

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Polovodivé pásy a jejich využití v elektrických strojích**

**vedoucí práce: Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.**

**2012**

**autor: Vlastimil Skřivan**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vlastimil SKŘIVAN**  
Osobní číslo: **E10N0053P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Polovodivé pásy a jejich využití v elektrických strojích**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Zpracujte přehled vyráběných polovodivých pásek.
2. Uveďte význam použití polovodivých ochran v elektrických strojích.
3. Ověřte vliv polovodivých ochran na rozložení napětí.
4. Proveďte rozvahu provedení polovodivých ochran pro optimalizaci účinku.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:


1. Stone G. C., Boulter E. A.; Culbert I.,; Dhirani H.:**Electrical Insulation for Rotating Machines - Design, Evaluation, Aging, Testing and Repair, Wiley-IEEE Press, 2008**
2. **IEEE journals**
3. **Firemní a internetové zdroje**

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**  
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

**Anotace**

## Polovodivé pásy a jejich využití v elektrických strojích

Tato diplomová práce je zaměřena na význam polovodivých pásek. Polovodivé pásy jsou ovinuty na vinutí na výstupu z drážky a slouží k rovnoměrnému rozložení gradientu elektrického pole. V práci je dále popsáno provedení vinutí a izolační systémy točivých strojů. V praktické části je ověřeno rozložení potenciálu na vinutí na výstupu z drážky. Na závěr je provedena rozvaha provedení polovodivých ochran pro optimalizaci rozložení napětí.

**Klíčová slova**

Polovodivá ochrana, pásy, izolace, točivý stroj, Von Roll Isola, vinutí

**Abstract**

Semiconducting tapes and their application in electrical machines

This thesis is focused on the importance of semi-conductive tapes. The semi-conductive tapes are wrapped on the electrical machines winding at the end of slot and it serves to even distribution of gradient of electrical field. The realization of winding and insulation systems of rotating machines are described in this work. Distribution of potential on windings at the end of slot is verified in practical part. The circumspection of semi-conductive protections for optimization of distribution voltage is performed in the end of this thesis.

**Key words**

Semi-conductive protection, tapes, insulation, rotating machine, Von Roll Isola, winding

## **Prohlášení**

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

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

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

V Plzni dne 9.5.2012

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Evě Kučerové, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále pak bych chtěl poděkovat Ing. Ondřejovi Krpalovi za odborné rady a pomoc při měření. Za profesionální rady a poskytnutí informací z praxe děkuji Ing. Petru Krupauerovi, Ph.D.

**Obsah**

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1 POLOVODIVÉ MATERIÁLY PRO IZOLAČNÍ SYSTÉMY ELEKTRICKÝCH TOČIVÝCH STROJŮ .....</b>	<b>12</b>
1.1 POLOVODIVÉ MATERIÁLY .....	12
1.2 POLOVODIVÉ PÁSKY .....	14
1.3 VÝROBCI POLOVODIVÝCH PÁSEK .....	14
1.3.1 <i>Von Roll Isola</i> .....	14
1.3.2 <i>Isovolta</i> .....	16
1.3.3 <i>Krempel</i> .....	17
<b>2 VÝZNAM POLOVODIVÝCH OCHRAN V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH.....</b>	<b>18</b>
2.1 VINUTÍ TOČIVÝCH STROJŮ .....	18
2.1.1 <i>Statorové vinutí</i> .....	18
2.1.2 <i>Funkce izolace statorového vinutí</i> .....	20
2.1.3 <i>Vinutí rotoru</i> .....	22
2.2 OCHRANA STATOROVÉHO VINUTÍ PROTI KORÓNĚ.....	24
2.3 IZOLAČNÍ SYSTÉMY ELEKTRICKÝCH TOČIVÝCH STROJŮ.....	24
2.3.1 <i>Nízkonapěťové izolační systémy</i> .....	24
2.3.2 <i>Vysokonapěťové izolační systémy</i> .....	25
2.4 VÝVOJ NOVÝCH POLOVODIVÝCH OCHRAN.....	28
<b>3 PROVEDENÍ POLOVODIVÝCH OCHRAN.....</b>	<b>32</b>
3.1 VLASTNOSTI MATERIÁLŮ PRO POLOVODIVÉ OCHRANY .....	33
3.2 ZKOUŠKY NAPĚŤOVÝCH OCHRAN.....	34
3.3 Odstupňované ochrany.....	35



---

3.4	PULZNÍ NAMÁHÁNÍ A JEJICH VLIV NA OCHRANNÉ VRSTVY .....	37
<b>4</b>	<b>VLIV POLOVODIVÝCH OCHRAN NA ROZLOŽENÍ NAPĚTÍ .....</b>	<b>39</b>
4.1	POLOVODIVÁ PÁSKA VON ROLL ISOLA – CORONA SHIELD SC 217.22 – VYTVRZENÝ STAV .....	41
4.2	POLOVODIVÁ PÁSKA VON ROLL ISOLA – CORONA SHIELD SC 217.22 – NEVYTVRZENÝ STAV .....	43
4.3	POLOVODIVÁ PÁSKA VON ROLL ISOLA – CORONA SHIELD SC 217.31 – VYTVRZENÝ STAV .....	45
4.4	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ.....	48
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>49</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA A DALŠÍ ZDROJE.....</b>	<b>50</b>
	<b>PŘÍLOHA A: FOTODOKUMENTACE MĚŘENÍ.....</b>	<b>53</b>

## Seznam symbolů a zkratk

d	tloušťka izolačního materiálu [m]
E	hodnota intenzity elektrického pole [ $V \cdot m^{-1}$ ]
f	frekvence [Hz]
l	délka [m]
S	plocha [ $m^2$ ]
T	teplota [K]
T <sub>1</sub>	první aktivační teplota [K]
T <sub>2</sub>	druhá aktivační teplota [K]
U	napětí [V]
U <sub>max</sub>	maximální testovací napětí [kV]
U <sub>N</sub>	jmenovité napětí [V]
VPI	Vacuum Pressure Impregnation – Vakuově tlaková impregnace
β	koeficient nelinearity [-]
γ	elektrická vodivost [ $S \cdot m^{-1}$ ]
ε <sub>0</sub>	permitivita vakua [ $F \cdot m^{-1}$ ]
ε <sub>r</sub>	relativní permitivita [ $F \cdot m^{-1}$ ]
ρ	měrný elektrický odpor [ $\Omega \cdot m$ ]

## Úvod

Elektrické stroje jsou zařízení pro přeměnu elektrické energie. Pro tuto přeměnu využívají magnetický obvod s elektrickým vinutím. Elektrické stroje se rozdělují na točivé a netočivé. Točivé elektrické stroje, které transformují elektrickou energii na mechanickou, se nazývají motory a naopak stroje, které přeměňují mechanickou energii na elektrickou, se nazývají generátory.

Při návrhu stroje je nutné respektovat technickoekonomické ukazatele a podmínky, např. velikost stroje, ceny materiálů, účinnost stroje, technologii výroby a spolehlivost.

Důležitým aspektem při návrhu stroje je použití vhodného izolačního systému. Na izolační systém působí několik druhů namáhání. Jedním z nich je namáhání elektrickým polem (při provozním napětí). Částečné výboje, které zde vznikají, způsobují degradaci izolace. Selhání izolace může vést k předčasnému odstavení stroje, a tím k ekonomickým ztrátám. Částečné výboje je možno omezit použitím polovodivých materiálů. Polovodivé materiály se v točivých strojích objevují ve formě pásek a laků, souhrnně se označují jako polovodivé ochrany. Velká výhoda těchto ochran spočívá v jejich aplikování, jak v samotné statorové drážce, tak i na čelech vinutí.

Vývojem polovodivých ochran se zabývá mnoho odborných center a specializovaných firem po celém světě. Technologie spěje stále kupředu a všichni se snaží vytvořit ty nejlepší polovodivé ochrany, protože moc dobře ví, že právě na nich závisí životnost stroje.

# 1 Polovodivé materiály pro izolační systémy elektrických točivých strojů

Polovodivé materiály jsou důležitou součástí elektrických točivých strojů. Jejich vlastností je využíváno na vinutí při výstupu z drážky, kde vytváří rovnoměrné rozložení gradientu elektrického pole. Výrobou polovodivých materiálů se zabývá mnoho firem, proto je na trhu velké množství těchto materiálů. Důležité je si vybrat ten správný, který bude odpovídat potřebám stroje. [1]

## 1.1 Polovodivé materiály

K polovodičovým materiálům řadíme velkou skupinu látek s elektronovou resp. děrovou vodivostí, jejichž rezistivita je při pokojové teplotě v intervalu omezeném zdola rezistivitou kovů ( $\rho = 10^{-3} \Omega \cdot m$ ) a shora rezistivitou izolantů ( $\rho = 10^8 \Omega \cdot m$ ). [2]

Vodivost polovodičů lze velmi ovlivňovat. U nevlastních polovodičů přidáním příměsí a u vlastních působením různých vlivů (např. světlem, elektrickým polem nebo magnetickým polem). [3]

### Rozdělení polovodičů

Polovodiče můžeme dělit podle několika kritérií. Základní rozdělení polovodičů je na vlastní a nevlastní (příměsové) polovodiče. Ty se pak mohou dále dělit na polovodiče typu N a typu P.

**Vlastní polovodič** – dokonalý krystal bez poruch a příměsí se v přírodě se nevyskytuje, ale při pečlivé výrobě se mu však můžeme přiblížit. Počet elektronů u tohoto druhu polovodiče by se rovnal počtu protonů (děr), takže polovodič by se navenek jevil jako neutrální. Takový polovodič se při teplotách blízkých absolutní nule podobá izolantu a začíná vést elektrický proud až při teplotách kolem 350 K (78,8 °C). [3]

**Nevlastní (příměsový) polovodič** – k vytvoření nevlastního polovodiče je potřeba aktivních příměsí. K tomuto účelu jsou nejvhodnější prvky, které sousedí v periodické tabulce s křemíkem nebo germaniem. [3]

**Vlastní vodivost** – je tvořena stejným počtem elektronů a děr. Vyskytuje se u polovodičů při teplotě kolem 350 K (78,8 °C). [3]

**Nevlastní vodivost** – teoreticky při absolutní nule ( $T = 0 \text{ K} = -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) je vodivost obou typů nosičů rovna nule. Při zvyšování teploty dochází nejprve k aktivaci nevládních příměsí, které se podílejí na vedení proudu. Tato aktivace rapidně roste se zvyšující se teplotou; při tzv. první aktivační teplotě  $T_1$  (pro Si kolem  $80 \text{ K} = -193,15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) dochází téměř k plné aktivaci příměsí a při dalším zvyšování teploty zůstává počet nosičů téměř stejný. Až kolem teploty  $T_2$  – tzv. druhé aktivační teplotě (asi kolem  $450 \text{ K} = 176,85 \text{ }^\circ\text{C}$ ) se na vedení proudu začínají podílet vlastní nosiče náboje. [3]

**Polovodič typu N** – je-li atom krystalové mřížky čtyřmocného prvku (např. Si, Ge) nahrazen atomem pětímocného prvku (např. P, As, Sb), pak čtyři z jeho valenčních elektronů se zúčastní vytvoření vazby se sousedními atomy, pátý elektron je nadbytečný a je vázán k atomu jen velmi slabě. Tento elektron se může uvolnit i malou aktivační energií a účastnit se vedení proudu. Tuto energii získá již při nízkých teplotách (takže při pokojové teplotě jsou téměř všechny příměsí ionizovány). Vznikají tak volné elektrony. Proto se pětímocné příměsí nazývají donory (dárci). V polovodiči typu N převažují jako nosiče proudu elektrony, proto je nazýváme většinové (majoritní) nosiče, nepohyblivé díry se nazývají menšinové (minoritní) nosiče. [3]

**Polovodič typu P** – nahradíme-li atom krystalové mřížky čtyřmocného prvku atomem trojmocného prvku (prvku III. skupiny- např. B, In, Ga, Al), pak se všechny tři jeho valenční elektrony účastní vazeb se sousedními atomy, čtvrtá zůstane neúplná. Stačí opět malá energie k tomu, aby se některý z elektronů se sousedních vazeb uvolnil a zaplnil neúplnou vazbu trojmocného atomu. Tak vznikne navenek neutrální atom. Na místě, které elektron upustil, se vytvoří kladná díra. Tato díra, navenek nepohyblivá, se může tímto způsobem pohybovat umožnit tak vedení proudu. Trojmocné příměsí se nazývají akceptory (příjemci). V polovodiči typu P jsou tedy většinovými nosiči díry, menšinovými nosiči elektrony. Při zvyšování koncentrace příměsí nad určitou mez se začne polovodič chovat jako kov, takovýto polovodič se nazývá degenerovaný vodič (značí se např.  $N^+$ ). [3]

Do skupiny jedenácti elementárních polovodičů patří křemík, germanium, fosfor, selen, síra, telur, arsen, antimon, bor, uhlík a cín. Z těchto prvků jsou však nejčastěji používány křemík a germanium. Jako polovodičové materiály můžeme použít také chemické sloučeniny (např. galiumarsenid, indiumantimonid), které krystalizují v krychlové soustavě. Zde je každý atom spojen čtyřmi vazbami se sousedními atomy. [2]

Polovodičové materiály jsou potřebné v mimořádné čistotě. Pomocí zvláštní technologie tažení monokrystalů a zónové tavby je možno docílit čistoty, při které na  $10^{10}$  atomů krystalu polovodiče připadne jen jeden atom jiné látky. [2,3]

Křemík jako základní materiál je dnes v polovodičové technice nejdůležitější prvek. Více než 90 % polovodičových součástek je na bázi křemíku. Jiné polovodiče se uplatňují jen v případech, kdy jsou vlastnosti křemíku v něčem nevyhovující (např. germanium má při vysokých kmitočtech proudu výhodnější vlastnosti a dvouprvkový polovodič galiumarsenid má velkou pohyblivost nosičů elementárních nábojů). [3]

## 1.2 Polovodiivé pásy

Polovodiivé materiály jsou aplikovány na vinutí na výstupu z drážky a slouží k rozložení elektrického potenciálu.

Dříve než se začaly využívat polovodiivé pásy, byly aplikovány jen polovodiivé laky. Vrstva laku byla obvykle slabá a vždy ji bylo nutno nanášet ve více vrstvách. Velkou nevýhodou při použití laku je, že se ochrana rychle opotřebila a také to, že laky mají rozdílnou dobu vytvrzení. [4]

Tato práce je zaměřena na polovodiivé pásy, které se používají na výstupu z drážky a slouží k rozložení elektrického potenciálu. Elektrický potenciál vzniká mezi uzemněným statorovým jádrem a koncem vinutí. Tento potenciál je nutné rozložit, aby nedocházelo k přehřívání, a tím i k degradaci izolace. [4]

## 1.3 Výrobci polovodiivých pásek

Na evropském trhu je mnoho společností (např. Scapa Group plc, 3M, S.V.Industries a 3A Associates Incorporated), které se zabývají výrobou a vývojem polovodiivých pásek. Do této práce jsem ale zvolil tři zástupce, kteří jsou, podle mě, jedničkami ve svém oboru. Těmito společnostmi jsou Von Roll Isola, Isovolta a Krempel.

### 1.3.1 Von Roll Isola

Von Roll Isola je švýcarská společnost zabývající se vývojem a výrobou elektroizolačních materiálů pro elektrické stroje. Dále se zabývá vývojem kompozitních materiálů, dílů pro různé průmyslové aplikace a vývojem speciálních a tepelně odolných

kabelů. Od roku 2008 firma Von Roll Isola začala vyrábět transformátory pro výrobu, přenos a distribuci elektrické energie. [5]

Současná Von Roll Isola vznikla spojením společností Von Roll a Isola – Werke AG. Společnost dále vystupuje pouze pod názvem Von Roll Isola. [5]

Izolační pásy od společnosti Von Roll Isola jsou vyráběny z polyesterové tkaniny s lemem. Tyto pásy se impregnují pryskyřicí a jsou vhodné pro technologii Resin Rich i pro VPI. Pásy se po navinutí na vinutí suší při 120 °C, a tím je zajištěno smrštění polyesterové tkaniny, a tím se zlepšuje kontakt mezi páskou a statorem. [5]

Výběr vhodného typu pásy závisí na typu zařízení vysokého napětí, na jeho rozměrech a konstrukci. V tabulce 1.1 je uvedeno několik typů pásek vhodných pro rotační stroje.

**Tab. 1.1:** Polovodivé pásy společnosti Von Roll Isola [5]

Von Roll Isola	šířka	tloušťka	celková váha	prodloužení při přetržení	smrštění-2hod., 160°C	pevnost v tahu	Teplotní třída
	mm	mm	g/m <sup>3</sup>	%	%	N/cm	°C
Corona Shield SC 217.01	21±1,5	0,22±0,03	350±20	≥12	≥3	≥80	155
Corona Shield SC 217.02	21±1,5	0,22±0,03	360±30	≥12	≥3	≥80	155
Corona Shield SC 217.03	21±1,5	0,22±0,03	360±20	≥12	≥3	≥80	155
Corona Shield SC 217.21		0,20±0,04	360±30	≥10	≥6	≥80	155
Corona Shield SC 217.22		0,22±0,03	360±30	≥10	≥6	≥80	155
Corona Shield SC 217.31		0,25±0,05	360±30	≥10	≥5	≥80	155

Z tabulky je dobře patrné, že se vyráběné pásy liší vždy jen v několika parametrech. Výběr správného typu pásy závisí na velikosti a použití rotačního stroje.

Společnost Von Roll Isola se také zabývá vývojem izolačních laků pro točivé elektrické stroje. Mezi jejich stěžejní výrobky patří Corona Shield P 8001, P 8002 a P 8003. Laky je možno nanášet samostatně nebo ve více vrstvách. Také bývají kombinované s páskou nebo jsou aplikovány až za ní. [5]

Corona Shield P 8001 je upravená fenolová pryskyřice s polovodivým plnivem. Tento polovodivý lak se nanáší jako koncová ochrana proti koróně a je kompatibilní s epoxidovými systémy s anhydridem. Lak Corona Shield P 8001 je odolný proti tepelnému stárnutí a vhodný pro Resin Rich i VPI. [5]

Corona Shield P 8003 je vodivý lak pro drážkovou ochranu proti koróně s odporem 150  $\Omega$  – 650  $\Omega$ . Je taktéž kompatibilní s epoxidovými systémy s anhydridem a vhodný pro Resin Rich i VPI. V tabulce 1.2 jsou zobrazeny některé důležité parametry. [5]

**Tab. 1.2:** Izolační laky společnosti Von Roll Isola [6]

Von Roll Isola	Hustota	Obsah pevných částic	Viskozita (23°C)	Doba schnutí-povrch (23°C)	Doba schnutí-celková (23°C)	Teplotní třída
	g/m <sup>3</sup>	%	mPa.s	min	hod	°C
Corona Shield 8001	1,28	52±3	1000±100	30	10	155
Corona Shield 8002	1,28	52±3	1100±100	30	10	155
Corona Shield 8003	1,12	54±3	300±30	10 - 15	5 - 10	155

### 1.3.2 Isovolta

Rakouská společnost Isovolta vznikla v roce 1949. Společnost se angažuje ve velkém množství odvětví, ať už to je automobilový průmysl, letectví, výroba velkých generátorů, ale i malých motorů a transformátorů. Tuto společnost jsem do svého výběru zařadil zejména proto, že její polovodivé pásy jsou vysoce kvalitní a používá je společnost BRUSH SEM s.r.o. s výrobním sídlem v Plzni. [7]

Izolační pásy od společnosti Isovolta se skládají z polyesterové tkaniny, která se napouští silikonovou pryskyřicí. Tyto pásy jsou částečně polovodivé, jejichž odpor je definován charakteristikou odporu v závislosti na napětí. Finálních vlastností těchto pásek je dosaženo až po vytvrzení a spojení vrstev. Optimální délka vytvrzování je 2 hodiny při teplotě 160 °C. V tabulce 1.3 můžeme vidět další parametry pásek. [7]



**Tab. 1.3:** Polovodivé pásy společnosti Isovolta [8]

Isovolta	šířka	tloušťka	celková váha	prodloužení při přetržení	pevnost v tahu	Teplotní třída
	mm	mm	g/m <sup>3</sup>	%	N/cm	°C
EGSB 0483	20	0,28±0,03	360±35	≥10	≥80	155
EGSB 2709	20	0,24±0,04	350±35	≥10	≥80	155
EGSB 2969	20	0,15±0,03	250±25	≥20	≥40	155

### 1.3.3 Krempel

Německá společnost Krempel byla založena již v roce 1891 ve Stuttgartu. Dříve se zabývala výrobou papíru a lepenky na bázi celulózy. Byly to první pokusy o izolaci na elektrických strojích. Nyní se společnost zabývá výrobou materiálů pro mnoho různých odvětví, jako např. solárními panely, materiály pro elektroniku, kabely, speciální papíry a filmy, tepelnou izolací a hlavně výrobou izolačních materiálů. [9]

Polovodivé pásy od společnosti Krempel jsou vyráběné z polyesterové tkaniny nebo ze skleněných vláken. Polyesterová tkanina může mít zesílená nebo zamotaná vlákna. Jako plnivo je používán uhlík nebo saze. [9]

V tabulce 1.4 je uvedeno několik příkladů typů polovodivých pásek ze sérií nabízených společností Krempel. Každá série nabízí několik variant, které se mohou lišit svými parametry. [8]

**Tab. 1.4:** Výběr polovodivých pásek společnosti Krempel [10]

Krempel	tloušťka	celková váha	prodloužení při přetržení	odpor	pevnost v tahu	Teplotní třída
	mm ± %	g/m <sup>3</sup>	%	Ω	N/50mm	°C
07 EWR 05 AA	0,13±20	87	≥9	400-6000	≥100	155
03 ELR 19 AA	0,05±20	45	≥10	400-1000	≥60	155
03 EFR 13 BA	0,08±20	45	≥12	400	≥150	155
04 ESR 22 AA	0,22±20	70	≥14	400-1000	≥100	155
05 GWR 17 AA	0,37±20	130	≥80	1000	≥150	155
07 NWR 00 CC	0,15±20	100	≥20	400	≥200	155

## 2 Význam polovodivých ochran v elektrických strojích

### 2.1 Vinutí točivých strojů

Vinutí obecně chápeme jako definovaný způsob uložení vodiče cívce. Ve střídavých elektrických strojích je vinutí prostředníkem elektromechanické přeměny energie. [4]

Výroba vinutí obvykle obecně sestává z několika operací. Zde je potřeba rozdělit točivé stroje na malé, střední a velké. Na malé a střední stroje se nejdříve navíjí vinutí, pak následuje impregnace a sušení. Sériová výroba, která je prováděna u malých a středních strojů, je dobře zvládnutá. Zde je možné využít automatizaci. V případě velkých strojů ale automatizace není možná, tato výroba má charakter výroby kusové a převažuje zde hlavně ruční práce (např. vkládání Roeblových tyčí). To představuje velmi vysoké náklady na výrobu vinutí.

Vinutí můžeme rozdělit na dvě velké části – vinutí statoru a vinutí rotoru. [4]

#### 2.1.1 Statorové vinutí

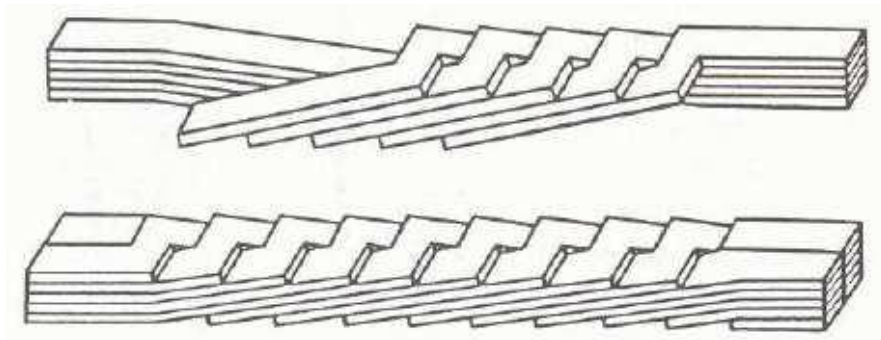
Statorová vinutí synchronních a asynchronních strojů jsou konstrukčně podobná. Vinutí tvoří cívky, jejichž rovné části jsou uloženy v drážkách rovnoměrně rozmístěných po obvodu statoru. Čela cívek vně drážek statoru jsou vytvarována, zpevnována a elektricky izolována. [4]

Z mechanického hlediska se statorové vinutí může rozdělit podle mnoha parametrů. V praxi se nejčastěji realizuje rozdělení, které jsem zvolil pro tuto práci.

- *Vinutí vsypávané do polozavřených drážek* - cívka dostane výsledný tvar po vložení do drážky. Vodiče jsou kruhového průřezu, nejčastěji lakované dráty. Vhodné pro automatizovanou výrobu. [4]
- *Vinutí vkládané do otevřených drážek* – cívky mají svůj tvar před vložení do drážky (šablonové cívky). Drážková izolace se vytvoří buď odděleně, nebo se vkládají cívky s již hotovou drážkovou izolací a izolací čel vinutí (u strojů nad 1 kV nejčastěji). Jako vodiče se nejčastěji používají Cu pásy izolované kombinovanou izolací (lak + opředení skleněným vláknem), nebo páskovou izolací (polyamidová folie). Mezizávitová izolace závisí na provozních podmínkách, přičemž se musí vzít v potaz

její odolnost při tvarování cívek na tvarovacích strojích. [4]

- *Vinutí tyčové* – jednozávitové cívky nebo půlcívky. Většinou se axiálně zasouvají do drážek. Jsou vhodná jak pro stator, tak pro rotory velkých střídavých strojů. Nacházíme je ale zejména u velkých turboalternátorů. Velké cívky nelze vyrábět jako jeden celek. Každá cívka se skládá ze dvou segmentů, půlcívek. Každá tyč má čela vytvarována do tvaru evolvent. Nejpoužívanější tyčová vinutí se vyrábí ve formě Roeblových tyčí (Obr. 2.1). Jejich účelem je omezení vzniku vířivých proudů ve vodičích a snížení přídatných ztrát. [4]



**Obr. 2.1:** Roeblův tyče [11]

Stator je z elektrického hlediska složen ze tří hlavních částí – magnetická část, elektrická část a izolace. Prostřednictvím mědi prochází statorovým vinutím proud. U generátorů platí, že se ve statoru vytváří indukovaný proud jako reakce na točivé magnetické pole rotoru. V motoru se proud přivádí do statoru a vytvoří točivé magnetické pole, které nutí rotor k pohybu. [4,14]

Izolace je jedna z nejdůležitějších částí statorového vinutí. Na rozdíl od měděných vodičů a magnetické oceli, které jsou aktivní složky zajišťující chod rotačních strojů, se jedná o pasivní část, a to proto, že se nepodílí na tvorbě magnetického pole nebo jeho cesty. Izolace slouží zejména k zabránění zkratu mezi vodiči nebo jejich spojení se zemí. Bez izolace by mohlo docházet k vzájemnému kontaktu mezi vodiči nebo k dotyku s jádrem statoru, a tím by se vytvořily nežádoucí cesty pro průchod proudu. V neposlední řadě izolace pomáhá držet vodiče pevně na místě. [4,14]

Magnetická část v generátoru koncentruje magnetické pole z měděných rotorových vodičů. Jádro je složeno z tenkých plechů, které jsou vyrobeny z magnetické oceli. Magnetická ocel působí jako hlavní cesta magnetického toku z rotoru do statoru. [4,14]

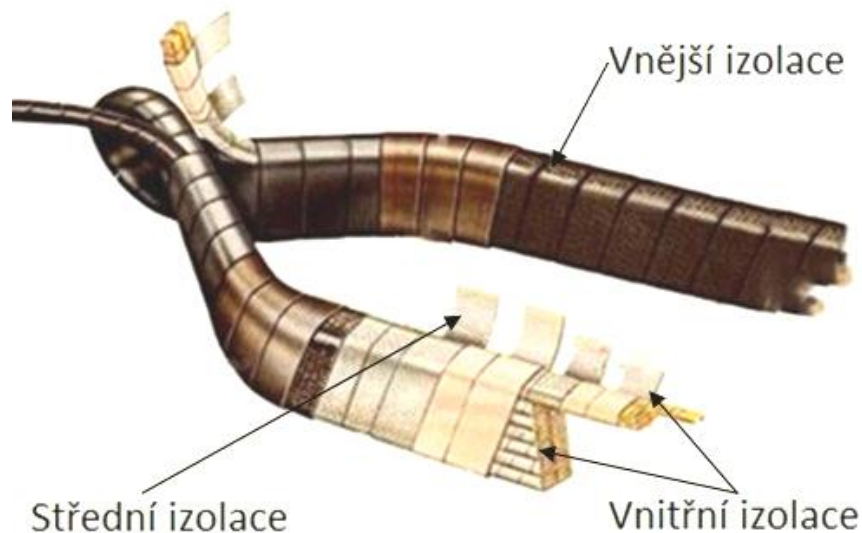
### 2.1.2 Funkce izolace statorového vinutí

Izolace statorového vinutí obsahuje několik důležitých částí, které společně zajišťují, aby nedocházelo ke zkratu mezi vodiči, byl zaručen odvod tepla do chladicího systému a aby vodiče nevibrovaly skrze magnetické síly. [18]

Hlavní části izolace statorového vinutí:

- Vnitřní izolace – izolace vodičů
- Střední izolace
- Vnější izolace – zemní izolace

V následující kapitole budou popsány vlastnosti hlavních částí (zejména mechanické, teplotní a elektrické). Na obrázku 2.2 je znázorněn příklad izolování vodičů.[4]

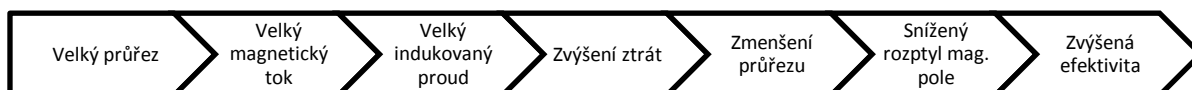


**Obr. 2.2:** Příklad izolování vinutí vodičů [13]

### Vnitřní izolace – izolace vodičů

Vnitřní izolace je zaměřena zejména na izolaci měděných vodičů. Tato izolace je tvořena laky a nátěry, které se nanáší přímo na vodič. Je také možné použít polovodivé pásy, které se proloží mezi vodiče. Z mechanického hlediska je důležité, aby vodič, který je dostatečně dlouhý a prochází skrz něj potřebný proud, měl velký průřez. Velikost průřezu vodiče je dána velikostí stroje. To znamená, že dostatečně velký průřez vodiče zajistí požadovanou zatížitelnost. Problém ale vzniká, když takový vodič chceme ohnout. Nejlepším řešením je proto použití více vodičů, které budou mít menší průřez a proto se snáze ohýbají do požadovaného tvaru. [4,18]

Z elektrického hlediska také existují důvody proč izolovat vodiče. Z elektromagnetické teorie víme, že když bude mít měděný vodič větší průměr, bude proud procházet po krajích vodiče, a ne celým jeho objemem. Toto je známé jako skin efekt. Vodiče se izolují i mezi sebou, a to zejména proto, aby se omezily ztráty vířivými proudy. Izolace může být tenká, protože napětí dosahuje jen několik málo desítek voltů. Avšak musí mít dobré mechanické vlastnosti, protože se může potřhat při výrobě cívky. Magnetické pole je především radiální, kolmé na osu. Na konci je ale magnetické pole axiální způsobené zakončením rotoru a statorového jádra. Toto axiální pole je velmi důležité u synchronních strojů. Ampérovo pravidlo pravé ruky nám popisuje orientaci magnetických indukčních čar při průchodu elektrického proudu přímým vodičem, popřípadě cívkou. Čím větší průřez, tím větší je magnetický tok, a tím větší je velikost indukovaného proudu. Výsledkem je zvýšení ztrát ve vodiči. Proto musíme snížit průřez, a tím dosáhneme snížením rozptylu magnetického pole a zvýšíme tím efektivitu (viz. Obr. 2.3). [4,18]



**Obr. 2.3:** Grafické znázornění zvyšování efektivity při velkém průřezu

Izolace musí mít také dobré tepelné vlastnosti. Během let dochází k opotřebování izolace a to opět vede ke ztrátám a ke zvyšování teploty cívky. [4]

## **Střední izolace**

Cílem střední izolace je zabránit zkratu mezi jednotlivými vodiči. V případě porušení izolace může dojít k přehřátí. Obvykle se jedná o rychlé přehřátí, při němž dochází ke spalování izolace a povrchovému opalování mědi. Teploty stroje v chodu jsou kolem 80 °C. Proto je potřebné, aby izolace v ohybech byla dobře tepelně odolná a měla dlouhodobou životnost. Zejména kvůli navíjení izolace je nutné, aby měla izolace také dobrou mechanickou odolnost. [4]

Tepelné namáhání je v podstatě stejné jako u vnitřní izolace. Izolují se opět měděné vodiče, které se průchodem proudu ohřívají. [4]

Jako střední izolace jsou využívány laminátové pásky. Tyto laminátové pásky byly vyvinuty s cílem dosáhnout stabilního, tepelně odolného a chemicky homogenního materiálu, jehož vlastnosti by byly závislé na složení a množství plniva (např. slída). [1]

## **Vnější izolace – zemnicí izolace**

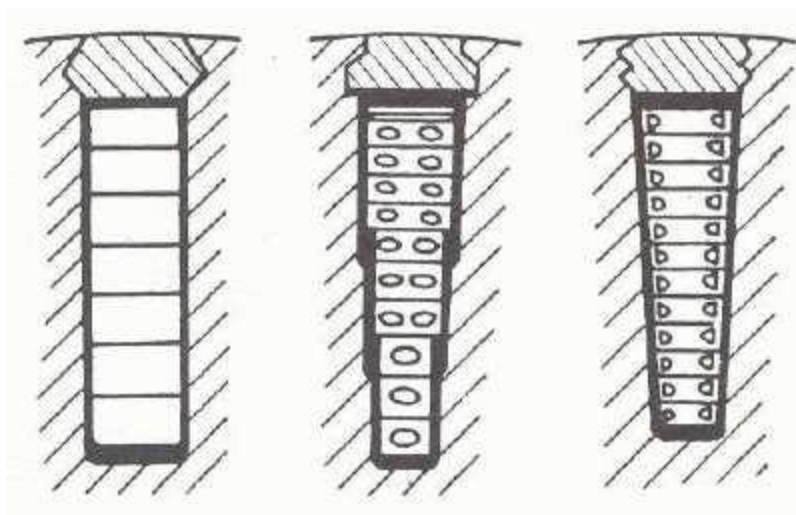
Vnější izolaci tvoří páska, která odděluje měděné vodiče od uzemněného magnetického obvodu. Selhání této izolace vede k zemnímu spojení. Tento typ izolace je rozhodující pro chod motoru nebo generátoru. Mechanicky musí být vysoce odolné proti otěru, aby odolala poškození, které vzniká při vibraci stroje, a také musí mít dobrou odolnost proti roztržení, které může vzniknout při výrobě. [4]

I přesto, že zde nedochází k přímému kontaktu s měděnými vodiči, je nutné, aby materiál použitý na výrobu izolace, měl vysokou tepelnou vodivost a nevyskytovaly se v něm vzduchové bubliny. Bubliny mohou blokovat odvod tepla a můžou v nich vznikat částečné výboje, které můžou vyvolat jiskření a následný zkrat. [4]

### **2.1.3 Vinutí rotoru**

Mechanické namáhání (hlavně odstředivé síly) velmi silně ovlivňují materiál a uspořádání. Vinutí se umísťuje do vyfrézovaných drážek v ocelovém tělese rotoru. [4]

Drážky rotoru mohou mít mnoho tvarů. Mezi nejpoužívanější patří obdélníkový tvar, odstupňovaný nebo kónický (lichoběžníkový). Tyto tvary uspořádání drážek můžeme vidět na obrázku 2.3.



**Obr. 2.4:** Uspořádání drážek rotorového vinutí [15]

Použitý druh vodiče, tvarové řešení drážky i výroba rotorového vinutí závisí na velikosti stroje a jeho typu chlazení:

- Vzduchové chlazení pro turboalternátory nejvýše do 100 MVA
- Chlazení vodíkem pro turboalternátory nad 50 MVA
- Vodní chlazení pro turboalternátory od 1000 MVA [3]

### **Izolace rotorového vinutí**

Vinutí rotoru u synchronního stroje, stejně jako vinutí rotoru asynchronního stroje, obsahuje elektrickou izolaci. Izolace se používá k zabránění vzniku zkratu mezi sousedními vodiči, nebo vodičem a tělem rotoru. Jako izolační materiál se používá kombinace organických a anorganických materiálů, které mají různé mechanické a tepelné vlastnosti. Správnou kombinací jsme schopni vytvořit vhodný elektroizolační materiál pro točivé stroje. Na kvalitě izolačního materiálu závisí doba životnosti rotoru. [4,14]

Izolace cívek v drážce se tvoří buď drážkovým izolačním korýtkem, nebo drážkovými úhelníky spolu s drážkovou vložkou na dně drážky. Čela cívek se musí po natvarování bandážovat, to se dělá rotorovou obručí, která zachycuje síly, kterými jsou čela namáhána. Vůči této obruči se čela izolují skelným epoxidovým laminátem, izolační výložky se na čela nasadí před finálním nasazením rotorové obruče. Obruče se vyrábí z nemagnetické oceli a nasazují se za tepla. Závitová izolace rotorového vinutí se nanáší

na vodiče před navíjením, nebo až při vkládání vodičů do drážky (vsypávané vinutí). Finálním krokem po montáži vinutí je vyvážení a odzkoušení rotoru. [4,14]

## 2.2 Ochrana statorového vinutí proti koróně

Ochrana proti koróně statorového vinutí slouží k prevenci proti postupné degradaci izolace elektrickými výboji, které vznikají na povrchu vodičů, a teplem vznikajícím ve vodičích. [16,17]

Polovodivá vrstva s nízkým odporem, který se pohybuje v řádech  $\rho_s=10^3 \Omega - 10^5 \Omega$ , se používá podél celé rovné části statorového vinutí. Vrstva s vysokým odporem ( $\rho_s=10^7 \Omega - 10^9 \Omega$ ) se používá v ohybech tyčí. Polovodivá vrstva také slouží k rozložení napětí a omezení skokových změn na koncích vodičů, tedy tam, kde vodiče postupně přechází v evolventu (viz. Obr. 3.1). [16]

Ochrana proti koróně zabraňuje vzniku zkratu mezi povrchem izolace a státorem, kde se nachází vzduchová mezera. Ochrana spočívá v polovodičové výplni, která zajišťuje dostatečný počet dotykových ploch. [16,17]

## 2.3 Izolační systémy elektrických točivých strojů

Dle pracovního napětí můžeme izolační systémy elektrických točivých strojů dělit na nízkonapěťové a vysokonapěťové. [1]

### 2.3.1 Nízkonapěťové izolační systémy

Nízkonapěťové izolační systémy jsou tvořeny izolací vodičů, vyložením drážek a impregnantem.

Izolace je závislá na velikosti pracovního napětí a tvoří ji lak, opředení a ovinutí bavlnou, skleněnými vlákny a další kombinace materiálů. Provedení izolace se označuje písemnými symboly. [1]

Vyložení drážky chrání vodiče před poškozením. Poškození vodičů může nastat při pohybu vodiče v drážce při mechanických rázech stroje. Vyložení drážky se obvykle provádí drážkovou lepenkou, kombinovanou drážkovou izolací nebo je z Nomexu (syntetický materiál z krátkých vláken a malých vláknitých částic aromatického polyamidu). [1]



U nízkonapětových systémů se impregnace nanáší obvykle máčením, zakapáváním nebo zaplavováním. U máčení se používají laky na bázi jednosložkové polyesterové pryskyřice nebo nenasyčené polyesterimidové pryskyřice. Pro zakapávací technologii se používá roztok nenasyčené polyesterimidové pryskyřice ve styrenu a u zalévání lze využít dvousložkové polyuretanové látky. [1]

### 2.3.2 Vysokonapětové izolační systémy

Vysokonapětové izolační systémy točivých stojů jsou tvořeny dvěma technologiemi, které jsou značně rozdílné. Jedná se o technologie VPI a resin-rich. [1]

#### Metoda VPI ( Vacuum Pressure Impregnation )

Jedná se o systém výroby hlavní izolace, v němž jsou základními materiály savé slídové pásy, papíry či lepenky, které se při impregnačním procesu prosytí impregnantem.

Tento systém se tedy skládá ze dvou základních komponentů – suché izolační pásy a kvalitního impregnačního laku. Technologie vakuově-tlakové impregnace (VPI) se provádí výhradně kontinuálním způsobem (cívka je průběžně ovíjena páskou a vytvrzena v celé své délce) a představuje jednu z vrcholných impregnačních technologií dneška. Využívá se v hojné míře pro vytvoření kvalitní izolace vinutí vysokonapětových a vysokovýkonových strojů. Nejčastěji se uplatňuje u trakčních motorů, kde je potřebný dokonalý impregnační systém zpevňující vinutí při výborných izolačních i teplotních vlastnostech. Díky těmto vlastnostem umožňuje minimalizovat rozměry trakčních motorů. [1]

#### Složení izolační pásy pro technologii VPI

Jako izolačního materiálu se u technologie VPI užívá savé (suché) slídové pásy s obsahem pojiva do 7 %. Tato metoda je průběžná – kontinuální. Savý izolant je obvykle ve formě pásy, která se skládá ze tří komponentů. [1]

Jako nosné složky, podkladového materiálu, je užito skleněné tkaniny, polyesterového rouna nebo syntetické fólie – nejčastěji polyamidové.

Druhou složkou je nekalcinovaná slída ve formě slídového papíru, nazývaná též remika. Tento slídový papír má o trochu větší zrnka z důvodu lepší nasákavosti pryskyřice.

Třetí složkou je pojivo, které musí být kompatibilní s impregnantem. V tomto případě se užívá pojiva jen do 7%, aby bylo zajištěno mechanické zpracování pásy („drží“

nosnou a izolační složku). Velmi důležitou a sledovanou vlastností je též savost materiálu. Je nezbytné, aby došlo k dokonalému proimpregnování všech užitých vrstev, neboť cívký jsou vícenásobně kontinuálně ovinuty páskou s překrytím. [1]

Nejčastěji užívaným impregnantem jsou bezrozpuštědlové epoxidové, polyesterové nebo silikonové pryskyřice se stoprocentním obsahem sušiny. To je velmi důležité, jelikož tyto pryskyřice umožňují úplné vyplnění prostoru impregnovaného objektu. Mají relativně krátkou vytvrzovací dobu, dobré mechanické i elektrické vlastnosti a lze je použít pro teplotní třídy H (180 °C) a 200. V současnosti je velmi rozšířený impregnant na bázi epoxidové pryskyřice s kapalným anhydridem, pro nějž musí základní materiál obsahovat latentní katalyzátor (tvrdidlo), který je neaktivní a aktivuje se většinou teplem. Je přidáván do pryskyřic v jednotkách procent. Jeho důležitou vlastností je, že k zahájení polymerační reakce dochází až po dosažení určité teploty (obvykle 100 °C). Toho se využívá zejména k prodloužení doby skladovatelnosti materiálu. Tento urychlovač při vytvrzování polymerační reakcí katalyzuje. Dochází ke zkrácení doby želatinace a snížení její teploty. [1]

### **Metoda Resin rich**

Technologie navazuje na metody užívané v minulosti. Izolace vyrobená touto metodou se provádí způsobem kontinuálním či diskontinuálním. Jako izolačního materiálu je zde užito tříslložkového kompozitu s výchozím izolačním předimpregnovaným materiálem ve formě polotovaru s obsahem pojiva mezi 30 – 40 %. [1]

Tříslložkový kompozit je složen z:

- nosné složky (skleněná tkanina)
- pojiva (epoxidová pryskyřice)
- izolační složky (kalcinovaný slídový papír)

Nosnou složku tvoří skleněná tkanina tloušťky 0,12 – 0,14 mm. Elektrickou bariérou je kalcinovaný slídový papír vyznačující se větší hutností, pevností a menší nasákavostí oproti nekalcinovanému slídovému papíru. Pojivem vázícím obě tyto složky je nejčastěji reaktoplastická bezrozpuštědlová novolaková nebo cykloalifatická epoxidová pryskyřice. Materiály užívané v technologii Resin-Rich jsou obvykle dodávány v částečně

předtvrzeném (gelovitém) stavu (tzv. B stavu), aby byly suché, nelepivé, při ovíjení vláčné a vyznačovaly se dlouhou dobou skladovatelnosti. Tloušťka materiálu se pohybuje v rozmezí 0,15 - 0,2 mm. Při vlastním zpracování se na vodivých částech vytvoří izolační kompaktní trubka o požadované tloušťce stěny, dle pracovního napětí stroje. Po založení do vytvrzovací formy, stlačení, vytvrzení a vyjmutí z formy se takto připravené vinutí vkládají do drážek stroje, kde je schopno po pospojování a dohotovení čel plnit svoji funkci. [1]

Jednou z nesporných výhod této technologie spočívá v možnosti jednoduchých oprav oproti technologii VPI. Jelikož vlastní montáž impregnovaných tyčí probíhá až po vytvrzení, izolační systém tak neznemožní rozebrání vinutí. [1]

### **Izolační systém technologie Resin-Rich:**

Rozdělen do dvou základních skupin podle způsobu navíjení:

- diskontinuální (nespojité)
- kontinuální (spojité)

#### *Diskontinuální:*

Tento způsob izolace vinutí je vhodný pro menší stroje. Jedná se o ekonomicky výhodný postup s nízkou energetickou náročností. Drážková část a čela vinutí jsou ovíjena zvlášť za použití různých materiálů. Rovná část je tvořena fóliovým materiálem, na který navazuje v čelních partiích ovin páskou. Čela jsou měkká a po založení se musí vytvrdit. Vlastní vytvrzování probíhá v jednoduchých přípravcích umožňující stažení izolace na daný rozměr. [1]

#### *Kontinuální:*

Tento způsob izolace vinutí je vhodný pro velké točivé stroje. Cívka je ovinuta jedním druhem pásy s polovičním, třetinovým nebo dvoutřetinovým překrytím a následně vytvrzena v rovné části nebo po celé délce. Čela jsou tvrdá a nelze je příliš tvarovat. Tento způsob izolace vinutí zajišťuje shodné vlastnosti izolace v drážkové části i v čelech. Značnou nevýhodou tohoto způsobu izolace jsou náročné, individuálně vyráběné přípravky pro vytvrzování izolace čel. [1]

## 2.4 Vývoj nových polovodivých ochran

Polovodivé materiály, které se používají na ochranu proti koróně, jsou v podstatě vrstvené kompozitní materiály. Jejich vodivost je dána vodivým plnivem přidaným do pojiva izolace. [16]

Vývoj více stabilních a spolehlivých materiálů na ochranu proti koróně závisí na několika vlivech:

- Zvyšování podílu vodivého plniva (uhlík nebo saze) v kompozitu, ale jen do určité míry. Maximální hranice pro toto plnivo je 14 %.
- Použití tepelně odolných reaktoplastů (zesíťované polymery) jako pojiva, např. epoxidová pryskyřice nebo silikony. [16]

Mezi prvními vyvinutými páskami byly pásy typu GF109, které mají lineární odpor. Avšak tento typ pásek není však konečným řešením ochrany proti koróně. Dalším krokem pro zvýšení vlastního odporu byl vývoj kompozitu s nelineárním odporem, který je závislý na elektrické intenzitě a jeho základ tvoří prášek z karbidu křemíku. Velká stálost odporu tohoto kompozitu je docílena díky zvýšené koncentraci prášku karbidu křemíku použitého jako plniva. [16,19]

Dalším materiálem byl polovodivý smalt (křemičitá tavenina) s odporovou nelineární závislostí na elektrickém poli – PEN. Tento materiál je použit na několika vinutích statorů hydrogenerátorů vodních elektráren. [16]

Později byl vyvinut materiál na bázi epoxidové pryskyřice a karbidu křemíku, známý pod obchodním názvem KPN (Tab. 2.1). Tato látka se osvědčila, kvůli své stabilitě a provozní spolehlivosti. Tento materiál je stále používán pro mnohé turbo- a hydrogenerátory se jmenovitým napětím od 13,8 kV – 20 kV. [16,19]

Nové trendy a požadavky na jednotnou, chemicky homogenní ochranu, která dovoluje kontrolu svého odporu, vedly k vývoji polovodivých sklolaminátových pásek. Polovodivých vlastností bylo dosaženo přidáním částí SiC. Tyto polovodivé ochrany jsou používány v modernějších strojích. Do této sklolaminátové se později přidaly oxidy mědi CuO. Původně měly tyto pásy povrchovou rezistivitu v řádech  $10^{10} \Omega$  až  $10^{12} \Omega$ . Tepelným zpracováním ve vodíkovém prostředí dochází ke změně vrstev CuO na krystalickou měď. Tím se sníží povrchová rezistivita na rozmezí  $10^2 \Omega$  až  $10^{10} \Omega$  (závisí na hodnotách teploty a času tepelného zpracování ve vodíkovém prostředí). [19,21]

Tepelné stárnutí negativně působí na polovodivé ochrany. To potvrdily výsledky experimentu, kdy se zkoušely laminátové pásy při teplotách 110 °C, 130 °C, 150 °C a 180 °C. S rostoucí se teplotou zhoršovaly vlastnosti pásek. [19,21]

Pásy se také zkoušely v různých prostředích – v argonu, ve vodíku a na vzduchu. Výsledky ukázaly, že se při teplotě 180 °C elektrická rezistivita ve vodíkovém prostředí příliš nemění, v argonovém prostředí se mírně zvýšila a na vzduchu rezistivita výrazně vzrostla. [19,21]

Další inovací, v oboru polovodivých pásek, bylo přidání oxidu stříbrného  $\text{Ag}_2\text{O}$  jako plniva. V průběhu tepelného zpracování sklolaminátu ve vodíkovém prostředí proniká zkrystalizovaný oxid stříbrný do povrchu laminátu a vytváří na povrchu zkrystalizované mědi další vrstvičku stříbrných krystalů, které slouží jako ochrana před možnou oxidací. Tímto postupem docílíme optimální teplotní stability při provozních podmínkách. Takto vyrobené pásy se označují LSP-O (Tab. 2.1). Pásy LSP-O mají vyšší přilnavost k epoxidovým a polyesterovým součástem než elektroizolační sklolaminátové pásy. Navíc mají pevnou monolitickou strukturu. [19,21]



**Obr. 2.5:** Polovodivé pásy LSP-O [30]

Polovodivé pásy typu LSP-O se mohou dělit na nízkoodporové (LSP-O-1) a vysoceodporové (LSP-O-2). Pásy typu LSP-O-1 jsou vhodné pro antikoronní ochrany uvnitř drážky statoru. Vyráběny jsou v tloušťkách 0,1 mm, 0,15 mm a 0,2 mm. Pásy typu LSP-O-1 jsou více elastické a hodnota odporu zůstává stabilní až do 180 °C, proto se hodí na ochranu konců vinutí točivých strojů. [19,21]

**Tab. 2.1:** Polovodivé materiály používané u vinutí turbo-a hydro- generátorů [15]

Vyvinuté materiály	Typ	Odpor na náměstí semi-vodivé vrstvy, kdy proud teče podél vrstvy, ps. Ohm	Vrstvy základu
Polovodivý lak na základě glyptalu	GF-5109G GF-5 109	$1 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^8$ $1 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^9$	LAE-I
Cu-Al-obsahující polovodivý - LSP-O-1 Vodivá skleněná páska	LSP-O-1 LSP-O-2 LSP-O-3	$1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^5$ $1 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^8$ $5 \cdot 10^8 - 9 \cdot 10^9$	
Polovodivý smalt s odporovou nelineární závislostí na elektrickém poli	PEN	$E=1 \text{ kV/cm } \rho_s = 1 \cdot 10^{9-11}$ $E=7 \div 8 \text{ kV/cm } \rho_s = \cdot 10^{7-8}$	
Polovodivá nelineární epoxidová sloučenina	KPN	$E=1 \text{ kV/cm } \rho_s = 1 \cdot 10^{9-11}$ $E=4 \text{ kV/cm } \rho_s = \cdot 10^{7-8}$	
Polovodivá nízkoodporová epoxidová sloučenina	PNEK	$5 \cdot 10^2 - 9 \cdot 10^3$	LAEI, LALE
Polovodivá plochá výplň na základě PNEK a LAT		$1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^5$	LAT $0,5 \times 175$
OMTI-rezistentní polovodivá nízkoodporová epoxidová sloučenina	PNEK-S-1	$5 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^5$	LES
OMTI-rezistentní polovodivá, nízká teplota tvrzení	PNEK-S-2	$5 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^5$	LES LAE-I
OMTI-rezistentní polovodivá nelineární eDoxv comDound KPN-S-1 odporová epoxidová sloučenina (vytvrzování za tepla)	KPN-S- 1	$E=1 \text{ kV/cm } \rho_s = 1 \cdot 10^{9-11}$ $E=4 \div 8 \text{ kV/cm } \rho_s = \cdot 10^{7-8}$	

V tabulce 2.1 jsou uvedeny polovodivé materiály používané pro anikoronové ochrany jak pro drážkovou část, tak na výstup vinutí z čel.

Pro vývoj nových ochran bylo použito výsledků dlouhodobého zkoumání starých rozebíratelných vinutí a oddělených tyčí. Tato vinutí byla podrobena laboratorním analýzám a z nich byly formulovány nové cíle. [15]

Všechny polovodivé vrstvy, jsou-li aplikované na vnější izolaci vysokonapětových tyčí, musí být pevné. Proto se začaly vyvíjet polovodivé kompozity na základě epoxidové pryskyřice, které je možné tepelně zpracovávat současně s vnější izolací tyčí. Do drážek se jako výplň používají polovodivé sloučeniny, saze a také grafit. Saze jsou v tomto případě vhodnější než grafit, protože zvyšují přilnavost materiálu. Při výrobě této ochrany se vyžaduje vysoká technologická životnost, protože tepelné zpracování totiž způsobí, že oprava není možná. [15]

Poté jsou tyče podrobeny vysokonapětovým zkouškám. Ty jsou prováděny v tmavém prostředí z důvodu lepší viditelnosti vnikajících výbojů. Izolace je testována na napětí 50 kV – 62 kV a během zkoušky nesmí dojít k povrchovým výbojům. Po 12 až 15 letech provozu se vinutí statoru opět testuje, ale jen na napětí 30 kV – 36 kV. [15]

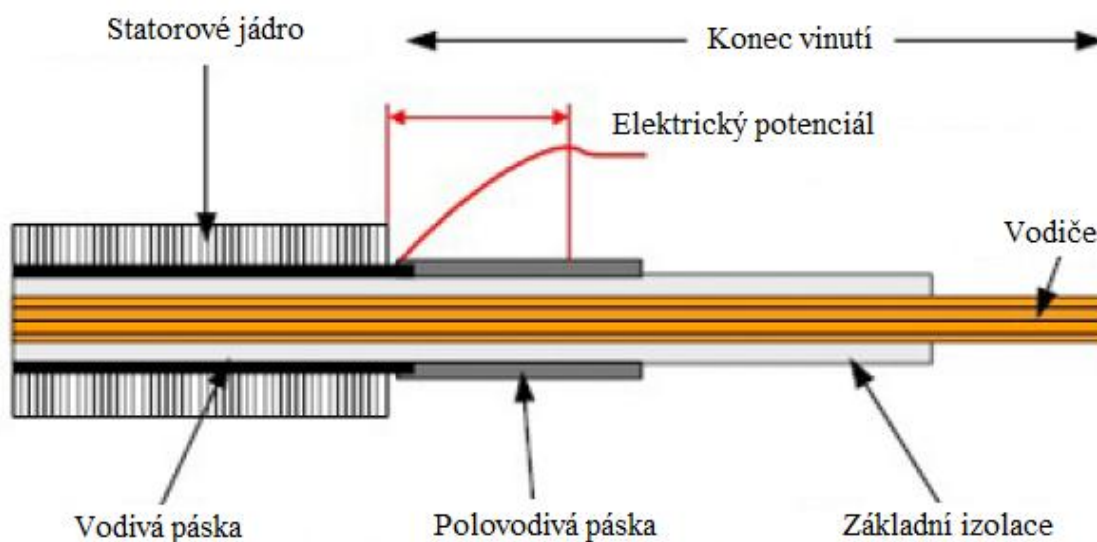
### 3 Provedení polovodivých ochran

Izolační systémy jsou jedny z nejdůležitějších částí elektrického točivého stroje. Složeny jsou z různých druhů materiálů, které zajišťují úspěšný chod stroje.

Nanesením polovodivé ochrany (pásky nebo laku) zajišťujeme rozložení gradientu elektrického pole. Tím zabráňujeme vzniku klouzavých výbojů (koronových výbojů) na výstupu vinutí z drážky.

Klouzavé výboje jsou speciální typ částečných výbojů, které vnikají na povrchu izolantu mezi dvěma elektrodami, pokud dosáhnou kritické hodnoty  $U_i$ . Napětí  $U_i$  je takové napětí, při kterém je možno sledovat částečné výboje. Tento jev se objevuje u průchodek, kabelových koncovek a u výstupu vinutí z drážek. [20]

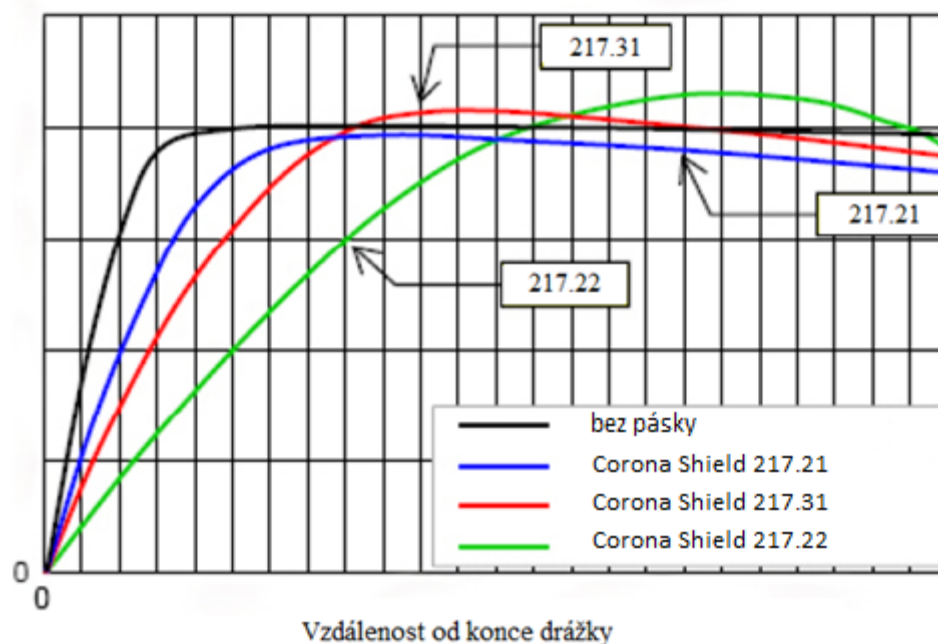
Na obrázku 3.1 je zobrazen nárůst elektrického pole na výstupu z drážky statoru. Zde může docházet ke vzniku výbojů na povrchu vodičů. Tomu lze zabránit použitím vhodné polovodivé ochrany, která má nelineární rezistivitu.



**Obr. 3.1:** Použití polovodivé pásky na konci tyče [5]



V moderních vysokonapěťových strojích se v některých oblastech vyskytuje nerovnoměrné rozložení elektrického potenciálu, musí být na vinutí aplikovány polovodivé materiály, které pomáhají toto nerovnoměrné rozložení rozprostřít. Největší rozdíl potenciálu se objevuje na konci drážky. Na obrázku 3.2 je znázorněno, jak různé typy pásek vyrovnávají tento rozdíl. [21]



**Obr. 3.2:** Vyrovnávání elektrického pole pomocí polovodivých pásek [5]

### 3.1 Vlastnosti materiálů pro polovodivé ochrany

Nejdůležitější požadavky, které musí páska splňovat, aby mohla být aplikována jako napěťová ochrana, jsou vysoké přeskové napětí a vysoká rezistivita. [22]

Vlastnosti materiálů, které jsou používány pro polovodivé ochrany, jsou nelineární. To znamená, že jejich rezistivita se mění v závislosti na elektrickém poli. Na tyto materiály je kladeno několik požadavků. [21]

- Koeficient nelinearity  $\beta$  – u používaných materiálů se jeho hodnota pohybuje od 10 do 40 a je dán vztahem: (3.1)

$$\beta = 1 + \frac{d \ln(\gamma)}{d \ln(E)} \quad (3.1)$$

kde	$\beta$	koeficient nelinearity [-]
	$\gamma$	elektrická vodivost [ $S \cdot m^{-1}$ ]
	E	hodnota intenzity elektrického pole [ $V \cdot m^{-1}$ ]

- Rezistivita materiálu v závislosti na přiloženém elektrickém poli – ve slabých polích ( $E < 1 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ ) musí být konduktivita materiálu  $\gamma < 10^{-10} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ . Pro intenzitu  $2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  pak při frekvenci  $f = 50 \text{ Hz}$  a relativní permitivitě  $\epsilon = 10$  by konduktivita materiálu měla splňovat podmínku, že  $\gamma \gg \epsilon \omega$ , z čehož vyplývá  $\gamma \gg 10^{-8} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$  [21]
- Velikost dovolených teplotních ztrát v izolaci – vymezuje vlastnosti ochranného povlaku. Dle reálných měření by velikost proudu tekoucích ochrannou vrstvou na výstupu z drážky měla být menší než  $50 \mu\text{A}$  a Joulovi ztráty by neměly překročit hodnotu  $0,2 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  plochy izolace. [21]

### 3.2 Zkoušky napěťových ochran

Napěťové ochrany jsou zkoušeny na různých napěťových hladinách. Napětí se volí jako  $3,5x U_N$ . Např. napěťové ochrany určené pro provozní napětí v rozmezí  $13,8 \text{ kV}$  až  $15,5 \text{ kV}$  se testují až do hodnoty  $50 \text{ kV}$  bez vzniku viditelného jiskření a bez slyšitelného zvuku podél povrchu napěťové ochrany. V průběhu minutové zkoušky, kdy je přiložené napětí  $60 \text{ kV}$ , se nesmí objevit hoření nebo dým. Cívky se mohou testovat v temné místnosti, kde by byly viditelné výboje. Napětí se může zvyšovat až do určení počátku výbojů. Ideální délku napěťové ochrany lze určit pomocí vzorce: (3.2) [22]

$$l = \frac{U_{max}}{2}$$

(3.2)

kde  $l$  – ideální délka pásy [cm]

$U_{max}$  – maximální testovací napětí [kV]

Polovodivé ochrany se v praxi zkouší také srovnávací metodou. Zkoušejí se různé pásy a laky. Délka pásek se navrhuje podle minutových zkoušek. Z výsledků by stačila délka 40 – 50 mm, ale raději se dá delší (až 200 mm). Pásy se také zkoušejí na vysoké napětí. Při těchto zkouškách se začne nejprve ničit nejbližší úsek u drážkové části. [22]

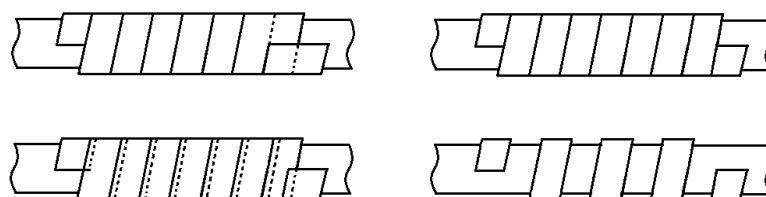
### 3.3 Odstupňované ochrany

Napětové odstupňované ochrany používají materiály, které musí být vhodné pro široký rozsah vysokonapětových točivých strojů. Tyto stroje mohou mít rozdílné provozní nebo testovací napětí, geometrické uspořádání statorových tyčí na výstupu, izolační systémy, technologické postupy výroby, provozní podmínky, atd. [22,23]

V podobě pásek se napětové odstupňované ochrany v praxi vyskytují ve dvou formách. První je tzv. B – stav, který je částečně vytvrzený, a druhý je tzv. C – stav, který je plně vytvrzený. [22]

**B – stav:** Pásy jsou tvořeny z polyesterové tkaniny a mohou mít vysoký nebo nízký obsah pryskyřice. Po vytvrzení se páska smrští, a tím zvýší svůj kontakt s polovodivou vrstvou uvnitř drážky.[22]

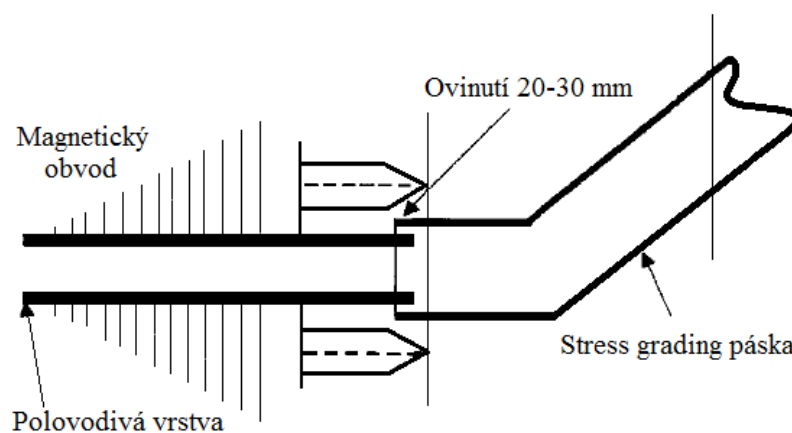
**C – stav:** Zde se používá tkanina, která se vlivem teploty smrští a bude dosahovat podobného kontaktu s polovodivou vrstvou jako páska v B – stavu. Tyto pásy jsou již vytvrzeny, a proto je možné skladovat i několik let. [22]



**Obr. 3.4:** Způsoby ovíjení [24]

Vodiče se ovíjejí páskami šířky 15 – 30 mm. Navíjí se protiběžně, nejčastěji s polovičním překrytím, protože toto uspořádání poskytuje vhodnou povrchovou cestu vzhledem k vlastnostem pásky. Je-li vyznačen střed pásky, může se rovnoměrnost navíjení snadno kontrolovat. Další způsoby ovíjení jsou ukázány na obrázku 3.4 – s částečným překrytím, na dotyk a řídké ovinutí. [24]

Většina výrobců doporučuje používat pásku s polovičním překrytím, s tím, že polovodivá ochrana by měla překrývat ochrannou v drážkové části 20 – 30 mm, viz. obrázek 3.5. [22,24]



**Obr. 3.5** Aplikace antikoročních pásek [24]

U vysokonapěťových strojů se doporučuje používat i dvojitou vrstvu polovodivých ochranných pásů. Zde je možné kombinovat pásy a laky. Lak je obvykle slabý (1 mm) jako barva a vždy se nanáší minimálně ve dvou vrstvách. Velkou nevýhodou při použití laku je, že se ochrana rychle opotřebí a laky mají rozdílnou dobu vytvrzení. Právě proto se již přešlo na polovodivé pásy. Laky se dnes používají při opravách stroje. [22,23]

### 3.4 Pulzní namáhání a jejich vliv na ochranné vrstvy

Vysokonapěťové izolační systémy musí odolávat účinkům provozního prostředí i mechanickým namáháním. Dále zde působí tepelné i elektrické degradační faktory. [25]

Vinutí a izolace musí vydržet rychlé opakované spínání. Je prokázáno, že systém, který dobře funguje na napájecí frekvenci, bude vystaven zvýšenému namáhání při použití opakovaných rychlých pulsů. [25]

Polovodivé ochrany mají zmírňovat skokové změny intenzity magnetického pole na výstupu vodičů z drážky. Zde může docházet k výbojové činnosti a tím ke značné degradaci izolačního systému. Jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly 3, této výbojové činnosti lze zabránit použitím polovodivých ochran. Polovodivá páska může být částečně ovinuta ochranou vodivou páskou, která poslouží ke zmírnění přechodu v místě, kde vinutí vychází z drážky. [26]

Při použití ochranných laků je potřeba nanášet je opakovaně a vyčkávat na vytvrzení. Vrstvy laků mají rezistivitu, která se postupně snižuje. To napomáhá k rovnoměrnějšímu rozložení elektrického pole. [25]

Pulzní zkoušky se provádějí při změně tvaru a frekvence napětí, z 50 Hz sinusového průběhu na vysokofrekvenční pulzní napětí při napájení z měniče kmitočtu. Jako určující parametr se při testování degradace ochran může zvolit kapacita nebo pouze vizuální kontrola. Měření kapacity vzorků vychází z předpokladu znalosti o degradaci ochranných vrstev. Laky se vlivem elektrického pole oprašují z povrchu izolace. Po určité době ochrana na částech vzorku zmizí a současně nastává degradace izolačního systému.

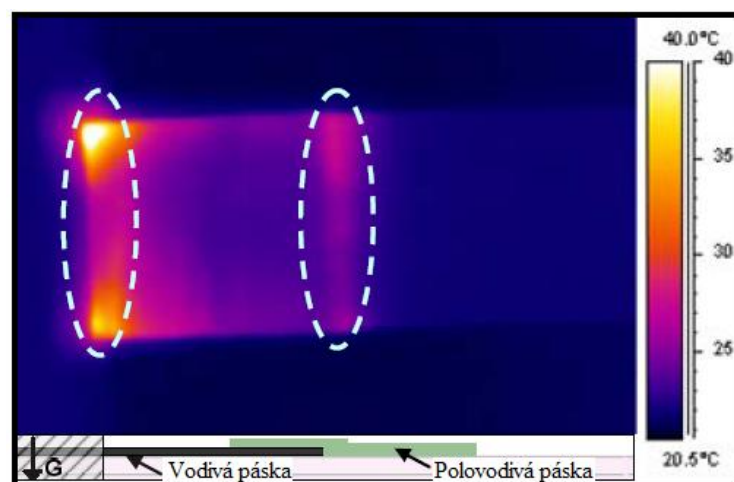
Degradací polovodivé vrstvy dochází ke změně plochy elektrody. Kapacita bude přímo úměrná ploše elektrody. [25]

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \text{ [F]} \quad (3.3)$$

kde	S	plocha [m <sup>2</sup> ]
	d	tloušťka izolačního materiálu [m]
	$\varepsilon_0$	permitivita vakua [F · m <sup>-1</sup> ]
	$\varepsilon_r$	relativní permitivita [F · m <sup>-1</sup> ]

Mírné zvýšení kapacity izolačního materiálu během degradace elektrickým polem může být vysvětleno narůstáním vodivých drah uvnitř izolačního materiálu. Vodivé nebo částečně vodivé dráhy uvnitř izolačního materiálu snižují efektivní tloušťku izolace. Kapacita je nepřímo úměrná tloušťce izolace. Naměřená změna kapacity odpovídá změně velikosti elektrody tj. degradaci polovodivého laku. Vodivost a rozměry ochrany musí být navrhovány s ohledem na druhy působícího napětí, tj. jeho frekvenci a strmosti nárůstů napěťových pulzů ve stroji. [25,26]

Pulzní namáhání lze také sledovat pomocí termo kamery, která může dobře zachytit rozdíl teplot. Obrázek 3.3 znázorňuje teplotní profil konce tyče, který byl vystaven pulznímu namáhání. Velký nárůst teploty je patrný na konci drážky a v rozích. V těchto místech dochází k degradaci ochrany. [27,28]



**Obr. 3.3:** Pulzní namáhání z pohledu termo kamery [27]

Polovodivé ochrany jsou velmi důležitou součástí točivých strojů. Na stroji jich sice není mnoho, ale cena nesmí být přemrštěná, protože na trhu je dost schopných výrobců, kteří jsou připraveni nabídnout dobrou cenu.

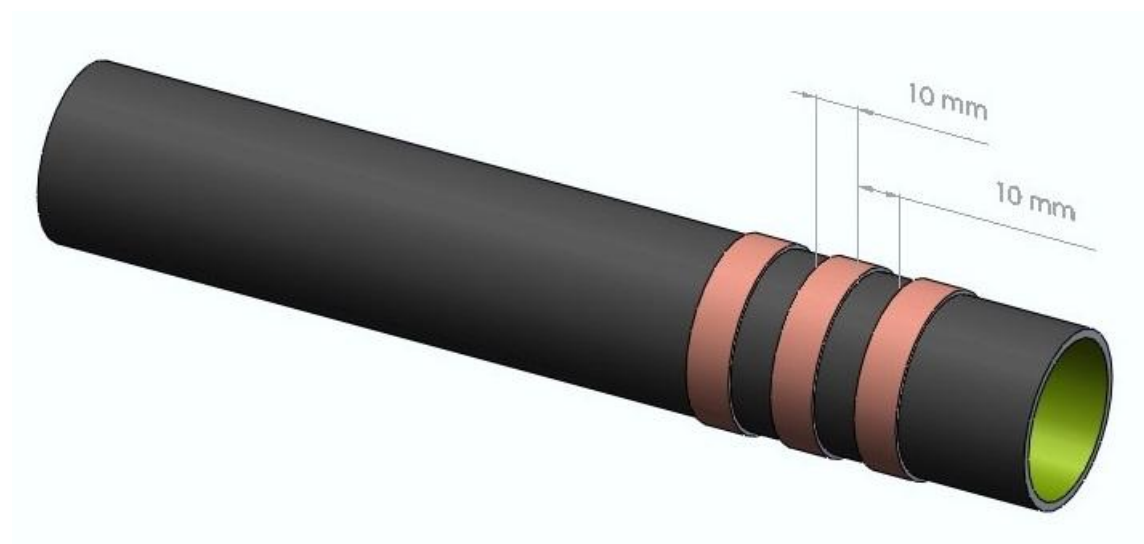
Cena jedné role (viz. Obr. 2.5) se pohybuje v řádu několika stovek českých korun. Problém může nastat při malé objednávce, protože dodavatelé je obvykle dodávají pouze ve velkém množství, kde jsou většinou vážené na kila. [31]

## 4 Vliv polovodivých ochran na rozložení napětí

Polovodivé pásy, které jsou navinuty na vodiči na výstupu z drážky, pomáhají rovnoměrně rozložit elektrický potenciál. V této části je ověřen vliv polovodivých ochran na rozložení napětí a také závislost proudu na různých vzdálenostech elektrod při stálém napětí.

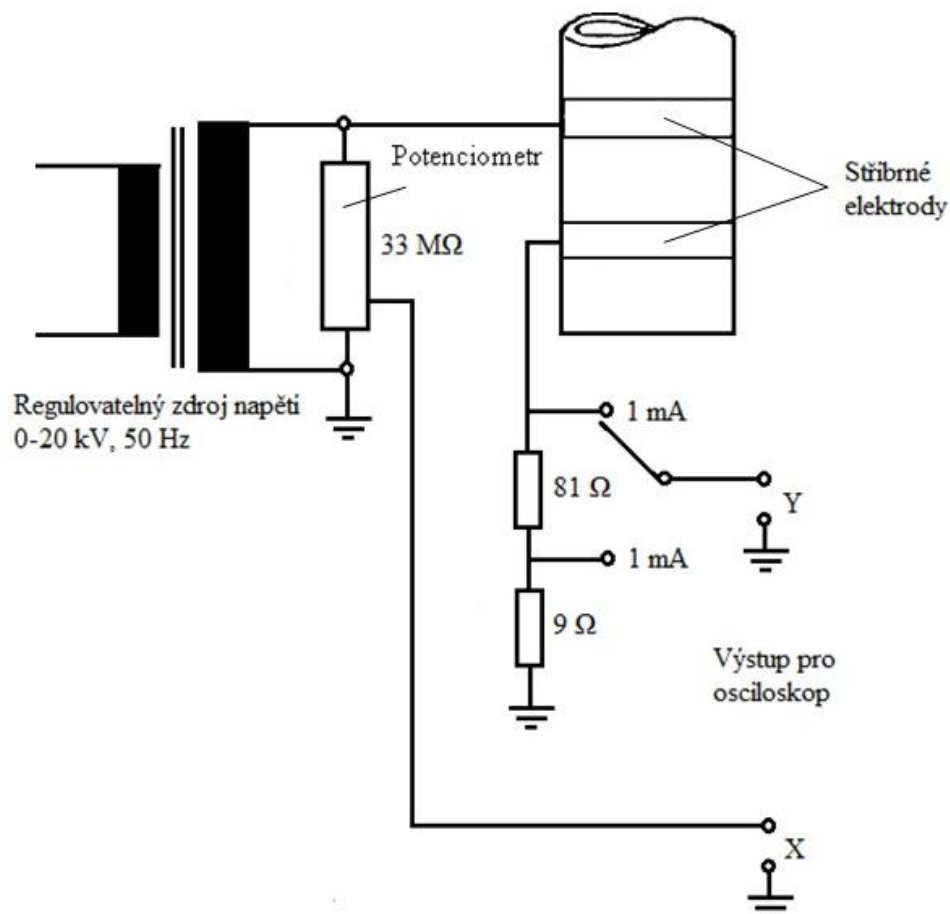
V této diplomové práci je použita V – A metoda pro ověření vlivu polovodivých ochran. Na měření této V – A charakteristiky zatím nejsou žádné evropské normy, a proto je možno řídit se interní normou SIB 14 – 07 od společnosti Von Roll Isola.

Interní norma Von Roll Isola určuje, jak má vypadat sklolaminátová trubka určená k testování. Ideální trubky má mít délku 340 mm a vnější průměr 40 mm s tloušťkou stěny 1 mm, na které je nanesena polovodivá páska. Na povrchu vzorků může být navinutá polovodivá páska s žádným nebo polovičním překryvem. Pro tuto práci měly všechny vzorky poloviční překrytí. Dále je dvou vzorcích (Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.22 a 217.31) aplikována polovodivá páska ve vytvrzeném stavu a na jednom v nevytvrzeném stavu (Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.22). Stříbrné elektrody byly rozmístěny ve vzdálenosti 10 mm (viz. Obr. 4.1), resp. u jednoho vzorku ve vzdálenosti 20 mm. K elektrodám se připevnilly měděné vodiče. [29]



**Obr. 4.1:** Testovací sklolaminátový vzorek dle normy SIB 14 – 07 [29]

Měření bylo prováděno stejnosměrným napětím až do 5 kV. Napětí bylo postupně zvyšováno po 250 V. Průběh proudu byl zaznamenáván do tabulek. Měřící rozsah pro proud byl od nuly do 2,5 mA. Schéma měření je na obrázku 4.2. Výsledná V-A charakteristika dle interní normy je znázorněna na obrázku 4.3.

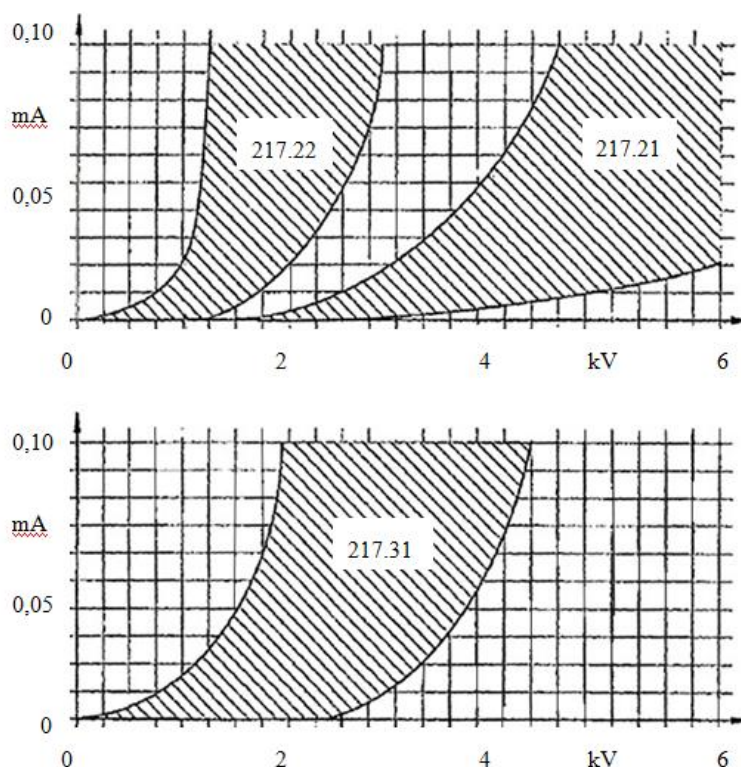


**Obr. 4.2:** Měřící obvod polovodivé ochrany dle normy SIB 14 – 07 [29]

Měření probíhalo za normálních podmínek, tj. teplota – 21 °C, tlak – 980 kPa, vlhkost – 49 %. Na měření byl použit napájecí zdroj KEITHLEY 248 HIGH VOLTAGE SUPPLY (evidenční číslo – 21926) a ampérmetr (evidenční číslo – 171123).



Na obrázku 4.3 jsou zobrazeny grafy se třemi typy polovodivých pásek. Typ pásky závisí na typu stroje a jeho použití. Vykreslené grafy vychází z normy SIB 14 – 07 a byly vykresleny po důkladných průzkumech společnosti Von Roll Isola. Výsledné V – A charakteristiky polovodivých pásek by měly být v rozmezí vyšrafovaných částí. I při stejných podmínkách a technologiích výroby je výsledný rozptyl V – A charakteristik poměrně velký.



**Obr. 4.3:** V – A charakteristika dle normy SIB 14 – 07 [23]

#### 4.1 Polovodivá páska Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.22 – vytvrzený stav

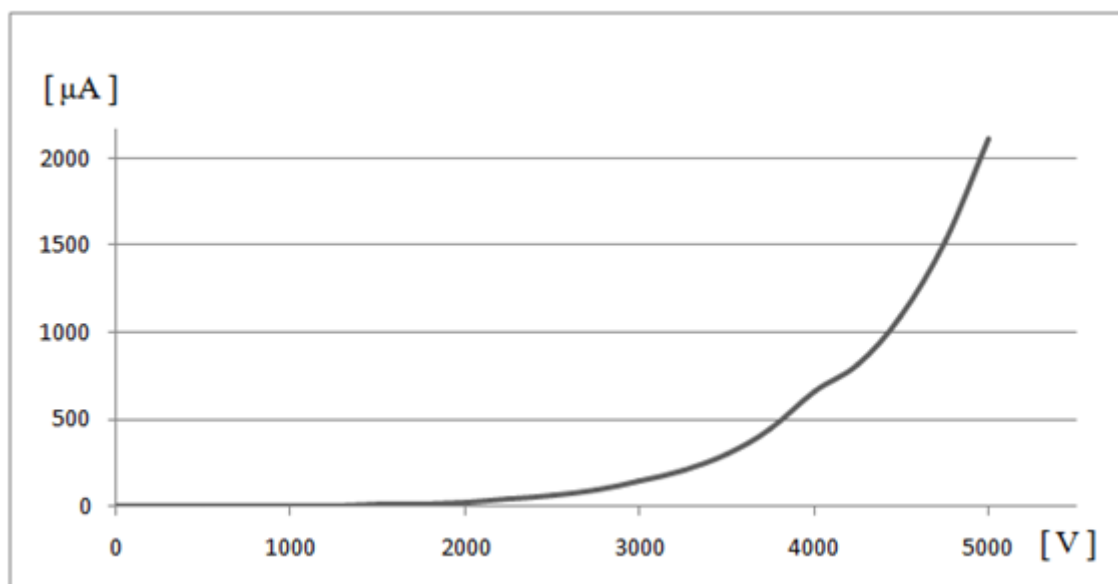
Na prvním testovaném vzorku byla nanesena polovodivá páska Corona Shield SC 217.22 ve vytvrzeném stavu. Vzorek by tedy měl odpovídat právě vinutí, které je umístěno přímo ve stroji. V tabulce 4.1 jsou zaznamenány hodnoty proudu při zvyšujícím se napětí. Rozsah napětí byl od 0 do 5 kV. [5]

**Tab. 4.1:** Polovodivá páska Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.22 ve vytvrzeném stavu – napěťová závislost proudu

U [V]	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500
I [ $\mu$ A]	0	0,1	0,2	0,6	1,4	3,2	6,4	12,2	23,4	39,1	61

U [V]	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500	4750	5000
I [ $\mu$ A]	94,4	142,2	209	302	440	660	810	1090	1520	2110

Na obrázku 4. 4 je vykreslena V – A charakteristika. V tomto grafu je dobře vidět, že při napětí kolem 2 kV začíná výrazně vzrůstat hodnota proudu.



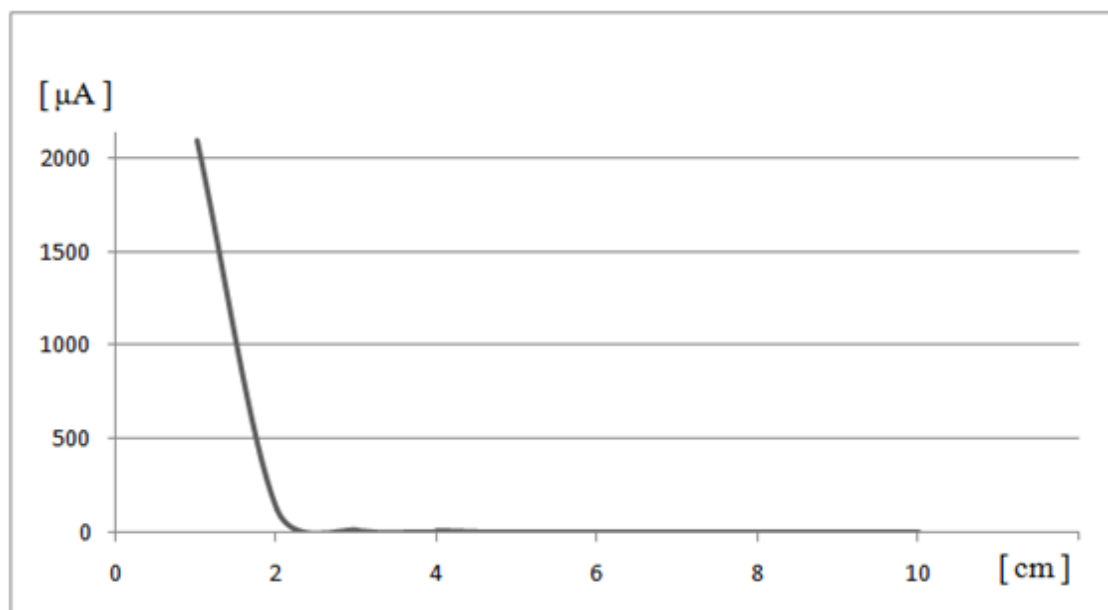
**Obr. 4.4:** V – A charakteristika polovodivé pásky Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.22

Další měření, které probíhalo na vzorku s polovodivou páskou Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.22, ověřovalo závislost proudu na vzdálenosti. Na tyči byly upevněné měděné proužky, každá ve vzdálenosti 1 cm. Po připevnění elektrod na proužky bylo nutné počkat 1 minutu, aby došlo k ustálení proudu. Napětí bylo nastaveno na 5 kV. Poté se postupně odečítaly hodnoty a zaznamenávaly do tabulky 4.2.

**Tab. 4.2:** Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.22 – vytvrzený stav

s [cm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I [ $\mu$ A]	2100	18	11,4	4	2	1,1	0,7	0,4	0,3	0,2

Z naměřených hodnot je vykreslen graf (viz. Obr. 4.5). Zde je vidět výrazný pokles proudu mezi první a druhou měřenou elektrodou. Hodnota se zde snížila více než 115x.

**Obr. 4.5:** Polovodivá páska Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.22 ve vytvrzeném stavu – závislost proudu na vzdálenosti

#### 4.2 Polovodivá páska Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.22 – nevytvrzený stav

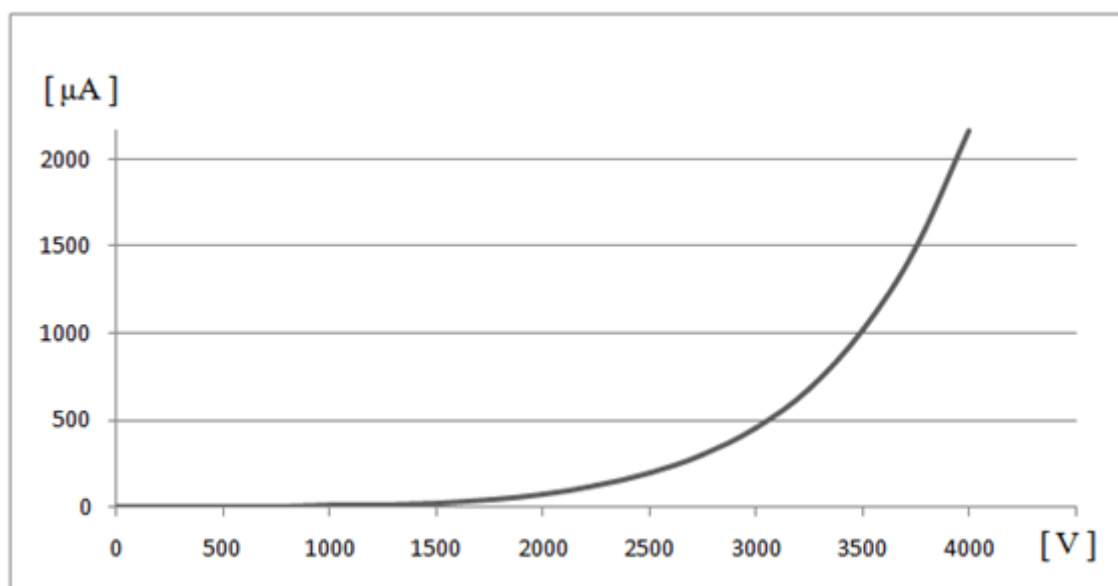
Na dalším ze vzorků, které jsem měl k dispozici, bylo navinutá polovodivá páska Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.22 v nevytvrzeném stavu. Měřící rozsah napětí zde byl od 0 do 4 kV. Větší rozsah nebyl možný, protože jsme byli limitováni zdrojem napětí. Naměřené údaje jsou zaznamenány v tabulce 4. 3.[5]

**Tab. 4.3:** Polovodivá páska Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.22  
v nevytvrzeném stavu – napěťová závislost proudu

U [V]	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
I [ $\mu$ A]	0	0,2	1	3	6,6	13,6	25,2	44,5	74,2

U [V]	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000
I [ $\mu$ A]	119,8	196,1	302	455	680	1020	1480	2160

Polovodivá páska ve vytvrzeném stavu je méně vodivá než ve stavu nevytvrzeném. Výsledný graf je na obrázku 4.6.

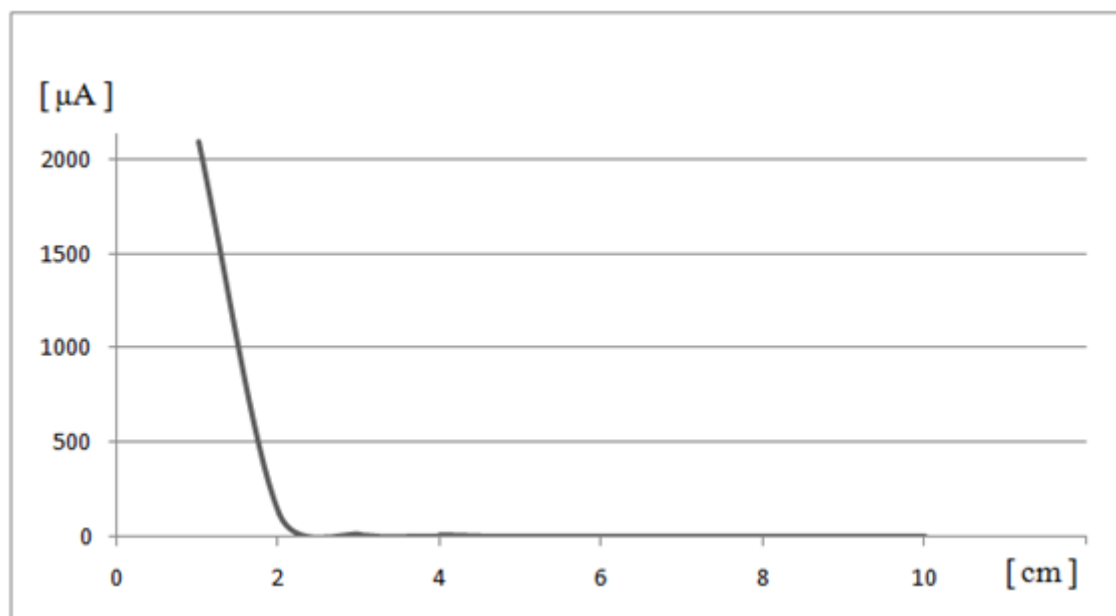


**Obr. 4.6:** Polovodivá páska Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.22  
v nevytvrzeném stavu

V tabulce 4.4 jsou výsledné hodnoty z měření, při kterém jsme ověřovali závislost proudu na vzdálenosti při 4 kV. Zde opět můžeme vidět velký pokles proudu mezi prvním a druhým centimetrem. Hodnoty ve vzdálenosti 5 cm a více jsou téměř zanedbatelné. Graficky jsou tyto hodnoty vykresleny na obrázku 4.7.

**Tab. 4.4:** Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.22 – nevytvrzený stav

s [cm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I [ $\mu$ A]	2160	21	11,6	3,4	1,6	0,7	0,5	0,4	0,2	0,1

**Obr. 4.7:** Polovodivá páska Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.22 v nevytvrzeném stavu – závislost proudu na vzdálenosti

### 4.3 Polovodivá páska Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.31 – vytvrzený stav

Poslední měření probíhalo na vzorku s páskou Corona Shield SC 217.31 ve vytvrzeném stavu. Na tomto vzorku bylo zajímavé, že měděné proužky byly ve vzdálenosti 2 cm. Hlavně proto jsou, v porovnání s předchozími vzorky, hodnoty proudu velmi malé (viz. Tab. 4.5). Až při napětí 1250 V bylo možné naměřit nějakou hodnotu. [5]

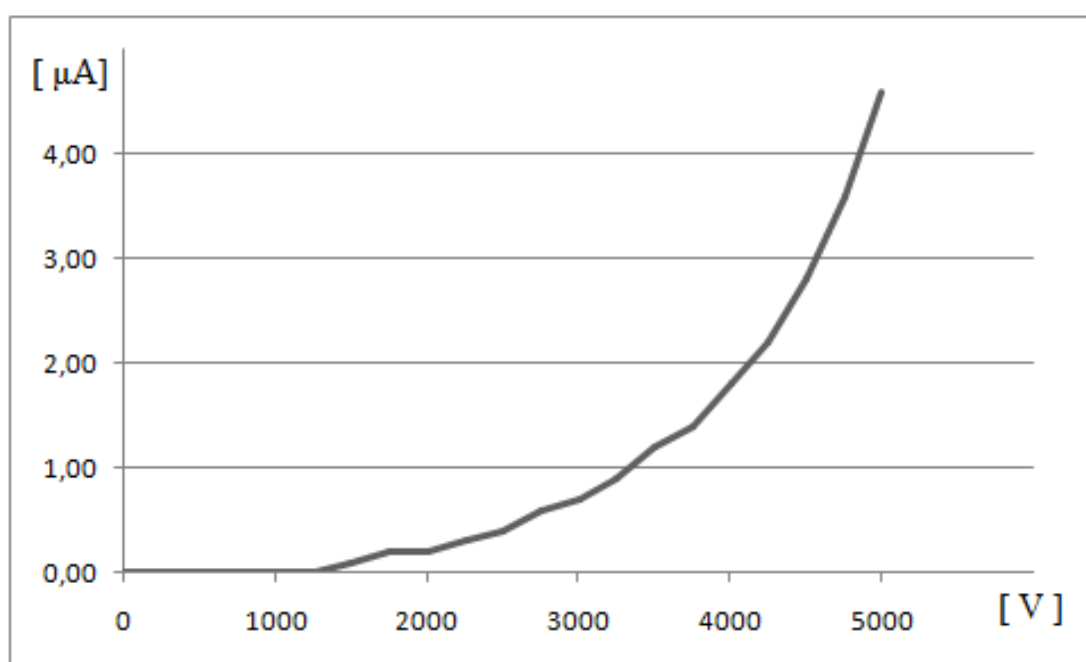
Dle normy SIB 14 – 07 by tato polovodivá páska měla být méně vodivá než Corona Shield SC 217.22.

**Tab. 4.5:** Polovodivá páska Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.31 ve vytvrzeném stavu – napěťová závislost proudu

U [V]	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500
I [ $\mu$ A]	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4

U [V]	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500	4750	5000
I [ $\mu$ A]	0,6	0,7	0,9	1,2	1,4	1,8	2,2	2,8	3,6	4,6

Na obrázku 4.8 je vykreslena křivka proudu v závislosti na zvyšujícím se napětí.



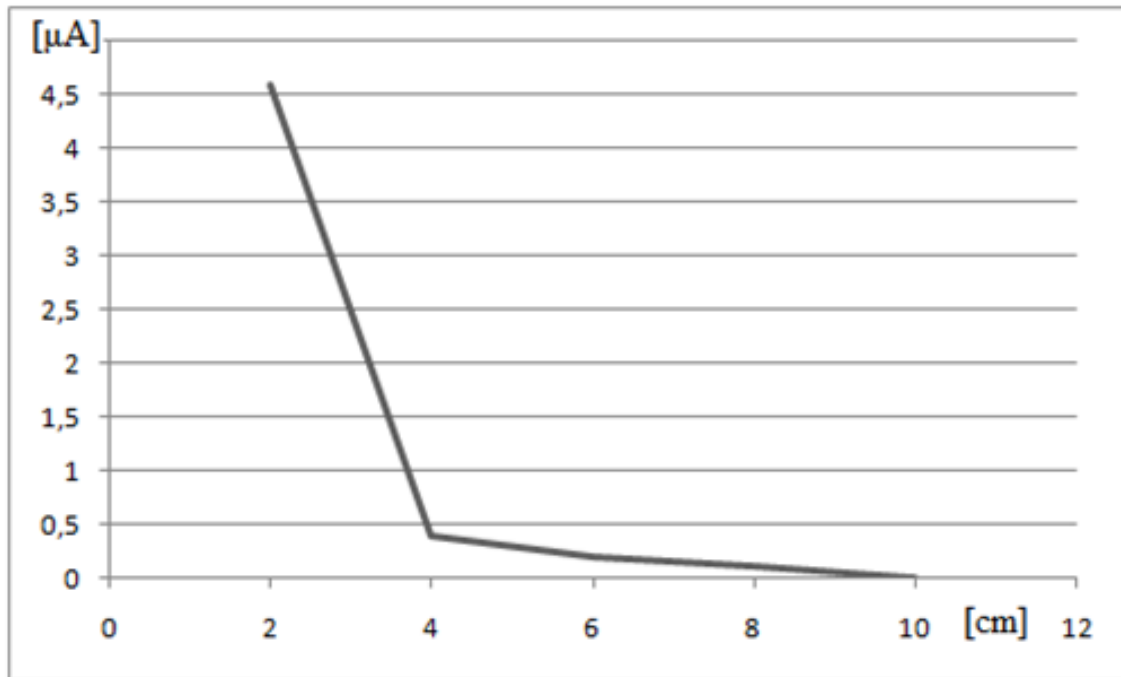
**Obr. 4.8:** Polovodivá páska Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.31 v nevytvrzeném stavu

Jelikož tento poslední vzorek měl měděné proužky ve vzdálenosti 2 cm od sebe, jsou hodnoty v tabulce 4.6 velmi malé, téměř zanedbatelné. V porovnání s prvním vzorkem, který byl také měřen při 5 kV, je hodnota proudu ve dvou centimetrech poloviční.

**Tab. 4.6:** Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.31 – vytvrzený stav

s [cm]	2	4	6	8	10
I [ $\mu$ A]	4,6	0,4	0,2	0,1	0

Na posledním grafu (Obr. 4.9) je křivka zobrazující závislost proudu na vzdálenosti při 5 kV.



**Obr. 4.9:** Polovodivá páska Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.31 ve vytvrzeném stavu – závislost proudu na vzdálenosti

#### 4.4 Zhodnocení výsledků měření

Měřením jsem ověřil vliv různých typů polovodivých ochran na rozložení napětí a také závislost proudu na různě vzdálených elektrodách při stálém napětí. Každý ze vzorků měl jiné vlastnosti a parametry. Jako vzorky byly použity různé typy pásek, které měly také různě vzdálené elektrody. Všechny vzorky ale prokázaly závislost proudu na vzrůstajícím napětí. Dle interní normy Von Roll Isola by křivka závislosti prvního vzorku měla růst výrazně rychleji, než jsem naměřil při tomto experimentu. Všechny vzorky se spíše podobají pásce typu Corona Shield SC 217.21, která má dle normy SIB 14 – 07 největší rozptyl hodnot.

Polovodivá páska Corona Shield SC 217.22 ve vytvrzeném stavu, která byla na prvním vzorku, vykazuje menší rezistivitu než ve stavu vytvrzeném. Třetí vzorek nemůžeme správně určit, jelikož jeho elektrody se nacházely ve vzdálenosti 2 cm, a ne jako u předchozích vzorků v 1 cm. Dle předpokladu by hodnoty rezistivity zařadily tento třetí vzorek mezi první a druhý.

Závislost proudu na vzdálenosti při konstantním stejnosměrném napětí je patrná na všech vzorcích. S narůstající vzdáleností výrazně klesá hodnota proudu. Největší rozdíl je vždy mezi první a druhou hodnotou.



## Závěr

Účelem této diplomové práce bylo zhodnocení vlivu polovodivých ochran, které jsou užívány v točivých elektrických strojích. Dále je zde provedena rozvaha pro optimální aplikaci polovodivých ochran a ověření jejich závislosti na přiloženém napětí.

Polovodivé pásy jsou aplikovány na výstupu vinutí z drážky a slouží k rovnoměrnému rozložení elektrického potenciálu. Všechny pásy použité pro experiment byly od společnosti Von Roll Isola, ale každá z pásek měla rozdílné vlastnosti v závislosti na přiloženém napětí. Vzorky se lišily typem, stavem vytvrzení a ve vzdálenostech připojených elektrod. U všech ale byla prokázána závislost proudu na vzrůstajícím napětí. Zkoušky byly prováděny dle interní normy společnosti Von Roll Isola SIB 14 – 07, protože zatím neexistuje žádná jednotná evropská norma. K ověření vlivu polovodivých ochran na rozložení napětí byla použita V – A metoda, kde maximální použité stejnosměrné napětí bylo 5 kV. Rozložení napětí by mělo být co nejrovnoměrnější.

Ze zkoumaných vzorků v této práci se na vysokonapěťové stroje nejvíce hodí polovodivá páska Von Roll Isola – Corona Shield SC 217.22 ve vytvrzeném stavu, kvůli svému rovnoměrnému rozložení elektrického potenciálu. Páska by měla být navinuta s polovičním překrytím alespoň do vzdálenosti 15 cm od výstupu vinutí z drážky. To je ověřené i z praxe. U vysokonapěťových točivých strojů je důležité vybrat správný druh polovodivých ochran. Pro optimální ochranu může být s páskou aplikován také polovodivý lak (např. typu Corona Shield 8001), a to zejména na konci ovinu pásy.

Také zkoušky závislosti proudu na vzdálenosti prokázaly předpokládaný výsledek, a to, že při konstantním stejnosměrném napětí hodnoty proudu s narůstající vzdáleností výrazně klesají.

Polovodivé ochrany jsou velmi důležitou součástí točivých strojů. Účelem polovodivých ochran je rozložení napětí na výstupu vinutí z drážky. Na polovodivých ochranách závisí životnost izolace.

## Použitá literatura a další zdroje

- [1] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Plzeň: Nakladatelství BEN, 2006. ISBN 80-7300-189-6
- [2] BOUDA, Václav. *Materiály pro elektrotechniku*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000, 226 s. ISBN 80-010-2232-3
- [3] VOŽENÍLEK, Ladislav. *Kurs elektrotechniky*. Praha: Nakladatelství SNTL, 1976.
- [4] Stone, Greg C., Boulter, Edward, Culbert, Ian, Dhirani, Hussein: *Electrical Insulation for Rotating Machine: Design, Evaluation, Aging, Testing and Repair*. Toronto: A JOHN WILEY & SONS, INC., 2004
- [5] Vonroll [online]. 2012 [cit. 2012-4-10]. Dostupné z WWW: <www.vonroll.com>
- [6] VON ROLL ISOLA. *Anti Corona: katalogové listy*. CH-4226. Breitenbach
- [7] Isovolta [online]. 2012 [cit. 2011-4-10]. Dostupné z WWW: <www.isovolta.com>
- [8] ISOVOLTA AG. *Technische information: katalogové listy*. Weiner Neudorf, 1996
- [9] *Krempel-Group* [online]. 2012 [cit. 2012-4-10]. Dostupné z WWW: <www.krempel-group.com >
- [10] KREMPEL GROUP. *Flexible electrically conductive materials: katalogové listy*. Wein
- [11] KUČERA, J; HAPL, J. *Vinutí elektrických točivých strojů*. Praha: SNTL, 1959
- [12] *Web zdarma* [online]. 2012 [cit. 2012-4-10]. Elektornika 1. Dostupné z WWW: <http://zkrat.wz.cz>
- [13] *The electrical engineering section : Global Spec* [online]. 2012 [cit. 2012-4-10]. Dostupné z WWW: <http://cr4.globalspec.com/thread/66789/Ground-wall-insualtion>
- [14] HRUŠKOVIC, L. *Elektrické stroje*. Bratislava: Tlač vydavatelstvo STU, 1999. ISBN 80-227-1249-3
- [15] PETROVIČ KOPYLOV, Igor. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1988

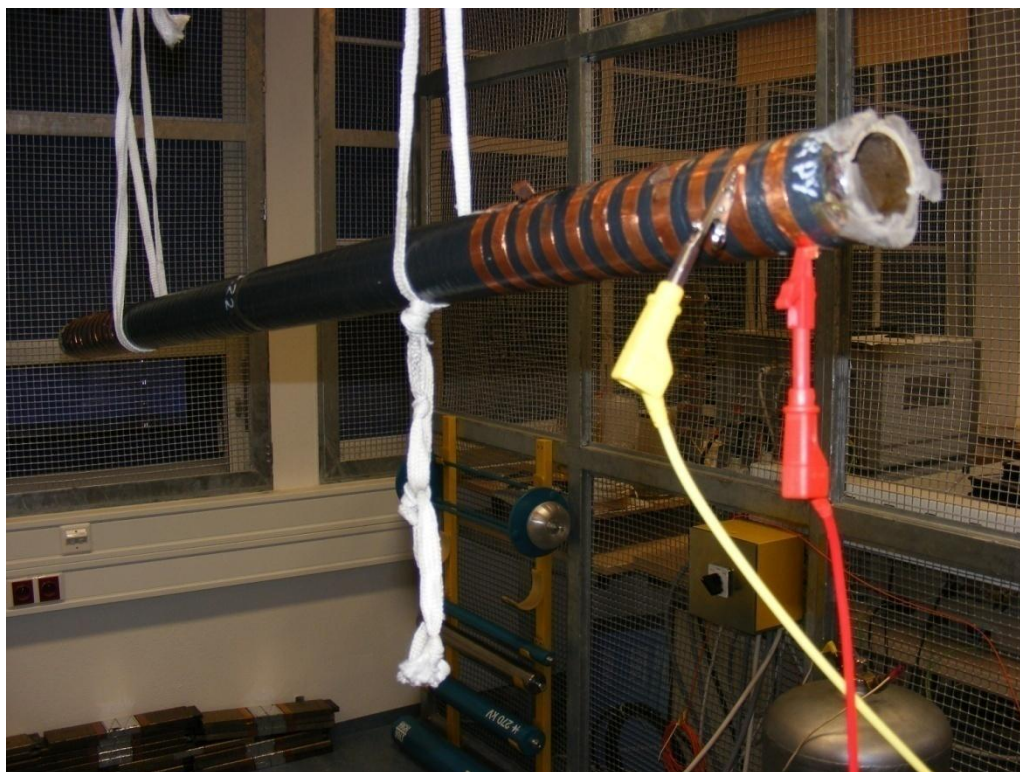
- [16] MULAMUD, R., et al. *Anti-Corona Protection of the High Voltage Stator Windings and Semi-Conductive Materials for Its Realization*, IEEE, 2010
- [17] HAVELKA, J; DRESER, J; JÍLEK, V. *Motáž, údržba a opravy elektrických strojů točivých*. Praha: STROM, 1995
- [18] BAŠTA, J; CHLÁDEK, J; MAYER, I. *Teorie elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1968
- [19] MULAMUD, R., et al. *The development of Semiconducting Fibreglass Tapes LSP-0, their Properties, and their use for Anti-Corona Protection of High Voltage Windings*. IEEE, 2010
- [20] VEVERKA, A. *Technika vysokého napětí*. Praha: SNTL, 1978
- [21] KRPAL, Ondřej. *Výbojová činnost ve vinutí synchronního stroje a její eliminace*. Plzeň 2011. Písemná práce ke státní zkoušce. Západočeská univerzita v Plzni – Fakulta elektrotechnická
- [22] ALLISON, J.A., *Understanding the need for Anti-corona materials in High Voltage Rotating*. IEEE, 2010
- [23] BRÜTSCH, R., T HILLMER. *Corona Protection in Rotating High Voltage Machines*. IEEE. Berlin, 2006
- [24] SEQUENZ, Heinrich. *Technologie vinutí elektrických strojů točivých*. Praha: SNTL, 1980
- [25] TRNKA, P. *Problematika ochranných vrstev vinutí elektrických točivých strojů při pulzním*. Západočeská univerzita v Plzni, 2008
- [26] SHARIFI, E, S JAYARAM a E. A. CHERNEY. *A Coupled Electro-thermal Study of the Stress Grading System of Medium Voltage Motor Coils when Energized by Repetitive Fast Pulses*. IEEE, 2010
- [27] WHEELER, J.C.G., A. M. GULLY, F.A. PERROT a A.E. BAKER. *Thermal Performance of Stress Grading Systems for Converter-Fed Motors*. IEEE, 2007
- [28] SHARIFI, E, S JAYARAM a E. A. CHERNEY. *Temperature and Electric Field Dependence of Stress Grading on Form-wound Motor Coils*. IEEE, 2010

- [29] SIB 14-07. *Halbleitende Glimmschutzbander: Strom-Spannungverlauf vom Glimmschutzbelag*. Von Roll Isola, 1978
- [30] [Http://www.hiwtc.com](http://www.hiwtc.com) [online]. 2011 [cit. 2012-4-10]. Anti-Corona tape. Dostupné z : <<http://www.hiwtc.com/products/anti-corona-tape-6408-79459.htm>>
- [31] [www.alibaba.com](http://www.alibaba.com). [online]. 2012 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://www.alibaba.com/showroom/semi-conductive-tape.html>

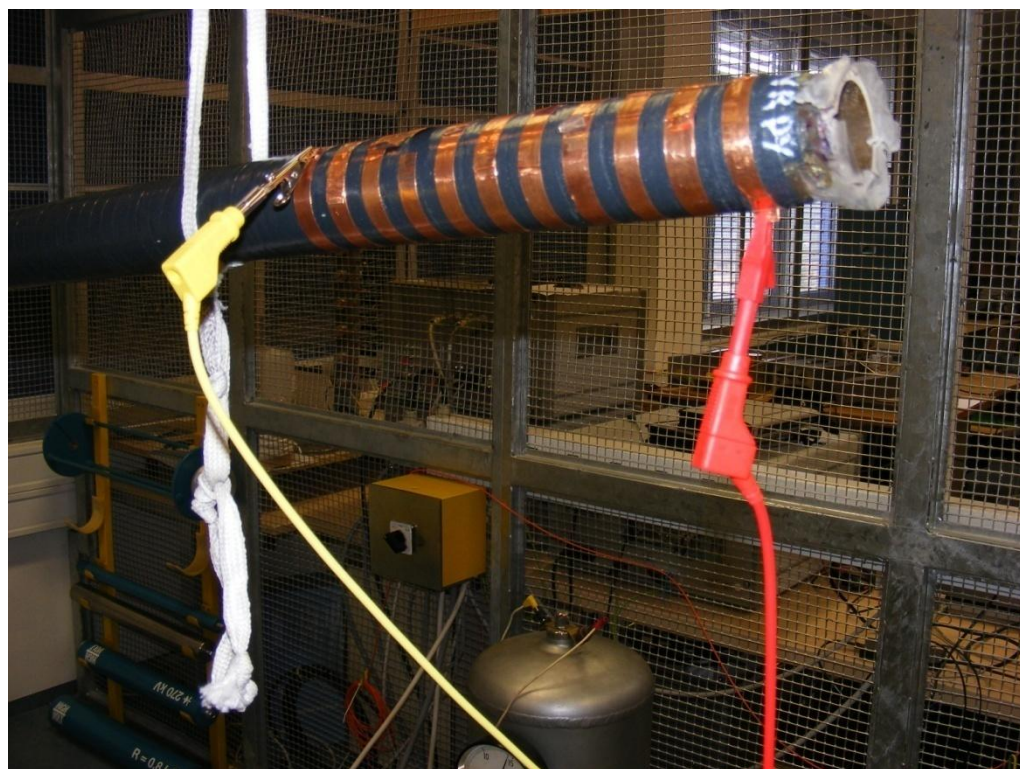
## Příloha A: Fotodokumentace měření



Obr.1 Zavěšený zkušební vzorek



Obr.2 Detail vzorku pro měření V-A charakteristiky



Obr. 3 Detail vzorku – elektrody ve vzdálenosti 10cm