

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

Protikoronové ochrany velkých točivých strojů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin KOKOŠKA**

Osobní číslo: **E16N0009P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**

Název tématu: **Protikoronové ochrany velkých točivých strojů**

Zadávací 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 funkci a aplikaci vodivých a polovodivých ochran na tyčích statorového vinutí turbogenerátoru.
2. Specifikujte materiály použitelné pro tyto aplikace a proveďte přehled výrobců a typů materiálů.
3. Vyberte a popište možné vhodné diagnostické postupy měření povrchového odporu ochrany proti koruně v drážkové části a na výstupu vinutí z drážky.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

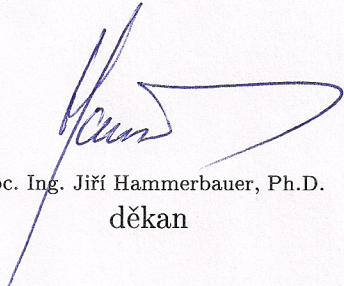
Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, V.: Dielektrické prvky a systémy, BEN 2006
2. Elektronické informační zdroje, Databáze Sciencedirect, Wiley Interscience
3. Veverka, A.: Technika vysokého napětí, SNTL/ALFA 1978

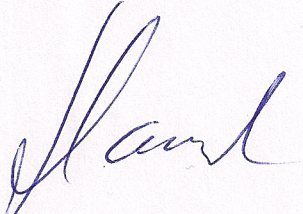
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Josef Pihera, Ph.D.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**

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



  
Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

## Abstrakt

Práce se zabývá protikoronovými ochranami, a to zejména v drážkové části a na výstupu z drážky magnetického obvodu turbogenerátoru. V úvodu práce je rozebrána důležitost izolačního systému pro vysokonapěťové točivé stroje a postup jeho výroby. Jsou zde vysvětleny příčiny vzniku výbojové činnosti a principy, jež vysvětlují jejich fyzikální podstatu. Dále jsou podrobněji popsány vodivé a polovodivé ochrany proti koruně a materiály, ze kterých se tyto ochrany vyrábějí. Kromě aktuálně používaných materiálů jsou popsány i potenciální alternativy, jež jsou momentálně předmětem výzkumu. Popis je doplněn technickými parametry jednotlivých ochranných pásek a laků, jež tvoří nabídku předních světových výrobců. V poslední části práce je navržena metoda měření povrchové rezistivity ochranných pásek a laků, včetně dalších užitečných měření, která souvisejí s jejich diagnostikou.

## Klíčová slova

Vysoké napětí, korona, klouzavý výboj, turbogenerátor, izolace, V-A charakteristika, vodivá páska, polovodivá páska

## **Abstract**

This thesis describes anti-corona protection systems in stator slots and at the exit of the slot of high voltage turbo generator. The importance of the insulation system of high voltage rotary machines and the technology of manufacturing process is described in the beginning of the paper. It also describes the principle of discharge activity in order to explain its physical nature. There is a focus on conductive and semi-conductive anti-corona protection systems and materials from which they are manufactured. Besides materials that are currently in commercial use there are also potential alternatives which are currently in the state of research. The description is supplemented by technical specification of available protection tapes and varnishes distributed by the world's leading manufacturers. In the last part of thesis an experimental method for resistivity measurement was proposed and described, among other methods that are used to diagnose the condition of conductive and semi-conductive tapes.

## **Key words**

High voltage, corona, gliding discharge, turbo generator, insulation, I-V characteristic, conductive tape, semi-conductive tape

## Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 16.8.2018

Martin Kokoška

## Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Josefu Piherovi Ph.D. za cenné rady, metodické vedení práce a benevolenci.

# Obsah

Úvod	12
<b>1 Synchronní generátory</b>	<b>13</b>
<b>2 Statorová vinutí turbogenerátoru</b>	<b>14</b>
2.1 Provedení vinutí . . . . .	14
2.2 Provedení izolace . . . . .	15
2.3 Chlazení . . . . .	18
<b>3 Vlastnosti izolovaného vinutí</b>	<b>20</b>
3.1 Elektrická vodivost . . . . .	20
3.2 Rezistivita . . . . .	22
3.3 Ztrátový činitel a relativní permitivita . . . . .	23
<b>4 Výbojová činnost</b>	<b>25</b>
4.1 Korona . . . . .	25
4.2 Klouzavé výboje . . . . .	27
4.3 Nehomogenity v izolaci . . . . .	29
4.4 Vlivy výbojové činnosti na elektrickou pevnost . . . . .	30
<b>5 Vodivé a polovodivé ochrany</b>	<b>32</b>
5.1 Ochrana proti drážkovým výbojům (AGS) . . . . .	33
5.2 Ochrana proti výbojům na výstupu z drážky (EGS) . . . . .	34
5.3 Provedení EGS ochran . . . . .	38
5.4 Nové trendy v oblasti EGS ochran . . . . .	42
<b>6 Nabídka AGS a EGS ochran</b>	<b>47</b>
6.1 KREMPEL-GROUP GmbH . . . . .	47
6.2 ISOVOLTA AG . . . . .	48
6.3 Von Roll Holding AG . . . . .	48
6.4 Další výrobci . . . . .	49
<b>7 Návrh měřicí metody</b>	<b>52</b>
7.1 Možnosti měření povrchové rezistivity . . . . .	52



7.2	Měření V-A charakteristiky protikoronových ochran . . . . .	55
7.3	Další možnosti měření . . . . .	61
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>64</b>
	<b>Reference</b>	<b>66</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>76</b>

## Seznam symbolů a zkratek

Zkratka	Význam
$AGS = OCP$	Vnější ochrana proti koruně
$ČSN$	Česká technická norma
$EGS$	Ochrana proti koruně na výstupu z drážky
$IGS = ICP$	Vnitřní ochrana proti koruně
$PET$	Polyethylentereftalát
$VPI$	Vacuum Pressure Impregnation
$C$	Elektrická kapacita
$C_D$	Lineární kapacita
$C_S$	Nelineární kapacita
$d$	Vzdálenost mezi elektrodami, resp. šířka izolace
$E$	Intenzita elektrického pole
$E_b$	Intenzita elektrického pole, při které dochází ke zvýšení elektrické vodivosti
$E_P$	Elektrická pevnost
$f$	Frekvence
$I$	Elektrický proud
$I_P$	Povrchový proud
$J_P$	Proudová hustota
$K$	Konstanta charakterizující protikoronovou ochranu v drážce
$K_G$	Koeficient geometrie
$l$	Šířka elektrod
$ln$	Přirozený logaritmus
$n$	Konstanta charakterizující protikoronovou ochranu mimo drážku
$n_S$	Otáčky rotoru točivého stroje
$p$	Počet pólových dvojic
$r$	Poloměr
$R$	Elektrický odpor
$R_S$	Nelineární odpor
$R_P$	Povrchový odpor
$tg\delta$	Ztrátový činitel
$U$	Napětí

## Seznam symbolů a zkratek

Zkratka	Význam
$\alpha$	Koeficient nelinearity V-A charakteristiky
$\gamma$	Konduktivita
$\gamma_0$	Elektrická vodivost při nízké intenzitě elektrického pole
$\delta_{pj}$	Jouleovy ztráty
$\varepsilon_0$	Permitivita vakua
$\varepsilon_r$	Relativní permitivita
$\rho$	Rezistivita
$\rho_P$	Povrchová rezistivita

## Úvod

Práce se zabývá problematikou vysokonapěťových izolačních systémů, zejména ochranou proti výbojové činnosti velkých točivých strojů. Jejím cílem je popsat vlastnosti izolačních materiálů a navrhnout měřicí postup pro měření povrchové rezistivity protikoronových ochran. Z hlediska výbojové činnosti je u těchto strojů kladen důraz na ochranné prvky proti koruně a klouzavým výbojům. Cílem je dostatečně popsat principy těchto výbojů a definovat možnosti jejich účinného potlačení. Práce také popisuje aktuálně dostupné produkty, které se pro tyto aplikace používají.

Výbojová činnost je typickým jevem při provozu vysokonapěťových zařízení. Setkáváme se s nimi zejména na vedení, kde mohou způsobovat značné ztráty, ale také u strojů, které pracují s vyšší hodnotou napětí. Nejnáchylnějšími místy pro vznik těchto samostatných neúplných výbojů jsou poté především ostré hrany nebo obecně objekty s malým poloměrem zakřivení. Samotnou výbojovou činnost je možné při vyšších intenzitách elektrického pole pozorovat pouhým okem nebo alespoň slyšet jeho charakteristické zvukové projevy. Sršení a praskání bohužel není jedinný nežádoucí účinek tohoto fenoménu. Stroje pracující s vysokým elektrickým napětím jsou při vysokých intenzitách elektrického pole těmito výboji namáhány, a proto je nutné zabývat se návrhem a vhodným dimenzováním izolace. U točivých strojů je celá problematika náročnější než např. u transformátorů, protože celý systém je dynamický a složitější z hlediska konstrukce. Izolace vinutí musí být tedy schopna odolávat vysokým intenzitám elektrického pole, mechanickému namáhání a zároveň splňovat požadavky pro uložení vinutí v drážce stroje. Celý izolační systém musí být bezpečný a spolehlivý tak, aby odolal i vysokému zatížení a především požadavkům zákazníka.

# 1 Synchronní generátory

Synchronní stroje mají velmi široké využití a mohou mít různá provedení. V poslední době se hojně využívají pro různé aplikace, zejména po příchodu strojů s permanentními magnety. Dříve byly také připojovány k síti jako kompenzátory účinníku. Jejich největší přínos však stále spočívá ve výrobě elektrické energie pro elektrickou distribuční soustavu. Alternátory velkých výkonů můžeme nalézt ve dvou základních provedení, a to hydroalternátory, využívané ve vodních elektrárnách a turbogenerátory, které jsou poháněny parními turbínami. V generátorickém režimu lze provozovat i stroje asynchronní, ovšem využívají se pro tento účel spíše zřídka. [1], [2]

Turbogenerátory většinou pracují jako dvoupólové stroje, z čehož vyplývají podle [2], [3] vztahu i otáčky pro elektrickou síť pracující na frekvenci 50 Hz, tedy 3000 ot/min.

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad [ot/min] \quad (1)$$

Vzhledem k masivnímu charakteru těchto strojů se konstruují s menším průměrem a větší délkou. Rozměry bývají okolo 1 m v průměru, přičemž délka stroje může být i desetinásobkem. Rozměry jsou při tak vysokých otáčkách obecně limitovány maximální zatížitelností hřídele. Díky hladkému rotoru může stroj pracovat s podstatně vyššími otáčkami než stroje s vyniklými póly. U hydrogenerátoru zapříčiňuje konstrukce a vzduch mezi vyniklými póly velké energetické ztráty, což jsou důvody, proč se provozují pouze na nízkých otáčkách [4]. Využití ovšem nacházejí na vodních tocích. Pohonem turboalternátorů bývá většinou parní turbína nebo plynová turbína.

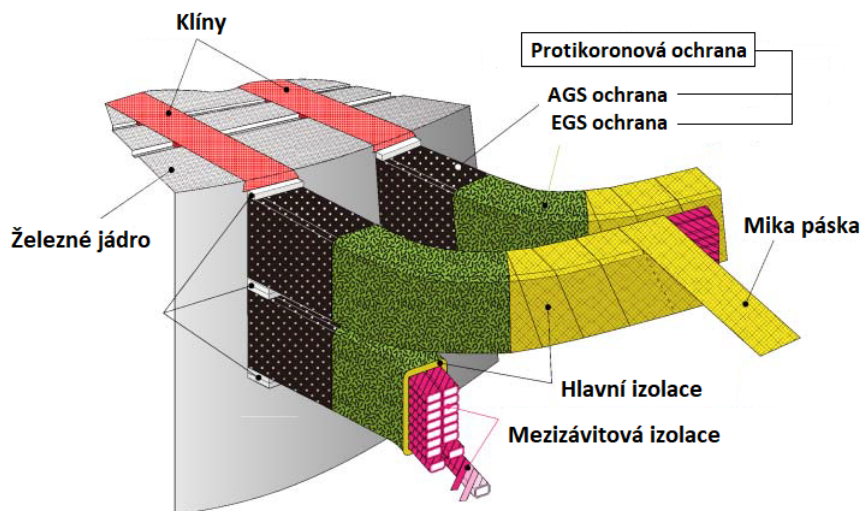
Stroje jsou schopny pracovat se vzdáleným výkonem přes 2000 MW, což je činí konstrukčně náročné [5]. U generátorů elektrické energie je jedním z nejdůležitějších prvků ochrana samotného stroje. Vysoká napětí používaná pro uspokojení čím dál větší poptávky po elektrické energii vytvářejí tlak na vývoj nových izolačních materiálů. Každá část stroje musí být odolná tak, aby byla schopna vydržet nepřetržitý provoz po mnoho let. Izolační systém musí být dobře navržen z hlediska geometrie, teplotní stability, mechanického namáhání a ochrany před nebezpečným napětím na vinutí [4].

## 2 Statorová vinutí turbogenerátoru

Synchronní stroje se skládají z rotorového a statorového vinutí. Vinutí rotoru představují nejčastěji elektromagnet, na který se přivádí budící proud. Pohybem tohoto vinutí se indukují napětí na statorové vinutí, které teprve představuje silovou část zařízení, jež dodává energii do sítě. Statorová vinutí jsou masivní svazky vodičů, které se zakládají do magnetického obvodu statoru. Jejich provedení má velký vliv na efektivní funkci, bezpečnost a spolehlivost celého zařízení [1], [2]. Vinutí vyžaduje kvalitní izolační systém pro bezpečný provoz s minimálními ztrátami. Nejen, že tyto ztráty představují plýtvání energie, ale také namáhají stroj, a to jak tepelně, tak elektricky [4], [6], [7]. Proto je důležité věnovat návrhu statoru velkou pozornost.

### 2.1 Provedení vinutí

Vinutí turbogenerátorů většinou tvoří velký paket, který se někdy označuje jako statorový svazek. Ten je složen z dílčích vodivých tyčí, jež jsou samostatně izolovány. Vinutí jsou také doplněna ochranami proti výbojové činnosti, které jsou navrženy podle potřeb daného stroje a způsobu provedení samotného vinutí. Nejčastějším způsobem návrhu cívek jsou tzv. Roeblovy tyče, které do značné míry řeší problém s rozložení potenciálu. Protože jsou vodiče izolovány samostatně, indukují se do jednotlivých tyčí různá napětí podle jejich polohy v drážce jádra. Tyto napěťové rozdíly zapříčiňují vznik nežádoucích vyrovnávacích proudů. Proto je nutné tyto potenciály v drážce vyrovnat. V případě použití Roeblova provedení jsou tyče vinutí v pravidelných intervalech skládány přes sebe a celý svazek je zpleten dohromady tak, aby se vodiče na pozicích vystřídalaly. Hovoříme o permutovaném vinutí či transpozici vinutí. Tím dojde k minimalizaci vyrovnávacích proudů. [8]. Příklad provedení statorového vinutí je možné vidět na obrázku 1.



Obrázek 1: Statorové vinutí turbogenerátoru. Převzato a upraveno z [9]

## 2.2 Provedení izolace

Kvalita provedení izolace má přímý dopad na výsledné vlastnosti vinutí. Důležité je dbát především na možný vznik nehomogenit v izolačním materiálu, což úzce souvisí s technologií výroby [7]. Pro výrobu vinutí se používá mnoho různých metod, ale dle [4] v zásadě všechny vycházejí ze 4 možností:

- Vakuově tlaková impregnace (VPI) jednotlivých cívek
- Celková VPI statorového vinutí
- Hydraulické tvarování jednotlivých cívek pomocí technologie Resin-rich
- Vytvrzení jednotlivých cívek pod tlakem pomocí technologie Resin-rich

Technologie VPI a Resin-rich jsou základem pro výrobu dnešních izolačních systémů točivých strojů. Obě technologie využívají různé druhy pryskyřic pro zajištění vhodných vlastností, ovšem výrobní postup i výsledné vinutí se značně liší a záleží na konkrétních požadavcích daného stroje a jeho aplikace. V obou případech se však jako základ používají slídové materiály a papír nebo skleněná tkanina. Pryskyřice poté tvoří pojivo těchto dvou materiálů [7].

## Vacuum pressure impregnation (VPI)

Základní složkou tohoto izolačního systému je savá slídová páska, která se až během výrobního procesu vinutí impregnuje. Nosnou látkou je skleněná tkanina, fólie nebo polyesterový materiál. Páska se vyznačuje nízkým obsahem základního pojiva (do 7 %) pro možnost manipulace s vinutím při výrobě, přičemž musí být zajištěna kompatibilita s finálním impregnantem. Základními parametry jsou poté savost, aby materiál bylo možné dokonale proimpregnovat a mechanické vlastnosti, zejména ohebnost a pevnost v tahu kvůli ovíjení. Jako impregnant se používají polyesterové, silikonové nebo epoxidové pryskyřice s maximálním obsahem sušiny pro úplné vyplnění vinutí [7].

Proces impregnace je zahájen sušením při teplotách přes 100 °C, kdy dochází k odstranění vlhkosti. Poté je předmět přesunut do impregnačního kotle, kde je vystaven dekompresy pro odstranění těkavých látek a zbytků vlhkosti. Dochází k postupnému impregnování od spodní části kotle. Po dekompresy následuje krátkodobé vystavení většímu tlaku. Předmět se po procesu vysuší v mírném podtlaku a nakonec vytvrdí proudem horkého vzduchu. Kvalita výsledné izolace se hodnotí podle velikosti ztrátového činitele [4], [7].

Tato technologie má výhodu v menším riziku vzniku nehomogenit v izolaci, ale je technologicky mnohem náročnější než systém Resin-Rich. Zejména u velkých vysokonapěťových alternátorů se těchto důvodů příliš nepoužívá. Její nevýhodou je také velmi obtížná oprava v případě poruchy vinutí. Vinutí nebo jeho část se většinou nedá jednoduše vyměnit [4], [7]. S úspěchem se tento systém využívá v trakčních pohonech, kde se v případě poruchy motor většinou vymění za nový [7].

## Resin-Rich

V případě Resin-Rich se aplikuje předimpregnovaný tříslučkový kompozit na vinutí a vytváří tak na jeho povrchu pevnou izolační vrstvu. Základní složkou tohoto kompozitu je skleněné vlákno o šířce většinou v rozmezí 12 až 14mm podle použité technologie výroby. Jako izolační bariéra slouží kalcinovaný slídový papír, který je typické svou pevností a menší nasákavostí. Tyto dvě složky jsou poté vázány epoxidovou pryskyřicí, které v praxi můžeme najít v různých podobách. Podle [7] jsou to nejčastěji



reaktoplastické bezrozpouštědlové novolakové nebo cykloalifatické epoxidové pryskyřice. Materiál je většinou částečně předtvrzen, což se někdy označuje jako tzv. B stav. Předtvrzení se provádí především z důvodů možného skladování, zajišťuje se tak udržení suchého a nelepivého stavu. Tloušťka materiálu v této fázi je přibližně 0,15 až 0,2 mm. Konečná šířka závisí především na jmenovitém napětí stroje. Podle [7] se izolační kompozit navíjí buď po celém vinutí, což označujeme jako tzv. kontinuální izolaci nebo se drážková část a čela izolují zvlášť s patřičným překrytím, tzv. diskontinuální izolace. Při aplikaci izolace na měděné (příp. hliníkové) vinutí se používá buď poloviční, třetinové nebo dvoutřetinové překrytí. Izolace vinutí se zpravidla dělá s větší tloušťkou, počítá se totiž s tím, že při vytvrzování se izolace stlačí do požadovaného rozměru pro optimální uložení do drážky. Stažení se provádí, když je pryskyřice v gelovém stavu. Pro aktivaci vytvrzování se přidávají latentní tvrdidla, jejichž výhodou je bezproblémové skladování, protože aktivace těchto látek probíhá až při teplotách okolo 100 °C. Klíčové je nezmeškat moment gelové fáze, protože v opačném případě již nelze izolaci úspěšně stlačit. Aby se zamezilo přítomnosti nežádoucích plynů, provádí se ještě před procesem formování stažení izolace za přítomnosti sníženého tlaku. Odplynění se může provádět i několikrát [4], [7].

Při vytváření izolace je důležité, aby izolace co nejlépe vyplňovala prostor drážky tak, aby nevznikaly nežádoucí vzduchové mezery, jenž by podporovaly výbojovou činnost. Samotný proces vytvrzení vyžaduje teploty okolo 160 až 170 °C [7]. Vzhledem k rozdílnému chladnutí vodiče a izolačního kompozitu, je potřeba ochlazovat izolované vinutí postupně, aby nedošlo k odrthnutí izolační vrstvy od vinutí vlivem rozdílné teplotní roztažnosti. Dále je nutné výsledný produkt řádně vysušit, protože stále obsahuje tekavé látky a vlhkost, a to až v jednotkách procent celkového objemu. Součástí izolačního systému vinutí jsou také vodivé a polovodivé ochrany, které mohou být přímo součástí izolace a nebo se aplikují zvlášť po zhotovení izolace hlavní. Takto připravená vinutí je možné bez dalších úprav založit do drážek stroje [4], [7], [8].

Výhodou tohoto výrobního procesu je možnost výměny konkrétního vinutí. U technologie VPI je taková výměna možná jen v případě, že se izolují jednotlivá vinutí zvlášť, ale i v takovém případě je oprava mnohem nákladnější. Zejména u velkých točivých strojů je využití Resin-Rich izolace vhodnější. Při výběru technologie je třeba uvážit zda výhoda větší homogenity izolace a možnost úspory vinutí (až o 6 %) stojí za větší náklady a případné problémy s opravou izolačního systému VPI [4], [7], [8].

## 2.3 Chlazení

Důležitou částí vinutí je chlazení. Má velký vliv na životnost izolace a ochranných prostředků proti výbojové činnosti. Většinou se pro chlazení turbogenerátorů používá vzduch, voda a nebo vodík. Hlavními příčinami oteplování stroje jsou ztráty. Ty vznikají zejména průchodem střídavého proudu vinutím statoru a stejnosměrného proudu vinutím rotoru [4]. Tyto Jouleovy ztráty lze vyjádřit vztahem:

$$\Delta p_j = R \cdot I^2 \quad [W] \quad (2)$$

Ve stroji pochopitelně vznikají i další ztráty, např. odporem média uvnitř stroje, vířivými proudy, magnetizací jádra atd. Teplo, které vzniká vlivem ztrát je třeba ze stroje efektivně odvádět, v opačném případě by došlo k degradaci izolace a nakonec k úplnému elektrickému výboji [4], [3]. Teplo také ovlivňuje chování ochran proti klouzavým výbojům, snižuje jejich životnost a způsobuje rozdílnou reakci materiálu na přiložené elektrické napětí. To znamená, že i když stroj je schopen pracovat, výbojová činnost v poměrně krátkém čase zničí izolaci jeho vinutí. Pro odvod tepla je možné použít přímé nebo nepřímé chlazení.

### Nepřímé chlazení

Během historického vývoje točivých strojů se používalo mnoho nepsaných norem pro volbu typu chlazení. Obecně se výkonová hranice stále zvyšovala s rozvojem efektivnějších a méně ztrátových strojů. Dnes se většinou stroje do 500 MVA chladí nepřímo. V takovém případě chladivo prochází zkrz jádro stroje a zbavuje stroj přebytečného tepla.

Tyto systémy mají různá provedení. Obvykle stroje menších výkonů (do 50 MVA) nemají cirkulovaný oběh chladiva, ale pouze ventiluje do otevřeného prostoru. Používají se zde vstupní filtry aby se zamezil vstup vlhkosti a cizích částic. Výkonnější zařízení používají uzavřený oběh chladiva doplněný tepelnými výměníky, zpravidla systémem vzduch-voda . Pro dobrý přestup tepla je také využíván vodík, který má zároveň nižší hustotu než vzduch, takže umožňuje stroji snažší a efektivnější chod [4].

### **Přímé chlazení**

Přímé chlazení představuje velmi účinnou možnost odvodu tepla, který je potřebný u strojů s požadavky na extrémně vysoké výkony. Díky těmto vysokým hodnotám je přes velkou účinnost stroje zbytkové teplo příliš velké a je potřeba vinutí stroje chladit přímo. I zde se tedy užívá uzavřeného okruhu s výměníky, ovšem jako chladící médium je zde vodík v podobě plynu nebo velmi čistá voda. Médium je vedeno přímo k vodičům, což zajišťuje lepší ochlazování, ale zároveň tím musíme upravit konstrukci stroje pro vytvoření chladících kanálů. Ty mohou vést v blízkosti vodičů nebo je možné vytvořit duté vodiče a vést médium přímo uvnitř. Výhodou přímého chlazení je výborná účinnost odvodu tepla. Nevýhodami jsou nároky na celý systém, nutnost vytvořit chladící cesty pro médium v magnetickém obvodu a v neposlední řadě také samotný vodík, který v kombinaci s kyslíkem představuje nebezpečí [4].

### 3 Vlastnosti izolovaného vinutí

Pro rozbor problematiky vinutí, izolace a ochranných prostředků proti výbojové činnosti je nejprve nutné závést některé pojmy, jenž jsou předmětem diagnostiky zařízení a také dalšího vývoje nových materiálů, které by mohly nahradit ty stávající. Uvádím tedy v této práci stručný popis hlavních veličin, která se v praxi v souvislosti s izolovaným vinutím měří a využívají se pro charakteristiku materiálů a porovnání jejich izolačních vlastností.

#### 3.1 Elektrická vodivost

Jde o fyzikální veličinu, která popisuje schopnost materiálu vést elektrický proud, což je dáno počtem volných nosičů náboje v materiálu. Je zřejmé, že pro izolační systémy vybíráme materiály, které jsou schopny bránit průchodu elektrického proud, a počet volných nosičů by tedy měl být minimální. Nicméně každý materiál vykazuje určitou elektrickou vodivost a má nenulové množství volných nosičů [10], [11]. Při návrhu elektrické izolace jsou samozřejmě důležité i jiné parametry, zejména mechanické, a proto je v praxi často nutné vytvářet systémy založené na kompromisech. Někdy se tyto problémy dají obejít kombinací různých skupenství, jako je tomu u izolace transformátorových vinutí [7], [12], [13] [14]. V případě ochrany proti klouzavým výbojům na výstupu z drážky statoru je otázka vodivosti složitější. Vodivé materiály se někdy používají na úpravu rozložení elektrického pole nebo se výstupující vinutí opatří materiály z řad polovodičů, které tento problém řeší změnou vodivosti v závislosti na intenzitě pole [15].

Pro popis materiálů je vhodnější vztahovat elektrickou vodivost materiálu na objem. V takovém případě je možné mezi sebou materiály porovnávat. Pro elektrickou vodivost jsou zavedeny veličiny měrná elektrická vodivost  $\gamma$  [ $S \cdot m^{-1}$ ] a měrný elektrický odpor  $\rho$  [ $\Omega \cdot m$ ] [7], [11], [12]. Podle [12] platí, že měrnou elektrickou vodivost lze vyjádřit jako převrácenou hodnotu měrného elektrického odporu a naopak:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad [S \cdot m^{-1}] \quad (3)$$

Podle způsobu přenášení elektrického náboje můžeme elektrickou vodivost rozdělit na elektronovou, iontovou, děrovou, protonovou a elektroforetickou. Elektrický náboj je přenášen pomocí elektronů nebo iontů. U elektroforetické dochází k přenosu prostřednictvím skupin částic [7], [11], [12], [14].

U pevných izolantů je důležitá především čistota a kvalita materiálu. Častým problémem jsou drobné vzduchové kapsy v materiálu, které poté narušují homogenitu izolace a dávají prostor pro vznik částečných výbojů. V případě pevných látek je důležitá také kvalita povrchu, čistota a celková geometrie izolačního systému. [14]

Elektrická vodivost v případě pevných izolantů je mnohem komplikovanější než v případě plyných nebo kapalných skupenství. Může za to zejména rozmanitost struktur těchto materiálů. U pevných izolantů můžeme pozorovat jak elektronovou, tak iontovou vodivost, avšak jeden z těchto dvou principů je vždy převládající. Ve většině případů se lze setkat s iontovou vodivostí. S elektronovou vodivostí se setkáváme až při vysokých hodnotách elektrické intenzity ( $10^1$  až  $10^2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ ) [7], [12] [13].

Iontový charakter vodivosti lze do jisté míry popsat Faradayovým zákonem. Plnou platnost lze však prokázat jen v případě elektrolytů. Podle tohoto zákona je množství látky uvolněné elektrolýzou úměrné množství prošlého náboje a hmotnosti příslušných iontů. Přirozeně jsou tyto proudy velmi malé, a tak je obtížné jejich bližší zkoumání. Tento fakt výrazně limituje využití Faradayova zákona. Použitelný je tedy jen u některých látek [7], [12], [14].

Elektronový charakter vodivosti je možné zkoumat s využitím Hallova jevu. Vzorok protékaný proudem je vložen do magnetického pole, jenž má charakter kolmý na procházející proud. Na rovnoběžných stěnách vzorku se poté objeví Hallovo napětí odpovídající rozdílu potenciálů. U makromolekulárních izolantů tento postup zjištění není možný, protože u těchto materiálů by byla potřebná příliš vysoká rychlost elektronů pro dosažení měřitelného Hallova napětí [7], [12], [14].

Pro hlubší zkoumání pevných izolantů je vhodné dle [7] provést následující rozdělení:

- iontové krystalické látky
- anorganické amorfnní látky
- organické amorfnní látky

Iontové krystalické látky jsou tvořeny kladnými a zápornými ionty nacházejícími se v uzlech mřížky. V takové mřížce nedochází k pohybu. Pro dosažení elektrické vodivosti musí dojít k postupné výměně kladných a záporných iontů, což je energeticky náročné. U běžných krystalů se však lze setkat s měřitelnou vodivostí, což dokazuje, že musí existovat možnost pohybu iontů v krystalické struktuře. Podle J. Frenkela dochází k tomu, že elektrony mohou mít při svých tepelných kmitech dostatek energie, aby se uvolnily z uzlů a dostaly se do tzv. intersticiální polohy (prostor mezi uzly). Tím vznikne volné místo na pozici iontu. Taková narušení struktury se označují jako Frenkelova porucha. Tento jev je velmi závislý na teplotě [7].

Anorganické amorfnní látky představují především skla. Elektrická vodivost u různých typů je značně odlišná, při pokojových teplotách se pohybují v rozsahu  $10^{-3}$  až  $10^{-17} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ . Elektrická vodivost těchto látek je pravděpodobně způsobena pohybem slabě vázaných iontů v důsledku vnějšího elektrického pole. Pohyb v těchto látkách by měl být podobný pohybu iontů v kapalinách [7].

## 3.2 Rezistivita

Rezistivita je klíčová vlastnost izolantů a charakterizuje materiál z hlediska bránění průchodu proudu. Čím vyšší rezistivitu látka má, tím méně volných nosičů náboje schopných vést proud je v něm přítomno. Ne vždy je však u ochranných materiálů žádoucí maximální rezistivita. V případě vodivých a polovodivých ochran se vytváří kompromis mezi rezistivitou a konduktivitou tak, aby materiál dokázal vyrovnávat odlišné potenciály, ale zároveň nezpůsobil uzavírání velkých vířivých proudů indukovaných z elektromagnetického pole. Rezistivitu může podle [16], [17] rozdělit na objemovou a povrchovou. Objemová rezistivita se týká proudu tekoucího uvnitř materiálu díky přiloženému elektrickému poli. Povrchová rezistivita je dána proudem tekoucím povrchovou

vrstvou materiálu. Přesné měření objemové rezistivity je poměrně náročné, protože vlivem velkého odporu tečou poměrně malé proudy, což jsou hodnoty těžko měřitelné. V případě ochran elektrických točivých strojů je vhodné zabývat se povrchovou rezistivitou, kterou je dle [17], [18] možné vyjádřit jako úbytek napětí na jednotku délky ku povrchovému proudu na jednotku šířky:

$$\rho_P = \frac{\frac{U}{I_S}}{\frac{d}{l}} \quad [\Omega \cdot m] \quad (4)$$

V případě ochran na výstupu z drážky točivého stroje je povrchová rezistivita proměnná, a to v závislosti na vzdálenosti od magnetického obvodu, resp. na působící intenzitě elektrického pole. U ochran v drážkové části by měla být rezistivita ideálně konstantní, ale i zde dochází k odchylkám vlivem nedokonalosti materiálu, překrytí pásy, profilu vinutí atd. Z hlediska ochrany proti výbojové činnosti je však dnes důležitější výzkum a vývoj v oblasti výstupu z drážky, a proto se jimi v této práci zabývám hlouběji. Důležitá je zejména vhodná nelinearita rozložení elektrického napětí podél statorové tyče, povrchová rezistivita by se tedy měla se zvyšující se intenzitou elektrického pole měnit směrem k nižším hodnotám [15]. Takových materiálů existuje více, ale otázkou zůstává, zda je možné je vyrobit dostatečně stabilní pro použití při reálné aplikaci, narážím zejména na stabilitu V-A charakteristiky při změnách teploty.

### 3.3 Ztrátový činitel a relativní permitivita

Izolované vinutí a drážku točivého stroje si lze představit jako kondenzátor v koaxiálním provedení [19], [20]. Vlivem tohoto uspořádání dochází mezi vinutím a uzemněným magnetickým obvodem ke ztrátě energie, a to v podobě dielektrických ztrát a svodového proudu. V ideálním případě by se tato situace dala popsat modelem složeným z paralelního spojení kapacity a odporu, přičemž delší vinutí bude mít vyšší kapacitu a nižší hodnotu izolačního odporu. Protože je vinutí v praxi napájeno střídavým napětím, zavádí se veličina označovaná jako ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$ , založená na tangentě ztrátového úhlu  $\delta$  mezi napětím a proudem. Vzhledem ke zřejmé frekvenční závislosti je nutné mít na paměti, že se ztrátový činitel při snižování kmitočtu zkušebního napětí zvyšuje. Měření se může provést při sílovém kmitočtu, ovšem je jednodušší

měřit při velmi nízkých frekvencích, kdy je vlivem svodového proudu ztrátový činitel vyšší [19]. Pro stanovení ztrátového činitele je většinou připojeno vinutí ke zdroji zkušebního napětí a sleduje se procházející proud. Porovnáním průběhů napětí a proudu je vyhodnocen ztrátový úhel, což moderní analyzátoři často provádějí převodem na optické signály [20]. Pokud není k dispozici speciální přístroj pro diagnostiku, je samozřejmě možné určit hodnoty kapacity a ztrátového činitele např. pomocí Scheringova můstku, což je vhodné zejména v elektrotechnických laboratořích, kde díky ochraně Faradayovou klecí nehrozí zkreslení elektromagnetickým rušením. Z naměřených hodnot je možné určit velikost ztrátového činitele na základě fázorového diagramu paralelního uspořádání odporu a kapacity [19]:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{2\pi f RC} \quad [-] \quad (5)$$

S měřením kapacity souvisí také hodnota relativní permitivity, jenž obecně udává kolikrát se zmenší elektrická síla v případě nahrazení vakua zkoumaným látkovým prostředím, jedná se tedy o materiálovou konstantu [14]. Měření relativní permitivity má význam zejména u kompozitních materiálů jako je izolace vinutí točivého stroje. Relativní permitivitu je možné stejně jako ztrátový činitel  $\operatorname{tg} \delta$  určit na základě kapacity změřené Scheringovým můstkem. Matematicky lze vyjádřit závislost těchto veličin takto:

$$\varepsilon_r = \frac{C \cdot d}{\varepsilon_0 \cdot S} \quad [-] \quad (6)$$



## 4 Výbojová činnost

Mezi vodičem a uzemněnými částmi stroje dochází i přes hlavní izolaci k tvorbě částečných výbojů. Tyto jevy je třeba odhalit a potlačit, protože způsobují degradaci izolace a z dlouhodobého hlediska ohrožují bezpečný chod stroje. Pro zkoumání částečných výbojů je vhodné rozdělit oblast vinutí na část, jež prochází železem a část vnější, tedy u výstupu z drážky. Na vnější části hrozí vznik především klouzavých výbojů, zatímco uvnitř jádra jsou to výboje koronové. Částečné výboje lze pozorovat i v samotné izolaci, ke kterým dochází díky přítomnosti nehomogenit v materiálu [6], [21].

### 4.1 Korona

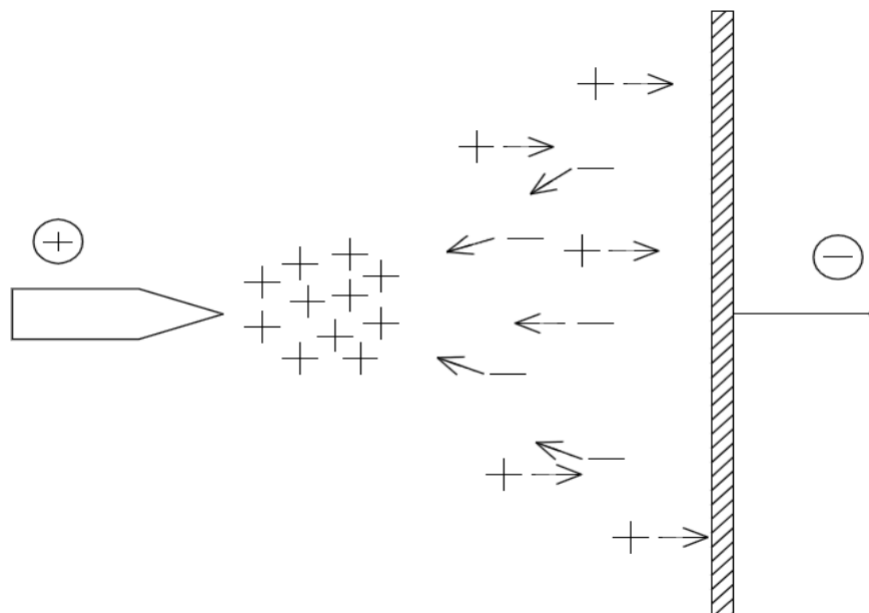
Jedná se neúplný samostatný výboj, se kterým se lze setkat ve vysokonapěťových aplikacích. Při zvyšování intenzity elektrického pole mezi elektrodami nakonec dojde k zažehnutí tohoto výboje, který se projevuje typickým zbarvením okolí elektrod. Samotný výboj je možné pozorovat pouhým okem, ovšem jen v omezené míře, protože zasahuje mimo viditelné spektrum, do ultrafialové oblasti. Podle [6] může být výboj 1,9 krát větší, než je viditelná oblast. Někdy se koronové výboje označují jako doutnavé, což z hlediska principu není zcela nepřesné, přesto takové označení vyvolává mylný dojem, že tento jev nastává jen za nižšího tlaku. Také je třeba zmínit, že princip vzniku korony, resp. efektu lavinové ionizace závisí na přiložené polaritě, což mimo jiné značně komplikuje problematiku v případě střídavého napětí. Tento jev je však pozorovatelný i za atmosférických podmínek na vedení, budovách, lodních stěžnících atd. Námořníci tento jev dříve označovali jako Eliášův oheň. Výboj je neúplný, což znamená, že korona nezasahuje z jedné elektrody na druhou, ale vytváří trsovitý výboj v okolí té elektrody, jež díky svému zakřivení nebo lokálním nerovnostem způsobuje nerovnoměrné rozložení intenzity elektrického pole [6], [22].

Korona je typická různým chováním v závislosti na polaritě. Mechanismus vzniku je v obou případech odlišný, nicméně k zažehnutí dochází při přibližně stejných hodnotách napětí. V případě záporné elektrody jsou kladné ionty přitahovány na katodu a uvolňují volné elektrony. Tyto volné nosiče náboje se pohybují prostorem rychlostí závislou na přiloženém napětí. Pokud je napětí dostatečné, tak získávají dostatek kinetické energie

k excitaci elektronů neutrálních molekul a atomů v prostředí. Excitace, resp. přechod zpět z excitovaného stavu na původní energetickou hladinu způsobuje uvolnění energie v podobě fotonů. Právě tato deexcitace způsobuje zaření tolik typické pro koronové a doutnavé výboje. V místech okolo zakřivené elektrody, kde je intenzita elektrického pole nejsilnější mohou být elektrony urychleny tak, že způsobují ionizaci neutrálních atomů, což znamená úplné uvolnění částice z valenčního pásu a vzniku dvou samostatných částic - volného elektronu a kladného iontu (zbytek molekuly či atomu). Deexcitace a následné vyzáření fotonů nastává i v případě opětovné rekombinace kladného iontu a záporného elektronu. Vzniká tak opět neutrální molekula. Tím jak působením vnějšího elektrického pole ionizace dielektrika lavinově narůstá vznikne mezi elektrodami prostor, který vytváří vlastní elektrické pole. Tedy oblast, ve které je směrem ke katodě velká převaha kladných iontů a směrem k anodě větší množství záporných elektronů. Podobně jako při polarizaci dielektrika má i zde pole opačný charakter než pole vnější. Tato skutečnost způsobuje, že výsledné elektrické pole dané součtem těchto dílčích polí bude mít nižší intenzitu. Snížením intenzity elektrického pole klesá rychlost elektronů, což znemožňuje další ionizaci a excitaci. Elektrony dále jen driftují směrem k anodě. Z tohoto důvodu označujeme koronové a doutnavé výboje jako neúplné [6] [22] [23].

Při přivedení kladné polarizace na zakřivenou elektrodu je princip vzniku odlišný především v mechanismu ionizace. Lavina elektronů se tvoří u vnější hranice korony a pohybuje se směrem k anodě. Samotný proces ionizace je založen na přijetí energie od fotonů, hovoříme tedy o tzv. fotoionizaci. Proud je přenášen pomocí kladných iontů směrem k záporné elektrodě. V případě korony není ionizace plynu tak silná jako v případě úplných výbojů, a proto také nedochází k významným změnám okolní teploty. Díky tomu korona nemá zpravidla dostatek energie k tepelné ionizaci [6], [24].

Při vzniku korony se udržuje na povrchu elektrod téměř stálá intenzita elektrického pole, jenž napomáhá udržení ionizace. Zvyšování napětí má za následek zvětšování prostorového náboje, který má stejné znaménko jako polarita elektrody. Takto vzniklý prostorový náboj je doplňován z ionizované vrstvy a pohybuje se od vodiče, který koronu vytvořil. Tento pohyb prostorového náboje způsobuje ztráty a označujeme ho jako proud korunou [6]. Tvorbu prostorového náboje je možné vidět na obrázku 2.



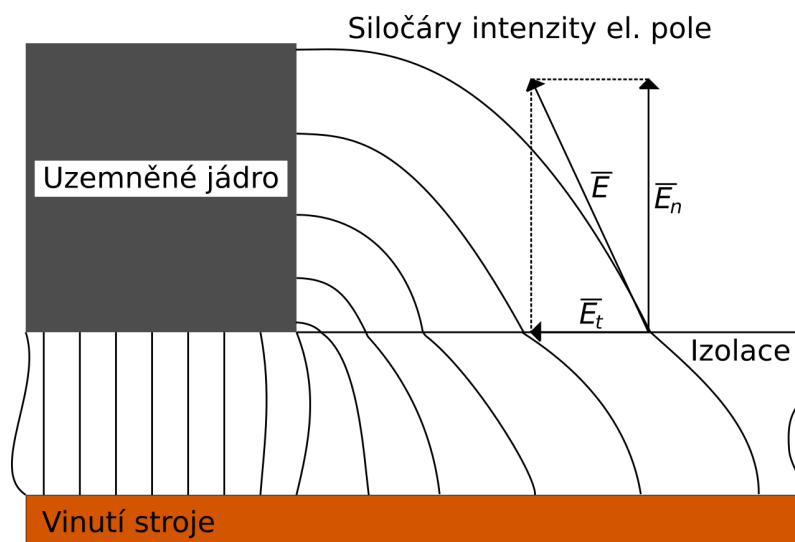
Obrázek 2: Prostorový náboj v okolí zakřivené anody. Převzato a upraveno z [25]

Korona pochopitelně představuje problém především v energetice, kde se s ní setkáváme na vedení, u průchodek, izolátorů, odpojovačů atd. V jiných aplikacích je ale možné využít tohoto jevu i k užitku. Typickým příkladem jsou odlučovače, které můžeme najít v zařízeních pro spalování odpadu nebo topného paliva. Běžná napětí v průmyslové aplikaci jsou dle [6] 55 kV až 80 kV. Korona také přispívá ke snížení negativních účinků atmosférického přepětí, kdy odvádí energii ze vzniklých elektromagnetických vln [26], [27]. U velkých točivých strojů však dochází k negativním dopadům, kdy korona nepříjemně namáhá izolaci vinutí. Mimo jiné vznik korony doprovázejí chemické změny plynů v příslušném prostoru, což může vést ke vzniku agresivních látek, jenž napomáhají poškození izolace [6], [26], [27].

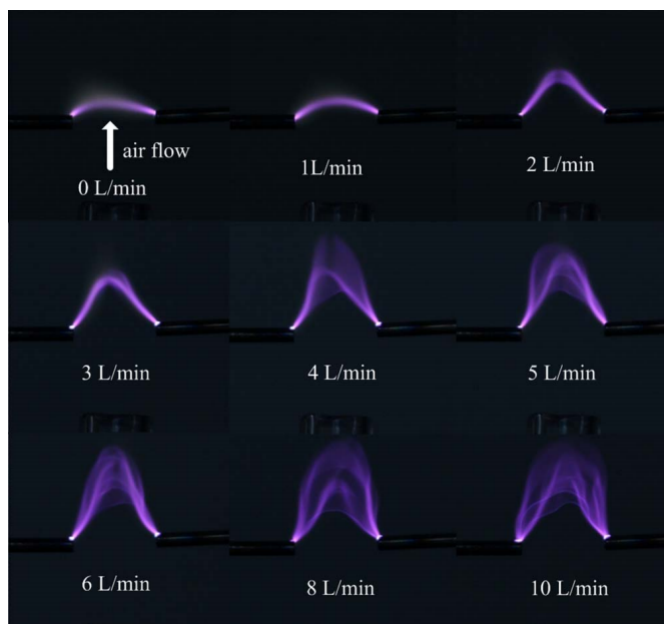
## 4.2 Klouzavé výboje

Klouzavé výboje jsou stejně jako korona neúplným samostatným výbojem. Jejich charakteristickým rysem je však pohyb po povrchu elektrody/izolace. Neuzavírají se do vzduchu, ale mezi povrchem izolace a jádrem stroje. Pohyb výboje je zapříčiněn nehomogenitou elektrického pole, která vzniká v některých elektrických systémech jako je např. výstup vodiče z drážky elektrického stroje. V oblasti výstupu z drážky vzniká

ostrý přechod z hlediska intenzity elektrického pole. Takové prostředí je vhodné pro tvorbu klouzavých výbojů. Siločáry intenzity elektrického pole vystupující z vodiče mají v takovém uspořádání tendenci se ohýbat směrem k magnetickému obvodu, který je uzemněn. Vlivem zakřivení siločar je přítomna tangenciální složka, jež způsobuje pohyb výboje po povrchu izolace. Klouzavé výboje mohou být podstatně delší, než bychom očekávali od výboje korony. Jak je znázorněno na obrázku 3, je zřejmé, že elektrické pole mimo drážku obsahuje jak normálovou, tak tangenciální složku. To má za následek tření o povrch izolace, které může vyvolat lokální nárůst teploty. Pokud od koronového stavu napětí vzroste, může oteplení zesílit natolik, že se spustí tepelná ionizace. V takovém případě je možné pozorovat změnu koronových praméneků v charakteristické svítivé trsy. Tyto trsy pochopitelně vytvářejí dobře vodivé kanály, na kterých je napěťový úbytek velmi malý. Na konci trsu tedy zůstane vysoká hodnota napětí, a právě proto se výbojová činnost tak snadno šíří. Klouzavý výboj se může díky náhlé ionizaci pohybovat velmi rychle a díky malému odporu vytáhnout výboj do značných vzdáleností [6], [28]. Na obrázku 4 jsou fotografie klouzavých výbojů při různých hodnotách průtoku vzduchu, které pochází z článku [29], jež se tímto problémem zabýval.



Obrázek 3: Rozložení elektrického pole na výstupu z drážky



Obrázek 4: Chování klouzavého výboje ve vzdušném proudu. Převzato z [29]

### 4.3 Nehomogenity v izolaci

Drobné výboje v dielektrických materiálech lze často vysvětlit poměrně uspokojivě. Reálné, v praxi používané, materiály nikdy nejsou zcela homogenní, obsahují množství plynů a různých nečistot. Tyto nehomogenity jsou prekurzorem výbojové činnosti a chemických procesů, které chceme minimalizovat. Ve většině případů se jedná o drobné dutiny v izolačním materiálu. Ty mohou být přítomny již z výroby a nebo jsou produktem elektrického či tepelného namáhání. Charakter takových výbojů je podle [6] lavinový nebo jiskrový, a stejně jako jiné typy výbojů mají, za předepsaných podmínek, počáteční hodnotu napětí. Dutiny v materiálu často obsahují kyslík, což v kombinaci s výbojovou činností zapříčiní vznik ozónu. Tato látka je pro izolaci nebezpečná, protože má značné oxidační účinky. Chemicky mohou izolaci narušit však i látky vznikající při destrukci samotné izolace vlivem výbojů [30]. Průraz dielektrika stroje je tedy nakonec vždy jen otázkou času, a proto je nutné koronovou aktivitu sledovat a nevyhodnocovat životnost izolace jen na základě výpočtu a zkušeností [21], [28], [31], [32].

Podle nejčastějších hypotéz je příčinou výbojů v dutinách částečné nebo úplné vybití kapacity, která je přirozeně tvořena geometrií dutiny nebo jiné nehomogenity [6], [28], [30], [31], [32]. Protilehlé strany dutiny tvoří podle charakteru působícího elektrického pole elektrody, přičemž plyn uvnitř tvoří dielektrikum. Pokud je intenzita elektrického pole příliš vysoká, dochází k přeskoku mezi stěnami dutiny, a tím i k poškození izolace. Díky tomu je možné výbojové činnosti sledovat na základě proudových špiček, které vznikají při vybití kapacity [6]. Takové proudové špičky je poté možné zobrazit osciloskopem nebo přístroji určenými přímo pro měření částečných výbojů [28], [30].

#### 4.4 Vlivy výbojové činnosti na elektrickou pevnost

Drobná výbojová činnost je u vysokonapěťových zařízení běžná a nedá se plně potlačit. Následky však mohou být značné a je potřeba ji minimalizovat, aby mohlo být zařízení provozováno bezpečně. Výboje v dielektrických materiálech mají vliv především na životnost izolace a pravděpodobnost výskytu průrazu. Tyto průrazy mohou být různého charakteru stejně jako účinky výbojové činnosti. Většinou tyto účinky pracují v synergi a vzájemně se posilují. Podle [6] lze účinky rozdělit na elektrické, chemické, tepelné a erozivní, což potvrzují i jiné studie např. [31], [32].

##### **Elektrické účinky**

Vlivem přítomnosti vysoké intenzity elektrického pole je materiál neustále namáhán. Jak bylo řečeno v předchozích kapitolách, v materiálu mohou vznikat výboje, které vedou k vytvoření velmi dobře vodivého kanálu. Tímto způsobem se zkracuje vzdálenost a zvyšuje koncentrace elektrického pole, což vede k čistě elektrickému průrazu. Vodivá dráha se tak postupně šíří dielektrikem a ničí izolaci.

### **Chemické účinky**

Materiály používané v blízkosti vysokého napětí často vykazují chemické změny během výbojové činnosti. Tyto procesy jsou dlouhodobé a netýkají se pouze kapalných nebo plyných izolantů, nýbrž i pevného materiálu. Výboje zapříčiňují vznik látek jako je např. kyslíčník dusíku, vodík, ozón atd. Izolant se vlivem těchto látek poté dále rozkládá. Produkty těchto procesů mohou difundovat, tedy pronikat hlouběji do izolace a tvořit vodivější oblasti s větší pravděpodobností tepelného průrazu.

### **Tepelné účinky**

S elektrickými jevy, výboje nevyjímaje, jsou spojeny změny teploty. Výbojová činnost způsobuje lokální oteplení izolace, což vede k nestabilitě, a napětí potřebné pro tepelný průraz se snižuje.

### **Erozivní účinky**

Výbojová činnost také způsobuje erozi stěn pevných materiálů. Tento proces je pozvolný a může způsobit jak čistě elektrický, tak mechanický průraz.

## 5 Vodivé a polovodivé ochrany

Vzhledem k narůstající spotřebě je nutné zavádět stále výkonější generátory elektrické energie. Stavba stroje vyššího výkonu má však za následek zvyšování napětí na vinutích točivých strojů, a tak rostou i nároky na izolační systém. Díky přítomnosti vysoké intenzity elektrického pole na malých přeskokových vzdálenostech, je nutné vyvíjet stále nové a odolnější materiály. Základem izolace velkých statorových vinutí je hlavní izolace. Jejím úkolem je izolovat vodiče od země a zároveň také od ostatních vodičů v drážce železného jádra [4]. U ochrany se lze setkat s celou řadou označení, protože nebyla doposud zavedena přesná terminologie. Většinou se setkáváme s označením AGS pro ochranu drážkové části a EGS pro ochranu výstupu z drážky. Mezi další populární označení patří tyto:

- Drážková část: corona shield protection, inner/outer corona protection, conductive armor tape, semi-conductive tape, anti-corona protection, atd.
- Výstup z drážky: stress grading tape, semi-conductive tape, end-winding corona protection, anti-corona protection, voltage stress grading, stress control tape, atd.

Můžeme vidět, že některé názvy se používají spíše pro koronové ochrany obecně, což do orientace v odborné anglické literatuře vnáší značnou míru chaosu.

Problém s částečnými výboji se v posledních letech začal řešit více zejména kvůli odlišnému přístupu k izolaci vinutí. Před 60. lety 20. století se používali převážně termoplastické izolační systémy, které sice vykazovaly nižší hodnotu elektrické pevnosti v porovnání s dnešními materiály, ale měli i své nesporné výhody. Dnes ve vysokonapěťových strojích používáme reaktoplastické materiály na bázi polyesterů a epoxidů. Termoplastické izolace trpěli především navlháním, ovšem u dnešních systémů se do popředí dostávají částečné výboje, které se objevují především z důvodu snížené odolnosti vůči mechanickému namáhání. Ačkoliv se vinutí utěsňuje pomocí klínů a vložek pro dosažení minimální pohyblivosti, stejně dochází po čase k uvolnění vinutí a vzniku mezer, a to zejména mezi izolací a drážkovou částí [4]. Tyto prostory zapříčiňují vznik drážkových výbojů, jenž urychlují degradaci izolace a její další uvolnění. Vibrace poté způsobují pohyb vinutí v drážce, což je pro reaktoplastické izolační materiály nebezpečné. Vznikají praskliny a drobné defekty v izolaci, které snižují elektrickou pevnost.



Při diagnostice izolačních systémů se tedy musí brát v úvahu i mechanické vlastnosti použitých materiálů [33].

## 5.1 Ochrana proti drážkovým výbojům (AGS)

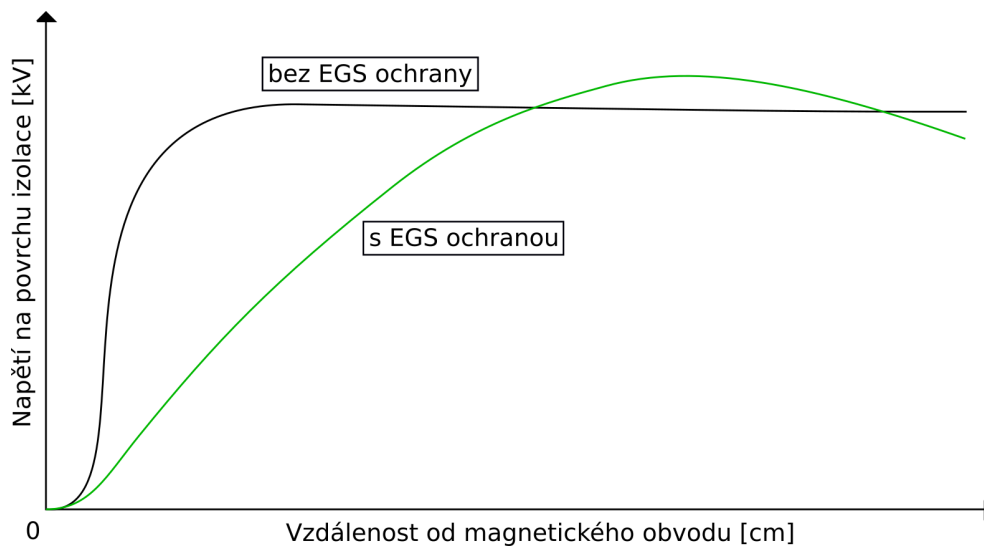
Drážkové výboje jsou způsobeny nedokonalým přilnutím izolované statorové tyče k vnitřnímu povrchu drážky. Tím vznikají volné prostory mezi povrchem izolace a drážkou, které podobně jako dutinky v izolaci vytvářejí prostor pro výbojovou činnost. Eliminace těchto volných prostor není možná, a proto nezbývá než vytvořit na povrchu izolace vlnutí vrstvu z dostatečnou vodivostí, aby mohlo docházet k vyrovnání rozdílných potenciálů. Tyto vodivé materiály mohou mít podobu i laku, ale v případě velkých točivých strojů spíše pásky. Laky se nepoužívají z důvodu snadného opotřebení, ale mají své místo v případě nutné opravy. K vyrovnání potenciálů může dojít v případě překlenutí vzduchové kapsy, volné nosiče náboje se šíří po povrchu vodiče do místa kontaktu vodivé pásky s jádrem. Z tohoto důvodu je důležitá hodnota povrchové rezistivity těchto materiálů [34]. Ochrana proti drážkovým výbojům má smysl jen u strojů se jmenovitým napětím vlnutí statoru od 6 kV a výš, kde hrozí překročení hodnoty elektrické pevnosti vzduchu  $E_P = 3 \text{ kV/mm}$  [4].

Vodivé ochrany degradují v točivých strojích především kvůli mechanickému namáhání, konkrétněji z důvodu uvolnění vlnutí a jeho pohybu v drážce. Kromě toho výbojová činnost, alespoň u vzduchem chlazených strojů, způsobuje tvorbu chemikálií, které představují zdravotní riziko (ozón) a způsobují erozi kovů, případně narušení pryžových materiálů [4].

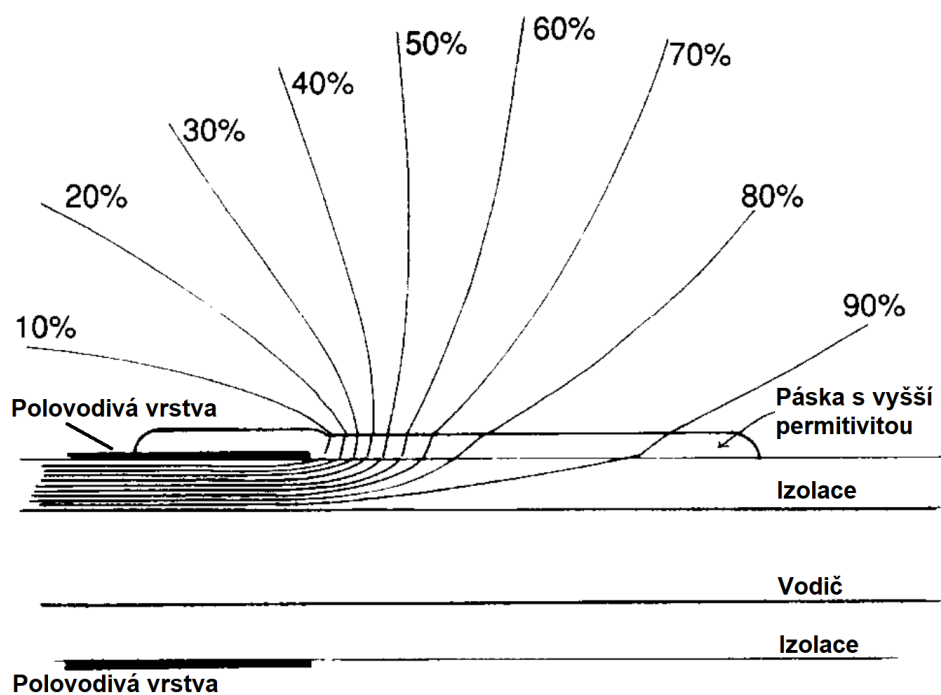
Princip výroby ochrany proti drážkovým výbojům spočívá v použití rezistivních látek jako jsou saze nebo grafit v kombinaci s pryskyřicemi. Hodnota odporu takových ochrany by neměla být vyšší než  $15 \text{ k}\Omega$ , aby byla zajištěna dostatečná vodivost pro funkci ochrany. Hodnota by ovšem neměla být ani příliš nízká, v opačném případě by se do statorové ochrany indukovaly příliš velké proudy, které by kromě ztráty energie především ohřívaly stroj. Ochranná páska je běžně vyvedena z drážky s určitým přesahem, aby se zamezilo vzniku výbojů na jejím konci [4], [35].

## 5.2 Ochrana proti výbojům na výstupu z drážky (EGS)

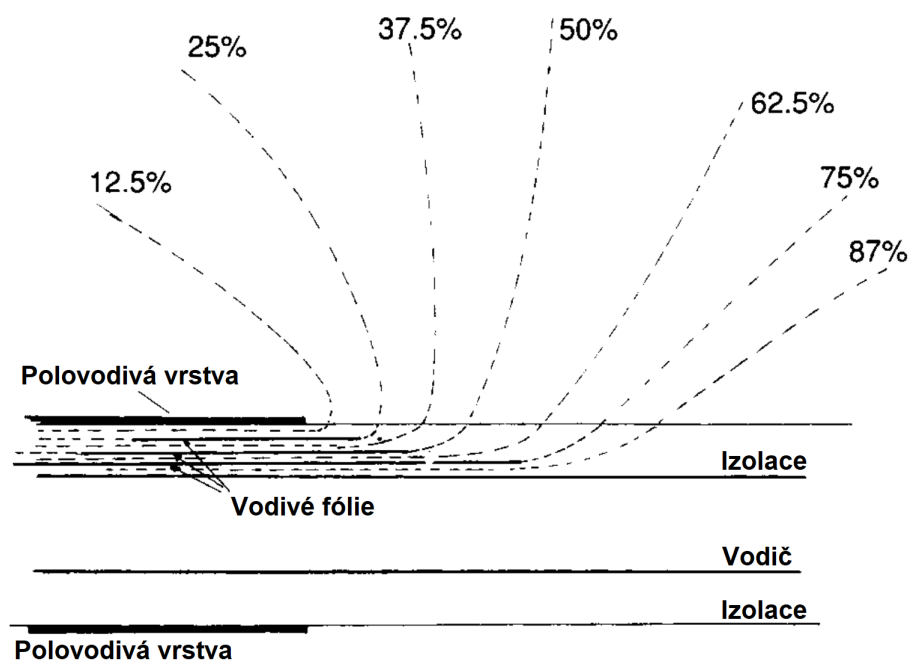
Pro minimalizaci vlivu klouzavých výbojů je třeba upravit rozložení potenciálu při výstupu vinutí z drážky. V případě nechráněného vinutí je zde příliš strmý nárůst napětí, což graficky znázorňuje obrázek 5. Pro zlepšení rozložení elektrického napětí se používají polovodiivé materiály, většinou na bázi karbidu křemíku, které reagují na intenzitu elektrického pole a mění podle ní svůj odpor [8], [36]. Na V-A charakteristice materiálu se toto projevuje jako typické nelineární zakřivení průběhu, přičemž hodnota napětí na povrchu izolace se s narůstající vzdáleností od magnetického obvodu stroje zvyšuje s menší strmostí. Rovnoměrné rozložení potenciálu podél izolovaného vinutí je možné dosáhnout i změnou permitivity, což znázorňuje obrázek 6. Tento princip je méně používaný zejména kvůli nízké dostupnosti materiálů s vysokou permitivitou ( $\epsilon_r > 30$ ), schopné pracovat v teplotní třídě F [37]. Další možností je umístění vodivých fólií do hlavní izolace vinutí. Fólie se většinou uvnitř izolace nacházejí v několika vrstvách s odstupňovanými přesahy pro dosažení požadovaného rozložení napětí [37]. Tento princip je znázorněn na obrázku 7.



Obrázek 5: Rozložení potenciálu podél izolovaného vinutí.

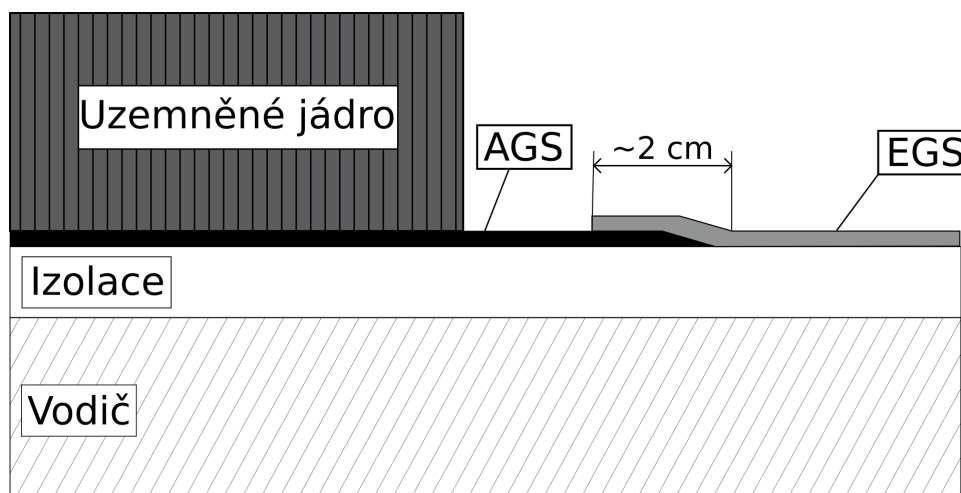


Obrázek 6: Řízení rozložení elektrického napětí na povrchu izolace pomocí změny permitivity. Převzato a upraveno z [37].



Obrázek 7: Řízení rozložení elektrického napětí na povrchu izolace pomocí vodivých fólií. Převzato a upraveno z [37].

Polovodivé pásy se vyrábějí na základě ze skleněného vlákna, přičemž hlavní složku polovodivé ochrany tvoří karbid křemíku. Jako pojivo zde slouží opět pryskyřice. Pásy mohou mít ve výsledku různý stupeň vyhlazení přechodu z drážky. Výběr pásy závisí na typu stroje, jmenovitém napětí, použité technologie výroby izolace atd. Polovodivá páska je aplikována s určitým přesahem přes pásku vodivou, uváděné vzdálenosti výrobců se mohou mírně lišit v závislosti na jejich zkušenostech a parametrech jejich produktů [38]. Většinou se hodnota přesahu pohybuje okolo dvou centimetrů. Přesah pásy je znázorněn na obrázku 8.



Obrázek 8: Detail překrytí AGS a EGS pásek.

Řešení pro potlačení klouzavých výbojů je mnoho, nicméně podle [37] v zásadě můžeme vymezit dva základní přístupy k této problematice:

1. Vytvoření vhodné geometrie s využitím vodivých materiálů na výstupu z drážky. Tímto způsobem dochází k vhodnému rozložení elektrického pole a výbojová činnost je tak potlačena. Výhodou tohoto řešení je především absence rezistivních materiálů, které by způsobovaly činné ztráty v podobě Jouleova tepla. Nevýhodou je nutná úprava geometrie, což znamená větší rozměry stroje. Provedení může být v podobě materiálu s vyšší permitivitou naneseného na hlavní izolaci. Další možností je rozšíření hlavní izolace nebo zavedení vodivých pásek přímo do hlavní izolace za účelem snížení namáhání izolace elektrickým polem. Tyto metody eliminace výbojů se většinou označují jako kapacitní.

2. Řešení na principu polovodivých materiálů aplikovaných na izolované vinutí. Využitím nelineární V-A charakteristiky je možné zrovnoměrnit rozložení napětí podél statorové tyče na výstupu z jádra. Problém těchto metod je v nezanedbatelných ztrátách, které sebou v konečném důsledku nese i oteplení stroje, a dokonce i změnu V-A charakteristiky samotné ochrany. Vzhledem k tomu, že se v minulých letech podařilo tyto materiály vylepšit, jsou dnes ztráty významně příznivější, což umožňuje aplikaci polovodivých pásek i na vysokonapěťové stroje. Přesto se stále experimentuje s novými možnostmi, jak stávající materiály, jenž jsou založeny zejména na karbidu křemíku, nahradit efektivnější alternativou. Tyto metody eliminace výbojů se většinou označují jako odporové.

Základním předpokladem funkční EGS ochrany je vlastnost použitého materiálu reagovat na intenzitu elektrického pole a zvyšovat jejím prostřednictvím vodivost. Platí tedy, že čím blíže k výstupu z drážky magnetického obvodu stroje, tím nižší rezistivity páska nabývá. Tuto závislost na elektrickém poli je možné vidět na obrázku 5.

Pro vyjádření reakce ochranné pásky na přiložené elektrické pole zavádí [39] tzv. koeficient nelinearity  $\alpha$ . Ten udává, jak strmou závislost na elektrickém poli materiál vykazuje. Matematicky je koeficient nelinearity  $\alpha$  vyjádřen takto:

$$\alpha = 1 + \frac{d \ln(\gamma)}{d \ln(E)} \quad [-] \quad (7)$$

Koeficient umožňuje stanovit hodnotu elektrické vodivosti při konkrétním zatížení elektrickým polem na základě vztahu:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{E}{E_b} \right)^\alpha \right] \quad [S \cdot m^{-1}] \quad (8)$$

Podle [40] se u běžně používaných ochran tento koeficient pohybuje v rozmezí  $\alpha = 10 - 40$ . Z [39] lze vyvodit, že v elektrických polích do  $1 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$  by konduktivita neměla přesáhnout hodnotu  $3\cdot 10^{-10} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ . V opačném případě bude ochrana vykazovat velké ztráty. Pro intenzitu elektrického pole nad  $2 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$  je vhodné použít hodnoty konduktivity v rozmezí  $\gamma = 10^{-6} - 10^{-7}$ . Tyto hodnoty vycházejí s předpokladu síťové frekvence  $f = 50 \text{ Hz}$  a relativní permitivity EGS pásy  $\epsilon_r \approx 10$ . Z [39] dále vyplývá, že maximální zatížení EGS pásy by mělo v řádech desítek  $\mu\text{A}$ , což by v přepočtu na ztrátový výkon nemělo činit více než desetiny  $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ .

### 5.3 Provedení EGS ochran

Dnes se jako hlavní materiál pro EGS ochrany využívá karbid křemíku SiC, který významně pozvedl jejich úroveň a kvalitu. V průběhu vývoje se používalo i mnoho jiných materiálů a technik aplikace k potlačení výbojové činnosti. V rámci odporových metod se využíval azbest a grafit, většinou na nosném materiálu v podobě tkaniny nebo jako nátěr na bázi pryskyřice. Další možností byla aplikace nástřiků kovových materiálů pro vytvoření vodivé vrstvy [4], [41].

Cílem této podkapitoly je popsat aktuálně používané materiály a uvést nové potenciální alternativy v oblasti EGS ochran.

#### Karbid křemíku SiC

Jedná se o sloučeninu uhlíku a křemíku, vlastnostmi podobnými diamantu, to zejména díky vysoké tvrdosti, která je zapříčiněna vzájemnými kovalentními vazbami mezi atomy obou prvků. Řadí se do skupiny neoxidových keramických materiálů a momentálně se jedná o jeden z nejtvrděších průmyslově vyráběných materiálů o hodnotě tvrdosti 9,5 Mohsovy stupnice. Oproti čistému křemíku lépe vede teplo a je schopen fungovat jako polovodič i při vyšších teplotách (i nad  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Je vhodný pro použití u výkonových elektrických součástek díky možnosti většího proudového zatížení [42].

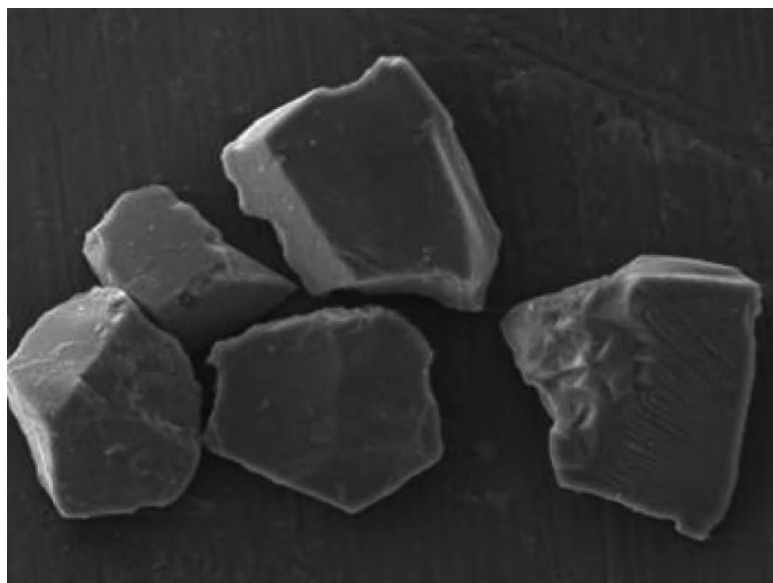
Hlavní překážkou v dřívějším využití karbidu křemíku v průmyslových aplikacích byla obtížnost jeho výroby v požadované kvalitě. Z hlediska elektrické vodivosti je čistota materiálu důležitá. Krystaly kvalitního materiálu se většinou vyznačují světležlutou až zelenou barvou nebo jsou zcela bezbarvé [43]. Horší kvalitu mají poté tmavší a černé odstíny, ze kterých se např. vyrábějí součástky s požadavky na vysokou tvrdost, teplotní odolnost, nízkou teplotní roztažnost a hustotu, což jsou všechno vlastnosti jimiž se karbid křemíku vyznačuje [40].

První karbid křemíku byl vyroben koncem 19. století americkým chemikem Edwardem Goodrichem Achesonem, který původně zamýšlel vytvořit umělý diamant pro brusné a řezací nástroje. Výroba byla tehdy velmi náročná a materiál se začal průmyslově užívat až po roce 1955, kdy proces výroby usnadnila tzv. Lelyho metoda. Velkého vřehlasu se sloučenině dostalo až po roce 1970, kdy pánové M. Tairov a V.F. Tsvetkov Lelyho metodu zdokonalily. Materiál se začal stávat dostupnější a jeho výroba probíhala ve vysoké kvalitě i při nižších teplotách [43].

Ačkoliv se karbid křemíku vyskytuje také v přírodě, je velmi vzácný a používá se podobně jako přírodní diamant pro výrobu šperků. Proces výroby syntetického karbidu křemíku je založen na epitaxi, což je proces, při kterém na tenké vrstvě substrátu roste jeho krystalická struktura. Výroba probíhá v pecích při vysokých teplotách okolo 2 400 °C [44]. Nosný substrát krystalu se přichytí na uhlíkový kelímek naplněný SiC v podobě prášku. ohřeje se na vysokou teplotu až do bodu, kdy prášek začne sublimovat. Látka nemá kapalně skupenství, takže sublimuje při vyšší teplotě rovnou z pevného do plynného skupenství. Teplotu je nutné udržovat v přesném rozmezí tak, aby měl prášek vyšší teplotu oproti substrátu, právě to z velké míry ovlivňuje velikost výsledného krystalu. Pro zajištění optimálního přenosu na substrát se tlak v peci udržuje pod hodnotou 50 mbar [43], [45].

V dnešní době se užívají zejména metody CVD (Chemical Vapor Deposition) neboli metoda chemického napařování a varianty metody MBE (Molecular Beam Epitaxy), což je metoda epitaxe z molekulárních svazků [44]. U krystalů vyráběných pro elektrotechnické účely je důležitá zejména čistota a velikost krystalů. V dnešní době je možné uvedenými výrobními metodami dosáhnout monokrystalů i o průměru 10 cm [43], [45].

Podle [46] je možné jako nosnou látku (matrici) použít organické látky, zejména silikonové nebo epoxidové prykyřice, které mají výhodu ve snadné aplikaci při nízkých teplotách, dají se snadno přizpůsobit potřebám a mají dobré mechanické a elektrické vlastnosti. Nevýhodou je nízká odolnost proti teplotnímu namáhání. Druhou možností jsou anorganické látky jako je glazurovaná keramika, ale ta se z pochopitelných důvodů v točivých strojích použít nedá, zejména kvůli nízké mechanické odolnosti. Přesto je to stále vhodné řešení u vysokonapěťových zařízení, které použití umožňují (průchodky, izolátory atd.). Na obrázku 9 jsou zobrazeny částičky SiC tak, jak jsou viděna při zvětšení elektronovým mikroskopem [47].



Obrázek 9: Mikroskopické částičky SiC. Převzato z [47]

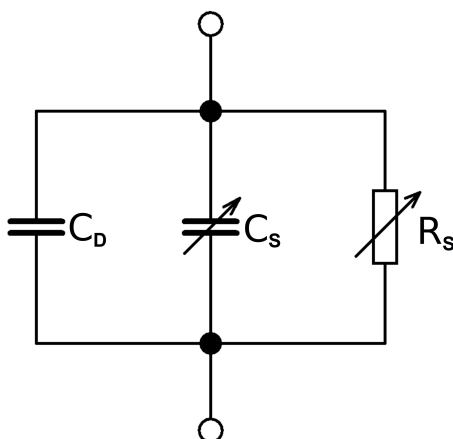
Článek [48] se zabývá teplotní závislostí ochrany proti výbojové činnosti na bázi SiC a jejich závěry jsou překvapivé. Podle jejich experimentu vykazuje prykyřice obohacená SiC velmi pozitivní vlastnosti a skutečně zvyšuje hodnotu zápalného napětí korony, nicméně pouze při nižších teplotách (do 70 °C). V práci je provedeno ex-



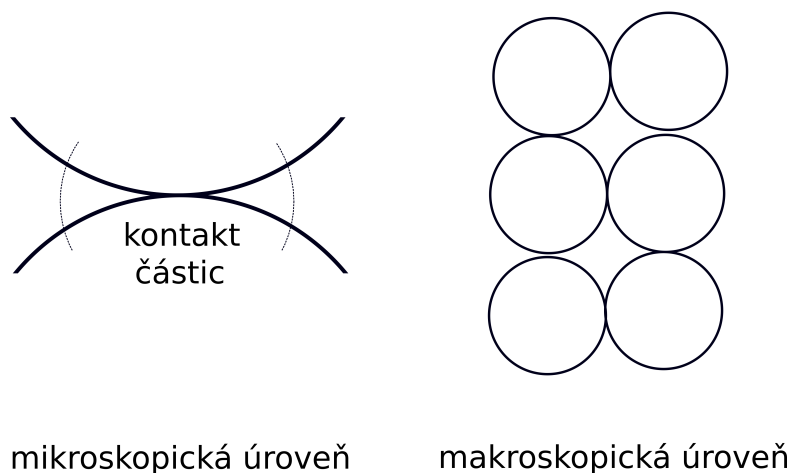
perimentální měření při různých koncentracích SiC, konkrétně 0 vol % (objemových procent), což představuje čistou pryskyřici, dále 6 vol% a 14 vol%. Bylo zjištěno, že při teplotě 20 °C a 50 °C dosahuje SiC pryskyřice výrazně lepších výsledků. Při teplotě 70 °C již čistá pryskyřice vykazovala nejvyšší odolnost a zároveň vykazovala i vyšší odolnost proti přeskoku. Při zvyšování teploty dochází také ke zvyšování vodivosti neboť částice získávají energii, pohybují se rychleji a snáze způsobí ionizaci částic vázaných ve valenčních vrstvách atomů. Přítomnost SiC tedy pravděpodobně může snížit elektrickou odolnost pryskyřice při vyšších teplotách.

Při použití SiC prášku jako EGS ochrany je vytvořen kompozitní materiál skládající se z polymerové matrice vyplněné zrníčky SiC [49]. Chování lze popsat náhradním schématem na obrázku 10, kde kapacita  $C_D$  představuje lineární kapacitu danou okolní maticí,  $C_S$  reprezentuje nelineární kapacitu barierových oblastí v místech kontaktu zrníček a nelineární odpor  $R_S$  tvoří ztrátu v podobě vodivostního (kondukčního) proudu. Kapacita se mění především podle toho, jak moc je materiál dotovaný. Kromě toho záleží přirozeně na přiloženém napětí a kontaktní ploše. Převládá buď kapacita  $C_D$  a nebo  $C_S$ . Značný vliv na nelinearitu má změna kontaktní plochy (některá zrnka se nedotýkají) [46].

Pro aplikace protikoronových ochrany se používá karbid křemíku v práškové podobě. Vzhledem k tomu, že materiál tvoří zrnka SiC a jiných látek, je těžké přesně odhadnout jeho konečné vlastnosti. Z hlediska dielektrických parametrů je tedy nutné uvážit kontakty mezi částicemi na mikroskopické i makroskopické úrovni, viz. obrázek 11 [47]. Dalším problémem z hlediska přesného určení je fakt, že se materiál používá ve střídavém elektrickém poli, kde kromě odporu musíme vzít v potaz i vliv kapacity a prostředí, ve kterém se látka nachází.



Obrázek 10: Model náhradního schématu kontaktu částic SiC. Převzato a upraveno z [49]



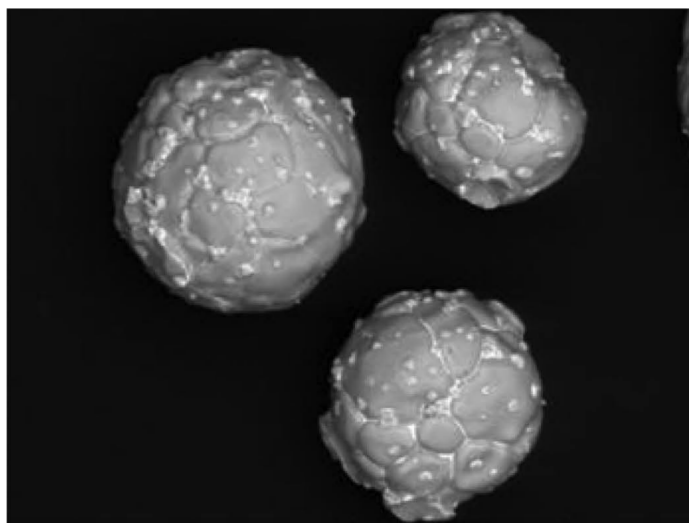
Obrázek 11: Kontakty mezi zrnky na mikroskopické a makroskopické úrovni. Převzato a upraveno z [49].

#### 5.4 Nové trendy v oblasti EGS ochran

Ačkoliv se dnes s úspěchem používají materiály s příměsí SiC prášku, jsou stále EGS ochrany nedokonalé. Rozložení potenciálu není ideální, a to zejména vezmeme-li v úvahu potíže s teplotní stabilitou. Obtíže způsobuje i omezená možnost řízení vlastností tohoto materiálu ve výrobním procesu. Z těchto důvodů se stále pracuje na možnostech alternativního přístupu a zkoumání nových možností ochran, jenž by zajistili lepší funkci proti výbojové činnosti na výstupu z drážky.

## Materiály na bázi ZnO

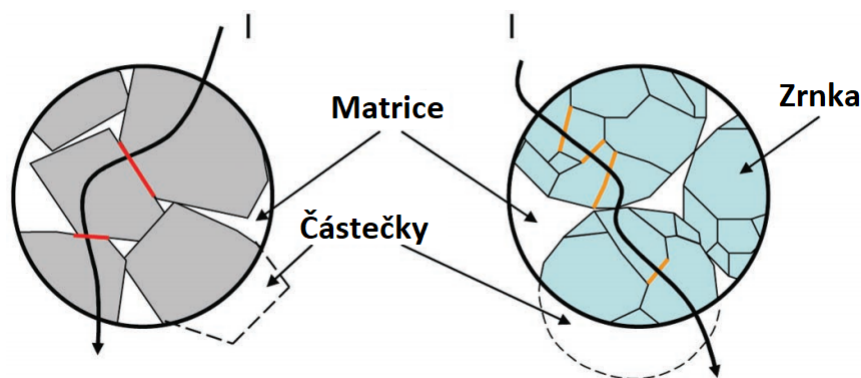
Oxid zinečnatý ZnO je v elektrotechnice známý materiál, který se využívá u varistorů, elektrické součástky, jenž slouží především jako přepěťová ochrana. Výhodou ZnO mikrovaristorů jako protikoronové ochrany je především v možnostech lépe kontrolovat vlastnosti materiálu při výrobním procesu. V případě SiC se vlastnosti modifikují úrovní a kvalitou dotování, čímž se ovlivňuje vodivost, nicméně koeficient nelinearity se dá ovlivnit jen velmi těžko. Proudová hustota se u SiC prášku dá také přizpůsobit velikostí zrn, čímž se mění počet kontaktních ploch. Tato kontrola je při výrobě velmi limitovaná a výsledek je těžko predikovatelný [50]. Materiály na bázi ZnO jsou v tomto ohledu mnohem příznivější, jelikož se vlastnosti neovlivňují úrovní dotování, ale složením dotované příměsy a procesem sintrování [47]. Díky tomu je možné u materiálu vybrat nezávisle vhodnou nelinearitu, rezistivitu i napěťovou úroveň, při níž ochrana funguje. To je velmi důležité z důvodu různých požadavků odlišných vysokonapěťových zařízení. Na obrázku 12 je snímek mikrovaristorů pořízený elektronovým mikroskopem.



Obrázek 12: Mikroskopické částičky mikrovaristorů ZnO. Převzato z [47].

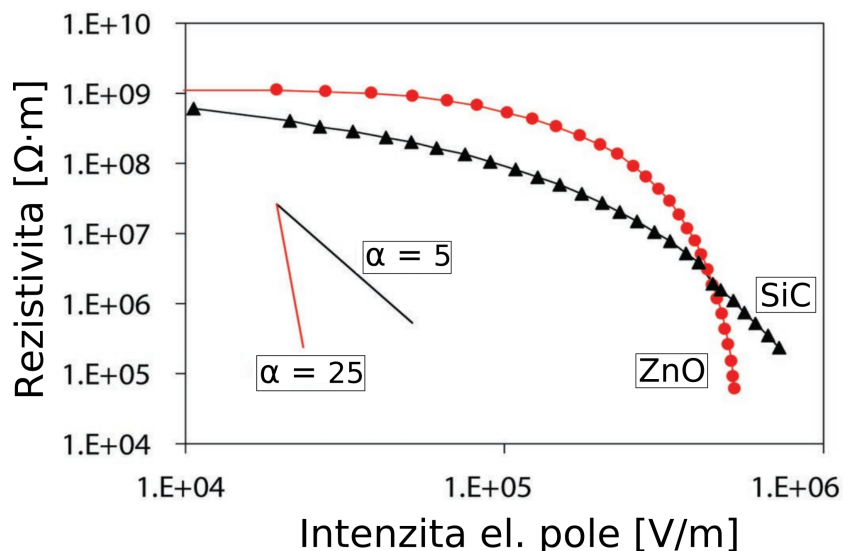
Předpokládá se, že by mikrovaristory mohli v budoucnu méně efektivní SiC nahradit. Tyto materiály vykazují nelinearitu podobně jako SiC, ovšem jejich možnosti jsou mnohem širší. Při působení vnějšího elektrického pole se uvnitř materiálu vytvoří vodivá cesta mezi jednotlivými mikrovaristory, přičemž při určité hodnotě napětí (spínací napětí) dochází k saturaci, vodivost není dále silicím elektrickým polem významně ovlivněna [51], [52]. Toto napětí je dáno především velikostí částic, což přímo souvisí

s teplotou, při které se materiál sintruje [47]. Každý mikrovaristor reaguje při určité hodnotě napětí v řádech jednotek voltů, což znamená, že pro menší částice je zapotřebí větší intenzita elektrického pole pro zvýšení vodivosti celého kompozitu. Jak dokazuje mnoho odborných článků, je díky tomu možné tento materiál dobře přizpůsobit požadavkům konkrétní aplikace [51], [53], [54], [55]. Další výhodou je, že nosný materiál, ve kterém jsou mikrovaristory rozptýleny má jen velmi malý vliv na spínací napětí a prakticky žádný vliv na nelinearitu V-A charakteristiky. Vysoké spínací napětí je dosaženo díky nižší teplotě a kratšímu času sintrování. Nízkým hodnotám odpovídají naopak vyšší teploty sintrování, případně speciální směs pro dotování [47]. Díky možnosti vyrábět materiály pro různé napěťové požadavky se nabízí využití i pro odlišné aplikace jako jsou např. integrované přepěťové ochrany. Na obrázku 13 je ilustrativní srovnání částecek karbidu křemíku a oxidu zinečnatého.



Obrázek 13: Mikroskopické částičky SiC a ZnO. Převzato z a upraveno [47].

Na obrázku 14 je možné vidět porovnání naměřených závislostí rezistivity na intenzitě elektrického pole, ze které je zřejmá výhoda mikrovaristorů díky většímu koeficientu nelinearity. Toto měření probíhalo na vzorcích určených pro vysokonapěťové turbogenerátory [47].



Obrázek 14: Porovnání průběhů rezistivity ZnO a SiC. Převzato a upraveno z [47].

### Organické materiály

Na Fakultě elektrotechnické ZČU v Plzni aktuálně probíhá výzkum nových materiálů na bázi organického PEDOT:PSS, které by mohli být perspektivním směrem ve vývoji nových ochran.

PEDOT:PSS označuje poly (3,4-ethylenedioxythiophene) polystyren sulfonát sodný, což je polymer složený ze dvou ionomeroů. Složka PSS tedy polystyren sulfonát sodný slouží k rozpuštění ve vodě a zároveň jako iontová kompenzace náboje [56].

Typické vlastnosti těchto látek jsou dobrá vodivost v rozsahu  $90$  až  $5000 \Omega \cdot cm$  a mechanickou odolností. Jeho uplatnění lze najít v elektrotechnice zejména jako materiál pro elektrody, např. v dotykových displejích a kondenzátorech. I tento materiál je zkoumán jako možná náhrada dnešních EGS ochran na bázi SiC [56], [57].

V disertační práci pana Ing. Ondřeje Krpala, Ph.D. [40] bylo provedeno měření, které se přímo zabývá vlastnostmi těchto materiálů v elektrickém poli a jejich schopnostmi zrovnoměnit rozložení napětí. Z práce vyplývá, že ačkoliv jsou materiály v této aplikaci do budoucna potenciálně přínosné, nejsou zatím na úrovni, kdy by mohli konkurovat komerčně dostupným ochraným páskám a lakům.

## V-A charakteristika EGS ochran

V-A charakteristika je jedním z nejdůležitějších parametrů protikoronových ochran, protože vyjadřuje hodnotu rezistivity, resp. povrchového odporu a v případě EGS ochran definuje nelinearitu, jenž se pro potlačení klouzavých výbojů používá.

Charakteristiku je možné měřit jak při střídavých, tak stejnosměrných hodnotách zkušebního napětí. Ve většině případů se volí stejnosměrné zkušební napětí nebo napětí velmi nízkých frekvencí, protože tyto metody nejsou zatíženy proudy příslušných kapacitních vazeb. Kapacitní proudy způsobují při střídavém napětí činné ztráty, dá se tedy po porovnání obou charakteristik předpokládat výrazný posun směrem k nižším hodnotám odporu [58]. Zároveň je nutné počítat s tím, že vlivem střídavého napětí dochází k reakci SiC v materiálu na proměnnou intenzitu elektrického pole, což způsobí odchylky naměřeného průběhu.

Měřením V-A charakteristiky lze též zjistit vliv tepelného stárnutí na chování protikoronových ochran, při vystavení různým intenzitám elektrického pole. Vzorky se většinou nechávají zestárnout uměle při konstantní teplotě. K tomuto procesu existují příslušné normy [59], [60] které udávají, že by se stárnutí mělo provádět při teplotě 180 °C po dobu 7 dní. Toto období představuje první cyklus stárnutí, který se opakuje až do konečných čtyř cyklů. Po této době už se nepředpokládá, že by materiál teplotní namáhání vydržel. Podle [40] došlo již po prvním cyklu stárnutí ke zničení měřících vzorků, přičemž prudkou reakci na vyšší teploty dokládají i další experimenty, např. [48]. Po procesu stárnutí při teplotě 155 °C, což je maximální teplota pro izolaci třídy F, již zkoumané EGS ochrany vydržely. Volil bych tedy stárnutí při nižší teplotě, než udává norma, případně vytvořit více vzorků pro porovnání teplotní odolnosti, pokud jich je k dispozici dostatečné množství.

## 6 Nabídka AGS a EGS ochran

Výrobci protikoronových ochran je na trhu větší množství a jejich produkty se svými vlastnostmi i přístupem k ochraně vinutí liší. Zejména v případě polovodivých ochran se užívají různé hodnoty rezistivity, což ovlivňuje schopnost ochrany vyrovnávat gradient elektrického pole na výstupu z drážky. Zejména větší výrobci poté nabízejí různé pásy jak pro AGS, tak pro EGS ochrany, aby zajistili parametry izolace podle požadavků stroje. Většina těchto izolací spadá do teplotní třídy F, pro kterou je stanovena maximální teplota 155 °C. Cílem této kapitoly je průzkum trhu z hlediska nabízených ochran proti výbojové činnosti a porovnání jejich vlastností.

Všechny uvedené parametry v této kapitole byly zjištěny na základě oficiálních technických listů uvedených výrobců, jenž cituje a zároveň některé veřejně dostupné příkládám v příloze této práce.

### 6.1 KREMPEL-GROUP GmbH

Firma KREMPEL se zabývá výrobou izolačních systémů vinutí, a to nejen pro vysokonapěťové točivé stroje, ale také transformátory a elektromotory. V rámci EGS ochran dle [61] nabízí produkt AKASIC 4b, což je částečně vytvrzená samosmršťující páska, schopná významně snížit riziko vzniku dutin mezi páskou a izolací. Firma nabízí také pásy proti koronovým výbojům v drážce, které označuje jako OCP (Outer Corona Protection) a ICP (Inner Corona Protection). OCP představuje AGS pásy, které chrání izolaci proti výbojům vůči uzemněnému magnetickému obvodu, zatímco ICP představuje vnitřní ochranu proti výbojům v oblastech transpozice vinutí. K těmto účelům se někdy využívají také laky nebo tmely, ovšem princip je stejný jako v případě AGS ochran.

Kromě ochranných prostředků vyrábí firma také hlavní izolaci, a to jak pro izolační systém Resin-Rich, tak izolaci technologií VPI. Jedná se o tzv. MICA pásy, což představuje izolační systém na bázi slídových materiálů. Jedná se zpravidla o slídový papír, který poté společně s nosným materiálem v podobě skleněné tkaniny a epoxidovou pryskyřicí tvoří kvalitní izolační systém s vysokou elektrickou pevností. Firma vyrábí z

těchto materiálů také mezizávitové izolace. Mezi další látky, které firma k izolacím užívá patří polyetylentereftalát (dále PET) nebo různé předimpregnované tkaniny, mimo jiné i syntetický aramidový materiál NOMEX.

## 6.2 ISOVOLTA AG

Jde o rakouskou firmu, jenž se zabývá výrobou AGS a EGS ochran. Nabídka firmy je rozmanitější než u předchozí firmy KREMPEL. Podle [62] V nabídce je hned několik AGS ochran lišící se zejména hodnotami rezistivity a použitými materiály, můžeme zde najít standardní materiály na bázi polyesterových vláken, skleněných vláken i jejich kombinaci. Další skupinu tvoří tzv. CONTAFELPREG, což jsou podle výrobce vodivé samosmršťující ochrany určené pro Resin-Rich technologii. Dále vodivé produkty CONTAGLAS na bázi skleněných vláken a CONTAVAL, což je vodivý laminát z epoxidového skla, jenž slouží jako výplň drážek.

V rámci polovodivých ochran nabízí firma produkt EGSB, což je polovodivá samosmršťující páska na bázi PET v provedení jak pro Resin-Rich pod označením EGSB 2969, tak VPI technologii pod označením EGSB 2709.

## 6.3 Von Roll Holding AG

Švýcarská firma Von Roll patří mezi světovou špičku v oblasti izolačních materiálů pro vysokonapěťové aplikace, nabízejí širokou škálu produktů od hlavních izolací, přes tepelné izolace a protikoronové ochrany až po samotné strojní součástky. Proti výbojové činnosti nabízejí dle [63] ve vysokonapěťových strojích nabízí širokou škálu prostředků. Mezi jejich nabídku patří i ochranné laky, pryskyřice a impregnanty. Kromě AGS a EGS ochran zavádí do svého portfolia též produkty pod označením IGS, což představuje ICP ochrany, tedy pásy či laky pro omezení výbojové činnosti, jenž vzniká pod hlavní izolací díky Roeblově transpozici vinutí.

Proti koronovým výbojům nabízí firma pásy pod označením CoronaShield C (conductive) a CoronaShield SC (semi-conductive). Kromě pásek vyrábí Von Roll také laky pod označením CoronaShield P, které využívají modifikovanou fenolovou pryskyřici a



karbid křemíku SiC k dosažení vhodné nelinearity v rozložení elektrického pole podél vinutí vystupujícího z drážky. Karbid křemíku je použit i pro EGS pásy, kde Von Roll také využívá PET vlákno impregnované pryskyřicí.

## 6.4 Další výrobci

Kromě velkých firem na trhu existuje také větší množství menších subjektů zabývajících se výrobou prostředků pro eliminaci výbojové činnosti. Uvádím zde tedy některé z nich, jenž se mi podařilo vyhledat a získat parametry jejich produktů na základě dostupných zdrojů.

### Vidyut

Indická firma Vidyut nabízí ochranu na bázi PET vláken, skleněných vláken a aramidového papíru NOMEX [64], [65]. Výrobce u svých pásek udává i doporučení pro skladování. Pásy by měly být uloženy na studeném a suchém místě, což je přirozeně z důvodů možného navlhnutí, to by způsobilo výrazné snížení elektroizolačních vlastností. Při pokojové teplotě je možné pásy skladovat po dobu šesti měsíců, při 5 °C je možné skladovat až dvanáct měsíců. Z dostupných zdrojů samotného výrobce je zřejmé, že nabízí dva typy AGS pásek, a to VID-ANTICOR 3.85 nebo VID-ANTICOR 5.110. U EGS ochran jsou to opět dva produkty pod označením VIDSTRESS 8.300 a VIDSTRESS 10.350, přičemž pro kvalitní přilehnutí k izolaci výrobce doporučuje nechat pásku smrštit při teplotě 150 °C po dobu jedné hodiny.

### Chhaperia

Indická firma působící od roku 1959 zabývající se výrobou slídových mica pásek. Kromě vysokonapěťových izolačních a ochranných pásek produkuje také prostředky pro tepelnou izolaci. V rámci AGS a EGS ochran nabízí několik produktů, jejichž parametry jsou zahrnuty v následujícím srovnání. Vlastnosti pásek Chhaperia byly zjištěny na základě technického listu uvedeného v příloze práce.

Tabulka 1: Parametry AGS ochran

Výrobce	Označení	Tloušťka [mm]	Pevnost v tahu [N/cm]	Prodloužení [%]	$\rho_p$ [ $\Omega/\square$ ]
KREMPEL	06 EWR 15 AA	$0,18 \pm 0,036$	$\geq 20$	$\geq 8$	400 - 6000
	07 EWR 05 AA	$0,13 \pm 0,026$	$\geq 28$	$\geq 9$	400 - 5000
	10 EWR 02 AA	$0,2 \pm 0,04$	$\geq 12$	$\geq 10$	400 - 20000
	12 EWR 01 AA	$0,29 \pm 0,058$	$\geq 12$	$\geq 4$	400 - 6000
	03 ELR 19 AA	$0,05 \pm 0,01$	$\geq 12$	$\geq 10$	400 - 1000
	06 ELR 14 AA	$0,1 \pm 0,02$	$\geq 40$	$\geq 15$	1000
	06 ELR 14 CB	$0,12 \pm 0,024$	$\geq 60$	$\geq 12$	1200
	06 ELR 14 CC	$0,1 \pm 0,02$	$\geq 40$	$\geq 15$	150 - 1500
	03 EFR 13 AA	$0,08 \pm 0,016$	$\geq 30$	$\geq 12$	1000 - 2000
	03 EFR 13 BA	$0,08 \pm 0,016$	$\geq 30$	$\geq 12$	400
	07 EFR 18 AA	$0,14 \pm 0,028$	$\geq 60$	$\geq 10$	400 - 5000
	07 EFR 18 BA	$0,14 \pm 0,028$	$\geq 60$	$\geq 14$	400 - 5000
	04 ESR 22 AA	$0,22 \pm 0,044$	$\geq 20$	$\geq 14$	400 - 1000
	04 ESR 22 AA-sk	$0,24 \pm 0,048$	$\geq 20$	$\geq 14$	400 - 1000
ISOVOLTA	CONTADEL 2716	$0,11 \pm 0,02$	$\geq 40$	-	200 - 600
	CONTADEL ME 3107	$0,11 \pm 0,02$	$\geq 40$	-	200 - 600
	CONTAVAL 2017	$0,3 \pm 0,15$	-	-	500 - 50000
	CONTADEL 3080	$0,08 \pm 0,02$	$\geq 40$	-	500 - 1500
	CONTADEL H 0865	$0,12 \pm 0,02$	$\geq 40$	-	150 - 250
	CONTADEL PREG 2564	$0,18 \pm 0,03$	$\geq 25$	-	10000
	CONTAGLAS 2912	$0,07 \pm 0,02$	$\geq 120$	-	500 - 1500
VonRoll	CoronaShield C 215.51	$0,1 \pm 0,02$	$\geq 30$	$\geq 10$	200 - 400
	CoronaShield C 215.51-03	$0,1 \pm 0,02$	$\geq 30$	$\geq 10$	400 - 1000
	CoronaShield C 215.55	$0,085 \pm 0,02$	$\geq 30$	$\geq 8$	200 - 400
	CoronaShield C 215.63	$0,17 \pm 0,03$	$\geq 12$	$\geq 5$	200 - 400
	CoronaShield 250 N 85	$0,085 \pm 0,01$	$21 \pm 4$	-	100 - 400
	CoronaShield C 2500	$0,125 \pm 0,015$	$38 \pm 5$	-	100 - 400
	CoronaShield C 2500NB 70	$0,07 \pm 0,01$	$\geq 35$	$\geq 5$	1500 - 3000
Vidyut	VID-ANTICOR 3.85	$0,085 \pm 0,002$	$\geq 30$	8	40 - 400
	VID-ANTICOR 5.110	$0,115 \pm 0,015$	$\geq 50$	15	200 - 1000
Chhaperia	C1530-1	$0,08 \pm 0,03$	$\geq 25$	$\geq 8$	500 - 1800
	C1530-1A	$0,09 \pm 0,02$	$\geq 30$	$\geq 8$	200 - 800
	C1530-1B	$0,09 \pm 0,03$	$\geq 60$	$\geq 15$	1000 - 5000

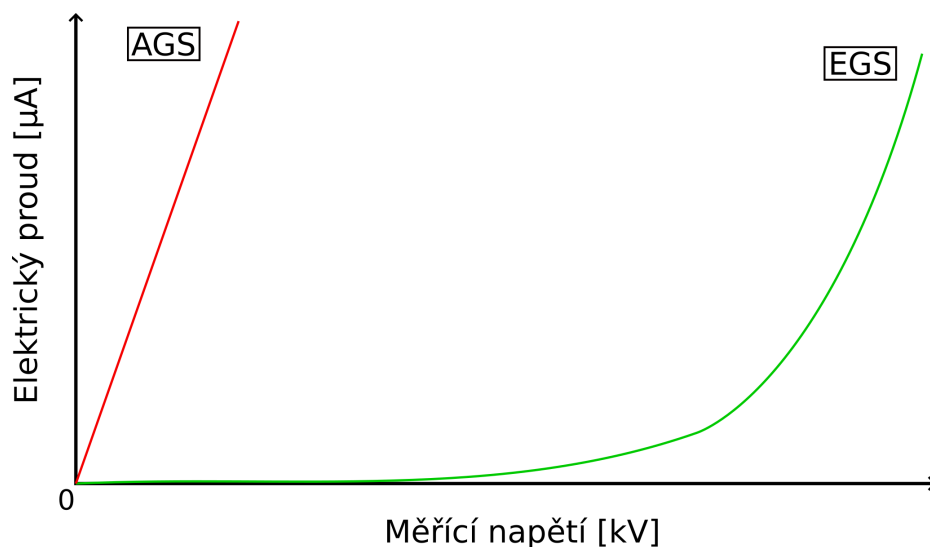
Tabulka 2: Parametry EGS ochran

Výrobce	Označení	Tloušťka [mm]	Pevnost v tahu [N/cm]	Prodloužení [%]	$\rho_p$ [ $\Omega/\square$ ]
KREMPEL	AKASIC 4b	$0,2 \pm 0,02$	$\geq 50$	$\geq 20$	-
ISOVOLTA	EGSB 2709	$0,24 \pm 0,04$	$\geq 80$	$\geq 10$	$\geq 10^{11}$
	EGSB 2969	$0,15 \pm 0,03$	$\geq 40$	$\geq 20$	$\geq 10^{11}$
VonRoll	CoronaShield SC 217.01	$0,22 \pm 0,03$	$\geq 80$	$\geq 12$	-
	CoronaShield SC 217.02	$0,22 \pm 0,03$	$\geq 80$	$\geq 12$	-
	CoronaShield SC 217.31	$0,25 \pm 0,05$	$\geq 80$	$\geq 10$	-
Vidyut	VIDSTRESS 8.300	$0,2 \pm 0,05$	$\geq 60$	$\geq 8$	-
	VIDSTRESS 10.350	$0,25 \pm 0,05$	$\geq 60$	$\geq 8$	-
Chhaperia	C1530-2	$0,2 \pm 0,04$	$\geq 60$	$\geq 10$	$5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^6$
	C1530-2A	$0,2 \pm 0,04$	$\geq 60$	$\geq 10$	$5 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^9$
	C1530-2B	$0,2 \pm 0,05$	$\geq 60$	$\geq 15$	$10^{10} - 10^{12}$

## 7 Návrh měřicí metody

Pro měření rezistivity bude vhodné navrhnout metodu pro měření V-A charakteristiky, ze které rezistivita materiálu vyplývá. V případě EGS ochran se bude jednat o nelineární průběh viz. kapitola 5.3 Vlastnosti EGS ochran. Pro úplnost zde uvádím i metody pro měření kapacity, ztrátového činitele  $\tan \delta$  a relativní permitivity  $\epsilon_r$ , což jsou parametry, které se při diagnostice izolovaného vinutí měří.

Pro základní popis chování protikoronových ochran je nutné změřit V-A charakteristiku z níž lze výpočtem určit hodnotu odporu a následně povrchové rezistivity. Obecný průběh V-A charakteristiky je vidět na obrázku 15. Je patrné, že AGS ochrany vykazují přímou závislost proudu na napětí, což znamená konstantní hodnotu rezistivity, zatímco průběh v případě EGS ochran je na přiloženém napětí závislý značně nelineárně.

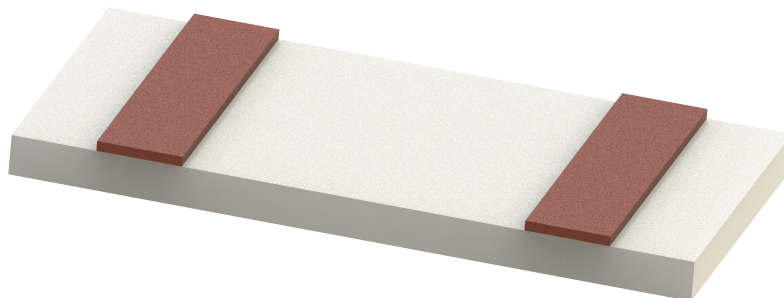


Obrázek 15: Obecný průběh V-A charakteristiky AGS a EGS ochran.

### 7.1 Možnosti měření povrchové rezistivity

Existuje množství způsobů, jak měřit povrchovou rezistivitu materiálů. Nejjednodušší způsob měření je pomocí dvou elektrod přitlačených silou k jeho povrchu. Na elektrody se přivádí napětí a sleduje se povrchový proud měřený ampérmetrem nebo jako úbytek napětí na odporovém normálu zapojeným do série. Většinou se využívá druhá možnost pro výhodné zobrazení na osciloskopu. Pro použitelnost naměřených vý-

sledků musí být dodrženy především rozměry elektrod a vzdáleností, pro které je možné najít příslušné normy. Důležitá je, aby elektrody dobře přiléhaly k materiálu. Používají se proto předem stanovené přitlačné síly. Většinou se během měření zanedbává unikající proud. Je nutné mít však na paměti orientační velikost měřeného odporu. Proud se šíří cestou menšího odporu a může dojít k situaci, že unikající proud má na výslednou hodnotu velký vliv [17], [18], [66], [67]. Pro měření se v technické praxi většinou zavádí pojem čtvercový odpor, což vyplývá z výše zmíněného uspořádání, které je možné vidět na obrázku 16. Platí zde, že vzdálenost elektrod je rovna jejich délce, a to 10 mm.



Obrázek 16: Uspořádání elektrod pro měření povrchové rezistivity.

Dalším možností měření povrchové rezistivity je pomocí sondy s koncentrickými elektrodami [17], [18]. Díky kruhovým elektrodám je možné vytvořit dobrý kontakt mezi elektrodami a měřeným povrchem. Vyjádření rezistivity už zde není tak triviální, nicméně stále se dá snadno vyjádřit na základě vztahu proudové hustoty a intenzity elektrického pole, což je původní Ohmův zákon v integrálním tvaru [18], [68], [69]:

$$J_P = \frac{E}{\rho_P} \quad [A \cdot m^{-2}] \quad (9)$$

Intenzitu elektrického pole pro koncentrické uspořádání elektrod lze vyjádřit takto:

$$E = \frac{\rho_P \cdot I_P}{2\pi \cdot r} \quad [V \cdot m^{-1}] \quad (10)$$

Z intenzity elektrického pole je možné určit napětí mezi elektrodami integrováním intenzity na vzdálenost obou poloměrů:

$$U = \int_{R_1}^{R_2} E dr \quad [V] \quad (11)$$

Po matematické úpravě a vyjádření rezistivity dostaneme vztah:

$$\rho_P = R_P \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} = R_P \cdot K_G \quad [\Omega \cdot m] \quad (12)$$

, kde K označuje vliv uspořádání, často označován jako koeficient geometrie.

Koncentrickou sondu je možné vidět na obrázku 17. Umožňuje měření objemové i povrchové rezistivity vysokým napětím.

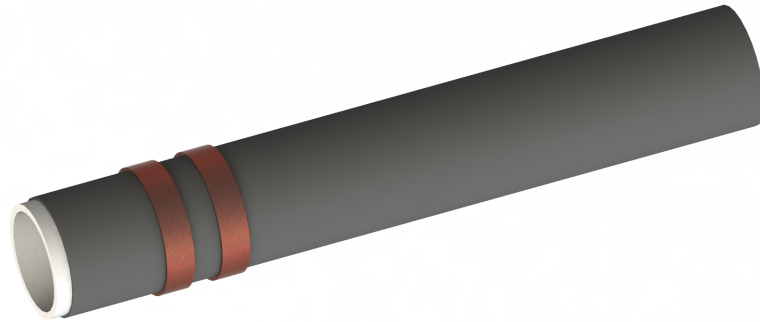


Obrázek 17: Koncentrická sonda PRF-911 od firmy PROSTAT. Převzato z [70].

## 7.2 Měření V-A charakteristiky protikoronových ochran

Ačkoliv u většiny materiálů je možné měřit povrchovou rezistivitu některou z předešlých metod, pro účely měření ochran jsou nevhodné. V praxi používané materiály jsou většinou v podobě pásek, které jsou ovnutím aplikovány na již izolovaná vinutí. Předešlé metody by bylo možné, tedy s určitou přesností, použít pro zjištění vlastností materiálu, ale vzhledem k provedení v podobě pásky je vhodnější měřit v přibližně stejném uspořádání jaké má samotné vinutí. Je tedy nutné navrhnout alternativní postup zjištění povrchové rezistivity a nelineárního průběhu V-A charakteristiky.

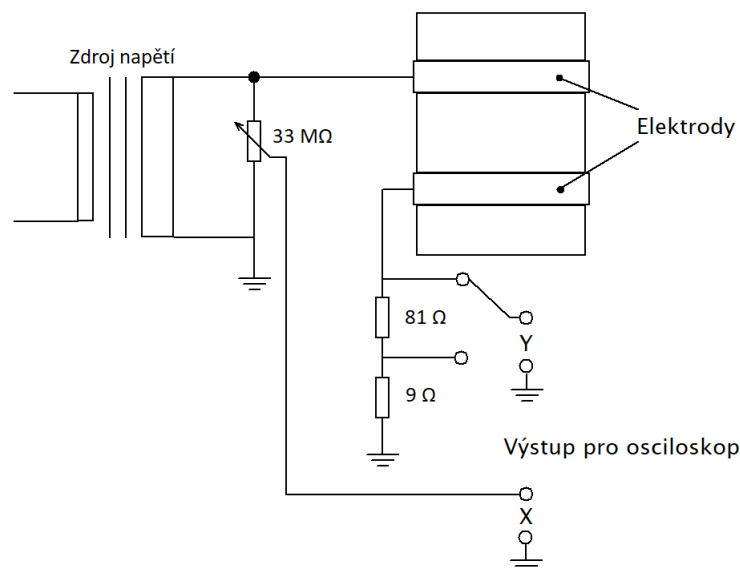
Povrchovou rezistivitu protikoronových ochran lze měřit za pomoci kruhových elektrod [37]. Jako nosná konstrukce pro měření může posloužit sklotextitová nebo i levnější sklolaminátová trubka o průměru 40mm, na kterou bude páska navinuta s polovičním překrytím, jak to doporučuje většina výrobců. Před samotným měřením je vhodné provést úpravu vzorků. Pro zkoumání teplotní odolnosti a ztráty vlastností pásky je dobré porovnávat nový vzorek se vzorkem zestaralým. Je možné tak zjistit vliv skladování na rezistivitu a nelineární vlastnosti pásek. Zároveň je možné predikovat ztrátu vlastností v provozu. Příprava vzorku k měření obnáší navinutí pásky na trubku a následné vytvrzení při teplotě přibližně 120 °C po dobu dvou hodin [71] nebo podle doporučení výrobce, pokud jsou tyto informace k dispozici. Vzorky je možné nechat stárnout uměle, tedy vystavením vyšší teplotě. Na takový přípravek se připevní/přilepí kruhové elektrody o šířce 10 mm tak, aby vytvořily mezery o šířce 10 mm. Toto uspořádání je vhodné pro pozdější přepočítání na čtvercový odpor. Model přípravku pro měření je možné vidět na obrázku 18. Zde popsaná metoda vychází z postupu měření A. Robertse [37].



Obrázek 18: Model přípravku pro měření V-A charakteristiky

Takto připravené vzorky lze měřit podle schématu na obrázku 19. K měření by byl použit zdroj vysokého napětí a potenciometr pro nastavení zkušebního napětí. K měření bych zvolil stejnosměrné hodnoty napětí pro vyšší přesnost, ovšem je vhodné změřit i V-A charakteristiku pro střídavé napětí, aby bylo možné porovnat odchylku obou průběhů a zjistit, jak se EGS ochrana chová při frekvenci, pro kterou je navržena, tedy  $f = 50$  Hz. Zároveň je vhodné provést i měření na skutečných statorových tyčích, kde bych předpokládal menší hodnoty rezistivity způsobené zakřivením na hranách obdélníkového vinutí. Ostré hrany reálného obdélníkového vinutí vytvářejí lokální extrémní intenzity elektrického pole, což se projeví snížením hodnoty odporu EGS ochrany. Tuto obavu potvrzuje i výsledek jiné práce [40]. Pro snímání napětí k následnému zobrazení na osciloskopu lze použít sérii odporů  $R_1 = 81 \Omega$  a  $R_2 = 9 \Omega$ . Tím bude zajištěna možnost řádové změny rozsahu. Hodnoty odporů mohou být malé, protože předpokládané proudy budou v řádech  $\mu\text{A}$  [71].





Obrázek 19: Schéma zapojení pro měření na izolované trubce.

V případě měření laků bude vhodné nanést rovnoměrnou vrstvu, počkat alespoň hodinu na vytvrdnutí laku a poté znovu stejným postupem nanést vrstvu další. Do měření bude zaneseno mírné zkreslení vlivem ručního nátěru, který nebude zcela rovnoměrný. Ideálním řešením by bylo lakování provádět ponořením do lázně a následné odkapaní, popř. srovnání vrstvy laku na hrotovém soustruhu, ale nepředpokládám, že by drobné odchylky ve vrstvě laku byly natolik významné. Po aplikaci minimálně čtyř vrstev bude vhodné nechat lak řádně vytvrdnout, a to alespoň po dobu 24 hodin [71].

Měření je vhodné provádět od nejvyšších hodnot napětí, a to kvůli vlivu teploty a ustálení procházejícího proudu. Maximální přiložené napětí by mělo být navrženo podle měřených parametrů pásek v řádu jednotek až desítek kV, případně podle možností napěťového zdroje. Podle Robertse [37] je vhodné použít napětí až 10 kV pro střídavé měření a až 15 kV pro stejnosměrné, přičemž zdroj by měl být schopen při tomto napětí dodávat proud alespoň 1 mA. Proudová rozlišitelnost by měla být alespoň 1  $\mu\text{A}$ , což zajistí napěťový dělič složený z odporů  $R_1$  a  $R_2$ . Podle maximálního napětí lze poté stanovit i vhodný napěťový krok, který by měl být rovnoměrný. Průběhy V-A charakteristik se poté aproximují na základě naměřených bodů. Napětí je vhodné nechat připojené na elektrodách po dobu několika minut pro ustálení procházejícího proudu před odečtením hodnoty.

Naměřené hodnoty lze přepočítat na hodnotu čtvercového odporu. Je nutné podělit naměřenou hodnotu proudu obvodem měřeného vzorku vinutí, čímž dostaneme hodnotu proudu na plochu  $1 \text{ cm}^2$  [71]. Hodnotu odporu lze poté dopočítat přes Ohmův vztah:

$$R_P = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad (13)$$

Z hodnoty odporu lze povrchovou rezistivitu určit takto:

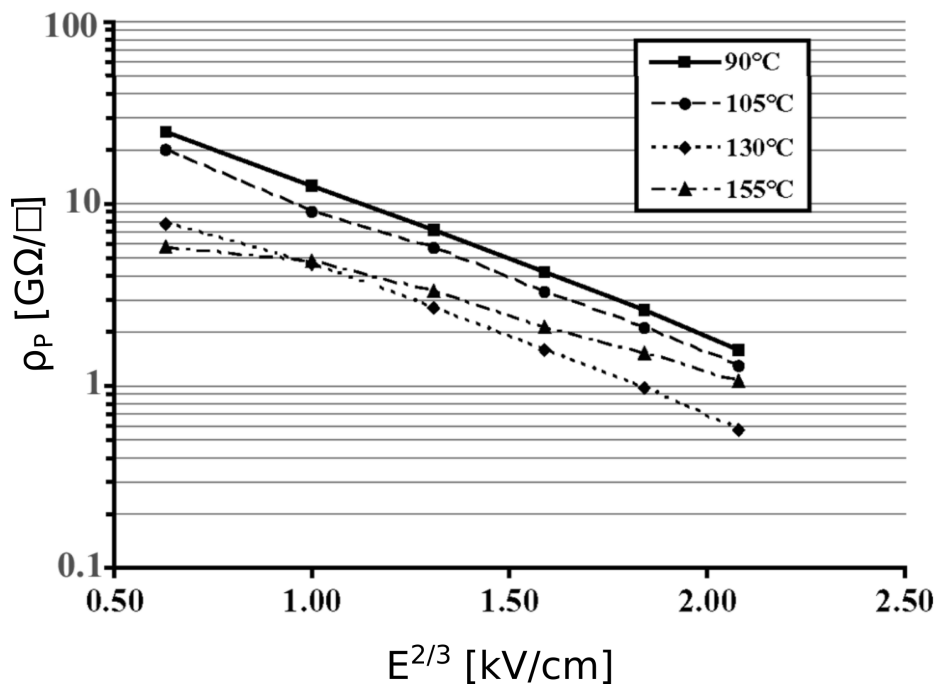
$$\rho_P = R_P \cdot \frac{d}{l} \quad [\Omega] \quad (14)$$

U protikoronových ochran lze s využitím V-A charakteristiky porovnat i různě staré vzorky. Pro účely těchto měření se vzorky nechávají stárnout při vyšší teplotě. Měření je vhodné provádět podle normy [60], nicméně je třeba dbát opatrnosti, aby vzorky tepelné namáhání vydržely (viz. kapitola 5.3 str. 38).

Podle [58] je vhodné výsledky V-A charakteristiky upravit do podoby konstant, které poté charakterizují rezistivitu dané pásky podle vztahu:

$$\rho_P = K \cdot e^{(n \cdot E^{2/3})} \quad [\Omega] \quad (15)$$

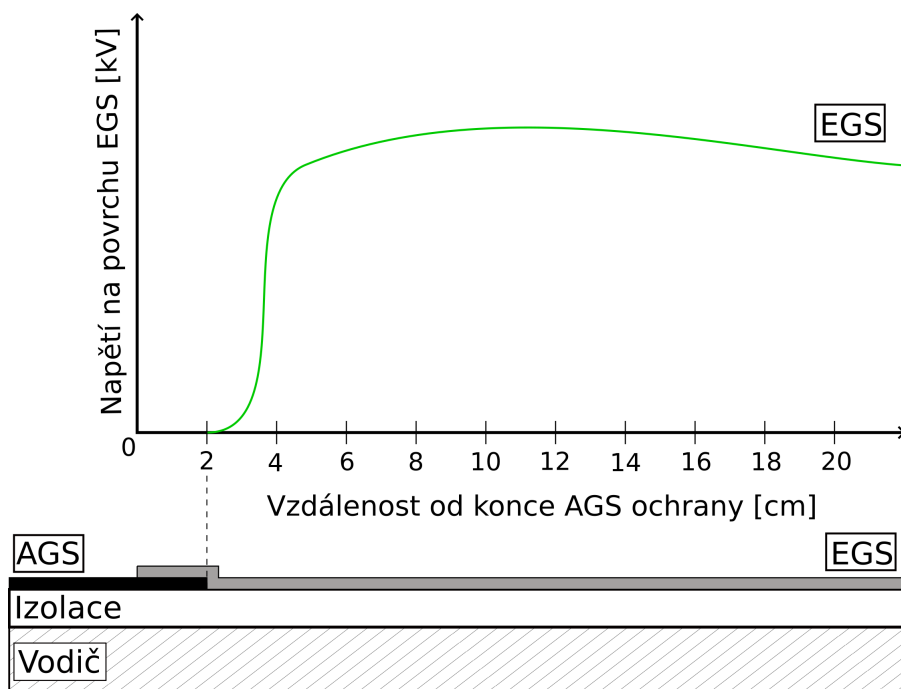
Po zlogaritmování hodnot rezistivity a vnesení závislosti na  $E^{2/3}$  by měl výsledný průběh tvořit přímku. Při použití této metody vyhodnocení naměřených V-A charakteristik lze snadno určit povrchovou rezistivitu jako funkci doby stárnutí vzorku. Pro dosažení vyšší vypovídací schopnosti je vhodné měření několikrát opakovat a provést průměr z naměřených hodnot. Zlogaritmovaný průběh je zobrazen na obrázku 20. Z naměřených hodnot v této charakteristice vyplývá, že EGS pásky vykazují nižší rezistivitu při nárůstu teploty.



Obrázek 20: Závislost rezistivity na intenzitě el. pole při různých hodnotách teploty. Převzato z [58].

### Měření rozložení potenciálu na vinutí

Účelem AGS ochrany je udržet rozdíl potenciálů v drážkové části na nule, zatímco EGS ochrana by měla eliminovat prudký rozdíl potenciálů na výstupu z drážky. Pro ověření těchto vlastností bych provedl měření rozložení potenciálu podél vzorku statorové tyče. Vzorek může mít podobu ocelového materiálu na němž je aplikovaná základní izolace včetně AGS a EGS ochrany, přičemž většina výrobců doporučuje každou z pásek aplikovat s polovičním překrytím. Vzájemné překrytí AGS a EGS by mělo být přibližně 2 cm. Nákres překrytí obou pásek a rozložení napětí je možné vidět na obrázku 21. AGS ochrana se na točivých strojích nechává mírně přesahovat z magnetického jádra, kvůli potlačení koronových výbojů na jejím konci. EGS ochrana tento konec překrývá, což je vhodné provést i na vzorku [72]. Ochrany by měly být překryté v řádu jednotek cm.



Obrázek 21: Rozložení napětí podél izolovaného vinutí s aplikovanou AGS a EGS ochranou.

Samotné měření může být provedeno zavěšením vzorku společně s přírodními elektrodami. Jedna elektroda (zemnicí) se umístí na střed AGS ochrany vzorku, jejím úkolem je simulovat spojení se zemí železného jádra stroje. Druhý konec (živý) se připojí na vinutí. Třetí elektroda (měřicí) se postupně posouvá směrem ke konci vinutí a snímá hodnoty napětí podél vzorku vinutí. Takto je proměřena celá závislost napětí na vzdálenosti. Výsledný graf by měl vykazovat nulové napětí v oblasti AGS ochrany, kde je vzorek uzemněn, zatímco na konci AGS ochrany by měl být při přechodu na EGS ochranu patrný výrazný napěťový skok. Předpokládaný průběh můžeme vidět na obrázku 21, přičemž hodnota napětí v oblasti AGS ochrany by měla být vlivem spojení s potenciálem země nulová.

Je vhodné odměřit více vzorků vinutí a porovnat vlastnosti jednotlivých ochran. Zajímá nás především schopnost rozložení elektrického potenciálu omezením velkého napěťového skoku v oblasti přechodu na EGS ochranu.

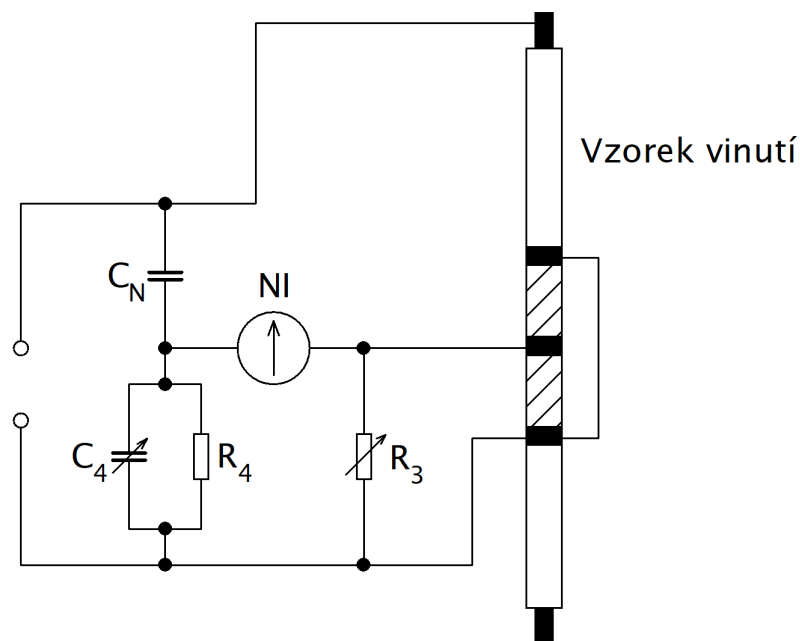
### 7.3 Další možnosti měření

Mezi další metody diagnostiky protikoronových ochran patří zejména měření ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$ , kapacity a permitivity. Metodami je opět možné zkoumat zestárlé vzorky pro možnost porovnání vlastností s novými. Pro analýzu existuje celá řada měřících přístrojů, ať už se jedná o speciální analyzátory a multifunkční zařízení nebo konvenční laboratorní metody.

#### Scheringův můstek

Můstková měření patří obecně mezi velmi přesné metody. V rámci protikoronových ochran se Scheringovým můstkem měří ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$  a kapacita. Díky vztahu pro výpočet kapacity je možné dopočítat také relativní permitivitu materiálu [73]. Schéma zapojení je možné vidět na obrázku 15. Měření probíhá při střídavém napětí o síťovém kmitočtu  $f = 50 \text{ Hz}$  na předem zhotoveném vzorku statorové tyče. Vzhledem k objemu vysokonapěťových vinutí je většinou nutné použít zmenšený vzorek vinutí. Jedná se o vodivý materiál důkladně omotaný izolační páskou, na kterou je poté aplikovaná protikoronová ochrana. Tento proces je lepší provést strojově, aby se zamezilo špatnému překrytí nebo nedokonalému přilnutí pásky. Vzorek se poté musí vytvrdit v lisu za zvýšené teploty. Lis se nejdříve předehřívá při teplotách okolo  $100^\circ\text{C}$ , z důvodu odstranění případné vlhkosti. K samotnému vytvrzení dochází při teplotách okolo  $165^\circ\text{C}$ . Vzorek se při těchto teplotách nechává hodinu a více, než se nechá vinutí pomalu vychladnout. Aby se zabránilo přilepení vinutí k lisu, používají se separační materiály ve formě fólií [40]. Pokud je to možné je dobré řídit se doporučením výrobce.

Maximální zkušební napětí a napěťový krok se pro měření určí na základě měřené pásky. Hodnoty mohou být i v řádech desítek kV. Vinutí používaná ve strojích jsou navíc vždy dimenzována na vyšší hodnoty než jmenovité napětí. Totéž platí pro ochrany proti výbojové činnosti, které musejí vydržet typové a kusové zkoušky nebo přepětí za provozu. Při krátkodobém přetížení musí vydržet izolační systémy vinutí i několikanásobně vyšší napětí [4].



Obrázek 22: Schéma zapojení pro měření na Scheringově můstku. Převzato a upraveno z [40].

Vztah pro výpočet relativní permitivity měřené pásky:

$$\varepsilon_r = \frac{C \cdot d}{\varepsilon_0 \cdot S} \quad [-] \quad (16)$$

### Dielektrická spektroskopie

Zhruba od 80. let 20. století jsou k dispozici na trhu přístroje pro měření elektromagnetických vlastností materiálů, zejména pak zařízení na měření permitivity, permeability a vodivosti nebo vnitřního elektrického odporu. Přístroje pro dielektrickou spektroskopii jsou určeny pro měření těchto dielektrických vlastností, jenž jsou dány molekulární strukturou materiálu [74]. Změny struktury nastávají v důsledku mnoha příčin, např. vlivem stárnutí nebo teploty [75]. Testování materiálů může probíhat

pomocí destruktivních i nedestruktivních zkoušek. Destruktivní zkoušky mají obecně větší vypovídací schopnost, ale jsou náročné na spotřebu vzorků. Proto se dává často přednost metodám jako je dielektrická spektroskopie, což je metoda nedestruktivní, při které se materiál zkoumá makroskopickým přístupem.

Princip zařízení spočívá ve sledování odezvy polarizace částic při změnách frekvence elektrického pole. Uplatnění nachází v aplikacích, kde dochází ke změnám na úrovni dipólů. Můžeme např. sledovat změny permitivity stárnocích materiálů nebo jejich dielektrické ztráty.

U měření koronových ochran točivých strojů dielektrickou spektroskopií budeme zkoumat především změny vodivosti při různých teplotách. Bylo prokázáno, že EGS pásy na bázi SiC mohou vykazovat značnou odezvu na změny v teplotě [40], [48]. S teplotou se mění také kapacita a velikost proudu tekoucího ochranou. V důsledku těchto změn může dojít k nevhodnému rozložení elektrického pole podél povrchu izolovaného vinutí.

Pro měření je nutné zhotovit malý vzorek EGS pásy, vzhledem k polovičnímu překrytí při ovinu statorové tyče bude vhodné použít dvě vrstvy materiálu. Vzorek by měl být vytvrzen podle doporučení výrobce, např. pro produkty od firmy Von Roll jde o vytvrzení po dobu 2 hodin při teplotě  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Výrobce doporučení většinou uvádí již přímo v datasheetu daného produktu. Teplota při měření by měla být od pokojové až po hodnoty na  $155\text{ }^{\circ}\text{C}$  a výš, což znamená přetížení pásy. Je možné tak sledovat, při jakých hodnotách teploty začne páska vykazovat strmější nárůst vodivosti. V důsledku dielektrických změn v materiálu se bude měnit také kapacita, ovšem pravděpodobně v mnohem menší míře než vodivost [40]. Materiál může být testován při různých frekvencích, nicméně důležitá je především síťová frekvence, při které je páska reálně používána.

## 8 Závěr

Nezbytnou součástí každého vysokonapěťového zařízení je správně navržený a funkční izolační systém. V případě vysokonapěťových vinutí turbogenerátorů dochází velmi často k výbojové činnosti, která má charakter elektrické korony. Aby byla zajištěna správná funkce izolace v přítomnosti vysoké intenzity elektrického pole, musí být izolované vinutí stroje vybaveno protikoronovými ochranami. V opačném případě by docházelo k obrovskému namáhání izolace a stroj by nemohl být provozován.

V práci je uvedeno rozdělení konvenčních ochran ve formě pásek a laků, a to jak na ochranu proti výbojům v drážkové části stroje, tak na výstupu z magnetického jádra, kde vlivem tangenciální složky vznikají klouzavé výboje. Z prozkoumaných materiálů vyplývá, že v dnešní době nejsou ochranné prostředky optimální a je třeba i nadále vyvíjet nové materiály, které nabídnou zejména lepší možnosti z hlediska rozložení napětí podél vinutí. Alternativním řešením stále zůstávají kapacitní metody potlačení výbojové činnosti, ovšem jak práce uvádí v kapitole 5.2, logickým trendem je rozměry stroje minimalizovat, což je podmínka, kterou kapacitní metody nesplňují. Aktuálně se zkoumají zejména technologie mikrovaristorů, což se v mnoha studiích ukazuje jako efektivnější řešení oproti ochranám založených na karbidu křemíku SiC. Oxid zinečnatý ZnO nabízí lepší možnosti z hlediska nastavení parametrů protikoronové ochrany a usnadňuje výrobu, která probíhá metodou sintrování. Technologii mikrovaristorů na základě získaných odborných článků považuji za vhodnou alternativu ke karbidu křemíku, který se podle několika zdrojů, jenž se zabývaly jejich měřením, choval nestabilně při vyšších teplotách [40], [48]. Změna V-A charakteristiky při změně teploty je pro tyto materiály bohužel typická, zejména v této aplikaci nežádoucí a představuje stálý problém. Ve srovnání s kompozitními materiály na bázi SiC vykazuje technologie mikrovaristorů výrazně lepší vlastnosti z hlediska koeficientu nelinearity, což dokládají provedená měření [47], [52]. Jak potvrzují i jiné odborné články [47], [51] [53], [54], materiál má do budoucna velký potenciál nahradit aktuálně používané kompozity a najít uplatnění nejen v oblasti vysokonapěťových točivých strojů, ale také u průchodek, izolátorů a dalších izolačních systémů vysokého napětí.



V rámci zadání práce byla navržena metoda pro měření povrchové rezistivity na sklolaminátové nebo sklotextitové trubce. Tento postup umožňuje změřit V-A charakteristiku ochranných pásek a laků s patřičným překrytím a dokáže simulovat tvar vinutí. Měření je možné provést i na vzorku vinutí nebo jeho imitaci v podobě jiného vodivého materiálu. Při této volbě se pravděpodobně projeví zakřivení způsobené obdélníkovým profilem, který se u vysokonapěťových turbogenerátoru zpravidla používá. Hrany s malým poloměrem zakřivení způsobí lokální nárůsty intenzity elektrického pole, což ovlivní rezistivitu protikoronové ochrany. Předpokládám na základě měření v práci [40], že hodnoty rezistivity by se v takovém případě snížily.

Ačkoliv jsou dnešní ochrany na bázi SiC velkým zlepšením oproti dříve používanému azbestu, grafitu, či kovovým nástřikům v drážkové části, existují stále zřejmé nedostatky v řešení otázky výbojové činnosti a ochrany strojů. Vzhledem k faktu, že izolační systém je životně důležitou částí nejen točivých strojů a přímo ovlivňuje jejich životnost, je nutné se protikoronovým ochranám věnovat i v budoucnu, a to především u vysokonapěťových energetických zařízení, jenž vyžadují dlouhou životnost a nepřetržitý provoz.

## Reference

- [1] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 2*. Academia, Praha, 1982. ISBN 21-055-82
- [2] BARTOŠ, V., ČERVENÝ, J., HRUŠKA, J., KOTLANOVÁ, A., SKALA, B. *Elektrické stroje*. Plzeň : Západočeská univerzita , 2006, 139 s. ISBN: 80-7043-444-9
- [3] PETROVIČ KOPYLOV, Igor, et al. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1988. 688 s.
- [4] STONE, Greg C. *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, c2004. ISBN isbn0-471-44506-1.
- [5] SEDLAZECK, K., C. RICHTER, S. STRACK, S. LINDHOLM, J. PIPKIN, F. FU, B. HUMPHRIES a L. MONTGOMERY. *Type testing a 2000 MW turbogenerator*. In: 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference [online]. IEEE, 2009, 2009, s. 465-470 [cit. 2018-08-13]. DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075247. ISBN 978-1-4244-4251-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5075247/>
- [6] VEVERKA, Antonín *Technika vysokého napětí* Praha: SNTL -Nakladatelství technické literatury, 1978. 04-512-78.
- [7] MENTLÍK, Václav *Dielektrické prvky a systémy* 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [8] SEQUENZ, Heinrich, et al. *Technologie vinutí elektrických strojů točivých*. 1. vydání. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1980, 312s
- [9] KUMADA, A., D. ONISHI, Y. MORITA, et al. *Surface corona inception on stress grading system in end-turn regions of rotating machines*. In: 2017 INSUCON - 13th International Electrical Insulation Conference (INSUCON) [online]. IEEE, 2017, 2017, s. 1-6 [cit. 2018-05-13]. DOI: 10.23919/INSUCON.2017.8097182. ISBN 978-1-9998-1569-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8097182/>

- [10] TOMÁŠ, Martin *Dielektrika: Fyzika normálních dielektrik* Praktická aplikace vlastností dielektrik.[online]. Plzeň: Martin Tomáš, c 2009 [cit. 2017-10-04]. Dostupné z: <http://dielektrika.kvalitne.cz/praktaplik.html>
- [11] RAJU, Gorur G. *Dielectrics in electric fields* New York: Marcel Dekker, c 2003. ISBN 0824708644.
- [12] JÁNEŠ, Vlastimil *Elektrická vodivost v pevných látkách, kapalinách, plynech a ve vakuu* ELT1 Přednáška č. 5. [online]. Praha: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE - FAKULTA DOPRAVNÍ, 2013 [cit. 2017-10-11]. Dostupné z: <https://www.fd.cvut.cz/personal/janes/Elektrotechnika1/ELT1.html>
- [13] SEMAT, Henry, Robert KATZ. *Physics: Chapter 28: Electrical Conduction in Liquids and Solids*. [online]. New York: Rinehart, 1958 [cit. 2017-10-11]. Dostupné z: <http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1163&context=physicskatz>
- [14] KOBLÍŽEK, Vilém. *Dielektrické vlastnosti tuhých látek*. [online]. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2005 [cit. 2017-10-11]. Dostupné z: [http://martin.feld.cvut.cz/koblizek/X13MTV-lab\\_soubory/uloha\\_4.pdf](http://martin.feld.cvut.cz/koblizek/X13MTV-lab_soubory/uloha_4.pdf)
- [15] ALLISON, J. A. *Understanding the need for anti-corona materials in high voltage rotating machines*. In: Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No.00CH36347) [online]. IEEE, 2000, s. 860-863 [cit. 2018-08-31]. DOI: 10.1109/ICPADM.2000.876364. ISBN 0-7803-5459-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/876364/>
- [16] BĚHÁLEK, L. *Polymery*. Liberec: Code Creator, s.r.o.; distribuce publi.cz, 2014 [cit. 2018-04-02]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/14.html>
- [17] A. MARYNIAK, William, Toshio UEHARA a Maciej A. NORAS. *Surface Resistivity and Surface Resistance Measurements: Using a Concentric Ring Probe Technique* [online]. In: . New York: TREK, 2013, s. 4 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.trekinc.com/pdf/1005ResistivityResistance.pdf>

- [18] ZHENYU YANG a QIAN WANG. *A simple approach to measure the surface resistivity of insulating materials*. In: IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society [online]. IEEE, 2011, 2011, s. 2088-2093 [cit. 2018-04-22]. DOI: 10.1109/IECON.2011.6119630. ISBN 978-1-61284-972-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6119630/>
- [19] VITNER, P. *Zkoušení silových kabelů střídavým napětím o nízké frekvenci se sinusovým průběhem – zkušenosti z praxe*. vydáno v časopise Elektro, 1999, č. 12, s. 18-20.
- [20] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. *400.2-2013 - IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)(less than 1 Hz)*New York, 2013, [cit. 2018-04-26]. ISBN: 978-0-7381-8801-0
- [21] MENTLÍK, V., PIHERA, J., POLANSKÝ, R., PROSR, P., TRNKA, P. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [22] ČIČMANEC, P. *Všeobecná fyzika 2: Elektrina a magnetismus* 1. vydání. Bratislava: ALFA, 1980.
- [23] SEDLÁK, B., Štoll, I. *Elektrina a magnetismus*. UK Praha, Academia Praha 1992.
- [24] FUKA, J., HAVELKA, B. *Elektrina a magnetismus*. SPN Praha 1965.
- [25] ARTBAUER, J. *Izolanty a izolácie* nakladatelství ALFA, Bratislava, 1969.
- [26] BURANT, Jiří *Blesk a přepětí, Systémová řešení ochran* Praha: Vydavatelství FCC Public s.r.o., 2006, ISBN 80-86534-10-3
- [27] BENETKA, Tomáš *Ochrana sítí NN, VN, VVN proti přepětí* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/10079/1/DP\\_Benetka\\_Tomas.pdf](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/10079/1/DP_Benetka_Tomas.pdf) Diplomová práce. ZČU Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Karel Noháč.
- [28] LAURENC, J. *Částečné výboje [přednáška]* Západočeská univerzita, fakulta elektrotechnická. Plzeň, zimní semestr 2017/2018.

- [29] ZHANG, Cheng, Tao SHAO, Jiayu XU, Hao MA, Liwei DUAN, Chengyan REN a Ping YAN. *A Gliding Discharge in Open Air Sustained by High-Voltage Resonant AC Power Supply*. IEEE Transactions on Plasma Science [online]. 2012, 40(11), 2843-2849 [cit. 2018-04-24]. DOI: 10.1109/TPS.2012.2208470. ISSN 0093-3813. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6275500/>
- [30] GROSS, D. *Měření částečných výbojů[přednáška]* Západočeská univerzita, fakulta elektrotechnická. Plzeň, 14.11.2017.
- [31] LEVESQUE, M., C. HUDON a E. DAVID. *Insulation degradation analysis of stator bars subjected to slot partial discharges*. In: 2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC) [online]. IEEE, 2013, 2013, s. 479-483 [cit. 2018-04-03]. DOI: 10.1109/EIC.2013.6554293. ISBN 978-1-4673-4744-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6554293>
- [32] MOORE, William G. a Aleksandr KHAZANOV. *Insulation degradation in generator stator bars due to spark erosion and partial discharge damage*. In: 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation [online]. IEEE, 2010, 2010, s. 1-5 [cit. 2018-04-03]. DOI: 10.1109/ELINSL.2010.5549794. ISBN 978-1-4244-6298-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5549794/>
- [33] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Praha: Academia, 2005. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-1358-x.
- [34] HILL, C. F. *Abridgment of improvements in insulation for high-voltage A-C generators*. Journal of the A.I.E.E [online]. 1928, 47(7), 492-496 [cit. 2018-05-15]. DOI: 10.1109/JAIEE.1928.6536908. ISSN 0095-9804. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6536908/>
- [35] MALAMUD, R. a I. CHEREMISOV. *Anti-corona protection of the high voltage stator windings and semi-conductive materials for its realization*. In: Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.00CH37075) [online]. IEEE, 2000, s. 32-35 [cit. 2018-05-15]. DOI: 10.1109/ELINSL.2000.845414. ISBN 0-7803-5931-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/845414/>

- [36] CONLEY, D.J. a N. FROST. *Fundamentals of semi-conductive systems for high voltage stress grading*. In: Proceedings Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2005 [online]. IEEE, 2005, s. 89-92 [cit. 2018-05-15]. DOI: 10.1109/EEIC.2005.1566265. ISBN 0-7803-9145-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1566265/>
- [37] ROBERTS, A. *Stress grading for high voltage motor and generator coils*. IEEE Electrical Insulation Magazine [online]. 1995, 11(4), 26-31 [cit. 2018-05-15]. DOI: 10.1109/57.400761. ISSN 0883-7554. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/400761/>
- [38] BRÜTSCH, Rudolf a Thomas HILLMER. *Corona Protection in Rotating High Voltage Machines*. In: [online]. 2006. vyd. Berlin [cit. 2018-05-14]. Dostupné z:[http://www.vonroll.com/media/files/f\\_e\\_publikationen/CPIRHVM.pdf](http://www.vonroll.com/media/files/f_e_publikationen/CPIRHVM.pdf)
- [39] CHRISTEN, Thomas, Lise DONZEL a Felix GREUTER. *Nonlinear resistive electric field grading part 1: Theory and simulation*. IEEE Electrical Insulation Magazine [online]. 2010, 26(6), 47-59 [cit. 2018-04-14]. DOI: 10.1109/MEI.2010.5599979. ISSN 0883-7554. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5599979/>
- [40] KRPAL, O. *Nové přístupy k optimalizaci polovodiivých ochran*. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologie a měření.
- [41] KUCERA, J., HAPL, J. *Vinutí elektrických strojů točivých*. Praha: Československé akad. věd, 1959. 899 s.
- [42] YOON, S. P. *SiC Materials and Devices* Academic Press, London 1998.
- [43] TRUONG, D. H. *Moderní polovodičové součástky ve výkonové elektrotechnice*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologie a měření.

- [44] CUKR, M. *TECHNOLOGIE MBE - EPITAXE Z MOLEKULÁRNÍCH SVAZKŮ V POLOVODIČOVÉM VÝZKUMU*. [online] 2008 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: [http://csacg.fzu.cz/func/viewpdf.php?file=2008\\_34Cukr.pdf](http://csacg.fzu.cz/func/viewpdf.php?file=2008_34Cukr.pdf)
- [45] SADDOW, S. E., AGARWAL, A. *Advances in Silicon Carbide Processing and Applications* Norwood 2004, Artech House.
- [46] GARTNER, J., E. GOCKENBACH a H. BORSI. *Field-grading with semi-conducting materials based on silicon carbide (SiC)*. In: Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.98CH36239) [online]. IEEE, 1998, s. 202-205 [cit. 2018-04-15]. DOI: 10.1109/ELINSL.1998.704697. ISBN 0-7803-4927-X. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/704697/>
- [47] DONZEL, L, F GREUTER a T CHRISTEN. *Nonlinear resistive electric field grading Part 2: Materials and applications*. IEEE Electrical Insulation Magazine [online]. 2011, 27(2), 18-29 [cit. 2018-04-15]. DOI: 10.1109/MEI.2011.5739419. ISSN 0883-7554. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5739419/>
- [48] DU, B. X., H. C. LIANG, J. LI a C. ZHANG. *Temperature dependent surface potential decay and flashover characteristics of epoxy/SiC composites*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation [online]. 2018, 25(2), 631-638 [cit. 2018-04-24]. DOI: 10.1109/TDEI.2017.006872. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8341657/>
- [49] MÅRTENSSON, E., U. GÄFVERT a C. ÖNNEBY. *Alternate current characteristics of SiC powders*. Journal of Applied Physics [online]. 2001, 90(6), 2870-2878 [cit. 2018-04-26]. DOI: 10.1063/1.1392964. ISSN 0021-8979. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1392964>

- [50] MEROUCHI, A., E. DAVID, F. BAUDOIN, D. MARY a I. FOFANA. *Optimization of the electrical properties of epoxy-SiC composites for stress-grading application*. In: 2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP) [online]. IEEE, 2015, 2015, s. 713-716 [cit. 2018-05-02]. DOI: 10.1109/CEIDP.2015.7352140. ISBN 978-1-4673-7496-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7352140/>
- [51] YANG, Xiao, Pengfei MENG, Xiaolei ZHAO, Qi LI, Jun HU a Jinliang HE. *How nonlinear V-I characteristics of single ZnO microvaristor influences the performance of its silicone rubber composite*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation [online]. 2018, 25(2), 623-630 [cit. 2018-05-01]. DOI: 10.1109/TDEI.2018.006858. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8341656/>
- [52] GREIJER, H., M. PRADHAN a G. ERIKSSON. *On the estimation of AC behavior of field grading composites*. In: 2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP) [online]. IEEE, 2015, 2015, s. 67-71 [cit. 2018-05-01]. DOI: 10.1109/CEIDP.2015.7352127. ISBN 978-1-4673-7496-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7352127/>
- [53] MATSUZAKI, Hidehito, Toshiyuki NAKANO, Hideyasu ANDO a Masafumi TAKEI. *Electrical properties and inner structures of composite material containing microvaristor and semiconductive ZnO*. In: 2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP) [online]. IEEE, 2014, 2014, s. 522-525 [cit. 2018-05-01]. DOI: 10.1109/CEIDP.2014.6995851. ISBN 978-1-4799-7525-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6995851/>
- [54] MATSUZAKI, Hidehito, Toshiyuki NAKANO, Tetsushi OKAMOTO, Hideyasu ANDO, Masafumi TAKEI a Motoharu SHIIKI. *Electrical properties of composite material containing microvaristor and tetrapod ZnO*. In: 2016 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC) [online]. IEEE, 2016, 2016, s. 619-622 [cit. 2018-05-01]. DOI: 10.1109/EIC.2016.7548678. ISBN 978-1-4673-8706-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7548678/>



- [55] AHMAD, H., S. ROBSON, M. ALBANO a A. HADDAD. *Characteristics of ZnO microvaristors-loaded grading polymeric materials*. In: 2017 INSUCON - 13th International Electrical Insulation Conference (INSUCON) [online]. IEEE, 2017, 2017, s. 1-6 [cit. 2018-05-01]. DOI: 10.23919/INSUCON.2017.8097175. ISBN 978-1-9998-1569-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8097175/>
- [56] PRETL, Silvan, Ales HAMACEK, Jan REBOUN, Jiri CENGERY, Tomas DZUGAN a Michael KROUPA. *Electrical characterization of PE-DOT: PSS*. In: 3rd Electronics System Integration Technology Conference ESTC [online]. IEEE, 2010, 2010, s. 1-4 [cit. 2018-05-03]. DOI: 10.1109/ESTC.2010.5642839. ISBN 978-1-4244-8553-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5642839/>
- [57] ODHIAMBO, Sheilla, Carla HERTLEER, Lieva VAN LANGENHOVE a Gilbert DE MEY. *Comparison of Commercial Brands of PE-DOT:PSS in Electric "Capattery" Integrated in Textile Structure*. MIXDES 2013, 20th International Conference. 2013, str. 389-392. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6613380>.
- [58] WHEELER, J.C.G., A.M. GULLY, A.E. BAKER a F.A. PERROT. *Thermal performance of stress grading systems for converter-fed motors*. IEEE Electrical Insulation Magazine [online]. 2007, 23(2), 5-11 [cit. 2018-08-01]. DOI: 10.1109/MEI.2007.357804. ISSN 0883-7554. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4197530/>
- [59] ČSN EN 60085 ed.2. *Elektrické izolace – Tepelné hodnocení a značení*. Praha: ČNI, 2008
- [60] ČSN EN 60216-1 ed.2. *Elektroizolační materiály – Vlastnosti tepelné odolnosti – Část 1: Proces stárnutí a vyhodnocení výsledků zkoušky*. Praha: ČNI, 2008
- [61] KREMPEL GmbH. *KREMPEL GROUP* [online]. Vaihingen, 2018 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: [https://www.krempe-group.com/en/download/download-center/?tx\\_e dxdownload\\_pi1](https://www.krempe-group.com/en/download/download-center/?tx_e dxdownload_pi1)

- [62] ISOVOLTA AG. *ISOVOLTA GROUP* [online]. *Wiener Neudorf*, 2018 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: [http://www.isovolta.com/high-voltage\\_en.php?art=High+Voltage&einsatz=Conductive+and+Semi-Conductive+Materials](http://www.isovolta.com/high-voltage_en.php?art=High+Voltage&einsatz=Conductive+and+Semi-Conductive+Materials)
- [63] Von Roll AG. *Von Roll* [online]. *Wädenswil, Switzerland*, 2018 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.vonroll.com/en/products/corona-protection/?id=54d521c0>
- [64] Vidyut. *Vidyut Impex* [online]. *Kolkata, India*, 2018 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.vidyutimpex.com/pdf/new/Semi%20Conductive%20Tape.pdf>
- [65] Vidyut. *Vidyut Impex* [online]. *Kolkata, India*, 2018 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.vidyutimpex.com/pdf/new/Anticor%20Conductive%20Tapes.pdf>
- [66] SALTHOUSE, E.C. a D.S. MCILHAGGER. *The measurement of surface resistivity*. *Proceedings of the IEE Part A: Power Engineering* [online]. 1962, 109(3S), 41- [cit. 2018-04-22]. DOI: 10.1049/pi-a.1962.0007. ISSN 03698882. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5242635/>
- [67] HANNA, R., O. LESAIN, O. GALLOT-LAVALLEE a L. ZAVATTONI. *Study of surface resistivity of an epoxy/gas interface versus electric field and relative humidity*. In: 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD) [online]. IEEE, 2016, 2016, s. 380-383 [cit. 2018-04-22]. DOI: 10.1109/ICD.2016.7547623. ISBN 978-1-5090-2804-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7547623/>
- [68] HAŇKA, L. *Teorie elektromagnetického pole* SNTL/ALFA, Praha 1982, 219 str.
- [69] JAVORSKÝ, L., BOBEK, A., MUSIL, R. *Základy elektrotechniky pro střední průmyslové školy elektrotechnické*. 7., nezměněné vyd. Praha : SNTL. 1981. 390 s. ISBN nemá.
- [70] *Concentric Ring Set PRF-911*. [online]. 2018 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <http://www.prostatcorp.com/concentric-ring-set>

- [71] KRPAL, O., MRÁZ, P. *V-A Characteristic Measuring of Stress Grading Tapes in the End-winding of Synchronous Generators*. [online] 2014 [cit. 2018-05-03]. Procedia Engineering, Volume 69, Pages 1523-1528, ISSN 1877-7058. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814003968>
- [72] WEI, M., GROSSMAN, S., SPECK, J. *Designing of End-winding Corona Protection of Generators by Help of Simulation*. [online]. 2012 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <http://www.prostatcorp.com/concentric-ring-set>
- [73] *Elektrotechnická měření*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-022-9.
- [74] ULRYCH, J. *Dielektrická spektroskopie v elektrotechnologické diagnostice*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologie a měření.
- [75] TRNKA, P. *Elektrické a kombinované stárnutí izolačních materiálů*. [online]. 2007 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/394/1/r0c1c2.pdf>

# Přílohy

## Technické listy

**KREMPEL GROUP**
**Technical Data**  
 www.krempe-group.com

### Conductive non-woven

### 03 EFR 13 AA 2000 $\Omega/\square$

#### Composition

PET-non-woven with additional polyester threads inserted in machine direction impregnated with a cured carbonfilled resin.

Colour: black

#### Thermal Class 155 (Class F) according to IEC 60085

Properties	Units	Values	Test method	
Thickness	mm	0,08	DIN EN 29073-2	
Tolerance	%	$\pm 20$		
Area weight	$\text{g/m}^2$	45	DIN EN 29073-1	
Tolerance	%	$\pm 12$		
Area weight of backing material	$\text{g/m}^2$	30	DIN EN 29073-1	
Tensile strength	MD CMD	N/50mm N/50mm	$\geq 150$ $\geq 20$	DIN EN 29073-3 DIN EN 29073-3
Surface resistance (without accelerator)	$\Omega/\square$	2000	DIN VDE 0303-3	
Storage		In dry rooms, in original packaging		

Obrázek A.1: Technický list pásy 03 EFR 13 AA



# Anti corona

## Conductive Mastic 8004

- ▶ Easy to apply
- ▶ As tape delivered

		Value	Test nom
Density	g/cm <sup>3</sup>	1.60 ± 0.1	ISO 1183
Thermal class		F (155°C)	IEC 60085
Flexural strength	N/mm <sup>2</sup>	>80	ISO 178
Volume resistivity	Ω.m	<50'000	SIB 12.10
Surface resistivity	Ω	≥10'000	SIB 12.11
Min. shelf life at 20°C	Month	6	
Min. shelf life at 5°C	Month	9	

### General description

Conductive Mastic 8004 consists of an epoxy resin filled with mica powder and conductive additives.

### Application

Conductive Mastic 8004 is used to fill the conductor strands in Roebel bars at the points where conductors cross over.

### Cure Conditions

guideline values:  
1 hour at 150°C  
2 hour at 140°C  
4 hour at 130°C

### Form of delivery

In tapes of 2-3mm thickness and 6-30mm width.

### Health and safety

While processing Conductive Mastic 8004 we recommend to follow all hygiene and safety standards.

The product properties set forth in this data sheet are based on the results of testing of typical material produced by the affiliated companies of Von Roll Holding Ltd. (underneath referred as Von Roll). Some variation in product properties is typical. Comments or suggestions relating to any subject other than product properties are offered only to call the end-user's or other person's attention to considerations which may be relevant in the independent determination of the use and/or manner of use of product. Von Roll does not claim or warrant that the use of its product will have the results described in this data sheet or that the information provided is complete, accurate or useful. The user should test the product to determine its properties and its suitability for the intended use. Von Roll expressly disclaims any liability for any damage, harm, injury, cost or expense to any person resulting directly or indirectly from that person's reliance on any information contained in this data sheet. Nothing contained in this data sheet constitutes representation or warranty as to any matter whatsoever. Von Roll makes no warranties whatsoever in this data sheet, expressed or implied, including any implied warranty or fitness for a particular use or purpose. Von Roll shall in no event be liable for incidental, exemplary, punitive or consequential damages.

Obrázek A.2: Technický list vodivého tmelu Mastic 8004



## Corona Protection

Electrical stress control measures are an essential component of any high-voltage machine. Von Roll has developed a number of superior products under the trade name CoronaShield®, namely:

- » Conductive tapes impregnated and in paper form
- » Semi-conductive tapes
- » Conductive varnishes

All these tapes can be applied as:

- » External corona protection – within the slot
- » End corona protection – outside the slot

Product name	Thickness mm	Resistivity Ohm/m <sup>2</sup>	Description
CoronaShield® 215.51	0.10	200–400	Conductive tape, impregnated PET fleece, not compatible with epoxy anhydride, cured
CoronaShield® 215.55	0.085	200–400	Conductive tape, impregnated PET fleece, cured
CoronaShield® 215.63	0.17	200–400	Conductive tape, impregnated PET fleece, cured
CoronaShield® 217.01/217.21	0.22	Variable	Semi-conductive tape, impregnated PET fabric, with specific characteristics, not cured (B-stage)
CoronaShield® 217.02/217.22	0.22	Variable	Semi-conductive tape, impregnated PET fabric, with specific characteristics, not cured (B-stage)
CoronaShield® 217.03	0.22	Variable	Semi-conductive tape, impregnated PET fabric, with specific characteristics, not cured (B-stage)
CoronaShield® 217.31	0.25	Variable	Semi-conductive tape, impregnated PET fabric, with specific characteristics, cured



CoronaShield® conductive and semi-conductive tapes.

Obrázek A.3: Technický list protikoronových pásek VonRoll

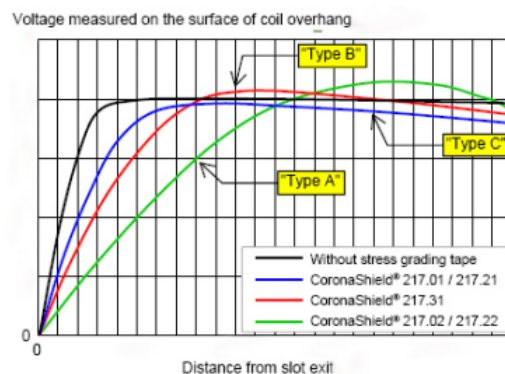
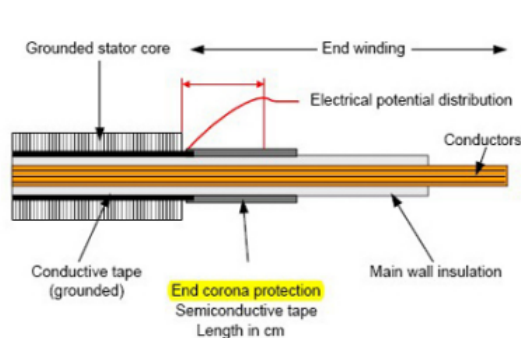
# Anti corona

## CoronaShield® SC 217.21

- ▶ "Type C" slight stress-grading characteristic
- ▶ Impregnated on a woven polyester tape
- ▶ Compatible with epoxy anhydride systems
- ▶ Suitable for RR as well as VPI
- ▶ For end corona protection (stress grading)

### General description

217.21 is a woven polyester fabric tape, impregnated with an electrically semiconductive varnish in the "B" stage, for use up to class F (155°C), suitable for Resin Rich and can also be used for VPI processed machines.



### Application

In electricity, a corona discharge - also called partial discharge - is an electrical discharge caused by the ionization of a fluid surrounding a conductor. This occurs when the potential gradient exceeds a certain value, but conditions are insufficient to cause complete electrical breakdown or arcing. Precautions must be taken to prevent the onset of corona, otherwise free radicals and ions generated in corona reactions will rapidly destroy organic materials such as binder resins and polymer films. These materials are necessary to provide a sufficient mechanical strength of the coil or bar and to give a tight fit in the slot. Erosion of organic materials in the insulation may be regarded as one of the initial steps leading to failure of the machine.

The use of corona protection materials is recommended for machines with a rated voltage > 5 kV.

### End Corona Protection (Stress Grading):

There is an increase of electric field strength at the slot exit of the stator which can cause flashovers on the surface of the coils or bars. This can be prevented by applying end corona protection materials. These materials have a nonlinear current-voltage characteristic and show a stress-grading effect on the main wall surface.

### Scope of Application:

With the product we add a semiconductive layer at the slot exit of high voltage coils. We reduce thus electrical stress outside of the core, where the electrical field strength would otherwise lead to damages on the insulation.

The tape is intended for use in both Resin Rich and VPI processed machines.

Von Roll Switzerland Ltd  
CH - 4226 Breitenbach  
www.vonroll.com

217.21

GW 4S114 07-09-2012



		Value	Test norm
Thickness	mm	0.20 ± 0.04	IEC 60394-2
Total weight	g/m <sup>2</sup>	360 ± 30	ISO 536
Shrinkage 2h at 160°C	%	≥6	
Elongation at break	%	≥10	IEC 60394-2
Thermal class	°C	155	IEC 60085
Tensile strength	N/cm	≥80	IEC 60394-2

#### Basis for selection

The selection of suitable materials depends on the type of high-voltage machine that is to be deployed as well as the insulation system and techniques are used (VPI or RR).

#### Processing Instructions

The "B" stage tape must be tightly applied without any wrinkles, half overlapped after pressing of the main wall insulation. Please don't press the tape to avoid any risk of migration of the silicon carbide particles. During the post curing of the insulation the tape shrinks, this ensures a good contact with the conductive layer and the coil surface. The tape should overlap the conductive layer by 20 mm and the recommended axial length of the stress grading tape you can calculate with following formula:

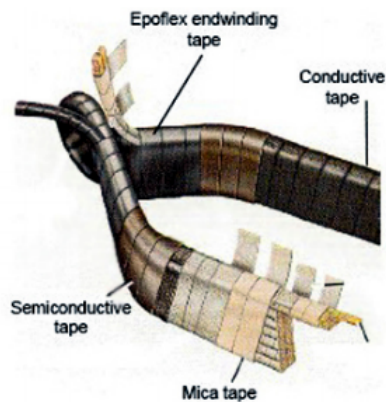
- Length in cm from slot exit = Maximum test voltage of coil in kV / 2
- e.g. for 11 kV coil we have a test voltage =  $2 \times 11 \text{ kV} + 1 = 23 \text{ kV}$
- $L = 23 / 2 = 11.5 \text{ cm}$

As a protective covering layer either Epoflex® 215.01 or Epoflex® 219.61-10 should be applied over the semiconductive tape for Resin Rich applications.

For VPI applications we recommend a covering of the tape with a shrinkable woven polyester tape 101.15 or Epoflex® 324.03. Drying at 120°C ensures shrinkage of the polyester tapes and this improves the contact between the semiconductive tape layers.

Please do not hesitate to contact us for detailed processing recommendations regarding your application.

#### Processing



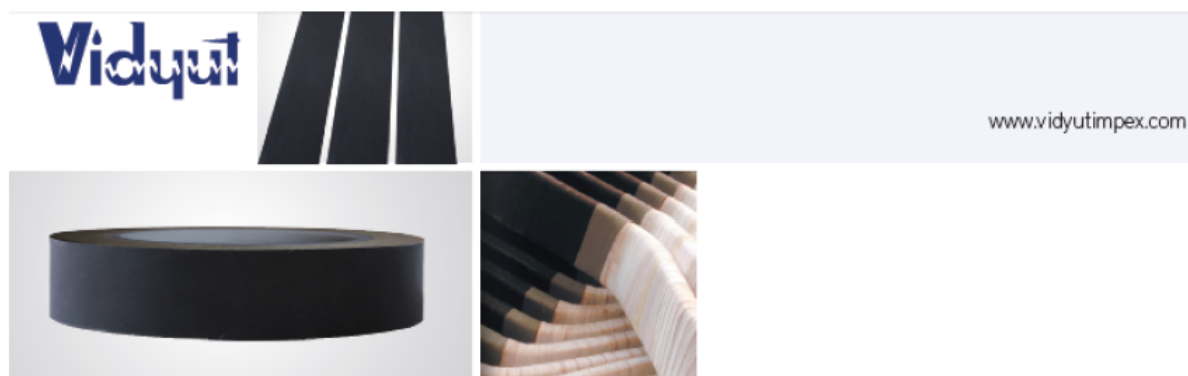
Von Roll Switzerland Ltd  
CH - 4226 Breitenbach  
www.vonroll.com

217.21

GW 4S114 07-09-2012

Obrázek A.5: Technický list pásky CoronaShield SC 217.21





### Properties

Physical Properties	Unit	Values 3.85		Values 5.110		Test Method
		Min	Max	Min	Max	
Thickness	mm	0.083	0.087	0.10	0.13	IEC 60394-2
Total Substance	g/sqm	68	92	95	115	IEC 60394-2
Non Woven Fleece	g/sqm	55	65			IEC 60394-2
Elongation	%		8		15	IEC 60394-2
Tensile Strength	N/cm		> 30		> 50	IEC 60394-2
Surface Resistance	Ohms-sq	40	400	200	1000	IS 5351
Thermal Class	°C		155		155	IEC 60394-2

### Availability

Tape Form: 10mm Up  
 Roll Length: 50 Mtrs -100 Mtrs  
 Core ID: It covers the range for manual & machine taping.

### Storage

VID Anticor Conductive Tapes 3.85 & 5.110 should be stored in cool, clean and dry condition.

### Shelf Life

Unlimited at normal temperature.

### Health And Safety

VID Anticor Conductive Tapes 3.85 and 5.110 is non toxic. All hygiene and safety standards should be followed.

### Disclaimer

All information, recommendations and test data herein are offered only as a guide. We believe them to be accurate but do not guarantee results, freedom from patent infringement, suitability of this product for any resultant application

36, Buroshivtalla Main Road Level 1, Kolkata 700 038, India

Phone: 91 3324988237/ 32920766 Fax: 91 3324988238 Email: vidyut@vidyutimpex.com, sales@vidyutimpex.com

Obrázek A.6: Technický list pásky VID-ANTICOR 3.85 a 5.110



www.vidyutimpex.com

### Properties

Physical Properties	Unit	No.8.300 Values	No.10.350 Values	Test Method
Thickness Nominal	mm	0.20+/-0.05	0.25+/-0.05	IEC 60371-2
Total Weight	g/sqm	300 +/-50	350 +/-50	IEC 60371-2
Tensile Strength	N/cm	≥60	≥60	IEC 60371-2
Elongation	%	≥8	≥8	IEC 60371-2
Shrinkage at 150 degree C for 1 hr	%	≥5	≥5	

### Availability

Roll Width: From 15mm to 1000mm +/-0.5mm  
Roll Length: Min 100 Mtrs

### Storage

Scft 8.300 and 10.350 should be stored in cool, clean and dry condition.

### Shelf Life

At Standard Temp of 20+/-5 Degree C : 6 Months  
At Refrigerated Storage of 5 Degree C : 12 Months

### Health And Safety

Vidress semiconductive Tape 8.300 and 10.350 is no toxic.  
All hygiene and safety standards should be followed.

### Disclaimer

All information, recommendations and test data herein are offered only as a guide. We believe them to be accurate but do not guarantee results, freedom from patent infringement, suitability of this product for any resultant application

36, Buroshivtalla Main Road Level 1, Kolkata 700 038, India  
Phone: 91 3324988237/ 32920766 Fax: 91 3324988238 Email: vidyut@vidyutimpex.com, sales@vidyutimpex.com

Obrázek A.7: Technický list pásky VIDSTRESS 8.300 a 10.350




[www.vidyutimpex.com](http://www.vidyutimpex.com)




### Properties

Physical Properties	Unit	Values	Values	Test Method
Thickness Nominal	mm	0.20+/-0.05	0.25+/-0.05	IEC 60371-2
Total Weight	g/sqm	300 +/-50	350 +/-50	IEC 60371-2
Tensile Strength	N/cm	>/ 60	>/ 60	IEC 60371-2
Elongation	%	>/8	>/8	IEC 60371-2
Shrinkage at 150 degree C for 1 hr	%	>/5	>/5	

#### Availability

Roll Width: From 15mm to 1000mm +/-0.5mm  
Roll Length: Min 100 Mtrs

#### Storage

8.300 and 10.350 should be stored in cool, clean and dry condition

#### Shelf Life

At Standard Temp of 20+/-5 Degree C : 6 Months  
At Refrigerated Storage of 5 Degree C :12 Months

#### Health And Safety

Vidress semi conductive Tape 8.300 and 10.350 is non toxic. All hygiene and safety standards should be followed.

#### Disclaimer

All information, recommendations and test data herein are offered only as a guide. We believe them to be accurate but do not guarantee results, freedom from patent infringement, suitability of this product for any resultant application

36, Buroshivtalla Main Road Level 1, Kolkata 700 038, India  
Phone: 91 3324988237/ 32920766 Fax: 91 3324988238 Email: [vidyut@vidyutimpex.com](mailto:vidyut@vidyutimpex.com), [sales@vidyutimpex.com](mailto:sales@vidyutimpex.com)

Obrázek A.8: Technický list pásky VIDSTRESS 8.300 a 10.350

**ANTI CORONA TAPE**

TYPE : C1530

Item	Unit	C1530-1 Conductive	C1530-1A Conductive	C1530-1B Conductive	C1530-2 Semi- Conductive	C1530-2A Semi- Conductive	C1530-2B Semi- Conductive
Nominal Thickness	mm	0.08	0.09	0.09	0.20	0.20	0.20
Thickness Tolerance	Average	±0.03	±0.02	±0.03	±0.04	±0.04	±0.05
	Individual	±0.04	±0.03	±0.04	±0.05	±0.05	±0.06
Weight of Tape	g/m <sup>2</sup>	75±12	85±10	75±12	320±35	320±35	330±40
PET Fabric	g/m <sup>2</sup>	38±4	60±4	34±4	80±4	80±4	80±4
Binder + Filler Content	g/m <sup>2</sup>	37±8	25±6	41±10	240±30	240±30	250±35
Tensile Strength	N/cm	≥25	≥30	≥60	≥60	≥60	≥60
Elongation at Break (MD)	%	≥ 8	≥8	≥15	≥10	≥10	≥15
Surface Resistivity	Ω	500-1800	200-800	1000-5000	5x10 <sup>4</sup> - 5x10 <sup>6</sup>	5x10 <sup>7</sup> - 5x10 <sup>9</sup>	1x10 <sup>10</sup> - 1x10 <sup>12</sup>
Test Method	IEC371-2						
Thermal Class	F						

**Chhaperia**

**Chhaperia International Co.**  
 Plot 270, 4th Phase, Peenya Industrial  
 Area, Bangalore - 560 058, India  
 Ph. : +91 80 41171552 / 28362823  
 Fax : +91 80 28360371 / 28396999  
 E-mail : info@micagroup.net  
 www.micagroup.net

**Representative**

Obrázek A.9: Technický list pásek Chhaperia