

RESIN RICH IZOLAČNÍ SYSTÉM

pro vysokonapěťová vícezávitová cívková vinutí
točivých strojů třídy F (155 °C)

Úvod

Akciová společnost COGEBI a.s., člen skupiny ELINAR, je tradičním výrobcem vysokonapěťových izolačních materiálů založených na zpracování vlastního slídového papíru **Remika®**. Uvedené varianty řešení izolačních systémů statorových vinutí vycházejí z mnohaletých zkušeností výroby a provozu točivých elektrických strojů, v nichž byly materiály z produkce COGEBI aplikovány, a jsou použitelné nejen v podmínkách opravárenských závodů, ale jsou vhodné i pro nové stroje velkých jednotkových výkonů a špičkových parametrů. Společnost je certifikována podle platných standardů EN ISO 9001 a EN ISO 14000.

Přehled materiálů pro vícezávitová cívková vinutí

Izolace vodičů – závitová izolace:

Kalastik® 45.000, Kalastik® 45.001, Kalastik® 45.003, Kalastik® 45.030

Konsolidace vodičů:

Eltacord® 70.000, Eltacord® 70.001, Remikakit® 35.000, Remikakit® 35.004, Relanex® 45.018

Hlavní izolace drážkové části:

Relastik® 45.013, Relastik® 45.006, Relastik® 45.036, Relastik® 45.037,
Relanex® 45.011, Relanex® 45.031, Relanex® 45.033

Izolace čel:

Remikaflex® 45.005, Relastik® 45.007, Relastik® 45.006, Relastik® 45.036, Relastik® 45.037,
Remikaflex® 45.021, Remikaflex® 45.022,

Protikoronová ochrana:

Eltacarb® 73.000, Eltacarb® 73.001, páska na bázi SiC s epoxidovým pojivem v B-stavu

Ochranné pásy:

Eltacord® 70.000, Eltacord® 70.001, Eltacord® 70.002

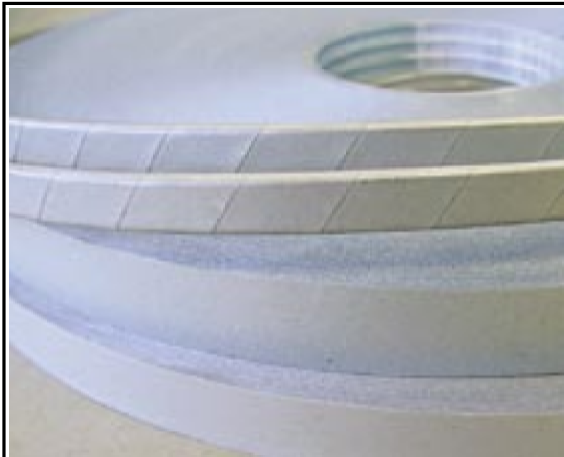
RESIN RICH IZOLAČNÍ SYSTÉM

pro vysokonapěťová vícezávitová cívková vinutí
točivých strojů třídy F (155 °C)

Izolace vodičů – závitová izolace vícezávitových cívek

Při volbě typu izolovaného vodiče pro vícezávitová cívková vinutí se zohledňuje zvolená technologie výroby cívek, zkušební mezizávitové napětí, elektrické a tepelné namáhání při provozu včetně způsobu napájení stroje. Zvýšené nároky na závitovou izolaci jsou kladeny zvláště u strojů napájených z frekvenčních měničů. U vícezávitových cívkových vinutí je obvyklé, že izolace vodiče je navržena jako závitová izolace. Cívky jsou vinuty z dodaného izolovaného vodiče bez nutnosti vkládání dodatečné závitové izolace.

Pro vysokonapěťová cívková vinutí jsou obvykle používány smaltované nebo holé ploché vodiče ovinuté jednou nebo více vrstvami pásky typu **Kalastik®**. Páska typu **45.030** tloušťky 0,09 mm je vyrobena z kalcinovaného slídového papíru spojeného s jednou vrstvou PET fólie modifikovanou epoxidovou pryskyřicí. Je zvláště vhodná v případech, kdy je tepelně exponovaná izolace vodiče (po konsolidaci svazku vodičů v drážkové části) namáhána ohybem při roztažení čel cívky do konečného tvaru. V případě potřeby dosažení menšího přírůstku



tloušťky izolace vodiče lze použít pásku typu **45.000** o tloušťce 0,06 mm nebo 0,07 mm. Páska typu **45.001** je vyrobena ze slídového papíru, pojiva a PET fólie s adhezí vrstvou. Adhezí vrstva umožňuje rychlou konsolidaci základů cívky. Páska typu **45.003** je tvořena kalcinovaným slídovým papírem spojeným oboustranně s dvěma vrstvami PET folie modifikovanou epoxidovou pryskyřicí a je jednostranně opatřena adhezí vrstvou umožňující rychlou konsolidaci základů cívky. Pásky typu **Kalastik®** musí být navinuty stranou slídového papíru směrem k povrchu vodičů (v případě pásky **45.003** vně stranou s adhezí vrstvou).

Dále jsou uvedeny tři konkrétní příklady řešení závitové izolace s páskami typu **45.030**, **45.001** tloušťky 0,09 mm pro jmenovitá sdružená napětí 6kV a 11kV.

6 kV	Holý vodič je izolovaný dvěma vrstvami pásky ovinutými na styk (0% překrytí), oviny obou vrstev jsou vzájemně posunuty o 50%.
11 kV	Holý vodič je izolovaný třemi vrstvami pásky ovinutými na styk, oviny jednotlivých vrstev jsou postupně vzájemně posunuty o 33%.
11 kV	Smaltovaný vodič (tloušťka smaltové vrstvy 0,07 mm) je ovinutý jednou vrstvou pásky s 50% překrytím.

RESIN RICH IZOLAČNÍ SYSTÉM

pro vysokonapěťová vícezávitová cívková vinutí
točivých strojů třídy F (155 °C)

Pro nízko napěťová vinutí se jako izolace vodičů používá jedna vrstva na styk tenké polyesterové pásky (0,03 mm) a jedna vrstva pásky **Kalastik®**. Oviny obou vrstev jsou vzájemně posunuty o 50 %.

Šířka použité pásky závisí na průřezu vodiče. Zjednodušeně lze tento vztah formulovat následovně:

Do průřezu 8 mm ² :	páska šířky 8 mm
Od 8 mm ² do 16 mm ² :	páska šířky 12 mm
Pro větší průřezy vodičů:	páska šířky 15 mm nebo širší.

Konsolidace vodičů vícezávitových cívek

Při návrhu cívky je třeba zohlednit fakt, že při konsolidaci základů rovných částí cívek dochází ke stlačení izolace vodičů (např. změna tloušťky pásky z 0,09 mm na 0,07 mm).

Konsolidaci rovných (drážkových) částí lze provést plošným lisováním po zhotovení cívek ve tvaru vlásenky popř. ve tvaru oválu. V jediném pracovním kroku se takto může upravit několik cívek najednou z obou stran. Tento způsob je zvláště výhodný, následuje-li po konsolidaci strojní ovíjení pásky hlavní izolace (tzv. 2D-technologie). Prostorové tvarování čelních partií se provádí na kompletně naizolované cívice.

Jiný způsob konsolidace je oddělené lisování každé drážkové části cívky až po tvarování vinutí (tzv. 3D-technologie). V tomto případě je hlavní izolace aplikována na kompletně vytvarovanou cívku. Pokud je jako izolace vodičů použita páska s adhezní vrstvou, není nutné v případě jednořadových (single-stack) cívek aplikovat další konsolidační materiál (předimpregnovaná páska nebo lak). Technologické stažení svazku vodičů lze provést řídkým ovínem pásky **Eltacord®**, typu **70.000**, nebo **70.001**. Také lze v některých případech stažení provést řídkými oviny sklo-slídové pásky **Relanex® 45.018** (tloušťka 0,12 mm).

Jako separátor zabraňující při lisování slepení cívky a formy (forma musí být suchá a čistá!) slouží páska nebo folie **Eltafilm® 76.000**. Páska **Eltafilm®** se ovíjí na rovné části cívky jednou vrstvou s 50% překrytím.

RESIN RICH IZOLAČNÍ SYSTÉM

pro vysokonapětová vícezávitová cívková vinutí
točivých strojů třídy F (155 °C)



Pro rychlou konsolidaci se doporučuje následující postup:

- A. v peci nebo jiném vhodném zařízení ohřát cívku na 130 °C, horkou cívku vložit do studeného lisu a aplikovat plný tlak; jakmile teplota cívky klesne pod 80 °C, vyjmout cívku z lisu (je vhodné použít aktivní chlazení lisu); tento proces se používá při konsolidaci několika cívek najednou
- B. vložit jednu rovnou část cívky do horkého lisu (150 °C) a aplikovat plný tlak po dobu cca 5 min (doba závisí na rozměrech

cívkou), vyjmout cívku z horkého lisu a vložit ji do chlazené lisovací formy

Pokud se jako izolace vodičů či závitů použije páska bez adhezní vrstvy, je nutné použít přídatný konsolidační materiál, např. stažení páskou typu **Relanex®** nebo přiložení proužků materiálu **Remikakit® 35.000 (resp. 35.004)**. Aplikace beznosičového tmelu **Remikakit®** na boky základů cívek, zvláště při použití vodičů velkého průřezu, umožní perfektní vyplnění základů cívek, což se pozitivně projeví na elektrických vlastnostech hotové cívky (příznivá napěťová závislost ztrátového činitele, nízká úroveň částečných výbojů). U víceřadých (multi-stacks) cívek je možné k proložení řad použít vertikální separátor **Eltapreg® 75.001**. Rovná část cívky musí být při konsolidaci ovinuta separátorem. Proces konsolidace rovné části cívky se děje v lisu za zvýšené teploty (165 °C) a tlaku. Tento postup je vhodný pro konsolidaci velkých cívek.

Separátor **Eltafilm®** nebo jiný separační film, musí být po skončení procesu konsolidace odstraněn z cívky!

Čela základů cívek u velkých dvoupólových vinutí se obvykle vytvrzují za zvýšené teploty a tlaku. Jako středovou vložku lze použít skleněnou tkaninu impregnovanou epoxidovým pojivem v B-stavu. Jako doplňující konsolidační materiál může být použita páska typu **Relanex®** stejně jako v rovné části.

U vícepólových vinutí nemusí být čela základů cívek vytvrzována zvlášť.

RESIN RICH IZOLAČNÍ SYSTÉM

pro vysokonapětová vícezávitová cívková vinutí
točivých strojů třídy F (155 °C)

Hlavní izolace vícezávitových cívek

Pro malá a střední cívková vinutí se nejčastěji používá diskontinuálně ovíjený a diskontinuálně vytvrzovaný izolační systém. Nejprve se izoluje drážková část, a to páskou nebo fólií. Vytvrzování se provádí v lisu za zvýšené teploty a tlaku. V druhé fázi se izolují čela vinutí, na která se aplikuje jiný typ izolační pásky. Izolace čel se vytvrzuje po navinutí cívek do jha statoru.

Systém zachovává částečnou nebo úplnou flexibilitu čel, vyžaduje však zvýšenou pozornost při realizaci přechodů izolace mezi rovnou částí a čely, aby se zabránilo vzniku dutin v izolační trubce. Výhodou je, že k vytvrzování čel nemusí být použity žádné formy.

Vhodnými materiály pro izolaci rovných částí cívek jsou materiály typu **Relanex® 45.011, 45.031, 45.033** nebo materiály typu **Relastik® 45.006, 45.036, 45.037 a 45.013**. Volba izolačního materiálu závisí na požadovaných konečných vlastnostech izolačního systému (parametry jsou uvedeny v katalogových listech jednotlivých materiálů).

Materiály typu **Relanex®** jsou složeny z kalcinovaného nebo nekalcinovaného slídového papíru spojeného s nosnou skleněnou tkaninou epoxy-novolakovou pryskyřicí v B-stavu. Materiály typu **Relastik®** jsou vyrobeny z kalcinovaného slídového papíru, PET nebo PEN fólie a epoxy-novolakové pryskyřice v B-stavu.

Pro izolaci čel se používají pásky **Remikaflex® 45.005** nebo **Relastik® 45.007** v případě, že není cívka kontinuálně ovíjena stejnou páskou v čelech i rovných částech.

Remikaflex® 45.005 je velmi flexibilní materiál vyrobený z kalcinovaného slídového papíru a modifikované epoxidové pryskyřice v B stavu. Materiál je oboustranně polepen polyesterovou fólií.

Relastik® 45.007 je materiál vyrobený z kalcinovaného slídového papíru spojeného s teplem smrštitelnou PET fólií epoxidovou pryskyřicí v B-stavu.

Počet vrstev izolace čel závisí na požadované elektrické pevnosti a mechanickém namáhání izolace čel. V běžné praxi je počet vrstev izolace čel cca 40÷50% počtu vrstev izolace v drážkové části. Při ovíjení musí být dodrženo dostatečné předpětí pásky, aby se minimalizoval vznik nežádoucích nerovností (vrásky, přehyby...).

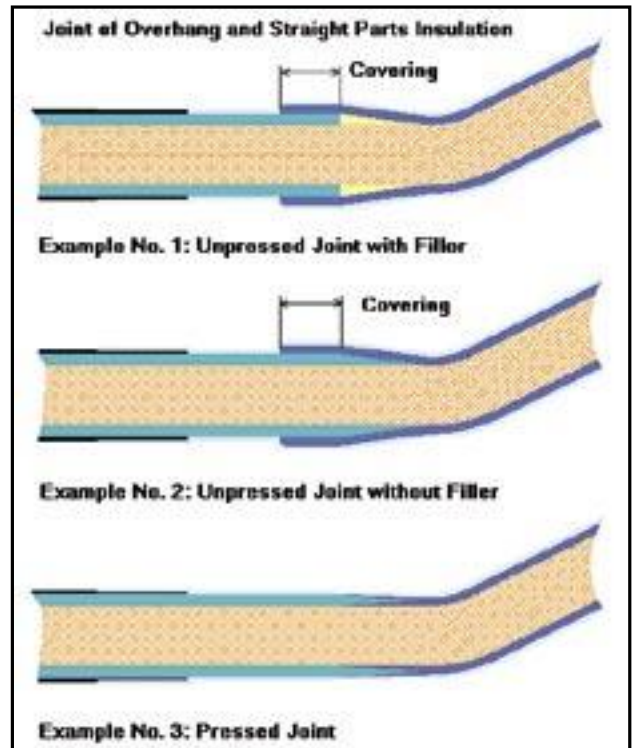
Jestliže se izolování čel provádí po vytvrzení izolace rovných částí cívek, musí izolace čel dostatečně překrývat izolaci rovných částí cívky. Doporučené hodnoty překrytí, podle jmenovitého napětí, jsou 25 mm pro 3kV, 40 mm pro 6kV a 110 mm pro 11kV. Před izolováním čel je nutné důkladně očistit zbytky vyteklé pryskyřice z předcházejícího tvrzení drážkové izolace. Výhodné je použít např. bavlněnou pásku, která absorbuje vytékající pryskyřici při tvrzení rovné části cívky v lisu. Někdy se konce izolace rovné části vyplňují plnivem (např. epoxidová pryskyřice zahuštěná izolačním plnivem – příklad číslo 1). Vhodná je aplikace takového typu epoxidové pryskyřice, který zajistí dobré spojení mezi izolacemi čel a rovných částí cívky.

RESIN RICH ISOLAČNÍ SYSTÉM

pro vysokonapěťová vícezávitová cívková vinutí
točivých strojů třídy F (155 °C)

Jestliže se izolování čel provádí před lisováním drážkové izolace, aplikuje se nejprve jedna nebo dvě vrstvy izolace čel. Následuje izolování drážkové části. Nakonec se izolují čela zbývajícím počtem vrstev izolace čel. V místech přechodu mezi izolací čela a izolací drážkové části nesmí být celková tloušťka izolace větší než požadovaná tloušťka izolace drážkové části. Přechodové části jsou vytvrzovány společně s izolací rovné části cívky v přípravku/lisu za zvýšené teploty a tlaku. Je-li přechodová část provedena správně, vytékající pryskyřice nateče do izolace čel, aniž by se zvýšila celková tloušťka izolace v tomto místě (příklad č. 3). Nedoporučuje se umístit místo spojení do drážky statoru nebo jej překrýt protikoronovou ochranou izolace drážkové části cívky!

Pro uvedené příklady diskontinuálního izolačního systému je na obrázku vyznačeno rozvržení protikoronových ochranných drážkové části izolace (černá) a izolace čel na výstupu z drážky (šedá) vzhledem k pozici spoje/přechodu.



Pro střední a velká cívková vinutí je vhodný kontinuálně ovíjený a diskontinuálně vytvrzovaný izolační systém. Celé cívky (drážkové části a čela) se izolují jedním typem izolační pásky. Nejprve se ovíjí pouze drážková část cca 30÷40% z celkově požadovaného počtu vrstev. Potom se kontinuálně doizoluje celá cívka zbývajících cca 60 ÷ 70% z celkově požadovaného počtu vrstev. Rovná část cívky se vytvrzuje v lisu za zvýšené teploty a tlaku. Aby spolu s rovnou částí mohla být vytvrzena i část izolace čel, je vhodné použít jednoduché přídavné lisovací formy (nástavce). Izolace čel se vytvrzuje po vložení celých cívek do jha statoru.

Tento izolační systém je vhodný pro vinutí se jmenovitým napětím až do 11 kV, vyznačuje se dobrou homogenitou hlavní izolace v místech výstupu cívek z drážek statoru. Výhodou je také relativně levná a jednoduchá forma potřebná k vytvrzení hlavní izolace v ohybech do čel cívek. Vhodnými izolačními materiály jsou pásy typu **Relastik® 45.006, 45.036, 45.037**.

RESIN RICH IZOLAČNÍ SYSTÉM

pro vysokonapětová vícezávitová cívková vinutí
točivých strojů třídy F (155 °C)

Ovíjení hlavní izolace



Páska bývá aplikována ručním nebo strojním ovíjením, obvykle s 50% překrytím. Jestliže se páska použije i na čela, požadované překrytí musí být dodrženo na větším poloměru ohybu. Na menším poloměru ohybu je skutečné překrytí větší. Je-li počet vrstev pásky v čelech zredukován, přechodová část izolační trubky musí být realizována plynule. Délka přechodové části závisí na tloušťce izolace, na šířce pásky a na požadovaných vlastnostech izolace. Přechod tloušťky izolace se vždy realizuje vně drážkové části (nejčastěji v čelech). Během ovíjení je vhodné zachovávat ovíjecí tah cca 30 N/cm v případě pásky s nosnou skleněnou tkaninou. V případě

nosné PET nebo PEN folie se doporučuje ovíjet pásky tahem cca 20 N/cm. K dosažení lepších konečných vlastností izolace se doporučuje ovíjení v jednom směru (posuv ovíjecí hlavy).

Počet vrstev izolace **N** lze stanovit takto:

$$N = \frac{d \cdot (1 - p)}{t \cdot (1 - c_p)}$$

<i>d</i>	tloušťka izolace po lisování (konečná tloušťka)
<i>t</i>	jmenovitá nebo skutečná tloušťka použité izolační
<i>p</i>	typ překrytí (1/2, 1/3, 0...)
<i>c_p</i>	stlačení

V následující tabulce jsou uvedeny doporučené hodnoty stlačení pro jednotlivé izolační materiály. Tyto hodnoty jsou platné pro případy měření tloušťky pásky v souladu s normou IEC 371-2. Při měření tloušťky pomocí nestandardních metod se musí hodnoty stanovení stlačení zrevidovat.

Materiál	Relanex® 45.011 / 45.031	Relanex® 45.033	Relastik® 45.006 /45.036 /45.037
Stlačení	0,22 ÷ 0,27	0,25 ÷ 0,30	0,18 ÷ 0,23

RESIN RICH IZOLAČNÍ SYSTÉM

pro vysokonapět'ová vícezávitová cívková vinutí
točivých strojů třídy F (155 °C)



Když je hlavní izolace ovíjena diskontinuálně a rovněž diskontinuálně tvrzena, bývá drážková část ovinuta ručně fólií. Aby se zabránilo tvoření vrásek, které by mohli způsobit nízkou hodnotu průrazného napětí a vysokou hodnotu $\tan \delta$, fólie musí být při navíjení dostatečně a rovnoměrně napínána. Proto je výhodné fólii nejprve navinout na (dřevěný) hranol nebo trubku pravoúhlého průřezu. Tímto se dosáhne velké a rovnoměrné síly napínání. Krátké drážkové části cívek lze ovíjet fólií i strojně. Obvyklá hodnota stlačení izolační fólie je 15–18%.

Počet vrstev fólie **N** na rovné části cívky lze spočítat dle následujícího vzorce:

$$N = \frac{d}{t \cdot (1 - c_p)}$$

d	konečná tloušťka izolace
t	jmenovitá či reálná tloušťka použitého izolačního materiálu
c_p	stlačení

Aby se dosáhlo postupného přechodu mezi izolací drážkové části a izolací čel, doporučuje se před ovíjením nastříhat fólii na lichoběžníkový tvar. Teoretickou výšku lichoběžníku L_w lze vypočítat dle vzorce:

$$L_w = N \cdot (C + \pi \cdot t \cdot N)$$

N	počet vrstev
t	tloušťka materiálu
C	obvod průřezu cívky

Z důvodu toho, že ohyby fólie nekopírují přesně kruhový tvar na hranách základů cívek, bude skutečná výška lichoběžníku kratší než teoretická. Ovíjení fólie se začíná ze strany širší základny lichoběžníku a stranou slídového papíru směrem k základu cívky.

RESIN RICH IZOLAČNÍ SYSTÉM

pro vysokonapětová vícezávitová cívková vinutí
točivých strojů třídy F (155 °C)

Vytvrzování hlavní izolace

Před vytvrzováním se lisovaná část cívky musí ovinout separačním materiálem. Jako separátor se používá páska **Eltafilm® 76.000** (0,05 x 25 mm), která se ovíjí na rovnou část cívky jednou vrstvou s 50% překrytím. Aby se zabránilo znečištění lisovací formy, je vhodné aplikovat ještě jednu vrstvu materiálu **Eltafilm® 76.000** ve formě fólie. Toto uspořádání separačního materiálu umožňuje po ukončení vytvrzovacího procesu odstranit vyteklou pryskyřici na hranách pouhým odvinutím pásy **Eltafilm**.

Cívka se vloží do přehřátého lisu (cca 60 °C) a aplikuje se malý tlak. Poté se teplota zvýší na hodnotu 95÷100 °C. Po dosažení této teploty se může aplikovat plný tlak. Jakmile se dosáhne plného tlaku, udržuje se uvedená teplota v lisu ještě několik minut (tzv. "prodleva").

Potom se nastaví teplota na 165 °C. Poté, co této teploty dosáhne i izolace, pokračuje se ve vytvrzování po dobu 1 hod při teplotě 165 °C. Po vytvrzení se lis ochladí na 60 °C a cívka se vyjme z lisu.

Způsob vytvrzování závisí na rozměrech tyčí (cívek), na rozměrech lisovacího zařízení, na rychlosti ohřevu apod. Způsob tvrzení lze ověřit např. měřením skutečné teploty při vytvrzování zkušební cívky. Měřením ztrátového činitele během celého procesu vytvrzování lze optimalizovat celkovou dobu vytvrzování.

Uvedený způsob vytvrzování je vhodný především pro větší cívky, pro menší může být proces vytvrzování jednodušší (např. zakládání cívek do horkého lisu 165 °C a vyjímání vytvrzených cívek bez chlazení).

Tloušťka hlavní izolace

Hodnoty konečné tloušťky hlavní izolace drážkové části pro běžné třífázová vinutí jsou uvedeny v následující tabulce. Tyto hodnoty nezahrnují tloušťku ochrany proti koruně. Při volbě tloušťky izolace se zohledňují technologická způsobilost pracovníků, provozní a zkušební požadavky. Skutečná tloušťka izolace nemusí tudíž odpovídat hodnotám v tabulce, může se odlišovat v obou směrech.

Jmenovité napětí	3 kV	6 kV	10 kV	13,8 kV
Tloušťka izolace	1.0 mm	1.3 mm	2.0 mm	3.0 mm

RESIN RICH IZOLAČNÍ SYSTÉM

pro vysokonapěťová vícezávitová cívková vinutí
točivých strojů třídy F (155 °C)

Protikoronová ochrana

K ochraně proti koróně se používá vodivá polyesterová netkaná textilie **Eltacarb® 73.000** nebo **73.001**. Pokud je hlavní izolace zhotovena z materiálu **Relanex®** nebo z pásky **Relastik®** aplikuje se páska (1 vrstva s 50% překrytím) nebo folie (1 vrstva) **Eltacarb® 73.000**. Po lisování je **Eltacarb®** neoddělitelně spojen s cívkou pomocí pryskyřice vytékající z hlavní izolace. Je-li pro hlavní izolaci použita folie **Relastik® 45.013**, kde PET fólie nedovolí při lisování propustit na svůj vnější povrch pryskyřici, je nutné použít **Eltacarb® 73.001**, který obsahuje epoxidové pojivo v B-stavu. Řešením je rovněž dodatečné přetření izolační trubky vhodným epoxidovým lakem před aplikací protikoronové vrstvy. Použití předimpregnované pásky typu **73.001** lze doporučit vždy v případě, že je použit jako hlavní izolace materiál s nosnou PET/PEN folií.

Výsledná tloušťka ochrany proti koróně (1 x 50% překrytí) po lisování je 0,2 mm. Tato hodnota musí být respektována při počátečním návrhu izolačního systému. Povrchový odpor po lisování je 100÷1000 Ω/ . Vodivá vrstva musí na obou koncích přesahovat drážku stroje. Délka tohoto přesahu závisí na provedení stahovací desky jha statoru.

Vinutí se jmenovitým napětím 6 kV a vyšším musí být opatřena ochranou proti koróně i v čelech. K tomu jsou vhodné polovodivý lak nebo páska na bázi SiC.

Ochranné pásky

Izolaci čel je nezbytné dále chránit proti mechanickému poškození. K tomuto účelu se používají pásky **Eltacord®**. Páska **Eltacord® 70.000** je tkaná skleněná páska (různé tloušťky a šířky). Páska **Eltacord® 70.001** je polyesterová páska (různé tloušťky a šířky). Páska **Eltacord® 70.002** je smrštitelná polyesterová páska. Umožňují stlačení izolace čel během vytvrzování a dosažení pevnější izolace. Pásky se navíjejí dostatečně napnuté jako poslední vrstva na čela cívek a část rovné části cívky (mimo drážkovou část).

Závěr

Tento popis nemůže obsahovat všechny způsoby výroby vícezávitových cívkových vinutí. Více detailů o výše uvedených našich výrobcích naleznete v katalogových listech jednotlivých produktů. Věřím, že případné problémy budou úspěšně vyřešeny v součinnosti s našimi odborníky. Neváhejte a kontaktujte nás!