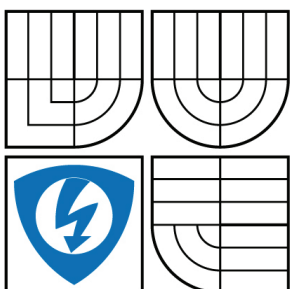


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MODEL PRO VÝPOČET OTEPLOVACÍCH CHARAKTERISTIK SILOVÝCH KABELŮ

MODEL FOR THE CABLE THERMAL CHARACTERISTIC CALCULATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

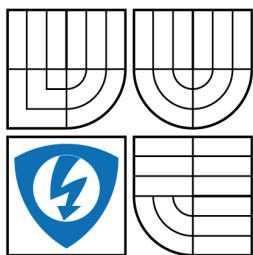
Bc. ZDENĚK STARÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAROSLAVA ORSÁGOVÁ, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Zdeněk Starý

ID: 83232

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Model pro výpočet oteplovacích charakteristik silových kabelů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teorie oteplování silových kabelů elektrickým proudem.
2. Model tepelného pole jednofázového silového kabelu v MATLABu Simulinku.
3. Parametrizace modelu na základě údajů výrobce a způsobu uložení kabelu.
4. Verifikace modelu měřením oteplení vodiče při průchodu elektrického proudu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 25.5.2009

Vedoucí práce: Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan

Jméno a příjmení: Bc. Zdeněk Starý

Bytem: Družstevní 5, 594 01, Velké Meziříčí

Narozen (datum a místo): 14.05. 1983, Mostiště - Velké Meziříčí

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Model pro výpočet oteplovacích charakteristik silových kabelů

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Ústav: Ústav elektroenergetiky

Datum obhajoby VŠKP: 15.06.2009

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v* :

- tištěné formě – počet exemplářů 1
- elektronické formě – počet exemplářů 1

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Bibliografická citace práce:

STARÝ, Z. *Model pro výpočet oteplovacích charakteristik silových kabelů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

.....

Děkuji vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslavě Orságové, Ph.D., za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Diplomová práce

Model pro výpočet oteplovacích charakteristik silových kabelů

Bc. Zdeněk Starý

vedoucí: : Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2009

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Master's Thesis

Model for the Cable Thermal Characteristic Calculation

by

Bc. Zdeněk Starý

Supervisor: Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Brno University of Technology, 2009

Brno

ABSTRAKT

V rámci této práce byl vytvořen model pro výpočet oteplovacích charakteristik silových kabelů. Přípravený přehled se nejprve věnuje základním pojmům z kabelové techniky. Navazuje jednoduché popsání jednotlivých možností přestupu tepla do okolí. V práci je zmíněna fyzikální podstata oteplování kabelů. Je zde popsán výpočet venkovních tepelných odporů kabelů. Lze se zde seznámit s metodou výpočtu oteplení silových kabelů. V rámci práce byl vytvořen a parametrizován model pro výpočet oteplovacích charakteristik silových kabelů, který je založen na metodě uvedené Van Wormerem. V závěru práce proběhla verifikace vytvořeného modelu s reálným kabelem. Proběhlo měření a porovnání výsledků modelování a měření.

KLÍČOVÁ SLOVA: kabel; Matlab Simulink; oteplení; přenos tepla; tepelný odpor; tepelná kapacita; teplota; Van Wormer; zatěžovací proud

ABSTRACT

The result of this assignment is the Model for the Cable Thermal Characteristic Calculation. Firstly, there is a prepared overview that is focused on the essential ideas of cable technology. The following part describes the simple possibilities of passaging the heat. Secondly, the physical essence of warming cables as well as the possibility to discover the methods how to calculate the warming cables are also mentioned in this task. There is an opportunity to find the methods for calculating the warming cables as well. The model was verificationed in the conclusion of my assignment. The measurement was done and the empirical results were compared with the results that were achieved by modeling.

KEY WORDS: cable; heat transfer; temperature; thermal resistance; thermal capacitance; temperature; Van Wormer; load current; warming

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	12
SEZNAM TABULEK	13
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	14
CÍLE PRÁCE	16
1 ÚVOD	17
2 ZÁKLADNÍ POJMY KABELOVÉ TECHNIKY	18
2.1 MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI KABELOVÉHO VEDENÍ	18
2.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI KABELOVÉHO VEDENÍ	18
2.2.1 SKINEFEKT, JEV BLÍZKOSTI KABELOVÝCH VEDENÍ.....	19
2.2.2 STÍNĚNÍ KABELOVÝCH VEDENÍ.....	19
2.3 ELEKTRICKÉ POLE KABELOVÝCH VEDENÍ.....	19
2.4 MAGNETICKÉ POLE KABELOVÝCH VEDENÍ.....	20
3 PŘENOS TEPLA	21
3.1 DRUHY ŠÍŘENÍ TEPLA.....	21
3.2 VLASTNOSTI ŠÍŘENÍ TEPLA.....	21
3.3 PŘESTUP TEPLA KONDUKČÍ VÁLCOVOU STĚNOU.....	21
4 FYZIKÁLNÍ PODSTATA OTEPLOVÁNÍ KABELŮ	23
4.1 URČENÍ VELIKOSTI OTEPLENÍ.....	27
4.2 OTEPLOVÁNÍ VODIČŮ PŘI PŘETÍŽENÍ	27
4.3 OKOLNÍ TEPLOTA	28
4.4 TEPELNÝ ODPOR PŮDY.....	28
5 VENKOVNÍ TEPELNÉ POLE A VENKOVNÍ TEPELNÝ ODPOR KABELŮ.....	29
5.1 SILOVÝ KABEL ULOŽENÝ V PŮDĚ.....	29
5.2 SILOVÝ KABEL VE VZDUCHU	31
6 TEPELNÝ VÝPOČET KABELU V USTÁLENÉM STAVU	33
7 PŘECHODNÉ TEPELNÉ JEVY SILNOPROUDÝCH KABELŮ	36
7.1 ŘEŠENÍ NESTACIONÁRNÍCH STAVŮ KABELŮ ULOŽENÝCH VE VZDUCHU; METODA PODLE VAN WORMERA.....	37
7.2 ŘEŠENÍ TEPELNÝCH JEVŮ KABELŮ ULOŽENÝCH V PŮDĚ	40
8 VÝPOČTY A SIMULACE V PROGRAMU MATLAB A SIMULINK	41
8.1 PROGRAMOVÁ REALIZACE POČÍTAČOVÉHO MODELU OTEPLOVACÍCH CHARAKTERISTIK.....	41
8.2 MODEL OTEPLOVACÍCH CHARAKTERISTIK V MATLAB SIMULINKU.....	43
8.2.1 POPIS VSTUPŮ A VÝSTUPŮ MODELU OTEPLOVACÍCH CHARAKTERISTIK SILOVÝCH KABELŮ .	45
8.3 PARAMETRIZACE MODELU OTEPLOVACÍCH CHARAKTERISTIK	45
8.3.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI KABELU.....	45

8.3.2 MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI KABELU	47
8.3.3 VÝPOČET ZATĚŽOVACÍHO PROUDU PRO MODEL OTEPLOVACÍCH CHARAKTERISTIK	48
8.3.4 VÝPOČET JEDNOTLIVÝCH TEPELNÝCH KAPACIT A TEPELNÝCH ODPORŮ	49
8.3.5 VÝPOČET DIELEKTRICKÝCH ZTRÁT PRO KABEL AXEKVCEY $1 \times 70 \text{ mm}^2$	50
8.4 VÝSLEDKY DOSAŽENÉ MODELOVÁNÍM OTEPLENÍ SILOVÉHO KABELU AXEKVCEY $1 \times 70 \text{ mm}^2$	51
9 VERIFIKACE MODELU MĚŘENÍM OTEPLENÍ KABELU	54
10 ZÁVĚR	60
POUŽITÁ LITERATURA	62

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3-1 Přestup tepla pro válcovou stěnu</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 4-1 Oteplovací charakteristika</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 4-2 Oteplovací charakteristika u zařízení s přerušovaným provozem.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 5-1 Schematické znázornění kabelu uloženého ve vzduchu[2]</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 6-1 Tepelné schéma kabelu pro výpočet ustáleného stavu</i>	<i>33</i>
<i>Obr.7-1 Náhradní tepelná síť pro řešení přechodných tepelných jevů pro kabely uložené ve vzduchu.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 7-2 Radiální průběh teploty v izolaci jednožilového kabelu s kovovým pláštěm.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 8-1 Model vstupů a výstupů oteplovacích charakteristik.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 8-2 Model sestavený z odvozených diferenciálních rovnic</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 8-4 Popis kabelu AXEKVCEY 1×70mm²</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 8-5 Oteplovací charakteristika kabelu při konstantním zatížení</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 8-6 Oteplovací charakteristika kabelu při konstantním zatížení</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 8-6 Oteplovací charakteristika kabelu při konstantním zatížení proudem sinusového průběhu.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 9-1 Schéma zapojení pro verifikaci výpočtu oteplovacích charakteristik</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 9-2 Oteplovací charakteristika výpočtem a měřením pro 285 A</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 9-3 Oteplovací charakteristika výpočtem a měřením pro 285 A</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 9-4 Oteplovací charakteristika povrchu kabelu pro 400 A.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 9-5 Oteplovací charakteristika jádra kabelu pro 400 A</i>	<i>58</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 4-1</i> Dovolené provozní teploty a maximální teploty vodičů pro různé druhy izolace (podle tab. 43-NA1z [8])	23
<i>Tab. 8-1</i> Mechanické vlastnosti kabelu AXEKVCEY 1×70 mm ²	46
<i>Tab. 8-2</i> Rozměry jednotlivých částí kabelu AXEKVCEY 1×70 mm ²	47
<i>Tab. 8-3</i> Materiálové vlastnosti kabelu AXEKVCEY 1×70 mm ²	48

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Značka jednotky
<i>B</i>	magnetická indukce	<i>T</i>
<i>C_a</i>	tepelná kapacita izolace	<i>J·K⁻¹</i>
<i>C_j</i>	tepelná kapacita jádra	<i>J·K⁻¹</i>
<i>C_p</i>	provozní kapacita kabelu	<i>F·m⁻¹</i>
<i>C₁</i>	tepelná kapacita reprezentující jádro kabelu	<i>J·K⁻¹</i>
<i>C₂</i>	tepelná kapacita reprezentující část izolace	<i>J·K⁻¹</i>
<i>C₃</i>	tepelná kapacita reprezentující stínění kabelu	<i>J·K⁻¹</i>
<i>c</i>	měrná tepelná kapacita	<i>J·kg⁻¹·K⁻¹</i>
<i>D</i>	průměr kabelu	<i>m</i>
<i>H_e</i>	venkovní tepelný odpor	<i>K·W⁻¹</i>
<i>H₁</i>	tepelný odpor reprezentující danou část kabelu	<i>K·W⁻¹</i>
<i>H</i>	magnetická intenzita	<i>A·m⁻¹</i>
<i>h</i>	hloubka uložení kabelu v půdě	<i>m</i>
<i>I_N</i>	jmenovitá proudová zatížitelnost kabelu	<i>A</i>
<i>I_m</i>	nadproud	<i>A</i>
<i>I_z</i>	dovolené proudové zatížení	<i>A</i>
<i>I</i>	zatěžovací proud	<i>A</i>
<i>l</i>	délka kabelu	<i>m</i>
<i>m</i>	hmotnost vodiče	<i>kg</i>
<i>m_Σ</i>	počet jader kabelu, která jsou zatížena proudem	-
<i>p</i>	koeficient respektující logaritmické chování teploty	-
<i>P</i>	celkový ztrátový výkon kabelu	<i>W</i>
<i>dQ</i>	teplo vyvinuté průchodem proudu kabelem	<i>J</i>
<i>dQ₁</i>	teplo akumulované v kabelu	<i>J</i>
<i>dQ₂</i>	teplo odevzdané do okolí	<i>J</i>
<i>r₁</i>	poloměr izolace kabelu	<i>m</i>
<i>r₂</i>	poloměr jádra kabelu	<i>m</i>
<i>R₀</i>	odpor vodiče při teplotě okolí <i>ϑ₀</i>	<i>Ω</i>
<i>R_ϑ</i>	elektrický odpor jádra při dané teplotě	<i>Ω</i>
<i>r_k</i>	poloměr kabelu	<i>m</i>
<i>S</i>	plochy povrchu vodiče	<i>m²</i>
<i>t</i>	čas průchodu proudu	<i>s</i>
<i>T₁</i>	teplota jádra kabelu způsobená průchodem proudu	<i>°C</i>
<i>T₂</i>	teplota okolí	<i>°C</i>
<i>tgδ</i>	ztrátový činitel izolace kabelu	-
<i>U_f</i>	fázové napětí kabelu	<i>V</i>
<i>α_R</i>	teplotní součinitel odporu	<i>K⁻¹</i>
<i>α_s</i>	teplotní konduktivita daného prostředí	<i>W·m⁻¹·K⁻¹</i>
<i>Δϑ</i>	oteplení jádra (povrchu) kabelu	<i>°C</i>

$\Delta\vartheta_m$	maximální ustálené oteplení jádra (povrchu) kabelu	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta\vartheta_{\tau}$	velikost oteplení za dobu τ	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta\vartheta_{\infty}$	ustálené oteplení jádra (povrchu) kabelu při nadproudu	$^{\circ}\text{C}$
$\vartheta(t)$	proměnná teplota vodiče	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_0	teplota okolí	$^{\circ}\text{C}$
λ	součinitel přestupu tepla vedením a prouděním	$\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$
λ_g	tepelná vodivost	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
λ_1, λ_2	součinitele přídavných ztrát v kabelu	
ϑ_m	největší ustálené oteplení jádra (povrchu) kabelu	$^{\circ}\text{C}$
λ_z	tepelná konduktivita země	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
ρ_l	vzdálenost daného bodu	m
μ	permeabilita prostředí	$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$
μ_0	permeabilita vakua	$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$
μ_r	relativní permeabilita	-
τ	časová oteplovací konstanta kabelu	s
ω	úhlová rychlost frekvence napětí	$\text{rad}\cdot\text{s}$

CÍLE PRÁCE

Cílem této diplomové práce je teoreticky popsat oteplování silových kabelů a uvést čtenáře do této problematiky. Jedná se o oteplování průchodem elektrického proudu silnoprůdným kabelem. S oteplením souvisí stárnutí a degradace izolačního stavu kabelu.

Práce bude obsahovat model pro výpočet oteplovacích charakteristik silových kabelů, vytvořený v programu Matlab Simulink, a následnou parametrizaci modelu. Parametry pro model budou získány z katalogu výrobce NKT Cables. Model bude vytvořen pro konkrétní kabel 22-AXEKVCEY 1×70 mm².

Výsledky získané modelováním budou verifikovány srovnáním s hodnotami naměřenými na uvedeném kabelu.

1 ÚVOD

Při zatěžování protéká jádru kabelů elektrický proud, který v těchto jádrech způsobuje Jouleovy ztráty, v kovovém plášti a stínění pak vznikají přídatné ztráty vířivými nebo i cirkulujícími proudy. V případě, že kabely mají i pancíř, především z feromagnetického materiálu, mohou v této části kabelů vznikat mimo ztrát vířivými a cirkulujícími proudy i ztráty hysterezní. Kromě Jouleových ztrát v jádrech kabelu se za hlavní považují i ztráty v jeho izolaci, označované jako ztráty dielektrické.

Aby došlo k rovnovážnému stavu, uvedené ztráty se musejí z kabelu odvést do prostředí a potom dále do vzdálenějšího okolí. V ustáleném tepelném stavu tedy platí, že teplo, které v kabelu vzniká za jednotku času, tzv. ztrátový výkon, se musí rovnat teplu, které je z kabelu odvedeno za jednotku času. Aby se teplo určitým prostředím šířilo, musí být vytvořen tepelný spád. Teplo se potom šíří z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou. Při šíření tepla se v kabelech a jejich okolí vytvářejí tepelná pole, charakterizovaná mapou, tedy rozdělením ekvipotenciálních ploch a siločar, čar charakterizujících směr toku tepla.

2 ZÁKLADNÍ POJMY KABELOVÉ TECHNIKY

Elektrická energie se z center výroben elektrické energie přivádí do spotřebních míst dvěma způsoby:

- venkovním vedením,
- kabelovým vedením.

Kabelová vedení jsou obvykle uložena v zemi.

Výrobní elektrické energie jsou často velmi vzdálené od míst spotřeby elektrické energie. Vodní elektrárny se budují v blízkosti vodních toků. Aby se palivo pro uhelné elektrárny nemuselo dopravovat na velké vzdálenosti, budují se elektrárny v lokalitách, kde se nacházejí zdroje využitelné energie. Taktéž i jaderné elektrárny se budují ve velké vzdálenosti od míst spotřeby. Elektrická energie se proto musí dopravovat do míst spotřeby – obcí, průmyslových oblastí a podobně.

Z ekonomických důvodů jsou výhodnější přenosové cesty venkovním vedením. Mimo ekonomické hledisko je kabelové vedení limitované tepelně. Kabel uložený v zemi je tepelně hůř ochlazovaný než venkovní vedení. Při překročení dovolené teploty jader dochází k rychlejšímu stárnutí izolace. Proto je často potřeba přenášet daný výkon více paralelními kabely [2].

2.1 Materiálové vlastnosti kabelového vedení

V současné době se kabelová vedení pro přenos střídavého výkonu vyrábějí v rozmezích od nízkého napětí 230 V až do hodnot velmi vysokého napětí, tedy 400 kV.

Provozní kapacita kabelového vedení je parametr důležitý pro návrh elektroenergetické sítě, případně systému. Kapacitu kabelového vedení můžeme kompenzovat, čímž se ale zvyšuje cena na vybudování kabelového vedení. Kapacita kabelového vedení je přímo úměrně závislá na permitivitě izolace kabelu. Provozní kapacita kabelového vedení je mnohem větší než u venkovního vedení. Z tohoto důvodu je třeba při návrhu sítě kabelového vedení dbát zvýšené pozornosti na nabíjecí proudy vedení a s tím související podmínky provozu.

Další vlastností elektroizolačního systému materiálu kabelu je činitel dielektrických ztrát $tg\delta$. Tento parametr omezuje přenosovou schopnost kabelového vedení tak, že se vzrůstajícím jmenovitým napětím kabelu rostou v dané izolaci i dielektrické ztráty, které zvyšují oteplení kabelu. Z hlediska oteplení kabelu jsou důležité všechny druhy ztrát, které vznikají v kabelu. Aby se zvýšila přenosová schopnost kabelového vedení, je třeba tyto ztráty omezit na minimum, aby nezpůsobovaly významné zvýšení teploty [2].

2.2 Mechanické vlastnosti kabelového vedení

Isolovaný vodič je jen takový vodič, jehož vodivý a izolační materiál tvoří jeden celek. Holé vodiče jsou navzájem izolované venkovním prostředím. Ale toto prostředí netvoří jednotný konstrukční celek.

Kovová část kabelu, která tvoří vodivou cestu pro přenos elektrické energie, se označuje jako jádro. Jádra sestavená z jednoho drátu se označují jako plná. Jádra tvořená z více drátů se označují jako složená. Tato mohou být lisovaná nebo nelisovaná.

Z hlediska tvaru průřezu mohou být jádra kruhová, sektorová, dutá, segmentová a podobně. Průřez sektorových jader má tvar kruhové výseče se zaoblenými hranami. Segmentová jádra mají kruhový průřez, jsou rozdělena na 4, 6 nebo i více kruhových výsečí. Segmenty mohou být navzájem izolované tenkou vrstvou izolačního materiálu, a to kvůli snížení vlivu skin efektu nebo jevu blízkosti. Všechny segmenty jednoho jádra jsou však segmenty jedné fáze [2].

2.2.1 Skin efekt, jev blízkosti kabelových vedení

V porovnání se stejnosměrným proudem nebývá střídavý proud rovnoměrně rozdělený po průřezu jádra, ale proudová hustota se směrem od povrchu k ose jádra zmenšuje. Toto vytlačování proudu na povrch jádra vlastním magnetickým polem se pro střídavý proud nazývá povrchový jev – skin efekt. Kromě povrchového jevu je znám i jev blízkosti – vytlačování proudu cizím magnetickým polem, obvykle magnetickým polem sousedního paralelního vodiče.

Znalosti o povrchovém jevu a jevu blízkosti jsou důležité zejména pro kabely s velkým průřezem (240 mm²), při vysokofrekvenčních přenosech a podobně.

Vlivem uvedených jevů dochází ke zvýšení činného odporu jader a tím ke zvýšení ztrátového výkonu v jádrech. Proto se jádra velkého průřezu konstruuje tak, aby zvýšení ztrát v nich vlivem povrchového jevu a jevu blízkosti byla co nejmenší.

Velikost vlivu obou jevů na velikost Jouleových ztrát v jádře se posuzuje prostřednictvím činitele zvýšení činného odporu jádra. To je poměr nárůstu činného odporu jádra vlivem střídavého proudu k odporu jádra při stejnosměrném proudě. Oba uvedené jevy ovlivňují i vnitřní reaktanci kabelu. Toto však nemá vliv na zvýšení činných ztrát, jako je tomu při odporu jádra [2].

2.2.2 Stínění kabelových vedení

Pro jádra kabelů pro vyšší napětí, např. pro jmenovité napětí od 6 kV a vyšší, se kabely konstruuje se stíněním jádra kabelu za účelem vyrovnání povrchu složených jader. Stínění jader kabelů se vytváří ovinutím jednou nebo dvěma vrstvami polovodivého materiálu nebo kovové fólie. Jeho funkcí je homogenizace elektrického namáhání na povrchu kovového jádra, a to tak, že se jeho povrch upraví na hladký válcový tvar.

Obal jádra, případně včetně jeho stínění, určený na elektrické odizolování od venkovního prostředí se označuje jako izolace.

Vrstva vodivého nebo polovodivého materiálu, která má za úkol ohraničit elektrické pole žíly kabelu, se nazývá stínění izolace. Na polovodivou část stínění se obvykle navijí měděný pásek, který zabezpečí nulový potenciál na povrchu kabelu po celé jeho délce. Tento pásek může vést nabíjecí a ve značné míře i zkratové proudy. Může i částečně mechanicky ochraňovat kabel [2].

2.3 Elektrické pole kabelových vedení

Z hlediska provozní spolehlivosti je nutné, aby elektroizolační materiál použitý na izolaci kabelu měl co největší elektrickou pevnost a aby maximální elektrické namáhání izolace bylo

ve stanovených mezích, tedy aby nebylo větší, než je dovolené elektrické namáhání elektroizolačního materiálu.

Při daném napětí závisí elektrické namáhání na tvaru elektrického pole, které je dané konstrukcí kabelu a velikostí izolace.

Zvyšování provozní bezpečnosti kabelů zvětšováním izolace je značně neekonomické. Se zvyšováním velikosti izolace vzrůstá nejen spotřeba materiálu na izolační a ochranné obaly, ale i tepelný odpor kabelu. Tím se snižuje proudová zatížitelnost kabelu. Elektrická izolace kabelu je zároveň i tepelnou izolací, a tak zvětšení izolace působí příznivě z hlediska elektrického namáhání, ale opačně je to z hlediska odvádění tepla z jádra kabelu.

Řešení elektrických polí kabelu je potřebné při určování provozní kapacity kabelu a při výpočtu dielektrických ztrát v izolaci. Znalost provozní kapacity je nutná pro stanovení velikosti nabíjecích proudů [2].

2.4 Magnetické pole kabelových vedení

Při zatěžování kabelů teče jejich jádru elektrický proud, který v jádrech a jejich okolí vytváří magnetické pole charakterizované vektorem magnetické intenzity \mathbf{H} nebo magnetické indukce \mathbf{B} . Mezi těmito veličinami platí vztah:

$$\bar{\mathbf{B}} = \mu \cdot \bar{\mathbf{H}} \quad (2.1)$$

kde: $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ – permeabilita prostředí
 μ_0 – permeabilita vakua $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$
 μ_r – relativní permeabilita

Pokud je elektrické pole kabelu uzavřené v objemu izolace, tak magnetické pole kabelu zasahuje do blízkého okolí, a to i tehdy, pokud má kabel magnetické stínící vrstvy. Střídavá magnetická pole vyvolaná střídavým proudem způsobují:

- zvýšení elektrického odporu jádra vlivem skin efektu a jevu blízkosti,
- indukovaná napětí, proudy a ztráty v kovových částech kabelu, případně i v kovových částech konstrukcí v jeho okolí,
- elektrodynamické silové působení, namáhání kabelů při zkratech, vnitřní a venkovní přepětí a podobně.

Elektrodynamické účinky se projevují především při zkratech trojfázových vedení jednožilových kabelů. Vlivem těchto účinků by mohlo v případě kabelů uložených v zemi nebo kabelových kanálů za určitých okolností dojít ke zničení kabelů poškozením izolace [2].

3 PŘENOS TEPLA

3.1 Druhy šíření tepla

Teplo se prostředím šíří třemi základními způsoby:

- **Vedením** – Při vedení (neboli *kondukcii*) se tepelná energie postupně šíří v nepohyblivé hmotě.
- **Prouděním** – Při proudění (neboli *konvekci*) dochází k přenosu tepla v důsledku proudění a promíchávání různě ohřátých částí hmoty.
- **Tepelným zářením** – Při tepelném záření (neboli *sálání* či *radiaci*) dochází k vyzařování energie ze zdroje ve formě elektromagnetických vln a k jeho následnému pohlcování ozařovaným tělesem.

3.2 Vlastnosti šíření tepla

Teplo se vždy šíří od místa s vyšší teplotou k místu s nižší teplotou.

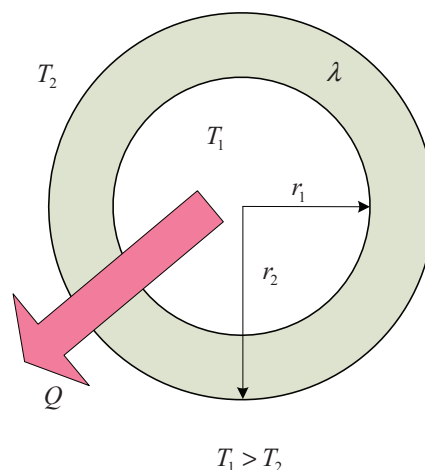
Tepelná energie se může šířit vedením a prouděním pouze v prostředí, které je vyplněno látkou. Příčinou šíření je neustálý pohyb částic hmoty. Vzájemným působením mezi jednotlivými částicemi (např. srážkami) dochází k předávání kinetické energie, a to tak dlouho, dokud nedojde k vyrovnání teplot.

Tepelné záření se svojí povahou odlišuje od vedení a proudění, neboť tepelná energie se může přenášet i v prostoru, který není vyplněn látkou (tedy ve vakuu). Důvodem je skutečnost, že sálání představuje elektromagnetické záření, které ke svému přenosu hmotu nepotřebuje.

3.3 Přestup tepla kondukcí válcovou stěnou

Kabel je tvořen z jádra (Cu, Al) a vnějších vrstev. Ty se mohou skládat z izolace kabelu, stínění, PVC obalu atd. Izolaci kabelu můžeme zahrnout do jedné vrstvy s jednou tepelnou vodivostí.

Přestup tepla kondukcí pro válcovou stěnu je zobrazen na *obr. 3-1*.



Obr. 3-1 Přestup tepla pro válcovou stěnu

Pro šíření tepla kondukcí pro jednu vrstvu platí vztah:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \lambda \cdot (T_1 - T_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot t \quad (3.1)$$

- kde: Q – teplo vyvinuté průchodem proudu
 l – délka kabelu
 λ – tepelná vodivost
 T_1 – teplota jádra kabelu způsobená průchodem proudu
 T_2 – teplota okolí
 r_2 – poloměr jádra kabelu
 r_1 – poloměr izolace kabelu
 t – čas průchodu proudu

Obecně pak pro šíření tepla válcovou stěnou platí vztah pro n vrstev:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \lambda \cdot (T_1 - T_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \cdot t \quad (3.2)$$

Vzorec (3.2) je zobecnění pro n vrstev materiálů izolace kabelu. Je to obecný zápis odvodu tepla z válcového tělesa.

4 FYZIKÁLNÍ PODSTATA OTEPLOVÁNÍ KABELŮ

Průchodem elektrického proudu kabelem vzniká teplo. Kabel proto zvyšuje svoji teplotu tak dlouho, až rozdíl teploty okolí umožní přestup tepla vznikajícího v kabelu do okolního prostředí. Ustálené oteplení kabelu proti teplotě okolí závisí na materiálu, ochlazovací ploše materiálu, způsobu chlazení vodiče a především na velikosti procházejícího proudu. Doba, za kterou ustálené oteplení vznikne, závisí kromě jmenovaných vlivů i na tepelné kapacitě vodiče. Tepelná kapacita vodiče je závislá na hmotnosti a měrném teple dané části kabelu. Stanovením těchto závislostí lze zvolit průřez kabelového vedení podle provozního proudu tak, aby nebyla překročena dovolená provozní teplota. Viz *tab. 4-1*.

Tab. 4-1 Dovolené provozní teploty a maximální teploty vodičů pro různé druhy izolace (podle tab. 43-NA1z [8])

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 umělého kaučuku	guma pryž kaučuk	G	30	60-120	120-150	200-250
do 10kV		G	30	60		150
Etylenpropylenová pryž	EPR		30	90	130	250
Polyetylen	PE	E	30	70		130-150
Zesítněný polyetylen	XE	X	30	90	120	250
Polytetrafluoretylen	PTFE		90	200	300	300
Propylen	FEP		90	200	250	250
normální		N	30	80	120	200
nemigrující		M	30	80		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
-----------------	--	--	----	-----	-----	-----

Při delším působení nadproudů a při zkratech vzroste teplota vodiče nad povolenou mez a dochází ke zničení izolace vodiče a poté ke zničení samotného vodiče. Tato teplota tedy nesmí přesáhnout určitou mezní hodnotu. Hlavní roli v určení této hodnoty hraje teplotní odolnost izolací použitých na vodiči. Nejvyšší dovolená teplota při nadproudech je 120 °C, a to u nejpoužívanější izolace z PVC. Vysoké teploty při nadproudech mají také vliv na samotné vodiče, kde způsobují nezvratné změny vlastností materiálu, zejména mechanické a elektrické pevnosti. Velikost teploty vodiče ovlivňuje délku jeho životnosti. To znamená, že vyšší teploty zkracují životnost vodiče. Např. při krajních teplotách je doba jeho života asi 10 let při nepřerušovaném zatížení [1].

Abychom vyloučili vliv teploty okolí, stanovíme závislost oteplení na čase:

$$\tau(t) = \vartheta(t) - \vartheta_0 \quad (4.1)$$

kde: $\vartheta(t)$ – proměnná teplota vodiče
 ϑ_0 – teplota okolí, kterou považujeme za stálou

Závislost $\tau(t)$ odvodíme za těchto zjednodušujících předpokladů:

- Proud ve vodiči se nemění, jeho rozložení po průřezu je konstantní.
- Vodič je holý, přímý, vodorovně uložený, bez podpěr a bez vlivu koncových svorek na přestup tepla do nich. Tepelný spád vzniká pouze v radiálním směru.
- Zanedbáváme složku tepla sdílenou do okolí radiací.
- Materiálové konstanty uvažujeme jako nezávislé na teplotě.
- Materiál vodiče je homogenní.

V každém časovém intervalu dt platí:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2 \quad (4.2)$$

kde: dQ – teplo vyvinuté průchodem proudu kabelem
 dQ_1 – teplo akumulované v kabelu na ohřátí hmoty v kabelu
 dQ_2 – teplo odevzdané do okolí (ochlazování) vedením a prouděním

Rozepsáním předchozí rovnice (4.2) získáme následující vztah:

$$R_0(1 + \alpha_R \cdot \tau) \cdot I^2 dt = m \cdot c \cdot d\tau + \lambda \cdot S \cdot \tau \cdot dt \quad (4.3)$$

kde: R_0 – odpor vodiče při teplotě okolí ϑ_0
 α_R – teplotní součinitel odporu
 I – zatěžovací proud
 c – měrná tepelná kapacita
 m – hmotnost vodiče

- λ – součinitel přestupu tepla vedením a prouděním do okolí vodiče
 S – plochy povrchu vodiče
 τ – časová oteplovací konstanta kabelu

Úpravou rovnice (4.3) získáme nehomogenní lineární diferenciální rovnici 1. řádu pro funkci $\tau(t)$, kde $t \in \langle 0, \infty \rangle$.

$$\tau \cdot (\lambda \cdot S - R_0 \cdot \alpha_R \cdot I^2) + c \cdot m \frac{d\tau}{dt} = R_0 \cdot I^2 \quad (4.4)$$

Laplaceovou transformací rovnice (4.3) a následnou úpravou získáme tvar:

$$\tau(p) = \frac{R_0 \cdot I^2 + c \cdot m \cdot \tau(0) \cdot p}{p \cdot (\lambda \cdot S - R_0 \cdot \alpha_R \cdot I^2 + c \cdot m \cdot p)} \quad (4.5)$$

kde předmět obrazu operátorové rovnice má následující podobu:

$$\tau(t) = \frac{R_0 \cdot I^2}{\lambda \cdot S - R_0 \cdot \alpha_R \cdot I^2} + \left(\tau(0) - \frac{R_0 \cdot I^2}{\lambda \cdot S - R_0 \cdot \alpha_R \cdot I^2} \right) \cdot e^{-\frac{\lambda \cdot S - R_0 \cdot \alpha_R \cdot I^2}{c \cdot m} t} \quad (4.6)$$

což je exponenciální funkce času s časovou konstantou

$$T = \frac{c \cdot m}{\lambda \cdot S - R_0 \cdot \alpha_R \cdot I^2} \quad (4.7)$$

a ustáleným oteplením

$$\tau(\infty) = \frac{R_0 \cdot I^2}{\lambda \cdot S - R_0 \cdot \alpha_R \cdot I^2} \quad (4.8)$$

Průběh těchto teplot – při oteplování nebo ochlazování kabelu – v určitém časovém úseku lze znázornit pomocí oteplovací charakteristiky kabelu.

Vztah pro průběh oteplovací charakteristiky kabelu je:

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_m \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (4.9)$$

kde: $\vartheta_m = \vartheta_0 + \Delta \vartheta_m$

$\Delta \vartheta$ – oteplení jádra (povrchu) vodiče za čas t od začátku průchodu proudu

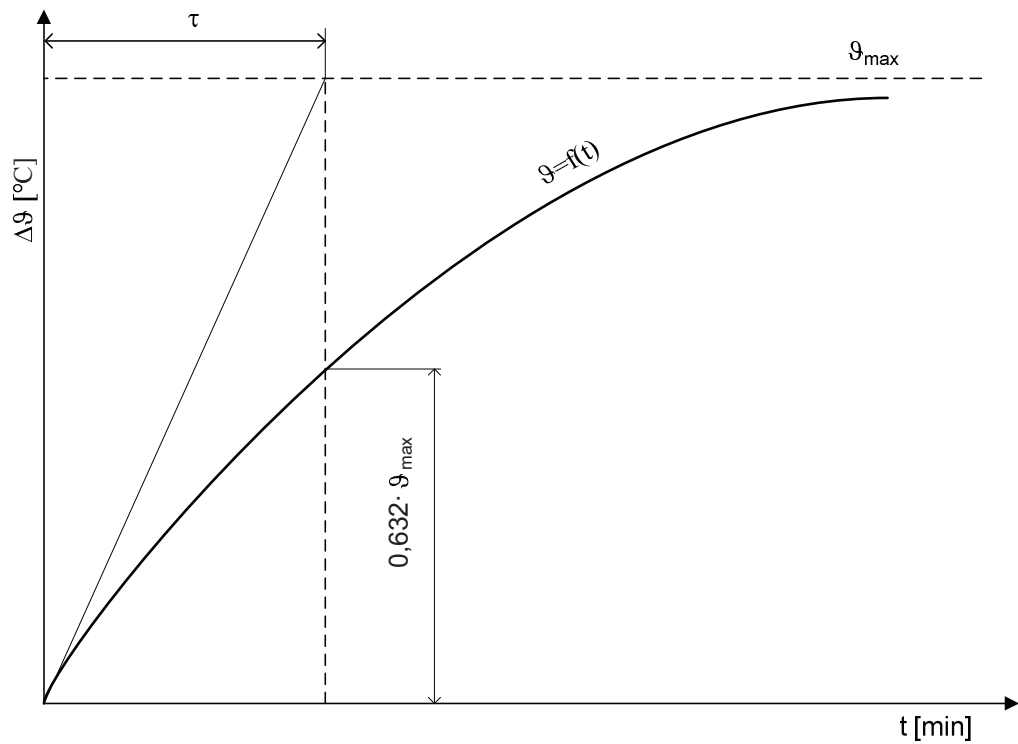
$\Delta \vartheta_m$ – největší ustálené oteplení jádra (povrchu) kabelu

ϑ_0 – počáteční teplota jádra (povrchu) kabelu v okamžiku, kdy začne procházet proud

ϑ_m – největší ustálené oteplení jádra (povrchu) kabelu, jež je způsobeno procházejícím proudem

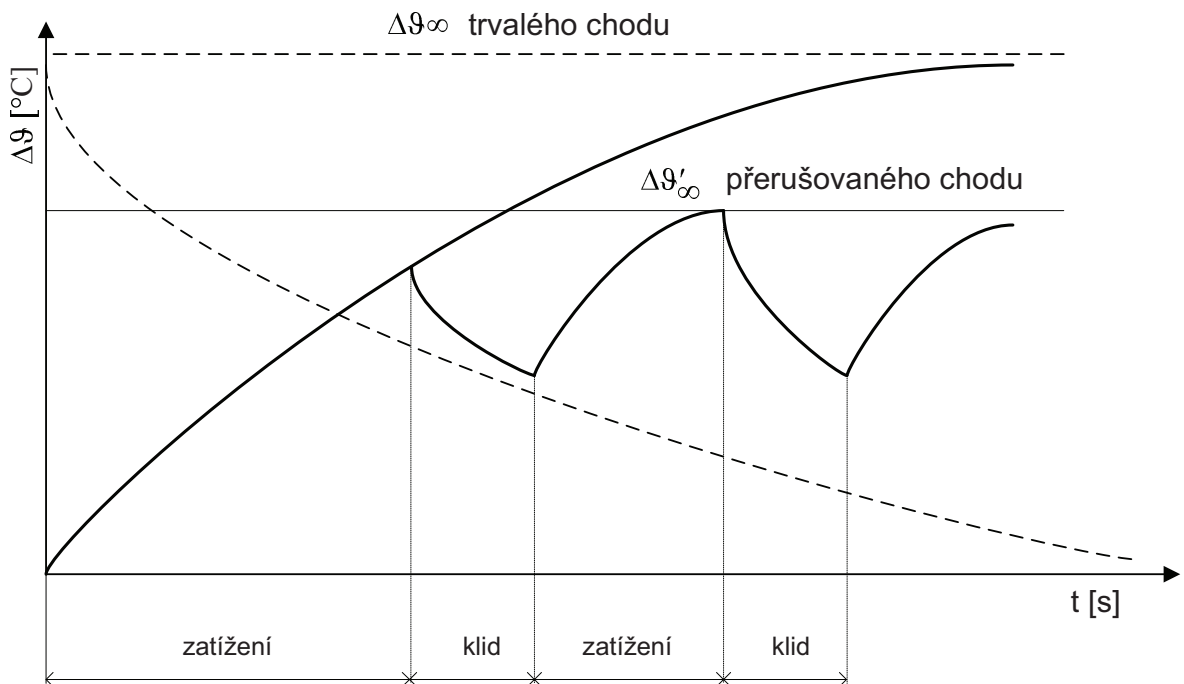
t – čas od počátku průchodu proudu nebo nadproudu

τ – časová oteplovací konstanta kabelu, viz obr. 4-1



Obr. 4-1 Oteplovací charakteristika

Při přerušení obvodu přestane kabelem procházet proud a nevzniká žádné teplo. Naakumulované teplo přechází z kabelu do okolí, a tím se kabel ochlazuje, viz obr. 4-2.



Obr. 4-2 Oteplovací charakteristika u zařízení s přerušovaným provozem

4.1 Určení velikosti oteplení

Pro určení průběhu oteplování kabelu je důležitou veličinou největší ustálené oteplení povrchu jádra kabelu [1].

$$\Delta \vartheta_{\max} = \Delta \vartheta_z \cdot \left(\frac{I_m}{I_z} \right)^x \quad (4.10)$$

Celkové oteplení kabelu je pak:

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_z \cdot \left(\frac{I_m}{I_z} \right)^x \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (4.11)$$

kde: $\Delta \vartheta_{\max}$ – ustálené oteplení povrchu (jádra) kabelu při nadproudu
 $\Delta \vartheta_z$ – oteplení povrchu (jádra) kabelu při proudu I_z
 x – mocnitel stanovený na základě měření
 I_m – nadproud
 I_z – dovolené proudové zatížení podle ČSN 33 2000-5-523
 t – čas od počátku průchodu proudu nebo nadproudu
 τ – časová oteplovací konstanta kabelu

4.2 Oteplování vodičů při přetížení

V každém elektrickém zařízení se setkáváme jak s normálními provozními stavy, tak i se stavy poruchovými. V normálních provozech může docházet k přetížení a při poruchách dochází ke zkratům. Přetížení se vyskytuje častěji než zkrat, ale u zkratů jsou účinky procházejícího proudu větší.

Působením nadproudů na vodič vzniká teplo, které zčásti přechází do okolí a zbytek slouží k oteplování kabelu, rovnice (4.1). Do doby, než se teplota vodiče zvýší na teplotu okolního prostředí, je všechno teplo spotřebováno na oteplování kabelu. Po vyrovnání teplot část tepla přechází do okolí a druhá část zůstává v kabelu a zvyšuje tak jeho teplotu. Při dosažení nejvyšší možné teploty kabelu přechází všechno další vznikající teplo z vodiče do okolí.

Průběh oteplování vodiče má tvar exponenciály. V době, kdy jsou mezi teplotou vodiče a teplotou jeho okolí malé rozdíly, dochází k oteplování vodiče rychle, ale se zvyšujícím se rozdílem teplot se kabel otepluje pomaleji, viz rovnice (4.5) [1].

Vztahy pro určení průběhu oteplení a ochlazování kabelu:

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_{\infty} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad \text{pro oteplování kabelu} \quad (4.12)$$

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_{\infty} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{pro ochlazování kabelu} \quad (4.13)$$

Z těchto rovnic se dá určit násobek maximálního dovoleného oteplení za dobu τ od začátku průchodu proudy:

$$\Delta\vartheta_{\tau} = \Delta\vartheta_{\infty} \cdot (1 - e^{-1}) \quad \text{oteplování kabelu} \quad (4.14)$$

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\infty} \cdot e^{-1} \quad \text{ochlazování kabelu} \quad (4.15)$$

- kde: t – čas od počátku průchodu proudy nebo nadproudu
 τ – časová oteplovací konstanta kabelu
 $\Delta\vartheta_{\infty}$ – ustálené oteplení povrchu (jádra) kabelu při nadproudu
 $\Delta\vartheta$ – oteplení povrchu (jádra) kabelu
 $\Delta\vartheta_{\tau}$ – velikost oteplení za dobu τ

4.3 Okolní teplota

Okolní teplota prostředí má velký vliv na teplotu vodiče. Je to teplota v okolí nezátíženého vodiče. Jako referenční hodnoty těchto teplot jsou udávány:

- 30 °C u izolovaných vodičů a kabelů uložených ve vzduchu,
- 20 °C u kabelů uložených v zemi, a to v trubkách nebo volně.

Pokud je teplota okolí vyšší než teplota referenční, je ztížen odvod tepla z vodiče a musí se použít příslušný korekční součinitel. Tento součinitel nemusíme použít u kabelů uložených v zemi, jelikož její teplota zůstává po většinu roku stejná. Součinitel také neuvažuje změnu teploty působením infračerveného záření na vodiče nebo kabely [1].

4.4 Tepelný odpor půdy

Na tepelném odporu půdy závisí, jak moc a jak rychle se bude odvádět teplo vytvořené ve vodiči dále do prostoru. Hodnota tepelného odporu se může na trase měnit, závisí např. na nadmořské výšce, intenzitě srážek, hloubce uložení aj. Nejčastěji se používá hodnota měrného tepelného odporu $2,5 \text{ K}\cdot\text{m}\cdot\text{W}^{-1}$, přičemž tato hodnota je stanovena pro neznámé typy půd v neznámé zeměpisné poloze s ohledem na bezpečnost. Pokud je tato hodnota ve skutečnosti vyšší, např. u velmi suchých půd nebo půd složených z materiálů s velkým měrným tepelným odporem, je třeba půdu v blízkosti kabelu nahradit nebo snížit dovolené proudy. Naopak u půd s menším měrným tepelným odporem lze proud zvýšit [2].

5 VENKOVNÍ TEPELNÉ POLE A VENKOVNÍ TEPELNÝ ODPOR KABELŮ

Nejběžnějším uložením silových kabelů je uložení v půdě. Kromě toho se kabely instalují ve vzduchu těsně nebo v malé vzdálenosti od stěn místností výrobních hal a jiných prostorů v kabelových kanálech. A to jednotlivě nebo ve skupinách [2].

5.1 Silový kabel uložený v půdě

V půdě se kabely ukládají jednotlivě nebo ve skupinách více kabelů s těsným uložením nebo s mezerami. Hloubka uložení kabelu v zemi je 0,4–1,2 m. Hloubka uložení závisí na jmenovitém napětí kabelů. Obvyklá hloubka uložení je 0,7 m od povrchu země. Kabely se ukládají do pískového úložiště. Toto je realizováno ve většině případů prosívkou, a to v okolí 150–200 mm okolo kabelu. Zbytek výkopu se zasype původní zeminou.

Tepelné pole silového kabelu uloženého v půdě se principiálně řeší jako elektrické pole dlouhé válcové elektrody proti rovině. A to buď jako pole elektrostatické, nebo pole proudové. To znamená, že elektrickému potenciálu tepelného pole přísluší jako ekvivalent teplota a náboj. Respektive proudu odpovídá ztrátový výkon. Namísto permitivity a konduktivity prostředí se zde vyskytuje měrná tepelná vodivost půdy. Povrch kabelu představuje ekvipotenciální plochu, která má teplotu ϑ_p . Povrch půdy je také ekvipotenciální plocha, která má teplotu rovnou teplotě prostředí. Tato teplota se rovná teplotě půdy v dostatečně velké vzdálenosti od kabelu. Mezi kabelem a povrchem půdy jsou další ekvipotenciální plochy.

Tepelné pole kabelů uložených v zemi se řeší metodou zrcadlení. Rovina zrcadlení je povrch země. Teplota země v libovolném místě mezi kabelem a povrchem země je daná součtem potenciálů od zdroje a jeho zrcadlového obrazu.

$$\vartheta = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_z} \cdot \left(\ln \frac{1}{\rho_1} - \ln \frac{1}{\rho_2} \right) + \vartheta_0 \quad (5.1)$$

- kde: λ_z – tepelná konduktivita země
 ρ_1, ρ_2 – vzdálenosti daného bodu, jehož potenciál (teplotu) počítáme, od země
 P – celkový ztrátový výkon v kabelu
 ϑ_0 – teplota povrchu země; teplota země v dostatečně velké vzdálenosti od kabelu

Při použití kartézských souřadnic můžeme vzdálenosti místa země, ve kterém potenciál počítáme, vyjádřit jako funkci souřadnic x a y :

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \sqrt{(x - x_1)^2 + (x + h)^2} \\ \rho_2 &= \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - h)^2} \end{aligned} \quad (5.2)$$

- kde: x_1 – x -ová souřadnice osy kabelu a osy jeho zrcadlového obrazu

y – y -ová souřadnice osy kabelu a osy jeho zrcadlového obrazu

Úpravou logaritmu v rovnici (5.1) dostaneme rovnici, která platí pro elektrostatické pole mezi dvěma paralelními válci. Pro ekvipotenciální plochy řešeného tepelného pole v tomto případě platí:

$$\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) = k \quad (5.3)$$

Dalším zjednodušováním dospějeme k vyjádření oteplení povrchu kabelu:

$$\vartheta_p - \vartheta_0 = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_z} \cdot \ln k_1 \quad (5.4)$$

$$\text{kde: } k_1 = \frac{h}{r_k} + \sqrt{\left(\frac{h}{r_k}\right)^2 - 1}$$

kde: r_k – poloměr kabelu
 h – hloubka uložení kabelu v půdě

Vydělením rovnice (5.3) výkonem P dostaneme na základě Ohmova tepelného zákona venkovní tepelný odpor silového kabelu uloženého v půdě:

$$H_e = \frac{\vartheta_p - \vartheta_0}{P} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_z} \cdot \ln\left(\frac{h}{r_k} + \sqrt{\left(\frac{h}{r_k}\right)^2 - 1}\right) \quad (5.5)$$

Tento vztah je známý jako Kenellyho vztah pro venkovní tepelný odpor kabelu uloženého v půdě. Protože obvykle platí $\left(\frac{h}{r_k}\right)^2 \gg 1$, tak s dostatečnou přesností vyhovuje i zjednodušená verze vztahu:

$$H_e = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_z} \cdot \ln \frac{2 \cdot h}{r_k} \quad (5.6)$$

V předcházejících vztazích se vyskytuje tepelná konduktivita půdy λ_z . Její převrácená hodnota se označuje jako tepelná rezistivita g . Tepelná rezistivita půdy závisí na velkém počtu činitelů, především na druhu půdy (písková, jílovitá, hlinitá a podobně), na obsahu vlhkosti, kompaktnosti, zrnitosti půdy. Tepelná rezistivita závisí i na klimatických podmínkách a ročním období. V závislosti na uvedených předpokladech se tepelná konduktivita půdy může pohybovat v rozmezích od 2,5 do 0,003 W·K⁻¹·m⁻¹. Proto se pro tepelné výpočty uvažuje normalizovaná hodnota této veličiny 1,43 W·K⁻¹·m⁻¹, která odpovídá tepelné rezistivitě půdy $g = 0,7 \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$.

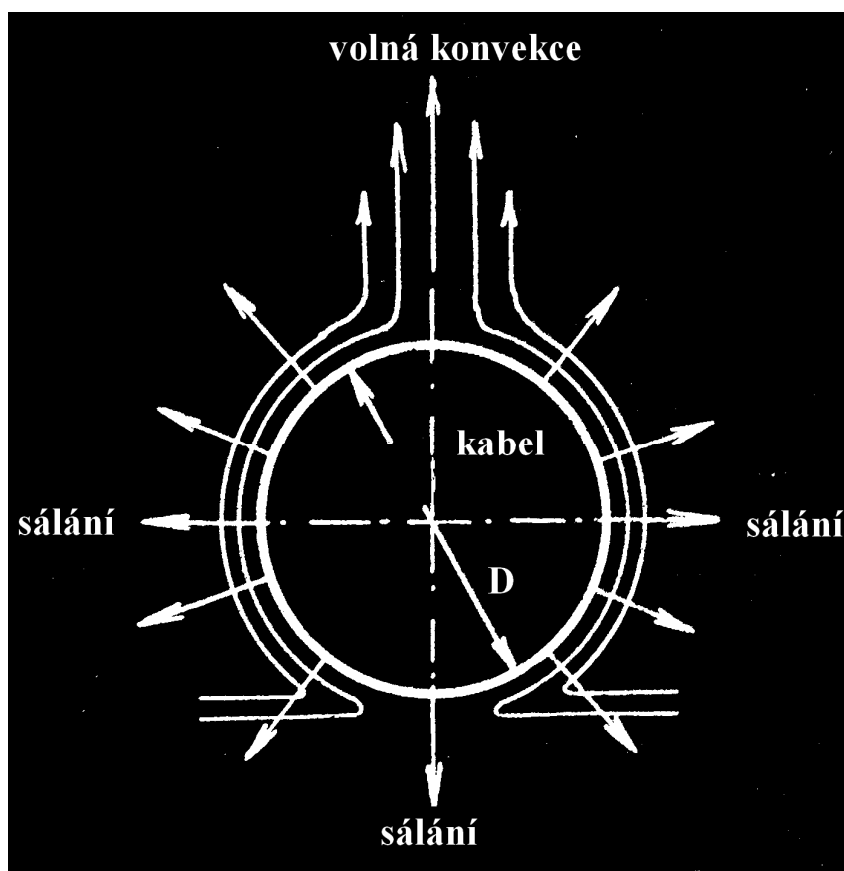
Kromě uvedených vlivů se měrná tepelná vodivost půdy – nejvíce v okolí kabelu – snižuje vlivem vysušování půdy zvýšenou teplotou tepelného pole kabelu. Aby se zabránilo

velkému vysušování země v okolí kabelu, volí se tepelná konduktivita půdy $1,2 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Nebo se volí nižší hodnoty dovolené teploty jader kabelů [2].

5.2 Silový kabel ve vzduchu

V případě kabelů uložených ve vzduchu se teplo z jejich povrchu odvádí volnou konvekcí a sáláním do okolí. Částečně se teplo odvádí i vedením, které se pro zanedbatelný podíl zahrnuje do volné konvekce. V takovémto případě uložení se předpokládá, že vzduch v halách a kabelových prostorech je klidný. Další předpoklad je, že kabely jsou chráněny před přímým slunečním zářením. Kabely se mohou ukládat jednotlivě nebo v seskupení dvou a více kabelů ve vodorovné poloze a ve zvláštních případech i ve svislé poloze. Při seskupení se mohou vyskytovat různé případy. Například seskupení vedle sebe, nad sebou, seskupení s mezerami, ve vrstvách a podobně. Toto je důležité, protože volná konvekce závisí na poloze a tvaru tělesa, které je ochlazované, a podobně i odvádění tepla sáláním je ovlivněno počtem a vzájemnou polohou kabelů v seskupení.

Venkovní tepelné pole kabelu uloženého ve vzduchu je z hlediska volné konvekce ohraničené na malou oblast okolo kabelu, protože při volné konvekci se ohřátý vzduch (je lehčí) pohybuje v tenké vrstvě směrem zdola nahoru okolo kabelu po jeho obou stranách. To je vidět z obr. 5-1 [2].



Obr. 5-1 Schematické znázornění kabelu uloženého ve vzduchu[2]

Proudění vzduchu při volné konvekci může být laminární nebo turbulentní. Při laminárním proudění vzduch obtéká kabel, aniž by došlo k jeho turbulenci. Nad kabelem postupuje teplý

vzduch nahoru a rychle se ochlazuje. Proudění způsobuje, že tepelné pole kabelu je v části nad ním více nebo méně roztáhnuté, což závisí na průměru kabelu a na velikosti ztrátového výkonu, který v něm vzniká [2].

Při sálání se teplo šíří paprskovitě na všechny strany z povrchu kabelu. Výměna tepla sáláním probíhá mezi povrchem kabelu a povrchem stěn nebo předmětů, které se nacházejí i ve větší vzdálenosti od kabelu. Proto pro výměnu tepla sáláním není rozhodující teplota prostředí, jako je tomu při volné konvekci, ale teplota povrchu stěn místností a předmětů v okolí kabelu.

Intenzita výměny tepla mezi povrchem kabelu a prostředím nebo obklopujícími předměty je charakterizována součinitelem přestupu tepla α . Při uložení kabelu ve vzduchu je tento součinitel dán součtem přestupu tepla volnou konvekci α_c a součinitele přestupu tepla sáláním α_s .

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_s \quad (5.7)$$

Pomocí součinitele přestupu tepla se stanoví venkovní tepelný odpor kabelu:

$$H_e = \frac{1}{\pi \cdot D \cdot \alpha} \quad (5.8)$$

kde $D = 2 \cdot r_k$ – průměr kabelu

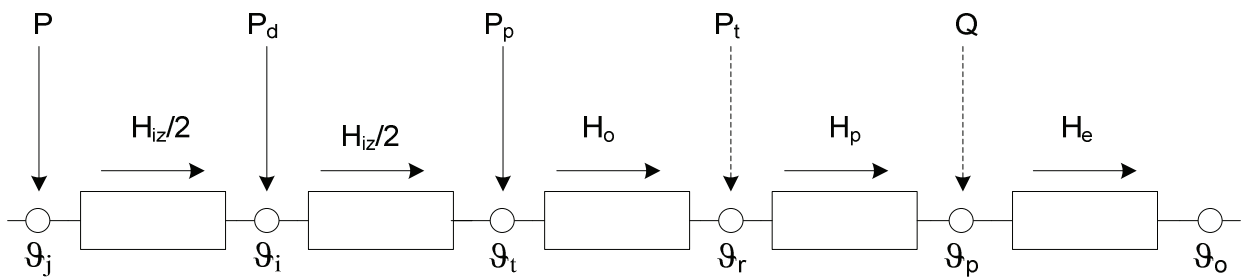
Na základě uvedeného vzorce se vypočítá venkovní tepelný odpor na jednotku délky s ohledem na uložení kabelu ve vzduchu.

Ve vzorci (5.2) je průměr kabelu D buď znám, nebo ho můžeme změřit. Naproti tomu je součinitel přestupu tepla veličina závislá na celé řadě činitelů. Jejich vliv je sice známý, ale jejich hodnoty mohou být v rámci určitého rozmezí různé. Proto se pro orientační výpočty hodnota α volí přibližně 10–12 W·K⁻¹·m⁻² [2].

6 TEPELNÝ VÝPOČET KABELU V USTÁLENÉM STAVU

Tepelným výpočtem kabelu rozumíme výpočet teploty jader, případně i některých dalších důležitých částí kabelu, obvykle je to povrch kabelu, pro danou hodnotu zatěžovacího proudu, nebo máme zadanou teplotu jader a teplotu prostředí a potřebujeme stanovit intenzitu zatěžovacího proudu kabelu. Tomuto druhému způsobu říkáme také výpočet trvalé proudové zatížitelnosti kabelu.

Pro tepelný výpočet kabelu sestavíme jeho náhradní tepelný obvod, který se skládá ze soustavy sériově řazených dílčích tepelných odporů. Při sestavování náhradního tepelného schématu postupujeme z hlediska konstrukce kabelu a z hlediska jeho uložení. Z hlediska konstrukce kabelu sestavíme příslušnou část tepelného schématu tak, že uvážíme, ve kterých místech kabelu vznikají hlavní a přídatné ztráty, nebo můžeme tyto ztráty zanedbat, případně je můžeme zanedbat z hlediska uložení. Postupujeme přitom od jádra kabelu k jeho povrchu a potom dále do prostředí [2].



Obr. 6-1 Tepelné schéma kabelu pro výpočet ustáleného stavu

Hlavní ztrátový výkon vzniká v jádrech. Ta jsou na obr. 6-1 reprezentována prvním uzlem zleva. Jeden uzel označujeme, i když jde o vícežilový kabel. V takovém případě však pod ztrátovým výkonem rozumíme ztrátový výkon vznikající na všech jádrech kabelu, která jsou zatěžována stejným proudem.

$$P = m \cdot R_{\vartheta} \cdot I^2 \quad (6.1)$$

kde: m – počet jader kabelu, která jsou zatížena proudem I
 R_{ϑ} – elektrický odpor jádra při dané teplotě se zřetelem na povrchový jev a jev blízkosti, činitel slaňování a podobně

Na tento uzel se připojí tepelný odpor izolace kabelu H_{iz} , jehož velikost se stanoví z hlediska konstrukce kabelu. Pokud jde o kabel VN a VVN, umístí se do poloviny tepelného odporu kabelu uzel s dielektrickými ztrátami. Ztrátový výkon dielektrických ztrát se vypočítá:

$$P_d = m \cdot \omega \cdot C_p \cdot U_f \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (6.2)$$

kde: ω – úhlová rychlost frekvence napětí
 C_p – provozní kapacita kabelu
 U_f – fázové napětí kabelu
 $\operatorname{tg} \delta$ – ztrátový činitel izolace kabelu

Tepelný odpor izolace má na druhém konci uzel, do kterého se umístí ztrátový výkon přídavných ztrát vířivými proudy nebo cirkulujícími proudy, případně obojí. To závisí na konstrukci kabelu. Ztrátový výkon přídavných ztrát se vypočítá jako násobek Jouleových ztrát v jádru kabelu:

$$P_d = (\lambda_1 + \lambda_2) \cdot P = \lambda \cdot P \quad (6.3)$$

kde: λ_1 a λ_2 – součinitele přídavných ztrát vířivými a cirkulujícími proudy

Na tento uzel je potom připojen tepelný odpor pláště, např. z PVC, nebo tepelný odpor podušky, pokud z hlediska konstrukce kabelu následuje stínění, které také představuje uzel se ztrátovým výkonem přídavných ztrát vířivými, cirkulujícími proudy a hysterezními ztrátami, pokud jsou ztráty z hlediska výpočtu významné. Nad stíněním může být ještě obal, který také představuje tepelný odpor. Povrch kabelu představuje určitý uzel tepelného schématu, který ukončuje vnitřní tepelné pole kabelu a začíná venkovní tepelné pole kabelu. Do tohoto uzlu se může umístit výkon z venkovního zdroje absorbovaný povrchem kabelu. Například výkon ze slunečního záření a podobně. Na tento uzel je připojen venkovní tepelný odpor kabelu, který závisí na druhu prostředí a obvykle je reprezentovaný jedním odporem. Může se však skládat do série řazených odporů, a to podle složitosti tepelné cesty dané instalací. Například pro kabely uložené v kabelovém kanálu se musí teplo z povrchů kabelů odvést do vzduchu v kanálu volnou konvekcí a sáláním z povrchu stěn kabelů. A také ze vzduchu v kanálu na povrch kanálu opět volnou konvekcí. Z povrchu kanálu přechází teplo přes stěny kanálu a zeminy, což představuje další tepelný odpor, a potom se teplo z povrchu země nad kanálem musí odvést do vzduchu konvekcí a sáláním.

Jednotlivé uzly tepelného schématu jsou charakterizované mimo uvedeného i teplotou. Tak uzel jader má teplotu ϑ_j , uzel ve středu izolace má teplotu ϑ_i , uzel kovového pláště nebo stínění má teplotu ϑ_s , povrch kabelu ϑ_p a tepelné schéma je ukončeno uzlem, který má teplotu prostředí ϑ_o .

Na základě tepelného schématu můžeme napsat rovnici pro výpočet teploty jader a případně i jiných uzlů tepelného schématu. Pro teplotu jader platí:

$$\vartheta_j = P \cdot (H_{iz} + H_o + H_p + H_e) + P_d \cdot \left(\frac{H_{iz}}{2} + H_o + H_p + H_e \right) + \lambda \cdot P \cdot (H_o + H_p + H_e) + \vartheta_0 \quad (6.4)$$

Pro teplotu povrchu kabelu platí:

$$\vartheta_p = (P + P_d + \lambda \cdot P) \cdot H_e \quad (6.5)$$

Po dosazení vzorců (6.1) a (6.3) do (6.4) a po oddělení proudu na levou stranu rovnice dostaneme vztah pro výpočet proudové zatížitelnosti:

$$I = \sqrt{\frac{\vartheta_j - \vartheta_0 - P_d \cdot \left(\frac{H_{iz}}{2} + H_o + H_p + H_e \right)}{m \cdot R_{\vartheta} \cdot (H_{iz} + (1 + \lambda) \cdot (H_o + H_p + H_e))}} \quad (6.6)$$

který je jednou z možných variant řešení. To závisí na konstrukci kabelu a způsobu jeho uložení.

Pokud ve vzorci (6.6) za ϑ_j dosadíme dovolenou teplotu jader kabelu ϑ_{jk} , která je pro daný typ kabelu uvedena v ČSN nebo v příslušných předmětových normách, a pokud za ϑ_0 dosadíme základní teplotu prostředí, která je podle uvedené normy pro uložení v půdě 20 °C a pro uložení ve vzduchu 30 °C, přičemž v případě uložení do země počítáme s tepelnou konduktivitou půdy 1,43 W·K⁻¹·m⁻¹, respektive tepelnou rezistivitou g=0,7 K·m·W⁻¹, tak stanovíme jmenovité hodnoty trvalé proudové zatížitelnosti kabelů pro uložení ve vzduchu a v půdě. Mimo uvedených podmínek se předpokládá, že jde o uložení jednoho kabelu ve vzduchu ve vodorovné poloze a stejně tak i v půdě v hloubce 0,7–1,2 m pod povrchem země. Takto stanovené hodnoty trvalé proudové zatížitelnosti se uvádějí jako jmenovité proudové zatížitelnosti kabelu. Pro jiné hodnoty teploty prostředí, teploty jader, měrného tepelného odporu půdy, hloubky uložení, seskupení více kabelů a podobně se uvádějí přepočtové koeficienty proudové zatížitelnosti k_n . Pomocí příslušné hodnoty přepočtového koeficientu pro daný případ uložení se stanoví proudová zatížitelnost kabelu jako součin tohoto koeficientu a jmenovité proudové zatížitelnosti:

$$I = k_n \cdot I_N \quad (6.7)$$

kde: I_N – jmenovitá proudová zatížitelnost kabelu pro uložení ve vzduchu

Ve vzorci (6.7) může být současně i více činitelů k_n , a to podle toho, kolik rozdílů se v porovnání se standardními podmínkami v daném případě vyskytuje. Hodnoty přepočtového koeficientu k_n pro zvláštní případy uložení se obvykle stanovují experimentálně. Pokud však pro daný případ uložení nebo zatěžovací podmínky existuje matematické řešení, stanovují se hodnoty uvedeného koeficientu výpočtem [2].

7 PŘECHODNÉ TEPELNÉ JEVY SILNOPROUDÝCH KABELŮ

V předcházející kapitole jsme předpokládali, že teplota jader a ostatních prvků kabelu se s časem nemění, je trvale konstantní. Takového stavu se dosáhne po určitém dostatečně dlouhém čase od připojení proudového zatížení na kabel nebo od změny proudového zatížení. Pro kabely uložené ve vzduchu se ustáleného stavu dosáhne po 3 až 8 hodinách. To závisí na velikosti průřezu jader a na konstrukci kabelu. V případě kabelů uložených v půdě je to 4 až 12 hodin. Při uložení v půdě to závisí na měrné tepelné vodivosti půdy [2].

Pro řešení neustálených tepelných dějů platí parciální diferenciální rovnice, která má pro radiální tepelná pole bez zdrojů tvar:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial r} = \frac{1}{\alpha_s} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \quad (7.1)$$

kde: ϑ – teplota místa určeného souřadnicí r a v čase t

α_s – teplotní konduktivita daného prostředí, tedy materiálu válce

Analytické řešení uvedené parciální diferenciální rovnice je možné pro jednoduchá homogenní tělesa s konstantními okrajovými podmínkami. Kabel je však z hlediska měrné tepelné i teplotní vodivosti nehomogenní těleso – jádra jsou z kovu, izolace je např. z plastu, stínění je také z kovu, plášť je z plastu, pancíř je také z kovu a další obaly mohou být z plastu nebo z jiných materiálů. Řešit uvedenou rovnici by proto bylo možné jen pro jednožilové vodiče, které mají izolaci a případně další obaly z téhož materiálu. Řešení by však bylo i v tomto případě jen přibližné, protože konstantní okrajovou podmínku – teplotu povrchu vodiče – není možné z hlediska praxe aplikovat. Teplota povrchu vodiče se s časem mění.

Parciální diferenciální rovnici (7.1) je však možno řešit numericky. Rovnice se přetransformuje na diferenciální a po příslušné úpravě je potom možné stanovit rovnici pro výpočet teploty v příslušném místě válce v závislosti na čase. V tomto případě, zejména s využitím výpočetní techniky, je možné řešit oteplování těles, která jsou z hlediska tepelných vlastností nehomogenní, a nevyžaduje se ani konstantní okrajová podmínka.

Nevýhody obou uvedených metod do značné míry odstraňuje metoda náhradních tepelných obvodů se soustředěnými parametry – tepelnými odpory a tepelnými kapacitami konstrukčních částí kabelu a případně i prostředí, pokud jde o uložení kabelu v půdě. Princip této metody spočívá v tomto:

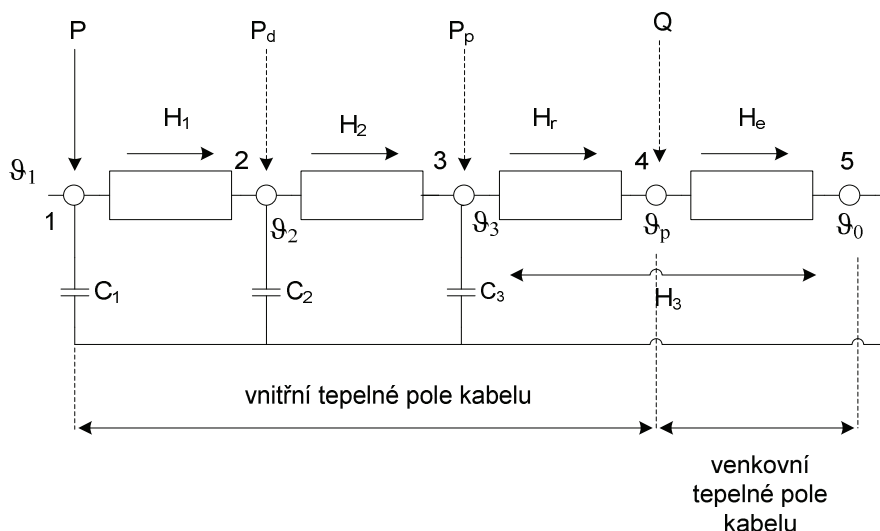
Tepelné pole v kabelu a jeho okolí se modeluje soustřednými tepelnými prvky – tepelnými odpory a tepelnými kapacitami – a průběh zátěže se určuje hladkou nebo po úsecích hladkou funkcí, což závisí na možnosti aproximace časového průběhu zatěžovacího proudu nebo ztrátového výkonu.

Řešení přechodných tepelných jevů v kabelech metodou náhradních tepelných sítí rozpracovali někteří autoři (*Van Wormer, Morallo*). Především metoda T-članků, kterou vypracoval *Van Wormer*, se používá v převážné míře doposud. Metodu náhradních tepelných II-članků se zaměřením na řešení tepelných poměrů kabelů uložených v půdě zavedl *Buller*.

V případě kabelů uložených v půdě je situace komplikovanější než u kabelů uložených ve vzduchu, protože pomocí náhradních tepelných obvodů, složených z odporů a kapacit, je třeba modelovat i venkovní tepelné pole kabelů. Vzhledem k obtížnosti numerických výpočtů se i tato problematika řeší jen přibližně, a to tak, že oteplování kabelu uloženého v půdě je dané součtem oteplování kabelu při konstantní okrajové podmínce (povrch kabelu má konstantní teplotu) a oteplování okolí kabelu. To dává výsledky, které se hlavně v přechodové části oteplovací charakteristiky odlišují od skutečného průběhu. Přesnější řešení předpokládají současná řešení celého – vnitřního i venkovního – tepelného pole kabelu, protože mezi uvedenými poli je vazba [2].

7.1 Řešení nestacionárních stavů kabelů uložených ve vzduchu; metoda podle Van Wormera

Metoda byla vypracována pro jednožilový kabel ve vzduchu, ale je možné ji po určité modifikaci použít i pro vícežilové kabely, ve kterých vzniká konstantní ztrátový výkon.



Obr. 7-1 Náhradní tepelná síť pro řešení přechodných tepelných jevů pro kabely uložené ve vzduchu

Nestacionární tepelné pole kabelu se podle Van Wormera modeluje náhradní tepelnou sítí sestávající ze tří tepelných kapacit a ze tří tepelných odporů. Síť má tři hlavní uzly, číselně označené 1, 2 a 3, do kterých jsou připojeny tři tepelné kapacity, které přísluší k určitým místům v kabelu [2].

Do uzlu 1, který reprezentuje jádro kabelu, je připojena tepelná kapacita C_1 , část tepelného odporu izolace H_{iz} a vzniká na něm ztrátový výkon P (Jouleovy ztráty). Uvedená tepelná kapacita, vyjádřená na jednotku délky, je daná součtem tepelné kapacity jádra a části p tepelné kapacity izolace, nacházející se mezi jádrem a místem $r=x$ v izolaci, tedy:

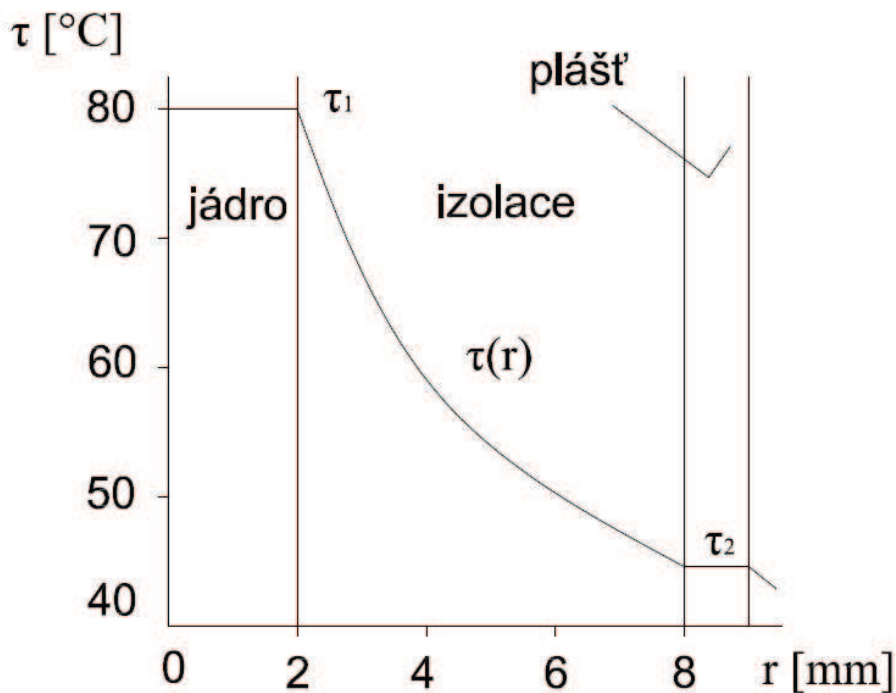
$$C_1 = C_j + p \cdot C_a \quad (7.2)$$

kde: C_j – tepelná kapacita jádra
 C_a – tepelná kapacita uvedené části izolace

Velikost p ve vzorci (7.1) se stanoví pomocí:

$$p = \frac{1}{2 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 - 1} \quad (7.3)$$

Velikost p označuje skutečnost, že teplo akumulované v izolaci v ustáleném stavu při logaritmickém radiálním rozdělení teploty v izolaci (viz obr. 7-2) zůstane konstantní při rozdělení izolace na dané části a připojení jejich tepelných kapacit do uzlů tepelné sítě, ve kterých jsou určité teploty nezávislé na radiální souřadnici. A následně s nimi může být zacházeno jako se soustřednými parametry [2].



Obr. 7-2 Radiální průběh teploty v izolaci jednožilového kabelu s kovovým pláštěm

Kapacity jsou vzájemně propojeny teplotními odpory, jejichž hodnoty odpovídají teplotní vodivosti každé vrstvy.

Tepelná kapacita C_2 podle obr. 7-1 je koncentrována do uzlu 2, který odpovídá místu $r=x$ v izolaci kabelu, je daná součtem $(1-p)$ -násobku tepelné kapacity části izolace a p -násobku tepelné kapacity zbylé části izolace. To je izolace nacházející se mezi místem $r=x$ a kovovým pláštěm (stíněním) kabelu, tedy r_2 :

$$C_2 = (1-p) \cdot C_a + p \cdot C_b \quad (7.4)$$

Do uzlu 3, který představuje kovový plášť (stínění) kabelu, je připojena tepelná kapacita C_3 , daná součtem tepelných kapacit $(1-p)$ –násobku tepelné kapacity C_b , tepelné kapacity kovového pláště (stínění) C_g a tepelné kapacity všech obalů nad pláštěm kabelu C_r , tedy:

$$C_3 = (1-p) \cdot C_b + C_g + C_r \quad (7.5)$$

Tepelné odpory H_1 , H_2 a H_3 se stanoví pomocí vztahů:

$$H_1 = H_2 = 0,5 \cdot H_{iz} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (7.6)$$

a

$$H_3 = H_r + H_e$$

kde: H_r – tepelný odpor všech obalů kabelu, které se nacházejí nad stíněním kabelu

H_e – venkovní tepelný odpor kabelu uloženého ve vzduchu daný vztahem:

$$H_e = \frac{1}{\pi \cdot D \cdot \alpha} \quad (7.7)$$

kde: $D = 2 \cdot r_k$ – průměr kabelu

Na základě uvedeného vzorce se vypočítá venkovní tepelný odpor na jednotku délky s ohledem na uložení kabelu ve vzduchu.

Náhradní tepelné schéma podle *obr. 7-1* má tři hlavní uzly, ve kterých jsou teploty ϑ_1 , ϑ_2 a ϑ_3 , vztahující se na určité místo v kabelu. A to na jádro, izolaci, izolaci v místě x , tedy v polovině tepelného odporu izolace a kovového pláště. Kromě toho je důležitý uzel s teplotou povrchu kabelu ϑ_p , do kterého však není připojena tepelná kapacita, ale jen venkovní tepelný odpor kabelu H_e , pokud jde o uložení kabelu ve vzduchu, nebo odpovídající tepelný obvod modelující venkovní tepelné pole kabelu uloženého v zemi. Tepelná síť je ukončená uzlem, ve kterém je teplota prostředí ϑ_0 . Do druhého uzlu se umísťují dielektrické ztráty a do třetího ztráty v kovovém plášti, pokud tyto ztráty nemůžeme zanedbat [2].

Řešení tepelné sítě je možné realizovat buď přímo řešením systému lineárních diferenciálních rovnic 1. řádu, vyjadřujících tepelné bilance v hlavních uzlech tepelné sítě, nebo řešením systému algebraických rovnic získaných použitím Laplaceovy transformace na rovnice tepelných bilancí.

Pro každý uzel, do kterého je připojena tepelná kapacita, můžeme napsat rovnici tepelné bilance.

Teplu, které za jednotku času v daném uzlu vzniklo a bylo přivedeno do uzlu, se rovná teplu, které za uvedenou časovou jednotku bylo z uzlu odvedeno a akumulovalo se v tepelné kapacitě připojené k danému uzlu. Pro 1. uzel tepelné sítě na *obr. 7-1*, do kterého se teplo nepřivádí, můžeme napsat rovnici tepelné bilance:

$$C_1 \cdot \frac{d\vartheta_1}{dt} + \frac{1}{H_1} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) = P \quad (7.8)$$

kde první výraz rovnice vyjadřuje výkon akumulovaný v tepelné kapacitě C_1 , druhý výraz prezentuje ztrátový výkon odvedený tepelným odporem H_1 do uzlu č. 2 a výraz na pravé straně rovnice zase představuje ztrátový výkon, který v uzlu vzniká.

Pro druhý uzel sítě, to znamená pro izolaci, je možné podle předchozích předpokladů napsat rovnici tepelné bilance:

$$C_2 \cdot \frac{d\vartheta_2}{dt} + \frac{1}{H_2} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_3) - \frac{1}{H_1} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) = 0 \quad (7.9)$$

Pro třetí uzel tepelného schématu, to je pro stínění kabelu, platí následující rovnice tepelné bilance:

$$C_3 \cdot \frac{d\vartheta_3}{dt} + \frac{1}{H_3} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_0) - \frac{1}{H_2} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_3) = 0 \quad (7.10)$$

Pro povrch kabelu je možné odvodit algebraickou rovnici:

$$\frac{1}{H_r} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_p) = \frac{1}{H_e} \cdot (\vartheta_p - \vartheta_0) \quad (7.11)$$

kde: ϑ_p – teplota povrchu kabelu

7.2 Řešení tepelných jevů kabelů uložených v půdě

V porovnání s kabely uloženými ve vzduchu je řešení přechodných tepelných jevů kabelů uložených v půdě složitější, protože u kabelů uložených ve vzduchu představuje vzduch jen zanedbatelnou tepelnou kapacitu a náhradní tepelnou síť stačí ukončit jen tepelným odporem, venkovním odporem kabelu. Pro kabely uložené v půdě představuje toto prostředí nejen tepelný odpor, ale i značnou tepelnou kapacitu, přičemž tato tepelná kapacita se nenabíjí na konstantní hodnotu teploty, ale teplota půdy je určitou funkcí liniového zdroje tepla [2].

8 VÝPOČTY A SIMULACE V PROGRAMU MATLAB A SIMULINK

Matlab americké firmy The MathWorks, Inc., (www.mathworks.com) je univerzální matematický systém určený zejména pro maticové výpočty. Tento otevřený systém je dostupný prakticky na všech počítačových platformách. Pro simulační výpočty v prostředí Matlabu slouží nadstavba Simulink, která umožňuje vytvářet simulační modely zakreslením blokových schémat. Jedná se o modelování problémů, analýzu a simulaci dynamických systémů.

Simulink poskytuje uživateli dokonalou fikci, že svůj model vytváří ze stavebnice dostupných bloků; v grafické podobě sestavuje na obrazovce blokové schéma modelu. Model řešeného projektu je rozložen na jednoduché bloky a z nich je sestavena jeho výsledná uzavřená struktura.

8.1 Programová realizace počítačového modelu oteplovacích charakteristik

Verze Matlabu, která byla používána pro výpočty a modelování byla 7.1.0.246 (R14) Service Pack 3.

Pro sestavení modelu v Simulinku jsme použili základní diferenciální rovnice:

$$\begin{aligned} C_1 \cdot \frac{d\vartheta_1}{dt} + \frac{1}{H_1} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) &= P \\ C_2 \cdot \frac{d\vartheta_2}{dt} + \frac{1}{H_2} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_3) - \frac{1}{H_1} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) &= 0 \\ C_3 \cdot \frac{d\vartheta_3}{dt} + \frac{1}{H_3} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_0) - \frac{1}{H_2} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_3) &= 0 \end{aligned} \quad (8.1)$$

a ještě jednoduchou algebraickou rovnicí (7.11).

Pro převod do Simulinku je nutná úprava těchto diferenciálních rovnic (8.1). Je třeba na jedné straně diferenciální rovnice osamostatnit diference, druhá strana rovnice pak bude obsahovat ostatní členy.

Nejprve provedeme úpravu diferenciální rovnice platící pro první uzel tepelného schématu (7-1). Za výkon P dosadíme Jouleovy ztráty s tou podmínkou, že se vzrůstající teplotou se bude měnit i ohmický odpor kabelu (indukčnost kabelu se v tomto modelu neuvažuje).

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (8.2)$$

kde: R – činný odpor jádra kabelu
 α – teplotní součinitel odporu jádra

Činný odpor jádra kabelu získáme z katalogu výrobce NKT Cables. Tento parametr je uveden v Příloze A.

$$\begin{aligned}
 C_1 \cdot \frac{d\vartheta_1}{dt} + \frac{1}{H_1} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) &= P \\
 C_1 \cdot \frac{d\vartheta_1}{dt} &= R \cdot I^2 - \frac{1}{H_1} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \\
 \frac{d\vartheta_1}{dt} &= \frac{R \cdot I^2}{C_1} - \frac{1}{C_1 \cdot H_1} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \\
 \frac{d\vartheta_1}{dt} &= \frac{1}{C_1 \cdot H_1} \cdot [R \cdot I^2 \cdot H_1 - (\vartheta_1 - \vartheta_2)] \\
 \frac{d\vartheta_1}{dt} &= \frac{1}{C_1 \cdot H_1} \cdot [R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) I^2 \cdot H_1 - (\vartheta_1 - \vartheta_2)] \\
 \Delta T &= \vartheta_1 - \vartheta_0
 \end{aligned} \tag{8.3}$$

kde: ϑ_1 – teplota jádra kabelu

ϑ_0 – okolní teplota

Následují úpravy diferenciálních rovnic pro další dva uzly.

Pro druhý uzel:

$$\begin{aligned}
 C_2 \cdot \frac{d\vartheta_2}{dt} + \frac{1}{H_2} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_3) - \frac{1}{H_1} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) &= 0 \\
 C_2 \cdot \frac{d\vartheta_2}{dt} &= \frac{1}{H_1} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) - \frac{1}{H_2} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_3) \\
 \frac{d\vartheta_2}{dt} &= \frac{1}{H_1 \cdot C_2} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) - \frac{1}{H_2 \cdot C_2} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_3)
 \end{aligned} \tag{8.4}$$

Dielektrické ztráty, pokud je nemůžeme zanedbat, se objevují na pravé straně diferenciální rovnice definované pro druhý uzel.

Pro třetí uzel podle tepelného schématu (7-1):

$$\begin{aligned}
 C_3 \cdot \frac{d\vartheta_3}{dt} + \frac{1}{H_3} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_0) - \frac{1}{H_2} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_3) &= 0 \\
 C_3 \cdot \frac{d\vartheta_3}{dt} &= \frac{1}{H_2} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_3) - \frac{1}{H_3} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_0) \\
 \frac{d\vartheta_3}{dt} &= \frac{1}{H_2 \cdot C_3} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_3) - \frac{1}{H_3 \cdot C_3} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_0)
 \end{aligned} \tag{8.7}$$

Pokud můžeme přídatné ztráty zanedbat, bude na pravé straně nula. V opačném případě budou na pravé straně vystupovat ztráty. Ty mohou vznikat například nesymetrickou zátěží, protože stínění kabelu je galvanicky spojeno se zemí, tudíž tímto stíněním může protékat vyrovnávací proud. Může se zde objevit i rozdílový proud při poruše jedné fáze v trojfázovém vedení.

Tyto ztráty můžeme opět vyjádřit Jouleovými ztrátami.

Pro modelování teploty povrchu musíme upravit i algebraickou rovnici (7.11):

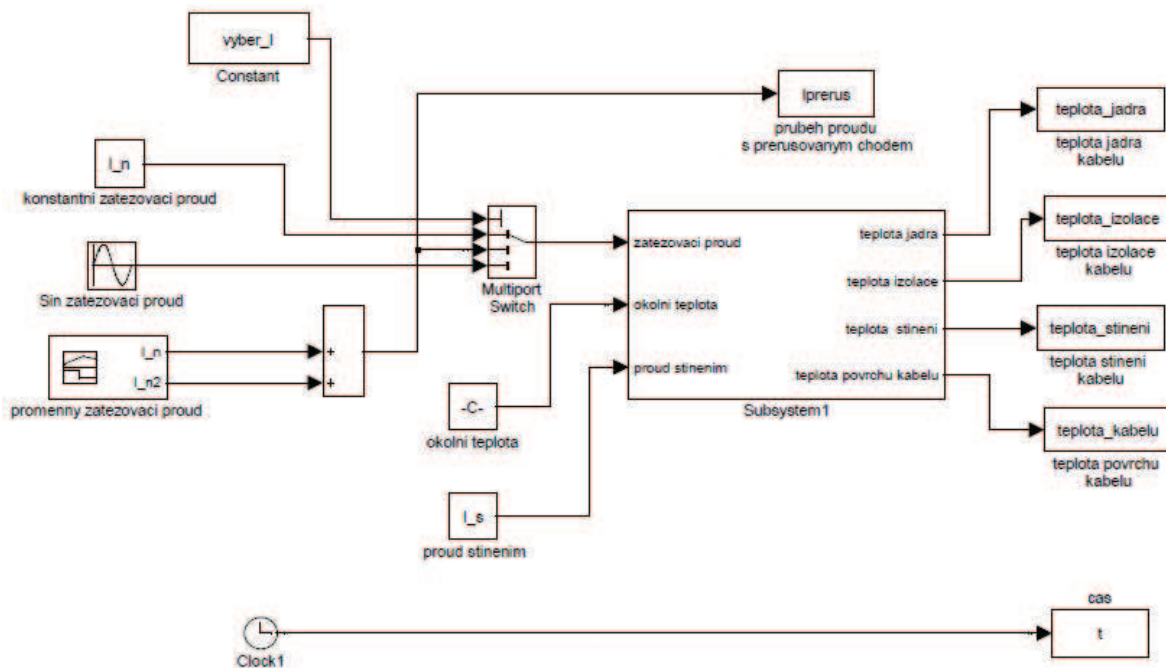
$$\begin{aligned} \frac{1}{H_r} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_p) &= \frac{1}{H_e} \cdot (\vartheta_p - \vartheta_0) \\ \frac{\vartheta_p - \vartheta_0}{H_r} &= \frac{\vartheta_3 - \vartheta_p}{H_e} \\ (\vartheta_p - \vartheta_0) \cdot H_e &= (\vartheta_3 - \vartheta_p) \cdot H_r \\ \vartheta_p \cdot H_e - \vartheta_0 \cdot H_e &= \vartheta_3 \cdot H_r - \vartheta_p \cdot H_r \\ \vartheta_p \cdot (H_e + H_r) &= \vartheta_3 \cdot H_r + \vartheta_0 \cdot H_e \\ \vartheta_p &= \frac{\vartheta_3 \cdot H_r + \vartheta_0 \cdot H_e}{H_e + H_r} \end{aligned} \tag{8.8}$$

Uvedené výsledné diferenciální rovnice jsou převedeny do schématu v Matlab Simulinku.

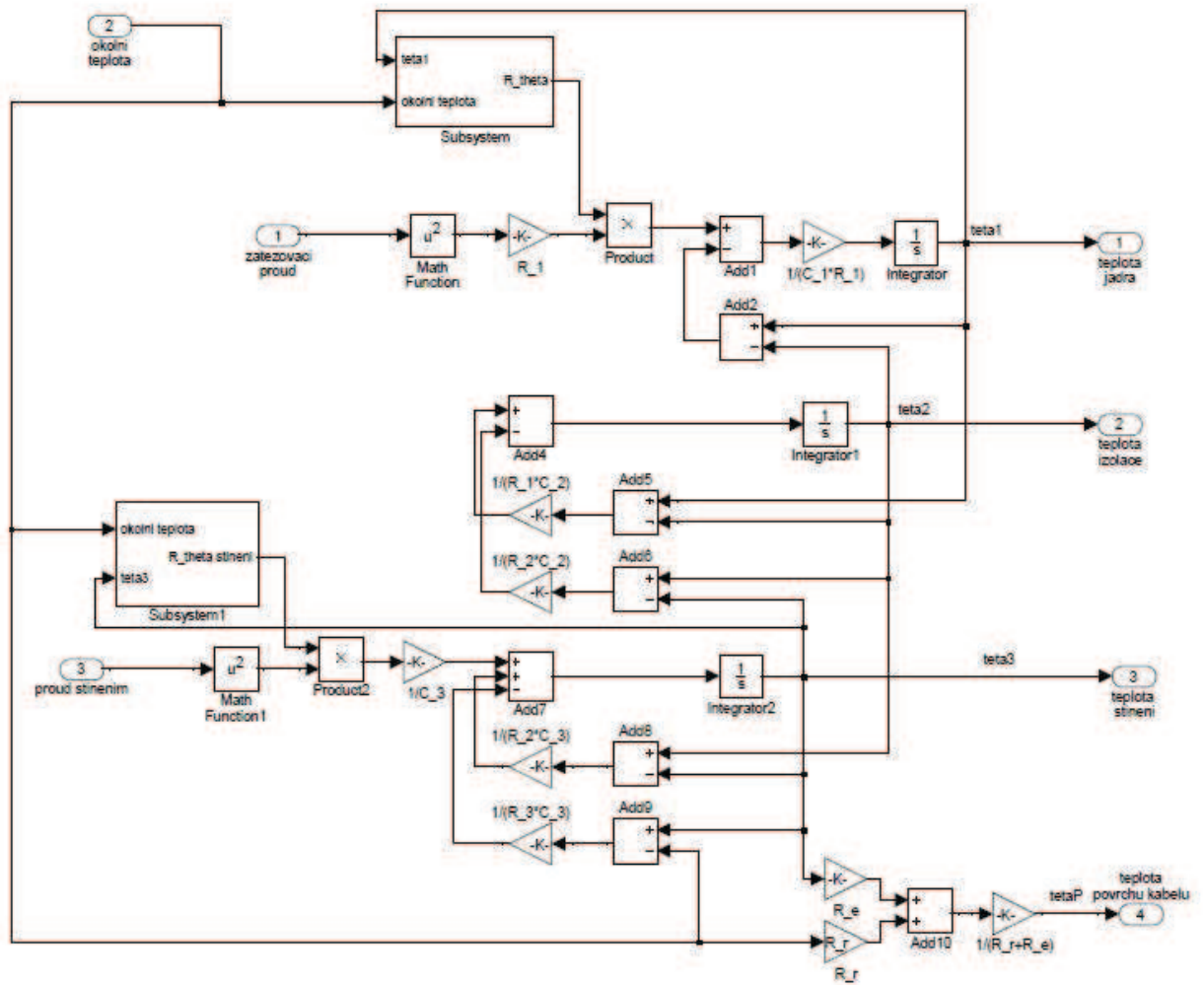
8.2 Model oteplovacích charakteristik v Matlab Simulinku

Model byl sestaven v programu Matlab Simulink podle upravených diferenciálních rovnic (8.3), (8.4), (8.7) a podle algebraické rovnice (8.8). Tento model je na obr. 8-2.

Na obr. 8-1 je znázorněn sestavený model oteplovacích charakteristik kabelu, kde jsou zobrazeny vstupy a výstupy modelu.

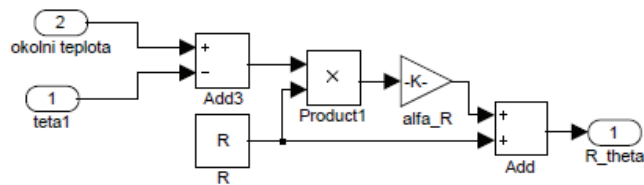


Obr. 8-1 Model vstupů a výstupů oteplovacích charakteristik

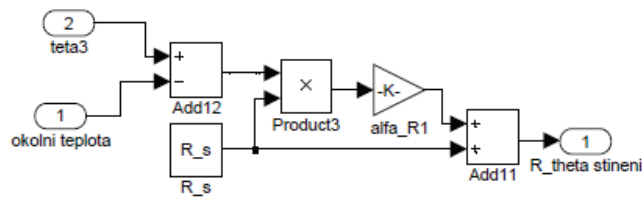


Obr. 8-2 Model sestavený z odvozených diferenciálních rovnic

V modelu jsou použity *Subsystem* a *Subsystem1*, které reprezentují nárůst ohmického odporu se vzrůstající teplotou. *Subsystem* (viz obr. 8-3a) odpovídá jádru kabelu a *Subsystem1* (viz obr. 8-4b) je stínění kabelu.



Obr. 8-3a Subsystem odpovídající růstu ohmického odporu jádra s teplotou



Obr. 8-3b Subsystem1 odpovídající růstu ohmického odporu stínění s teplotou

8.2.1 Popis vstupů a výstupů modelu oteplovacích charakteristik silových kabelů

V bloku I_n je konstantní zatěžovací stejnosměrný proud, který je jedním ze vstupů. Dále je zde sinusový zatěžovací proud a následuje proměnné zatížení. Toto proměnné zatížení je realizováno dvěma signály, které jsou sečtené, pomocí bloku *Signal Builder*. Blok *Multiport Switch* zajišťuje přepínání mezi jednotlivými druhy vstupních signálů (proudů).

Vliv okolní teploty je zobrazen také jako jeden ze vstupů a navíc je zde i možnost přiřadit proud stíněním. To proto, že pokud jde o nesouměrné třífázové vedení, může se na stínění, které je spojeno se zemí, objevit vyrovnávací proud.

Výstupy *Subsystem1* jsou jednotlivé teploty kabelu. Tyto teploty jsou realizované blokem *To Workspace* kvůli použití v dalších výpočtech simulace.

8.3 Parametrizace modelu oteplovacích charakteristik

Parametrizace modelu byla provedena na základě katalogových hodnot výrobce NKT Cables. Tento katalog je uveden v *Příloze A*.

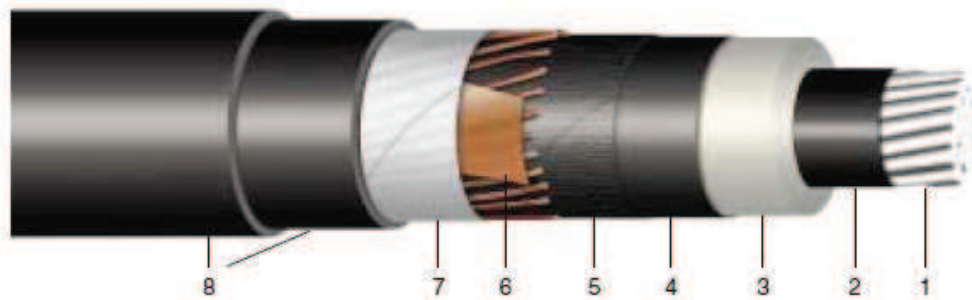
8.3.1 Mechanické vlastnosti kabelu

Z tohoto katalogu byly vybrány hodnoty potřebné pro další výpočty a modelování. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 8.1.

Tab. 8-1 Mechanické vlastnosti kabelu AXEKVCEY $1 \times 70 \text{ mm}^2$

Označení, jednotka	hodnota
Provozní teplota jádra, [$^{\circ}\text{C}$]	90
Průměr kabelu, [mm^2]	36
Hmotnost kabelu, [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$]	1,15
Činný odpor kabelu, [$\Omega\cdot\text{m}^{-1}$]	0,443
Zatížitelnost ve vzduchu, [A]; uložení vedle sebe	268
Kapacita kabelu, [$\text{pF}\cdot\text{m}^{-1}$]	190
Hmotnost mědi, [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$]	0,210
Hmotnost hliníku, [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$]	0,157

Další potřebné parametry byly změřeny přímo na vzorku kabelu AXEKVCEY $1 \times 70 \text{ mm}^2$. Jedná se především o mechanické rozměry kabelu, které výrobce neudává. Tyto parametry jsou přehledně zobrazeny v tabulce 8.2 a na obr. 8-4.



Obr. 8-4 Popis kabelu AXEKVCEY $1 \times 70 \text{ mm}^2$

Konstrukce kabelu:

1. Hliníkové jádro
2. Vnitřní polovodivá vrstva
3. Izolace ze zesíťovaného polyetylenu
4. Vnější polovodivá vrstva
5. Polovodivá vodoblokující páska
6. Stínění měděnými dráty s protispirálou z měděné pásky
7. Vodoblokující páska
8. Vnější plášť PE+PVC

Tab. 8-2 Rozměry jednotlivých částí kabelu AXEKVCEY 1×70 mm²

Označení	Popis mechanického rozměru	Označení	Hodnota mechanického rozměru
1.	Průměr jádra	$d_{\text{jádro}}$	10,4 mm ²
2.	Tloušťka izolace	l_{iz}	6,5 mm
3.			
4.			
5.			
6.	Průměr drátu	$d_{\text{stínění}}$	1,2 mm ²
7.	Tloušťka pláště	$l_{\text{plášť}}$	4,6 mm
8.			

Pozn. Vzhledem k tomu, že kabel má hodně vrstev, které by značně zkomplikovaly výpočet jednotlivých tepelných odporů, jsou vrstvy 2.–5. považovány za jednu vrstvu s homogenními parametry. Totéž platí i pro vrstvy 7.–8. Vrstva 2.–5. bude považována za izolaci kabelu a vrstva 7.–8. za plášť kabelu.

8.3.2 Materiálové vlastnosti kabelu

Materiálové vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 8.3. Znalost jejich hodnot je nutná pro další výpočty jednak tepelných odporů jednotlivých částí kabelu a jednak tepelných kapacit kabelu.

Tab. 8-3 Materiálové vlastnosti kabelu AXEKVCEY 1×70 mm²

Název	Označení	Velikost, jednotka
Hustota hliníku	$\rho_{\text{jádra}}$	2300 kg·m ⁻³
Hustota mědi	$\rho_{\text{stínění}}$	8960 kg·m ⁻³
Měrná tepelná kapacita izolace, zesítený polyetylen	c_{iz}	2500 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Měrná tepelná kapacita hliníku	$c_{\text{jádro}}$	896 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Měrná tepelná kapacita mědi	$c_{\text{stínění}}$	383 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Měrná tepelná kapacita pláště, PVC+PE	$c_{\text{plášť}}$	1800 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Tepelná vodivost izolace	λ_{iz}	0,4 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Tepelná vodivost pláště	λ_{pl}	0,16 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Ohmický odpor jádra	R	0,443·10 ⁻³ Ω·m ⁻¹
Ohmický odpor stínění	$R_{\text{stínění}}$	1,15·10 ⁻³ Ω·m ⁻¹
Teplotní součinitel odporu jádra	$\alpha_{R_{\text{jádro}}}$	0,00377 K ⁻¹
Teplotní součinitel odporu stínění	$\alpha_{R_{\text{stínění}}}$	0,00392 K ⁻¹
Součinitel přestupu tepla	α	12 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹

8.3.3 Výpočet zatěžovacího proudu pro model oteplovacích charakteristik

Výpočet proudu pro model a kabel AXEKVCEY 1×70 mm² je odvozen ze vzorce (6.6) za předpokladu některých zjednodušujících podmínek.

Teplota jádra se uvažuje 90 °C a teplota okolí je 30 °C. Protože ohmický odpor kabelu se se vzrůstající teplotou jádra kabelu mění, musíme tento faktor zahrnout do výpočtu zatěžovacího proudu.

$$R_{\text{theta}} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (8.9)$$

kde $\Delta T = \vartheta_1 - \vartheta_0$,

ϑ_1 – teplota jádra kabelu

ϑ_2 – teplota okolního prostředí

R_0 – ohmický odpor kabelu

α – teplotní součinitel elektrického odporu

Pro výpočet použijeme zjednodušený vztah (6.6), vztah se zjednoduší, protože v daném modelu neuvažujeme přídatné ztráty P_d a koeficient přestupu tepla λ je také roven nule. Jedná

se totiž o samostatný kabel uložený ve vzduchu. Proto si toto zjednodušení můžeme dovolit. Jelikož kabel nemá podušku, nabízí se zde další zjednodušující předpoklad $H_0=0$.

Po všech výše uvedených předpokladech můžeme napsat zjednodušený vzorec pro výpočet zatěžovacího nominálního proudu pro zadaný kabel uložený ve vzduchu.

$$I = \sqrt{\frac{\vartheta_j - \vartheta_0}{m \cdot R_{\vartheta} \cdot (H_{iz} + H_p + H_e)}} \quad (8.10)$$

- kde
- m – počet jader kabelu
 - H_{iz} – tepelný odpor izolace kabelu
 - H_p – tepelný odpor pláště kabelu
 - H_e – tepelný odpor okolí kabelu

8.3.4 Výpočet jednotlivých tepelných kapacit a tepelných odporů

Pro výpočet tepelných odporů byly použity *tab. 8-1*, *tab. 8-2* a *tab. 8-3*.

Tepelný odpor izolace kabelu se stanoví pomocí následujícího vztahu:

$$H_{iz} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{iz}} \cdot \ln \frac{\frac{d_{j\acute{a}dro} + l_{iz}}{2}}{\frac{d_{j\acute{a}dro}}{2}} \quad (8.11)$$

Tepelný odpor pláště se určí podobně jako tepelný odpor izolace:

$$H_{iz} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{pl}} \cdot \ln \frac{\frac{d_{kabel}}{2}}{\frac{d_{kabel} - l_{pl\acute{a}st}}{2}} \quad (8.12)$$

Venkovní tepelný odpor kabelu se vypočítá podle vzorce (7.7), kam dosadíme příslušné geometrické rozměry a materiálové vlastnosti.

Tepelná kapacita jádra kabelu, izolace, stínění a pláště kabelu se určuje ve všech případech podobně, jen s tím rozdílem, že musíme dosadit správné materiálové a mechanické rozměry.

Obecně je platný vzorec:

$$C = m_X \cdot c_X \quad (8.12)$$

- kde
- C – tepelná kapacita obecného prvku kabelu
 - m_X – hmotnost daného počítaného prvku kabelu

c_X – měrná tepelná kapacita počítaného prvku kabelu

8.3.5 Výpočet dielektrických ztrát pro kabel AXEKVCEY 1×70mm²

Pro výpočet dielektrických ztrát v kabelu je třeba znát provozní kapacitu kabelu. Ta se stanoví podle Přílohy A, kde je uveden katalog firmy NKT Cables. Hodnota udávaná tímto výrobcem je $C_p=190 \text{ pF}\cdot\text{m}^{-1}$.

Provozní kapacitu můžeme také stanovit ze vzorce:

$$C_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (8.5)$$

kde: ε – permitivita $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$, za relativní permitivitu ε_r dosadíme hodnotu pro zesítěný polyetylen 2, 3

r_2 – poloměr izolace kabelu $r_2=11,7 \text{ mm}$

r_1 – poloměr jádra kabelu $r_1=5,2 \text{ mm}$

l – délka kabelu, v našem případě $l=1 \text{ m}$

Dosazením uvedených hodnot do vzorce (8.5) a výpočtem získáme výpočtovou provozní kapacitu kabelu:

$$C_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot 8,8542 \cdot 10^{-12} \cdot 2,3 \cdot 1}{\ln \frac{11,7}{5,2}} = \underline{\underline{157,8 \text{ pF} \cdot \text{m}^{-1}}}$$

Porovnáním vypočítané provozní kapacity a kapacity uvedené výrobcem zjistíme, že se tyto hodnoty liší o $47,8 \text{ pF}\cdot\text{m}^{-1}$, což může být způsobené nepřesným měřením rozměrů kabelu. Dále tedy budeme uvažovat provozní kapacitu stanovenou výše uvedeným výrobcem.

Dielektrické ztráty v izolaci kabelu stanovíme podle vzorce:

$$P_d = m \cdot \omega \cdot C_p \cdot U_f \cdot \text{tg} \delta \quad (8.6)$$

kde: m – počet jader kabelu $m=1$

ω – úhlová rychlost frekvence napětí

C_p – provozní kapacita kabelu $C_p=0,190 \text{ pF}\cdot\text{m}^{-1}$

U_f – fázové napětí kabelu

$\text{tg} \delta$ – ztrátový činitel izolace kabelu

Ztrátovému činiteli izolace kabelu pro zesítěný polyetylen přísluší hodnota $\text{tg} \delta=0,0005$.

Dosažením hodnot do vzorce (8.6) získáme dielektrické ztráty kabelu AXEKVCEY $1 \times 70 \text{ mm}^2$:

$$P_p = 1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 190 \cdot 10^{-12} \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 0,0005 = \underline{\underline{8,1023 \cdot 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}}}$$

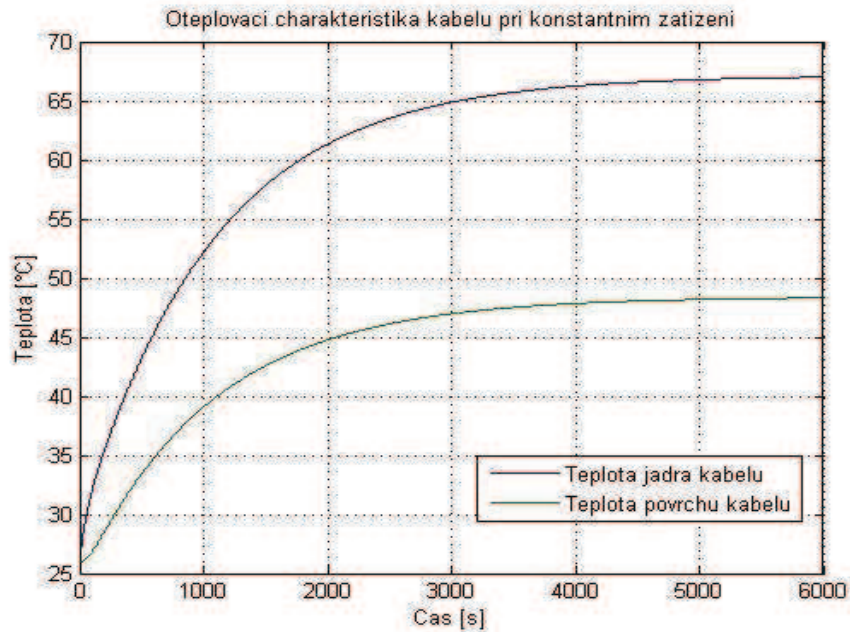
Dielektrické ztráty jsou velmi malé. Proto je při výpočtech a modelování můžeme zanedbat.

8.4 Výsledky dosažené modelováním oteplení silového kabelu AXEKVCEY $1 \times 70 \text{ mm}^2$

Cílem modelování oteplení konkrétního silového kabelu je získání výsledné oteplovací charakteristiky. Pro výpočet zatěžovacího proudu byl použit vztah (8.10), tento výpočet by měl odpovídat proudu uváděnému výrobcem. Vypočtený nominální zatěžovací proud se však liší. To je způsobeno jednak velikou citlivostí modelu na vstupní parametry a jednak zjednodušeními, kterých jsme se při modelování dopustili. Jedná se především o způsob uložení kabelu ve vzduchu. Výrobce udává nominální proud při uložení ve vzduchu pro uložení kabelů do trojúhelníka nebo vedle sebe. Ovšem my uvažujeme jen jeden kabel uložený ve vzduchu. To ovlivní výpočet nominálního zatěžovacího proudu, protože v modelu se neuvažují okolní tepla kabelů, kterými by měl procházet tentýž proud. Výrobce udává zatěžovací proud 268 A při uložení vedle sebe. Pro náš model byl vypočítán pomocí uvedeného zjednodušeného vztahu (8.10) 285 A. Výsledná oteplovací charakteristika při zatížení nominálním výpočtovým proudem je zobrazena na obr. 8-5.

Teplota povrchu kabelu musí odpovídat materiálovým vlastnostem kabelu. Jelikož se jedná o kabel se zesítěným polyetylenem, odpovídá tato maximální teplota povrchu kabelu hodnotě $90 \text{ }^\circ\text{C}$, jak je uvedeno v tab. 4-1.

Teplota jádra kabelu je stanovena pomocí rovnic (8.3), přičemž je nutné, aby proběhl výpočet diferenciálních rovnic a byly zde zahrnuty jednotlivé parametry rovnice. Tuto teplotu reprezentuje jeden z výstupů modelu pro výpočet oteplovacích charakteristik, proto je tvořen v modelu blokem *To Workspace* s příslušným názvem proměnné.

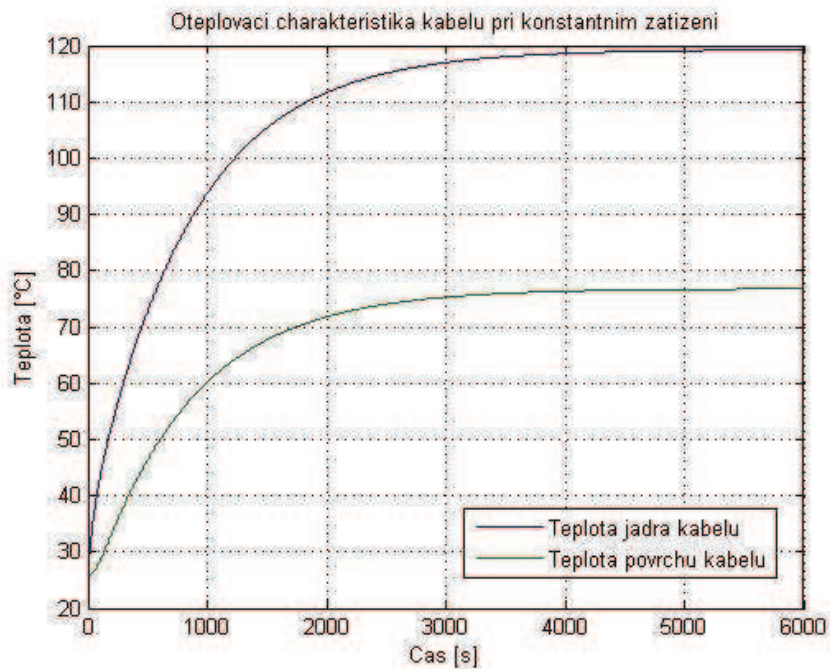


Obr. 8-5 Oteplovací charakteristika kabelu při konstantním zatížení

Pro určení časové oteplovací konstanty kabelu AXEKVCEY $1 \times 70 \text{ mm}^2$ je nutné, aby teplota jádra kabelu byla při své maximální hodnotě $120 \text{ }^\circ\text{C}$. Pak časová oteplovací konstanta je násobkem $0,632$ maximální teploty a zobrazení v časové ose.

Oteplovací charakteristika při požadované teplotě jádra je zobrazena na obr. 8-6.

Pro tuto teplotu jádra kabelu byl stanoven proud 490 A .

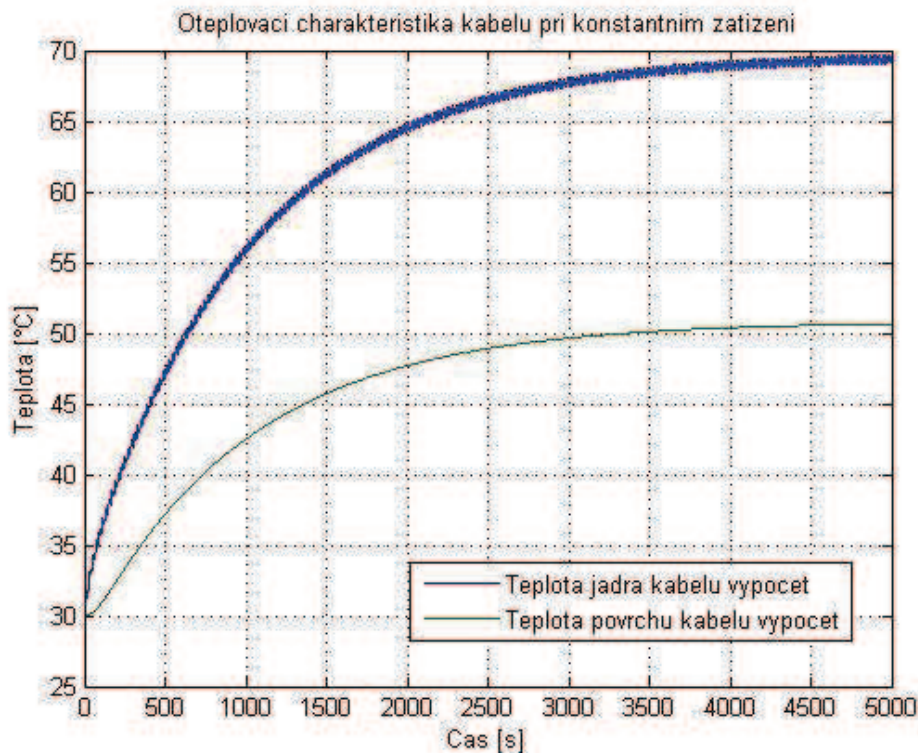


Obr. 8-6 Oteplovací charakteristika kabelu při konstantním zatížení

Z předchozího obrázku si můžeme stanovit časovou oteplovací konstantu. Vzhledem k tomu, že výrobce tohoto kabelu neposkytl žádná žadaná data ohledně postupu určování časové oteplovací konstanty při výrobě kabelu, je nutné brát tento postup jako jedno z možných řešení.

Podle kapitoly 4 (Fyzikální podstata oteplování kabelů) je tato konstanta stanovena 560 sec pro daný kabel. Výrobce však udává tuto konstantu 271 sec.

Vzhledem k tomu, že při verifikaci modelu bude zdroj proudu dodávat sinusový průběh proudu, je na *obr. 8-7* zobrazena charakteristika pro zatěžování kabelu proudem sinusového průběhu. Tento sinusový proud má efektivní hodnotu 285 A.

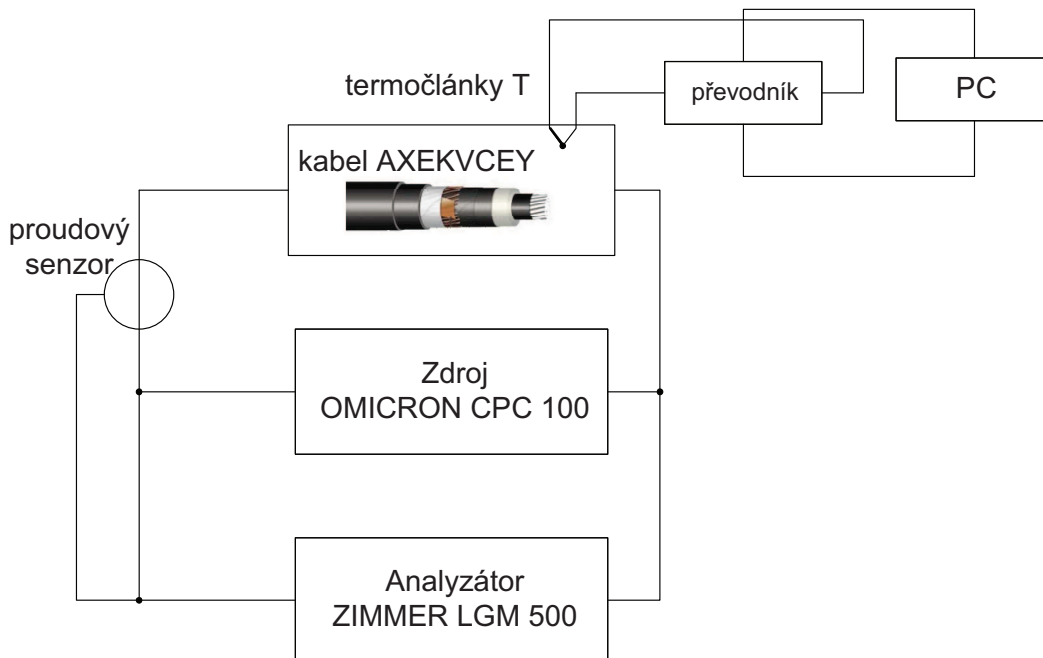


Obr. 8-6 Oteplovací charakteristika kabelu při konstantním zatížení proudem sinusového průběhu

Z *obr. 8-6* je patrné, že sinusový průběh napájecího proudu nemá vliv na výpočet teploty povrchu kabelu ani teploty jádra kabelu, a to z toho důvodu, že uvažujeme pouze ohmický odpor kabelu a indukčnost kabelu zanedbáváme.

9 VERIFIKACE MODELU MĚŘENÍM OTEPLENÍ KABELU

Pro měření oteplení kabelu průchodem elektrického proudu jsme použili zapojení podle obr. 9-1.



Obr. 9-1 Schéma zapojení pro verifikaci výpočtu oteplovacích charakteristik

Použité měřicí přístroje:

- zdroj OMICRON CPC 100 + booster CP CB2,
- připojovací kleště,
- multimetr Agilent U1241A,
- Multi Channel Protection Power Analyzer ZIMMER LMG 500,
- current transducer 600A, převod 1:1500, Tectra, a. s.,
- termočlánek typu T 5ks,
- převodník Advantech USB4871 Portable Data Acquisition module,
- počítač.

Pro měření teploty povrchu kabelu byly použity termočláanky typu T. Obrazová dokumentace z měření je v Příloze C.

Pomocí analyzátoru ZIMMER LMG 500 byl měřen úbytek napětí a proud, který protéká zkušebním kabelem.

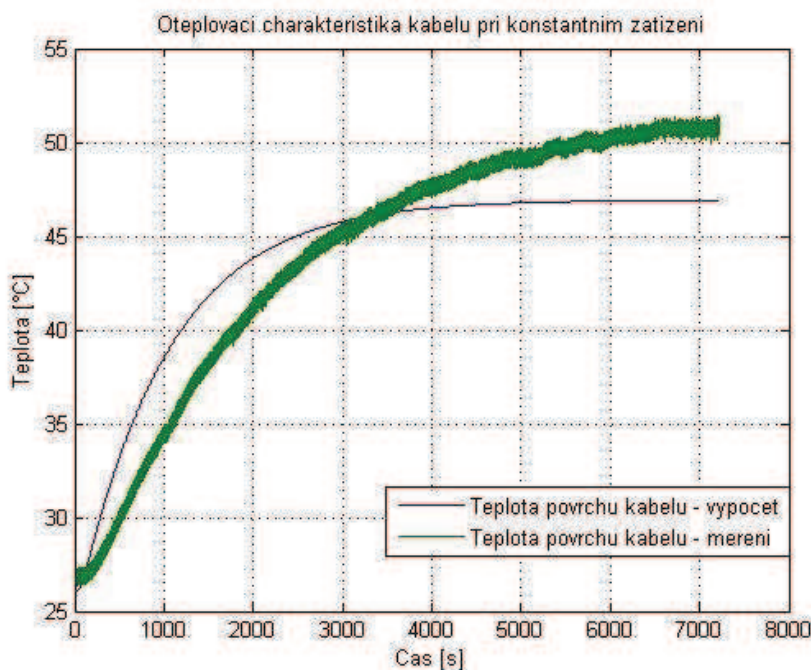
Hodnoty, které byly zaznamenávány:

- teplota povrchu kabelu na čtyřech různých místech (pomocí termočlánků),
- kontrolní teplota povrchu kabelu (pomocí multimetru Agilent U1241 a termočlánkové sondy typu K),
- úbytek napětí na měřeném kabelu (pomocí Omicron a LMG 500),
- ohmický odpor kabelu,
- aktuální proudové zatížení (pomocí Omicron a LMG 500).

Jeden termočlánek byl použit jako kontrolní pro zjištění okolní teploty kabelu, takže byl umístěn v dostatečné vzdálenosti, aby nedošlo k ovlivnění termočlánku kabelem. Tento termočlánek zaznamenával aktuální teplotu okolního vzduchu.

Termočlánky byly zapojeny do převodníku Advantech USB4871 Portable Data Acquisition module a tento převodník byl zapojen přes USB rozhraní do počítače. Data byla zpracovávána v programu WaveScan 2.0. Výstupem tohoto programu je soubor s hodnotami vytvořený v Excelu. Tyto hodnoty byly dále zpracovávány v Matlabu.

Na *obr. 9-2* je zobrazen průběh teploty povrchu kabelu při měření se sinusovým zatížením 280 A. Pro srovnání je zobrazena i vypočtená charakteristika. Okolní teplota byla na začátku měření 26 °C a tento parametr byl zanesen do výpočtu při modelování charakteristiky.



Obr. 9-2 Oteplovací charakteristika výpočtem a měřením pro 285 A

Z *obr. 9-2* je patrné, že modelováním a měřením byly dosaženy podobné oteplovací charakteristiky pro zatížení proudem sinusového průběhu. Rozdíl teplot nečiní v žádném místě grafu více než 5 °C.

Protože časová oteplovací konstanta se určuje z teploty jádra kabelu, je na dalším *obr. 9-3* zobrazena teplota jádra kabelu získaná jak měřením, tak modelováním v *Simulinku*. Teplota jádra kabelu se však dost obtížně určuje, protože je třeba, aby kolem jádra kabelu byla izolace, kdyby

jádro bylo holé, nastal by zde odvod tepla do okolí. Proto byla do kabelu vyvrtána díra o průměru 4 mm^2 a do ní vložen jeden termočlánek typu T . Toto se však projevilo jako značně neefektivní, protože na jádře kabelu se může objevit potenciál, který by měření pomocí termočlátku mohl značně ovlivnit. Proto byla teplota jádra měřením stanovena podle hodnoty ohmického odporu kabelu, který byl v průběhu měření zaznamenáván. Z logických úvah jsme odvodili možný způsob určení teploty jádra kabelu. Byl použit vzorec (8.9) a po úpravách získána hodnota teploty jádra kabelu. Po úpravách byl tento výsledný vzorec zpracován v programu *Matlab*.

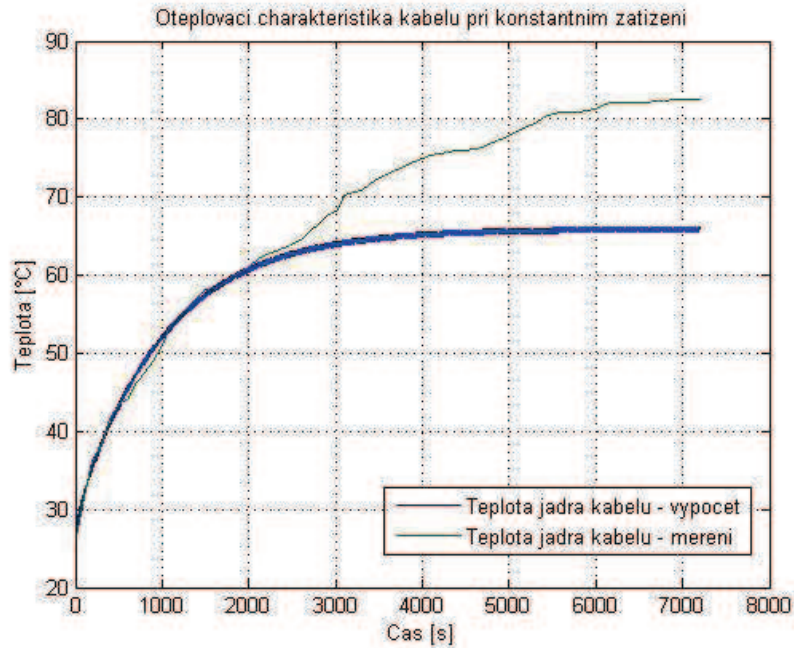
$$R_{kabel} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta \vartheta) \quad (9.1)$$

- kde:
- $\Delta \vartheta$ – rozdíl teploty jádra kabelu a okolní teploty $\Delta \vartheta = \vartheta_{jadro} - \vartheta_{okoli}$
 - R_0 – omický odpor kabelu na začátku měření
 - R_{kabelu} – omický odpor kabelu v průběhu měření (při zvyšující se teplotě)
 - α – teplotní součinitel odporu jádra

Odvození rovnice pro výpočet teploty jádra kabelu měřením:

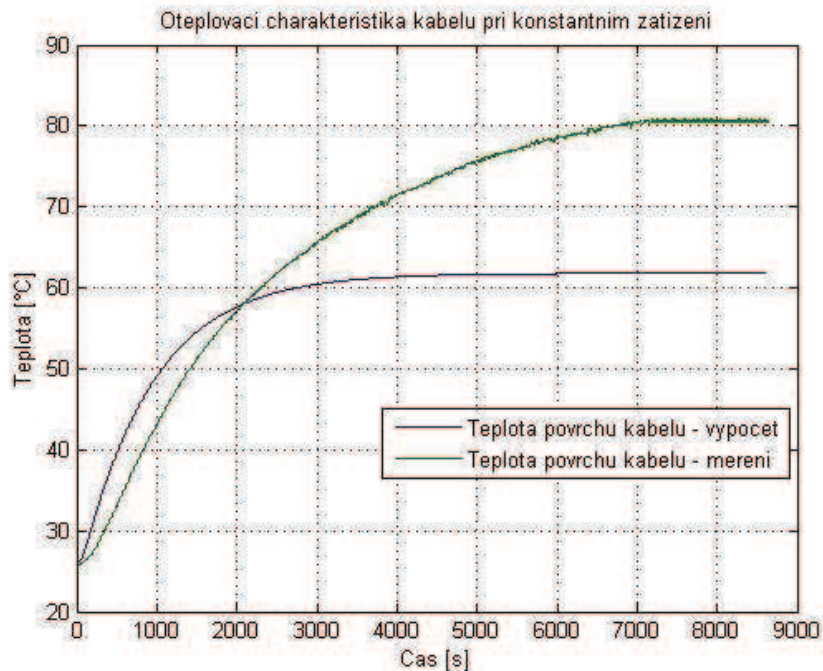
$$\begin{aligned} R_{kabel} &= R_0 + R_0 \cdot \alpha \cdot \vartheta_{jadro} - R_0 \cdot \alpha \cdot \vartheta_{okoli} \\ R_{kabel} + R_0 \cdot (\alpha \cdot \vartheta_{okoli} - 1) &= R_0 \cdot \alpha \cdot \vartheta_{jadro} \\ \vartheta_{jadro} &= \frac{R_{kabel} + R_0 \cdot (\alpha \cdot \vartheta_{okoli} - 1)}{R_0 \cdot \alpha} \\ \vartheta_{jadro} &= \vartheta_{okoli} + \frac{\left(\frac{R_{kabel}}{R_0} - 1 \right)}{\alpha} \end{aligned} \quad (9.2)$$

Na obr. 9-3 je zobrazen průběh teploty jádra kabelu při jmenovitém zatížení. Pro přehlednost je zde uvedeno srovnání namodelovaných a změřených teplot při jmenovitém zatížení kabelu.



Obr. 9-3 Oteplovací charakteristika výpočtem a měřením pro 285 A

Podle modelu by teplotě jádra (120 °C) odpovídal proud 490 A. Avšak při měření při této proudové zatížitelnosti by pravděpodobně teplota dosáhla vyšších hodnot. Protože většina parametrů, které model ovlivňují, je závislá na teplotě, byla zvolena nižší proudová zatížitelnost, tedy 400 A. Pro toto proudové zatížení je zobrazena charakteristika teploty povrchu kabelu na obr. 9-4.



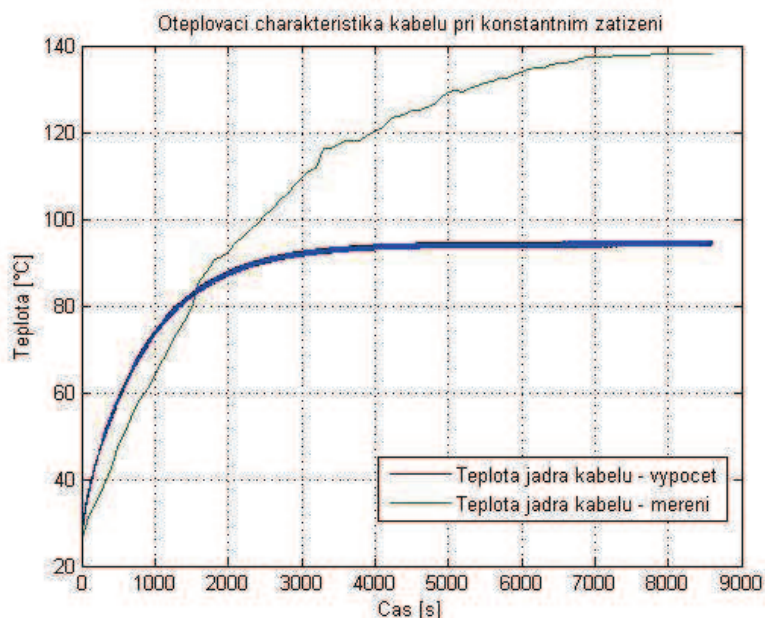
Obr. 9-4 Oteplovací charakteristika povrchu kabelu pro 400 A

Z grafu je patrné, že výsledky nejsou stejně uspokojivé jako při nižším proudovém zatížení. Trend teploty kabelu získaný měřením, jak je vidět z posledního grafu, by nepokračoval do ještě

vyšších teplot, protože v časovém okamžiku, kdy bylo měření ukončeno, se teplota téměř přestala měnit. Vzhledem k vývoji teploty můžeme proto tuto hodnotu považovat za ustálenou konečnou teplotu povrchu kabelu. To proto, že teplota povrchu kabelu se během poslední 0,5 hodiny měnila pouze nepatrně.

Tyto výsledky měření jsou pravděpodobně způsobeny velkým vlivem teploty na vlastnosti materiálů kabelu. Jedná se zejména o koeficient přestupu tepla do okolí, který značně ovlivňuje výpočet. Toto však není jediný parametr, který je ovlivněn teplotou. Vliv na výpočet mohou mít i změny hustoty materiálů kabelu vlivem teploty. Dále se jedná o mechanické parametry kabelu a o fyzikální vlastnosti jednotlivých vrstev kabelu – měrné tepelné kapacity.

Pro určení časové oteplovací konstanty je třeba, aby teplota jádra kabelu byla 120 °C. Postupujeme podle kapitoly 4 (Fyzikální podstata oteplování kabelů). Pro porovnání je na obr. 9-5 uvedena teplota jádra kabelu namodelovaná a teplota jádra kabelu získaná měřením.



Obr. 9-5 Oteplovací charakteristika jádra kabelu pro 400 A

Z grafu je patrné, že oteplovací charakteristika je značně odlišná od teoretického výpočtu. Tato chyba může být způsobena vlivem přechodových odporů při připojení kabelu na zdroj. V tomto ohledu je měření značně ovlivněno.

Abychom zjistili, jakým způsobem byla stanovena katalogová hodnota časové oteplovací konstanty kabelu, kontaktovali jsme jeho výrobce. Ten nám ale i přes několiknásobné pokusy tuto informaci neposkytl. Proto byly pro naše potřeby pro výpočet časové oteplovací konstanty zvoleny následující metody.

1. Časová oteplovací konstanta se určí z teploty jádra kabelu. V okamžiku, kdy teplota jádra kabelu dosáhne 120 °C a bude maximální a ustálená, vynásobí se 0,632. Časový okamžik, v němž oteplovací charakteristika dosáhla tohoto bodu, budeme pak považovat za časovou oteplovací konstantu.

2. Časová oteplovací konstanta se určí z teploty povrchu kabelu při jmenovitém zatížení. V našem případě 286 A. Další postup je totožný s předchozím.

Oba tyto postupy jsou součástí programu v *Matlabu*. Grafy pro určení časových oteplovacích konstant měřením jsou uvedeny v příloze D.

Výrobce udává v katalogu pro kabel AXEKVCEY 1×70 mm² časovou oteplovací konstantu 271 sekund při uložení kabelů vedle sebe.

Podle *bodu 1* při modelování vychází časová oteplovací konstanta 542 sekund.

Pro *bod 1* vychází při měření časová oteplovací konstanta 1650 sekund, ale vzhledem k výše popsaným chybám, k nimž došlo při měření, je tato hodnota značně zkreslená, a to z toho důvodu, že jádro kabelu mělo pravděpodobně vyšší teplotu, než byla požadována.

Při určování časové oteplovací konstanty podle *bodu 2* pro modelování vychází časová oteplovací konstanta 266 sekund.

Pro měřenou charakteristiku při jmenovitém zatížení (286 A) je časová oteplovací konstanta 670 sekund. Ovšem i tato hodnota podléhá značné chybě.

Při určování časové oteplovací konstanty měřením dochází ke značným chybám vlivem přechodového odporu při připojování kabelu ke zdroji. Rovněž přesné určení teploty jádra kabelu je velmi obtížné. Z těchto důvodů jsou časové oteplovací konstanty získané měřením značně nepřesné.

10 ZÁVĚR

Základem pro teorii oteplování silových kabelů elektrickým proudem je kalorimetrická rovnice a základní kalorimetrické výpočty, založené na přenosu tepla. To se děje vedením (kondukcí), prouděním (konvekce) a sáláním (vyzařování, radiace). U silových kabelů se uplatňuje především složka přenosu tepla vedením, případně kombinací zmiňovaných způsobů. Pokud jádrem kabelu protéká elektrický proud, způsobuje v něm oteplení, a aby se teplo šířilo určitým prostředím, musí být vytvořen teplotní spád. Teplo se potom šíří z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou. Při uvažování silových jednožilových kabelů jde o šíření tepla z jádra přes jeho konstrukční prvky do okolí. Záleží však také na uložení kabelu.

Obecně je analogie mezi teplotním polem a elektrickým polem používána pro modelování časově proměnných teplotních polí. Toto se provádí za použití Van Wormerovy metody, s jejíž pomocí si můžeme teplotní pole jednožilového silového kabelu převést na jednoduché elektrické schéma, kde jednotlivé prvky představují tepelné odpory a kapacity jednotlivých částí kabelu.

V této práci byl vytvořen model pro výpočet oteplovacích charakteristik silových kabelů, konkrétně pro kabel AXEKVCEY $1 \times 70 \text{ mm}^2$. Model byl vytvořen na základě odvozených diferenciálních rovnic a následně byl parametrizován pomocí materiálových a fyzikálních vlastností jednotlivých vrstev kabelu. Další potřebné mechanické parametry byly změřeny na konkrétním typu měřeného kabelu. Dále byl pro parametrizaci použit katalog firmy NKT Cables. Jednotlivé oteplovací charakteristiky jsou uvedeny v průběhu textu práce.

Pro vypočítání nominálního proudu za laboratorních podmínek byl použit zjednodušený vztah (8.10). Tento nominální zatěžovací proud je 286 A. Výrobce kabelu udává nominální zatěžovací proud při uložení na vzduchu vedle sebe 268 A. Námi vypočítaná hodnota je vyšší z toho důvodu, že máme jen jednotlivý kabel uložený ve vzduchu. Výrobce uvažuje i ovlivňování kabelu ostatními kabely uloženými v jedné trase.

Při modelování se neuvažují dielektrické ztráty, které jsou oproti ztrátám Jouleovým v jádře kabelu zanedbatelně malé.

Teoretický model vytvořený v prostředí *Matlab Simulink* přibližně odpovídá měření pro jmenovité zatížení kabelu. Avšak pro vyšší zatížení je charakteristika odlišná. To je způsobeno citlivostí vstupních parametrů modelu na změny, jichž doznávají některé vlastnosti kabelu při nárůstu teploty. Jedná se především o měrnou tepelnou kapacitu a tepelný odpor jednotlivých vrstev kabelu. Dalším parametrem, který značně ovlivňuje modelování, je součinitel přestupu tepla do okolí. Uvedené parametry mohou být dále zkoumány, a pokud zaneseme vliv teploty na ně do výpočtového modelu, dosáhneme tak pro konkrétní kabel dalšího zpřesnění výsledků.

K optimalizaci dosažených výsledků by vedlo mimo jiné také přesnější měření jednotlivých teplot kabelu. Použité termočlánky typu T byly na povrch kabelu instalovány pomocí izolační pásky, zde se tedy nabízí další možnost zlepšení, a to využití termočlánků určených přímo pro měření teploty povrchu kabelu.

Naskýtá se také možnost spolupráce s výrobcem kabelů. Protože ten nám nesdělil podmínky, při nichž určuje časovou oteplovací konstantu, byly pro účely této práce použity dvě metody,

popsané v kapitole 9 Verifikace modelu měřením oteplení kabelu. I to je zdrojem odlišných výsledků při určování časové oteplovací konstanty. Výsledné časové oteplovací konstanty jsou zatíženy chybami, které jsou popsány v příslušné kapitole, a proto jsou odlišné od teoretických předpokladů.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BLAŽEK, Vladimír, SKALA, Petr. *Distribuce elektrické energie*. [s.l.] : [s.n.], 2006. 140 s.
- [2] SLANINKA, Pavel. *Káblková technika I*. Bratislava : Edičné stredisko SVŠT v Bratislavě, 1988. 190 s. ISBN 80-227-0025-8.
- [3] RADA, Josef, et al. *Elektrotepeľná technika*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1985. 344 s. ISBN 04-525-85.
- [4] BAXANT, Petr, DRÁPELA, Jiří, LÁZNIČKOVÁ, Ilona. *Elektrotepeľná technika*. FEKT Vysokého učení technického : [s.n.], 172 s.
- [5] PLCH, Jiří. *Elektrické teplo*. 1988. vyd. [s.l.] : Ediční středisko VUT Brno, 1988. 192 s.
- [6] ORSÁGOVÁ, Jaroslava, TOMAN, Petr. Application of thermal models of digital protective relays in cable protection. In *The 9th International Conference on Developments in Power Systems Protection*.
- [7] KUČERA, Drahoš. *Přenos a rozvod elektrické energie*. FEKT Vysokého učení technického [s.l.] : [s.n.], 1986. 198 s.
- [8] ČSN 33 2000-4-43 Elektrická zařízení Část 4 – Bezpečnost. Oddíl 43 – Ochrana proti nadproudům
- [9] ZÍTEK, Pavel, PETROVÁ, Růžena. *Matematické a simulační modely*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1996. 128 s.
- [10] KARBAN, Pavel. *Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink*. [s.l.] : [s.n.], 2006. 220 s. Computer press.
- [11] RAČEK, Jiří. *Technická mechanika : Mechanika tekutin a termomechanika*. 2004. vyd. [s.l.] : [s.n.], 2004. 212 s. ISBN 80-214-2838-4
- [12] *MATLAB Documentation* [online]. [2009] [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/index.html?/access/helpdesk/help/techdoc/>>.
- [13] *Katalog výrobků NKT Cables* [online]. 2009 [cit. 2009-02-24]. Dostupný z WWW: <http://www.kablo.cz/upload/axekvcey_002.pdf>.
- [14] BENEŠOVÁ, Zdenka. *Heating of power cables with respecting of influence of imperfect insulation*. [s.l.] : [s.n.], 2001. Západočeská univerzita, Plzeň. s. 151–154.
- [15] KONŠEL, Ladislav. *Jištění vedení proti přetížení a zkratu*. [s.l.], 2008. 23 s. Fakulta elektrotechniky, VUT. Vedoucí semestrální práce Ing. Jiří VALENTA, Ph.D.