



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

OTEPLOVACÍ CHARAKTERISTIKY SILOVÝCH VODIČŮ

THERMAL CHARACTERISTICS OF POWER CONDUCTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

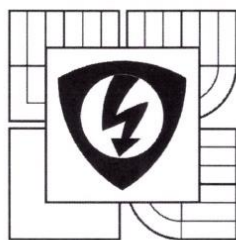
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

IVAN MĚRKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. JAROSLAVA ORSÁGOVÁ,
PH.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Ivan Měrka

Ročník: 3

ID: 125542

Akademický rok: 2012/13

NÁZEV TÉMATU:

Oteplovací charakteristiky silových vodičů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teorie oteplování vodiče průchodem proudu a její aplikace při stanovení dovoleného zatížení.
2. Matematický model pro stanovení oteplovací charakteristiky silového vodiče.
3. Parametrizace modelu s ohledem na konstrukci a materiál izolace a způsob uložení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

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

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

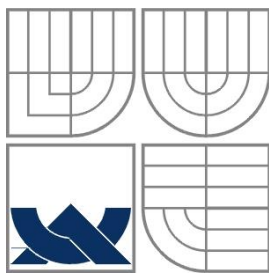
Bibliografická citace práce:

MĚRKA, Ivan. *Oteplovací charakteristiky silových vodičů*. Brno, 2013. Bakalářská práce.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

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

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Semestrální práce

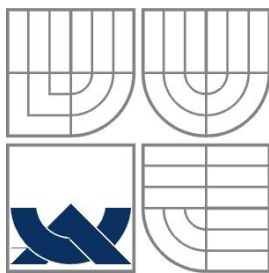
Oteplovací charakteristiky silových vodičů

Ivan Měrka

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

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2012

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

Bachelor's Thesis

Thermal characteristics of Power Conductors

Ivan Měrka

Supervisor: doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Brno University of Technology, 2013

Brno

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce má za úkol teoreticky rozebrat tepelné děje v silových vodičích a vytvořit simulaci oteplovací charakteristiky zatíženého vodiče. Nejprve je stručně pojednáno o silových vodičích a jejich klasifikaci. Následují základní poznatky termomechaniky a způsoby přestupu tepla. Navazující kapitola hovoří o různých způsobech uložení vodičů z hlediska jejich ustálených teplot a návrhu vhodného průřezu. Další část se soustřeďuje na nestacionární stav oteplovaného vodiče, rozbor Van Wormerovy metody pro získání oteplovacích charakteristik a z ní poté vychází tvorba modelu pro parametrizované vodiče. V závěru jsou modelované výsledky ověřeny a porovnány s praktickým měřením v laboratoři.

KLÍČOVÁ SLOVA

oteplovací charakteristika; silový vodič; kabel; teplota; teplo; tepelná kapacita; tepelný odpor; Matlab; Simulink; Van Wormer;

ABSTRACT

This bachelor's thesis aims to theoretically analyze thermal phenomena in power conductors and construct a simulation of thermal characteristics of conductor under load. First, power conductors and their classification is discussed. Following are elementary information in thermomechanics and ways of heat transfer. Next chapter talks about different ways of cable laying with respect to their steady temperatures and the design of conductor's cross section. Further chapter focus on unsteady state of the heating conductor, analysis of Van Wormer's method for acquisition of thermal characteristics and in this method the model for parameterized conductors is based. In conclusion the simulated results are verified and compared to the results of practical laboratory measurement.

KEY WORDS

thermal characteristic; power conductor; cable; temperature; heat; thermal capacity; thermal resistivity; Matlab; Simulink; Van Wormer;

OBSAH

1 ÚVOD	8
2 VODIČE ELEKTRICKÉHO PROUDU	9
3 DRUHY SILOVÝCH VODIČŮ	10
3.1 HOLÉ VODIČE	10
3.2 IZOLOVANÉ VODIČE	10
3.3 KABELY.....	10
4 ELEMENTÁRNÍ VLASTNOSTI VODIČŮ	12
4.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI VODIČŮ	12
4.2 MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI VODIČŮ	12
4.3 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI VODIČŮ.....	12
4.3.1 ELEKTRICKÉ POLE VODIČE.....	12
4.3.2 MAGNETICKÉ POLE VODIČE	13
4.3.3 PROXIMITY EFEKT, SKIN EFEKT	13
5 TEPLA, TEPLOTA	14
5.1 ŠÍŘENÍ TEPLA.....	14
5.1.1 SDÍLENÍ TEPLA KONDUKČÍ.....	14
5.1.2 SDÍLENÍ TEPLA KONVEKČÍ	15
5.1.3 SDÍLENÍ TEPLA RADIACÍ.....	15
6 TEPLA VE VODIČÍCH.....	16
6.1 NÁVRH KABELU S OHLEDEM NA OTEPLENÍ.....	16
6.1.1 PŘÍKLAD Č. 1: KONTROLA NA OTEPLENÍ VODIČE	17
6.2 OTEPLOVACÍ CHARAKTERISTIKY	17
6.3 TEPLOTNÍ VLIV OKOLNÍHO PROSTŘEDÍ	18
6.3.1 ZPŮSOB ULOŽENÍ	19
7 NESTACIONÁRNÍ STAV OTEPLOVANÉHO VODIČE	22
7.1 VAN WORMEROVA METODA	22
8 SIMULACE V PROGRAMU MATLAB	25
8.1 SIMULACE HOLÉHO VODIČE.....	25
8.1.1 PARAMETRY VYBRANÉHO SILOVÉHO VODIČE	25
8.1.2 MATEMATICKÝ ZÁKLAD PRO SIMULACI	25
8.1.3 MODEL	27
8.1.4 VÝSTUP SIMULACE	28
8.2 SIMULACE VÍCEVRSTVÉHO VODIČE - KABELU	30
8.2.1 PARAMETRY VYBRANÉHO KABELU	30
8.2.2 MATEMATICKÝ ZÁKLAD PRO SIMULACI	30
8.2.3 MODEL	31
8.2.4 VÝSTUP SIMULACE	33

9 POROVNÁNÍ SIMULOVANÝCH A MĚŘENÝCH OTEPLENÍ	34
10 ZÁVĚR.....	36
11 POUŽITÁ LITERATURA	37
12 PŘÍLOHY	38

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. č. 1: Schéma kabelu CYKYDY, výrobce PRAKAB
- Obr. č. 2: Obecná oteplovací charakteristika
- Obr. č. 3: Ochlazování kabelu uloženého ve vzduchu
- Obr. č. 4: Vliv hustoty a vlhkosti půdy na tepelnou rezistivitu
- Obr. č. 5: Schematické znázornění vodiče pro základní tvar Van Wormerovy metody
- Obr. č. 6: Náhradní schéma tepelného pole vodiče z Obr. č. 5
- Obr. č. 7: Holý měděný vodič kruhového průřezu
- Obr. č. 8: Náhradní tepelné schéma holého vodiče
- Obr. č. 9: Simulovaný průběh oteplovací charakteristiky holého vodiče
- Obr. č. 10: Popsaný model oteplování holého vodiče v prostředí Simulink
- Obr. č. 11: Schematické naznačení struktury kabelu CYKY
- Obr. č. 12: Náhradní tepelné schéma kabelu
- Obr. č. 13: Model oteplovaného kabelu CYKY v prostředí Simulink
- Obr. č. 14: Simulovaný průběh oteplovací charakteristiky kabelu
- Obr. č. 15: Porovnání praktického měření a simulace včetně detailu času 0-3000s
- Obr. č. 16: Výňatek z katalogu firmy PRAKAB pro holý vodič
- Obr. č. 17: Výňatek z katalogu firmy PRAKAB pro kabel CYKY
- Obr. č. 18: M-file s parametry holého Cu vodiče
- Obr. č. 19: M-file s parametry kabelu CYKY
- Obr. č. 20: Pohled na pracoviště a detail svorky pomocí termokamery FLIR
- Obr. č. 21: Pohled na pracoviště s měřeným kabelem
- Obr. č. 22: Odečtení časové oteplovací konstanty holého vodiče
- Obr. č. 23: Pokládání silových kabelů do země a aplikace Fluidizovaného termálního zásypu

SEZNAM TABULEK

- Tab. č. 1: Dovolené orientační provozní teploty a oteplení vodičů
- Tab. č. 2: Parametry simulovaného vodiče
- Tab. č. 3: Parametry simulovaného vodiče

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Jednotka
B	magnetická indukce	T
C_a	tepelná kapacita izolace	$J \cdot K^{-1}$
C_j	tepelná kapacita jádra	$J \cdot K^{-1}$
C_p	provozní kapacita kabelu	$F \cdot m^{-1}$
C_1	tepelná kapacita reprezentující jádro kabelu	$J \cdot K^{-1}$
C_2	tepelná kapacita reprezentující část izolace	$J \cdot K^{-1}$
C_3	tepelná kapacita reprezentující stínění kabelu	$J \cdot K^{-1}$
c	měrná tepelná kapacita	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
D	průměr kabelu	m
H_e	venkovní tepelný odpor	$K \cdot W^{-1}$
H_1	tepelný odpor reprezentující danou část kabelu	$K \cdot W^{-1}$
H	magnetická intenzita	$A \cdot m^{-1}$
h	hloubka uložení kabelu v půdě	m
I_N	jmenovitá proudová zatížitelnost kabelu	A
I_m	nadproud	A
I_z	dovolené proudové zatížení	A
I	zatěžovací proud	A
l	délka kabelu	m
m	hmotnost vodiče	kg
m_Σ	počet jader kabelu, která jsou zatížena proudem	-
p	koeficient respektující logaritmické chování teploty	-
P	celkový ztrátový výkon kabelu	W
dQ	teplo vyvinuté průchodem proudu kabelem	J
dQ_1	teplo akumulované v kabelu	J
dQ_2	teplo odevzdané do okolí	J
r_1	poloměr izolace kabelu	m
r_2	poloměr jádra kabelu	m
R_0	odpor vodiče při teplotě okolí ϑ_0	Ω
R_9	elektrický odpor jádra při dané teplotě	Ω
r_k	poloměr kabelu	m
S	plochy povrchu vodiče	m^2
t	čas průchodu proudu	s
T_1	teplota jádra kabelu způsobená průchodem proudu	$^{\circ}C$
T_2	teplota okolí	$^{\circ}C$
$tg\delta$	ztrátový činitel izolace kabelu	-
U_f	fázové napětí kabelu	V
$\alpha_{_R}$	teplotní součinitel odporu	K^{-1}
$\alpha_{_s}$	teplotní konduktivita daného prostředí	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\Delta\vartheta$	oteplení jádra (povrchu) kabelu	$^{\circ}C$
$\Delta\vartheta_m$	maximální ustálené oteplení jádra (povrchu) kabelu	$^{\circ}C$
$\Delta\vartheta_\tau$	velikost oteplení za dobu τ	$^{\circ}C$
$\Delta\vartheta_\infty$	ustálené oteplení jádra (povrchu) kabelu při nadproudu	$^{\circ}C$
$\vartheta(t)$	proměnná teplota vodiče	$^{\circ}C$
ϑ_0	teplota okolí	$^{\circ}C$

λ	součinitel přestupu tepla vedením a prouděním	$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$
λ_g	tepelná vodivost	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
λ_1, λ_2	součinitele přídavných ztrát v kabelu	-
ϑ_m	největší ustálené oteplení jádra (povrchu) kabelu	$^{\circ}C$
λ_z	tepelná konduktivita země	$m^2 \cdot s^{-1}$
ρ_l	vzdálenost daného bodu	m
μ	permeabilita prostředí	$H \cdot m^{-1}$
μ_0	permeabilita vakua	$H \cdot m^{-1}$
μ_r	relativní permeabilita	-
τ	časová oteplovací konstanta kabelu	s
ω	úhlová rychlost frekvence napětí	$rad \cdot s$

1 ÚVOD

Základem celé moderní civilizace jak ji známe je v dnešní době energetika. Elektrická rozvodná síť je páteří ekonomiky každé vyspělé krajiny. Aby byla síť kvalitní, tedy dostatečně tvrdá (držela napěťovou hladinu), odolná vůči přechodným jevům spínacím i povětrnostním a výkonově uspokojující odběr, je potřeba jak dostatku velkých zdrojů – elektráren, tak správně dimenzované vedení.

O dopravu elektrické energie z výroben do velkých transformátorových stanic se stará přenosová soustava. Zajištění dodávek koncovým odběratelům – tedy obcím, domácnostem, či průmyslovým komplexům, je úkol distribuční soustavy. Koncoví zákazníci pak mají rozvod po vlastních objektech většinou řešený již při stavbě dané budovy. Tato rozdělení však jsou z větší části umělá, neboť veškeré vedení elektrického proudu, nezávisle od délky, polohy, či konkrétní aplikace, je prováděno pomocí *silových vodičů*.

Všechny běžně používané vodiče se při průchodu proudu ohřívají, a pokud bychom při návrhu vedení s tímto oteplováním nepočítali, mohlo by docházet k poškození samotných vodičů anebo k požárům. Proto je důležité znát *oteplovací charakteristiky*, umět je simulovat a poté s nimi správně kalkulovat při dimenzování vedení.

2 VODIČE ELEKTRICKÉHO PROUDU

Elektrické proudy nejsou výhradní doménou pouze velké průmyslové energetiky, vyskytují se všude kolem nás i přímo v nás.

Elektrický proud prochází látkami díky přítomnosti volných elektronů v obalech jejich atomů či molekul. Schopnost vést proud je vyjádřena veličinou elektrická vodivost. Analogicky – elektrický odpor vyjadřuje, jak velkou rezistencí (odpor se též nazývá rezistance) působí vodič proti průchodu proudu. Pokud k vodiči přiložíme napětí U a bude jím protékat proud I , pak odpor R určíme podle:

$$R = \frac{U}{I} \quad (2.1)$$

Odpor je žádoucí vlastností u elektrotechnické součástky – rezistoru. Je však také neoddelitelným parametrem každého standardního vodiče, protože rezistivita je vlastnost každého materiálu. Rezistivita, též měrný odpor, vyjadřuje odpor na jeden metr látky. Místo přiloženého napětí na vodič uvažujeme intenzitu elektrického pole E v určitém bodě materiálu a budeme pracovat s hustotou proudu J ve sledovaném bodě. Pak je rezistivita materiálu dána vztahem:

$$\rho = \frac{E}{J} \quad (2.2)$$

Při průchodu proudu vzniká na objektu daného odporu, tedy i vodiči, úbytek napětí, jakožto důsledek poklesu elektrické potenciální energie. Na odporu se spotřebovává výkon P . Tento děj musí být logicky doprovázen přeměnou energie do jiné formy – disipací energie. Ve vodiči se pohybují nabitě elektrony. Při tomto pohybu dochází ke srážkám nábojů s atomy ve vodiči (součástce) a tyto náboje tak předávají část své energie. Tím dochází ke zvětšování vnitřní energie materiálu, narůstá teplota vodiče a ten se stává zdrojem tepelného toku. Obecně v elektrotechnice hovoříme o Joulově teple, v případě vodičů je tento jev nežádoucí a proto se takto uvolněné energii často říká (Joulovo) ztrátové teplo.

$$P = I \cdot U \quad (2.3)$$

$$P = R \cdot I^2 \quad (2.4)$$

V praxi by pro přenos elektrické energie ve vodičích bylo ideální, kdybychom měli k dispozici materiál zcela bez rezistivity. V roce 1911 holandský fyzik Onnes objevil, že při extrémně nízkých teplotách, tedy blízkých 0 K, rezistivita jím zkoušené rtuti zcela vymizí. V dnešní době je už známo, že některé keramické materiály, za normálních okolností používané běžně právě pro svoji vysokou rezistivitu jako izolátory na stožárech elektrického vedení, dosahují při značně nízkých teplotách velmi vysoké vodivosti – *supravodivosti*.

Běžné elektrické obvody, ať už silové či výpočetní, obsahují kromě rezistorů ještě mnoho jiných součástek, kde místo odporu hovoříme obecně o *impedanci*. Všechny tyto komponenty by však byly bez užitku, pokud by nebyly správně propojeny vodiči. [7]

3 DRUHY SILOVÝCH VODIČŮ

Typ elektrického vodiče určuje mnoho faktorů. Patří mezi ně fyzické rozměry vodiče, složení vodiče, elektrické, oteplovací a jiné charakteristiky vodiče. Rozhodující je prostředí, ve kterém bude vodič použit, hmotnost a v neposlední řadě také ekonomické hledisko, tedy cena.

3.1 Holé vodiče

Nejčastěji se jedná o svazek drátů dělený na jádro a plášť. Svazky vodičů v tomto laně jsou po celé délce stočeny. Takováto svazková lana se používají ve venkovním vzdušném vedení přenosové soustavy a vyrábí se nejběžněji z hliníku a oceli, popřípadě z mědi a oceli (kde jádro lana je vždy tvořeno ocelovými dráty). Tato lana mají velmi dobrou vodivost, jejich nevýhoda však spočívá v mechanických vlastnostech. Hliníková lana trpí na vibrace a měděná jsou velmi těžká a též drahá. V určitých podmínkách může být výhodné použít slitinové vodiče většinou s obsahem hliníku.

Jako holé se používají vodiče pro venkovní vedení proudu o vysokém napětí v podobě lanových vodičů. Pro použití v rozvodnách jsou charakteristické ploché holé (většinou měděné) vodiče, které tvoří přípojnice. Mezi holé pracovní vodiče také patří ocelové kolejnice pro kolejová vozidla poháněná elektromotory a napájená z trakční sítě. Pro bezpečnost majetku i osob mají nezastupitelnou roli bleskosvody (častěji zvané hromosvody), které jsou taktéž tvořeny vodiči bez izolace.

3.2 Izolované vodiče

Je složen z vodiče a izolace a také se používá pro venkovní vzdušná vysokonapěťová vedení. Do země nesmí být uložen. Jejich výhodou je zejména spolehlivost provozu. Jsou odolné vůči vibracím při nárazech větru, přeskokům při atmosférickém přepětí, pádu stromu (větve) do vedení. Například u vodiče SAX-W vyráběné a dodávané společností Ensto-group byla prokázána funkčnost vedení VN i několik měsíců po pádu stromu do vedení, zatímco u vedení s holými vodiči by takový incident způsobil okamžitý zkrat a tedy poruchu a přerušení dodávky.

Používají se také v těžkých průmyslových provozech, kde je nutné vést vodiče s vysokým napětím stejnými prostory, ve kterých se mohou pohybovat také osoby. Příklad takového vodiče může být DURESCA výrobce MGC MOSER-GLASER, který garantuje dotykovou ochranu do 170kV, vyloučení mezifázového zkratu, vysokou mechanickou odolnost, jednoduchost montáže a jiné výhody. [11]

Jako jednoduše izolované jsou provedeny i mnohé vodiče nízkého napětí, zejména pro osvětlovací techniku, či uvnitř rozváděčů.

3.3 Kabele

Kabelem rozumíme svazek vodičů, opatřených některým z mnoha typů izolace a společným pláštěm. Kabelová vedení jsou často umístěna uvnitř budov jako domovní rozvody anebo jsou

v případě venkovního vedení uložena v zemi. Kabelové vedení je nákladnější jak materiálově, tak především montážně. Je zároveň omezeno teplotní zátěží, protože zemina obklopující kabel odebírá zpravidla teplo méně ochotně, než proudící vzduch. Při nesprávném dimenzování a přehřívání kabelů dochází k urychlenému stárnutí či přímému narušení obalů.

Kabely jsou konstrukčně nejsložitějším druhem vodiče a množství používaných druhů izolací, stínění, opláštění má za následek velkou rozmanitost podob a použití všemožných kabelů, od silových až po datové. Například běžný napájecí kabel CYKYDY pro pevný rozvod elektrické energie v zemi nebo ve volném prostoru odolávající zvýšenému mechanickému tlaku se skládá z následujících vrstev:

- Cu (měděná) jádra
- Izolace (barevné PVC podle funkce drátu)
- Obal tvořený výplňovou gumou
- Plášť (černé PVC)
- Pancíř (pozinkované ocelové dráty)
- Obal (černé PVC, odolné proti UV záření)



Obrázek č. 1: Schéma kabelu CYKYDY, výrobce PRAKAB [12]

4 ELEMENTÁRNÍ VLASTNOSTI VODIČŮ

Na vodiče a jejich vlastnosti můžeme pohlížet ze dvou úhlů, buď jako součásti elektrického vedení, kdy je elektrická energie brána v potaz, anebo jako technické konstrukční prvky, budované ve specifických lokalitách. Pokud tedy elektrickou energii ponecháme stranou, zajímají nás mechanické a materiálové atributy.

4.1 Mechanické vlastnosti vodičů

Druhy vedení a požadavky na jejich mechanické vlastnosti určuje nejzásadněji způsob uložení. Z toho vyplývá, že větší pozornost se bude věnovat mechanickým vlastnostem vodičů, určených pro nadzemní vedení elektrické energie. Tyto vodiče musí totiž odolávat klimatickým jevům, jako jsou námraza, vítr, výboje blesku, výkyvy teploty. Kromě povětrnostních podmínek se ještě nesmí zanedbat stálé zatížení vlastní vahou vodiče a přídavné zatížení způsobené zařízeními pro údržbu a revize.

4.2 Materiálové vlastnosti vodičů

Hlavním materiálem u elektrického vodiče je vždy ten, který bude sloužit k samotnému vedení elektrického proudu. Tvoří takzvané *jádro* vodiče. Jádra mohou být plná, tvořena jedním vodičem, anebo složená, kde je lano tvořeno větším počtem svinutých drátů. Jádra složená mohou pak mít různá uspořádání ovlivněná tvarem profilu jednotlivých vodičů. Rozlišujeme kruhová jádra, běžná u holých venkovních vedení a sektorová jádra, modernější, úspornější, ale ne tolik rozšířená. Jiné profily jader jsou spíše vzácné. Mohou se vyskytovat u vodičů, na které jsou kladeny speciální nároky závislé od prostředí jejich umístění.

V dnešní době je primárním materiálem pro výrobu všech druhů vodičů měď (Cu). Pro elektrotechnickou měď jsou stanoveny mezinárodní i české normy. Již v roce 1913 byl zaveden pojem standardní vyžíhaná měď, jenž je v současnosti objasněn normou ČSN IEC 28 (32 0210) Mezinárodní norma odporu mědi. V tomto dokumentu jsou uvedeny normální hodnoty rezistivity, hustoty a teplotního součinitele odporu elektrotechnické mědi při 20°C. U nás platí ještě pojem elektrovodná měď a je upraven normou ČSN 42 3001 Měď elektrovodná Cu 99,9E.

Hliník tvoří spolu s mědí základ materiálů pro výrobu elektrických vodičů. Zpracovává se tvářením a žíháním a jeho vlastnosti stanovuje ČSN 42 4004 Hliník tvářený pro elektrotechniku Al 99,5. Největší výhody hliníku oproti mědi jsou cena a nižší hmotnost. Převažují ale nevýhody, zejména nižší vodivost, oxidace na povrchu zvyšující přechodový odpor, menší pevnost, lámavost, vyšší teplotní roztažnost. [2]

4.3 Elektrické vlastnosti vodičů

V okolí vodičů, ve kterých se pohybují nosiče náboje, tedy, jimiž teče elektrický proud, jsou vytvářena elektrická a magnetická pole.

4.3.1 Elektrické pole vodiče

Při návrhu vodiče, obzvláště pak kabelu, je důležité dbát na provozní kapacitu kabelu, která bude způsobovat dielektrické ztráty v izolaci. Elektroizolační materiál kabelu musí mít velkou

elektrickou pevnost, čehož by se dalo docílit navyšováním průřezu izolace, avšak bylo by to neekonomické a rovněž by se zhoršoval odvod tepla z kabelu, a tedy proudová zatížitelnost by klesala. Dimenzování takového vodiče musí být cenově i technicky přijatelným kompromisem.

4.3.2 Magnetické pole vodiče

U silových vodičů uvažujeme za normálních předpokladů střídavá napětí. Magnetická pole vytvářená tekoucím střídavým proudem mohou způsobovat elektromagnetickou indukci ve vodivých strukturách ve své blízkosti. Při zkratu se projevují elektrodynamické účinky, které by mohly poškodit izolaci kabelového vedení.

4.3.3 Proximity efekt, skin efekt

Pokud je vedeno více vodičů v těsné blízkosti, dochází k vytlačování proudu vlivem cizího magnetického pole – proximity efektu (též jevu blízkosti). V důsledku tohoto vytlačení je proud nucen téct menším průřezem a kvůli takto zvýšenému odporu narůstají tepelné ztráty.

Skin efekt (též povrchový jev) je obdobným procesem vytlačení elektrického proudu k vnějším okrajům vodiče – dále od jádra. Dochází k němu však vlivem vlastního magnetického pole, nikoliv cizího, jako u proximity efektu. Skin efekt znatelně narůstá se zvyšující se frekvencí přenášeného proudu, zhruba od 20kHz. Skin efekt má identický důsledek jako proximity efekt, zvyšuje odpor a způsobuje ztráty. [2][9]

5 TEPLLO, TEPLOTA

Teplo je forma energie, která byla získávána po tisíciletí chemickou přeměnou z různých druhů paliv. Přeměna elektrické energie na teplo je tedy v porovnání stále novinkou. Takto získané teplo je sice nákladnější, ale má mnoho výhod, zejména v možnosti řízení a regulace a v rychlosti dosažení požadované teploty. Teplo je možné z elektřiny získat jednoduše odporově či obloukově, ale i složitějšími způsoby pro speciální aplikace (indukční, plazmový, elektronový, laserový ohřev).

Částice v látkách se neustále pohybují a vzájemně se sráží. Díky těmto srážkám má každá látka svou vnitřní energii. Pokud dojde ke styku dvou prostředí s odlišnými vnitřními energiemi, dochází podle termodynamických zákonů k předávání části této energie, té říkáme *teplo*. Nejedná se tedy o stavovou veličinu, jde o veličinu procesní.

Teplota vyjadřuje vnitřní energii látky, každá látka s vnitřní energií má svou teplotu. Je měřena a udávána v jiných částech světa v mnoha různých jednotkách, u nás jde o Celsiovu stupnici, používané jsou ještě Fahrenheitova, Rankinova. Nejlépe však definuje skutečnou míru vnitřní energie termodynamická teplota vyjadřovaná v Kelvinech. Tato stupnice má jako svůj počátek 0K, též znám jako absolutní nula, jde o bod, kde látka s touto teplotou nemá žádnou vnitřní energii, nemohla by tedy existovat. K teplotám blízkým 0K je technicky možné se přiblížit, v praxi se toho využívá zejména u chlazení supravodičů. Kelvinova termodynamická stupnice patří do soustavy SI. [4]

5.1 Šíření tepla

Tepelná výměna je děj, při kterém se snaží dvě a více soustav o vyrovnání rozdílných teplot a dosažení rovnovážného stavu. Směr toku energie je dán teplotami daných soustav (např. těles), tepelná energie proudí vždy z tělesa o vyšší teplotě do tělesa s teplotou nižší.

Tepelná energie se šíří různými způsoby, závislými od materiálu a skupenství hmot, mezi kterými probíhá tepelná výměna. Rozlišujeme tři základní typy šíření tepla:

- **Kondukcce** – značí vedení tepelné energie pevnou hmotou, prostřednictvím srážek částic, které se nepohybují, ale kmitají kolem svých poloh. Takto je teplo vedeno v pevných látkách.
- **Konvekce** – hmota proudí a dochází ke kontaktu různě teplých částí hmoty vlivem jejich pohybu. Vyskytuje se u tekutin.
- **Radiace** – tento způsob šíření tepla nevyžaduje látkové prostředí, jde o sálání elektromagnetických vln do prostoru a může probíhat i ve vakuu. [4]

5.1.1 Sdílení tepla kondukcí

Pokud je těleso zahříváno nerovnoměrně a je tedy v jeho objemu nestejné rozložení teploty, šíří se v tomto tělese teplo prostřednictvím vedení – kondukcce. Popis vedení tepla se řídí Fourierovým zákonem, podle empirického vztahu:

$$\phi = -\lambda \cdot A \cdot \text{grad } \vartheta \quad (5.1)$$

kde: ϕ - tepelný tok prošlý plochou
 A - plocha stojící kolmo ke směru toku
 λ - součinitel tepelné vodivosti
 ϑ - teplota

Při uvažování proměnnosti teploty v průběhu času je nutné vycházet z diferenciální rovnice vedení tepla v tělese s konstantními materiálovými vlastnostmi:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = a \cdot \operatorname{div} \operatorname{grad} \vartheta + a \frac{q_v}{\lambda} \quad (5.2)$$

kde: a - součinitel teplotní vodivosti

5.1.2 Sdílení tepla konvekcí

Jde o současné sdílení tepla vedením a prouděním tekutiny, kde podíly příspěvku sdílení nejsou vždy stejné a záleží na druhu proudění a druhu tekutiny. Je-li proudění vyvoláno například čerpáním či ofukováním, jedná se o proudění vynucené. Pokud probíhá samovolně vlivem závislosti hustoty tekutiny na teplotě, říkáme takové konvekci volná. Dále rozeznáváme proudění laminární a turbulentní. [15]

Často se v souvislosti oteplování kabelů setkáváme právě s volnou konvekcí, ke které dochází, když je kabel uložen volně ve stojatém klidném vzduchu.

5.1.3 Sdílení tepla radiací

Elektromagnetické záření, které z tělesa vyzařuje, se nazývá tepelné záření. Těleso může toto záření nejen vysílat, ale také přijímat či odrážet. Absorbované tepelné záření se v tělese mění na tepelnou energii látky.

6 TEPLA VE VODIČÍCH

Teplo vznikající ve vodiči se řídí Jouleovým zákonem. Množství tepla Q je úměrné druhé mocnině proudu I a elektrickému odporu vodiče R v čase t .

$$Q = P \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t \quad (6.1)$$

Toto teplo vzniká v jádře vodiče a předává se do dalších vrstev. Pokud je vodičem kabel, pak teplo prostupuje do izolace, stínění, popř. dalších obalů a nakonec prostředí, ve kterém je uložen/zavěšen. Jestli je vodičem pouze holý drát, anebo svazkové lano, pak teplo prochází rovnou do okolního prostředí – vzduchu a je jím ochlazován.

6.1 Návrh kabelu s ohledem na oteplení

Vodiče se mohou dimenzovat podle toho, jaká kritéria jsou kladena na jejich provoz. Kontrola na dovolené oteplení se provádí vždy, navíc se mohou provádět různé dodatečné kontroly kvůli zvýšení bezpečnosti anebo ekonomičnosti provozu. Mezi ně patří kontroly mechanických a tepelných účinků zkratového proudu, velikosti úbytku napětí, velikosti Jouleových ztrát a další.

Při běžném použití vodičů není obvyklá aplikace externího chlazení. Proto je před výběrem konkrétního typu vodiče pro konkrétní případ jeho aplikace důležité zajistit, aby jeho běžný provoz ani provoz při krátkodobém přetížení nepředstavoval možné riziko.

Za normálního provozu nesmí proud procházející vodičem vytvořit takovou teplotu, která by překročila hodnotu nejvyšší dovolené provozní teploty vodiče a jeho izolace, které stanovuje výrobce vodiče. Materiály, ze kterých se vyrábí vodivá jádra, snesou vyšší teploty, než materiály, ze kterých jsou vyrobeny izolace. Zatěžovací proud závisí tedy na druhu izolace.

Kontrola na oteplení vodiče spočívá v porovnání provozního jmenovitého proudu s hodnotou proudu v normě pro daný průřez vodiče, typ izolace a pracovní podmínky pro ochlazování. Sestavení tabulek v normě odpovídá vypočteným a naměřeným přechodným elektrotepelným dějům a uvedené hodnoty proudu zajišťují nepřekročení maximální dovolené teploty izolace.

typ vodiče	teplota okol. vzduchu	dovolená provozní t.	dov. provozní oteplení
	ϑ_0 [°C]	ϑ_d [°C]	τ_d [°C]
kabely s papírovou izolací	30	80	50
s PVC izolací do 1kV	30	70	40
holý vodič (Cu, Al...)	30	80	50

Tab. č. 1: Dovolené orientační provozní teploty a oteplení vodičů [5]

V tabulce Tab. č. 1 jsou uvedeny běžné hodnoty teplot pro běžné typy vodičů, v praxi se mohou lišit podle specifikací výrobce anebo podle očekávaných teplot okolí. Například holý vodič nemusí být takto striktně omezen, protože jeho součástí není izolace, která by mohla podléhat teplotnímu namáhání a opotřebení. [5][10]

6.1.1 Příklad č. 1: Kontrola na oteplení vodiče

Ověřte správnost návrhu vodiče 3x AYKY 4mm², který má přenášet výkon $P_N=14\text{kW}$ na jmenovitém napětí $U_N=400\text{V}$ při účinnosti $\cos\varphi=0,95$. Vodič je umístěn v trubce pod omítkou. Okolo omítky je vzduch s teplotou 35°C .

Základem kontroly na oteplení je ověření, že velikost provozního proudu I_N je menší, než velikost dovoleného proudu stanoveného výrobcem I_D .

$$I_D > I_N \quad (6.3)$$

Proud I_D bychom měli znát pro zvolený kabel, než ho však porovnáme s provozním proudem, musíme ho upravit o korekční koeficienty, respektující specifické pracovní podmínky. Z normy ČSN 3320000-5-523, zjistíme $k_1=0,62$ – koeficient pro 3 pracovní vodiče v trubce pod omítkou; $k_2=0,89$ – koeficient respektující zvýšenou teplotu okolí. Z této normy je také možno vyčíst Proud $I_{DN}=41\text{A}$ (pokud výrobce neudá jinak).

$$I_D = k_1 \cdot k_2 \cdot I_{DN} \quad (6.4)$$

$$I_D = 0,62 \cdot 0,89 \cdot 41 = 22,62\text{A}$$

Nyní musíme zjistit, jak velký bude stálý provozní proud.

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos\varphi} \quad (6.5)$$

$$I_N = \frac{14000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,95} = 21,27\text{A}$$

$$I_D > I_N$$

Použitý vodič vyhověl. [6]

6.2 Oteplovací charakteristiky

Pokud začne proud protékat vodičem, který byl do té chvíle v tepelné rovnováze se svým okolím, začne se zvyšovat teplota v té části, kterou proud teče (obvykle jádro). Teplota narůstá tak dlouho, až rozdíl teplot okolí a vodiče umožní přestup tepla vznikajícího ve vodiči do okolního prostředí. Ustálené oteplení vodiče závisí na jeho materiálu, ochlazovací ploše, způsobu chlazení a velikosti proudu. Doba, za kterou ustálené oteplení nastane, závisí navíc na hmotnosti a měrné tepelné kapacitě vodiče (tedy tepelné kapacitě). Graf časové závislosti teploty od začátku přechodného děje do ustálení nazýváme oteplovací charakteristikou vodiče a určíme ji následovně:

$$\vartheta(t) = \vartheta(\infty) \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (6.1)$$

kde: $\vartheta(t)$ - závislost teploty na čase

$\vartheta(\infty)$ - teplota při ustáleném stavu

t - čas, který uběhl od počátku přechodného děje

τ - časová oteplovací konstanta

Pro každý vodič by měl jeho výrobce stanovit velikost časové oteplovací konstanty τ . Je možné ji spočítat ze známých parametrů vodiče anebo materiálu vodiče:

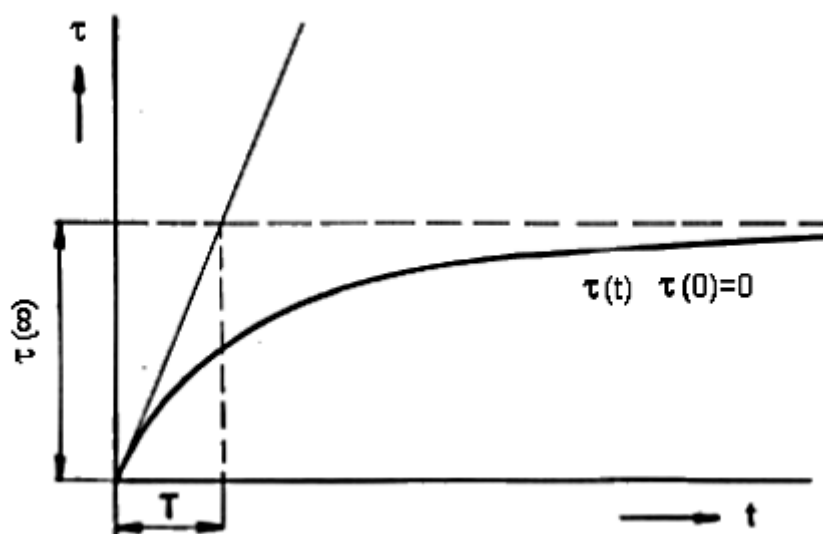
$$\tau = \frac{c \cdot m}{\lambda \cdot S - R_0 \cdot \alpha_R \cdot I^2} \quad (6.2)$$

kde:

- c - měrná tepelná kapacita vodiče
- m - hmotnost vodiče
- λ - součinitel přestupu tepla vedením a prouděním do okolí
- S - plocha ochlazovaného povrchu
- R_0 - odpor vodiče za teploty okolí
- α_R - teplotní součinitel odporu
- I - stálý zatěžovací proud

Rovnice 6.1 pro určení oteplovací charakteristiky však počítá s jistými zjednodušujícími předpoklady:

- Proud ve vodiči se nemění, jeho rozložení po průřezu je konstantní.
- Vodič je holý, přímý, vodorovný 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. [5][2]



Obr. č. 2: Obecná oteplovací charakteristika [5]

6.3 Teplotní vliv okolního prostředí

Prostředí, ve kterém se vodič vyskytuje, má nezanedbatelný vliv na odvod odpadního tepla z vodiče a určuje dovolenou provozní teplotu jader vodičů. Charakteristikami prostředí jsou jeho:

- druh (půda, voda, vzduch)
- teplota okolí ϑ_0 [°C]
- tepelný odpor H [°C.m²/W]

Teplota okolí i tepelný odpor jsou veličiny v praxi značně nestálé. Teplota se mění jak v průběhu dne, tak, samozřejmě výrazněji, v průběhu roku. Tepelný odpor závisí na vlhkosti prostředí, nadmořské výšce, hloubce uložení (v případě kabelového vedení v půdě). Pro dimenzování je nutné používat maximální očekávané hodnoty. [2]

6.3.1 Způsob uložení

Vodiče potřebujeme přivést k našim spotřebičům a trasa, kterou jsou vedeny, má svá specifika. Charakteristiku uložení tvoří řada činitelů, počet a seskupení vodičů, uložení v různých prostředích, vodorovný nebo svislý průběh vedení a jiné. Tyto a další vlastnosti mají dopad zejména na schopnost odvodu tepla, vzniklého ve vodiči.

Norma ČSN 33 2000-5-523 Elektrické instalace budov, rozděluje podle tabulek dovolených proudů vodičů způsoby uložení na následující:

- A1 – izolované vodiče v tepelně izolační stěně
- A2 – vícežilové kabely v trubce v tepelně izolační stěně
- B1 – izolované vodiče v elektroinstalační trubce na dřevěné stěně
- B2 – vícežilové kabely v elektroinstalační trubce na dřevěné stěně
- C – jedno nebo vícežilové kabely na dřevěné stěně
- D – vícežilové kabely v elektroinstalační trubce v zemi
- E, F – jedno nebo vícežilové kabely ve vzduchu
- G – holé nebo izolované vodiče na izolátoru ve vzduchu

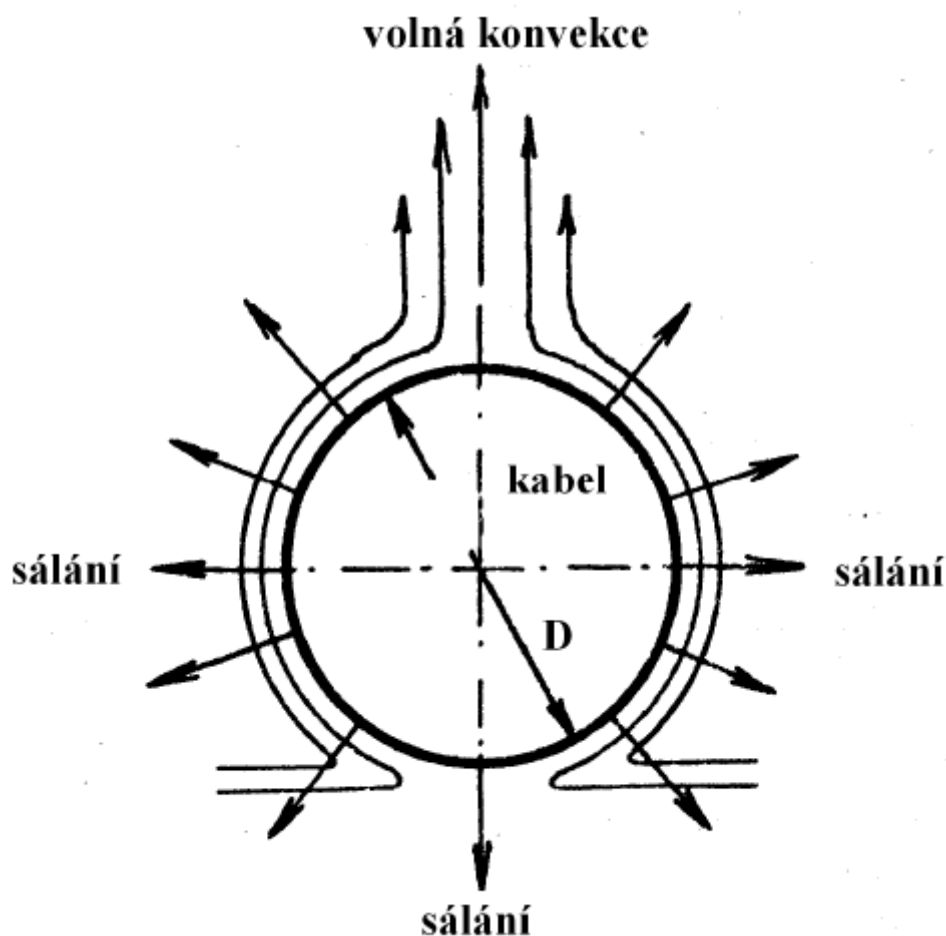
Tabulky, které lze nalézt v [2], stanovující dovolené hodnoty proudů podle způsobu uložení platí pro jednofázové a trojfázové jednoduché obvody v různých provedeních kabelů (několik jednožilových anebo jeden vícežilový kabel).

6.3.1.1 Uložení ve vzduchu

Uložení ve vzduchu popisují normované typy E, F, G. Kabely mohou být trvale uloženy na vzduchu v kabelových kanálech, tunelech a kolektorech, na lávkách nebo na podpěrách. Holé vodiče pak bývají na stožárovém vedení přichyceny izolátory.

Teplo vznikající ve vodičích takto umístěných je odváděno z povrchu konvekci a radiací. Neuvažuje se proudění vzduchu ani dodatečné teplo získané například ze slunečního záření. Potom je venkovní tepelné pole vodiče omezené na nejbližší okolí kabelu, protože ohřátý vzduch se pohybuje po obvodu kabelu nahoru podle obrázku z [2], Obr. č. 3. Radiace (sálání) pak směřuje do všech směrů spojitě.

Pro stanovení intenzity výměny tepla mezi kabelem a jeho okolím se používá součinitel přestupu tepla α . Tento součinitel závisí na všech parametrech ovlivňujících proudění tekutiny (vzduchu), zejména na její hustotě, kinematické viskozitě, rychlosti proudění, teplotním rozdílu, tepelné vodivosti tekutiny, měrné tepelné kapacitě, teplotním součiniteli objemové roztažnosti, na charakteristickém rozměru tělesa, tíhovém zrychlení a tak dále [15]. Pro orientační výpočty se tedy hodnota α volí v rozmezí $10\text{--}12 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ [1].



Obr. č. 3: Ochlazování kabelu uloženého ve vzduchu

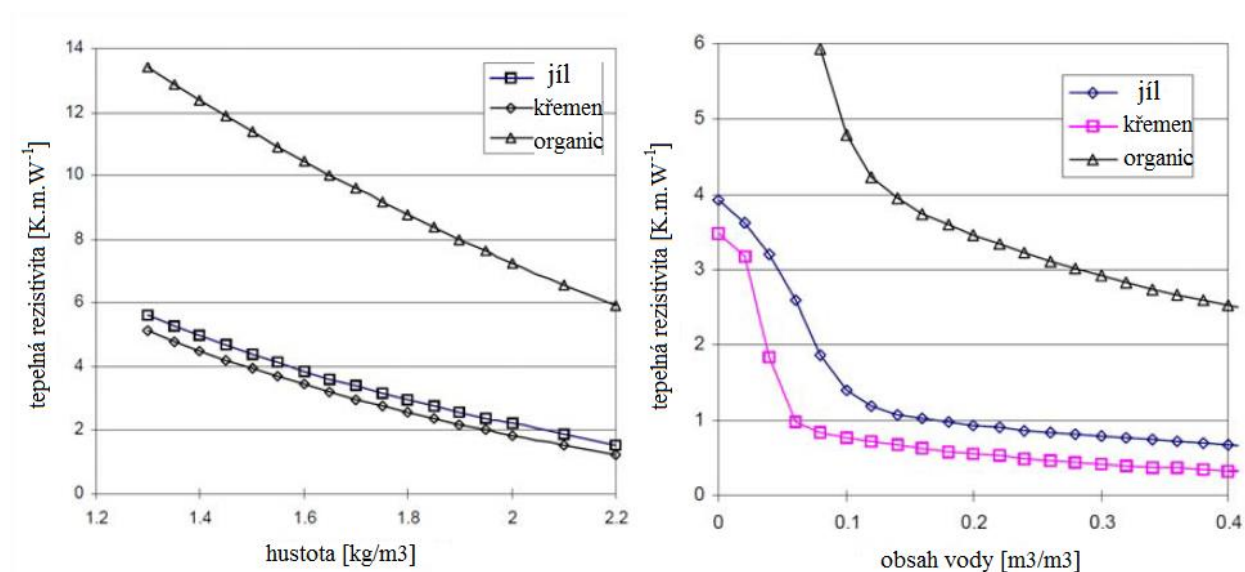
6.3.1.2 Uložení v půdě

Tomuto způsobu pokládky kabelového vedení odpovídá podle zmiňované normy typ uložení D, kabely vícežilové v trubkách v zemi, nebo přímo v zemi. Je pochopitelné, že v půdě není možné vést vodiče holé.

Z hlediska teplotních poměrů je uložení vodiče v půdě nejproblematictější způsobem, jelikož na rozdíl od vzduchu, kde jsou výrazné změny teploty v krátkých časových úsecích, půda drasticky mění svůj teplotní odpor. Teorie popisující určení tepelného odporu zeminy existují podle [14] již od roku 1963 (de Vries), či pozdější přepracování v roce 1998 (Campbell & Norman). Tyto modely jsou založeny na výpočtech vážené paralelní kombinace základních rezistivit pěti půdních prvků: křemene, ostatních minerálů, vody, organické hmoty a vzduchu v pořadí vzrůstajícího tepelného odporu. Vzduch, jakožto nejúčinnější tepelný izolant je pro účely ochlazování nežádoucí. Je tedy důležité jeho podíl na objemu okolní půdní masy minimalizovat, čehož lze dosáhnout zhutněním. Pokud jsou póry v půdě vyplněny místo vzduchu vodou, tepelný odpor klesá, vlhká půda (například po dešti) je pro ochlazování vodiče příznivější. Jak silně se vyjmenované faktory projevují na hodnotách měrné tepelné rezistivity je patrné v grafech převzatých z [14] na obrázku Obr. č. 3.

Při výpočtech, kde neznáme složení půdy, do které bude kabel uložen, ani zeměpisnou polohu a s tím spjaté povětrnostní podmínky, volíme hodnotu tepelné rezistivity na $0,9 \text{ K}\cdot\text{m}\cdot\text{W}^{-1}$ [2], popřípadě bezpečnější hodnotu $2,5 \text{ K}\cdot\text{m}\cdot\text{W}^{-1}$ [14].

Pro zaručení vhodného prostředí s dobrou schopností odvodu tepla v blízkosti kabelu se v běžné praxi kabel pokládá do hloubky 0,7 m pod povrch země do pískového úložiště. Pokud jsou požadavky na tepelnou bezpečnost přísnější, lze místo písku použít například Fluidizovaného termálního zásypu firmy Geotherm [14], náhled na aplikaci speciálního zásypu je v příloze na obrázku Obr. č. 23.



Obr. č. 4: Vliv hustoty a vlhkosti půdy na tepelnou rezistivitu [14]

7 NESTACIONÁRNÍ STAV OTEPLOVANÉHO VODIČE

V případě, že musíme řešit situaci, kdy se teplota vodiče v čase mění v důsledku jeho proudového zatížení, můžeme použít následující parciální diferenciální rovnici, kde ϑ je teplota místa určeného souřadnicí r v čase t , a a_s je tepelná konduktivita materiálu válcového vodiče:

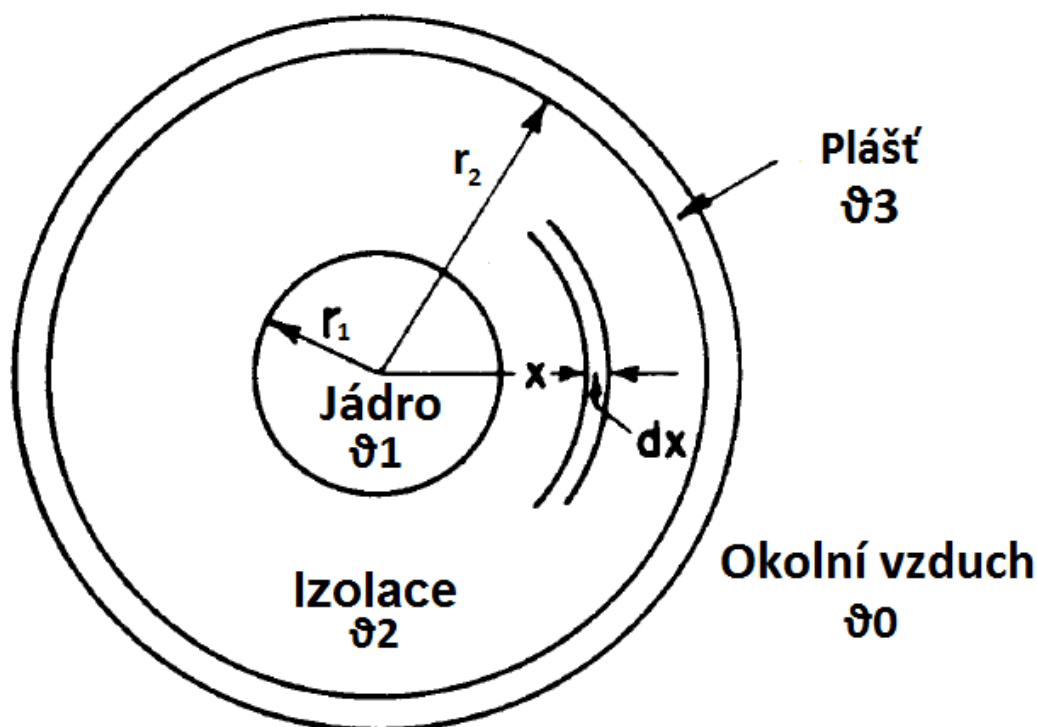
$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial r} = \frac{1}{a_s} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \quad (7.1)$$

Pro praktické použití je však tato rovnice nevhodná, protože vyžaduje konstantní okrajové podmínky, což teplota povrchu vodiče nesplňuje (je proměnná v čase).

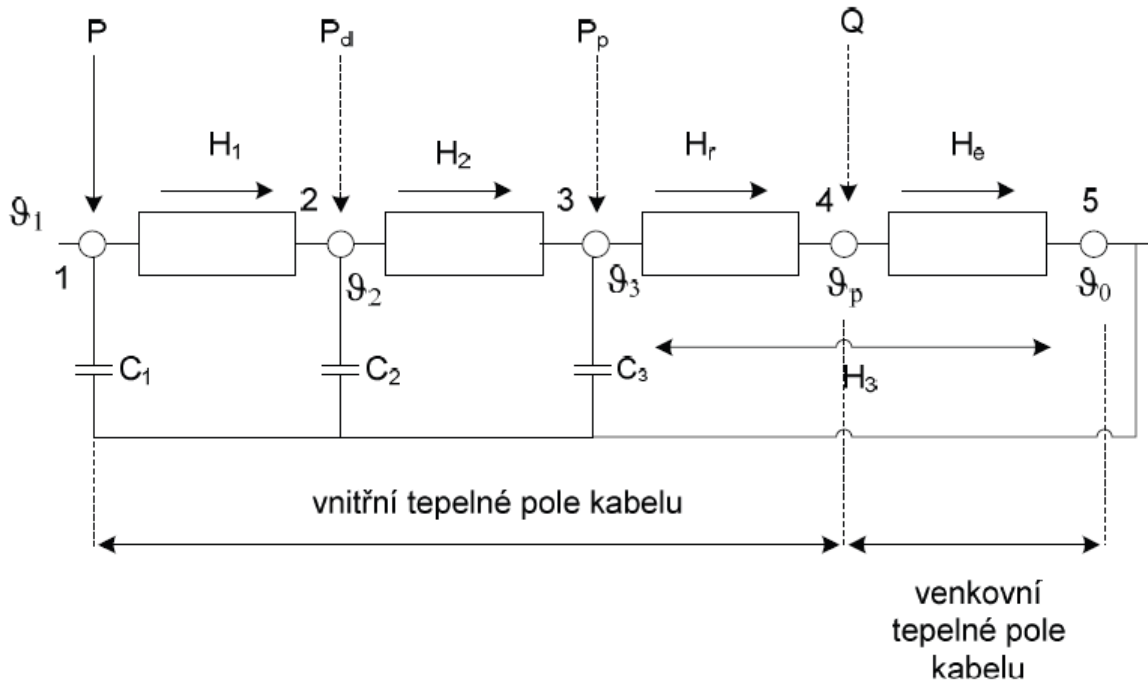
Metody náhradních tepelných obvodů se soustředěnými parametry, tepelnými odpory a kapacitami, jež modelují tepelná pole vodičů a jejich okolí, jsou značně univerzálnějším způsobem získání výsledného průběhu oteplení. Metody využívají modely T-članků a Π -članků a byly vypracovány pro různé aplikace několika autory (Van Wormer, Morallo, Buller...). [8][1]

7.1 Van Wormerova metoda

F.C. Van Wormer vypracoval tuto metodu, kterou zveřejnil v publikaci „An Improved Approximate Technique for Calculating Cable Temperature Transients“ především pro jednožilový kabel uložený ve vzduchu.



Obr. č. 5: Schematické znázornění vodiče pro základní tvar Van Wormerovy metody [3]



Obr. č. 6: Náhradní schéma tepelného pole vodiče z Obr. č. 5 [8]

Základem této metody je náhradní tepelná síť (Obr. č. 4) jednoduchého kabelu, tvořeného jádrem s jednou vrstvou izolace a jednou vrstvou stínění (Obr. č. 3), sestávající ze tří tepelných odporů spojených ve třech uzlech se třemi tepelnými kapacitami a v uzlu čtvrtém s teplotním odporem okolního vzduchu.

Náhradní schéma se řídí strukturou vodiče směrem od jádra a jednotlivé uzly reprezentují tyto vrstvy. Uzel 1 zastupuje jádro kabelu s tepelnou kapacitou C_1 a ztrátovým výkonem P , spojené s tepelným odporem H_1 izolací v uzlu 2 s izolací vodiče. Tepelná kapacita C_1 , je dána součtem tep. kapacity jádra a části p tepelné kapacity izolace, nacházející se mezi jádrem a místem $r = x$ v izolaci, tedy:

$$C_1 = C_j + p \cdot C_a \quad (7.1)$$

$$p = \frac{1}{2 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 - 1} \quad (7.2)$$

, kde C_j je tepelná kapacita jádra a C_a je tepelná kapacita uvedené části izolace, r_1 poloměr jádra a r_2 poloměr izolace.

Tepelná kapacita C_2 náležící uzlu 2 (v místě $r = x$ v izolaci kabelu), je stanovena vztahem:

$$C_2 = (1 - p) \cdot C_a + p \cdot C_b \quad (7.3)$$

Uzel 3 reprezentující plášť (stínění) vodiče tvoří tepelná kapacita C_3 , jejíž výpočet sestává ze součtu $(1-p)$ -násobku tepelné kapacity C_b , tep. kapacity pláště C_g a tep. kapacit všech obalů nad pláštěm C_r :

$$C_3 = (1 - p) \cdot C_b + C_g + C_r \quad (7.4)$$

Tepelné odpory H_1 , H_2 , H_3 se stanoví vztahy:

$$H_1 = H_2 = 0,5 \cdot H_{izolace} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (7.5)$$

$$H_3 = H_e + H_r \quad (7.6)$$

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

H_r je tepelný odpor všech obalů kabelu, které se nacházejí nad stíněním a H_e je vnější tepelný odpor kabelu uloženého ve vzduchu. D je průměr kabelu a α je součinitel přestupu tepla, což je veličina závislá na mnoha činitelích, jejíž vliv sice známe, ale jejich hodnoty se mohou pohybovat v širokém rozmezí. Pro orientační výpočty volíme α okolo 10 – 12 W.K⁻¹.m⁻².

Náhradní tepelné schéma (Obr. č. 4) má 3 hlavní uzly, ve kterých jsou teploty ϑ_1 , ϑ_2 , ϑ_3 . Tyto teploty se vztahují k jádru, polovinu tepelného odporu izolace a kovovému stínění (plášti). Čtvrtý uzel představuje povrch kabelu v kontaktu s okolním prostředím, vzduchem.

Každý uzel s připojenou tepelnou kapacitou má svou tepelnou bilanci, kterou je možné vyjádřit rovnicí. Teplo, které za jednotku času vzniklo anebo bylo přivedeno do uzlu, se rovná teplu, které bylo za stejnou jednotku času odvedeno anebo se akumulovalo v tepelné kapacitě náležící danému uzlu. Pro trojici uzlů a povrch z obrázku Obr. č. 4 je možné odvodit následující 3 diferenciální a jednu algebraickou rovnici, za předpokladu, že ztrátový výkon vzniká pouze v uzlu prvním (jádra kabelu)[1]:

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

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

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

$$\frac{1}{H_r} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_p) = \frac{1}{H_e} \cdot (\vartheta_{povrchu} - \vartheta_0) = 0 \quad (7.11)$$

8 SIMULACE V PROGRAMU MATLAB

Pro získání výsledných oteplovacích charakteristik bylo použito výše popsané metody F. C. Van Wormera a univerzálního matematického softwaru MATLAB americké společnosti The MathWorks, Inc. Modelování bylo provedeno za pomoci součásti MATLABU - Simulinku, což je specializovaný nástroj pro modelování, simulace a analýzy systémů.

Použita byla verze 7.10.0.499 (R2010a) pro systém Windows 7 (64-bit).

8.1 Simulace holého vodiče

Jelikož doc. Slaninka v [1] zmiňuje, že Van Wormerova metoda je při různých modifikacích použitelná i pro jiné, než jednožilové kabely s izolací, stíněním a pláštěm, byl pro první simulaci vybrán nejjednodušší typ silového vodiče – vodič holý.

8.1.1 Parametry vybraného silového vodiče

Pro simulaci byl vybrán jednoduchý holý plný vodič s následujícími parametry, zjištěnými z katalogu firmy PRAKAB:

Parametry 1x16 Cu lano	Značka	Jednotka	Hodnota
Průřez vodiče	S	mm ²	16,00000
Průměr vodiče	d	mm	4,40000
Délka vodiče	l	m	1,00000
Materiál jádra	-	-	Cu
Měrná hmotnost vodiče	m	kg/m	0,15700
Teplotní součinitel odporu Cu	α	K ⁻¹	0,00392
Měrný odpor vodiče při 30°C	r ₀	Ω/m	0,00115

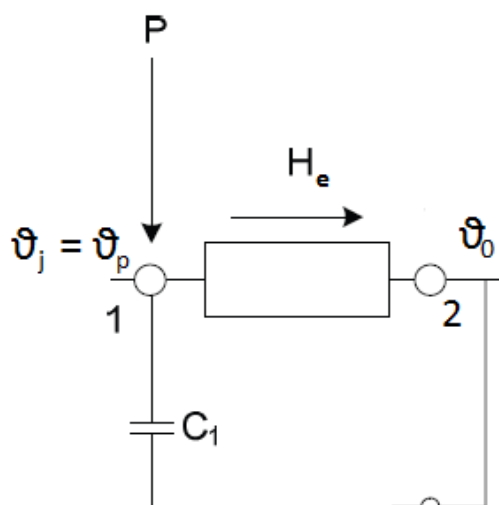
Tab. č. 2: Parametry simulovaného vodiče [12] [13]



Obr. č. 7: Holý měděný vodič kruhového průřezu

8.1.2 Matematický základ pro simulaci

Van Wormerova metoda je popsána na ukázkovém vodiči s jedním jádrem, jednou vrstvou izolace a jednou vrstvou stínění zavěšený ve volném vzduchu. Její princip je přitom založen na náhradním schématu s uzly, reprezentujícími tyto vrstvy, pro které se dají sestavovat diferenciální teplotní bilanční rovnice.



Obr. č. 8: Náhradní tepelné schéma holého vodiče

Protože byl vybrán jednoduchý holý vodič, je náhradní schéma zjednodušeno na jeden uzel (Obr. č. 6). Budeme tedy potřebovat rovnici pro první uzel (7.8), kterou je nutné upravit tak, aby byla na jedné straně rovnice osamostatněna difference, a druhá strana rovnice pak obsahuje ostatní členy. V základním tvaru rovnice 7.8 figuruje výkon P . Je to ztrátový výkon, vytvořený průchodem proudu a spočítá se vzorce 2.4:

$$P = R \cdot I^2$$

kde R je činný odpor jádra kabelu. Tento odpor je teplotně závislý, což nemůžeme zanedbat. Musíme tedy počítat s proměnnou velikostí odporu podle:

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta_j - \vartheta_0)] \quad (8.1)$$

$$C_j \cdot \frac{d\vartheta_j}{dt} + \frac{1}{H_e} \cdot (\vartheta_j - \vartheta_0) = I^2 \cdot R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta_j - \vartheta_0)]$$

$$C_j \cdot \frac{d\vartheta_j}{dt} = I^2 \cdot R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta_j - \vartheta_0)] - \frac{1}{H_e} \cdot (\vartheta_j - \vartheta_0)$$

$$\frac{d\vartheta_j}{dt} = \frac{I^2 \cdot R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta_j - \vartheta_0)]}{C_j} - \frac{1}{C_j \cdot H_e} \cdot (\vartheta_j - \vartheta_0)$$

$$\frac{d\vartheta_j}{dt} = \frac{1}{C_j \cdot H_e} \cdot \{I^2 \cdot R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta_j - \vartheta_0)] \cdot H_e - (\vartheta_j - \vartheta_0)\}$$

(8.2)

- kde:
- R - činný, teplotně závislý odpor jádra
 - R_0 - počáteční odpor při 30°C
 - I - zatěžovací SS proud
 - α - teplotní součinitel odporu jádra
 - ϑ_j - teplota jádra

- ϑ_0 - teplota okolí
 ϑ_p - teplota povrchu vodiče
 H_e - teplotní odpor okolí jádra
 C_j - tepelná kapacita jádra

Pro povrch vodiče je možno použít ještě algebraickou rovnici 7.11. Protože se ale jedná o schéma zjednodušené na jeden uzel, postrádá tato rovnice využití, neboť teplota povrchu celého vodiče je shodná s teplotou jádra:

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{H_r} \cdot (\vartheta_j - \vartheta_p) &= \frac{1}{H_e} \cdot (\vartheta_p - \vartheta_0) = 0 \\
 \frac{(\vartheta_p - \vartheta_0)}{H_e} &= \frac{(\vartheta_j - \vartheta_p)}{H_r} \\
 (\vartheta_p - \vartheta_0) \cdot H_r &= (\vartheta_j - \vartheta_p) \cdot H_e \\
 \vartheta_p \cdot H_r - \vartheta_0 \cdot H_r &= \vartheta_j \cdot H_e - \vartheta_p \cdot H_e \\
 \vartheta_p &= \frac{\vartheta_j \cdot H_e + \vartheta_0 \cdot H_r}{H_e + H_r}
 \end{aligned}
 \tag{8.3}$$

H_r (tepelný odpor všech obalů nad stíněním), je pro holý vodič bez obalů roven nule, platí, že $\vartheta_p = \vartheta_j$.

$$\begin{aligned}
 \vartheta_p &= \frac{\vartheta_j \cdot H_e + \vartheta_0 \cdot 0}{H_e + 0} \\
 \vartheta_p &= \vartheta_j
 \end{aligned}$$

8.1.3 Model

Na následujícím obrázku je vysvětlen Simulinkový model vodiče zatěžovaného proudem, u něhož sledujeme oteplení.

Model má řadu vstupů a výstupů. Veškeré konstantní vstupní hodnoty byly do modelovacího GUI načteny z MATLABového m-file souboru (příloha). M-file slouží jako datový vstup ať už pro MATLAB, tak i pro Simulink. V tomto konkrétním souboru jsou zadány všechny materiálové a stavové konstanty a zároveň jsou zde některé teplotně nezávislé výpočty, použité dále při simulaci.

Hlavním výstupem této práce má být časová oteplovací charakteristika zvoleného vodiče. Výstupem z grafické reprezentace diferenciální rovnice 8.2 je ale změna teploty (oteplení vodiče), nikoliv výsledná teplota jádra. Proto je nutné k oteplení ještě přičíst konstantu okolní teploty, abychom měli správný údaj pro oteplovací charakteristiku.

Jelikož Simulink implicitně pracuje s hodnotami proměnnými v čase (podle nastaveného *Simulation stop time* a *simulation step size*), je možné výstupní teplotní charakteristiku sledovat přímo v prostředí Simulinku pomocí bloku *Scope*. Daleko výhodnější pro editaci grafické

reprezentace je však MATLAB a jeho *Figure editor*. Pro umožnění této operace je v Simulinku přidán blok *To Workspace*, který po zadání příkazu „ $A=[tout, \theta_j]$ “ v pracovní ploše (*Workspace*) MATLABu vytvoří matici A , ve které první sloupec reprezentuje čas a druhý sloupec výslednou teplotu jádra vodiče. Pomocí příkazu `plot` přímo v editoru proměnných evidovaných MATLABem je možné upravovat graf.

Vztah mezi grafickým blokovým schématem Simulinku a diferenciální rovnicí 8.2 podle metody Van Wormera je vysvětlen na obrázku Obr. č. 8.

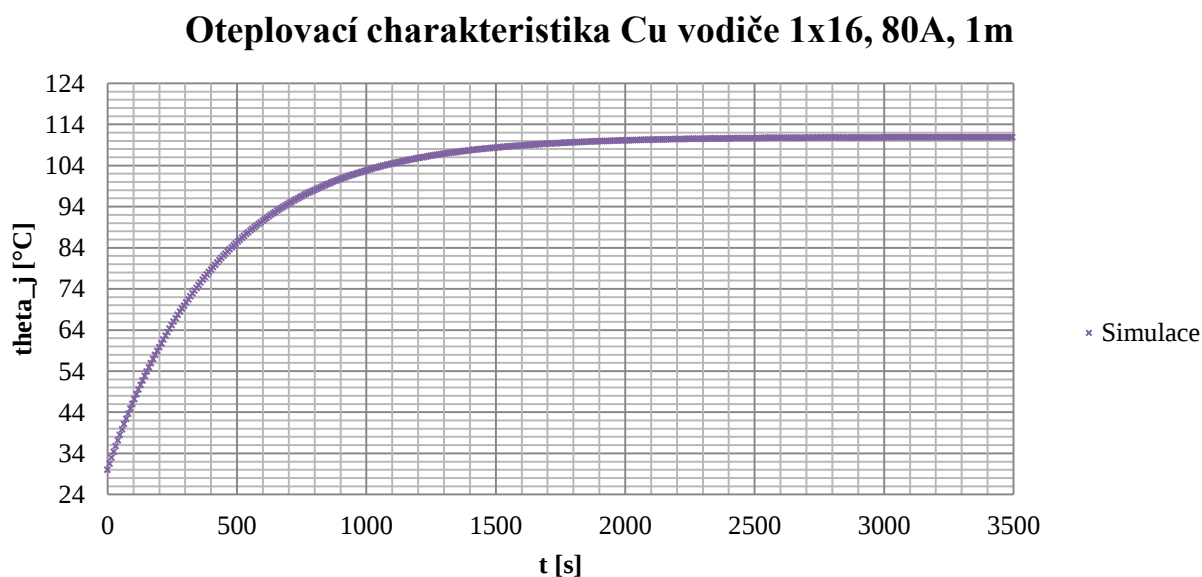
8.1.4 Výstup simulace

Vysvětleným zjednodušením Van Wormerovy metody byla pomocí sestavení blokového schématu rovnice 8.2 pro jednoduchý holý vodič získána oteplovací charakteristika, tedy závislost teploty vodiče (jádra) na čase. Čas simulace byl nastaven na 3500 sekund, přičemž ustálení (už jen minimální změna oteplení) nastalo přibližně po třiceti minutách. Maximální dosažená teplota jádra byla stanovena na 110,9 °C při zatěžovacím proudu 80 A.

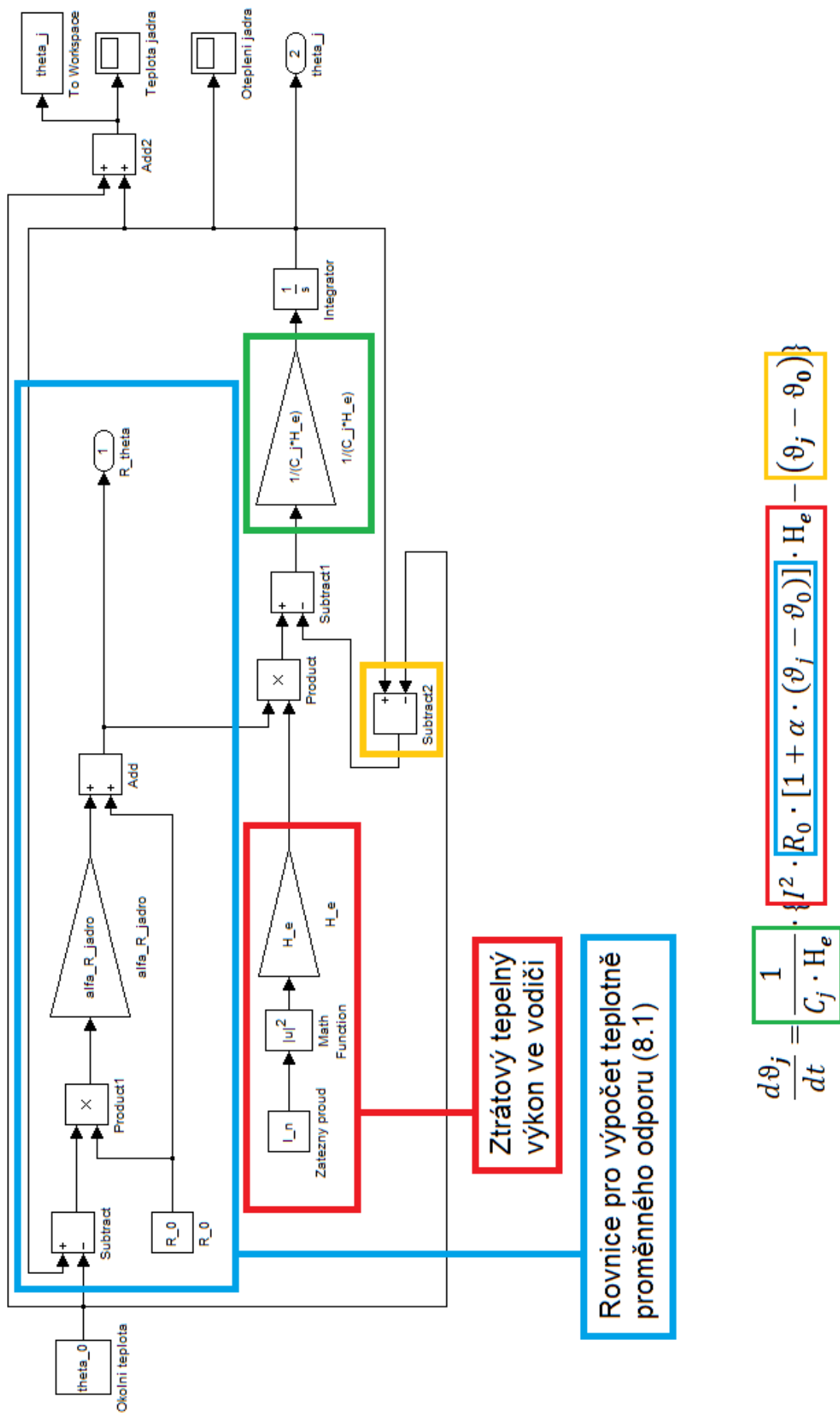
Můžeme též stanovit časovou oteplovací konstantu. Získáme ji z vykresleného grafu, kdy k hodnotě 0,632. ϑ_{jmax} nalezneme odpovídající čas t na ose x . Samozřejmě není potřeba pravítkem odečítat z grafu. Využijeme *Data Cursor* v MATLABovém editoru grafů. Získáme hodnotu časové otep. konstanty τ :

$$\tau = 304,5 \text{ s}$$

Získaná oteplovací charakteristika je patrná na obrázku Obr. č. 7, časová oteplovací konstanta a její odečtení z grafu je k nalezení v příloze:



Obr. č. 9: Simulovaný průběh oteplovací charakteristiky holého vodiče



Obr. č. 10: Popsaný model oteplování holého vodiče v prostředí Simulink

8.2 Simulace vícevrstvého vodiče - kabelu

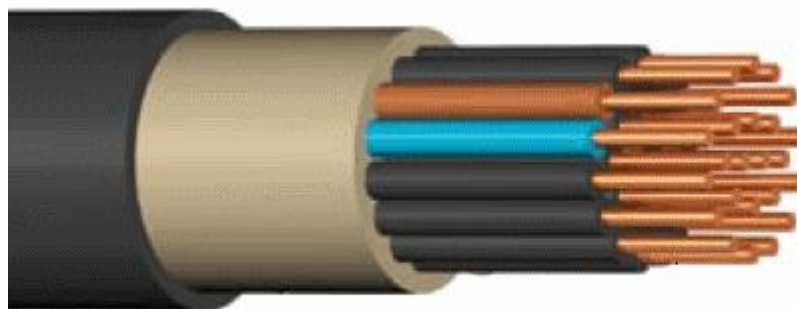
Pro dostatečné ověření použitelnosti Van Wormerovy metody je třeba simulovat oteplování i složitějších vodičů – vícevrstvných kabelů.

8.2.1 Parametry vybraného kabelu

Byl vybrán vodič 5x16 CYKY PRAKAB, který byl pro účely simulace zjednodušen na 1x80 CYKY o těchto parametrech. Protože průřez 80 mm^2 nenáleží do normalizované řady průřezů, byly některé hodnoty pro tento konkrétní kabel vypočteny z trendů sousedních průřezů v řadě.

Parametry 1x80 CYKY	Značka	Jednotka	Hodnota
Průřez vodiče	S	mm ²	80,00000
Průměr vodiče	d	mm	21,50000
Délka vodiče	l	m	1,30000
Materiál jádra	-	-	Cu
Měrná hmotnost vodiče (kabelu)	m	kg/m	1,13800
Teplotní součinitel odporu Cu	α	K ⁻¹	0,00392
Měrný odpor vodiče při 30°C	r ₀	Ω/m	0,00023

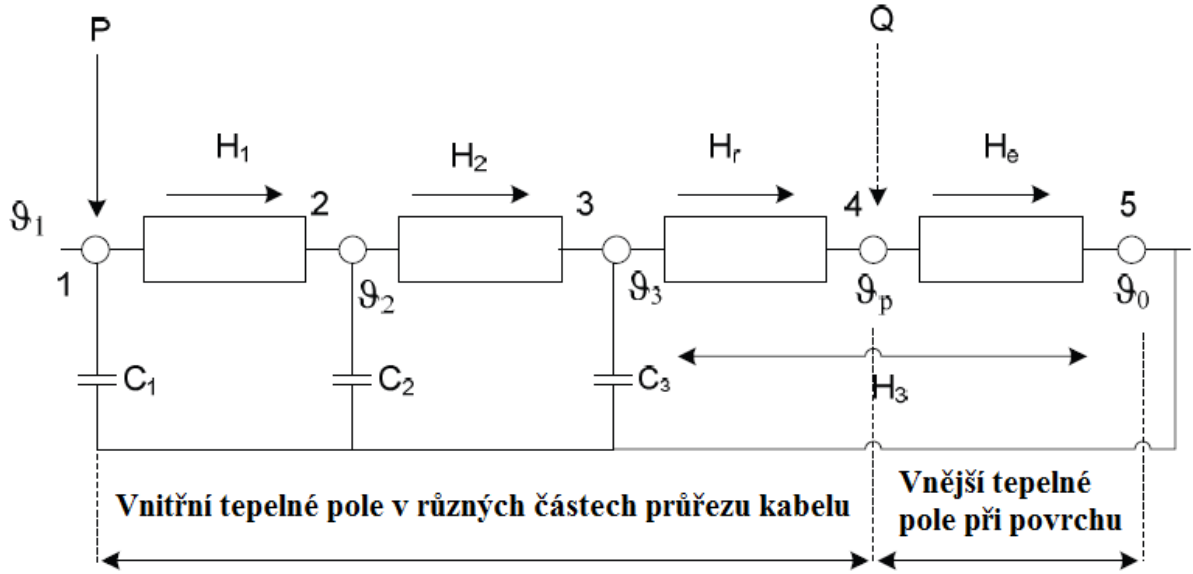
Tab. č. 3: Parametry simulovaného vodiče [12] [13]



Obr. č. 11: Schematické naznačení struktury kabelu CYKY

8.2.2 Matematický základ pro simulaci

Na rozdíl od výše řešeného holého vodiče již u izolovaného a opláštěného kabelu CYKY nepoužijeme zjednodušujících kroků a musíme řešit náhradní tepelné schéma v jeho úplnosti. Vycházíme tedy z následujícího náhradního schématu:



Obr. č. 12: Náhradní tepelné schéma kabelu

Na schématu jsou patrné tepelné kapacity a tepelné odpory různých částí uvnitř kabelu, stejně tak jako tepelné odpory reprezentující povrch a vnější prostředí, ve kterém je kabel uložen. Jednotlivé uzly mají své rovnice tepelných bilancí. U předchozího holého vodiče postačovala pro simulaci jedna diferenciální bilanční tepelná rovnice, u kabelu se podle [1] uvažují tři. První platí pro jádro, další pro izolaci a poslední pro plášť (a stínění). Všechny vyjadřují tepelnou bilanci daného místa, tedy teplo v uzlu vzniklé či do uzlu přivedené (za časovou jednotku) se rovná teplu v uzlu akumulovanému či z uzlu odvedenému (za časovou jednotku). Na rozdíl od předchozího případu s holým vodičem se zde uplatní i čtvrtá, algebraická rovnice, která slouží pro určení teploty povrchu, jež se v tomto případě nerovná teplotě jádra.

První uzel bude mít tvar podobný rovnici (8.2), již však upravený pro vyšší složitost struktury vodiče a korespondující tepelné odpory/kapacity uzlu 1:

$$\frac{d\vartheta_1}{dt} = \frac{1}{c_1 \cdot H_1} \cdot \{I^2 \cdot R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0)] \cdot H_1 - (\vartheta_1 - \vartheta_2)\} \quad (8.4)$$

Uzel 2:

$$\frac{d\vartheta_2}{dt} = \frac{1}{c_2 \cdot H_1} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) - \frac{1}{c_2 \cdot H_2} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_3) \quad (8.5)$$

Uzel 3:

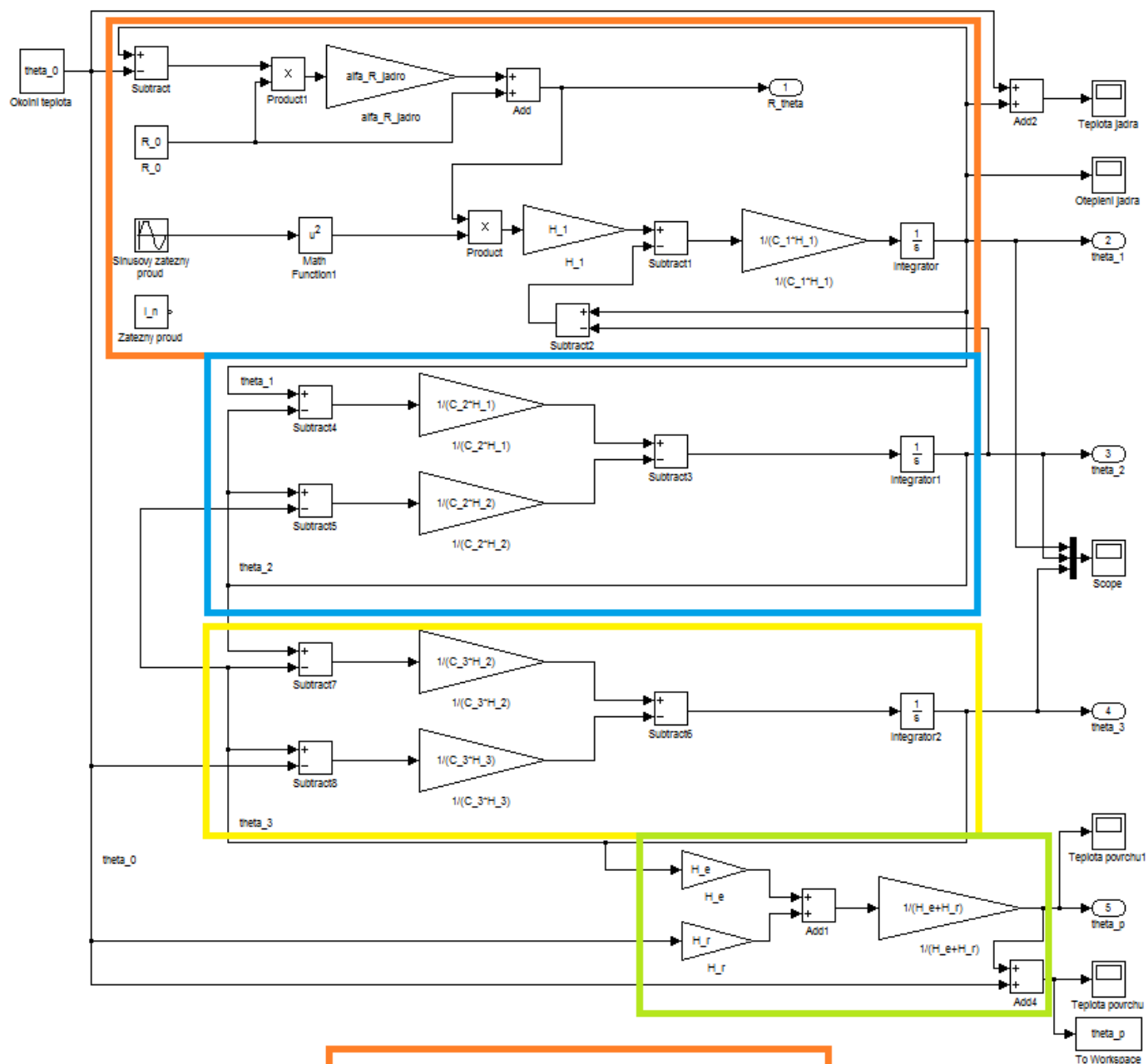
$$\frac{d\vartheta_3}{dt} = \frac{1}{c_3 \cdot H_2} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_3) - \frac{1}{c_3 \cdot H_3} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_0) \quad (8.6)$$

K získání teploty povrchu je ještě potřeba vyřešit algebraickou rovnici, protože $\vartheta_3 \neq \vartheta_p$:

$$\vartheta_p = \frac{\vartheta_3 \cdot H_e + \vartheta_0 \cdot H_r}{H_e + H_r} \quad (8.7)$$

8.2.3 Model

Parametry kabelu a dílčí výpočty, jež jsou pro model vstupními konstantami, byly Simulinkem načteny z m-file, stejně jako v prvním případě s holým vodičem.



$$\frac{d\theta_1}{dt} = \frac{1}{c_1 \cdot H_1} \cdot \{I^2 \cdot R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta_1 - \theta_0)] \cdot H_1 - (\theta_1 - \theta_2)\}$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \frac{1}{c_2 \cdot H_1} \cdot (\theta_1 - \theta_2) - \frac{1}{c_2 \cdot H_2} \cdot (\theta_2 - \theta_3)$$

$$\frac{d\theta_3}{dt} = \frac{1}{c_3 \cdot H_2} \cdot (\theta_2 - \theta_3) - \frac{1}{c_3 \cdot H_3} \cdot (\theta_3 - \theta_0)$$

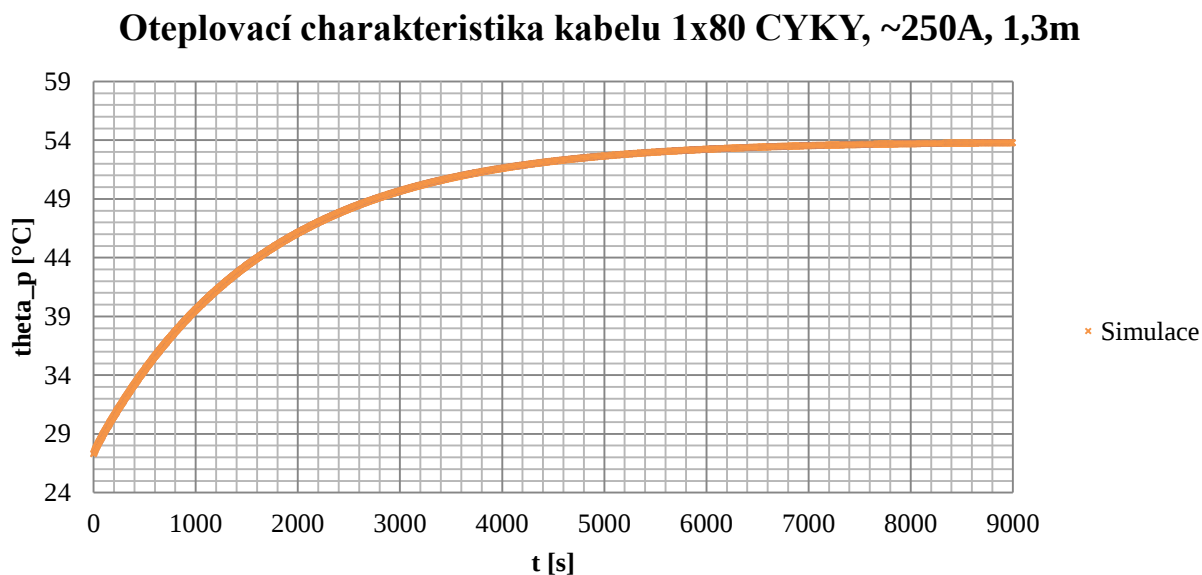
$$\theta_p = \frac{\theta_3 \cdot H_e + \theta_0 \cdot H_r}{H_e + H_r}$$

Obr. č. 13: Model oteplovaného kabelu CYKY v prostředí Simulink

Postup tvorby modelu se shoduje s postupem již výše vysvětleným, zvýšila se přitom složitost modelu kvůli přidaným rovnicím, jak lze vidět na obrázku Obr. č. 11. Barevně schematicky je naznačeno převedení diferenciálních rovnic do blokového tvaru.

8.2.4 Výstup simulace

Simulované proudové zatížení bylo nastaveno na 250A střídavého proudu s frekvencí 50Hz při okolní teplotě 23 °C. Doba simulace byla zadána na 9000 sekund, pro účely lepší přehlednosti grafického zobrazení, přičemž úplné ustálení teploty nastane asi za 13000 sekund. Teplota povrchu kabelu dosahuje při uvedené zátěži podle modelu maxima v 53,8 °C. Výsledná charakteristika je patrná na obrázku Obr. č. 12.



Obr. č. 14: Simulovaný průběh oteplovací charakteristiky kabelu

9 POROVNÁNÍ SIMULOVANÝCH A MĚŘENÝCH OTEPLENÍ

Výběr kabelu pro ověření výsledků simulací byl uskutečněn na základě dostupnosti skutečného fyzického vodiče kvůli možnosti proměření jeho oteplení pod proudovou zátěží v laboratorních podmínkách Ústavu elektroenergetiky na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT. K dispozici byly tyto vícežilové kabely: 5x25 N2XH-J Facab a 5x16 CYKY PRAKAB. Po provedení měření oteplení obou kusů bylo rozhodnuto, že pro účely bakalářské práce lépe poslouží kabel CYKY.

Použité přístroje:

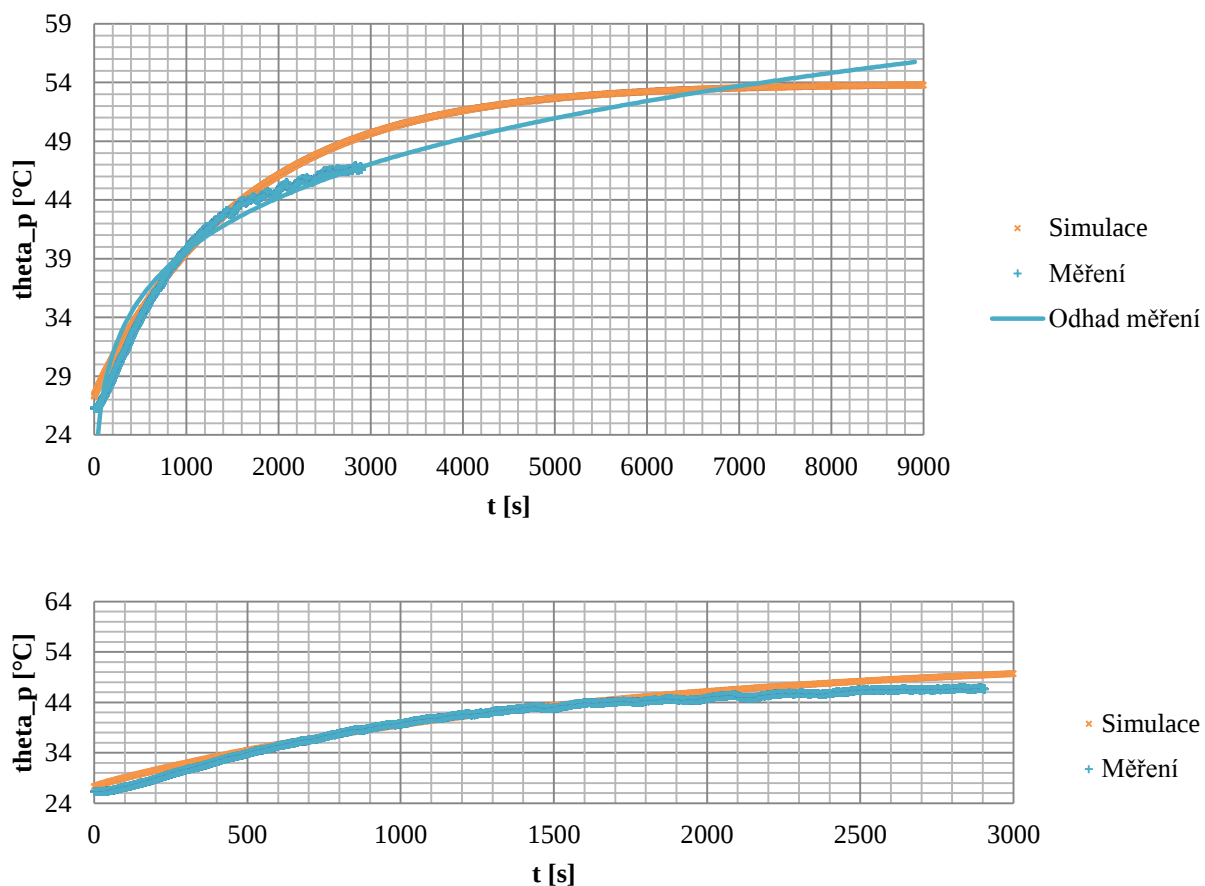
- 3 kusy termočlánku typu T
- Kabel 5x16 CYKY
- multimetr Agilent U1241A
- Zdroj OMICRON CPC1000
- Booster CP CB2
- převodník Advantech USB 4718
- počítač se softwarem WaveScan 2.0

Kabel byl umístěn na podpěrách tak, aby bylo jeho uložení co nejbližší podobné přirozenému uložení ve volném vzduchu. Oba konce kabelu byly obnaženy od izolace a opláštění, jednotlivé žíly byly zkratovány, aby mohl být kabel zatěžován jednofázově. Na tyto konce byly připojeny napájecí svorky zdroje. K dispozici byly tři kusy termočlánků, byly proto rovnoměrně rozmístěny po povrchu kabelu. Náhled na pracoviště je k nalezení v příloze.

Termočlánky snímaly povrchovou teplotu a byly zapojeny do převodníku Advantech USB 4718. Ten byl spojen USB kabelem s počítačem, na kterém byl spuštěn program WaveScan 2.0, jež se postaral o záznam časové oteplovací charakteristiky, včetně exportu do tabulky pro program Excel.

Na zdroji byl nastaven proud 250A střídavý. Jelikož se v průběhu měření ohřívaly samozřejmě také přívodní kabely ke svorkám a tyto byly menšího průřezu než kabel zkoušený, bylo vedoucím doporučeno zkrácení měření, abychom zamezili poškození laboratorního příslušenství. V následujícím grafu na obrázku Obr. č. 13 je tedy patrná charakteristika získaná simulací, měřením a dodatečně také odhadovaná charakteristika vypočítaná z trendu naměřeného průběhu.

Porovnání získaných oteplovacích charakteristik



Obr. č. 15: Porovnání praktického měření a simulace včetně detailu času 0-3000s

Podle grafu je zřejmé, že simulace skutečně blízce odpovídá reálné změřené situaci. Teplotní odchylky jsou v řádu desetin až jednotek stupňů Celsia.

Odhadovaný průběh charakteristiky získané měřením má spíše orientační povahu, jelikož průběh, ze kterého se tento odhad počítá, je zvlněný, není výsledný trend (mocninná funkce) absolutně spolehlivý.

Měření teploty jádra nebylo prováděno z důvodu technické náročnosti a velkého zkreslení výsledných hodnot při použití dostupných termočlánků.

10 ZÁVĚR

Zadání práce sestávalo ze tří cílů, kterých mělo být dosaženo. Prvním úkolem byla teoretická rešerše fyzikální podstaty oteplování vodiče průchodem proudu a její aplikace při stanovení dovoleného zatížení.

Proto byly nejdříve stanoveny a rozebrány druhy silových vodičů, jejich elementární mechanické, materiálové a elektrické vlastnosti. Teorie oteplování se řídí kalorimetrickou rovnicí, jež popisuje tepelnou výměnu těles, která tvoří izolovanou soustavu s respektováním zákona zachování energie. Teplo, které odevzdá teplejší těleso, přijme druhé, chladnější těleso (přičemž se předpokládá, že tepelná energie se nemění na jiné druhy energie). Při průchodu proudu vodičem vzniká (u silových vodičů) nežádoucí, odpadní teplo. Toto teplo se šíří z místa vzniku, což je vodivé jádro vodiče, do okolí. Okolí tvoří prostředí, ve kterém je vodič uložen či zavěšen. V případě kabelu se okolím rozumí nejdříve veškeré obaly vodivého jádra (izolace, stínění, pláště, obaly) a až poté venkovní prostředí. Podle použití a umístění vodiče musíme dbát na jeho správné navržení. Často v technické praxi vystačíme s řešením ustálených stavů, kdy se teplota (zatížení) vodiče nemění. Modelový návrh takového vodiče byl vyřešen v Příkladu č. 1. Vnější klima, ve kterém se vodič nachází, považujeme většinou pro jednoduchost neměnné, anebo při tepelném návrhu počítáme s nejhorší pravděpodobnou situací.

Pokud nás zajímá situace, při které dochází ke změně teploty vodiče v čase, sledujeme takzvané oteplovací charakteristiky. Jednou z metod k jejich získání je Van Wormerova metoda, kde je využito náhradní schéma tepelného pole zatěžovaného vodiče, tvořené tepelnými kapacitami a tepelnými odpory.

Druhým úkolem práce bylo sestavení matematického modelu pro stanovení oteplovací charakteristiky silového vodiče. Pro tento model byly vybrány dva rozdílné vodiče. Jednojádrový holý měděný vodič (firmy PRAKAB), který umožnil zjednodušení náhradního Van Wormerova schématu na jeden uzel a složitější kabel CYKY s pěti jádry, jež však byla pro účely jak měření, tak simulace zkracována a zatěžována jednofázově. K vypracování modelů bylo použito matematického softwaru MATLAB, především jeho součásti Simulinku. Základem pro modelování byly údaje zadané výrobcem, známé tabulkové údaje materiálu a Van Wormerem odvozené diferenciální rovnice. Parametry vodičů a průběžné výpočty byly zaznamenány do souboru typu m-file, ze kterých poté Simulinkový model načítal potřebná data. Tato parametrizace vodičů, jež byla předmětem třetího bodu zadání práce, byla nedílnou součástí celé simulace.

Výsledky simulace kabelu CYKY pak byly ověřeny praktickým měřením v laboratoři. Kabel byl zatěžován proudem 250A~ po dobu 3000 s. Vhodnější by bylo nechat kabel ohřívat po delší dobu pro získání delší časové oteplovací křivky, abychom však zamezili poškození přístrojů, ukončili jsme měření před dosažením kritických dovolených teplot napájecích vodičů. Přesto se po porovnání výsledků simulace s reálným průběhem oteplování shodovala pouze s malými odchylkami.

Získané výstupní hodnoty, grafické průběhy a bloková schémata modelů v Simulinku jsou uvedena výše. Vstupní m-file, výtahy z katalogu firmy PRAKAB a doplňující fotografickou dokumentaci je možné nalézt v příloze.

11 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] SLANINKA, Pavel. Káblová technika I. Bratislava : Edičné stredisko SVŠT v Bratislave, 1988. 190 s. ISBN 80-227-0025-8.
- [2] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ. *Rozvodná zařízení* [pdf]. 2011 [cit. 2013-01-06].
- [3] VAN WORMER, F.C. AIEEE. *An improved approximate technique for calculating cable transients* [pdf]. 1955 [cit. 2013-01-06]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4499079>
- [4] BAXANT, Petr, DRÁPELA, Jiří, LÁZNIČKOVÁ, Ilona. Elektrotepelná technika. FEKT VUT : [s.n.], 172 s.
- [5] BLAŽEK, Vladimír, SKALA, Petr. Distribuce elektrické energie. [s.l.] : [s.n.], 2006. 140 s.
- [6] NOHÁČ, Karel. KATEDRA ELEKTROENERGETIKY ZČU. *Dimenzování vodičů a kabelů* [pdf]. 2008 [cit. 2013-01-06]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~nohac/EE1/CV-EE1-4-Dimenzovani_vodicu_1.pdf
- [7] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Praha: Prometheus, 2000, xxiv, 1198, [52] s. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.
- [8] STARÝ, Zdeněk. *Model pro výpočet oteplovacích charakteristik silových kabelů: Model for the Cable Thermal Characteristic Calculation* [online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009 [cit. 2013-01-06]. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD].
- [9] BHATIA, A. Electrical conductors. [online]. [cit. 2013-01-06]. Dostupné z: <http://www.cedengineering.com/upload/Electrical%20Conductors.pdf>
- [10] KONŠEL, Ladislav. *Jištění vedení proti přetížení a zkratu: Line protection against overload and short circuit* [online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010 [cit. 2013-01-06]. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD].
- [11] ENSTO GROUP. *Příslušenství izolovaných a holých vedení VN*. Dostupné z: http://www.ensto.com/download/18972_ENSTO_Prislusenstvi_izolovanych_a_holyc_h_vedeni_VN_izolov.pdf
- [12] PRAKAB PRAŽSKÁ KABELOVNA A.S. *Katalog produktů 2009-2010*. Praha, 2009. Dostupné z: http://www.prakab.cz/fileadmin/content/prakab/Vyrobky/PRAKAB_Katalog_produkту_2009-2010.pdf
- [13] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2007, 206 s. ISBN 978-807-1963-455.
- [14] CAMPBELL, Gaylon a Keith BRISTOW. The Effect of Soil Thermal Resistivity (RHO) on Underground Power Cable Installations. In: [online]. 2009 [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://www.decagon.com/assets/Uploads/The-Effect-of-Soil-Thermal-Resistivity-RHO-on-Underground-Power-Cable-Installation3.pdf>
- [15] RAČEK, Jiří. *Technická mechanika: mechanika tekutin a termomechanika*. Vyd. 4. Brno: Novpress, 2009, 236 s. ISBN 978-80-214-3881-1.

12 PŘÍLOHY

Průřez vodiče [mm²]	Maximální odpor vodiče [Ω/km]	Informativní průměr vodiče [mm]	Obsah Cu [kg/km]	Obvyklé balení [m]
Cu vodič plný pro pevné propojení (ČSN EN 60228 tř. 1)				
0,5	36,00	0,8	5	CM 1000
0,75	24,50	1,0	7	CM 1000
1	18,10	1,1	10	CM 1000
1,5	12,10	1,4	15	CM 1000
2,5	7,41	1,8	25	CM 1000
4	4,61	2,2	39	CM 1000
6	3,08	2,7	59	CM 1000
10	1,83	3,5	98	B 1000
16	1,15	4,4	157	B 1000

Obr. č. 16: Výňatek z katalogu firmy PRAKAB pro holý vodič

počet žil × jmenovitý průřez number of cores × nominal cross-section	tvar jádra shape of conductor	jmenovitá tloušťka izolace nominal thickness of insulation	jmenovitá tloušťka pláště nominal thickness of sheath	vnější průměr kabelu external cable diameter	činný odpor jádra při 20 °C conductor resistance at 20 °C	proudová zatížitelnost ve vzduchu / v zemi current carrying capacity in air / in the ground		informativní hmotnost kabelu informative weight of cable
n x mm²		mm	mm	mm	Ω/km	A	A	kg/km
1-CYKY								
1x70	RM	1,4	1,4	15,5	0,268	217	288	765
1x95	RM	1,6	1,5	18,0	0,193	262	340	1045

Obr. č. 17: Výňatek z katalogu firmy PRAKAB pro kabel CYKY

```
clc;
clear all;
close all; |
disp('Holý vodič Cu 1x16, In=80, 1m');

% Hodnoty, které zname
d_jadro=4.4e-3; %prumer jadra [m]
S_jadro=0.000016; %prurez 16mm2 [m^2]
hu_jadro=8940; %hustota Cu [kg*m^-3]
c_jadro=383; %merna tepelna kapacita Cu [J*kg^-1*K^-1]
m_jadro=0.157; %merna hmotnost jadra Cu [kg*m^-1]
d_kabel=d_jadro; %prumer kabelu [m]
I_n=80; %zatezovaci proud [A]
R_0=1.1/1000; %pocatecni odpor kabelu pri normalnich podm [ohm*m^-1]
alfa_R_jadro=0.00392; %teplotni soucinitel odporu Cu jadra [K^-1]
lambda=12; %soucinitel prestupu tepla, zvoleny [W*K^-1*m^-1]
theta_max=80; %maximalni teplota kabelu
theta_0=30; %teplota okoli

% Hodnoty, které spocitame ci simulujeme
%theta_j=theta_0; aktualni promenniva teplota jadra (modelovana)
%R_theta=R_0*(1+alfa_R_jadro*(theta_j-theta_0)); R zavisly (modelovany)
%tepelný odpor okoli vodiče
H_e=1/(pi*d_kabel*lambda);
%tepelná kapacita jadra
C_j=m_jadro*c_jadro;
%theta_p=(theta_0*H_e+theta_j*H_e)/(2*H_e); %teplota na povrchu vodiče
```

Obr. č. 18: M-file s parametry holého Cu vodiče

```

clc;
clear all;
close all;
%Ivan Merka, ID:125542
disp('1-CYKY 5x16 PRAKAB, zatěžováno sin. proudem 250A');

% JADRO a základní
U_n=5; %jmenovité napětí [V]
S_jadro=80e-6; %průřez 5x16mm2 [m2]
%5 jader bylo zjednodušeno do jednoho
r_jadro=sqrt(S_jadro/pi); %poloměr jadra [m]
hu_jadra=8940; %hustota Cu [kg*m-3]
c_jadro=383; %měrná tepelná kapacita Cu [J*kg-1*K-1]
alfa_R_jadro=0.00392; %teplotní součinitel odporu Cu jadra [K-1]
l=1.3; %delka kabelu [m]
r_j=0.232/1000; %měrný ohmický odpor kabelu [ohm*m-1]
R_0=r_j*1; %ohmický odpor kabelu [ohm]
I_n=250; %zátěžovací proud [A]

% IZOLACE PVC
c_iz=1050; %měrná tepelná kapacita izolace PVC [J*kg-1*K-1]
lambda_iz=0.17; %tepelná vodivost izolace PVC [W*m-1*K-1]
l_iz=1e-3; %tloušťka izolace XLPE [m]

% PLAST PVC + vyplň
c_plast=1050; %měrná tepelná kapacita plaste [J*kg-1*K-1]
lambda_plast=0.17; %tepelná vodivost plaste [W*m-1*K-1]
l_plast=2.8e-3; %tloušťka plaste [m]

d_kabel=21.5e-3; %vnější průměr kabelu [m]
r_1=r_jadro;
r_2=r_jadro+l_iz;

m_celkova=1.138; %hmotnost celková [kg*m-1]
m_jadro=0.784; %hmotnost jadra Cu [kg*m-1]

alfa=12; %součinitel přestupu tepla, zvolený z rady hodnot [W*K-1]
theta_0=23; %teplota okolí

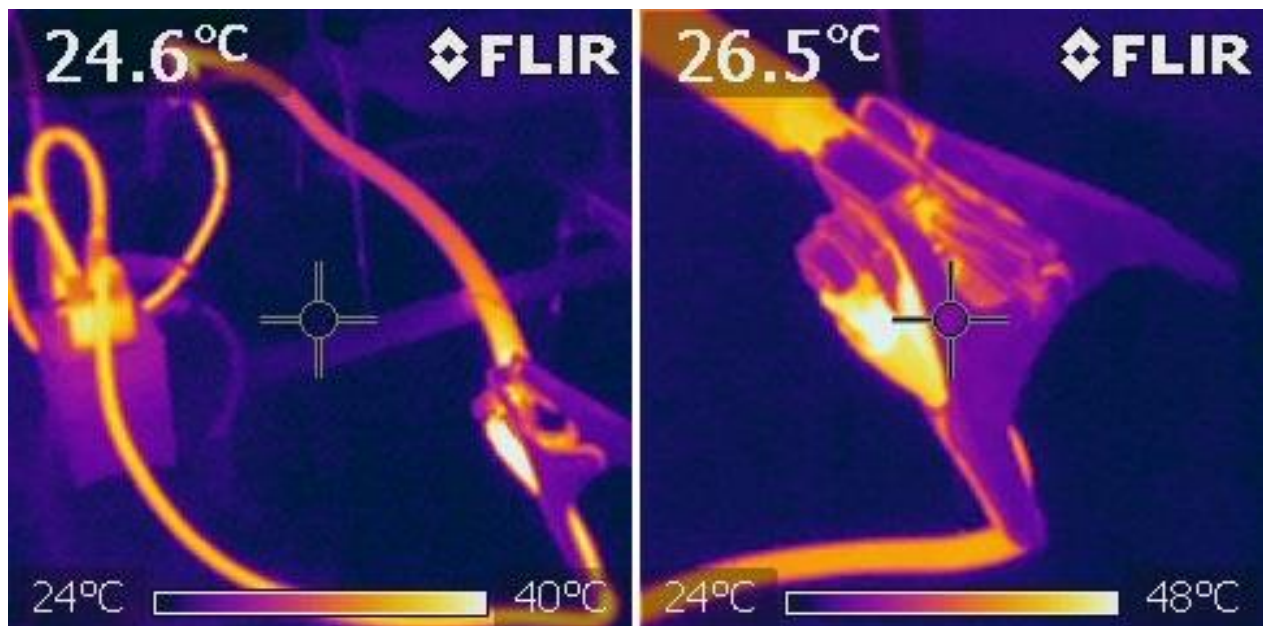
%objem jadra
V_j=1*pi*(r_jadro)^2;
%objem izolace kabelu
V_iz=(1*pi*(r_jadro+l_iz)^2)-V_j;
%objem plaste kabelu
V_plast=(1*pi*(d_kabel/2)^2)-V_iz-V_j;
%celkový objem plast+izolace
V_celkovaIzolace=V_iz+V_plast;
%celková hmotnost plast+izolace
m_celkovaIzolace=m_celkova*1-m_jadro*1;
%celková hmotnost plaste
m_plast=(m_celkovaIzolace*V_plast)/V_celkovaIzolace;
%celková hmotnost izolace
m_iz=(m_celkovaIzolace*V_iz)/V_celkovaIzolace;

%tepelná kapacita jadra
C_j=c_jadro*m_jadro*1;
%tepelná kapacita části izolace
C_a=0.5*c_iz*m_iz*1;
%tepelná kapacita zbyvajících částí izolace
C_b=C_a;
%tepelná kapacita stínění (v tomto kabelu není)
C_g=0;
%tepelná kapacita zbytku obalu nad stíněním (plast)
C_r=c_plast*m_plast*1;
p=1/(2*(log(r_2/r_1)))-1/(((r_2/r_1)^2)-1);
%tepelná kapacita uzlu 1 [J*K-1]
C_1=C_j+p*C_a;
%tepelná kapacita uzlu 2 [J*K-1]
C_2=(1-p)*C_a+p*C_b;
%tepelná kapacita uzlu 3 [J*K-1]
C_3=(1-p)*C_b+C_g+C_r;

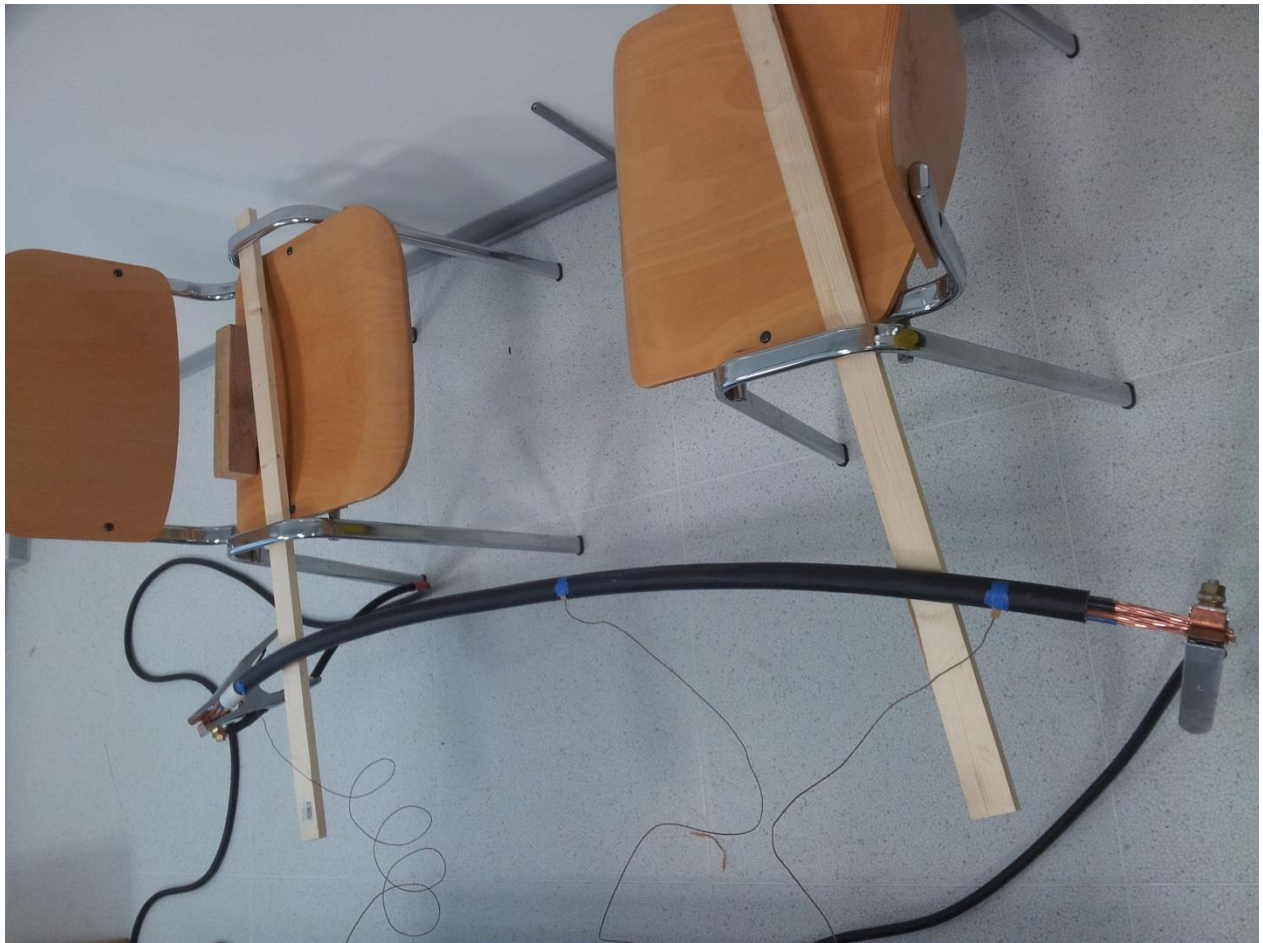
%tepelný odpor izolace
H_iz=(1/(2*pi*lambda_iz))*log(r_2/r_1);
%tepelný odpor H1 a H2
H_1=0.5*H_iz;
H_2=H_1;
%tepelný odpor plaste
H_p=(1/(2*pi*lambda_plast))*(log((d_kabel/2)/(d_kabel/2-l_plast)));
H_r=H_p;
%tepelný odpor okolí kabelu
H_e=1/(pi*d_kabel*alfa);
%tepelný odpor H3
H_3=H_r+H_e;

```

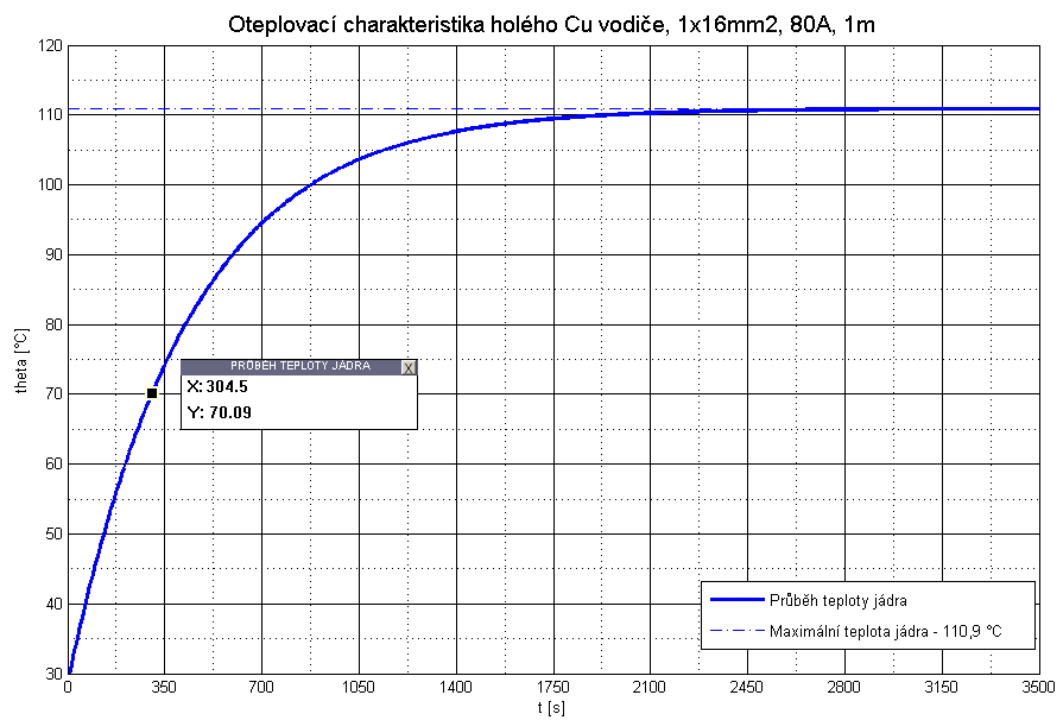
Obr. č. 19: M-file s parametry kabelu CYKY



Obr. č. 20: Pohled na pracoviště a detail svorky pomocí termokamery FLIR



Obr. č. 21: Pohled na pracoviště s měřeným kabelem



Obr. č. 22: Odečtení časové oteplovací konstanty holého vodiče



Obr. č. 23: Pokládání silových kabelů do země a aplikace Fluidizovaného termálního zásypu