

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Materiály pro polovodivé ochrany a technologie jejich
výroby**

Original/kopie zadání

Originál/kopie zadání

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou částečných výbojů ve velkých točivých strojích a jejich eliminací pomocí polovodivých ochran. Polovodivé pásy jsou ovinuty na vinutí u výstupu z drážky, kdežto vodivé páskou jsou navinuty na vinutí v drážce statoru, obě tyto ochrany slouží k rovnoměrnému rozložení gradientu elektrického pole. V praktické části práce byly změřeny $V - A$ charakteristiky polovodivých ochran.

Klíčová slova

Polovodivé ochrany, pásy, izolace, synchronní stroje, Von Roll, částečné výboje

Abstract

This bachelor thesis is dealing with problem of partial discharges in big rotating machines and their elimination by using semiconductive protections. Semiconductive tapes are wound in the end - winding of the stator slot like a protection against surface discharges whereas the conductive tapes are used in stator slots like a protection against partial discharges. The practical part of the work was a measuring of V-A characteristics.

Key words

Semiconducting protection tapes, insulation, synchronous machines, Von Roll, partial discharges

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 7.6.2013

Jan Bejček

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřejovi Křpalovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 SYNCHRONNÍ STROJE.....	11
1.1 KONSTRUKCE SYNCHRONNÍCH ALTERNÁTORŮ	11
1.2 TURBOALTERNÁTORY.....	11
1.3 HYDROALTERNÁTORY	12
2 IZOLAČNÍ SYSTÉMY	14
2.1 VYSOKONAPĚŤOVÉ IZOLAČNÍ SYSTÉMY TOČIVÝCH STROJŮ.....	15
2.2 TECHNOLOGIE RESIN – RICH	15
2.3 VPI.....	16
3 ELEKTRICKÁ PEVNOST.....	17
3.1 PASCHENŮV ZÁKON	18
3.2 ELEKTRICKÝ PRŮRAZ.....	19
4 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	20
4.1 VÝBOJE V HLAVNÍ IZOLACI A DRÁŽKÁCH STATORU	20
4.2 POVRCHOVÉ VÝBOJE U VÝSTUPU VYNUTÍ Z ČEL	21
4.3 VLIV ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ NA IZOLACI	21
4.4 ELIMINACE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	24
4.5 OCHRANY S SiC PLNIVEM.....	25
4.6 POLOVODIVÉ PÁSKY A LAKY	26
5 MĚŘENÍ POLOVODIVÝCH OCHRAN.....	27
5.1 POLOVODIVÉ PÁSKY VON ROLL – CORONASHIELD SC 217.01, 217.21 A AKASIC.....	28
5.2 POLOVODIVÉ PÁSKY VON ROLL – CORONASHIELD SC 217.02, 217.03 A 217.22	30
5.3 POLOVODIVÉ LAKY VON ROLL – CORONASHIELD SC P8001 P8002	31
5.4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	32
ZÁVĚR	34
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	35

Seznam symbolů a zkratk

VPI.....	Vacuum Pressure Impregnation
E	Intenzita elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$]
d	Vzdálenost mezi elektrodami [m]
E_p	Elektrická pevnost [$kV \cdot mm^{-1}$]
U_p	Průrazné napětí [V]
p	Tlak [Pa]
PE.....	Polyetylen
PTFE	Polytetrafluoretylen
XLPE	Zasíťovaný polyetylen
SiC	silicon-carbid
CB	carbon black
V-A	Volt-Ampér

Úvod

Točivé elektrické stroje jsou zařízení na přeměnu energie. Pracují na principu elektromagnetické indukce. Rozdělují se na dva základní typy, na motory a generátory. Generátor se nazývá stroj, který přeměňuje mechanickou energii na elektrickou, jejich hlavním účelem je vytváření elektrické energie. Naopak motor, je zařízení, které přeměňuje elektrickou energii na mechanickou.

Pro správnou funkčnost stroje je nutná kvalitní izolační systém, na ten působí velké namáhání. Hlavním jsou takzvané částečné výboje, které degradují izolaci a může dojít až k jejímu průrazu. To by zapříčinilo poruchu stroje a nutnou opravu a odstavení což je z ekonomického hlediska velice nepříznivé. Částečné výboje se dají omezit použitím polovodivých ochran, které jsou ve formách pásek a laků. Používají se jak v statorových drážkách, tak v čelech vnutí. Má velký podíl na životnosti stroje. Bez těchto polovodivých ochran by nemohl žádný stroj, který pracuje s napětím nad 5kV fungovat delší dobu.

V této práci se budeme zabývat problematikou částečných výbojů a jejich minimalizací, dále materiály a výrobou již zmíněných polovodivých pásek a laků, které se významně podílejí na životnosti strojů.

V praktické části se zaměříme na ověření vlivu polovodivých ochran na rozložení elektrického pole pomocí V – A metody.

1 Synchronní stroje

Synchronní stroj je zařízení na přeměnu energie, nejčastěji se používá ve formě generátoru k přeměně mechanické energie na střídavou elektrickou energii. Synchronní generátory se také nazývají alternátory, jsou většinou trojfázové a ze všech druhů generátorů jsou největší. Jejich výkon dosahuje i více než 1000 MW. Alternátory, které jsou poháněny plynovými nebo parními turbínami, mají vodorovnou hřídel a jejich rychlost otáček dosahuje 1500-3000 ot./min nazýváme turboalternátory, dále mohou být alternátory poháněny vodními turbínami při rychlosti od 100 do 1500 ot./min. a většinou bývají postaveny se svislými hřídelemi [1].

1.1 Konstrukce synchronních alternátorů

Stator synchronního alternátoru se příliš neliší od statoru asynchronního stroje, obsahuje magnetický obvod složený z plechů, které jsou vzájemně odizolované lakem nebo papírem, aby nedocházelo k velkým ztrátám vířivými proudy. V magnetickém obvodu jsou vytvořeny chladicí kanálky, kudy chladicí medium (vzduch nebo voda) odvádí ztrátové teplo.

Na vnitřním obvodu plechů jsou drážky, ve kterých je uloženo střídavé trojfázové vinutí. Začátek vinutí je připojen na svorky alternátoru, odkud se střídavý elektrický proud odebírá a vede do rozvodny a dále ke spotřebitelům. Konce vinutí jsou spojeny do uzlu. Dle konstrukce rotoru lze stroje rozdělit do dvou skupin: s hladkým rotorem a s vyniklými póly [8,9,11,12].

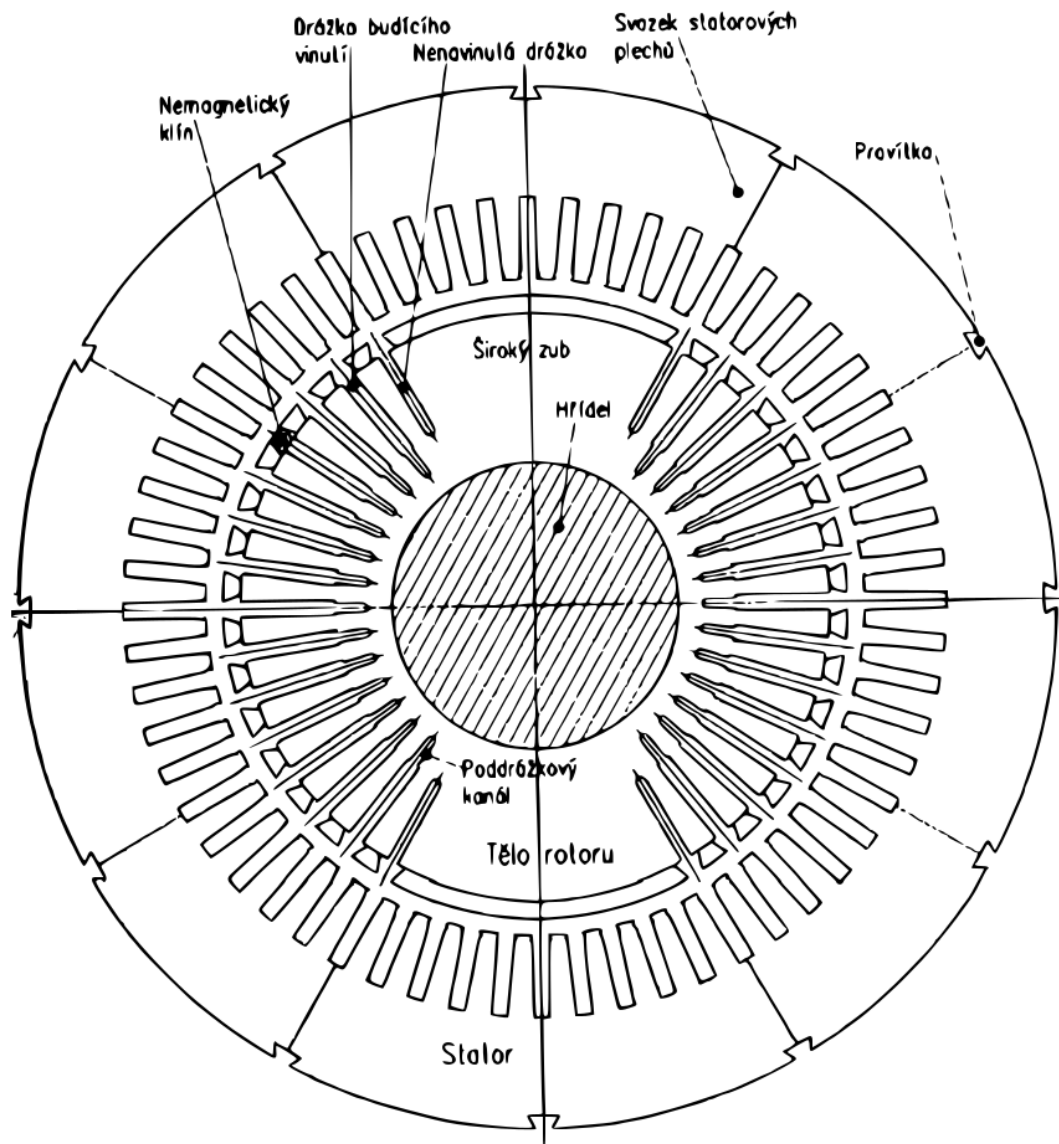
Mezi rotorem a státorem je vzduchová mezera, její velikost se pohybuje od několika milimetrů až do několika centimetrů, hlavním parametrem, podle kterého se tato velikost řídí je výkon stroje. Stator se pak u obou typů synchronních strojů neliší. Statorové vinutí se ukládá do drážek kde je zajištěno drážkovými klíny. U velkých strojů se pak používá dvouvrstvé vlnové vinutí. U některých turboalternátorů s vnitřním chlazením statorového vinutí se používá jednovrstvé vinutí [8,9].

1.2 Turboalternátory

Stroje s hladkým rotorem se nazývají turboalternátory. Při rychlosti 3000 ot./min působí na rotor značné odstředivé síly a proto je průměr rotoru omezen do 1,2 m kdyžto délka rotoru může dosahovat až 8 m. Takto dlouhé stroje se hůře chladí v jejich střední části, proto je nutné věnovat tomuto problému pozornost při jejich konstrukci. Nejčastěji se

turboalternátory vyskytují jako dvoupólové a při frekvenci 60 Hz čtyřpólové [10,11].

Rotor turboalternátoru je vyroben z jednoho kusu chromniklové oceli s dalšími přísadami (vanad, molybden) a má tvar hladkého válce s podélnými drážkami po obvodu. Do těchto drážek je upevněno pomocí nemagnetických klínů budící vinutí, které je napájeno stejnosměrným proudem. Konstrukční uspořádání je naznačeno na *Obr. 1.1* [11,12].

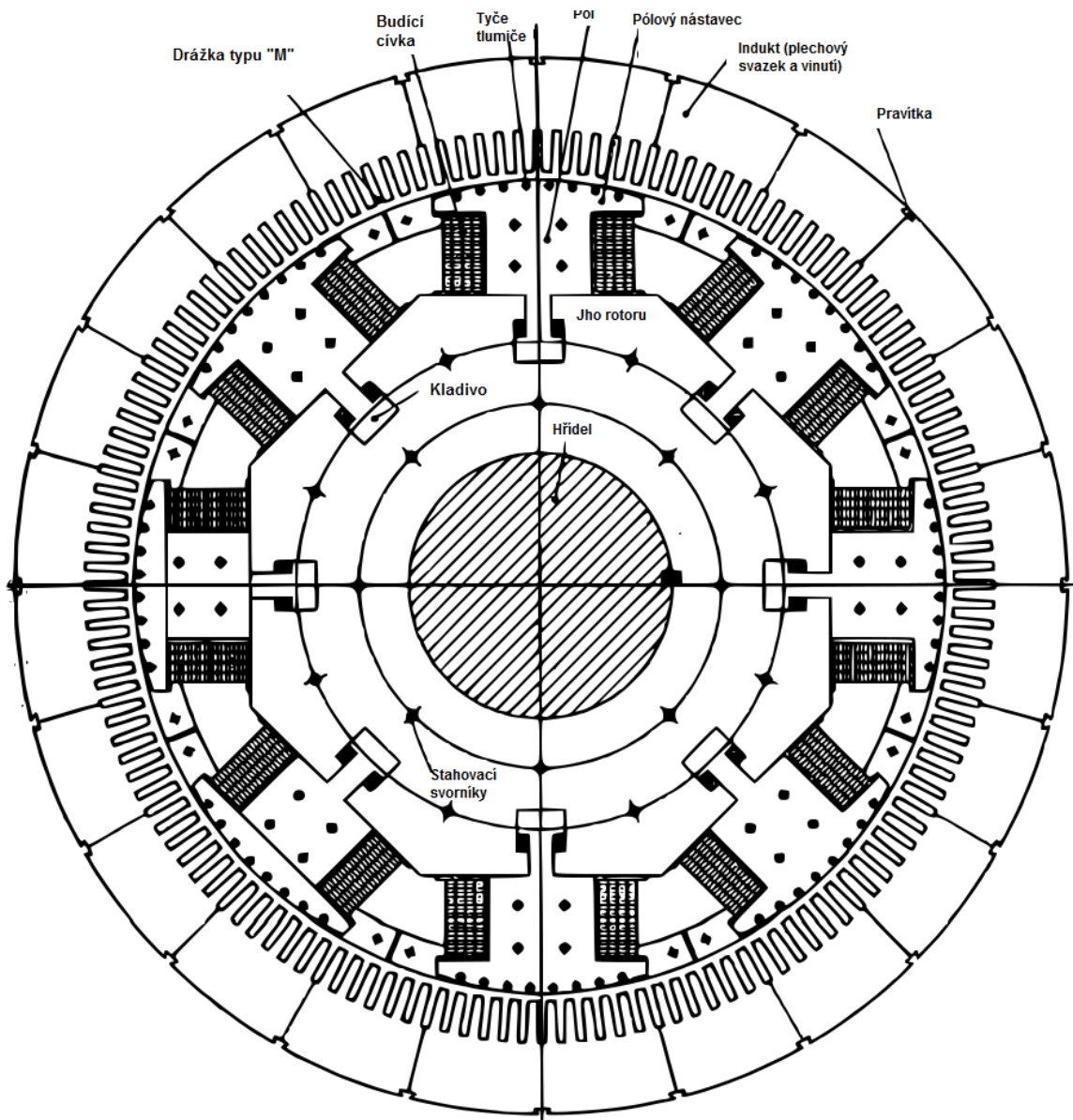


Obr. 1.1: Synchronní stroj - turboalternátor

1.3 Hydroalternátory

Stroje s vyniklými póly se nazývají hydroalternátory. Mají velký průměr až 15 m a délku až 3 m, protože u hydroalternátoru nepracujeme s tak velkými otáčkami, tudíž na něj nepůsobí tak velká odstředivá síla a můžeme si velký průměr dovolit. Stroje mají na rotoru

více pólů (4 až 80). Na jádře každého pólu je umístěno budící vinutí. Vinutí je drženo pólovými nástavci a rozpěrkami mezi póly a je spojeno tak aby střídavě vznikaly severní a jižní póly. Vinutí je připojeno ke sběracím kroužkům, které jsou upevněny na hřídeli rotoru. Na kroužky dosedají kartáče, pomocí kterých se do vinutí přivádí stejnosměrný budící proud. U velkých hydroalternátorů se používá tzv. tlumič, ten zamezuje při nárazovém zatížení tzv. kývání rotoru. Tlumič je řešen pomocí klecového vinutí umístěného v pólových nástavcích. Konstrukční uspořádání je naznačeno na *Obr. 1.2* [8,9].



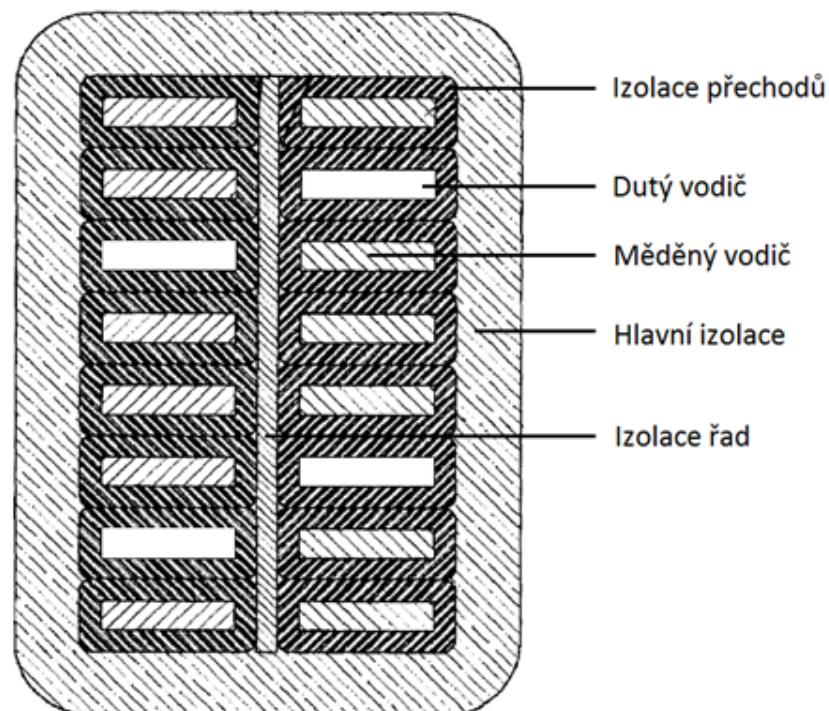
Obr. 1.2: Synchronní stroj - hydroalternátor

2 Izolační systémy

Pro velké točivé stroje je velmi nezbytné použít izolační systém pro statorová vinutí. Izolační systém se pak skládá z několika částí: izolace jednotlivých vodičů, izolace závitů, drážková izolace [1,12].

U vodičů s velkým průřezem dochází k tzv. skin effectu, tzn., že proudová hustota není rovnoměrně rozložena v celém průřezu vodiče, největší proudová hustota je pak v krajních částech vodiče. Magnetické pole rovněž není rozloženo rovnoměrně, proto dochází k ztrátám vířivými proudy. Oba tyto jevy mají za následek větší tepelné ztráty. Aby se zamezilo těmto nežádoucím ztrátám, používají se místo jednoho vodiče s velkým průřezem závitů vinutí z více vodičů. Každý z vodičů musí být od sebe vzájemně odizolován [1,12].

U strojů s vyšším napětím jsou využívány Roeblovy tyče. Princip Roeblových tyčí spočívá v uložení jednotlivých ve dvou sloupcích a jejich zkroucení. Každý vodič je stočen o 360° v průběhu drážkou, tzn., že jednotlivé vodiče se vzájemně rovnoměrně vystřádají. Řez Roeblovi tyče je znázorněn na *Obr. 2.1* [1,12].



Obr. 2.1: Roeblovi tyče, převzato z [13]

2.1 Vysokonapěťové izolační systémy točivých strojů

Pro výrobu vysokonapěťových izolačních systémů točivých strojů se používají dvě technologie. Obě značně rozdílné, mají řadu výhod, specifik i omezení v provedení, materiálech i aplikačních aspektech. Jedná se o technologie Resin – Rich, které již obsahují pryskyřici a technologii VPI (Vacuum Pressure Impregnation) – vakuově tlaková impregnace [1,12].

2.2 Technologie Resin – Rich

Základem tohoto systému je tříložkový kompozit s předimpregnovaným materiálem obvykle s 30 až 40 procenty pojiva. Nosnou částí je skleněná tkanina. Ta je složena ze stočených vláken a její tloušťka je přibližně 0,14 mm. Novější metodou nejsou vlákna stočena ale rovnána do roviny, tím se tloušťka zmenší na 0,12 mm. Elektrická pevnost se zvětší o 7% a dielektrické ztráty jsou nižší, zatímco mechanické vlastnosti obou metod jsou téměř stejné. Jako plnivo se používá kalcinovaný slídový papír, ten jen pevný, hutný a méně nasákavý. Jako plnivo se nejčastěji používá reaktoplastická bezrozpuštědloví novolaková nebo cykloalifatická epoxidová pryskyřice. Použitá pryskyřice se nachází v tzv. stavu B, tedy částečně vytvrzena. Samotná aplikace spočívá v tom, že na připraveném vinutí je vytvořena izolační vrstva dle požadovaného pracovního napětí. Tato vrstva může vzniknout dvěma způsoby [12].

První způsob tzv. kontinuální spočívá v tom, že požadovaná vrstva vznikne navinutím pásky se šířkou obvykle 20 mm s polovičním, třetinovým nebo dvoutřetinovým překrytím po celé délce tyče i v čelech. Navinutí je prováděno se stanoveným tahem, což zajišťuje lepší kvalitu. Tento způsob ovinu se nejčastěji používá u velkých strojů (např. hydroalternátory a turboalternátory) [12].

Při druhém způsobu ovinu tzv. diskontinuálním, je rovná část vinutí ovinuta izolačním materiálem, nejčastěji ve formě fólie. Následně se v lisu vytvrdí za zvýšeného tlaku a teploty. Čela cívek jsou ovinuta izolační páskou až po tomto vytvrzení. Následuje další vytvrzení, které je prováděno ve speciálních formách lisu za zvýšeného tlaku a teploty. Tento způsob ovinu se používá u menších a středně velkých strojů. Takto připravené vinutí se vkládá do drážek statoru, kde je prakticky po pospojování a dohotovení čel bez dalších zásahů do vinutí schopno fungovat [12].

2.3 VPI

Tato metoda dostala svůj název vakuově tlaková impregnace díky rozhodující výrobní operaci. Základem této technologie je savá slídová páska, která se skládá ze tří částí. Jako nosná složka je použita skleněná tkanina, polyesterová fólie nebo polyamidová fólie. Množství pojiva je zde minimální (7%) a je zde kvůli zpracování pásky. Pojivo musí být kompatibilní s použitým ipregnantem, aby nedošlo ke vzájemnému napadení při finálním zpracování [12].

Jako impregnant pro tuto technologii jsou použity bezrospouštědlové epoxidové, polyesterové a silikonové pryskyřice se 100% obsahem sušiny pro úplné vyplnění prostor impregnovaného objektu. Pryskyřice mají dobré elektrické i mechanické vlastnosti, krátkou vytvrzovací dobu a lze je použít pro třídy 180 a 200. Nejčastěji se tato metoda používá u trakčních motorů [12].

3 Elektrická pevnost

Elektrický průraz izolace je podobné jako mechanické selhání materiálu. Například pevnost v tahu materiálu závisí na síle chemických vazeb materiálu. K mechanickému selhání dojde, pokud jsou tyto vazby přetřhány mechanickým namáháním. Tahové namáhání (kPa) je definováno jako síla (kN) působící na plochu (m²). Čím větší je plocha na kterou síla působí, tím větší sílu dokáže materiál snášet, než dojde k přetržení. Různé materiály mají různou pevnost. Elektrická pevnost je také různá pro každý materiál.

Průraz není jen otázkou použitého napětí. Hlavním činitelem je pak velikost elektrického pole, stejně jako mechanická pevnost není závislá pouze na síle. Tak intenzita elektrického pole E je dána poměrem napětí (U) k vzdálenosti mezi elektrodami (d) jak jde vidět z následujícího vztahu.

$$E = \frac{U}{d}, \quad (3.1)$$

kde E – intenzita elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$],

U – napětí [V],

d – vzdálenost elektrod [m].

Při postupném zvyšování napětí, dojde dříve nebo později k průrazu izolantu, v tento moment je rovno průraznému napětí (U_p). Pokud toto napětí dosadíme do vzorce 3.1, dostaneme elektrickou pevnost (E_p) daného izolantu.

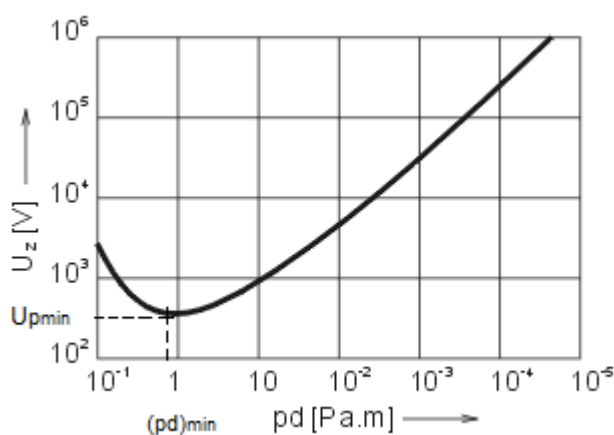
Izolanty se liší od vodičů a polovodičů nepřítomností volných elektronů, toto platí ale pouze při teplotách blízkých absolutní nule a s dokonalou krystalovou mřížkou izolantu. Při pokojové teplotě se vlivem tepelné ionizace dostanou elektrony do vodivostního pásu izolantu, avšak tento počet je z hlediska vodivosti zanedbatelný. Volné elektrony mohou dále vznikat působením vnějších činitelů. Například působení silného elektrického pole se ulehčuje přechod elektronů do vodivostního pásu [5].

Jako mechanická pevnost tak i elektrická pevnost je specifická vlastnost každého materiálu. Pro vzduch při pokojové teplotě a atmosférickém tlaku (100 kPa) je tato hodnota kolem 3 kV/mm. Elektrická pevnost vzduchu také závisí na tlaku a vlhkosti. Například pro vzduch, při tlaku 300 kPa je elektrická pevnost 9 kV/mm, to je pro stejnou vzdálenost

elektrod 3 krát větší elektrická pevnost při zvýšeném tlaku. Elektrická pevnost vodíku je skoro stejná jako vzduchu. Nicméně vodíkem chlazené generátory často pracují pod tlakem 300 kPa a více, takže elektrická pevnost v tomto tlaku je 9 kV/mm. To nám umožňuje pracovat s většími napětími než u vzduchem chlazenými stroji, které pracují při atmosférickém tlaku. Tento vztah je známý jako Paschenův zákon [3].

3.1 Paschenův zákon

Je dán funkcí $U_p = f(p \cdot d)$, tudíž pokud v homogenním elektrickém poli při stálé teplotě n -krát zmenšíme vzdálenost elektrod a zároveň n -krát zvětšíme tlak plynu, zůstane přeskokové napětí stejné. Grafické znázornění Paschenova zákona je tzv. Paschenova křivka, obr. 1.1.1. Hodnoty U_{pmin} a $(pd)_{min}$ jsou pro každý plyn jiné, pro vzduch je hodnota $U_{pmin} = 330 \text{ V}$ při $(pd)_{min} = 760 \text{ Pa} \cdot \text{mm}$. Z počátku předpokládáme konstantní vzdálenost elektrod a pouze zkoumáme vliv proměnného tlaku pro nízké hodnoty tlaků (sestupná část křivky). Volné dráhy částic jsou pro tak malé tlaky velké natolik, že většina elektronů uvolněných z kladně nabitě elektrody nenarazí na žádnou molekulu plynu cestou k záporně nabitě elektrodě. Z toho plyne, že se další nosiče elektrického náboje nemohou vytvořit. Pravá, vzestupná část křivky znázorňuje oblast vysokých tlaků, kde jsou naopak dráhy mále, zde se elektrony sráží příliš brzy s molekulami plynu a proto nestihly získat dostatečnou kinetickou energii nutnou pro ionizaci molekul plynu, pro vznik a udržení výboje je tedy ideální pohybovat se v minimu Paschenovy křivky [5,6,7].



Obr. 3.1: Paschenova křivka. Závislost zapalovacího napětí U na hodnotě $p \cdot d$ ve vzduchu.[7]

3.2 Elektrický průraz

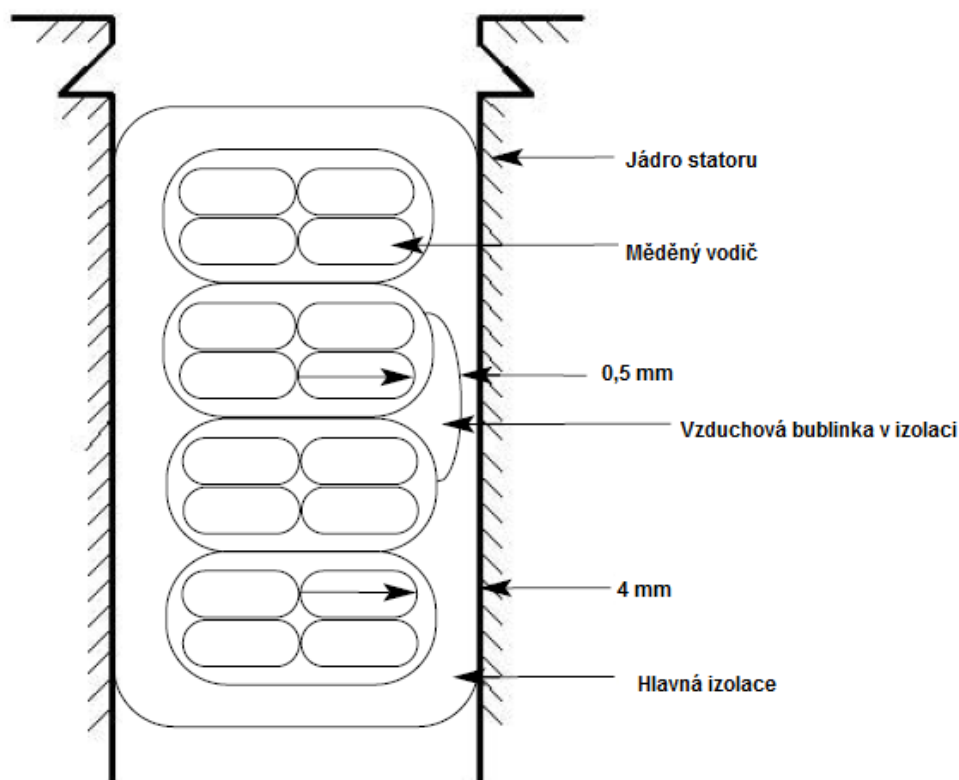
U elektrického průrazu mohou nastat dvě situace, první předpokládá malou koncentraci volných elektronů v izolantu, druhá naopak velkou koncentraci elektronů. Při malé koncentraci elektronů je mnohem menší pravděpodobnost vzájemných srážek elektronů než srážek se strukturou izolantu. Působením elektrického pole dojde k nárůstu elektrického proudu tekoucího v izolantu, ten je úměrný počtu volných elektronů. Za těchto okolností dochází k nárůstu energie přeměněné na teplo. Působením tohoto tepla se poruší struktura izolantu natolik, že dojde k průrazu. Při velké koncentraci elektronů dochází výměně energie mezi elektrony při vzájemných srážkách. Vlivem častých srážek se energie rozdělí mezi všechny elektrony. Pokud dochází ve větší míře k srážkám mezi elektrony než mezi elektrony a strukturou izolantu, dojde ke zvyšování elektronové teploty nad teplotou struktury izolantu do té doby, než nastane rovnováha mezi energií odevzdanou struktuře izolantu a energií získanou z elektrického pole. Rovnováha však platí pouze do určité mezní teploty. Po jejím překročení dojde k nekontrolovatelnému nárůstu teploty, následkem toho dojde k ohřevu izolantu a jeho následnému průrazu [5].

4 Částečné výboje

4.1 Výboje v hlavní izolaci a drážkách statoru

U šablonového vinutí či u Roebelových tyčí, které pracují s napětím větším než 5 kV, může dojít k takzvaným částečným výbojům v hlavní izolaci nebo mezi povrchem cívky a drážkou statoru. Tyto částečné výboje vznikají kvůli vysoko-napět'ovému namáhání, které působí na izolaci. Když při výrobě vznikne v izolaci vzduchová bublina, tak velké namáhání působící v izolaci prorazí vzduch a vznikne výboj. Obecně mají tyto výboje dobou trvání mnohem menší než 1 μ s [4]. Tento výboj negativně ovlivňuje vlastnosti izolace a snižuje její životnost a spolehlivost, pokud k němu dochází častěji a není nijak odstraněn může způsobit průraz izolace, který může vést k selhání celého motoru. Proto je nutné eliminovat vzduchové bubliny v izolaci. Navíc je nutná ochrana proti těmto výbojům mezi povrchem cívky a drážkou statoru kde se nachází vzduchová mezera. Na *Obr. 4.1* lze vidět průřez částí statoru se vzduchovou bublinkou v hlavní izolaci. [1,5].

Elektrická pevnost většiny pevných izolantů jako například epoxid a polyesterové materiály je kolem 300 kV/mm. To znamená, že pevné izolanty, které chrání statorové vinutí, jsou téměř 100 krát silnější než vzduch. Tudiž přítomnost vzduchové (vodíkové) bubliny v izolaci může vést k výboji v bublině a následné degradaci izolace. Jelikož je elektrická pevnost pevných materiálů tak velká, je skoro nemožné u správně dimenzované izolace aby došlo k jejímu průrazu, pokud v ní není bublina [1].



Obr. 4.1: Průřez statoru se vzduchovou bublinou [1]

4.2 Povrchové výboje u výstupu vynutí z čel

Kolem čel vinutí také dochází k částečným výbojům, hlavně v místech s vysokou intenzitou elektrického pole, tj. na výstupu statorového vinutí z drážky. Nerovnoměrnému rozložení elektrického pole může napomáhat například špatný stav izolačních materiálů, nebo také nečistoty, vlhkost, či stárnutí materiálu. Hlavní příčinou je ale vysoký gradient elektrického pole, v jehož důsledku dochází ke vzniku povrchových výbojů, které postupně degradují materiály. Částečné výboje mohou také vznikat mezi fázemi, podpěry čel, či jako výboje mezi fází a zemí na čele vinutí [1,2].

4.3 Vliv částečných výbojů na izolaci

Pro všechny druhy částečných výbojů platí, že mají degenerativní účinky na izolační systém, což způsobuje snižování elektrické pevnosti a zkracování životnosti izolantu. Vnější částečné výboje se nejvíce vyskytují na hranách a trvalé destruktivní účinky nemají na rozdíl od výbojů v izolaci, které mohou mít účinky elektro-erozivní, chemické a tepelné [2,5].

Pokud vznikne v dutince výboj, tak s velkou pravděpodobností vytvoří vodivé dráhy.

Při působení elektrického pole o vysoké intenzitě může vzniknout v daném místě čistě elektrický průraz a vodivá dráha se může postupně šířit izolantem. Degradační účinek mají také ionty a elektrony, které bombardují stěny dutinky, což má za následek erozi stěn dutinky, ta se pak postupně zvětšuje a při dalším působení eroze může nastat průraz izolantu. Těmto účinkům se říká elektro-erozivní [2,5].

Pokud dutinky obsahují kyslík, vzniká v dutinkách při působení částečných výbojů ozon, který nepříznivě ovlivňuje izolaci díky svým oxidačním účinkům. Ozon ve spojení s oxidy dusíku pak může při vysokých teplotách vytvářet kyselinu dusičnou, která je velmi agresivní. Chemickou destrukci izolantu mohou způsobit i některé produkty rozkladu izolanty při výbojích. Jelikož může dojít i k tepelnému průrazu izolantu je velmi důležité uvážit fakt, že produkty rozkladu mohou vytvářet vodivější oblasti. Těmto účinkům se říká chemické [2,5].

Opakovaným působením částečných výbojů může dojít k tepelné nestabilitě, jelikož se izolant otepluje a tím klesá hladina napětí tepelného průrazu. Těmto účinkům se říká teplené [2,5].

I přes snahu dodržovat přísné technologické postupy a přes stále se zlepšující výrobní metody a technologie, nelze úplně zabránit povrchovým a objemovým nerovnostem, které dávají za vznik částečným výbojům. Částečné výboje mají hlavně svým opakováním, škodlivý vliv na izolaci, rapidně zkracují její životnost a postupně snižují její elektrickou pevnost, až do bodu kdy dojde k průrazu izolantu. Obecně můžeme říci, že všechny výboje v pevných nebo kapalných izolantech jsou nebezpečné, velikost nebezpečí pak závisí na typu materiálu a umístění zdroje výboje. Dle tohoto jsou výboje ve venkovní vzduchové izolaci málo nebezpečné, částečné výboje v kabelech jsou však velkým nebezpečím pro funkčnost zařízení [2,5].

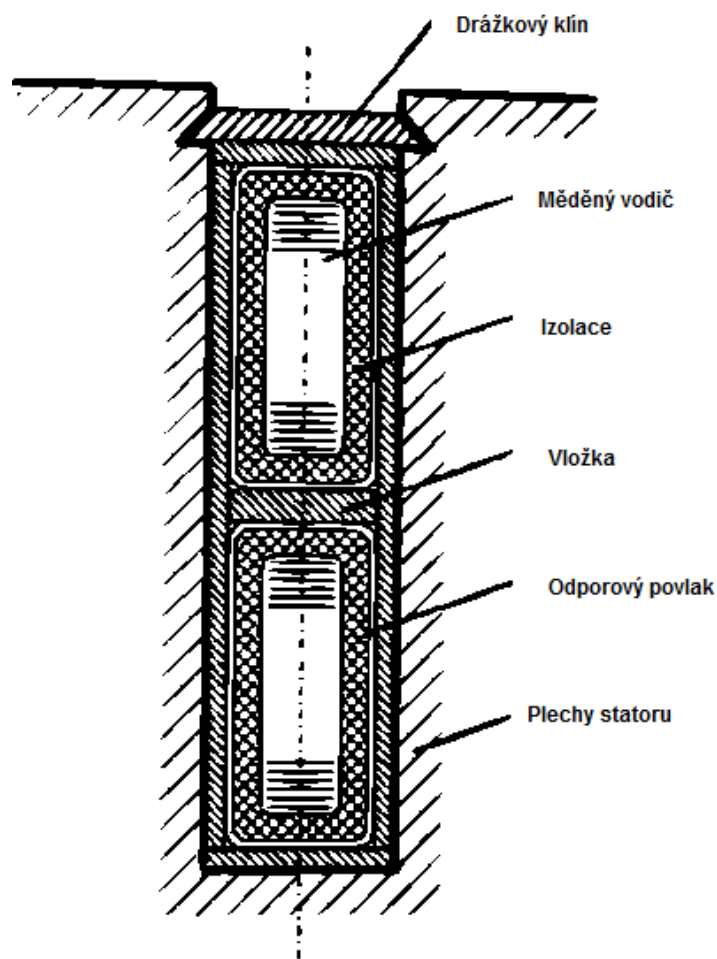
Pevné izolanty můžeme najít v každém izolačním systému točivých strojů a dají se rozdělit do dvou základních skupin podle citlivosti na účinky částečných výbojů. První skupinu tvoří materiály jako porcelán a slída, které jsou vůči částečným výbojům velmi odolné. Ani při dlouhodobém působení částečných výbojů nedojde u těchto materiálů k podstatné degradaci, čili ke zhoršení jejich izolačních vlastností. Výrobky ze slídy, které obsahují pojiva, mohou mít však menší odolnost. Další výhodou těchto materiálů je jejich odolnost vůči vysokým teplotám. Druhou skupinu tvoří vysokomolekulární plasty jako

polyetylen (PE), polytetrafluoretylen (PTFE, teflon), zasítovaný polyetylen (XLPE), ty jsou bohužel na částečné výboje velice náchylné. Jejich dlouhodobým působením dochází v izolaci k degračním procesům, které mohou vést k průrazu izolace. Velká pozornost e věnuje tzv. elektrickým stromečkům (treeing), které se vyskytují v silně namáhaných jednovrstvových izolantech, např. v kabelech [2,5,14].

Izolační systémy elektrických točivých strojů se vyznačují složitým uspořádáním různých izolantů, pro které je téměř nemožné vyrobit je tak, aby v nich nedocházelo k částečným výbojům. Nejslabším místem z hlediska spolehlivosti se pak u elektrických točivých strojů stává statorové vinutí. Dle studie o poruchovosti hydroalternátorů bylo 58% závad způsobeno uvolněním tyčí v drážkách statoru a drážkovými výboji, tedy částečnými výboji mezi povrchem izolace statorové tyče a dnem drážky statoru [2,5].

V 60. letech 20. století došlo k přechodu z termoplastických izolací na reaktoplastické na bázi epoxidů či polyesterů, s tímto přechodem se zvýšila elektrická pevnost izolačních systémů, ale vznikl nový problém s jejich provozem. Na rozdíl od termoplastických izolací, kde byl největší problém navlhání izolace, u reaktoplastických izolací vznikl problém s drážkovými výboji, s vibracemi tyčí a s uvolňováním klínů. To bylo způsobeno především horšími mechanickými vlastnostmi, např. odolnost na ohyby, mechanické rázy apod. [2,5].

V elektrických točivých strojích je statorové vinutí tvořeno tyčemi, které jsou uloženy v drážkách statoru a utěsnění klíny (viz *Obr. 4.2*). Povrh izolace tyčí je natřen vodivým lakem, který zajišťuje, že nulový potenciál je zároveň na dně drážky statoru i na povrchu izolace tyče, takže nedochází k částečným výbojům ve vzduchových mezerách mezi statorem a tyčemi. Při provozu stroje se vlivem dynamického namáhání tyč v drážce pohybuje a vodivý lak se tak postupně naruší, což má za následek vznik částečných výbojů v místech oděrů. Tyto částečné výboje rychle narušují celý vodový povlak a těsnící materiál utěšňující tyč v drážce. Tyč se pak vlivem mechanických otřesů v drážce uvolňuje a při provozu v drážce vibruje, což je velmi nebezpečné pro izolaci. V izolaci vlivem vibrací vznikají praskliny a nalomení, což má za následek podstatné zhoršení elektrické pevnosti. Z tohoto důvodu se provádí měření částečných výbojů, neboť nám poukazuje na uvolnění tyče v drážce a možnost jejího mechanického poškození [2,5].



Obr. 4.2: Statorové vinutí

4.4 Eliminace částečných výbojů

K eliminaci částečných výbojů se používají polovodivé pásy a laky, které zabraňují vzniku částečných výbojů ve vzduchových mezerách, které mohou být přítomny mezi cívkou a drážkami statoru, nebo na výstupu vnutí z čel [1,2,18].

Takzvané slot *conductive coating* neboli vodivá páska, která se používá v místech, kde se vinutí zakládá do statoru, slouží k eliminaci výbojů mezi statorovými plechy a vinutím. U téměř všech statorů, které pracují s napětím větším, než 6 kV dojde k částečnému výboji. U strojů, které jsou chlazeny vzduchem, vytvoří částečný výboj ozon. Ozon spolu s dusíkem vytváří kyseliny, které jsou velkým zdravotním rizikem, také dokážou oslabit pryžové materiály a korodují kov [1,2].

Aby se zabránilo těmto částečným výbojům, byla na povrch cívek navinuta polovodivá páska nebo lak. Tato páska nebo lak se skládá většinou z uhlíkových částic,

kteřé jsou spojeny pojivem, má čerňou barvu. Ve většine případů se dotýká uzemněného statorového jádra v mnoha místech. S dostatečně malou rezistivitou (150-650 Ω), se tato ochrana chová jako zem, jelikož je spojena s jádrem. Díky tomuto je napětí působící na jakoukoli vzduchovou mezeru mezi plechy statoru a cívkou nula, tudíž nemůže dojít k žádnému částečnému výboji, intenzita elektrického pole nepřesáhne 3 kV/mm [1,2,18].

Polovodivá ochrana vynutí je nutná jen pro statory pracující nad 6 kV, protože je velice nepravděpodobné že by došlo k vytvoření tak silného elektrického pole, které by prorazilo vzduch u nízkonapěťových strojů.

4.5 Ochrany s SiC plnivem

Polovodivé pásky, které zabraňují výboji v drážkách statoru, většinou končí jen par centimetrů od konce každé drážky, jinak by byl uzemněný povrch moc blízko připojení jednoho konce cívek k druhé. Léta praxe ukázali, že i úplně odizolované spoje mezi vinutími jsou slabým místem, v kterém může dojít selhání izolace, pokud je uzemněná část poblíž těchto částí [1].

Drážkové vodivé pásky nemohou být navinuty mimo drážku statoru, jelikož by zde vznikalo silné elektrické pole, které by přesahovalo svou intenzitou 3 kV/mm a došlo by zde k částečným výbojům. Čím menší je poloměr, tím větší je intenzita elektrického pole. Například hrot s napětí U , poloměrem r a vzdáleností mezi hrot d , dá za vznik poli o maximální intenzitě.

$$E = \frac{2U}{r \cdot \ln\left(\frac{4d}{r}\right)}, \quad (4.1)$$

kde E – intenzita elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$],

U – napětí [V],

r – poloměr [m],

d – vzdálenost mezi hroty [m].

To ukazuje, že poloměr je nejvíce důležitý pro maximální intenzitu elektrického pole [1].

SiC je speciální materiál, který má velmi zajímavou vlastnost, jelikož čím větší intenzita na něj působí, tím se jeho rezistivita snižuje. V minulosti byl křemíko-karbid používán ve vysokonapěťových svodů pro přeměrování vysokého napětí z blesku do země, zatímco při práci s pracovním napětím se choval jako izolant. Při použití na statorové vynutí a

tyče má velice malou rezistivitu v místech kde dochází k velkému namáhání, tj. konec drážky statoru a postupně rezistivita roste až ke konci vedení. Takle proměnná rezistivita dělá elektrické pole na konci drážky více jednotné a tím je snížena hodnota intenzity elektrického pole pod kritickou hranici 3 kV/mm [1].

SiC se většinou přimíchává do nosné barvy, nebo je vyroben formou pásky kde se smíchává s pojivem a vytvrzuje. Tato páska nebo barva je pak aplikovaná na povrch vnutí nebo tyče. Délka tohoto vnutí pak záleží na pracovním napětí, ale pro většinu případů stačí 5 až 10 cm [1].

4.6 Polovodivé pásky a laky

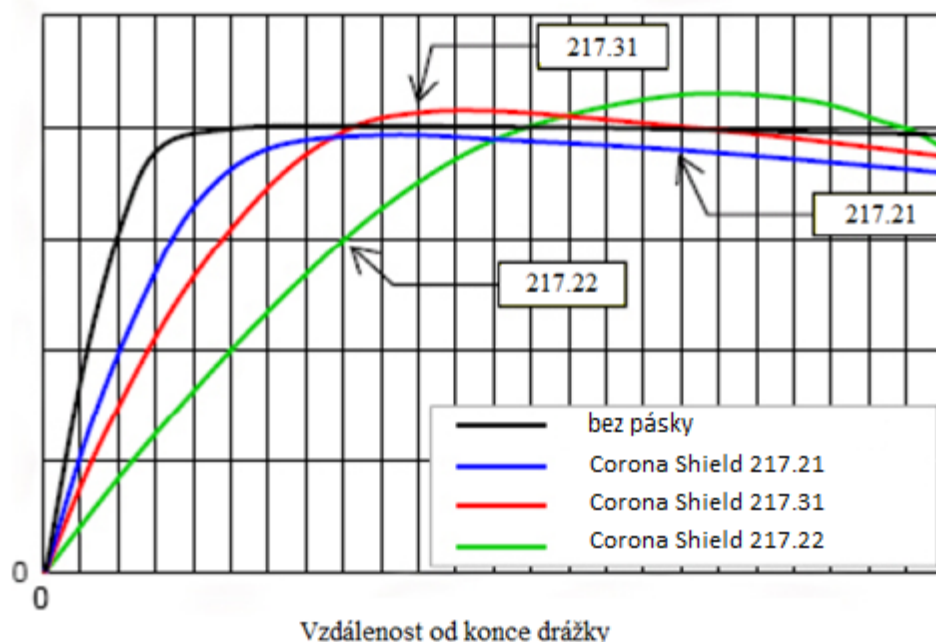
Polovodivé pásky a laky se vyrábí velice podobně jako izolační pásky a laky. Polovodivé pásky se skládají ze tří částí: nosná složka, pojivo a plnivo. Každý tento prvek je nedílnou součástí celého systému. Nosná složka tvoří konstrukční část celého systému. Úkolem nosné části je zajištění mechanických vlastností celého kompozitu. Jako nosná složka je nejčastěji použita skleněná tkanina. Plnivo pak tvoří největší část kompozitu (až 80%). Plnivo má zajistit dostatečné rozložení elektrického pole tak, aby nedocházelo k částečným výbojům ve strojích. Jako plnivo se nejčastěji používá SiC pro polovodivé pásky a CB (carbon black) pro vodivé pásky, které se používají v drážkách statoru. Obsah pojiva je rozdílný u různých typů pásek, tímto se budeme zabývat v další kapitole. Pojivo má za účel zajistit přenos sil a ochranu vláken. Jako pojivo se používají reaktoplasty a termoplasty např.: epoxidové pryskyřice, polyesterové pryskyřice a fenolické pryskyřice [12,19].

Polovodivé laky jsou roztoky látek, které po ztuhnutí vytváří kompaktní vrstvy. Laky se používaly spíše v minulosti, jejich hlavní nevýhodou je, že se ochrana rychle opotřebí a také to, že laky mají rozdílnou dobu vytvrzení. Lak je nutné nanášet v několika vrstvách. Jako laky jsou využívány syntetické pryskyřice s příměsí SiC [12,19].

5 Měření polovodivých ochran

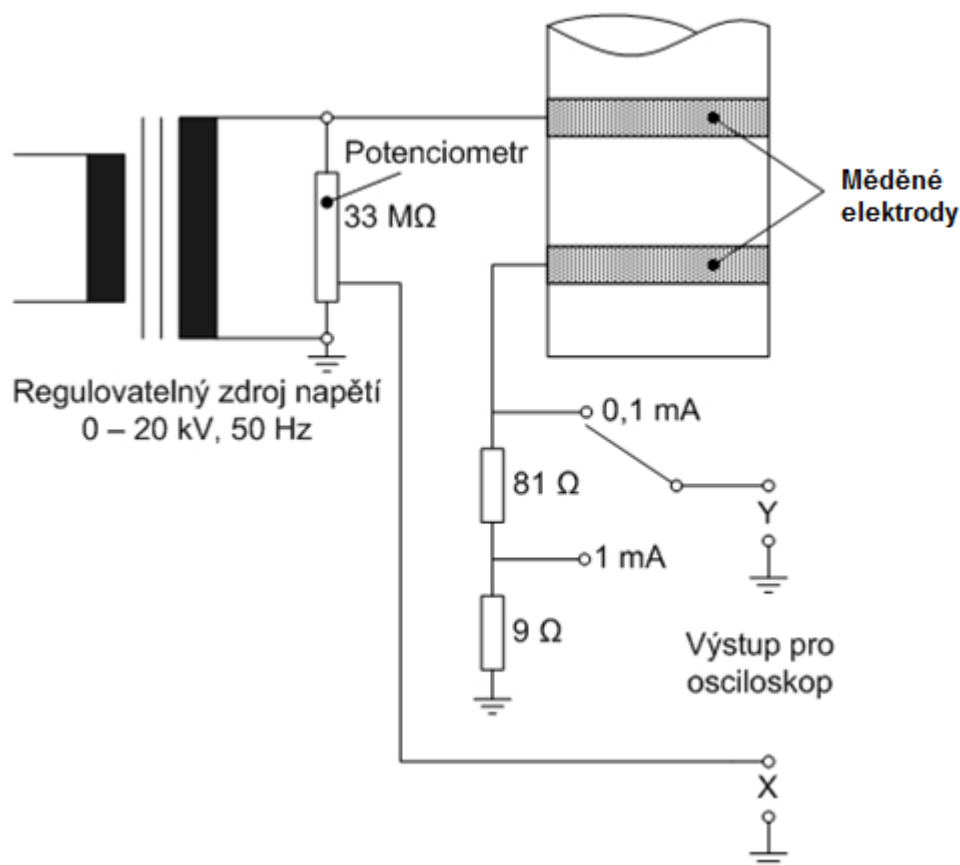
Polovodivé pásy a laky, které jsou naneseny vinutí velkých strojů, pomáhají rovnoměrně rozložit elektrický potenciál. V této části práce budeme ověřovat vliv polovodivých ochran pomocí V-A metody.

Pro vytvoření vzorku byla použita sklotextilová trubka o vnějším průměru 4 cm a tloušťkou 1mm pokrytá teflonem, na kterou byla navinuta polovodivá páska od společnosti Von Roll. Použité pásy byly různých typů, typ A je páska určená pro technologii Resin – Rich, jelikož již obsahuje velké množství pojiva (více jak 40%), jak je vidět z Obr. 5.1, typ A má tzv. *strong stress-grading characteristic*. Typ B je velice podobný typu A, také se používá pro technologii Resin – Rich, rozdíl je ve množství pojiva, jehož hodnota se ale také pohybuje kolem 40% , z grafu pak jde vidět že charakteristika typu B není tak ostrá. Poslední typ C, je s minimálním množstvím pojiva, používá se výhradně pro technologii VPI kde je páska dosycena dalším pojivem v průběhu technologického procesu. Páska byla navinuta ručně s polovičním překryvem. Jako vzorek byl použit i polovodivý lak taktéž od společnosti Von Roll, konkrétně P8001 a P8002, který se nanášel postupně v pěti vrstvách s rozmezím 30 minut na vyschnutí laku. Po navinutí pásek přišlo vytvrzování, to bylo provedeno ve speciální peci po dobu 2 hodin při teplotě 120 °C. Na všechny vzorky byly rozmístěny měděné elektrody ve vzdálenosti 10 mm, ke kterým byly připevněny měděné vodiče.



Obr. 5.1: Závislost rozložení napětí na typu pásky [15]

Samotné měření probíhalo najetím na hodnotu napětím 4,5 kV. Tato hodnota byla zjištěna pomocí postupného zvyšování napětí do doby, než došlo k přeskoku, hodnota napětí v tomto případě dosahovala 5 kV. Po ustálení byl odečítán proud a zaznamenáván do tabulek, napětí se poté snižovalo po 250 V. Schéma zapojení je na *Obr. 5.2*. Měření probíhalo za normálních podmínek, tj. tlak 980 kPa, teplota 21 °C, při vlhkosti 49% a podle normy SIB 14-07.



Obr. 5.2: Schéma zapojení pro měření $V - A$ charakteristiky [16]

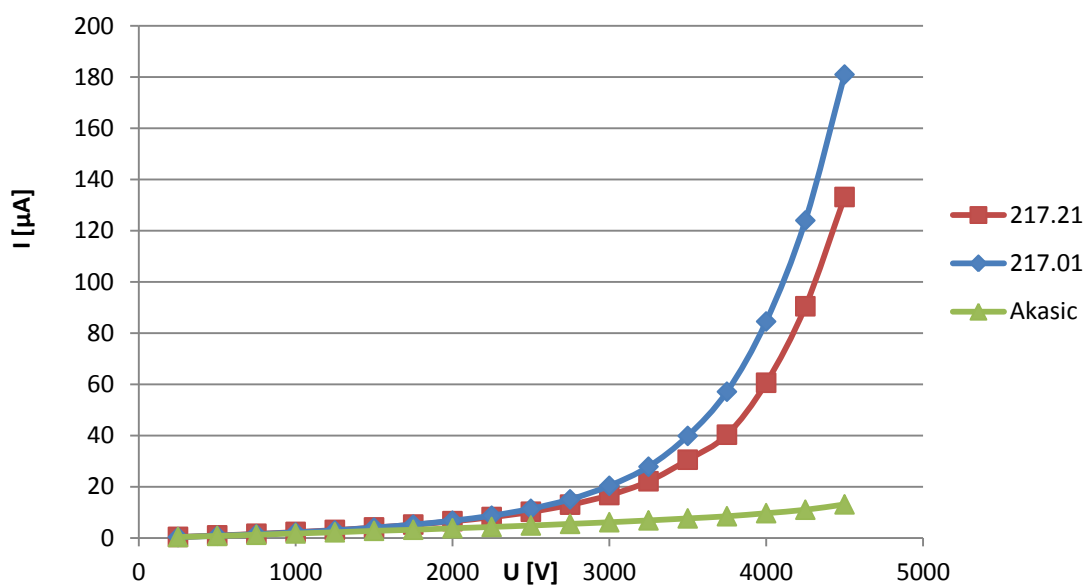
5.1 Polovodivé pásy Von Roll – CoronaShield SC 217.01, 217.21 a Akasic

Na první tyč byly nanесeny tři polovodivé pásy, které byly poté vytvrzeny. Jedná se o pásy od společnosti Von Roll – CoronaShield SC 217.01, 217.21 obě typu C a pásku od firmy Akasic typu B, ta byla po expiraci, což mohlo ovlivnit výsledné naměřené hodnoty. V *Tab. 5.1* jsou zaznamenány průměrné hodnoty proudu, při postupně se snižujícím napětí od 4,5 kV do 250 V.

Tab. 5.1: Naměřené hodnoty prvních tří vzorků

	217.01	217.21	Akasic
U [V]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]
250	0,33	0,4	0,35
500	0,82	1	0,79
750	1,46	1,62	1,24
1000	2,15	2,34	1,76
1250	2,95	3,12	2,21
1500	4,02	4,1	2,78
1750	5,19	5,22	3,2
2000	6,74	6,54	3,78
2250	8,68	8,16	4,3
2500	11,38	10,22	4,86
2750	15,06	13	5,5
3000	20,36	16,75	6,14
3250	27,83	22,14	6,86
3500	39,84	30,55	7,64
3750	57,11	40,32	8,48
4000	84,53	60,61	9,68
4250	124	90,48	11,02
4500	180,99	133,17	13,12

Na Obr. 5.3 je vykreslena V – A charakteristika všech tří vzorků. Z grafu je dobře vidět, že při napětí kolem 2 kV začíná proud postupně vzrůstat a při hodnotě kolem 3,5 kV začíná strmě stoupat. Jak již bylo zmíněno, páska Akasic byla po expiraci, tudíž naměřené hodnoty byly velice zkreslené.



Obr. 5.3: V – A charakteristika

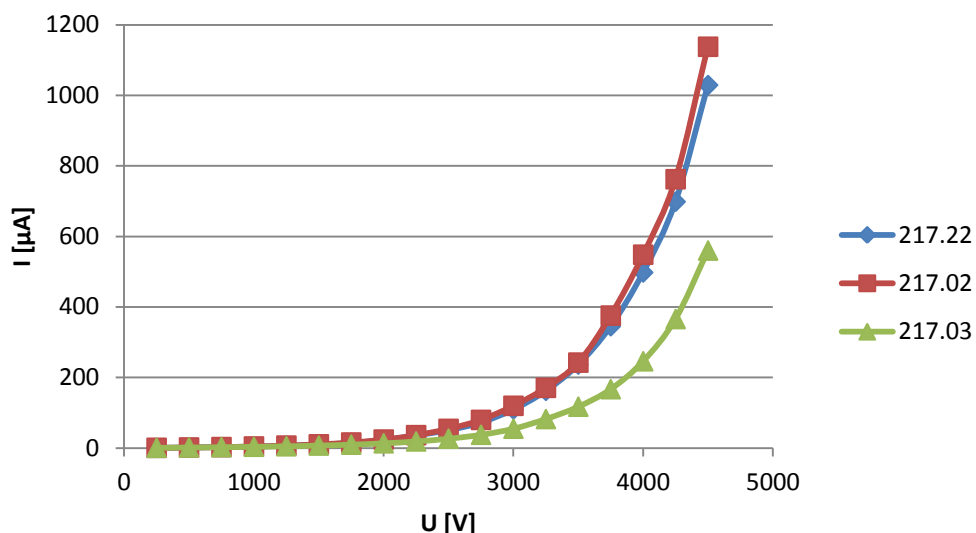
5.2 Polovodivé pásy Von Roll – CoronaShield SC 217.02, 217.03 a 217.22

Další tři měřené vzorky byly, opět od společnosti Von Roll a to CoronaShield SC 217.02, 217.22 obě typu A a 217.03 typu B. V tabulce 1.2 jsou zaznamenány průměrné hodnoty proudu při postupně se snižujícím napětím všech tří měřených vzorků.

Tab. 5.2: Naměřené hodnoty dalších tří vzorků

	217.02	217.03	217.22
U [V]	I [μ A]	I [μ A]	I [μ A]
250	0,41	0,52	0,55
500	1,39	1,44	1,5
750	2,46	2,3	2,68
1000	4,2	3,4	4,32
1250	6,68	4,88	6,58
1500	10,3	6,86	9,88
1750	15,45	9,44	14,44
2000	23,74	13,24	22,56
2250	36,26	18,56	35,92
2500	54,12	26,36	50,56
2750	79,52	37,36	72,38
3000	119,54	54,6	109,38
3250	170,5	82,04	162,04
3500	242,02	117,02	236,58
3750	375,4	166,64	345,16
4000	548	245,76	497,6
4250	762	365,6	698,3
4500	1137,6	559,8	1028,9

Na Obr. 5.4 je vykreslena V – A charakteristika vzorků. Z grafu je dobře vidět, že napětí opět stoupá kolem 2 kV a při hodnotě kolem 3,5 kV začíná stoupat mnohem rychleji. Porovnáním s prvními třemi vzorky zjistíme, že naměřené proudy jsou až sedm krát větší, tudíž tyto pásy mají mnohem větší vodivost.



Obr. 5.4: V–A charakteristika

5.3 Polovodivé laky Von Roll – CoronaShield SC P8001 P8002

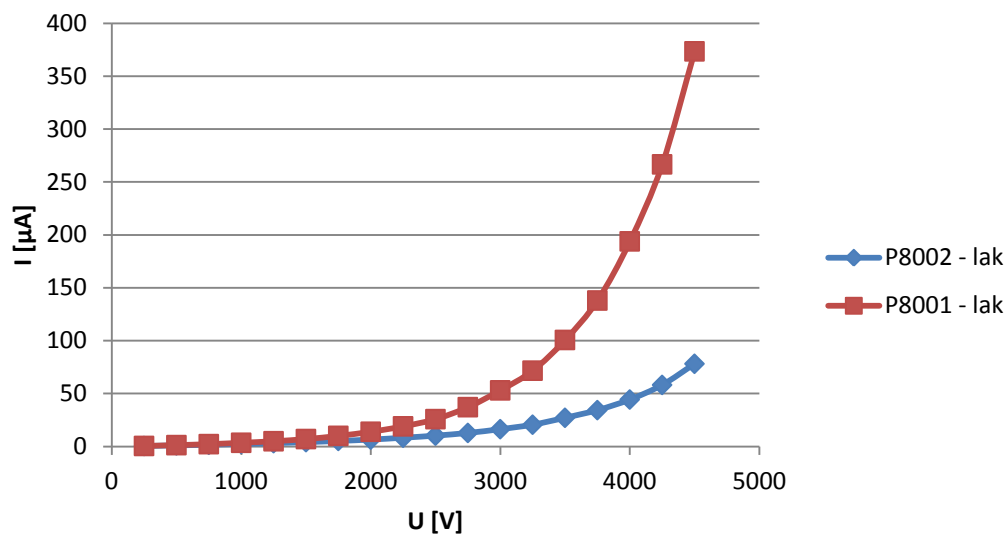
Poslední měření probíhalo na vzorcích s polovodivými laky Corona Shield SC P8001 a P8002. Ty byly nanесeny v pěti vrstvách, abychom dosáhli požadované tloušťky ochranné vrstvy. Naměřené průměrné hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 5.3.

Tab. 5.3: Naměřené hodnoty dvou polovodivých laků

	P 8002	P8001
U [V]	I [μA]	I [μA]
250	0,4	0,42
500	0,95	1,22
750	1,56	2,14
1000	2,32	3,44
1250	3,08	4,9
1500	4,04	6,96
1750	5,16	9,96
2000	6,44	13,83
2250	8,2	18,95
2500	10,18	25,76
2750	12,72	37,08
3000	16,28	52,98
3250	20,52	71,58
3500	27,06	100,6
3750	34,28	137,9
4000	44,29	193,8
4250	58,11	266,6
4500	78,1	373,4

Na Obr. 5.5 je vykreslena V – A charakteristika obou laků. Z grafů lze pak vidět, že lak P8002 má mnohem větší vodivost s porovnáním s lakem P8001, který při maximálním napětí

4500 V dosahoval pouze hodnot kolem $58 \mu\text{A}$ zatímco lak P8002 dosahoval hodnot kolem $266 \mu\text{A}$.



Obr. 5.5: $V-A$ charakteristika

5.4 Zhodnocení výsledků měření

Měřením byl prokázán vliv různých typů polovodivých ochran na rozložení napětí. Každý ze vzorků měl jiné vlastnosti a parametry, ale některé vzorky si byly velice podobné například vzorek 217.22 a 217.02, které byli oba typu A. Měření proběhlo bez problémů, jediný nastal při měření posledního vzorku, kdy došlo k částečnému výboji mezi elektrodami a poškození jedné z nich. To bylo zapříčiněno pravděpodobně moc rychlým zvýšením intenzity elektrického pole v místě elektrod. Na Obr. 5.6 lze vidět, jak měření probíhalo.



Obr. 5.6: Průběh měření v praxi

Závěr

Účelem této bakalářské práce bylo zmapovat problematiku částečných výbojů a jejich eliminaci ve velkých synchronních generátorech. Pro to jsou užívány polovodivé ochrany. Ty se dají rozdělit na tři druhy: polovodivé pásy, polovodivé laky, vodivé pásy. Vodivé pásy se používají v drážkách statoru, polovodivé pásy a laky pak na výstupu vynutí z čel. Dále bylo provedeno měření, které mělo ověřit závislost ochran na přiloženém napětí.

Pásy a laky použité pro měření byli od společnosti Von Roll a jedna páska od společnosti Akasic. Pro ověření vlivu polovodivých ochran na rozložení napětí byla použita V – A metoda, kde maximální použité střídavé napětí bylo 4500 V. Nejrovnoměrnější rozložení napětí bylo zjištěno u pásy Von Roll – Corona Shield SC 217.02 a 217.22. Pásy byly navinuty s polovičním překrytím a vytvrzeny při teplotě 120 °C po dobu 2 hodin. Pro lepší ochranu může být spolu s páskou aplikován také polovodivý lak např. Corona Shield P8001, který se také osvědčil v našem měření. Lak se dá aplikovat na konci ovinu pásy, ale v praxi se spíše používá při opravách, jelikož kdybychom chtěli vyměnit pásku museli bychom rozebrat celý stroj. Páska nemůže zasahovat, až ke konci vinutí, ideální vzdálenost se určuje podle toho na jaké napětí je vinutí dimenzováno. Pro vysokonapěťové stroje je tato vzdálenost přibližně 15 cm od výstupu vinutí z drážky. U výstupu nejdřív vykukává vodivá pásy, na ní se s přibližně 2 cm překrytím aplikuje páska polovodivá.

Polovodivé ochrany jsou nedílnou součástí každého velkého točivého stroje, bez nich by vlivem částečných výbojů došlo k velmi rychlé degradaci izolace a snížení životnosti celého stroje na minimum.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] STONE, Greg. Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, c2004, ISBN 0-471-44506-1.
- [2] ZÁLIŠ, Karel. Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů. 1. vyd. Praha: Academia, 2005, 135 s. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-1358-X.
- [3] KUFFEL, E, W ZAENGL a J KUFFEL. High voltage engineering: fundamentals. 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000, xiii, 239 p. ISBN 07-506-3634-3.
- [4] KOUTSKÝ, Jaroslav. Degradací procesy a predikce životnosti. Vyd. 1. Plzeň: Západočeská univerzita, 1995, 167 s. ISBN 80-708-2177-9.
- [5] MENTLÍK, Václav. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [6] Doutnavý výboj. [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: <http://physics.ujep.cz/~mkormund/P223/FMD-prednaska4.pdf>
- [7] Plazma generované elektrickým proudem: elektrické plynové výboje. [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: <http://home.tiscali.cz/rajed/plazma/kap1/124.htm>
- [8] Synchronní stroje. [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_synchronni%20stroje_bc%20FS.pdf
- [9] Elektrické stroje. [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/www453/soubory/texty/ucebni_texty/se/SEL2b.pdf
- [10] Elektrické stroje. [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: http://ok1zed.web.cz/s/el_generator.htm
- [11] Asynchronní stroje. [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: <http://www.spssol.cz/~vyuka/UCITELE/NM/ELE/3.ro%E8n%EDk/Asynchronn%ED%20a%20synchron%ED%20stroje.pdf>
- [12] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [13] Stator Bar Components with High Thermal Conductivity Resins, Varnishes, and Putties - diagram, schematic, and image 02. [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.faqs.org/patents/imgfull/20090174279_02

- [14] DEGRADACE IZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ TOČIVÝCH STROJŮ: ELEKTRICKÉ STROMEČKY. [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/15-sirucek.pdf>
- [15] Anti corona: CoronaShield® CS 217.02. In: [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://www.sibel.bg/upl_doc/CoronaShield%20217.02-EN.pdf
- [16] KRPAL, Ondřej. Výbojová činnost ve vinutí synchronního stroje a její eliminace. 2011 [cit. 2013-05-04].
- [17] BRÜTSCH, R., T HILLMER. Corona Protection in Rotating High Voltage Machines. IEEE. Berlin, 2006
- [18] ALLISON, J.A., Understanding the need for Anti-corona materials in High Voltage Rotating. IEEE, 2010
- [19] PLACHÁ, Michaela. Izolační systémy točivých strojů. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. FEL ZČU