

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Technologické možnosti výztuh čel vinutí velkých točivých  
elektrických strojů**

**vedoucí práce: Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc  
autor: Bc. Julius Sokol**

**2013**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Julius SOKOL**  
Osobní číslo: **E11N0038P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Technologické možnosti výztuh čel vinutí velkých točivých elektrických strojů**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte aspekty výroby vinutí velkých točivých elektrických strojů s respektováním výztuh v jejich čelech
2. Provedte rozbor možností tvorby mezicívkových vložek čel statorových vinutí těchto strojů
3. Na základě uvedeného rozboru určete další možnosti přípravy vložek zejména s použitím různým způsobem proimpregnovaného materiálu
4. Určete vliv výroby vložek na jejich zejména mechanické vlastnosti i s ohledem na možnost následných oprav bez porušení tyčí
5. Stanovte diagnostický systém sledování vlastností mezicívkových vložek čel statorových vinutí

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, V.: Dielektrické prvky a systémy, BEN Praha 2006
2. Mentlík, V., et al: Diagnostika elektrických zařízení, BEN Praha 2008
3. Mentlík, V., et al: Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, BEN Praha 2011

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.**

Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce popisuje výrobu a montáž statorového vinutí velkých točivých elektrických strojů se zaměřením na mezicívkové vložky v jejich čelech. Jsou v ní popsány nové možnosti přípravy mezicívkových vložek s použitím různým způsobem proimpregnovaného materiálu. V praktické části je stanoven diagnostický systém, který má za úkol prověřit elektrické vlastnosti těchto nových způsobů. Dále je v praktické části provedena zkouška nasákavosti finetu.

## **Klíčová slova**

Synchronní generátor, tyčové vinutí, mezizávitové vložky, resin-rich, VPI, částečné výboje, ztrátový činitel, nasákavost finetu

## **Possibilities of clamp application to the large electric rotary machine end turns**

### **Abstract**

The master thesis describes production and assembly of a stator winding of the large electric rotary machines with focus to winding clamps in their end turns. It describes new possibilities of a preparation of the winding clamps with use of differently impregnated material. Diagnostic system is done in the practical part. It is focused to verification of electrical properties of winding braces. Testing of finet absorbing power is done in the practical part too.

### **Key words**

Synchronous generator, rod winding, winding clamps, resin-rich, VPI, partial discharges, dissipation factor, finet absorbing power

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 23.4.2013

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval všem, kteří mi pomáhali při vzniku této diplomové práce.

Zejména bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Václavu Mentlíkovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za odborné rady a pomoc při měření. Za profesionální rady a poskytnutí informací z praxe děkuji Ing. Petru Novákovi.

# Obsah

ÚVOD .....	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	11
<b>1 ELEKTRICKÉ TOČIVÉ STROJE .....</b>	<b>12</b>
<b>2 VÝROBA STATOROVÉHO VINUTÍ.....</b>	<b>13</b>
2.1 TYČOVÁ VINUTÍ.....	13
2.1.1 Roeblova tyč.....	14
2.2 IZOLOVÁNÍ VINUTÍ.....	15
2.2.1 Resin-rich.....	15
2.2.2 VPI.....	16
2.2.3 Porovnání Resin-rich a VPI.....	16
2.3 MONTÁŽ VINUTÍ .....	17
2.3.1 Zajištění tyčí v drážce .....	17
2.3.2 Montáž čel vinutí.....	18
<b>3 MEZICÍVKOVÉ VLOŽKY .....</b>	<b>20</b>
3.1 SKLOTEXTIT .....	20
3.2 EPOXIDOVÁ PRYSKYŘICE FOAM 128.....	21
3.3 3D SKLENĚNÁ TKANINA PARABEAM.....	22
3.4 TESTOVANÉ NOVÉ MOŽNOSTI TVORBY VLOŽEK .....	22
<b>4 DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM .....</b>	<b>25</b>
4.1 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE .....	25
4.1.1 Sledované veličiny.....	25
4.1.2 Globální galvanická metoda.....	25
4.2 ZTRÁTOVÝ ČINITEL.....	27
4.2.1 Měření ztrátového činitele .....	27
4.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	28
4.3.1 Částečné výboje .....	28
4.3.2 Ztrátový činitel.....	30
4.4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....	31
<b>5 ZKOUŠKA NASÁKAVOSTI FINETU .....</b>	<b>32</b>
5.1 VÝSLEDKY NASÁKAVOSTI .....	34
5.1.1 Neřaděný epoxid zcela zalitý.....	34
5.1.2 Nařaděný epoxid zalitý do výšky finetu .....	35
5.1.3 Nařaděný epoxid zcela zalitý.....	36
5.1.4 Srovnání celkové nasákavosti .....	36
5.2 ELEKTRICKÉ PARAMETRY .....	37
5.2.1 Vnitřní rezistivita .....	38
5.2.2 Polarizační index .....	39
5.2.3 Ztrátový činitel.....	39
5.3 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....	40
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>41</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>42</b>
<b>PŘÍLOHA A: NAMĚŘENÉ HODNOTY MEZICÍVKOVÝCH VLOŽEK .....</b>	<b>43</b>
<b>PŘÍLOHA B: FOTODOKUMENTACE MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ A ZTRÁTOVÉHO ČINITELE.....</b>	<b>47</b>



<b>PŘÍLOHA C: FOTODOKUMENTACE ZKOUŠKY NASÁKAVOSTI .....</b>	<b>49</b>
<b>PŘÍLOHA D: KATALOGOVÝ LIST POUŽITÉHO FINETU FINET PES2 .....</b>	<b>56</b>
<b>PŘÍLOHA E: NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY ZE ZPRÁVY Z MĚŘENÍ MATERIÁLŮ FINET .....</b>	<b>57</b>

## Úvod

Tato diplomová práce vznikla ve spolupráci se společností 1. SERVIS-ENERGO, s.r.o. zabývající se montáží, opravou a servisem v oblasti generátorů, která chtěla prověřit vlastnosti mezicívkových vložek připravených s použitím různým způsobem proimpregnovaného materiálu.

V teoretické části je popsána výroba a montáž statorového vinutí velkých točivých elektrických strojů se zaměřením na mezicívkové vložky v jejich čelech. Dále jsou v ní popsány nové možnosti přípravy mezicívkových vložek. V praktické části je stanoven diagnostický systém, který má za úkol prověřit elektrické vlastnosti těchto nových způsobů. Dále je v praktické části provedena zkouška nasákavosti finetu. Zkouška nasákavosti finetu měla za úkol zjistit, zda je vhodné při opravách vkládat mezi tyče vinutí sklotextitové vložky ovinuté suchým finetem a naimpregnovat jej nastříkáním až po založení, oproti starému způsobu kdy se vkládají sklotextitové vložky obalené již zcela prosyceným finetem.

## Seznam symbolů a zkratk

A	efektivní plocha měrné elektrody [ $\text{m}^2$ ]
$C_a$	testovaný vzorek
CC	spojovací stíněný kabel
CD	vazební zařízení
$C_k$	vazební kondenzátor
ELVA	technologie indukčního pájení
MI	detektor
OL	optický kabel
p	měrný tlak [MPa]
q	zdánlivý náboj impulzu částečných výbojů [pC]
$Q_{iec}$	kvantitativně největší opakovaně se vyskytující úroveň náboje výbojů [pC]
$\overline{Q_{iec}}$	střední hodnota $Q_{iec}$ [pC]
$p_{i1}$	jednominutový polarizační index [-]
$p_{i10}$	desetiminutový polarizační index [-]
$R_x$	vnitřní odpor [ $\Omega$ ]
s	směrodatná odchylka
SRS	boční vlnovec pro vyklínování (Side Ripple String)
$\text{tg } \delta$	ztrátový činitel [-]
$\overline{\text{tg } \delta}$	střední hodnota $\text{tg } \delta$ [-]
TRS	horní vlnovec pro vyklínování (Top Ripple String)
U	napájecí napětí [V]
$u_A$	standardní nejistota typu A
$U_i$	zapalovací napětí částečných výbojů [kV]
$\overline{U}_i$	střední hodnota $U_i$ [kV]
$U_e$	zhasací napětí částečných výbojů [kV]
$\overline{U}_e$	střední hodnota $U_e$ [kV]
v	variační koeficient [%]
VPI	vakuově tlaková impregnace (Vacuum Pressure Impregnation)
Z	filtr rušení
$Z_m$	snímací impedance
$\rho_v$	vnitřní rezistivita [ $\Omega \cdot \text{m}$ ]

## 1 Elektrické točivé stroje

Elektrické točivé stroje jsou používány buď jako motory, které přeměňují elektrickou energii v mechanickou anebo jako generátory, které přeměňují mechanickou energii v elektrickou. Elektrické točivé stroje můžeme rozdělit na stroje stejnosměrné, asynchronní stroje, synchronní stroje a speciální stroje. Bavíme-li se o velkých točivých strojích, máme většinou na mysli synchronní stroje, protože asynchronní a stejnosměrné stroje nedosahují takových výkonů jako stroje synchronní.

Synchronní stroj je nejdůležitějším elektrickým strojem pro výrobu elektrické energie. V tomto případě pracuje jako generátor, zpravidla třífázový a nazýváme jej alternátor. Synchronní alternátory patří mezi největší vyráběné elektrické stroje, jejichž výkony dosahují několika stovek MW, a to díky lepšímu využití aktivních materiálů a zlepšení chlazení. Synchronní stroj je tvořen statorem a rotorem. Konstrukce statoru (nepohyblivá část) je prakticky stejná jako u asynchronního stroje. Stator je tvořen kostrou a magnetickým obvodem z izolovaných plechů, v jehož drážkách je uloženo střídavé trojfázové vinutí. Rotor (pohyblivá část) je tvořen hřídelí s magnetickým obvodem, ve kterém je uloženo vinutí. Rotor se obvykle neskládá z plechů, protože se otáčí synchronně s točivým polem a nevznikají v něm ztráty v železe. Je tvořen z plně ušlechtilé ocele. Princip synchronního generátoru spočívá v tom, že nejprve nabudíme vinutí v rotoru stejnosměrným proudem. Otáčením rotoru dochází v cívkách statoru k indukovaní střídavého napětí, které je úměrné hodnotě magnetické indukce. Po připojení zátěže začne vinutím ve statoru procházet proud, který vytvoří magnetické pole. Generátor nazýváme synchronní, protože kruhové točivé pole statoru má stejnou rychlost otáčení jako rotor. Z hlediska konstrukce rotoru rozdělujeme synchronní alternátory na turboalternátory a hydroalternátory. Turboalternátory jsou stroje s dlouhou hřídelí a malým průměrem, což slouží k omezení vlivu odstředivých sil. Jsou to tzv. rychloběžné stroje (většinou dvoupólové) dosahující rychlosti otáčení 3000 ot./min. Rotor se nazývá hladký, protože je budící vinutí uloženo v drážkách rotoru z důvodu mechanické pevnosti při vysokých otáčkách. Jsou poháněny parními turbínami a jsou využívány v tepelných a jaderných elektrárnách. Hydroalternátory jsou naopak stroje malé délky a velkého průměru. Jsou vícepólové a pracují tedy s menšími otáčkami. Po obvodu rotoru jsou vyniklé póly, ve kterých je uloženo budící napětí. Jsou používány ve vodních elektrárnách a jsou poháněny vodními turbínami. [1, 2, 3, 4]

## 2 Výroba statorového vinutí

Statorové vinutí můžeme dělit podle způsobu ukládání vinutí do drážek a to na:

- prošívané (protahované) – vodiče se vkládají do uzavřených drážek v axiálním směru
- vsypávané – vodiče se vkládají do otevřené drážky v radiálním směru

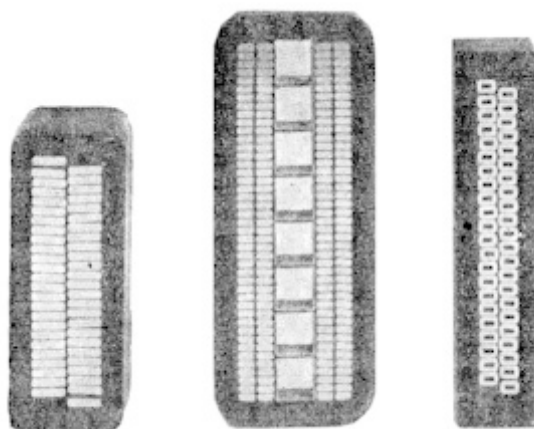
Dále podle provedení jednotlivých vodičů rozdělujeme statorové vinutí na:

- vinutí s vodiči kruhového průřezu, jehož cívky se vytvarují vložením nebo vtažením vodičů do drážky
- vinutí s hotovými cívkami z profilových vodičů, jehož cívky mají svůj konečný tvar již před vložením do drážek

V současné době se obvykle používají vsypávaná vinutí v polozavřených drážkách, s prošívaným vinutím se dnes prakticky neseťkáme. U točivých strojů velkých výkonů se používá tyčové vinutí, což je druh vsypávaného vinutí. Tyčové vinutí má dvě části: čela a drážky. Drážky jsou uloženy v magnetickém obvodu statoru. Čelo je část mimo magnetický obvod sloužící k propojení jednotlivých tyčí. [4, 5]

### 2.1 Tyčová vinutí

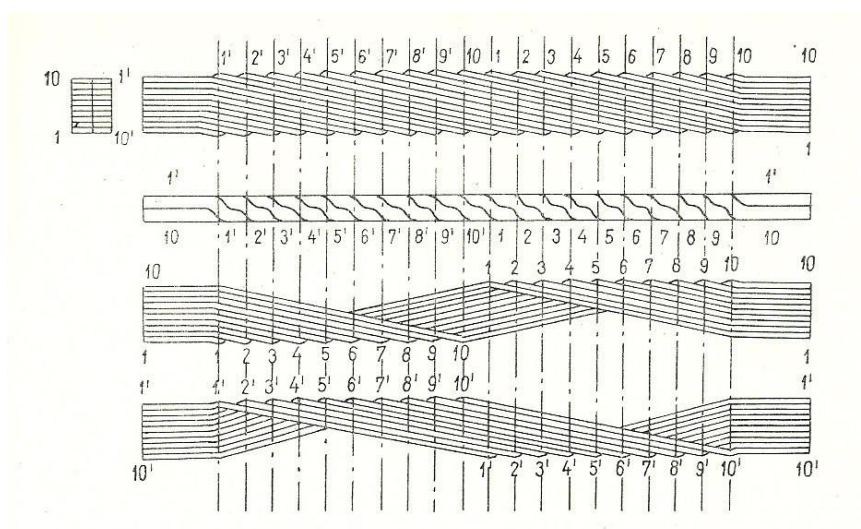
Tyče u velkých strojů jsou rozděleny na mnoho tenkých dílčích vodičů (tzv. permutace vodičů), které musí být vzájemně izolovány. Tímto uspořádáním snížíme ztráty způsobené nerovnoměrným rozložením proudové hustoty. Dále oproti masivnímu vodiči jsou jednak podstatně sníženy vířivé ztráty, a jednak jsou všechny dílčí vodiče v záběru s co nejvíce stejným magnetickým tokem, což zabraňuje vnitřním vyrovnávacím proudům. U středních a velkých synchronních strojů je nejvhodnější a technicky nejrozšířenější použití permutovaného vinutí tvořeného pomocí tzv. Roeblovy tyče. U strojů velkých výkonů se musí vinutí chladit. Vnitřní chlazení je prováděno kapalinami nebo stlačenými plyny. Buď se mezi ploché vodiče umísťují duté vodiče pro chladicí médium, nebo se mezi sloupce dílčích vodičů umístí profilové trubky z odporového materiálu pro průtok chladicího média. Chladicím médiem může být vzduch, voda nebo vodík. Konstrukce Roeblových tyčí s různým typem chlazení vidíme na *Obr. 2.1*. [5]



Obr. 2.1 Řez Roeblovou tyčí: nepřímá chlazená tyč, dvojitá Roeblova tyč chlazená plynem, tyč z dutých vodičů chlazená tekutinou (převzato z [5])

### 2.1.1 Roeblova tyč

V současné době je několik provedení Roeblových permutací, které se liší různým zkroucením v rozsahu drážky. U klasické (původní) Roeblovy tyče jsou dílčí vodiče uspořádány do dvou vedle sebe ležících sloupců a v délce drážky jsou společně zkrouceny. Každý dílčí vodič se v drážce stočí o  $360^\circ$  a tak se všechny dílčí vodiče jednou vzájemně oběhnou. Kvůli lepšímu vyrovnávání pole se Roeblova permutace provádí i v čelech vinutí. U velkých strojů, kde je dostatek místa, se dnes pro vyrovnání všech polí používá tyč se zkroucením  $+180^\circ (+540^\circ) - 180^\circ$ . Toto označení znamená, že v prvním čele dojde ke zkroucení vodičů o  $180^\circ$ , v drážce o  $540^\circ$  a v druhém čele o  $180^\circ$ , ale v opačném směru. U širokých drážek se dělají několikanásobné Roeblovy tyče, nejčastěji se vyskytuje dvojitá Roeblova tyč. [5]



Obr. 2.2 Základní provedení Roeblovy tyče (převzato z [5])

## 2.2 Izolování vinutí

Izolace vinutí je jednou z nejdůležitějších částí výroby satorového vinutí. Působí na ni elektrické, mechanické a tepelné namáhání. Úkolem izolace vinutí je oddělení uzemněného magnetického obvodu statoru od vinutí, které je protékáno proudem. V současnosti se vysokonapěťové izolační systémy dělají dvěma technologiemi. Jedná se technologii Resin-rich a technologii VPI. Oba způsoby jsou velmi rozdílné a mají řadu výhod i omezení.

### 2.2.1 Resin-rich

Název této technologie lze přeložit jako bohatý na pryskyřici nebo na používanější výraz „již obsahující pryskyřici“. Základem je tříšložkový kompozit. Nosná část je tvořena skleněnou tkaninou, která je tvořena stáčenými vlákny a její tloušťka je kolem 0,14 mm. Díky nové technologii, kdy je možné vlákna nestáčet, ale rovnat do roviny je její tloušťka 0,12 mm. Navíc se nám zvýší elektrická pevnost (zhruba o 7%) a sníží dielektrické ztráty. Izolační bariérou (plnivem) je kalcinovaný slídový papír, který je hutný, pevný a méně nasákový. Jako pojivo se používá epoxidová pryskyřice, jejíž obsah se pohybuje kolem 30 – 40 %. Tato izolační páska má tloušťku od 0,15 do 0,2 mm, dodává se ve formě polotovaru a v tzv. B stavu, což znamená, že je částečně vytvrzena. Podle pracovního napětí stroje se potom potřebná vrstva této pásky nanáší na tyčové vinutí. K tomu máme dva způsoby. První způsob je kontinuální, kdy se po celé délce tyče a v čelech ovine materiál ve formě pásky o šířce 20 mm. Ovin se provádí s polovičním, třetinovým nebo dvoutřetinovým překrytím. Druhou možností je diskontinuální způsob. Tyčová část je tvořena fóliovým materiálem, na který v čelech navazuje ovin páskou. U obou způsobů se dává větší tloušťka izolace než je plánovaná, to je tzv. přídavek na stlačení. Dále následuje proces vytvrzení probíhající ve formách, které umožňují stažení izolace na požadovaný rozměr. Vytvrzení probíhá za pomoci tzv. latentního tavidla při teplotě 160 – 170 °C po dobu, která je závislá na tloušťce izolace a typu použité pryskyřice. Dále je nutné řídit proces ochlazování tak, aby chladlo stejně jádro i izolační trubka, aby nedošlo k oddělení izolace od jádra a tím ke vzniku nehomogenit. Po vyjmutí tyče vinutí z formy a jejím zchladnutí jsou tyto tyče bez dalších úprav připraveny k montáži do drážek. Izolace vyrobená tímto způsobem zcela vyhovuje kladeným požadavkům, má velmi dobrou elektrickou pevnost i ostatní požadované vlastnosti. [6]

### 2.2.2 VPI

Zkratka této technologie znamená Vacuum Pressure Impregnation, což je v překladu vakuově tlaková impregnace. Hlavním rozdílem oproti technologii resin-rich je to, že se vinutí ovine nenaimpregnovanou páskou a až poté se impregnuje celé ovinuté vinutí. Základem je tří komponentový savý izolant, který se při impregnačním procesu prosytí impregnantem. Jako nosná složka se používá skleněná tkanina nebo polyesterové rouno. Pojiva se používá do 7 % pro mechanické zpracování pásky. Nejdůležitější vlastností materiálu je savost, protože je důležité, aby došlo k dokonalému naimpregnování všech vrstev i při jejich větším počtu. Jako materiál s dobrou savostí je používána nekalcinovaná slída. Jako impregnant se používají bezrozpouštědlové epoxidové, polyesterové a silikonové pryskyřice, které mají dobré elektrické a mechanické vlastnosti a relativně krátkou vytvrzovací dobu. Vlastní impregnační proces probíhá v tlaku a vakuotěsném kotli a je od něj odvozen název této technologie. Nejprve probíhá při teplotě vyšší než 100 °C po dobu 20 hodin sušení, které má za úkol odstranit vlhkost. Dále je v impregnačním kotli zavedeno vakuum, které odstraní zbytek těkavin a vlhkosti. Následuje zaplavení kotle ode dna impregnantem, který je předem zahřán na určitou teplotu v ohřívacím zařízení. Pak se po zrušení vakua zavede opět přetlak. Po hodině se zruší vakuum, vypustí impregnant a předmět se přemístí do sušárny. Nejprve sušení probíhá za mírného podtlaku, aby se urychlilo vyprchání těkavých látek. Samotné vytvrzování probíhá za normálního tlaku za pomoci proudění teplého vzduchu. Stroj je nutné otáčet, aby nedocházelo ke stékání pryskyřice. Technologii VPI lze impregnovat kromě celků i jednotlivé části elektrických zařízení. [6]

### 2.2.3 Porovnání Resin-rich a VPI

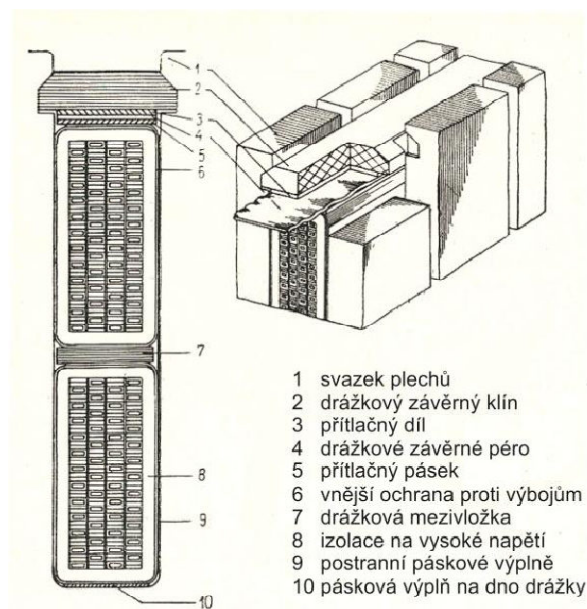
Každá technologie má svá pro a proti. VPI je technicky náročnější a dražší než resin-rich. Dále pokud je u VPI vinutí proimpregnováno do kompaktního celku nemáme možnost oprav jednotlivých dílů. Zato u resin-rich lze snadno vadnou cívku vyměnit. Z hlediska homogenity systému je VPI lepší, protože u resin-rich dochází k výskytu nehomogenit, které u VPI nejsou. VPI při využití průběžného systému izolace umožňuje zkrácení cívek a tím úsporu materiálu až 6 %. V České republice se setkáme v podstatě pouze s technologií resin-rich. [6]



## 2.3 Montáž vinutí

### 2.3.1 Zajištění tyčí v drážce

Plně izolované tyče se montují do drážek tak, aby se vytvořil těsný mechanický a elektrický kontakt mezi povrchem izolace a stěnou drážky. Kompletní uložení tyčí v drážce včetně uklínování můžeme vidět na *Obr. 2.3*.



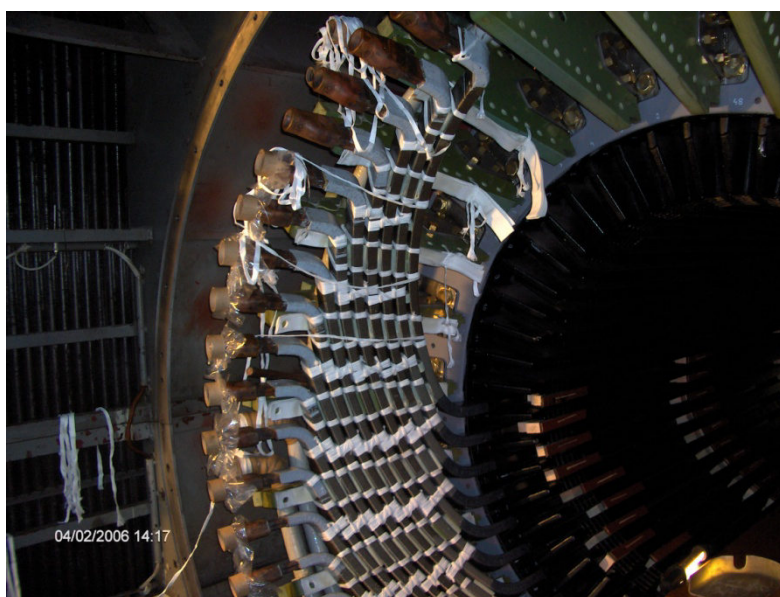
*Obr. 2.3 Uložení tyčí v drážce (převzato z [5])*

Nejprve se na dno drážky umístí vložka, která pomáhá vyrovnávat nerovnosti, rozměrové odchylky vzniklé při výrobě, případně i působení hran magnetického obvodu při výstupu z drážky. Druhým krokem je vložení již izolovaných tyčí spodní polohy. Při vkládání musíme dbát na to, aby se nepoškodil povrch izolace, což by mělo za následek výskyt doutnavých výbojů. Z tohoto důvodu se u vinutí velkých rozměrů nechává mezi stěnou drážky a povrchem izolace dodatečná vůle (až 2 mm). Tyč se po vložení vyklínuje postranními vodivými páskami, tzv. vlnovcem označovaným SRS (Side Ripple String). Poté se na vinutí dolní polohy umístí drážková mezivložka ze sklotextitu, která slouží jako izolace. Dalším krokem je vložení vinutí horní polohy, které se provádí stejně jako u tyčí spodní polohy. Na tyče vinutí horní polohy se umístí horní vložka označována jako TRS (Top Ripple String). Nakonec se do drážky zasune sklolaminátový závěrný klín, který má obvykle lichoběžníkový tvar. Závěrný klín se zasouvá na volno. K jeho upevnění se ještě mezi klín a horní vložku zasouvá další vložka. Vložka na dno a horní drážka se vyrábí z textilie, která je napuštěna epoxidovou pryskyřicí a obsahuje laminát, skelná vlákna a grafit. Vlnovec je vyráběn z polovodivé epoxidové pryskyřice plněné skelnými vlákny a grafitem. [4, 7]

### 2.3.2 Montáž čel vinutí

Čela vinutí musí být dostatečně mechanicky zpevněna v jeden celek, aby během provozu stroje nedocházelo ke zhoršování izolace mechanickým namáháním. V oblasti čel vinutí jsou propojeny tyče horní a dolní polohy a vyskytují se zde vstupy chladiva.

Základ pro zpevnění čel vinutí tvoří sklotextitové konzole, které slouží pro podpírání vinutí vystupujícího z magnetického obvodu. Tyto konzole jsou připevněny pomocí ocelových přírub na stahovací kruhy magnetického obvodu statoru. Následuje zakládání tyčových vinutí spodní polohy. Pro zajištění dokonalého styku se mezi konzole a čela vinutí umísťuje textilní podklad napuštěný pryskyřicí. Mezi sousední tyče se vkládají rozpěrné mezizávitové výztuhy (vločky). Tyče se poté fixují vyvázáním tkanicí napuštěnou pryskyřicí. Po založení spodní polohy se na čela pokládají sklotextitové mezipolohové příčky, které jsou vyvázány bandážemi ke spodní poloze. Následuje provedení povrchové úpravy izolačním lakem. Poté se na vinutí spodní polohy umístí textilní podklad, který zajišťuje dokonalý styk spodní a horní polohy vinutí. Montáž vinutí horní polohy probíhá stejně jako u vinutí spodní polohy. U velkých alternátorů se ještě na čela vinutí umísťuje rozpěrný kruh sloužící ke zlepšení celkového zpevnění. [3, 4, 7]



Obr. 2.4 Zakládání spodní polohy (převzato z [8])

Dále je nutné elektricky propojit dolní a horní polohu. To je možné provést několika způsoby v závislosti na konstrukčním provedení stroje. U strojů, které mají chlazení vedené uvnitř tyče, se používají čelní spojky sloužící zároveň jako elektrické propojení a vstup pro chladivo. Když chladivo neprochází tyčemi, tak se obě polohy spojují vodiči, které se ohýbají

a pájí, což je možné vidět na *Obr. 2.5*. Čelní spojky a jednotlivé vodiče se připevňují pomocí technologie indukčního pájení označovaného jako ELVA. Při pájení se obalují konce tyčí vinutí teplotně izolační tkaninou SIBRAL, aby nedocházelo k ohřevu izolace. Správnost propojení se kontroluje měřením přechodového odporu. [3, 4, 7]



*Obr. 2.5 Zapájená čela vinutí (převzato z [8])*

Holá čela je poté nutné izolovat. Na holé čelní spojky se nasadí izolační pouzdra, která se poté zalijí izolační hmotou. Izolační hmotou může být zalévací hmota MICARES 850, která se po zalití vytvrzuje. Vytvrzování a sušení probíhá za technologického ohřevu, který trvá 15 – 16 hodin při teplotě cca 110 °C. Poté následuje očištění, demontáž pomocných částí a finální nástřik izolačním lakem. [3, 4, 7]



*Obr. 2.6 Finální podoba čel vinutí (převzato z [8])*

### 3 Mezicívkové vložky

Při montáži je třeba čela vinutí vyztužit a celkově zpevnit. K tomu nám slouží konzole, rozpěrný kruh, provázání bandážemi a mezicívkové vložky. Mezicívkové vložky (výztuhy) se vyrábí z materiálu, který vydrží velké elektrické a mechanické namáhání. Vložky musí být dobrým izolantem, protože se nachází v místech s velkým napětovým namáháním. Při provozu stroje dochází v čelech vinutí k mechanickému namáhání ve formě vibrací, které jsou způsobeny elektromagnetickým točivým polem. To může mít za následek uvolnění vložky a tím se sníží mechanická odolnost celého celku. Uvolněná vložka poškozuje ochranné polovodivé vrstvy a hlavní izolaci. Může dojít k úplnému prodření izolace, což má za následek zkrat mezi tyčemi. Mezicívkové materiály jsou při prvovýrobě vyráběny ze Sklotextitu. Ten je možno vyrobít přesně na požadovaný rozměr nebo s určitou vůlí, která se poté vyplní impregnovanou tkaninou. Ta díky své poddajnosti zajistí dokonalý styk s tyčemi vinutí. Dále se vložky vyváží tkanicemi, které se poté ještě naimpregnují.

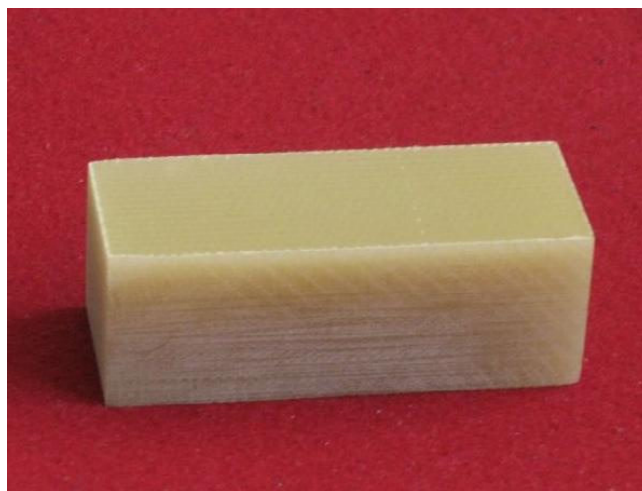
Při uvolnění nebo porušení se musí mezicívková vložka co nejdříve vyměnit, aby nedošlo k porušení izolace. V horní poloze vinutí není problém vložky vyměnit a vyvázat, protože je k místu opravy relativně dobrý přístup. Avšak problém je s opravou vložek u vinutí spodní polohy, kam je omezenější přístup. Pro opravu by bylo nutné z části demontovat horní polohu, čím by se oprava stroje prodloužila a prodražila. Z tohoto důvodu se zkoušely nové materiály, které by se daly použít místo Sklotextitu bez nutnosti demontáže horní polohy. Takhle provedená oprava by byla považována pouze za dočasnou a při následující plánované odstávce by byla provedena plnohodnotná oprava. Jako materiál na dočasnou opravu se zkoušela použít epoxidová pryskyřice Foam 128 a 3D skleněná tkanina Parabeam. [3, 4, 5]

Tato práce se zabývá mezicívkovými vložkami, které jsou vyrobeny s použitím různým způsobem proimpregnovaného materiálu. Cílem je tedy prověřit jejich elektrické vlastnosti a určit, zda jsou vhodné pro použití při opravách vinutí točivých elektrických strojů.

#### 3.1 Sklotextit

Sklotextit je vrstvený materiál vyrobený z upravené skelné tkaniny a epoxykrezolové živice (tvrzená skelná tkanina). Vyhovuje požadavkům na mechanické a elektroizolační vlastnosti. Mezi jeho vlastnosti patří vysoká dielektrická pevnost, nízký ztrátový činitel, vysoká tepelná odolnost a minimální nasákavost. Kromě těchto vlastností má i vysokou klimatickou odolnost, takže jej lze použít i ve vyšších teplotách a vlhkém prostředí. Sklotextit má žlutou až světle hnědou barvu. [9, 10]

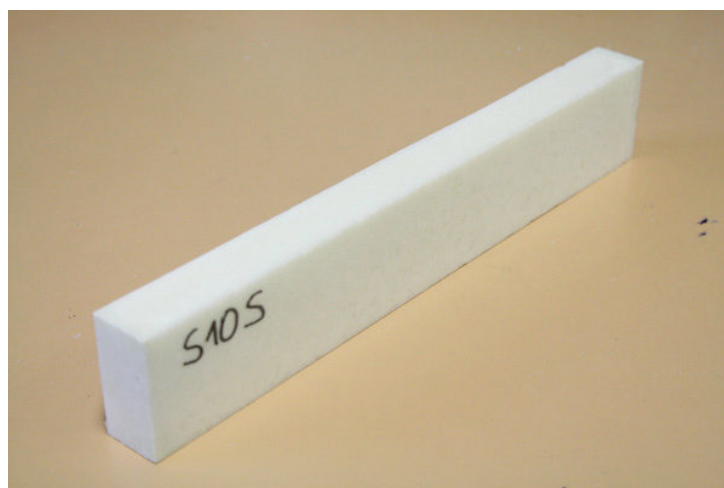




Obr. 3.1 Sklotextit

### 3.2 Epoxidová pryskyřice Foam 128

Uvažovaná aplikace byla taková, že by se epoxidová pryskyřice nalila do prostoru vzniklého uvolněním vložky, kde by následně vypěnila a vytvrdla. Poté by byl nanesen epoxid či izolační lak. Z měření, které bylo provedeno Ing. Ondřejem Veselým, je patrné, že tento materiál nevyhovuje požadavkům na mechanické vlastnosti. Za normální teploty byl materiál křehký, při zahřátí docházelo k jeho výraznému měknutí. Jelikož mezicívkové vložky pomáhají k celkovému zpevnění je epoxidová pryskyřice Foam 128 nevyhovující. [3]

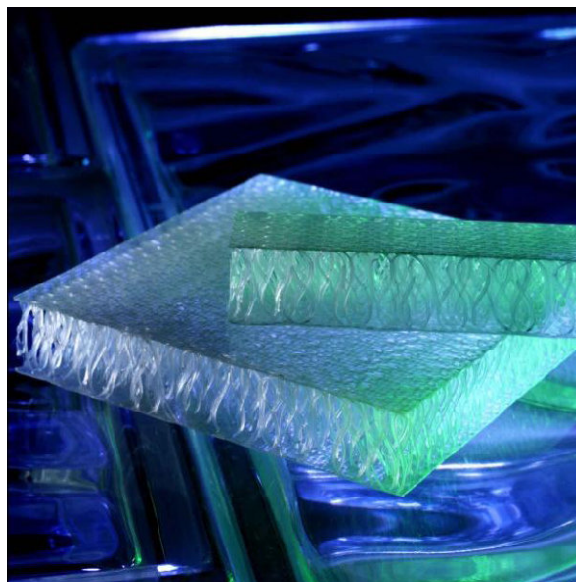


Obr. 3.2 Vzorek Foam 128 (převzato z [3])

### 3.3 3D skleněná tkanina Parabeam

Tento materiál je zvláštní třídou kompozitních materiálů. Je tvořen dvěma tenkými vrstvami skelné tkaniny, které jsou vzájemně propleteny s jádrem ve tvaru číslice 8. Materiál má výbornou pevnost v ohybu, která roste exponenciálně s jeho tloušťkou, při zachování malé hustoty. Dalšími výhodami jsou odolnost proti delaminaci, urychlení procesu výroby a snížení váhy nebo nákladů na výrobu. Předpokládanou aplikací bylo prosycení skelné tkaniny pryskyřicí a následné poskládání nastříhaných pásů na potřebnou tloušťku nebo složení pomocí přehybů tak, aby následné vložení do prostoru vymezilo místo po uvolněné vložce.

Měření, které bylo provedeno Ing. Michalem Rokem, odhalilo ztrátu mechanických vlastností za zvýšené teploty, kdy se použitá pryskyřice změnila v gel. Dále zkoušky odhalily nehomogenitu materiálu. Z těchto důvodů nebyl materiál Parabeam v kombinaci s použitou vytvrzovací pryskyřicí doporučen za vhodný. [4]



Obr. 3.3 3D skleněná tkanina Parabeam (převzato z [4])

### 3.4 Testované nové možnosti tvorby vložek

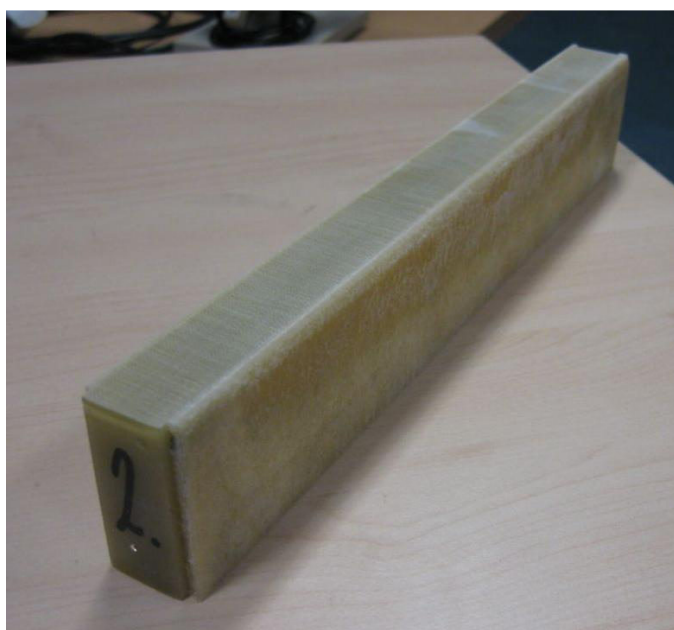
V návaznosti na předchozí zkoušky epoxidové pryskyřice Foam 128 a 3D skleněné tkaniny Parabeam, které se ukázaly jako nevhodné, byl na základě nového požadavku otestován další materiál.

Pro testování byly použity tři druhy možnosti přípravy mezizávitových vložek s použitím různým způsobem proimpregnovaného materiálu. Použitým materiálem na impregnaci je finet FINET PES2. Jeho složení a vlastnosti jsou uvedeny v Příloze D. První zkušební vzorek je klasický Sklotextit obalený zcela prosyceným finetem. Výroba tohoto

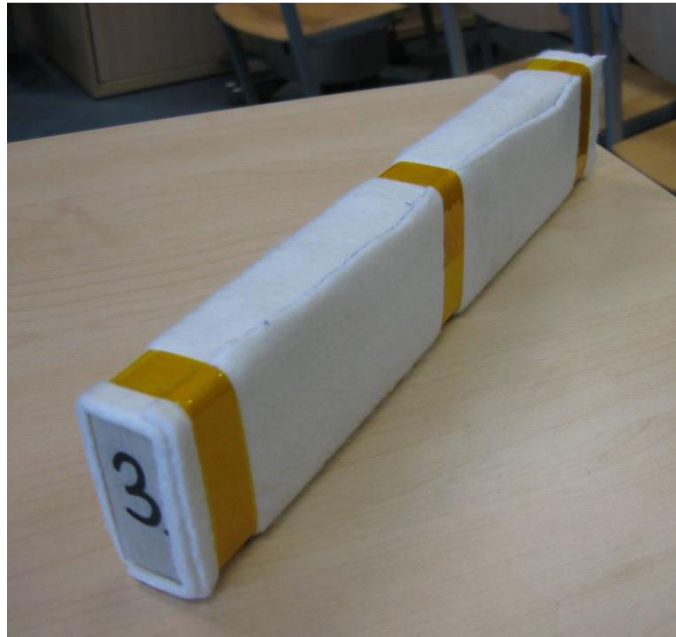
vzorku se provádí tak, že se nejprve samotný finet ponoří do nádoby s epoxidovou pryskyřicí 110BG (15531) a tvrdidlem 70563 (mícháno v hmotnostním poměru 100:30) a nechá se zcela prosytit. Poté se Sklotextit ovine naimpregnovaným finetem a vloží se do přípravku a nechá vytvrdit. Druhým vzorkem je Sklotextit obalený prolakovaným (nastříkaným) finetem. U tohoto vzorku byl Sklotextit nejprve obalen suchým finetem, vložen do přípravku a následně přestříkán směsí epoxidu a tvrdidla naředěnou technickým acetonem v poměru 1:1. Třetím vzorkem je Sklotextit obalený pouze suchým finetem. Jednotlivé vzorky jsou zachyceny na následujících obrázcích.



Obr. 3.4 Zkušební vzorek se zcela prosyceným finetem



Obr. 3.5 Zkušební vzorek s prolakovaným finetem



*Obr. 3.6 Zkušební vzorek se suchým finetem*

Test těchto vzorků byl proveden ve spolupráci s firmou 1. SERVIS-ENERGO, s.r.o. se sídlem v Plzni, která všechny zkušební vzorky vyrobila. Tato společnost se specializuje na montážní, opravárenskou a servisní činnost v oblasti generátorů. Strategii 1. SERVIS-ENERGO, s.r.o. je věnovat veškerou energii a prostředky dalšímu rozvoji oboru, výchově nových pracovníků, zkvalitňování kultury trhu a poskytovaných služeb. Díky rozvoji a uplatňování moderních technologií, vybavení, odbornosti a serióznímu přístupu poskytovat všem zákazníkům služby v té nejvyšší kvalitě. [11]



## 4 Diagnostický systém

### 4.1 Částečné výboje

Částečné elektrické výboje částečně přemostují izolaci mezi vodiči nebo elektrodami o různých potenciálech. Bývají důsledkem koncentrace lokálního elektrického namáhání v izolaci nebo na povrchu izolace v okolí vodičů a objevují se jako impulzy s dobou trvání menší než 1  $\mu$ s. Částečné výboje působí na izolační systém elektrickými, erozivními, chemickými a tepelnými vlivy, což má za následek negativní ovlivnění jeho vlastností a snížení spolehlivosti a životnosti. Částečné výboje mohou v točivých strojích vznikat na několika místech: přímo v izolaci vodičů, mezi izolací a vodičem, mezi izolací a dnem statorové drážky (tzv. drážkové výboje) nebo na povrchu izolace mimo statorovou drážku (klouzavé výboje, povrchové výboje na čelech vinutí, koróna). [12]

#### 4.1.1 Sledované veličiny

##### Zdánlivý náboj $q$ impulzu částečného výboje

Zdánlivý náboj  $q$  impulzu částečného výboje je základním diagnostickým parametrem pro měření a vyhodnocování částečných výbojů. Jedná se o takový náboj, při jehož mžikovém přivedení na svorky zkoušeného objektu se nám mezi elektrodami změni krátkodobě napětí na stejnou hodnotu, která by se objevila i při částečném výboji. Velikost zdánlivého náboje  $q$  se udává v pikocoulombech [pC]. [12]

##### Zapalovací napětí částečných výbojů $U_i$

Zapalovací napětí částečných výbojů  $U_i$  udává nejnižší hodnotu testovacího napětí, při kterém dojde k zachycení stabilních částečných výbojů. Předpokladem je plynulé zvyšování testovacího napětí z nízké počáteční hodnoty do chvíle zaznamenání výskytu výbojů. Udává se v kilovoltech. [12]

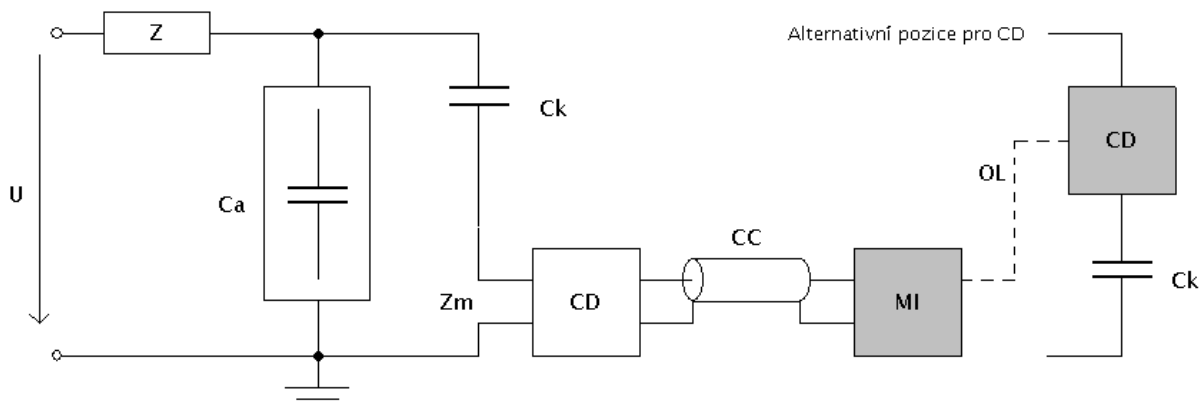
##### Zhášecí napětí částečných výbojů $U_e$

Zhášecí napětí částečných výbojů  $U_e$  [kV] udává hodnotu, při které již nelze zjistit stabilní výbojovou činnost. Testované napětí se plynule snižuje z vyšší hodnoty až do doby, kdy již nelze částečné výboje zachytit. [12]

#### 4.1.2 Globální galvanická metoda

Pro detekci a měření částečných výbojů byla zvolena globální metoda měření. Tato metoda je jednou z nejrozšířenějších a je založená na sledování impulzů částečných výbojů za pomoci měřicí impedance. Měřicí impedance bývá tvořena RLC členem s ochrannými prvky

proti přepětí a navíc do napájecí frekvence filtruje superponované pulzy částečných výbojů. Norma ČSN EN 60270 specifikuje tři základní zapojení. V našem případě se jedná o měřicí obvod se zapojením impedance do větve vazebního kondenzátoru. [12]



- $U$  - napájecí napětí
- $Z$  - filtr rušení, zábrana vybíjení částečných výbojů přes impedanci zdroje
- $C_a$  - testovaný vzorek
- $C_k$  - vazební kondenzátor
- $Z_m$  - snímací impedance
- $CD$  - vazební zařízení
- $CC$  - spojovací stíněný kabel
- $MI$  - detektor
- $OL$  - optický kabel

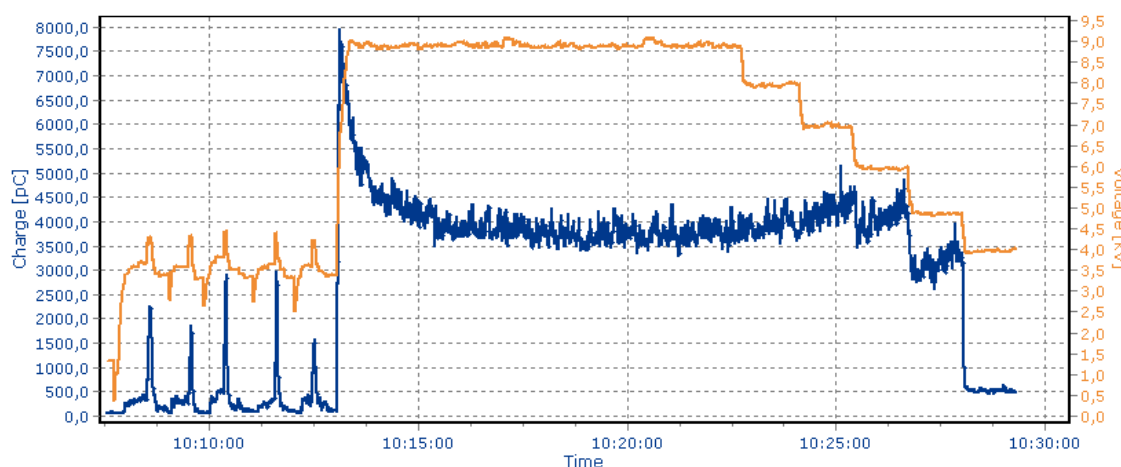
Obr. 4.1 Schéma zapojení měření částečných výbojů (překresleno podle [12])

Vysokonapěťový vazební kondenzátor je důležitou součástí měřicího obvodu, dodává do obvodu potřebný náboj pro kompenzaci přechodných změn napětí při částečném výboji. Vazební kondenzátor musí mít nízkou indukčnost, vysokou kapacitu v porovnání s rozptylovou kapacitou obvodu a nesmí vykazovat významné částečné výboje v rozsahu měřících napětí.

Mezi výhody galvanické metody patří vysoká citlivost měření z důvodu možnosti regulace vazební kapacity, velká výpovědichopnost, bezpečí měřeného objektu a použitelnost za chodu zařízení (on-line). Nevýhodou je citlivost na rušivé vlivy jak vnější povahy (elektromagnetické rádiové vlny vysílačů) tak vnitřní povahy (vlivy způsobené prvky v obvodu). [12]

Pro měření sledovaných veličin částečných výbojů byl použit měřicí systém PD Smart od společnosti LIDIC Lempke Diagnostic, GmbH. Po zapojení podle schéma na Obr. 4.1 byla provedena kalibrace pomocí přístroje LDIC LDC-5/S3 na náboj 500 pC. Zkušební vzorky byly vloženy mezi dvě tyčová vinutí v horní a současně i ve spodní poloze. Pro porovnání bylo provedeno měření i pro prázdnou drážku, tedy bez vloženého vzorku. Nejprve se

zjišťovala hodnota zapalovacího a zhašecího napětí. Postupně se zvyšovala hodnota napětí do chvíle, kdy se objevily dva stálé výboje. Poté se napětí zvýšilo zhruba o 20 %, aby se zajistila stabilní výbojová činnost. Pro zjištění zhašecího napětí se zkušební napětí snižovalo do doby, kdy všechny výboje uhasly. Toto se provedlo opakovaně pro každý vzorek pětkrát. Poté se zkušební napětí nastavilo na hodnotu 9 kV. Po 10 minutách určených pro samozhášecí jev bylo napětí snižováno od 9 kV do 4 kV s krokem 1 kV po době jedné minuty a byla pravidelně zaznamenávána hodnota náboje  $Q_{iec}$ . Celý tento postup byl proveden pro každý typ vzorku s četností 5. Průběh měření je znázorněn na Obr. 4.2.



Obr. 4.2 Velikost zdánlivého náboje  $Q_{iec}$  a časový průběh zkušebního napětí zaznamenáno programem PD-Smart

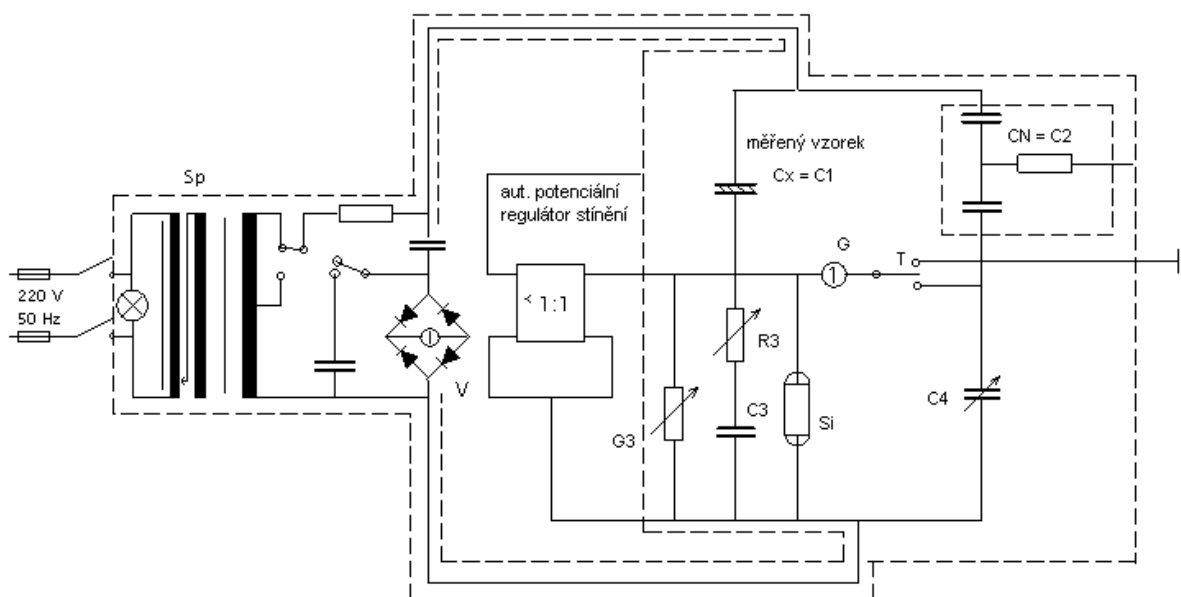
## 4.2 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel  $\tan \delta$  [-] popisuje, kolik elektrické energie se v izolantu po zatížení elektrickým polem změní na nežádoucí tepelnou energii, tzv. dielektrické ztráty.  $\delta$  je tzv. ztrátový úhel dielektrika. [6]

### 4.2.1 Měření ztrátového činitele

Pro měření ztrátového činitele byl použit čtyřkapacitní Scheringův můstek. Oproti klasickému Scheringovu můstku má kapacity ve všech svých větvích, čímž se zvětší impedance v daných větvích a tím je i větší citlivost a přesnost měření. Dále je můstek vybaven stíněním a vestavěným poloautomatickým potencionálním regulátorem, který slouží k eliminaci parazitních kapacit přívodů a měrných kondenzátorů. Vyrovnání můstku se provádí pomocí nulového indikátoru s regulovatelnou citlivostí. Neznámá kapacita  $C_x$  v první větvi se vyrovnává kapacitní dekadou  $C_4$ , ztráty vzorku pak odporovou  $R_3$  a vodivostní

dekádou  $G_3$  ve třetí větvi. Velikost  $\text{tg } \delta$  se odečítá přímo na vyvažovacích prvcích můstku. Zabudovaný kapacitní normál  $C_N$  je bezztrátový, ztráty  $C_3$  a dekády  $C_4$  se vzájemně ruší. [12]



Obr. 4.3 Schéma zapojení čtyřkapacitního Scheringova můstku (překresleno podle [12])

Měření bylo prováděno při hodnotě napětí 500 V. Zkušební vzorky se umístily mezi dvě měděné deskové elektrody a za pomoci speciálních kleští a tkaniny se zavěsily do prostoru. Zavěšení vzorků je možné vidět v Příloze B. Dále následovalo vyvážení můstku kapacitní a odporovou dekádou. Při dosažení nulové výchylky na indikátoru se zvětšila jeho citlivost a pokračovalo se s vyvažováním až do dosažení maximální citlivosti. Poté se odečetly hodnoty ztrátového činitele z vyvažovacích prvků můstku. Pro každý typ vzorku bylo provedeno měření s četností 10.

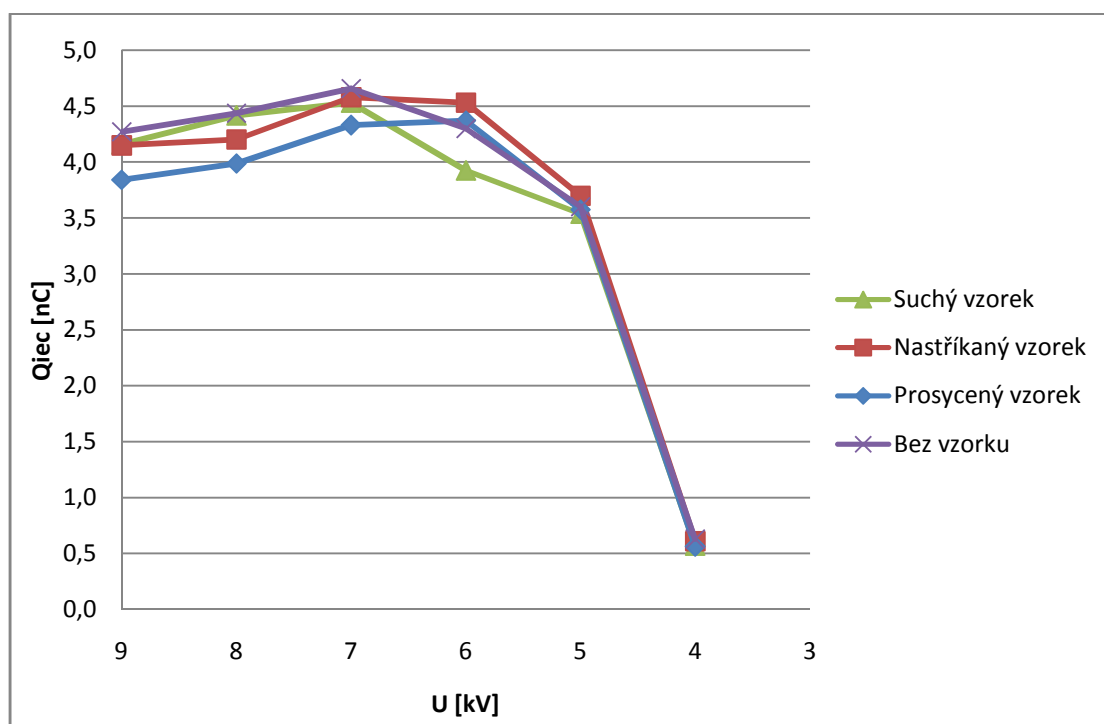
## 4.3 Výsledky měření

### 4.3.1 Částečné výboje

V Tab. 4.1 jsou uvedeny střední hodnoty kvantitativně největší opakovaně se vyskytující úrovně náboje  $Q_{iec}$  pro všechny tři typy vzorků získané při měření na laboratorním vinutí. Pro porovnání jsou uvedeny i hodnoty pro prázdnou drážku, kdy měření probíhalo bez vložení vzorku. Dále tabulka obsahuje i směrodatnou odchylku a variační koeficient. Všechny naměřené a statistické hodnoty jsou uvedeny v Příloze A. Na Obr. 4.4 je pak graficky znázorněna závislost velikosti náboje  $Q_{iec}$  na napětí.

Tab. 4.1 Střední hodnoty náboje  $\overline{Q_{iec}}$  včetně směrodatné odchylky a variačního koeficientu

U [kV]	Bez vzorku			Prosycený vzorek			Nastříkaný vzorek			Suchý vzorek		
	$\overline{Q_{iec}}$ [nC]	s [nC]	v [%]	$\overline{Q_{iec}}$ [nC]	s [nC]	v [%]	$\overline{Q_{iec}}$ [nC]	s [nC]	v [%]	$\overline{Q_{iec}}$ [nC]	s [nC]	v [%]
9	4,273	0,346	8,10	3,842	0,133	3,47	4,150	0,113	2,73	4,160	0,406	9,77
8	4,438	0,377	8,49	3,988	0,156	3,92	4,202	0,113	2,70	4,416	0,316	7,14
7	4,658	0,329	7,07	4,330	0,184	4,24	4,580	0,132	2,89	4,532	0,554	12,22
6	4,300	0,508	11,82	4,372	0,189	4,31	4,532	0,218	4,80	3,924	0,493	12,57
5	3,603	0,202	5,62	3,576	0,159	4,45	3,700	0,195	5,27	3,538	0,341	9,63
4	0,630	0,012	1,94	0,564	0,041	7,23	0,610	0,033	5,49	0,570	0,073	12,80

Obr. 4.4 Závislost velikosti náboje  $Q_{iec}$  na napětí

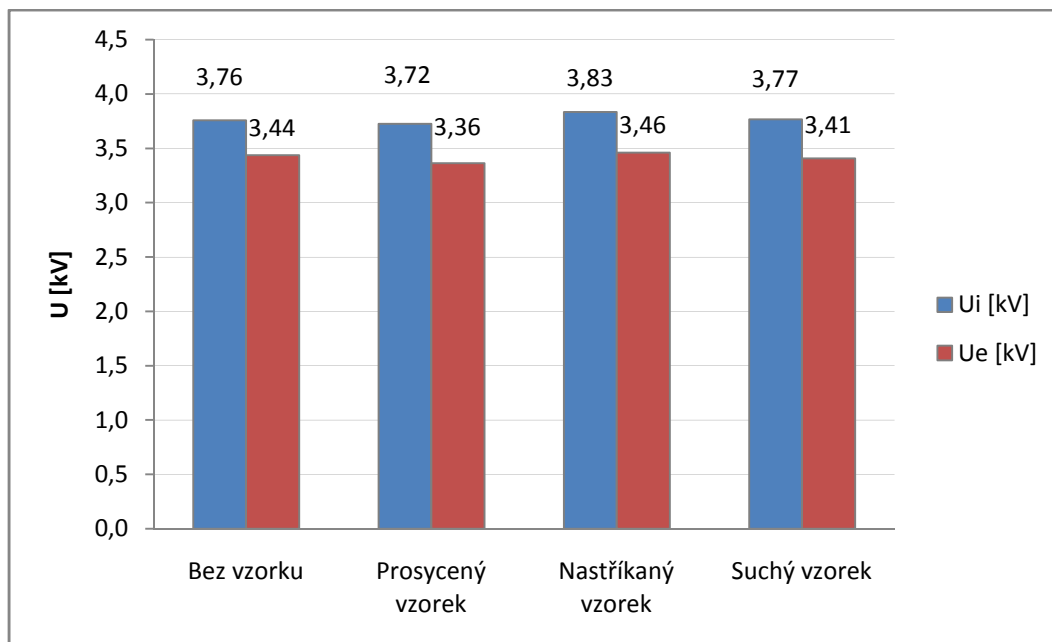
Střední hodnoty zapalovacích napětí  $\overline{U}_l$  a zhašecích napětí  $\overline{U}_e$  včetně směrodatné odchylky, variačního koeficientu a standardní nejistoty typu A testovaných vzorků jsou uvedeny v Tab. 4.2, resp. Tab. 4.3.

Tab. 4.2 Hodnoty zapalovacích napětí  $\overline{U}_l$ 

	Bez vzorku	Prosycený vzorek	Nastříkaný vzorek	Suchý vzorek
$\overline{U}_l$ [kV]	3,758	3,724	3,832	3,766
s [kV]	0,041	0,042	0,052	0,022
v [%]	1,096	1,121	1,345	0,583
$u_A$ [kV]	0,040	0,029	0,036	0,015

Tab. 4.3 Hodnoty zhášecích napětí  $\overline{U}_e$ 

	Bez vzorku	Prosycený vzorek	Nastříkaný vzorek	Suchý vzorek
$\overline{U}_e$ [kV]	3,436	3,362	3,459	3,406
s [kV]	0,032	0,061	0,039	0,022
v [%]	0,938	1,819	1,137	0,636
$u_A$ [kV]	0,032	0,043	0,028	0,015



Obr. 4.5 Porovnání zapalovacích a zhášecích napětí jednotlivých vzorků

#### 4.3.2 Ztrátový činitel

V Tab. 4.4 jsou uvedeny střední hodnoty ztrátového činitele  $\overline{tg \delta}$  všech tří typů vzorků spolu se statistickými údaji. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v Příloze A.

Tab. 4.4 Střední hodnoty ztrátového činitele  $\overline{tg \delta}$  včetně statistických parametrů

	Prosycený vzorek	Nastříkaný vzorek	Suchý vzorek
$\overline{tg \delta}$ [-]	0,00278	0,02313	0,45747
s [-]	0,00017	0,00714	0,04074
v [%]	6,18	30,86	8,90
$u_A$ [-]	0,00006	0,00238	0,01358
Min [-]	0,00240	0,01113	0,39784
Max [-]	0,00300	0,03500	0,51856
Medián [-]	0,00276	0,02239	0,47599

#### 4.4 Vyhodnocení výsledků

Na *Obr. 4.4* vidíme, že testované typy vzorků nemají vliv na výskyt částečných výbojů, resp. kvantitativně nejvyšší opakovaně se vyskytující úroveň náboje  $Q_{iec}$ . Vidíme, že po vložení vzorku do drážky vinutí nedošlo k výraznému poklesu hodnoty  $Q_{iec}$ . Pro všechny tři typy vzorků a i pro měření bez vzorku jsme naměřili hodnoty  $Q_{iec}$  velmi podobné. Při detailnějším rozboru zjistíme, že u vyšších napětí byly podle předpokladů naměřeny nejnižší hodnoty  $Q_{iec}$  u vzorku se zcela prosyceným finetem, zatímco nejvyšší hodnoty byly získány při měření bez vzorku a u vzorku se suchým finetem. Ale jak už bylo řečeno, rozdíly jsou zanedbatelné. Z *Obr. 4.5* je patrné, že testované typy vzorků neovlivňují zapalovací a zhášecí napětí částečných výbojů.

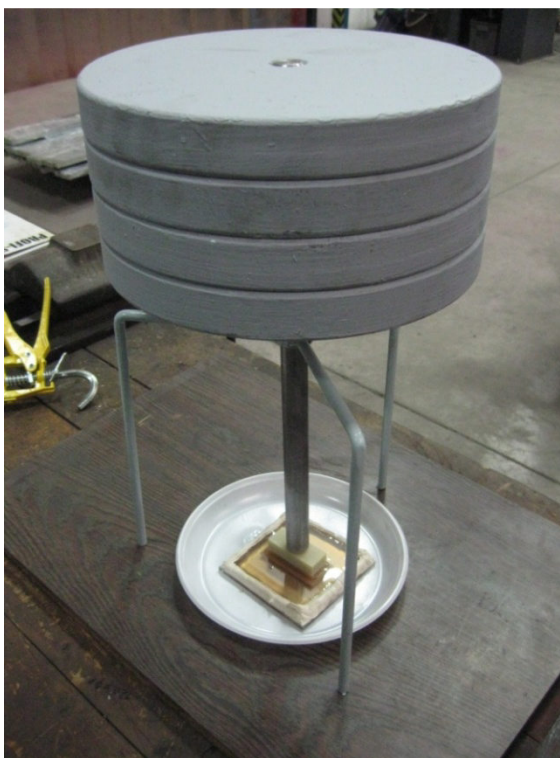
Výsledky měření ztrátového činitele jsou uvedeny v *Tab. 4.4*. U vzorku se zcela prosyceným finetem vyšel ztrátový činitel v rámci tisícín a lze jej považovat za vhodný pro aplikaci jako mezizávitovou vložku. U vzorku s nastříkaným finetem vyšel ztrátový činitel o řád vyšší, u vzorku se suchým finetem dokonce o dva vyšší. Z hlediska ztrátového činitele jsou tedy tyto dva typy nevhodné pro aplikaci. U vzorků s nastříkaným finetem vyšel poměrně vysoký variační koeficient (téměř 31 %), to je dáno velkou nehomogenitou jednotlivých vzorků tohoto typu.

## 5 Zkouška nasákavosti finetu

Zkouška nasákavosti finetu měla za úkol zjistit, zda je vhodné při opravách vkládat mezi tyče vinutí sklotextitové vložky ovinuté suchým finetem a naimpregnovat jej nastříkáním až po založení, oproti starému způsobu kdy se vkládají sklotextitové vložky obalené již zcela prosyceným finetem. Jelikož na vložky mezi vinutím působí relativně velké síly, nebylo jasné, zda by došlo k dostatečnému prosycení finetu a tím i dosažení požadovaných izolačních vlastností. Cílem této zkoušky bylo tedy zjistit nasákavost finetu v závislosti na měrném tlaku.

Zkouška nasákavosti finetu byla opět provedena ve spolupráci s firmou 1. SERVIS-ENERGO, s.r.o. se sídlem v Plzni.

Nejprve se vzorek finetu (60x30x1,5 mm) položil na sklíčko (100x100x5 mm), které mělo po svém obvodu mantinely ze silikonového tmelu. Složení a vlastnosti použitého finetu jsou uvedeny v *Příloze D*. Poté se na střed vzorku finetu umístila kostička Sklotextitu (50x20x20 mm), která byla zatěžkána trojnožkou se závažím. Celý aparát můžeme vidět na *Obr. 5.1*.



*Obr. 5.1 Aparát pro zkoušku nasákavosti finetu – varianta se zatížením 40 kg*

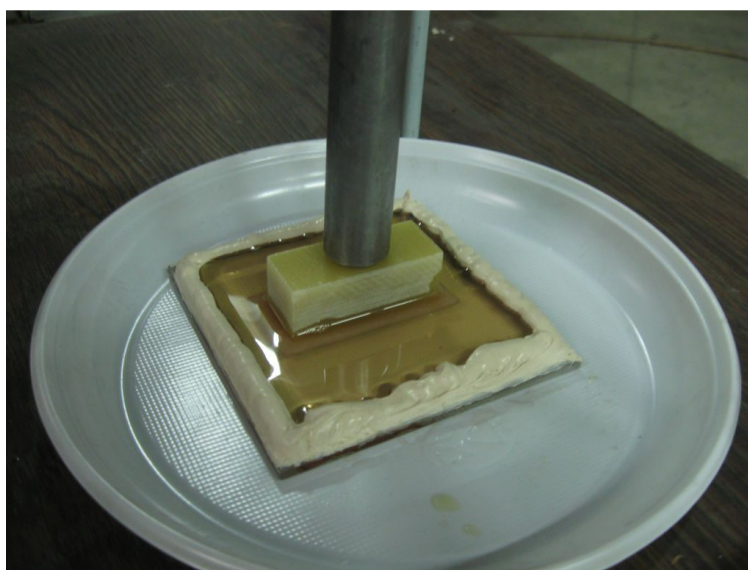
Dále následovalo zalití vzorku finetu epoxidovou pryskyřicí. Zalití bylo provedeno ve třech variantách. Nejprve úplné zalití směsí neředěné epoxidové pryskyřice 110BG (15531)



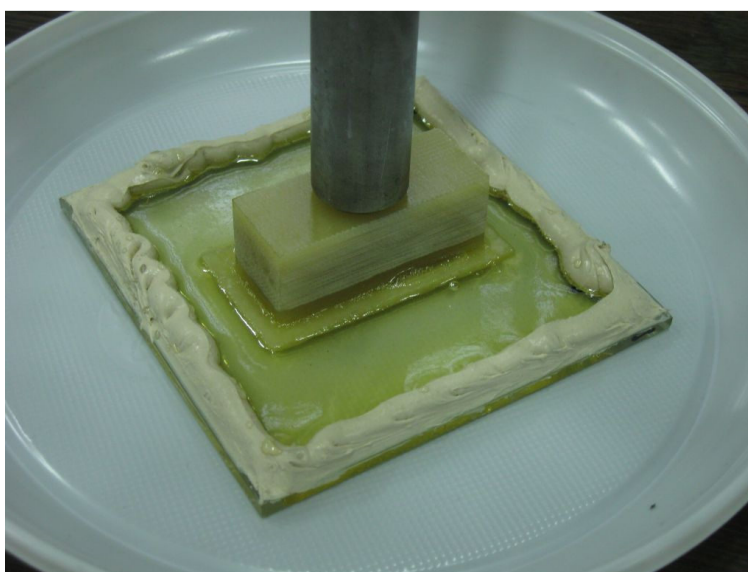
a tvrdidla T0563 (mícháno v hmotnostním poměru 100:30), tak aby vzorek finetu byl zcela potopen a nalitá pryskyřice byla do výšky cca 3-4 mm.

Další variantou bylo opět úplné zalití vzorku finetu, ale tentokrát ředěnou epoxidovou pryskyřicí. Směs pro zalití se vyrobila tak, že se k 33 g epoxidu 110BG (15531) přidalo 10 g tvrdidla T0563. Po promíchání se pro zředění přidalo 9 g technického acetonu a opět důkladně promíchalo. Na *Obr. 5.2* je vidět vzorek finetu s úplným zalitím.

Třetí variantou bylo použití ředěné epoxidové pryskyřice připravené stejným způsobem jako v předchozím případě, ale zalití se provedlo pouze do výšky vzorku finetu, tedy do výšky cca 1,5 mm. Tato varianta je znázorněna na *Obr. 5.3*.



*Obr. 5.2 Plné zalití finetu*



*Obr. 5.3 Zalití do výšky finetu*

U každé varianty byly vzorky zatěžovány stejnou vahou a to: 1 kg, 20 kg a 40 kg, což odpovídalo měrnému tlaku  $p = 0,01$  MPa,  $p = 0,2$  MPa a  $p = 0,4$  MPa. Po zalití se nechaly vzorky vytvrdit. Doba vytvrzení byla u neředěné epoxidové pryskyřice 6-7 hodin při 20°C, u ředěného epoxidu 25-26 hodin při 20°C a 10-11 hodin při teplotě 35°C. Po vytvrzení bylo možné ze spodní strany sklička vidět prosycenost jednotlivých vzorků finetu. Fotografie prosycenosti jednotlivých vzorků a fotodokumentaci zkoušky můžeme vidět v *Příloze C*.

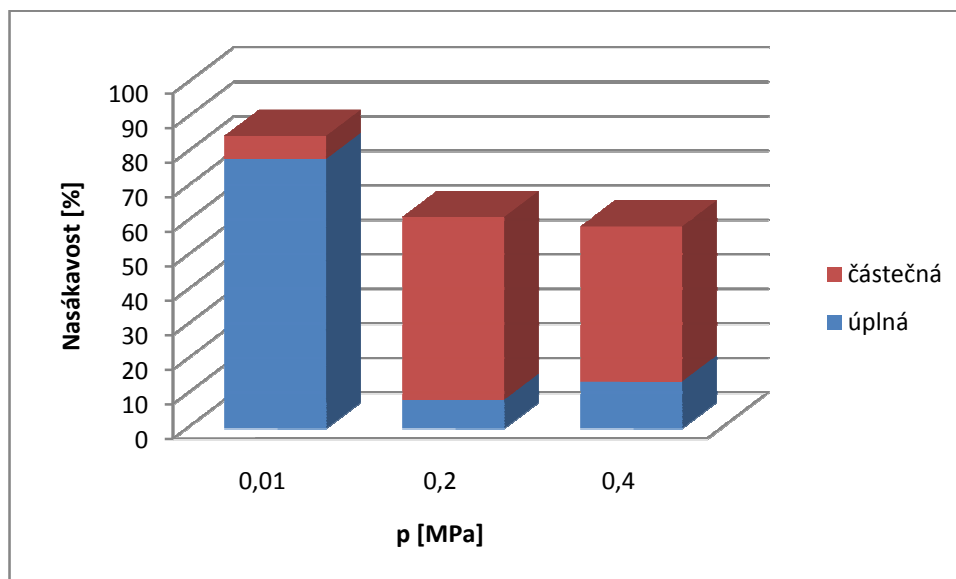
## 5.1 Výsledky nasákavosti

Výsledky zkoušky nasákavosti jsou udávány v procentech prosycené oblasti a jsou rozděleny na několik složek: částečná, úplná a celková nasákavost. Kde zůstal suchý neprosycený finet byla nasákavost nulová, která se ve výsledcích neuvádí. Jako úplná nasákavost se brala oblast pod Sklotextitem, která byla zcela prosycená. Částečnou nasákavostí rozumíme oblast, která byla prosycena, ale v menším množství. Zda se jedná o částečnou nebo úplnou nasákavost se určilo podle odstínu prosyceného finetu, u úplné nasákavosti měl prosycený finet stejnou barvu jako část finetu, která nebyla přímo pod kostičkou Sklotextitu, ale vně, a tak nebyla zatěžována silou a došlo v ní k úplnému prosycení. Jako částečná nasákavost se brala oblast pod Sklotextitem, která neobsahovala takové množství epoxidu a byla tak na pohled světlejší. Celková nasákavost je pak součtem úplné a částečné nasákavosti. Procenta se získala tak, že se jednotlivé oblasti překreslily na milimetrový papír a spočetla se jejich plocha. Jako celkovou plochu, podle které se počítala procenta, se brala plocha pod Sklotextitem, tedy 1000 mm<sup>2</sup>. V následujících tabulkách a grafech je vždy uváděna procentuální částečná a úplná nasákavost v závislosti na měrném tlaku, celková nasákavost je pak dána jejich součtem.

### 5.1.1 Neředěný epoxid zcela zalitý

Tab. 5.1 Nasákavost vzorku zcela zalitým neředěným epoxidem

p [MPa]	Nasákavost [%]		
	částečná	úplná	celková
0,01	6,7	78,0	84,7
0,2	52,9	8,3	61,2
0,4	44,9	13,6	58,5

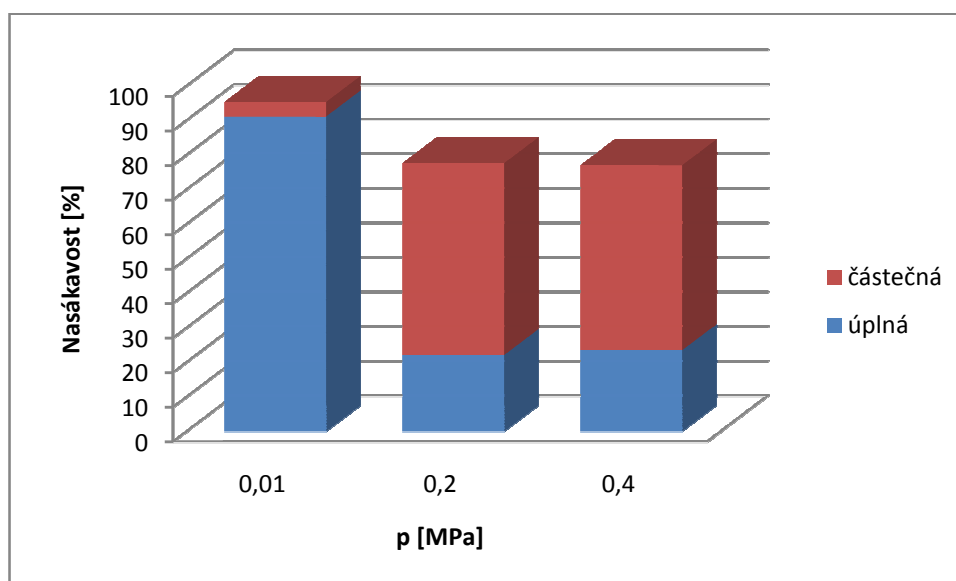


Obr. 5.4 Částečná a úplná nasákavost vzorku zcela zalitým neředěným epoxidem

### 5.1.2 Naředěný epoxid zalitý do výšky finetu

Tab. 5.2 Nasákavost vzorku zalitým ředěným epoxidem do výšky finetu

p [MPa]	Nasákavost [%]		
	částečná	úplná	celková
0,01	4,2	91,1	95,3
0,2	55,5	22,1	77,6
0,4	53,5	23,5	77,0

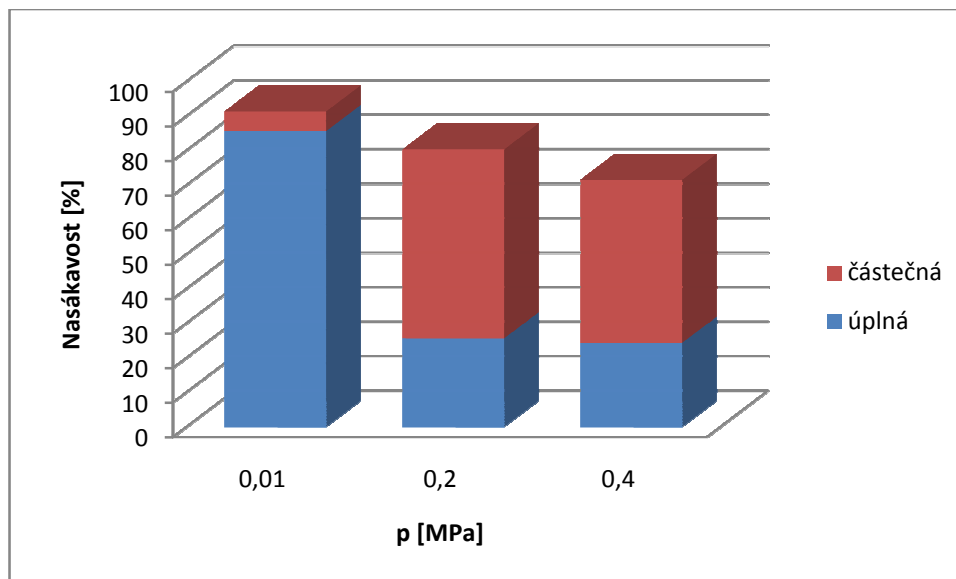


Obr. 5.5 Částečná a úplná nasákavost vzorku zalitým ředěným epoxidem do výšky finetu

### 5.1.3 Naředěný epoxid zcela zalitý

Tab. 5.3 Nasákavost vzorku zcela zalitým ředěným epoxidem

p [MPa]	Nasákavost [%]		
	částečná	úplná	celková
0,01	5,7	85,6	91,3
0,2	54,7	25,6	80,3
0,4	47,2	24,3	71,5

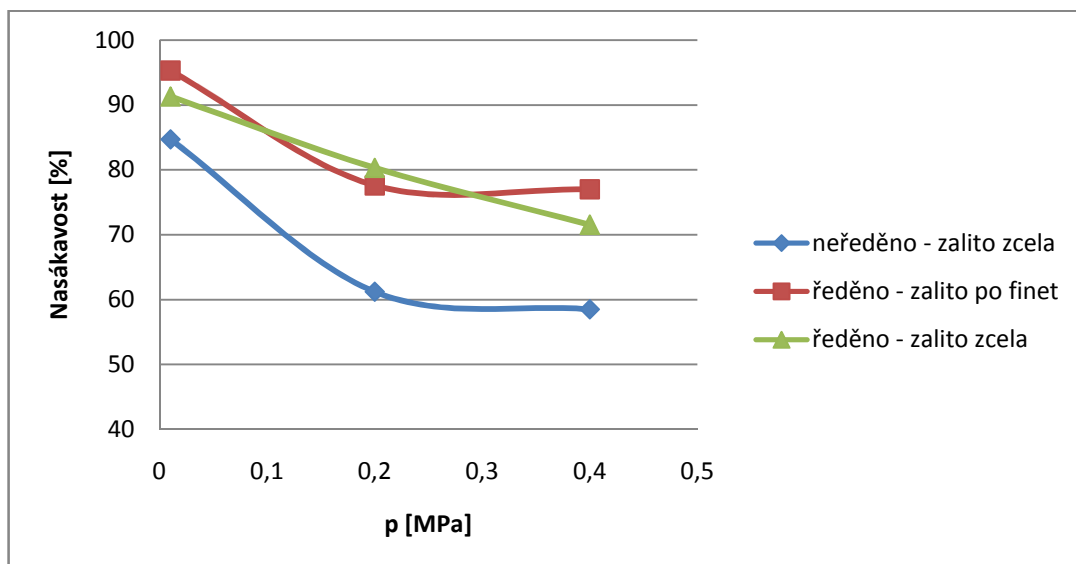


Obr. 5.6 Částečná a úplná nasákavost vzorku zcela zalitým neředěným epoxidem

### 5.1.4 Srovnání celkové nasákavosti

Tab. 5.4 Celková nasákavost jednotlivých vzorků

p [MPa]	Celková nasákavost [%]		
	neředěno	ředěno, zalito po finet	ředěno, zalito zcela
0,01	84,7	95,3	91,3
0,2	61,2	77,6	80,3
0,4	<b>58,5</b>	<b>77,0</b>	<b>71,5</b>



Obr. 5.7 Celková nasákavost finetu v závislosti na měrném tlaku

## 5.2 Elektrické parametry

Dále bylo nutné prověřit, jak se liší elektrické vlastnosti finetu prosyceného ředěnou a neředěnou epoxidovou pryskyřicí. Prověřování proběhlo na dvou modifikacích, první byl finet prosycený epoxidovou pryskyřicí 110 BG (15531) s tvrdidlem T 0563, druhou finet prosycený stejnou epoxidovou pryskyřicí ředěnou po namíchání 1:1 technickým acetonem. Materiál použitého finetu byl stejný jako u zkoušky nasákavosti. Prověřovaný materiál byl proměřován ve formě deseti vzorků deskového tvaru o rozměrech cca 100 x 100 x 2 mm (5 vzorků pro každou modifikaci). Uvedené naměřené a dopočítané hodnoty byly převzaty ze Zprávy z měření materiálů FINET [13].

Sledovanými parametry byla vnitřní rezistivita  $\rho_v$ , polarizační indexy  $p_{i1}$ ,  $p_{i10}$  a ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$ . Hodnoty vnitřní rezistivity  $\rho_v$  a polarizačních indexů  $p_i$  byly získány při teplotě cca 20 °C. Měření ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  proběhlo rovněž při teplotě cca 20 °C a frekvenci 50 Hz. [13]

Pro určení vnitřní rezistivity a polarizačních indexů se využívají hodnoty absorpčního proudu. Pro jejich změření byla použita běžná voltampérová metoda zjišťování odporu. Při jmenovitém napětí 500V byl automatizovaně, prostřednictvím pikoampérmetru se zdrojem KEITHLEY a speciálního stíněného elektrodového systému téhož výrobce, měřen proud procházející vzorkem. [13] Střední hodnoty z pěti vzorků jsou uvedeny v Tab. 5.5. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v Příloze E.

Tab. 5.5 Střední hodnoty absorpčního proudu [13]

	Absorpční proud [A]						
	max	min	v 15. s	v 60. s	v 10. min	v 60. min	v 100. min
Neřaděný epoxid	2,14E-10	8,65E-12	5,03E-11	3E-11	1,55E-11	9,78E-12	8,69E-12
Řaděný epoxid	6,11E-07	5,32E-07	5,47E-07	5,63E-07	5,92E-07	5,83E-07	5,76E-07

### 5.2.1 Vnitřní rezistivita

Vnitřní rezistivita  $\rho_V$  je poměr intenzity stejnosměrného elektrického pole a hustoty ustáleného proudu uvnitř elektroizolačního materiálu. Udává se v  $\Omega \cdot m$ . [6]

Po přepočítání hodnot izolačního odporu s využitím hodnot absorpčních proudů naměřených v ustáleném stavu (po 100 min.), s přihlédnutím k rozměrům použitého stíněného tří-elektrodového měřicího systému a tloušťky vzorků změřené v pěti bodech, byla podle vzorce (1) spočtena vnitřní rezistivita  $\rho_V$  [ $\Omega \cdot m$ ].

$$\rho_V = R_X \cdot \frac{A}{h} \quad (1)$$

- kde
- $\rho_V$  je vnitřní rezistivita [ $\Omega \cdot m$ ]
  - $R_X$  je vnitřní odpor [ $\Omega$ ]
  - $A$  je efektivní plocha měrné elektrody [ $m^2$ ]
  - $h$  je průměrná tloušťka zkušební vzorku [m]

V Tab. 5.6 jsou uvedeny střední hodnoty vnitřní rezistivity, vnitřního odporu a tloušťky vzorku, naměřené hodnoty pro všechny jednotlivé vzorky jsou opět uvedeny v Příloze E.

Tab. 5.6 Střední hodnoty vnitřní rezistivity, vnitřního odporu a tloušťky testovaného materiálu [13]

	$\bar{\rho}_V$ [ $\Omega \cdot m$ ]	$\bar{h}$ [mm]	$\bar{R}_X$ [ $\Omega$ ]
Finet s neřaděným epoxidem	4,51E+13	1,71	6,06E+13
Finet s řaděným epoxidem	1,23E+09	1,94	1,45E+09

### 5.2.2 Polarizační index

Další velmi využívaným parametrem, který lze získat z absorpčních proudů, je polarizační index. Ty pro popis stavu materiálu využívají časovou proměnnost absorpčního proudu. Jednominutový polarizační index  $p_{i1}$  vyjadřuje poměr absorpčních proudů v 15. a 60. sekundě po přiložení napětí, desetiminutový polarizační index  $p_{i10}$  vyjadřuje poměr proudů v 1. a 10. minutě. Jsou to bezrozměrná čísla. [6]

V *Tab. 5.7* jsou uvedeny střední hodnoty polarizačních indexů  $p_{i1}$  a  $p_{i10}$  finetů s neřaděnou a s řaděnou epoxidovou pryskyřicí. Polarizační indexy všech vzorků jsou opět uvedeny v *Příloze E*.

*Tab. 5.7 Střední hodnoty polarizačních indexů  $p_{i1}$  a  $p_{i10}$  [13]*

	$\overline{p_{i1}}$	$\overline{p_{i10}}$
Finet s neřaděným epoxidem	1,68	1,93
Finet s řaděným epoxidem	0,97	0,95

### 5.2.3 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel  $tg \delta$  [-] popisuje, kolik elektrické energie se v izolantu po zatížení elektrickým polem změnil na nežádoucí tepelnou energii, tzv. dielektrické ztráty. [6]

Ztrátový činitel  $tg \delta$  byl měřen na poloautomatickém zařízení HighVolt/LDIC. Pro každý vzorek byla zjišťována jedna hodnota při běžné pokojové teplotě a napětí 500 V s využitím tříelektrodového systému jmenovitého průměru 50 mm. [13]

Naměřené hodnoty pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v *Příloze E*, v následující *Tab. 5.8* jsou uvedeny střední hodnoty ztrátového činitele pro finet s řaděným a neřaděným epoxidem.

*Tab. 5.8 Střední hodnoty ztrátového činitele  $tg \delta$  [13]*

	$\overline{tg \delta}$
Finet s neřaděným epoxidem	1,02E-02
Finet s řaděným epoxidem	5,51E-01

### 5.3 Vyhodnocení výsledků

Pro vyhodnocení zkoušky nasákavosti mají pro nás největší výpovědní hodnotu hodnoty získané při měrném tlaku  $p = 0,4$  MPa. U neředěného epoxidu byla nasákavost pouze 58,5 %, u ředěného epoxidu byla nasákavost větší (77 % a 71,5 %). V porovnání s klasickou metodou, kdy se finet před ovinutím zcela prosytí, je nasákavost jak u neředěného tak i ředěného epoxidu nedostačující. Na mezicívkové vložky působí ještě větší síly, než odpovídá zkoušenému měrnému tlaku, a tak by byla celková nasákavost ještě menší.

Při zkoumání elektrických vlastností vyšla hodnota vnitřní rezistivity u finetu s neředěným epoxidem  $\rho_V = 4,51E+13$ , u finetu s ředěným epoxidem  $\rho_V = 1,23E+09$ . Obecně lze u dobrých izolačních materiálů očekávat hodnotu vnitřní rezistivity v řádu  $10^{14} \Omega \cdot m$  [13]. Vidíme tedy, že z hlediska vnitřní rezistivity je finet s neředěným epoxidem vyhovující, ale finet s ředěným epoxidem je zcela nevyhovující. Hodnoty polarizačních indexů vyšly u finetu s neředěným epoxidem  $p_{i1} = 1,68$ , resp.  $p_{i10} = 1,93$ , u finetu s ředěným epoxidem  $p_{i1} = 0,97$ , resp.  $p_{i10} = 0,95$ . V praxi se jako dobrý bere materiál, kde se polarizační indexy pohybují v rozmezí 3-5 [13]. Finet s neředěným epoxidem můžeme považovat za vyhovující, byť podprůměrný, finet s ředěným epoxidem ovšem za zcela nevyhovující. Posledním parametrem byl ztrátový činitel  $\tan \delta$ . U dobrých izolačních materiálů lze hodnoty  $\tan \delta$  při specifikovaných podmínkách očekávat v řádu  $10^{-3}$  [13]. Vidíme, že finet s neředěným epoxidem můžeme považovat za vyhovující, byť průměrný, finet s ředěným epoxidem ovšem za zcela nevyhovující.

Z hlediska elektrických parametrů je finet s neředěnou epoxidovou pryskyřicí průměrný, ale vyhovující, avšak nedosahuje dostatečné nasákavosti. Finet s ředěnou epoxidovou pryskyřicí měl sice o něco větší nasákavost, ale ta stejně není dostačující. Navíc z hlediska elektrických parametrů se jeví jako zcela nevyhovující. Z těchto důvodů je tedy zamýšlený nový způsob impregnace finetu pro použití u mezicívkových vložek nevhodný.



## **Závěr**

Cílem této diplomové práce bylo prověřit vlastnosti mezicívkových vložek připravených s použitím různým způsobem proimpregnovaného materiálu.

V teoretické části je popsána výroba a montáž statorového vinutí velkých elektrických strojů se zaměřením na mezicívkové vložky v jejich čelech. Dále jsou v ní popsány nové možnosti přípravy mezicívkových vložek.

Praktická část je rozdělena na dvě části. V první byly prověřeny elektrické vlastnosti vložek s různě prosyceným finetem. Z hlediska částečných výbojů nemají vložky s různě prosyceným finetem vliv. Velký vliv však mají na ztrátový činitel, kdy i při relativně nízkém napětí vyšly ztráty u vložek s nastříkaným a suchým finetem ztelně větší než u vložek se zcela prosyceným finetem.

Ve druhé části byla provedena zkouška nasákavosti finetů, která měla zjistit, zda je vhodné při opravách vkládat mezi tyče vinutí sklotextitové vložky ovinuté suchým finetem a naimpregnovat je nastříkáním až po založení, oproti starému způsobu kdy se vkládají sklotextitové vložky obalené již zcela prosyceným finetem. Z výsledků je patrné, že při použití neředěné epoxidové pryskyřice je prosycenost finetu nedostačující. U ředěné epoxidové pryskyřice byla prosycenost o něco větší, ale elektrické vlastnosti se výrazně zhoršily.

Výsledkem této práce tedy je, že je vhodné používat mezizávitové vložky se zcela prosyceným finetem, u kterého dojde k proimpregnování ještě před založením mezi tyče vinutí.

## Použitá literatura

- [1] UHLÍŘ, Ivan et al. *Elektrické stroje a pohony*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 120 s. ISBN 80-01-02482-2.
- [2] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 311 s. ISBN 80-01-02109-2.
- [3] VESELÝ, Ondřej. *Aspekty technologie oprav čel vinutí velkých točivých strojů*. Plzeň, 2011. 80 s. Diplomová práce. FEL ZČU Plzeň.
- [4] ROK, Michal. *Aspekty oprav čel vinutí velkých točivých strojů*. Plzeň, 2012. 72 s. Diplomová práce. FEL ZČU Plzeň.
- [5] SEQUENZ, Heinrich et al. *Technologie vinutí elektrických strojů točivých*. Praha: SNTL, 1980, 312 s.
- [6] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 240 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [7] LÁBADI, J.; KŘELOVEC, Z. Technologický postup – výměna vinutí. Plzeň: 1. SERVIS - ENERGO, s.r.o.
- [8] fotodokumentace spol. 1. SERVIS-ENERGO s.r.o.
- [9] Sklotextit. *VSS plasty* [online]. 2008 [cit. 2012-11-19]. Dostupné z: <http://www.vss-plasty.cz/elektro-izolacni-materialy/sklotextit.html>
- [10] Sklotextit (Texgumoid) - tvrzená skelná tkanina. *Hansanet* [online]. [cit. 2012-11-19]. Dostupné z: <http://www.rempo.cz/oddeleni/108/Sklotextit-%28Texgumoid%29---tvrzena-skelna-tkanina.aspx>
- [11] *1.SERVIS-ENERGO* [online]. 2013 [cit. 2013-02-19]. Dostupné z: <http://www.servisenergo.cz/profil.php>
- [12] MENTLÍK, Václav, Josef PIHERA, Radek POLANSKÝ, Pavel PROSR a Pavel TRNKA. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [13] MENTLÍK, Václav a Jaroslav BARTOŇ. *Zpráva z měření materiálů FINET*. FEL ZČU Plzeň, 15. 3. 2013.

## Příloha A: Naměřené hodnoty mezicívkových vložek

Tab. P1-1 Naměřené hodnoty  $Q_{iec}$  a statistické hodnoty měření bez vzorku

$Q_{iec}$ [nC]	Číslo měření				$\overline{Q_{iec}}$ [nC]	s [nC]	v [%]	$u_A$ [nC]	Med [nC]	Min [nC]	Max [nC]
U [kV]	1	2	3	4							
9	4,39	4,12	4,76	3,82	4,27	0,3462	8,10	0,3398	4,26	3,82	4,76
8	4,52	4,34	4,97	3,92	4,44	0,3767	8,49	0,3698	4,43	3,92	4,97
7	4,72	4,51	5,15	4,25	4,66	0,3295	7,07	0,3234	4,62	4,25	5,15
6	4,29	4,07	5,11	3,73	4,30	0,5084	11,82	0,4990	4,18	3,73	5,11
5	3,61	3,45	3,93	3,42	3,60	0,2024	5,62	0,1987	3,53	3,42	3,93
4	0,62	0,65	0,63	0,62	0,63	0,0122	1,94	0,0120	0,63	0,62	0,65

Tab. P1-2 Naměřené hodnoty  $Q_{iec}$  a statistické hodnoty zcela prosyceného vzorku

$Q_{iec}$ [nC]	Číslo měření					$\overline{Q_{iec}}$ [nC]	s [nC]	v [%]	$u_A$ [kV]	Med [nC]	Min [nC]	Max [nC]
U [kV]	1	2	3	4	5							
9	3,63	3,75	3,89	3,96	3,98	3,84	0,1332	3,47	0,0932	3,89	3,63	3,98
8	3,85	3,92	3,82	4,19	4,16	3,99	0,1564	3,92	0,1095	3,92	3,82	4,19
7	4,32	4,24	4,05	4,59	4,45	4,33	0,1836	4,24	0,1285	4,32	4,05	4,59
6	4,52	4,34	4,18	4,65	4,17	4,37	0,1886	4,31	0,1320	4,34	4,17	4,65
5	3,68	3,38	3,39	3,67	3,76	3,58	0,1591	4,45	0,1114	3,67	3,38	3,76
4	0,55	0,52	0,53	0,63	0,59	0,56	0,0408	7,23	0,0286	0,55	0,52	0,63

Tab. P1-3 Naměřené hodnoty  $Q_{iec}$  a statistické hodnoty prolakovaného vzorku

$Q_{iec}$ [nC]	Číslo měření					$\overline{Q_{iec}}$ [nC]	s [nC]	v [%]	$u_A$ [kV]	Med [nC]	Min [nC]	Max [nC]
U [kV]	1	2	3	4	5							
9	4,11	4,36	4,02	4,11	4,15	4,15	0,1133	2,73	0,0793	4,11	4,02	4,36
8	4,04	4,19	4,23	4,39	4,16	4,20	0,1134	2,70	0,0794	4,19	4,04	4,39
7	4,63	4,62	4,64	4,69	4,32	4,58	0,1322	2,89	0,0925	4,63	4,32	4,69
6	4,65	4,56	4,86	4,33	4,26	4,53	0,2178	4,80	0,1524	4,56	4,26	4,86
5	3,91	3,76	3,89	3,45	3,49	3,70	0,1951	5,27	0,1366	3,76	3,45	3,91
4	0,56	0,58	0,64	0,63	0,64	0,61	0,0335	5,49	0,0234	0,63	0,56	0,64

Tab. P1-4 Naměřené hodnoty  $Q_{iec}$  a statistické hodnoty suchého vzorku

$Q_{iec}$ [nC]	Číslo měření					$\overline{Q_{iec}}$ [nC]	s [nC]	v [%]	$u_A$ [kV]	Med [nC]	Min [nC]	Max [nC]
U [kV]	1	2	3	4	5							
9	4,69	4,43	4,29	3,8	3,59	4,16	0,4063	9,77	0,2844	4,29	3,59	4,69
8	4,98	4,47	4,39	4,14	4,1	4,42	0,3155	7,14	0,2209	4,39	4,1	4,98
7	5,48	4,68	4,54	3,94	4,02	4,53	0,5538	12,22	0,3876	4,54	3,94	5,48
6	4,86	3,92	3,77	3,45	3,62	3,92	0,4933	12,57	0,3453	3,77	3,45	4,86
5	4,13	3,71	3,32	3,31	3,22	3,54	0,3408	9,63	0,2386	3,32	3,22	4,13
4	0,63	0,62	0,63	0,45	0,52	0,57	0,0729	12,80	0,0511	0,62	0,45	0,63

Tab. P1-5 Naměřené hodnoty zapalovacích a zhášecích napětí při měření bez vzorku

			Počet měření					Aritmetický průměr
			1	2	3	4	5	
Číslo měření	1	Ui [kV]	3,80	3,62	3,78	3,62	3,87	<b>3,74</b>
		Ue [kV]	3,41	3,35	3,37	3,45	3,43	<b>3,40</b>
	2	Ui [kV]	3,79	3,75	3,90	3,73	3,93	<b>3,82</b>
		Ue [kV]	3,46	3,47	3,41	3,51	3,58	<b>3,49</b>
	3	Ui [kV]	3,75	3,63	3,69	3,74	3,73	<b>3,71</b>
		Ue [kV]	3,46	3,44	3,40	3,41	3,49	<b>3,44</b>
	4	Ui [kV]	3,84	3,71	3,72	3,82	3,73	<b>3,76</b>
		Ue [kV]	3,33	3,42	3,48	3,39	3,45	<b>3,41</b>

Tab. P1-6 Průměrné a statistické hodnoty zapalovacího a zhášecího napětí pro měření bez vzorku

	Aritmetický průměr	s [kV]	v [%]	u <sub>A</sub> [kV]
Ui [kV]	3,76	0,0412	1,10	0,0404
Ue [kV]	3,44	0,0322	0,94	0,0316

Tab. P1-7 Naměřené hodnoty zapalovacích a zhášecích napětí prosyceného vzorku

			Počet měření					Aritmetický průměr
			1	2	3	4	5	
Číslo měření	1	Ui [kV]	3,92	3,71	3,67	3,71	3,74	<b>3,75</b>
		Ue [kV]	3,15	3,10	3,35	3,28	3,37	<b>3,25</b>
	2	Ui [kV]	3,82	3,78	3,76	3,74	3,75	<b>3,77</b>
		Ue [kV]	3,43	3,40	3,39	3,42	3,32	<b>3,39</b>
	3	Ui [kV]	3,68	3,59	3,76	3,64	3,62	<b>3,66</b>
		Ue [kV]	3,39	3,32	3,36	3,33	3,38	<b>3,36</b>
	4	Ui [kV]	3,76	3,70	3,69	3,62	3,70	<b>3,69</b>
		Ue [kV]	3,35	3,44	3,36	3,41	3,34	<b>3,38</b>
	5	Ui [kV]	3,70	3,68	3,83	3,79	3,75	<b>3,75</b>
		Ue [kV]	3,40	3,45	3,47	3,43	3,41	<b>3,43</b>

Tab. P1-8 Průměrné a statistické hodnoty zapalovacího a zhášecího napětí prosyceného vzorku

	Aritmetický průměr	s [kV]	v [%]	u <sub>A</sub> [kV]
Ui [kV]	3,72	0,0418	1,12	0,0292
Ue [kV]	3,36	0,0612	1,82	0,0428

Tab. P1-9 Naměřené hodnoty zapalovacích a zhášecích napětí prolakovaného vzorku

			Počet měření					Aritmetický průměr
			1	2	3	4	5	
Číslo měření	1	Ui [kV]	3,95	3,83	3,66	3,76	3,86	<b>3,81</b>
		Ue [kV]	3,49	3,33	3,45	3,44	3,32	<b>3,41</b>
	2	Ui [kV]	3,80	3,98	3,84	3,92	3,72	<b>3,85</b>
		Ue [kV]	3,51	3,39	3,46	3,38	3,50	<b>3,45</b>
	3	Ui [kV]	3,92	3,77	3,86	3,79	3,68	<b>3,80</b>
		Ue [kV]	3,41	3,43	3,49	3,50	3,55	<b>3,48</b>
	4	Ui [kV]	3,71	3,74	3,81	3,75	3,85	<b>3,77</b>
		Ue [kV]	3,23	3,48	3,52	3,51	3,47	<b>3,44</b>
	5	Ui [kV]	4,01	3,84	3,96	3,88	3,92	<b>3,92</b>
		Ue [kV]	3,48	3,55	3,58	3,54	3,47	<b>3,52</b>

Tab. P1-10 Průměrné a statistické hodnoty zapalovacího a zhášecího napětí prolakovaného vzorku

	Aritmetický průměr	s [kV]	v [%]	u <sub>A</sub> [kV]
Ui [kV]	3,83	0,0515	1,34	0,0361
Ue [kV]	3,46	0,0393	1,14	0,0275

Tab. P1-11 Naměřené hodnoty zapalovacích a zhášecích napětí suchého vzorku

			Počet měření					Aritmetický průměr
			1	2	3	4	5	
Číslo měření	1	Ui [kV]	3,93	3,69	3,71	3,70	3,81	<b>3,77</b>
		Ue [kV]	3,28	3,44	3,36	3,40	3,43	<b>3,38</b>
	2	Ui [kV]	3,87	3,74	3,72	3,86	3,73	<b>3,78</b>
		Ue [kV]	3,41	3,38	3,37	3,55	3,42	<b>3,43</b>
	3	Ui [kV]	3,80	3,79	3,81	3,68	3,75	<b>3,77</b>
		Ue [kV]	3,39	3,43	3,44	3,41	3,38	<b>3,41</b>
	4	Ui [kV]	3,84	3,70	3,80	3,75	3,85	<b>3,79</b>
		Ue [kV]	3,41	3,44	3,51	3,48	3,32	<b>3,43</b>
	5	Ui [kV]	3,74	3,69	3,80	3,71	3,69	<b>3,73</b>
		Ue [kV]	3,32	3,34	3,45	3,37	3,42	<b>3,38</b>

Tab. P1-12 Průměrné a statistické hodnoty zapalovacího a zhášecího napětí suchého vzorku

	Aritmetický průměr	s [kV]	v [%]	u <sub>A</sub> [kV]
Ui [kV]	3,77	0,0220	0,58	0,0154
Ue [kV]	3,41	0,0217	0,64	0,0152

Tab. P1-13 Naměřené hodnoty  $\operatorname{tg} \delta$  prosyceného vzorku

číslo měření	$\operatorname{tg} \delta$ [-]
1	0,00290
2	0,00240
3	0,00275
4	0,00287
5	0,00273
6	0,00300
7	0,00300
8	0,00277
9	0,00274
10	0,00262

Tab. P1-14 Střední hodnota  $\overline{\operatorname{tg} \delta}$  prosyceného vzorku a její statistické parametry

$\overline{\operatorname{tg} \delta}$ [-]	0,00278
s [-]	0,00017
v [%]	6,18
$u_A$ [-]	0,00006
Min [-]	0,00240
Max [-]	0,00300
Medián [-]	0,00276

Tab. P1-15 Naměřené hodnoty  $\operatorname{tg} \delta$  nastříkaného vzorku

číslo měření	$\operatorname{tg} \delta$ [-]
1	0,02740
2	0,02370
3	0,01750
4	0,01113
5	0,02300
6	0,03500
7	0,01978
8	0,01751
9	0,03452
10	0,02177

Tab. P1-16 Střední hodnota  $\overline{\operatorname{tg} \delta}$  nastříkaného vzorku a její statistické parametry

$\overline{\operatorname{tg} \delta}$ [-]	0,02313
s [-]	0,00714
v [%]	30,86
$u_A$ [-]	0,00238
Min [-]	0,01113
Max [-]	0,03500
Medián [-]	0,02239

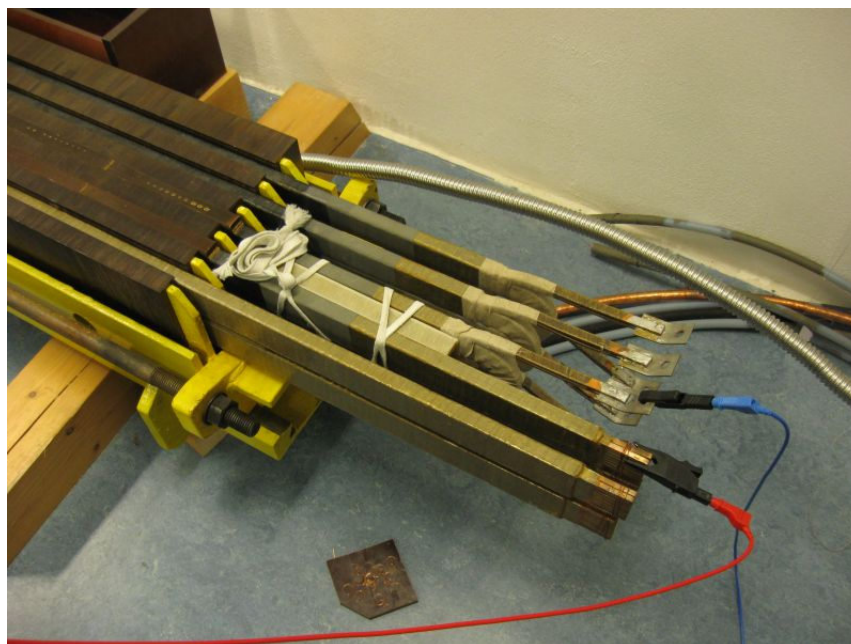
Tab. P1-17 Naměřené hodnoty  $\operatorname{tg} \delta$  suchého vzorku

číslo měření	$\operatorname{tg} \delta$ [-]
1	0,39784
2	0,40317
3	0,47477
4	0,48790
5	0,51856
6	0,44892
7	0,48333
8	0,47720
9	0,48331
10	0,39973

Tab. P1-18 Střední hodnota  $\overline{\operatorname{tg} \delta}$  suchého vzorku a její statistické parametry

$\overline{\operatorname{tg} \delta}$ [-]	0,45747
s [-]	0,04074
v [%]	8,90
$u_A$ [-]	0,01358
Min [-]	0,39784
Max [-]	0,51856
Medián [-]	0,47599

## Příloha B: Fotodokumentace měření částečných výbojů a ztrátového činitele



*Obr. P2-1 Uložení vzorku v laboratorním modelu vinutí při měření částečných výbojů*



*Obr. P2-2 Přípravek na výrobu zkušebních vzorků*



Obr. P2-3 Zavěšení zkušební vzorku při měření ztrátového činitele



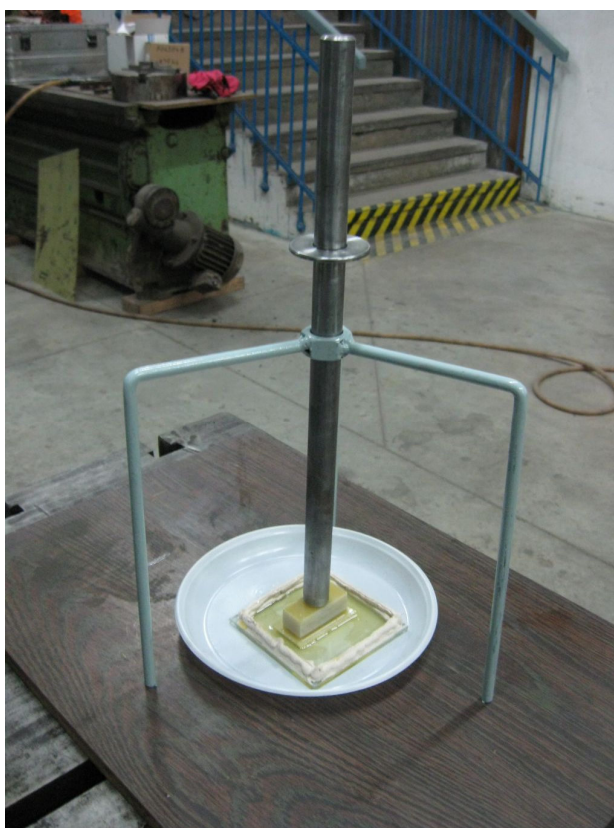
Obr. P2-4 Čtyřkapacitní Scheringův můstek pro měření ztrátového činitele



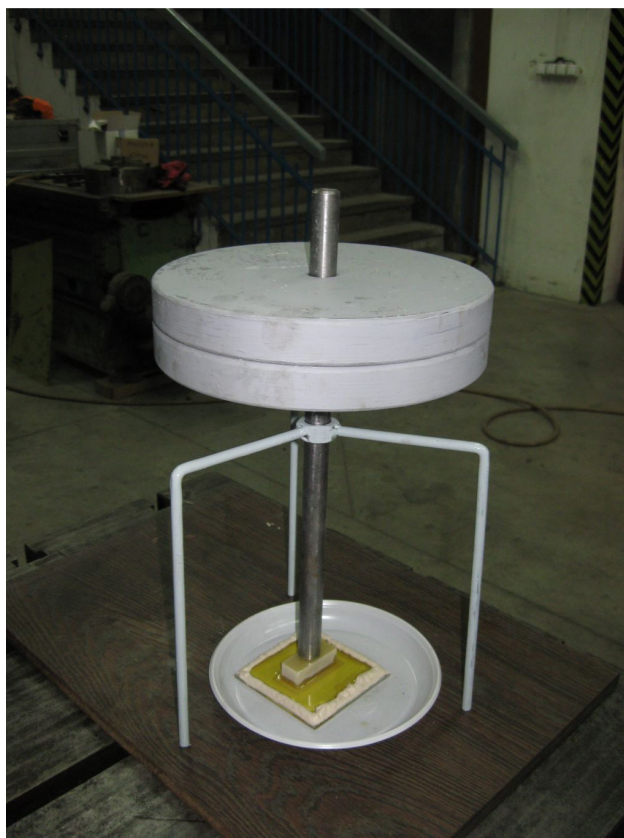
## Příloha C: Fotodokumentace zkoušky nasákavosti



*Obr. P3-1 Zkušební vzorek finetu*



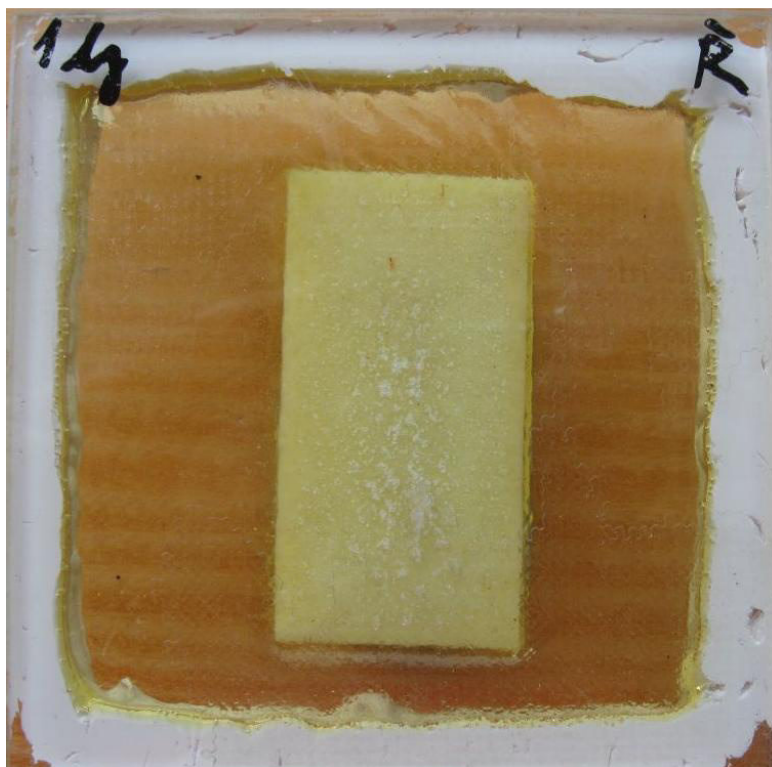
*Obr. P3-2 Zkouška se zátěží 1 kg*



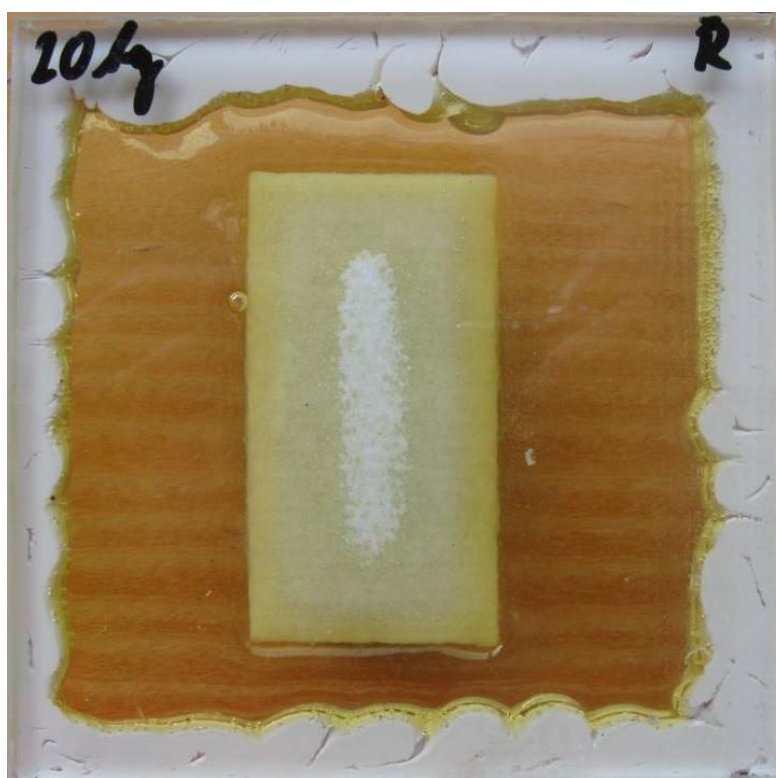
Obr. P3-3 Zkouška se zátěží 20 kg



Obr. P3-4 Zkouška se zátěží 40 kg

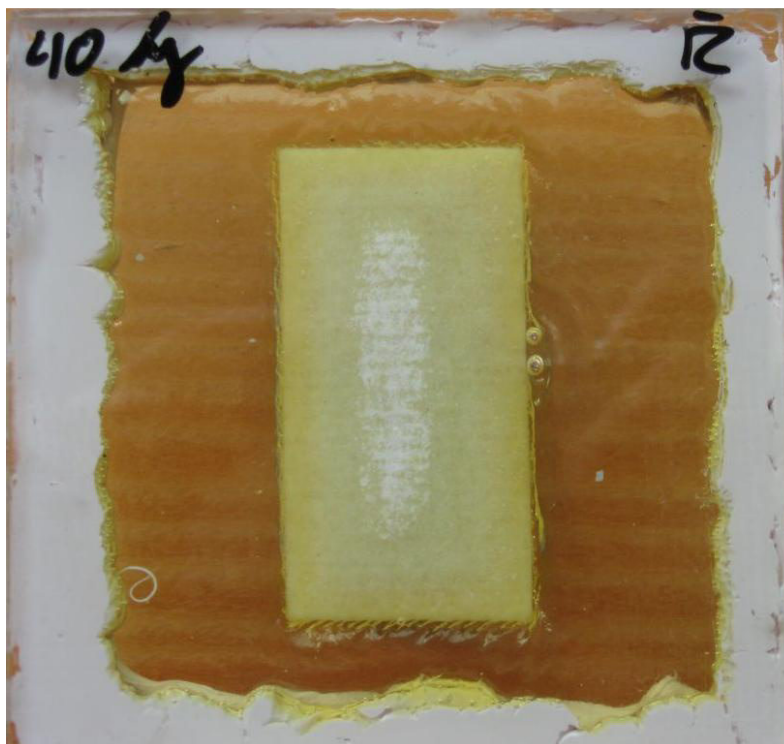


Obr. P3-5 Nasákavost vzorku: ředěno, zalito do výšky finetu, zátěž 1 kg

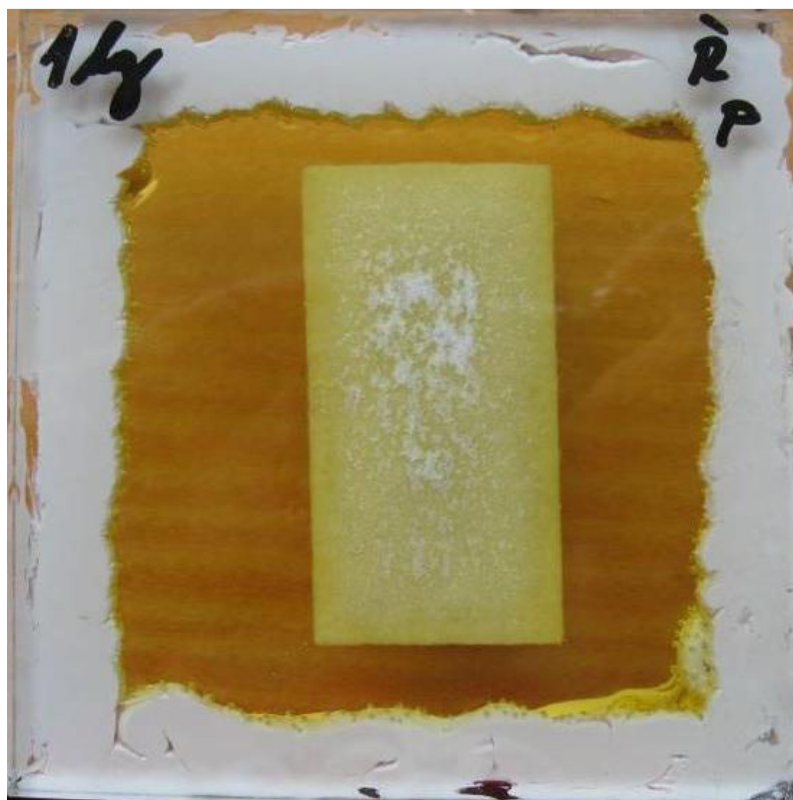


Obr. P3-6 Nasákavost vzorku: ředěno, zalito do výšky finetu, zátěž 20 kg

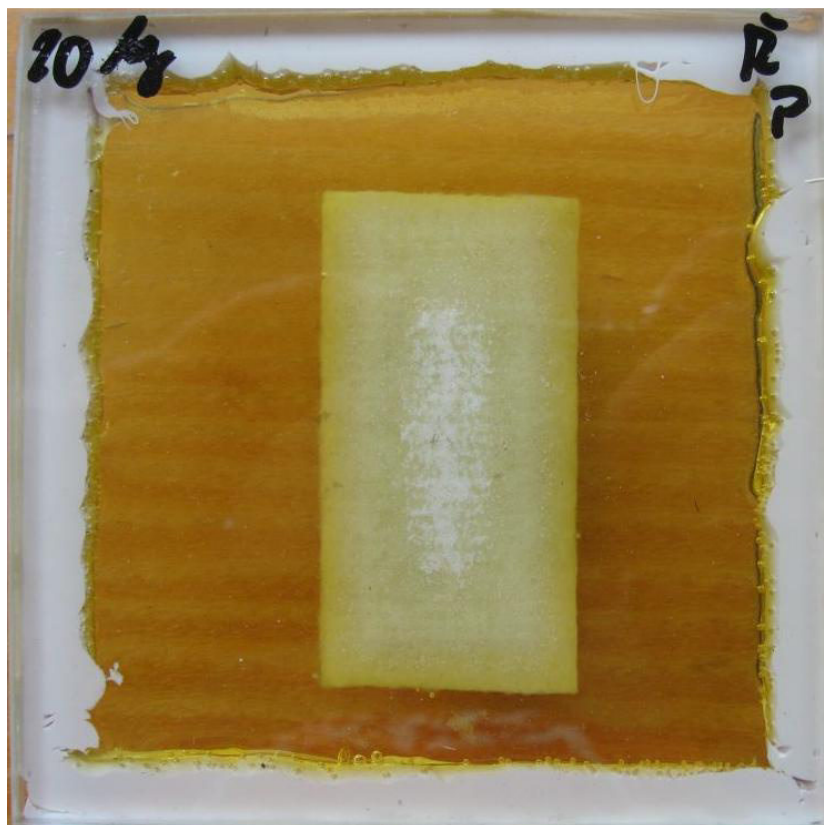




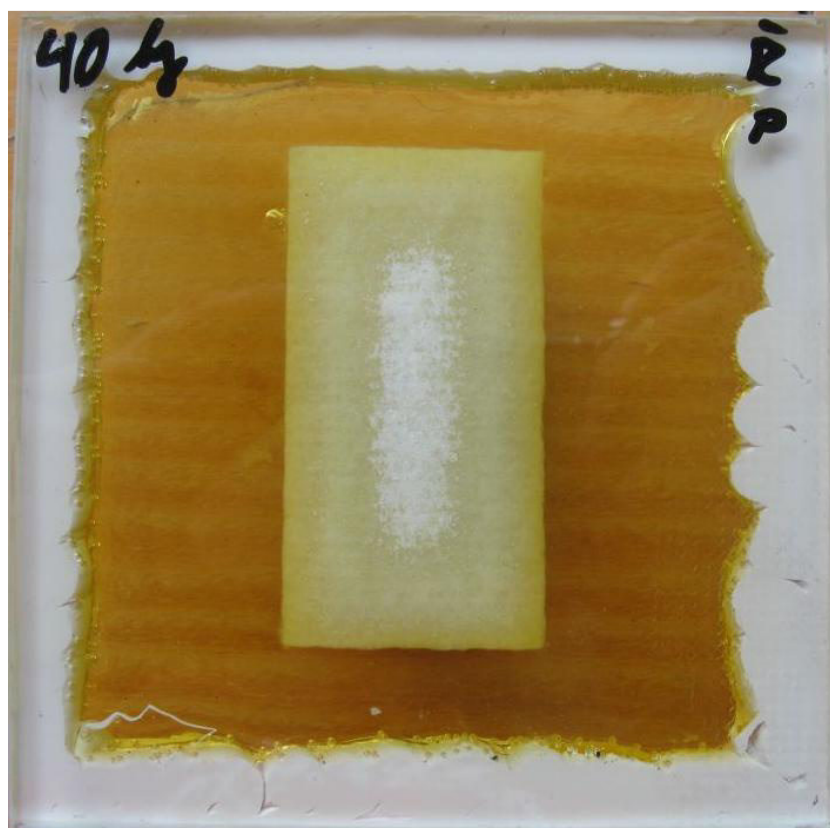
Obr. P3-7 Nasákavost vzorku: ředěno, zalito do výšky finetu, zátěž 40 kg



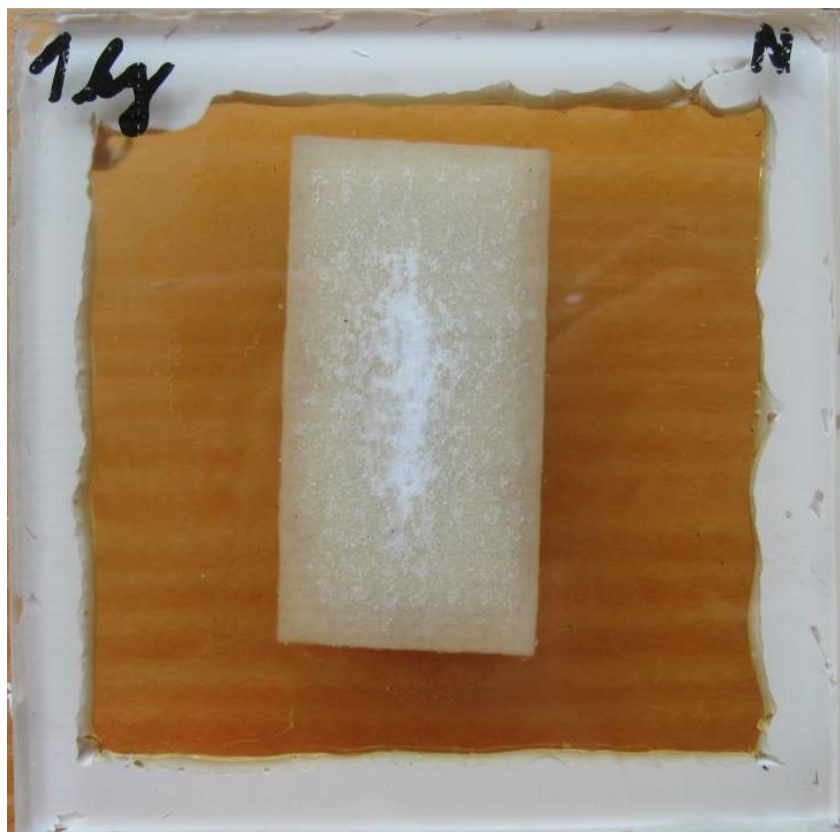
Obr. P3-8 Nasákavost vzorku: ředěno, zalito zcela, zátěž 1 kg



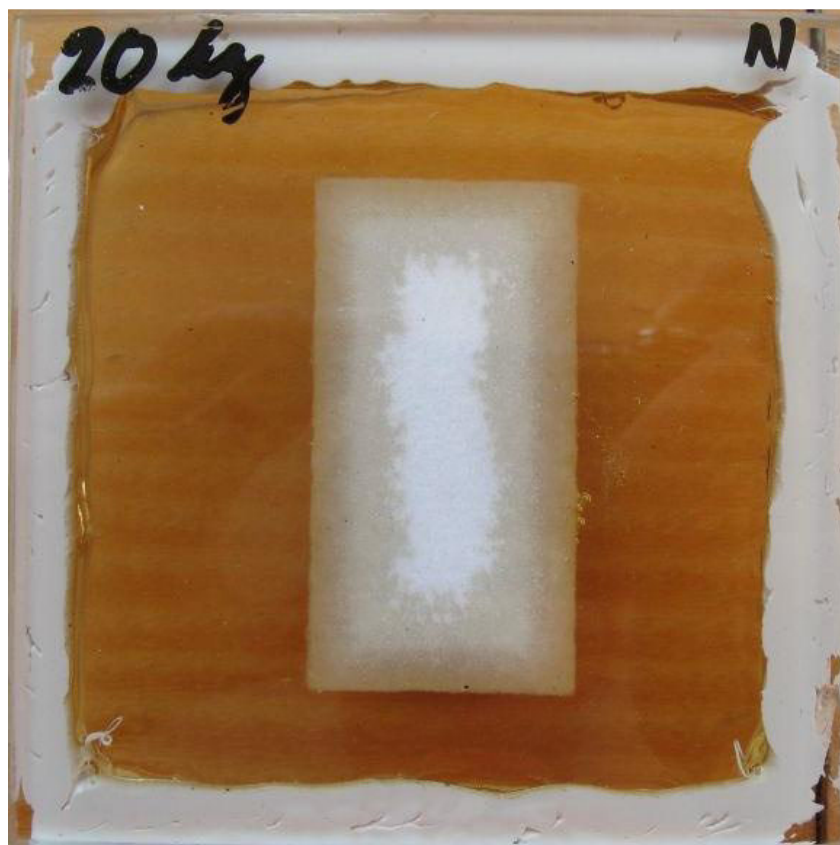
Obr. P3-9 Nasákavost vzorku: ředěno, zalito zcela, zátěž 20 kg



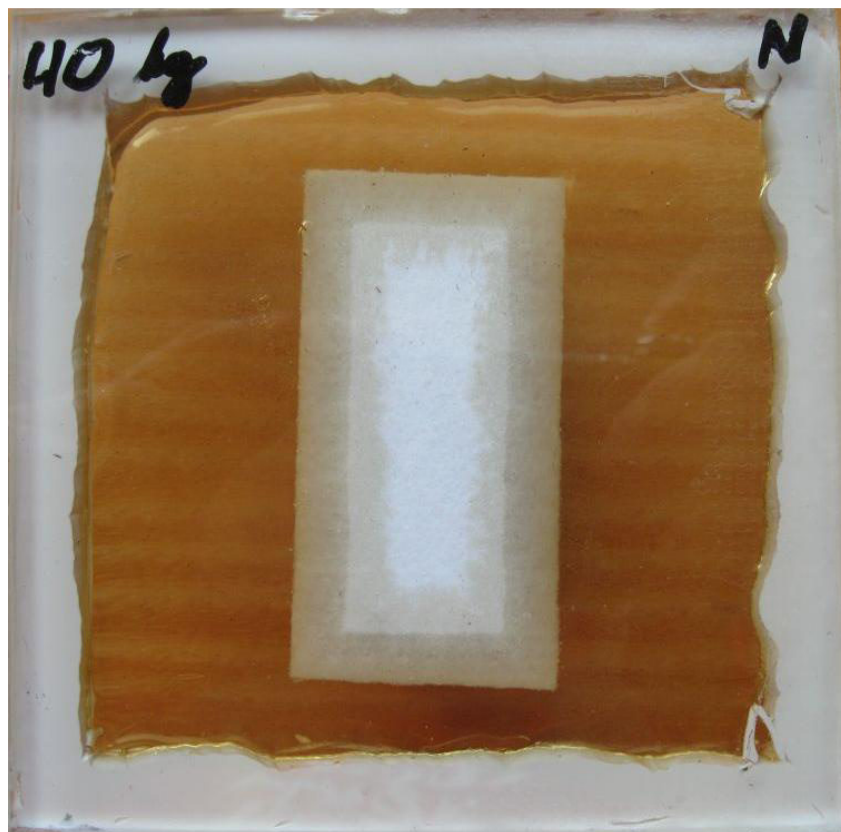
Obr. P3-10 Nasákavost vzorku: ředěno, zalito zcela, zátěž 40 kg



Obr. P3-11 Nasákavost vzorku: neředěno, zalito zcela, zátěž 1 kg



Obr. P3-12 Nasákavost vzorku: neředěno, zalito zcela, zátěž 20 kg



Obr. P3-13 Nasákavost vzorku: neředěno, zalito zcela, zátěž 40 kg



**Příloha D: Katalogový list použitého finetu FINET PES2****FINET PES 2**

PNJ 486-80-96

**POPIS** Vpichovaná filtrační textilie s podkladovou tkaninou, 100% polyester, vstupní strana tepelně upravená.  
**DESCRIPTION** Needled felt for filtration with scrim reinforcement, 100% polyester, top-side treated.  
**BESCHREIBUNG** Genadelte Filtrationstextilie mit Gewebeeinlage, 100% Polyester, Oberfläche geglättet.

**BARVA**  
**COLOUR**  
**FARBE**

bílá  
 white  
 weiß

**PLOŠNÁ HMOTNOST - ČSN EN 12127**  
**WEIGHT AREA**  
**GEWICHT**

500 g/m<sup>2</sup>

**PEVNOST PODÉLNÁ - ČSN 80 0812**  
**TENSILE STRENGTH - A DIRECTION**  
**REISSFESTIGKEIT - RICHTUNG B**

min. 1 000 N/5 cm

**PEVNOST PŘÍČNÁ**  
**TENSILE STRENGTH - B DIRECTION**  
**REISSFESTIGKEIT - RICHTUNG B**

min. 900 N/5 cm

**TAŽNOST PODÉLNÁ - ČSN 80 0812**  
**EXTENTION AT BREAK - A DIRECTION**  
**REISSDEHNUNG - RICHTUNG A**

max. 50%

**TAŽNOST PŘÍČNÁ**  
**EXTENTION AT BREAK - B DIRECTION**  
**REISSDEHNUNG - RICHTUNG B**

max. 55%

**PRODYŠNOST PŘI 200 Pa - ČSN EN ISO 9237**  
**PERMEABILITY AT 200 Pa**  
**LUFTDURCHLÄSSIGKEIT BEI 200 Pa**

min. 200 l/m<sup>2</sup>.s

**TEPELNÁ ODOLNOST**  
**WORKING TEMPERATURE**  
**TEMPERATURBESTÄNDIGKEIT BEI DAUEREINWIRKUNG**

max. 150 °C

**DODÁVKY****DELIVERY****LIEFERUNGEN**

Standardní rozměr je 40,- x 1,40-1,45 m. Teoretická váha jedné role je 28 kg.

Délka 40,- m není podmínkou. Balení - folie, juta.

Tento materiál je především určen k šití filtračních útvarů dle přání zákazníka (např. filtr. hadice, filtr. vložky, atd.)

MITOP, akciová společnost MIMOŇ, Pertoltická 142/IV, 471 24 MIMOŇ, CZ

Telefon : ( 00420, ) 0425 862241

FAX : (0042) 0425 862160

484

484



## Příloha E: Naměřené a vypočtené hodnoty ze Zprávy z měření materiálů FINET

Modifikace I – Finet s neředěnou epoxidovou pryskyřicí

Modifikace II – Finet s ředěnou epoxidovou pryskyřicí

Tab. P5-1 Naměřené hodnoty absorpčního proudu

vzorek	Absorpční proud [A]						
	max	Min	v 15.s	v 60.s	v 10.min	v 60.min	v 100.min
I-1	2,19E-10	1,14E-11	5,83E-11	3,53E-11	1,85E-11	1,24E-11	1,14E-11
I-2	4,77E-10	1E-11	5,32E-11	3,13E-11	1,65E-11	1,1E-11	1E-11
I-3	1,26E-10	6,98E-12	4,82E-11	2,88E-11	1,47E-11	8,49E-12	7,12E-12
I-4	1,14E-10	6,07E-12	4,19E-11	2,46E-11	1,24E-11	7,31E-12	6,08E-12
I-5	1,32E-10	8,74E-12	4,98E-11	2,98E-11	1,55E-11	9,69E-12	8,79E-12
<b>Průměr mod. I</b>	<b>2,14E-10</b>	<b>8,65E-12</b>	<b>5,03E-11</b>	<b>3,00E-11</b>	<b>1,55E-11</b>	<b>9,78E-12</b>	<b>8,69E-12</b>
II-1	1,49E-06	1,34E-06	1,39E-06	1,43E-06	1,49E-06	1,4E-06	1,36E-06
II-2	4,12E-07	2,82E-07	2,9E-07	3E-07	3,26E-07	3,88E-07	4,12E-07
II-3	7,11E-07	6,57E-07	6,72E-07	6,89E-07	7,11E-07	6,86E-07	6,76E-07
II-4	2,84E-07	2,38E-07	2,45E-07	2,56E-07	2,78E-07	2,77E-07	2,7E-07
II-5	1,62E-07	1,38E-07	1,39E-07	1,43E-07	1,54E-07	1,61E-07	1,61E-07
<b>Průměr mod. II</b>	<b>6,11E-07</b>	<b>5,32E-07</b>	<b>5,47E-07</b>	<b>5,63E-07</b>	<b>5,92E-07</b>	<b>5,83E-07</b>	<b>5,76E-07</b>

Tab. P5-2 Vnitřní rezistivita vzorků

Vzorek	rezistivita $\rho_v$ [ $\Omega \cdot m$ ]	tloušťka [mm]	R <sub>x</sub> [ $\Omega$ ]
I-1	3,29E+13	1,72	4,37E+13
I-2	3,72E+13	1,71	4,98E+13
I-3	5,27E+13	1,72	7,03E+13
I-4	5,93E+13	1,65	8,23E+13
I-5	4,34E+13	1,75	5,69E+13
<b>Průměr modifikace I</b>	<b>4,51E+13</b>	<b>1,71</b>	<b>6,06E+13</b>
II-1	3,04E+08	1,89	3,67E+08
II-2	1,06E+09	2,00	1,21E+09
II-3	6,23E+08	1,93	7,39E+08
II-4	1,56E+09	1,92	1,86E+09
II-5	2,61E+09	1,93	3,10E+09
<b>Průměr modifikace II</b>	<b>1,23E+09</b>	<b>1,94</b>	<b>1,45E+09</b>

Tab. P5-3 Polarizační indexy

Vzorek	$p_{i1}$	$p_{i10}$
I-1	1,65	1,91
I-2	1,70	1,90
I-3	1,67	1,95
I-4	1,71	1,98
I-5	1,67	1,93
<b>Průměr modifikace I</b>	<b>1,68</b>	<b>1,93</b>
II-1	0,97	0,96
II-2	0,97	0,92
II-3	0,98	0,97
II-4	0,96	0,92
II-5	0,97	0,93
<b>Průměr modifikace II</b>	<b>0,97</b>	<b>0,95</b>

Tab. P5-4 Ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$ 

Vzorek	$V_{\text{rms}}[\text{V}]$	$\text{tg } \delta$	$C_x \text{ (Parallel)}[\text{F}]$
I-1	506	1,01E-02	4,17E-11
I-2	507	1,06E-02	4,17E-11
I-3	504	9,72E-03	4,21E-11
I-4	509	9,65E-03	4,38E-11
I-5	504	1,11E-02	4,15E-11
<b>Průměr modifikace I</b>	<b>506</b>	<b>1,02E-02</b>	<b>4,22E-11</b>
II-1	504	4,79E-01	7,53E-11
II-2	505	6,54E-01	1,16E-10
II-3	510	5,43E-01	8,55E-11
II-4	510	5,90E-01	9,92E-11
II-5	506	4,91E-01	8,11E-11
<b>Průměr modifikace II</b>	<b>507</b>	<b>5,51E-01</b>	<b>9,14E-11</b>