

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2020

Samuel Marčok



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## NÁVRH SLEDOVACÍHO ZAŘÍZENÍ NAPĚŤOVÝCH PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PRO POTŘEBY SERVISU

DEVELOPMENT OF MONITORING DEVICE FOR VOLTAGE INSTRUMENT TRANSFORMERS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Samuel Marčok

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

BRNO 2020

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Samuel Marčok

**ID:** 203287

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Návrh sledovacího zařízení napěťových přístrojových transformátorů pro potřeby servisu**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Nastudujte početné okolnosti působící na přístrojové transformátory v rozváděči VN a zdůvodněte potřebu monitorování některých působení.
2. Seznamte se s normami věnovanými přístrojovým transformátorům v rozváděči VN.
3. Prostudujte manuály ABB pro obsluhu rozváděčů VN.
4. Navrhněte způsob monitorování vybraných veličin působících na přístrojové transformátory.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

- [1] Kopeček, J., Dvořák, M.: Přístrojové transformátory (měřicí a jisticí). Academia, 1966.
- [2] Havelka, Otto a kolektiv. Elektrické přístroje. Praha: SNTL, 1985
- [3] STN EN 61869. Přístrojové transformátory. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie, 2010.
- [4] ABB, s.r.o. Přístrojové transformátory proudu a napětí – Návod k instalaci, použití a údržbě: 1VLM000610. Rev. 19, CZ. EPDS BRNO Vídeňská, 2017
- [5] ZDRUŽENIE ELEKTROTECHNIKOV SLOVENSKA. Čiastočné výboje [online]. In: Žilina. [cit.2019-11-26]. Dostupné z: <http://ix.sk/EPMPB>
- [6] Manuály ABB pro obsluhu rozváděčů vn.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 29.5.2020

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Témou bakalárskej práce sú prístrojové transformátory a vývoj monitorovacieho zariadenia pre účely servisu. Teoretickému základu prístrojových transformátorov je venovaná úvodná kapitola práce. Tá zároveň pojednáva o prístrojovom transformátore ako samostatnom celku podľa normy EN 61869-1. Ďalšia kapitola poukazuje na prístrojový transformátor ako súčasť rozvádzača UniGear ZS1 (produkt ABB) a jeho bežné prevádzkové podmienky. Výsledkom týchto dvoch samostatných kapitol sú dva pohľady na prístrojový transformátor, prvý ako samostatné zariadenie a druhý ako súčasť celku (rozvádzača) kedy sa v každom prípade musí prispôbiť iným podmienkam. V samostatnej kapitole sú popísané vplyvy teploty, vlhkosti, tlaku, nadmorskej výšky, vibrácií a výbojov na prístrojový transformátor. Práca ďalej vysvetľuje fyzikálnu podstatu vybraných veličín a popisuje spôsoby ich monitorovania. Záver práce je sumarizáciou nadobudnutých znalostí a stručným prehľadom výsledkov práce.

## **Kľúčové slova**

prístrojový transformátor, servis, monitorovanie, rozvádzač

## **Abstract**

The topic of this bachelor thesis is instrument transformers and development of monitoring device for service purposes. The first chapter of this work is dedicated to a theoretical functionality of instrument transformers. It also deals with the instrument transformer as a separate unit according to norm EN 61869-1. Next chapter depicts instrumental transformer as a part of switchgear UniGear ZS1 (a product of ABB) and its standard working conditions. The results of these two separate chapters are two views of the instrument transformer, the first as a separate device and the second as part of the unit (switchgear), which in each case must be adapted to different conditions. A separate chapter describes the effects of temperature, humidity, pressure, altitude, vibration and discharges on the instrument transformer. The work further explains the physical nature of selected quantities and describes the methods of their monitoring. The conclusion of the work is a summary of the acquired knowledge and a brief overview of the results of the work.

## **Keywords**

instrument transformer, service, monitoring, switchgear

### **Bibliografická citace:**

*MARČOK, Samuel. Návrh sledovacího zařízení napěťových přístrojových transformátorů pro potřeby servisu. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127531>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Bohuslav Bušov.*

## **Prehlásenie**

*„Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému Návrh sledovacího zariadení napätových prístrojových transformátorů pro potřeby servisu som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.*

*Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobností a som si plne vedomý následkov porušení ustanovení § 11 a nasledujúceho autorského zákona č. 121/2000 Zb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníku č. 40/2009 Zb.“*

V Brne dne: **10.6.2020**

.....  
podpis autora

## **Pod'akovanie**

Ďakujem za odborné vedenie, motiváciu a podporu pánovi doc. Bohuslavovi Bušovovi a pánovi Ing. Martinovi Odehnalovi za firmu ABB. Rovnako ďakujem samotnej firme ABB za príležitosť písať pre nich túto prácu. Umožnili mi tým získať nové znalosti a poznatky s možnosťou uplatňovať ich v ďalšej profesijnej praxi.

V Brne dne: **10.6.2020**

.....  
podpis autora

# Obsah

Úvod .....	13
<b>1. Prevádzkové podmienky prístrojových transformátorov .....</b>	<b>15</b>
1.1 Teplota vzduchu .....	15
1.2 Nadmorská výška .....	15
1.3 Vibrácie a otrasy zeme .....	17
1.4 Ostatné prevádzkové podmienky .....	18
1.4.1 Vnútorne prístrojové transformátory .....	18
1.4.2 Vonkajšie prístrojové transformátory .....	18
1.5 Typ uzemnenia siete .....	19
1.6 Menovité údaje prístrojového transformátora .....	19
<b>2. Prístrojový transformátor ako súčasť rozvádzača VN UniGear ZS1 .....</b>	<b>20</b>
2.1 Rozvádzač VN UniGear ZS1 firmy ABB .....	20
2.2 Prevádzkové podmienky rozvádzača UniGear ZS1 .....	21
2.2.1 Normálne prevádzkové podmienky UniGear ZS1 .....	21
2.2.2 Optimálne prevádzkové podmienky UniGear ZS1 .....	22
2.2.3 Náročné prevádzkové podmienky UniGear ZS1 .....	22
<b>3. Podmienky okolia a vplyv jednotlivých faktorov .....</b>	<b>23</b>
3.1 Vlhkosť .....	23
3.2 Teplota .....	23
3.3 Nadmorská výška .....	24
3.4 Otrasy, vibrácie a seizmická činnosť .....	24
<b>4. Javy vyskytujúce sa pri prevádzke prístrojových transformátorov .....</b>	<b>25</b>
4.1 Tepelné účinky elektrického prúdu .....	25
4.1.1 Teplo odvedené do okolia .....	25
4.1.2 Teplo spotrebované na zvýšenie teploty materiálu .....	25
4.1.3 Maximálne oteplenie .....	26
4.1.4 Časová konštanta oteplenia .....	26
4.1.5 Krátkodobé oteplenie .....	27
4.2 Výboje v elektrických prístrojoch .....	27
4.2.1 Elektrický oblúk v prístrojoch .....	29



4.2.2	Čiastočné výboje.....	31
4.2.3	Medzifázové výboje (vonkajšie).....	31
4.3	Ostatné javy vplyvajúce na prístrojový transformátor .....	34
4.3.1	Vyššie harmonické.....	34
4.3.2	Ferorezonancia .....	34
<b>5.</b>	<b>Fyzikálne veličiny vybrané pre monitorovanie .....</b>	<b>35</b>
5.1	Vlhkosť.....	35
5.1.1	Absolútna vlhkosť vzduchu .....	35
5.1.2	Relatívna vlhkosť vzduchu .....	35
5.1.3	Špecifická vlhkosť vzduchu.....	35
5.2	Teplota.....	36
5.2.1	Teplotná rozťažnosť.....	36
5.2.2	Vplyv teploty na elektrické vlastnosti materiálov .....	37
5.3	Tlak.....	38
5.3.1	Atmosférický tlak.....	38
<b>6.</b>	<b>Spôsoby monitorovania vybraných veličín .....</b>	<b>39</b>
6.1	Monitorovanie vlhkosti .....	39
6.2	Monitorovanie teploty .....	39
6.3	Monitorovanie tlaku .....	40
6.4	Monitorovanie ostatných veličín.....	41
6.4.1	Vibrácie a otrasy .....	41
6.4.2	Medzifázové výboje.....	41
	<b>Záver .....</b>	<b>42</b>

# Zoznam symbolov a skratiek

## Skratky:

FEKT	...	Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií
VUT	...	Vysoké učení technické v Brne
STN	...	Slovenská technická norma
EN	...	Európska norma
NN	...	nízke napätie
VN	...	vysoké napätie
VVN	...	veľmi vysoké napätie
PT	...	Prístrojový transformátor
CT	...	Current transformer (PT prúdu)
VT	...	Voltage transformer (PT napätia)
CIT	...	Combined instrument transformer (Kombinovaný PT)
SNTL	...	Státní nakladatelství technické literatury
SI	...	Système International (d'Unités)

## Symboly:

U	...	napätie	[V]
I	...	prúd	[A]
T	...	teplota	[°C, F, K]
$\Delta\vartheta_h$	...	oteplenie pri nadmorskej výške do 1000m	[K]
$\Delta\vartheta_{ho}$	...	medza oteplenia pri nadmorskej výške nad 1000m	[K]
h	...	nadmorská výška	[m]
$\Delta\vartheta$	...	okamžité oteplenie telesa	[K]
S	...	plocha materiálu	[m <sup>2</sup> ]
V	...	objem materiálu	[m <sup>3</sup> ]
R	...	odpor materiálu	[ $\Omega$ ]
$\alpha_0$	...	súčiniteľ prestupu tepla	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
c	...	objemová tepelná kapacita	[J.m <sup>-3</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\Delta\vartheta_{\infty}$	...	maximálne oteplenie	[K]
$\tau$	...	časová konštanta	[s]
$\alpha_A$	...	konštanta Ayrtonovej rovnice	[V]
$\beta_A$	...	konštanta Ayrtonovej rovnice	[V/m]
$\gamma_A$	...	konštanta Ayrtonovej rovnice	[W]
$\delta_A$	...	konštanta Ayrtonovej rovnice	[W/m]
$l_A$	...	dĺžka oblúku	[m]
$\rho_P$	...	absolútna vlhkosť vzduchu	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$r_P$	...	špecifická plyn. konštanta vodnej pary	[J.K <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> ]
$p_P$	...	parciálny tlak	[Pa]
$\varphi$	...	relatívna vlhkosť vzduchu	[%]
m	...	hmotnosť	[kg]
$\alpha$	...	teplotný súčiniteľ dĺžkovej rozťažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
$\beta$	...	teplotný súčiniteľ objemovej rozťažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
l	...	dĺžka	[m]
$\alpha_R$	...	teplotný súčiniteľ rezistivity	[K <sup>-1</sup> ]

$\rho$	...	rezistivita	[ $\Omega \cdot m$ ]
F	...	sila	[N]
$p_H$	...	hydrostatický tlak	[Pa]
$\rho_H$	...	hustota	[kg. m <sup>-3</sup> ]
g	...	tiažové zrýchlenie (gravitačná konštanta)	[m.s <sup>-2</sup> ]
$h_H$	...	výška stĺpca plynu (kvapaliny)	[m]

## Zoznam obrázkov

<i>Obrázok 1 - Prístrojové transformátory z ponuky firmy ABB [2].....</i>	<i>14</i>
<i>Obrázok 2 - Korekčný činiteľ nadmorskej výšky pre oteplenie [1].....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázok 3 - Korekčný činiteľ nadmorskej výšky [1].....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázok 4 - Príklad správnej manipulácie podľa príručky ABB [2].....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázok 5 - Bočný pohľad na rozvádzač UniGear ZSI [4].....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázok 6 - Priebeh najnepriaznivejšieho oteplenia prístroja (pôsobením skratu) [6]..</i>	<i>27</i>
<i>Obrázok 7 - Prehľadová charakteristika elektrických výbojov [6].....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázok 8 - Statická charakteristika (jednosmerného) oblúku [6].....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázok 9 - Dynamická charakteristika (striedavého) oblúku [6].....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázok 10 - Pravdepodobnosť medzifázového výboja v závislosti na vzdialenosti a okolitej vlhkosti .....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázok 11 - Pravdepodobnosť medzifázového výboja v závislosti na vzdialenosti a okolitej teplote.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázok 12 - Pravdepodobnosť medzifázového výboja v závislosti na vzdialenosti a nadmorskej výške .....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázok 13 - Teplotné stupnice v rôznych jednotkách merania [11].....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázok 14 - Rezistivita medi v závislosti na teplote [10].....</i>	<i>37</i>

## **Zoznam tabuliek**

<i>Tabuľka 1: Rozdelenie PT podľa teploty okolitého vzduchu [1].....</i>	15
<i>Tabuľka 2: Menovité izolačné hladiny primárnych svoriek [1].....</i>	19
<i>Tabuľka 3: Skupiny izolačných materiálov podľa max. hodnoty teploty [6] .....</i>	23

# ÚVOD

Norma STN EN 61869-1, ktorá je slovenským prekladom a zodpovedá svojmu originálu, ktorý je európskou normou špecifikuje prístrojový transformátor nasledovne: „transformátor určený na prenos informačného signálu do meracích zariadení, meracích prístrojov a ochranných a riadiacich prístrojov, prípadne podobných zariadení [1].“

Prístrojové transformátory môžeme z hľadiska účelu ich použitia rozdeliť na dva základné typy. Prvým typom sú transformátory meracie, tie merajú fyzikálne (elektrické) veličiny (napätie alebo prúd). Meranie prebieha ako transformácia veličín v primárnom obvode na vhodnú úroveň zodpovedajúcu parametrom v sekundárnom obvode (napríklad meracie prístroje, relé ...). Dôvodom pre vznik meracích prístrojových transformátorov bola široká škála hodnôt využívaných v praktických aplikáciách. Napríklad v prípade napätia siahajú od jednotiek voltov až po desiatky či stovky kilovoltov. Výroba zariadení pre takto veľké merané veličiny by bola technicky náročná a zároveň finančne nevhodná. Druhým typom sú istiacie transformátory. Ich účelom je oddelenie primárnej a sekundárnej časti obvodu, čím je zabezpečené chránenie sekundárneho obvodu pred účinkami veľkých hodnôt meraných veličín primárnej strany (napríklad skrat). Je samozrejmé, že v technickej praxi sa úloha meracích a istiacich transformátorov v dnešnej dobe môže kombinovať do jedného zariadenia.

V literatúre o prístrojových transformátoroch sa ďalej dozvedáme, že plnia aj niekoľko ďalších účelov, ktoré nie sú na prvý pohľad zrejmé:

- a) Izolujú obvod vyššieho napätia od obvodu nižšieho napätia a tým chránia obsluhu zariadenia pred účinkami vyššieho napätia
- b) Svojou prítomnosťou oddávajú meracie a istiace prístroje od miesta pôsobenia magnetických a elektrických polí vznikajúcich prechodom prúdu v elektrizačnej sústave. Zároveň umožňujú sústredenie meracích staníc či prístrojov mimo rozvodne do tzv. velínov (tým zvyšujú pohotovosť a jednoduchosť ovládania)
- c) Umožňujú jednoduchšie stanovenie súčtov prípadne rozdielov prúdov v niekoľkých izolovaných obvodoch

Hlavné uplatnenie nachádzajú v elektrizačných sústavách, elektrických zariadeniach NN, VN a VVN, či skúšobniach a laboratóriách.

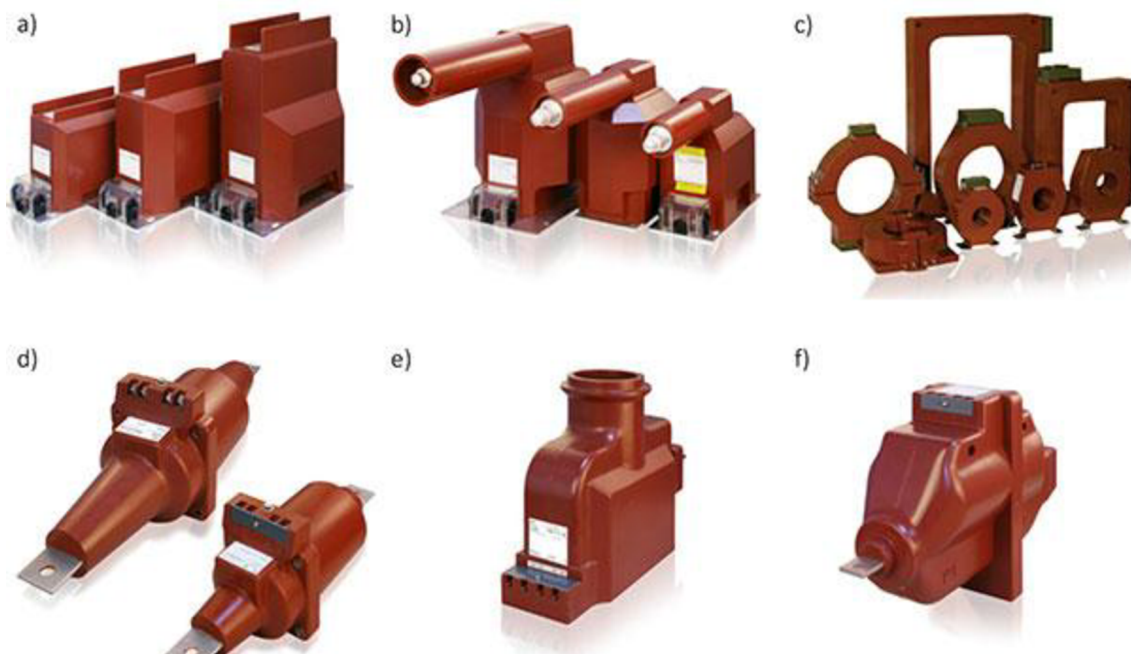
Prístrojové transformátory sa vyrábajú v troch základných vyhotoveniach, a to:

- a) Prístrojový transformátor prúdu (CT)
- b) Prístrojový transformátor napätia (VT)
- c) Kombinovaný prístrojový transformátor (CIT)

Ako už samotné názvy napovedajú, prvé dva typy merajú každý jednu fyzikálnu veličinu, zatiaľ čo posledný uvedený zlučuje funkciu prvých dvoch – meria prúd aj napätie.

Samotné prístrojové transformátory môžeme ďalej rozdeliť na základe miesta, kde budú používané a to jednoducho na vnútorné a vonkajšie prístrojové transformátory [1,3].

Niekoľko konkrétnych príkladov reálne vyrábaných transformátorov napätia je na obrázku 1. Konkrétne ide o pár exemplárov z výrobného portfólia firmy ABB.



*Obrázok 1 - Prístrojové transformátory z ponuky firmy ABB [2]  
a) prúdový TPU b) napätový TJP c) prúdový káblový vnútorný  
d) typ TTR e) typ PR 25 f) typ TSR*

# 1. PREVÁDZKOVÉ PODMIENKY PRÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTOROV

Ako každé elektrické zariadenie, aj prístrojový transformátor má normou určené svoje použitie pri menovitých charakteristikách a pri normálnych prevádzkových podmienkach. Menovité charakteristiky a normálne podmienky pre prevádzku transformátora nájdeme v norme STN EN 61869-1. Ak sú používateľom určené iné podmienky ako uvažuje norma je nutné uskutočniť konštrukčné zmeny tak, aby výsledný prístrojový transformátor zodpovedal požiadavkám uvedeným v norme.

## 1.1 Teplota vzduchu

Z hľadiska teploty vzduchu môžeme podľa normy STN EN 61869-1 prístrojové transformátory rozdeliť nasledovne :

*Tabuľka 1: Rozdelenie PT podľa teploty okolitého vzduchu [1]*

Kategória	Minimálna teplota [°C]	Maximálna teplota [°C]
-5/+40	-5	+40
-25/+40	-25	+40
-40/+40	-40	+40

V prípade, že sa transformátor bude využívať v iných teplotných rozmedziach, norma ďalej špecifikuje jeho používanie a delí transformátory do ďalších podskupín, a to:

- 50°C a +40°C pre veľmi chladné klimatické podmienky
- 5°C a +50°C pre veľmi teplé klimatické podmienky

Pre regióny s výskytom teplých a vlhkých vetrov je nutné uvažovať výskyt kondenzácie vo vnútornom prostredí.

Transformátory pre vnútorné použitie majú príručkou určenú teplotu pri preprave a prípadnom skladovaní v rozmedzí -25 °C až 70 °C. Ďalej platí, že počas doby prepravy či skladovania musia byť transformátory chránené pred priamym slnečným žiarením [1].

## 1.2 Nadmorská výška

Pri normálnych prevádzkových podmienkach nesmie nadmorská výška presiahnuť 1000 metrov nad morom. V prípade použitia prístrojového transformátora v nadmorskej výške vyššej ako 1000 m.n.m dochádza ku zmene hodnoty prierazného napätia z dôvodu zníženia hustoty vzduchu s rastúcou nadmorskou výškou. Rovnako tak dochádza aj ku zmene oteplenia transformátora z dôvodu zmeny hustoty vzduchu.

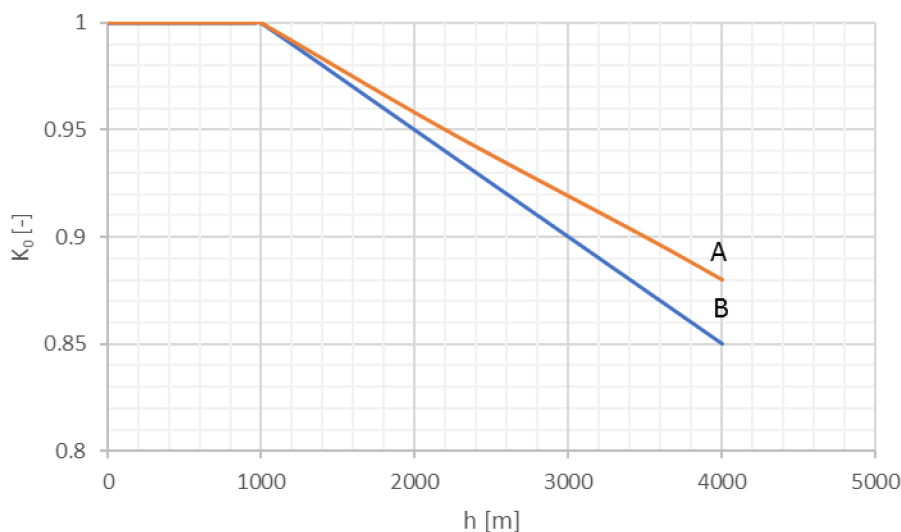
Keďže nadmorská výška vplýva na niekoľko parametrov prístrojových transformátorov, boli zavedené korekčné činitele. Prvým korekčným činiteľom je korekčný činiteľ nadmorskej výšky pre oteplenie, ten je vyjadrený nasledovným jednoduchým pomerom podľa vzorca 1.1 [1]:



$$K_0 = \frac{\Delta\vartheta_h}{\Delta\vartheta_{ho}} \quad (1.1)$$

Následne z hodnôt pre jednotlivé nadmorské výšky bol zostrojený graf, na ktorý odkazuje aj norma STN EN 61869-1. Norma rozlišuje z hľadiska korekčnej krivky dva typy prístrojových transformátorov:

- A) prístrojový transformátor ponorený v oleji
- B) suchý prístrojový transformátor, prípadne plynom izolovaný



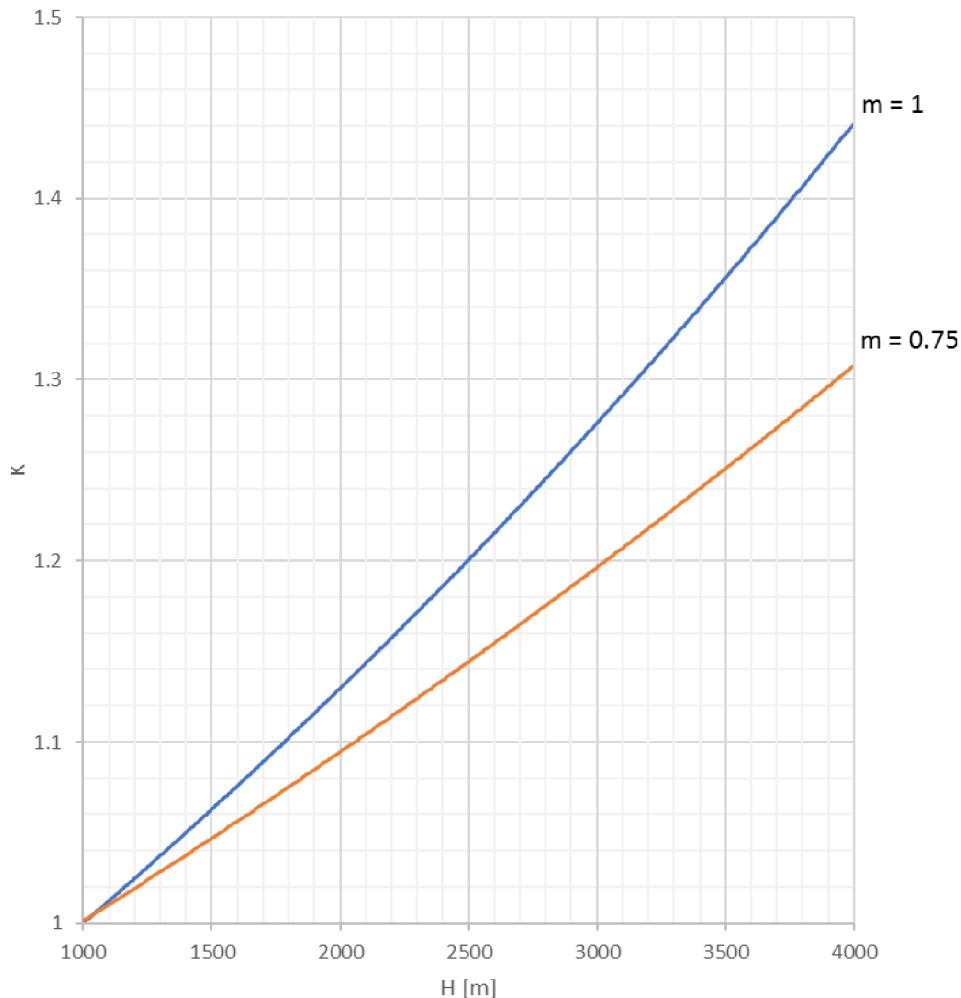
Obrázok 2 - Korekčný činiteľ nadmorskej výšky pre oteplenie [1]

Ďalším parametrom, ktorý nadmorská výška ovplyvňuje je výdržné napätie, to je v prípade inštalácii nad 1000 m.n.m. nutné vynásobiť korekčným činiteľom nadmorskej výšky podľa grafu na obrázku 3, ktorý je taktiež daný normou. Norma rozlišuje dve základné exponenciály a to:

- a) pre  $m = 0,75$  – spínacie impulzné napätie
- b) pre  $m = 1$  – napätia sieťovej frekvencie a atmosférické impulzné napätie

Tvar exponenciál reprezentujúcich korekčné činitele možno spočítať z nasledujúcej jednoduchej rovnice 1.2, v ktorej  $h$  reprezentuje nadmorskú výšku [1]:

$$k = e^{m(h - 1000)/8150} \quad (1.2)$$



Obrázok 3 - Korekčný činiteľ nadmorskej výšky [1]

### 1.3 Vibrácie a otrasy zeme

Vplyv vibrácií, či otrasy zeme v okolí prístrojového transformátora nie sú významné. Vibrácie v okolí sú zväčša spôsobené ovládaním iných zariadení umiestnených v rozvádzači alebo silami, ktoré sú spôsobené prietokom skratových prúdov cez časti prístrojového transformátora, prípadne časti obvodu, v ktorom je prístrojový transformátor zapojený. Vibrácie a otrasy môžu byť ďalej spôsobené prepravou a manipuláciou s prístrojovými transformátormi. Na tieto otrasy a vibrácie nie je kladený veľký dôraz pri manipulácii. Príručka presne určuje spôsob uchytenia pri ručnej manipulácii, respektíve spôsob závesu pri využití popruhov v prípade manipulácie zavesením (obrázok 4). V oblasti so zvýšenou seizmickou aktivitou je nutné kupujúcim špecifikovať úroveň otrasov v súlade s IEC 62271-2. Skúškami sa následne overí, či transformátor spĺňa podmienky určené kupujúcim [1,2].



Obrázok 4 - Príklad správnej manipulácie podľa príručky ABB [2]

## 1.4 Ostatné prevádzkové podmienky

Medzi ostatné prevádzkové podmienky patrí vplyv slnečného žiarenia, znečistenie okolitého vzduchu, vlhkosť atď. V závislosti na mieste použitia môžeme ostatné podmienky rozdeliť pre prístrojové transformátory vnútorné a pre prístrojové transformátory vonkajšie.

### 1.4.1 Vnútorné prístrojové transformátory

Podľa normy sú ostatné prevádzkové podmienky pre vnútorné prístrojové transformátory nasledovné:

- a) vplyv slnečného žiarenia sa môže zanedbať;
- b) okolitý vzduch nie je významne znečistený (prachom, dymom, parami ...);
- c) podmienky vlhkosti:
  1. priemerná hodnota relatívnej vlhkosti meraná počas 24 hodín maximálne 95 %;
  2. priemerná hodnota tlaku vodných pár meraná počas 24 hodín maximálne 2,2 kPa;
  3. priemerná hodnota relatívnej vlhkosti za jeden mesiac maximálne 90 %;
  4. priemerná hodnota tlaku vodných pár za jeden mesiac maximálne 1,8 kPa.

Výskyt kondenzácie pri týchto podmienkach je možný [1].

### 1.4.2 Vonkajšie prístrojové transformátory

Podľa normy sú ostatné prevádzkové podmienky pre vonkajšie prístrojové transformátory nasledovné:

- a) priemerná teplota okolitého vzduchu za 24 hodín maximálne 35 °C;
- b) nutné uvažovať slnečné žiarenie do úrovne 1000 W/m<sup>2</sup> (jasný deň na poludnie);
- c) znečistenie okolitého vzduchu (prachom, dymom, parami ...) podľa normy IEC 60815;
- d) tlak vetra maximálne 700 Pa (zodpovedá rýchlosti 34 m/s);
- e) nutné uvažovať o prítomnosti kondenzácie a mrholenia;
- f) povlak ľadu do 20 mm.

## 1.5 Typ uzemnenia siete

Norma STN EN 61869-1 uvažuje nasledujúce typy uzemnenia siete, ktoré sú z hľadiska praxe najpoužívanejšie:

- sieť s izolovaným neutrálom;
- sieť s rezonančným uzemnením;
- sieť s uzemneným neutrálom;
- sieť s priamo uzemneným neutrálom;
- sieť s neutrálom uzemneným cez impedanciu.

## 1.6 Menovité údaje prístrojového transformátora

Menovité údaje transformátora sa podľa normy volia na základe týchto údajov:

- najvyššie napätie pre zariadenie ( $U_m$ )
- menovitá izolačná hladina
- menovitá frekvencia ( $f_R$ )
- menovitý výkon
- menovitá trieda presnosti

*„Menovité údaje platia pre normalizované referenčné podmienky okolia (teplota 20 °C, tlak 101,3 kPa a vlhkosť 11 g/m<sup>3</sup>) podľa špecifikácie v IEC 60071-1 [1].“*

Pre transformátory napätia sa v norme udávajú tri základné hodnoty napätia. Prvou hodnotou je najvyššie napätie zariadenia ( $U_m$ ), druhou je výdržné napätie sieťovej frekvencie a treťou hodnotou je menovité atmosférické výdržné impulzné napätie. Pri zapojení transformátora v trojfázovej sústave medzi fázový vodič a nulový bod, platí pre menovité napätie primáru fázová hodnota podľa tabuľky 2 delená odmocninou z troch. Pre sekundárne napätie platí menovitá hodnota 100 V, v prípade merania fázových hodnôt napätia v trojfázovej sústave opäť platí, že výslednú hodnotu sekundárnej strany je nutné vydeliť odmocninou z troch [3].

Tabuľka 2: Menovité izolačné hladiny primárnych svoriek [1]

Najvyššie napätie zariadenia $U_m$ (ef. hodnota) [kV]	Menovité výdržné napätie sieťovej frekvencie (ef. hodnota) [kV]	Menovité atmosférické impulzné výdržné napätie (vrchol. hodnota) [kV]
0,72	3	-
1,2	6	-
3,6	10	20 (40)
7,2	20	40 (60)
12	28	60 (75)
17,5	38	75 (95)
24	50	95 (125)
36	70	145 (170)

## 2. PRÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR AKO SÚČASŤ ROZVÁDZAČA VN UNIGEAR ZS1

Na prístrojový transformátor je možné pozerat' sa z viacerých uhlov pohľadu. Prvým je prístrojový transformátor ako samostatný prístroj. Druhý pohľad je zo strany rozvádzača VN ako v prípade firmy ABB. V druhom prípade teda hovoríme o prístrojovom transformátore ako súčiastke, či komponente rozvádzača. Tento komponent môže byť v rozvádzači umiestnený rôznymi spôsobmi:

- a) prístrojový transformátor montovaný na pevno
- b) prístrojový transformátor s možnosťou vybratia
- c) prístrojový transformátor s možnosťou vysunutia

V prípade všetkých troch možných spôsobov aplikácie sa z prístrojového transformátora stáva v čase prevádzky pevná súčasť rozvádzača. Prístrojový transformátor sa z tohto dôvodu musí prispôbiť všetkým podmienkam, ktoré v rozvádzači nastávajú. Tým pádom prístrojový transformátor pracuje pri teplote, vlhkosti a celkovom prostredí, ktoré je vo vnútri rozvádzača VN. Toto prostredie samozrejme musí zodpovedať prevádzkovým podmienkam transformátora popísanými v predošlej kapitole práce [4,5].

### 2.1 Rozvádzač VN UniGear ZS1 firmy ABB

UniGearZS1 je trojfázový vzduchom izolovaný rozvádzač v kovovom obale (skrini) na vnútorné použitie s prevádzkovým napätím do úrovne 24 kV. Všetky komponenty a súčasti zostavy sú montované a kompletované priamo vo výrobnom procese rozvádzača. Jednotlivé časti UniGear ZS1 sú vytvorené ako komponenty a z toho dôvodu je možná rôzna konfigurácia presne podľa požiadaviek zákazníka. Systém UniGear ZS1 sa momentálne vyrába v troch základných konfiguráciách:

- a) jednoúrovňový
- b) dvojúrovňový
- c) so systémom dvojitéch prípojnic

Keďže je systém zložený z jednotlivých komponentov, môžeme jeho vnútro rozdeliť na výkonovú časť, nízko napäťovú časť a komoru pre uvoľnenie plynov spôsobených elektrickým oblúkom. Prehľadnejšie delenie systému je viditeľné na obrázku 5, kde sú jednotlivé časti označené písmenami A-E a reprezentujú nasledujúce časti:

- A) výkonový vypínač
- B) prípojnice
- C) káble (káblový priestor)
- D) nízko napäťová časť
- E) komora pre uvoľnenie plynov vznikajúcich pôsobením elektrickým oblúkom



Obrázok 5 - Bočný pohľad na rozvádzač UniGear ZS1 [4]

## 2.2 Prevádzkové podmienky rozvádzača UniGear ZS1

Ako je spomenuté v úvode kapitoly, prístrojový transformátor je súčasťou rozvádzača, teda je jedným z jeho komponentov. Samotný rozvádzač UniGear ZS1 je určený pre vnútorné použitie, z toho teda plynie, že ako komponent budú použité prístrojové transformátory pre vnútorné použitie, ktorých prevádzkové podmienky sú bližšie popísané v kapitole 1.4.1. Samotný rozvádzač UniGear ZS1 musí podľa príručky spĺňať podmienky, ktoré môžeme rozdeliť na tri základné kategórie:

- a) normálne
- b) optimálne
- c) náročné

V závislosti na týchto podmienkach sú vykonávané rôzne servisné úkony, kontroly a v neposlednom rade tieto podmienky majú vplyv na životnosť samotného prístrojového transformátora [4,5].

### 2.2.1 Normálne prevádzkové podmienky UniGear ZS1

Normálnymi pracovnými podmienkami sa rozumejú podmienky, keď prístrojový transformátor nie je vystavený žiadnym vplyvom, ktoré by napomáhali rýchlejšiemu starnutiu prístroja. Starnutie prístrojového transformátora dokážeme spomaliť údržbou.

Pri dodržaní predpísaných intervalov údržby je transformátor schopný vydržať po celú dobu svojej životnosti. Podľa príručky sú normálne prevádzkové podmienky nasledovné:

- a) teplota v rozmedzí od -30 °C do +40 °C
- b) nadmorská výška do 1000 m.n.m
- c) minimálny vplyv slnečného žiarenia
- d) neznečistený okolitý vzduch
- e) seizmické podmienky spĺňajúce 0,2 krát hmotnosť zariadenia v horizontálnom a 0,16 krát hmotnosť zariadenia vo vertikálnom smere

Príručka ďalej popisuje podmienky, ktoré sa vymykajú normálnym a teda sú špeciálnymi prevádzkovými podmienkami:

- a) teplota mimo rozmedzia od -30 °C do +40 °C
- b) nadmorská výška vyššia než 1000 m.n.m
- c) vystavenie zariadenia znečistenému vzduchu (prachom, plynmi, soľami ...)
- d) vystavenie zariadenia nadmerným vibráciám, nakláňaniu, nárazom ...
- e) priestorová limitácia v rozmiestnení jednotlivých komponentov [4,5]

### **2.2.2 Optimálne prevádzkové podmienky UniGear ZS1**

Optimálne prevádzkové podmienky sú zhodné s normálnymi, avšak navýšením servisných intervalov dochádza k spomaleniu starnutia samotného rozvádzača a jeho komponentov. Optimalizácia v tomto prípade spočíva v poukázaní na faktory a upravení podmienok na také, ktoré predĺžia životnosť samotného rozvádzača [4,5].

### **2.2.3 Náročné prevádzkové podmienky UniGear ZS1**

Náročnými prevádzkovými podmienkami sa rozumejú také, ktoré sa vymykajú normálnym prevádzkovým podmienkam čo i len v jednom bode. Porušenie čo i len jednej podmienky má vplyv na celú zostavu a komponenty rozvádzača. Je samozrejmé, že porušenie podmienok má vplyv na životnosť a taktiež môže spôsobovať rýchlejšie opotrebovanie mechanizmov zariadenia. Napriek porušeniu podmienok dokáže rozvádzač pracovať správne, avšak dochádza k zvýšenému riziku zlyhania rozvádzača. Zamedziť, respektíve zmierniť riziko je možné zvýšením servisných intervalov a kontrol zariadenia [4,5].

### 3. PODMIENKY OKOLIA A VPLYV JEDNOTLIVÝCH FAKTOROV

Vplyv okolitých faktorov na prístrojový transformátor nie je možné zanedbať. Ako môžeme vidieť v predošlých častiach práce, normy špecifikujú presné podmienky okolia pre transformátor samotný ako aj pre transformátor ako súčasť rozvádzača VN. Základné faktory, ktoré majú vplyv na prístrojový transformátor, sú teplota, vlhkosť a nadmorská výška.

#### 3.1 Vlhkosť

V prípade prístrojového transformátora pre bežné aplikácie je okolitým prostredím vzduch, ktorého parametre by mali byť v čase konštantné. Zmenou vlhkosti, napríklad (ako je spomenuté vyššie) výskytom kondenzácie, dochádza k zmene parametrov tohto vzduchu. Dôsledkom zvýšenia vlhkosti je zvýšenie vodivosti izolačného média a možný výskyt čiastočných, prípadne iných výbojov, ktorými sa podrobnejšie zaoberá jedna z nasledujúcich kapitol práce. Zvýšená vlhkosť môže mať zlý vplyv na životnosť kontaktov, spojov či iných kovových prvkov transformátora, napriek tomu, že tie majú na sebe povrchovú úpravu. Vlhkosť v kombinácii s nízkymi teplotami môže vytvárať námrazy, ktorých hrúbka je nebezpečná pre vonkajšie prístrojové transformátory. Rovnako ako teplota prístrojového transformátora aj vlhkosť prostredia je definovaná normou a výrobcom pre konkrétnu aplikáciu a prostredie, v ktorom bude prístrojový transformátor použitý.

Vlhkosť bude ďalším parametrom, ktorý bude potrebné v okolí prístrojového transformátora monitorovať [1,4].

#### 3.2 Teplota

Hodnota tejto veličiny je podstatnou z hľadiska garantovanej životnosti, kedy norma STN EN 61869-1 presne určuje medze pre jednotlivé typy transformátorov, čo môžeme vidieť v podkapitolách 2 a 3 v kapitole 1. Rovnako ako okamžitá hodnota teploty sú dôležité aj jej zmeny, ktoré pri náhlejšej a veľkej zmene môžu mať za následok kondenzovanie vody v blízkosti prístrojového transformátora. Kondenzácia by mala za následok zvyšovanie vlhkosti, ktorá je ďalším z faktorov. S teplotou je úzko spojená hodnota rezistivity, preto platí, že s narastajúcou teplotou stúpa hodnota rezistivity. Vyššia rezistivita materiálu môže znamenať vyššie straty v materiáli, ktoré vytvárajú Joulovo teplo, to môže mať za následok ďalšie zvyšovanie teploty. Vyššia teplota má výrazný vplyv na rýchlosť degradácie izolačných materiálov v čase, ktoré sú na základe maximálnej dovolenej teploty rozdelené normou STN EN 61869-1 do niekoľkých kategórií. Rozdelenie izolačných materiálov do spomínaných kategórií môžeme vidieť v nasledujúcej tabuľke.

Tabuľka 3: Skupiny izolačných materiálov podľa max. hodnoty teploty [6]

Skupina materiálov	Y	A	E	B	F	H	N	R	-
$\vartheta_{\max}$ [°C]	90	105	120	130	155	180	200	220	250



Z toho vyplýva, že jednou z podstatných veličín, ktoré bude potrebné sledovať, je okolitá teplota. Rovnako však aj teplotu vo vnútri transformátora, ktorá môže byť varovným signálom pre rôzne prechodné deje či poruchy v jeho vnútri [1,4].

### **3.3 Nadmorská výška**

Štandardne je nadmorská výška bežných aplikácií obmedzená na nadmorské výšky do 1000 m.n.m. Dôvod je prostý, s nadmorskou výškou dochádza ku zmenám teploty, vlhkosti a hlavne tlaku, ktoré vplývajú na jeho prevádzku. Vplyv nadmorskej výšky na prístrojový transformátor je bližšie vysvetlený v podkapitole 1.2. Opäť ako v predošlých dvoch prípadoch norma definuje podmienky zmeny nadmorskej výšky, rovnako ako príručky výrobcov prístrojových transformátorov [1,4].

### **3.4 Otrasy, vibrácie a seizmická činnosť**

Medzi ďalšie parametre môžeme zaradiť vibrácie a otrasy. Vplyv vibrácií a otrasov, ktoré vnikajú bežnou prevádzkou sa v tomto prípade zanedbáva. Avšak pre špecifické oblasti, kde sú otrasy zemskej kôry (zemetrasenia) bežným javom, je monitorovanie týchto otrasov nutné. Preto by bolo rozumné do miesta inštalácie zariadenia umiestniť meranie, ktoré by upozornilo na výskyt týchto otrasov, prípadne na dosiahnutie hodnoty otrasov, ktorá môže mať na prístrojový transformátor vplyv [1,4].

## 4. JAVY VYSKYTUJÚCE SA PRI PREVÁDZKE PRÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTOROV

Pri prevádzke prístrojového transformátora je potrebné dodržať prevádzkové podmienky, ktoré stanovuje norma STN EN 61869 vo svojich úvodných troch častiach. Ako pri každom zariadení má nedodržanie týchto prevádzkových podmienok negatívny vplyv na životnosť, parametre či správanie prístroja. Z elektrického hľadiska sú to dva najčastejšie javy, ktoré sa najväčšou mierou prejavia pri nedodržaní prevádzkových podmienok určených normou, prípadne bližšie špecifikovaných výrobcom, a to:

- a) tepelné účinky elektrického prúdu
- b) elektrické výboje

V ďalších častiach kapitoly sa zameriame na vysvetlenie princípu a podmienok vzniku javov. Budeme sa sústrediť aj na následky, ktoré tieto javy môžu mať na samotný prístrojový transformátor [6].

### 4.1 Tepelné účinky elektrického prúdu

Prechodom elektrického prúdu  $I$  [A] materiálom s odporom  $R$  [ $\Omega$ ] za časový úsek  $dt$  vzniká teplo  $Q$  [J]. Tento dej môžeme zapísať matematickou rovnicou nasledovne:

$$dQ = R \cdot I^2 dt \quad (4.1)$$

Túto matematickú rovnicu môžeme ďalej rozvinúť, respektíve rozpísať na jednotlivé zložky tepla, ktoré sú prechodom prúdu vytvárané.

$$R \cdot I^2 dt = \alpha_0 \cdot S \cdot \Delta\vartheta dt + c \cdot V d\vartheta \quad (4.2)$$

Ako vidíme z rovnice 3.2 teplo vytvárané prechodom prúdu tvoria dve samostatné zložky [6].

#### 4.1.1 Teplo odvedené do okolia

Prvou zložkou je teplo odvedené do okolia. Jeho výpočet logicky pozostáva z plochy  $A$  [ $m^2$ ], z ktorej je teplo vyžarované do okolia. Súčiniteľom prestupu tepla  $\alpha_0$  [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ] je vyjadrené s akou účinnosťou je teplo odvádzané do okolia za časový element  $dt$ . Posledným údajom prvej zložky tepla tvoreného prechodom prúdu je  $\Delta\vartheta$ , ktorý reprezentuje hodnotu okamžitého oteplenia z pôvodnej teploty na konečnú teplotu [6].

#### 4.1.2 Teplo spotrebované na zvýšenie teploty materiálu

Druhou zložkou je časť tepla, ktorá je spotrebovaná na zvýšenie teploty samotného materiálu, ktorým elektrický prúd prechádza. V tomto prípade je podstatný objem  $V$  [ $m^3$ ] samotného materiálu. Každý materiál má svoju materiálovú vlastnosť, ktorou je objemová tepelná kapacita  $c$  [ $J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$ ]. Tá reprezentuje také množstvo tepla,

ktoré je potrebné dodať jednotkovému objemu látky, aby sa jeho teplota zvýšila o jeden teplotný stupeň (°C prípadne K) [6].

Postupnými matematickými úpravami z rovnice 3.2 dokážeme vyjadriť dve veľmi podstatné veličiny, ktoré sú potrebné pri dimenzovaní zariadenia z hľadiska oteplenia [6].

### 4.1.3 Maximálne oteplenie

Ako prvú môžeme z rovnice vyjadriť hodnotu maximálneho oteplenia  $\Delta\vartheta_{\infty}$  [K], ktoré môže materiál (zariadenie) dosiahnuť. Matematicky môžeme hodnotu maximálneho oteplenia vyjadriť takto:

$$\Delta\vartheta_{\infty} = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot A} \quad (4.3)$$

### 4.1.4 Časová konštanta oteplenia

Ďalej z rovnice úpravou dostávame časovú konštantu materiálu  $\tau$  [s] (zariadenia), ktorá vyjadruje čas, za ktorý by materiál (zariadenie) dosiahol ustálené oteplenie, ak by sa všetko uvoľnené teplo spotrebovalo len na zvyšovanie jeho teploty. Matematicky ju môžeme vyjadriť nasledujúcou rovnicou 4.4:

$$\tau = \frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot A} \quad (4.4)$$

Zavedením zjednodušenia, ktorého podstatou je, že vodičom po dlhú dobu preteká rovnaký prúd (o ktorom môžeme povedať, že je ustáleným prúdom), dostávame zjednodušenú verziu matematickej rovnice 4.2:

$$R \cdot I^2 = \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta_{\infty} \quad (4.5)$$

V zjednodušenej rovnici dosadením za maximálnu hodnotu oteplenia  $\Delta\vartheta_{\infty}$  dostávame matematický popis tepelnej rovnováhy v systéme. Tepelná rovnováha znamená, že všetko vytvorené teplo je rovné teplu odovzdanému do okolia. Maximálna hodnota oteplenia  $\Delta\vartheta_{\infty}$  nesmie presiahnuť určitú medznú hodnotu z dôvodu bezpečnosti a spoľahlivej prevádzky zariadenia.

Hodnota maximálneho oteplenia je dôležitou hodnotou hlavne z hľadiska výberu izolačného materiálu. Izolačné materiály sa delia do niekoľkých základných skupín, kedy pre každú skupinu materiálov je presne určená maximálna hodnota teploty, ktorú môže materiál dosiahnuť. Prehľad skupín izolačných materiálov a ich maximálnej teploty je vidieť v tabuľke 3, ktorá sa nachádza v tejto práci na strane číslo 23.

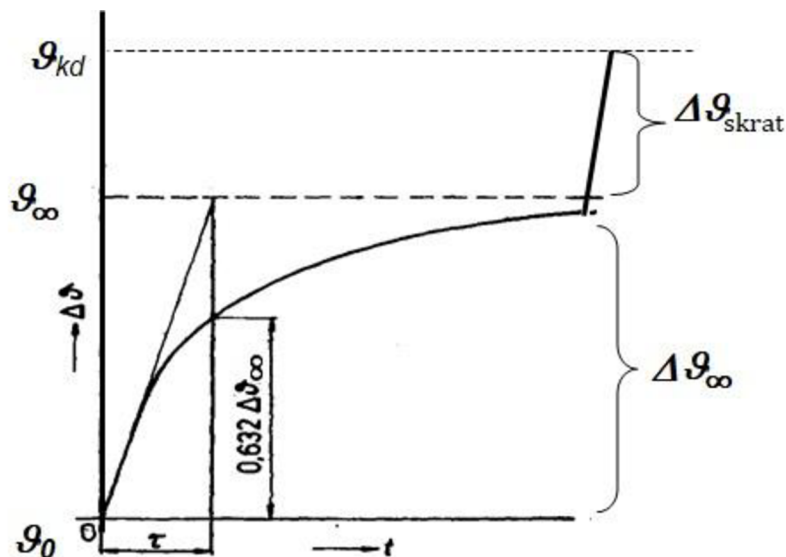
Ako príklad si môžeme uviesť konkrétne materiály pre niektoré zo skupín izolantov. V skupine Y sa nachádza napríklad papier, bavlna či hodváb; v skupine A sú to rovnaké materiály avšak impregnované živcami alebo olejmi. Skupinu C tvoria materiály ako porcelán, sľuda prípadne sklo. Rozdelenie izolačných materiálov do jednotlivých tepelných tried bližšie špecifikuje norma ČSN EN 60085 ed.2 (prípadne jej slovenský ekvivalent STN EN 60085 (33 0250)) [6].

## 4.1.5 Krátkodobé oteplenie

Z rovnice 3.2 zistujeme, že množstvo tepla, ktoré sa vytvorí je závislé na veľkosti prechádzajúceho prúdu (a to kvadraticky) a na čase, po ktorý prúd zariadením prechádza. Z tohto hľadiska teda poznáme oteplenie krátkodobé, ktoré uvažujeme za splnenia podmienky, že doba pôsobenia je kratšia než  $0,2\tau$ . Za splnenia tejto podmienky zanedbávame teplo odvedené do okolia a počítame s tým, že všetko teplo je spotrebované na oteplenie samotného prístroja.

Pri krátkodobých otepleniach je najhorším variantom prípad skratu, kedy po dlhodobom pôsobení menovitého prúdu dochádza k nárazovému krátkodobému pôsobeniu skratového prúdu. Účinky menovitého a skratového prúdu vytvoria oteplenia, ktoré sa v tomto prípade pripočítajú k teplote okolia a spolu vytvoria výslednú hodnotu teploty ako vidíme v rovnici 4.6 a následne na obrázku 6 [6].

$$\vartheta_{KD} = \vartheta_0 + \Delta\vartheta_{\infty} + \Delta\vartheta_{\text{SKRAT}} \quad (4.6)$$



Obrázok 6 - Priebeh najnepriaznivejšieho oteplenia prístroja (pôsobením skratu) [6]

V závere tejto podkapitoly môžeme konštatovať, že oteplenie zariadenia bude jedným z nosných parametrov, ktorý bude potrebné sledovať.

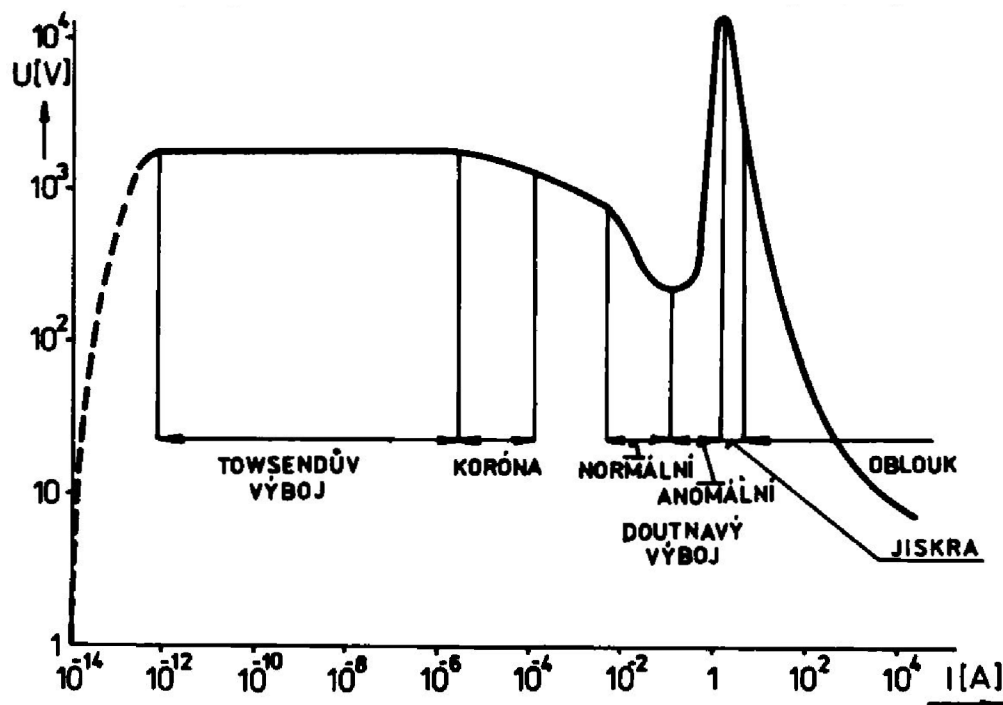
## 4.2 Výboje v elektrických prístrojoch

Elektrickým výbojom sa v jednoduchosti rozumie fyzikálny jav, počas ktorého sa z izolantu (nevodiča) stáva vodič elektrického prúdu. Pri výbojoch spravidla hovoríme o krátkodobých fyzikálnych javoch. Vznik elektrického výboja je podmienený prítomnosťou elektricky nabitých častíc, vedenie prúdu je zabezpečované prostredníctvom elektrónov. V plynnom prostredí je pre vytvorenie výboja potrebná prítomnosť elektrónov prípadne iónov. Z hľadiska veľkosti prúdu a čiastočne z hľadiska napätia rozoznávame nasledujúce typy výbojov (obrázok 7):

- a) (Towsendov) temný výboj
- b) korónový výboj
- c) tlejúci výboj
- d) iskrový výboj
- e) oblúkový výboj
- f) čiastočné výboje

Ďalším dôležitým parametrom je prostredie medzi elektródami, kde samotný oblúk vzniká. Určujúcimi parametrami pre vlastnosti oblúku sú:

- a) napätie na elektródach
- b) prúd prechádzajúci dráhou, kde vzniká výboj
- c) chemické zloženie plazmy výboja
- d) tlak vo výbojovej dráhe
- e) spôsob chladenia
- f) elementárne pochody vo výbojovej dráhe
- g) tvar a materiál elektród



Obrázok 7 - Prehľadová charakteristika elektrických výbojov [6]

Vzájomná závislosť parametrov oblúku je pochopiteľná, sú medzi sebou úzko prepojené a zmena jedného z nich vyvolá zmenu ostatných (napr. z Ohmovho zákona plynie závislosť medzi napätím a prúdom, ďalej na chemickom zložení a tlaku prostredia závisí veľkosť prúdu ...). Ak hovoríme o závislosti napätia na prúde oblúku, hovoríme o charakteristike výboja [6].

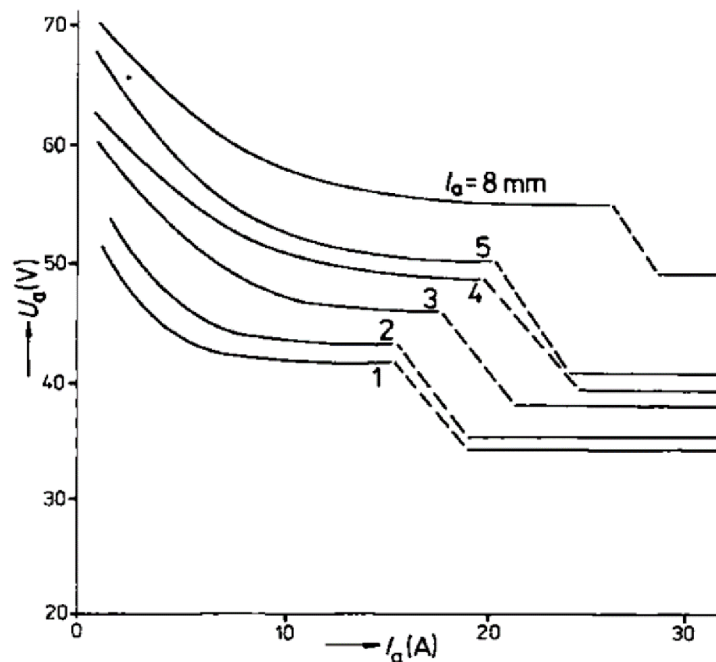
Obrázok 7 potvrdzuje fakt, že jednotlivé parametre výboja sú na sebe závislé. Môžeme veľmi dobre vidieť vzájomnú závislosť prúdu (na x-ovej osi) a napätia (na y-ovej osi). Ďalej z obrázka vidíme, že každému druhu výboja je priradená veľkosť (rozmedzie) prúdu, v ktorom vzniká a pôsobí.

## 4.2.1 Elektrický oblúk v prístrojoch

Elektrický oblúk je druhom elektrického výboja, ktorý vzniká v plynnom prostredí a môže existovať ľubovoľne dlhú dobu, respektíve kým nie je prerušený nejakým účinným spôsobom. Podstatnými znakmi elektrického oblúku sú:

- vysoká teplota katódy (emisie elektrónov)
- malé elektródové úbytky
- malé napätie medzi elektródami
- veľký prúd oblúkom
- intenzívne svetelné vyžarovanie oblúka

Keďže jednými z hlavných parametrov výboja sú napätie a prúd, môžeme oblúk rozdeliť podľa ich typu na jednosmerný a striedavý oblúk. Základné znalosti problematiky elektrotechniky nám napovedajú, že jednosmerný oblúk bude charakterizovaný statickou charakteristikou (viz obrázok 8), ktorá bude charakterizovať vzťah prúdu a napätia na oblúku. Rovnaká charakteristika bude platiť aj pre striedavý oblúk, avšak v tomto prípade bude charakteristika dynamickou charakteristikou (viz obrázok 9) [6].

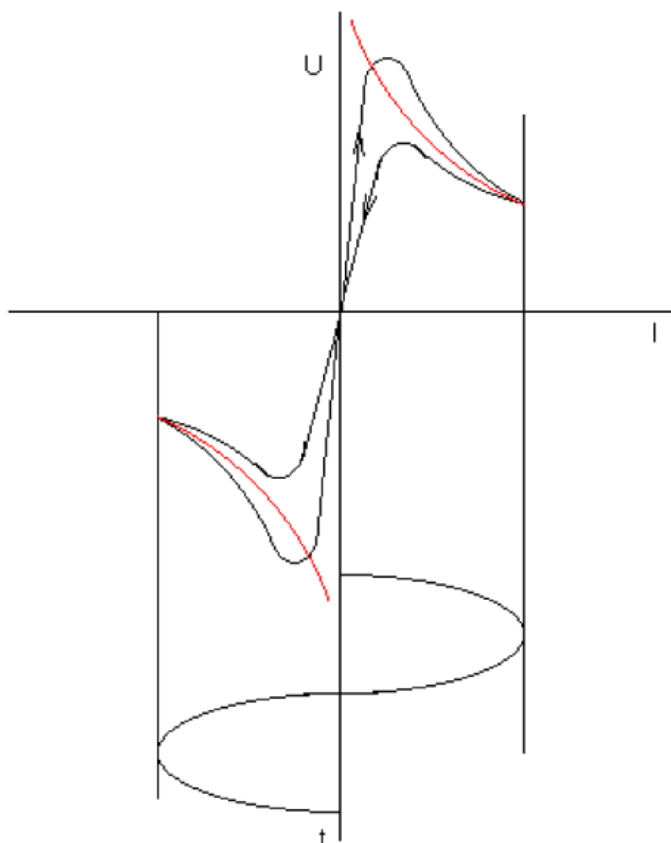


Obrázok 8 - Statická charakteristika (jednosmerného) oblúku [6]

Statickú charakteristiku popísala Ayrtonová vo svojej rovnici, ktorú v literatúre nájdeme v tvare:

$$U_A = \alpha_A + \beta_A I_A + \frac{\gamma_A + \delta_A I_A}{I_A} \quad (4.7)$$

Konštanty  $\alpha_A$ ,  $\beta_A$ ,  $\gamma_A$  a  $\delta_A$  sú závislé na druhu a tlaku plynu, v ktorom horí oblúk, ale taktiež na materiály, tvare a rozmere elektród. Dĺžka oblúku je v rovnici 4.7 označená symbolom  $l_A$  [6].



Obrázok 9 - Dynamická charakteristika (striedavého) oblúku [6]

Pre vznik horenia oblúku je potrebná dostatočná ionizácia prostredia. V prípade, že nad touto prevláda rekombinácia, dochádza k zániku oblúku, teda jeho zhasnutiu.

Vo všeobecnosti môžeme povedať, že poznáme dva hlavné deje, pri ktorých v elektrotechnickej praxi dochádza ku vzniku oblúku:

- a) zapínacie – tento typ oblúku spravidla zaniká po odznení deja a nemá zásadný vplyv na dej samotný
- b) vypínacie – v tomto prípade je potrebné zasiahnuť vhodným zhášacím mechanizmom, pretože vypínací oblúk môže dosahovať vysoké hodnoty prúdu

V oboch prípadoch môže za určitých okolností dôjsť k poškodeniu prístroja samotného a to napríklad poškodením kontaktov (oblúk môže vzniknúť napríklad vďaka ich nerovnosti) [6].

## 4.2.2 Čiastočné výboje

Čiastočné výboje sú výbojmi vznikajúcimi v dielektrických či elektrických materiáloch. Môžu vznikajú vo všetkých typoch prostredia - plynnom, pevnom, prípadne kvapalnom dielektriku. Spravidla za ich vznikom stojí silná koncentrácia elektrického namáhania na mieste vzniku výboja. Vo všeobecnosti ich môžeme prirovnať k akýmisi krátkym impulzom, pri ktorých hovoríme o dobe trvania kratšej ako 1  $\mu$ s. Majú niekoľko základných vlastností, ktorými pôsobia na materiál:

- a) elektrické
- b) chemické
- c) erozívne
- d) tepelné

Podľa nasledujúceho delenia delíme čiastočné výboje v závislosti na mieste ich vzniku na tieto tri podskupiny:

- a) vnútorné - vznikajú v plynnom prostredí, ktoré je obklopené plynom či prípadne pevným dielektrikom. Pri PT môžu vznikajú napríklad v mikroskopických dutinkách v dielektriku;
- b) vonkajšie - vznikajú v plyne v blízkosti elektród a sú zväčša z kategórie tlejúcich či korónových výbojov. V našom prípade popísané v kapitole 4.2.3;
- c) povrchové - ako už ich názov napovedá, vznikajú na povrchu materiálov a typickým príkladom sú napríklad drážky v točivých strojoch alebo priechodky pri prístrojových transformátoroch.

Ďalej môžeme čiastočné výboje rozdeliť na niekoľko typov. Základným parametrom pre určenie typu čiastočného výboja je jeho fázový uhol, ktorý bližšie určuje miesto a povahu výboja. K určeniu tohto podstatného parametru sa dodnes využívajú Lissajousove obrazce. Typy výbojov sú značené abecedne od A po O, kedy každý z výbojov pôsobí v inom materiáli a dôvod jeho vzniku je taktiež rozličný.

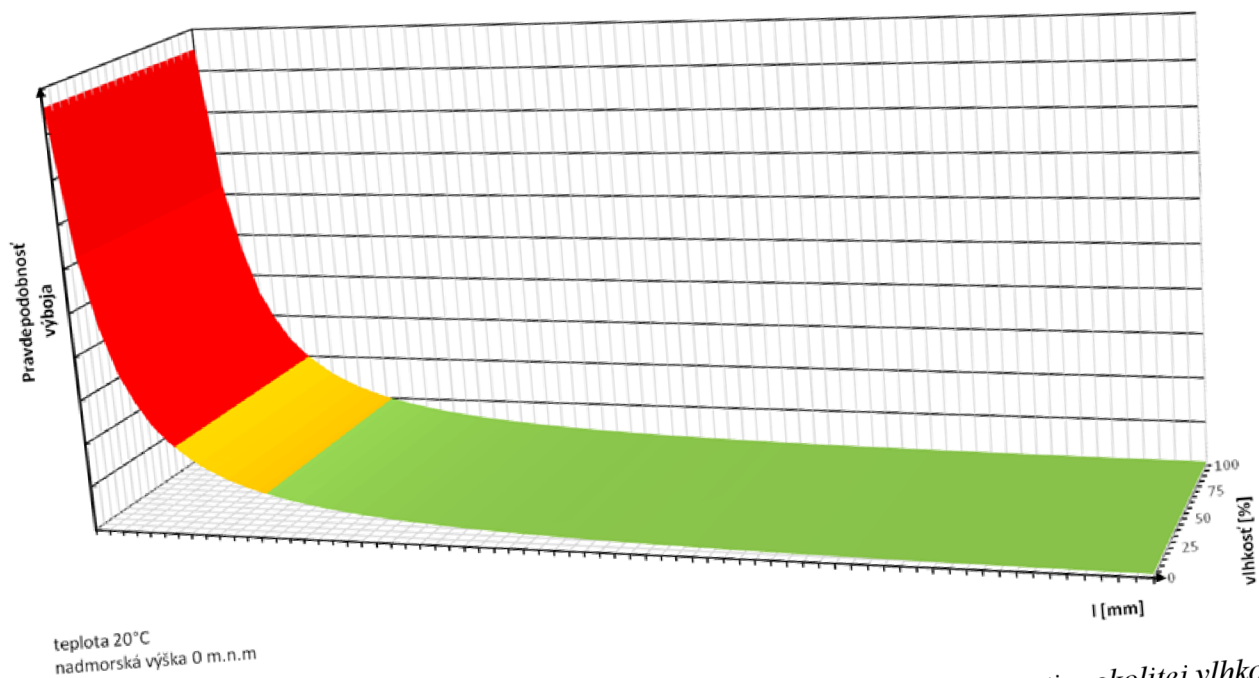
V závere podkapitoly môžeme konštatovať, že elektrické výboje sú ďalším javom, ktorý bude z hľadiska správnej prevádzky a životnosti prístrojového transformátora potrebné monitorovať. Monitorovanie bude dôležité kvôli vysokej teplote, ktorá pri horení oblúku vzniká ako aj kvôli prúdu, ktorý môže pri horení oblúku dosahovať hodnôt mimo rozsah prístrojových transformátorov [8].

## 4.2.3 Medzifázové výboje (vonkajšie)

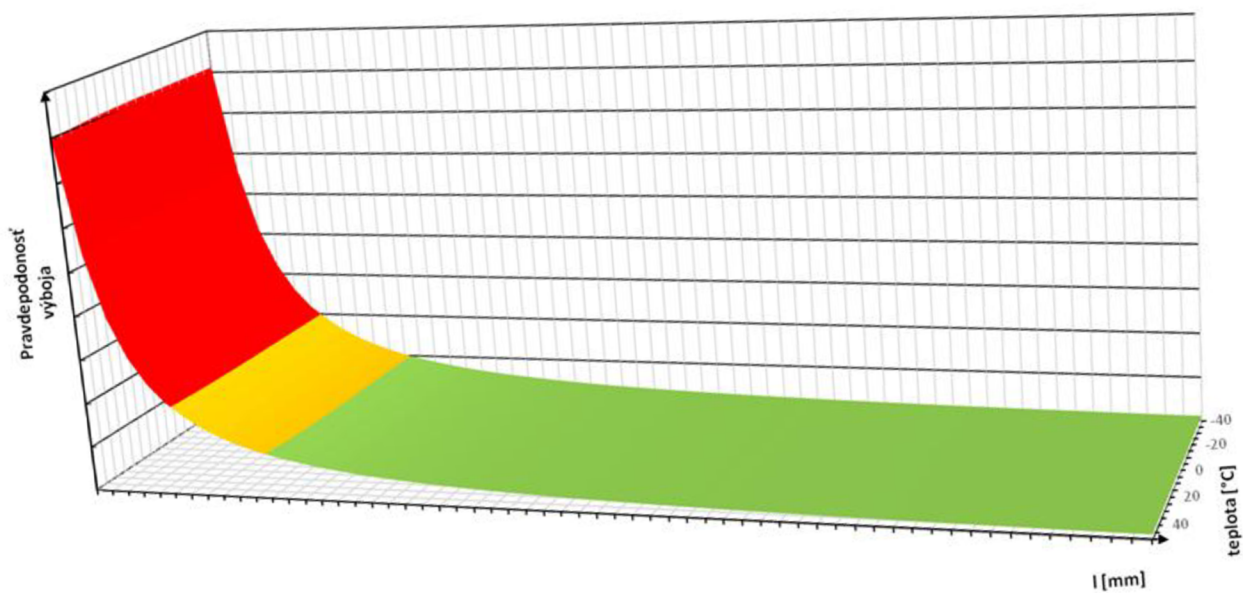
Keďže predmetom bakalárskej práce je umiestnenie transformátora v rozvádzači UniGear ZS1, je potrebné uvažovať pri prevádzke aj s výbojmi, ktoré nastávajú medzi jednotlivými fázami. Spravidla sa využívajú jednofázové prístrojové transformátory, z čoho vyplýva, že v trojfázovej sústave je nutné použiť tri kusy PT. Pravdepodobnosť výboja medzi fázami je rôzne závislá na mnohých parametroch okolitého prostredia, ako napríklad vlhkosť, teplota, či nadmorská výška, s ktorou priamo súvisí okolitý tlak. Pomocou matematického programu, ktorý vytvorila spoločnosť ABB, sme vypočítali hodnoty a parametre okolitého prostredia a ich vplyv na medzifázové výboje v závislosti na vzdialenosti jednotlivých prístrojových transformátorov. Je potrebné pozrieť sa na obrázok 5 pre lepšie predstavu o umiestnení PT v rámci UniGear ZS1.



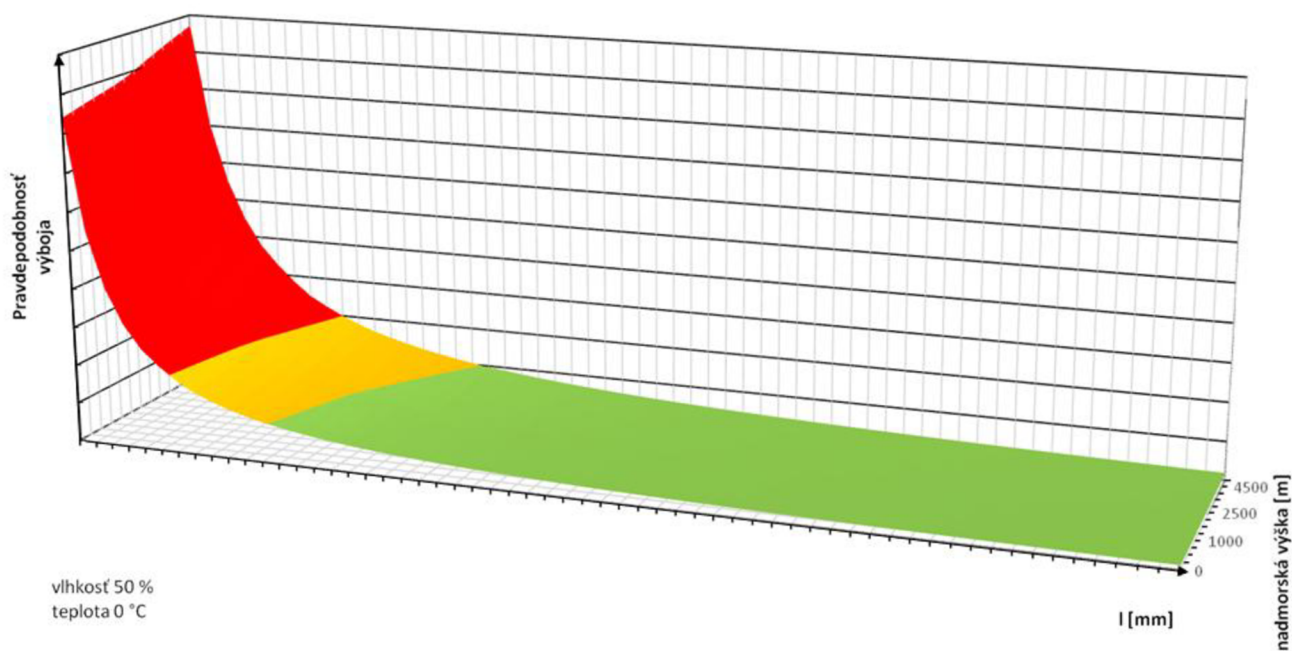
Na nasledujúcich obrázkoch sú zobrazené jednotlivé závislosti, kde červená farba reprezentuje vysokú, žltá farba strednú a zelená malú pravdepodobnosť medzifázového výboja [2].



Obrázok 10 - Pravdepodobnosť medzifázového výboja v závislosti na vzdialenosti a okolitej vlhkosti



Obrázok 11 - Pravdepodobnosť medzifázového výboja v závislosti na vzdialenosti a okolitej teplote



Obrázok 12 - Pravdepodobnosť medzfázového výboja v závislosti na vzdialenosti a nadmorskej výške

Závislosti na obrázkoch 10-12 sú vynesené pre hodnotu napätia 11 kV. Je potrebné podotknúť, že pre rôzne hodnoty napätia bude závislosť meniť svoj tvar a vlastnosti. Z obrázkov môžeme zistiť, že najdôležitejším parametrom okolitého prostredia je nadmorská výška, ktorá priamo súvisí s tlakom okolitého vzduchu. Je všeobecne známym faktom, že s narastajúcou nadmorskou výškou klesá atmosférický tlak, a to až do takej miery, že v nadmorskej výške 5000 m.n.m dosahuje polovičnej hodnoty oproti hladine mora.

S nadmorskou výškou spravidla dochádza aj ku zmenám teploty, s rastúcou nadmorskou výškou teplota klesá za predpokladu platnosti základných fyzikálnych zákonov. Pri uvažovaní zmeny tlaku spoločne so zmenou teploty platí, že s poklesom teploty narastá pravdepodobnosť výboja. Pri zachovaní konštantného tlaku a zmeny teploty samotnej nepozorujeme žiadnu zmenu pravdepodobnosti výboja.

Pre simuláciu vlhkosti bola v prípade programu od firmy ABB použitá pre zjednodušenie výpočtov destilovaná voda. Pre výsledky, ktoré by zodpovedali realite je potrebné uskutočniť laboratórne meranie, ktoré by pokrylo rôzne prípady a možnosti znečistenia okolitého prostredia a tým zmenu vlastností a parametrov vlhkosti.

Simuláciu v programe môžeme aj napriek zjednodušeniam (selekcia vypočítaných údajov pre účely grafického spracovania, uvažovanie destilovanej vody ako zdroja vlhkosti, pokles tlaku spoločne s poklesom teploty) považovať za úspešnú a veľa vypovedajúcu. Simulácia vychádzala zo základných fyzikálnych zákonov, materiálových vlastností použitých materiálov a Paschenovej krivky. Paschenova krivka graficky znázorňuje Paschenov zákon, ktorý upravuje súvislosť medzi vzdialenosťou elektród vo výbojovom priestore, tlakom plynu a zápalným napätím pre konkrétny plyn prítomný vo výbojovom priestore. Opäť sme sa ako v prípade štúdia noriem dopracovali k rovnakým veličinám, ktoré je potrebné monitorovať. Simulácia nám teda potvrdila, že vlhkosť, teplota a tlak (resp. nadmorská výška) budú v prípade monitorovacieho zariadenia podstatné veličiny [2,8,10].

### 4.3 Ostatné javy vplývajúce na prístrojový transformátor

V technickej praxi sa stretávame s ďalšími dejmi, ktorých účínok a pôsobenie je potrebné v prípade prístrojového transformátora zväžiť. Pri prístrojovom transformátore je potrebné čím ďalej tým viac uvažovať zarušenie jeho primárnej strany vyššími harmonickými. Taktiež je potrebné zväžiť jav, ktorý prináša rozširovanie distribučných sietí a vzájomná interakcia ich prvkov – ferorezonanciu.

#### 4.3.1 Vyššie harmonické

Problematike vyšších harmonických a spôsobu návrhu transformátora odolávajúceho týmto násobkom sieťovej frekvencie je venovaná samostatná práca pod vedením firmy ABB. V tejto práci, ktorá sa zaoberá monitorovaním prístrojového transformátora, je dôležité spomenúť samotný výsledok práce zaoberajúcej sa vyššími harmonickými. Kolegovia pod vedením firmy ABB dospeli výskumom k tomu, že vyššie harmonické svojou prítomnosťou superponujú a tým zvyšujú efektívnu hodnotu vstupného prúdu, ktorý vytvára deformovaný úbytok napätia. Dôsledkom toho dochádza k zníženiu efektívnej hodnoty napätia, avšak k zvýšeniu jeho maximálnej hodnoty. To prispieva k rýchlejšiemu opotrebeniu izolácie a komponentov prístrojového transformátora, na čo je potrebné brať zreteľ pri jeho návrhu a konštrukcii. Je dôležité spomenúť, že vyššie harmonické sú v sieti pomerne novou skutočnosťou, s ktorou predtým nebolo počítané. Meranie konkrétnych hodnôt vyšších harmonických je v prípade nášho vyvíjaného sledovacieho zariadenia nadbytočné, keďže zmena samotných hodnôt vyšších harmonických v sieti z hľadiska transformátora nie je možná. Riešením je navrhnutie prístrojového transformátora odolného voči ich účinkom [13].

#### 4.3.2 Ferorezonancia

Z hľadiska prenosových sietí je ferorezonancia bežne sa vyskytujúcim javom v rámci prístrojových transformátorov. V jednoduchosti ju môžeme definovať ako rezonanciu vznikajúcu medzi indukčnosťou transformátorov v sieti a kapacitou vedení použitých na prenos elektrickej energie. Jej prítomnosť nastáva hlavne pri prechodných dejoch, akými sú napríklad vypnutie, zapnutie či rôzne poruchy (skraty). Rovnako ako v prípade vyšších harmonických je ferorezonancia prítomná v sieťach aj kvôli moderným solárnym či veterným modulom, a to hlavne kvôli spôsobenej nesymetrii. Taktiež dôsledky, ktoré ferorezonancia prináša sú podobné vyšším harmonickým, je to zvýšenie prevádzkovej teploty spôsobené nárastom hodnoty napätia. Zvýšená teplota urýchľuje starnutie materiálu, či dokonca môže viesť až k poškodeniu izolácie. V súčasnej dobe existujú zariadenia, ktoré napomáhajú redukcii účínok ferorezonancie, a preto so zakomponovaním do monitorovacieho zariadenia pre účely servisu v tejto práci neuvažujeme [14].

## 5. FYZIKÁLNE VELIČINY VYBRANÉ PRE MONITOROVANIE

V predošlých kapitolách práce sme si štúdiom noriem, manuálov a simuláciou v programe vytypovali tri fyzikálne veličiny, ktorých vplyv na prístrojový transformátor v prevádzke nás vedie k potrebe ich monitorovania. V nasledujúcich podkapitolách si tieto veličiny definujeme a charakterizujeme po fyzikálnej stránke.

### 5.1 Vlhkosť

Vlhkosť, v našom prípade zohráva rolu najmä v okolitom vzduchu. Vlhkosť vzduchu je možné jednoducho definovať ako obsah vody vo vzduchu. Toto množstvo vody, ktoré môže byť vzduchom o určitom objeme pohltené, závisí na teplote samotného vzduchu, ktorý vodu pohlcuje. Z hľadiska technickej praxe rozlišujeme tri konkrétne typy vlhkosti [9]:

- absolútna vlhkosť
- relatívna vlhkosť
- špecifická vlhkosť

#### 5.1.1 Absolútna vlhkosť vzduchu

Vyjadruje hmotnosť vodných pár rozptýlených v jednom metri kubickom vzduchu. Absolútnu vlhkosť označujeme  $\rho_p$  a vypočítame ju podľa nasledovného vzťahu [9]:

$$\rho_p = \frac{p_p}{r_p \cdot T} \quad (5.1)$$

#### 5.1.2 Relatívna vlhkosť vzduchu

Keďže vlhkosť súvisí s teplotou vzduchu, relatívna vlhkosť je pomer maximálneho možného množstva (hmotnosti) vody obsiahnutého vo vzduchu pri danej teplote a skutočného množstva (hmotnosti) vody obsiahnutého vo vzduchu. Označujeme ju  $\varphi$  a jej jednotkou sú percentá. Matematicky je možné tento pomer zapísať nasledujúcou rovnicou:

$$\varphi = \frac{m_{skutočná}}{m_{maximálna}} = \frac{p_{p_{skutočný}}}{p_{p_{maximálny}}} \quad (5.2)$$

Kvôli tomu, že relatívna vlhkosť je udávaná v percentách, môže nadobúdať hodnoty v rozmedzí 0 až 1 [9].

#### 5.1.3 Špecifická vlhkosť vzduchu

Tento typ definovania vlhkosti spočíva vo vzťahovaní množstva vodných pár na jednotku suchého vzduchu, v oblasti našej aplikácie je tento spôsob málo používaný [9].

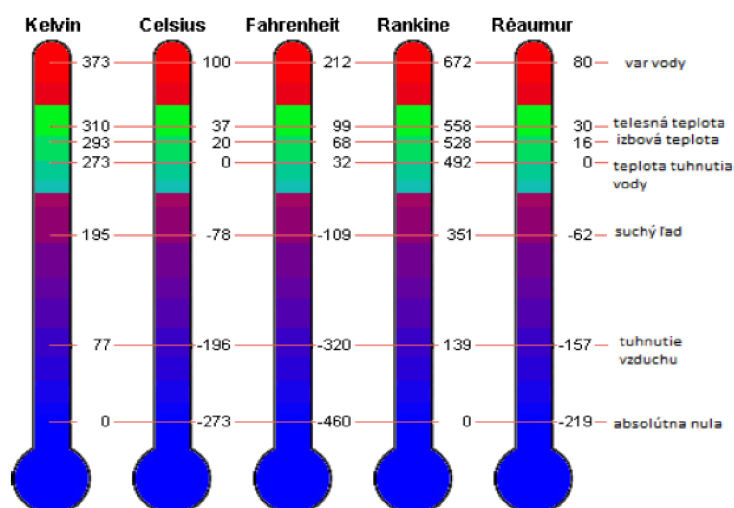
## 5.2 Teplota

Teplota patrí medzi základné jednotky medzinárodnej sústavy SI, v ktorej ju poznáme ako termodynamickú teplotu. Termodynamická teplota je stavová veličina, ktorú bližšie špecifikujú zákony termodynamiky. Najzrozumiteľnejšie je teplota definovaná v nultom zákone termodynamiky, ktorý ju špecifikuje ako strednú kinetickú energiu častíc dosahujúcu rovnakú hodnotu v každom mieste izolovanej sústavy v rovnováhe. V technickej praxi sa najčastejšie uvádza v jednotkách SI - Kelvinoch [K]. V bežnom živote sa využívajú jednotky, ktoré je možné získať prepočtom, a to stupne Celzia [°C] a Fahrenheity [F] medzi ktorými platí nasledovný prepočet [10,12]:

$$1 [^{\circ}\text{C}] \cong 273,15 [\text{K}] \quad (5.3)$$

$$1 [F] \cong 255.9278 [\text{K}] \quad (5.4)$$

Ďalšie jednotky ako aj porovnanie stupníc jednotiek teploty spomenutých vyššie možno vidieť na obrázku 13.



Obrázok 13 - Teplotné stupnice v rôznych jednotkách merania [11]

### 5.2.1 Teplotná rozťažnosť

Technická prax sa v spojitosti s teplotou stretáva s rôznymi javmi, ako napríklad teplotnou rozťažnosťou. Tú môžeme prehľadne rozdeliť na:

- objemovú rozťažnosť
- dĺžkovú rozťažnosť

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (5.5)$$

Rovnica 5.5 matematicky vyjadruje hodnotu, o ktorú sa zmení dĺžka materiálu pri konkrétnej zmene teploty  $\Delta T$ .

$$\Delta V = V \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (5.6)$$

Rovnica 5.6 matematicky vyjadruje hodnotu, o ktorú sa zmení objem materiálu pri konkrétnej zmene teploty  $\Delta T$ .

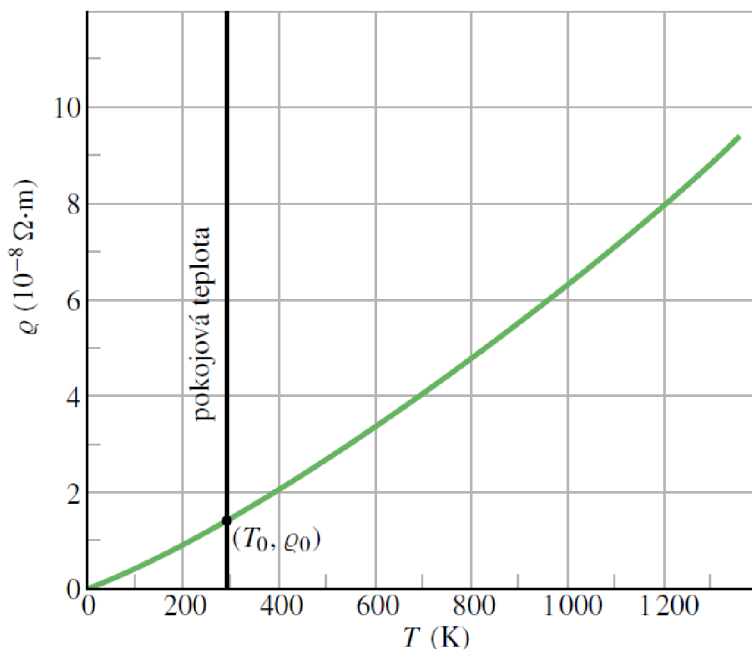
Ako môžeme vidieť v predchádzajúcich dvoch rovniciach, každá látka a materiál má v súvislosti s teplotnou rozťažnosťou zavedené konštanty, ktoré bližšie špecifikujú správanie látky. Fyzika pozná vzťah aj medzi týmito dvomi konštantami a matematicky ho môžeme zapísať nasledovne:

$$\beta = 3 \cdot \alpha \quad (5.7)$$

Teplotná rozťažnosť je v technickej praxi parazitným a nežiaducim javom, ktorý sa vo väčšine prípadov snažíme pri návrhu zariadení obmedziť [10].

## 5.2.2 Vplyv teploty na elektrické vlastnosti materiálov

Je všeobecne známe, že mnohé materiálové vlastnosti sú závislé na teplote prostredia, v ktorom sa materiál nachádza. Z elektrických vlastností patrí medzi najdôležitejšie a najzávislejšie na teplote rezistivita materiálu. Konkrétny príklad závislosti je viditeľný na nasledujúcom obrázku 14, ktorý zobrazuje závislosť rezistivity medi na teplote.



Obrázok 14 - Rezistivita medi v závislosti na teplote [10]

Obrázok 14 ukazuje, že v prípade medi, ktorá je jedným z najpoužívanějších materiálov v elektrotechnickej praxi je závislosť na teplote takmer lineárna pre široké teplotné spektrum. Po lineárnej aproximácii môžeme rezistivitu medi vypočítať pomocou nasledovnej rovnice:

$$\rho - \rho_{REF} = \rho_{REF} \cdot \alpha_R \cdot (T - T_{REF}) \quad (5.8)$$

Vzťah spočíva v odvodení rezistivity materiálu za predpokladu zvolenia si referenčnej teploty, pri ktorej je nám rezistivita materiálu známa. Hodnoty teplotného súčiniteľa rezistivity sú tabuľkovými hodnotami pre konkrétny materiál [10].

### 5.3 Tlak

Fyzikálna veličina tlak je definovaná od nepamäti. Technická prax ju pozná ako silu pôsobiacu na plochu. Keď teda hovoríme o tlaku, hovoríme o sile pôsobiacej na plochu telesa, nie jeho konkrétny bod. Matematicky môžeme tlak definovať nasledovne:

$$p = \frac{F}{S} \quad (5.9)$$

Princíp vzniku tlaku vnútri látky je rozdielny v závislosti na jej skupenstve. V plynných a kvapalných látka dochádza k vzniku tlaku tepelným pohybom častíc, avšak pri pevných látkach za vznik tlaku môže vzájomné pôsobenie medzi jednotlivými časticami vnútri látky. Tlak sa v rôznych oblastiach technickej praxe uvádza v rôznych jednotkách, ktoré boli prepočtami odvodené od základnej jednotky – Pascal [10,12].

#### 5.3.1 Atmosférický tlak

V našom prípade je z fyzikálnej stránky pre nás najpodstatnejší atmosférický tlak. Jeho existencia je podmienená existenciou atmosféry, ktorá vytvára hydrostatický tlak na všetko na Zemi. Výpočet hydrostatického tlaku vychádza z nasledujúcej rovnice:

$$p_H = \rho_H \cdot g \cdot h_H \quad (5.10)$$

Hodnota tzv. štandardného atmosférického tlaku je 101 325 Pa, bola zavedená ako štandardizovaná hodnota tlaku z dôvodu jeho neustáleho kolísania vplyvom zmien počasia. Z rovnice 5.10 vidíme, že okrem počasia má na tlak výrazný vplyv aj nadmorská výška, v ktorej je meraný. S narastajúcou nadmorskou výškou klesá veľkosť plynného stĺpca (hrúbka vrstvy atmosféry) nad miestom merania [10].

## 6. SPÔSOBY MONITOROVANIA VYBRANÝCH VELIČÍN

Monitorovanie veličín môžeme uskutočniť po dôkladnom oboznámení sa s podmienkami, v ktorých prístrojový transformátor pracuje a výbere veličín najviac vplyvajúcich na bežný chod PT. Ďalším podstatným bodom je pochopenie fyzikálnej podstaty týchto veličín. Pri výbere spôsobov monitorovania je potrebné dbať, aby riešenie a prevedenie bolo z hľadiska výroby jednoduché. Taktiež je potrebné zvoliť spôsob monitorovania tak, aby nebola narušená kvalita a celkový bezproblémový chod zariadenia.

### 6.1 Monitorovanie vlhkosti

Aplikácia prístrojového transformátora v rámci rozvádzača UniGear ZS1 uvažuje ako izolačné médium vzduch. Z tohto dôvodu je potrebné monitorovanie vzdušnej vlhkosti. V praxi sú na meranie absolútnej aj relatívnej vlhkosti využívané vlhkomery, ktoré pracujú na týchto základných princípoch:

- a) psychrometrická metóda – psychrometre (prioritne na meranie relatívnej vlhkosti)
- b) hygrometrická metóda – hygrometre (vhodné na meranie obidvoch typov vlhkosti)
- c) kondenzačná metóda – rosné vlhkomery (vhodné na meranie obidvoch typov vlhkosti)

Pre využitie vlhkomeru pre aplikáciu s prístrojovým transformátorom je najvhodnejšou možnosťou využitie druhej hygrometrickej metódy, a to konkrétne kapacitného čidla na meranie vlhkosti. Kapacitný snímač na meranie vlhkosti sa nachádza napríklad v bežných domácich meteostaniciach a je teda lacnou a dostupnou voľbou pri meraní vlhkosti. Kapacitný hygrometer je založený na zmene dielektrických vlastností polyméru, ktorý je v ňom umiestnený, na základe zmeny okolitej vlhkosti. Zmenou dielektrických vlastností polyméru dochádza ku zmene kapacity kondenzátora, na základe ktorej je vyhodnocovaná vlhkosť. Samotné meranie vlhkosti je najvýhodnejšie uskutočňovať na povrchu transformátora, čím nedôjde k narušeniu jeho parametrov a izolačných vlastností [12].

### 6.2 Monitorovanie teploty

V technickej praxi existuje niekoľko možností delenia monitorovacích zariadení (prístrojov) pre monitorovanie teploty. Prvé je delenie podľa spôsobu merania:

- a) bezdotykové
- b) dotykové

Druhé je delenie podľa typu vstupného signálu, a to:

- a) analógové
- b) digitálne

Posledným tretím delením je delenie podľa fyzikálnej podstaty merania:

- a) dilatačné
- b) elektrické
- c) špeciálne



Prvé dve delenia sú pomerne jednoduché, posledné je presnejšie a podrobnejšie. Pre našu aplikáciu v oblasti prístrojových transformátorov bude po konzultácii s odborníkom v oblasti meraní najvhodnejšie použiť elektrický kontaktný spôsob merania. Ten je možné uskutočniť rôznymi spôsobmi. V praxi sa využívajú tri základné:

- a) snímače (napríklad PT100, PT1000 ...)
- b) termočlánky ( princíp dvoch rôznych kovov)
- c) termistory (polovodiče)

Všetky hore vymenované využívajú zmenu elektrických vlastností snímača v závislosti na teplote. Výber konkrétneho snímača, termočlánku či termistoru je možné uskutočniť len na základe laboratórnych meraní a definovaní požiadaviek na presnosť, rýchlosť a ďalšie parametre získavaných údajov. Meranie teploty je najvhodnejšie uskutočniť na povrchu prístrojového transformátora z hľadiska zachovania celistvosti a izolačných vlastností použitých materiálov (epoxidu atď). Iný ako povrchový spôsob by vyžadoval zásah do samotnej výroby transformátora.

Myšlienka merania teploty v jadre transformátora je založená len na teoretických podkladoch. Po konzultácii s odborníkmi a zväžení technických možností sme dospeli k záveru, že doba trvania prechodných dejov vnútri prístrojového transformátora je natoľko krátka, že nepredpokladáme možnosť detekovania zmeny teploty v tak krátkom časovom okamihu. Ďalším problémom, ktorý sa v tejto súvislosti vynára je spôsob akým by bolo možné prístrojový transformátor odpojiť od zdroja v danom krátkom časovom okamihu. Po uvážení všetkých vyššie uvedených skutočností prichádzame k názoru, že problematika prechodných dejov a spôsob ich monitorovania je v súčasnosti svojím rozsahom vhodná na samostatnú výskumnú prácu [11,12].

### 6.3 Monitorovanie tlaku

Meranie tlaku nachádza v praxi širokú škálu uplatnenia, čomu zodpovedá aj množstvo rôznych typov zariadení na jeho meranie. Tlak môže dosahovať hodnoty v pomerne veľkom rozsahu, preto vzniklo delenie tlakomerov podľa veľkosti meraného tlaku:

- a) manometre (meranie pretlaku)
- b) vakuometre (merenie veľmi malých absolútnych tlakov)
- c) manovakuometre (merenie pretlakov a podtlakov)
- d) ťahomery (meranie malých podtlakov)
- e) diferenčné tlakomery (meranie tlakových rozdielov)

Pre nás dôležitejšie je delenie podľa princípu fungovania, na základe tohto princípu môžeme tlakomery rozdeliť takto:

- a) zvonové a piestové
- b) kvapalinové
- c) deformačné
- d) elektrické

Keďže vytvárame komplexné monitorovacie zariadenie, je potrebné pri výbere „subzariadení“ na monitorovanie jednotlivých veličín myslieť na ich kompatibilitu. Pri meraní vlhkosti a tlaku sme zvolili zariadenia s elektrickým výstupom, rovnako tak teda zvolíme aj v prípade monitorovania tlaku. Tlak bude monitorovaný pomocou snímača absolútneho tlaku, ktorý môže byť napríklad v prevedení kapacitného snímača.

Princíp fungovania je totožný s kapacitným snímačom vlhkosti, kedy na základe zmeny parametrov obsiahnutého polyméru dochádza k zmene kapacity, na základe ktorej je vyhodnocovaný výsledný tlak. Rovnako ako v predošlých prípadoch volíme umiestnenie snímača na povrchu prístrojového transformátora [12].

## **6.4 Monitorovanie ostatných veličín**

Pri výbere veličín, ktoré budú súčasťou monitorovacieho procesu je nutné zvážiť aj vplyvy, ktoré sa nemusia vyskytovať pri každej aplikácii (napríklad seizmika), prípadne ich výskyt je závislý na viacerých premenných (napríklad medzifázové výboje).

### **6.4.1 Vibrácie a otrasy**

Monitorovanie vibrácií a otrasov je v prípade oblastí bez seizmickej činnosti pomerne zbytočné. Mnohé z regiónov sveta, v ktorých sú umiestňované transformátory majú aktívnu seizmickú činnosť. Monitorovanie vibrácií a otrasov je vo väčšine prípadov praxe uskutočňované pomocou akcelerometrov. Jeho princíp spočíva v kyvadielku umiestnenom vnútri a jeho vychýľovaní vplyvom otrasov a vibrácií.

### **6.4.2 Medzifázové výboje**

V súčasnosti je na detekciu medzifázových výbojov možné využiť materiály, ktoré pri zmene elektromagnetického poľa menia svoju farbu. Bližšia špecifikácia materiálov však podlieha utajeniu a patentom výrobcu. Z toho dôvodu nie je možné materiál bližšie špecifikovať. Týmto spôsobom by bolo možné detekovať ich pôsobenie na prístrojový transformátor v minulosti (pred kontrolou farby materiálu). Nevýhoda tohto riešenia spočíva v možnosti detekovať len výboje, ktoré už odzneli. Tento spôsob teda neslúži k sledovaniu výbojov v reálnom čase.

# ZÁVER

V závere bakalárskej práce je potrebné zhodnotiť výsledky našej práce. V úvode sme sa zoznámili s prístrojovými transformátormi, normami, ktoré špecifikujú ich použitie a určujú podmienky, v ktorých tieto prístrojové transformátory musia fungovať. Ďalej sme preštudovali normu, ktorá špecifikuje prostredie rozvádzača VN, rovnako sme sa podrobne zoznámili s príručkou firmy ABB, tvoriacou obslužný manuál k rozvádzačom VN UniGear ZS1. V ďalšom pokračovaní práce sú popísané javy, ktoré sa môžu vyskytovať pri prevádzke prístrojového transformátora ako sú napríklad tepelné účinky prúdu, čiastočné či medzifázové výboje. Problematika monitorovania veličín, vplyvujúcich na správanie prístrojového transformátora, v praxi je veľmi rozsiahla. Vzhľadom na to problematika čiastočných či medzifázových výbojov, prípadne prechodných dejov vnútri prístrojového transformátora svojim rozsahom nabáda k ďalšiemu podrobnému skúmaniu.

V práci sme zatiaľ dospeli k niekoľkým veličinám, ktoré bude potrebné monitorovať. Veličinami vybranými pre monitorovanie sú vlhkosť, teplota, tlak (nadmorská výška) a prítomnosť výbojov. Tieto veličiny vyplývajú jednak z normy STN EN 61869-1,-3 a taktiež z príručiek ABB pre rozvádzače VN. Výber veličín sme si potvrdili na základe údajov získaných z programu firmy ABB a následným vynesím závislostí na obrázkoch 10-12, ktoré nám preukázali závislosť pravdepodobnosti výskytu medzifázových výbojov na podmienkach okolia prístrojového transformátora.

Prvou veličinou, ktorú je potrebné monitorovať, je vlhkosť v okolí transformátora. Vlhkosť prispieva k zmene parametrov okolitého prostredia (vzduchu), pri ktorom s nárastom vlhkosti rastie vodivosť, čo môže mať za následok napríklad neželaný preskok oblúku medzi jednotlivými meranými fázami.

Druhou z veličín je teplota okolia. Monitorovanie teploty vnútri prístrojového transformátora kvôli náročnosti vyhotovenia a efektívnosti výsledku zostáva len na teoretickej úrovni. Bližšie dôvody tohto rozhodnutia sú popísané v podkapitole 6.2. Z práce ďalej plynie, že samotná teplota nemá priamy vplyv na zmenu pravdepodobnosti výboja. Ku zmene pravdepodobnosti dochádza len v spojení teploty s inou fyzikálnou veličinou, spravidla tlakom.

Skúmaním sme zistili, že tretou veličinou, ktorá má vplyv na fungovanie prístrojového transformátora je okolitý tlak. Už samotná norma zaoberajúca sa prístrojovými transformátormi sa bližšie vyjadruje k nadmorskej výške. Široké spektrum nadmorskej výšky (závisí od konkrétnej aplikácie) prináša so sebou aj zmenu atmosférického tlaku, a tým aj zmenu vlastností okolitého prostredia.

Medzi najzaujímavejšie časti monitorovania patrí oblasť medzifázových výbojov, ktorých výskyt je možné detekovať s použitím materiálov citlivých na zmenu elektromagnetického poľa pomocou zmeny ich farby. Tento spôsob neslúži k sledovaniu výbojov v reálnom čase, ale iba k detekcii výbojov, ktoré už odzneli.

Seizmické aktivity a meranie ich intenzity je podmienené poznatkami a zmyslom merania pre konkrétnu aplikáciu, resp. prostredie.

Samozrejmosťou je sledovanie prevádzkových veličín ako sú napätie a prúd na primárnej a sekundárnej strane transformátora. Sledovanie prevádzkových veličín je nutnou súčasťou z hľadiska skratov či výbojov, ktoré sú neželanými javmi.

Medzi neželané javy vyskytujúce sa pri prevádzke prístrojového transformátora patria aj vyššie harmonické frekvencie a ferorezonancia. Ich vplyv nemožno zanedbať,

rovnako ako ich monitorovanie. Monitorovanie týchto javov je však pre súčasné zariadenie neefektívne. Riešením vplyvu neželaných javov je použitie iných zariadení, prípadne úprava samotného vyhotovenia prístrojového transformátora tak, aby im dokázal odolávať.

Pred uskutočnením meraní musíme brať do úvahy, že každá z vybraných veličín vplýva rovnakou mierou na prístrojový transformátor. Z toho plynie, že akékoľvek porušenie prevádzkových podmienok stanovených výrobcom (normou) je nežiaduce a vedie k zhoršeniu kondície a životnosti PT.

Všetky spomínané veličiny je možné monitorovať pomocou snímačov s elektrickým výstupom, naskytá sa možnosť použitia zariadenia, ktoré by vytváralo záznam s monitorovanými veličinami. V jednoduchosti by sme toto zariadenie mohli prirovnáť k čiernej skrinke využívanej v leteckej doprave. Tento záznam by poslužil k presnejšiemu určeniu vplyvu jednotlivých veličín na prístrojový transformátor. Dokonca by bolo možné zo záznamu zistiť konkrétne podmienky okolia, počas ktorých došlo k zlyhaniu transformátora. Meranie a presnejšie určenie miery vplyvu jednotlivých veličín je víziou zadávateľa do ďalšej časti štúdia, a teda do magisterskej práce.

# Literatúra

- [1] STN EN 61869-1. *Prístrojové transformátory: Časť 1: Všeobecné požiadavky*. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie, 2010.
- [2] ABB s.r.o. *Prístrojové transformátory proudu a napätí – Návod k instalaci, použití a údržbě: 1VLM000610*. Rev. 19, CZ. EPDS BRNO Vídeňská, 2017.
- [3] KOPEČEK Jan a DVOŘÁK Miloš, *Prístrojové transformátory (měřicí a jističí)*, 1. Vyd. Praha: Academica, 1966.
- [4] ABB s.r.o. *Instruction manual UniGear ZS1: Installation, service and maintenance: 1VLM000363*. Rev.F, EN. EPDS BRNO Vídeňská, 10/2008.
- [5] KRIVENKOV, Sviatoslav. *Development of a maintenance plan for medium voltage equipment*. Miláno, 2017. Magisterská práca. POLITECNICO DI MILANO. Vedúci práce Prof. Enrico Ragaini.
- [6] HAVELKA, Otto a kolektív. *Elektrické přístroje*. 1. Praha: SNTL, 1985.
- [7] STN EN 61869-3. *Prístrojové transformátory: Časť 3: Osobitné požiadavky na indukčné transformátory napätia*. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie, 2012.
- [8] ZDRUŽENIE ELEKTROTECHNIKOV SLOVENSKA. *Čiastočné výboje* [online]. In: Žilina. [cit. 2019-11-26]. Dostupné z: <http://ix.sk/EPMPB>
- [9] ANTAL, Štefan. *Termodynamika*. 2. vyd. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2009. ISBN: 978-80-227-3212-3
- [10] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.
- [11] KNOROVÁ, Renáta a František DROZDA. *PRÍRUČKA PRE MERANIE TEPLoty* [online]. In: Bratislava: Kalibračné združenie SR, s. 57 [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: [https://www.unms.sk/swift\\_data/source/2015/om/prirucky/PRIRUCKA\\_TEPLOTA\\_na\\_web.pdf](https://www.unms.sk/swift_data/source/2015/om/prirucky/PRIRUCKA_TEPLOTA_na_web.pdf)
- [12] JENČÍK, Josef, Jaromír VOLF a kolektív. *TECHNICKÁ MĚŘENÍ*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003.
- [13] MIHÁLYI, Róbert. *Návrh prístrojového transformátoru napätí odolného vůči síťovým harmonickým frekvencím*. Brno, 2020. Bakalárska práca. VUT BRNO. Vedúci práce doc. Bohuslav Bušov
- [14] ABB s.r.o. *Eliminace ferorezonančních jevů: 1VLM000657*. Rev. 1, CZ. EPDS BRNO Vídeňská, 2017.