

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra výkonové elektroniky a strojů

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Elektroizolační materiály pro točivé stroje a jejich budoucnost

Autor práce: **Lukáš Drozný**  
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Michal Ph.D.**

---

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Lukáš DROZNÝ</b>
Osobní číslo:	<b>E18B0044K</b>
Studijní program:	<b>B2644 Aplikovaná elektrotechnika</b>
Téma práce:	<b>Elektroizolační materiály pro točivé stroje a jejich budoucnost</b>
Zadávací katedra:	<b>Katedra výkonové elektroniky a strojů</b>

### Zásady pro vypracování

1. Zpracujte rešerši elektroizolačních materiálů se zaměřením na točivé elektrické stroje.
2. Popište technologie Resin Rich a VPI.
3. Proveďte analýzu aktuálně využívaných komerčních produktů.
4. Proveďte na základě předchozí rešerše analýzu možného směrování vývoje nových elektroizolačních materiálů.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. STONE, Greg C., Ian CULBERT, Edward A. BOULTER a Hussein DHIRANI. Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair. 2nd edition. Hoboken: John Wiley, 2014. IEEE Press series on power engineering. ISBN 1118057066.
2. MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 8073001896.
3. Elektronické informační zdroje (databáze IEEE Xplore a další.)

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ondřej Michal, Ph.D.**  
Katedra materiálů a technologií

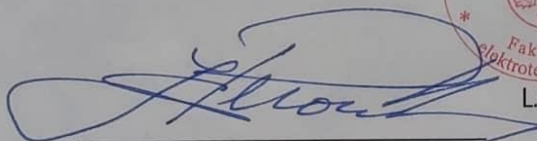
Oponent bakalářské práce: **Ing. Jaroslav Hornak, Ph.D.**  
Katedra materiálů a technologií

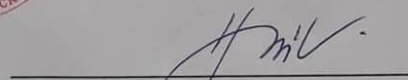
Datum zadání bakalářské práce: **13. července 2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26. srpna 2022**



L.S.

  
**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan

  
**Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 13. července 2022

---

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá tématem elektroizolačních materiálů se zaměřením na točivé stroje. V práci jsou v úvodní kapitole definovány točivé stroje a jejich vinutí. V následujících kapitolách práce jsou popsány jednotlivé vlastnosti izolačních materiálů, které jsou pro výběr vhodných materiálů klíčové. V druhé části bakalářské práce je definováno, jaké materiály jsou v točivých strojích užívány, s uvedením konkrétních příkladů z praxe. V závěrečné kapitole práce, je provedena analýza a zamyšlení nad budoucím vývojem tohoto dynamického odvětví. V této bakalářské práci je provedena rešerše vědeckých pramenů, tak aby došlo k ucelení tématu elektroizolačních materiálů využívaných v točivých strojích a k zamyšlení se nad jejich vývojem do budoucna.

## **Klíčová slova**

Točivé stroje, vinutí, elektroizolační materiály, VPI, Resin-rich, ochranné laky, kompozity, slída

---

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the topic of electrical insulating materials with a focus on rotating machines. There are rotating machines and their windings defined in the introductory chapters of the work. The following chapters describe the individual properties of insulators, which are the key to the selection of suitable materials. The second part of the bachelor thesis defines which materials are being used in the rotating machines, including specific examples from practical use. In the final chapter, there is an analysis and reflection on the future development of this dynamic industry performed. This bachelor thesis includes a research of scientific sources in order to complete the topic of electrical insulating materials used in rotating machines and also to reflect on their development in the future.

## **Key Words**

Rotating machines, windings, electrical insulating materials, VPI, Resin-rich

---

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Ondřejovi Michalovi Ph.D., za cenné rady, připomínky a celkovou pomoc při zpracování této práce.

---

## Obsah

Úvod .....	10
1 Elektrické točivé stroje a jejich vinutí .....	11
1.1 Základní vlastnosti točivých strojů.....	11
1.2 Vinutí točivých strojů .....	11
1.2.1 Vinutí statoru .....	13
1.2.2 Izolace statoru.....	14
1.2.3 Vinutí rotoru .....	16
2 Vlastnosti elektroizolačních materiálů .....	18
2.1 Dielektrika a izolanty.....	18
2.2 Elektrická vodivost izolantů.....	19
2.2.1 Elektrická vodivost plynných izolantů.....	19
2.2.2 Elektrická vodivost kapalných izolantů .....	20
2.2.3 Elektrická vodivost pevných izolantů .....	20
2.3 Elektrická pevnost .....	21
3 Zpracování izolačních systému .....	23
3.1 Nízkonapěťové systémy .....	23
3.1.1 Izolace vodičů .....	24
3.1.2 Izolace drážky .....	24
3.1.3 Impregnace vinutí .....	25
3.2 Vysokonapěťové izolační systémy .....	26
3.2.1 Resin-rich.....	26
3.2.2 VPI .....	28
3.2.3 Porovnání systémů resin rich a VPI.....	30
4 Materiály užívané k izolaci v současných izolačních systémech.....	31

---

4.1	Izolační laky.....	31
4.2	Kompozitní materiály.....	33
4.2.1	Matrice.....	35
4.2.2	Plniva.....	37
4.3	Slída.....	38
4.4	Polovodivé pásy .....	39
5	Budoucnost a vývoj izolačních systémů.....	41
5.1	Nanomateriály.....	41
5.2	Vývoj nových druhů materiálů .....	43
5.3	Keramická vlákna.....	45
5.4	Recyklace kompozitních materiálů a ekologie .....	46
	Závěr.....	49
	Seznam použité literatury .....	51
	Seznam obrázků .....	56



---

## Seznam symbolů a zkratk

d.....	tloušťka izolace [m]
Ep.....	elektrická pevnost [V.m-1]
kV.....	kiloVolt
min.....	minuta
mm.....	milimetr
MgO.....	oxid hořečnatý
n.....	koncentrace koloidních částic o pohyblivost b
ot.....	otáčka
PET .....	polyethylentereftalát
q .....	elektrický náboj
t .....	čas [s]
Up .....	průrazné napětí [V]
VPI.....	Vacuum Pressure Impregnation
$\varepsilon$ .....	absolutní permitivita
$\varepsilon_r$ .....	relativní permitivita
$\varepsilon_0$ .....	permitivita vakua
$\gamma$ .....	konduktivita [S.m-1]

---

## Úvod

Elektroizolační materiály jsou dynamickým odvětvím elektrotechniky, které zaznamenalo v 20. a 21. století mimořádný vývoj. Od historicky nejstarších izolací, jako byl například asfalt, či běžný papír, se postupně začalo využívat pryskyřic, od nichž byl jen krůček ke vzniku vícesložkových kompozitů. Je otázkou, jakým směrem se bude tento obor vydávat do budoucna, tak aby docházelo k vývoji stále tenčích izolací, s co nejlepšími vlastnostmi. Velkou výzvou pro budoucí vývoj tohoto odvětví je i vyšší celosvětový důraz na ekologii, úspory prostoru, a především na optimalizaci nákladů.

Hlavním tématem této bakalářské práce je definování jednotlivých elektroizolačních materiálů využívaných v točivých strojích a zamyšlení se nad jejich vývojem do budoucna.

V první kapitole této práce bude pro větší přehlednost daného tématu nastíněno, co jsou to točivé stroje. Dále bude v kapitole představena oblast vinutí elektrických strojů, která velmi úzce souvisí s izolací daných strojů.

Druhá část bakalářské práce se bude zabírat klíčovými vlastnostmi elektroizolačních materiálů a definováním celkové množiny izolantů.

Třetí kapitola bude představovat rozdělení elektroizolačních systémů na nízkonapěťové a vysokonapěťové. V oblasti vysokonapěťových systémů budou popsány metody Resin rich a VPI, provedeno jejich srovnání a popsány základní principy obou těchto metod.

Čtvrtá, předposlední kapitola, se bude věnovat třem základním skupinám materiálů, ze kterých jsou vyráběny elektroizolační systémy. Konkrétně pak lakům, které jsou velmi obsáhlou skupinou, která je pro odvětví elektroizolací klíčová. Dále pak kompozitům a slídě, jednomu ze základních materiálů potřebných pro výrobu elektroizolantů.

V poslední páté kapitole této bakalářské práce bude vytvořena rozvaha, na základě poznatků získaných v této bakalářské práci, nad možnostmi vývoje a perspektivy elektroizolačních materiálů pro točivé stroje do budoucna.

---

# 1 Elektrické točivé stroje a jejich vinutí

V této kapitole je popsáno, co jsou to elektrické točivé stroje, jejichž izolačním materiálům se převážně věnuje tato bakalářská práce. Zároveň je v kapitole definováno vinutí točivých strojů, které je dále děleno na vinutí statoru a rotoru. Poslední část této kapitoly se věnuje izolacím vinutí točivých strojů.

## 1.1 Základní vlastnosti točivých strojů

Základní vlastností a hlavním smyslem elektrických točivých strojů je přeměna elektrické energie. Každý točivý stroj obsahuje točivé magnetické pole, které je získáváno konstrukcí statoru. [1]

Základními dvěma částmi elektrických točivých strojů jsou stator a rotor. **Stator** je nepohyblivou součástí elektrického stroje, která se skládá z konstrukce stroje, statorových plechů a statorového vinutí. **Rotor** je částí pohyblivou. Tato část točivého stroje se skládá z hřídele, rotorových plechů a rotorového vinutí. [2] [3] [4]

## 1.2 Vinutí točivých strojů

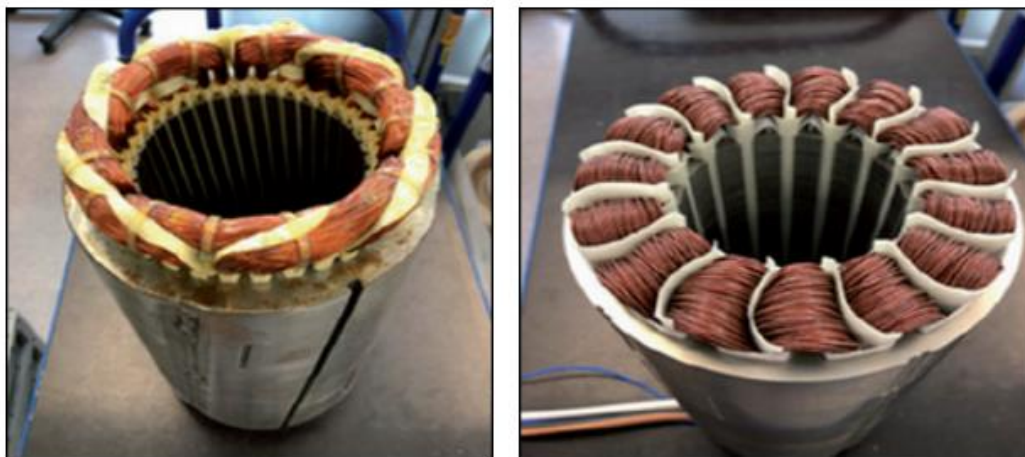
Samotné vinutí jako pojem, znamená metodu uložení vodičů do cívek. Vinutí zprostředkovává ve střídavých elektrických strojích přeměnu elektrické energie. Této přeměny je dosaženo indukováním elektrického napětí a buzením potřebného magnetického toku ve stroji. Vinutí elektrických strojů se dále dělí na dvě hlavní oblasti, na vinutí statoru a rotoru. Pole statoru a rotoru na sebe vzájemně reagují, tím dochází k přeměně mezi elektrickou a mechanickou energií. Je podstatné, aby byly co nejmenší ztráty ve vinutí elektrického stroje. Tyto ztráty mají významný vliv na účinnost motoru daného stroje. [5]

Vinutí je možné dělit: [6]

- dle tvaru cívek na rozložená a koncentrovaná,
- dle konstrukce na vinutí vsypávaná, s tuhými cívkami, tyčová a rotorová vinutí na krátko,
- dle způsobu uložení na vinutí jednovrstvá a dvouvrstvá,
- dle vyhotovení na vinutí ručně navíjené do drážek a vinutí šablonová.

---

Rozloženého vinutí se využívá u asynchronních motorů. V tomto případě dochází ke vkládání stran cívky do statorových drážek tak, že dochází k přeskočení některých drážek, které jsou následně vyplněné drážkou jiných fází. Na obrázku číslo jedna jsou vidět čela vinutí, která se v případě rozloženého vinutí typicky utváří. U koncentrovaného vinutí, které se užívá pro synchronní motory, je každá z cívek ovinuta okolo jednoho zubu, jak je vidět v druhé části obrázku číslo jedna. [7]



Obrázek 1: Rozložené a koncentrované vinutí [7]

Materiály, které se nejčastěji užívají v elektrických strojích k výrobě vinutí, jsou zejména měď, hliník, či slitiny těchto kovů. Měď je díky svým vhodným elektrickým i technologickým vlastnostem nejvíce užívaným materiálem pro výrobu vodičů. Tento materiál disponuje z cenově dostupných materiálů nejlepšími vlastnostmi pro výrobu vodičů. Jelikož již malé množství jiných prvků může výrazně snížit schopnosti tohoto vodiče, využívá se v oblasti elektrotechniky měď, která má čistotu 99,9-99,99 %. V ryzí podobě se měď v přírodě prakticky nevyskytuje. Nejčastěji se měď získává z minerálů siřičkových a kysličnickových měďnatých rud. [4] [8]

Hliník je v elektrotechnice využíván již historicky. Oproti mědi se jedná o lehčí a levnější materiál, jehož cena v čase příliš nekolísá. Jeho nevýhodou jsou mechanické vlastnosti, především pak pevnost. Z toho důvodu je užívání hliníku ve vinutí málo rozšířené a užívá se zde převážně mědi. Z ekonomických důvodů lze na pomocné části elektrických obvodů využít i oceli. Výhodou využití oceli je její dobrá mechanická pevnost. [4] [9]

---

Ocel, která se využívá na výrobu tenkých plechů v elektrotechnice, musí být co nejměkčí. Ingoty se s řadou meziuhřevů postupně vytvářejí. Dle druhu plechu dochází k lisování za tepla, či ke kombinování teplého a studeného lisování. [4]

### 1.2.1 Vinutí statoru

Toto vinutí je tvořeno cívkami, které jsou uloženy v drážkách a jsou pravidelně rozmístěny v obvodové části statoru. Propojením vinutí statoru s dalšími součástkami stroje dochází k přeměně, či výrobě elektrické energie, případně ke konání práce. V prostoru je nutné, aby byla udržována magnetická indukce ve vzduchové mezeře stroje. Dále, aby měla sinusový průběh, a malé množství vysokých kmitočtů. [5]

Statorová vinutí se dělí na vinutí: [10]

- Vinutí s uzavřenými drážkami v axiálním směru
- Vinutí s otevřenými drážkami v radiálním směru

V praxi se v současné chvíli již vinutí v axiálním směru prakticky nevyužívá, vinutí v radiálním směru se dělí na tyto podskupiny: [10]

- Prošívání vinutí

U této skupiny je možné se v odborné literatuře setkat i s názvem protahovaná vinutí. Do uzavřené drážky je umístěna izolační trubka, kterou se protahuje vodič. Výhodou tohoto typu vinutí je, že zde nejsou pájená místa. Nevýhodou je horší činitel plnění. Tato vinutí mohou být z důvodu nebezpečí vzniku vzduchových bublin užívána pro stroje o napětí maximálně 6kV. [10]

- Vinutí s cívkami tvaru U v uzavřených drážkách

Tento druh vinutí je tvořen z profilových vodičů. Následně se jednotlivé vodiče po montáži společně za pomoci šablon ohnou, spájejí a zaizolují. Při montáži může docházet k deformaci cívek, které jsou až následně vsunuty do drážek. Právě velké množství spojů je nejslabší stránkou tohoto druhu vinutí, jelikož zde může docházet k poruchám, s čímž souvisí přirozeně vznik vícenákladů. Naopak výhodou tohoto typu vinutí je možnost jeho užívání i ve vysokých typech strojového napětí. [10]

---

- Vinutí s cívkami tvaru Z

Jedná se o vylepšenou variantu vinutí cívek typu U. Označení vzniklo dle tvaru cívk, kdy jedno čelo statoru je ohnuto dovnitř a druhé ven. Výhodou tohoto typu je, že zde není tolik spájených oblastí jako u cívk tvaru U. Slabou stránku je, že v tomto typu je zapotřebí velké otevření drážky. [10]

Stator každého stroje se skládá ze tří základních částí:

- *magnetická část*

Magnetická část je aktivní částí statoru, je tvořena z oceli. Koncentruje se zde pole a dochází k toku ze statoru do rotoru. Velmi podstatný je zvolený druh oceli a tloušťka plechu. Zvolený druh oceli mimo jiné ovlivňuje magnetické ztráty, které se rozdělují na ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy. [4]

- *elektrická část*

Za pomoci měděného vodiče prochází statorovým vinutím elektrický proud. Proud se v motoru převádí do statoru, kde se vytváří magnetické pole, které rozpožehována rotor. [4]

- *izolace*

Jedná se o pasivní část každého statoru, která předchází zkratům daného vodiče. Tato oblast je více popsána v následující kapitole.

### **1.2.2 Izolace statoru**

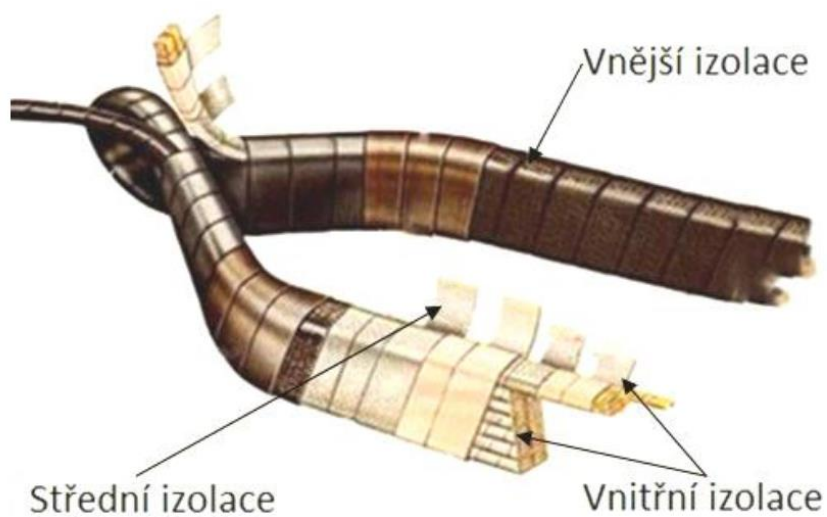
Základním významem této velmi podstatné součástky každého elektrického stroje je předcházení zkratu vodiče, či jeho spojení se zemí. Bez izolací by docházelo k nežádoucím průchodům elektrického proudu. Další funkcí izolací je, že udržují vodiče na pevných místech. Základními požadavky na izolaci stroje jsou vhodná tepelná vodivost a pevnost daného izolantu ať již elektrická, nebo mechanická. [10]

Izolační materiály se dle tepelné stálosti řadily v minulosti do 7 tříd. V dnešní době je užíváno dělení izolačních materiálů do skupin zobrazených v tabulce číslo jedna. Jednotlivé tepelné třídy značí, do jaké teploty ve stupních Celsia je využití daného izolantu ještě vhodné. [10] [52]

Tabulka 1: Teplotní skupiny [52]

RTE	Tepelná třída
méně než 90	70
90-105	90
105-120	105
120-130	120
130-155	130
155-180	155
180-200	180
200-220	200
220-250	220
250	250

Z obrázku číslo dvě je patrné, že izolace vinutí se skládá ze tří základních částí.



Obrázek 2: Izolace vinutí [38]

---

Konkrétně se jedná o:

- Vnitřní izolace

Hlavním účelem vnitřní izolace je izolování měděných vodičů. Izolace je tvořena z laků a nátěrů, jenž jsou natřeny přímo na daný vodič. Dalšími možnostmi je pak ovinutí daného vodiče bavlnou, případně skleněnými vlákny, možná je i kombinace obou druhů izolace. [5]

Důležité jsou i tepelné vlastnosti dané izolace, aby v průběhu let nedocházelo k jejich opotřebenosti a tím ke zvyšování teplot dané cívky. Podstatná je ovšem i tloušťka dané izolace, kdy je kladen důraz na to, aby byla co nejtenčí a neomezovala tak daný stroj. V praxi jsou často využívány vrstvy laku, které se vytvrzují při vyšších teplotách a na vodiči díky tomu vzniká smaltová vrstva. [5]

- Střední izolace

Tato izolace slouží k tomu, aby nedocházelo mezi vodiči ke zkratům, a k přehřátí daného stroje. Kromě dobré tepelné odolnosti je dále nutné, aby daná izolace byla především z důvodu navíjení i mechanicky odolná. Ke střední izolaci se používají laminátové pásy, jejichž předností je jejich stabilita a teplotní odolnost. [5]

- Vnější izolace

Vnější neboli zemní izolace, je tvořena páskou, kterou je oddělen vodič od uzemněného magnetického obvodu. Izolace musí být velmi mechanicky odolná, materiál musí mít velkou tepelnou vodivost a neměl by obsahovat žádné vzduchové bubliny. [5]

### **1.2.3 Vinutí rotoru**

Vinutí je v rotoru umístěno do drážek, které jsou vyfrézované v rotoru. Tyto drážky se užívají v různých tvarech, které závisí na velikosti a druhu chlazení daného stroje. Vinutí stroje v sobě má vždy elektrickou izolaci, na kterou jsou využívány materiály, které mají vhodné mechanické a teplotní vlastnosti. V asynchronních motorech se užívají vinutí motorů na krátko, která nemají izolaci mezi drážkami a stěnami drážky. V synchronních strojích jsou pak využívána rozběhová vinutí, či amortizéry. [5]



---

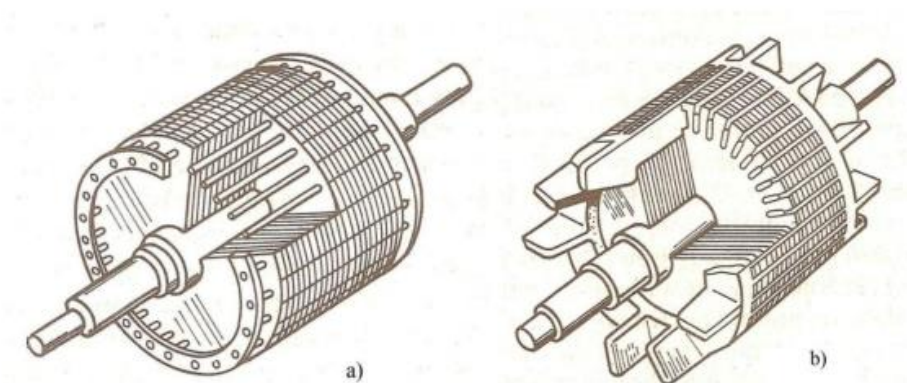
Rozdíl mezi statorovými a rotorovými vinutími tkví v tom, že rotorová vinutí jsou na rozdíl od statorových vystavená odstředivým silám, z toho důvodu je nutné, aby na čele vinutí a na jednotlivých opatřeních byla použita ochranná opatření, která vliv těchto sil omezí.

U rotorových vinutí rozlišujeme celkem 4 skupiny vinutí: [10]

- Prošívaná vinutí kruhového průřezu
- Vsypaná vinutí kruhového průřezu
- Vsypaná vinutí z profilových vodičů
- Tyčová vinutí z profilových vodičů

První dva zmíněné typy se užívají u menších strojů, druhé dva typy pak převážně u strojů větších rozměrů. [10]

Na obrázku číslo tři jsou zobrazeny dva typy rotoru, v části a obrázku číslo tři se jednotlivé tyče vinutí umístí do drážek, následně se lící části spojí kruhy, přivařením. V části b obrázku číslo tři se jedná o jeden odlitek včetně lopatek, sloužících k ventilaci.



Obrázek 3: Rotory nakrátko asynchronních motorů, a) s natvrdo pájeným vinutím, b) s odlévaným vinutím [5]

---

## 2 Vlastnosti elektroizolačních materiálů

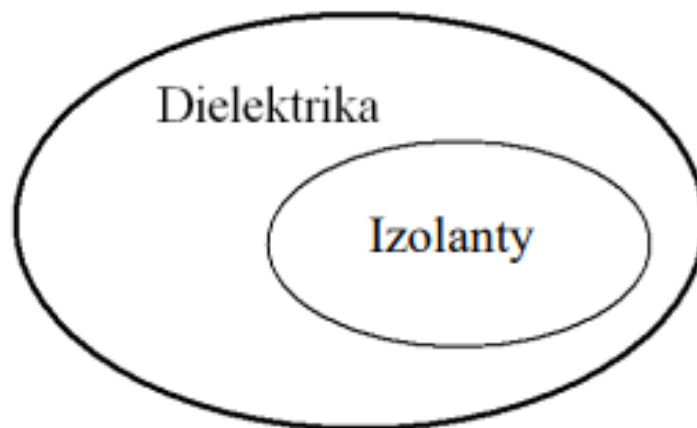
Následující kapitola popisuje jednotlivé vlastnosti elektroinstalačních materiálů. V úvodu kapitoly je vysvětlen rozdíl mezi izolanty a dielektrikem. Navazující části kapitoly se poté věnují jednotlivým vlastnostem izolantů.

### 2.1 Dielektrika a izolanty

Tyto dva pojmy úzce souvisí s problematikou elektroizolačních materiálů a z toho důvodu jsou zmíněny i v rámci této bakalářské práce. Jedná se o pojmy, které jsou v praxi velmi často zaměňovány, případně chápány jako synonyma.

Zatímco dielektrikum má po vložení do elektrického pole možnost vytvořit vlastní elektrické vnitřní pole, izolant je materiál, který zabraňuje průchodu elektrického proudu mezi dvěma body s lišícím se elektrickým potenciálem.

Rozdílnost pojmů zobrazuje i následující obrázek číslo čtyři, ze kterého vyplývá, že pojem dielektrikum je nadmnožinou pojmu izolant, pro nějž platí veškeré vlastnosti dielektrika, ovšem v opačném slova smyslu tomu tak není. [11]



Obrázek 4: Dielektrika a izolanty [11]

---

Dielektrika je možné dělit do mnoha kategorií, nejčastěji se v praxi setkáváme s dělením dle: [11]

- Dle skupenství, kdy jsou rozlišovány dielektrika plynná, kapalná a pevná, s tím že tento druh dělení je podstatný jak z důvodu fyzikálních, tak i elektrických vlastností.
- Dle polarity, na polární a nepolární, kdy polární látky obsahují permanentní elementární dipólové momenty i v okamžicích, kdy nepůsobí vnější elektrické pole.
- Pevná dielektrika dále dělíme dle jejich struktury na krystalická a amorfní, či na dielektrika, která mají střed souměrnosti, nebo bez středu souměrnosti.

## 2.2 Elektrická vodivost izolantů

V této kapitole jsou popsány vodivosti jednotlivých izolantů dle jejich skupenství, jsou tedy rozděleny na izolanty plynné, kapalně a pevné.

### 2.2.1 Elektrická vodivost plynných izolantů

Plyny lze zařadit z důvodu nízké koncentrace volných nosičů náboje, mezi velmi vhodné izolanty převážně ve slabých elektrických polích a při nízkých teplotách.

Při ionizaci, tedy při uvolnění elektronů z neutrálního atomu, dochází ke vzniku volných nosičů náboje v okamžiku pohlcení dochází ke vzniku tzv. ionizační energie nejčastěji v těchto konkrétních případech:[11]

- **Nárazová ionizace**

V tomto případě dochází ke srážce neutrální částí s elektronem, kterým disponuje díky působení elektrického pole výraznou kinetickou energií. [11]

- **Fotoionizace**

Na této reakci se podílejí kosmická, rentgenová či gama záření, kdy dochází k pohlcení neutrální částice fotony. [11]

- **Povrchová ionizace**

Jedná se o speciální typ, kdy je využívána převážně tepelná energie, která působí na povrch elektrody. [11]

---

### 2.2.2 Elektrická vodivost kapalných izolantů

Vzdálenosti mezi jednotlivými molekulami u kapalných izolantů jsou menší než u plynů, ale větší než u pevných látek. To, jak vodivý je daný elektrický izolant, do velké míry závisí na tom, z čeho se skládá, jestli je nějakým způsobem znečištěn a co je jeho součástí. Za nejvíce čisté jsou považovány technicky čisté kapalně izolanty. [11]

Tyto technicky čisté izolanty vznikají náročnými a pečlivými chemickými procesy a díky tomu vykazují pouze nepatrnou hodnotu konduktivity.

Základním vztahem pro konduktivitu kapalného izolantu je:

$$\gamma = n \cdot q \cdot b \quad (1.1)$$

Kde:  $\gamma$ - konduktivita [S.m-1],

$n$  – koncentrace koloidních částic o pohyblivost  $b$ ,

$q$  – elektrický náboj.

Vodivost technických izolantů může být: [11]

- **Iontová**

Tato skupina vodivosti je dále dělena na vlastní a nevlastní. V případě vlastní jsou disociovány vlastní molekuly izolantu. V případě nevlastní jsou přítomny příměsi jiných látek.

- **Elektroforetická**

Tato vodivost se vyskytuje v systémech, které se skládají ze dvou fází.

### 2.2.3 Elektrická vodivost pevných izolantů

Tento druh izolantů dosahuje v běžném prostředí velmi malých hodnot konduktivity, která závisí na struktuře pevného izolantu. Převážně pak jeho složitosti.

V případě pevných izolantů je kvůli složitosti nutné zjednodušovat předpoklady pro určení konduktivity. [11]

Kromě vnitřní vodivosti, která je společná pro všechny tři druhy izolantů dle skupenství, je možné poznat u pevných izolantů i vodivost povrchovou.

---

Elektrická výměna u krystalických látek je možná při velkém množství energie díky vzájemné výměně kladných a záporných iontů. Z pevných látek jsou nejméně vodivá čistá křemičitá skla.

### 2.3 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je jednou ze základních charakteristik každého izolantu, jedná se o plnění jejího základního úkolu, kterým je od sebe oddělit jednotlivá místa, která mají různý elektrický potenciál. Tento parametr je velmi významný a musí být zohledněn při každé konstrukci elektrického stroje. V případě, že by u daného stroje přesáhla intenzita daného pole danou kritickou mez, dojde k nárůstu koncentrace volných nosičů náboje což způsobí náhlý pokles rezistivity daného materiálu. U pevných izolantů se jedná o průraz, který je trvalým zhoršením izolačních vlastností daného materiálu. V případě plyných a kapalných izolantů se tento jev nazývá přeskokem a po skončení dochází k obnově. U plyných izolantů je obnova úplná ihned po skončení výboje, nicméně u kapalných izolantů dochází ke zhoršení vlastností a k částečnému obnovení dochází až po určité regenerační době.

Tento vzorec popisuje vztah průrazného napětí a tloušťky izolace v místě průrazu. [10]  
[11]

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (1.2)$$

Kde:  $E_p$  – elektrická pevnost [V.m<sup>-1</sup>],

$U_p$  – průrazné napětí [V],

$d$  – tloušťka izolace [m].

Podstatnou informací pro určení elektrické pevnosti je homogenost daného pole. U pole, které je homogenní, představuje elektrická pevnost intenzitu daného pole, při které dochází k průrazu. Složitější situace nastává, pokud se jedná o pole nehomogenní. [11]

Dle druhu a délky působení expozičního napětí je elektrická pevnost dělena na: [11]

- Střídavá elektrická pevnost
- Impulzní elektrická pevnost
- Stejnoseměrná elektrická pevnost

---

## 2.4 Rezistivita

U každého izolantu je možné zjistit jeho povrchovou a vnitřní rezistivitu. Zatímco vnitřní rezistivita značí odpor toku elektrického proudu v daném materiálu, povrchová rezistivita značí poměr intenzity elektrického pole a hustoty proudu v povrchové vrstvě. Snahou je, aby bylo u izolantu dosaženo co nejvyšší rezistivity. [10] [11]

## 2.5 Relativní permitivita

Relativní permitivita je látková konstanta, které hodnota je závislá na vlastnostech daných materiálů. Permitivita definuje, kolikrát se elektrická síla zmenší v případě, že tělesa s elektrickým nábojem jsou místo ve vakuu umístěna v látkovém prostředí. Tato veličina je bezrozměrná. [10] [11]

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (1.3)$$

Kde:  $\varepsilon_r$  - relativní permitivita

$\varepsilon$  - absolutní permitivita

$\varepsilon_0$  - permitivita vakua

---

## 3 Zpracování izolačních systému

Dle pracovního napětí daného stroje jsou v praxi rozlišovány nízkonapěťové a vysokonapěťové izolační systémy. Je nutné, aby byla v těchto systémech izolována veškerá místa, kterými prochází vinutí, které je uloženo v drážkách.

### Izolace vinutí v drážkách

- *Izolace mezi vodiči*

Tato izolace slouží k odizolování jednotlivých vodičů tak, aby docházelo ke zmenšování jednotlivých ztrát tepla. Je zapotřebí, aby daná izolace byla velmi tepelně odolná. [5]

- *Izolace mezi závity*

Izolace mezi závity slouží k zamezení dotyků mezi jednotlivými závity cívky. Mezi jednotlivými závity by bez této izolace vznikal transformující prvek, čímž by docházelo k významnému nárůstu proudu ve zkratujícím vinutí. Izolace mezi závity je díky kvalitním novým materiálům nanášena společně s izolací mezi vodiči. [5]

- *Drážková izolace*

Účelem této izolace je zamezit mechanickému poškození izolace tím, že je vinutí oddělené od stěn dané drážky. Drážková izolace musí mít dobré mechanické vlastnosti, jelikož je vystavena vysokému mechanickému tlaku, zároveň je zapotřebí, aby odolávala vysokým napětím, které na izolaci působí, tedy měla i dostatečnou elektrickou pevnost. [5]

### 3.1 Nízkonapěťové systémy

V těchto systémech jsou požadavky na výdrž izolace daného stroje nižší (až na několik konkrétních výjimek), z toho důvodu je možné v těchto typech strojů využívat méně vrstev izolačního materiálu.

#### Nízkonapěťové izolační systémy se skládají z:

- Izolace vodičů
- Drážkové izolace
- Impregnace vinutí [11]

---

### 3.1.1 Izolace vodičů

Izolace vodičů je podstatnou součástí izolačních systémů. Jedná se o izolaci, která je součástí vodiče, z něž je vyráběno vinutí. Jak již bylo zmíněno, jednotlivé vodiče je zapotřebí izolovat mezi sebou, ale i proti jednotlivým součástkám daného stroje. [11]

Izolace vodičů může být prováděna různými způsoby, například lakem, opředěním vodiče různými typy vláken (především pro zlepšení elektrické pevnosti vodiče), či kombinací více zmíněných možností. Podstatné je, aby daná izolace byla co nejtenčí, ale zároveň, aby obstála při setkávání s elektrickými a mechanickými činiteli.

Jaký druh izolace je u kterého vodiče využit, je možné rozpoznat za pomoci kódového označení, které se skládá až ze 4 písmen, a je díky němu možné přehledně poznat složení a vlastnosti daného izolantu. [13]

Jednotlivá písmena označují:

1. První písmeno označuje charakter daného vodiče (O – vodič pro vinutí, ...).
2. Následující písmeno označuje kov, ze kterého je tvořeno jádro. Konkrétně pak L pro měď či A pro hliník (2. písmeno).
3. Třetí písmeno označuje materiál izolace (například E – PET folie, G – slídová páska, ...).
4. Čtvrté písmeno je pro zvláštní označení. [13]

Stejně jako u ostatních druhů izolačních systémů, i u izolace vodičů docházelo v posledních letech k významným posunům. Dříve velmi hojně využívané olejové laky, byly nahrazeny syntetickými pryskyřicemi. Jejich výhodou jsou výrazně lepší vlastnosti, jsou odolné proti vysokým teplotám, proti manuálnímu poškození a mají vhodné chemické a dielektrické vlastnosti, což je více popsáno v následující kapitole této bakalářské práce.

### 3.1.2 Izolace drážky

Tato izolace se nachází mezi drážkou a vinutím daného elektrického stroje. Tato drážka slouží zároveň i jako mechanická ochrana daného stroje, jelikož chrání vinutí, aby se o ostré výstupky z dané drážky neponičilo. Drážková izolace může být umístěna na cívce daného vinutí, případně pak uložena v drážkách daného stroje ještě před uložením vinutí. [11]



---

Možnosti izolace drážky jsou:

- *Drážková lepenka*

Tato speciální lepenka je vyráběna ze sulfátové buničiny, sběrového papíru, hadrů a dřevovin. Její tloušťka je mezi 0,1 až 0,6 mm. Tato elektrotechnická lepenka je hladká, elastická a ohebná. [11]

- *Kombinovaná drážková izolace*

U těchto izolací je většinou základem polyethyltereftalátová fólie, na níž se následně napojují další vhodné materiály. Mezi ně se řadí elektrotechnická lepenka, slídový papír a další. [11]

PETP je materiál, který je odolný proti trvalé zátěži 150 stupňů Celsia, výhodou materiálu jsou výborné elektrické vlastnosti, mechanické vlastnosti a malá naléhavost. [11]

Mezi nejčastěji užívané materiály se řadí:

- ✓ E – polyethyltereftalátová fólie
- ✓ S – skleněná tkanina
- ✓ K – polyamidová fólie
- ✓ L – aramidový papír
- ✓ N – polyesterová rohož
- ✓ P – elektrotechnická lepenka
- ✓ R – slídový papír

- *Nomex*

Tento syntetický materiál je stále více využíván z důvodu jeho vhodných vlastností. Nomex je tvořen z krátkých vláken aromatického polyamidu. Materiál odolává vysokým teplotám, je velmi pevný v tahu, odolává chemikáliím a rozpouštědlům. Je tedy vhodný jako pro točivé stroje, tak transformátory. Díky pryskyřicím naneseným na povrchu lze snadno kombinovat Nomex s jinými materiály. Další výhodou tohoto materiálu je jeho zpracování za pomoci klasických technologií využívaných v papírenském průmyslu do rolí. [11] [14] [35]

### **3.1.3 Impregnace vinutí**

Hlavním účelem impregnování vinutí je jeho mechanické zpevnění. Mezi další důvody impregnování vinutí, patří posílení odvodu tepla a vylepšení ochrany daného stroje před

---

externími vlivy. Povrchové vrstvy laku napomáhají zvyšování odolnosti proti jednotlivým vlivům externího prostředí. Impregnuje se metodami zakapávání, zaplavování, či namáčení. Kdy jsou využity impregnační laky, pryskyřice, či silikony. Je podstatné, aby byla impregnace správně zvolena, aby plnila svůj účel a nezpůsobovala zhoršení výkonu daného stroje. [11]

Metody impregnace: [11]

- *Vysoušení*  
Při této metodě se, jak již název napovídá, využívají pece k odstraňování vlhkosti při teplotách 90–100°C.
- *Impregnování*  
Stator i rotor se při této operaci ponořují do impregnačního laku, tak aby lak pokryl veškeré součástky daného stroje, včetně jeho vinutí. Zajištění, aby lak skutečně natekl do veškerých i okem nepoznatelných součástek stroje, je poměrně složitý proces. Aby byla vyšší pravděpodobnost pokrytí celého stroje, je jednou z možností přidání ředidla, čímž se usnadní vnikání laku, nicméně, současně se také výrazně sníží izolační vlastnosti daného laku. Další možností je užití vakuotlaké impregnace.
- *Vytvrzování laku*  
Dle druhu laku se daný lak vytvrzuje v peci, dle požadavků kladených na dané vinutí se volí, zda bude daný stroj vytvrzován jednou, či víckrát.

### **3.2 Vysokonapět'ové izolační systémy**

V současnosti se k výrobě vysokonapět'ových izolačních systému volí dvě základní výrobní technologie, které se ovšem od sebe značně odlišují.

Konkrétně se jedná o technologie:

- Resin rich
- VPI

#### **3.2.1 Resin-rich**

Tato historicky starší technologie využívá a navazuje na jednotlivé poznatky z metod, které byly využívány převážně v minulosti. Aby byly materiály využívané v této technologii co nejvhodnější, dodávají se v tak zvaném B stavu. Jedná se o částečně

---

předimpregnovaný polotovár, který je většinou tvořen 30–40 % pojiva. Díky tomu, že je materiál suchý a nelepivý, může být skladován dlouhou dobu. Stažení izolace na vhodný rozměr dochází za pomoci vytvrzení, k čemuž jsou užívána latentní tvrdidla. [5] [11] [15]



Obrázek 5: Resin – rich [15]

Základem této metody je užívání tzv. tříložkového kompozitu. Tento kompozit se, jak již název napovídá, skládá ze tří částí, kterými konkrétně jsou: [5] [11] [15]

- *Nosná složka*

Tato složka je tvořena skelnou tkaninou tloušťky 0,14 - 0,12 mm. Aby byla tloušťka této vrstvy co nejnižší, začalo se využívat technologie, kdy se jednotlivá vlákna nestáčíjí, ale rovnají. Tento systém má menší dielektrické ztráty, zároveň je i pevnější než dříve častěji užívané technologie. Z velkého množství variant se nejčastěji užívají bezalkalická skla.

- *Pojiva*

Jejichž účel je propojení dvou ostatních zmíněných složek. Příkladem pojiv jsou jednotlivé typy pryskyřic.

- *Izolační složky*

Obvykle tvořené kalcinovaným slídovým papírem, který je hutný, není tolik nasákvavý a je i pevný.

---

Dle způsobu navíjení, jsou rozlišovány dvě základní skupiny izolačních systémů: [11]

- *Diskontinuální*

Způsob izolace, který se užívá převážně u malých strojů. Tento postup je nízkoenergetický. Rovnou část tvoří fóliový materiál, v čelních částech stroje je poté ovinutí páskou.

- *Kontinuální*

V kontinuálním způsobu, dochází ke vzniku pásky s polovičním, třetinovým nebo dvoutřetinovým překrytím po celé délce dané tyče, včetně čel.

Výhodou tohoto izolačního systému jsou identické znaky izolace v drážkách i ostatních částech daného vinutí. Nicméně významnou nevýhodou je vysoká náročnost tohoto systému izolace na výrobu, z toho důvodu se tento způsob v praxi užívá převážně jen u velkých strojů.

Výrobní postup začíná navinutím určeného počtu vrstev buď diskontinuálním, nebo kontinuálním způsobem. Poté co je materiál navinut do požadované tloušťky, se daná izolace vkládá do lisů. Zde se při působení konkrétní teploty mění skupenství dané izolace a dochází k propojení jednotlivých složek izolace v jeden celek. Potom dojde k vytvrzení látky za zvýšené teploty, která se po určité době snižuje, dochází k dotvrzování izolace a k jejímu postupnému chladnutí. Na konci procesu se dané látky vloží do drážek. [5] [11] [15] [33]

### **3.2.2 VPI**

VPI neboli Vacuum Pressure Impregnation je na rozdíl od předchozí technologie novější, nicméně i investičně výrazně dražší variantou. Název této metody je odvozen od hlavní výrobní operace, která je nutná pro fungování celého procesu, tedy vakuové tlakové impregnace. [11] [15] [17]



Obrázek 6: VPI [15]

I v tomto případě je nosná složka tvořena ze skelné tkaniny, ale základem je zde savá slídová páska, ta je vyrobena ze slídového papíru. Tato páska má dobré mechanické i izolační vlastnosti, je elastická. Materiál, ze kterého je páska vyrobena je velmi savý, jelikož musí být proimpregnovány veškeré jeho vrstvy. K impregnaci se užívají epoxidové, polyesterové, či silikonové pryskyřice, které vyplní kompletně impregnovaný objekt, díky stoprocentnímu obsahu sušiny. Tyto impregnanty mají dobré elektrické i mechanické vlastnosti, vytvrdnou za krátkou dobu a je možné je použít i pro vysoké teplotní třídy. [11] [15]

Systém se skládá ze dvou základních vrstev již zmíněné pásky a impregnačního laku. Samotná páska se skládá ze tří komponentů. Z nosné části, kde je, stejně jako u metody resin – rich užívána skelná tkanina, případně však i syntetické fólie, nebo polyesterové tkaniny. Další součástí je slídový papír. Poslední, třetí složkou je pojivo. [11] [15]

Proces impregnace je technologicky náročný. Nejprve je zapotřebí sušení při teplotě vyšší než 100 stupňů Celsia po dobu minimálně 20 hodin. Poté se zbytková vlhkost odstraňuje v impregnačním kotli. Následně se těleso po dobu jedné hodiny zaplavuje ve vakuu. Po zrušení vakua se na 1 hodinu zavádí přetlak. Následně se izolant přesouvá do sušárny, kde dochází k sušení za mírného podtlaku. V konečné fázi výrobního procesu dochází k vytvrzení izolantu při proudění teplého vzduchu za normálního tlaku. Po uplynutí celého procesu je nutné ověřit kvalitu za pomoci měření ztrátových činitelů. [11] [15]

---

### 3.2.3 Porovnání systémů resin rich a VPI

Jak je zřejmé již z předcházejících kapitol systém VPI je variantou výrazně dražší na vstupní investici, kdy je zapotřebí speciálního stroje. V případě varianty Resin rich, postačí pouze pec a forma k vytvrzení. Spolu s počátečními náklady na pořízení stroje jsou v případě varianty VPI i výrazně vyšší náklady, které se vážou na případné opravy a údržbu systému. V případě systému Resin rich jsou opravy výrazně jednodušší, pokud by došlo k selhání cívky, lze jí vyměnit na místě a nainstalovat cívku jinou. V případě metody VPI je výměna vadného dílu na místě prakticky nemožná, a kromě již zmíněných nákladů na opravu je nutné do porovnání zahrnout i náklady spojené s případným odstavením stroje a časovými prodlevami, než dojde k nápravě. [11] [15] [17]

Výhodou varianty VPI ovšem je vyšší homogenita výsledného izolantu. Tento klad napomáhá dobrému odvodu tepla, či minimalizaci výbojů. V případě varianty VPI, se také využívají tenčí vrstvy izolantů. [11] [17] [36]

Výhodou systému VPI je i vyšší odolnost vůči chemickým látkám, díky homogenitě je systém kompaktnější, zatímco v systému resin rich dochází k častějším poškozením z důvodu chemických vlivů. [36]

---

## 4 Materiály užívané k izolaci v současných izolačních systémech

V této kapitole budou popsány tři základní skupiny materiálů užívaných v elektroizolačních systémech.

### 4.1 Izolační laky

Tyto roztoky syntetických a přírodních pryskyřic jsou jedním ze základních materiálů využívaných v izolačních systémech. Jedná se o látky, které jsou na začátku kapalné a následně po zpracování tuhé. Hlavním úkolem laků je tvorba elektroizolačního filmu, který ochrání daný stroj. Laky se od sebe odlišují vlastnostmi, chemickým složením i způsoby výroby. [11] [16]

Izolační laky dělíme dle filmotvorné složky na: [16]

- *Rozpouštědlové laky*

Jedná se o roztoky látek v organických rozpouštědlech. Mezi nejčastěji užívané látky se řadí syntetické i přírodní pryskyřice. Z organických rozpouštědel jsou nejčastěji užívány alifatické a aromatické uhlovodíky a alkoholy. K zatuhnutí laku dochází tak, že se organické rozpouštědlo odpařuje za pomoci sušení na vzduchu, nebo v sušárně a zůstane zde pouze filmotvorná látka, která po uschnutí vytvoří pevný film. Druhou možností je, že se odpaří rozpouštědlo a nezávisle na něm vznikají ve filmotvorné látce chemické procesy, které zpevňují lak.

- *Bezrozpouštědlové laky*

Jak již z názvu vyplývá, tato skupina laků neobsahuje žádná organická rozpouštědla, ale pouze filmotvorné látky, často syntetické pryskyřice. Tato skupina laků vytvrzuje díky katalyzátorům. Výhodou je, že v případě těchto laků není zapotřebí čas ani tepelná energie k zasychání. Laky se užívají například k impregnaci vinutí, převážně pak pro vysoké napětí. Izolace je schopna vyplnit veškerá místa daného vinutí a nevznikají zde žádné bubliny.

- *Ostatní laky*

Do této skupiny lze zařadit například laky na vodní disperzi.

---

Dle chemického složení lze dále dělit laky na: [16]

- *Lihové*

Jedná se o přírodní pryskyřice, které jsou rozpuštěny v alkoholech. Jejich výhodou je snadné nanášení. Tyto laky se jednoduše rozpouští v alkoholech a nejsou příliš odolné vůči vlivům počasí. [16]

- *Olejové*

Jejich základními složkami jsou vysychavé rostlinné oleje, které jsou modifikovány přírodními či syntetickými pryskyřicemi. Z přírodních pryskyřic se jako nejvhodnější jeví převážně fosilní pryskyřice, jako je kalafuna, či kopál. Nicméně převážně z ekonomických důvodů se v současné době v praxi využívají více syntetické pryskyřice. Nejlépe rozpustná v olejích a v praxi tedy nejčastěji užívaná je fenol-formaldehydová pryskyřice. Výhodou těchto laků je odolnost vůči chemikáliím a povětrnostním vlivům. Nicméně nevýhodou je poměrně náročná výroba a nepřilízná odolnost vůči rozpouštědlům. [16]

- *Asfaltové*

Jedná se o podskupinu olejových laků, kde je částečně pryskyřice nahrazena asfaltem. Tyto laky jsou velmi odolné vůči rozpouštědlům. [16]

- *Celulózové*

Filmotvornou látkou je v tomto případě celulóza.

- *Syntetické*

Skupina syntetických laků, je velmi nehomogenní a obsáhlá.

Příkladem těchto laků například jsou: [16]

- Silikonové laky

Tyto laky jsou vysoce teplotně odolné, zároveň mají dobré chemické a elektrické vlastnosti. Problematická je horší přilnavost silikonových laků k měděným jádrům.

- Polyuretanový lak

V případě polyuretanových laků, je možné spájet mezi sebou jednotlivé vodiče, aniž by byl odstraněn lakový film.

- Polyamidový lak

Vrstva tohoto laku je tvrdá a ohebná, tento lak je tvořen fenol-formaldehydovou pryskyřicí, která je plastická polyamidem.



- 
- Laky z epoxidových pryskyřic

Tyto laky jsou velmi elastické, odolné vůči vlhkosti a teplotám. Mají podobné vlastnosti jako olejové laky a z toho důvodu je velmi často v praxi nahrazují.

Mezi nejčastěji užívané impregnační laky lze zařadit: [11] [16]

- *Syntetický impregnační lak S 1901*

Tento lak je složen z roztoku alkydové a fenolické pryskyřice v organických rozpouštědlech. Výhodou tohoto laku je odolnost proti vodě, chemikáliím, vlhku i horku. Nejčastěji je užíván k impregnaci vinutí točivých strojů a transformátorů. Tento druh laku se obvykle nanáší máčením, či vakuotlakou impregnací.

- *Syntetický impregnační lak 1942*

Složen je tento lak z izokyanátu a fenol formaldehydové pryskyřice ve směsi organických rozpouštědel.

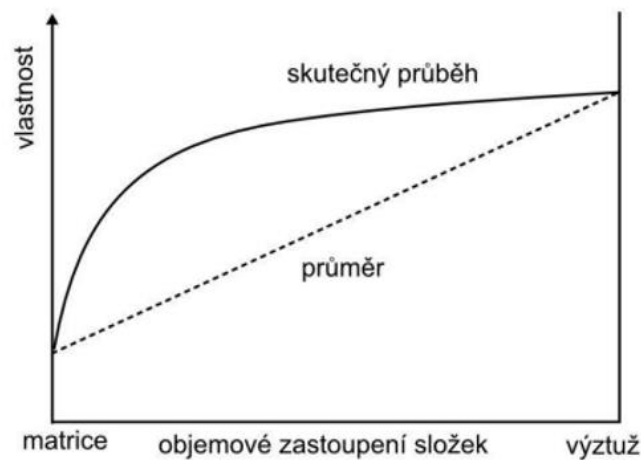
- *Povrchový elektroizolační lak S 1903*

Lak je složen z roztoku epoxyesterového pojiva v organických rozpouštědlech. Lak se aplikuje máčením, případně vakuotlakou impregnací.

#### **4.2 Kompozitní materiály**

Tyto multisložkové materiálové systémy disponují vlastnostmi, které nejsou možné získat za pomoci jednoho samostatného materiálu. Vlastnosti, kterými tyto systémy vynikají, vznikají pouze díky vazbě více dohromady kompatibilních látek. [19] [20]

Toto řešení je velmi často užíváno z důvodu, že tyto materiály současně plní požadavky na kvalitní mechanické i elektrické předpoklady. Při volbě vhodných kompozitu, je podstatné, aby mezi jejich jednotlivými složkami vznikl tak zvaný synergický efekt. Tento efekt značí takový stav, kdy díky kombinaci vybraných složek, získá daný celek lepší vlastnosti než pouze dle součtu vlastností jednotlivých samostatných složek. Jedná se zároveň o oblast elektroizolačních materiálů, kde lze předpokládat největší vývoj do budoucna. [11] [16] [19] [21]



Obrázek 7: Synergetický efekt [20]

Tyto materiály dělíme na: [11]

- *Dvousložkové*

Tyto materiály se skládají z pojiva a nosné složky.

- *Třísložkové*

Kromě pojiva a nosné složky, je v těchto kompozitech je navíc plnivo, které zde funguje jako dielektrická bariéra. Jako bariéra se užívá slídového papíru, který zde působí jako elektro izolant.

Dle částic použitého plniva lze rozlišovat na makro kompozitní, mikro kompozitní a nano kompozitní materiály. Zatím co, makro kompozitní materiály nalézají své využití převážně ve stavebnictví, mikro kompozitní materiály jsou využívány nejvíce a lze se s nimi setkat napříč mnoha rozlišnými odvětvími, tedy i v rámci elektrotechniky. Nejvíce vyvíjeným odvětvím v posledních letech je pak oblast nano kompozitních materiálů, kde se dá očekávat nejvýznamnější nárůst v následujících letech. [19] [20]

V praxi se užívá mnoho druhů kompozitů příkladem některých z nich jsou například:

- **CALMICA-FLEX® 0917**

Tento kompozitní materiál je vyroben ze skleněné tkaniny jako nosiče a slídového papíru impregnovaného epoxidovou pryskyřicí. Tato páska je vysoce

---

flexibilní a má vynikající dielektrické vlastnosti. Využívá se například k izolaci cívek pro nízkonapěťové a vysokonapěťové stroje. [39]

- **Cogemica VPI 609 R 16-24**

Páska se skládá z muskovitového papíru s vynikající pórovitostí. Papír je spojený s malým množstvím speciálního epoxidu na tkaný skleněný podklad. Páska je suchá, pružná, nelepivá a vysoce absorpční.

Páska Cogemica VPI 609 R 16-24 neobsahuje žádné urychlovače, páska byla vyvinuta pro pryskyřice s obsahem tužidla a je kompatibilní s většinou dnes využívaných pryskyřic při metodě VPI. [49]

- **Samicapor 366.55-10**

Je založen na skleněných vláknech se slídovým papírem a epoxidovou pryskyřicí. Je používán ve vysokonapěťových strojích jako izolace drážky a hlavní izolace. [50]

#### 4.2.1 Matrice

Matrice, je podstatnou součástí každého kompozitu, která zajišťuje tvarovou stálost daného výrobku. Na rozdíl od výztuže, je tento materiál méně pevný, ale vyniká vyšší plasticitou. Právě spojením vlastností těchto dvou komponentů vzniká vhodný kompozit.

Mezi základní požadavky, které jsou kladeny na matrice se řadí:

- Zajištění tvarové stálosti daného kompozitu.
- Přenos mechanické námahy mezi vlákny.
- Ochrana výztuže před vlhkostí, chemikáliemi a dalšími vnějšími vlivy.
- Ochrana vláken před mechanickým poškozením. [22] [23]

Matrice jde dle jejich vlastností rozdělit na tyto základní skupiny: [23]

- *Termoplastické matrice*

Tyto látky jsou při dosažení konkrétní teploty zcela tekuté a po následném zchlazením mají opětovně pevnou konzistenci. Výhodou těchto matric je možnost jejich opakovaného využívání. Mezi další klady lze zařadit tepelnou tvarovatelnost, velkou chemickou odolnost, či rázovou pevnost. Mezi podstatné klady těchto matric patří i možnost volby ekologicky vhodných materiálů, kdy je možné

---

v některých případech termoplastické matrice recyklovat, nebo opakovaně využívat výrobního odpadu. [19] [24]

- *Reaktoplastické matrice*

Tyto látky se vyskytují při běžné teplotě v tekutém skupenství. Díky tomu se snáze zpracovávají a lépe se u těchto typů matric smáčejí a prosycují vlákna. Svoji konečnou podobu získávají až díky vytvrzování při konkrétních teplotách. Po získání této vytvrzené podoby je daný reaktoplast již opakovaně netavitelný a pokud by byla v delším časovém horizontu překračována správná teplota došlo by ke zničení daného termosetu. [21] [25]

Aby byly reaktoplastické matrice více využitelné a docházelo ke zlepšování jejich vlastností, přidávají se do materiálů další modifikační přísady. Příklady nejčastěji užívaných typů přísad jsou fenolické pryskyřice, polyesterové pryskyřice, vinyl esterové pryskyřice či epoxidové pryskyřice. [21] [25]

- *Epoxidové pryskyřice*

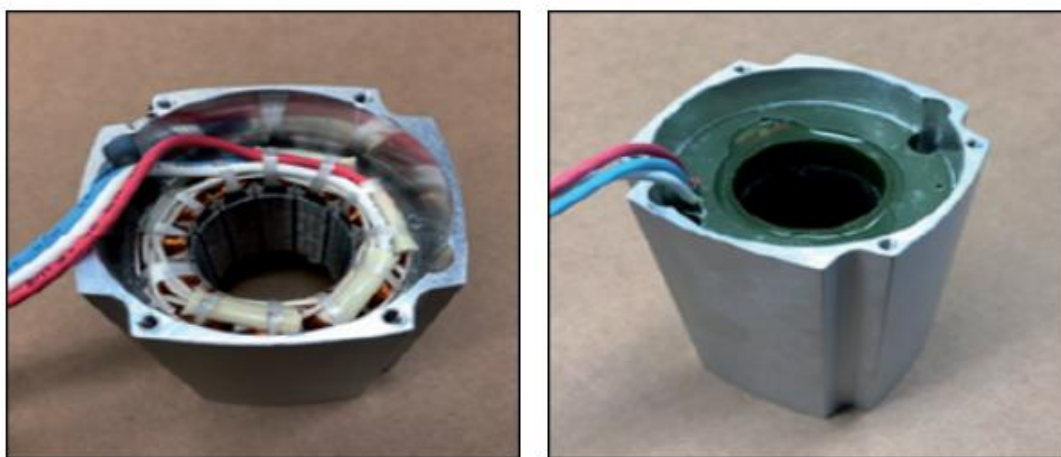
Tyto pryskyřice jsou v současné chvíli velmi využívány v elektrických strojích. Epoxidové pryskyřice se řadí mezi termosetické látky v jejichž molekulách jsou nejčastěji dvě epoxidové skupiny, ze kterých je složená daná makromolekula. Systémy na bázi epoxidové pryskyřice byly vyvinuty již více než před 60 lety, nicméně jedná se o oblast, kde dochází stále k dalšímu vývoji, tak aby tyto materiály co nejvíce vyhovovaly zákazníkům a aby docházelo ke snižování výrobních nákladů na tyto materiály. [22] [23]

Tyto pryskyřice jsou užívány z důvodu jejich dobrých elektroizolačních a mechanických vlastností, silnou stránku je i dobrá tepelná vodivost, přilnavost, dlouhá životnost a chemická odolnost. [22] [23]

V současné chvíli je vyvíjen v Japonsku nový systém Cast and go, který by měl nákladově zefektivnit proces výroby ve srovnání s tradičními epoxidovými licími systémy, míchání by v tomto systému bylo nesrovnatelně jednodušší, stejně tak by došlo ke zjednodušení dávkování materiálu a k zeštíhlení celého výrobního procesu. [26]

---

Následující obrázek číslo 9 zobrazuje jednu z možností využívání epoxidových pryskyřic k zalévání statoru epoxidovou pryskyřicí. Zalévání epoxidovou pryskyřicí je vhodné z důvodu zvyšujících se požadavků na výkon točivých strojů, kdy dochází ke zvyšování ztrát ve vinutí. Dalším důvodem je, že díky zalévacím hmotám dochází k lepšímu chlazení vinutí, kdy zalévací hmota dokáže vyplnit jednotlivé mezery a mechanicky zpevnit vinutí, ochránit stroj proti prachu a vlhkosti. [7]



Obrázek 8: Zalévání vinutí [7]

#### 4.2.2 Plniva

Nedílnou součástí každého kompozitu jsou kompozitní plniva. Tento nespojitý prvek vyniká dobrými mechanickými vlastnostmi a je dále dělen na:

- *Částicová plniva*

Tato plniva mají přibližně stejný každý z jejich rozměrů (s výjimkou vrstveného plniva). Plniva lze rozlišovat podle jejich tvaru na částice kulovité, vrstvené a tyčinkovité. [27] [26]

- *Vláknová plniva*

V kompozitních materiálech se převážně užívají vlákna, která mají kruhový průřez v průměru od 100 nanometrů do 10 mikrometrů. Mezi užívaná vlákna se řadí vlákna přírodní, skleněná, plastová, uhlíková, keramická či kovová. [27] [26]

Vláknová plniva je možné dále dělit na jednovrstvé a vícevrstvé. V případě jednovrstvých plniv se jedná o jednu či více samostatných vrstev z nichž každá má

---

stejná specifika. U vícevrstvých vláknových plniv se jedná o materiály složené z kompozitů, které jsou orientovány různými směry při různých délkách.

Specifickou skupinou jsou hybridní kompozitní materiály, které se skládají z obou typů plniv.

### 4.3 Slída

Pro elektrické stroje je slída velmi vhodným izolantem, což je způsobeno převážně tím, že tento materiál je odolný vůči elektrickému namáhání, a i vůči vyšším teplotám. Nevýhodou tohoto materiálu je pak, malá odolnost vůči mechanickému namáhání. [9]

Převážně v oblasti vysokonapěťové izolace je v současné chvíli slída velmi podstatným materiálem a neexistují prakticky žádné jiné alternativy. Slída je, díky svému složení, velmi snadno štípatelná a je možné dosahovat velmi tenkých plátků, až o velikosti 0,0005 mm. [11] [16]

V přírodě se nachází velká řada druhů slídy, pro elektroizolační materiály se z nich užívají převážně dva druhy.

Konkrétně se jedná o: [11]

- *Muskovit*

Tento druh slídy vyniká dobrými elektrickými i mechanickými vlastnostmi, díky dobré pevnosti se užívá jako izolant velmi často i v elektrických strojích.

- *Flogopit*

Na rozdíl od muskovitu, je tento druh slídy měkčí a má menší elektrickou pevnost. Výhodou ovšem je, že je více teplotně odolný a snadněji štípatelný.

V přírodě se nachází slída, která v sobě obsahuje i jiné materiály, aby byla tedy vhodná pro účely elektrotechniky, je nejprve nutné slídu očistit na tzv. surovou slídu. Štípáním surové slídy se pak vytváří jednotlivé slídové výrobky, kdy se jednotlivé slídové lístky pojí různými elektroizolačními materiály, převážně pak pryskyřicemi. V současnosti se užívá převážně slída rekonstruovaná, která je rozmělněna na malé částičky, a s vodou vytvoří kaši, která se zpracovává na kalcinovaný a nekalcinovaný slídový papír. Této slídě se dále říká i remika. [11] [16]

Kalcinovaný papír vzniká v případě, kdy je přeměna provedena chemicky. Výroba slídového papíru chemicky se nazývá Bardetův způsob. Při této technologii výroby se

---

síra zahřívá při teplotě cca 800 °C, čímž ztrácí významnou část své vody. Poté dojde k výraznému ochlazení slídy, díky tomu se naruší struktura krystalů a slída výrazně zvětší svůj objem. Následkem těchto postupů vznikne slídová suspenze, která se dále upravuje a zpracovává na papír. [11]

Pokud se slída rozmělní mechanicky, vzniká nekalcinovaný papír. Výroba slídového papíru tzv. Heymannovým způsobem se slída štěpí o překážky pod proudem vody na malé části. Které se následně zpracovávají, stejně jako v předchozím případě na papírenských strojích na nekalcinovaný papír. Výhodou papíru kalcinovaného je, že je elektricky pevnější, je velmi pevný v tahu a je tenčí. Výhodou nekalcinovaného papíru je, že se snadno impregnuje, což se vyplatí především ve VPI systémech. [16]

#### **4.4 Polovodivé pásy**

Na výstupu vinutí z drážek dochází k velkému napěťovému skoku, který může způsobovat tvorbu částečných výbojů. Z tohoto důvodu jsou zde používány polovodivé pásy a laky. Pásy a laky zaručují, že na výstupu vinutí z drážky nedochází k velkému nárůstu napětí a tedy, že nedochází k tvorbě výbojů. Z důvodu opotřebování laků, je v praxi častěji využíváno pásek. Další nevýhodou laků je jejich doba tvrdnutí na vzduchu, která bývá velmi rozdílná, a je nutné nanášet i několik vrstev. Výroba laků a pásek se stejně skládá z několika částí. Mechanické vlastnosti pásek zajišťuje nosná složka, kde se nejčastěji využívají skleněné tkaniny. Další složkou, která je zastoupena je plnivo. Tato složka zajišťuje rozložení elektrického pole a je zastoupena až v 80 % ochrany. Jako plnivo se nejčastěji používá karbid křemíku. Poslední zastoupenou složkou je pojivo, které zajišťuje spojení všech částí. Jako pojiva se nejčastěji používají pryskyřice. [11]

Mezi zástupce polovodivých pásek lze zařadit výrobek Coronashield SC 217.21, který se používá na konci vinutí, kde redukuje narůstající sílu elektrického pole, která může vést k částečným výbojům. Je tvořen tkanou polyesterovou páskou impregnovanou polovodivým lakem. Tento produkt je kompatibilní s metodou Resin rich i VPI. [34]

Jako ochrana proti vnitřním výbojům se používá např. vodivá páska CoronaShield C 215.51-03, která je tvořena z netkané polyesterové pásky impregnované vodivým lakem. Vodivá páska je namotána mezi vnější částí hlavní izolace a laminovaného

---

statorového jádra. Stejně jako předchozí materiál je vhodná pro zpracování jak metodou Resin rich, tak VPI. [51]



---

## 5 Budoucnost a vývoj izolačních systémů

Na rozdíl od konstrukce strojů, která se zdá být poměrně stabilní kapitolou v oblasti elektrotechniky, dochází v oblasti materiálů v posledních letech k stále většímu vývoji a pokrokům. Aby mohlo i v budoucnu docházet k dalšímu rozvoji v oblasti izolačních materiálů je zapotřebí, aby se vývoj v této oblasti věnoval takovým materiálům, které budou mít co nejvhodnější vlastnosti.

Na začátku této kapitoly je zapotřebí definovat, jaké jsou požadavky na elektrické točivé stroje do budoucna.

Oblasti, na které by měl brát zřetel při vývoji do budoucna:

- Stále výkonnější elektrické stroje, s tím související tlak na vyšší teplotní odolnost strojů
- Úspora nákladů
- Ochrana životního prostředí
- Nakládání s odpady
- Úspora prostoru ve výrobě

Mezi cíle patří:

- Lepší tepelná vodivost
- Redukce nehomogenity (bublíny, nečistoty)
- Možnost sériové výroby

### 5.1 Nanomateriály

Nanovláknenný materiál je oficiálně definován jako [29] „*Přírodní materiál, materiál vzniklý jako vedlejší produkt nebo materiál vyrobený, obsahující částice v nesloučeném stavu nebo jako agregát či aglomerát, ve kterém je u 50 % nebo více částic ve velikostním rozdělení jeden nebo více vnějších rozměrů v rozmezí velikosti 1 nm - 100 nm.*“

Jednou z možností vývoje v oblasti složení tříslučkového elektroizolačního kompozitu je využívání nanovláknenné netkané polymerní vrstvy. Tyto materiály mají oproti v současné chvíli využívaným technologiím velmi dobré mechanické a elektrické

---

vlastnosti včetně požadované tepelné vodivosti. Nicméně v současné chvíli se těchto materiálů příliš neužívá z důvodu náročné výroby a velmi vysoké ceny. [28]

Výzvou pro oblast vývoje je posílení tepelné vodivosti systémů. Právě k tomu by mohlo vést užívání nanočástic. Dle experimentu provedeného dle citované disertační práce, dokážou nanovláknenné vrstvy zmenšit vzduchové bubliny, které se vytvářejí při metodě zpracování resin-rich. Nanovláknenná vrstva se na základě výsledků z experimentu dokáže lépe přizpůsobit dané formě než běžně užívaná skleněná tkanina. Další výhodou užívání těchto materiálů, je snížení vnitřní rezistivity daného polymeru oproti jiným složkám daného kompozitu. [28]

V jiné studii bylo zkoumáno, jak přispěje ke zlepšení tepelných vlastností epoxidových kompozitů nanoplňivo a jaké jsou elektrické vlastnosti nanokompozitů na bázi epoxidových pryskyřic plněných nanočásticemi z hydrofobního a hydrofilního oxidu křemičitého. V této studii je uváděna jako slabá stránka epoxidových pryskyřic, že mají nízkou tepelnou vodivost. V případě nalezení vhodných nanomateriálů, by bylo možné snížit tepelný odpor daného stroje a zvýšit tak možnosti využití stroje. V rámci výzkumu byly vyzkoušeny mikro a nanočástice oxidu křemičitého. V případě mikročástic došlo v daném pokusu ke zlepšení tepelné vodivosti ve srovnání s nanočásticemi. Naopak v případě nanočástic dochází k výraznému zlepšení objemu a odporu. Druhá část výzkumu se věnovala částicím oxidu křemičitého. Z měření vyplynulo, že v případě hydrofilních částic oxidu křemičitého dochází k absorpci vody, a to má za následek zhoršení aktivní vlastnosti celého kompozitního systému. Vzorky s hydrofobními částicemi oxidu křemičitého mají lepší hodnotu absorpčního proudu, objemu rezistivity, dielektrické pevnosti a tepelné vodivosti než u vzorky s obsahem hydrofilních částic oxidu křemičitého. [40]

Do budoucna lze s přicházejícím rozmachem nanovláknenných technologií napříč odvětvími předpokládat zjednodušení výroby těchto materiálů. Velkou výhodou a příslibem užívání nanovláknenných materiálů do budoucna je i předpoklad možnosti výroby těchto materiálů v sériové výrobě, a celkový příslib k vylepšení výsledků izolantů při metodě zpracování resin-rich, která je z celkového pohledu pro část podniků finančně výhodnější než metoda VPI. [28]

---

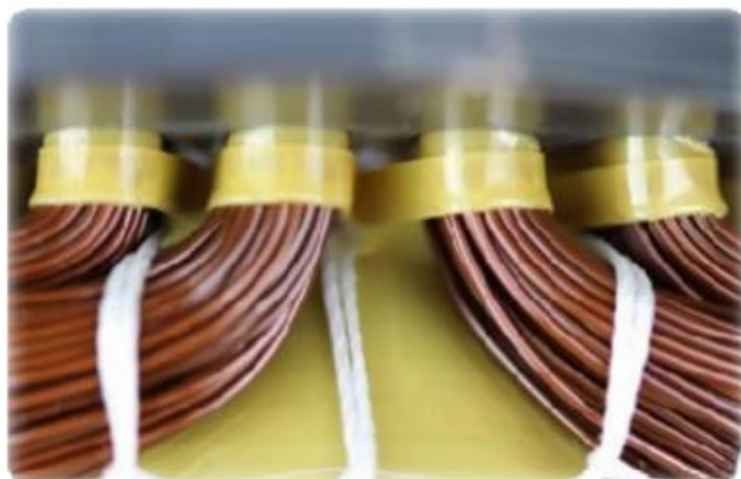
Nanovlákna mohou být vyráběna z mnoha typů materiálů, výhodou do budoucna je i možnost jejich získávání z biokompatibilních polymerů, jejichž předností je šetrnost k životnímu prostředí.

## 5.2 Vývoj nových druhů materiálů

Vývoj se v současné chvíli zaměřuje na nové možnosti směřování u užívaných vláken, tak aby nové materiály vycházely z kladů stávajících vláken, ale dokázaly pokrýt i jejich nedostatky. Příkladem je současný výzkum, který se soustředí na **nahrazování aramidových vláken**. Tato vlákna byla vyvinutá již na počátku 60. let 20. století. Aramidová vlákna mají takovou chemickou strukturu, že jsou jednotlivé vazby zarovnané podél osy daných vláken. Díky tomu jsou vlákna velmi pružná a odolná vůči otěru. Dalším významným kladem těchto vláken je, že jsou velmi málo hořlavá. Hlavním argumentem proto, aby se jednalo o materiál perspektivní pro oblast elektrických izolantů, je že mají velmi nízkou elektrickou vodivost. [22]

I přes nesporné výhody využívání aramidových vláken jsou zde určitá omezení. Materiály, kde jsou využívána aramidová vlákna jsou náchylné na vlhkost a mají své orientační limity. Jednou z možností vývoje je nově představený materiál, tzv. kompozitní filmový substrát, který disponuje lepšími elektrickými a mechanickými vlastnostmi a překonává tak současná omezení laminátových výrobků s aramidovými vlákny. [41]

Tento materiál se nazývá ELAN-Film® HT-180, jedná se o kompozitní materiál, který je složen ze speciálně vyvinuté pryskyřice, která je vysoce odolná proti znečištění, zároveň má vhodné i další vlastnosti. [41]

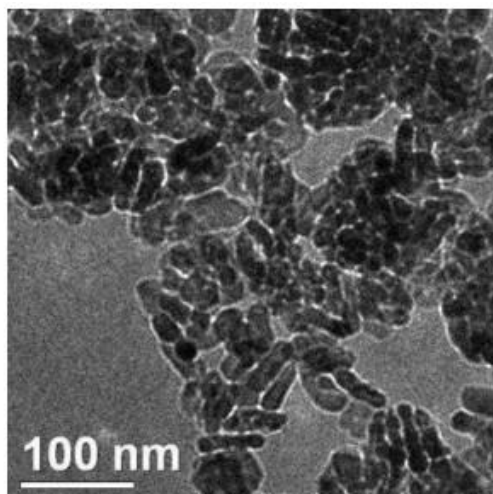


Obrázek 9: ELAN-Film® HT-180 [41]

Z výzkumu vyplývá, že na rozdíl od aramidového papíru, který ztrácí minimálně 40 % svých vlastností po kontaktu s vodou zůstávají hodnoty ELAN filmu prakticky beze změny. Tento materiál by tak mohl vést do budoucna ke zlepšování, je konkurence schopný a díky jednoduššímu nakládání a skladování by mělo docházet k úspoře nákladů. [41]

Další výzvou pro oblast vývoje nových kompozičních materiálů jsou vzniky závad ve vysokonapěťových zařízeních, ke kterým dochází z důvodu významné nehomogenity. Pro správné fungování točivých strojů je zapotřebí, aby materiály, které jsou v jejich izolačních systémech využívány splňovaly elektrická, mechanická i tepelná kritéria. To je zajištěno součinností jednotlivým kompozitů ve správných poměrech. Rozhraní v těchto materiálech se vytváří mezi složkami s různými relativními permitivitami, což může být příčinou deformací intenzity elektrického pole. [43]

Vývojem nového typu kompozičního materiálu se zabývá i další citovaná studie, která představuje nový typ izolačního materiálu, který je na bázi epoxidové pryskyřice a nanočástic MgO polyethylennaftalátu. V rámci studie byl zkoumán potenciál tohoto materiálu pomocí mnoha metod, jako je dielektrická spektroskopie, odporová měření, Scheringův můstek a dielektrické pevnosti. [43]

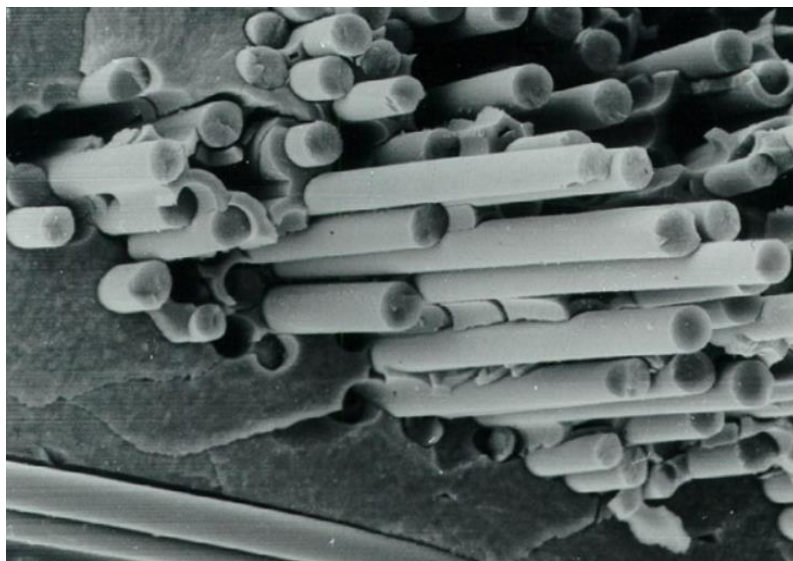


Obrázek 10:Tvar nanoplňiva MgO [43] [44]

Ztrátový činitel byl vyhodnocen jako dostatečně nízký. Materiál vykazuje mírné rozdíly v chování v rámci zahřívání a ochlazování, to může ale souviset s dodatečným vytvrzováním pryskyřice. Materiál má dobrou dielektrickou pevnost a dostatečný odpor. Výhodou materiálu je i větší homogenita díky použití nanoplňiva. Pro možnosti zavádění tohoto materiálu do průmyslu jsou ale zapotřebí další výzkumy vedoucí k rozvinutí jeho užívání. [43]

### **5.3 Keramická vlákna**

Keramická vlákna se jeví jako jedna z budoucích možností náhrady skelných vláken v kombinaci s vhodným typem pryskyřice. Keramická vlákna se vyrábějí z taveniny oxidů hlinitých a křemičitých. V současné chvíli mají své využití převážně ve slévárnách, průmyslových pecích, kotelnách či komínech. Nicméně stále více se mohou tyto vlákna do budoucna uplatňovat v průmyslových izolacích, převážně v těch, které přicházejí do styku s vysokými teplotami. [21] [22]



Obrázek 11: Keramická vlákna [42]

Velkým kladem keramických vláken je jejich žáruvzdornost. Z toho důvodu se mohou využívat jako izolanty i v místech, kde dochází ke styku s vysokými teplotami. Teplotní odolnost těchto vláken je až 1600 °C, což výrazně převyšuje v současné chvíli užívané materiály. Tato vlákna jsou ohebná a mají nízkou teplotní vodivost, zároveň jsou pevná a pružná a velmi dobře obstojí při kontaktu s chemikáliemi. Dalším kladem těchto vláken je, že jejich tepelné a fyzikální vlastnosti se nijak nemění při styku s vodou, párou, či oleji. Do budoucna by mohla být vlákna více využívána i z důvodu dobrého vlivu na životní prostředí. [21] [20]

#### **5.4 Recyklace kompozitních materiálů a ekologie**

I přes nepopíratelné přednosti kompozitů je významnou výzvou do budoucna **recyklace** a nakládání z těchto materiály poté, co doslouží svým původním účelům. V současné chvíli neexistují univerzální metody, jak separovat od sebe jednotlivé složky, tak aby recyklace těchto materiálů byla ekonomicky únosná. Skládování kompozitů již je v současné chvíli zakázáno v některých zemích Evropské unie a lze předpokládat, že tlak na jednotnou legislativu, která skládování zakáže ve všech členských zemích, bude posilovat. [45]

---

Příklady možností nakládání s vysloužilými kompozity:

- **Druhotné zpracování**

V případě druhotného zpracování dochází ke zpracování a znovu využití těchto stále nadmíru kvalitních materiálů v úplně jiných oblastech než v odvětví elektrotechniky. Nicméně i při druhotném zpracování je prakticky jisté, že dojde postupem času k dosloužení materiálu a jedná se spíše o odsouvání problematiky do budoucna. [45]

- **Recyklace**

V případě recyklací je několik možných způsobů nakládání s kompozitními materiály, konkrétně se jedná o recyklaci:

- *Mechanická*

Tento druh recyklace je velmi běžný v případě různých druhů materiálů, bohužel není pro recyklaci kompozitů příliš vhodný. Pryskyřice je ve většině kompozitů velmi těžko oddělitelná, z důvodu, že materiál je velmi odolný i vůči vysokým teplotám. Hlavním nedostatkem tohoto typu recyklace je degradace materiálů, ze kterých se kompozit skládá a jejich znehodnocení. [45]

- *Termální*

V rámci řízené degradace matrice při pyrolýze je možné při udržení správných teplot vypálit pryskyřice a zachovat vlákennou část. Tekutá složka, která se získá z pyrolýzy může být využita pro výrobu paliv či petrochemikálií. Nevýhodou tohoto typu recyklace je nutnost velké obezřetnosti při nakládání s potenciálně nebezpečným odpadem a užívání speciálních filtrů pro ekologičnost varianty. [45]

- *Chemická*

Velkým příslibem do budoucna je cesta chemické recyklace. V tomto procesu dochází u polymerů k rozpadu základních stavebních jednotek, či jejich kratších řetězců. Aby byla varianta bezpečná je zapotřebí, aby nedocházelo k úniku chemikálií. Výhodou je, že v případě této varianty je možnost recyklace i znečištěného odpadu. Nevýhodou je, že tato technologie

---

je velmi nákladná a z toho důvodu není zatím příliš dostupná komerčním zákazníkům. [45]

Ve společnosti se stále častěji hovoří o nutnosti **výroby „zelených“ ekologických druhů pryskyřic**, které obstojí náročným požadavkům, které jsou kladeny na kvalitu těchto materiálů, ale také budou vyráběné udržitelným způsobem. V současné chvíli se tedy lokální, ale i nadnárodní společnosti snaží přicházet s win – win variantami.

Možnosti užívání materiálu na výrobu elektroizolačních materiálu jsou stále více ovlivňovány ze strany zákonných regulí. Základním dokumentem je Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1907/2006 ze dne 18. prosince 2006 o registraci, hodnocení, povolování a omezování chemických látek, o zřízení Evropské agentury pro chemické látky. [46] [47]

Dalším podstatným pramenem práva v této oblasti je Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2004/42/ES ze dne 21. dubna 2004 o omezování emisí těkavých organických sloučenin vznikajících při používání organických rozpouštědel v některých barvách a lacích a výrobcích pro opravy nátěru vozidel. [48]



---

## Závěr

Elektroizolační materiály pro točivé stroje jsou velmi dynamickým odvětvím, které se stále vyvíjí. Oproti jiným oblastem, dochází v oboru elektroizolačních materiálů k neustálým posunům, tak aby byly dané materiály co nejvhodnější a nejekonomičtější. V posledních letech je kladen důraz i na to, aby elektroizolační materiály co nejvíce odpovídaly stále vyšším nárokům kladeným legislativou v oblasti ochrany životního prostředí.

V rámci této bakalářské práce byla provedena analýza elektroizolačních materiálů pro točivé stroje. Zároveň bylo provedeno zamyšlení nad jejich perspektivou do budoucna na základě rešerše odborných pramenů.

V úvodních kapitolách této práce byla provedena stručná analýza toho, co jsou to točivé stroje, jak se dělí a jaké jsou principy jejich fungování. V kapitole byla popsána oblast vinutí a poprvé v rámci práce bylo otevřeno téma izolantů.

V následující kapitole této práce jsou uvedené jednotlivé klíčové vlastnosti, které jsou zapotřebí, aby splňoval daný elektroizolační materiál, aby odpovídal na něj kladeným požadavkům. Čtvrtá kapitola bakalářské práce otevírá téma izolačních systémů, kdy tyto systémy pro vyšší přehlednost dělí do dvou podskupin, a to nízkonapěťových a vysokonapěťových izolačních systémů. V rámci kapitoly je tak popsána izolace vodičů, izolace drážek, impregnace i rozdíly mezi metodami VPI a Resin-rich.

V předposlední kapitole práce jsou definovány některé ze základních elektroizolačních materiálů, kdy se práce věnovala převážně těm materiálům, které mají nejvýraznější zastoupení v točivých strojích. Z toho důvodu jsou v rámci kapitoly blíže popsány laky, slída a převážně kompozity, jeden z nejperspektivnějších elektroizolačních materiálů vůbec, jelikož se v něm pojí klady několika dílčích materiálů.

Poslední kapitola práce si klade za cíl zamyslet se nad možnostmi vývoje odvětví elektroizolačních materiálů do budoucna. Na základě práce s odbornými zdroji se jako jedna z nejpravděpodobnějších oblastí rozvoje jeví cesta nanomateriálů, které se vyznačují výbornými vlastnostmi a pokud by došlo do budoucna ke zjednodušení a zlevnění jejich výroby, jednalo by se o ideální materiál, který by našel využití převážně v metodě resin-rich. Jako další možnosti se jeví začít ve větších objemech využívat

---

keramických vláken a dalších nových materiálů, které by měly klady současně využívaných materiálů, ale zároveň eliminovaly jejich nedostatky. Velkým tématem do budoucna je recyklace a znovu využívání kompozitních materiálů, stejně jako výzkum a vývoj ekologických variant i z důvodu stále většího tlaku v této oblasti ze strany legislativy.

---

## Seznam použité literatury

- [1] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7043-444-9.
- [2] KONEČNÁ, Eva a Aleš RICHTER. ELEKTRICKÉ STROJE: Učební texty. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. [online]. Upravené vydání. Liberec, 2000 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: [http://www.mti.tul.cz/files/ele/El\\_Str1\\_h.pdf](http://www.mti.tul.cz/files/ele/El_Str1_h.pdf)
- [3] VLADAŘ, Jaroslav a Jiří ZELENKA. *Elektrotechnika a silnoproudá elektronika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
- [4] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje-synchronní stroje*. Praha: Academia, 1982.
- [5] STONE, Greg C. *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, c2004. ISBN 0471445061.
- [6] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [7] *Elektro – časopis pro elektrotechniku – Zalévání vinutí* [online]. 2019 [cit. 2022-07-15]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/clanek/zalevani-vinuti-novy-trend-v-navijeni-elektromotoru--3743>
- [8] *O Energetice.cz - zpracování mědi* [online]. 2015 [cit. 2022-07-15]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/zpracovani-medi-od-mineralu-az-po-kabel>
- [9] *Electrical engineering portal: Zpracování hliníku*[online]. [cit. 2022-07-18]. <https://crushtymks.com/cs/energy-and-power/397-aluminium-and-its-alloys-used-in-electrical-engineering.html>
- [10] SEQUENZ, Heinrich. *Technologie vinutí elektrických strojů točivých*. Přeložil Josef HAPL, přeložil Vladimír HOLUB. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980.
- [11] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.

- 
- [12] HRUŠKOVIČ, Ladislav. *Elektrické stroje*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 1999. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 80-227-1249-3.
- [13] ARTBAUER, Ján, Juraj ŠEDOVIČ a Vladimír ADAMEC. *Izolanty a izolácie*. Bratislava: Alfa, 1969. Edícia elektrotechnickej literatúry (Alfa).
- [14] Dupont- Nomex [online].2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.dupont.com/brands/nomex.html>
- [15] Michal O. Technologie pro elektrotechniku. Presentation presented at: [Technologie pro elektrotechniku FEL 2022; Plzeň, Czechia.]
- [16] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [17] Mikovcová, P. Porovnání technologie Resin Rich a VPI pro izolační systémy [stať]. 2006.
- [18] Teledynehi – VPI [online].2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.teledynehi.com/resourcecenter/Application%20Notes/vacuum%20pressure%20impregnation%20system.pdf>
- [19] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [20] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály – druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN isbn978-80-7372-279-1.
- [21] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [22] MALLICK, P. K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. ISBN 978-0-8493-4205-.
- [23] MÍŠEK, Bohumil. *Kompozity*. Brno: Technický dozorčí spolek - Sekce materiálů a svařování, 2003. ISBN 80-903386-0-7.
- [24] Plasticportal – Termoplasty [online].2020 [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/termoplasticke-kompozity-ensinger-uvadi-do-provozu-nove-zarizeni-na-vyrobu-prepregu/c/6838/>

- 
- [25] JANČÁŘ, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [26] HISHIKAWA S., "Technical history and future prospects of cast epoxy resin systems for heavy electrical insulation materials," *Proceedings of 2011 International Symposium on Electrical Insulating Materials*, 2011, pp. 527-527, doi: 10.1109/ISEIM.2011.6826393. Dostupné také z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6826393>
- [27] *Plasticportal – Kompozitní materiály* [online]. 2020 [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/kompozity-s-termoplastickou-matrici-a-automobilovy-prumysl-2-cast/c/2653/>
- [28] ZEMANOVÁ, Monika. Vývoj nové generace elektroizolačních materiálů využívajících netkané nanovláknenné vrstvy. V Plzni: Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, 2018.
- [29] J. Potočník, "DOPORUČENÍ KOMISE ze dne 18. října 2011 o definici nanomateriálu (2011/696/EU)," vol. 0328, no. 2005, pp. 2010–2012, 201
- [30] *Technický deník – Kompozity* [online]. 2006 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/kompozity-zdroj-stale-nevycerpatelných-konstrukčních-možností\\_11466.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/kompozity-zdroj-stale-nevycerpatelných-konstrukčních-možností_11466.html)
- [31] *Eferrit – Aramidová vlákna* [online]. 2021 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://cs.eferrit.com/aramidove-vlakna/>
- [32] *Hennlich těsnění – Keramická speciální vlákna* [online]. 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: [https://tesneni.hennlich.cz/fileadmin/user\\_upload/H CZ/Home/Tesneni/Produktov%C3%A9%20listy/Termoizola%C4%8Dn%C3%AD%20%C5%A1n%C5%AFry%20keramick%C3%A1%20speci%C3%A1ln%C3%AD%20vl%C3%A1kna.pdf](https://tesneni.hennlich.cz/fileadmin/user_upload/H CZ/Home/Tesneni/Produktov%C3%A9%20listy/Termoizola%C4%8Dn%C3%AD%20%C5%A1n%C5%AFry%20keramick%C3%A1%20speci%C3%A1ln%C3%AD%20vl%C3%A1kna.pdf)
- [33] JIRKOVSKÝ, Zdeněk. Vývoj a současné trendy v izolačních systémech elektrických točivých strojů. Plzeň: Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, 2011.
- [34] *Anticorona – Corona shield* [online]. 2012 [cit. 2022-08-21]. Dostupné z: [https://www.sibel.biz/upl\\_doc/CoronaShield%20SC%20217.21-EN.pdf](https://www.sibel.biz/upl_doc/CoronaShield%20SC%20217.21-EN.pdf)

- 
- [35] Labara – drážková izolace [online]. 2022 [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: <http://www.labara.cz/cs/izolanty/flexibilni/bandazova-a-drazkova-izolace>
- [36] STAUBER, Jiří. *Návrh a výroba izolačního systému (resin-rich) vn statorových vinutí na bázi předimpregnovaných pásek*. Přednáška na konferenci Diagnostika, 2001.
- [37] *Preformed windings – Resin rich vs VPI* [online]. 2020 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: <https://www.preformedwindings.com/products/hvcoils/resin-rich-vs-vpi/>
- [38] SKŘIVAN, Vlastimil. *Polovodivé pásy a jejich využití v elektrických strojích*. V Plzni: Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, 2012.
- [39] *Isovolca – Calmica* [online]. 2022 [cit. 2022-08-20]. Dostupné <https://stenbacka.fi/wp-content/uploads/sites/3/2019/08/Calmica-flex-eristenauhat-Engl-02.04.2004.pdf>
- [40] T. Tomášková, L. Harvánek, P. Trnka, V. Mentlík, M. Sebok and M. Gutten, "New epoxy composite insulating material with nano fillers and micro fillers of silica with higher thermal conductivity," *2016 Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering (DEMISEE)*, 2016, pp. 89-93, doi: 10.1109/DEMISEE.2016.7530473. Dostupné také z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7530473>
- [41] T. Murray, M. Barmeier and S. Tuckwell, "Composite Film Technology, the Next Breakthrough in Flexible Electrical Insulating Materials," *2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2018, pp. 585-588, doi: 10.1109/EIC.2018.8481055. Dostupné také z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8481055>
- [42] *Wikipedia – keramická vlákna* [online]. 2018 [cit. 2022-08-19]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Keramick%C3%A1\\_textiln%C3%AD\\_vl%C3%A1kna#/media/Soubor:CVIpullout.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Keramick%C3%A1_textiln%C3%AD_vl%C3%A1kna#/media/Soubor:CVIpullout.jpg)
- [43] J. Hornak, P. Kadlec and P. Trnka, "Complex analysis of novel insulation material for rotating machines based on polymer/MgO," *2017 6th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/IYCE.2017.8003703. Dostupné také z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8003703>
- [44] *Nanoscale products – Magnesium Oxide (MgO, 99+ %, 20 nm)*, [online]. 2017 [cit. 2022-08-19]. Dostupné z: <http://www.nanoamor.com/inc/pdetail?v=1&pid=2543>

- 
- [45] *Materialtimes – kompozity na konci svého života*, [online]. 2021 [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://www.materialtimes.com/tema/kompozity-na-konci-sveho-zivota.html>
- [46] *Ministerstvo průmyslu a obchodu – Základní informace o povinnostech vyplývajících z nařízení REACH* [online]. 2022 [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/chemicke-latky-a-smesi/zakladni-informace-o-povinnostech-vyplývajících-z-narizeni-reach--147388/>
- [47] *Echa Europa – REACH* [online]. 2022 [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://echa.europa.eu/cs/regulations/reach/legislation>
- [48] *Lex europa – legal content* [online]. 2022 [cit. 2022-08-19]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32004L0042>
- [49] Z. Bezděk, "New VPI Insulation System of High Voltage Stator Windings of Large Rotating Electrical Machines Based on Cogemica VPI Tapes and One-component Epoxy Impregnation Varnish," 2020 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostics), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/Diagnostics49114.2020.9214660 Dostupné také z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9214660>
- [50] *Mica Tapes Samicapor* [online]. 2022 [cit. 2022 08 21]. Dostupné z: <http://www.comercialph.cl/wp-content/uploads/2015/06/Samicapor-366.55.10.pdf>
- [51] *Anticorona – Corona shield* [online]. 2012 [cit. 2022-08-21]. Dostupné z: [https://sibel.biz/upl\\_doc/Coronashield%20215.51-03-EN.pdf](https://sibel.biz/upl_doc/Coronashield%20215.51-03-EN.pdf)
- [52] ČSN EN 60085, „Elektrická izolace – Tepelné hodnocení a značení,“ © Český normalizační institut, ed.2. Praha, 2008.

---

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozložené a koncentrované vinutí [7].....	12
Obrázek 2: Izolace vinutí [38] .....	15
Obrázek 3: Rotory nakrátko asynchronních motorů, a) s natvrdo pájeným vinutím, b) s odlévaným vinutím [6] .....	17
Obrázek 4: Dielektrika a izolanty [12] .....	18
Obrázek 5: Resin – rich [14].....	27
Obrázek 6: VPI [14] .....	29
Obrázek 7: Synergetický efekt [20] .....	34
Obrázek 9: Zalévání vinutí [7].....	37
Obrázek 10: ELAN-Film® HT-180 [41].....	44
Obrázek 11:Tvar nanoplniva MgO [43] [44].....	45
Obrázek 12: Keramická vlákna [42] .....	46