

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

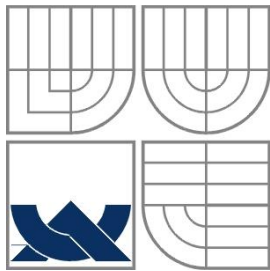
## **IZOLAČNÍ SYSTÉM PRO SYNCHRONNÍ A ASYNCHRONNÍ MOTORY PRACUJÍCÍ NA NAPĚŤOVÉ HLADINĚ 18 kV**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

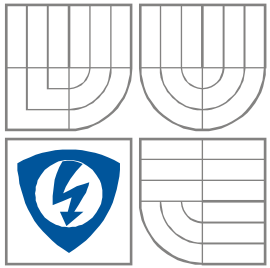
Viktor Šporcr

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

# IZOLAČNÍ SYSTÉM PRO SYNCHRONNÍ A ASYNCHRONNÍ MOTORY PRACUJÍCÍ NA NAPĚŤOVÉ HLADINĚ 18 kV

- THE INSULATION SYSTEM FOR SYNCHRONOUS AND ASYNCHRONOUS MOTORS  
WORKING ON VOLTAGE LEVEL 18 kV

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

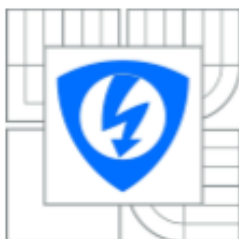
AUTHOR

Viktor Šporcr

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

**Student:** Viktor Šporc  
**Ročník:** 3

**ID:** 145955  
**Akademický rok:** 2013/2014

## NÁZEV TÉMATU:

**Izolační systém pro synchronní a asynchronní motory pracující na napěťové hladině 18 kV**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedte literární rešerši problematiky
2. Seznamte se s izolačními systémy točivých strojů na napětí 18kV
3. Analyzujte vlastnosti izolačních materiálů pro napětí 18kV vhodné pro synchronní a asynchronní stroje.
4. Provedte test dielektrické odolnosti u cívek statorového vinutí, sepište zprávu z tohoto testu.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Cigánek,L., Bauer,M.: Elektrické stroje a přístroje
- [2] Fitzgerald, A.E.,Kingsley, Ch., Kusko, A.: Electric machinery. McGraw Hill 1971
- [3] Technologické postupy Siemens Drásov.

**Termín zadání:** 27.9.2013

**Termín odevzdání:** 2.6.2014

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
Předseda oborové rady

## UPOZORNĚNÍ:

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

## **Abstrakt**

Bakalářská práce je rozdělena na dvě samostatné části. První část je zaměřena na izolační systém vysokonapěťových točivých strojů impregnovaných vakuově tlakovou impregnací. Stručně popisuje složení jednotlivých komponentů používaných pro sestavování izolačních systémů vzduchem a vodou chlazených točivých strojů. V druhé praktické části je vyhodnocena dielektrická odolnost sady cívek s izolačním systémem navrženým pro napěťovou hladinu 18 kV. Tato část uvádí stručný popis použitých izolací. Dále obsahuje zprávu z dielektrických zkoušek provedených na zadané sadě cívek. U této sady cívek byly provedeny následující zkoušky. Měření ohřevu polovodivé pásky termovizní kamerou při impulsním napětí. Dále byly cívky vystaveny impulznímu průběhu napětí po dobu sto hodin, sinusovému průběhu napětí po dobu tisíc hodin. Před a mezi stárnutími byl měřen náboj částečných výbojů a ztrátový faktor.

## **Abstract**

Bachelor's thesis is divided into two separate sections. First part is concentrated on insulation system of high voltage machines impregnated by vacuum pressure impregnation. This part of semester thesis concisely describes the composition of individual components used for construction insulation systems of air and water cooled rotation machines. Second practical part contains evaluation of dielectric resistance of coil set with insulation system designed for voltage level 18 kV. This part contains a short description of used insulations. Further includes a report of dielectric tests of used coil set. This set of coils was tested on following tests. Heating measurement semi conductive tape with infrared camera at impulse voltage. The coils was exposed to impulse voltage for one 100 hours and sinus voltage for one 1000 hours. Before and between, aging was measured value of charge partial discharges and dissipation factor.

## **Klíčová slova**

Cívka, izolační systém, izolační materiál, částečné výboje, točivé stroje, ztrátový faktor

## **Keywords**

Coil, insulation system, insulation material, partial discharges, rotation machines, dissipation factor

## **Bibliografická citace**

ŠPORCR, V. *Izolační systém pro synchronní a asynchronní motory pracující na napěťové hladině 18 kV*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 55 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou Bakalářskou práci na téma Izolační systém pro synchronní a asynchronní motory pracující na napěťové hladině 18 kV jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

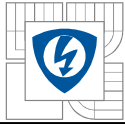
Podpis autora .....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Čestmíru Ondruškovi, CSc. za metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále chci poděkovat svému zaměstnavateli firmě Siemens Electric Machines s.r.o a panu Ing. Pavlovi Rašovskému za účinnou pomoc při tvorbě bakalářské práce.

V Brně dne .....

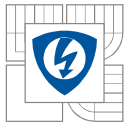
Podpis autora .....



## Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>11</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>13</b>
<b>1 VLASTNOSTI IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ .....</b>	<b>14</b>
1.1.1 ELEKTRICKÝ ODPOR IZOLANTŮ .....	14
1.1.2 ELEKTRICKÁ VODIVOST IZOLANTŮ .....	14
1.1.3 POLARIZACE .....	15
1.1.4 ELEKTRICKÁ PERMITIVITA.....	15
1.1.5 ELEKTRICKÁ PEVNOST IZOLANTŮ .....	15
1.1.6 ZTRÁTOVÝ FAKTOR .....	16
1.1.7 ELEKTRICKÉ STÁRNUTÍ IZOLACE.....	17
<b>1.2 TEPELNÉ VLASTNOSTI IZOLANTŮ .....</b>	<b>17</b>
1.2.1 TŘÍDY TEPLTNÍ ODOLNOSTI IZOLACÍ .....	17
1.2.2 TEPELNÉ STÁRNUTÍ MATERIÁLŮ.....	18
<b>2 IZOLAČNÍ MATERIÁLY PRO VYSOKONAPĚŤOVÉ TOČIVÉ STROJE.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 PLOŠNÉ IZOLAČNÍ MATERIÁLY .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 MATERIÁLY SLOUŽÍCÍ JAKO PLNIVA KOMPOZITU .....</b>	<b>19</b>
2.2.1 SKELNÉ MATERIÁLY .....	19
2.2.2 MATERIÁLY Z ARAMIDOVÝCH VLÁKEN .....	19
<b>2.3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4 LÁTKY SLOUŽÍCÍ JAKO POJIVO KOMPOZITU - PRYSKYŘICE .....</b>	<b>20</b>
<b>3 IZOLAČNÍ SYSTÉM VYSOKONAPĚŤOVÝCH TOČIVÝCH STROJŮ .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1 IZOLACE STATOROVÝCH CÍVEK.....</b>	<b>20</b>
3.1.1 OPATŘENÍ PROTI VÝBOJOVÉ ČINNOSTI .....	22
<b>4 IMPREGNACE IZOLAČNÍHO SYSTÉMU .....</b>	<b>22</b>
<b>4.1 IMPREGNAČNÍ PROCES VPI.....</b>	<b>22</b>
<b>5 STRUKTURA IZOLAČNÍHO SYSTÉMU PRO NAPĚŤOVOU HLADINU 18 KV.....</b>	<b>24</b>
<b>6 VYHODNOCENÍ DIELEKTRICKÉ ODOLNOSTI CÍVEK STATOROVÉHO VINUTÍ PRACUJÍCÍHO NA NAPĚŤOVÉ HLADINĚ 18 KV .....</b>	<b>24</b>
<b>6.1 POROVNÁNÍ POLOVODIVÝCH PÁSEK .....</b>	<b>25</b>
6.1.1 ZÁVISLOST MĚRNÉHO POVRCHOVÉHO ODPORU NA NAPĚTÍ .....	25
6.1.2 $I-U$ KŘIVKY .....	26
<b>6.2 PRVNÍ MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO FAKTORU <math>TAN \Delta</math> .....</b>	<b>26</b>
<b>6.3 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ PŘED ELEKTRICKÝM STÁRNUTÍM IZOLACE.....</b>	<b>26</b>



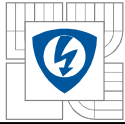


---

<b>6.4 KONTROLA PŘILOŽENÝM AC NAPĚTÍM PŘED STÁRNUTÍM IZOLACE VLIVEM IMPULZNÍHO NAPĚTÍ .....</b>	<b>27</b>
<b>6.5 MĚŘENÍ OTEPLENÍ POLOVODIVÉ PÁSKY PŘI SINUSOVÉM PRŮBĚHU NAPĚTÍ .....</b>	<b>27</b>
<b>6.6 STÁRNUTÍ IZOLAČNÍHO SYSTÉMU VLIVEM IMPULSNÍHO NAPĚTÍ .....</b>	<b>29</b>
<b>6.7 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ PO STÁRNUTÍ CÍVEK VLIVEM IMPULSNÍHO NAPĚTÍ.....</b>	<b>29</b>
<b>6.8 STÁRNUTÍ IZOLAČNÍHO SYSTÉMU VLIVEM SINUSOVÉHO NAPĚTÍ.....</b>	<b>30</b>
<b>6.9 MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO FAKTORU <math>\tan \delta</math> PO STÁRNUTÍ IZOLACE VLIVEM SINUSOVÉHO NAPĚTÍ</b>	<b>30</b>
<b>6.10 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ PO STÁRNUTÍ CÍVEK VLIVEM SINUSOVÉHO NAPĚTÍ .....</b>	<b>30</b>
<b>7 ZÁVĚR.....</b>	<b>31</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>32</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>34</b>

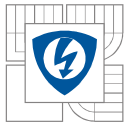
## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1</i> Náhradní schéma izolace a fázorový diagram [autor] .....	16
<i>Obrázek 2</i> Částečný výboj v izolaci [autor] .....	17
<i>Obrázek 3</i> Řez drážkou statoru [autor].....	21
<i>Obrázek 4</i> Vzorek pro měření plošného odporu polovodivé pásky [autor] .....	25
<i>Obrázek 5</i> Svitky připravené pro měření .....	37
<i>Obrázek 6</i> Průběh impulzního napětí při stárnutí izolace .....	49
<i>Obrázek 7</i> Detail pulzu průběhu při stárnutí impulzním napětím .....	49
<i>Obrázek 8</i> Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 10,4 kV, po čase 3 min u cívky 1.....	50
<i>Obrázek 9</i> Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 18 kV, po čase 3 min u cívky 1.....	50
<i>Obrázek 10</i> Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 37 kV, po čase 1 min u cívky 1.....	50
<i>Obrázek 11</i> Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 10,4 kV, po čase 3 min u cívky 2.....	50
<i>Obrázek 12</i> Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 37 kV, po čase 1 min u cívky 2.....	50
<i>Obrázek 13</i> Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 18 kV, po čase 3 min u cívky 2.....	50
<i>Obrázek 14</i> Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 18 kV, po čase 3 min u cívky 3.....	51
<i>Obrázek 15</i> Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 10,4 kV, po čase 3 min u cívky 3.....	51
<i>Obrázek 16</i> Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 10,4 kV, po čase 3 min u cívky 4.....	51
<i>Obrázek 17</i> Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 37 kV, po čase 1min u cívky 3.....	51
<i>Obrázek 18</i> Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 37 kV, po čase 1 min u cívky 4.....	51
<i>Obrázek 19</i> Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 18 kV, po čase 3 min u cívky 4.....	51
<i>Obrázek 20</i> Měření částečných výbojů u cívky 1 ve spodní vrstvě v původním stavu (před stárnutím) vlevo 10,1 kV, vpravo 18,4 kV .....	53
<i>Obrázek 21</i> Měření částečných výbojů u cívky 1 ve spodní vrstvě po stárnutí impulsním napětím, vlevo 10,1 kV, vpravo 18,4 kV .....	53
<i>Obrázek 22</i> Měření částečných výbojů u cívky 1 ve spodní vrstvě po stárnutí sinusovým napětím, vlevo 10,1 kV, vpravo 18,4 kV .....	53
<i>Obrázek 23</i> Měření částečných výbojů u cívky 1 v horní vrstvě po stárnutí sinusovým napětím, vlevo 11 kV, vpravo 18,6 kV .....	53
<i>Obrázek 24</i> Měření částečných výbojů u cívky 1 v horní vrstvě po stárnutí impulsním napětím, vlevo 10,5 kV, vpravo 18,1 kV .....	53
<i>Obrázek 25</i> Měření částečných výbojů u cívky 1 v horní vrstvě v původním stavu (před stárnutím) vlevo 10,4 kV, vpravo 18,1 kV.....	53

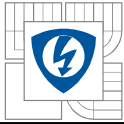


## SEZNAM TABULEK

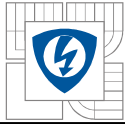
<i>Tabulka 1</i> Třídy teplotní odolnosti [14] .....	17
<i>Tabulka 2</i> Parametry ovinu polovodivou páskou .....	24
<i>Tabulka 3</i> Teplota a oteplení polovodivé pásky u cívek 1 a 2 .....	28
<i>Tabulka 4</i> Teplota a oteplení polovodivé pásky u cívek 3 a 4 .....	28
<i>Tabulka 5</i> Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzorek 217.22 u prvního svitku.....	35
<i>Tabulka 6</i> Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzorek 217.22 u druhého svitku.....	35
<i>Tabulka 7</i> Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzorek Akasic 4b u prvního svitku .....	35
<i>Tabulka 8</i> Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzorek Akasic 4b u druhého svitku.....	35
<i>Tabulka 9</i> Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzorek 217.03 u prvního svitku.....	36
<i>Tabulka 10</i> Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzorek 217.03 u druhého svitku.....	36
<i>Tabulka 11</i> Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzorek 217.21 u prvního svitku.....	36
<i>Tabulka 12</i> Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzorek 217.21 u druhého svitku.....	36
<i>Tabulka 13</i> Naměřené a doložené hodnoty pro I-U křivky.....	38
<i>Tabulka 14</i> Tabulka naměřených hodnot ztrátového činitele u cívky číslo 1 .....	41
<i>Tabulka 15</i> Tabulka naměřených hodnot ztrátového činitele u cívky číslo 2 .....	42
<i>Tabulka 16</i> Tabulka naměřených hodnot ztrátového činitele u cívky číslo 3 .....	43
<i>Tabulka 17</i> Tabulka naměřených hodnot ztrátového činitele u cívky číslo 4 .....	44
<i>Tabulka 18</i> Tabulka naměřených hodnot ztrátového činitele u cívky číslo 1 .....	45
<i>Tabulka 19</i> Tabulka naměřených hodnot ztrátového činitele u cívky číslo 2 .....	45
<i>Tabulka 20</i> Tabulka naměřených hodnot ztrátového činitele u cívky číslo 3 .....	46
<i>Tabulka 21</i> Tabulka naměřených hodnot ztrátového činitele u cívky číslo 4 .....	46
<i>Tabulka 22</i> Naměřené náboje částečných výbojů .....	52

**SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**

<b>Symbol:</b>	<b>Popis:</b>	<b>Jednotka:</b>
$\rho$	Měrná rezistivita	$[\Omega \cdot \text{m}]$
$\gamma$	Měrná vodivost	$[\Omega \cdot \text{m}^{-1}]$
$S$	Plocha	$[\text{m}^2]$
$\varepsilon_r$	Permitivita	$[\text{F} \cdot \text{m}^{-2}]$
$\varepsilon_o$	Permitivita vakua	$[\text{F} \cdot \text{m}^{-2}]$
$E_p$	Elektrická pevnost	$[\text{V} \cdot \text{mm}^{-1}]$
$\delta$	Úhel mezi fázory proudů $I_c$ a $I_{zk}$	$[\text{°}, \text{rad}]$
$C_n$	Kapacita vazebního kondenzátoru	$[\text{nF}]$
$I_c$	Fázor čistě kapacitního proud	$[\text{A}]$
$I_{zk}$	Fázor proud zkušebnímu objektu	$[\text{A}]$
$I_R$	Fázor čistě odporového proudu	$[\text{A}]$
$I_{pr}$	Průměrný proud	$[\mu\text{A}]$
$I_{1.1}, I_{1.2}, I_{2.1}, I_{2.2}$	Proudy v měřicích bodech dvou svitků	$[\mu\text{A}]$
$U_B$	Fázové napětí	$[\text{kV}]$
$U_N$	Jmenovité napětí	$[\text{kV}]$
$U_P$	Přiložené napětí	$[\text{kV}]$
$U_j$	Skokové napětí	$[\text{kV}]$
$U_{pk/pk}$	Napětí špička-špička	$[\text{kV}]$
$R_{95}$	povrchový odpor	$[\Omega]$
$R_p$	Měrný povrchový odpor	$[\Omega]$
$t_r$	Doba čela pulzu	$[\text{s}]$
$f$	Frekvence	$[\text{Hz}]$
$L_1, L_2, L_3$	Délka ovinu polovodivou páskou	$[\text{mm}]$
$S_p$	Povrch měřicího bodu	$[\text{cm}^2]$
$l_m$	Šířka měřicího bodu	$[\text{cm}^2]$
$P$	Překrytí polovodivé pásky	$[\text{°}]$
$v_p$	Průměrná teplota	$[\text{°C}]$
$\Delta v$	Absolutní hodnota oteplení	$[\text{°C}]$
$Q$	Elektrický náboj	$[\text{pC}]$
$V_1, V_2, V_3$	Počet vrstev polovodivé pásky	-
V1 až V8	Označení vzorku na zkumavce	-



VPI	Vacuum Pressure Impregnation	-
PD	Partial Discharges	-



## ÚVOD

Synchronní a asynchronní stroje jsou nedílnou součástí elektrizační soustavy. Dlouhou cestu jejich vývoje započal Nikola Tesla, narozen 10. července 1856, který svým vynálezem asynchronního motoru položil základy všech dnes používaných točivých strojů napájených střídavým proudem. S rychle probíhající elektrifikací a stoupající spotřebou elektrické energie se neustále zvětšovalo uplatnění těchto strojů v různých výrobních odvětvích. Proto je s postupem času stále více kladen důraz na spolehlivost elektrických strojů, ať už z hlediska bezpečnosti, nebo omezení finančních škod vzniklých v důsledku nečekaného vyřazení stroje z provozu. Vzniklé škody mohou v krátké době několikanásobně převýšit pořizovací cenu daného stroje, zejména při výpadku velkých výrobních linek, například dolů, mlýnů, továren apod.

Nemůže být opomíjen ani vliv na bezpečnost obyvatelstva a zachování čistoty životního prostředí. Tyto rizika musí být brány v potaz například pro elektrické stroje používané v jaderné energetice. Jedním ze způsobů jak zajistit spolehlivost točivých strojů je použití vhodného izolačního systému, který musí splňovat požadavky na něj kladené.

Bakalářská práce je zaměřena na izolační systém statoru vysokonapěťových točivých strojů se vzduchovým a vodním chlazením, které jsou vyráběny ve firmě Siemens Electric Machines s.r.o v Drásově. Tato firma se zabývá výrobou motorů do výkonu 20 MW a generátorů do výkonu 20 MVA, dále pak vyrábí komponenty pro mateřskou firmu sídlící v Berlíně a Norimberku.

V první kapitole bakalářské práce jsou uvedeny základní izolační materiály a jejich elektrické vlastnosti. Další kapitola je věnována struktuře izolačních systémů a důvodům použití různých materiálů. K této kapitole se váže stručný popis vakuově tlakové impregnace izolačních systémů. Na literární část práce navazuje praktická část v podobě testu dielektrické odolnosti na sadě cívek statorového vinutí, který se uskutečnil pod záštitou firmy Siemens Electric Machines s.r.o. Testovaný izolační systém bude v případě pozitivních výsledků použit pro konstrukci synchronních a asynchronních strojů na napěťové hladině 18 kV v závodě Siemens Electric Machines s.r.o. v Drásově. Odtud vznikl i název práce Izolační systém pro synchronní a asynchronní motory pracující na napěťové hladině 18 kV.

# 1 VLASTNOSTI IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ

Při výrobě točivých strojů jsou brány v úvahu materiály kovové a dielektrické. Kovové materiály mají dvojí funkci. Slouží jako vodiče pro vedení elektrického proudu a zároveň k uzavření elektrického obvodu, například měď a jiné. Dalším kovovým materiálem je křemíkem legovaná ocel, v podobě plechů (dynamoplech). Tyto plechy jsou vzájemně odizolovány z důvodu potlačení ztrát vířivými proudy a slouží k uzavření magnetického obvodu. Izolační materiály jakožto nevodiče jsou určeny k oddělení elektrického obvodu od magnetického a současně míst s rozdílným elektrickým potenciálem.

Izolační materiály jsou používány ve skupenství pevném, plynném i kapalném. Pevné izolační materiály představují celou škálu materiálů od laminátů přes anorganické papíry, slídové výrobky až po izolační pásy vyrobené z kombinací slídových a skelných materiálů. Za plynné izolační materiály lze považovat například vzduchové mezery mezi vodiči. Kapalné izolační materiály se používají například v podobě minerálních olejů, ve kterých jsou ponořeny vinutí velkých netočivých strojů.[2]

## 1.1 Elektrické vlastnosti izolačních materiálů

Každý materiál je složen z atomů, tyto atomy mohou být kladně nebo záporně nabitě, přičemž takto nabitě částice nazýváme ionty. Ve vodivých látkách se vyskytují volné elektrony, nebo ionty, které mají funkci nosičů náboje. Látky nevodivé tyto volné částice téměř postrádají, proto materiál v normálním stavu (ideálně čistá struktura, příznivá teplota, nízká vlhkost aj.) není schopen vést elektrický proud.[4]

Pro praktické účely používáme při hodnocení materiálů z hlediska jejich elektrické vodivosti hodnoty měrného elektrického odporu (rezitivity –  $\rho$  [ $\Omega \cdot \text{m}$ ]) a měrné elektrické vodivosti (konduktivity –  $\gamma$  [ $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ ]).

### 1.1.1 Elektrický odpor izolanů

Pro elektrický odpor izolanů neplatí Ohmův zákon, jelikož se proud s napětím zvětšuje mnohem strměji. U izolanů rozeznáváme vnitřní, povrchový, průchozí a měrný odpor. Povrchový odpor je měřitelný mezi přiloženými břitovými elektrodami. Vnitřní odpor, též označovaný jako odpor izolační, je měřitelný mezi zasazenými elektrodami. Průchozí odpor je vnitřní odpor izolanu při vyloučení povrchu, jakožto vodiče proudu. Odpor měrný lze zjistit z odporu vnitřního přepočítáním na rozměry izolanu.[1] Pro plochý vzorek při předpokladu homogenního elektrického pole vyjádříme měrný elektrický odpor:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{h} \text{ [}\Omega \cdot \text{m]} \quad (1)$$

kde:  $R$  je hodnota izolačního odporu [ $\Omega$ ]  
 $S$  je plocha elektrod [ $\text{m}^2$ ]  
 $h$  je tloušťka vzorku [ $\text{m}$ ]

### 1.1.2 Elektrická vodivost izolanů

Chování látek po vložení do vnějšího elektrického pole závisí na koncentraci v nich přítomných nosičů, tedy elektrického náboje. Reálné materiály rozdělujeme právě podle

koncentrace těchto nosičů s přihlédnutím k daným podmínkám, tedy podle hodnot jejich vodivosti (konduktivity)  $\gamma$ . Rozdělení látek dle měrné elektrické vodivosti vypadá následovně:

- vodiče  $\gamma > 10^5$  [ $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
- polovodiče  $10^{-9} < \gamma < 10^5$  [ $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
- izolanty  $\gamma < 10^{-9}$  [ $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

Vodivost reálných izolantů je vždy neurčitá, jelikož obsahují neurčité množství volných nosičů elektrického náboje. Zařazení všech materiálů do příslušné skupiny látek je ovlivňováno vnějšími podmínkami, tedy teplotou, tlakem, frekvencí přiloženého napětí a intenzitou působícího elektrického pole. Veliký význam má hlavně teplota. Vhodným příkladem je sklo, které je v roztaveném stavu vodivé. [5]

Vodivost izolantů lze rozdělit podle mechanismů na iontovou vodivost, elektronovou vodivost, dále pak na vnitřní a povrchovou vodivost. Tyto mechanismy se v izolantech vyskytují současně, přičemž vždy jeden v závislosti na daných podmínkách převládá.

Měrná elektrická vodivost a měrný elektrický odpor jsou účelné zejména z hlediska porovnání různých materiálů. Vzájemný vztah zmíněných veličin je následující:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} [\text{S}\cdot\text{m}^{-1}] \quad (2)$$

### 1.1.3 Polarizace

Dielektrická polarizace je fyzikální jev, při kterém se molekuly látky vlivem elektrického pole přemisťují ze svých rovnovážných poloh do poloh nových. Dochází k natočení dipólových molekul ve směru elektrického pole. Výjimečně mohou být příčinou polarizace i volné elektrony. Mírou polarizace v látce je relativní permitivita označována  $\epsilon_r$ . [4]

### 1.1.4 Elektrická permitivita

Elektrická permitivita je jedním z nejdůležitějších parametrů izolačních materiálů charakterizující chování izolace v elektrickém poli. Její jednotkou je pF/m. Tato veličina je kmitočtově a tepelně závislá, proto ji nelze považovat za konstantu, tou je jen permitivita vakua  $\epsilon_0$ . Elektrická permitivita izolantu je součin permitivity vakua a relativní permitivity  $\epsilon_r$ . Relativní permitivitu si lze představit jako kapacitu kondenzátoru s plochou elektrod  $1 \text{ m}^2$  a šířkou dielektrika 1 m. Přiložené napětí na tento kondenzátor působí na kladné a záporné části molekuly. Působením elektrického pole jsou na nabitě částice vyvíjeny síly, které způsobí jejich posunutí. Toto posunutí nazýváme posunutí dielektrické. Posun elektrického náboje způsobí vznik takzvaného posuvného nabíjecího proudu, který je zaznamenatelný až to doby obnovení rovnováhy mezi elektrickým polem a nabitou částicí. Elektrická permitivita je tedy mírou polarizace. [1]

### 1.1.5 Elektrická pevnost izolantů

Základním úkolem izolačních materiálů je oddělit místa s různým elektrickým potenciálem. K tomu aby mohl izolant tuto funkci vykonávat, musí mít příznivé fyzikální vlastnosti. Tyto vlastnosti se mění se změnami parametrů okolí například teploty, tlaku, nebo intenzity elektrického pole. Izolantům vystaveným těmto vlivům se mohou ve struktuře objevit poruchy, počet volných nosičů tak narůstá, což způsobuje svodový proud. Pokud se intenzita elektrického pole, nebo teplota zvětšuje, roste i svodový proud a může se zvýšit natolik, až je překročena



určitá úroveň napětí a nastane průraz. Vzniklým výbojem jsou oba elektrické potenciály spojeny vodivou cestou, která umožňuje průchod proudu. Procházející proud může dosahovat značných hodnot, jelikož je omezen pouze impedancí zdroje a přívodů k elektrodám. [4]

Vzniklý výboj má dvě stádia. V izolantu nejdříve dojde k prudkému nárůstu vodivosti, který končí zmíněným výbojem. Následně po odeznění výboje se projeví procesy mající ve svém důsledku vážně degradační účinky izolantu. V závislosti na skupenství izolantu může být elektrická pevnost porušena průrazem, nebo přeskokem.

O průraz se jedná u látek pevných. Vlivem průrazu dochází k trvalému poškození izolantu a lze jej rozdělit na tři skupiny. Čistě elektrický průraz, u kterého velikost průrazného napětí není závislá na teplotě ani na době přiloženého napětí. Tepelný průraz je charakterizován tím, že je průrazné napětí výrazně závislé na teplotě a délce působení průrazného napětí. Elektrochemický průraz nastává při dlouhodobém působení elektrického pole, vlivem kterého jsou v izolantu nastartovány elektrochemické procesy zhoršující jeho izolační schopnosti.

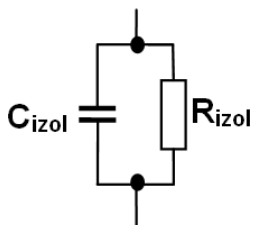
Přeskok je jev způsobený výbojem v ionizovaném prostředí. Vyskytuje se u izolantů plyných nebo kapalných. Plyné a kapalné izolanty mají vlastnost regenerace, tedy nedochází k jejich trvalému poškození.

Jak bylo popsáno v prvním odstavci, při přiložení určité úrovně napětí dochází k průrazu (resp. přeskoku). Tomuto napětí říkáme napětí průrazné a značí se  $U_P$ . Jeho velikost závisí na druhu i rozměrech izolantu, na časovém průběhu elektrického namáhání, vlhkosti, vlivu teploty, znečištění a tlaku. Pokud se napětí přepočítá na tloušťku izolantu  $d$  [mm] dostaneme hodnotu elektrické pevnosti  $E_P$ . [5]

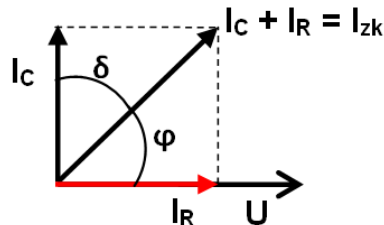
$$E_P = \frac{U_P}{d} \text{ [V}\cdot\text{mm}^{-1}] \quad (3)$$

### 1.1.6 Ztrátový faktor

Ztrátový faktor neboli tangens delta se používá k monitorování stavu izolace, měří se vysokým střídavým napětím při síťové frekvenci. Izolace vodičů je v podstatě kondenzátor s kapacitou  $C_{izol}$  a izolačním odporem  $R_{izol}$ , který odpovídá ztrátám v izolaci. Z fázorového diagramu na obrázku 1 je patrný význam úhlu  $\delta$ . Jedná se o fázový posuv mezi ideálním kapacitním proudem  $I_C$  a zkušebním  $I_{zk}$  proudem protékajícím vodičem, který je součet čistě odporového a čistě kapacitního proudu. Nesprávně impregnovaná izolace se projevuje velkým úhlem  $\delta$  a tím i velkým ztrátovým činitelem  $\tan \delta$ . [3]



Náhradní obvod



Obrázek 1. Náhradní schéma izolace a fázorový diagram [autor]

Ztrátový činitel je bezrozměrné číslo a vypočítáme jej pomocí následujícího vztahu:

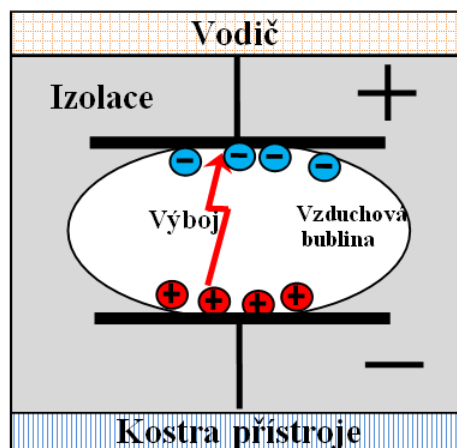
$$\tan \delta = \frac{|I_R|}{|I_C|} \quad (4)$$

### 1.1.7 Elektrické stárnutí izolace

Elektrické stárnutí izolace je eroze, probíhající při dlouhodobém působení elektrického pole na izolant. Jde o neúplné průrazy ve struktuře izolantu, které krátkodobě nenarušují elektrickou pevnost, ale postupně způsobují trvalou degradaci izolačního materiálu. V izolačních systémech vznikají i při největší technologické kázni výroby dutinky vyplněné plynem (vzduchem). Plyn má podstatně menší elektrickou pevnost, než okolní materiál. V těchto dutinkách dochází k přeskokům, které jsou nazývány částečné výboje. [5]

Výskyt částečných výbojů je způsoben lokálním nárůstem intenzity elektrického pole a nehomogenitami v materiálu. Bylo již zmíněno, že k částečným výbojům dochází v bublinkách vzniklých při výrobě izolace. Při přeskoku se molekuly plynu v dutince rozpadají na kladné a záporné ionty. Tyto ionty se v elektrickém poli pohybují v opačném směru, než je orientace přiloženého elektrického pole. Začnou se hromadit na stěnách dutinky a vytváří tak opačně orientované elektrické pole. Průběh tohoto jevu je patrný z obrázku 2.

Výboj v dutince hoří do doby, dokud se na jejích stěnách nenahromadí tak velký elektrický náboj, že napětí na dutince klesne pod hodnotu tzv. zhašecího napětí. V případě střídavého napětí se tento děj opakuje v obou polaritách.[6]



Obrázek 2. Částečný výboj v izolaci [autor]

## 1.2 Tepelné vlastnosti izolantů

Průchodem proudu vodičem vznikají ztráty a v důsledku nich se uvolňuje teplo známé jako teplo Joulovo. Toto teplo společně s teplem uvolněným v důsledku ztrát v železe a ztrát dielektrických způsobuje oteplení stroje. Izolace má v porovnání s ocelovými plechy a materiálem používaným pro vodiče podstatně menší tepelnou odolnost což znamená, že tepelná odolnost celého stroje je omezena na tepelnou odolnost izolace. Parametry izolantů se v závislosti na teplotě mění. Klesá jejich odpor, zvyšuje se vodivost a vzrůstá riziko trvalého poškození izolace. Proto jsou tepelné vlastnosti izolantů při návrhu elektrických strojů velice důležité.[1]

### 1.2.1 Třídy teplotní odolnosti izolací

K nejdůležitějším vlastnostem izolantů patří zachování izolačních schopností za tepla. Tyto vlastnosti se vztahují na složení materiálu, protože právě složení materiálu určuje stálost izolačních vlastností při tepelném namáhání. Aby nedocházelo k překračování maximálních dovolených teplot izolací, rozdělujeme izolační materiály podle tříd teplotní odolnosti, které udává norma ČSN EN 60085.[13]

Maximální teplota	90 °C	105 °C	120 °C	130 °C	155 °C	180 °C	200 °C	220 °C	250 °C
Označení	Y	A	E	B	F	H	N	R	-

Tabulka 1 Třídy teplotní odolnosti [14]

### 1.2.2 Tepelné stárnutí materiálů

Průběh tepelného stárnutí je rozdílný v závislosti na druhu izolačního materiálu a provozních podmínkách, kterým je izolant vystaven. Typické průběhy tepelného stárnutí izolačních materiálů jsou:

- Výstup těkavých složek s malou molekulární hmotností (delaminace), které se v izolačním materiálu nacházejí, nebo se v materiálu vytvořily v průběhu stárnutí.
- Pokračování polymerace, které nejdříve zlepšuje elektrické a fyzikální vlastnosti, ale po překročení určitého času způsobí křehnutí a následné lámání materiálu.
- Zhoršení následkem hydrolyzy, což je tepelně vyvolaná chemická reakce mezi materiálem a vodou obsaženou ve vlhkosti vzduchu.

U plastických látek lze výše zmíněné pochody potlačit aditivami a tím ovlivnit jejich teplotní odolnost. Pro izolační materiály, které nejsou složeny z polymerních látek, tedy i materiály z kterých se skládají izolační systémy elektrických strojů, se vlastnosti měnící se působením teploty nemění stejnou rychlostí. Na tomto faktu jsou založeny teplotní indexy.

Teplotní index izolačního materiálu udává teplotu, při které dojde po určité době ke ztrátě jeho charakteristických vlastností.[1]

## 2 IZOLAČNÍ MATERIÁLY PRO VYSOKONAPĚŤOVÉ TOČIVÉ STROJE

Izolační systém točivých strojů je tvořen kompozitem složeným z různých materiálů, jako jsou slídové, skelné a polyetylenové pásy, nomex®, C-bloky ze skelných materiálů nanesených na vodivé části a vytvrzené při impregnačním procesu.

V izolačním systému vysokonapěťových točivých strojů rozdělujeme používané izolační materiály dle funkce na izolace plošné, materiály sloužící jako nosiče, materiály kompozitní a materiály používané jako pojivo. V případě, že je jako pojivo izolačního systému použita anhydridová pryskyřice, jsou tyto materiály obohaceny o urychlovač.

### 2.1 Plošné izolační materiály

Plošné izolační materiály slouží jako primární elektrická izolace, která je nanesena na vodič ve formě spojitě, nebo nespojitě izolace. Spojitě izolace je zajištěna jedním kusem izolační fólie navinuté na vodič, nebo vložené do drážky. Pro izolaci statoru je více využívána nespojitě izolace, provedena pomocí slídových izolačních pásek navinutých na cívku statoru ve více vrstvách. Tyto materiály musí mít co možná nejlepší elektrickou pevnost a tepelnou odolnost.

Izolační fólie jsou vyráběny v mnoha provedeních. Složení je závislé na metodě impregnace, napěťové hladině a třídě teplotní odolnosti stroje. Pro izolování vinutí vysokonapěťových strojů se pro třídu teplotní odolnosti F používá složení porézního epoxid-slídového papíru a skelné tkaniny jako nosiče, nebo kombinace porézního epoxid-slídového papíru s polyetylen-tereftalátovou fólií. Pro třídu teplotní odolnosti H se používá slídový papír a skelná tkanina s modifikovanou silikonovou pryskyřicí. Tyto materiály jsou navíjeny ve vrstvách, jejichž tloušťka je závislá na napěťové hladině, pro kterou je stroj konstruován. Izolační pásy musí mít příznivou pevnost v tahu, aby se páska při navíjení nepoškodila. Pro vyšší pevnost v tahu jsou vyráběny izolační pásy s vrstvou polyetylen-tereftalátové plsti. Stažení izolace v čelech cívek zajišťují

smršťovací pásky složené z polyesterových a skelných vláken s polyester-ftalátovou fólií. Takto složené materiály jsou dodávány v šířkách od 10 do 1000 mm. [8]

Nomex® je syntetický materiál složený z malých vláknitých částic aromatického polyamidu (aramidu). Velmi dobře odolává vysokým teplotám do 220 °C, má příznivé elektrické a mechanické vlastnosti. Používá se jako drážková izolace, oddělení fází nebo kluzný materiál při klínování.[5]

## 2.2 Materiály sloužící jako plniva kompozitu

Materiály sloužící jako plniva kompozitu společně s pojivou zajišťují mimo elektrické pevnosti i mechanické zpevnění vinutí. Mají za úkol zajistit nehybnost jednotlivých vodičů a dodržení požadovaných vzduchových mezer.

### 2.2.1 Skelné materiály

Skleněná vlákna z bez alkalické skloviny jsou výborným elektrickým izolantem a mají vynikající tepelné vlastnosti. Odolávají velkému tepelnému namáhání přes 250°C bez zhoršení mechanických vlastností. Skelná vlákna se samostatně téměř nevyužívají, ovšem další zpracování na výrobky ze skelných vláken umožňuje jejich široké využití. Nejpoužívanějšími výrobky ze skelných vláken používané pro točivé stroje jsou skelné pramence, rohože a tkaniny.

Skelné pramence se skládají ze sdružených, rovnoběžně uložených, nestočených vláken. Tyto pramence mohou být umístěny do trubice ze skelné tkaniny, nebo jsou ovinuty krycí páskou.

Skelné rohože se vyrábějí buď ze sekaných pramenců, nebo kontinuálních vláken nepravidelně plošně uložených a slisovaných ve vrstvách společně s pojivem. Tyto rohože se vyrábějí v různých tloušťkách, dají se libovolně ohýbat a stříhat.

Skelné tkaniny jsou plošné výrobky z pramenců, nebo vláken pravouhle utkaných, proto působí výstužně v obou směrech. [7]

### 2.2.2 Materiály z aramidových vláken

Aramid je aromatický polyamid. Jeho vlákna jsou na bázi lineárních organických polymerů, jichž předností je vysoká pevnost a tuhost v tahu. Nevýhodou je nízká pevnost v tlaku, což znamená, že není vhodný pro součásti namáhané na ohyb. Ve formě kompozitu odolává teplotám do 300°C. [7]

## 2.3 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou v současnosti velmi využívané, jelikož s výhodami spojují své mechanické a elektrické vlastnosti. Vznikají spojením nosné složky (skelná vlákna, polyesterová rouna, polyamidové folie a jiné) s pojivou nejčastěji z epoxidové, polyesterové, nebo silikonové pryskyřice.[5]

V současnosti patří mezi nejpoužívanější kompozitní materiály pro výrobu vysokonapěťových točivých strojů sklotextit, delglas®, delmat®, delmat epoxy®, vetronit®, isoval®. Tyto materiály jsou vyráběny v podobě desek, trubek, tyčí, případně mohou být opracovány do jiných požadovaných tvarů. Mají různé mechanické, tepelné a elektrické vlastnosti.[8, 9]

## 2.4 Látky sloužící jako pojivo kompozitu - pryskyřice

Úkolem pojiva je prosytit všechny vrstvy a části kompozitu izolačního systému. Po vytvrzení plniva se uzavře povrch vzniklého kompozitu, což zabrání případnému pronikání vlhkosti a nečistot do struktury izolačního systému.

Nedostatek přírodních materiálů vhodných pro izolační systémy elektrických strojů byl příčinou využití plastických látek. Plastické látky jsou nekovové materiály, jejichž podstatnou složku tvoří makromolekulární organické sloučeniny, které mohou být získávány synteticky, nebo přeměnou přírodních látek. Podle fyzikálních vlastností dělíme plastické látky na reaktoplasty, termoplasty a elastomery. Pro plnivo kompozitu točivých strojů se nejčastěji používají reaktoplasty. Reaktoplasty jsou látky, které se s působením tepla vytvrzují a stávají se netavitelnými a nerozpustitelnými. Příčinou jejich vytvrzeného stavu je chemická reakce. [1]

Pro impregnaci vysokonapěťových strojů jsou celosvětově běžně používány reaktivní směsi na bázi pryskyřic tedy polyesterové, modifikované epoxidové, případně silikonové pryskyřice s různými mechanickými a tepelnými vlastnostmi.[10]

## 3 IZOLAČNÍ SYSTÉM VYSOKONAPĚŤOVÝCH TOČIVÝCH STROJŮ

Vysokonapěťové točivé stroje pracují na napěťové hladině od 1 kV do 35 kV, nejčastěji v třídě teplotní odolnost F a ve zvláštních případech ve třídě H. Aplikovaný izolační systém neplní pouze funkci elektrické izolace. Musí také zajistit vhodnou mechanickou pevnost při dynamickém namáhání statorového vinutí vlivem procházejících proudů.

Stator synchronního stroje se od statoru asynchronního stroje příliš neliší. Je opatřen trojfázovým vinutím vsazeným do drážek, vyražených do statorových plechů. Jako materiál pro vodič je použita měď obdélníkového průřezu. Statorové cívky se ručně vkládají do svazku ve dvou vrstvách, přičemž vždy jedna drážková část cívky se nachází v horní poloze a druhá část v poloze spodní. Vzdálenost těchto poloh se nazývá krok. Části cívek vystupující ze statoru se nazývají čela a vytvářejí takzvaný koš vinutí, který je třeba zpevnit pomocí vhodných prostředků například skelných bloků, sklolaminátových kruhů nebo polštářů.[11]

### 3.1 Izolace statorových cívek

Statorové cívky jsou navinuty z vodiče požadovaného průřezu s pracovní izolací. Jeden vodič bývá z výrobně technických důvodů složen z více jednotlivých pramenů, které jsou navinuty do tvaru vlásenky (obrázek 4., vlevo). Vlášenska je v délce čel cívky ovinuta polyesterovou páskou, která při tvarování zajišťuje odolnost proti mechanickému poškození pracovní izolace. V případě vícepramenného vinutí je u navinuté vlásenky do drážkového prostoru mezi prameny vložena výztuha z polyetylenu, napuštěného epoxidovou pryskyřicí. U jednopramenných cívek lze ovin polyesterovou páskou vynechat a výztužný materiál je ovinut kolem drážkové části cívky. Takto připravená vlášenska je vložena do zapékacího lisu, kde se výztuha vlivem teploty vytvrdí.[1]

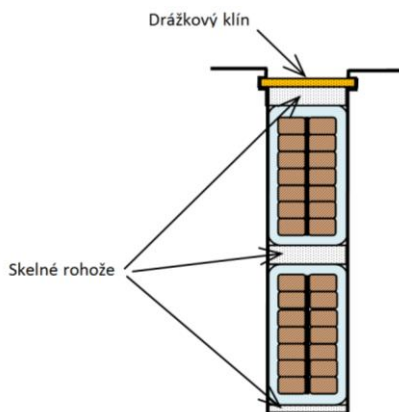
Další fází výroby statorové cívky je její tvarování, které je provedeno pomocí hydraulických lisů. Příslušný tvar cívky se odvíjí od průměru statoru a délky kroku.

Cívky vysokonapěťových točivých strojů jsou ovinuty základní izolací v podobě izolačních pásek. Pro vysokonapěťový izolační systém je nejvhodnějším způsobem impregnace vakuová, takzvaná VPI (Vacuum Pressure Impregnation) viz níže, proto jsou pro základní izolaci vhodné spíše porézní pásy s malým obsahem pryskyřice, nebo kombinace porézních pásek a pásek s polyetylenovou fólií. Toto základní ovinutí provádí zpravidla stroj.[1] Vývody a nosy cívek jsou ovíjeny izolací ručně, pro vývody mohou být s výhodami použity trubice ze sklo-silikonpolyesteru, které se jednoduše navléknou na vývod cívky.

Cívka ovinutá základní izolací je dále opatřena povrchovou vrstvou, která se svojí funkcí i materiálem liší pro drážkovou a košovou část cívky. Vrchní vrstva drážkové části je realizována vodivými páskami, které slouží jako ochrana proti výbojové činnosti uvnitř drážky. Košová část cívky za výstupem z drážky je v ohybu ovinuta polovodivou páskou, tato páska omezuje stárnutí izolace způsobené vlivem skokové změny potenciálu na výstupu vodiče z ocelového svazku. Finální ovinutí čel cívek je provedeno parotěsnou smršťovací páskou, která se vlivem tepla stáhne a zarovná tak povrch cívky. Tato páska má funkci především ochrannou.[1]

Z důvodu oddělení fází je nutné rozdělit vrchní a spodní polohy cívek v drážkové části. Oddělení je provedeno vsazením pásku ze skelné rohože. Tento prostor, pokud se zrovna nejedná o rozdělení fází, můžeme opatřit i teplotními čidly, které mohou poskytovat údaje o teplotě drážkové části stroje. Dále je nutné ochránit cívky před poškozením nerovnostmi statorového svazku na dně drážky způsobenými nedokonalým skládáním plechů. To je opět provedeno vložením tenkého izolantu (skelné rohože nebo sklotextitu) na dno drážky.

Po vložení vinutí jsou do drážek vloženy pásy ze skelné rohože, které mají při klínování ochrannou a po impregnaci fixační funkci. Následně je drážka uzavřena klínem. Při klínování jsou cívky v drážkové části mírně stlačovány, například pákou zapřenou o vnitřní průměr statoru, přičemž se do rýh v horní části drážky zasunují drážkové klíny, které postupně uzavřou drážku v celé délce statorového svazku.



Obrázek 3 Řez drážkou statoru [autor]

### 3.1.1 Opatření proti výbojové činnosti

Výbojová činnost, dále jen koróna, značně snižuje spolehlivost i životnost izolačního systému a proto je nutné ji co možná nejvíce omezit. Nerovnosti povrchu izolace, nebo vzduchem vyplněné dutinky v izolaci, představují potenciální nebezpečí vzniku koróny, tedy možnosti přítomnosti částečných a plazivých výbojů. Odolnost proti koróně je třeba zajistit jak uvnitř v drážce, tak i na výstupu z ní. Opatření proti koróně je provedeno rovnoměrným vyrovnáním potenciálu po celém povrchu izolace a zpomalením prudkého nárůstu potenciálu na výstupu z drážky. Tyto opatření jsou pro vysokonapěťové aplikace zajištěny vodivými, polovodivými páskami, nebo vodivými laky. [8]

Vodivé pásy určené pro drážkovou část jsou vyrobeny z polyesteru, nebo skelné tkaniny obsahující vodivé částice. Tato vrstva musí těsně přiléhat a vyplňovat nerovnosti stěn drážek statorového svazku. Polovodivá páska, která slouží jako ochrana proti koróně na výstupu z drážky, je vyrobena z polyetylenové tkaniny silně obohacené reaktoplastovou hmotou obsahující částice karbidu křemíku. Přesné složení těchto pásek je výrobní tajemství firem zabývajících se výrobou izolačních materiálů. [8]

## 4 IMPREGNACE IZOLAČNÍHO SYSTÉMU

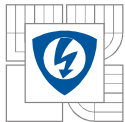
Impregnace izolačního systému je finální fází výroby statorového vinutí. Zajišťuje dostatečnou elektrickou pevnost, mechanickou odolnost proti vibracím a chemickým vlivům průmyslového prostředí. Dále musí dostatečně zajišťovat odvod tepla z vinutí.

Z hlediska metodiky rozlišujeme dvě základní metody impregnace a to vakuovou impregnaci dále jen VPI (Vacuum Pressure Impregnation) a impregnaci resin-rich. Impregnační metoda resin-rich není z hlediska vysokonapěťových aplikací tak využívaná. Z tohoto důvodu není metodě resin-rich v tomto textu věnována pozornost. Její výhody spočívají především v nižší pořizovací ceně používaného zařízení oproti metodě VPI.

Impregnace VPI je z hlediska materiálního zajištění firmy velmi náročná impregnační metoda. Vyžaduje moderní a rozsáhlé technické zázemí v podobě vakuové komory, nádrží pro uskladnění pryskyřic, odsávacích a filtračních zařízení, cirkulačních pecí a podobně. Přes tento fakt jsou izolační systémy zpracovány touto metodou velmi kvalitní a to především proto, že vakuum spolehlivě odstraňuje z izolace bublinky plynů, proto je celý systém méně náchylný na přítomnost částečných výbojů a tedy i stárnutí izolace. Pro tuto metodu jsou používány porézní izolační pásy s nízkým obsahem pryskyřice, aby celý izolační systém dobře absorboval impregnační pryskyřici. Případně může být použito kombinované izolování, kdy je cívka izolována současně porézní páskou i páskou s polyetylen-tereftalátovou fólií. Pokud je k impregnaci použita anhydridová pryskyřice, musí komponenty izolačního systému obsahovat urychlovač, který slouží jako katalyzátor. Pryskyřice používané v metodě VPI jsou skladovány v nádržích poblíž vakuového kotle. V těchto nádržích jsou udržovány takové podmínky, aby nedocházelo k znehodnocování pryskyřic před jejich použitím. Pro zajištění kvality izolačního systému je nutné pryskyřici podrobovat pravidelným kontrolám, zejména měření viskozity a délky želatinačního času (reaktivity). [12]

### 4.1 Impregnační proces VPI

Před impregnačním procesem je nutné statorový svazek předebrát v peci na teplotu přibližně 160 °C z důvodu stažení izolací a vysušení vlhkosti. Následně se dílec nechá zchladnout na



požadovanou teplotu, jejíž velikost je závislá na použité izolační pryskyřici, přibližně (20 až 70 °C). Po tomto kroku je dílec přemístěn do kotle ve vakuové komoře. Nyní začíná samotný impregnační proces. Ve skladovacích nádržích se pryskyřice předpřipraví (vhodná teplota, odplynění) pro přečerpání do vakuového kotle. Během přípravy pryskyřice je tlak v impregnačním kotli snížen na hodnotu přibližně 0,4 mbar. Toto stádium se nazývá suché vakuum, je to poslední fáze kdy je možné impregnační proces přerušit bez trvalých následků. Další krok spočívá v zaplavení kotle při tlaku 20 až 25 mbar, takovou rychlostí, aby nedocházelo k nadměrné tvorbě bublin. Dílec je zaplaven nad nejvyšší bod a tlak stabilizován na hodnotu 30 až 60 mbar. Zaplavením kotle začíná takzvané mokré vakuum. Po zaplavení je tlak zvyšován až na hodnotu 5 bar, která je udržována 30 minut. Následně se tlak kotle snižuje až na tlak atmosférický a posléze je pryskyřice odčerpána zpět do nádrží, kde jsou pro její skladování vhodné podmínky (příznivá teplota, míchání). V dalším kroku se dílec převezde do pece, kde je při teplotě 150 °C pryskyřice vytvrzena. [12]

## **Konec rešeršní části bakalářské práce**



## Praktická část bakalářské práce

### 5 STRUKTURA IZOLAČNÍHO SYSTÉMU PRO NAPĚŤOVOU HLADINU 18 kV

Testované cívky byly izolovány slídovou páskou s přidáním urychlovačem v příslušných vrstvách a jsou opatřeny ochranou proti koróně. V drážkové části ve formě vodivé pásky, na výstupu z drážky polovodivou páskou pro zmenšení napěťového gradientu. Polovodivá páska je u každé z cívek jiná (odlišné vlastnosti, jiný výrobce). Parametry polovodivé pásky nemohou být z důvodu vyzrazení firemního tajemství zveřejněny, nicméně *tabulka 2* poukazuje na to, že nejsou u všech cívek stejné. V čelech jsou cívky ovinuty ochrannou smršťovací páskou. Takto izolované cívky byly impregnovány impregnační metodou VPI v segmentech simulujících uzavřenou drážku statoru.

Cívka	Materiál	Dolní vrstva		Horní vrstva	
		Délka – $L$ (mm)	Ovinutí (Počet vrstev - $V$ ) (překrytí $P$ %)	Délka – $L$ (mm)	Ovinutí (Počet vrstev - $V$ ) (překrytí $P$ %)
1	217.21	$L_1$	$V_1$	$L_2$	$V_1$
2	Akasic 4b	$L_1$	$V_1$	$L_2$	$V_1$
3	217.03	$L_1$	$V_2$	$L_3$	$V_2$
4	217,22	$L_1$	$V_3$	$L_3$	$V_3$

Tabulka 2. Parametry ovinu polovodivou páskou

Příčemž:

Jsou délky ovinů  $L_2 < L_1 < L_3$  a počty vrstev  $V_3 < V_2 < V_1$

### 6 VYHODNOCENÍ DIELEKTRICKÉ ODOLNOSTI CÍVEK STATOROVÉHO VINUTÍ PRACUJÍCÍHO NA NAPĚŤOVÉ HLADINĚ 18 kV

Kvalita izolačního systému jde ruku v ruce se spolehlivostí celého stroje. Způsob jejího zajištění z hlediska elektrického namáhání je proveden dielektrickými zkouškami v dostatečném rozsahu. Dielektrická odolnost izolačního systému je zajištěna více jednotlivými zkouškami, při nichž namáhání izolace několikanásobně převyšuje namáhání při chodu stroje. Procesy těchto zkoušek simulují dlouhodobé namáhání izolace jak při sinusovém, tak impulsním napětí. Tyto zkoušky mají za úkol v čas odhalit nedostatky v provedení izolace a umožňují odhad životnosti izolačního systému točivých strojů.

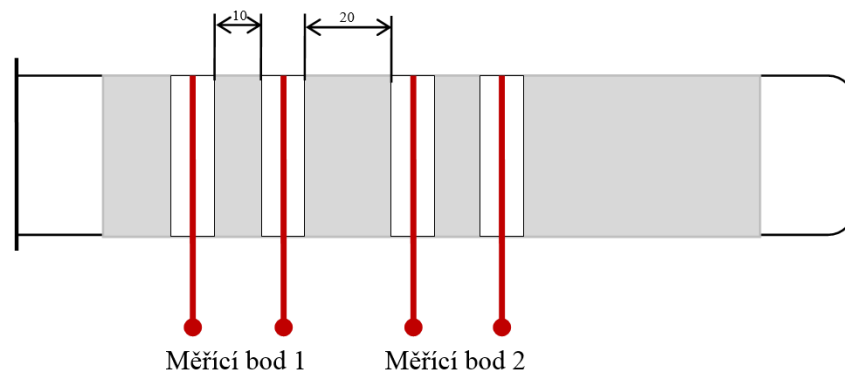
Následující odstavce popisují průběh kvalifikace izolačního systému čtyř cívek s izolačním systémem navrženým pro napěťovou hladinu 18 kV. Níže uvedený postup je dán technickou specifikací [17] a standardy firmy Siemens.

## 6.1 Porovnání polovodivých pásek

Jak již bylo řečeno výše, pro každou cívku byla použita jiná polovodivá páska. U těchto pásek je pro budoucí posuzování třeba klasifikovat její vodivost v závislosti na intenzitě elektrického pole dle [17]. Pro klasifikaci vodivosti polovodivé pásky byl nejprve změřen, respektive dopočítán měrný plošný odpor a posléze graficky znázorněn v závislosti na napětí. Dále je vyhodnocena vodivost polovodivých pásek, kterou lze přibližně určit na základě  $I$ - $U$  charakteristiky, kde křivka lámající se při vyšším napětí poukazuje na menší vodivost dané pásky. Stanovení diagramu vodivosti v závislosti na intenzitě elektrického pole by do měření zbytečně vneslo další chyby, jelikož elektrody v podobě stříbrného laku s měděným vodičem neměly vždy úplně přesnou rozteč 10 mm. Tato vzdálenost by hrála velkou roli při výpočtu intenzity elektrického pole.

Aby bylo možné změřit odpor vzorku polovodivé pásky, musíme každý ze vzorků navinout na zkumavku a následně vytvrdit v peci. Elektrody zajišťuje tenká vrstva stříbrného laku a měděný vodič, viz *obrázek 4*.

Tímto způsobem bylo zpracováno celkem osm svitků, přičemž se každý vzorek nacházel na dvou svitcích, viz *obrázek 7* v příloze 1. U každého měřicího bodu byl změřen proud a z těchto hodnot následně vypočítán průměr. Z Ohmova zákona jsme při vyloučení tloušťky materiálu obdrželi hodnotu povrchového odporu, která nám dá po vynásobení obsahem měřené části  $S_p$  hodnotu měrného povrchového odporu.



Obrázek 4. Vzorek pro měření plošného odporu polovodivé pásky [autor]

### 6.1.1 Závislost měrného povrchového odporu na napětí

Obsah měřené plochy:

Průměr zkumavky:  $d = 3,02$  cm

Šířka měřicího bodu:  $l_m = 1$  cm

$$S_p = l_m \cdot \pi \cdot d = 1 \cdot \pi \cdot 3,02 = 9,48 \cong 9,5 \text{ cm}^2 \quad (7)$$

Příklad výpočtu pro tabulku 4 v příloze 1 a napětí 1000 V:

Průměrný proud:

$$I_{pr} = \frac{I_1 + I_2}{2} = \frac{2,43 + 2,11}{2} = 2,27 \text{ } \mu\text{A} \quad (8)$$

Povrchový odpor při zanedbání tloušťky materiálu:

$$R_{95} = \frac{U}{I} = \frac{1000}{2,27 \cdot 10^{-6}} = 4,41 \cdot 10^8 \Omega \quad (9)$$

Měrný povrchový odpor:

$$R_p = R_{95} \cdot S_p = 4,41 \cdot 10^8 \cdot 9,5 = 4,19 \cdot 10^9 \Omega \quad (10)$$

Závislost měrného povrchového odporu na napětí je znázorněna v *grafu 1*, viz *příloha 1*. Červené křivky udávají hranice, v kterých by se měly polovodivé pásy pohybovat. V plném rozsahu vyhovuje pouze měrný povrchový odpor polovodivé pásky 217.21.

### 6.1.2 *I-U* křivky

Pomocí *I-U* křivek stanovíme, která páska má dle [17] nejpříznivější vodivost. Proud pro sestavení *I-U* křivek byl spočítán jako průměr všech naměřených proudů u jednoho vzorku, tedy vždy čtyři naměřené hodnoty ze dvou svitků s polovodivou páskou stejného typu, viz *tabulka 14* v *příloze 2*. Vodivost polovodivé pásky vyhovuje v plném rozsahu pouze u vzorku Akasic 4b, jak je patrné z *grafu 3* v *příloze 2*.

Příklad výpočtu pro *tabulku 12* v *příloze 2*, vzorek 217.22 a napětí 1000 V:

$$I_{pr} = \frac{I_{1.1} + I_{1.2} + I_{2.1} + I_{2.2}}{4} = \frac{2,43 + 2,11 + 3,43 + 3,31}{4} = 2,82 \mu A \quad (11)$$

Důvodem, že se *I-U* křivky v *grafu 2*, stanovené u jednotlivých vzorků v různých měřicích bodech nekryjí, je nehomogenita polovodivé pásky, respektive nestejně velké překrytí při jejím navijení a také fakt, že částice karbidu křemíku nemají ve všech místech stejnou velikost a koncentraci. Právě proto byly od každého vzorku polovodivé pásky vyrobeny dva svitky s dvěma měřicími body. Potom je tedy možné spočítat a graficky znázornit průměrné *I-U* křivky.

## 6.2 První měření ztrátového faktoru *tan δ*

Ztrátový faktor je dle [3] měřen jen pro drážkovou část cívky (čela cívek jsou uzemněné) v rozsahu od  $0,2 \cdot U_N$  do  $1,2 \cdot U_N$ , kde  $U_N$  je jmenovité napětí stroje, pro který jsou testované cívky určeny. Pro napěťové hladiny  $\leq 11$  kV nesmí hodnota ztrátového činitele *tan δ* překročit velikost  $7 \cdot 10^{-3}$ . Pro napěťové hladiny větší než 11 kV není normou stanovena žádná hodnota ztrátového faktoru.[15]

Výsledky naměřených hodnot ztrátového faktoru před a po stárnutí vlivem impulzního napětí po dobu 100 hodin udávají *tabulky 14 až 17* v *příloze 3*. V *grafech 5 až 8* jsou graficky znázorněny průběhy měření ztrátového faktoru pro jednotlivé cívky. Z těchto grafů je patrné výrazné zlepšení ztrátového faktoru po stohodinovém stárnutí izolace.

## 6.3 Měření částečných výbojů před elektrickým stárnutím izolace

Částečné výboje dále jen PD z anglického Partial Discharges, vznikají při nárůstu intenzity elektrického pole v izolaci. Jak již bylo popsáno v odstavci 1.1.7, v izolaci jsou přítomny velmi malé dutinky plynu (vzduchu). V případě, že je izolace namáhána elektrickým polem, dochází v těchto dutinách k výbojům, tedy i proudovým impulsům a poklesům napětí na kapacitě izolace. Integrací časového průběhu těchto proudů dostaneme velikost náboje v dutinkách. Právě z tohoto faktu vychází většina metod pro detekci částečných výbojů. Přímé měření proudu v samostatné dutince však není možné, proto je nutné stejně jako u měření ztrátového faktoru paralelní připojení vazebního kondenzátoru, ke kterému je do série připojen přízpusobovací čtyřpól. Tento

čtyřpól představuje měřicí impedanci a předává informace o velikosti náboje do zobrazovací jednotky (počítač s vhodným programem) pomocí optických kabelů.

V měřícím obvodu dochází k částečnému zkreslení průběhu pulzů PD vlivem kapacit kondenzátorů (i kapacit parazitních) a dochází i ke ztrátám elektrického náboje. Proto je nutné před začátkem měření provést kalibraci měřícího obvodu.[14]

K měření částečných výbojů byl použit měřicí systém od firmy Omicron MPD600 s vazebním kondenzátorem  $C_n = 1,1 \text{ nF}$ .

Toto měření poukazuje na značné rozdíly mezi jednotlivými polovodivými páskami, kde při napětí  $10,4 \text{ kV}_{\text{RMS}}$  byla největší hodnota náboje  $Q = 3136 \text{ pC}$  zjištěna u cívky číslo 2 v horní vrstvě. Naopak nejmenší hodnota náboje  $Q = 159,4 \text{ pC}$  při stejném napětí, byla zaznamenána u cívky číslo 3 ve spodní vrstvě. Po zvýšení napětí na hodnotu  $18 \text{ kV}_{\text{RMS}}$  byla zjištěna největší hodnota náboje  $Q = 3760,9 \text{ pC}$  opět u cívky 2 v horní vrstvě a nejmenší hodnota  $Q = 871,6 \text{ pC}$  stejně jako v prvním případě u cívky číslo 3 ve spodní vrstvě. Hodnoty nábojů naměřených u ostatních cívek jsou uvedeny v příloze 6 v tabulce 22.

Výsledky tohoto měření prozatím neslouží k určení vhodné polovodivé ochrany pro zadaný izolační systém. Tato zkouška poskytuje pouze možnost budoucího porovnání délek ovinů, počtů vrstev a vlastností jednotlivých pásek.

## 6.4 Kontrola přiloženým AC napětím před stárnutím izolace vlivem impulzního napětí

Po měření částečných výbojů je provedena zkouška AC napětím přiloženým po dobu jedné minuty. Podle podnikových norem firmy Siemens je velikost přiloženého napětí dána vztahem:

$$U_P = 2 \times U_N + 1 \quad [\text{kV}] \quad (12)$$

Tedy:

$$U_P = 2 \times 18 + 1 = 37 \text{ kV}_{\text{RMS}} \quad (13)$$

Všechny čtyři cívky vydržely přiloženou hodnotu napětí  $37 \text{ kV}_{\text{RMS}}$  po dobu jedné minuty bez průrazu.

## 6.5 Měření oteplení polovodivé pásky při sinusovém průběhu napětí

Materiály snižující napěťový gradient musí po vystavení zvýšenému elektrickému namáhání snížit svůj odpor, což má ve svém konečném důsledku za následek i zvýšení odvodu tepla. Tento fakt je v rozporu u strojů napájených z měničů napětí, kde je třeba pro rozložení elektrického potenciálu zajistit dostatečně nízkou rezistivitu a zároveň dostatečně vysokou rezistivitu pro udržení odvodu tepla v přijatelných mezích. Oteplení samostatného materiálu snižujícího napěťový gradient může velmi výrazně přispět k celkovému oteplení stroje a snížit tak celkovou maximální jmenovitou teplotu stroje, proto je nutné vzít tento činitel v úvahu. Dielektrické zkoušky uvedené v této práci porovnávají oteplení čtyř různých použitých pásek.[16]

Měření oteplení bylo prováděno následujícím způsobem. Hodnota napětí byla zvyšována od napětí fázového přes napětí jmenovité na napětí  $U_P$ , tedy  $37 \text{ kV}$ . Při fázovém a jmenovitém napětí byla změřena teplota po třech minutách, při napětí  $U_P$  po jedné minutě. Frekvence měřícího napětí byla  $50 \text{ Hz}$ . Tabulky 3 a 4 udávají hodnoty oteplení polovodivých pásek po jednotlivých časových intervalech.

Tabulka 3 Teplota a oteplení polovodivé pásky u cívek 1 a 2

Cívka 1, polovodivá páska 217.21							
Měření	Napětí (kV)	Teplota v bodě 1 (°C)	Teplota v bodě 2 (°C)	Průměrná teplota (°C)	referenční teplota (°C)	Oteplení (°C)	čas (min)
1	10,4	27,71	27,72	27,72	25,00	2,72	3
2	18	31,19	31,02	31,11	25,00	3,39	3
3	37	55,27	54,74	55,01	25,00	23,90	1
Cívka 2, polovodivá páska Akasic 4b							
Měření	Napětí (kV)	Teplota v bodě 1 (°C)	Teplota v bodě 2 (°C)	Průměrná teplota (°C)	Referenční teplota (°C)	Oteplení (°C)	čas (min)
1	10,4	26,06	26,09	26,08	25,00	1,08	3
2	18	27,78	28,18	27,98	25,00	1,91	3
3	37	50,76	43,64	47,20	25,00	19,22	1

Tabulka 4. Teplota a oteplení polovodivé pásky u cívek 3 a 4

Cívka 3, polovodivá páska 217.03							
Měření	Napětí (kV)	Teplota v bodě 1 (°C)	Teplota v bodě 2 (°C)	Průměrná teplota (°C)	Referenční teplota (°C)	Oteplení (°C)	čas (min)
1	10,4	26,96	27,02	26,99	25,00	1,99	3
2	18	31,92	32,17	32,05	25,00	5,06	3
3	37	52,48	53,74	53,11	25,00	21,07	1
Cívka 4, polovodivá páska 217.22							
Měření	Napětí (kV)	Teplota v bodě 1 (°C)	Teplota v bodě 2 (°C)	Průměrná teplota (°C)	referenční teplota (°C)	Oteplení (°C)	čas (min)
1	10,4	27,79	27,64	27,72	25,00	2,72	3
2	18	35,03	34,92	34,98	25,00	7,26	3
3	37	68,29	67,19	67,74	25,00	32,77	1

Příklad výpočtu pro první cívku v tabulce 4 a měření 2.

Průměrná teplota:

$$v_p = \frac{v_{p1} - v_{p2}}{2} = \frac{27,71 + 27,72}{2} = 27,72 \text{ °C} \quad (14)$$

Hodnota oteplení:

$$\Delta v_2 = v_{p2} - v_{p1} = 31,11 - 27,72 = 3,39 \text{ °C} \quad (15)$$

Při hodnotě fázového napětí bylo oteplení největší u cívek 1 a 4, naproti tomu nejmenší u cívky 2 s polovodivou páskou Akasic 4b. Při jmenovitém napětí vykazovala největší oteplení cívka 4 a nejnižší oteplení bylo naměřeno opět u cívky 2. Po přiložení napětí o hodnotě 37 kV byly velikosti hodnot oteplení i po minutě mnohem větší než ve všech předchozích případech z toho největší u cívky 4 s polovodivou páskou 217.22 a nejmenší u cívky 2. Znázornění teplot pomocí infrazamery je na obrázcích 12 až 21 v příloze 5.

## 6.6 Stárnutí izolačního systému vlivem impulsního napětí

Při použití polovodivé ochrany na čelech cívek je podle [16] nutné tuto ochranu kvalifikovat. Pro tento účel jsou využity podobná napětí a kmitočty, které se vyskytují v provozu. Tam kde je při konstrukci požadován dobrý elektrický kontakt, to znamená na přechodu vodivé a polovodivé pásky může dojít k zvětšení stykového odporu, což by zahřívání a riziko přítomnosti výbojové aktivity. Cílem kvalifikačních zkoušek systému rozložení elektrického namáhání a systému zmenšujícího napěťový gradient na výstupu z drážky, je poskytnout záruku, že bude spolehlivě fungovat po dobu provozní životnosti.

Izolační systém byl podle [16] stárnut v simulovaných drážkách po dobu 100 hodin impulzním napětím s následujícími parametry impulzního signálu:

Skokové napětí (Jump voltage)	$U_j = 2 \times \text{napětí zdroje nízkého napětí} = 2 \times 1000 \text{ V}$
Hodnota napětí špička-špička	$1,3 \times U_j = 1,3 \times 2000 = 2,6 \text{ kV}_{\text{pk/pk}}$
Doba čela	$t_r = 1,66 \mu\text{s}$
Frekvence	$f = 1 \text{ kHz}$

Kde hodnota 1,3 kterou je násobeno skokové napětí udává zdroj [16]. *Obrázky 6 a 7 v příloze 4* znázorňují průběh impulzního napětí při stárnutí a detail náběhu pulzu.

Po stohodinovém stárnutí izolace všech cívek nebyly v místě přechodu mezi vodivou a polovodivou páskou znatelné žádné známky poškození v podobě opálení, nebo změny barvy izolace. Dále byly cívky v průběhu stárnutí sledovány coronaskopem (přístroj citlivý na ultra fialové záření výbojů) a rovněž nebyly zaznamenány žádné projevy povrchových výbojů.

## 6.7 Měření částečných výbojů po stárnutí cívek vlivem impulsního napětí

Výsledky měření částečných výbojů po prvním stárnutí poukazují opět na aktuální stav izolačního systému, zejména pak protikorónové ochrany.

Po stohodinovém stárnutí vlivem impulsního napětí vykazovaly cívky následující hodnoty nábojů. Při napětí  $10,4 \text{ kV}_{\text{RMS}}$  byla největší hodnota náboje  $Q = 503,8 \text{ pC}$  zjištěna u cívky číslo 3 v horní vrstvě. Naopak nejmenší hodnota náboje  $Q = 70,4 \text{ pC}$  při stejném napětí je zaznamenána u cívky číslo 2 ve spodní vrstvě. Po zvýšení napětí na hodnotu  $18 \text{ kV}_{\text{RMS}}$  byla zjištěna největší hodnota náboje  $Q = 4470,3 \text{ pC}$  u cívky 2 v horní vrstvě a nejmenší hodnota  $Q = 398 \text{ pC}$  u cívky číslo 3 ve spodní vrstvě.

Z výsledků uvedených v *tabulce 22* je zřetelné zmenšení hodnot nábojů u všech čtyř cívek téměř ve všech vrstvách. Toto zlepšení je způsobeno vyzkratováním zdrojů částečných výbojů, to znamená, že stěny mikroskopických dutinek popsaných v kapitole 1.1.7 jsou pokryty vodivými produkty výbojové činnosti[5,6]. Tento jev byl nejmarkantnější zejména u cívky 2 v horní vrstvě, kde hodnota náboje naměřeného při napětí  $10,4 \text{ kV}_{\text{RMS}}$  poklesla z  $Q = 3136 \text{ pC}$  na hodnotu  $Q = 98,9 \text{ pC}$ . Naopak výrazné zvýšení naměřeného náboje u cívky 1 a cívky 2 v horních vrstvách poukazuje na zhoršení vlastností polovodivých ochran vlivem stárnutí impulsního napětí.

V *příloze 6* jsou ukázky PD-diagramů z měření částečných výbojů, jelikož je těchto obrázků příliš mnoho, byly pouze pro názornost vloženy PD-diagramy pro cívku 1.

## 6.8 Stárnutí izolačního systému vlivem sinusového napětí

Tato zkouška má za úkol, stejně jako zkouška namáháním impulsním napětím, popsaném v kapitole 6.6 ověřit funkci ochrany proti koruně. Izolační systém všech čtyř cívek byl podle [16] stárnut vlivem sinusového napětí v simulovaných drážkách. Níže jsou uvedeny parametry průběhu sinusového napětí.

$$\text{Efektivní hodnota napětí} \quad 1,3 \times \frac{U_N}{\sqrt{3}} = 1,3 \times \frac{18}{\sqrt{3}} = 13,5 \text{ kV}$$

$$\text{Frekvence} \quad f = 50 \text{ Hz}$$

Kde hodnota 1,3 kterou je násobeno jmenovité napětí udává zdroj [16].

Po tomto stárnutí opět nebylo zaznamenáno žádné opálení, nebo změna barvy izolace.

## 6.9 Měření ztrátového faktoru $\tan \delta$ po stárnutí izolace vlivem sinusového napětí

Jak již bylo popsáno v odstavci 6.2 ztrátový faktor je měřen jen pro drážkovou část cívky v rozsahu od  $0,2 \cdot U_N$  do  $1,2 \cdot U_N$ .

V tabulkách 19 až 22 v příloze 3 jsou zaznamenány hodnoty ztrátového činitele po namáhání cívek sinusovým průběhem napětí po dobu 1000 h. Po tomto namáhání, došlo opět k mírnému zlepšení naměřených hodnot ztrátového faktoru, zejména u cívek 1 a 2. Z čehož lze usuzovat, že izolace v drážkové části prozatím nepodléhá vlivům stárnutí a to jak stárnutí vlivem impulsního napětí (odstavec 6.6), tak ani vlivem sinusového napětí (odstavec 6.9).

## 6.10 Měření částečných výbojů po stárnutí cívek vlivem sinusového napětí

Výsledky třetího měření částečných výbojů jsou v příloze 6 v tabulce 22. Pro napětí  $10,4 \text{ kV}_{\text{RMS}}$  nejvyšší hodnotu náboje  $Q = 1150,2 \text{ pC}$  vykazovala horní vrstva cívky 1, naopak nejnižší hodnota  $Q = 223,4 \text{ pC}$  při stejném napětí byla naměřena u cívky 1 v horní vrstvě. Pro napětí  $18,1 \text{ kV}_{\text{RMS}}$  vykazují vysoké hodnoty náboje cívky 1 a 2 v horních vrstvách, konkrétně  $Q = 6314,4 \text{ pC}$  pro cívku 1 a  $Q = 6028,6 \text{ pC}$ . Nejnižší hodnota náboje  $Q = 826,4 \text{ pC}$  při stejném napětí byla naměřena u cívky 2 ve spodní vrstvě.

V celkovém průběhu měření částečných výbojů si lze povšimnout, že náboje téměř u všech cívek jsou právě v tomto měření nejvyšší. Je to zřejmě způsobeno "vystárnutím" polovodivé ochrany, která částečně ztratila schopnost snižovat napěťový gradient na výstupu z drážky. Doposud stárnutí odolává pouze spodní vrstva cívky 2 s polovodivou páskou Akasic 4b o délce návinnu  $L_1$  a počtem vrstev  $V_1$ .

## 7 ZÁVĚR

V bakalářské práci byly porovnány jednotlivé polovodivé pásky pro snížení napěťového gradientu z hlediska závislosti měrného povrchového odporu na napětí a dále graficky znázorněny  $I-U$  křivky. Z těchto měření plyne, že z hlediska měrného povrchového odporu vyhovuje normě [17] v plném rozsahu jen polovodivá páska 217.21 a z hlediska polohy  $I-U$  křivky v tolerované oblasti pouze polovodivá páska Akasic 4b.

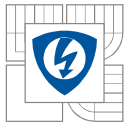
Další dielektrické zkoušky jsou provedeny dle technické specifikace [16]. Sestávají z kvalifikace systému řízení ochrany proti koróně v podobě stárnutí izolačního systému při impulsním napětí po dobu sto hodin a sinusovém napětí 1000 hodin. Následující kvalifikační zkouškou je měření oteplení izolačního systému při různých hodnotách napětí. Během stárnutí izolačního systému nedošlo k žádnému viditelnému poškození izolace, proto je izolační systém všech cívek předběžně způsobilý pro použití v provozu. Nejmenší oteplení polovodivé pásky bylo zaznamenáno u vzorku Akasic 4b použité u cívky 2, největší oteplení vykazoval vzorek 217.22 použité u cívky 4.

Z měření ztrátového faktoru po obou stárnutích je patrné výrazné zlepšení parametrů izolace drážkové části, které je zřejmě způsobené uhašením lokálních zdrojů částečných výbojů a pokračujícími chemickými pochody v izolačním systému.

Z porovnání všech tří měření částečných výbojů je patrný vliv vystavení izolačního systému stohodinovému a tisícihodinovému namáhání. Je nesporné, že polovodivá ochrana byla kromě spodní vrstvy cívky 2 u všech cívek poškozena. Nutno podotknout, že zdroj [16] povoluje opravení, nebo výměnu polovodivé ochrany i v průběhu série dielektrických zkoušek.

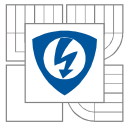
Celkový průběh dielektrických zkoušek nebude v této práci z časových důvodů zahrnut. Nicméně na základě dosud provedených zkoušek můžeme konstatovat, že vliv napěťového namáhání, ať už provozního, nebo zvýšeného (během dielektrických zkoušek) způsobuje trvalou ztrátu požadovaných vlastností izolačních systémů. Jelikož je člověk tvor zvědavý, bude jen otázkou času, než přijde s novými poznatky ze světa izolací a izolačních systémů. Jedna z nadějných inovací může v budoucnu být například zavedení nanotechnologií, které by měly v izolačních systémech zajišťovat "samoopalovací" schopnost. Toto je zatím předmětem výzkumu mnoha firem zabývajících se výrobou izolačních materiálů.





## LITERATURA

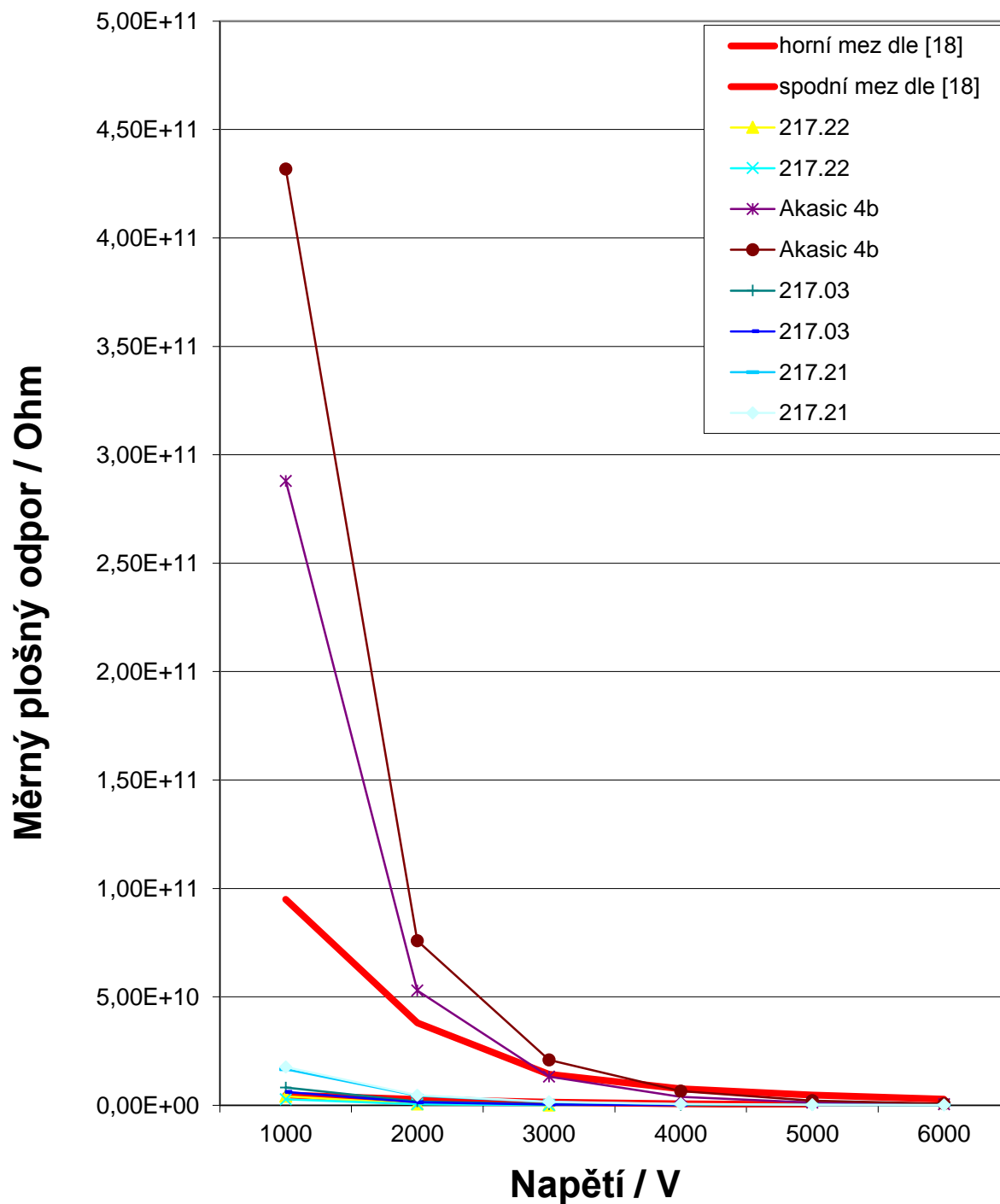
- [1] Sequenz, H. a kol. *Herstellung der Wicklungenel ektrischer Maschines*, Springer-verlag ve Vídni, 1973
- [2] Nejezchlebová, Z. *Vývoj technické normalizace elektroizolačních materiálů v posledním desetiletí*: Širůček, E, *www.odbornecasopisy.cz: Elektro*. Časopis pro elektrotechniku [web], roč. 2007, č. 1, [cit 12. 11. 2013]
- dostupnost: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=34587](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34587)
- [3] Rašovský, P. *Kontrola ztrátového faktoru u cívek a vinutí v technice Micalastic® TPK 193/0*. Drásov 126: Siemens Electric Machines s.r.o, 2012
- dostupnost: firemní materiál firmy Siemens Electric Machines s.r.o
- [4] Jiráček, J. *Materiály a technická dokumentace: materiály v elektrotechnice* [elektronický text]. Vysoké učení technické v Brně, FEKT, neznámé datum vydání
- dostupnost: e – learing
- [5] Mentlík, V. *Dielektrické prvky a systémy*. Nakladatelství BEN, Praha 2006
- dostupnost: Moravská zemská knihovna Brno
- [6] Rašovský, P. *Měření částečných výbojů TPK 216/0*. Drásov 126: Siemens Electric Machines s.r.o, 2012.
- dostupnost: firemní materiál firmy Siemens Electric Machines s.r.o
- [7] Erenstein, G., W. a kol. *Polymerní a kompozitní materiály* Praha, SCIENTIA, spol. s.r.o., 2009
- dostupnost: Moravská zemská knihovna Brno
- [8] Isovolta: *Elektroisolierstoffe, katalog výrobků*, 1995
- dostupnost: firemní materiál firmy Siemens Electric Machines s.r.o
- [9] Isoma: *Kompozity pro elektrickou a tepelnou izolaci*. Izoma. Praha
- dostupnost: [www.isoma.cz](http://www.isoma.cz)
- [10] Vonroll: *Insulation systems for HV rotation machines*. Scribd, 2009
- dostupnost: <http://www.scribd.com/doc/16698271/Insulation-Systems-for-HV-Motors>
- [11] Košťál, J. *Elektrické motory (9. část)*: Širůček, E, *www.odbornecasopisy.cz: Elektro*. Časopis pro elektrotechniku [web], roč. 2013, č. 10, [cit 9. 11. 2013]
- dostupnost: <http://www.odbornecasopisy.cz/obsah-casopisu/50529.html>
- [12] Večeřa, V. *Vakuově tlaková impregnace vinutí pryskyřicí TH155BEP a vytvrzení v sušící peci TN30028/4*. Drásov 126: Siemens Electric Machines s.r.o, 2012.
- dostupnost: firemní materiál firmy Siemens Electric Machines s.r.o
- [13] ČSN EN 60085 ed.2: *Elektrické izolace – Tepelné hodnocení a značení*, 2008
- dostupnost: <http://shop.normy.biz/detail/81628#nahled>
- [14] Korber, S. a kol. *OMICRON Academy, Hochpräzises Mess- und Analysesystem für Verlustfaktor und Kapazität*, 2012
- dostupnost: firemní materiál firmy Siemens Electric Machines s.r.o



- 
- [15] ČSN EN 50209: *Zkoušení izolace tyčí a cívek vysokonapěťových strojů*, 1998  
- **dostupnost: firemní materiál firmy Siemens Electric Machines s.r.o**
- [16] CLC/TS 60034-18-42: *Kvalifikační a přijímací zkoušky elektrických izolačních systémů typu II odolných částečným výbojům u točivých strojů napájených z měničů napětí*, 2008  
- **dostupnost: firemní materiál firmy Siemens Electric Machines s.r.o**
- [17] SN 536770: *Corona Shielding Conductive and Semiconductive Sheel Materials*; Technical Delivery Conductains, 2007  
- **dostupnost: firemní materiál firmy Siemens Electric Machines s.r.o**

## PŘÍLOHY

### příloha 1



Graf 1. Závislost měrného plošného odporu polovodivé pásky na napětí

Tabulka 5. Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzorek 217.22 u prvního svitku

V1 217.22 První svitek vzorku	Měřicí bod	Napětí / V	1000	2000	3000	4000	5000	6000
	1	<i>Proud / <math>\mu A</math></i>	2,43	31,2	263	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA
	2	<i>Proud / <math>\mu A</math></i>	2,11	27,6	218	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA
		<i>Průměrný proud / <math>\mu A</math></i>	2,27	29,4	240,5	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA
		<i>R95 / <math>\Omega</math></i>	4,41E+08	6,80E+07	1,25E+07	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA
		<i>Rp / <math>\Omega</math></i>	4,19E+09	6,46E+08	1,19E+08	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA

Tabulka 6. Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzorek 217.22 u druhého svitku

V2 217.22 Druhý svitek vzorku	Měřicí bod	Napětí / V	1000	2000	3000	4000	5000	6000
	1	<i>Proud / <math>\mu A</math></i>	3,43	48,8	456	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA
	2	<i>Proud / <math>\mu A</math></i>	3,31	36,2	297	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA
		<i>Průměrný proud / <math>\mu A</math></i>	3,37	42,5	376,5	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA
		<i>R95 / <math>\Omega</math></i>	2,97E+08	4,71E+07	7,97E+06	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA
		<i>Rp / <math>\Omega</math></i>	2,82E+09	4,47E+08	7,57E+07	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA

Tabulka 7. Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzorek Akasic 4b u prvního svitku

V3 Akasic 4b První svitek vzorku	Měřicí bod	Napětí / V	1000	2000	3000	4000	5000	6000
	1	<i>Proud / <math>\mu A</math></i>	0,035	0,381	2,33	10,69	41	127
	2	<i>Proud / <math>\mu A</math></i>	0,031	0,336	1,97	8,49	34	107
		<i>Průměrný proud / <math>\mu A</math></i>	0,033	0,3585	2,15	9,59	37,5	117
		<i>R95 / <math>\Omega</math></i>	3,03E+10	5,58E+09	1,40E+09	4,17E+08	1,33E+08	5,13E+07
		<i>Rp / <math>\Omega</math></i>	2,88E+11	5,30E+10	1,33E+10	3,96E+09	1,27E+09	4,87E+08

Tabulka 8. Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzorek Akasic 4b u druhého svitku

V4 Akasic 4b Druhý svitek vzorku	Měřicí bod	Napětí / V	1000	2000	3000	4000	5000	6000
	1	<i>Proud / <math>\mu A</math></i>	0,022	0,261	1,384	6,1	23,4	80
	2	<i>Proud / <math>\mu A</math></i>	0,022	0,24	1,346	5,52	20,7	70,5
		<i>Průměrný proud / <math>\mu A</math></i>	0,022	0,2505	1,365	5,81	22,05	75,25
		<i>R95 / <math>\Omega</math></i>	4,55E+10	7,98E+09	2,20E+09	6,88E+08	2,27E+08	7,97E+07
		<i>Rp / <math>\Omega</math></i>	4,32E+11	7,58E+10	2,09E+10	6,54E+09	2,15E+09	7,57E+08

Tabulka 9. Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzorek 217.03 u prvního svitku

V5 217.03 První svitek vzorku	Měřicí bod	Napětí / V	1000	2000	3000	4000	5000	6000
	1	<i>Proud / <math>\mu A</math></i>	1,46	13,54	84	390	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA
	2	<i>Proud / <math>\mu A</math></i>	0,873	8,32	46,3	227	612	I > 0.6 mA
		<i>Průměrný proud / <math>\mu A</math></i>	1,1665	10,93	65,15	308,5	612	I > 0.6 mA
		<i>R95 / <math>\Omega</math></i>	8,57E+08	1,83E+08	4,60E+07	1,30E+07	8,17E+06	I > 0.6 mA
		<i>Rp / <math>\Omega</math></i>	8,14E+09	1,74E+09	4,37E+08	1,23E+08	7,76E+07	I > 0.6 mA

Tabulka 10. Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzorek 217.03 u druhého svitku

V6 217.03 Druhý svitek vzorku	Měřicí bod	Napětí / V	1000	2000	3000	4000	5000	6000
	1	<i>Proud / <math>\mu A</math></i>	1,025	9,73	61,1	291	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA
	2	<i>Proud / <math>\mu A</math></i>	2,06	18,31	121	530	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA
		<i>Průměrný proud / <math>\mu A</math></i>	1,5425	14,02	91,05	410,5	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA
		<i>R95 / <math>\Omega</math></i>	6,48E+08	1,43E+08	3,29E+07	9,74E+06	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA
		<i>Rp / <math>\Omega</math></i>	6,16E+09	1,36E+09	3,13E+08	9,26E+07	I > 0.6 mA	I > 0.6 mA

Tabulka 11. Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzorek 217.21 u prvního svitku

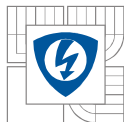
V7 217.21 První svitek vzorku	Měřicí bod	Napětí / V	1000	2000	3000	4000	5000	6000
	1	<i>Proud / <math>\mu A</math></i>	0,478	3,45	14,94	57,4	180	384
	2	<i>Proud / <math>\mu A</math></i>	0,661	5,3	24,1	105,5	328	730
		<i>Průměrný proud / <math>\mu A</math></i>	0,5695	4,375	19,52	81,45	254	557
		<i>R95 / <math>\Omega</math></i>	1,76E+09	4,57E+08	1,54E+08	4,91E+07	1,97E+07	1,08E+07
		<i>Rp / <math>\Omega</math></i>	1,67E+10	4,34E+09	1,46E+09	4,67E+08	1,87E+08	1,02E+08

Tabulka 12. Naměřené a vypočítané hodnoty pro vzorek 217.21 u druhého svitku

V8 217.21 Druhý svitek vzorku	Měřicí bod	Napětí / V	1000	2000	3000	4000	5000	6000
	1	<i>Proud / <math>\mu A</math></i>	0,506	3,46	15,54	51,1	167	388
	2	<i>Proud / <math>\mu A</math></i>	0,574	4,66	20	79,2	262	471
		<i>Průměrný proud / <math>\mu A</math></i>	0,54	4,06	17,77	65,15	214,5	429,5
		<i>R95 / <math>\Omega</math></i>	1,85E+09	4,93E+08	1,69E+08	6,14E+07	2,33E+07	1,40E+07
		<i>Rp / <math>\Omega</math></i>	1,76E+10	4,68E+09	1,60E+09	5,83E+08	2,21E+08	1,33E+08



Obrázek 5. Svitky připravené pro měření



**příloha 2**

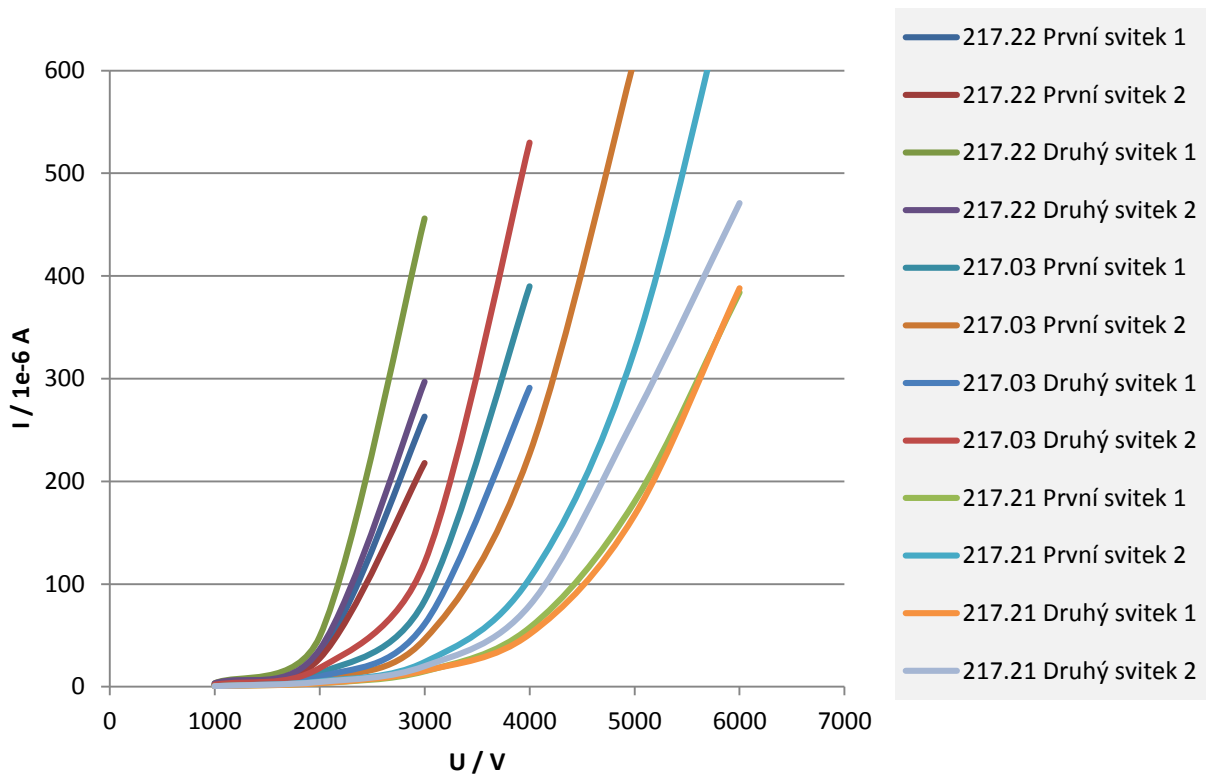
<b>V1</b>		<b>Měřicí bod</b>	<b>Napětí / V</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>3000</b>	<b>4000</b>	<b>5000</b>	<b>6000</b>
217.22	První svitek	1	Proud / $\mu\text{A}$	2,43	31,2	263	$I > 0.6\text{mA}$	$I > 0.6\text{mA}$	$I > 0.6\text{mA}$
217.22	První svitek	2	Proud / $\mu\text{A}$	2,110	27,600	218,000	$I > 0.6\text{mA}$	$I > 0.6\text{mA}$	$I > 0.6\text{mA}$
<b>V2</b>		<b>Měřicí bod</b>	<b>Napětí / V</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>3000</b>	<b>4000</b>	<b>5000</b>	<b>6000</b>
217.22	Druhý svitek	1	Proud / $\mu\text{A}$	3,43	48,8	456	$I > 0.6\text{mA}$	$I > 0.6\text{mA}$	$I > 0.6\text{mA}$
217.22	Druhý svitek	2	Proud / $\mu\text{A}$	3,31	36,2	297	$I > 0.6\text{mA}$	$I > 0.6\text{mA}$	$I > 0.6\text{mA}$
<b>V1, V2</b>			Průměrný proud / $\mu\text{A}$	2,820	35,950	308,500	-----	-----	-----

<b>V3</b>		<b>Měřicí bod</b>	<b>Napětí / V</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>3000</b>	<b>4000</b>	<b>5000</b>	<b>6000</b>
Akasic 4b	První svitek	1	Proud / $\mu\text{A}$	0,035	0,381	2,33	10,69	41	127
Akasic 4b	První svitek	2	Proud / $\mu\text{A}$	0,031	0,336	1,97	8,49	34	107
<b>V4</b>		<b>Měřicí bod</b>	<b>Napětí / V</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>3000</b>	<b>4000</b>	<b>5000</b>	<b>6000</b>
Akasic 4b	Druhý svitek	1	Strom / $\mu\text{A}$	0,022	0,261	1,384	6,1	23,4	80
Akasic 4b	Druhý svitek	2	Strom / $\mu\text{A}$	0,022	0,24	1,346	5,52	20,7	70,5
<b>V3, V4</b>			Průměrný proud / $\mu\text{A}$	0,028	0,305	1,758	7,700	29,775	96,125

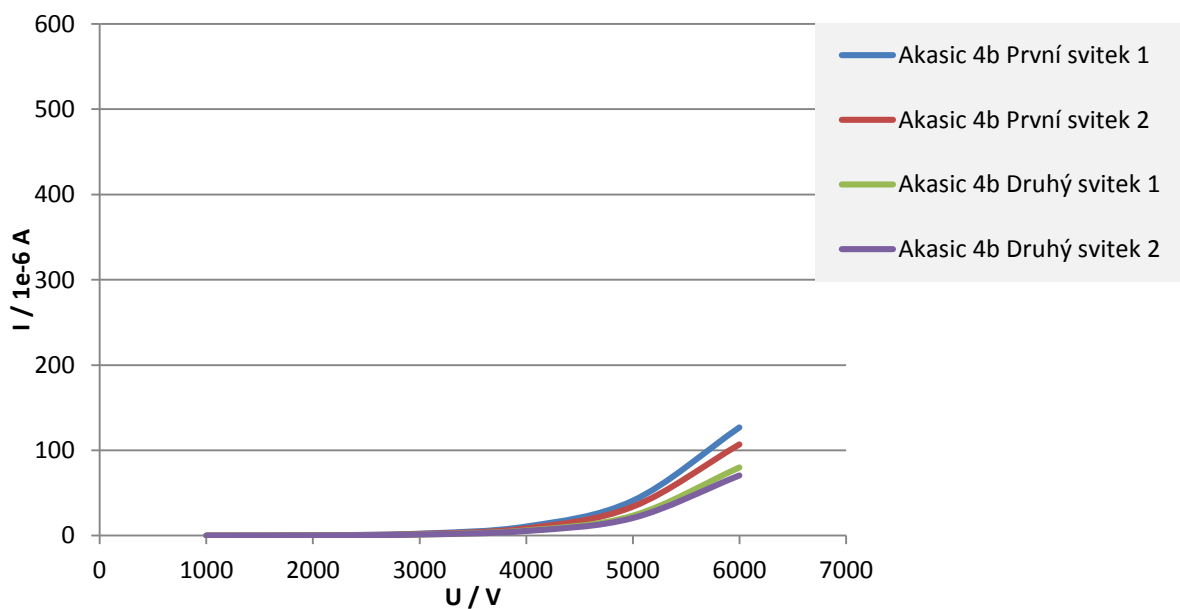
<b>V5</b>		<b>Měřicí bod</b>	<b>Napětí / V</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>3000</b>	<b>4000</b>	<b>5000</b>	<b>6000</b>
217.03	První svitek	1	Proud / $\mu\text{A}$	1,46	13,54	84	390	$I > 0.6\text{mA}$	$I > 0.6\text{mA}$
217.03	První svitek	2	Proud / $\mu\text{A}$	0,873	8,32	46,3	227	612	$I > 0.6\text{mA}$
<b>V6</b>		<b>Měřicí bod</b>	<b>Napětí / V</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>3000</b>	<b>4000</b>	<b>5000</b>	<b>6000</b>
217.03	Druhý svitek	1	Proud / $\mu\text{A}$	1,025	9,73	61,1	291	$I > 0.6\text{mA}$	$I > 0.6\text{mA}$
217.03	Druhý svitek	2	Proud / $\mu\text{A}$	2,06	18,31	121	530	$I > 0.6\text{mA}$	$I > 0.6\text{mA}$
<b>V5, V6</b>			Průměrný proud / $\mu\text{A}$	1,355	12,475	78,100	359,500	612,000	-----

<b>V7</b>		<b>Měřicí bod</b>	<b>Napětí / V</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>3000</b>	<b>4000</b>	<b>5000</b>	<b>6000</b>
217.21	První svitek	1	Proud / $\mu\text{A}$	0,478	3,45	14,94	57,4	180	384
217.21	První svitek	2	Proud / $\mu\text{A}$	0,661	5,3	24,1	105,5	328	730
<b>V8</b>		<b>Měřicí bod</b>	<b>Napětí / V</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>3000</b>	<b>4000</b>	<b>5000</b>	<b>6000</b>
217.21	Druhý svitek	1	Proud / $\mu\text{A}$	0,506	3,46	15,54	51,1	167	388
217.21	Druhý svitek	2	Proud / $\mu\text{A}$	0,574	4,66	20	79,2	262	471
<b>V7, V8</b>			Průměrný proud / $\mu\text{A}$	0,555	4,218	18,645	73,300	234,250	493,250

Tabulka 13. Naměřené a dopočítané hodnoty pro  $I$ - $U$  křivky

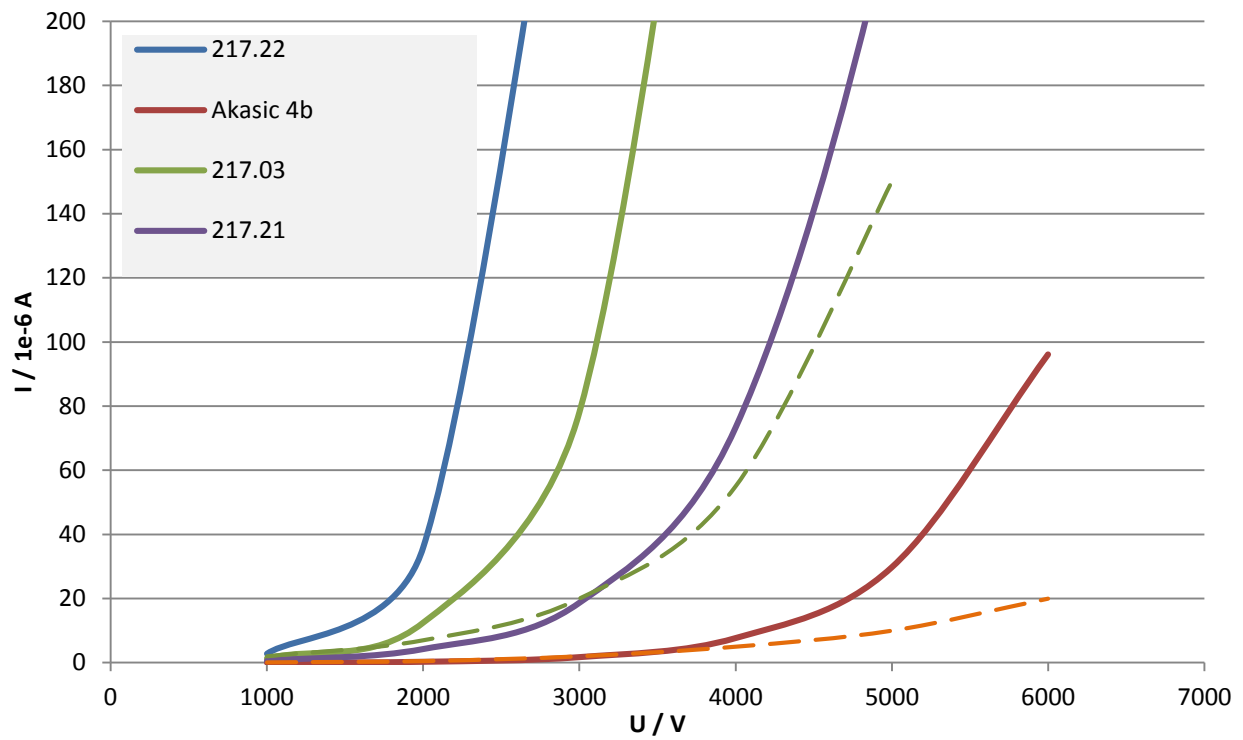


Graf 2. I-U Křivky pro jednotlivé měřící body na svítcích



Graf 3. Křivky pro jednotlivé měřící body na svítcích vzorku Akasic 4b





Graf 4. I-U Křivky z průměrných hodnot proudů na všech svítcích

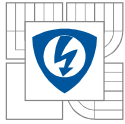
### příloha 3

Tabulka 14. Tabulka naměřených hodnot ztrátového činitele u cívky číslo 1

Před stárnutím Impulsním napětím						
Horní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	$U_{refRMS}$ (V)	$I_{testRMS}$ (A)	TanDelta	Cx (F)
15.10.2013	11:10:10	49,998	3 601,16	0,00138589	0,00744759	1,22E-09
15.10.2013	11:10:47	50,0125	7 197,57	0,00277013	0,00775484	1,22E-09
15.10.2013	11:11:07	50,0223	10 863,60	0,00418324	0,00807660	1,23E-09
15.10.2013	11:11:32	50,0231	14 419,40	0,00555484	0,00853637	1,23E-09
15.10.2013	11:12:26	50,0195	18 168,90	0,00700072	0,00888631	1,23E-09
15.10.2013	11:13:00	50,0185	21 610,80	0,00832896	0,00920074	1,23E-09
Před stárnutím Impulsním napětím						
Spodní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	$U_{refRMS}$ (V)	$I_{testRMS}$ (A)	TanDelta	Cx (F)
15.10.2013	11:16:47	50,0113	331,031	0,000124766	0,00681321	1,20E-09
15.10.2013	11:17:20	50,0043	3 606,25	0,00136049	0,00743637	1,20E-09
15.10.2013	11:18:04	50,0037	7 204,14	0,00271779	0,00779860	1,20E-09
15.10.2013	11:18:39	50,0035	10 804,20	0,0040748	0,00804312	1,20E-09
15.10.2013	11:18:55	50,0175	14 433,60	0,00544583	0,00824042	1,20E-09
15.10.2013	11:19:23	50,0033	18 167,70	0,00685229	0,00846417	1,20E-09
15.10.2013	11:19:52	49,9999	21 718,50	0,00818992	0,00865864	1,20E-09
Po stárnutí (100 h, Impulsní napětí)						
Horní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	$U_{refRMS}$ (V)	$I_{testRMS}$ (A)	TanDelta	Cx (F)
22.10.2013	11:39:46	50,0055	3634,8	0,00109296	0,00541417	4,79E-05
22.10.2013	11:40:00	50,0182	7233,5	0,00218003	0,00553631	4,80E-05
22.10.2013	11:40:14	50,0073	10837,2	0,00326815	0,00562611	4,80E-05
22.10.2013	11:40:31	50,0032	14355,4	0,00433821	0,00575187	4,80E-05
22.10.2013	11:40:43	49,9983	17993,1	0,00543488	0,00581407	4,80E-05
22.10.2013	11:40:53	50,0007	21637,9	0,00651626	0,00593245	4,80E-05
Po stárnutí (100 h, Impulsní napětí)						
Spodní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	$U_{refRMS}$ (V)	$I_{testRMS}$ (A)	TanDelta	Cx (F)
22.10.2013	11:46:37	50,0100	3613,12	0,00107767	0,00564425	4,75E-05
22.10.2013	11:46:52	50,0180	7217,23	0,00215685	0,00582669	4,75E-06
22.10.2013	11:47:04	50,0207	10796,3	0,0032296	0,0058585	4,75E-05
22.10.2013	11:47:19	50,0138	14407	0,00429834	0,00589352	4,75E-05
22.10.2013	11:47:36	50,0159	18031,5	0,00538779	0,00596154	4,75E-05
22.10.2013	11:47:45	50,0150	21608,1	0,00645522	0,00601335	4,76E-05

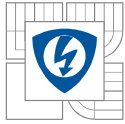
Tabulka 15. Tabulka naměřených hodnot ztrátového činitele u cívky číslo 2

Před stárnutím Impulsním napětím						
Horní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	$U_{refRMS}$ (V)	$I_{testRMS}$ (A)	TanDelta	Cx (F)
15.10.2013	14:06:43	50,0049	329,163	0,000124719	0,00724118	1,21E-09
15.10.2013	14:07:34	50,0090	3 611,82	0,00137139	0,00783656	1,21E-09
15.10.2013	14:07:54	50,0141	7 199,99	0,00273228	0,00812173	1,21E-09
15.10.2013	14:08:15	50,0212	10 861,90	0,00412695	0,00854235	1,21E-09
15.10.2013	14:08:36	50,0153	14 473	0,00550726	0,00921231	1,21E-09
15.10.2013	14:09:05	49,9930	18 020,30	0,0068617	0,00964021	1,21E-09
15.10.2013	14:09:30	49,9994	21 637,40	0,00824752	0,00996958	1,21E-09
Před stárnutím Impulsním napětím						
Spodní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	$U_{refRMS}$ (V)	$I_{testRMS}$ (A)	TanDelta	Cx (F)
15.10.2013	14:00:02	49,9909	3 599,75	0,00134953	0,00863131	1,19E-09
15.10.2013	14:00:39	49,9945	7 216,43	0,00270753	0,00879338	1,19E-09
15.10.2013	14:01:02	50,0051	10 857,80	0,00407531	0,0089082	1,19E-09
15.10.2013	14:01:33	50,0064	14 479,40	0,00543437	0,00918752	1,19E-09
15.10.2013	14:01:48	50,0048	18 019,20	0,0067653	0,00949372	1,19E-09
15.10.2013	14:02:18	50,0126	21 637,10	0,00812575	0,00993671	1,20E-09
Po stárnutí (100 h, Impulsní napětí)						
Horní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	$U_{refRMS}$ (V)	$I_{testRMS}$ (A)	TanDelta	Cx (F)
22.10.2013	6:48:21	49,9950	3598,37	0,00107134	0,00564415	4,74E-05
22.10.2013	6:48:33	49,9865	7196,23	0,00214066	0,00581157	4,74E-05
22.10.2013	6:48:43	49,9828	10808,3	0,00321819	0,00591435	4,74E-05
22.10.2013	6:49:10	49,9839	14399	0,00428552	0,00618053	4,74E-05
22.10.2013	6:49:13	49,9866	18019,2	0,0053665	0,00661265	4,74E-05
22.10.2013	6:49:31	49,9938	21631,1	0,00645623	0,00700791	4,75E-05
Po stárnutí (100 h, Impulsní napětí)						
Spodní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	$U_{refRMS}$ (V)	$I_{testRMS}$ (A)	TanDelta	Cx (F)
22.10.2013	6:51:17	49,9909	3596,3	0,00105734	0,00568001	4,68E-05
22.10.2013	6:52:17	49,9964	7181,71	0,00211111	0,00585958	4,68E-05
22.10.2013	6:52:30	49,9944	10838,3	0,00318833	0,00595794	4,68E-05
22.10.2013	6:52:47	49,9964	14466	0,00425025	0,00600121	4,68E-05
22.10.2013	6:53:10	49,9919	18055,5	0,00530685	0,00603572	4,68E-05
22.10.2013	6:53:18	50,0011	21639,3	0,0063642	0,00608657	4,68E-05



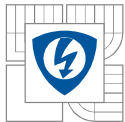
Tabulka 16. Tabulka naměřených hodnot ztrátového činitele u cívky číslo 3

Před stárnutím Impulsním napětím						
Horní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	UrefRMS (V)	ItestRMS (A)	TanDelta	Cx (F)
16.8.2013	14:01:47	50,0089	0,0455837	2,34E-08	-2,62637	5,56E-12
16.8.2013	14:05:30	50,0099	3 613,70	0,00129427	0,00771479	1,14E-09
16.8.2013	14:06:41	50,0181	7 206,29	0,00258298	0,00789225	1,14E-09
16.8.2013	14:07:55	50,0166	10 853,20	0,00388763	0,00806696	1,14E-09
16.8.2013	14:08:26	49,9910	14 421,00	0,0051651	0,00826191	1,14E-09
16.8.2013	14:10:30	49,9744	18 164,80	0,00650233	0,00847954	1,14E-09
16.8.2013	14:11:57	49,9580	21 618,10	0,00773825	0,00883279	1,14E-09
Před stárnutím Impulsním napětím						
Spodní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	UrefRMS (V)	ItestRMS (A)	TanDelta	Cx (F)
16.8.2013	14:22:02	49,7887	0,04	2,34E-08	-2,71889800	3,10E-12
16.8.2013	14:22:39	49,9800	3 617,22	0,00129427	0,00768689	1,20E-09
16.8.2013	14:23:51	49,9900	7 200,47	0,00258298	0,00767685	1,20E-09
16.8.2013	14:24:42	49,9800	10 841,00	0,00388763	0,00774996	1,20E-09
16.8.2013	14:25:05	49,9900	14 409,60	0,0051651	0,00798891	1,20E-09
16.8.2013	14:26:03	49,9900	18 089,20	0,00650233	0,00819898	1,20E-09
16.8.2013	14:26:52	50,0100	21 637,90	0,00773825	0,00853866	1,20E-09
Po stárnutí (100 h, Impulsní napětí)						
Horní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	UrefRMS (V)	ItestRMS (A)	TanDelta	Cx (F)
22.10.2013	9:34:39	50,0104	3653,24	0,00106006	0,00544009	4,62E-05
22.10.2013	9:34:56	50,0112	7234,34	0,00210287	0,00544968	4,62E-05
22.10.2013	9:35:16	50,0161	10839	0,00314766	0,00565562	4,62E-05
22.10.2013	9:35:35	50,0156	14433,9	0,00419129	0,00573681	4,62E-05
22.10.2013	9:35:57	50,0027	18084,8	0,00524227	0,00579187	4,63E-05
22.10.2013	9:36:14	49,9893	21606,4	0,00628718	0,00593196	4,63E-05
Po stárnutí (100 h, Impulsní napětí)						
Spodní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	UrefRMS (V)	ItestRMS (A)	TanDelta	Cx (F)
22.10.2013	9:28:59	49,9938	3617,31	0,00106744	0,00560857	4,70E-05
22.10.2013	9:29:12	49,9937	7245,93	0,00214079	0,00565797	4,70E-05
22.10.2013	9:29:25	49,9985	10895,7	0,0032183	0,00576272	4,70E-07
22.10.2013	9:29:33	50,0068	14464,6	0,00427515	0,00575744	4,70E-05
22.10.2013	9:29:44	50,0195	18030,8	0,00533349	0,00582699	4,70E-07
22.10.2013	9:30:50	50,0152	21612,3	0,00638999	0,00589643	4,70E-05



Tabulka 17. Tabulka naměřených hodnot ztrátového činitele u cívky číslo 4

Před stárnutím Impulsním napětím						
Horní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	UrefRMS (V)	ItestRMS (A)	TanDelta	Cx (F)
14.8.2013	14:59:31	49,9855	3 628,97	0,0013857	0,00765158	1,22E-09
14.8.2013	15:00:16	49,9882	7 202,24	0,00275053	0,00795466	1,22E-09
14.8.2013	15:00:53	49,9818	10 846,10	0,00413924	0,00828482	1,22E-09
14.8.2013	15:01:33	49,9919	14 430,40	0,00550999	0,00865433	1,22E-09
14.8.2013	15:01:53	49,9893	18 029,50	0,00688269	0,00900455	1,22E-09
14.8.2013	15:02:31	49,9936	21 613,80	0,00825173	0,00937321	1,22E-09
Před stárnutím Impulsním napětím						
Spodní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	UrefRMS (V)	ItestRMS (A)	TanDelta	Cx (F)
14.8.2013	15:39:54	50,0085	3 613,65	0,00135435	0,00728322	1,19E-09
14.8.2013	15:40:16	49,9988	7 208,76	0,00270238	0,00762573	1,19E-09
14.8.2013	15:40:49	49,9832	10 818,50	0,00405413	0,00778837	1,19E-09
14.8.2013	15:41:06	49,9689	14 400,60	0,00539568	0,00794264	1,19E-09
14.8.2013	15:41:38	49,9727	18 011,60	0,00675089	0,00813999	1,19E-09
14.8.2013	15:42:16	49,9734	21 637,90	0,00811067	0,00844740	1,19E-09
Po stárnutí (100 h, Impulsní napětí)						
Horní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	UrefRMS (V)	ItestRMS (A)	TanDelta	Cx (F)
22.10.2013	10:08:59	49,9621	3626,78	0,001082	0,00558657	4,75E-05
22.10.2013	10:09:08	49,9737	7191,72	0,00214744	0,00554617	4,75E-05
22.10.2013	10:09:25	49,9738	10878,7	0,00324444	0,00554134	4,75E-05
22.10.2013	10:09:43	49,9659	14382,1	0,00429348	0,00563723	4,75E-05
22.10.2013	10:09:58	49,9706	18027,2	0,00537675	0,00565856	4,75E-05
22.10.2013	10:10:10	49,9685	21608,6	0,00646788	0,00577312	4,75E-05
Po stárnutí (100 h, Impulsní napětí)						
Spodní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	UrefRMS (V)	ItestRMS (A)	TanDelta	Cx (F)
22.10.2013	11:01:39	49,9974	3662,36	0,00107632	0,00534097	4,67E-05
22.10.2013	11:01:52	49,9960	7198,81	0,00211795	0,00547093	4,68E-05
22.10.2013	11:02:14	49,9956	10880,6	0,00319424	0,00554612	4,68E-05
22.10.2013	11:02:33	49,9838	14394,1	0,00422864	0,00556910	4,68E-05
22.10.2013	11:02:45	49,9889	18043,3	0,00529476	0,00561293	4,68E-05
22.10.2013	11:03:02	49,9811	21608,5	0,00635101	0,00571463	4,68E-05



Tabulka 18 Tabulka naměřených hodnot ztrátového činitele u cívky číslo 1

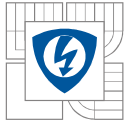
Po stárnutí (1000 h, Sinusové napětí), Horní vrstva v drážce						
Horní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	Uref RMS (V)	ItestRMS (A)	TanDelta	Cx (F)
27.3.2014	07:02:13.3	49,97	3669,35	0,00137677	0,00514794	1,20E-09
27.3.2014	07:02:33.6	49,97	7245,42	0,00272163	0,00525582	1,20E-09
27.3.2014	07:02:49.4	49,96	10873,8	0,00408245	0,00535133	1,20E-09
27.3.2014	07:03:6.2	49,97	14402,7	0,00540386	0,00540955	1,20E-09
27.3.2014	07:03:22.9	49,97	18037,6	0,00678826	0,00562341	1,20E-09
27.3.2014	07:03:49.1	49,96	21585,6	0,00810739	0,00573265	1,20E-09

Po stárnutí (1000 h, Sinusové napětí), Spodní vrstva v drážce						
Spodní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	Uref RMS (V)	ItestRMS (A)	TanDelta	Cx (F)
27.3.2014	07:10:2.5	49,99	3633,85	0,00135028	0,00532172	1,18E-09
28.3.2014	07:10:22.8	49,98	7228,79	0,00269223	0,00539606	1,18E-09
29.3.2014	07:10:42.8	49,98	10854,3	0,00403732	0,00549531	1,18E-09
30.3.2014	07:10:59.9	49,98	14393,6	0,0053494	0,0055562	1,18E-09
31.3.2014	07:11:15.6	50,00	17987,5	0,00670187	0,00559349	1,18E-09
1.4.2014	07:12:42.6	50,02	21700,8	0,00807728	0,00563838	1,18E-09

Tabulka 19 Tabulka naměřených hodnot ztrátového činitele u cívky číslo 2

Po stárnutí (1000 h, Sinusové napětí), Horní vrstva v drážce						
Horní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	Uref RMS (V)	ItestRMS (A)	TanDelta	Cx (F)
27.3.2014	09:50:49.6	50,0163	3630,59	0,00134814	0,00557236	1,18E-04
27.3.2014	09:51:1.9	50,0242	7234,48	0,00268271	0,00560947	1,18E-04
27.3.2014	09:51:12.8	50,0238	10793,5	0,00401088	0,00572413	1,18E-04
27.3.2014	09:51:28.9	50,0174	14423,6	0,00535461	0,00585858	1,18E-04
27.3.2014	09:51:54.8	50,007	18046,3	0,00670035	0,00614707	1,18E-04
27.3.2014	09:52:21.2	50,0133	21659,1	0,00805315	0,00685413	1,18E-04

Po stárnutí (1000 h, Sinusové napětí), Spodní vrstva v drážce						
Spodní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	Uref RMS (V)	ItestRMS (A)	TanDelta	Cx (F)
27.3.2014	09:53:42.5	50,0153	3621,26	0,00132741	0,00563263	1,17E-04
27.3.2014	09:54:11.7	50,0087	7241,07	0,00265453	0,00572624	1,17E-04
27.3.2014	09:54:37.9	50,0047	10813,2	0,00395988	0,00581019	1,17E-04
27.3.2014	09:54:50.2	50,0131	14424,7	0,00528127	0,00587989	1,17E-04
27.3.2014	09:55:7.2	50,0173	18055,8	0,00660912	0,00590525	1,17E-04
27.3.2014	09:55:21.1	50,0205	21629,5	0,0079252	0,00604959	1,17E-05



Tabulka 20 Tabulka naměřených hodnot ztrátového činitele u cívky číslo 3

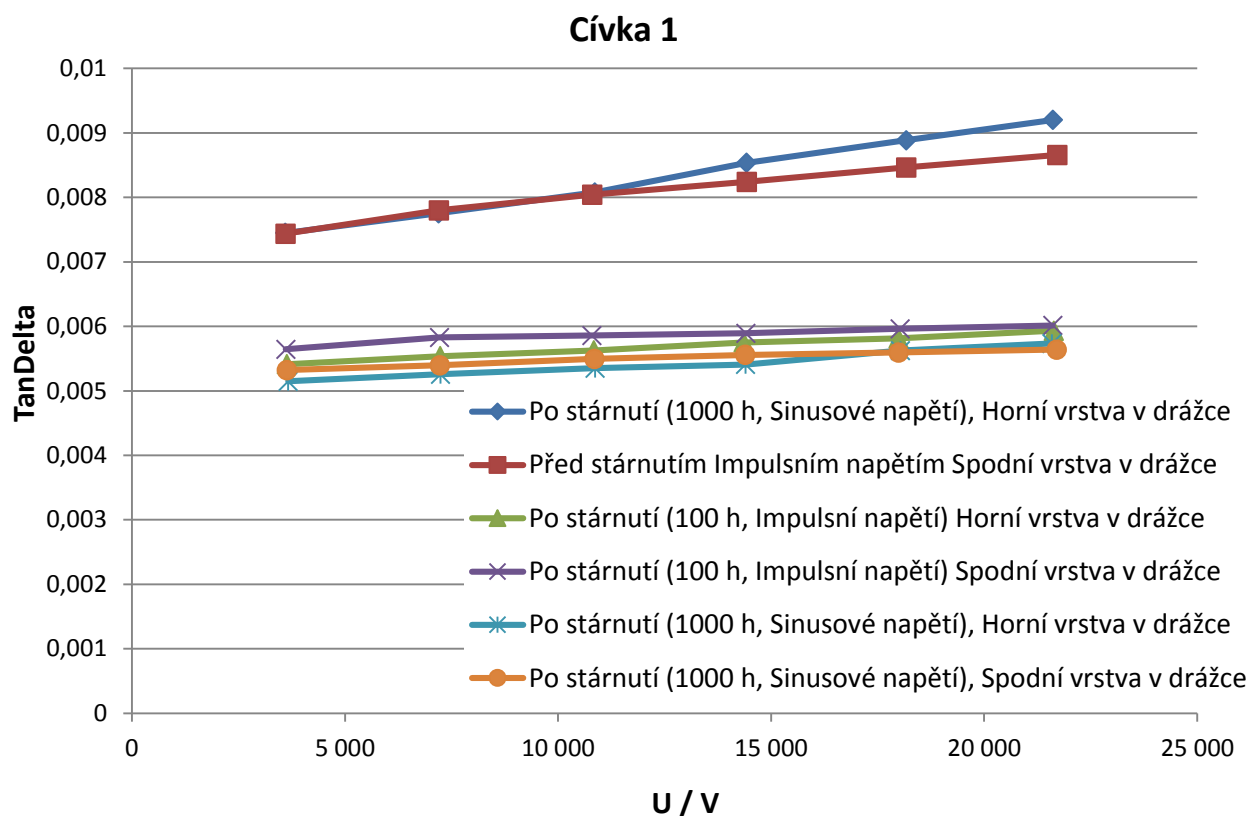
Po stárnutí (1000 h, Sinusové napětí), Horní vrstva v drážce						
Horní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	Uref RMS (V)	ItestRMS (A)	TanDelta	Cx (F)
27.3.2014	09:28:42.8	50,00	3623,74	0,0013094	0,00536935	1,15E-04
27.3.2014	09:28:57.4	49,99	7244,56	0,00262177	0,00548729	1,15E-04
27.3.2014	09:29:19.1	50,01	10885	0,00393571	0,00554664	1,15E-05
27.3.2014	09:29:32.1	50,01	14423,2	0,00521941	0,00558766	1,15E-05
27.3.2014	09:29:45.3	50,01	18127	0,0065606	0,0056857	1,15E-04
27.3.2014	09:30:3.1	50,02	21603	0,0078311	0,00578291	1,15E-04

Po stárnutí (1000 h, Sinusové napětí), Spodní vrstva v drážce						
Spodní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	Uref RMS (V)	ItestRMS (A)	TanDelta	Cx (F)
27.3.2014	09:32:14.7	50,02	3618,64	0,00133439	0,00539663	1,17E-04
27.3.2014	09:32:27.9	50,02	7223,92	0,00266035	0,00547963	1,17E-04
27.3.2014	09:32:38.1	50,02	10820,6	0,00398996	0,00561341	1,17E-04
27.3.2014	09:32:48.9	50,02	14412,7	0,0053103	0,00570215	1,17E-05
27.3.2014	09:32:59.0	50,02	18026,8	0,00664616	0,00578262	1,17E-04
27.3.2014	09:33:16.5	50,01	21689,2	0,00802128	0,00588458	1,17E-04

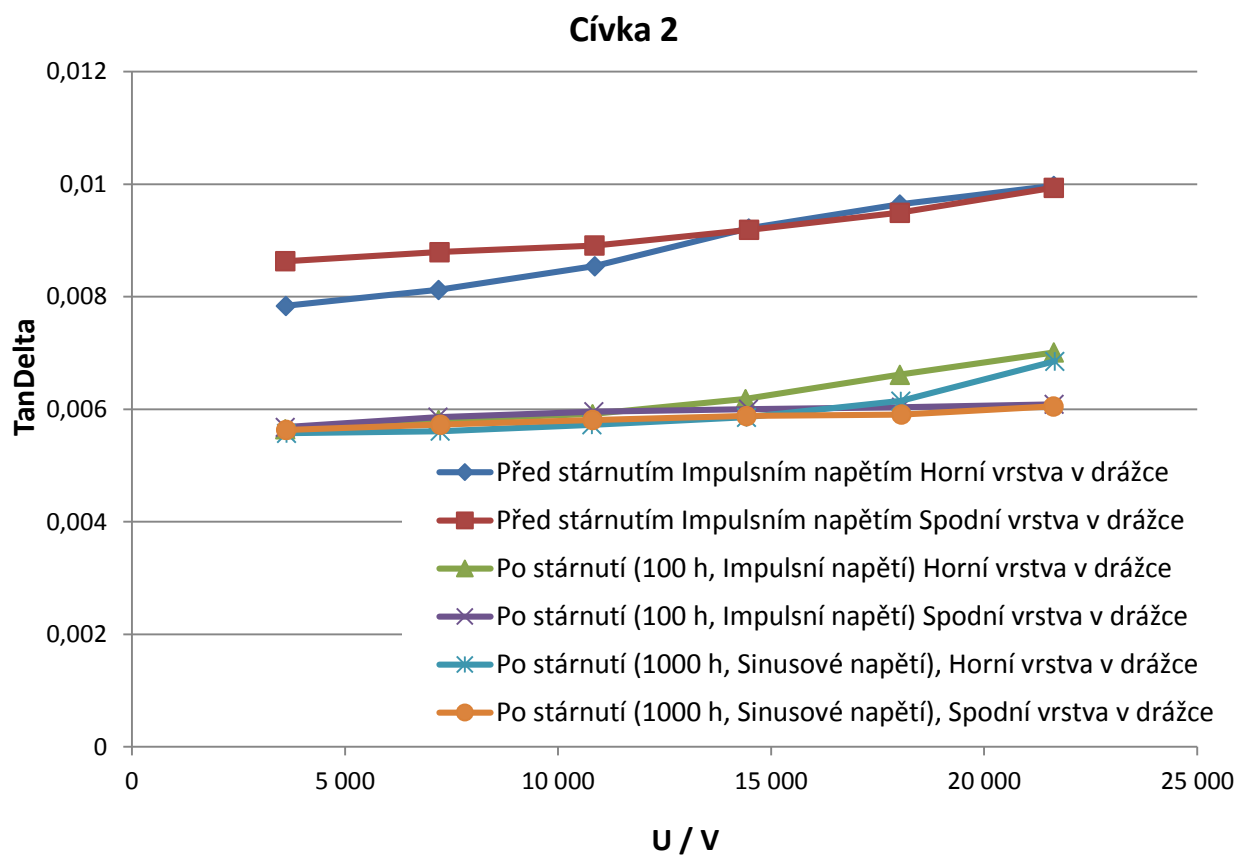
Tabulka 21 Tabulka naměřených hodnot ztrátového činitele u cívky číslo 4

Po stárnutí (1000 h, Sinusové napětí), Horní vrstva v drážce						
Horní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	Uref RMS (V)	ItestRMS (A)	TanDelta	Cx (F)
27.3.2014	09:09:27.3	49,98	3636,35	0,00135494	0,00518271	1,19E-04
27.3.2014	09:09:44.4	49,99	7227,75	0,0026932	0,0052925	1,19E-04
27.3.2014	09:09:56.3	49,98	10814,5	0,0040275	0,00536521	1,19E-04
27.3.2014	09:10:16.5	49,99	14411,8	0,00536819	0,00543732	1,19E-04
27.3.2014	09:10:37.4	49,99	18045,2	0,00672284	0,00553436	1,19E-04
27.3.2014	09:11:3.1	49,99	21658	0,0080631	0,00567794	1,19E-04

Po stárnutí (1000 h, Sinusové napětí), Spodní vrstva v drážce						
Spodní vrstva v drážce						
Datum	Čas	Frekvence (Hz)	Uref RMS (V)	ItestRMS (A)	TanDelta	Cx (F)
27.3.2014	09:13:19.5	49,98	3607,47	0,00132078	0,0052799	1,17E-04
27.3.2014	09:13:58.5	50,00	7207,1	0,00264173	0,00534783	1,17E-04
27.3.2014	09:14:10.8	50,00	10802,8	0,00395812	0,00537185	1,17E-04
27.3.2014	09:14:28.7	50,00	14406	0,00528037	0,00540625	1,17E-04
27.3.2014	09:14:56.4	49,98	17984,8	0,00659582	0,00546012	1,17E-04
27.3.2014	09:15:14.1	49,99	21583,4	0,00791658	0,00558296	1,17E-05

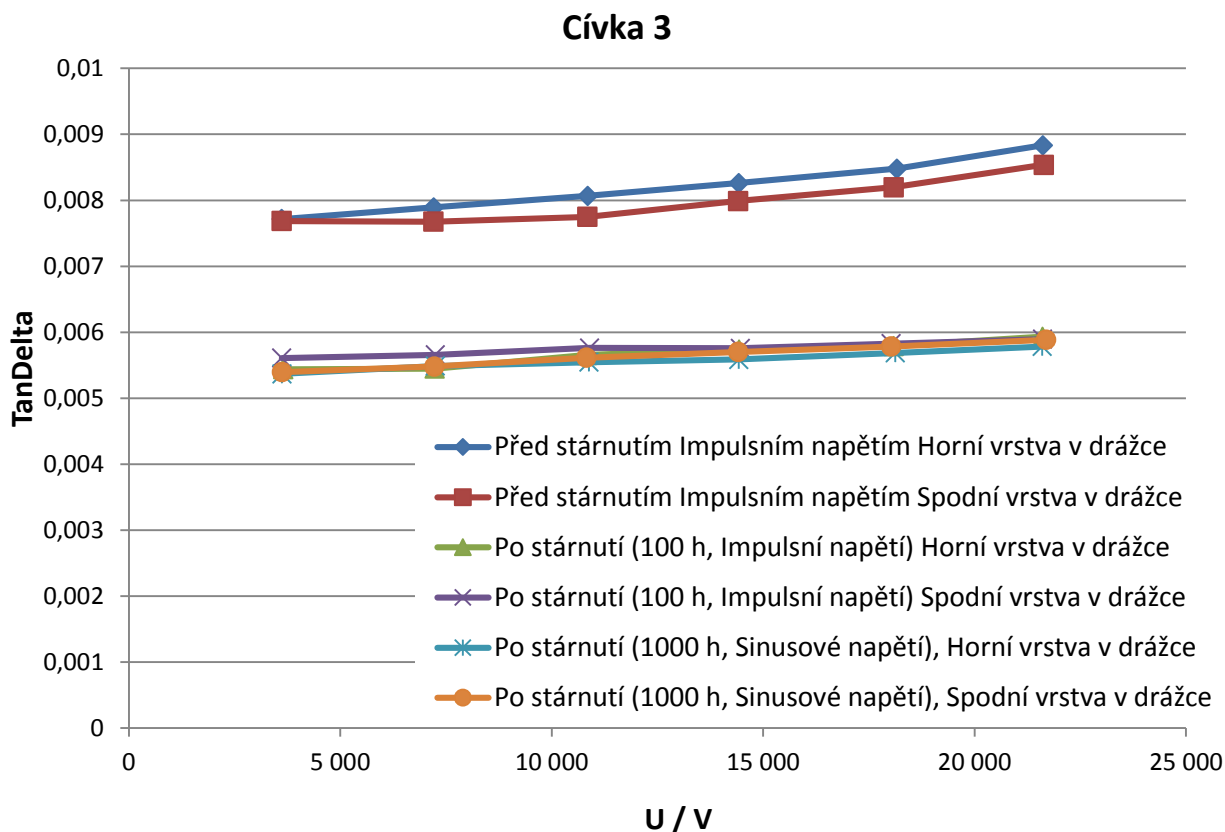


Graf 5 Průběh měření ztrátového činitele u cívky číslo 1

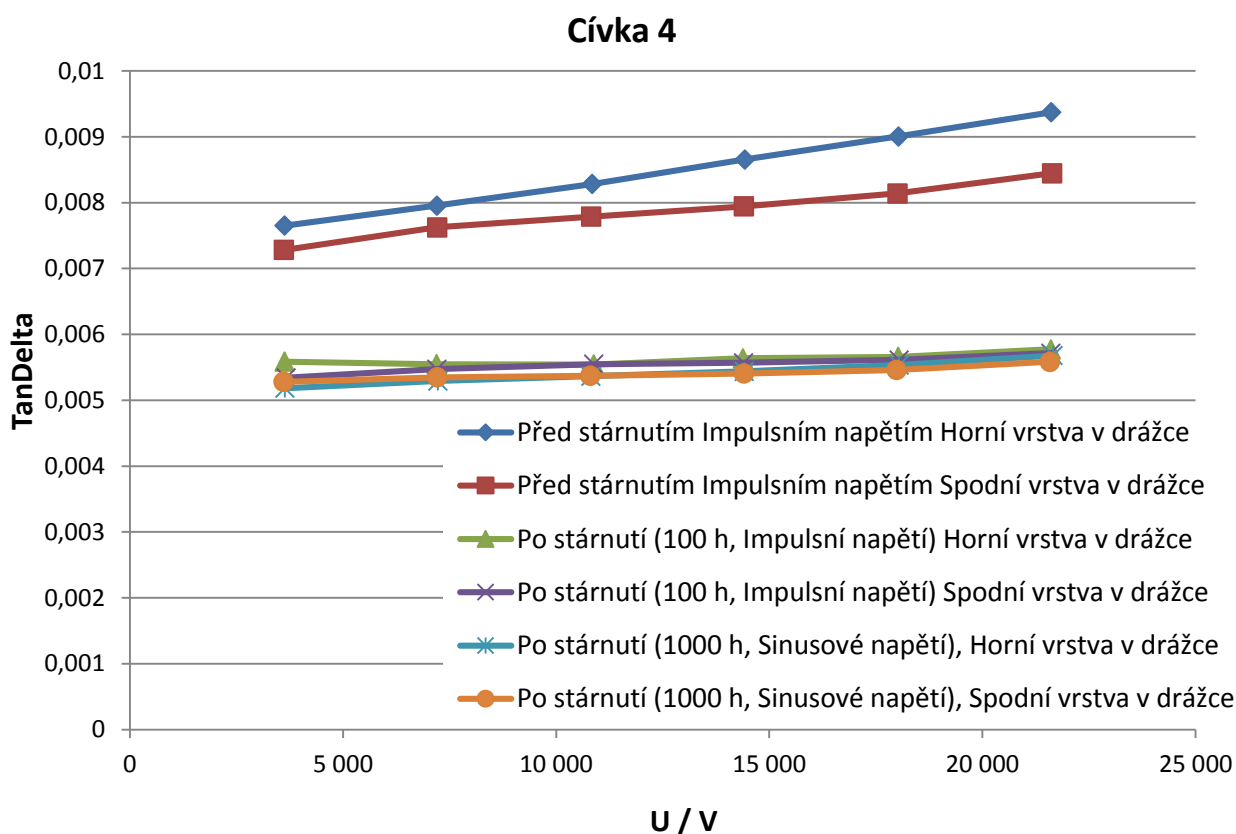


Graf 6 Průběh měření ztrátového činitele u cívky číslo 2



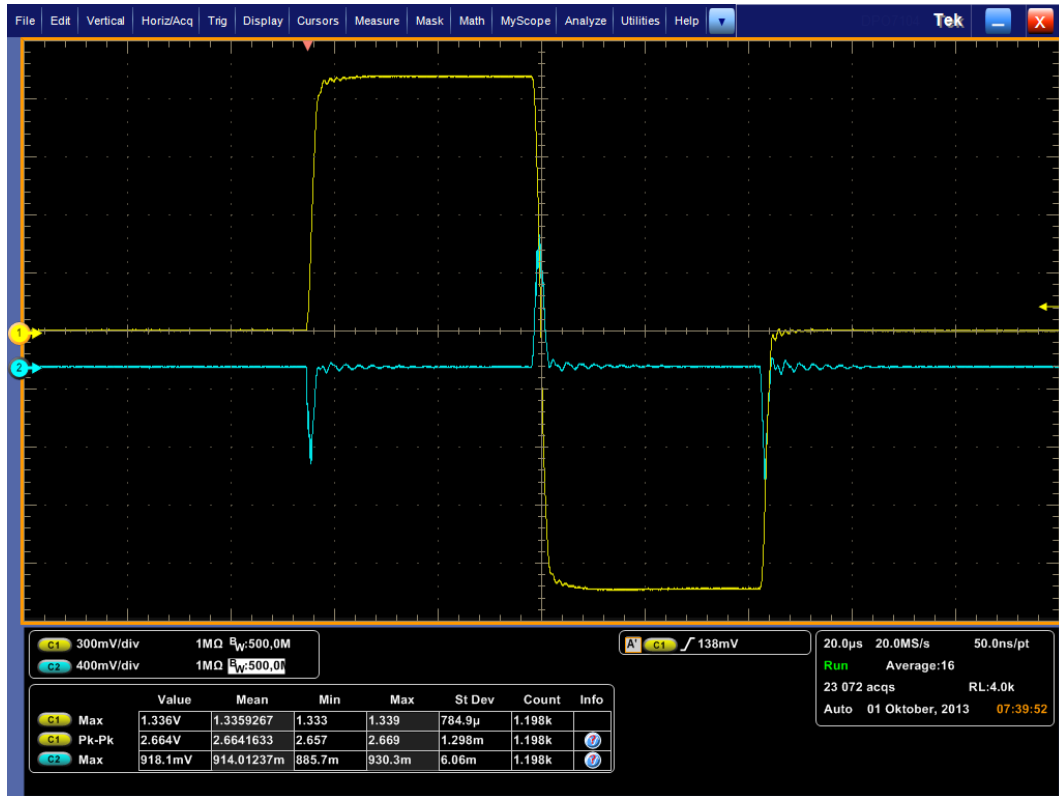


Graf 7 Průběh měření ztrátového činitele u cívky číslo 3

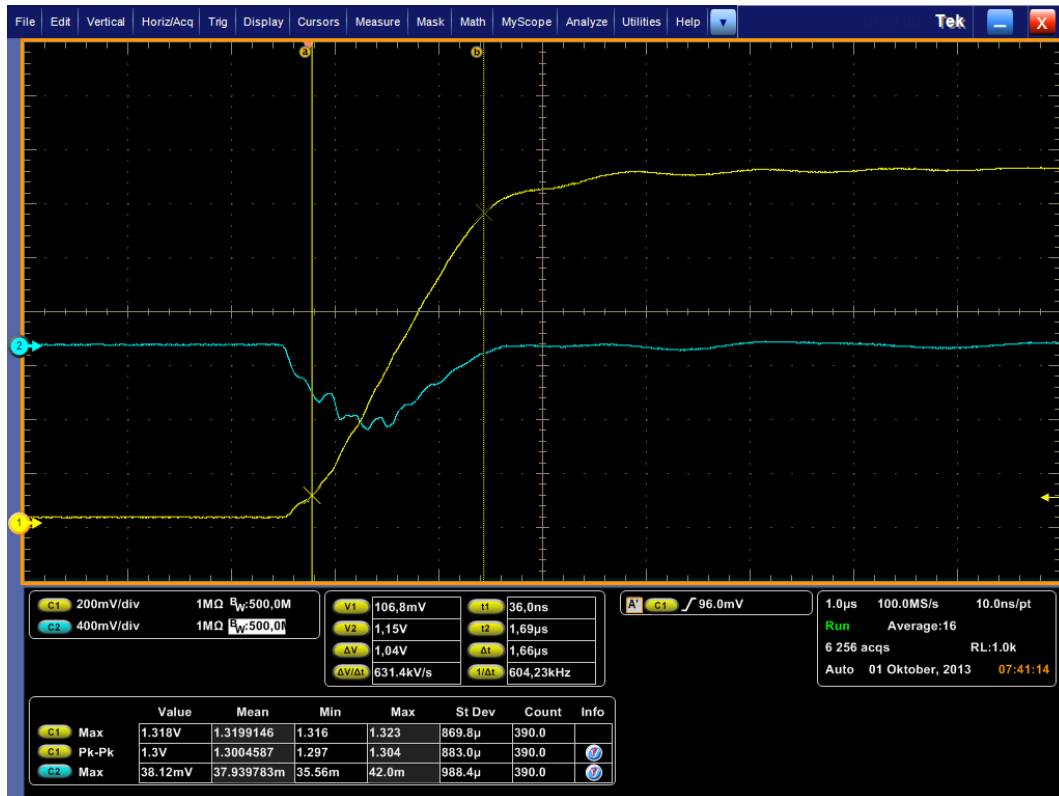


Graf 8 Průběh měření ztrátového činitele u cívky číslo 2

příloha 4

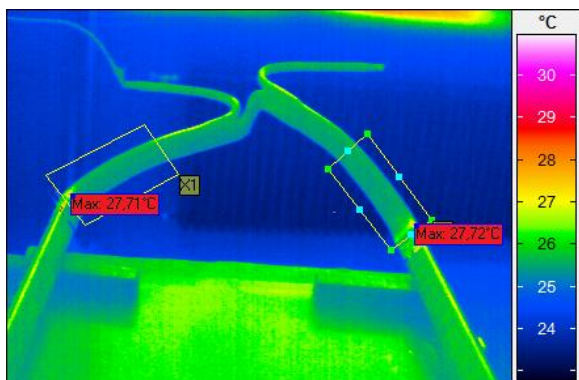


Obrázek 6. Průběh impulzního napětí při stárnutí izolace

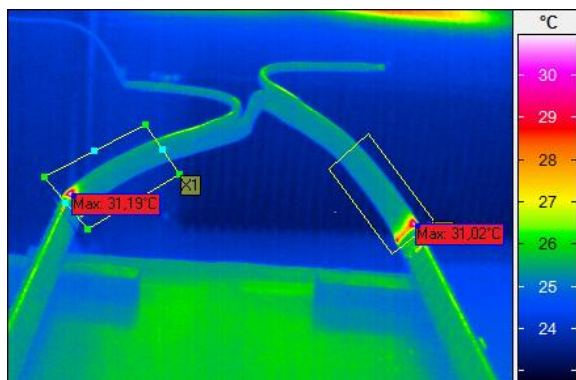


Obrázek 7. Detail pulzu průběhu při stárnutí impulzním napětím

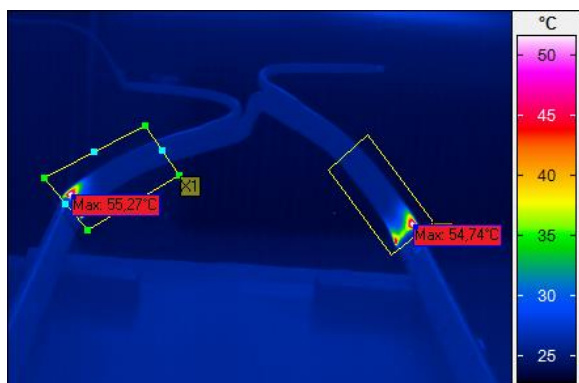
příloha 5



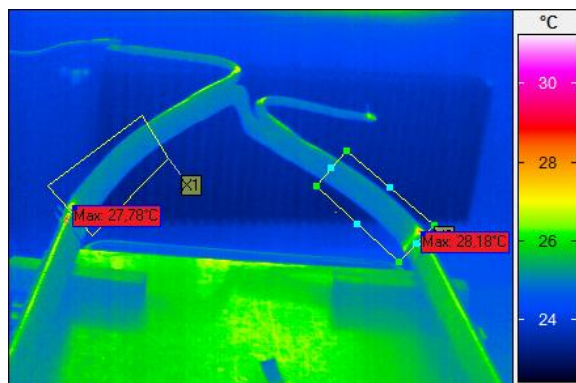
Obrázek 8 Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 10,4 kV, po čase 3 min u cívky 1



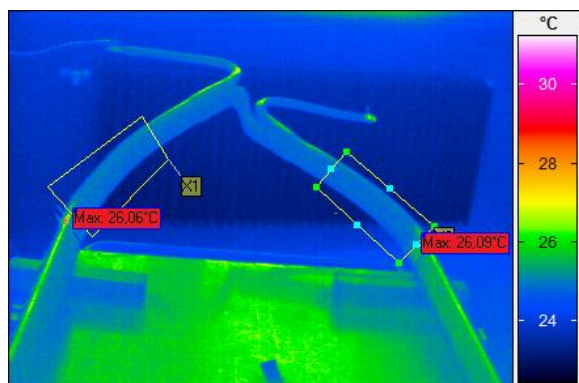
Obrázek 9 Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 18 kV, po čase 3 min u cívky 1



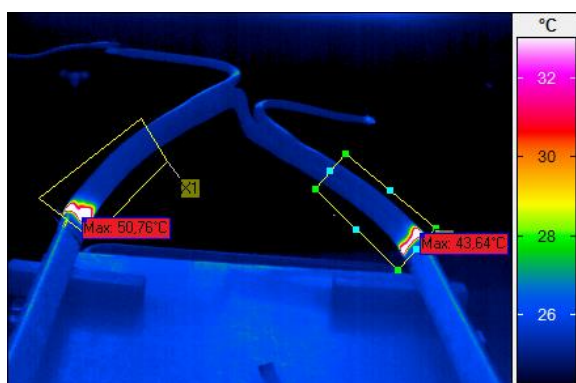
Obrázek 10 Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 37 kV, po čase 1 min u cívky 1



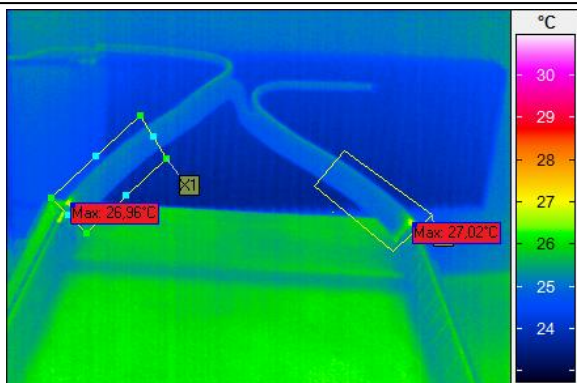
Obrázek 11 Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 10,4 kV, po čase 3 min u cívky 2



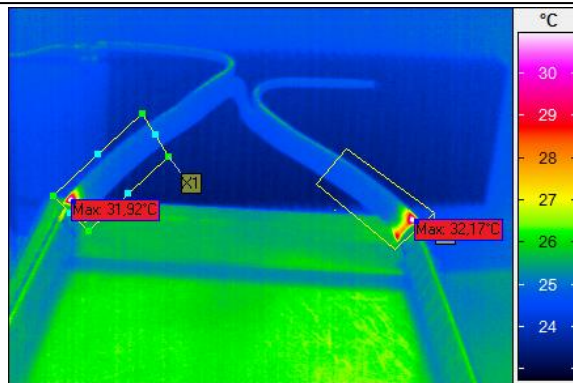
Obrázek 13 Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 18 kV, po čase 3 min u cívky 2



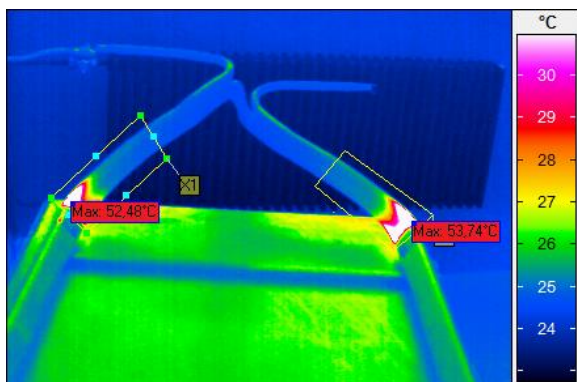
Obrázek 12 Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 37 kV, po čase 1 min u cívky 2



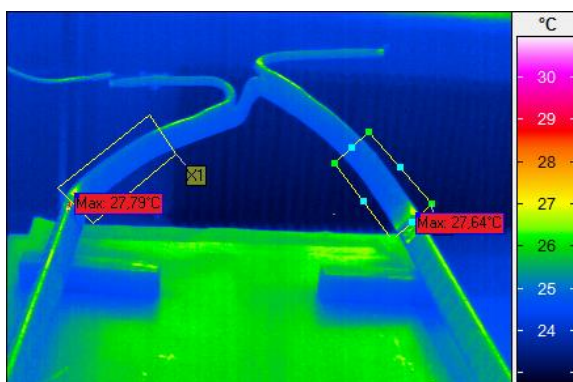
Obrázek 15 Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 10,4 kV, po čase 3 min u cívky 3



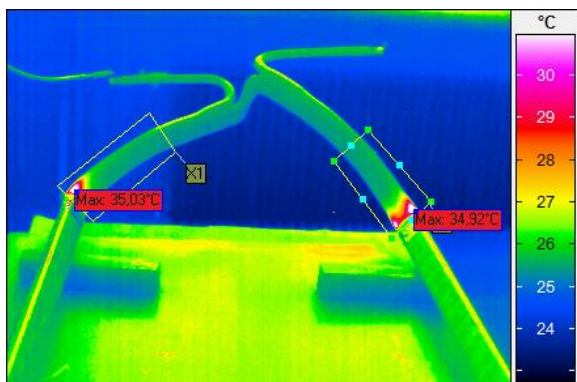
Obrázek 14 Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 18 kV, po čase 3 min u cívky 3



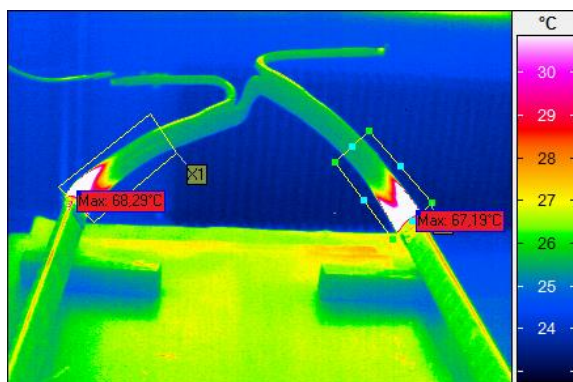
Obrázek 17 Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 37 kV, po čase 1 min u cívky 3



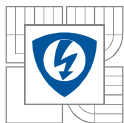
Obrázek 16 Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 10,4 kV, po čase 3 min u cívky 4



Obrázek 19 Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 18 kV, po čase 3 min u cívky 4



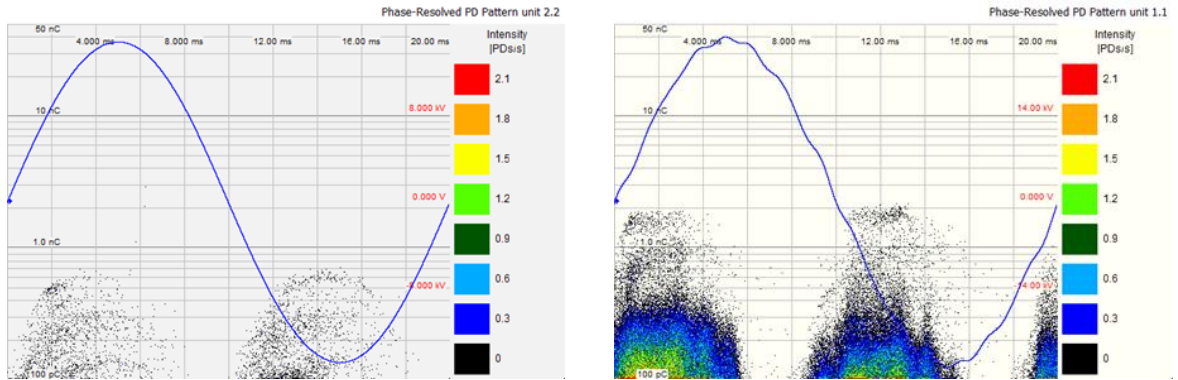
Obrázek 18 Měření oteplení polovodivé pásky při napětí 37 kV, po čase 1 min u cívky 4



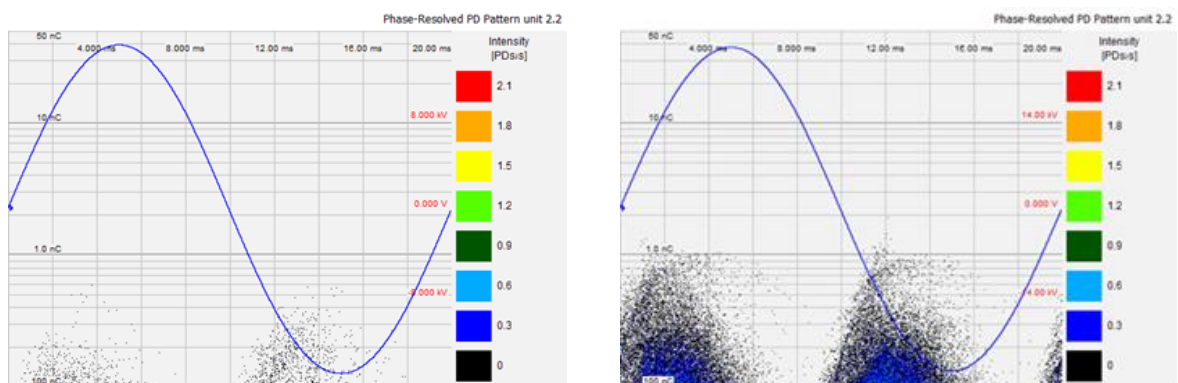
## příloha 6

Tabulka 22 Naměřené náboje částečných výbojů

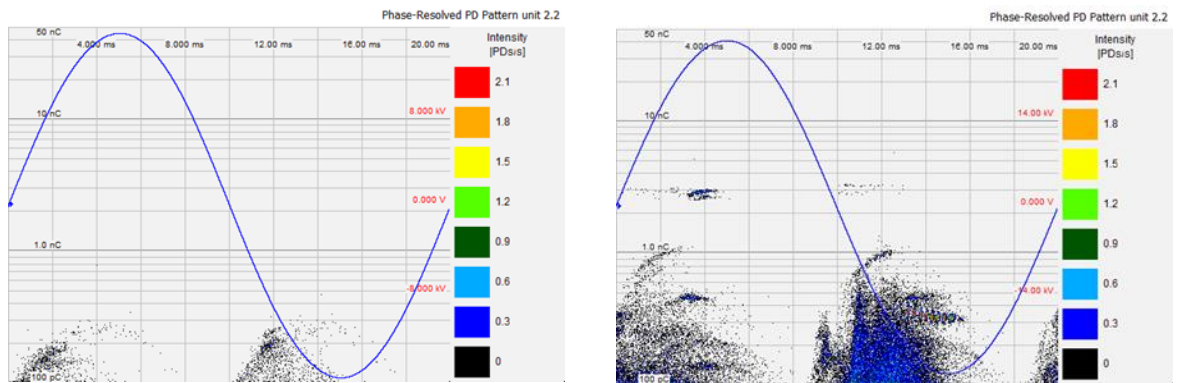
Cívka	1							
Vrstva v drážce statoru	Horní vrstva (L2, V1)				Spodní vrstva (L1, V1)			
Jednotka	Q (pC)	U <sub>1RMS</sub> (kV)	Q (pC)	U <sub>2RMS</sub> (kV)	Q (pC)	U <sub>1RMS</sub> (kV)	Q (pC)	U <sub>2RMS</sub> (kV)
Před stárnutím	572,6	10,4	2806,7	18,1	327,5	10,4	1514,2	18,1
Po stárnutí 100 h imp.	229,6	10,5	3503,7	18,1	217,1	10,5	766,1	18,1
Po stárnutí 1000 h sin.	232,6	10,6	6314,6	18,6	223,4	11	2460,5	18,6
Cívka	2							
Vrstva v drážce statoru	Horní vrstva (L2, V1)				Spodní vrstva (L1, V1)			
Jednotka	Q (pC)	U <sub>1RMS</sub> (kV)	Q (pC)	U <sub>2RMS</sub> (kV)	Q (pC)	U <sub>1RMS</sub> (kV)	Q (pC)	U <sub>2RMS</sub> (kV)
Před stárnutím	3136	10,3	3760,9	17,9	1121,2	10,5	3102,4	18,1
Po stárnutí 100 h imp.	98,9	10,5	4470,3	18	70,4	10,5	936,1	18,1
Po stárnutí 1000 h sin.	515,1	10,3	6028,6	18,2	212,8	10,7	826,4	18,2
Cívka	3							
Vrstva v drážce statoru	Horní vrstva (L3, V2)				Spodní vrstva (L1, V2)			
Jednotka	Q (pC)	U <sub>1RMS</sub> (kV)	Q (pC)	U <sub>2RMS</sub> (kV)	Q (pC)	U <sub>1RMS</sub> (kV)	Q (pC)	U <sub>2RMS</sub> (kV)
Před stárnutím	478,3	10,6	1439	18	159,4	10,5	871,6	18,1
Po stárnutí 100 h imp.	503,8	10,4	922,2	18,1	88,9	10,5	398	18
Po stárnutí 1000 h sin.	789,4	10,4	1987,1	18,3	851,3	10,3	2979,1	18
Cívka	4							
Vrstva v drážce statoru	Horní vrstva (L3, V3)				Spodní vrstva (L1, V3)			
Jednotka	Q (pC)	U <sub>1RMS</sub> (kV)	Q (pC)	U <sub>2RMS</sub> (kV)	Q (pC)	U <sub>1RMS</sub> (kV)	Q (pC)	U <sub>2RMS</sub> (kV)
Před stárnutím	1057,3	10,4	2505,1	17,9	769,5	10,4	1129,7	18
Po stárnutí 100 h imp.	267,2	10,5	813,7	18,1	317,2	10,5	734,7	18,2
Po stárnutí 1000 h sin.	1161,8	10,4	1744,9	17,8	1150,2	10,9	2571,6	18,4



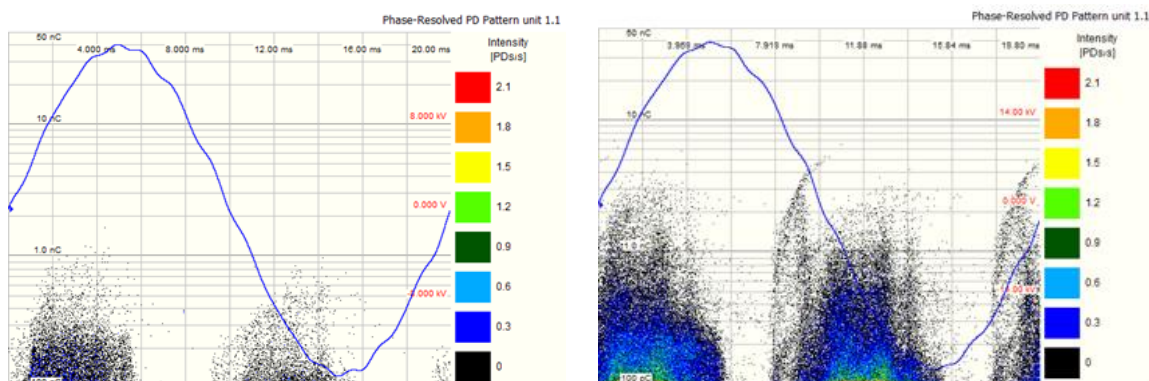
Obrázek 20 Měření částečných výbojů u cívky 1 ve spodní vrstvě v původním stavu (před stárnutím) vlevo 10,1 kV, vpravo 18,4 kV



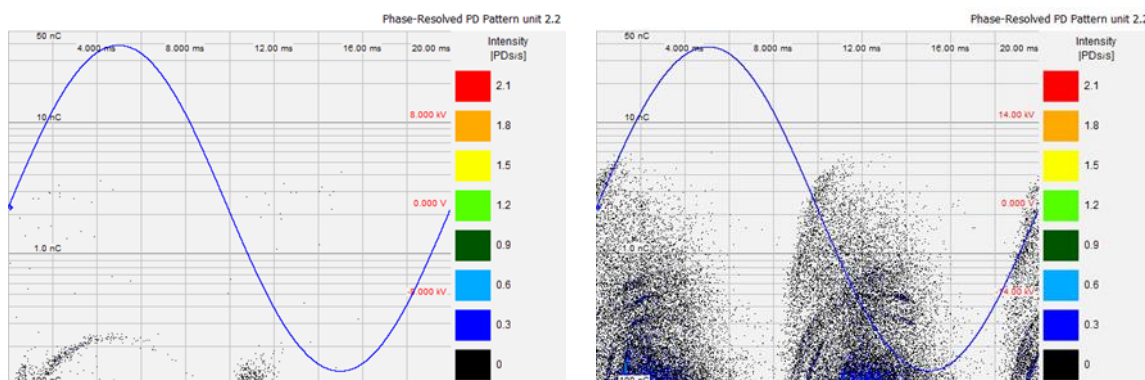
Obrázek 21 Měření částečných výbojů u cívky 1 ve spodní vrstvě po stárnutí impulsním napětím, vlevo 10,1 kV, vpravo 18,4 kV



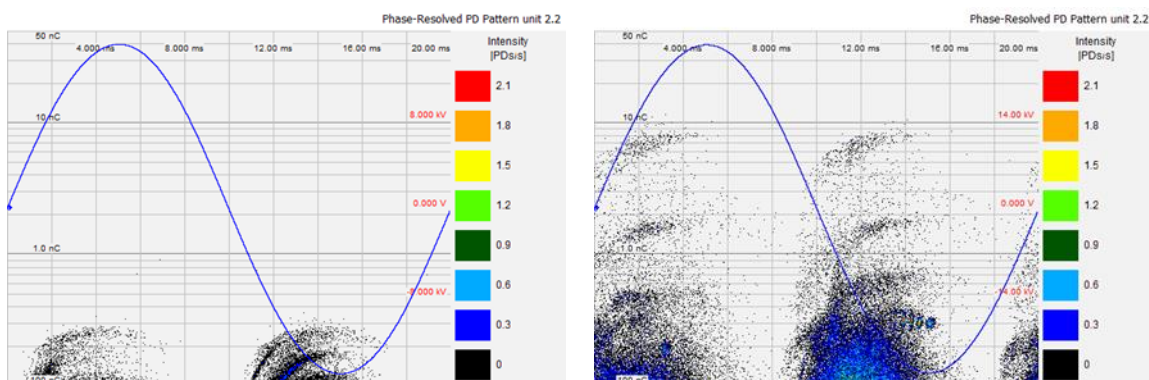
Obrázek 22 Měření částečných výbojů u cívky 1 ve spodní vrstvě po stárnutí sinusovým napětím, vlevo 10,1 kV, vpravo 18,4 kV



Obrázek 25 Měření částečných výbojů u cívky 1 v horní vrstvě v původním stavu (před stárnutím) vlevo 10,4 kV, vpravo 18,1 kV



Obrázek 24 Měření částečných výbojů u cívky 1 v horní vrstvě po stárnutí impulsním napětím, vlevo 10,5 kV, vpravo 18,1 kV



Obrázek 23 Měření částečných výbojů u cívky 1 v horní vrstvě po stárnutí sinusovým napětím, vlevo 11 kV, vpravo 18,6 kV