

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studie antikoronových ochran u velkých točivých strojů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marek HAJNÝ**
Osobní číslo: **E11B0116P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Studie antikoronových ochran u velkých točivých 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. Popište výrobu izolace cívek
2. Shrňte důvody použití antikoronových ochran
3. Uveďte způsob eliminace částečných výbojů pomocí antikoronových ochran

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Mentlík V.: Dielektrické prvky a systémy, BEN - Technická literatura ISBN 80-7300-189-6, Praha 2006
2. Mentlík V. a kol.: Diagnostika elektrických zařízení, BEN - Technická literatura ISBN 978-80-7300-232-9, Praha 2008
3. Kučerová E.: Elektrotechnické materiály, ISBN 80-7082-940-0, Plzeň 2002
4. internetové zdroje

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Ondřej Krpal

Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Bakalářská práce se zaměřuje na problematiku vzniku částečných výbojů ve velkých točivých strojích a na jejich eliminaci. Práce v úvodu popisuje konstrukci vysokonapěťových točivých strojů a vznik částečných výbojů. Dále se práce zaměřuje na vznik výbojů jak v drážkách statorových vinutí, tak na výstupu z nich, a na jejich eliminaci pomocí vodivých a polovodivých ochran. Poslední část práce se zabývá měřením polovodivých ochran na tyčích. Tyto výsledky jsou poté porovnávány s měřením na sklotextitních trubkách.

Klíčová slova

Vodivé ochrany, polovodivé ochrany, izolační systém, částečné výboje, vinutí

Abstract

The bachelor's thesis is specialized to genesis partial discharges in high-voltage winding of rotate machine and their elimination. At the beginning, the thesis describes the construction of high-voltage rotate machine and genesis partial discharges. Next part of the thesis is specialized to genesis discharges in slots of the stator winding and output from the slot, and elimination using conductive and semi-conductive shields. Last part of the thesis is dealt to measurement semi-conductive protection applied to the bar. The results of measurement are compared with measurement semi-conductive protection applied to the sklotextit pipe.

Key words

Conductive coating, semi-conductive coating, insulation system, partial discharges, winding

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou 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 bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 5.6.2014

Marek Hajný

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Krpalovi za ochotné a vstřícné jednání, cenné profesionální rady při konzultacích a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	9
1 POPIS VYSOKONAPĚŤOVÉHO TOČIVÉHO STROJE	10
1.1 IZOLAČNÍ SYSTÉMY	13
1.1.1 <i>Systém VPI</i>	14
1.1.2 <i>Systém Resin-Rich</i>	15
1.2 MÍSTA VZNIKU ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	16
1.2.1 <i>Vnitřní výboje</i>	17
1.2.2 <i>Drážkové výboje</i>	18
1.2.3 <i>Povrchové výboje na koncích vinutí</i>	18
1.3 METODY MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	19
1.3.1 <i>Přímé metody</i>	19
1.3.2 <i>Globální metody</i>	19
1.4 DEGRADACE IZOLACE	19
1.5 ZPŮSOBY ELIMINACE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	21
2 ANTIKORONOVÉ OCHRANY	22
2.1 VODIVÉ OCHRANY	22
2.2 POLOVODIVÉ OCHRANY	23
2.3 APLIKACE POLOVODIVÝCH OCHRAN	24
3 MĚŘENÍ POLOVODIVÝCH OCHRAN	26
3.1 POUŽITÉ POLOVODIVÉ OCHRANY	26
3.2 POSTUP MĚŘENÍ	28
3.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	28
3.3.1 <i>ANOVA</i>	30
ZÁVĚR	32
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	33
PŘÍLOHA	35

Seznam symbolů a zkratek

A, B	Konstanty závislé na druhu plynu a teplotě [m^2/J], [m^2/C]
C	Kapacita [F/m^2]
d.	Vzdálenost [m]
f	Frekvence [Hz]
l	Aktivní délka [m]
N	Počet závitů
p	Tlak [Pa]
P	Mezní povolené ztráty [W/cm^2]
PE	Polyetylen
PEN	Polyetylnaftalát
PET	Polyetylentereftalát
PTFE	Polytetrafluoretylen
R_s	Povrchový odpor [Ω]
R_v	měrný odpor [$\Omega \cdot \text{m}$]
SiC	silicon-carbid
$\tan \delta$	Ztrátový činitel
U_i	Indukované napětí [V]
U_N	Jmenovité napětí cívky [V]
U_T	Testované napětí cívky [V]
U_z	Zapalovací napětí [V]
VPI	Vacuum Pressure Impregnation
Φ	Magnetický tok [Wb]
γ_e	Součinitel

Úvod

Točivé elektrické stroje se rozdělují na dva základní typy. Na točivé elektrické stroje přeměňující mechanickou energii na elektrickou, kterým se říká generátor, a na elektrické stroje přeměňující elektrickou energii na mechanickou, které se nazývají motor. U těchto strojů je velice důležitá spolehlivost, jelikož každá odstávka stroje kvůli poruše se negativně projevuje na ekonomické využitelnosti stroje.

Jednou z částí točivých elektrických strojů, které jsou nejvíce namáhány, jsou bezpochyby izolační systémy. V této bakalářské práci se budu zabývat vznikem částečných výbojů v izolačním systému stroje a také vznikem výbojů ve statorových drážkách stroje a na výstupu z nich. Zaměřím se na použití vodivých a polovodivých pásků a laků, které slouží právě k eliminaci výbojů jak v drážkách, tak na výstupu z nich.

Touto problematikou se budu zabývat i v praktické části bakalářské práce, kde budu měřit jednotlivé polovodivé ochrany od společnosti Von Roll a společnosti Krempel navinuté na tyčích. Hodnoty z tohoto měření budu porovnávat s měřením, které bylo provedeno s totožnými polovodivými ochranami, které ale nebyly navinuty na tyči, ale na sklotextitní trubce.

1 Popis vysokonapětového točivého stroje

Elektrické točivé stroje jsou stroje, ve kterých se elektromagnetickou indukcí mění mechanická energie na elektrickou (generátor) nebo elektrická energie na mechanickou (motor). Elektrický točivý stroj se skládá z pevné části, která se nazývá stator a točivé části, která se nazývá rotor. Otáčející se rotor u generátoru způsobuje v magnetickém obvodu statoru proměnný magnetický tok, který indukuje do statorového vinutí elektrické napětí U_i . [1]

$$U_i = N \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot \Phi_m, \quad (1.1)$$

kde N – počet závitů [–]

f – frekvence [Hz]

Φ_m – magnetický tok [Wb]

Přivedením střídavého napětí na statorové svorky vinutí motoru, vznikne v magnetickém obvodu statoru magnetický tok. Vzájemnou polohou statorového magnetického toku a rotorového magnetického toku vznikne mechanický moment M_{mech} , který roztočí rotor.

$$M_{mech} = \Phi \cdot N \cdot I_2 \cdot \sin \alpha, \quad (1.2)$$

kde N – počet závitů rotorového vinutí [–]

I_2 – proud v rotorovém vinutí [A]

Φ – magnetický tok [Wb]

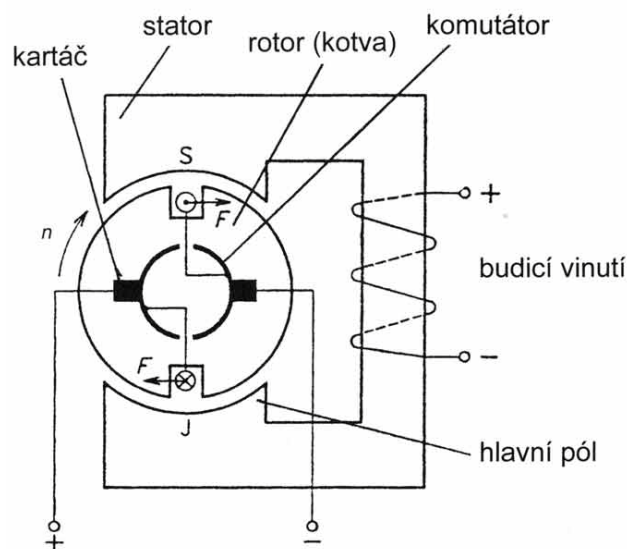
$\sin(\alpha)$ – úhel mezi osou statorového magnetického toku a osou rotorového vinutí

Mezi nepoužívanější točivé stroje patří: asynchronní, synchronní a stejnosměrné stroje.

Asynchronní stroje mají název odvozen od rozdílných otáček rotoru oproti otáčkám točivého magnetického pole statoru. Můžeme se ale setkat i s názvem indukční stroje. V průmyslu se řadí tyto stroje mezi nepoužívanější. U asynchronních strojů rozeznáváme dva druhy motorů a to s rotorem nakrátko a s kroužkovým rotorem. Rotor nakrátko má rotorové vinutí sestavené z tyčí, které se nejčastěji vyrábějí z hliníku, mědi nebo mosazi. Tyče jsou na koncích spojeny kruhy, které celé rotorové vinutí zkratují. Kroužkový rotor má vinutí řešené

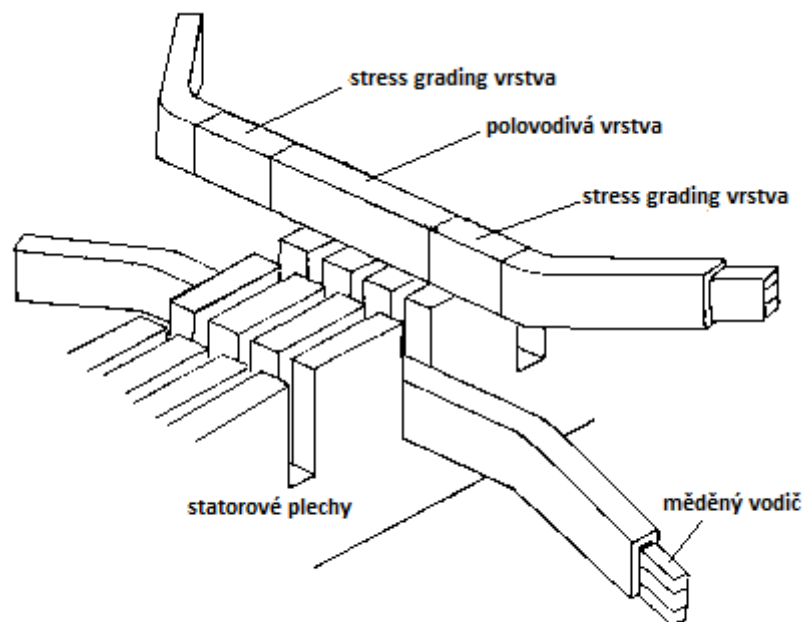
pomocí třífázového vinutí, které se spojuje do hvězdy. Konce vinutí jsou pomocí kroužků a kartáčů vyvedeny ven z rotoru. Při rozběhu stroje se na rotorové cívky připojuje činný odpor, který zvedá záběrový moment. Na konci rozběhu se odpor odpojí a rotorové vinutí spojí nakrátko. Stator je tvořen stejně jako rotor magnetickým obvodem složeným z válcovaných plechů. Ve statorovém magnetickém obvodu jsou vytvořené drážky, kde je uložené třífázové statorové vinutí. Konce vinutí jsou vyvedeny na statorovou svorkovnici. [20]

U synchronních strojů jsou na rozdíl od asynchronních strojů otáčky rotoru a otáčky točivého magnetického pole stejné. Tento typ strojů se v drtivé většině používá v elektrárnách pro výrobu elektrické energie. I u tohoto typu točivého stroje se používají různé konstrukce rotorů. Jedním z používaných rotorů, je rotor s vyniklými póly. Tento rotor je tvořen magnetickým obvodem, ke kterému jsou přišroubovány magnetické póly. Na každém pólu je navinuta cívka, která je přes kartáče a kroužky napájena stejnosměrným napětím. Tento druh rotoru se často používá u vodních elektráren jako hydroalternátor. Dalším typem synchronního stroje je synchronní stroj s hladkým rotorem. Rotory tohoto typu mají malý průměr, zato dlouhou osovou délku. Rotorové vinutí jsou zasazovány do drážek vyfrézovaných po obvodu válce a stejně jako u rotoru s vyniklými póly jsou přes kartáče a kroužky vyvedeny ven z rotoru na stejnosměrné napětí. Uplatnění tento rotor nachází u parních elektráren jako turboalternátor. [20]



Obr 1.1: Princip stejnosměrného stroje, převzato z [21]

Stejnoseměrné stroje stejně jako předchozí stroje disponují statorem a rotorem. Od předchozích strojů se ale v dosti věcech liší. Jednou z věcí je stator, který není tvořen válcovanými plechy, ale je odléván. Na odlitý stator jsou připevněny hlavní póly, na kterých je navinuto vinutí, které je připojeno na stejnosměrné napětí. Podle velikosti stroje se do statoru umísťují další pomocná vinutí. Jedním z nich je kompenzační vinutí, které je umístěno v drážkách pólových nástavců, které jsou umístěny na hlavních pólech. Toto vinutí zabraňuje vychýlení neutrální osy v důsledku reakce kotvy. Ve statoru jsou dále umístěny kartáče, které dosedají na komutátor rotoru. Rotor stejnosměrného stroje je složen z válcovaných plechů. V plechách jsou vytvořeny drážky, kde je umístěno stejnosměrné vinutí. Konce jednotlivých cívek jsou připevněny k lamelám komutátoru. Komutátor se skládá z klínových měděných lamel vzájemně izolovaných mikanitovými lamelami. [20]

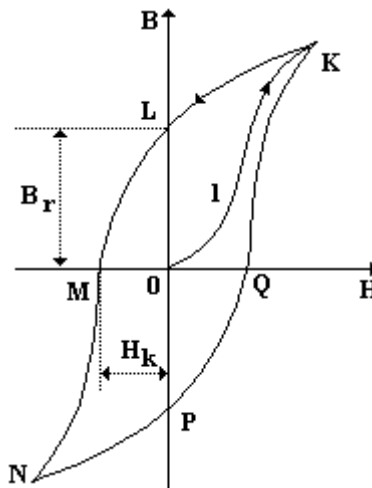


Obr 1.2: Uložení statorového vinutí, převzato z [22]

Vinutí používané u elektrických točivých strojů je vyráběno převážně z mědi a hliníku a to především kvůli dobrým vodivým vlastnostem. U malých a středních strojů se používá drátové vinutí. Jedinou výjimkou je již zmíněný rotor asynchronního stroje, který je odléván z hliníku. U velkých strojů může být vinutí řešeno pomocí tyčí nebo dutých vodičů, ve kterých proudí chladicí médium. Tyto tyče nebo duté vodiče jsou uspořádány do takzvaného permutovaného (Roeblova) vodiče. Permutace vodiče spočívá v postupném měnění jednotlivých vodičů ve svazku tak, aby každý vodič vystřídal všechny polohy v drážce. Díky

permutaci vodičů dosáhneme indukování přibližně stejně velkého napětí po celé délce cívky. To nám způsobí, že proudová hustota je rovnoměrně rozprostřena po celé cívce a nedochází k nahromadění proudové hustoty a tepla v horní části drážky. [5]

Na výrobu magnetických obvodů se nejčastěji používá ocel legovaná křemíkem (okolo 4%) a to z důvodu, že se jedná o magnetický měkký materiál, který má úzkou hysterezní smyčku, a proto při častém přemagnetování vykazuje menší ztráty než je u magneticky tvrdých materiálů. Ztráty přemagnetováním odpovídají ploše hysterezní smyčky. Z důvodu snížení ztrát vířivými proudy se magnetický obvod skládá z válcovaných plechů. Magnetický obvod může být vytvořen i pouze z jednoho souvislého odlitku a to, když je magnetický tok konstantní. Tyto odlitky se nejčastěji skládají z permanentních magnetů na bázi vzácných zemin. [5]



Obr 1.3: Hysterezní smyčka, převzato z [18]

1.1 Izolační systémy

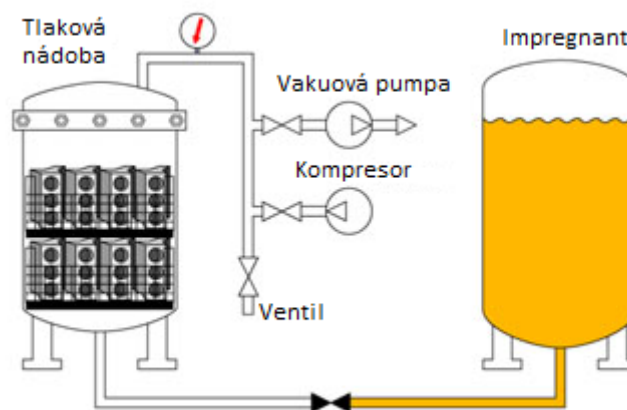
Velký důraz je kladen na izolační systémy statorových vinutí, jelikož velmi ovlivňují vlastnosti stroje. Izolační systémy vysokonapěťových točivých strojů se dělají dvěma rozdílnými technologiemi. Jedná se o systémy VPI (Vacuum Pressure Impregnation) a Resin-Rich. Každá z těchto technologií má své výhody a nevýhody. Nelze s jistotou říci, která z technologií je lepší a proto při volbě technologie se rozhoduje případ od případu. [2]

Jak VPI tak Resin-Rich využívají třísloužkový izolační systém složený z nosné složky, pojiva a dielektrické bariéry. Nosná složka se nejčastěji vyrábí ze skleněných vláken. Používány jsou ale i jiné druhy vláken, jako jsou například aramidová. Je možné použít i PEN nebo PET fólie. Na výběru nosné složky závisí výsledné mechanické vlastnosti a tepelná třída

izolačního systému. Složka, která k sobě váže nosnou složku a dielektrickou bariéru, se nazývá pojivo. Jako pojivo se nejčastěji využívají syntetické pryskyřice, konkrétně reaktoplastické bezrozpouštědlové novolakové nebo cykloalifatické. Tyto pryskyřice mimo jiné zajišťují i homogenitu izolace. Dielektrická bariéra zajišťuje potřebnou elektrickou pevnost a nejčastěji se vyrábí pomocí rekonstruovaného slídového papíru, který se zkráceně nazývá Remikanit. Výsledná páska se vytvrzuje a vzniká kompozitní materiál s velkou elektrickou a mechanickou pevností, velkou rezistivitou a nízkou nasákavostí. Díky této technologii zpracování dochází k vysokému stupni prosycení kompozitu pojivem a dochází pouze k malému výskytu vzduchových bublinek uvnitř izolačního systému. To má za následek, že vnitřní výbojová činnost je omezena a nedochází k rychlé degradaci izolačního systému. [3]

1.1.1 Systém VPI

Systém vakuově tlakové impregnace se dále dá rozdělit podle rozsáhlosti impregnace. Jednou z možností je vakuově tlaková impregnace jednotlivých cívek a tyčí. Druhou z možností je globální VPI celého statoru. Systém VPI spočívá v prosetí slídové pásky impregnantem. Tato technologie se hlavně využívá v případech, kdy je potřeba výborné izolační a tepelné vlastnosti. Savá páska je složena z několika složek. Nosnou složkou je zde buď skleněná tkanina, polyesterové rouno nebo fólie, nejčastěji polyamidová. Pro možnost mechanického zpracování pásky se používá pouze 7% pojiva. Vhodnou volbou pojiva se zaručuje kompatibilita s impregnantem a tím k zabránění vzájemnému napadení při zpracování. [2,4]



Obr 1.4: Impregnace systémem VPI, převzato z [17]

Impregnantem jsou bezrozpouštědlové epoxidové, polyesterové a silikonové pryskyřice. Tyto pryskyřice obsahují 100% sušiny. Díky tomu lze zcela vyplnit impregnovaný objekt i při jednoduché impregnaci. Impregnace se provádí v zařízení vybavené kotlem, který je jak tlakotěsný, tak vakuotěsný. Dále je vybavený zásobníkem impregnantu, který má možnost impregnant ohřívat nebo ochlazovat. Impregnant se před impregnací ohřeje na určitou teplotu a ve vakuu dojde k odplynění. Po dokončení impregnace se nevyužitý impregnant zpět ochladí na svojí původní teplotu a vrátí se do zásobníku. [2,4]

1.1.2 Systém Resin-Rich

Jak je už z názvu patrné, jedná se o systém využívající materiály již obsahující pryskyřici. Tento již předimregnovaný materiál dosahuje obsahu pojiva převážně v rozmezí 30 – 40%. Základem technologie je třísložkový materiál. Nosnou složkou je zde skleněná tkanina. Díky nové technologii může být skleněná tkanina tvořena vlákny rovnými do roviny oproti dřívějším, které byli stáčené. Tato změna zajistila zmenšení tloušťky tkaniny z 0,14 mm na 0,12 mm a to s obdobnými mechanickými vlastnostmi. Dalšími výhodami nové technologie je zvětšení elektrické pevnosti materiálu přibližně o 7% a snížení dielektrických ztrát. Jako izolační bariéra se používá kalcinovaný slídový papír, který se díky technologii výroby stává méně nasáklým, více hutným a má lepší mechanické vlastnosti. Jako pojivo jsou zde používány již dříve zmíněné bezrozpouštědlové novolakové nebo cykloalifatické epoxidové pryskyřice. Jelikož je velice důležité, aby materiál byl suchý, nelepivý a dal se co nejdéle skladovat, dodává se částečně předtvrzen. Tloušťka materiálu dosahuje od 0,15 do 0,2 mm. [2]

Výsledné nanesení izolace na vinutí se provádí dvojitým způsobem. Jednou z možností je kontinuální navíjení. Při této možnosti dochází k navinutí obvykle 20 mm široké pásky s polovičním, třetinovým nebo dvoutřetinovým překrytím a to i v čelech. Druhou z možností je diskontinuální způsob navinutí. Tato možnost se od první liší v tom, že rovinná část je ovinuta foliovým materiálem a páska je použita pouze na čela vinutí. Pro vytvrzení se používají latentní tvrdidla, která se v jednotkách procent přidávají do pryskyřic, a způsobuje to, že k zahájení polymerační reakce dochází až po dosažení určité teploty. Vytvrzování probíhá při teplotách pohybujících se v rozmezí 160-170 °C. Velkou pozornost je třeba dávat i na ochlazování po vytvrzení. Řízené pozvolné ochlazování zajišťuje, že nedochází k rozdílnému chladnutí jádra a izolační trubky, a tím pádem nedochází k defektům, jako je například oddělení izolace od jádra, neboli delaminace [2]

1.2 Místa vzniku částečných výbojů

Částečné výboje vznikají v místech, kde dochází k nehomogenosti dielektrických vlastností izolantů. Při výrobě izolace téměř vždy vznikají různě velké mikro dutiny vyplněné plynem. Těmto dutinkám se snažíme předcházet již při výrobě izolace, ale díky nedokonalosti výroby nelze vzniku dutinek úplně zamezit. Jelikož poměrná permitivita plynů se blíží 1, zatímco poměrná permitivita pevného izolantu je o ϵ_r větší, dochází k několikanásobně většímu elektrickému namáhání mikro dutin než pevné izolace. Mimo jiné plyny obsažené v mikro dutinách mají mnohem menší elektrickou pevnost než pevné izolanty. Díky těmto skutečnostem dochází v dutinách k výbojům, které překlenou pouze část izolace. Kvůli skutečnosti, že výboj nevznikne mezi oběma elektrodami, se nazývá částečný. [6,7,8]

Paschenův zákon udává napětí, při kterém dojde k průrazu v dutinkách.

$$U_z = \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln \left[\frac{A \cdot p \cdot d}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma_e} \right)} \right]}, \quad (1.3)$$

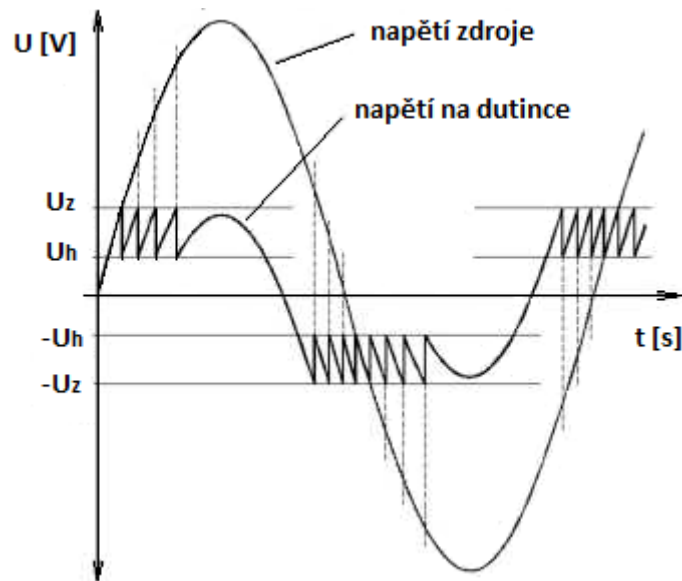
kde A [m^2/J], B [m^2/C] – konstanty závislé na druhu plynu a teplotě

p [Pa] – tlak plynu

d [m] – vzdálenost

γ_e [-] – součinitel udávající počet elektronů vzniklých na katodě působením jednoho elektronu z prostoru mezi elektrodami

Při dosažení napětí U_z nastane v mikro dutině průraz, který způsobí rozštěpení neutrálních molekul plynu. Ionty, které vzniknou při rozštěpení, se začnou pohybovat k povrchu dutin směrem, který určí jejich polarita a polarita elektrického pole. Nashromážděné ionty na stěnách mikro dutin vytváří elektrické pole, které je opačné polarity než vnější elektrické pole. Díky tomu se snižuje napětí na mikro dutinách. Při poklesu napětí až na hodnotu U_h , výboj zhasne. [7]



Obr 1.5: Průběh napětí na dutince, [19]

1.2.1 Vnitřní výboje

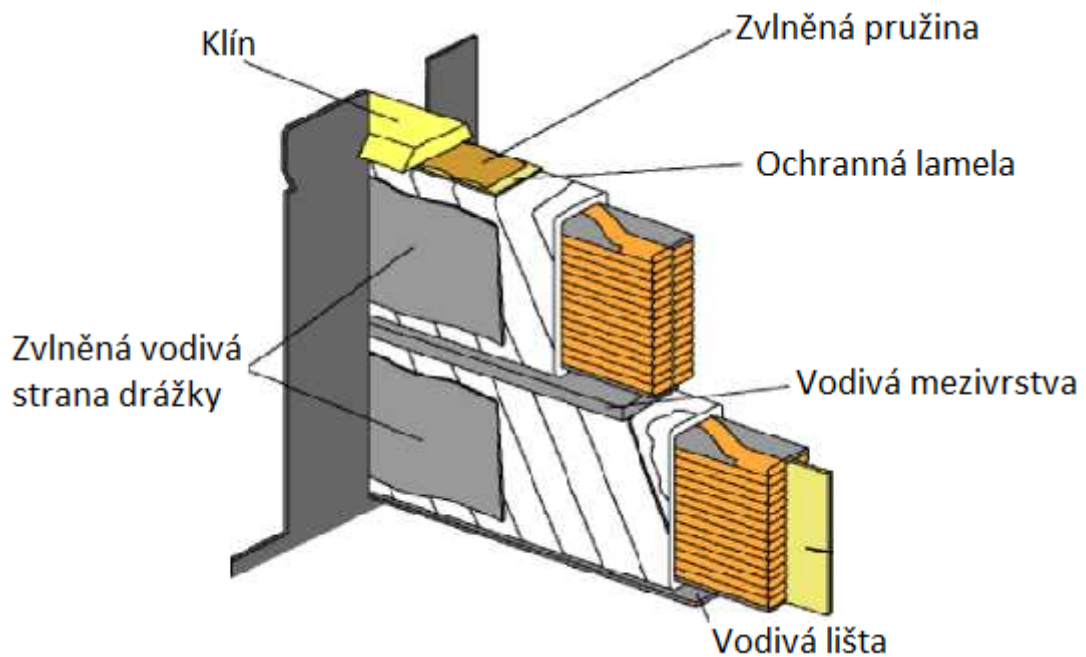
V točivých strojích můžeme pozorovat víc druhů částečných výbojů. První z nich jsou již zmíněné vnitřní výboje, které vznikají díky mikrodutinkám v izolaci. Další příčinou vzniku částečných výbojů je vnitřní delaminace v hlavní izolaci. Ta může vzniknout buď během výroby, kde je izolační systém nedokonale vytvrzen, nebo v provozu nadměrným tepelným a mechanickým namáháním. Tyto výboje vedou ke snížení tepelné vodivosti izolace, která má za následek rychlé stárnutí izolace nebo tepelný lavinový jev. [8]



Obr 1.6: Dutiny v izolaci, převzato z [13]

1.2.2 Drážkové výboje

V počátku můžeme brát tyto výboje spíše jako vibrační jiskření než částečné výboje. Toto jiskření vzniká, když se poškodí vodivý povlak drážkové části. K takovému poškození může dojít pohybem tyčí v drážce nebo u výstupu z drážek. Tento pohyb může být způsobený například ztrátou klínového tlaku v důsledku obroušení, usazení atd. Poté co dojde k mechanickému poškození, které může zapříčinit poruchu izolace, se rozvinou klasické výboje. [8]



Obr.1.7: Uložení vinutí v drážce, převzato z [13]

1.2.3 Povrchové výboje na koncích vinutí

Tento druh výbojů vzniká v okolí čel vinutí v místech, kde vinutí vystupuje z drážky statorové vinutí. Tyto výboje jsou způsobeny špatným rozložením pole, které může vznikat z různých příčin. Mezi hlavní příčiny patří skokové zvětšení intenzity elektrického pole po výstupu vinutí z drážky statoru. Pro zamezení vzniku povrchových výbojů se používají polovodivé ochrany, které budou popsány níže. Mezi další příčiny vzniku povrchových výbojů můžeme počítat znečištění, pórovitost, tepelné účinky atd. Výše popsané poruchy způsobí ztrátu účinnosti povlaku pro řízení pole na čelech a vznik povrchových výbojů. [8]

1.3 Metody měření částečných výbojů

Částečné výboje v izolantu s sebou nesou i plno vedlejších jevů. Díky těmto jevům lze částečné výboje detekovat a měřit. Mezi tyto jevy patří například generování vysokofrekvenčních elektromagnetických impulzů, vznik chemických zplodin, tepelný ohřev a zvukové vlny ve slyšitelném a ultrazvukovém pásmu. Obecně lze rozdělit měření částečných výbojů na globální a lokální, kde globální vypovídá o celkovém stavu izolace a lokální hledá místa vzniku částečných výbojů. [9]

1.3.1 Přímé metody

Přímé metody detekují výboje pomocí proudových impulzů. Při výboji dojde k úbytku elektrické energie, která díky indukčnosti napájecího napětí zabrání, aby byl tento úbytek hrazen ze zdroje. Dojde tedy k poklesu napětí na svorkách zkoušeného objektu. Pokles napětí je úměrný náboji proudového impulsu výboje. V měřícím obvodu teda dojde k tvorbě vyrovnávacích proudů, které vytvoří na svorkách napěťovou odezvu. Doba trvání částečných výbojů se odvíjí od použitého materiálu. [9]

1.3.2 Globální metody

Tato metoda detekce částečných výbojů sleduje impulzy částečných výbojů. Nazývá se globální galvanická metoda. Tato metoda využívá RLC člen s ochrannými prvky proti přepětí. Tento druh měření vyniká především velkou citlivostí měření a bezpečností měření bez přetěžování stroje. Mezi nevýhody galvanického měření je velká citlivost jak na vnější elektromagnetické vlny, tak na vlivy, které působí přímo v měřícím obvodu. [9]

1.4 Degradace izolace

Jak již už bylo zmíněno, je kladen velký důraz na kvalitu izolačního systému statorových vinutí, a proto i degradace izolace je jev, který je nežádoucí, a snažíme se ho co nejvíce omezit. V důsledku degradace izolace dochází k poklesu elektrické pevnosti a zhoršení dielektrických vlastností. Díky mechanickému, elektrickému a tepelnému namáhání se zeslabují vazby mezi slídovou páskou a pryskyřicí, a dochází k růstu elektrického stromečku. Název je odvozen od tvaru, který je buď stromovitý, nebo keřovitý. Tento degradační jev může způsobit až průraz elektrické izolace, a to i při intenzitě elektrického pole pohybující se okolo jmenovitých hodnot. Pro vznik elektrického stromečku je zapotřebí silné elektrické

pole, které pomocí vodivých částecek, nečistot a jiných defektů vytvoří vodivé cesty. V blízkosti této cesty vzniká nehomogenní elektrické pole a s ní velká intenzita. Díky tomu v místech, kde dojde k překročení elektrické pevnosti, dojde k mikroskopickému průrazu a vytvoření další cesty. Takto vytvořené cesty vytvářejí stromečkovou strukturu. Kanály se vytvářejí, do té doby, než překlenou celou vzdálenost mezi elektrodami. [10,11]



Obr.1.5: Elektrický stromeček, převzato z [12]

Dalšími účinky, které degradují izolační systémy, jsou účinky chemické a tepelné. Dutinky uvnitř izolace, které způsobují částečné výboje, mohou být naplněny různými plyny. Pokud je v dutince přítomen kyslík, dochází při výboji k tvorbě ozonu, který má nepříznivé oxidační účinky. Při výboji dále dochází k bombardování stěn dutinky částicemi, což má za následek zvětšení vodivosti dutinek. Na každý druh izolace působí výboje jiným způsobem. Poměrně rezistentní jsou proti částečným výbojům skupiny izolantů, které jsou anorganické, jako jsou například slída a porcelán. Na druhé straně stojí izolanty na bázi organických látek, jako je například PET (polyetylentereftalát), PEN (Polyetylnaftalát), PE (polyetylen), PTFE (Polytetrafluoretylen) a materiály obsahující epoxidová a silikonová pojiva. Tyto materiály jsou velmi citlivé na degradační účinky při výbojích. [9]

1.5 Způsoby eliminace částečných výbojů

Pro co možná největší omezení částečných výbojů u elektrických točivých strojů se používají polovodivé pásy a laky. Tyto pásy a laky se většinou používají na cívky, které jsou uloženy v drážkách vinutí, jelikož mezi cívkou a drážkou vzniká vzduchová mezera, která by vedla ke vzniku částečných výbojů. Tyto výboje vznikají z důvodu nedokonalého kontaktu izolované cívky s magnetickým obvodem. Cívky jsou proto navinuty vodivými páskami. Tyto pásy se po navinutí a vložení do drážek na většině míst dotýkají magnetického obvodu. Jelikož se pásy dotýkají jádra, dostávají stejný potenciál jako jádro. Díky tomu, bubliny vzniklé při ukládání vinutí do drážky mají nulové napětí a nedochází k částečným výbojům. [10]

2 Antikoronové ochrany

Antikoronové ochrany aplikované na statorové vinutí vysokonapěťových točivých strojů slouží k zabránění povrchových výbojů v drážkách vinutí a na výstupu vinutí z drážek. Pro tyto účely se používají vodivé a polovodivé ochrany, které eliminují tvorbu povrchových a drážkových výbojů a tím chrání izolaci vinutí před zničením.

2.1 Vodivé ochrany

Jedním z druhů antikoronových ochran jsou vodivé ochrany. Vodivý povrch pomáhá se snížením napětím ve vzduchových mezerách, které jsou nevyhnutelné mezi vnějším povrchem cívky a stěnou drážky. Vodivý povrch zkratuje mezeru a zabraňuje zvýšení napětí v mezeře. Vodivosti pásek se dosahuje pomocí vodivých částic, jako jsou saze nebo grafit. Určujícím faktorem vodivosti pásek je povrchový odpor. Minimální povrchový odpor, který je přípustný na vodivé pásce je dán rovnicí: [15]

$$R_s \geq \frac{\left(\frac{U}{l}\right)^2}{P}, \quad (2.1)$$

kde R_s – povrchový odpor [Ω]

U – napětí [V]

l – aktivní délka [m]

P – mezní povolené ztráty [W/cm^2]

Většina vodivých materiálů mají tendenci během stárnutí při provozních teplotách zvyšovat svojí vodivost. Nejvyšší přípustný povrchový odpor je daný ztrátou vodivosti pásky. Pokud chceme být efektivní při snižování napětí ve vzduchových mezerách mezi stěnou drážky a povrchem cívky, neměl by povrchový odpor ochrany přesáhnout řádově 15 Ω . Běžně se povrchový odpor cívek pohybuje v rozmezí 1000 – 15000 Ω v závislosti na typu stroje. Vzhledem k nárůstu ztrát musí být monitorován i měrný odpor: [15]

$$\tan \delta = 2 \cdot \pi \cdot C \cdot \frac{Rv \cdot S}{d}, \quad (2.2)$$

kde $\tan \delta$ – ztrátový činitel

C – kapacita [F/m^2]

Rv – měrný odpor [$\Omega \cdot m$]

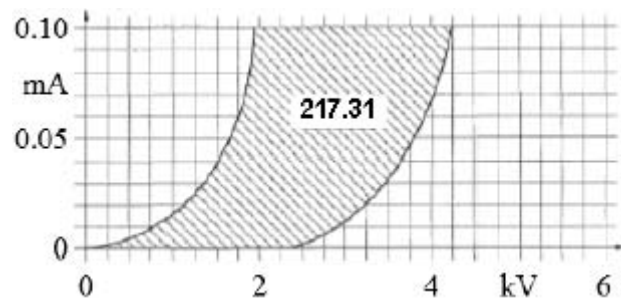
S – plocha [m^2]

d – tloušťka [m]

Ze vzorce je patrné, že i vysoký měrný odpor způsobí zanedbatelný nárůst ztrátového činitele. Odpor pásky závisí na obsahu plniva a vodivých částic. Bohužel odporová závislost na obsahu plniva je velmi nelineární, a proto zhotovovací procesy musí být velmi přesné a stabilní. Při výrobě je nutné provádět pečlivé testy, jelikož impregnační pryskyřice vždy naruší strukturu vodivého povlaku. Agresivní rozpouštědla obsažená v impregnační pryskyřici mohou snížit vodivost až na nepoužitelnou hodnotu. [15]

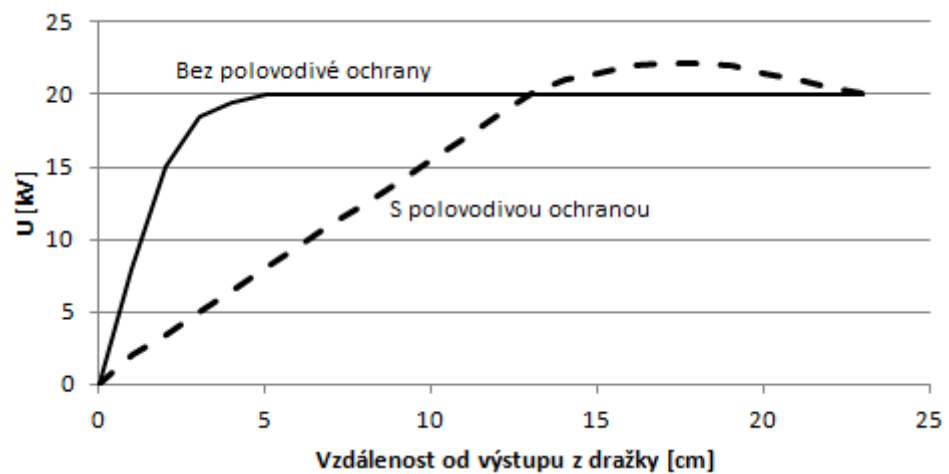
2.2 Polovodivé ochrany

U výstupu vinutí z drážek dochází k velkému napěťovému skoku, který by způsoboval tvorbu výbojů. Z tohoto důvodu jsou zde používány polovodivé pásky a laky. Tyto pásky a laky zabezpečují, že u výstupu vinutí z drážky dochází k pozvolnému nárůstu napětí a nedochází tedy k tvorbě výbojů. Upřednostňováno je zde používání spíše pásek než laků, z důvodu snadného opotřebení laku a tím nedokonalého chránění vinutí. Další nevýhodou laků je jejich doba tvrdnutí na vzduchu, která bývá dosti rozdílná, a nutnost nanášení několika vrstev. Uplatní se spíše na místech, kde pásky nelze použít. Jako například při opravách stroje. Výroba laků a pásek se stejně jako u izolačních pásek skládá z několika částí. Mechanické vlastnosti pásek zajišťuje nosná složka, kde se nejčastěji využívají skleněné tkaniny. Další složkou, která je zastoupena v ochraně, je plnivo. Tato složka zajišťuje rozložení elektrického pole a je zastoupena až v 80 % ochrany. Jako plnivo se nejčastěji používá karbid křemíku. Poslední zastoupenou složkou je pojivo, které zajišťuje spojení všech částí. Jako pojivo se nejčastěji používají pryskyřice. [2]



Obr.2.1: Nelineární V-A charakteristika polovodičové ochrany, převzato z [13]

Vodivost polovodičových ochran se získává pomocí polovodičových plniv, které se přidávají do elektroizolačních pojiv. U polovodičových ochran se nejčastěji používá karbid křemíku zkráceně SiC. Vlastností karbidu křemíku je jeho nelineární odpor, jak je vidět z Obr. 2.1, kdy při zvyšování intenzity jeho odpor klesá. Tohoto jevu se využívá právě u statorového vinutí. V místech, kde statorové vinutí vystupuje z drážky, je velký napěťový skok. Použitím polovodičové ochrany zajišťujeme, že v místě největšího napěťového skoku má ochrana nejmenší odpor a se vzrůstající vzdáleností od konce drážky se tento odpor zvětšuje, a tím dochází k pozvolnému nárůstu napětí a k eliminaci výbojů, jak je patrné na Obr. 2.2. [2,16]



Obr.2.2: Nárůst napětí na výstupu z drážky [13]

2.3 Aplikace polovodičových ochran

Nanášení polovodičových ochran se doporučuje u strojů, které mají jmenovité napětí větší než je hodnota 5 kV. Výběr vhodné polovodičové ochrany je závislý na mnoha aspektech, jako jsou například typ stroje, velikost jmenovitého napětí, použitý izolační systém a v neposlední řadě i výběr mezi VPI a Resin-Rich technologií pro výrobu izolačního systému. [23]

Při aplikaci polovodivé pásky na vinutí se musí dbát na pečlivé nanášení pásky tak, aby páska obepínala celý obvod vinutí a netvořily se na pásce záhyby. Nejčastěji se páska nanáší s třetinovým, polovičním nebo dvouřetinovým překrytím. Při vytvrzení pásky dochází k jejímu smršťování, a tím k dokonalému kontaktu s vodivou vrstvou a povrchem cívky. Je doporučeno, aby polovodivá páska přesahovala přes vodivou pásku o 20 mm. Doporučenou vzdálenost mezi koncem drážky a koncem polovodivé ochrany můžeme vypočítat pomocí vzorce:

$$l = \frac{U_T}{2}, \quad (2.3)$$

kde l [cm] – doporučená délka od konce drážky

U_T [kV] – testovací napětí cívky

Testované napětí cívky U_T vypočítáme pomocí vzorce:

$$U_T = 2 \cdot U_N + 1, \quad (2.4)$$

kde U_T [kV] – testovací napětí cívky

U_N [kV] – jmenovité napětí stroje

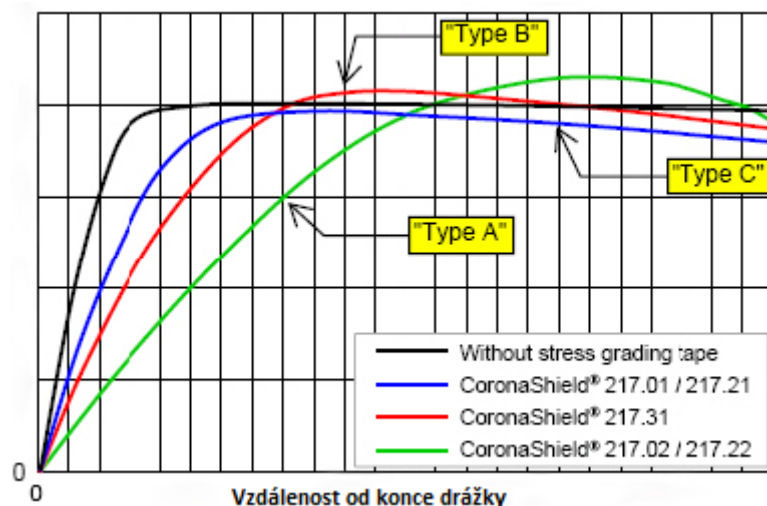
Před nanášením polovodivého laku musí být nádoba pečlivě promíchána, jelikož barvivo uvnitř laku má velkou hustotu a usazuje se ve spodní části nádoby. Lak se na vinutí aplikuje v několika vrstvách, kdy výsledná tloušťka povlaku se pohybuje v rozmezí 0,2 až 0,5 mm. Mezi jednotlivými nátěry vrstev laku musí být prodleva nejméně 30 minut kvůli dostatečnému zaschnutí předešlé vrstvy. Přesah polovodivého laku přes vodivou pásku je stejně jako u polovodivých pásek 20 mm. I délka polovodivé vrstvy laku se vypočítá podle vzorců (2.3) a (2.4), jako tomu bylo u pásek. [23, 24]

3 Měření polovodivých ochran

Měření polovodivých ochran se provádělo na vzorcích, které byly tvořeny tyčemi, na kterých byly aplikovány ochrany. Jako první byla navinuta vodivá ochrana, která slouží k vyrovnání potenciálů v drážce statoru. Vodivá ochrana ale při tomto měření nehrála žádnou roli a byla spíše na obtíž. Na tuto ochranu se poté aplikovala polovodivá ochrana. U vzorků, kde byla použita polovodivá páska, se páska navinula ručně s polovičním překrytím. Pásky se poté nechali vytvrdit při teplotě 120 °C po dobu 2 hodin. Po vytvrzení se na ochrany umístily samolepící měděné pásky, které měly mezi sebou vzdálenost 10 mm.

3.1 Použité polovodivé ochrany

Na měření bylo použito celkem 6 druhů pásek a 2 laky. Pásky Corona Shield® 217.01, Corona Shield® 217.21, Corona Shield® 217.22, Corona Shield® 217.03, Corona Shield® 217.02 a laky Corona Shield® P 8001, Corona Shield® P 8002 jsou od společnosti Von Roll. Pouze Akasic je výrobkem společnosti Krempel. Pásky a laky se od sebe lišily mimo jiné stress grading charakteristikou, která ukazuje, jak vzrůstá napětí na ochraně v závislosti na vzdálenosti od konce drážky. Výrobce podle této charakteristiky rozděluje ochrany na typ A, typ B a typ C, jak je patrné z obrázku *Obr. 3.1*. [23, 24]

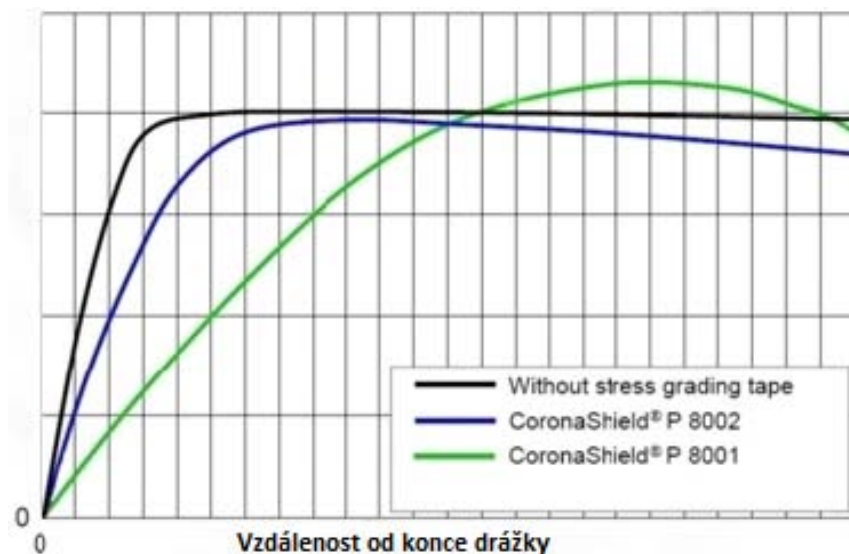


Obr.3.1: Stress grading charakteristika pásek[23]

Polovodivé pásky Corona Shield® 217.01, Corona Shield® 217.02, Corona Shield® 217.21, Corona Shield® 217.22, Corona Shield® 217.03 patří do skupiny tkaných polyesterových látek, které se dají používat za teplot pohybujících se do 155 °C a to jak

v izolačních systémech Resin Rich, tak v izolačních systémech používající technologii VPI. Jak je vidět na *Obr. 3.1* pásky s číselným označením 217.02 a 217.22 patří do skupiny pásků se stress grading charakteristikou typu A, a tedy s nejpozdvolnějším nárůstem napětí na výstupu z drážky. Na druhé straně pásky s označením 217.01 a 217.21 mají stress grading charakteristiku typu C, což značí nejvíc strmý nárůst napětí na výstupu z drážky. Charakteristiky pásek označené 217.03 spadají do typu B, která nemá tak strmý průběh jako páska typu C, ale nedosahuje po zvolnosti pásky typu A. Použitá polovodivá páska Akasic byla v době použití již po expiraci, která mohla ovlivnit její vlastnosti. [23, 25, 26, 27]

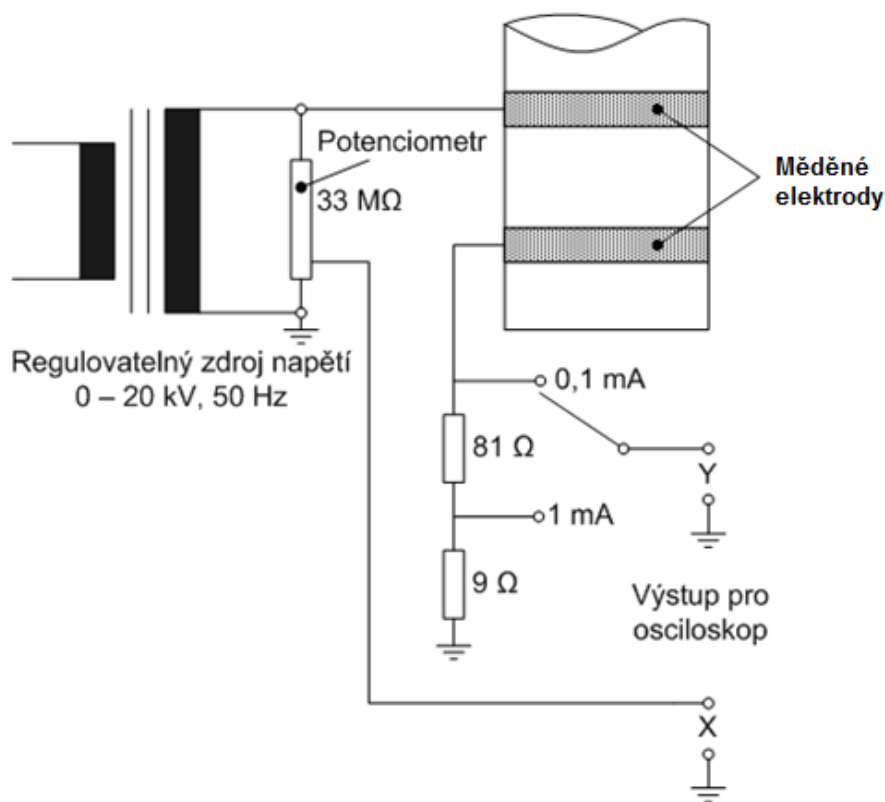
Použité laky s označením Corona Shield® P 8001 a Corona Shield® P 8002 jsou fenolové pryskyřice s polovodivým plnivem, který se používá jak v systémech Resin Rich tak v systém s technologií VPI. Stejně jako pásky se laky používají do teplot pohybující se do 155 °C. I laky mají svojí stress grading charakteristiku, která je na obrázku *Obr. 3.2*. Charakteristika ukazuje, že lak s označením Corona Shield® P 8001 má podstatně pozvolnější nárůst napětí na výstupu z drážky než je tomu u laku Corona Shield® P 8002.



Obr.3.2: Stress grading charakteristika laků[23]

3.2 Postup měření

Měření probíhalo zapojením vzorků podle *Obr. 3.3*, kde jako regulovaný zdroj napětí jsme použili HIGHVOLT SYSTEM s inventárním číslem 22501, který nám sloužil i jako voltmetr. Pro měření proudu byl použit MULTIMETER METEX M-38900 s inventárním číslem 171137. Po zapojení vzorků se pomocí regulovaného zdroje napětí nastavilo napětí na hodnotu 4,5 kV. Na tomto napětí se počkalo, než se ustálí měřený proud. Po ustálení se napětí postupně snižovalo o 250 V až k nule a zapisoval se naměřený proud. Toto měření se provádělo na každé polovodivé ochraně desetkrát.



Obr.3.3:Schéma zapojení měření polovodivých ochran [28]

3.3 Výsledky měření

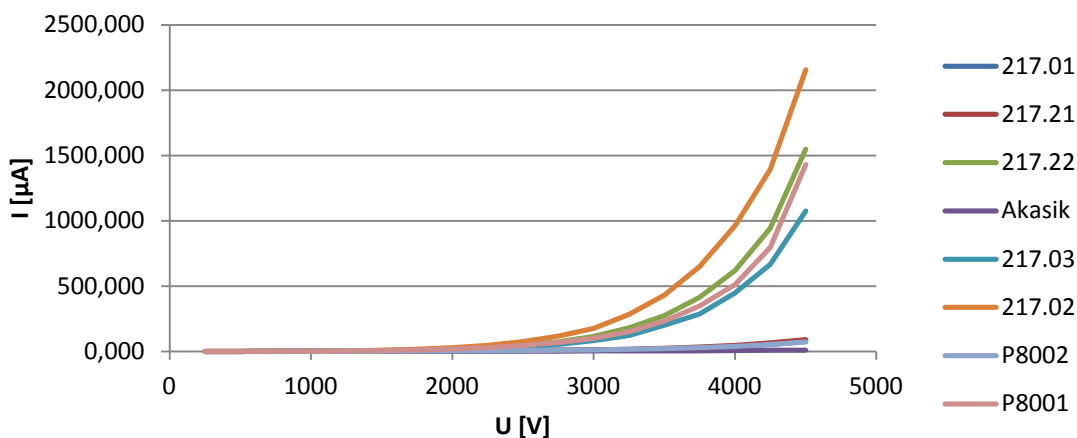
Naměřené hodnoty u každé polovodivé ochrany byly zpracovány do tabulek, ve kterých byly vyneseny minimální, maximální a průměrné hodnoty každé polovodivé ochrany, jak je uvedeno v *Tab. 3.1*.

Tab. 3.1: Naměřené hodnoty na polovodivé pásce Corona Shield® 217.01

217.01															
U [V]	I [μA]	I [μA]	I [μA]	I [μA]	I [μA]	I [μA]	I [μA]	I [μA]	I [μA]	I [μA]	I [μA]	I [μA]	MIN	MAX	PRŮMĚR
250	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
500	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
750	0,065	0,065	0,065	0,048	0,048	0,065	0,048	0,065	0,048	0,048	0,048	0,048	0,065	0,065	0,057
1000	0,081	0,097	0,097	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,097	0,097	0,084
1250	0,113	0,129	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,129	0,129	0,115
1500	0,145	0,162	0,162	0,145	0,162	0,162	0,145	0,162	0,162	0,162	0,145	0,145	0,162	0,162	0,155
1750	0,194	0,210	0,210	0,210	0,226	0,210	0,194	0,210	0,210	0,194	0,194	0,194	0,226	0,226	0,207
2000	0,242	0,275	0,291	0,275	0,307	0,275	0,275	0,275	0,275	0,258	0,258	0,242	0,307	0,307	0,275
2250	0,323	0,339	0,388	0,355	0,420	0,372	0,355	0,388	0,372	0,355	0,355	0,323	0,420	0,420	0,367
2500	0,420	0,452	0,501	0,468	0,582	0,501	0,485	0,517	0,501	0,468	0,468	0,420	0,582	0,582	0,489
2750	0,533	0,582	0,662	0,630	0,775	0,679	0,646	0,679	0,662	0,646	0,646	0,533	0,775	0,775	0,649
3000	0,711	0,775	0,872	0,840	1,099	0,905	0,872	0,937	0,872	0,856	0,856	0,711	1,099	1,099	0,874
3250	0,937	1,034	1,147	1,131	1,535	1,228	1,195	1,292	1,147	1,163	1,163	0,937	1,535	1,535	1,181
3500	1,276	1,405	1,567	1,551	2,165	1,696	1,680	1,745	1,567	1,583	1,583	1,276	2,165	2,165	1,624
3750	1,712	1,858	2,132	2,100	3,037	2,294	2,342	2,407	2,100	2,197	2,197	1,712	3,037	3,037	2,218
4000	2,326	2,585	2,843	2,843	4,313	3,263	3,376	3,376	2,924	3,037	3,037	2,326	4,313	4,313	3,089
4250	3,199	3,683	3,990	3,893	5,994	4,475	4,766	4,750	4,136	4,168	4,168	3,199	5,994	5,994	4,305
4500	4,620	5,073	5,428	5,315	8,465	6,333	6,882	6,591	5,719	5,670	5,670	4,620	8,465	8,465	6,010

Z takto zpracovaných hodnot u všech testovaných polovodivých ochran se sestavil graf, do kterého se vynesly jejich průměrné hodnoty.

Pásky na trnu

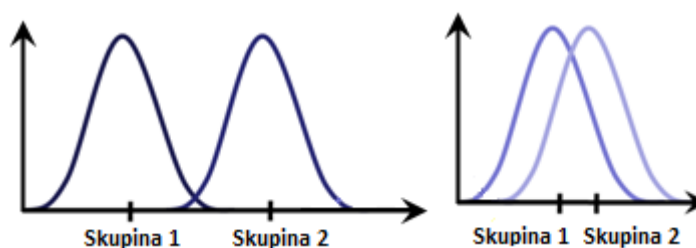


Obr. 3.4: V–A charakteristika průměrných hodnot polovodivých ochran

Z grafu je patrné, že polovodivé pásky Corona Shield® 217.02, Corona Shield® 217.03, Corona Shield® 217.22 a lak Corona Shield® P 8001 mají několikanásobně větší vodivost než zbylé ochrany.

3.3.1 ANOVA

Naměřené hodnoty se dále porovnávaly s hodnotami naměřenými na sklotextitních trubkách. Pro porovnání se použila analýza rozptylu. Této analýze se díky anglickému názvu Analysis of variance říká zkráceně ANOVA. Pro naše účely byla použita one-way ANOVA, jinak řečeno jednofaktorová. Jediným proměnným faktorem, který metoda zkoumala, byl materiál, na kterém byly ochrany testovány. Jako vstupní data do analýzy byly použity hodnoty proudu změřené při 4,5 kV. Po provedení analýzy se z výstupních hodnot použila hodnota P, která udává, jestli jsou zkoumané modely rovnocenné. Pokud hodnota P nabývala hodnot menších než 0,05, rovnocennost modelů se zamítla. Jak je patrné na *Obr. 3.5*, čím více se skupiny překrývají, tím více jsou skupiny rovnocenné.



Obr. 3.5: Vyhodnocení rovnosti modelů [29]

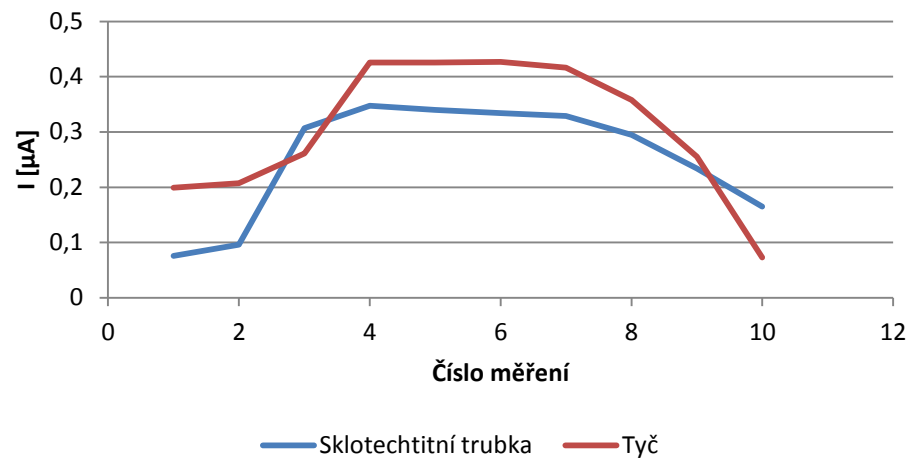
Po provedení analýzy rozptylu u všech polovodiivých ochran se zjistilo, že pouze u polovodiivého laku Corona Shield® P 8002 lze říci, že naměřené hodnoty na sklotextitní trubce jsou rovnocenné s hodnotami naměřenými na tyči.

Tab. 3.2: Hodnota P měřených polovodiivých ochran

Typ ochrany	Hodnota P
Corona Shield® 217.01	0,0075
Corona Shield® 217.21	0,0186
Corona Shield® 217.22	1,7E-07
Akasic	0,0003
Corona Shield® 217.03	8,2E-10
Corona Shield® 217.02	2,7E-12
Corona Shield® P 8002	0,5766
Corona Shield® P 8001	3,8E-17

Na *Obr. 3.6* je patrné, že hodnoty získané z měření na polovodiivém laku Corona Shield® P 8002 aplikovaném jak na sklotextitové trubce, tak na tyči jsou natolik podobné, že je můžeme prohlásit za rovnocenné.

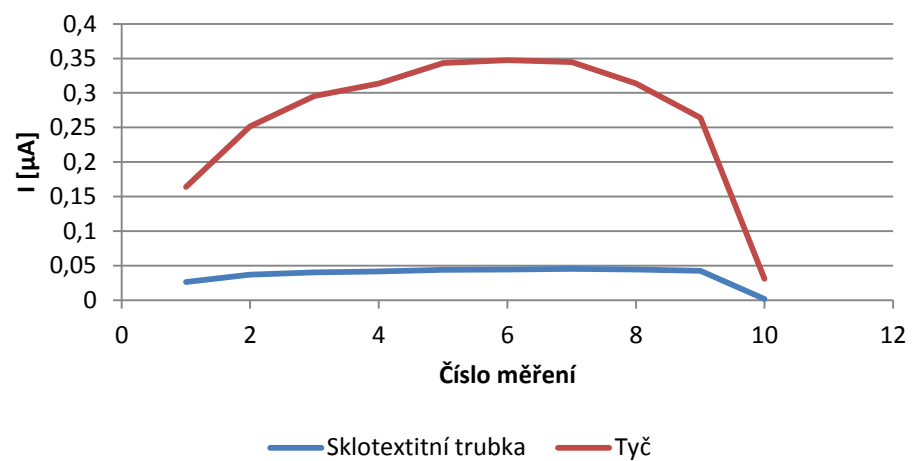
Lak Corona Shield® P 8002



Obr. 3.6: Rovnocennost měření na sklotextitní trubce a tyči

Na Obr. 3.7 je znázorněna analýza rozptylu provedená u polovodivé ochrany Corona Shield® 217.01, ze které je patrné, že průnik ploch pod naměřenými křivkami na tyči a na sklotextitní trubce není dostatečný a tím pádem je nemůžeme prohlásit za rovnocenné.

Páska Corona Shield® 217.01



Obr. 3.7: Porovnání měření na tyč a sklotextitní trubce

Závěr

Tato bakalářská práce byla zaměřena na princip a konstrukci točivých elektrických strojů, konkrétně na problematiku výbojů, vznikajících ve satorových vinutích točivých elektrických strojů. Byly zde popsány druhy výbojů způsobující předčasnou degradaci izolačních systémů elektrického stroje a možnosti eliminace jejich vzniku. Dále se práce zaměřila pouze na výboje vznikající na výstupu z drážky satoru. Jako ochrana proti těmto výbojům byly prezentovány polovodivé pásy a laky, které díky svému nelineárnímu odporu tyto výboje minimalizují.

V praktické části práce bylo provedeno měření polovodivých ochran aplikovaných na tyč, a tyto výsledky byly porovnávány s měřením, které bylo prováděno se stejnými druhy polovodivých ochran, ale aplikovanými na sklotextitové trubce. Výsledky z těchto měření byly zpracovávány pomocí analýzy rozptylu, která nám ukázala, jak moc se měření na tyči a sklotextitní trubce u jednotlivých ochran liší. Z výsledku bylo patrné, že u polovodivých ochran Corona Shield® 217.01, Corona Shield® 217.02, Corona Shield® 217.03, Corona Shield® 217.21, Corona Shield® 217.22, Corona Shield® P 8001 a Akasic nelze říci, že hodnoty získané z měření na tyči a sklotextitní trubce jsou rovnocenné. Jediná polovodivá ochrana, u které můžeme říci, že měření na tyči a sklotextitní trubce jsou rovnocenná, je lak Corona Shield® P 8002 od společnosti Von Roll. V průběhu měření došlo u polovodivých ochran Corona Shield® 217.02, Corona Shield® 217.03, Corona Shield® 217.22, Corona Shield® P 8001 k propálení části ochrany. Toto selhání ochrany bylo nejspíše způsobeno jinou geometrií vzorku.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HRUŠKOVIČ, Ladislav. *Elektrické stroje*. Bratislava: STU, 1999. ISBN 80-227-1249-3.
- [2] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [3] MENTLÍK, Václav, Pavel TRNKA, Josef PIHERA a Roman HAMAR. Zvýšení provozní spolehlivosti motorů s měniči s rychlými spínacími prvky. *Zvýšení provozní spolehlivosti motorů s měniči s rychlými spínacími prvky* [online]. 2008, 12/2008 [cit. 2014-03-30].
Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=38198
- [4] STONE, Greg. *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, c2004, xviii, 371 p. ISBN 04-714-4506-1.
- [5] UHLÍŘ, Ivan. *Elektrické stroje a pohony*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, 137 s. ISBN 978-80-01-03730-0.
- [6] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika izolantů*. 1. vyd. Plzeň: VŠSE, 1986. skriptu 62 s.
- [7] BARTÁK, Alexandr. *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1984. 254 s.
- [8] Měření a charakter částečných výbojů (ČV) v točivých strojích. *Měření a charakter částečných výbojů (ČV) v točivých strojích* [online]. 2012, č. 1 [cit. 2014-04-04].
Dostupné z: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.elektroprumysl.cz/merici-technika/mereni-a-charakter-castečných-vyboju-cv-v-tocivých-strojích-3>
- [9] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [10] DEGRADACE IZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ TOČIVÝCH STROJŮ: ELEKTRICKÉ STROMEČKY. [online]. [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/15-sirucek.pdf>
- [11] TRNKA, Pavel, Josef PIHERA a Martin ŠIRŮČEK. Elektrické stromečky – fenomén v elektroizolačních materiálech. *Elektrické stromečky – fenomén v elektroizolačních materiálech* [online]. [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=40272 http://www.odborne-casopisy.cz/index.php?id_document=40272
- [12] Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* [online]. [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www2.le.ac.uk/departments/engineering/research/electrical-power/electrical-insulation-and-dielectric-phenomena>
- [13] BRÜTSCH, Rudolf a Thomas HILLMER. Corona Protection in Rotating High Voltage Machines. In: *Corona Protection in Rotating High Voltage Machines* [online]. 2006 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.vonroll.com/media/files/fepublikationen/CPIRHVM.pdf>
- [14] Materiály pro izolaci čel cívek a podobné použití [online]. [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.silent-czech.cz/produkty/izolacni-materialy/slidove-materialy/b-materialy-pro-izolaci-čel-civek-a-podobne-pouziti/>
- [15] HAFNER, B., H. GSELLMANN a P. MAREK. *Corona resistant conductive materials*.

- [16] The Development of Semiconducting Materials for Anti- Corona Protection Designs of Generator High Voltage Windings and their Testing at Cryogenic Temperatures [online]. 2008 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4570363&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4570363
- [17] Vacuum Impregnation Processes. In: GILMORE, Chris. Vacuum Impregnation Processes [online]. 2012 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.godfreywing.com/blog/bid/113703/Vacuum-Impregnation-Processes>
- [18] Magnetická hystereze. In: Magnetická hystereze [online]. 2008 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/296-magneticka-hystereze>
- [19] PIHERA, J., P. MARTÍNEK, P. TRNKA a P. NETOLICKÝ. Analýza signálu pulzů částečných výbojů. In: Analýza signálu pulzů částečných výbojů [online]. 2008 [cit. 2014-05-26]. ISSN 1802 – 4564. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/454/r2c2c1.pdf?sequence=1>
- [20] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006, 139 s. ISBN 978-80-7043-444-4.
- [21] Princip stejnosměrných motorů. *Princip stejnosměrných motorů* [online]. 2008 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/princip-stejnosemnych-motoru>
- [22] Stress Grading for High Voltage Motor and Generator Coils. *Stress Grading for High Voltage Motor and Generator Coils* [online]. 1995, č. 4 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=00400761>
- [23] Anti corona: CoronaShield® CS 217.02. Dostupné z: [online]. [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: http://www.sibel.bg/upl_doc/CoronaShield%20217.02-EN.pdf
- [24] Anti corona: CoronaShield® P 8002 Dostupné z: [online]. [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: <http://www.bagdistribution.fr/bag/upload//site/default/FT/Anglais/VonRoll/Vernis%208002.pdf>
- [25] Anti corona: CoronaShield® CS 217.22. Dostupné z: [online]. [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: http://sibel.bg/upl_doc/CoronaShield.%20217.22-EN.pdf
- [26] Anti corona: CoronaShield® CS 217.01. Dostupné z: [online]. [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: http://www.sibel.bg/upl_doc/CoronaShield%20217.01-EN.pdf
- [27] Anti corona: CoronaShield® CS 217.21. Dostupné z: [online]. [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: http://www.sibel.bg/upl_doc/CoronaShield%20SC%20217.21-EN.pdf
- [28] KRPAL, Ondřej. Výbojová činnost ve vinutí synchronního stroje a její eliminace. 2011 [cit. 2014-05-20].
- [29] Two-way ANOVA. *Two-way ANOVA* [online]. [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.multid.se/genex/hs465.htm>

Příloha

Příloha A – Naměřené hodnoty na polovodiivých ochranách

217.01										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U [V]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]
250	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
500	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
750	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05	0,06	0,05	0,05
1000	0,08	0,10	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
1250	0,11	0,13	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
1500	0,15	0,16	0,16	0,15	0,16	0,16	0,15	0,16	0,16	0,15
1750	0,19	0,21	0,21	0,21	0,23	0,21	0,19	0,21	0,21	0,19
2000	0,24	0,27	0,29	0,27	0,31	0,27	0,27	0,27	0,27	0,26
2250	0,32	0,34	0,39	0,36	0,42	0,37	0,36	0,39	0,37	0,36
2500	0,42	0,45	0,50	0,47	0,58	0,50	0,48	0,52	0,50	0,47
2750	0,53	0,58	0,66	0,63	0,78	0,68	0,65	0,68	0,66	0,65
3000	0,71	0,78	0,87	0,84	1,10	0,90	0,87	0,94	0,87	0,86
3250	0,94	1,03	1,15	1,13	1,53	1,23	1,20	1,29	1,15	1,16
3500	1,28	1,41	1,57	1,55	2,16	1,70	1,68	1,74	1,57	1,58
3750	1,71	1,86	2,13	2,10	3,04	2,29	2,34	2,41	2,10	2,20
4000	2,33	2,58	2,84	2,84	4,31	3,26	3,38	3,38	2,92	3,04
4250	3,20	3,68	3,99	3,89	5,99	4,47	4,77	4,75	4,14	4,17
4500	4,62	5,07	5,43	5,32	8,47	6,33	6,88	6,59	5,72	5,67

217.21										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U [V]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]
250	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
500	0,05	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
750	0,08	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
1000	0,11	0,10	0,10	0,11	0,10	0,10	0,11	0,11	0,10	0,10
1250	0,15	0,13	0,15	0,15	0,13	0,15	0,13	0,15	0,15	0,13
1500	0,21	0,16	0,18	0,19	0,16	0,18	0,21	0,16	0,19	0,18
1750	0,26	0,23	0,24	0,26	0,21	0,24	0,26	0,24	0,21	0,26
2000	0,34	0,29	0,32	0,34	0,27	0,29	0,27	0,32	0,29	0,34
2250	0,45	0,39	0,44	0,45	0,34	0,45	0,34	0,44	0,39	0,39
2500	0,61	0,52	0,61	0,61	0,42	0,52	0,61	0,52	0,61	0,61
2750	0,78	0,68	0,82	0,84	0,52	0,68	0,82	0,78	0,68	0,84
3000	0,99	0,94	1,08	1,20	0,68	0,94	1,20	1,08	0,99	1,20
3250	1,34	1,24	1,49	1,63	0,89	1,24	1,49	1,63	1,34	1,34
3500	1,83	1,76	2,02	2,34	1,23	2,34	2,02	1,76	2,02	1,83
3750	2,58	2,29	2,96	3,34	1,71	2,96	3,34	2,29	2,58	2,29
4000	3,65	3,17	4,22	4,47	2,41	4,22	4,47	3,17	4,47	3,65
4250	4,96	4,54	6,17	6,51	3,46	6,51	4,54	6,17	4,96	4,54
4500	7,00	5,93	8,59	8,76	5,27	8,59	7,00	8,76	5,93	7,00

217.22										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U [V]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]
250	0,02		0,02	0,02	0,02	0,02		0,02	0,02	0,02
500	0,05		0,05	0,05	0,05	0,05		0,05	0,05	0,05
750	0,10		0,10	0,10	0,08	0,10		0,08	0,08	0,08
1000	0,18		0,15	0,18	0,18	0,18		0,16	0,16	0,16
1250	0,32		0,27	0,34	0,27	0,36		0,29	0,29	0,31
1500	0,53	Propálená při 3,5 kV	0,48	0,58	0,48	0,60	Propálená při 4 kV	0,52	0,52	0,50
1750	0,92		0,76	1,00	0,86	1,02		0,90	0,87	0,87
2000	1,53		1,24	1,57	1,39	1,71		1,44	1,42	1,39
2250	2,58		2,00	2,67	2,23	2,63		2,46	2,34	2,41
2500	3,99		3,21	4,49	3,41	4,28		3,81	3,55	3,78
2750	6,16		4,88	6,32	5,49	6,59		5,99	5,86	5,96
3000	9,71		8,06	9,71	8,29	10,29		9,87	9,29	9,48
3250	14,96		12,54	14,91	13,57	15,72		15,30	14,02	13,75
3500	24,09		19,40	24,10	19,71	24,10		22,74	20,69	22,16
3750	35,22		29,97	33,93	31,91	35,06		34,89	31,83	34,25
4000	52,34	45,56	50,73	45,72	53,63	52,50	49,43	50,73		
4250	77,06	73,02	80,13	70,11	78,76	79,64	73,99	76,74		
4500	131,0	122,0	132,1	117,9	126,7	133,3	117,1	120,0		

akasik										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U [V]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]
250	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
500	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
750	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
1000	0,08	0,06	0,08	0,06	0,06	0,08	0,06	0,06	0,06	0,08
1250	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
1500	0,13	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
1750	0,16	0,13	0,13	0,15	0,13	0,15	0,13	0,15	0,13	0,13
2000	0,18	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
2250	0,21	0,19	0,19	0,19	0,18	0,19	0,19	0,18	0,19	0,19
2500	0,24	0,21	0,23	0,21	0,23	0,23	0,21	0,23	0,23	0,21
2750	0,27	0,24	0,26	0,24	0,24	0,24	0,27	0,24	0,24	0,24
3000	0,32	0,27	0,29	0,29	0,27	0,27	0,29	0,27	0,27	0,27
3250	0,36	0,32	0,34	0,34	0,32	0,34	0,34	0,32	0,34	0,32
3500	0,44	0,37	0,39	0,39	0,37	0,39	0,37	0,39	0,39	0,37
3750	0,50	0,42	0,44	0,47	0,42	0,44	0,47	0,42	0,42	0,47
4000	0,60	0,52	0,52	0,58	0,52	0,52	0,58	0,58	0,52	0,52
4250	0,74	0,66	0,61	0,73	0,63	0,61	0,66	0,63	0,61	0,61
4500	0,99	0,82	0,78	0,90	0,78	0,78	0,90	0,82	0,78	0,78

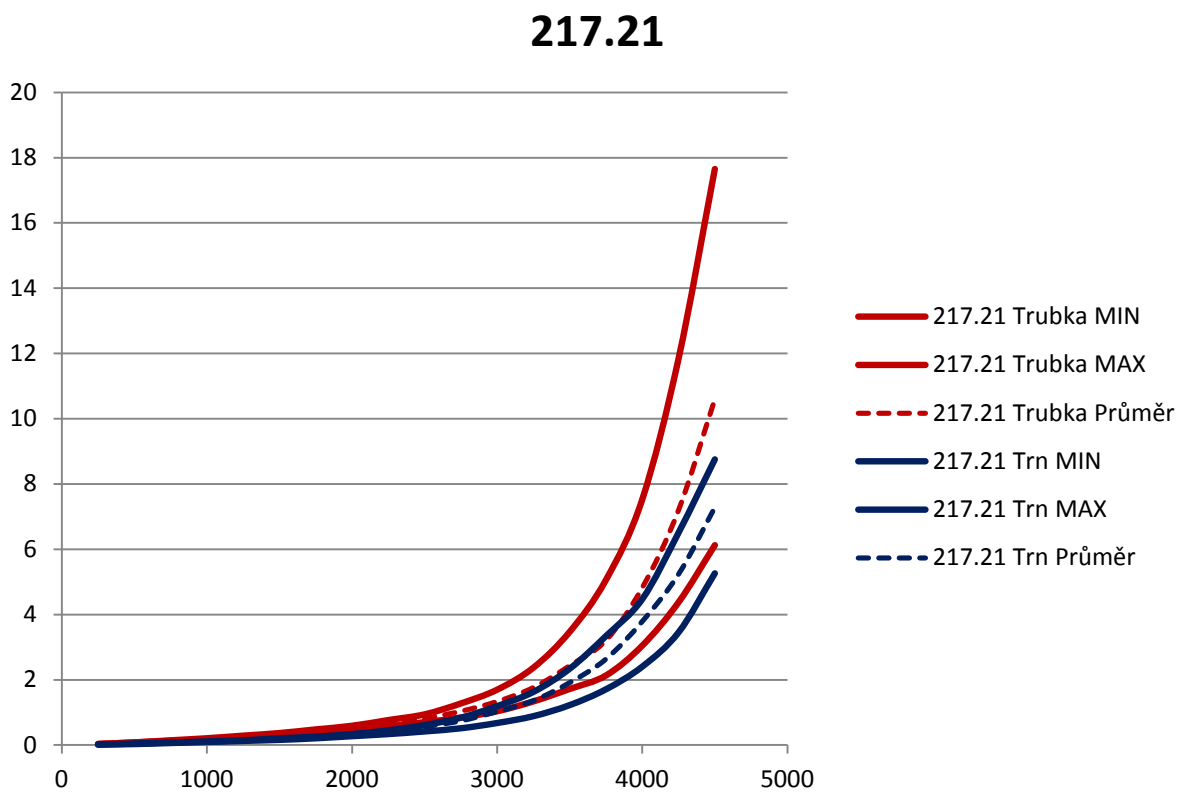
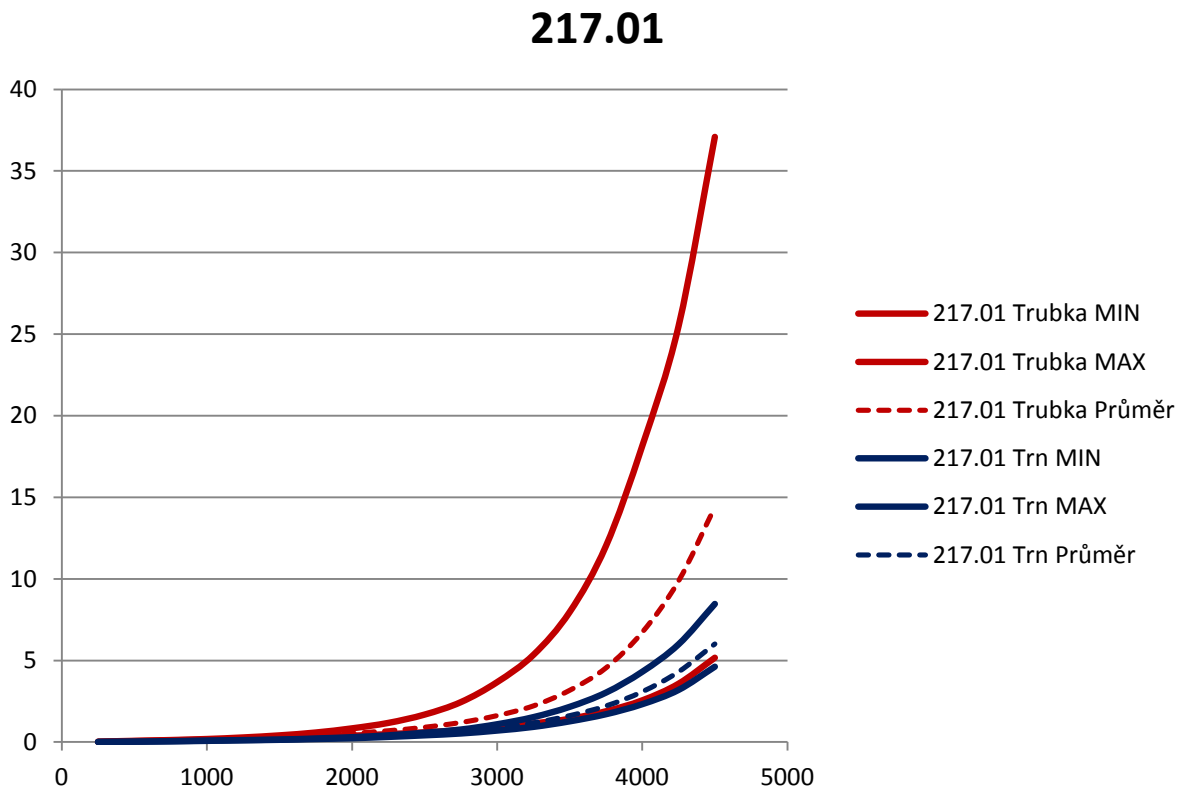
217.03										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U [V]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]
250	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02		0,02	0,02	0,02	0,02
500	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03		0,03	0,03	0,03	0,03
750	0,06	0,06	0,08	0,06	0,08		0,06	0,08	0,06	0,08
1000	0,13	0,13	0,13	0,13	0,15		0,15	0,13	0,13	0,13
1250	0,23	0,23	0,23	0,23	0,26		0,23	0,23	0,26	0,23
1500	0,37	0,40	0,40	0,37	0,47	Propálená při 0,5 kV	0,37	0,37	0,40	0,40
1750	0,65	0,65	0,65	0,65	0,66		0,65	0,65	0,65	0,65
2000	1,02	1,08	1,03	1,00	1,13		1,08	1,13	1,02	1,02
2250	1,65	1,78	1,68	1,68	1,86		1,68	1,86	1,68	1,78
2500	2,79	2,84	2,65	2,68	2,96		2,68	2,84	2,65	2,96
2750	4,31	4,28	4,10	4,25	4,47		4,10	4,28	4,47	4,31
3000	7,11	6,74	6,35	6,27	6,85		6,27	6,35	7,11	6,74
3250	10,24	10,44	9,06	9,55	10,66		9,06	9,55	10,66	10,24
3500	17,17	15,80	14,99	15,54	16,67		15,80	17,17	15,54	16,67
3750	25,49	23,86	21,26	22,23	24,18		21,26	23,86	22,23	25,49
4000	39,74	35,86	32,79	34,09	37,48	37,48	32,79	35,86	39,74	
4250	59,77	51,53	51,05	51,70	53,80	53,80	51,05	51,53	59,77	
4500	95,32	84,98	75,93	82,55	89,98	82,55	84,98	89,98	95,32	

217.02										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U [V]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]
250	0,00	0,02	0,02	0,02		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
500	0,05	0,05	0,05	0,05		0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
750	0,11	0,11	0,11	0,11		0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
1000	0,23	0,24	0,24	0,23		0,23	0,24	0,23	0,24	0,27
1250	0,44	0,48	0,48	0,39		0,40	0,41	0,39	0,45	0,45
1500	0,79	0,81	0,82	0,74	Propálená při 3,5 kV	0,79	0,81	0,77	0,86	0,89
1750	1,35	1,47	1,36	1,31		1,37	1,37	1,31	1,47	1,51
2000	2,09	2,46	2,33	2,07		2,24	2,29	2,17	2,45	2,51
2250	3,59	3,83	3,81	3,13		3,65	3,72	3,54	3,98	4,09
2500	5,85	6,14	6,07	5,22		6,12	6,24	5,93	6,67	6,86
2750	9,08	10,00	9,84	8,45		9,35	9,54	9,07	10,20	10,48
3000	11,62	14,98	14,49	13,28		14,20	14,48	13,77	15,49	15,90
3250	21,26	23,72	22,15	20,00		22,83	23,29	22,12	24,89	25,57
3500	34,57	35,54	34,73	31,18		33,93	34,57	32,88	37,00	37,96
3750	53,31	52,50	52,02	46,69		51,45	52,50	49,92	56,14	57,67
4000	74,31	79,97	77,71	66,56	77,30	78,84	74,88	84,25	86,59	
4250	108,2	117,1	110,7	98,22	111,5	113,7	108,1	121,6	124,9	
4500	171,2	187,4	180,3	167,2	169,6	173,0	164,4	163,7	190,0	

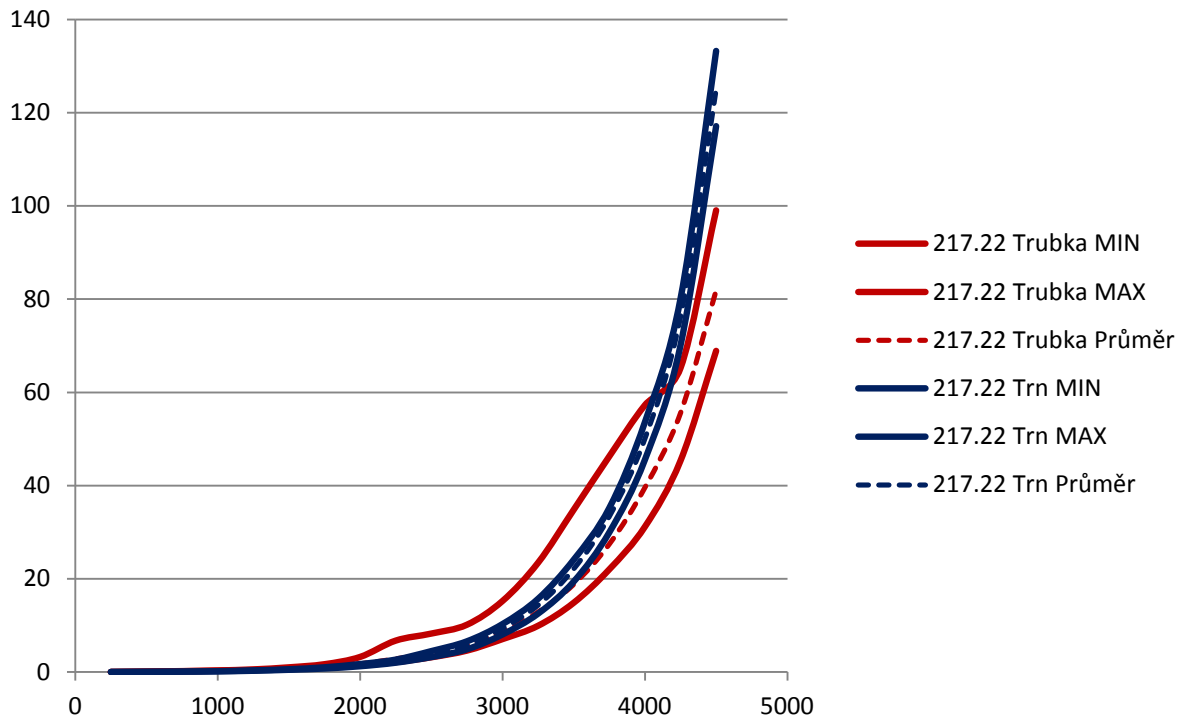
P8002 - lak										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U [V]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]
250	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
500	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03
750	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
1000	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
1250	0,15	0,13	0,15	0,15	0,15	0,13	0,13	0,13	0,15	0,13
1500	0,18	0,18	0,19	0,18	0,19	0,18	0,16	0,18	0,18	0,16
1750	0,24	0,23	0,24	0,24	0,26	0,23	0,23	0,21	0,26	0,21
2000	0,32	0,29	0,34	0,31	0,34	0,27	0,29	0,27	0,36	0,29
2250	0,42	0,39	0,44	0,40	0,45	0,39	0,39	0,37	0,48	0,39
2500	0,60	0,50	0,60	0,50	0,61	0,53	0,52	0,47	0,65	0,50
2750	0,76	0,69	0,78	0,69	0,82	0,74	0,68	0,61	0,81	0,63
3000	0,99	0,90	0,99	0,87	1,13	0,94	0,95	0,76	1,10	0,86
3250	1,26	1,23	1,36	1,20	1,53	1,32	1,23	1,03	1,45	1,11
3500	1,63	1,62	1,81	1,53	2,13	1,74	1,68	1,34	1,91	1,52
3750	2,25	2,20	2,55	1,99	2,91	2,50	2,18	1,79	2,71	2,02
4000	2,96	3,00	3,44	2,67	3,94	3,23	2,97	2,42	3,65	2,55
4250	4,22	4,14	4,85	3,70	5,51	4,23	4,14	3,36	4,88	3,47
4500	5,85	5,85	6,90	5,02	7,71	6,17	5,88	4,83	6,51	4,80

P8001 - lak										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U [V]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]
250	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02			0,02	0,02	0,02
500	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05			0,05	0,05	0,05
750	0,11	0,11	0,11	0,10	0,11			0,11	0,11	0,11
1000	0,19	0,19	0,21	0,18	0,21			0,21	0,21	0,21
1250	0,36	0,37	0,32	0,32	0,37			0,39	0,37	0,37
1500	0,60	0,60	0,61	0,53	0,63			0,61	0,63	0,60
1750	0,94	0,95	0,97	0,86	1,07			0,99	1,07	1,05
2000	1,52	1,44	1,42	1,24	1,68			1,58	1,60	1,53
2250	2,34	2,29	2,34	2,07	2,57			2,55	2,50	2,55
2500	3,62	3,46	3,57	3,20	3,97			3,65	4,20	3,97
2750	5,25	5,23	5,11	4,65	5,88			5,65	5,70	5,95
3000	7,96	7,93	7,75	6,77	8,53			8,53	8,51	8,69
3250	12,07	12,23	11,58	10,92	12,86			13,26	12,86	12,79
3500	17,80	18,93	18,14	16,93	19,40			19,77	19,90	19,03
3750	26,70	28,27	27,25	25,01	29,35			29,58	29,08	28,72
4000	41,36	41,36	41,36	38,61	39,10			45,72	41,52	42,16
4250	64,94	67,04	63,97	62,04	63,65			67,37	62,84	63,17
4500	124,7	116,8	115,8	116,6	116,3			114,2	109,0	110,7

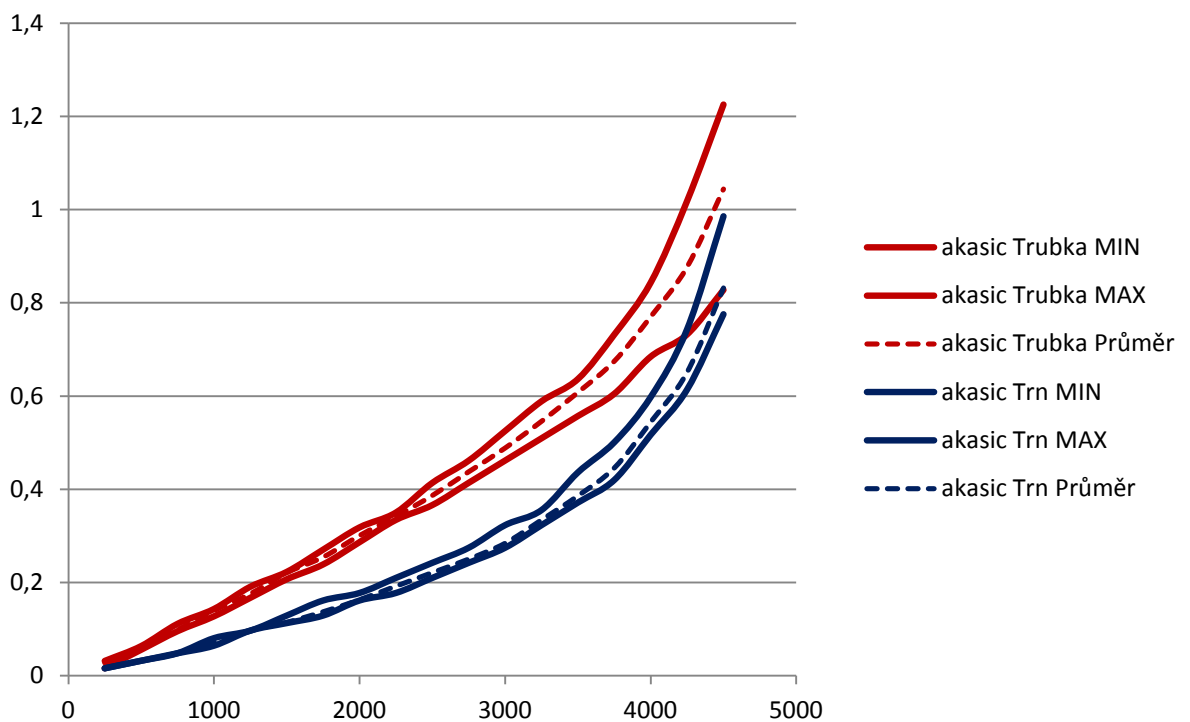
Příloha B – Grafy srovnávající měření na tyči a na sklotextitové trubce



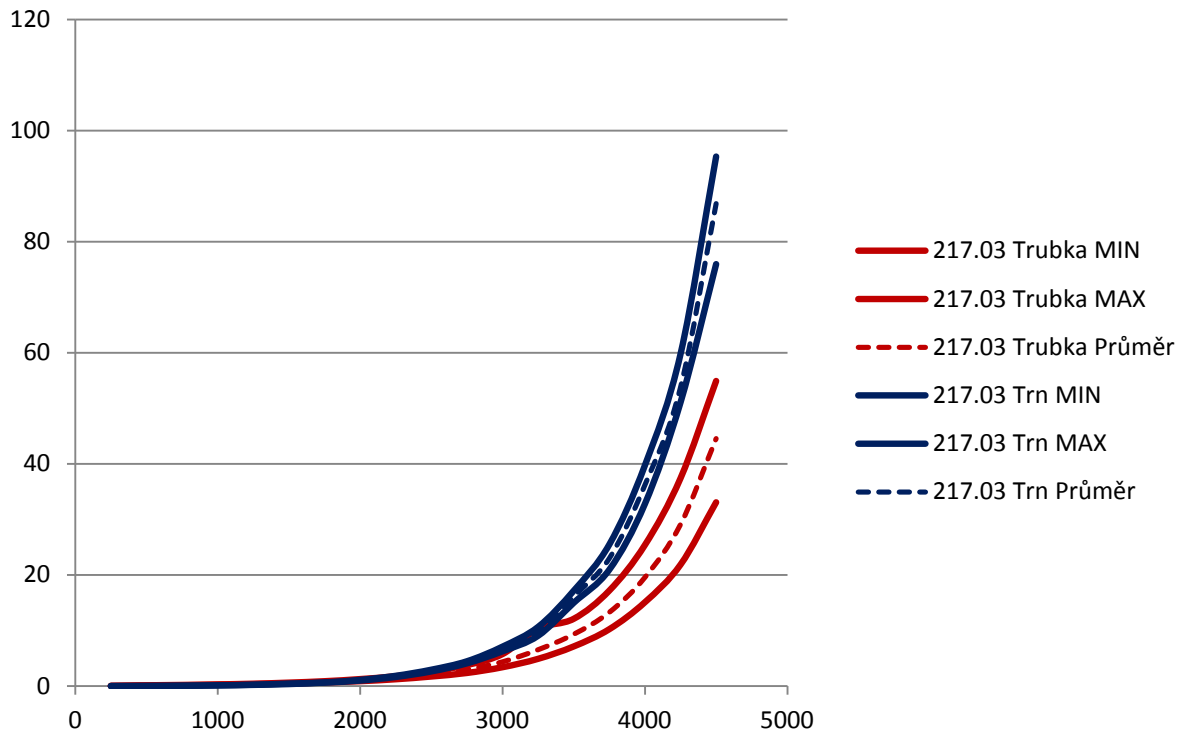
217.22



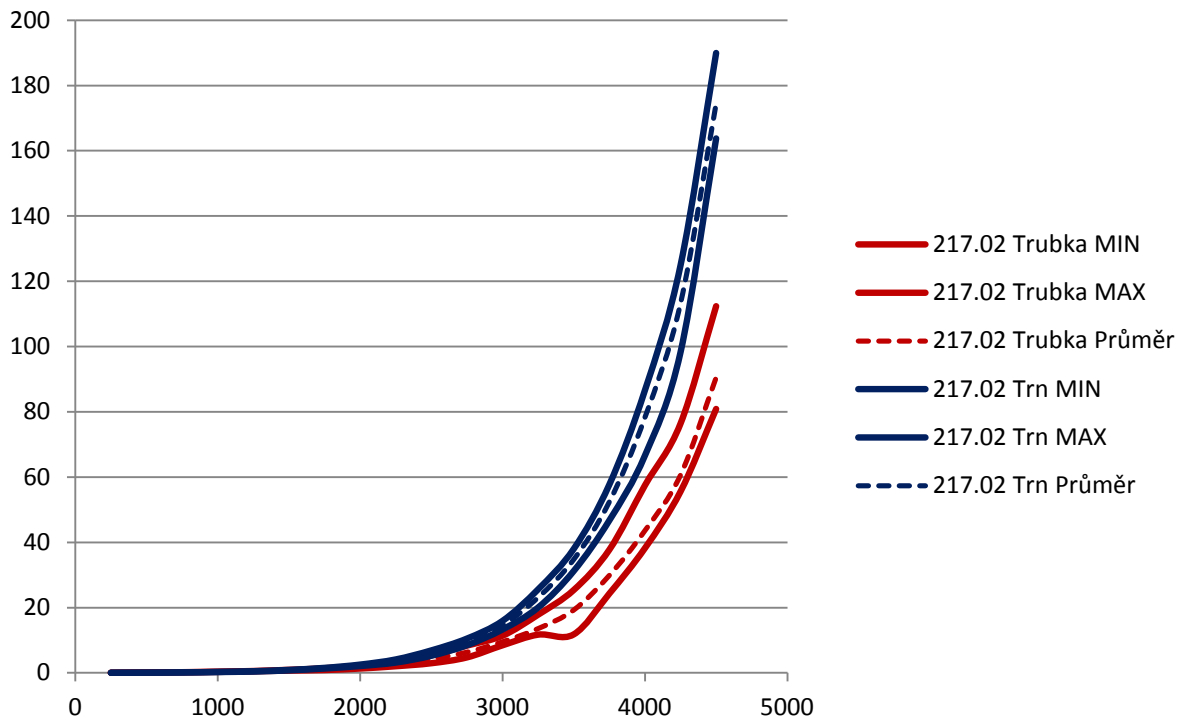
akasic



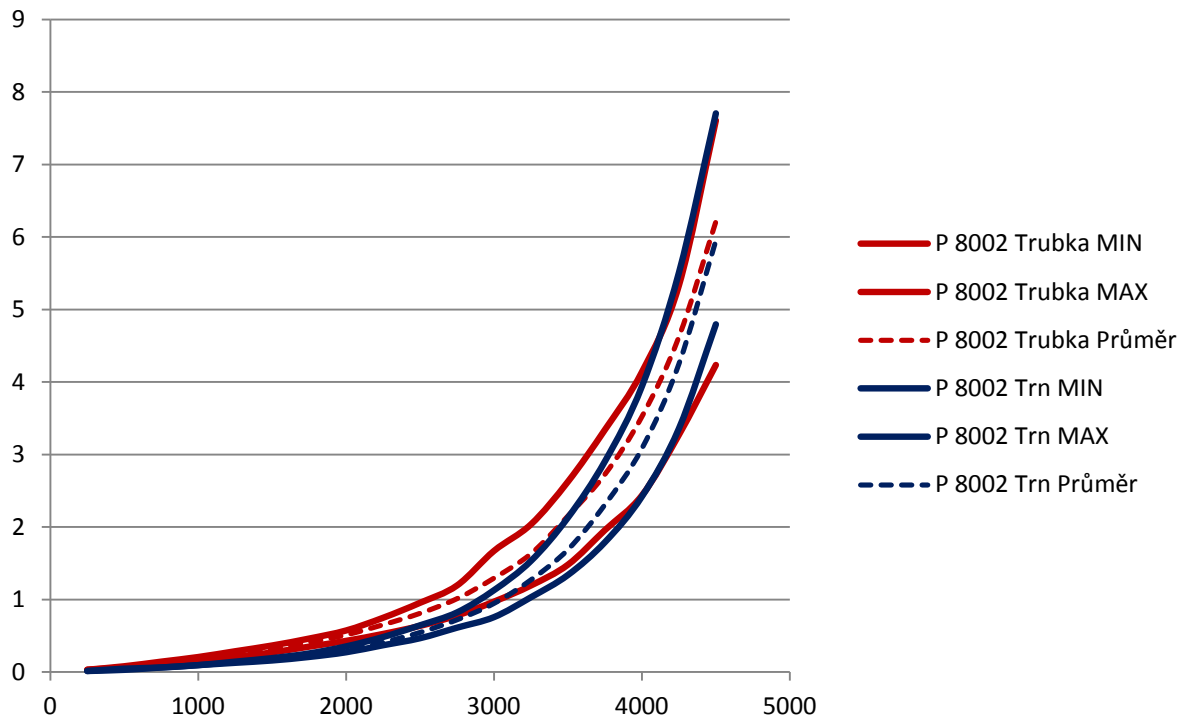
217.03



217.02



P 8002



P 8001

