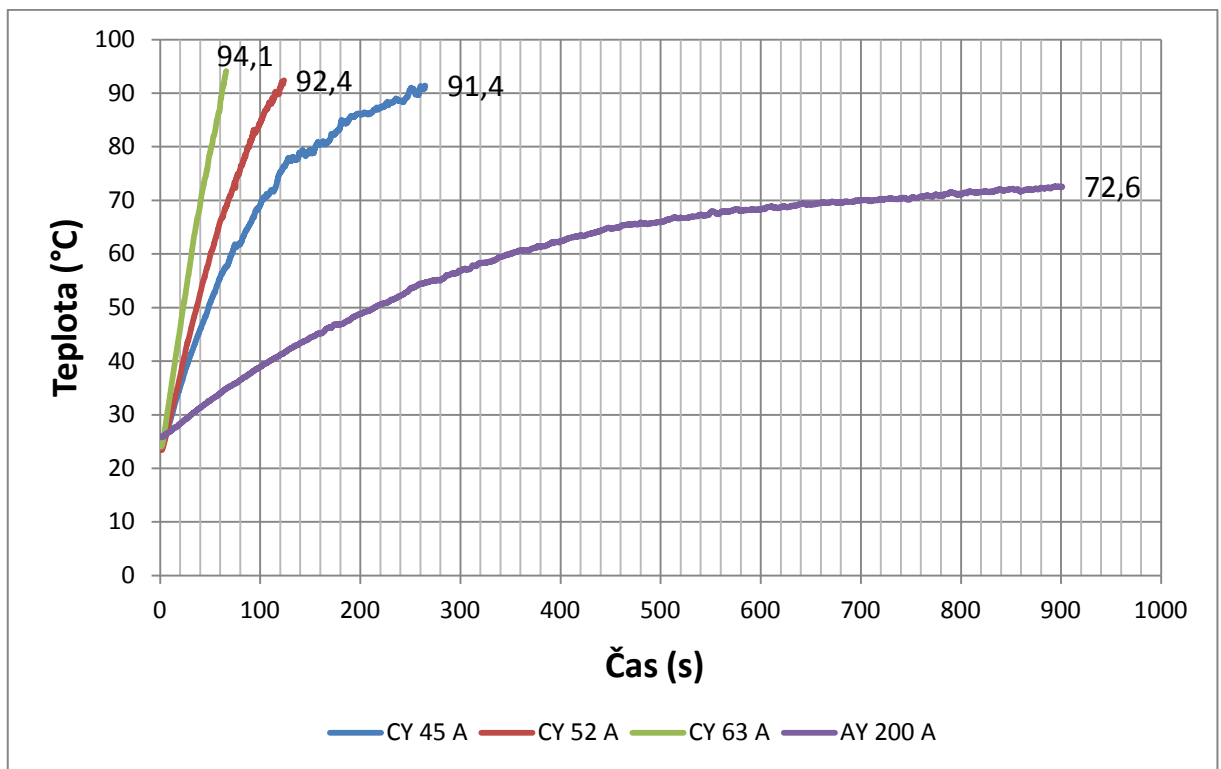
Na následujících obrázcích si je zobrazena závislost teploty kabelů pro různá proudová zatížení.

Na Obr. 4.7 můžeme vidět tři různé průběhy teplot pro různá proudová zatížení. Z obrázku je patrné, že větší proudové zatížení vyvolá rychlejší oteplení kabelu.

Na Obr. 4.8 je zobrazené porovnání oteplení kabelu CY a kabelu AY. Je zjevné, že kabel AY maximální povolené hodnoty 90 °C nedosáhne, ačkoliv byl zatěžován proudem 200 A. To je způsobené větším průřezem jádra tohoto kabelu.



Obr. 4.7 - Závislost teploty na čase pro 3 různá zatížení kabelu CY



Obr. 4.8 - Závislost teploty na čase pro 3 různá zatížení kabelu CY a AY

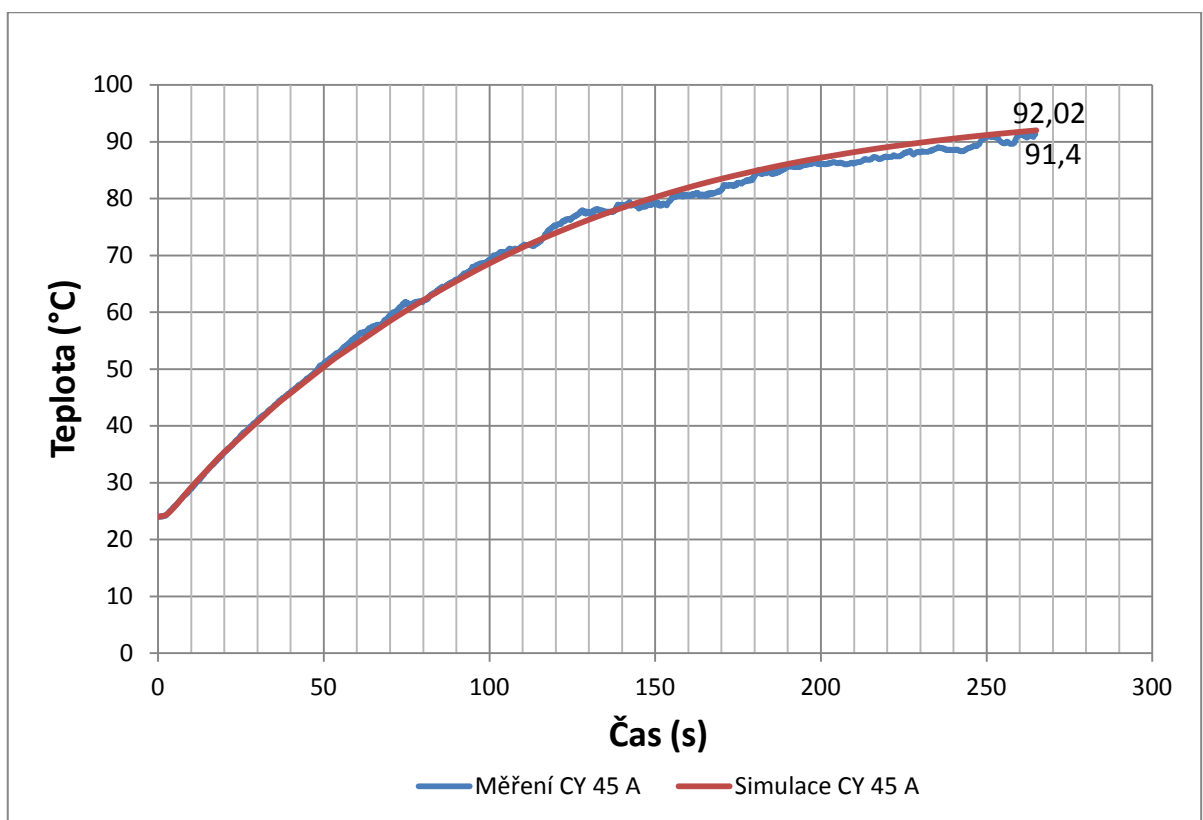
## 5 Porovnání výsledků měření a simulace

V této kapitole jsou porovnávány výsledky nasimulovaného oteplení pomocí programu Comsol a termokamerou změřeného oteplení kabelu CY a kabelu AY.

Porovnávány budou jednotlivé metody mezi sebou pro různá proudová zatížení.

### 5.1 Kabel CY, zatížení 45 A

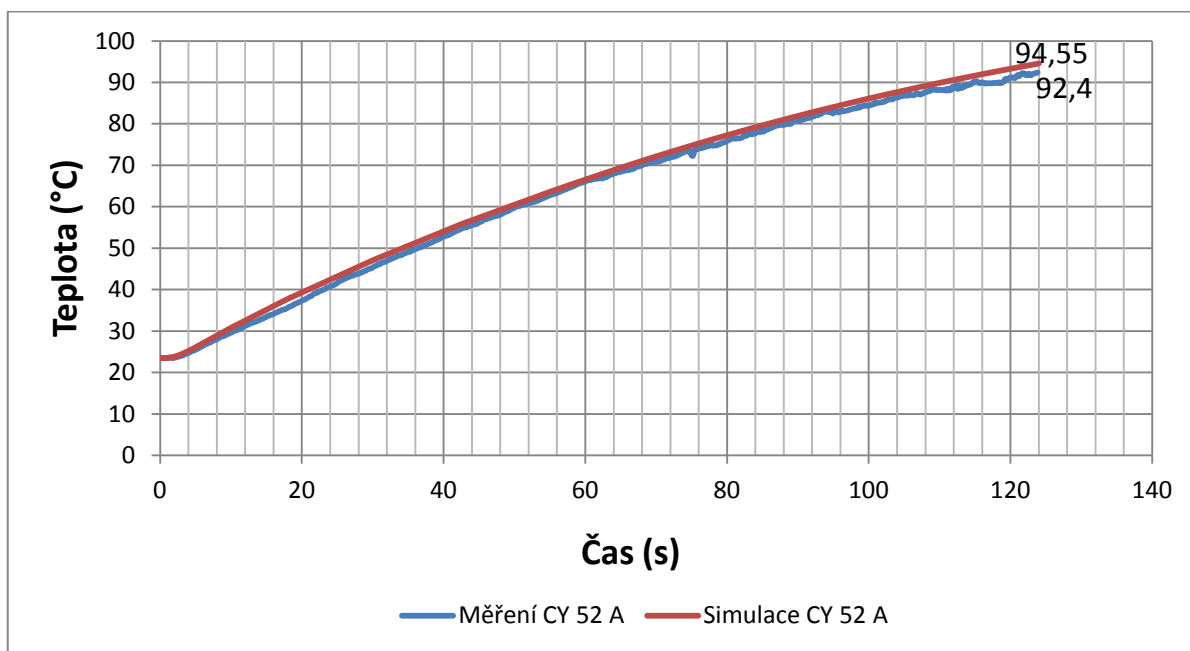
Na Obr. 5.1 můžeme vidět porovnání nasimulovaného průběhu teploty a změřeného průběhu teploty kabelu CY při proudovém zatížení 45 A. Z obrázku je patrné, že simulovaný průběh sleduje změřený průběh teploty. Na konci simulace se konečná teplota simulace liší od měření přibližně o 0,6 °C.



Obr. 5.1 - Porovnání změřené a nasimulované závislosti teploty izolace

## 5.2 Kabel CY, zatížení 52 A

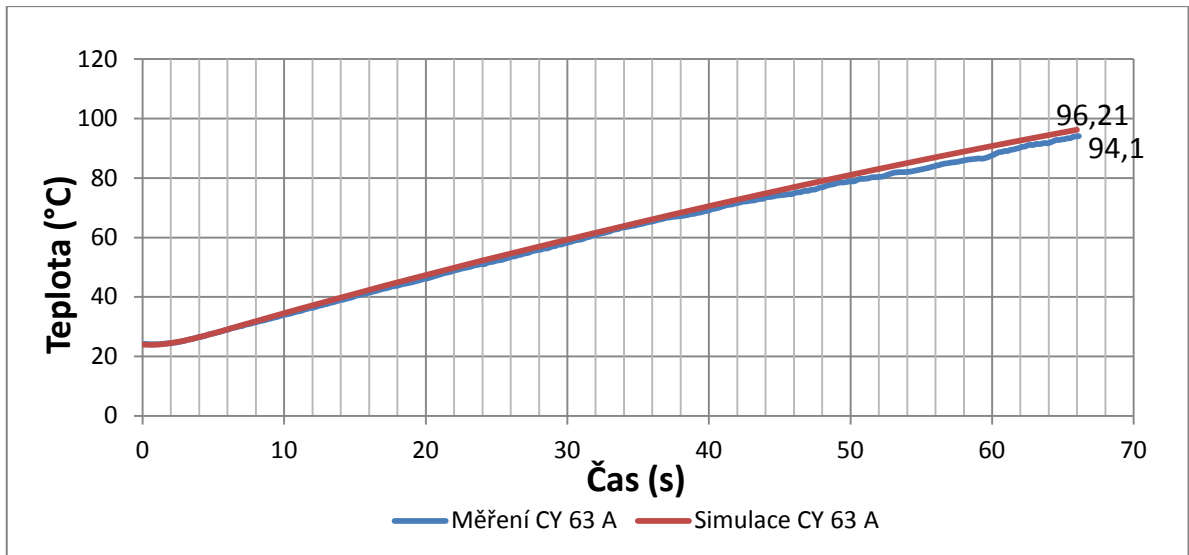
Na Obr. 5.2 je zobrazeno porovnání nasimulovaného průběhu teploty a změřeného průběhu teploty kabelu CY při proudovém zatížení 52 A. Ke konci simulace se maximální teplota liší od změřené teploty zhruba o 2 °C.



Obr. 5.2 - Porovnání změřené a nasimulované závislosti teploty izolace

## 5.3 Kabel CY, zatížení 63 A

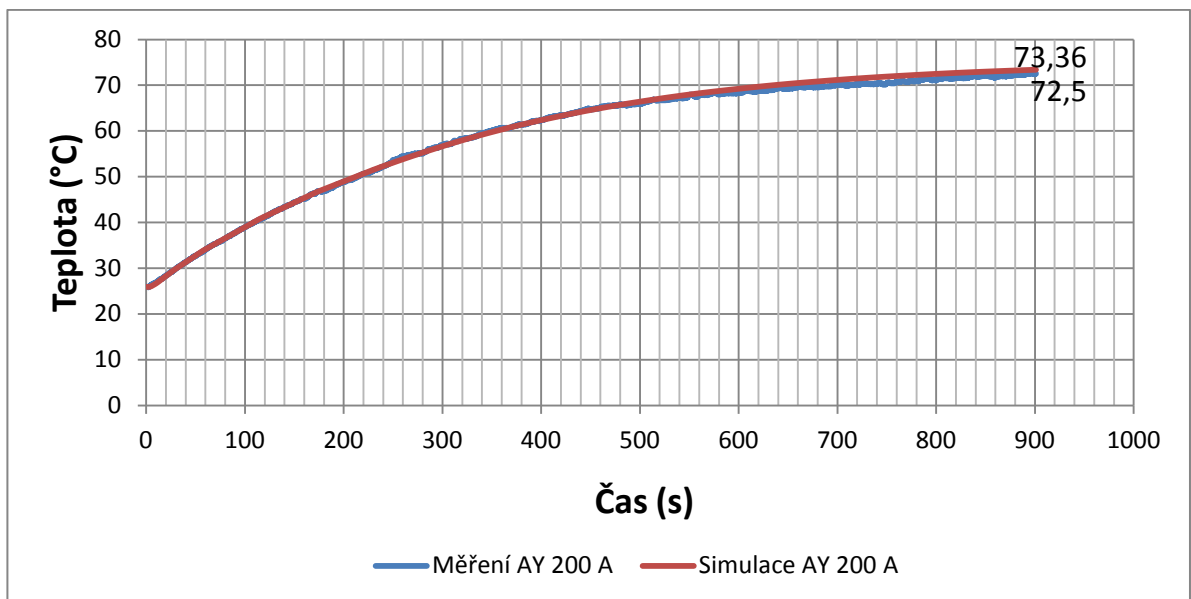
Na Obr. 5.3 můžeme vidět porovnání nasimulovaného průběhu teploty a změřeného průběhu při proudovém zatížení 63 A. Je patrné, že průběhy teplot už sou spíše lineární než exponenciální, protože čas simulace a měření byl krátký. Ke konci simulace se maximální teplota liší od změřené teploty přibližně o 2 °C.



Obr. 5.3 - Porovnání změřené a nasimulované závislosti teploty izolace

#### 5.4 Kabel AY, zatížení 200 A

Na Obr. 5.4 můžeme vidět porovnání nasimulovaného průběhu teploty a změřeného průběhu teploty kabelu AY při proudovém zatížení 200 A. Je patrné, že průběhy teplot jsou exponenciální. Ke konci simulace se maximální teplota liší od změřené teploty přibližně o 1 °C.



Obr. 5.4 - Porovnání změřené a nasimulované závislosti teploty izolace



## Závěr

V dnešní době se čím dál víc využívají programy založené na metodě MKP- metoda konečných prvků (FEM- finite elements method). Používání těchto programů přináší uživateli výhody, kterými jsou např. velká úspora času, téměř úplné vyloučení ručních výpočtů a existence mnoha užitečných variant výstupů. Uživatel u těchto programů nemusí vědět, jak program dospěl k výsledkům.

Neznalost vnitřních algoritmů, ale může přinášet určité problémy. Uživatel neví, jakým způsobem program zpracoval vstupní parametry a nemůže si postup výpočtu výstupních dat poupravit podle sebe. V této bakalářské práci je to například nutnost použití programu Excel pro výpočet závislosti hustoty ztrát na teplotě.

K vytvoření numerického modelu je nutno do programu zadat vstupní parametry, z nichž některé jsou jen těžko zjistitelné. Je tedy nutné volit jen jejich přibližné hodnoty. Z toho vyplývá, že model bude z části také jen přibližný. Na uživateli pak zůstává problém správné interpretace výsledků získaných simulačním programem.

Z kapitoly 5 je patrné, že konečné nasimulované teploty se od konečných změřených teplot liší maximálně o 2 °C. Těchto výsledků bylo dosaženo až po korekci vstupních parametrů modelu, protože například rezistivitu výrobce kabelu AY/CY neudává přesně, ale udává pouze podle normy její maximální hodnotu. Menší oteplení při měření mohlo být také způsobeno nastavováním konstantního proudu v kabelu. Vzhledem k tomu že zdroj byl napěťový, bylo potřeba regulovat napětí, aby kabelem tekla konstantní proud, protože s rostoucí teplotou se odpor kabelu zvyšoval a tím by se snižoval proud kabelem.

Výsledky simulace se tedy víceméně shodují s měřením. Simulaci tedy můžeme použít při navrhování vedení a zefektivnění provozu dynamickým zatěžováním vedení. Nicméně je důležité správně určit vstupní parametry simulace a výsledky brát s určitou rezervou, protože ne všechny vstupní parametry se dají určit se stoprocentní přesností.

V práci jsem se zabýval dynamickým oteplením kabelových vodičů. Práce by mohla pokračovat v simulaci složitějších kabelů, než jsou jednožilové kabely s plným jádrem. Simulace by také mohla být doplněna o různé systémy uložení kabelů (v půdě, v kolektoru, svisle, vodorovně), které mají také vliv na výsledné oteplení.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ČSN 33 2000-5-523 Elektrická zařízení Část 5 – Výběr a stavba elektrických zařízení Oddíl 523 – Dovolené proudy
- [2] ČSN 33 2000-4-43 Elektrická zařízení Část 4 – Bezpečnost. Oddíl 43 – Ochrana proti nadproudům
- [3] KRÍŽ, Michal. *Dimenzování a jištění elektrických zařízení: tabulky a příklady*. Praha: IN-EL, 2001. 194 s. Knižnice Elektro; sv. 56. ISBN 80-86230-21-X.
- [4] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. 2 sv. ISBN 80-7082-826-9.
- [5] KOTLAN, Jiří. *Úvod do elektrotechniky (učební texty pro předmět KTE/+UE)*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2007
- [6] RUSŇÁK, Štěpán a ŘEZÁČEK, Petr. *Elektrické přístroje*. 1. 2., přeprac. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2001. 155 s. ISBN 80-7082-825-0.
- [7] ECKERTOVÁ, L.: *Fyzikální elektronika pevných látek*. UK, Karolinum, Praha 1992.
- [8] ÇENGEL, Yunus A. a GHAJAR, Afshin J. *Heat and mass transfer: fundamentals & applications*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, ©2011. xix, 924 s. ISBN 978-0-07-339812-9.
- [9] Fyzika v pozadí: Měrná tepelná kapacita [online]. 4.2.2012. Dostupné z: [http://www.techmania.cz/edutorium/art\\_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d6f6c656b756c6f76e12066797a696b61h&key=323](http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d6f6c656b756c6f76e12066797a696b61h&key=323)
- [10] Wiedemannův-Franzův zákon [online]. 4.2.2012. Dostupné z: <http://oldweb.izip.cz/ds3/hypertext/JVAJG.htm>
- [11] HOFMANN J., URBANOVÁ M.: *Fyzika I*. Verze 1.0. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2005. [online]. 24.4.2007. Dostupné z: [http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_ekniha-001/pages-img/obsah.html](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_ekniha-001/pages-img/obsah.html)
- [12] Přestup tepla [online]. 4.2.2012. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Přestup\\_tepla#Sou.C4.8Dinitel\\_p.C5.99estupu\\_tepla](http://cs.wikipedia.org/wiki/Přestup_tepla#Sou.C4.8Dinitel_p.C5.99estupu_tepla)
- [13] BARTA, Karel a VOSTRACKÝ, Zdeněk. *Spínací přístroje velmi vysokého napětí*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983. 445 s.
- [14] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985. 436 s.
- [15] HORÁK, Karel. *Výpočet elektrických sítí*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980. 307 s.
- [16] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. 239 s. Senzory neelektrických veličin; sv. 1. ISBN 80-7300-145-4.
- [17] LYSENKO, Vladimír. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. 153 s. Senzory neelektrických veličin; sv. 2. ISBN 80-7300-180-2.
- [18] KINDL, Vladimír. *Modelování polí v elektrických strojích*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. Podpůrný text pro výuku KEV/MPS
- [19] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Podpůrný text pro výuku předmětu Rozvodná zařízení. [online]. 4.2.2012. Dostupné z: [http://files.gamepub.sk/Bakalar/ET1/Rozvodna\\_zarizeni.pdf](http://files.gamepub.sk/Bakalar/ET1/Rozvodna_zarizeni.pdf)
- [20] ČSN 34 7409 Systém značení kabelů a vodičů