



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

LABORATORNÍ OHŘEV VYSOKONAPĚŤOVÝCH KABELŮ

LABORATORY HEATING OF MV CABLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Vala

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Krbal, Ph.D.

BRNO 2016

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Martin Vala

ID: 119660

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní ohřev vysokonapěťových kabelů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše v dané problematice.
2. Požadavky a zkušební postupy vyplývající z platných norem.
3. Používané principy a dosažitelné parametry.
4. Praktická měření ohřevu kabelů v laboratorních podmínkách.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 20.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Michal Krbal, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

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

Bibliografická citace práce:

VALA, M. *Laboratorní ohřev vysokonapěťových kabelů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Krbal, Ph.D.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

.....

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Krbalovi Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne Podpis autora



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Diplomová práce

Laboratorní ohřev vysokonapět'ových kabelů

Bc. Martin Vala

vedoucí: Ing. Michal Krbal Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2015

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering

Master Thesis

Laboratory heating of MV cables

by

Bc. Martin Vala

Supervisor: Ing. Michal Krbal Ph.D

Brno University of Technology, 2015

Brno

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá možnostmi laboratorního ohřevu vysokonapěťových kabelů. První část práce je vyhrazena pro popis tepla, jako fyzikálního jevu a veličin s teplem spojených. Druhá část se zabývá možnostmi měření teploty objektů v praxi a třetí část se zabývá možnostmi ohřevu kabelů s ohledem na prováděná měření podle norem ČSN.

Praktická část diplomové práce byla zaměřena na popis fyzikálních jevů, probíhajících během měření pomocí vybraných metod na jednotlivých komponentech a optimalizaci výsledných hodnot pro praktická měření.

KLÍČOVÁ SLOVA: teplo; teplota; ohřev; vysokonapěťový kabel; teploměr; jádro kabelu; izolace kabelu; indukční ohřev; magnetická indukce;

ABSTRACT

This thesis deals with options of laboratory heating of high voltage cables. First part of the work is reserved for description of heat as physical phenomenon and quantities connected with the heat. Second part deals with options of temperature measurements of objects in practical use and third part of the work deals with options of cables heating regarding the measurements according the ČSN rules.

Practical part of diploma thesis is focused on physical phenomenon description, being under way during measurement using selected methods in individual components and optimization of results for practical measurements.

KEY WORDS: heat; temperature; heating; high voltage cable; thermometer; cable core; cable isolation; induction heating; magnetic induction;

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1 ÚVOD	13
2 TEPLLO	14
2.1 VZNIK TEPLA	15
2.2 PŘENOS TEPLA	16
2.2.1 KONDUKCE	16
2.2.2 KONVEKCE.....	17
2.2.3 RADIACE	19
3 MĚŘENÍ TEPLLOTY V ELEKTROTEPELNÉ TECHNICE	22
3.1 ODPOROVÉ TEPLMĚRY.....	23
3.1.1 TEPLMĚRY ODPOROVÉ – KOVOVÉ	23
3.1.2 TEPLMĚRY ODPOROVÉ – POLOVODIČOVÉ	25
3.1.3 TERMOČLÁNKY	25
4 MOŽNOSTI OHŘEVU VYSOKONAPĚŤOVÉHO KABELU	26
4.1 KABELY VN.....	27
4.2 KLIMATICKÉ KOMORY	28
4.3 ODPOROVÝ OHŘEV	29
4.4 INDUKČNÍ OHŘEV	30
4.5 INDUKČNÍ OHŘEV S NEPŘÍMÝM ODPOROVÝM OHŘEVEM.....	31
5 OHŘEV A MĚŘENÍ KABELŮ VN PODLE NOREM ČSN	34
5.1 ZKOUŠKY PŘI ZVÝŠENÉ TEPLOTĚ	34
5.2 TEPELNÉ ZKRATOVÉ ZKOUŠKY.....	37
5.3 DYNAMICKÉ ZKRATOVÉ ZKOUŠKY	38
6 LABORATORNÍ METODA MĚŘENÍ	39
6.1 METODA MĚŘENÍ TEPLLOTY POMOCÍ PŘÍMÉHO MĚŘENÍ ODPORU	40
6.2 METODA MĚŘENÍ TEPLLOTY POMOCÍ MĚŘENÍ ÚČINÍKU.....	41
6.3 SROVNÁNÍ MĚŘICÍCH METOD.....	42
7 CHARAKTERISTIKA PRVKŮ V OBVODU	45
7.1 CÍVKA	45
7.1.1 HYSTEREZNÍ ZTRÁTY	45
7.1.2 ZTRÁTY VÍŘIVÝMI PROUDY	46
7.1.3 MECHANICKÉ A ENERGETICKÉ PARAMETRY CÍVKY	50
7.2 AUTOTRANSFORMÁTOR	51
7.2.1 ZTRÁTY V TRANSFORMÁTORU.....	51
7.2.2 POPIS AUTOTRANSFORMÁTORU	53
7.3 KOMPENZAČNÍ BATERIE.....	54
7.3.1 PARALELNÍ KOMPENZACE.....	55
7.4 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE.....	56
7.4.1 TROJFÁZOVÝ VÝKONOVÝ ANALYZÉR DW-6092	56

7.4.2 MILIOHMMETR GOM-802.....	60
7.5 VÝKONOVÝ JISTIČ.....	61
8 POSTUP LABORATORNÍHO MĚŘENÍ	62
8.1 ROZHRANÍ PROGRAMU POWERANALYZER.....	63
8.2 PRŮBĚH MĚŘENÍ.....	64
8.3 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ	69
9 ZÁVĚR.....	73
POUŽITÁ LITERATURA	74

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3-1: Rozdělení teplotních čidel [1]	22
Obr. 3-2: Teplotní závislost odporu pro odporový článek Pt 100 [3]	24
Obr. 3-3: Princip termočlánku [6]	25
Obr. 4-1: Oteplovací křivka	26
Obr. 4-2: Klimatická komora WT3/WK3-B XXL [5]	29
Obr. 5-1: Měření teploty referenčního kabelu [7]	35
Obr. 5-2: Uspořádání termočlánků [7]	35
Obr. 5-3: Teplotní cyklus zkoušky [7]	37
Obr. 6-1: Schéma zapojení a měření teploty ohřívaného kabelu	39
Obr. 6-2: Tepelný skok při měření odporu s vypnutým jističem	41
Obr. 6-3: Graf předběžného měření použitých metod.....	43
Obr. 7-1: Hysterezní smyčky magneticky tvrdého a měkkého materiálu	45
Obr. 7-2: Intenzita magnetického pole ve vodiči [11]	46
Obr. 7-3: Siločáry magnetického pole v cívce [11]	47
Obr. 7-4: Rozložení intenzity magnetického pole uvnitř a vně cívky	47
Obr. 7-5: Popis souřadnicového systému elektrické vrstvy [12]	48
Obr. 7-6: Náhradní schéma transformátoru	52
Obr. 7-7: Principiální zapojení autotransformátoru	54
Obr. 7-8: Paralelní kompenzace jalové složky.....	55
Obr. 7-9: Princip čtyřvodičového zapojení ohmmetru [16].....	60
Obr. 7-10: Zapojení kabelu RS-232 pro komunikaci wattmetru s počítačem [15]	62
Obr. 8-1: Rozhraní programu PowerAnalyzer.....	63
Obr. 8-2: Graf průběhu teplot během měření	66
Obr. 8-3: Průběh absolutní chyby měření pomocí wattmetru při koeficientu $\alpha = 0,003\text{K}^{-1}$	67
Obr. 8-4: Průběh absolutní chyby měření pomocí wattmetru při koeficientu $\alpha = 0,00377\text{K}^{-1}$	67
Obr. 8-5: Průběh absolutní chyby měření pomocí wattmetru po korekci	69
Obr. 8-6: Průběh oteplovací křivky vypočtené ze zdánlivého výkonu a pomocí lineární korekce.71	
Obr. 8-7: Průběh absolutní chyby zdánlivého výkonu a pomocí lineární korekce	71
Obr. 8-8: Závislost účinníku soustavy na teplotě	72

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1: Převody teplotních stupnic vzhledem k termodynamické teplotě [1]</i>	<i>14</i>
<i>Tab. 3-1: Rezistivita a teplotní součinitel odporu pro odporové materiály [1]</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 4-1: Materiálové vlastnosti elektrovedné mědi a hliníku [2].....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 4-2: Přehled nejvyšších dovolených teplot pro jednotlivé typy izolací kabelů [2]</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 5-1: Koeficient pro stanovení povoleného proudu v kabelu při jiné, než referenční teplotě.</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 6-1: Měření teploty za použití ohmmetru</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 6-2: Měření teploty za použití wattmetru</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 6-3: Porovnání metod měření ohřevu kabelu.....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 7-1: Údaje o přesnosti měření napětí [15]</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 7-2: Údaje o přesnosti měření proudu [15]</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 7-3: Údaje o přesnosti měření činného výkonu [15]</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 7-4: Přesnost měřených veličin v použitých rozsazích.....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 8-1: Hodnoty získané během testovacího měření teploty</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 8-2: Hodnoty získané korekcí z předchozího měření</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 8-3: Hodnoty teplot získané výpočtem ze zdánlivého výkonu</i>	<i>70</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

α	součinitel přestupu tepla	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
α	úhel dopadajícího záření	$^{\circ}$
α_L	součinitel délkové roztažnosti	K^{-1}
α_R	teplotní součinitel odporu	K^{-1}
β	úhel procházejícího záření	$^{\circ}$
γ	měrná vodivost látky	S
δ	hloubka vniku	m
λ	tepelná vodivost	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
λ	vlnová délka	m
μ	permeabilita	H.m^{-1}
v	rychlost proudění kapaliny	m.s^{-1}
v	reluktivita	m.H^{-1}
ρ	měrná rezistivita látky	$\Omega.\text{m}$
ρ	hustota látky	kg.m^{-3}
τ	časová konstanta ohřevu	s
ϑ	teplota	$^{\circ}\text{C}$
Φ	magnetický indukční tok	Wb
c	měrná tepelná kapacita	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
c	rychlost světla	m.s^{-1}
f	vlnová frekvence	Hz
d	průměr vodiče	m^2
l	tloušťka stěny	m
l	délka vodiče	m
q	hustota tepelného toku	$\text{J.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$
t	doba ohřevu	s
t_r	reakční doba	$^{\circ}\text{R}$
t_c	Celsiova teplota	$^{\circ}\text{C}$
t_f	Fahrenheitova teplota	$^{\circ}\text{F}$
t_r	Rankinova teplota	$^{\circ}\text{R}$
A	vektorový potenciál	Wb.m^{-1}
B	magnetická indukce	T
C	kapacita kondenzátoru	F
E	energie	J
H	intenzita magnetického pole	A
I	elektrický proud	A
J	proudová hustota	A.m^2
L	magnetická indukce	H
M	spektrální hustota vyzařování	W.m^2
N	počet závitů cívky	-
P	činné ztráty	W
Q	teplo	J
R	činný odpor látky	Ω
S	povrch tělesa	m^2
S	zdánlivý výkon	VA
T	termodynamická teplota	K
U_{te}	termoelektrické napětí	V
V	objem tělesa	m^3
X	reaktance	Ω

1 ÚVOD

Kabely vysokého napětí musí svým použitím vyhovovat mnoha nejen elektrickým požadavkům, ale i požadavkům mechanickým a tepelným. Při průchodu elektrického proudu kabelem dochází ke vzniku elektrických ztrát a takový kabel se začne ohřívat. Taková teplota působí nepříznivě především na izolaci kabelu, která je nejméně odolná na vysoké teploty. Každý materiál využívaný na izolaci kabelů má maximální hodnoty teplot daných normami, při kterých může pracovat, aniž by došlo k jejich poškození.

Proto je nutné kabely před použitím v praxi testovat, zda při běžných provozních podmínkách nepřekračují teplotní mez povolenou těmito normami. Existuje mnoho způsobů, jak v laboratorních podmínkách ohřát vodič na požadovanou teplotu, ať už pomocí přímého průchodu proudu kabelem, nebo pomocí proudu indukovaného do kabelu skrze indukční cívku. Každá z metod se od ostatních liší účinností ohřevu, ale i přesností.

Další neméně důležitou problematikou ohřevu je měření teploty jádra vodiče. Bezkontaktní měření teploty nelze použít, jelikož jádro je chráněno vrstvami stínění a izolace a při kontaktních metodách dochází k porušení těchto vrstev a tedy k znehodnocení kabelu. Při kontaktu kabelu s čidlem teploty rovněž dochází k vzájemnému ovlivnění teplot a nepřesnostem v měření. Díky mnoha vnějším vlivům působícím na teplotu kabelu v reálných podmínkách není ani možné určit přesné hodnoty proudů a napětí potřebných pro ohřev na požadovanou teplotu předem.

Tato práce se zabývá možnostmi ohřevu kabelů vysokého napětí a měření teploty podle teoretických předpokladů i s ohledem na přepisy norem ČSN, které se využívají v laboratorních podmínkách a uvedením teoretických předpokladů do praxe, s následným vyhodnocením získaných výsledků.

2 TEPLLO

Teplo je část energie látky, kterou tato látka může vyměňovat se svým okolím pomocí srážek jednotlivých částic, obsažených v látce. Tyto srážky nelze sledovat ani změřit, aniž by došlo k ovlivnění systému. Teplo je tedy fyzikální veličina popisující změnu termodynamického systému, není však možné pomocí tepla popsat stav látky samotný. Mluvíme-li tedy o teple, předanému z látky do okolí, nebo naopak teple přijatému z okolí, mluvíme o změně tepelné energie látky ΔQ . Základní jednotkou tepla je, stejně jako u každého druhu energie látky jeden Joule. S teplem je svázáno několik základních veličin, které popisují tepelné vlastnosti látek. Tyto veličiny jsou ve stručnosti uvedeny níže.

Teplota:

Každá látka, nacházející se v termodynamické rovnováze, lze popsat veličinou, zvanou teplota. Teplota charakterizuje tepelný stav dané látky. Měřením teploty rozumíme vlastně měření translační kinetické energie látky, způsobené neuspořádaným mikroskopickým pohybem částic a molekul v látce. O dvou látkách se stejnou teplotou lze pak říct, že mají stejnou kinetickou energii a nemůže mezi nimi docházet k výměně tepla. Látky však nemusí mít stejnou vnitřní energii. Základní stupnici udává termodynamická teplota, uváděná ve stupních Kelvina. Pro tuto stupnici platí, že její nulový bod je bod, kdy v látce dochází k zastavení veškerého pohybu částic v látce. Tento stav látky však nemůže reálně existovat.

Teplota je často uváděna v různých stupnicích a jednotkách. Mezi nejznámější a nejčastěji používané patří Celsiova, Fahrenheitova a Rankinova stupnice. Vztahy mezi jednotlivými stupnicemi v závislosti k termodynamické teplotě uvádí následující tabulka.

Stupnice:	Jednotky:	Převod z termodynamické teploty:
Celsiova	°C	$\{t_C\} = \{t_K\} + 273,15$
Fahrenheitova	°F	$\{t_F\} = 1,8\{t_K\} + 305,15$
Rankinova	°R	$\{t_R\} = 1,8\{t_K\}$

Tab. 2-1: Převody teplotních stupnic vzhledem k termodynamické teplotě [1]

Hustota tepelného toku q ($J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$):

Hustota tepelného toku je veličina vyjadřující množství tepelné energie, procházející daným průřezem tělesa za určitou dobu. U hustoty tepelného toku není tedy důležitá jen nominální velikost, ale i směr působení, jde tedy o vektorovou veličinu. Směr hustoty tepelného toku má opačnou orientaci ke gradientu teploty. Pokud je hustota tepelného toku v daném směru nulová, znamená to, že v tomto směru nedochází k žádnému přenosu tepelné energie.

Tepelná vodivost λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$):

Tepelná vodivost je materiálová vlastnost, která určuje schopnost šíření tepla uvnitř látek. Čím vyšší je tepelná vodivost, tím snazší je šíření tepla uvnitř látky. Tepelná vodivost v kovových materiálech často přímo souvisí s vodivostí elektrickou.

Součinitel přestupu tepla α ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$):

Součinitel přestupu tepla určuje, jak snadno se teplo šíří z jedné látky do jiné, např. z pevné do plynné apod. Není materiálovou vlastností, ale závisí na všech parametrech ovlivňujících proudění, například na typu a rychlosti proudění, kinematické viskozitě tekutiny, tepelné vodivosti tekutiny, měrné tepelné kapacitě, součiniteli tepelné roztažnosti tekutiny.

Měrná tepelná kapacita c ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$):

Měrná tepelná kapacita určuje schopnost látky jímat teplo. Z jednotky je patrné, že určitá energie dodaná nebo odebraná ohřeje nebo ochladí danou látku o hmotnosti 1 kg o 1 teplotní stupeň. Od měrné tepelné kapacity je odvozená veličina tepelné kapacity, která určuje schopnost konkrétního množství látky přijímat tepelnou energii. Velká hodnota tepelné kapacity znamená vysokou schopnost jímat teplo, tedy při malé změně teploty je pohlceno velké množství tepelné energie.

Součinitel teplotní délkové roztažnosti α_L (K^{-1}):

Součinitel teplotní délkové roztažnosti určuje vliv teploty na délku pevných těles. Schopnost měnit s teplotou objem a tím i délku komplikuje konstrukci celé řady technických zařízení, např. kolejí, mostů, dálkových potrubí, elektrických vedení apod.

Teplotní součinitel odporu α_R (K^{-1}):

Teplotní součinitel odporu určuje vliv teploty na elektrický odpor zejména kovů, resp. vodičů. Tento parametr se sleduje např. při dimenzování vedení, využívá se např. u odporových teploměrů. Speciální součástky, které na tomto parametru zakládají svou funkci, se jmenují termistory – teplotně závislé rezistory [1].

2.1 Vznik tepla

Tepelná energie vzniká přeměnou jiné formy energie. V praxi se nejčastěji setkáváme s přeměnou mechanické energie, tedy především působením třecích sil mezi objekty. Teplo ovšem vzniká například i působením chemických reakcí v některých látkách, nebo pro tuto problematiku asi nejdůležitějším způsobem, a to přeměnou elektrické energie ve vodičích.

Přeměna elektrické energie na teplo vzniká průchodem elektrického proudu ve vodičích, kdy vlivem odporu vodiče vznikají energetické ztráty, které se projevují ohříváním vodičů. Při ohřevu se uplatňuje pouze činná složka výkonu procházejícího obvodem [1].

2.2 Přenos tepla

Přenos tepla probíhá mezi jakýmkoli dvěma látkami, které nejsou ve vzájemné tepelné rovnováze. V základu rozeznáváme tři základní druhy přenosu tepla:

1. Kondukce – vedení,
2. Konvekce – proudění,
3. Radiace – sálání.

V praxi však může a obvykle i dochází ke složenému případu přenosu tepla mezi látkami, jelikož například u každého tělesa s teplotou vyšší, než 0K dochází k radiaci tepla do okolí. Pro zjednodušení jsou tyto tři typy popisovány každý zvlášť [1].

2.2.1 Kondukce

Kondukce je základním mechanismem přenosu tepla. Kondukcí se přenáší teplo prakticky ve všech stavech hmoty, tedy v pevné, kapalně i plynné fázi. Množství přeneseného tepla tímto způsobem ovšem závisí na vnitřní molekulární a krystalické struktuře hmoty. Základní podstatou tohoto přenosu je výměna vnitřní energie uvnitř hmoty mezi mikročásticemi. Každá částice hmoty má svoji vnitřní energii. Např. atom má energii danou počtem elektronů v jednotlivých valenčních vrstvách atomového obalu. Energie atomu roste s přibývajícím počtem elektronů na vyšších valenčních drahách. Do tohoto stavu se atom může dostat celou řadou mechanismů. Jedním z nich je buzení dopadajícím zářením nebo pružné srážky atomů nebo jiných částic. Srážka částic mění kinetickou energii pohybující se hmoty na energii vnitřní, která se projevuje zvýšením teploty. Pokud se částice uvnitř hmoty pohybují, mohou prostřednictvím srážek předávat energii uvnitř látky. Velikost takto přeneseného tepla závisí především na množství těchto vnitřních nosičů energie a na pravděpodobnosti vzájemného předání mezi částicemi, tedy z většiny na pravděpodobnosti vzniku srážky. Teplo je míra změny vnitřní energie systému při styku s jiným systémem, aniž by přitom docházelo ke konání práce. Například v kovech, kde je velké množství volných elektronů s vysokou pohyblivostí, je přenos tepla vedením podstatně větší než v izolantech, kde volné elektrony prakticky neexistují. Teplo zde může ovšem vznikat také na molekulární úrovni – třením molekul, molekulových dipólů. Souhrnně by se dalo říci, že přenos tepla vedením je tím snazší, čím více je v dané hmotě zprostředkujících částic, které na sebe mohou vzájemně vnitřní energii přenášet.

V praktických aplikacích uvažujeme přenos tepla vedením v pevných látkách o určitém průřezu a tloušťce, kde známe teplotní rozdíl před a za překážkou. Typickými aplikacemi jsou např. výpočty tepelných ztrát, přestupy tepla přes rozhraní, ohřev materiálů prostupem tepla a další. K výpočtu musíme znát hlavní materiálovou konstantu, která určuje schopnost látky vést teplo a to tzv. tepelnou vodivost λ . Tato hodnota je charakteristická pro daný materiál [1].

Kondukcí tepla popisuje Fourierův zákon

$$q = -\lambda \text{grad}T \quad (2.1)$$

Z této rovnice lze pro rovinnou stěnu tloušťky l a plochy S odvodit následující vztah:

$$Q = \lambda \frac{S}{l} \Delta T \cdot t \quad (2.2)$$

2.2.2 Konvekce

Konvekce je způsob přenosu tepla, který reprezentuje přenos hmoty o určité vnitřní energii a to fyzickým přemístěním hmoty z jednoho místa na druhé. Z obecného pohledu tento princip vlastně není přenosem tepla, ale přenosem hmoty, na které je teplo vázané. V principu tedy rovněž může existovat ve všech třech skupenstvích hmoty, ovšem přenos tepla prouděním u pevných látek vyžaduje dodatečnou energii na přesun pevné látky.

V praxi hovoříme o přenosu tepla prouděním tedy obvykle v kontextu plynných a kapalných látek, které mohou skutečně fyzicky proudit – téci. Pohybem z jednoho místa na jiné pak prostřednictvím své hmoty přenášejí tepelnou energii.

Má-li kapalina nebo plyn teplotu T_0 a je-li povrch stěny o ploše S a teplotě T_1 , je množství tepla přeneseného mezi kapalinou a stěnou určeno Newtonovým vztahem:

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta T \cdot t \quad (2.3)$$

Kde veličina α je nazývána jako součinitel přestupu tepla. Tento součinitel je složitá funkce, závisící nejen na tekutině, ke které se vztahuje, ale také na rychlosti a orientaci proudění tekutiny, rozdílu teplot mezi povrchy a dalších. V praxi se tento součinitel určuje pomocí experimentálních měření. Pro některé základní případy proudění lze součinitel přestupu tepla určit pomocí grafických průběhů popsaných následujícími funkcemi:

a) Svislá rovinná stěna - přirozená konvekce

Při proudění okolního prostředí kolem svislé stěny o různých teplotách s tepelným spádem ΔT bude vyjádřen teplotní součinitel přirozené konvekce podle dvou rovnic daných velikostí teplotního rozdílu:

Pro $\Delta T = 15 - 85\text{K}$:

$$\alpha = 14,44 \Delta T^{0,13}$$

Pro $\Delta T = 85 - 150\text{K}$:

$$\alpha = 8,58 \Delta T^{0,25}$$

b) Vodorovná rovinná stěna - přirozená konvekce

Při proudění okolního prostředí kolem vodorovné stěny o různých teplotách s tepelným spádem ΔT je nutné rozlišit proudění tekutiny nad nebo pod rovinnou stěnou pro teplotní spád v mezích $\Delta T = 15 - 150\text{K}$:

Nad vodorovnou stěnou:

$$\alpha = 9,00\Delta T^{0,25}$$

Pod vodorovnou stěnou:

$$\alpha = 4,73\Delta T^{0,25}$$

c) Svislá rovinná stěna - nucená konvekce

Součinitel přestupu tepla u svislé stěny s nuceným prouděním okolního prostředí je určován pomocí rychlosti proudění vzduchu. Určení součinitele není tedy tak snadné, jako v předchozích příkladech:

Pro $v_{20} < 5\text{m.s}^{-1}$

$$\alpha = 5 + 14,23v_{20}$$

Pro $v_{20} > 5\text{m.s}^{-1}$

$$\alpha = 25,70v_{20}^{0,78}$$

Hodnota v_{20} značí rychlost proudění okolního prostředí přepočtenou na teplotu 20°C podle vztahu:

$$v_{20} = v_{sk} \frac{273 + 20}{273 + \vartheta_{sk}} \quad (2.4)$$

Kde v_{sk} značí skutečnou rychlost proudění vzduchu a ϑ_{sk} skutečnou teplotu vzduchu [1].

2.2.3 Radiace

Přenos tepla radiací, nebo vyzařováním je přenos tepla probíhající bez přítomnosti hmoty. Nejedná se o tepelnou energii, ale o energii elektromagnetických vln vyzařovanou z povrchu tělesa, která se může v konečném důsledku přeměnit na teplo. Není proto možné změřit teplotu tohoto záření, ale lze změřit jeho energie.

Při dopadu elektromagnetického záření na povrch tělesa může dojít k pohlcení, odrazu nebo prostupu tohoto záření hmotou tohoto tělesa. Záření vychází z povrchu každého tělesa s teplotou vyšší, než 0K. Toto záření se šíří prostorem přímočaře všemi směry. Každé těleso tuto energii nejen vyzařuje, ale i absorbuje energii vyzařovanou z jiných těles. Poměr pohlcené, odražené a prostoupené energie se řídí podle zákonů geometrické optiky.

$$\text{Činitel pohlcení:} \quad A = \frac{E_{\alpha}}{E}$$

$$\text{Činitel odrazu:} \quad B = \frac{E_{\rho}}{E}$$

$$\text{Činitel prostupu:} \quad C = \frac{E_{\tau}}{E}$$

Celkový součet koeficientů musí být roven vztahu: $A + B + C = 1$

Energie se šíří prostorem v elektromagnetických vlnách s vlnovou délkou v rozsahu infračerveného záření $\lambda = 780\text{nm}$ až $10\mu\text{m}$, kde vlnová délka je dána známým vztahem:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.5)$$

Sálání je komplexní děj, který se řídí několika základními zákony, popisujícími tento děj.

d) Snellův zákon

Snellův zákon vyjadřuje změnu úhlu šíření elektromagnetické vlny při přechodu z jednoho prostředí do druhého podle vztahu:

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (2.6)$$

Kde index n je index lomu mezi prostředími, kterými vlna prochází.

e) Lambertův zákon

Lambertův zákon určuje, že pro přenos výkonu se uplatňuje pouze kolmá složka elektromagnetického záření podle vztahu:

$$P = P_{\alpha} \cdot \cos \alpha \quad (2.7)$$

Pokud záření dopadá na plochu pod jiným úhlem, je potřeba s tímto úhlem počítat. Při předávání energie se uplatní pouze normálová složka, která je dána kosinem úhlu dopadajícího záření.

f) Stefan-Boltzmannův zákon

Stefan-Boltzmannův zákon vyjadřuje závislost úhrnné zářivosti absolutně černého tělesa na termodynamické teplotě podle vztahu:

$$M = \sigma T^4 \quad (2.8)$$

Kde konstanta σ je Stefan-Boltzmanova konstanta a má velikost:

$$\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

g) Planckův zákon

Planckův zákon vyjadřuje, že spektrální hustota intenzity vyzařování není v celém rozsahu spektra konstantní. Pro tuto závislost na jednotlivých hladinách vlnových délek byl odvozen vztah:

$$M(\lambda; T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (2.9)$$

Kde C_1 a C_2 jsou konstanty o velikosti $C_1 = 3,73 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ a $C_2 = 1,438 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$

Tato rovnice udává intenzitu vyzařovaného výkonu pouze na jedné konkrétní vlnové délce. Pro získání celkového vyzařovaného výkonu je tedy potřeba spočítat integraci skrz všechny vlnové délky obsažené v tomto záření.

$$M(T) = \int_0^{\infty} M(\lambda; T) \cdot d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \cdot d\lambda \quad (2.10)$$

Při dosazení a následné integraci vztahu by vznikl již známý Stefan-Boltzmannův zákon.

h) Wienův zákon

Wienův zákon udává závislost posun spektrální zářivosti na změně teploty vyzařujícího tělesa. Při růstu teploty dochází k posunu maxima ke kratším vlnovým délkám a tím k vyšším frekvencím. Tuto závislost přesně popisuje následující vztah:

$$\lambda_m = \frac{2897,79}{T} \cdot 10^{-6} \quad (2.11)$$

Tento vztah je výsledkem první derivace Planckova zákona a určuje tedy v podstatě lokální maximum této funkce. Podobně, jako pro Planckův zákon zde platí, že vypočítaná vlnová délka maxima je pouze s největší pravděpodobností skutečnou vlnovou délkou vyzařovaného maxima. Ve skutečném případě však nemusí o maximum jít.

i) Kirchhoffův zákon

Kirchhoffův zákon popisuje záření šedých těles ve vztahu k absolutně černému tělesu. Tento zákon platí obecně pro spektrální i celkovou úhrnnou zářivost tělesa.

$$M_x = A_x \cdot M \quad (2.12)$$

Kde A_x je poměrná pohltivost šedého tělesa. Z tohoto vztahu vyplývá, že pro zářivý výkon šedého tělesa pak platí vztah:

$$M_x = A_x \sigma T^4 = \varepsilon_x \sigma T^4 \quad (2.13)$$

Číselně je pak emisivita poměrné pohltivosti $\varepsilon_x = A_x$. Z toho plyne, že zářivost tělesa je přímo úměrná jeho pohltivosti. Proto také černé matné plochy teplo nejlépe nejen pohlcují, ale také vyzařují a naopak lesklé bílé plochy nepohlcují, ale ani nevydávají skoro žádné teplo. U většiny pevných těles je poměrná pohltivost konstantní v celém rozsahu vlnových délek a proto křivky vyzařování pro šedé a absolutně černé těleso jsou si navzájem podobné. Pro některé látky a především pro plyny však nemusí konstantní závislost platit a pro některé vlnové délky může být pohltivost a emisivita záření nulová. V takovém případě se jedná o čárová spektra vyzařování.

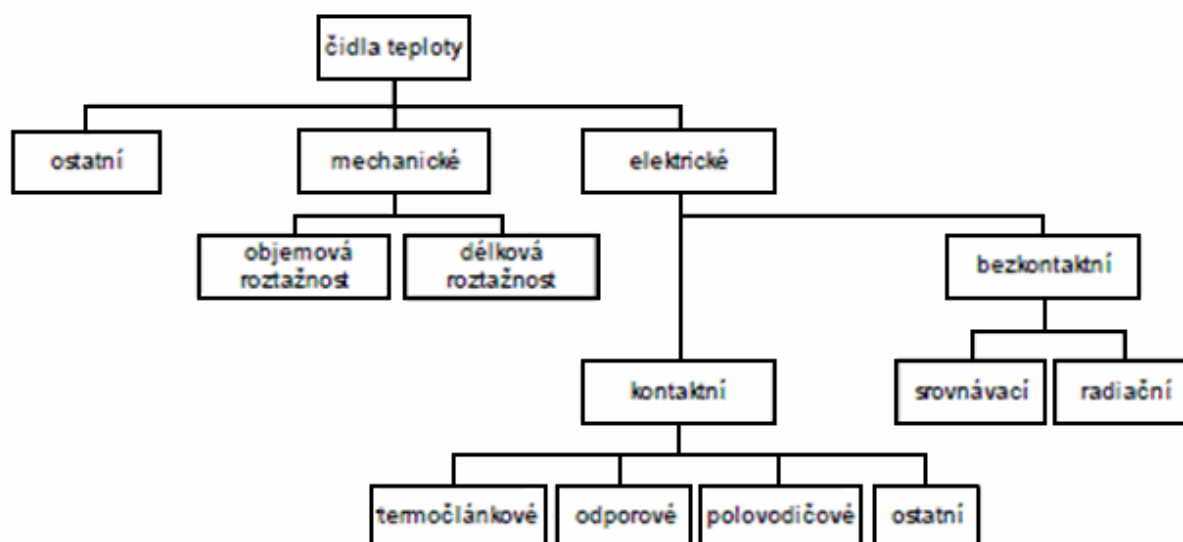
Této vlastnosti se využívá například u konstrukce solárních kolektorů, kdy speciální povrchovou úpravou lze dosáhnout takové spektrální selektivity, aby materiál nejlépe absorboval spektrum v oblasti viditelného záření a nevyzařoval energii v oblasti škodlivého IR záření. Tím dochází ke zvýšení účinnosti kolektoru [1].

3 MĚŘENÍ TEPLOTY V ELEKTROTEPELNÉ TECHNICE

Při měření neznámé teploty se využívá změn materiálových vlastností závislých na teplotě u měřeného objektu. Tepelná čidla využívají především tyto vlastnosti:

- teplotní roztažnost (dilatační a tlakové teploměry),
- změnu elektrických vlastností (odporové teploměry-termistory, termočlánky),
- celková energie záření (tepelné detektory),
- spektrální záření (s růstem teploty měřeného objektu roste i jeho spektrální záření).

Vzhledem na princip teploty lze čidla teploty dělit do tří základních skupin: elektrická, mechanická a ostatní. Základní princip rozdělení čidel teploty je uveden v následujícím diagramu:



Obr. 3-1: Rozdělení teplotních čidel [1]

Pro měření teplot materiálů se nejčastěji využívají elektrická čidla, díky snadnému zpracování naměřených dat. Elektrická čidla jsou dělena do dvou základních skupin, kontaktní a bezkontaktní. Bezkontaktní čidla mají výhodu, že při měření zkoumaného prvku nedochází k vzájemnému tepelnému ovlivnění prvku a přístroje, jelikož čidlo vyhodnocuje intenzitu teplotní radiace. Nevýhodou je, že pomocí bezkontaktního čidla nelze měřit prvek stíněný jinou vrstvou, která nemusí mít stejnou teplotu, jako například jádro kabelu.

Kontaktní čidla využívají při měření změnu elektrických vlastností vodivého materiálu, který je uložen v konstrukci teplotního čidla.

3.1 Odporové teploměry

Nejčastěji využívanou skupinou kontaktních čidel jsou odporové teploměry, které využívají principu změny elektrického odporu látky při změně teploty. Odporové teploměry se dělí do několika základních skupin na:

- kovové,
- polovodičové,
- monokrystalické,
- polykrystalické.

Odpor snímače se určuje na základě měření proudu a napětí podle Ohmova zákona. Při protékání proudu vodičem však dochází k jeho ohřevu a tedy i vzniku nepřesnosti [6].

3.1.1 Teploměry odporové – kovové

Odporové teploměry jsou relativně odolné elektrickému rušení, a proto se dobře hodí k měření teploty ve výrobních prostorách, zejména u motorů, generátorů a jiných zařízení s vysokým napětím. Za průmyslový standard kovových odporových teploměrů se považuje platinový odporový drát Pt 100 (při 0°C má odpor 100Ω a při 100°C odpor 138,5Ω). Platina je výhodná pro svou chemickou stálost, vysokou teplotou tavení a možnost dosažení vysoké čistoty, která se pohybuje v rozmezí 99,9 až 99,999%. Hlavní výhodou platinových čidel je jejich vynikající dlouhodobá stálost odporu, která zaručuje jejich vysokou přesnost a reprodukovatelnost měření. Jejich nevýhodou je velká citlivost na magnetické pole především při nižších teplotách. Mimo platiny lze však použít i jiné prvky s obdobnými elektrickými vlastnostmi jako měď a nikl, které však mají menší dlouhodobou stálost.

Závislost změny odporu na teplotě vyjadřuje takzvaný teplotní součinitel odporu, který je definován jako střední přírůstek odporu při zvýšení teploty o jeden teplotní stupeň ve stupnici od nuly do sta stupňů Celsia.

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{(T_{100} - T_0)R_0} \quad (3.1)$$

Hodnoty rezistivity při teplotě 0°C a teplotního součinitele odporu pro materiály používané v odporových člancích zobrazuje následující tabulka:

Materiál	Rezistivita ρ_0 ($\Omega \cdot \text{m}^{-1}$)	Teplotní součinitel odporu α (K^{-1})
Platina	$9,6 \cdot 10^{-8}$	$(0,385-0,392) \cdot 10^{-2}$
Nikl	$6,16 \cdot 10^{-8}$	$0,617 \cdot 10^{-2}$
Železo	$8,57 \cdot 10^{-8}$	$0,657 \cdot 10^{-2}$
Měď	$1,54 \cdot 10^{-8}$	$(0,426-0,433) \cdot 10^{-2}$
Zlato	$2,05 \cdot 10^{-8}$	$0,400 \cdot 10^{-2}$
Stříbro	$1,47 \cdot 10^{-8}$	$0,410 \cdot 10^{-2}$

Tab. 3-1: Rezistivita a teplotní součinitel odporu pro odporové materiály [1]

Teplotní součinitel odporu ve velkém rozsahu teplot není konstantní a změnu odporu je pak nutno vyjádřit rovnicemi:

$$R_{\vartheta} = R_0(1 + A\vartheta + B\vartheta^2) \quad (3.2)$$

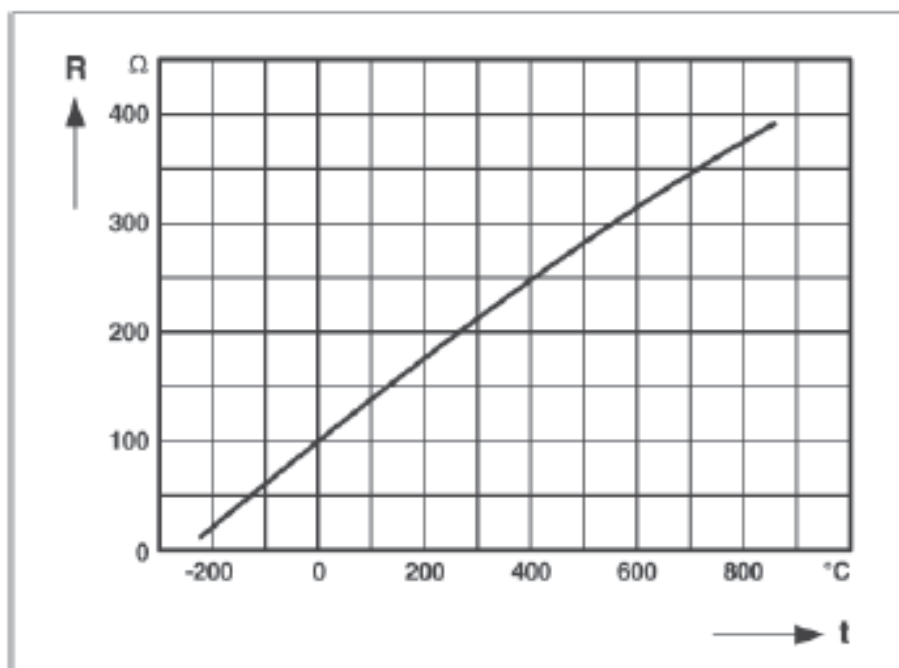
Pro kladné a

$$R_{\vartheta} = R_0(1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C[\vartheta - 100]^3) \quad (3.3)$$

Pro záporné teploty na Celsiově stupnici.

Pro malé rozsahy je však tuto rovnici linearizovat s využitím pouze činitele α , aniž by došlo k zanesení znatelné chyby do měření [3;6]:

$$R_{\vartheta} = R_0(1 + \alpha\Delta\vartheta) \quad (3.4)$$



Obr. 3-2: Teplotní závislost odporu pro odporový článek Pt 100 [3]

3.1.2 Teploměry odporové – polovodičové

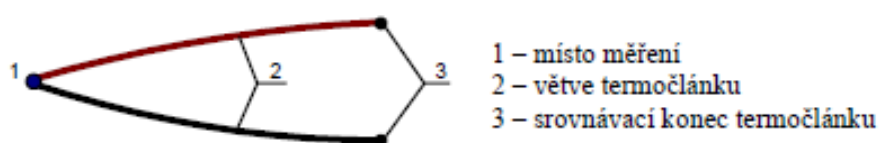
Polovodičová čidla využívají vlastností polovodičových součástek a jejich PN přechodů, kde velikost napětí na přechodu v propustném směru je lineárně závislá na teplotě přechodů při konstantním proudu přechodem. Tuto vlastnost splňuje každá obyčejná dioda, kterou pak stačí napájet konstantním stejnosměrným proudem a měřit voltmetrem úbytek napětí na přechodu. Ten bývá zpravidla okolo -2mV/K . V praxi se tato čidla konstruují jako složitější integrované obvody s dalšími dodatečnými součástkami integrovanými v jediném obvodu zajišťující snadné připojení do obvodu a poskytující zesílený a unifikovaný výstupní signál. Polovodičová čidla pracují v rozsahu zpravidla od -50°C do 120°C . Jejich přesnost bývá obvykle okolo 1 % a hodí se spíše pro méně náročné aplikace. Řada polovodičových čidel poskytuje analogový signál, který lze přímo zpracovat elektrickými obvody nebo ručičkovými měřidly. Konstrukce teploměrů je pak poměrně jednoduchá a levná. Obvykle bývá výstupní veličinou elektrický proud a proto je snadné tyto čidla připojovat i k velmi dlouhým vedením, neboť úbytek na vedení neovlivňuje výstupní veličinu. Hodí se proto pro vzdálená měření s centrálním sběrem dat.

Polovodičová čidla se dají rozdělit do dvou základních skupin podle závislosti odporu na teplotě:

- Negastory: (NTC) hodnota elektrického odporu klesá se vzrůstající teplotou.
- Pozistory: (PTC) hodnota elektrického odporu roste se vzrůstající teplotou [6].

3.1.3 Termočláanky

Termočláanky pracují na principu Seebeckova jevu, kdy mezi dvěma vodiči, které mají různou teplotu na rozpojených koncích, než na koncích spojených, vzniká termoelektrické napětí. Velikost termoelektrického napětí je přímo úměrná rozdílu teplot a rozdílu vnitřních termoelektrických potenciálů použitých kovů. Kombinací různých kovů můžeme měnit konstantu úměrnosti, která je v určitém teplotním rozsahu téměř teplotně nezávislá [6].



Obr. 3-3: Princip termočláanky [6]

Při malém teplotním rozsahu se dá závislost termoelektrického napětí linearizovat a popsat vztahem:

$$U_{te} = \alpha \cdot \Delta T \quad (3.5)$$

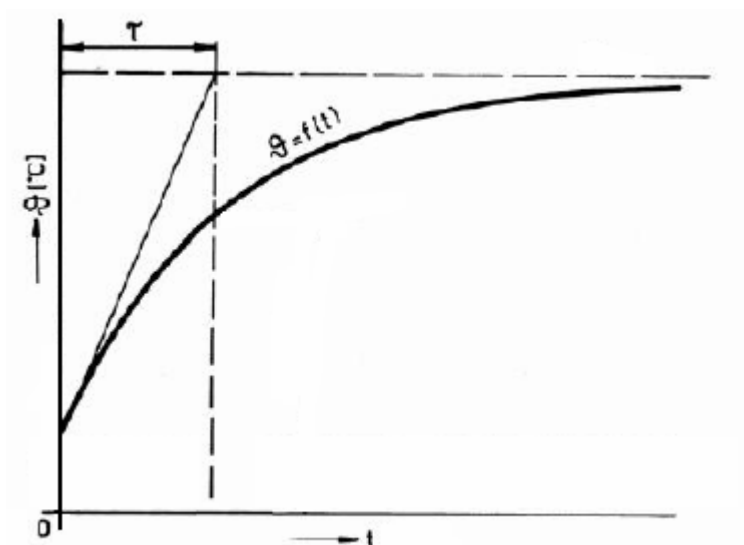
4 MOŽNOSTI OHŘEVU VYSOKONAPĚŤOVÉHO KABELU

Existuje mnoho možností pro ohřev kabelu. Vysokonapěťový kabel, stejně jako jakýkoliv jiný objekt, lze ohřívat nepřímo pomocí různých způsobů přenosu tepla, ať už využitím nepřímého odporového ohřevu nebo prouděním horkého plynu v klimatické komoře. Ale díky vodivým vlastnostem jádra vysokonapěťového kabelu lze využít i přímého působení elektrického proudu například pomocí indukovaného proudu ve vodiči pomocí cívky nebo přímého připojení vodiče do elektrického obvodu.

Jelikož při oteplování vodiče dochází k neustálému přenosu tepla do okolí, není možné dosáhnout požadované teploty vodiče bez dodání určitého výkonu a to především u elektrických ohřevů, kdy není okolí omezeno žádnými hranicemi a nemůže se tedy nikdy ohřát na teplotu vodiče, aby nedocházelo ke ztrátám. Pro ustálení oteplovací charakteristiky tělesa při ohřevu konstantním dodávaným výkonem platí vztah:

$$\vartheta_1 = \vartheta_0 + \Delta\vartheta_{\max}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (4.1)$$

Kde τ je časová konstanta udávající dobu, za kterou se těleso ohřeje na 63% maximální teploty při daném dodávaném výkonu. Proto například u přímého odporového ohřevu, kdy odpor soustavy je daný přímo vlastnostmi daného ohřívaného vodiče, je potřeba správně nastavit velikost protékajícího proudu, aby došlo k ustálení teploty na požadované teplotě.



Obr. 4-1: Oteplovací křivka

4.1 Kabely VN

Kabely VN zasahují do oblasti napětí od 6kV do 35kV. Jejich konstrukce se liší ve tvaru jádra, použitých materiálech i počtu ochranných vrstev, proto je těžké popsat průřez kabelu obecně. Obecně se však dá říct, že kabel má čtyři základní vrstvy: Jádro kabelu, izolace jádra, polovodičové a ochranné vrstvy a plášť kabelu. Pro jádro kabelu se nejčastěji využívá měď nebo hliník, jelikož tyto materiály mají nejlepší mechanické a elektrické vlastnosti pro vedení elektřiny na dlouhou vzdálenost. Základní vlastnosti hliníku a mědi ukazuje následující tabulka:

Stav		měď			hliník		
		měkká	polotvrdá	tvrdá	měkký	polotvrdý	tvrdý
γ_{min}	10^6 S.m^{-1}	57	56,5	56	34 - 35	33 - 34	32 - 33
ρ_{max}	$10^{-6} \Omega.\text{m}$	0,01754	0,01769	0,01786	0,02899	0,02985	0,03077
$\sigma_{n, min}$	MPa	240 - 190	300 - 250	400 - 300	155	195	245

Tab. 4-1: Materiálové vlastnosti elektrovedné mědi a hliníku [2]

Jádra vodičů mohou být zhotovena dvojím způsobem:

1. Jádra **plná** jsou tvořena jediným vodičem.
2. Jádra **složená** jsou tvořena lanem, tedy větším počtem slaněných drátů.

Hlavním rozdílem ve vlastnostech plných jader a lan je ohebnost. Zatímco na vnitřní straně ohybu dochází k namáhání tlakem a zkracování jádra, na vnější straně se jádro namáhá tahem a prodlužuje se. U plného vodiče musí dojít k deformaci materiálu silou úměrnou jeho pevnosti. U lana, kde dráty mění svou polohu a může docházet k jejich vzájemnému posunu, je ohýbání značně ulehčeno.

Při lanování se kolem středu lana, který je obvykle tvořen jedním drátem, stáčí do šroubovice další dráty tak, aby se dosáhlo potřebného průřezu. Jednotlivé dráty vytvářejí soustředné vrstvy, které se nazývají polohy. Smysl stáčení poloh se střídá, aby při působení podélného tahu lano nemělo sklon k rozplétání. Dráty v polohách vzdálenějších od středu mají větší vliv na ohebnost lana, proto se délka zkrutu - stoupání šroubovice – postupně zkracuje. Směr zkrutu se považuje za pravý, jestliže viditelná část šroubovice spolu s příčnými řezy, které ji ohraničují, tvoří tvar písmene „Z“ a za levý, jestliže tvoří tvar písmene „S“ [2].

Izolace kabelu je nedílnou součástí jeho konstrukce. Jestliže na jádro kabelu jsou kladeny elektrické požadavky, pak většina mechanických požadavků je kladena právě na izolaci. Jedná se především o mechanické a tepelné namáhání v různých stavech, které mohou v daných soustavách nastat. Z tepelných účinků jde zejména o provozní teplotu, teplotu při proudovém přetížení a teplotu při zkratu.

Přehled těchto dovolených teplot v závislosti na použitém materiálu pro izolaci kabelu je uveden v následující tabulce:

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

Tab. 4-2: Přehled nejvyšších dovolených teplot pro jednotlivé typy izolací kabelů [2]

4.2 Klimatické komory

Klimatické komory fungují na principu horkovzdušných pecí, kdy do ohřívacího prostoru komory je vložena sázka a přístroj ohřeje prostředí v komoře na požadovanou teplotu. Klimatické komory patří k nejpřesnějším způsobům ohřevu sázky na požadovanou teplotu, protože nedochází k únikům tepla do okolního prostředí a teplota sázky se tedy po určité době ustálí na teplotě prostředí v komoře, která je kalibrována podle příslušných norem a udržována automaticky. Běžné klimatizační komory pracují v rozsahu od -75°C do 180°C a s vlhkostním rozsahem od 10% do 98%.

Jednou z nevýhod klimatizačních komor je nízká účinnost ohřevu a tedy dlouhá doba trvání ohřevu sázky na požadovanou teplotu. Klimatizační komory proto nejsou vhodné pro měření skokových charakteristik, ale spíše k měření ustálených teplotních stavů. Další nevýhodou jsou rozměry klimatizačních komor při ohřevu sázek s netypickým tvarem, jako jsou například kabely VN. Při měření většího vzorku je potřeba využívat klimatizačních komor s velkými vnitřními rozměry, protože kabely VN mají poloměr ohybu běžně v rozsahu 50-100cm. Jedním z možných

typů pro ohřev kabelů VN o větších rozměrech proto může být klimatizační komora typu WT3/WK3-B XXL pracující v teplotním rozsahu od -70°C do 180°C



Obr. 4-2: Klimatická komora WT3/WK3-B XXL [5]

Klimatizační komory tedy patří k nejpřesnějším způsobům ohřevu VN kabelů, ale také k časově, finančně i prostorově nejnáročnějším [5].

4.3 Odporový ohřev

V zařízeních využívajících přímý odporový ohřev se mění energie elektrická na energii tepelnou podle Jouleova zákona:

$$Q = Pt = RI^2t \quad (4.2)$$

Pokud je ohříváný materiál přímo vodičem elektrického proudu, jedná se o přímý odporový ohřev, pokud však ohříváný materiál není součástí obvodu a pro ohřev využívá některý z principů přenosu tepla od vodiče elektrické energie, jde o ohřev nepřímý. Vodičem elektrické energie nemusí být nutně jen kov, ale i elektricky vodivá kapalina, tedy elektrolyt. Při návrhu odporového ohřevu ovšem vzniká problém s nelineární závislostí fyzikálních parametrů vodivé vsázky na teplotě. Pro ohřev lze vycházet ze základní rovnice:

$$Q = Q_u + Q_z \quad (4.3)$$

Kde Q je teplo dodávané, Q_u je teplo potřebné k ohřevu vsázky a Q_z je teplo ztrátové [1].

4.4 Indukční ohřev

Indukční ohřev je možné provádět pouze u elektricky vodivých materiálů, kdy se v materiálu vloženého do střídavého magnetického pole indukují vířivé proudy, které předmět zahřívají. Teplo tedy vzniká přímo v ohřívané sázce a dochází k velmi malým ztrátám oproti jiným způsobům ohřevu díky možnosti izolace sázky od okolního prostředí.

Principiálně se při indukčním ohřevu jedná o zapojení transformátoru, kdy na primární straně je připojena cívka s protékajícím proudem a sekundární stranu tvoří sázka reprezentující jeden závit cívky spojený nakrátko. Na sekundární straně se pak indukuje napětí podle vztahu:

$$U_2 = 2\pi f \cdot \frac{\phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f \cdot \phi_m \quad (4.4)$$

Pro proud procházející v sekundárním vinutí s jedním závitem platí:

$$I_2 = N_1 \cdot I_1 \quad (4.5)$$

A pro intenzitu magnetického pole pak:

$$H_0 = \sqrt{2} N_1 \cdot I_1 \quad (4.6)$$

Jelikož elektromagnetické pole lze popsat formou vlnění, lze určovat jeho intenzitu v libovolném bodě v prostoru. Jelikož ohřívaný materiál je velmi ztrátové prostředí pro šíření elektromagnetického vlnění, je pro ohřívanou sázku důležitá charakteristická veličina známá, jako hloubka vniku. Tato veličina udává vrstvu materiálu pod povrchem, kde hodnota intenzity záření nabývá velikosti $1/e$, tedy asi 36,8% hodnoty intenzity na povrchu ohřívaného materiálu.

Hloubka vniku lze určit ze vztahu:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{1}{f \cdot \gamma \cdot \mu_r}} \quad (4.7)$$

Ze vztahu je zřejmé, že hloubku vniku lze ovlivnit pouze změnou frekvence procházejícího střídavého proudu, jelikož konduktivita a relativní permeabilita materiálu se ovlivnit nedá.

Díky znalosti hloubky vniku lze potom určit proudová hustota v jednotlivých vrstvách ohřívaného materiálu pomocí vztahu:

$$J_x = \gamma \cdot E_x = \frac{\sqrt{2}}{\delta} H_0 \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} = J_0 \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} \quad (4.8)$$

Proudová hustota je veličina potřebná k určení proudu procházejícího danou vrstvou materiálu a pak tedy i k určení dodaného tepla. Jelikož se však nejedná o lineární úlohu, protože v jednotlivých vrstvách procházejí různé proudy a dochází mezi k přenosu tepla, je těžké popsat problém pomocí matematického vztahu.

Z hlediska provozních nákladů je zajímavá účinnost ohřevu. Přibližně lze účinnost η posoudit ze vztahu:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{D^2}{d^2} \left[1 + \left(2,5 \frac{\delta}{d} \right)^2 \right] \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu_r \cdot \rho_2}}} \quad (4.9)$$

kde:

- D vnitřní průměr cívky induktoru,
- d průměr vsázky,
- δ hloubka vniku,
- ρ_1 měrný odpor materiálu induktoru,
- ρ_2 měrný odpor materiálu vsázky,
- μ_r poměrná permeabilita materiálu vsázky.

Účinnost klesá se zvětšením poměru D/d , protože se zmenšuje vazba magnetického pole induktoru se vsázkou. Proto není vhodné používat jeden induktor pro velký rozsah průměrů vsázky. Účinnost klesá i se zvětšováním poměru δ/d . Nízká hodnota δ/d se využívá např. pro povrchové kalení, kde se rychlým procesem ohřeje a následně ochladí tenká povrchová vrstva.

Pro tváření (kování) je třeba, aby materiál byl prohřát pokud možno rovnoměrně. Proto se volí pomalejší ohřev, aby se teplo mohlo rozvést ke středu vsázky. Rovnoměrnosti ohřevu napomáhá i zvětšení hloubky vniku. Volí se kompromis kmitočtu pro dosažení potřebného ohřevu při dobré účinnosti přenosu energie z induktoru do vsázky [4].

4.5 Indukční ohřev s nepřímým odporovým ohřevem

Jednou z možností ohřevu VN kabelu je indukční ohřev pomocí cívky namotané okolo vodiče přímo na jeho plášti. Díky tomu tak dochází nejen k ohřevu indukčnímu, ale i k ohřevu odporovému od závitů cívky přes ochranný plášť do jádra, což zvýší účinnost ohřevu. Jelikož kabely mohou dosahovat velkých průměrů oproti hloubce vniku, je dobré provozovat ohřev při síťové frekvenci, aby hloubka vniku byla co nejvyšší. Díky tomu, že cívka je v tomto případě namotána těsně k plášti kabelu, je její vnitřní průměr D roven průměru kabelu, což umožňuje zvýšení účinnosti ohřevu ze vztahu (4.6).

Teplo dodané odporovým ohřevem z cívky do jádra kabelu musí projít přes všechny ochranné pláště kabelu, proto je jeho výsledná hodnota značně zmenšená. Celý přenos se řídí dle vztahu:

$$Q = \frac{2\pi l \cdot \Delta T}{\sum \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \cdot t \quad (4.10)$$

Kde l je délka ohřívání kabelu, λ_i je tepelná vodivost i -té vrstvy kabelu a r_i a r_{i+1} jsou poloměry vymezující tloušťku i -té vrstvy kabelu.

Vnější vrstva však není ohřívána rovnoměrně po celém povrchu, jelikož závit cívky, kterou je ohřev prováděn, nemusí být v těsné blízkosti u sebe. V takovém případě je nutno brát v potaz poměr stykové plochy cívky s povrchem ohřívání kabelu. Pokud budeme brát v potaz zjednodušující předpoklad, že styková plocha mezi cívkou a kabelem je stejná, jako průměr vodiče cívky (vodič cívky je čtvercového průřezu), lze tento vztah upravit podle poměru stykové plochy ku celkovému povrchu kabelu. Pro výpočet budeme uvažovat stejnou délku ohřívání kabelu i vodiče cívky.

$$\frac{s}{S} = \frac{d \cdot l}{2\pi \cdot R \cdot l} = \frac{d}{2\pi R} \quad (4.11)$$

$$Q = \frac{2\pi l \cdot \Delta T}{\sum \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \cdot t \cdot \frac{s}{S} = \frac{2\pi l \cdot \Delta T}{\sum \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \cdot t \cdot \frac{d}{2\pi R} = \frac{l \cdot d \cdot \Delta T}{R \cdot \sum \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \cdot t \quad (4.12)$$

Při přímém odporovém ohřevu kabelu je důležitá velikost proudu protékající jádrem kabelu. Pokud je nám hodnota tohoto proudu, potřebného k ohřevu jádra na požadovanou teplotu, předem známá, můžeme odvodit vztah pro počet závitů cívky potřebných k vyvolání tohoto proudu.

Při ohřevu, kdy nedochází ke ztrátám tepla v prostředí, se dodané teplo řídí vztahem:

$$R \cdot I^2 \cdot t = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (4.13)$$

Při rozepsání jednotlivých veličin lze tento vztah upravit do tvaru:

$$\rho_e \frac{4l}{\pi d^2} \cdot I^2 \cdot t = \rho l \frac{\pi d^2}{4} \cdot c \cdot \Delta T \quad (4.14)$$

Nejvyšší dovolená teplota v jádru je dimenzována tak, aby nedošlo k porušení vnějšího obalu kabelu, proto maximální dovolená teplota vodiče cívky musí být stejná. K ohřevu dochází ve stejném čase, proto i čas t v obou vztazích zůstává stejný. Pokud je materiál vodiče cívky i jádra kabelu zhotovený ze stejného materiálu, pak materiálové konstanty, tedy hustota, měrná tepelná kapacita a měrná rezistivita jsou také stejné. Pro poměr velikosti proudu v cívce a ve vodiči platí vztah:

$$I_2 = N_1 \cdot I_1 \quad (4.15)$$

Pokud tedy vložíme oba vztahy pro teplo potřebné k ohřevu na požadovanou teplotu do poměru, dostaneme vztah:

$$\frac{(N_1 \cdot I_1)^2}{I_1^2} = \frac{S^2}{s^2} = \frac{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)^2}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)^2} \quad (4.16)$$

Výsledný počet závitů cívky v bezeztrátovém prostředí lze potom vyjádřit jako poměr průřezů obou vodičů:

$$N_1 = \frac{S}{s} = \frac{D^2}{d^2} \quad (4.17)$$

A pro proud procházející vodičem cívky potom platí vztah:

$$I_1 = \frac{I_2}{N_1} \quad (4.18)$$

Jelikož se ohřev kabelu neuskutečňuje v bezeztrátovém prostředí a dochází k postupnému ustalování teploty podle oteplovací křivky, je tento poměr pouze orientační. Reálně, pokud bude docházet k ohřevu v plynném prostředí, bude při tomto proudu ustálená teplota vodiče cívky menší, než je povolené maximum. Vzhledem k mnoha proměnným v reálném případě je však přesnou hodnotu proudu obtížné určit.

5 OHŘEV A MĚŘENÍ KABELŮ VN PODLE NOREM ČSN

Nejdůležitějšími parametry pro určení teploty kabelu jsou jeho průřez a proud, který vodičem prochází. Hodnoty dovolených proudů však závisí nejen na průřezu vodiče, ale i na uspořádání svazků a na způsobu uložení vodičů. Tyto hodnoty jsou zpracovány v tabulkách podle normy ČSN 33 2000-5-52 ed.2 a jsou příliš rozsáhlé, než aby bylo vhodné je uvádět do této práce.

Teploty uvedené v tabulce jsou však vztaženy pro referenční teplotu okolí, která je určena na 20°C pro uložení v zemi a 30°C pro uložení ve vzduchu. Pro laboratorní měření je důležitá především skupina kabelů uložených ve vzduchu. Při teplotách jiných, než referenčních, je potřeba daný proud v tabulkách vynásobit koeficientem podle následující tabulky:

Okolní teplota [°C]	Izolace PVC	Izolace XLPE
10	1,22	1,15
15	1,17	1,12
20	1,12	1,08
25	1,06	1,04
30	1,00	1,00

Tab. 5-1: Koeficient pro stanovení povoleného proudu v kabelu při jiné, než referenční teplotě

Podle normy ČSN EN 61442 existují tři základní typy teplotních zkoušek vodičů VN v rozsahu jmenovitých napětí od 6kV do 36kV. Zkouška při trvale zvýšené teplotě, tepelná zkratová zkouška a dynamická zkratová zkouška [9].

5.1 Zkoušky při zvýšené teplotě

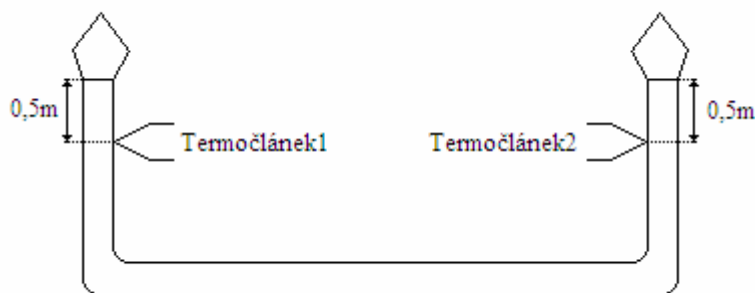
Při měření trvalé provozní teploty kabelu při zkouškách ve vzduchu platí tato pravidla:

- Soubory musí být smontovány a je-li to nutné, podepřeny a opatřeny spojeními umožňujícími cirkulaci vyhřívacího proudu.
- Při zkouškách koncovek nebo neoddělitelných konektorů musí být spojení mezi každým okem zdírkou elektrický průřez ekvivalentní průřezu vodiče v kabelu.
- Při zkouškách odbočné spojky musí vyhřívací proud protékat pouze hlavním kabelem.
- Trojžilové soubory mohou být připojeny buď k jednofázovému, nebo trojfázovému vyhřívacímu zdroji proudu. Jednofázové nebo trojfázové napětí musí být v souladu s požadavky superponováno na vyhřívací proud. V případě magnetického pláště musí být použit trojfázový vyhřívací proud.

Pro stanovení teploty vodiče v kabelu je pro některé zkoušky souborů nutno zvyšovat teplotu vodiče v kabelu do 5-10K nad nejvyšší teplotu za normálního provozu při současném přiložení napětí, buď střídavého, nebo impulzního. Není proto možný přístup k vodiči, který by umožnil přímé měření teploty. Teplota musí být udržována v omezeném rozmezí 5K, zatímco okolní teplota může nabývat většího rozsahu. Proto je nutné použít kalibraci na zkušebním kabelu, aby bylo během zkoušky možné stanovit okamžitou teplotu vodiče.

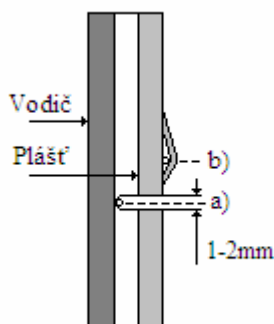
Účelem kalibrace je stanovení teploty vodiče v rozmezí teplot předepsaných pro zkoušku přímým měřením při zadaném kabelu. Kabel použitý pro kalibraci musí být identický se zkoušeným kabelem.

Kalibrace se má provádět na délce kabelu minimálně 2m, přičemž termočlánky se montují minimálně 0,5m od konců kabelu podle obrázku Obr.5-1.



Obr. 5-1: Měření teploty referenčního kabelu [7]

V každém místě měření by měly být připojeny dva termočlánky: jeden na vodič a druhý na vnější povrch kabelu. Doporučuje se, aby termočlánky byly připojeny k vodiči pomocí mechanických prostředků, protože jinak může dojít k jejich pohybu v důsledku vibrací během ohřívání.



Obr. 5-2: Uspořádání termočlánků [7]

- a) Termočlánek v kontaktu s jádrem vodiče,
- b) Termočlánek na vnějším povrchu: 1 vrstva měděné pásky + 2 napůl překryté vrstvy adhezivní pásky.

Kalibrace má být provedena při teplotě okolí v rozmezí 5-35°C bez proudění vzduchu. Kabel má být vyhříván až jsou teploty vodiče zaznamenávané oběma termočlánky stabilizované a dosahují hodnot uvedených níže:

- 5-10K nad maximální teplotu vodiče v normálním provozu pro kabely s výtlačně lisovanou izolací,

- 0-5K nad maximální teplotu vodiče v normálním provozu pro kabely s papírovou izolací.

Hodnoty přípustných teplot kabelů s různým typem izolací jsou uvedeny v tabulce Tab.4-2 podle normy ČSN 33 2000-4-43. Za stav, kdy byla dosažena stabilizovaná teplota, se považuje stav, kdy teploty vodiče a_1 , a_2 neukazují po dobu dvou hodin odchylky větší než 2K.

Po dosažení stabilizace musí být zaznamenány údaje:

ϑ_{vod} - teplota vodiče; ϑ_{pl} - teplota pláště; ϑ_{ok} - teplota okolí; I_{cal} – vyhřívací proud

Metoda 1: Zkouška založená na měření teploty okolí

Za předpokladu, že ztráty v dielektriku, kovovém plášti a pancíři jsou zanedbatelné:

- Během kalibrace kabelu:

$$\vartheta_{vod} - \vartheta_{ok,c} = R_{20} \cdot I_{cal}^2 [1 + \alpha_{20} (\vartheta_{vod} - 20)] T \quad (5.1)$$

- Během zkoušky souboru:

$$\vartheta_{vod} - \vartheta_{ok,t} = R_{20} \cdot I_{zk}^2 [1 + \alpha_{20} (\vartheta_{vod} - 20)] T \quad (5.2)$$

Kombinací obou vztahů vznikne vztah pro proud zkoušek během souboru:

$$I_{zk} = I_{cal} \sqrt{\frac{\vartheta_{vod} - \vartheta_{ok,t}}{\vartheta_{vod} - \vartheta_{ok,c}}} \quad (5.3)$$

Metoda2: Zkouška založená na měření teploty vnějšího povrchu

- Během kalibrace kabelu:

$$\vartheta_{vod} - \vartheta_{pl,c} = R_{20} \cdot I_{cal}^2 [1 + \alpha_{20} (\vartheta_{vod} - 20)] T \quad (5.4)$$

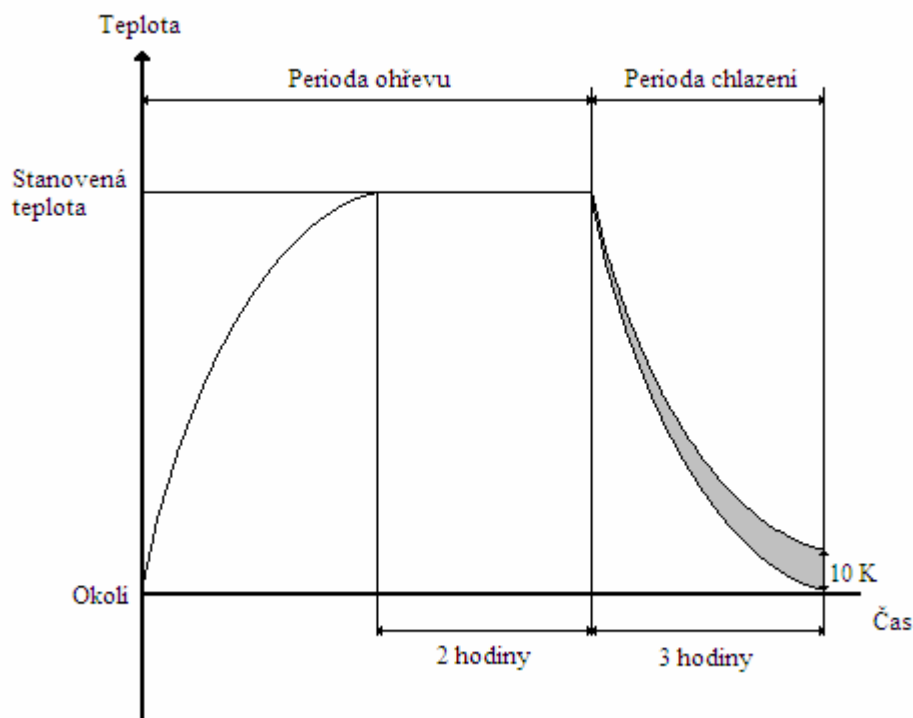
- Během zkoušky souboru:

$$\vartheta_{vod} - \vartheta_{pl,t} = R_{20} \cdot I_{zk}^2 [1 + \alpha_{20} (\vartheta_{vod} - 20)] T \quad (5.5)$$

Kombinací obou vztahů vznikne vztah pro proud zkoušek během souboru:

$$I_{zk} = I_{cal} \sqrt{\frac{\vartheta_{vod} - \vartheta_{pl,t}}{\vartheta_{vod} - \vartheta_{pl,c}}} \quad (5.6)$$

Při zkoušení kabelu větším počtem teplotních cyklů musí každý cyklus ve vzduchu nebo ve vodě trvat 8 hodin s intervalem nejméně dvě hodiny při stabilizované teplotě a je následován nejméně třemi hodinami přirozeného chlazení do rozmezí 10K nad teplotu okolí. Charakter teplotního cyklu je ukázán v následujícím obrázku [7]:



Obr. 5-3: Teplotní cyklus zkoušky [7]

5.2 Tepelné zkratové zkoušky

a) Tepelná zkouška stínění:

Tato zkouška je požadována pouze pro soubory, které jsou vybaveny spojením nebo adaptérem pro kovové stínění kabelu.

Zkušební smyčka se musí skládat z kabelu se soubory. Na obou koncích zkušební smyčky musí být spojení stínění odpojeno od země a připojeno ke zkratovému generátoru. Vodič musí být před zkouškou vyhřátý na teplotu odpovídající předchozí zkoušce. Před a po zkratové zkoušce musí být pomocí termočlánků nebo jinými vhodnými prostředky měřena teplota stínění. Na stínění musí být aplikovány dva zkraty odpovídající dohodnutým požadavkům na proud a čas. Mezi dvěma zkraty je dovoleno zchladit stínění kabelu na teplotu menší, než 10K nad jeho teplotu předcházející první zkrat.

b) Tepelná zkouška jádra:

Trojžilové soubory se musí zkoušet s jedním koncem kabelové smyčky připojeným ke zkratovému generátoru a druhým ke zkratové přípojnici podle popisu v příslušné normě. Alternativně mohou být žíly zapojeny do série a zkoušeny jako jednožilový soubor.

Zkouška musí být provedena se zkušební smyčkou při teplotě okolí. Musí být aplikovány dva zkraty s použitím střídavého nebo stejnosměrného proudu tak, aby se teplota vodiče zvýšila během pěti sekund na maximální přípustnou zkratovou teplotu kabelu. Mezi dvěma zkraty je dovoleno zchladit stínění kabelu na teplotu 5- 10K nad jeho teplotu předcházející první zkrat [7;8].

Pro výpočet proudů se využívají následující vzorce:

$$\text{Pro hliníkové vodiče: } I^2 t = 2,19 \cdot 10^4 \cdot S^2 \cdot \ln \frac{\vartheta_{zk} + 228}{\vartheta_0 + 228} \quad (5.7)$$

$$\text{Pro měděné vodiče: } I^2 t = 5,11 \cdot 10^4 \cdot S^2 \cdot \ln \frac{\vartheta_{zk} + 234,5}{\vartheta_0 + 234,5} \quad (5.8)$$

5.3 Dynamické zkratové zkoušky

Tato zkouška je trojfázová zkouška požadovaná pro jednožilové kabelové soubory navrhované pro špičkový proud větší, než 80kA a pro trojfázové kabelové soubory navrhované pro špičkový proud větší, než 63kA.

Zkušební smyčka se skládá buď ze tří jednožilových kabelů, nebo z jednoho trojžilového kabelu se soubory. Jeden konec kabelové smyčky musí být připojen ke zkratovému generátoru a druhý ke zkratové přípojnici podle příslušné normy. Pro koncovky, oddělitelné konektory a spojky musí být způsob upnutí a vzdálenosti mezi soubory podle doporučení výrobce a musí být zaznamenány ve zkušebním protokolu. Navíc se musí jednožilové kabelové spojky zkoušet v uspořádání podobném trojlístku.

Zkratový proud se musí aplikovat po dobu minimálně deseti milisekund k zajištění počátečního dynamického proudu. Tvar vlny musí být zaznamenán [7].

6 LABORATORNÍ METODA MĚŘENÍ

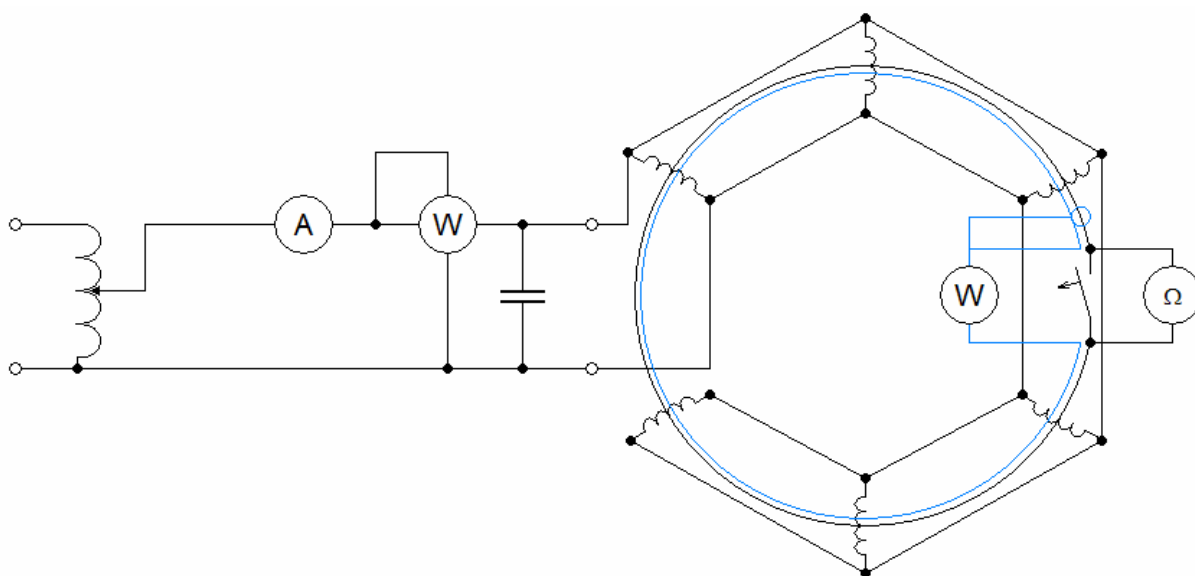
Pro ohřev měřeného kabelu v laboratorních podmínkách byla využita metoda indukčního ohřevu s napájením ze sítě přes autotransfornátor. Samotný ohřev je uskutečňován pomocí šesti cívek rozložených rovnoměrně po obvodu měřeného kabelu tak, aby došlo k co nejrovnoměrnějšímu prohřevu měřeného kabelu s ohledem na vířivé proudy vznikající v oblastech, kde kabel prochází jádrem cívky. Jednotlivé cívky jsou mezi sebou spojeny paralelně tak, aby napětí indukované do kabelu bylo rovno součtu jednotlivých napětí z každé cívky. Do primárního obvodu je vřazena i jednotka kompenzačních článků s několika stupni pro možnost regulace jalové složky proudu v obvodu. Součástí obvodu je i ampérmetr a wattmetr na sledování informativních hodnot napětí, proudu a účinníku v primárním obvodu.

Sekundární obvod je tvořen samotným ohříváním kabelem, který tvoří jádro cívek a tím nahrazuje sekundární stranu transformátoru s jedním závitem. Poměr přenášeného napětí na sekundární stranu je roven vztahu:

$$U_2 = n \cdot \frac{U_1}{N_1} \quad (6.1)$$

Kde n je počet paralelně řazených cívek a N_1 je počet závitů na jedné cívce. Ve zvoleném způsobu zapojení je tedy $n = 6$.

Ohříváný kabel je uzavřen do smyčky přes jistič, který plní nejen úlohu jištění, ale i úlohu spínače pro přímé měření odporu. Ke svorkám jističe je čtyřvodičově připojený ohmmetr pro měření odporu na vodiči. Součástí měřicího okruhu je i druhá smyčka s připojeným wattmetrem pro měření napětí indukovaného ve smyčce, s klešťovým ampérmetrem připojeným k měřenému kabelu pro určení velikosti proudu. Jednotlivé metody měření jsou popsány podrobněji níže.



Obr. 6-1: Schéma zapojení a měření teploty ohříváného kabelu

Jelikož obě metody měření vycházejí z určení teploty kabelu přes výpočet z hodnoty elektrického odporu pomocí vztahu:

$$R_{\vartheta} = R_0 (1 + \alpha \Delta \vartheta) \quad (6.2)$$

Je potřeba před započítáním měření určit počáteční teplotu okolí, z níž bude celkový výpočet vycházet, odpor kabelu při této teplotě a také znát teplotní součinitel odporu jádra kabelu:

- měď: $\alpha = 0,00392\text{K}^{-1}$
- hliník: $\alpha = 0,00377\text{K}^{-1}$

6.1 Metoda měření teploty pomocí přímého měření odporu

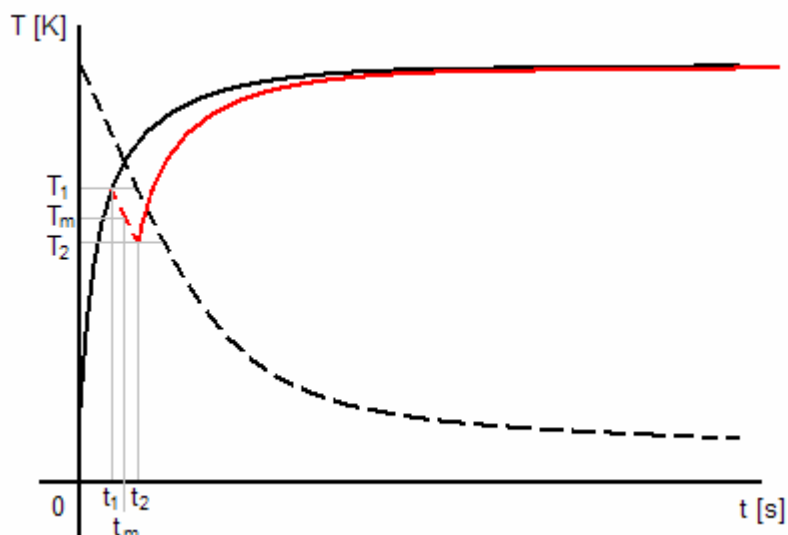
Tato metoda vychází z přímého měření odporu pomocí ohmmetru, zapojeného do obvodu na svorkách jističe. Jistič při měření plní úlohu převážně spínacího prvku, jelikož během měření nesmí obvodem procházet proud.

Při použití běžných dvou vodičových metod (přímé metody, substituční, můstkové) je výsledná hodnota ovlivněna přechodovým odporem, odporem přírodních vodičů a termoelektrickým napětím. Pro měření velmi malých odporů (jednotky ohmů a méně) mohou dosahovat systematické chyby dané výše zmíněnými jevy stejného nebo i vyššího řádu, jako měřená hodnota.

Pro vyloučení vlivu přechodových odporů a odporu přírodních vodičů se používá tzv. čtyřvodičová měřicí metoda. Protože vnitřní odpor voltmetru je velký (nejméně $10^4\Omega$), protéká obvodem voltmetru velmi malý proud, který na svorkách nezpůsobí významný úbytek napětí. Stanovený měřený odpor tak vychází bez systematické chyby dané odporem přírodních vodičů a přechodových odporů proudových svorek.

Během určování odporu kabelu dojde k přerušení průchodu proudu a kabel se začne ihned ochlazovat. I během krátkého přerušení proudu může především u vyšších teplot docházet k poklesu teploty kabelu o několik jednotek stupňů. Tím dochází k zanášení chyby do měření, jelikož odečítaná teplota není teplotou kabelu v době vypnutí obvodu a stejně tak není stejná, jako v okamžiku opětovného sepnutí obvodu. Tuto chybu lze částečně eliminovat, pokud je předem určena ochlazovací křivka měřeného vodiče. Při měření ochlazovací křivky neprochází obvodem žádný proud a tedy nedochází k zanášení této chyby do měření. Jelikož ale ochlazování je přirozené a není vynucováno žádnou umělou cestou, může být znatelně pomalejší, než ohřev. Pokud známe dobu trvání celé operace, lze tuto chybu kompenzovat dosazením již změřeného průběhu ochlazovací křivky do daného měření.

Celou operaci lze rozdělit do tří okamžiků: t_1 - chvíle rozpojení obvodu; t_m - chvíle zaznamenání odporu; t_2 - chvíle opětovného sepnutí. V okamžiku t_m je určována měřená teplota T_m , která odpovídá teplotě v určitém času na ochlazovací křivce. Pokud známe přesný interval, kdy byl obvod rozpojený, lze přenesením tohoto intervalu z ochlazovací křivky určit teplotu T_1 v době rozepnutí a T_2 v době sepnutí obvodu. Nevýhodou této metody je, že nelze určit teplotu kabelu v jakémkoli okamžiku ohřevu a je velmi obtížné regulovat ustálenou teplotu na přesné hodnotě.



Obr. 6-2: Tepelný skok při měření odporu s vypnutým jističem

6.2 Metoda měření teploty pomocí měření účinku

Metoda je založená na výpočtu činného odporu měřené soustavy přes měření napětí a proudu. V případě, že by měřeným vodičem procházel proud pouze činného charakteru, šlo by určit velikost odporu na základě Ohmova zákona, jelikož však ale na vodič působí značné magnetické síly způsobené vlivem cívek, procházející proud má i jalovou složku. Proto je nutné kromě velikosti proudu a napětí znát i velikost činného odporu, nebo účinku v měřeném obvodu.

Pro určení činného výkonu ve vodiči je využito zapojení s wattmetrem, znázorněné ve schématu modrou barvou. Systémem cívek je provlečen nový vodič pro měření napětí, indukovaném v soustavě. Jelikož cívky indukují do pomocné soustavy napětí o stejné fázi a ve stejném poměru, lze toto napětí považovat za shodné vzhledem k napětí na měřeném vodiči. Napětí na vodiči však nemusí být pro zvolený wattmetr dostačující, proto je možné pomocný vodič provléct cívkami vícenásobně, aby se dosáhlo menšího poměru závitů a v pomocném obvodu bylo dosaženo vyššího napětí. Celkové napětí v pomocném obvodu se pak bude rovnat vztahu:

$$U_{2p} = U_1 \cdot \frac{N_{2p}}{N_1} = U_2 \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{N_{2p}}{N_1} = U_2 \cdot \frac{N_{2p}}{N_2} \quad (6.3)$$

Pokud tedy pomocný obvod budou tvořit dva závity, lze dosáhnout dvojnásobného pomocného napětí U_{2p} se stejným fázovým posuvem.

Velikost a fázový posuv proudu však může být ovlivněn vlastnostmi pomocného vodiče. Měření proudu je proto realizováno pomocí klešťového ampérmetru na původním měřeném obvodu. Změřením těchto hodnot dostáváme potřebnou velikost proudu, napětí i činného výkonu pro dosažení hodnoty činného odporu výpočtem.

6.3 Srovnání měřicích metod

Při prvním zkušebním měření obou metod byl zvolen hliníkový kabel o průřezu 120mm^2 . Před měřením byly určeny počáteční hodnoty odporu a teploty kabelu podle teploty okolního prostředí. Tím jsme získali potřebná data pro výpočet teploty dosazením do vzorce:

$$R_1 = R_0 (1 + \alpha \Delta \vartheta) \quad (6.4)$$

kde:

$$\vartheta_0 = 20^\circ\text{C}; R_0 = 3,322\Omega; \alpha = 0,00377\text{K}^{-1}$$

Při výpočtu výsledné teploty je pak vztah potřeba upravit do tvaru:

$$\vartheta_1 = \frac{R_1 - R_0 + R_0 \cdot \alpha \cdot \vartheta_0}{R_0 \cdot \alpha} = \frac{R_1 - R_0}{R_0 \cdot \alpha} + \vartheta_0 \quad (6.5)$$

t [min]	R [mΩ]	ϑ [°C]
1	3,767	55,532
3	4,307	98,649
5	4,463	111,106
7	4,721	131,706
9	4,96	150,790
11	5,039	157,097
13	5,251	174,025
15	5,504	194,226
17	5,562	198,857
19	5,785	216,663
21	5,888	224,888
23	6,241	253,074

Tab. 6-1: Měření teploty za použití ohmmetru

Při měření za použití wattmetru je potřeba k odporu dojít za použití výpočtu. Vzhledem k tomu, že na pomocném obvodu byly využity dvě smyčky, je potřeba výsledné napětí a výkony dělit dvěma, aby odpovídaly hodnotám v měřeném kabelu. Následný výpočet pak vychází z výpočtu činných ztrát kabelu:

$$\Delta P = \frac{U^2}{R} \quad (6.6)$$

tedy po upravení dostáváme vztah:

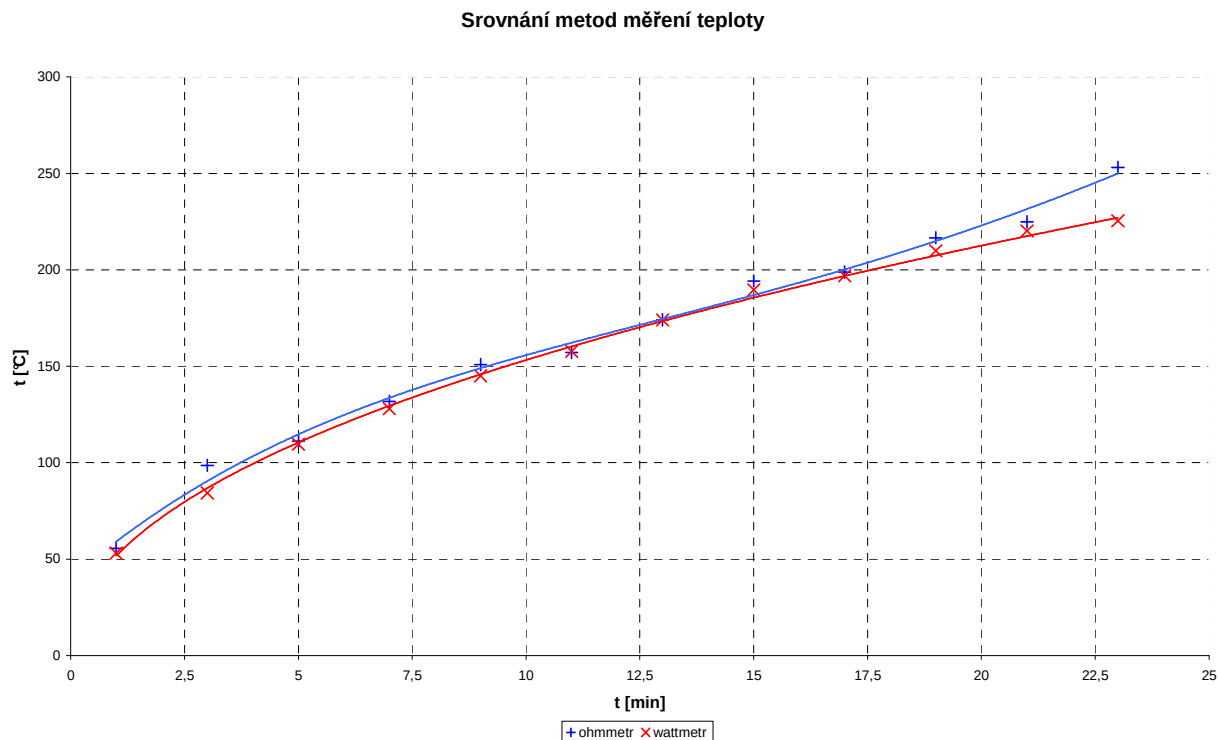
$$R_1 = \frac{U^2}{P} \quad (6.7)$$

t [min]	U [V]	I [A]	P [kW]	S [kVA]	R [m Ω]	ϑ [°C]
1	5,5	1079	4,35	5,9	3,736	53,084
3	5,65	1050	4,55	5,9	4,127	84,276
5	5,75	1023	4,65	5,95	4,443	109,529
7	5,95	1008	4,75	5,95	4,675	128,025
9	6	991	4,8	5,9	4,888	145,007
11	6,05	975,3	4,8	5,85	5,046	157,673
13	6,05	961,2	4,85	5,75	5,249	173,902
15	6,1	943,7	4,85	5,75	5,446	189,591
17	6,1	935,9	4,85	5,75	5,537	196,870
19	6,15	922,4	4,85	5,7	5,700	209,906
21	6,2	912,2	4,85	5,65	5,829	220,142
23	6,25	902,4	4,8	5,6	5,894	225,402

Tab. 6-2: Měření teploty za použití wattmetru

V tabulce jsou uvedeny hodnoty již po vydělení naměřených hodnot napětí a výkonů.

Vynesení do grafu pak dostáváme následující průběhy oteplovací křivky kabelu, stanovené oběma metodami.



Obr. 6-3: Graf předběžného měření použitých metod

Měření probíhalo při napětí $U_1 = 360\text{V}$, kdy primární stranou obvodu procházel, podle kontrolního ampérmetru, proud o velikosti $I_1 = 30\text{A}$. každá cívka byla tvořena dvěma sériově spojenými vinutími, kde každé vinutí bylo tvořeno sto padesáti závitů. Každá z cívek tedy do sekundárního obvodu tvořeného ohříváním hliníkovým kabelem indukovala napětí o velikosti:

$$U_2 = U_1 \frac{N_2}{N_1} = 360 \cdot \frac{1}{300} = 1,2\text{V}$$

Propojením sério-paralelního řazení šesti takovýchto totožných cívek pak bylo na sekundárním měřeném obvodu dosaženo teoretické velikosti indukovaného napětí:

$$U_2 = n \cdot U_1 \frac{N_2}{N_1} = 1,2 \cdot 360 \cdot \frac{1}{300} = 7,2\text{V}$$

Výhody a nevýhody měřících metod:

Měření za použití ohmmetru:	Měření za použití wattmetru:
Výhody + využití jediného měřicího přístroje (malá chyba měření) + není potřeba využívat pomocný obvod + měřením se získává přímo činný odpor kabelu	Výhody + odečítání hodnot lze provádět bez odpojení od sítě + snadnější automatizace měření + snadná regulace na ustálenou teplotu
Nevýhody – při odečítání hodnot je potřeba odpojit napájení obvodu – nelze odečítat hodnoty v libovolném čase ohřevu – obtížná regulace na ustálenou teplotu	Nevýhody – měření několika fyzikálních veličin – pro dosažení činného odporu je potřeba provést dodatečné výpočty (zanášení systematických chyb) – nutno použít pomocný měřicí obvod

Tab. 6-3: Porovnání metod měření ohřevu kabelu

7 CHARAKTERISTIKA PRVKŮ V OBVODU

V této kapitole jsou shrnuty poznatky o všech prvcích zahrnutých v měřicím obvodu, především jejich elektrické parametry a energetické nároky na obvod.

7.1 Cívka

Vlivem magnetického pole dochází ve vodiči elektrického proudu k dalším typům ztrát kromě přímého průchodu elektrického proudu. Magnetické ztráty ve vodivých materiálech se dělí do tří skupin a to:

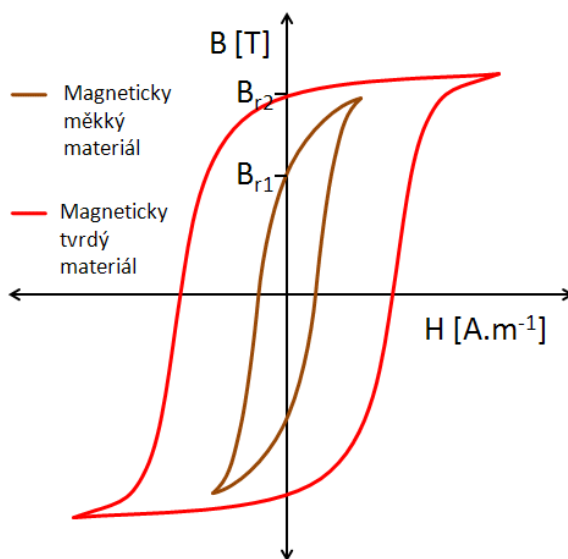
- Ztráty hysterezní,
- ztráty Foucaultovými (vířivými) proudy,
- dodatečné ztráty.

7.1.1 Hysterezní ztráty

Ztráty hysterezní vznikají neustálým přemagnetováváním vodivého materiálu. Velikost hysterezních ztrát je přímo úměrná ploše hysterezní smyčky. Ztráty ve feromagnetickém materiálu tedy budou mnohem vyšší, než ztráty materiálu magneticky měkkého. Velikost hysterezních ztrát je dána vztahem:

$$\Delta P_h = V \cdot f \cdot S_h \quad (7.1)$$

Kde V je objem zkoumaného tělesa, f je frekvence procházejícího proudu a S_h představuje velikost plochy statické hysterezní smyčky.



Obr. 7-1: Hysterezní smyčky magneticky tvrdého a měkkého materiálu

7.1.2 Ztráty vířivými proudy

Ztráty způsobené vířivými proudy nelze oproti hysterézním ztrátám vyjádřit jednoduchou rovnicí, jelikož tyto proudy neprocházejí celým objemem tělesa a nejsou ve všech místech stejné. Jejich velikost v různých vrstvách ohřívaného objektu závisí na permeabilitě μ_r objektu a na velikosti magnetické indukce B .

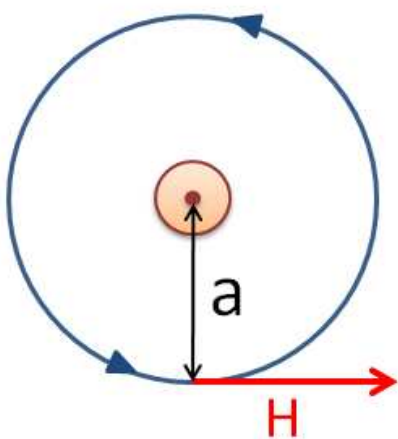
Vztah mezi ztrátami způsobenými vířivými proudy a magnetickým polem je příhodnější popisovat pomocí veličiny intenzity magnetického pole H , která je spjatá s velikostí magnetické indukce podle vztahu:

$$B = H \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \quad (7.2)$$

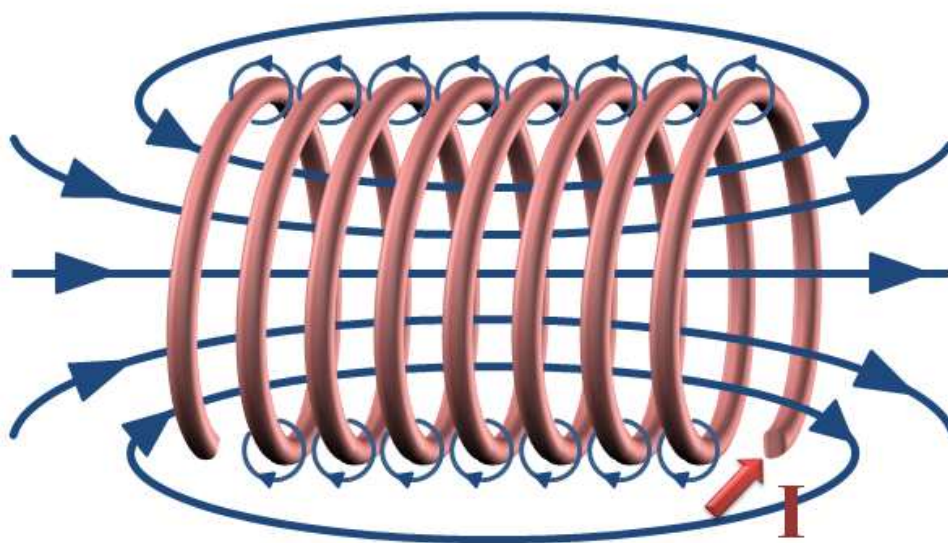
Pomocí této veličiny lze vyjádřit velikost magnetického pole v závislosti na faktorech, které pole vytvářejí a nezávisle na parametrech prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno. Intenzita magnetického pole je vektorová veličina a její směr je udáván směrem elektrického proudu procházejícího vodičem, vytvářejícím ve svém okolí magnetické pole. Intenzita magnetického pole v daném bodě od přímého vodiče je dána vztahem:

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot a} \quad (7.3)$$

Kde I je velikost proudu procházejícího vodičem a a je vzdálenost zkoumaného bodu od středové osy vodiče. Směr vektoru intenzity magnetického pole pak vychází z pravidla pravé ruky podle následujícího obrázku.

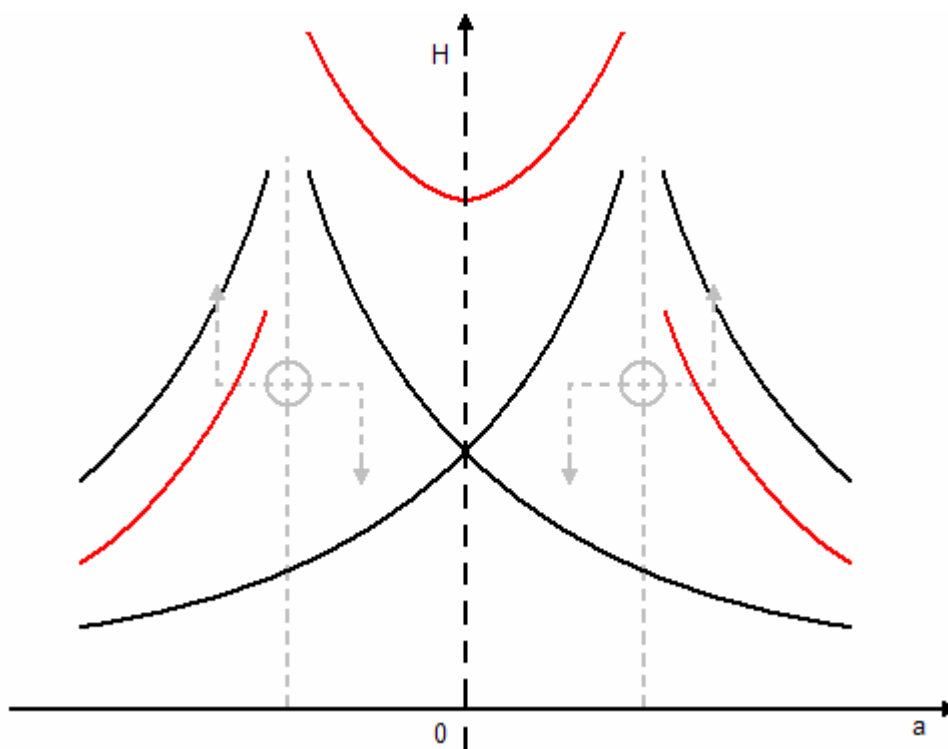


Obr. 7-2: Intenzita magnetického pole ve vodiči [11]



Obr. 7-3: Siločáry magnetického pole v cívkce [11]

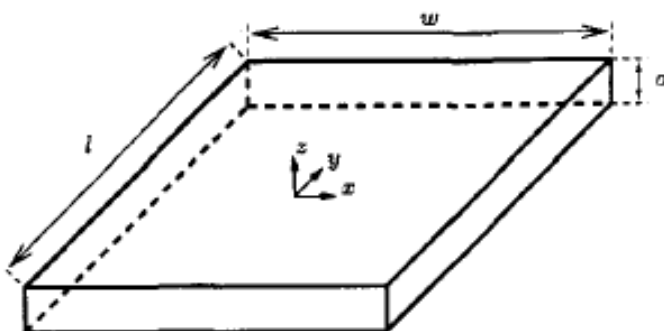
Vlivem procházejícího proudu cívkou mají podle obrázku Obr. 7-2: indukční čáry intenzity magnetického pole stejný směr a navzájem se sčítají. Oproti tomu vně cívky dochází k jejich vzájemnému rušení a magnetické pole vně cívky je tak mnohem menší, než v jeho středu. Díky nepřímé úměrnosti intenzity magnetického pole lze určit, že v těsné blízkosti vodičů cívky bude intenzita magnetického pole vyšší, než v jejím středu, ale stejně tak bude nejvyšší uprostřed vinutí cívky a směrem k počátku a konci vinutí bude slábnout.



Obr. 7-4: Rozložení intenzity magnetického pole uvnitř a vně cívky

Běžná metoda vyjádření vířivých proudů vychází z časově závislého 2D modelu konečných prvků. Tato metoda se ovšem využívá jen pro přímé vodivé objekty a nepočítají s okrajovými vlivy, působícími na zkoumaný objekt. Proto vznikla metoda 1D a 2D modelů s konečným počtem prvků v jednotlivých vrstvách objektu, která zahrnuje i vlivy okrajových podmínek a vliv saturace.

Uvažujme vodivou vrstvu o šířce w , délce l a tloušťce d , orientovaných podle souřadnicového systému podle obrázku Obr. 7-5:, kde počáteční bod souřadnicového systému leží ve středu zkoumané vrstvy. výpočet dále pracuje s předpokladem, že vodivá vrstva je magneticky izotropní, nehysterézní a jeho vodivost je konstantní.



Obr. 7-5: Popis souřadnicového systému elektrické vrstvy [12]

Problematika vířivých proudů se řídí následujícími diferenciálními rovnicemi a dílčími fyzikálními zákony:

$$\bar{\nabla} \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}; \quad \bar{\nabla} \times \bar{H} = \bar{J}; \quad \bar{\nabla} \cdot \bar{B} = 0 \quad (7.4)$$

$$\bar{J} = \sigma \bar{E}; \quad \bar{B} = \mu(H^2)\bar{H} \quad \text{nebo} \quad \bar{H} = \nu(B^2)\bar{B} \quad (7.5)$$

Permeabilita μ a reluktivita $\nu = \mu^{-1}$ vodivé vrstvy materiálu jsou funkcemi H^2 , respektive B^2 .

Systémy rovnic mohou být řešeny numericky nebo analyticky pomocí vektoru intenzity magnetického pole nebo pomocí magnetického vektorového potenciálu [12].

1D model [12]:

Uvažujme šíření magnetického toku paralelní k rovině xy . Toto pole může nebo nemusí být otáčivé, tedy mezi magnetickým tokem v ose x může být fázový posuv oproti toku v ose y . Pokud délka a šířka vrstvy je mnohonásobně větší, než její tloušťka, lze při výpočtu zanedbat okrajové vlivy, tedy hodnoty vektorů $\bar{E}$, $\bar{J}$, $\bar{B}$ a $\bar{H}$ budou závislé pouze na poloze v ose z a na čase t .

Využitím numerického řešení s ohledem na energie v systému je hodnota energie P na časovou jednotku, dodávaná do zkoumaného objemu rovna integrálu Poyntingovu vektoru $\bar{H} \times \bar{E}$ přes povrch vrstvy ∂V . Uplatněním věty o divergenci a za předpokladu, že platí:

$$\bar{\nabla} \cdot (\bar{H} \times \bar{E}) = (\bar{\nabla} \times \bar{H}) \cdot \bar{E} - (\bar{\nabla} \times \bar{E}) \cdot \bar{H} \quad (7.6)$$

Mohou být ztráty rozděleny do dvou částí:

$$P = \int_{\partial V} (\bar{H} \times \bar{E}) \cdot \bar{n} ds = \int_V \bar{J} \cdot \bar{E} dv + \int_V \bar{H} \cdot \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} dv \quad (7.7)$$

První integrál lze považovat za ztráty vířivými proudy a druhý lze použít v případě periodického uvolňování energie, která je spjata s vlivem hystereze. Jelikož v počátku byla vyslovena podmínka, že v materiálu nedochází k hysterezi, nejsou v tomto výpočtu žádné úniky energie.

za předpokladu symetrie problému v ose z může být ztrátový výkon vyjádřen pomocí intenzity magnetického pole H na povrchu vrstvy a magnetické indukce B v příčném řezu vrstvy vyjádřeno vztahem:

$$P = V \bar{H}^s \cdot \frac{\partial \bar{B}^a}{\partial t} \quad (7.8)$$

kde:

$$\bar{H}^s(t) = \bar{H}(z = d/2, t) = \bar{H}(z = -d/2, t) \quad (7.9)$$

$$\bar{B}^a(t) = \frac{1}{d} \int_{-d/2}^{d/2} \bar{B}(z, t) dz \quad (7.10)$$

2D model [12]:

Výpočet dvojrozměrného modelu není tak snadný jako výpočet modelu jednorozměrného a mimo jiné na směr magnetického pole je závislý i na frekvenci magnetického pole. Tento model se využívá v případě, kdy zkoumaná vrstva dosahuje poměrů stran $w/d < 10$.

V případě neuvažování energetických ztrát do okolí jdou vektory magnetické indukce a intenzity magnetického pole závislé na umístění v souřadnicích roviny xy a na čase t . Proudová hustota je orientovaná podle osy z . Takovýto model pak vede k soustavě diferenciálních rovnic:

$$\bar{S} \cdot \bar{A} = \bar{T} \cdot \frac{d\bar{A}}{dt} = F(\bar{I}_{str}, \bar{U}_{mas}) \quad (7.11)$$

kde $\bar{A}$ je vektor závislý na vektoru magnetického potenciálu a $\bar{S}$ a $\bar{T}$ na tuhostních a vodivostních maticích materiálu. Pravá strana rovnice závisí na vektorech proudů $\bar{I}_{str}$ ve vodičích se složeným jádrem a napětí $\bar{U}_{mas}$ ve vodičích s plným jádrem.

7.1.3 Mechanické a energetické parametry cívky

Základním parametrem magnetické cívky, od kterého se odvozuje většina vztahů s cívkou spjatá, je její vlastní indukčnost L . Velikost vlastní indukčnosti cívky není závislá na elektrických parametrech připojeného obvodu, ale na vlastních rozměrech a typu konstrukce cívky. Pro výpočet vlastní indukčnosti cívky platí vztah:

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}{l} \quad (7.12)$$

Kde N značí počet závitů cívky, l je délka cívky a S je velikost průřezu cívky. Relativní permeabilita μ_r určuje magnetické vlastnosti jádra cívky.

V obvodech střídavého proudu způsobuje indukčnost pasivních prvků pokles amplitudy a efektivní hodnoty proudů a způsobuje zpoždění fáze proudu za napětím. Podle docenta Szekelyho lze odvodit přibližný vzorec pro výpočet vzduchových cívek. Jeho odvozování vychází z Maxwellových rovnic. U vzduchové cívky záleží také na tom, zda závity cívky tvoří jednu, nebo více vrstev.

Pro jednovrstvou cívku potom platí vztah:

$$N = \sqrt{\frac{(25l + 23R)L}{R^2}} \quad (7.13)$$

kde rozměry l a R (poloměr cívky) jsou udávány v centimetrech a výsledná indukčnost cívky pak vychází v jednotkách μH .

Pro vícevrstvou cívku platí vztah:

$$N = \sqrt{\frac{(19l + 28R + 31b)L}{R^2}} \quad (7.14)$$

kde R tentokrát značí střední poloměr cívky a b je šířka vinutí cívky.

Energie magnetického pole cívky vychází z elektrických parametrů této cívky, tedy z indukčnosti a velikosti elektrického proudu, který cívkou prochází. Obecně je velikost energie magnetického pole dána vztahem [13]:

$$W_m = \frac{1}{2} \phi \cdot I = \frac{1}{2} L \cdot I^2 \quad (7.15)$$

Pro cívky s uzavřeným jádrem však není závislost magnetického indukčního toku Φ lineární na velikosti proudu a pro výpočet energie by bylo třeba použít vyšší matematiku.

7.2 Autotransformátor

Transformátory jsou zařízení pracující se střídavými proudy na základě principu elektromagnetické indukce. Slouží k přenosu elektrické energie z jednoho obvodu do druhého pomocí cívek. Při tomto přenosu může docházet ke změně velikosti napětí v závislosti od poměru počtu závitů mezi jednotlivými cívkami.

Výhodou transformátorů je galvanické oddělení dvou vedení, které mohou sloužit především jako filtry rychlých přechodových jevů a jiných nežádoucích impulsních stavů, které mohou v obvodech nastávat.

Transformátory mají v praxi velké množství využití, ať už se jedná o transformaci napětíové hladiny, galvanická oddělení, měření elektrických veličin nebo regulaci napájecího napětí nebo změnu fázového posuvu napětí pomocí sério-paralelního zapojení transformátorů, které se využívá k řízení výkonových toků v obvodech (Phase Shifting Transformers).

7.2.1 Ztráty v transformátoru

V rámci ideálního transformátoru dochází k bezeztrátovému přenosu elektrické energie z jedné cívky na druhou. O ideálním transformátoru lze mluvit za předpokladu, platí-li tři základní podmínky:

- Nulové ztráty uvnitř transformátoru,
- nulový rozptyl (činitel vazby $k = 1$),
- Nulový magnetický odpor jádra ($R_M = 0$)

Za těchto předpokladů platí pro indukované napětí na svorkách transformátoru:

$$u_{i1,2} = \frac{d\Phi_{\Sigma 1,2}}{dt} \quad (7.16)$$

V případě nulového rozptylu lze pak tento vztah upravit do následující podoby:

$$u_{i1,2} = N_{1,2} \frac{d\Phi}{dt} \quad (7.17)$$

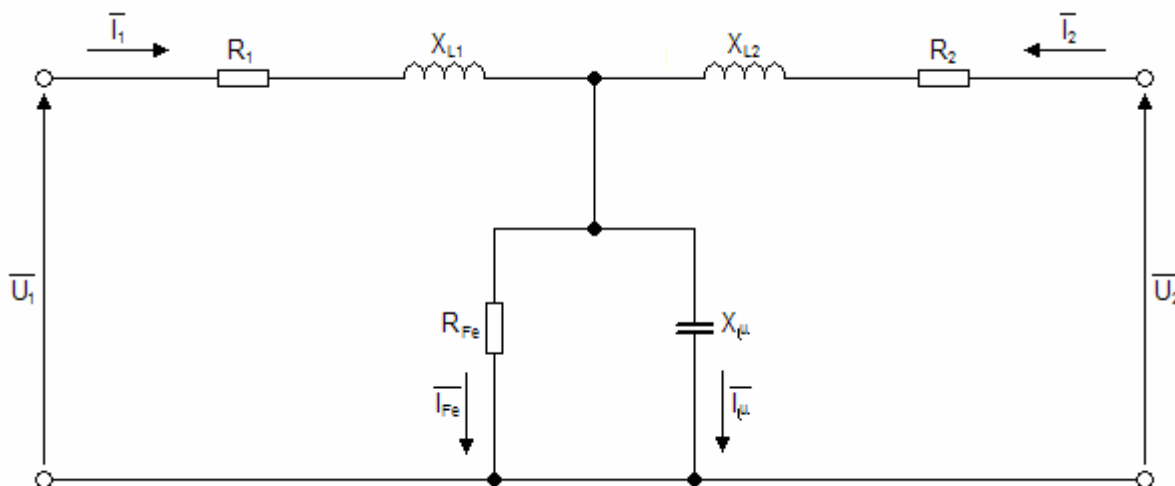
Pro harmonické průběhy napětí na cívkách transformátoru potom pro velikost indukovaného napětí platí vztah:

$$U_i = 4,44 \cdot \Phi_m \cdot f \cdot N \quad (7.18)$$

Celkový výkon transformátoru je roven součtu všech výkonů, které do obou vinutí vstupují. V ideálním transformátoru však platí, že součet těchto výkonů je roven nule, tedy výkony, které do transformátoru na jedné straně vstupují, jej na druhé straně beze zbytku opouští.

$$P = P_1 + P_2 = 0 \quad (7.19)$$

U skutečného transformátoru ovšem nelze zanedbat vliv magnetického odporu jádra, elektrického odporu vinutí, ani rozptylové indukčnosti. Náhradní schéma skutečného transformátoru je zakresleno na obrázku Obr. 7-6:



Obr. 7-6: Náhradní schéma transformátoru

Ztráty transformátoru lze dělit na dvě základní složky a to na ztráty v příčné složce náhradního schématu a ztráty v podélné složce. Jejich vliv na celkový přenášený výkon lze matematicky určit a prakticky změřit pomocí měření transformátoru ve stavu nakrátko a naprázdno [14].

Měření nakrátko:

Měření nakrátko potlačuje vliv ztrát v příčné složce transformátoru a do celkových ztrát se tedy zahrnují jen ztráty v cívkách transformátoru. proto jsou tyto ztráty označovány jako ztráty v mědi.

Měření nakrátko probíhá při napájení ze strany vyššího napětí se zkratovanými svorkami na straně nižšího napětí. Strany vyššího napětí je pak napájena sníženou hodnotou U_{1k} tak, aby obvodem procházel elektrický proud I_{1k} rovný jmenovité hodnotě proudu I_{1n} . Velikost tohoto napětí dosahuje hodnot v rozmezí 3% až 10% jmenovité hodnoty napětí. Díky tomu je tok v jádře transformátoru velmi malý a lze jej při výpočtu zanedbat.

Výsledný měřený činný výkon P_k lze pak považovat za celkové ztráty ve vinutí transformátoru, označovány jako ztráty v mědi.

Činný odpor soustavy pak lze určit pomocí vztahu [14]:

$$R_{1k} = (R_1 + R_2') = \frac{P_k}{I_{1n}^2} \quad (7.20)$$

Měření naprázdno:

Při měření naprázdno je jedna strana vinutí transformátoru ponechána v rozpojeném stavu a tudíž v ní neprochází elektrický proud. Přenos elektrické energie se potom uzavírá přes příčnou složku transformátoru.

Napětí na příčné složce transformátoru lze matematicky vyjádřit přes úbytek napětí na cívce transformátoru:

$$\overline{U}_{1i} = \overline{U}_{10} - \overline{\Delta U} = \overline{U}_{10} - R_1 \overline{I}_{10} - jX_{r1} \overline{I}_{10} \quad (7.21)$$

Toto indukované napětí lze podle vztahu 7.18 definovat i jako:

$$U_{1i} = 4,44 \cdot \Phi_{hm} \cdot f_1 \cdot N_1 = j \cdot X_\mu \cdot I_{10} \quad (7.22)$$

Kde X_μ je magnetizační reaktance a Φ_{hm} je amplituda hlavního magnetického toku, na kterém závisí jak velikost ztrát v jádře transformátoru, tak stupeň nasycení jádra. Činné ztráty v jádře transformátoru jsou ve schématu znázorněny paralelně k magnetizační reaktanci jako R_{Fe} a je to v podstatě souhrn hysterézních ztrát a ztrát vířivými proudy, popsanych v předchozí kapitole.

Měření naprázdno probíhá obvykle ze strany nižšího napětí při rozpojených svorkách vyššího napětí, za jmenovité hodnoty napětí transformátoru. Při měření prochází soustavou poměrně nízký proud naprázdno, dosahující hodnot od 0,5% do 10% hodnoty jmenovitého proudu. Měřený příkon P_0 pak představuje ztráty transformátoru v železe [14].

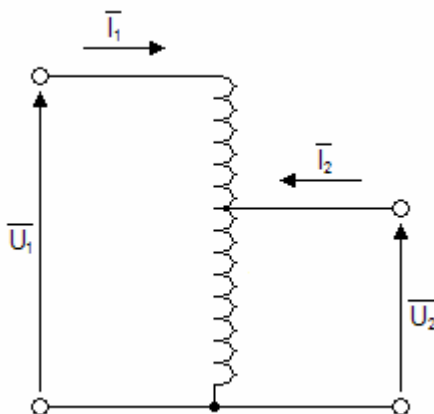
$$P_0 = \frac{U_{1n}^2}{R_{Fe}} \quad (7.23)$$

7.2.2 Popis autotransformátoru

Autotransformátor je zvláštní druh transformátoru, kde je pro primární i sekundární vinutí obvodu využita stejná cívka. Dochází tím k velké úspoře materiálu při výrobě. Autotransformátor má díky své konstrukci především jako hlavní výhodu možnost plynulé regulace napětí na sekundární straně transformátoru, která se pohybuje v rozmezí od 0% do 120% jmenovitého napětí na primární straně.

Primární strana je tvořena cívkou s neměnným počtem závitů, sekundární strana bývá konstruována tak, že s primární cívkou má jeden společný vývod, druhý vývod je realizován pomocí pevného vývodu s odbočkami nebo posuvného jezdce. Nastavením jezdce nebo přepínáním odboček lze následně měnit počet závitů na sekundární cívce a tím i převod transformátoru.

Principiální schéma zapojení autotransformátoru je zobrazeno na obrázku Obr. 7-7:



Obr. 7-7: Principiální zapojení autotransformátoru

Hlavní nevýhodou autotransformátoru je skutečnost, že přímé propojení obou cívek neposkytuje galvanické oddělení primární a sekundární strany obvodu, autotransformátor tedy nelze použít jako ochranu proti impulsním jevům.

Autotransformátor lze konstruovat v jednofázovém i třífázovém provedení. Základní výhodou je především úspora místa a financí. Druhou nespornou výhodou je možnost plynulé regulace pro najíždění některých strojů nebo při potřebě přesné hodnoty napájecího napětí pro některá měření.

7.3 Kompenzační baterie

Kompenzační baterie je tvořena kondenzátory zapojenými do obvodu paralelně nebo sériově tak, aby vylepšily poměry v síti. Velkou výhodou kondenzátorů je skutečnost, že jejich charakter je téměř čistě jalový. ztráty činného výkonu v kompenzačních bateriích zpravidla nepřesahují velikost 0,5% jmenovité hodnoty zdánlivého výkonu kondenzátoru. Vliv činné složky kondenzátoru lze tedy bez větších nepřesností naprosto zanedbat.

Základní veličinou, charakterizující vlastnosti kondenzátoru, je jeho kapacita C . Tato veličina charakterizuje velikost energie, kterou je schopen kondenzátor pojmout dle vztahu:

$$W = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (7.24)$$

Kapacita vodiče není přímo úměrná velikosti jeho reaktance, jako tomu je u cívek a jejich indukčnosti, nýbrž odpovídá velikosti jejich susceptance, což je převrácená hodnota reaktance. Proto pro sčítání kondenzátorů platí opačná pravidla, jako pro sčítání odporů nebo cívek.

Paralelní řazení kondenzátorů:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (7.25)$$

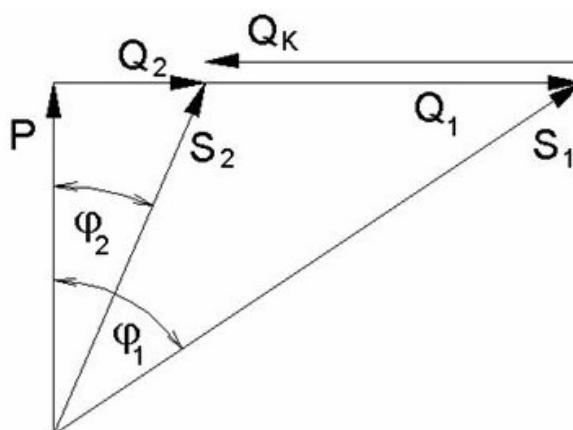
Sériové řazení kondenzátorů:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (7.26)$$

V našem případě je pro danou laboratorní úlohu k dispozici soubor čtyř kondenzátorů o velikosti 500nF, s možností sério-paralelního řazení, což dává velký počet možností k dobrému nastavení kompenzace.

7.3.1 Paralelní kompenzace

Paralelní kompenzace slouží ke snížení jalového a tedy i zdánlivého výkonu soustavy za neměnné složky činného výkonu. Zvyšuje se tak především hodnota účinníku soustavy $\cos\varphi$, což má za následek menší úbytky napětí na vedení a tedy i zvýšení účinnosti přenosu elektrické energie. V ideálním případě je vhodné nastavovat velikost kompenzace tak, aby byl účinník soustavy roven 1, ale z ekonomických důvodů se soustavy kompenzují na hodnotu účinníku 0,95.



Obr. 7-8: Paralelní kompenzace jalové složky

Pro velikost zdánlivého výkonu před kompenzací platí vztah:

$$S_1 = P - jQ_1 \quad (7.27)$$

Po připojení kondenzátoru se tento vztah upraví do podoby:

$$S_2 = P - jQ_2 \quad (7.28)$$

Kde velikost činného výkonu zůstává stejná. Změní se jen velikost jalové složky:

$$Q_2 = Q_n - Q_k \quad (7.29)$$

7.4 Měřicí přístroje

Jako každý mechanismus, i měřicí přístroje nemohou být stoprocentně přesné a při měření elektrických veličin v obvodu dochází k odchylce od skutečného stavu. Tyto odchylky mohou při dalších matematických výpočtech vést k navýšení chyby a může tak dojít k překročení dovolené odchylky od ideálního stavu.

Pro měření teploty jádra kabelu byly využity dva přístroje, jejichž parametry přímo ovlivňují přesnost měření a proto je důležité znát jejich princip, aby bylo možné posoudit přesnost daného měření. Ampérmetr a wattmetr, zapojené v primárním obvodu, ukazují pouze orientační hodnoty, které pro samotné měření nejsou přímo důležité, proto není třeba se jejich vlivy blíže zabývat.

Vzhledem k tomu, že ohříváním kabelem protékají značné proudy, řádově v tisících ampér, vzniká kolem vodiče poměrně velké magnetické pole. Toto pole ve vzduchovém prostředí velmi rychle slábne a většina přístrojů je konstruována tak, aby jejich přesnost nebyla magnetickým polem ovlivněna, přesto existuje doporučení, aby měřicí přístroje byly umísťovány ve vzdálenosti nejméně 30 - 50 cm od vodiče s vysokým protékajícím proudem a stejně tak mezi sebou navzájem.

7.4.1 Trojfázový výkonový analyzátor DW-6092

Trojfázový výkonový analyzátor DW-6092 je multifunkční přístroj, sloužící k měření velké škály elektrických veličin v jednofázových, ale i třífázových obvodech. Jeho konstrukce však neumožňuje přímé měření odporu a při jeho určování tak dochází k zanášení velkého počtu chyb do konečného výsledku. Přehled přesností měření jednotlivých veličin, potřebných k určení výsledné teploty jádra, uvádějí následující tabulky.

Rozsah	Rozlišení	Přesnost
10.0V – 600.0V	0.1V	$\pm(0.5\%+0.5V)$

Tab. 7-1: Údaje o přesnosti měření napětí [15]

Rozsah	Rozlišení	Přesnost
20A	0.001A < 10A	$\pm(0.5\%+0.1A)$
	0.01A $\geq$ 10A	
200A	0.01A < 100A	$\pm(0.5\%+0.5A)$
	0.1A $\geq$ 100A	
1200A	0.1A < 1000A	$\pm(0.5\%+5A)$
	1A $\geq$ 1000A	

Tab. 7-2: Údaje o přesnosti měření proudu [15]

Rozsah	Rozlišení	Přesnost
0.000kW – 9.999kW	0.001/0.01/0.1kW	$\pm(1\%+0.008\text{kW})$
10.00kW – 99.99kW	0.01/0.1kW	$\pm(1\%+0.08\text{kW})$
100.0kW – 999.9kW	0.1kW	$\pm(1\%+0.8\text{kW})$
1000kW – 9.999MW	0.001MW	$\pm(1\%+0.008\text{MW})$

Tab. 7-3: Údaje o přesnosti měření činného výkonu [15]

Výpočet maximální odchylky výsledné teploty od skutečnosti:

Ze zkušebního měření, popsaného v kapitole 6, známe přibližné hodnoty proudů a napětí, procházející ohříváním kabelem a můžeme tak určit rozsahy přesností měřených veličin. Víme, že výsledný proud se pohybuje v oblasti 1kA, činný výkon kabelu nepřesahuje hodnotu 10kW a napětí se pohybuje kolem minimální hranice, potřebné pro správnou funkci wattmetru, tedy nad 10V. Z údajů v datasheetu proto lze vybrat potřebné údaje přesností měření jednotlivých veličin:

Měřená veličina	Rozsah naměřených hodnot	Přesnost
U	11-12.5V	$\pm(0.5\%+0.5\text{V})$
I	902.4-1079A	$\pm(0.5\%+5\text{A})$
P	8.7-9.7kW	$\pm(1\%+0.008\text{kW})$

Tab. 7-4: Přesnost měřených veličin v použitých rozsazích

U výsledných hodnot je výhodou, že všechny hodnoty se pohybují pouze v jednom rozsahu přesnosti dané veličiny a není tedy potřeba uvažovat s více rozsahy.

Pro určení výsledné teploty ϑ_1 je potřeba znát hodnotu odporu R_0 na začátku měření a aktuální hodnotu odporu R_1 při dané teplotě podle vztahu 6.5.

$$\vartheta_1 = \frac{R_1 - R_0}{R_0 \cdot \alpha} + \vartheta_0 \quad (7.30)$$

Tyto hodnoty lze určit dvojím způsobem a to buď podle vztahu 6.7 a nebo výpočtem pomocí elektrického proudu.

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (7.31)$$

Proto je nejprve nutné porovnat, zda bude výhodnější použít metodu měření elektrického proudu nebo napětí, jelikož tato hodnota ovlivňuje přesnost měření nejvíce, protože výsledný odpor je na proud i napětí závislý s jejich druhou mocninou.

Pro porovnání relativní chyby měření proudu a napětí tedy vezmeme odchylku od minimální naměřené hodnoty z prvního měření:

$$I_0 = 902,4 \text{ A} \quad U_0 = 11 \text{ V}$$

Do těchto hodnot dosadíme maximální odchylku z rozsahu přesností a určíme procentní chybu:

$$\delta_I = \frac{I_0 - (0,005I_0 + 5 \text{ A})}{I_0} = \frac{902,4 - (0,005 \cdot 902,4 + 5 \text{ A})}{902,4} = 0,9895$$

$$\delta_U = \frac{U_0 - (0,005U_0 + 0,5 \text{ V})}{U_0} = \frac{11 - (0,005 \cdot 11 + 0,5 \text{ V})}{11} = 0,9495$$

Z vypočtených hodnot je jasné, že naměřené hodnoty proudu jsou o čtyři procenta přesnější, než hodnoty napětí a do výpočtu se tedy bude vnášet mnohem menší chyba při výpočtu činného odporu přes hodnoty proudu.

Při teoretickém výpočtu pro určení odchylky není důležité, kterou hodnotu zvolíme, jako skutečnou a kterou, jako měřenou, proto při výpočtu lze vycházet z předpokladu, že hodnoty naměřené, jsou hodnotami přesnými a odchylky přístrojů potom dosadit až do výpočtu odchylky. Dále k výpočtu není potřeba určovat počáteční ani koncovou teplotu, stačí určit jejich rozdíl Δt . Pro vyloučení matematické chyby při zaokrouhlování, jsou uváděné hodnoty vypočteny s přesností na velký počet desetinných míst.

Pro námi zvolené hodnoty tedy platí:

$$R_0 = \frac{P_{Z0}}{I_0^2} = \frac{P_0}{I_0^2} = \frac{8700}{1079^2} = 0,00373634 \Omega$$

$$R_1 = \frac{P_{Z1}}{I_1^2} = \frac{P_1}{I_1^2} = \frac{9600}{902,4^2} = 0,00589445 \Omega$$

Pro výsledný rozdíl teplot potom platí:

$$\Delta \vartheta = \frac{R_1 - R_0}{R_0 \cdot \alpha} = \frac{0,00589445 - 0,00373634}{0,00373634 \cdot 0,00377} = 153,20955^\circ \text{C}$$

Nyní je třeba určit maximální odchylku naměřené teploty od teploty skutečné. Pomocí teoretické úvahy lze říct, že maximální odchylka ve výpočtu teploty ze vzorce 7.30 nastane tehdy, bude-li nabývat čitatel co nejvyšších hodnot a jmenovatel co nejnižších, nebo obráceně. Pokud by se čitatel a jmenovatel klonily oba k vyšším hodnotám, vzájemné odchylky by se navzájem vyrušovaly. Proto tedy můžeme zvolit, že chceme, aby R_0 nabývalo nejnižší možné hodnoty s možnou odchylkou od skutečného odporu a R_1 nejvyšší.

Pro nejnižší možnou hodnotu odchylky od skutečné hodnoty odporu R_0 je potřeba předpokládat nejnižší možnou odchylku výkonu P_0 a nejvyšší možnou odchylku proudu I_0 .

$$R_{0k} = \frac{\frac{P_0 - (0,01P_0 + 8W)}{2}}{[I_0 + (0,005I_0 + 5A)]^2} = \frac{\frac{8700 - (0,01 \cdot 8700 + 8W)}{2}}{[1079 + (0,005 \cdot 1079 + 5A)]^2} = 0,003625352\Omega$$

A pro odpor R_1 platí podobný postup, jen s opačnými extrémy výkonu a proudu:

$$R_{1k} = \frac{\frac{P_1 + (0,01P_1 + 8W)}{2}}{[I_1 - (0,005I_1 + 5A)]^2} = \frac{\frac{9600 + (0,01 \cdot 9600 + 8W)}{2}}{[902,4 - (0,005 \cdot 902,4 + 5A)]^2} = 0,006085928\Omega$$

Z těchto hodnot pak zbývá určit výsledný rozdíl teplot s maximální odchylkou:

$$\Delta\vartheta_k = \frac{R_{1k} - R_{0k}}{R_{0k} \cdot \alpha} = \frac{0,006085928 - 0,003625352}{0,003625352 \cdot 0,00377} = 180,0302^\circ\text{C}$$

Relativní chyba maximální odchylky měřené a skutečné teploty pak lze určit pomocí snadného výpočtu:

$$\delta_{\Delta\vartheta} = \frac{|\Delta\vartheta - \Delta\vartheta_k|}{\Delta\vartheta} = \frac{|153,20955 - 180,0302|}{153,20955} = 0,175059 = 17,5059\%$$

Meze spodní relativní hodnoty chyby nemusejí být stejné, proto je dobré výpočet zopakovat i s opačnými extrémy chyb. V takovém případě bude pro oba odpory platit výpočet:

$$R_{0k} = \frac{\frac{P_0 + (0,01P_0 + 8W)}{2}}{[I_0 - (0,005I_0 + 5A)]^2} = \frac{\frac{8700 + (0,01 \cdot 8700 + 8W)}{2}}{[1079 - (0,005 \cdot 1079 + 5A)]^2} = 0,003850982\Omega$$

$$R_{1k} = \frac{\frac{P_1 - (0,01P_1 + 8W)}{2}}{[I_1 + (0,005I_1 + 5A)]^2} = \frac{\frac{9600 - (0,01 \cdot 9600 + 8W)}{2}}{[902,4 + (0,005 \cdot 902,4 + 5A)]^2} = 0,005709589\Omega$$

Z těchto hodnot pak zbývá určit výsledný rozdíl teplot s maximální odchylkou:

$$\Delta\vartheta_k = \frac{R_{1k} - R_{0k}}{R_{0k} \cdot \alpha} = \frac{0,005709589 - 0,003850982}{0,003850982 \cdot 0,00377} = 128,0191^\circ\text{C}$$

Zbývá už jen dopočíst relativní odchylku měření:

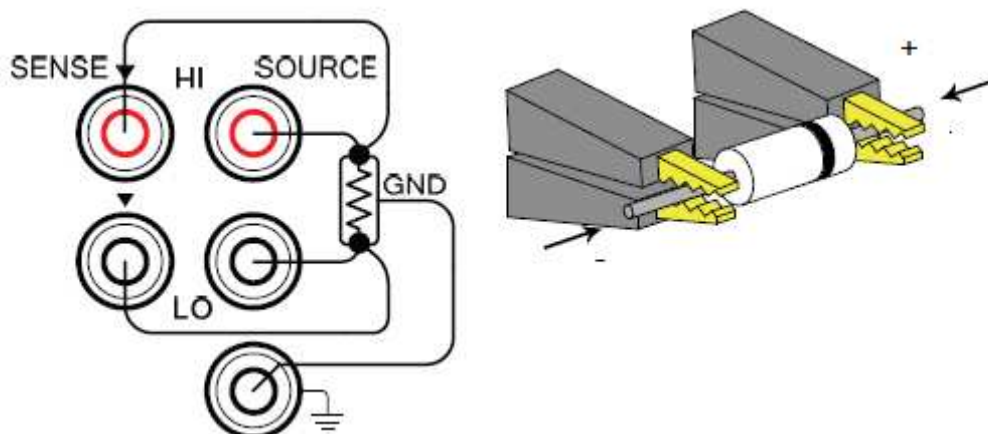
$$\delta_{\Delta\vartheta} = \frac{|\Delta\vartheta - \Delta\vartheta_k|}{\Delta\vartheta} = \frac{|153,20955 - 128,0191|}{153,20955} = 0,164418 = 16,4418\%$$

Tato chyba se může zdát velmi vysoká a při měření vyšších teplot může znamenat odchylku od skutečné teploty i o desítky stupňů, je však ale nutno podotknout, že pro dosažení takového odchylky bylo potřeba sjednotit velké množství náhodných faktorů a že skutečná chyba má velmi nízkou pravděpodobnost dosažení této hodnoty. Navíc při kontinuálním měření vzniká průběžný graf, který podobný skok od průměrných hodnot snadno odhalí.

7.4.2 Miliohmometr Gom-802

Běžné kabely VN mají velké průřezy v řádu desítek a stovek milimetrů čtverečních. I v běžném venkovním vedení o délce desítek kilometrů představuje takový kabel velmi malý odpor. Při měření v laboratorních podmínkách, kdy se délka zkoumaného kabelu pohybuje v řádu jednotek metrů, dosahuje vnitřní odpor hodnot v řádu jednotek miliohmů.

U měření velmi malých odporů pomocí dvou vodičů vzniká velká chyba měření vlivem přechodového odporu, odporu samotných vodičů nebo termoelektrickým napětím. Pro vyloučení těchto vlivů se pro měření takových odporů využívá Kelvinova metoda zapojení pomocí čtyř vodičů. Miliohmometr typu Gom-802 pracuje na principu čtyřvodičového měření odporu.



Obr. 7-9: Princip čtyřvodičového zapojení ohmmetru [16]

Velkou výhodou v přesnosti tohoto měření je skutečnost, že měření probíhá bez průchodu elektrického proudu soustavou, tedy zkoumaný kabel není ovlivňován žádnými chybami, vyplývajícími z vlivů elektrického a magnetického pole obvodu a měření odporu je zatíženo pouze vlastní chybou měřicího přístroje.

Výpočet maximální odchylky výsledné teploty od skutečnosti:

Z orientačního měření byly určeny tyto hodnoty odporů:

$$R_0 = 0,003737\Omega$$

$$R_1 = 0,006241\Omega$$

Výsledný rozdíl naměřených teplot vychází přímo z odporů určených měření:

$$\Delta \vartheta = \frac{R_1 - R_0}{R_0 \cdot \alpha} = \frac{0,006241 - 0,003737}{0,003737 \cdot 0,00377} = 174,2058^\circ\text{C}$$

Nyní dosadíme do výpočtu odchylky měřicího přístroje se stejnou orientací, jako v předchozím příkladě:

$$R_{0k} = R_0 + (0,001R_0 + 0,000006\Omega) = 0,003737 + (0,001 \cdot 0,003737 + 0,000006\Omega) = 0,003762633\Omega$$

$$R_{1k} = R_1 + (0,001R_1 + 0,000006\Omega) = 0,006241 + (0,001 \cdot 0,006241 + 0,000006\Omega) = 0,006253241\Omega$$

Z těchto hodnot pak zbývá určit výsledný rozdíl teplot s maximální odchylkou:

$$\Delta \vartheta_k = \frac{R_{1k} - R_{0k}}{R_{0k} \cdot \alpha} = \frac{0,006253241 - 0,003762633}{0,003762633 \cdot 0,00377} = 175,5788^\circ\text{C}$$

Relativní chyba maximální odchylky měřené a skutečné teploty pak lze určit pomocí snadného výpočtu:

$$\delta_{\Delta \vartheta} = \frac{|\Delta \vartheta - \Delta \vartheta_k|}{\Delta \vartheta} = \frac{|174,2058 - 175,5788|}{174,2058} = 0,00788 = 0,788\%$$

7.5 Výkonový jistič

Výkonový jistič v této úloze slouží nejen jako nadproudová ochrana, ale i jako spínač potřebný pro rozpojení a opětovné sepnutí obvodu v případě měření pomocí miliohmmetru. Z elektrického hlediska jistič nezatěžuje měření žádnou chybou, ale při průchodu elektrického proudu kabelem dochází k ohřevu samotného jističe. Jelikož jsou kontakty měřicího přístroje umístěny v těsné blízkosti, nebo i na svorkách jističe, které mají v danou chvíli měření jinou teplotu a samozřejmě i elektrický odpor, než jádro kabelu, může docházet k ovlivnění měření a vzniku odchylky výsledné teploty.

Proudová dráha jističe se může zdát v porovnání s kabelem malá, ale při působení vysokých oteplovacích proudů, které procházejí obvodem, může jistič znamenat nezanedbatelnou složku oteplení. Velikost odporu proudové dráhy výkonového jističe se může pohybovat v řádu stovek mikrohmů. Při působení proudů o velikosti 1kA zde mohou vznikat poměrně významné Jouleovy ztráty.

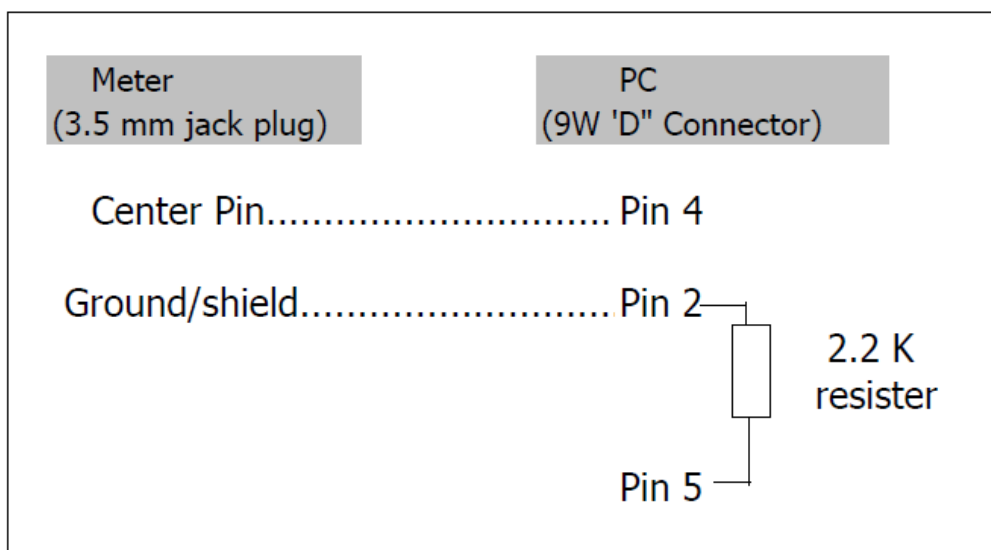
Při tomto měření byl využit výkonový jistič typu Modeion BH630NE305 od firmy OEZ.

8 POSTUP LABORATORNÍHO MĚŘENÍ

Pro praktické měření ohřevu kabelu byla vybrána metoda měření činného výkonu pomocí wattmetru DW-6092. Ačkoli je tato metoda méně přesná vzhledem k výsledným hodnotám naměřených teplot, poskytuje uživateli podrobnější informace o rychlosti ohřevu kabelu a dosažení ustálené teploty. Proto je možné při zapojování obvodu podle schématu na obrázku Obr. 6-1: možné vynechat zapojení výkonového jističe a miliohmmetru a konce kabelu spojit nakrátko do smyčky, ale je také možné tyto přístroje v zapojení ponechat a použít například pro kontrolní měření počáteční a konečné teploty, nebo k měření ochlazovací křivky kabelu, jelikož pomocí wattmetru není možné měřit ochlazovací křivku přirozeného ochlazování.

Před samotným měřením je dobré nastavit příslušnou kompenzaci kondenzátoru na účinník blízký jedné při průchodu nízkého proudu, aby nedocházelo k oteplování vodiče. Během samotného měření není s kompenzací dále manipulovat, aby nedocházelo k zanášení dalších chyb do měření.

Pro komunikaci wattmetru s počítačem je nutné použít upravený kabel RS-232 s vřazeným rezistorem mezi piny 2 a 5 podle manuálu od firmy Lutron vydaného k použití tohoto přístroje.

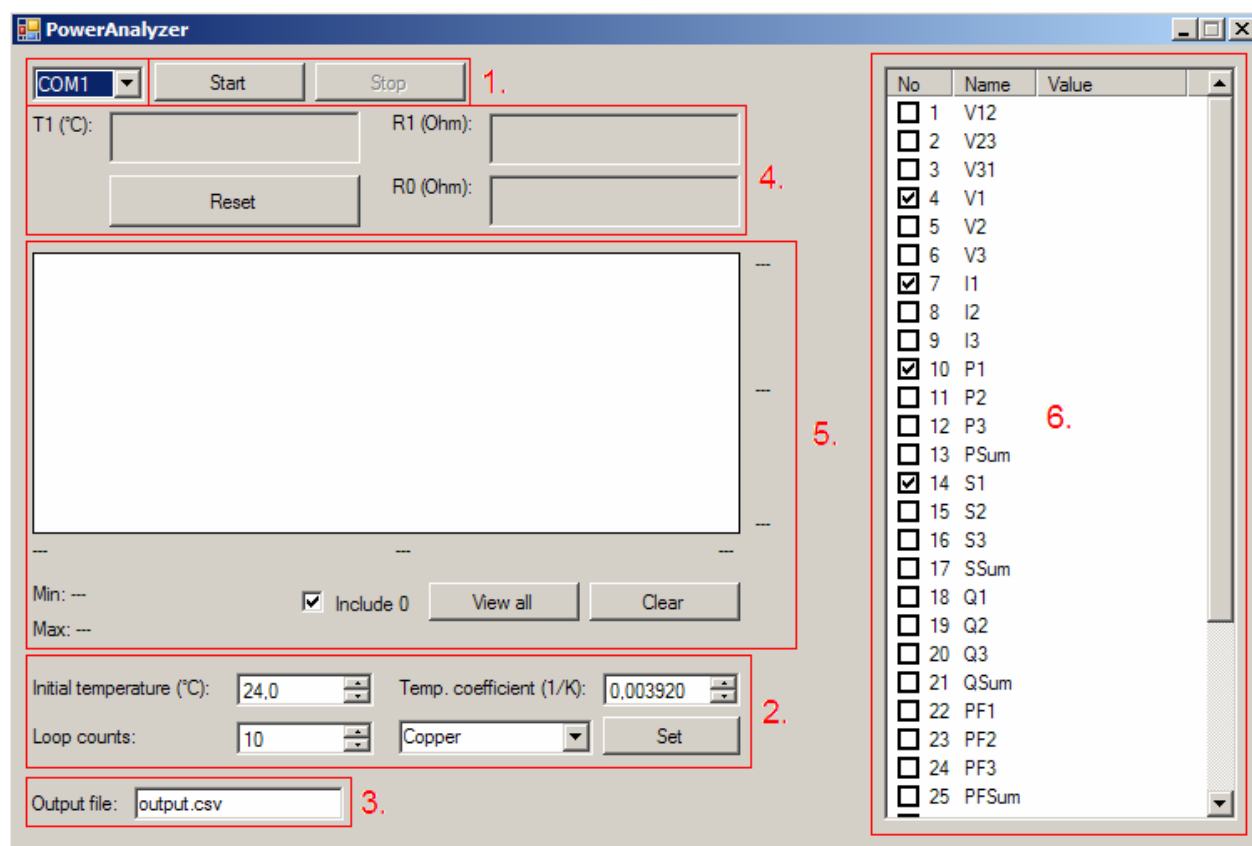


Obr. 7-10: Zapojení kabelu RS-232 pro komunikaci wattmetru s počítačem [15]

8.1 Rozhraní programu PowerAnalyzer

Po spuštění počítače a připojení wattmetru pomocí příslušně upraveného kabelu je možné spustit měřicí program určený k měření oteplovací křivky PowerAnalyzer.exe. Tento program byl vytvořen speciálně pro daný typ wattmetru a pro vyhodnocování činného odporu a teploty měřeného objektu v reálném čase.

Grafické prostředí tohoto programu lze rozdělit do šesti základních částí podle jejich funkce, jak je znázorněno na obrázku:



Obr. 8-1: Rozhraní programu PowerAnalyzer

Popis funkcí jednotlivých částí programu PowerAnalyzer

1. První oblast lze rozdělit do dvou samostatných částí. V první části je tlačítko pro výběr správného portu počítače, ke kterému byl wattmetr připojen. Pokud došlo k připojení wattmetru k počítači až po spuštění programu, požadovaný výstup portu se v nabídce nezobrazí. Druhá část je tvořena tlačítkem Start a Stop, které už podle názvu plní funkci spouštění a přerušování daného měření.
2. Druhá oblast je oblast zadávaných počátečních hodnot měření. Udávají se zde tři hodnoty: počáteční teplota zadávaná ve stupních Celsia, počet smyček pomocného vedení a teplotní součinitel odporu. Teplotní součinitel lze nastavit ručně uvedením požadované hodnoty do příslušné lišty, nebo výběrem z dvou základních hodnot pro měď a hliník pod tímto oknem a potvrzením pomocí tlačítka: Set.

3. Třetí oblast je okno pro zadání jména výstupního souboru. Program automaticky vytvoří soubor pod tímto názvem ve formátu csv ve stejném adresáři, kde je uložený soubor ProgramAnalyzer.exe, kam ukládá všechny naměřené hodnoty z průběhu měření, společně s vypočtenými hodnotami odporu R_1 a teploty t_1 , získanými během měření. Pokud během měření dojde k ukončení a opětovnému spuštění měření pomocí tlačítka Start a Stop a nedojde ke změně jména souboru, hodnoty z předchozího měření budou nahrazeny hodnotami novými.
4. Čtvrtá oblast je oblast zobrazující aktuální měřenou hodnotu teploty T_1 a odporu R_1 a hodnotu odporu na počátku měření R_0 . Hodnotu odporu R_0 program získává automaticky z prvního platného vzorku dat, který po spuštění měření pomocí tlačítka Start získá. Tlačítko Reset umožňuje vynulování získané hodnoty R_0 .
5. Pátá oblast je oblast vykreslující grafický průběh teploty v závislosti na čase. Hodnota souřadnice osy x ovšem není udávána v sekundách, ale v počtu získaných vzorků měření. Pokud tedy wattmetr získává údaje rychlostí jednoho měření za dvě sekundy, je tedy jedna jednotka na ose x rovna dvěma sekundám. Hodnoty na ose y jsou udávány přímo ve stupních Celsia. Pod grafem jsou zobrazovány hodnoty minimální a maximální naměřené teploty během jednoho měření, které jsou stejně tak zobrazovány na ose y . Po ukončení měření pomocí tlačítka Stop je možné zoomovat jednotlivé oblasti grafu. Hodnoty na ose y potom ukazují maximální a minimální hodnotu z vybrané oblasti grafu, ale hodnoty pod grafem budou nadále ukazovat extrémy z celého měření. Pomocí tlačítka Wiew all je potom možné graf vrátit do původního rozlišení a tlačítko Clear slouží pro resetování grafu.
6. Šestá oblast slouží k určení veličin zapisovaných do výstupního souboru csv. Hodnoty potřebné pro toto měření jsou při spuštění programu automaticky přednastaveny. V této tabulce je také možné sledovat aktuální hodnoty proudu, napětí a činného i jalového výkonu, naměřených v obvodu.

8.2 Průběh měření

Pro testovací měření s programem PowerAnalyzer bylo využito zapojení bez použití jističe a miliohmometru. Pro usnadnění manipulace s měřeným kabelem a pomocnou smyčkou byly transformátory uspořádány v těsné blízkosti u sebe. Takové rozmístění vede sice k nerovnoměrnému rozdělení teploty v kabelu, ale podstatně zkrátí potřebnou délku pomocného vodiče. Při měření činného výkonu je měřená průměrná teplota kabelu po celé jeho délce, tudíž takové rozmístění by nemělo výslednou teplotu nijak významně ovlivnit. Jako referenční měření byl využit termočlánek Pt 100, který byl zaveden skrze izolaci přímo do jádra kabelu na dvou náhodně vybraných místech, aby byla vyloučena chyba měření kvůli případnému teplotnímu extrému v daném místě kabelu.

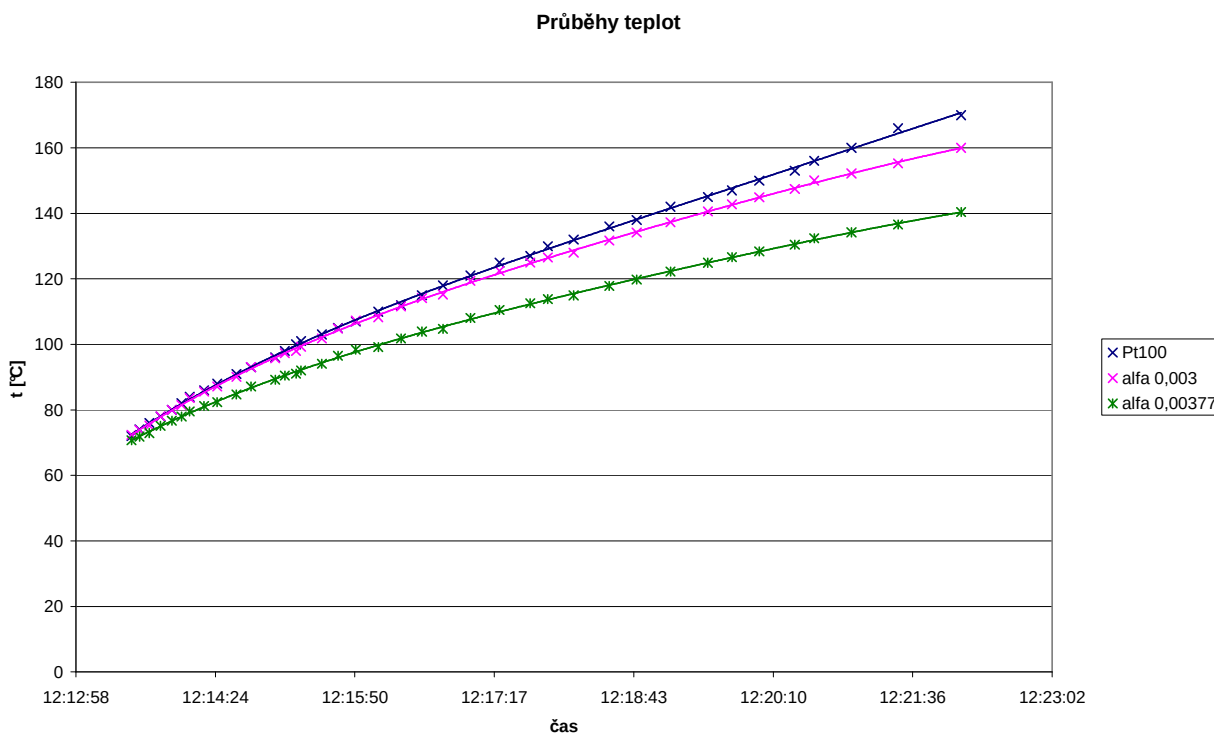
Před samotným ohřevem kabelu byla nastavena hodnota kompenzačního članku tak, aby účinník přenosu v primárním okruhu byl blízký jedné. Jako pomocná smyčka měření byl využit síťový kabel, který je složen z osmi jednotlivých vodičů, tedy i jedním protažením skrze transformátory bylo dosaženo počtu osmi pomocných měřících smyček.

Vlivem série testovacích pokusů, kdy nebylo dosaženo uspokojivých výsledků bylo dosaženo před zahájením měření počáteční teploty jádra 64°C, změřené pomocí článku Pt 100, která byla zaznamenána jako referenční teplota pro toto měření. Z předchozích měření bylo zjištěno, že mnohem přesnějších výsledků je dosaženo nastavením teplotního součinitele odporu na hodnotu menší, než je udávána v tabulkách. Pro toto měření byla tedy zvolena hodnota $0,003\text{K}^{-1}$. V tento okamžik bylo spuštěno měření teploty pomocí programu PowerAnalyzer a zároveň zaznamenávány hodnoty teploty získané termočlánkem v krátkých časových intervalech:

time	ϑ_{Pt100} [°C]	$\vartheta_{\text{DW-6092}}$ [°C] ($\alpha = 0,003\text{K}^{-1}$)	$\Delta \vartheta$ [°C]	$\delta \vartheta$ [-]	$\vartheta_{\text{DW-6092}}$ [°C] ($\alpha = 0,00377\text{K}^{-1}$)	$\Delta \vartheta$ [°C]	$\delta \vartheta$ [-]
12:13:32	72	72,42	-0,42	-0,006	70,70	1,30	0,018
12:13:37	74	73,90	0,10	0,001	71,88	2,12	0,029
12:13:43	76	75,21	0,79	0,010	72,92	3,08	0,041
12:13:50	78	78,03	-0,03	0,000	75,16	2,84	0,036
12:13:57	80	80,02	-0,02	0,000	76,75	3,25	0,041
12:14:03	82	81,54	0,46	0,006	77,96	4,04	0,049
12:14:08	84	83,57	0,43	0,005	79,57	4,43	0,053
12:14:17	86	85,61	0,39	0,005	81,19	4,81	0,056
12:14:25	88	87,15	0,85	0,010	82,42	5,58	0,063
12:14:37	91	90,09	0,91	0,010	84,76	6,24	0,069
12:14:46	93	93,05	-0,05	-0,001	87,12	5,88	0,063
12:15:01	96	95,70	0,30	0,003	89,23	6,77	0,071
12:15:07	98	97,30	0,70	0,007	90,50	7,50	0,077
12:15:14	100	98,01	1,99	0,020	91,06	8,94	0,089
12:15:17	101	99,28	1,72	0,017	92,08	8,92	0,088
12:15:30	103	101,78	1,22	0,012	94,06	8,94	0,087
12:15:40	105	104,86	0,14	0,001	96,52	8,48	0,081
12:15:51	107	107,23	-0,23	-0,002	98,40	8,60	0,080
12:16:05	110	108,24	1,76	0,016	99,21	10,79	0,098
12:16:19	112	111,56	0,44	0,004	101,84	10,16	0,091
12:16:32	115	114,14	0,86	0,008	103,90	11,10	0,097
12:16:45	118	115,20	2,80	0,024	104,74	13,26	0,112
12:17:02	121	119,36	1,64	0,014	108,05	12,95	0,107
12:17:20	125	122,48	2,52	0,020	110,53	14,47	0,116
12:17:39	127	124,99	2,01	0,016	112,53	14,47	0,114
12:17:50	130	126,57	3,43	0,026	113,79	16,21	0,125
12:18:06	132	128,03	3,97	0,030	114,95	17,05	0,129
12:18:28	136	131,67	4,33	0,032	117,85	18,15	0,133
12:18:45	138	134,11	3,89	0,028	119,79	18,21	0,132
12:19:06	142	137,26	4,74	0,033	122,30	19,70	0,139
12:19:29	145	140,55	4,45	0,031	124,92	20,08	0,138
12:19:44	147	142,70	4,30	0,029	126,62	20,38	0,139
12:20:01	150	144,89	5,11	0,034	128,37	21,63	0,144
12:20:23	153	147,45	5,55	0,036	130,41	22,59	0,148
12:20:35	156	150,03	5,97	0,038	132,46	23,54	0,151
12:20:58	160	152,19	7,81	0,049	134,18	25,82	0,161
12:21:27	166	155,26	10,74	0,065	136,62	29,38	0,177
12:22:06	170	160,01	9,99	0,059	140,40	29,60	0,174

Tab. 8-1: Hodnoty získané během testovacího měření teploty

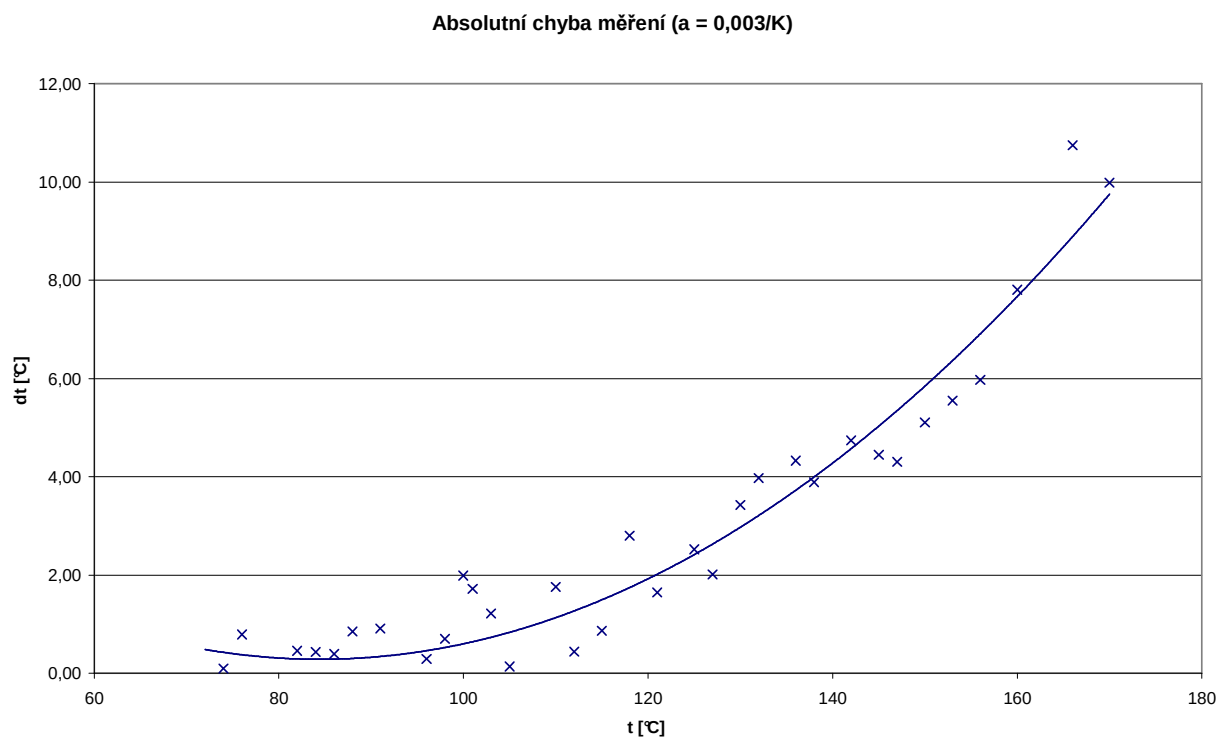
V tabulce 8-1: jsou uvedeny hodnoty teplot získané během měření spolu s vypočtenou absolutní a relativní chybou měření wattmetru za předpokladu referenční teploty získané pomocí termočlánu Pt 100. Poslední tři sloupce ukazují hodnoty teplot za předpokladu, že by byl teplotní součinitel odporu nastaven na původní tabulkovou hodnotu $\alpha = 0,00377\text{K}^{-1}$, společně s jejich vypočtenou absolutní a relativní chybou.



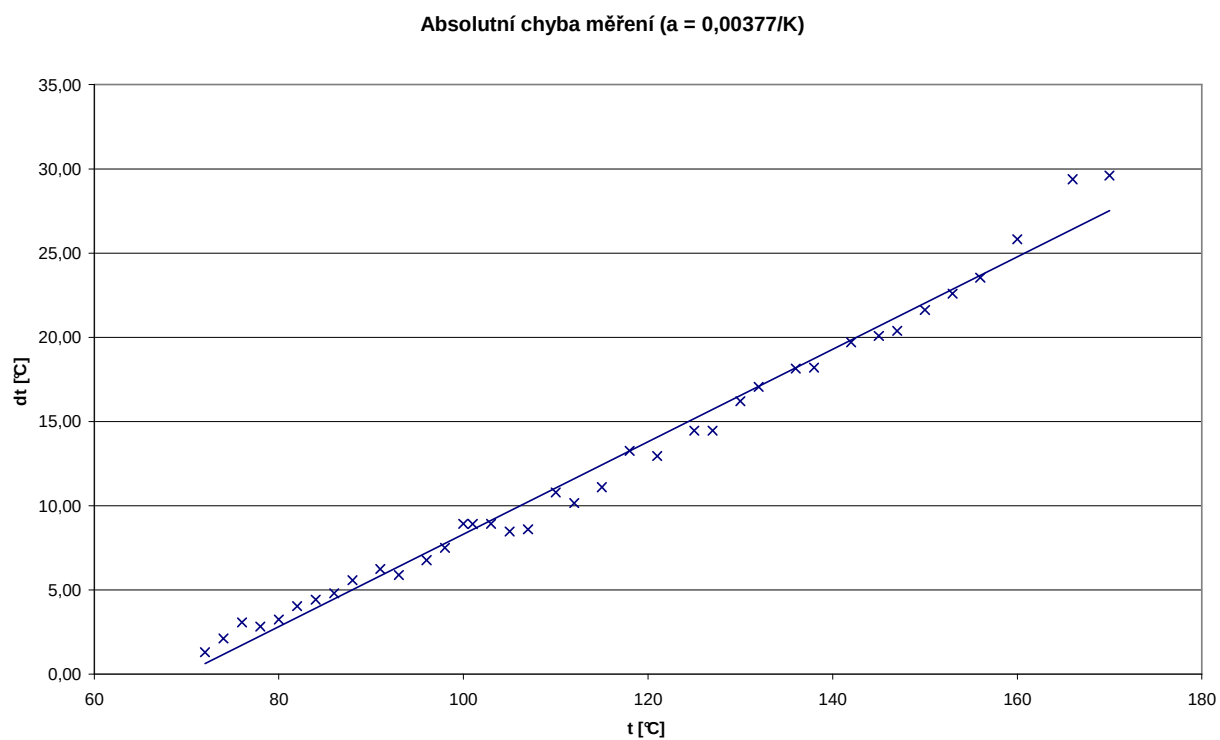
Obr. 8-2: Graf průběhu teplot během měření

Při zkoumání výsledků průběhu absolutní a relativní chyby měření byla zjištěna zajímavá skutečnost a to ta, že při použití upraveného koeficientu vznikne sice mnohem nižší absolutní chyba, než při tabulkových hodnotách koeficientu, ale její průběh nelze proložit lineárním trendem, zatímco naopak u původního koeficientu, třebaže už při teplotě 88°C překročí hranici odchylky měření, povolené normami, lze tento průběh považovat za lineární.

Při takovémto průběhu je pak snazší vytvořit matematickou funkci, kterou by bylo možno vynásobit hodnoty naměřené během měření tak, aby vykompenzovaly absolutní chybu měření. Změna teplotního součinitele odporu na původní hodnotu nebyla důvodem linearizace průběhu chyby, ale při teplotním součiniteli, který byl upraven na takovou hodnotu, aby byla absolutní chyba teploty co nejmenší, není lineární průběh absolutní chyby patrný. Ten se začíná projevovat až při větších chybách měření.



Obr. 8-3: Průběh absolutní chyby měření pomocí wattmetru při koeficientu $\alpha = 0,003\text{K}^{-1}$



Obr. 8-4: Průběh absolutní chyby měření pomocí wattmetru při koeficientu $\alpha = 0,00377\text{K}^{-1}$

Pokud bude absolutní chyba vyjádřena ne v závislosti na referenční teplotě naměřené termočlánkem, ale na teplotě naměřené z dat wattmetru, lze potom její rovnici regrese využít ke kompenzaci absolutní chyby.

Rovnice regrese pro tento případ měření byla vyčíslena ve tvaru:

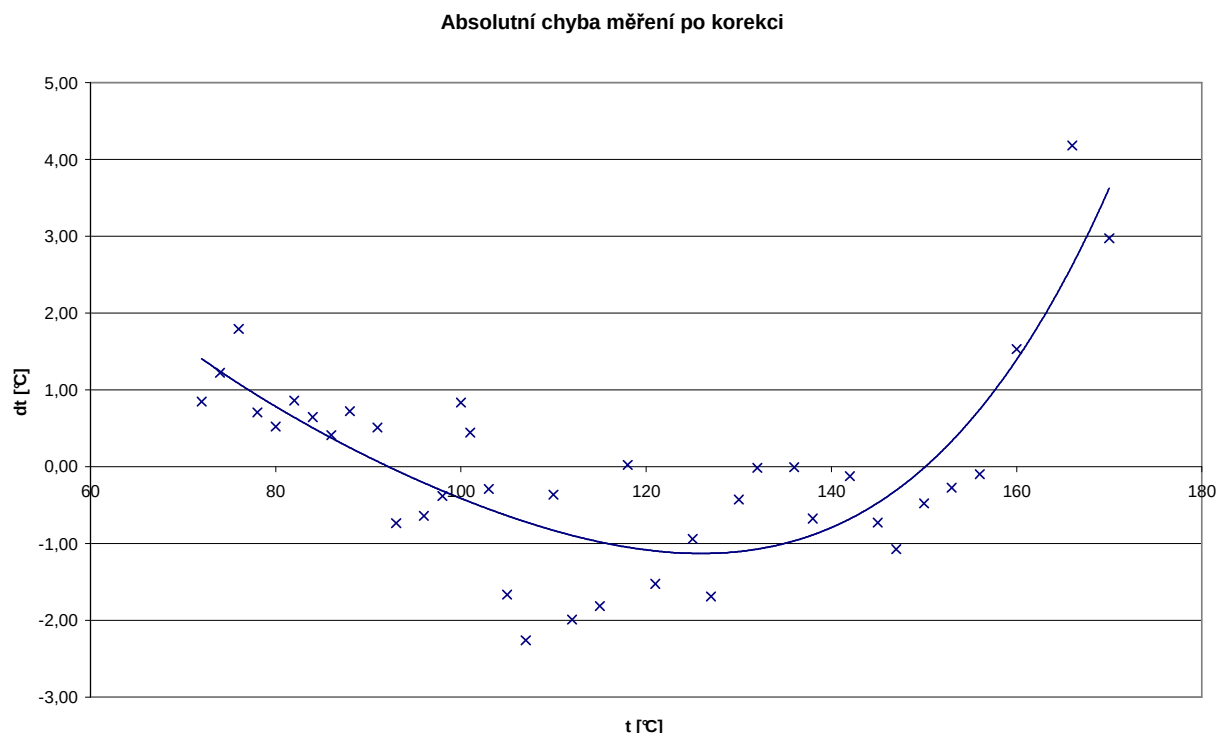
$$\Delta \vartheta = 0,3754\vartheta - 26,085 \quad (8.1)$$

Pokud tímto vztahem upravíme všechny naměřené hodnoty, získáme novou sérii hodnot:

$\vartheta_{\text{Pt100}} [^{\circ}\text{C}]$	$\vartheta_{\text{DW-6092}} [^{\circ}\text{C}]$ ($\alpha = 0,003\text{K}^{-1}$)	$\Delta \vartheta [^{\circ}\text{C}]$	$\delta \vartheta [-]$
72	71,15	0,85	0,012
74	72,78	1,22	0,017
76	74,21	1,79	0,024
78	77,29	0,71	0,009
80	79,48	0,52	0,007
82	81,14	0,86	0,010
84	83,35	0,65	0,008
86	85,59	0,41	0,005
88	87,28	0,72	0,008
91	90,49	0,51	0,006
93	93,73	-0,73	-0,008
96	96,64	-0,64	-0,007
98	98,38	-0,38	-0,004
100	99,17	0,83	0,008
101	100,56	0,44	0,004
103	103,29	-0,29	-0,003
105	106,66	-1,66	-0,016
107	109,26	-2,26	-0,021
110	110,36	-0,36	-0,003
112	113,99	-1,99	-0,018
115	116,81	-1,81	-0,016
118	117,98	0,02	0,000
121	122,53	-1,53	-0,013
125	125,94	-0,94	-0,008
127	128,69	-1,69	-0,013
130	130,43	-0,43	-0,003
132	132,02	-0,02	0,000
136	136,01	-0,01	0,000
138	138,68	-0,68	-0,005
142	142,12	-0,12	-0,001
145	145,73	-0,73	-0,005
147	148,07	-1,07	-0,007
150	150,48	-0,48	-0,003
153	153,27	-0,27	-0,002
156	156,10	-0,10	-0,001
160	158,47	1,53	0,010
166	161,82	4,18	0,025
170	167,03	2,97	0,017

Tab. 8-2: Hodnoty získané korekcí z předchozího měření

Z takto získaných hodnot lze vyčíst, že absolutní chyba v žádném bodě měření nepřesahuje povolenou odchylku měření teploty.



Obr. 8-5: Průběh absolutní chyby měření pomocí wattmetru po korekci

8.3 Zhodnocení měření

Z naměřených výsledků a především pak z grafických průběhů absolutních chyb je patrný vliv určení hodnoty teplotního součinitele odporu daného materiálu. Upravování tohoto koeficientu pro dosažení vyšších teplot není vhodnou metodou pro dosažení přesnějších výsledků, protože chyba metody pak přestává být lineární a je obtížnější matematickou úpravou dosáhnout ideální korekce této chyby.

Lineární průběh nárůstu absolutní chyby nás ale přivádí k další myšlence, jak zredukovat chybu výpočtu při samotném měření. Princip výpočtu činného odporu kabelu pomocí absolutní velikosti procházejícího proudu a činné složky výkonu podle vzorce 6.7 je jistě fyzikálně správný, ale kvůli využití pomocné smyčky při měření výkonu je potřeba počítat se vzájemným vlivem vodičů. Při použití více, než jednoho kabelu totiž dochází ke vzniku vzájemné indukční vazby mezi vodiči, která je přímo úměrná velikosti proudu. Tím také dochází ke změně účinníku v obvodu, která není zahrnuta do výpočtu.

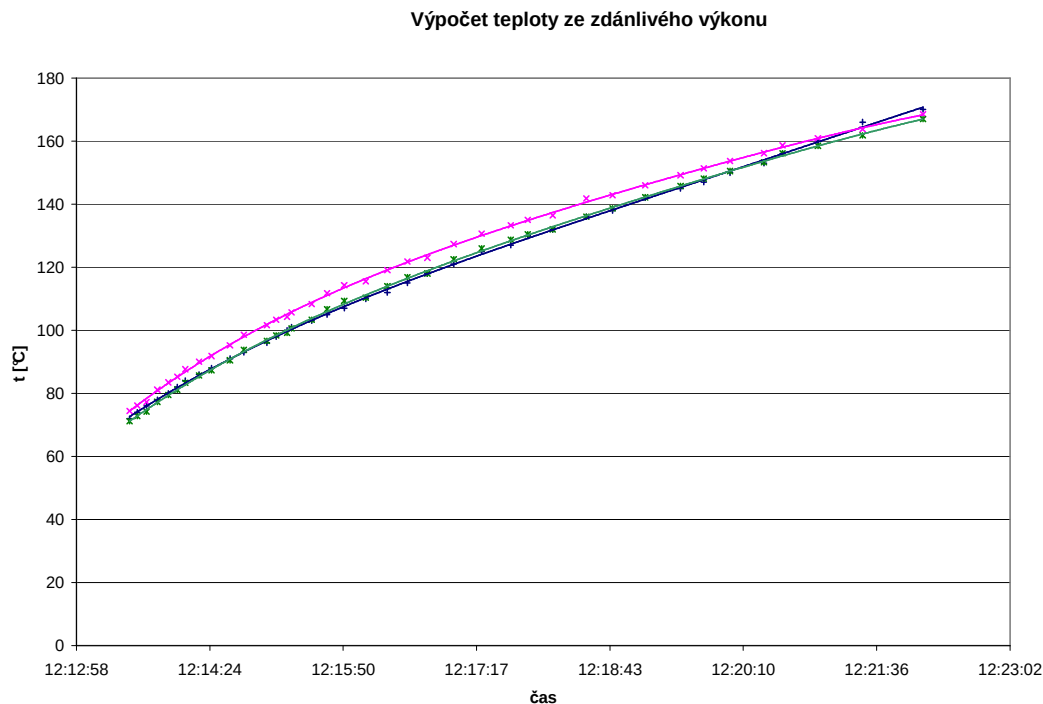
Samotný kabel, zapojený do smyčky jako sekundární okruh transformátoru bezpochyby není čistě odporového charakteru a má i určitou indukční složku. Tato složka ovšem není tak vysoká, jak se projevuje při výpočtu odporu z činného výkonu. Za teoretického předpokladu, že výsledná teplota měřeného kabelu je závislá na změně účinníku soustavy, byl proveden další přepočet teploty, kdy naměřená teplota při teplotním součiniteli odporu $\alpha = 0,00377\text{K}^{-1}$ byla podělena velikostí účinníku v daném okamžiku měření.

time	U [V]	I [A]	P [W]	S [VA]	ϑ_{Pt100} [°C]	$\vartheta_{DW-6092}$ [°C]	cos φ [-]	ϑ_s [°C]	$\Delta \vartheta$ [°C]
12:13:32	7,5125	1075	5225	8087,5	72	70,70	0,646	74,37	-2,37
12:13:37	7,5125	1074	5237,5	8075	74	71,88	0,649	76,15	-2,15
12:13:43	7,5125	1072	5237,5	8062,5	76	72,92	0,650	77,23	-1,23
12:13:50	7,525	1069	5250	8050	78	75,16	0,652	81,12	-3,12
12:13:57	7,5125	1066	5250	8025	80	76,75	0,654	83,49	-3,49
12:14:03	7,525	1065	5262,5	8012,5	82	77,96	0,657	85,25	-3,25
12:14:08	7,5125	1062	5262,5	7987,5	84	79,57	0,659	87,63	-3,63
12:14:17	7,5125	1059	5262,5	7962,5	86	81,19	0,661	90,01	-4,01
12:14:25	7,525	1058	5275	7962,5	88	82,42	0,662	91,81	-3,81
12:14:37	7,525	1055	5287,5	7950	91	84,76	0,665	95,21	-4,21
12:14:46	7,525	1052	5300	7925	93	87,12	0,669	98,56	-5,56
12:15:01	7,5125	1047	5287,5	7875	96	89,23	0,671	101,57	-5,57
12:15:07	7,525	1046	5300	7875	98	90,50	0,673	103,37	-5,37
12:15:14	7,525	1045	5300	7875	100	91,06	0,673	104,21	-4,21
12:15:17	7,5125	1042	5287,5	7837,5	101	92,08	0,675	105,62	-4,62
12:15:30	7,525	1041	5312,5	7837,5	103	94,06	0,678	108,35	-5,35
12:15:40	7,525	1038	5325	7812,5	105	96,52	0,682	111,71	-6,71
12:15:51	7,525	1036	5337,5	7800	107	98,40	0,684	114,28	-7,28
12:16:05	7,5	1031	5300	7750	110	99,21	0,684	115,48	-5,48
12:16:19	7,525	1029	5325	7750	112	101,84	0,687	119,08	-7,08
12:16:32	7,5375	1028	5350	7750	115	103,90	0,690	121,8	-6,8
12:16:45	7,5125	1023	5312,5	7700	118	104,74	0,690	122,95	-4,95
12:17:02	7,525	1020	5337,5	7675	121	108,05	0,695	127,34	-6,34
12:17:20	7,5125	1016	5337,5	7650	125	110,53	0,698	130,58	-5,58
12:17:39	7,525	1014	5350	7637,5	127	112,53	0,700	133,28	-6,28
12:17:50	7,525	1012	5350	7625	130	113,79	0,702	134,98	-4,98
12:18:06	7,5125	1009	5337,5	7587,5	132	114,95	0,703	136,43	-4,43
12:18:28	7,5375	1008	5375	7612,5	136	117,85	0,706	141,84	-5,84
12:18:45	7,5375	1005	5375	7587,5	138	119,79	0,708	142,76	-4,76
12:19:06	7,5375	1000	5362,5	7537,5	142	122,30	0,711	145,94	-3,94
12:19:29	7,525	997,2	5375	7512,5	145	124,92	0,715	149,14	-4,14
12:19:44	7,55	995,8	5387,5	7512,5	147	126,62	0,717	151,33	-4,33
12:20:01	7,55	993,2	5387,5	7500	150	128,37	0,718	153,61	-3,61
12:20:23	7,55	990,2	5387,5	7475	153	130,41	0,721	156,14	-3,14
12:20:35	7,5375	987,2	5387,5	7450	156	132,46	0,723	158,66	-2,66
12:20:58	7,55	984,7	5387,5	7437,5	160	134,18	0,724	160,89	-0,89
12:21:27	7,55	981,2	5387,5	7400	166	136,62	0,728	163,74	2,26
12:22:06	7,5375	974,7	5375	7350	170	140,40	0,731	168,48	1,52

Tab. 8-3: Hodnoty teplot získané výpočtem ze zdánlivého výkonu

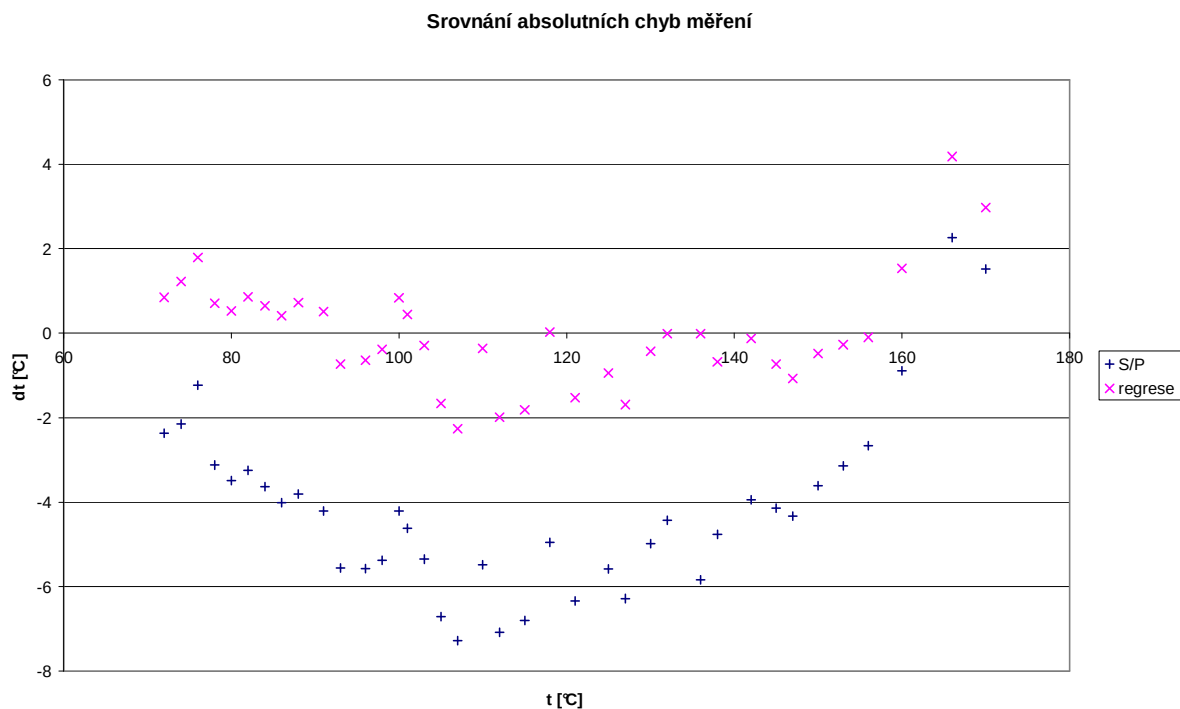
Příklad výpočtu pro první řádek tabulky:

$$\vartheta_1 = \vartheta_0 + \frac{\frac{P_1}{I_1^2} - \frac{P_0}{I_0^2}}{\frac{P_0}{I_0^2} \cdot \alpha} \cdot \frac{S_1}{P_1} = 64 + \frac{0,004512 - 0,004412}{0,004412 \cdot 0,00377} \cdot \frac{8087,5}{5225} = 74,37^\circ\text{C}$$



Obr. 8-6: Průběh oteplovací křivky vypočtené ze zdánlivého výkonu a pomocí lineární korekce

Výsledkem je teplotní křivka, která se velmi blíží naměřeným hodnotám pomocí termočlánku Pt 100. Tento průběh nedosahuje takové přesnosti, jako průběh dosažený pomocí rovnice regrese, ale výhodou je skutečnost, že výpočet proběhl bez závislosti na datech změřených pomocí termočlánku, takže se jedná o nezávislé měření.



Obr. 8-7: Průběh absolutní chyby zdánlivého výkonu a pomocí lineární korekce

Především z porovnání průběhů absolutní chyby obou výpočtů je patrná podobnost dosažených průběhů měření. Proto lze skutečně tvrdit, že předpoklad závislosti výsledné teploty na velikosti účinníku soustavy byl správný.



Obr. 8-8: Závislost účinníku soustavy na teplotě

9 ZÁVĚR

Diplomová práce je založena na popisu možností ohřevu a měření teploty kabelů vysokého napětí. První část se zabývá popisem tepla jako fyzikální veličiny a veličin s teplem spojených, vztahy mezi jednotlivými teplotními stupnicemi a popisem jednotlivých principů přenosů tepla mezi látkami, které mohou v praxi nastávat.

Druhá část práce se zabývá rozdělením teplotních čidel, možnostmi jejich využití při měření teploty jádra kabelu a popisem principu funkce teplotních čidel. Ze sesbíraných poznatků vyplývá, že jednou z nejpřesnějších možností měření teploty jádra je využití teplotního odporového čidla tvořeného platinovým odporovým drátem, označovaného jako Pt 100. Měření tímto čidlem dosahuje vysoké přesnosti výsledků ve velkém teplotním rozsahu. Nevýhodou měření je nutnost využití kalibračního vzorku kabelu, jelikož při měření kontaktními čidly je nutné porušit izolaci kabelů a proto se kabel stává následně nepoužitelným.

Ve třetí části práce jsou navrženy a popsány různé způsoby ohřevu kabelu vysokého napětí. Energeticky nejméně náročným způsobem na ohřev se jeví indukční ohřev, nejlépe skombinovaný s nepřímým odporovým ohřevem dodávaným cívkou ohřívacího vodiče. Tento způsob vyžaduje nejmenší hodnotu elektrického proudu dodávaného do vodiče, ale díky ztrátám indukčního proudu skrze přenos a následně i v jádře ohříváného kabelu vlivem hloubky vniku dochází k velkým nepřesnostem v konečném výsledku a není možné přesně určit ustálenou teplotu kabelu, proto je nutné mít možnost proud procházející cívkou během ohřevu regulovat pro dosažení správné teploty. Možnost využití klimatické komory je omezená velikostí ohříváného kabelu, proto se při laboratorním ohřevu využívá nejčastěji přímý odporový ohřev.

Další část práce je zaměřena na laboratorní zkoušky kabelu využívané v praxi a popsané normami ČSN, které potvrzují využívání přímého odporového ohřevu v dlouhodobých teplotních zkouškách. V této kapitole je sepsán postup měření i pravidla pro zapojování soustavy a zhodnocení výsledků měření dle daných norem pro dosažení nejpřesnějšího výsledku.

Poslední část práce byla zaměřena na praktická měření a zkoumání fyzikálních jevů, ovlivňujících přesnost těchto měření. Jako způsob ohřevu byl z důvodů dalšího možného ohřevu pomocí impulsních výbojů vybrán způsob indukčního ohřevu, který galvanicky odděluje měřený kabel od zdroje. Jako dvě základní metody měření byly vybrány měření pomocí miliohmmetru při rozepnutém obvodu a kontinuální měření pomocí wattmetru. Zvláštní důraz byl kladen především na měření pomocí wattmetru kvůli možnosti automatizace celého měření a propojení měření s počítačem, k čemuž byl speciálně vytvořen program pro komunikaci počítače s wattmetrem DW-6092. Pro toto měření byly analyzovány výsledky a zkoumány možnosti korekce výsledků vzhledem k uvažovanému referenčnímu měření pomocí termočlánu Pt 100. V rámci analýzy byla vyslovena hypotéza závislosti teploty na účinníku měřené soustavy, jelikož závislost účinníku na teplotě má prokazatelně velmi podobný charakter jako závislost absolutní chyby samotného měření. Tuto hypotézu se však nepodařilo matematicky potvrdit, přestože jejím využitím bylo dosaženo poměrně přesných výsledků.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BAXANT, Petr, DRÁPELA, Jiří, LÁZNIČKOVÁ, Ilona. *Elektrotepelná technika*. Brno: Fakulta Elektrotechniky a Komunikačních Technologií, Vysoké Učení Technické v Brně.
- [2] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení, 1.část*. Brno: Fakulta Elektrotechniky a Komunikačních Technologií, Vysoké Učení Technické v Brně.
- [3] *Rosemount: Odporové teploměry a sestavy termočlánků* [online]. 16 stran. [cit. 2015-12-01]. Dostupné z: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/pm%20rosemount%20documents/00809-0317-2654.pdf>
- [4] *Roboterm: Co je indukční ohřev* [online]. 2015-12-01 [cit. 2015-11-01]. Dostupné z: <http://www.roboterm.cz/home/co-je-indukcni-ohrev>
- [5] *JD Dvořák: Teplotní a klimatické komory XXL* [online]. 2015-12-01 [cit. 2015-12-01]. Dostupné z: <http://www.testsysteme.cz/cz/produkty/zkusebni-komory/teplotni-a-klimatizacni/teplotni-a-klimaticke-komory-xxl.html>
- [6] ZÁBRANSKÝ, J. Korekce a kompenzace při měření teplot. Diplomová práce. Brno: Ústav automatizace a informatiky FSI VUT v Brně, 2009, 70 stran.
- [7] ČSN EN 61442 Zkušební metody pro silnoproudé kabelové soubory se jmenovitým napětím od 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) do 36 kV ($U_m = 42$ kV)
- [8] ČSN IEC 949 Výpočet dovolených tepelných zkratových proudů, který bere v úvahu neadiabatický ohřev
- [9] ČSN 33 2000-5-52 ed.2 Elektrické instalace nízkého napětí - Část 5-52: Výběr a stavba elektrických zařízení - Elektrická vedení
- [10] ČSN EN 60085 ed.2 Elektrické izolace - Tepelné hodnocení a značení
- [11] Základy elektrotechniky. *SPŠE Mohelnice*. [online]. 11.3.2016 [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: <http://www.spsemoh.cz/vyuka/zae/el7.htm>
- [12] Calculation of eddy currents and associated losses in electrical steel laminations. *IEEE Transactions on magnetics*. Belgium, 1999, **1999**(3), 4.
- [13] RACHŮNEK, Antonín. *Výpočet indukčnosti cívky* [online]. In: . s. 6 [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/?action=2&doc=17784&instance=2>
- [14] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Transformátory*. Brno: Fakulta Elektrotechniky a Komunikačních Technologií, Vysoké Učení Technické v Brně.
- [15] Lutron, 3D Phase power analyzer, model DW-6092, operation manual: 61 stran
- [16] GW Instek: D.C Mili-ohm meter GOM-802, user manual: 55 stran