

KOMPOZITY V ELEKTROTECHNICE

Přednáška v rámci semináře „*Kompozity v energetice*“
23. 11. 2023, ITAM AV ČR, v. v. i., Praha

Radek Polanský



FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

OBSAH PŘEDNÁŠKY

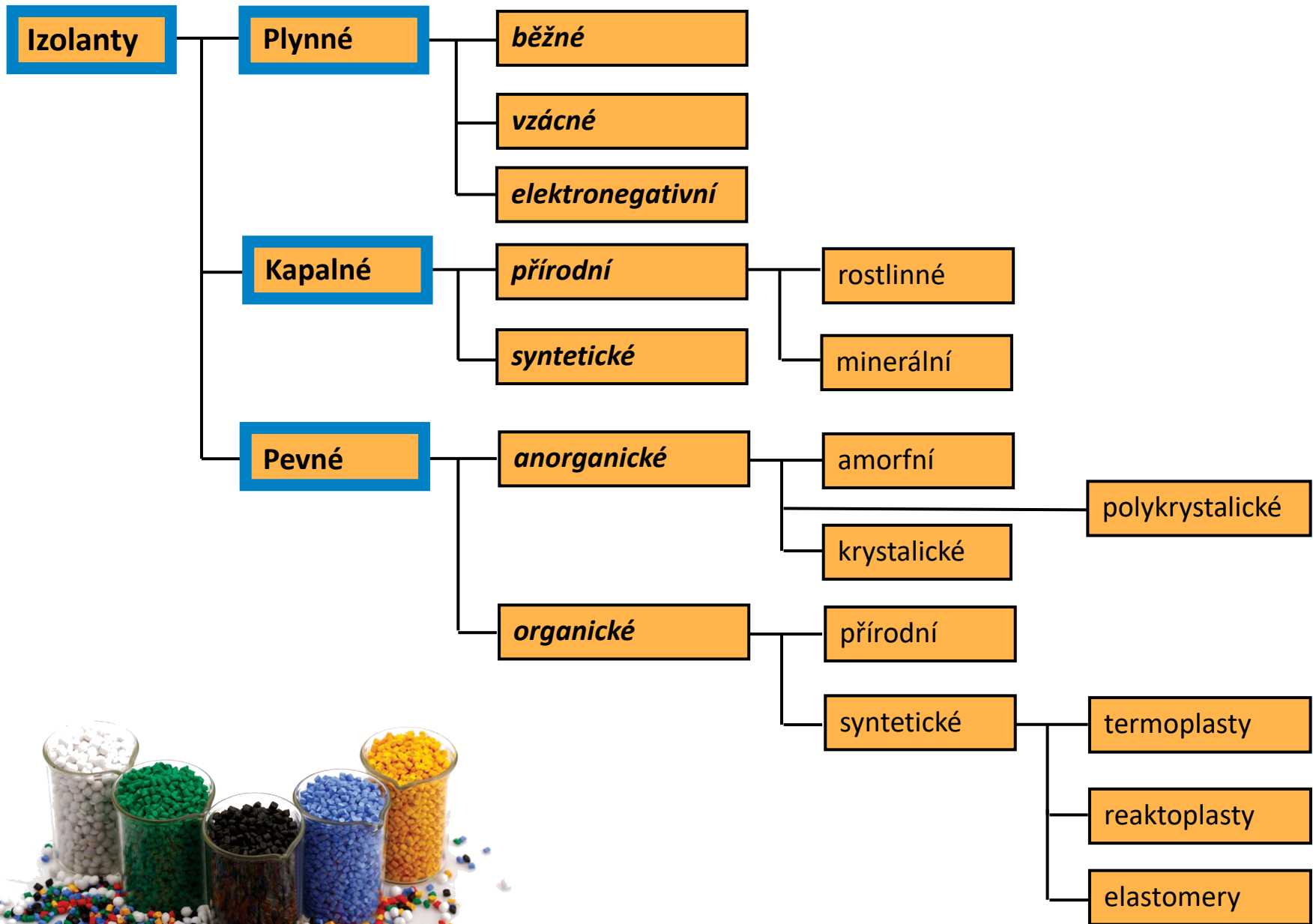
- Úvod
- Historický kontext
- Současné technologie
- Přehled požadavků, zkušební metody
- Aktuálně řešená témata
- Závěrečné shrnutí

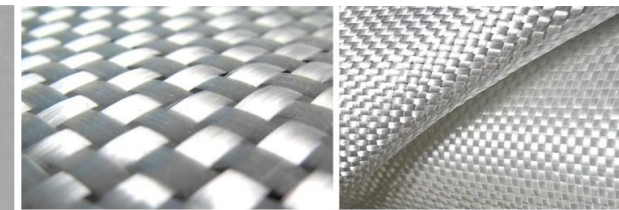
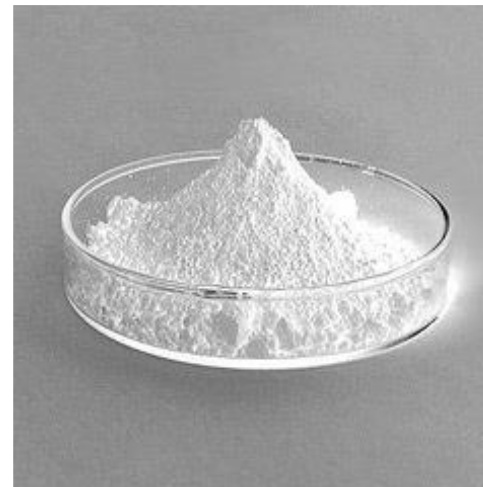
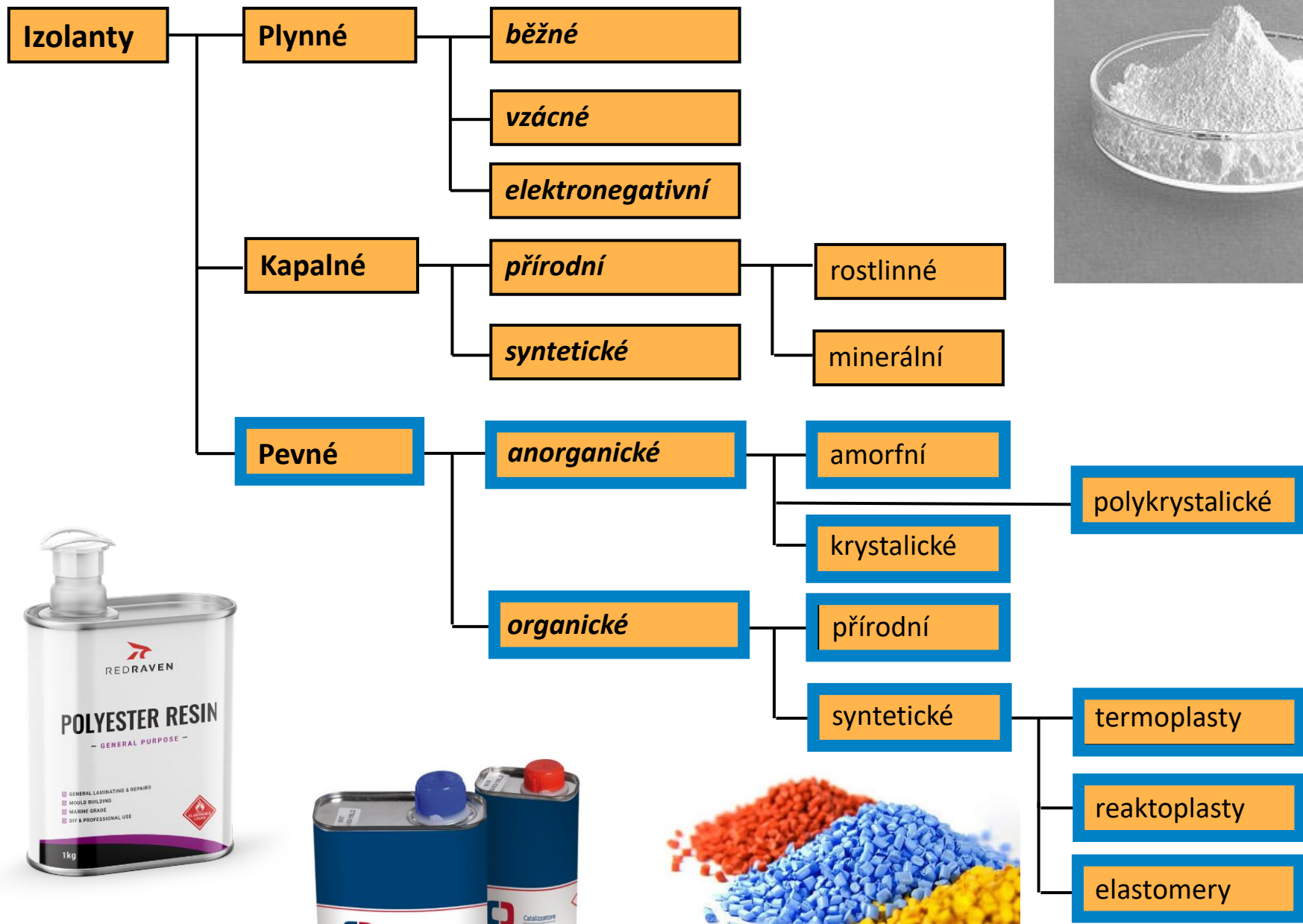


1. ÚVOD



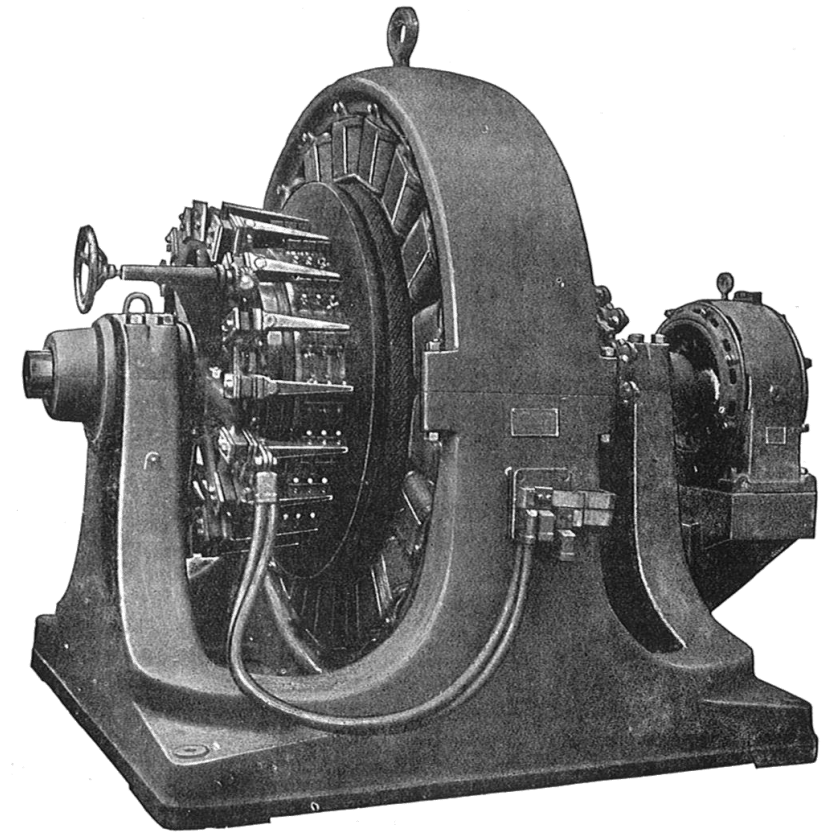
↑↑↑ Thomas Alva Edison (1847 – 1931) a Charles Steinmetz (1865 - 1923) kontrolují poškozené izolátory po testování.
↑↑ Katalog mikanitů z roku 1907. Páska z lakovaného batistu (2023) ↑





2. HISTORICKÝ KONTEXT

- **Historické vlivy ovlivňující návrh elektroizolačních systémů**
- Přírodní materiály
- První syntetické látky
- Syntetické plastové folie a netkané textilie
- Syntetické pryskyřice

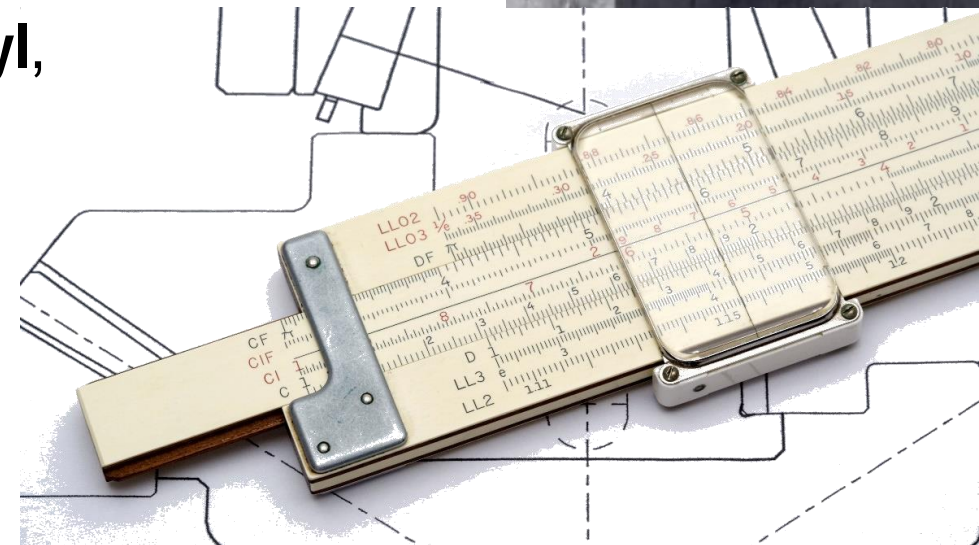
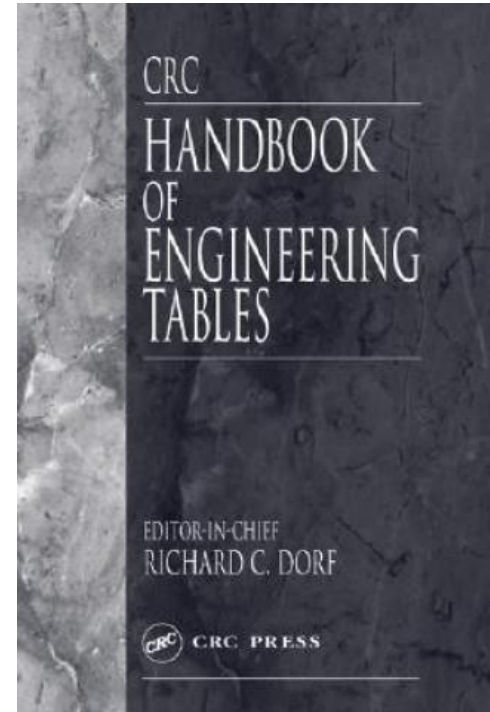


Skladba elektroizolačních systémů historicky vždy závisela na:

- dostupných materiálech a jejich ceně,
- technických nárocích dané aplikace,
- výrobních nákladech souvisejících s výrobními procesy dostupnými v dané době.

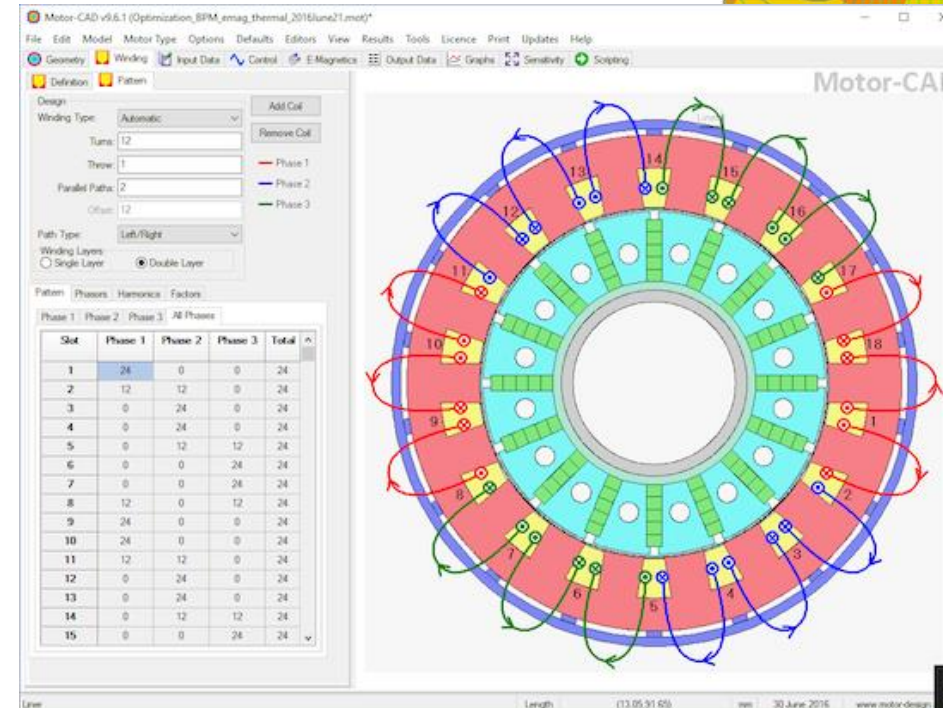
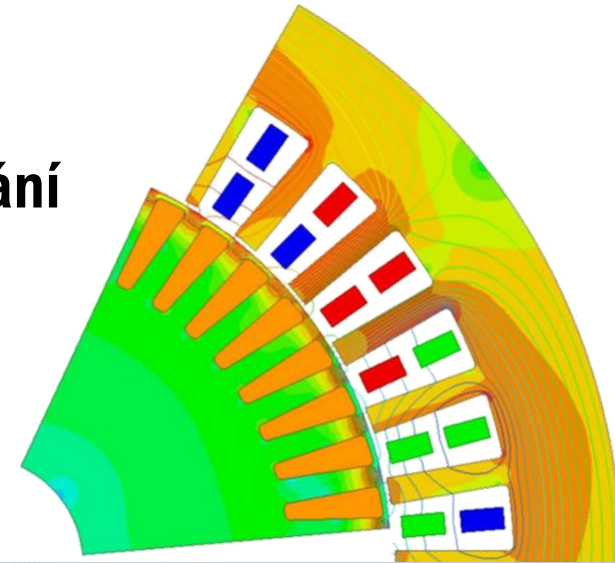
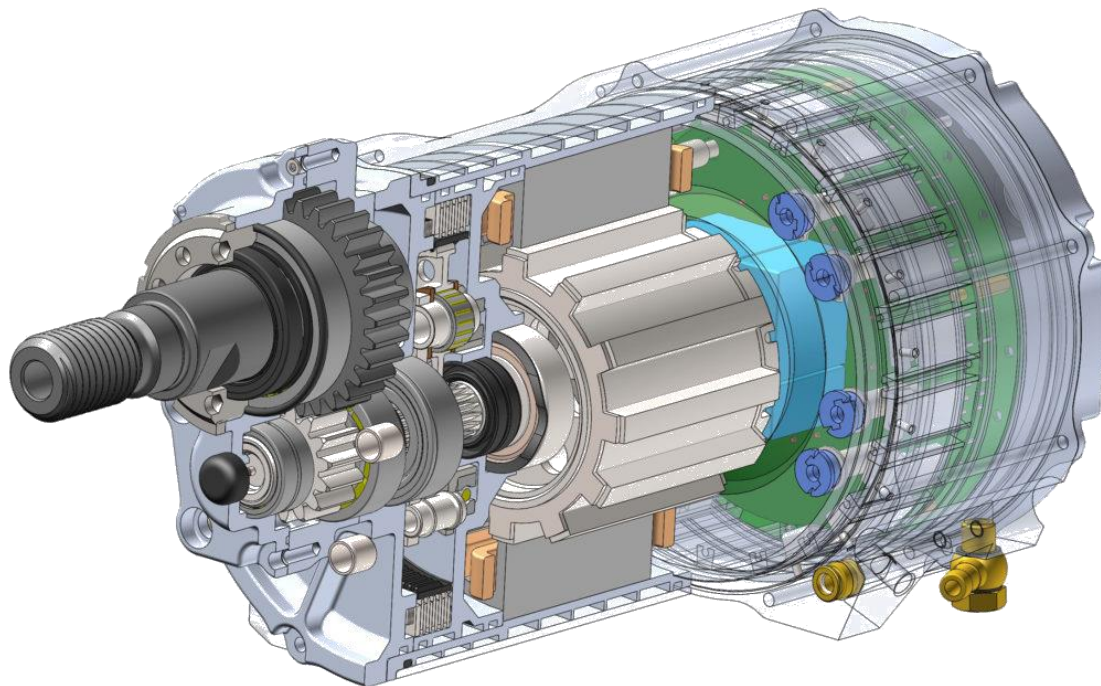
Prvopočátky elektrotechnického průmyslu:

- přírodní materiály,
- množství experimentů prováděných metodou **pokus-omyl**,
- provozní teploty, úroveň mechanického a elektrického namáhání na **nízkých hodnotách = konzervativní návrhy** strojů,
- dlouhá životnost strojů daná nevyužitím jejich předimenzovaných bezpečnostních rezerv.



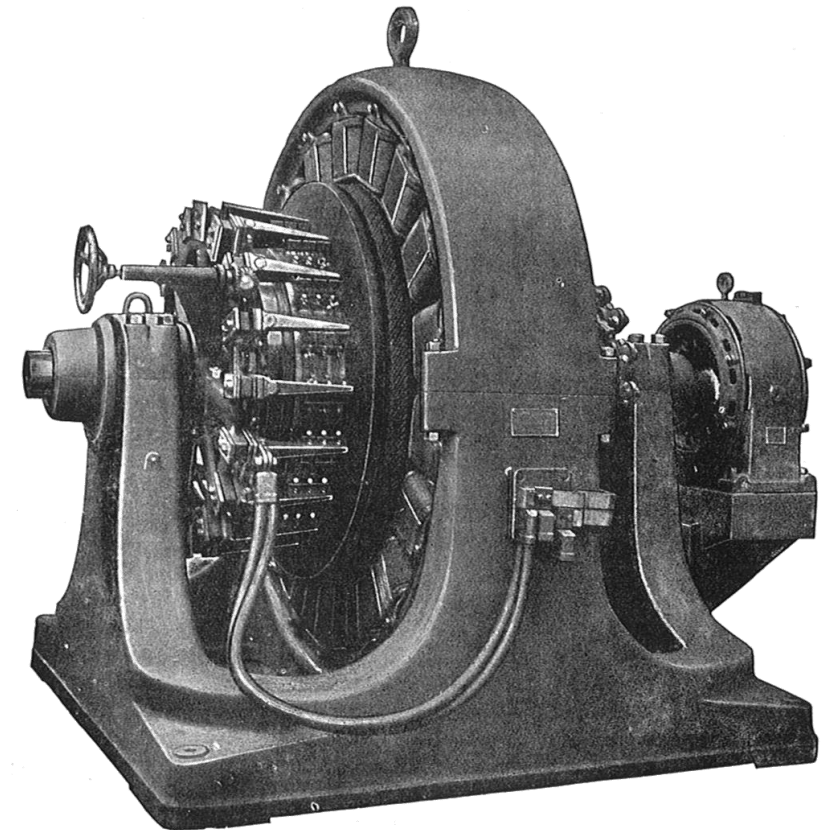
V současnosti:

- **elektroizolační systémy** pracují při mnohem **vyšším provozním namáhání** (výkonná výpočetní technika, sofistikované SW nástroje, špičkové materiály),
- **nižší výrobní náklady** a **životnost** lze přesněji **odhadnout**,
- **ALE** provoz strojů nad rámec jejich **jmenovitých hodnot** **obvykle není možný**.

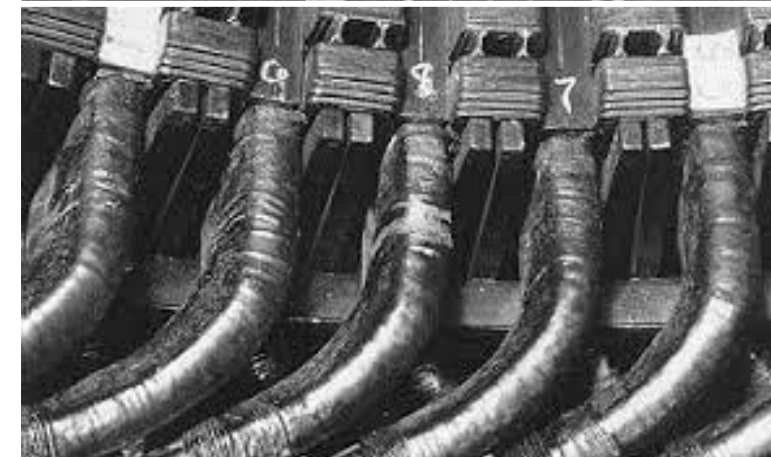
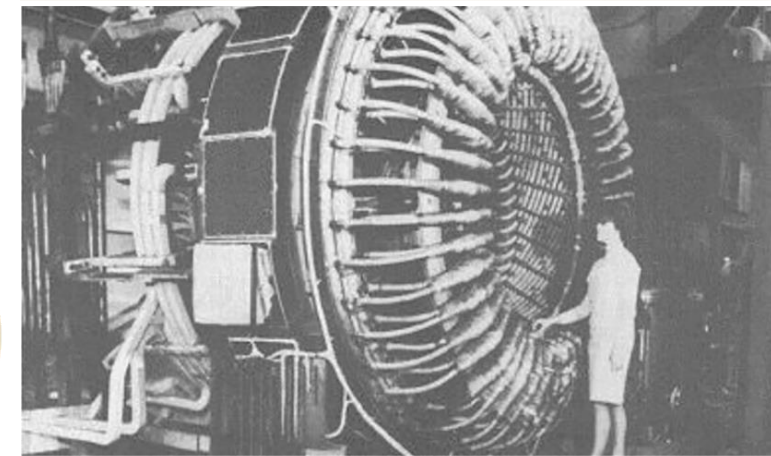
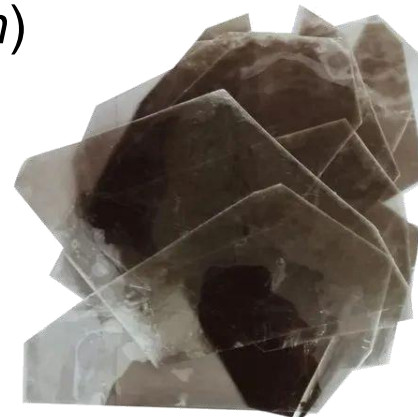


2. HISTORICKÝ KONTEXT

- Historické vlivy ovlivňující návrh elektroizolačních systémů
- **Přírodní materiály**
- První syntetické látky
- Syntetické plastové folie a netkané textilie
- Syntetické pryskyřice

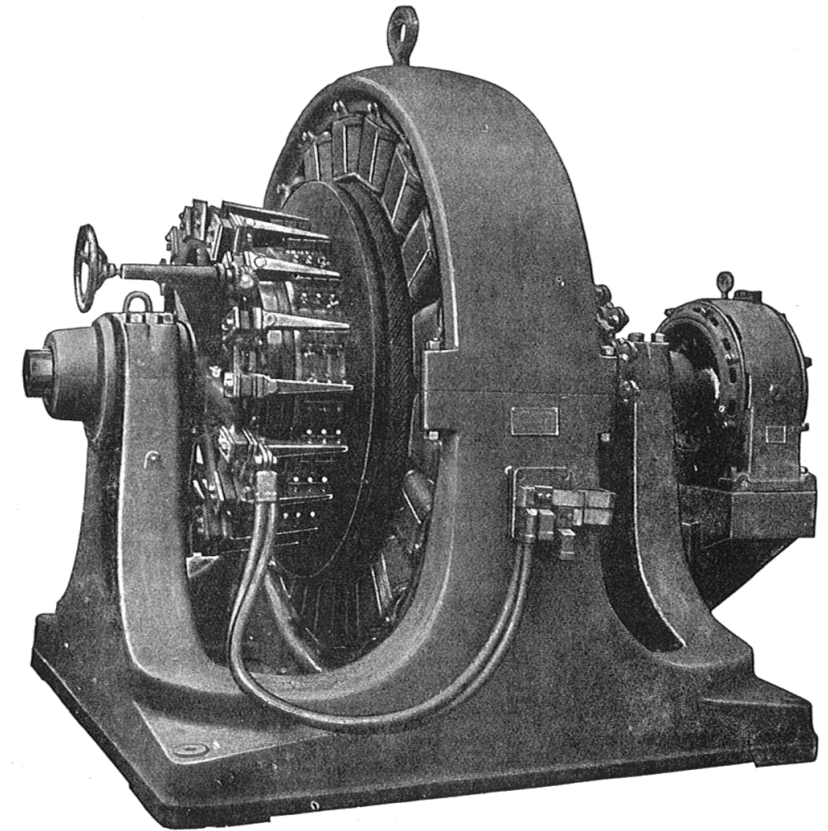


- **Výztuže** – přírodní vlákna z **celulózy**, **hedvábí**, **lnu**, **bavlny**, **vlny**, později **azbest**.
- **Pojiva** – **přírodní pryskyřice** ze stromů, rostlin, hmyzu a ropných ložisek (**rafinované ropné oleje**, **vosky**, **asfalty**, **smola**, **šelak**, **kalafuna**, **lněný olej** aj.).
- **Plniva** – pevné látky jako **písek**, **slída**, **azbest**, **křemen** a další minerály.
- **Příklady**
 - **Lakovaný batist** (*Varnished Cambric*)
 - **Štípaná slída impregnovaná asfaltovými pryskyřicemi** (*Asphaltic Mica Systems, Bitumen Micafolium*)
 - **Rozpouštědla** na bázi **toluenu** ve velké míře.

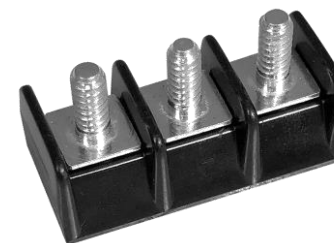


2. HISTORICKÝ KONTEXT

- Historické vlivy ovlivňující návrh elektroizolačních systémů
- Přírodní materiály
- **První syntetické látky**
- Syntetické plastové folie a netkané textilie
- Syntetické pryskyřice

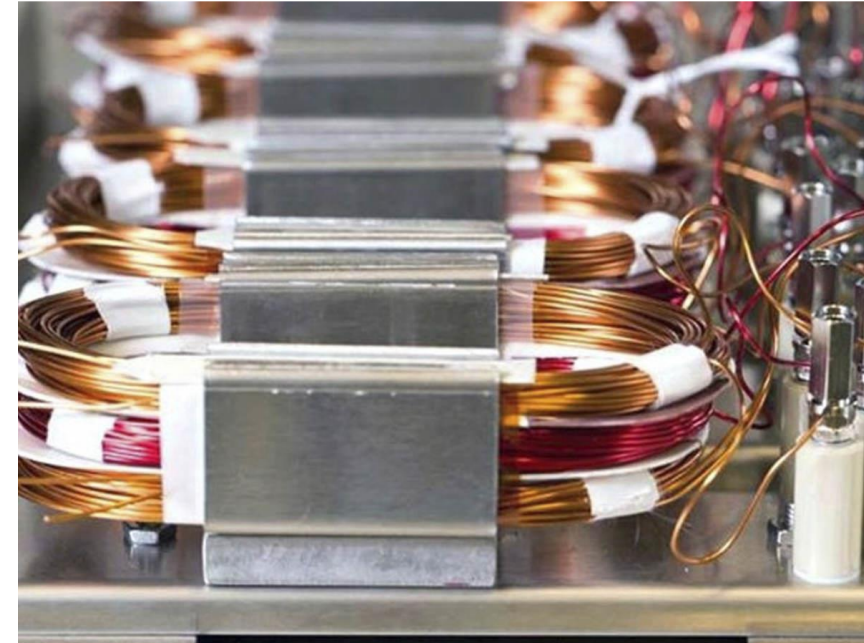


- **Fenolické látky** – Leo Baekeland (1907)
- **Alkydové a anilin-formaldehydová pryskyřice** (1926)
- **Polyvinylchlorid** (1927)
- **Močovino-formaldehydová pryskyřice** (1929)
- **Akrylové pryskyřice** (1936)
- **Polystyren a nylon** (1938)



- **Melaminformaldehydová pryskyřice** (1939)
- **Polyestery, polyethylen** (1942)
- **Fluorované uhlovodíky, silikony** (1943)
- **Epoxidy** (1947)
- **Polyuretany, polypropylen, polykarbonát** (50. léta)

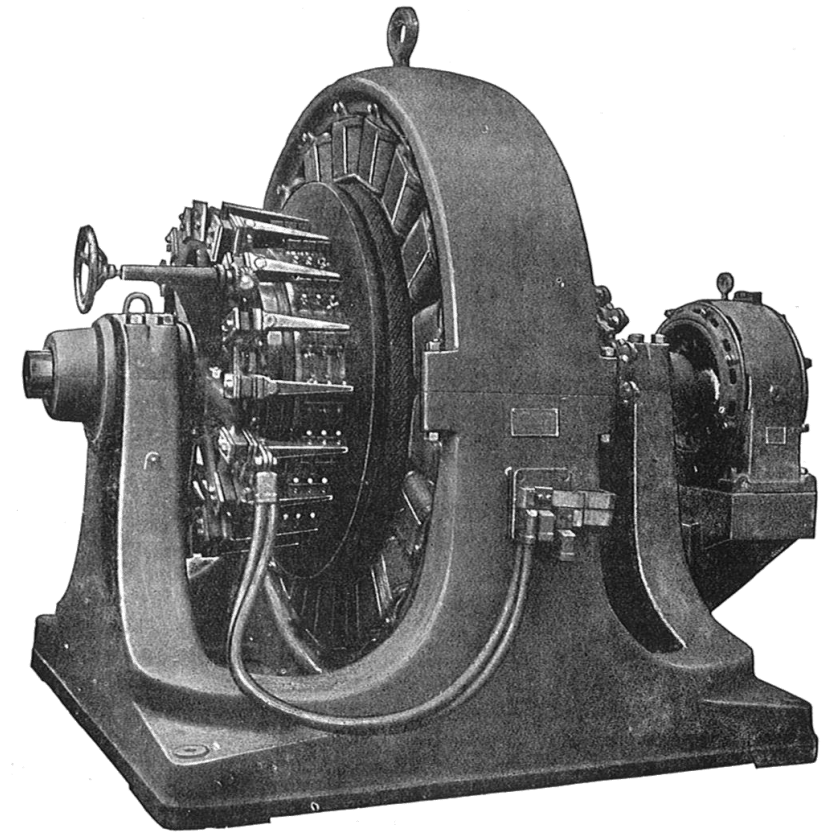
- **Polyethylentereftalát (PET)** – lineární termoplastický polyester s vysokým stupněm krystalizace, **vysokou teplotou tání** (265 °C) a **skvělou stabilitou**.
- Dostupnost PET po 2. sv. válce = **velké změny na trhu s elektroizolační technikou**.
- Rozvoj **nových metod zrychleného funkčního testování**.
- „**Motorette**“ nebo „**transformerette**“ testy používané při **odhadech životnosti** elektroizolačních systémů dodnes (*Motorette Accelerated Thermal Aging Tests*).



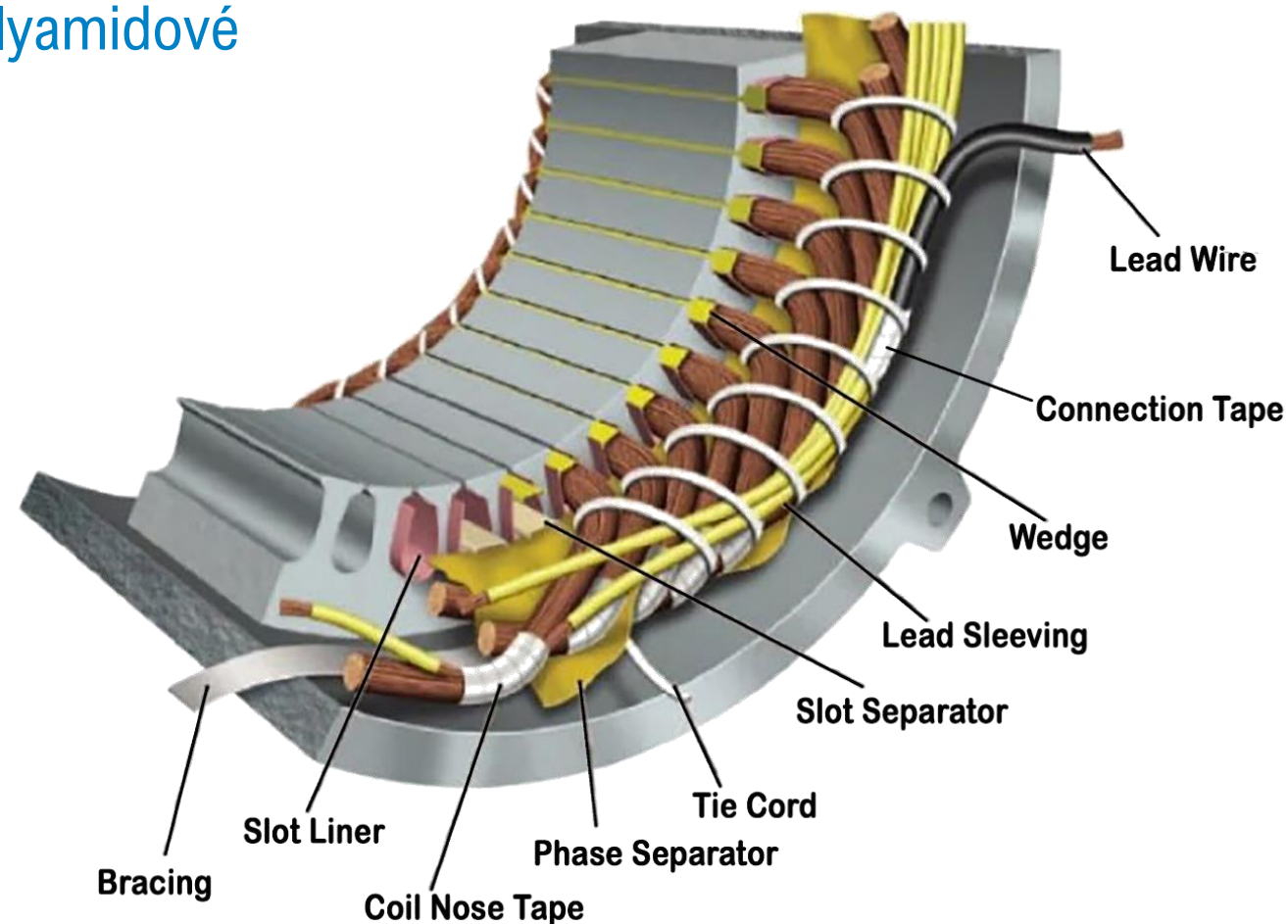
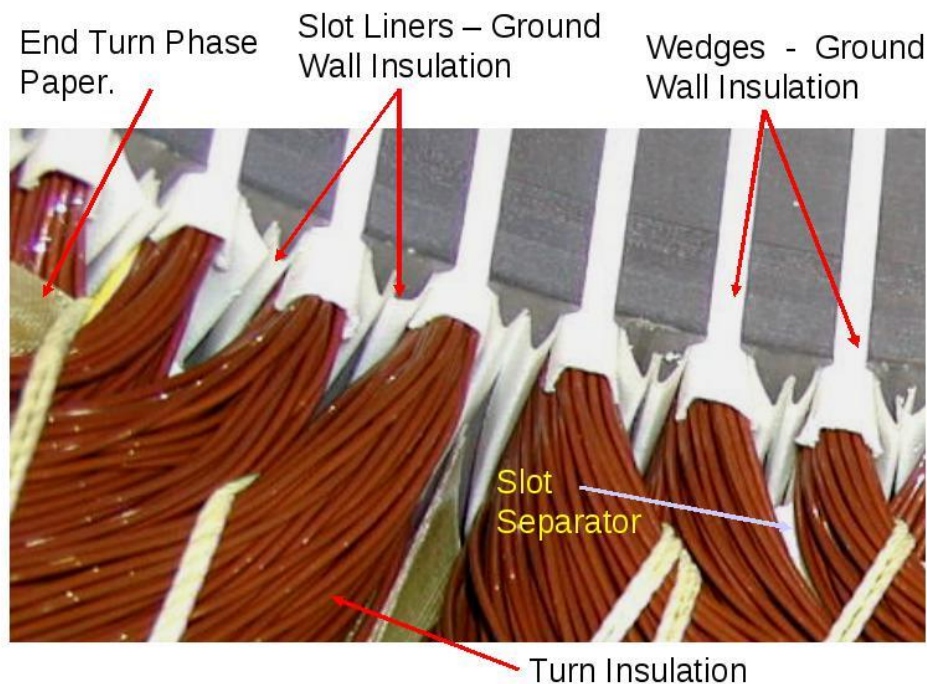
Motorette sample with varnish treatment

2. HISTORICKÝ KONTEXT

- Historické vlivy ovlivňující návrh elektroizolačních systémů
- Přírodní materiály
- První syntetické látky
- **Syntetické plastové folie a netkané textilie**
- Syntetické pryskyřice

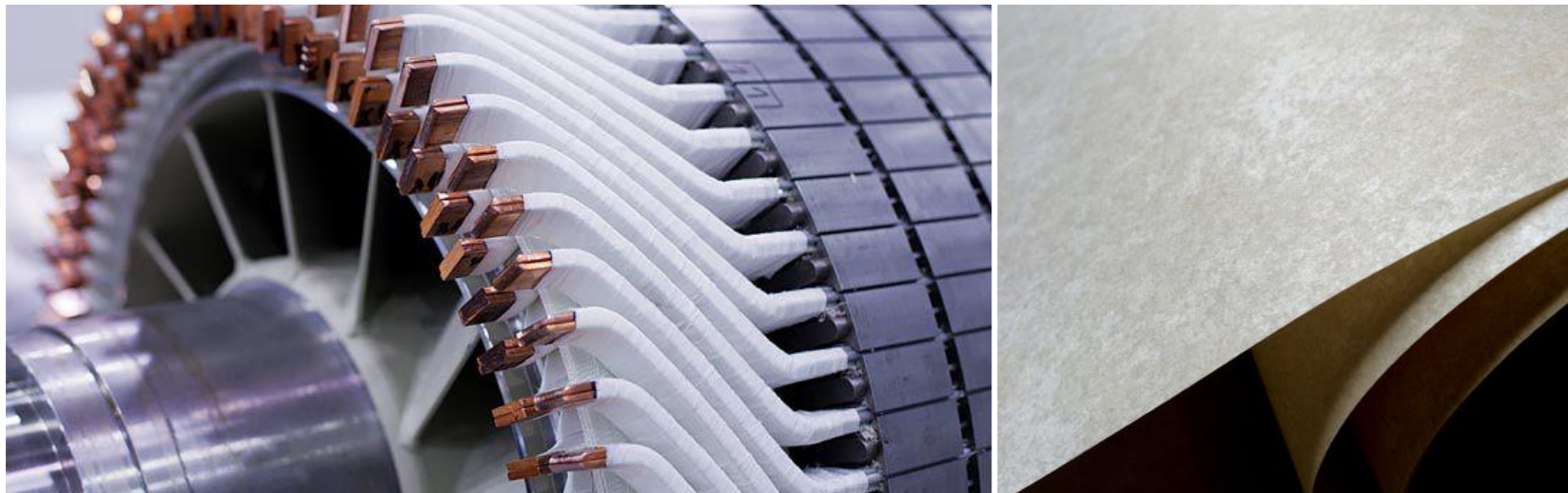


- **Syntetické plastové fólie** (1950) a později **netkané textilie na bázi polymerních vláken** (drážková, závitová a fázová izolace indukčních motorů).
- **Nižší náklady**, obecně **lepší vlastnosti**, **snadná výroba**.
- Extrudované + kalandrované **syntetické polyamidové** a **polyesterové fólie**.



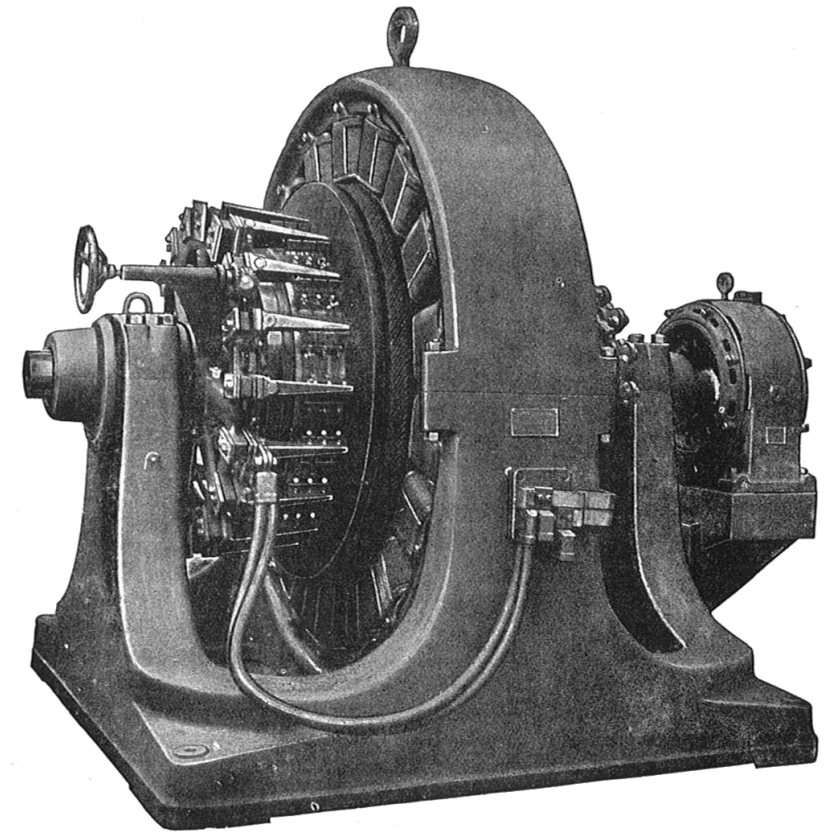
Ukázky uspořádání statorového vinutí točivého stroje (drážková a závitová izolace, podklínová výstelka).

- **Kombinované neslídové materiály drážkových izolací tenké lamináty** z extrudované PET folie vložené mezi hlazené polyesterové (PES) rohože nebo papír) – nízkonapěťové systémy malých a středních motorů.
- **Teplotní třídy B** (130 °C) a **F** (155 °C) s příslušnou **impregnací** upravené přírodní laky, fenolické, polyesterové, silikonové a epoxidové pryskyřice.
- Dnes až po **třídu C** (220 °C) – PES rohož nahrazena rohoží ze skleněných, keramických, aramidových vláken nebo slídovým papírem.
- **Vnitřní „funkční“ PET folie** může být nahrazena poly(ether-imidovými), poly(amid-imidovými) nebo pouze imidovými polymery.



2. HISTORICKÝ KONTEXT

- Historické vlivy ovlivňující návrh elektroizolačních systémů
- Přírodní materiály
- První syntetické látky
- Syntetické plastové folie a netkané textilie
- **Syntetické pryskyřice**



- Nahrazení přírodních a syntetických rozpouštědlových pryskyřic syntetickými pryskyřicemi bezrozpouštědlovými (reaktoplasty).
- Zvýšená **tepelná stabilita**, **výborné dielektrické vlastnosti**, **méně zdravotně závadné**.

Polyesterové pryskyřice (1942)

- **nízko-viskózní**,
- **impregnace** plátek štípané slídy (**plnivo**),
- **nosná složka** – tenký listu **papíru**, později **plastové folie** nebo **skleněná tkanina**.
- **Westinghouse Electric Corporation** – impregnace vrstev hlavní izolační stěny statoru pomocí **vakuově-tlakové impregnace (VPI)**.



Epoxidové pryskyřice (1947)

- vyšší viskozita,
- výhodně **malá smrštitelnost**
(0,05 až 2 % vs. 10 % v případě polyesterů),
- **General Electric** – zpracování hlavní izolační stěny statoru pomocí **Resin-Rich** technologie,
- konkurence pro „suché“, tj. **plně neprosycené VPI pásy**.



**General
Electric**



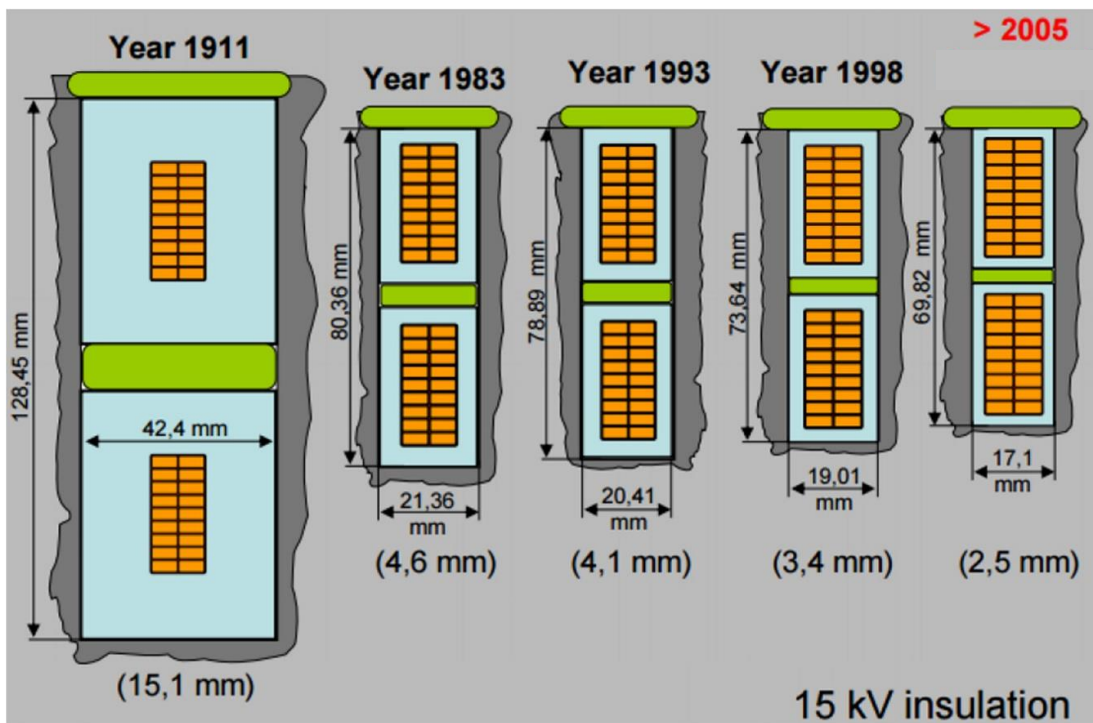
3. SOUČASNÉ TECHNOLOGIE

■ VPI a Resin-Rich systémy

■ Přístupy k vylepšení elektroizolačních systémů

Čtyři hlavní výrobní technologie

- Vakuově tlaková impregnace (VPI) jednotlivých tyčí
- Globální VPI celých statorů
- Zpracování jednotlivých tyčí pomocí Resin-Rich
- Vzájemná kombinace VPI a Resin-Rich technologií.



state
of the
art

← Historický vývoj snižování tloušťky hlavní izolační stěny statoru.



← Automatické rovnání a stříhání pravoúhlých měděných vodičů.

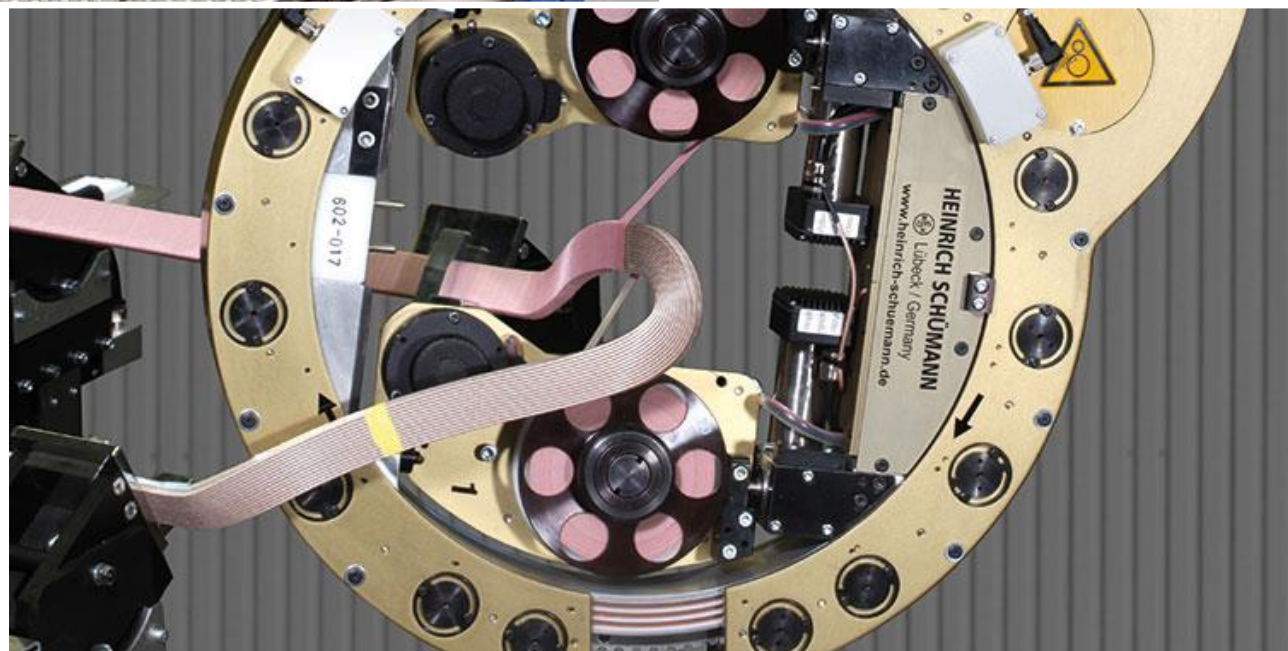
Ohýbání satorových tyčí do požadovaného tvaru. ↓

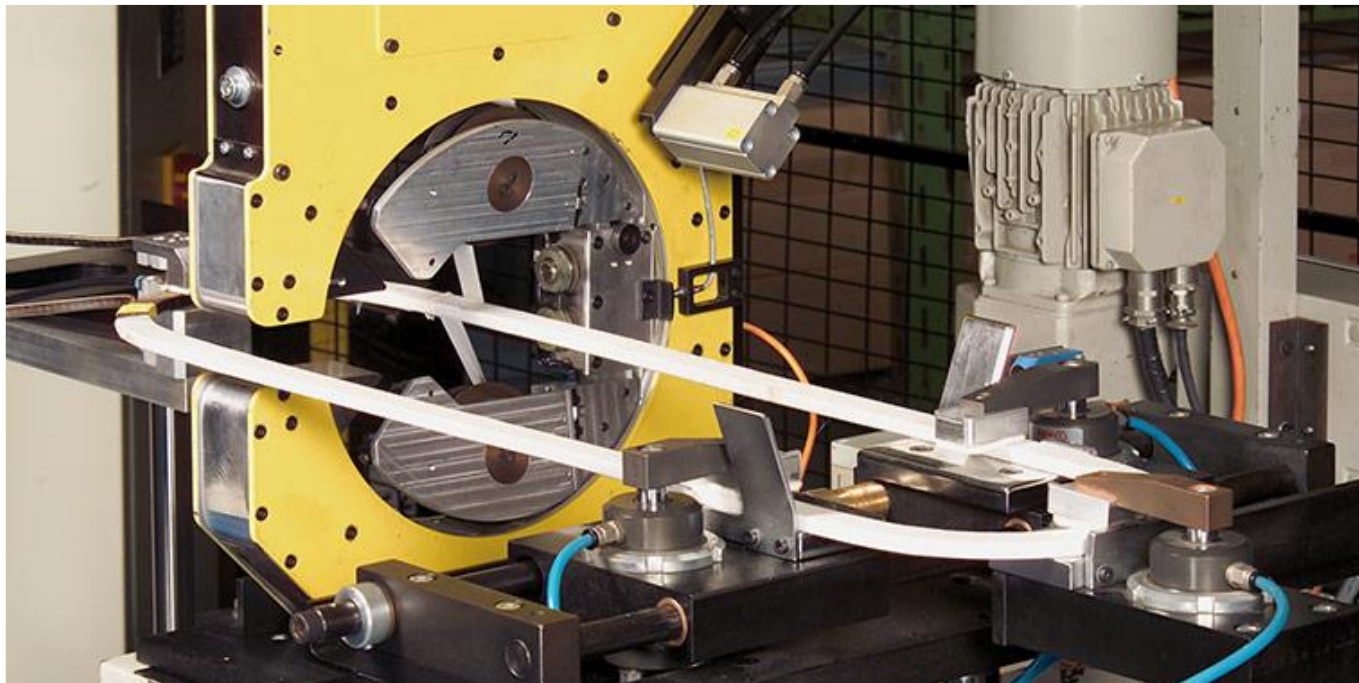




← Robotický systém pro ovíjení izolačních pásek.

Detail hlavy robotického systému pro ovíjení izolačních pásek. ↓





← Ovíjecí hlava na menší cívky.

Polo-automatický systém ovíjení velkých cívek. ↓





← 3D inspekce rozměrů
satorové tyče.

Modelové uspořádání
cívek ve satorových drážkách. ↓

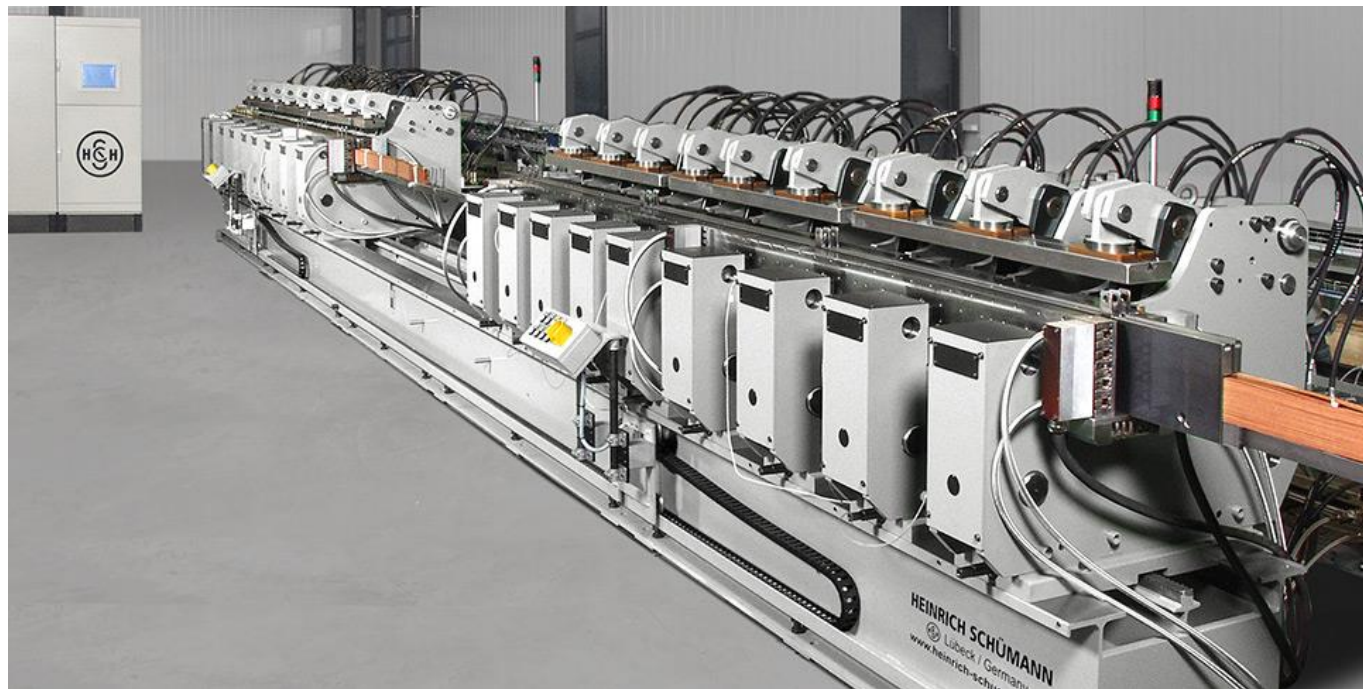


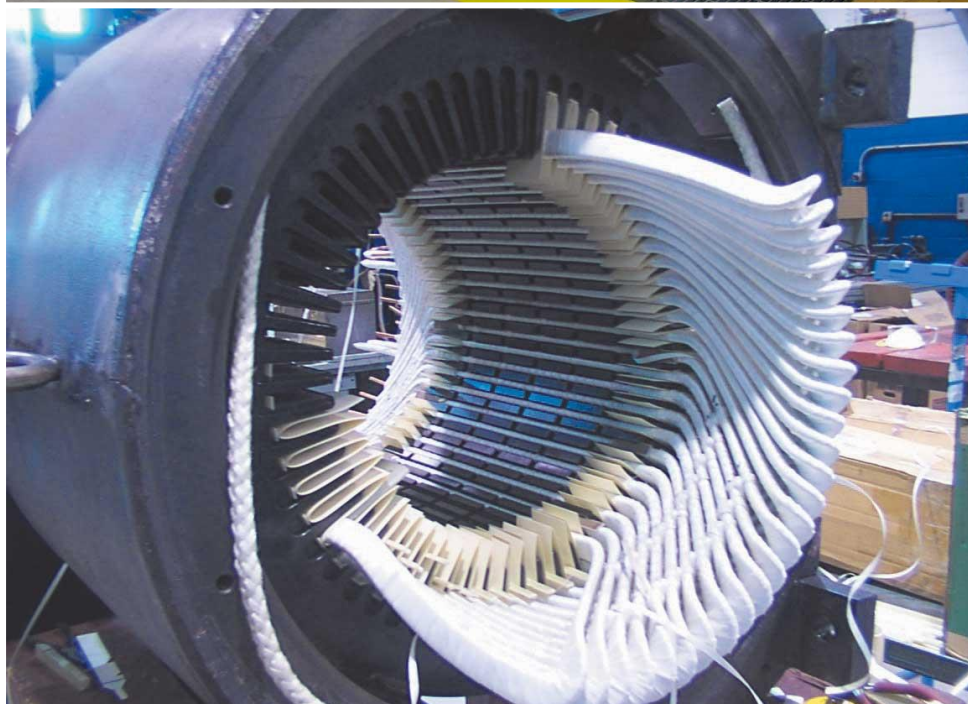
3.1 VPI A RESIN-RICH SYSTÉMY



← Malý vytvrzovací lis pro
Resin-Rich systémy.

Velký vytvrzovací lis pro
Resin-Rich systémy. ↓



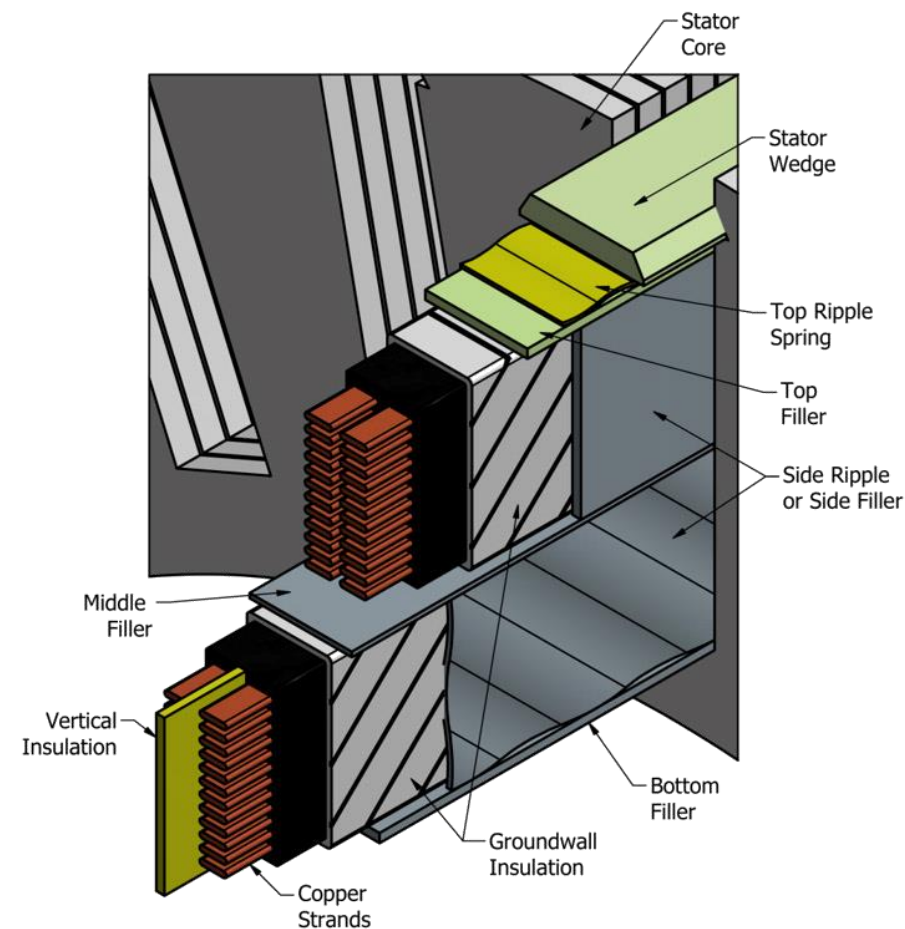


Ukázky VPI technologie

3. SOUČASNÉ TECHNOLOGIE

- VPI a Resin-Rich systémy
- **Přístupy k vylepšení elektroizolačních systémů**

- **Nízká tepelná odolnost elektroizolačních materiálů přestává být zásadní problémem.**
- **Navyšovat přípustné hodnoty napěťového namáhání hlavní izolační stěny** (výskyt tzv. částečných výbojů).
- **Zvyšovat tepelnou vodivost** (↑odvod ztrátového tepla, ↑proudové zatížení vinutí, ↑výkon stroje).
- **Snižovat materiální náklady**
- **Přejít k impregnačním pryskyřicím s velmi nízkým obsahem rozpouštědel**



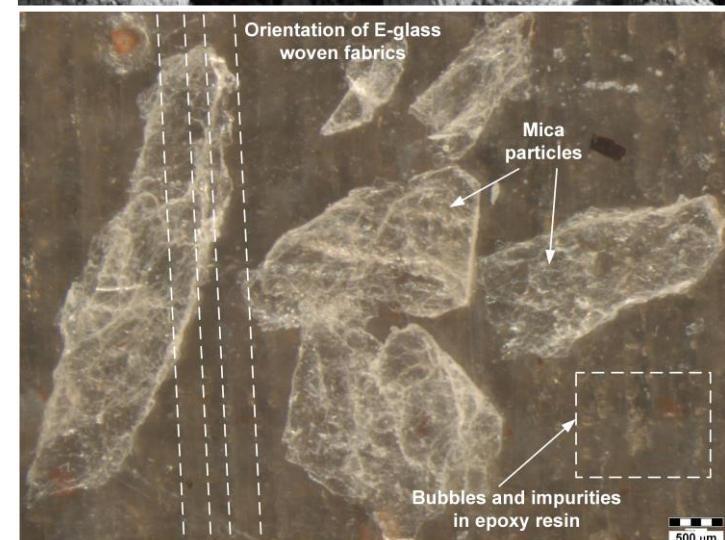
Horní a spodní poloha statorové tyče v drážce statoru ↑

- Přidání vysoce tepelně vodivých plniv ve formě jemných částic do impregnační pryskyřice**
 (navýšení jmenovitého výkonu stroje o 15 % díky plnivu na bázi *nitridu boru* přidanému do pojiva, firma Toshiba).
- Přidání vysoce tepelně vodivých plniv do slídového papíru**
 (problematické, částice mohou narušovat těsné rozestupy jednotlivých vrstev slídy).
- Snížení obsahu polymerního pojiva ve prospěch slídového papíru a skleněných vláken**



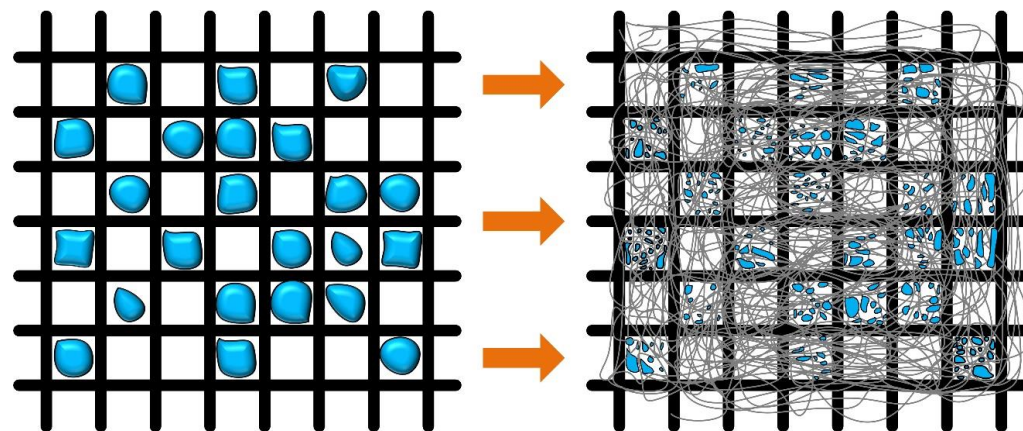
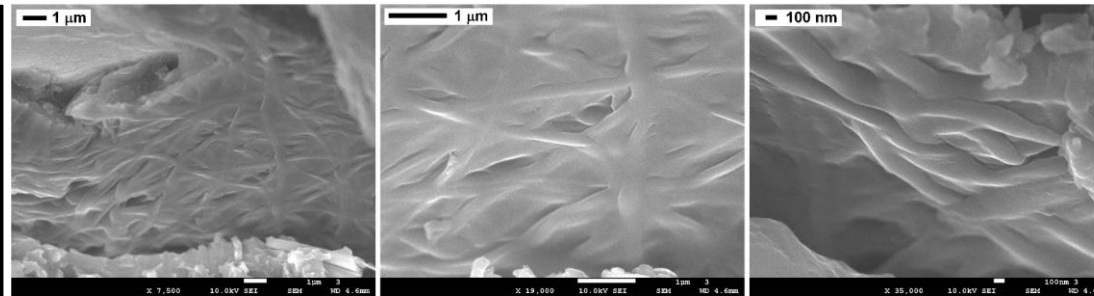
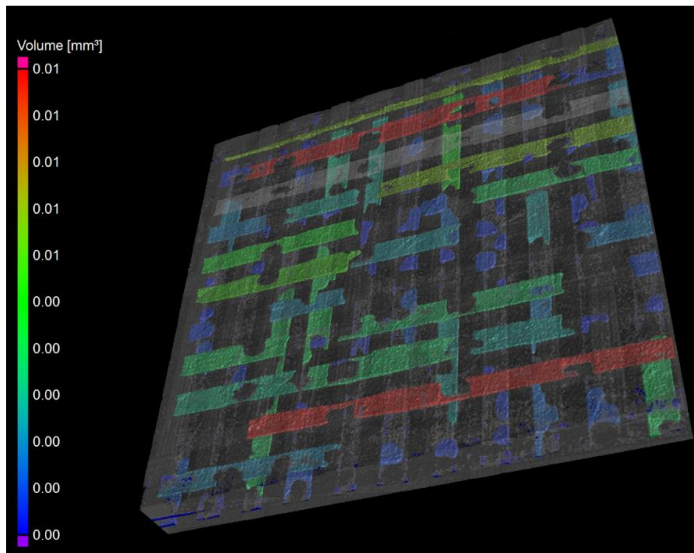
TABLE I. VALUES OF THERMAL CONDUCTIVITY OF INDIVIDUAL COMPONENTS OF COMPOSITE MATERIALS

Material	λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
Mica paper	0,30-0,75
Glass Fiber	0,6-1,0
Epoxy resin	0,15-0,3

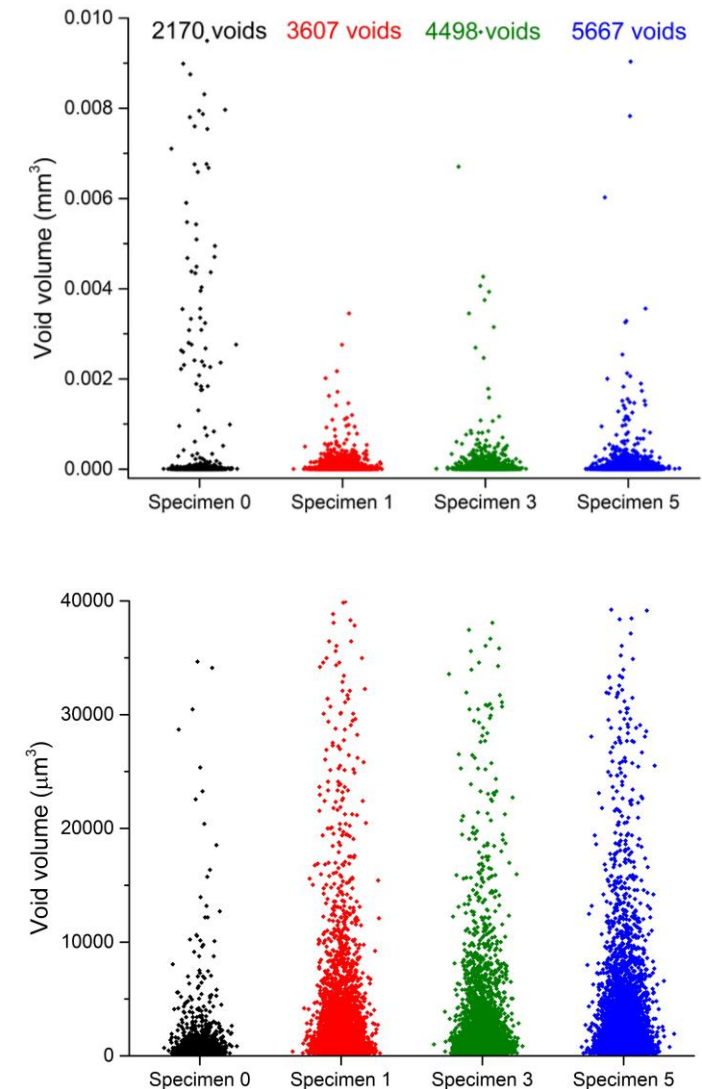


Eliminace vnitřních mikro-, nano-dutin v mřížce skleněné rohože

- mnoho dutin vyplněných pojivem (s nižší tepelnou vodivostí),
- čím vyšší objem dutinky tím **energeticky náročnější výbojová činnost**.



— Glass fibre reinforcement Nanofibrous layer Gas bubbles



■ Zmenšení tloušťky skleněné tkaniny ve prospěch slídového papíru (snížení počtu vzduchových dutin, ↑ elektrická pevnost, ↑ tepelná vodivost).

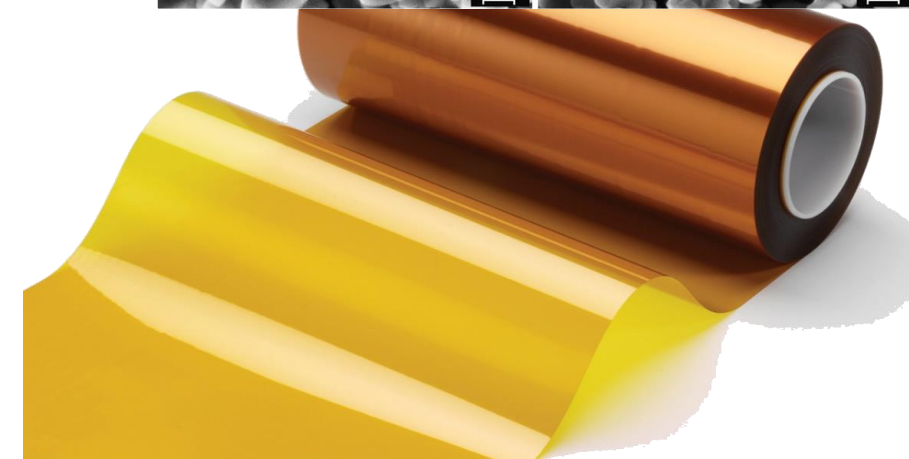
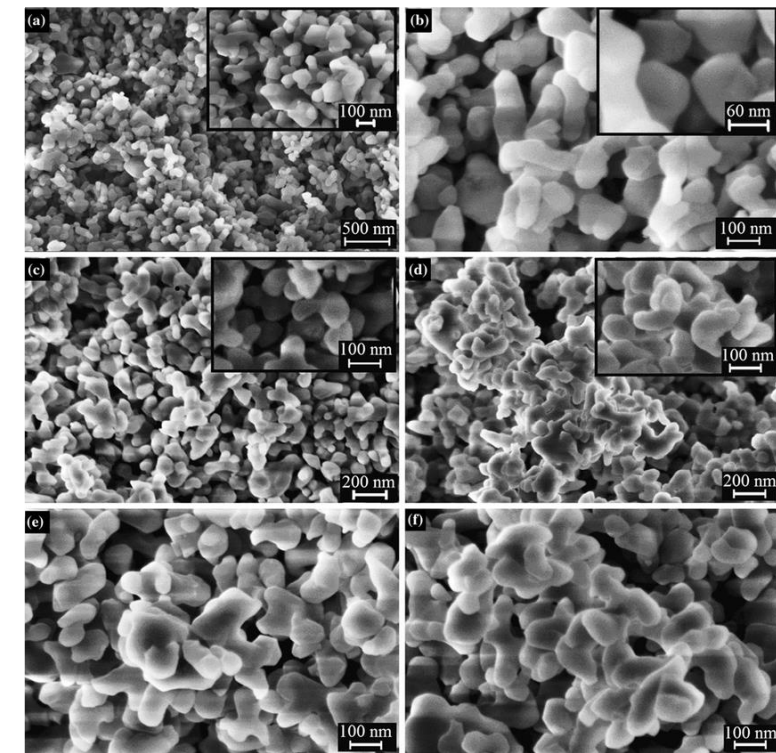
■ Optimalizace složení a struktury slídového papíru

- **struktura:** *kalcinovaný* vs. *nekalcinovaný slídový papír*
(rozdíly v tepelné vodivosti, porozitě);
- **složení:** *aramidová vlákna* nebo *krátká* (nasekaná) *skleněná vlákna* (3 až 6 %), tzv. *Glass-mixed Mica Tapes*.



■ Náhrada skleněné výztuže tenkou termoplastickou folií

- tl. od **0,0065 mm** \approx $\frac{1}{4}$ **tloušťky** skleněné tkaniny,
- vyšší tepelná vodivost
(můžeme použít vyšší objemové zastoupení slídy),
- **nižší odolnost vůči částečným výbojům**,
- *PET fólie* postupně nahrazovány *PEN foliemi*
(↑tepelná stabilita),
- další **vylepšení folie** pomocí:
 - (i) *vysoce tepelně vodivých plniv* přidávaných přímo do folie,
 - (ii) *plniv zvyšujících odolnost folií vůči částečným výbojům*
(**oxidy kovů**, např. *submikronový oxid hlinitý*),
 - (iii) použitím *polyimidu odolného vůči částečným výbojům*
(**Kapton CR™**, vyrábí DuPont®, patent General Electric).

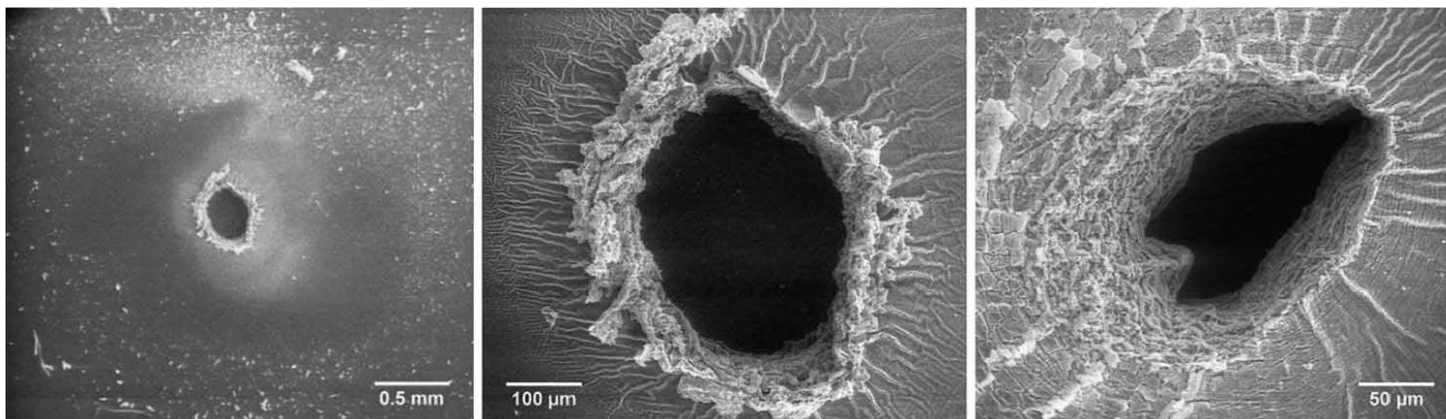
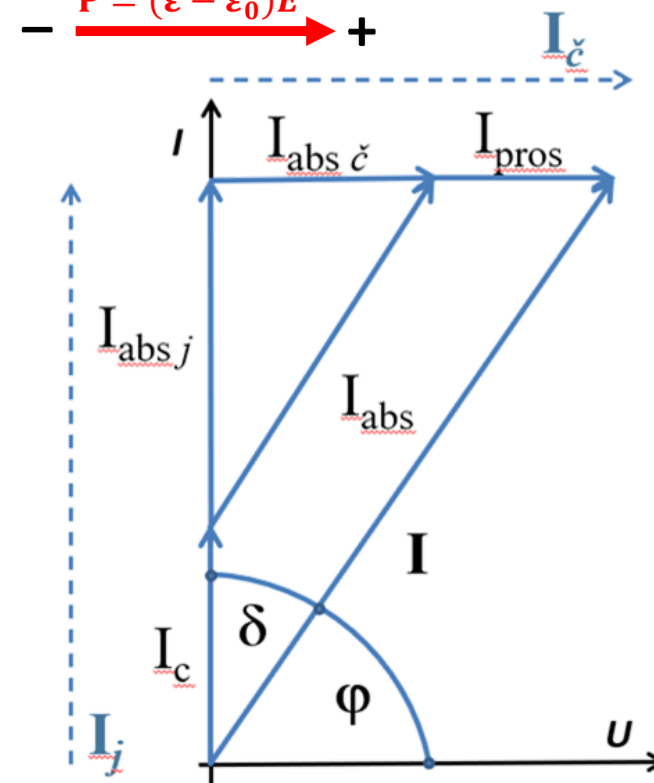
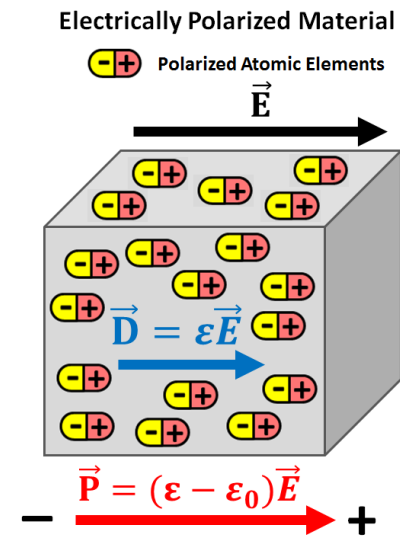
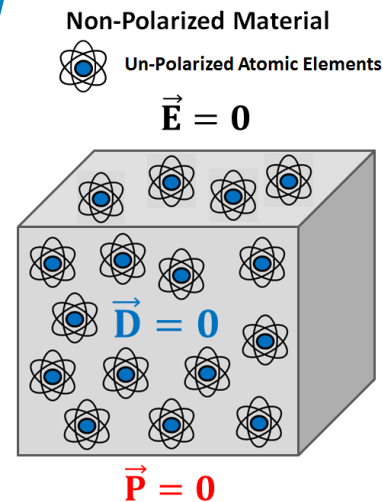


4. PŘEHLED POŽADAVKŮ, ZKUŠEBNÍ METODY

- **Požadavky kladené na elektroizolační kompozity**
- Přehled vybraných zkušebních metod

4.1 POŽADAVKY KLADENÉ NA ELEKTROIZOLAČNÍ KOMPOZITY

- Minimální **elektrická vodivost** – konduktivita ($\gamma < 10^{-12} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$)
- **Relativní permitivita** (ϵ_r) – řádově jednotky
- Minimální **dielektrické ztráty** ($\text{tg } \delta \leq 10^{-2}$)
- Maximální **elektrická pevnost** ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$, $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$)
- Odpovídající **mechanická pevnost** a **tepelná odolnost**

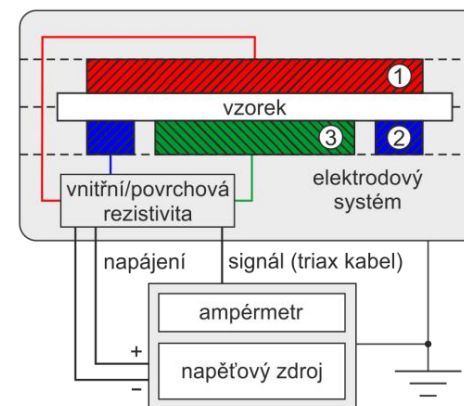
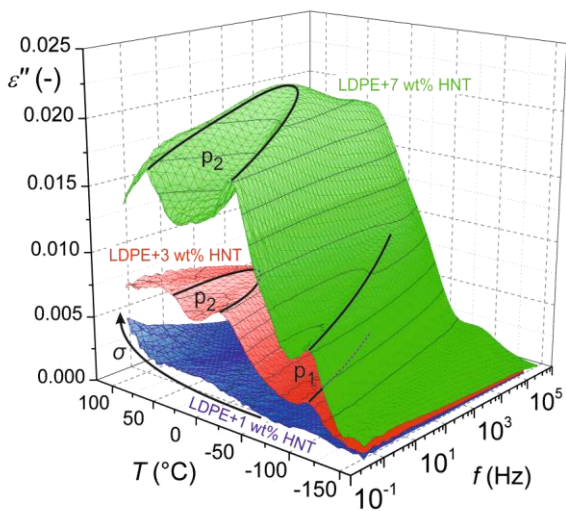


4. PŘEHLED POŽADAVKŮ, ZKUŠEBNÍ METODY

- Požadavky kladené na elektroizolační kompozity
- **Přehled vybraných zkušebních metod**

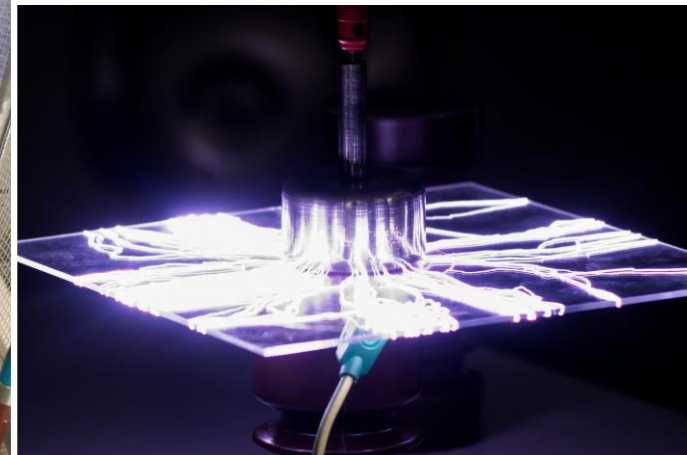
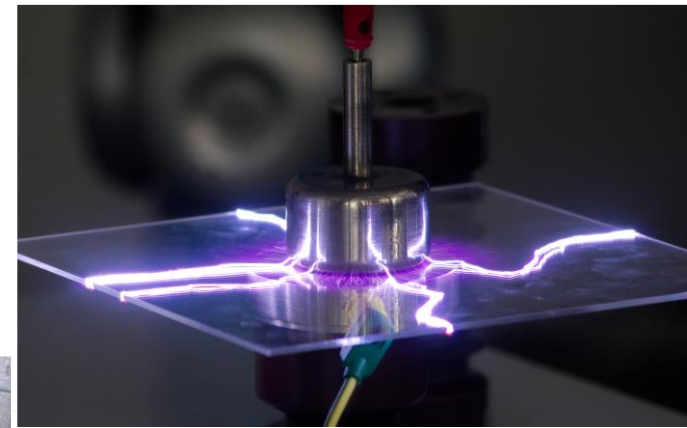
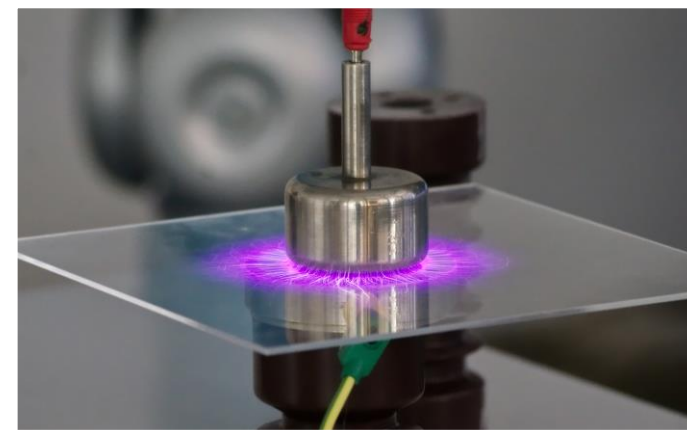
■ ČSN EN 62631 Dielektrické a izolační vlastnosti pevných elektroizolačních materiálů (soubor norem)

- Měření *vnitřní* a *povrchové rezistivity* (DC, do 5 kV)
- Měření *ztrátového činitele* a *permitivity* pevných látek a kapalin (napěťová závislost do 10 kV, teplotní závislost do 180 °C)
- Širokopásmová dielektrická spektrometrie (1 – 3 V, frekvenčně od 1 μHz do 10 MHz, teplotně od -160 do 400 °C)



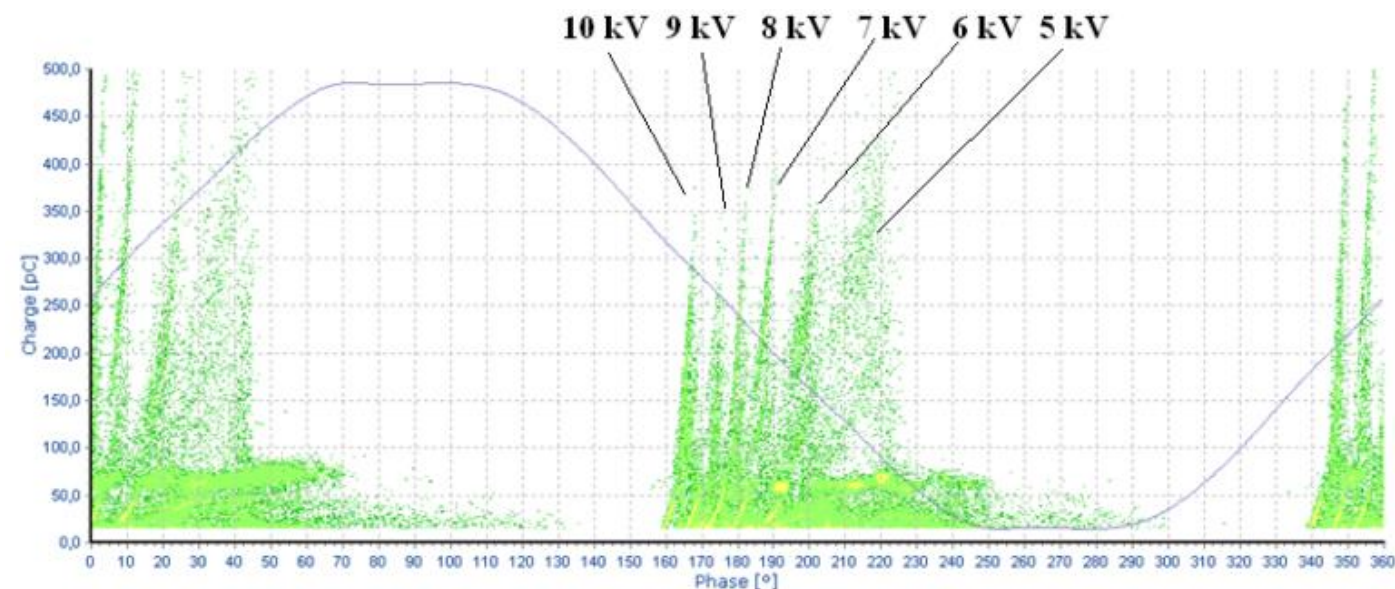
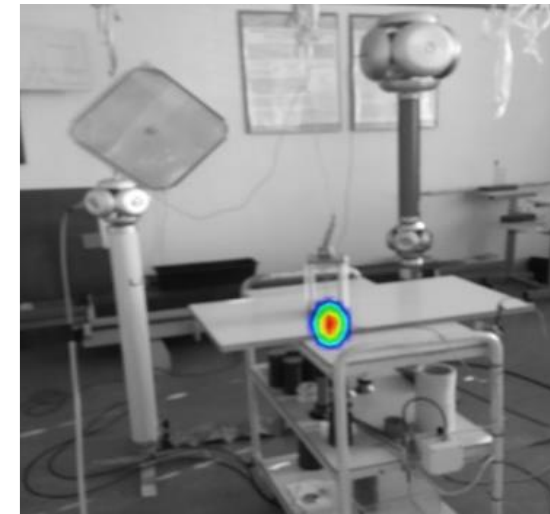
■ ČSN EN 60243 *Elektrická pevnost izolačních materiálů*

- Měření *elektrické pevnosti pevných látek* (pásky, folie, deskové vzorky, kabely...)
- Měření *elektrické pevnosti kapalin*
- Zdroje napětí do 200 kV (AC) a 130 kV (DC)



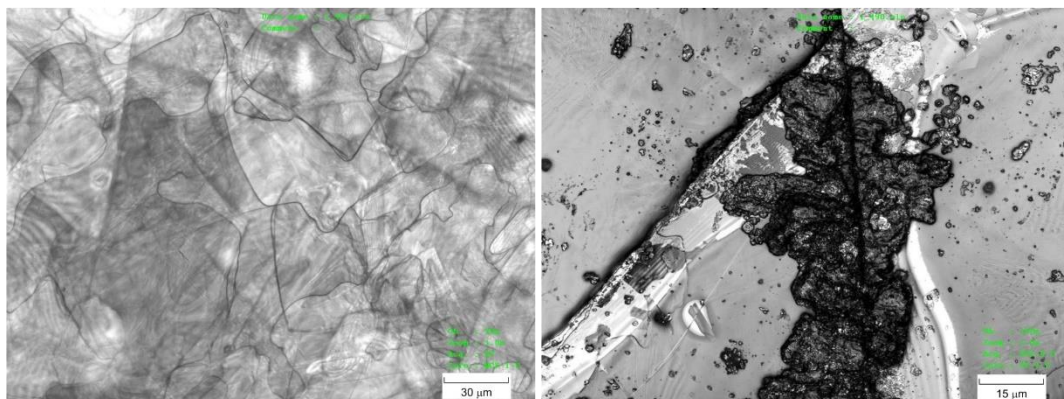
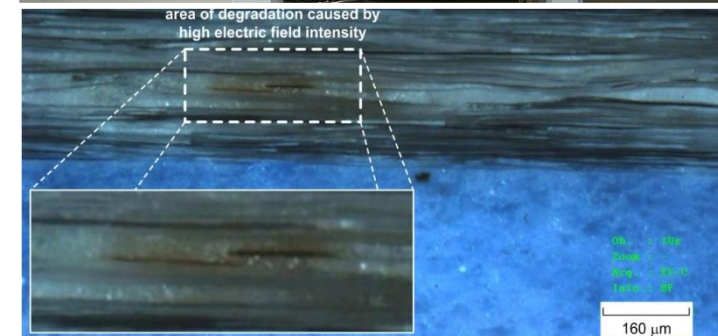
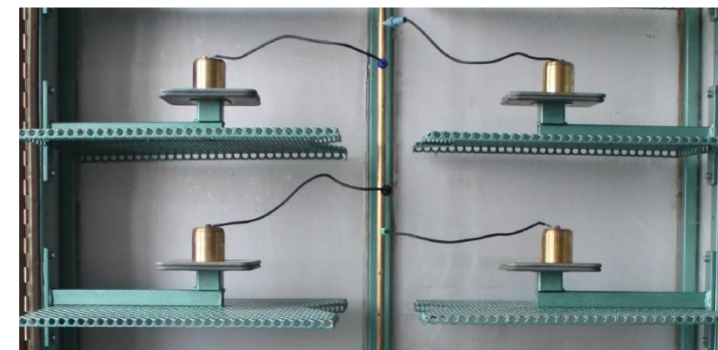
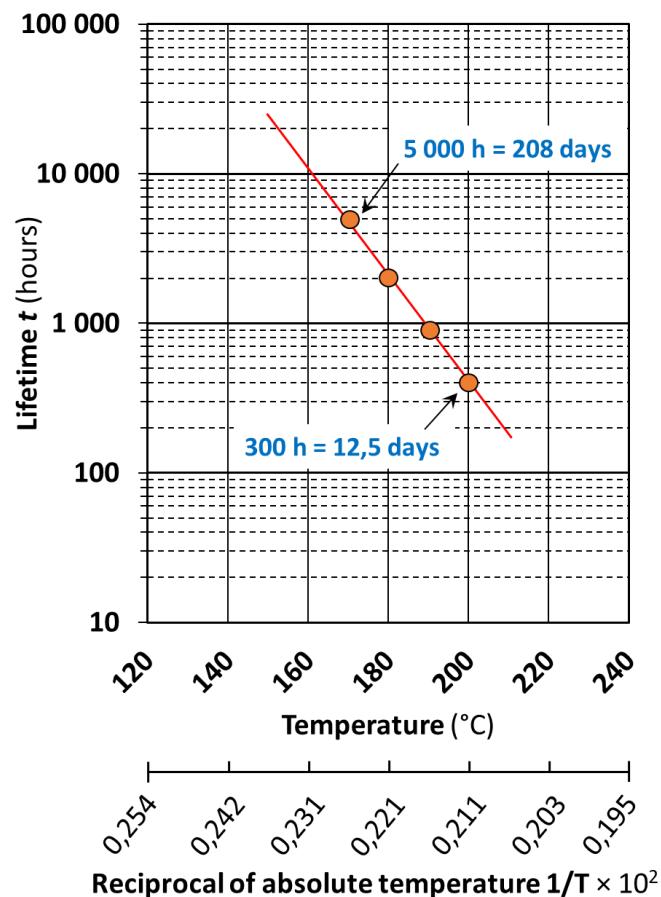
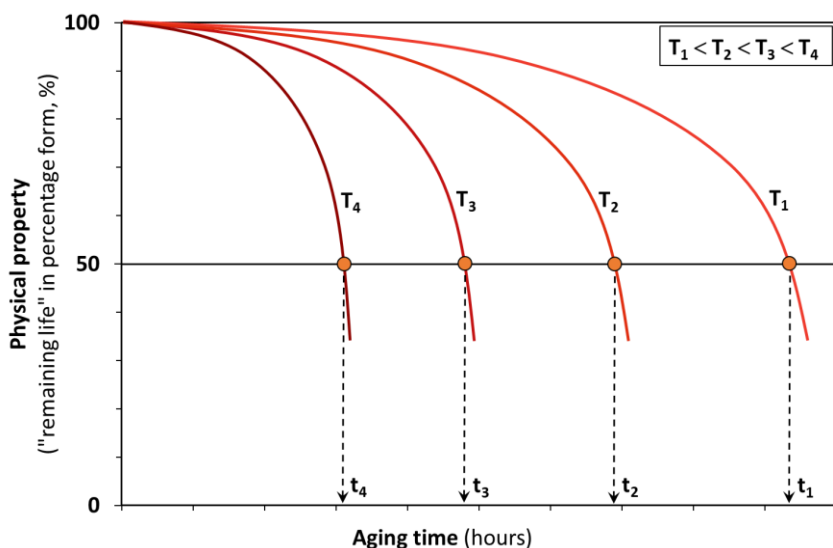
■ ČSN EN 60270 *Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů*

- Diagnostika VN zařízení a materiálů s ohledem na *výskyt částečné výbojové činnosti*.
- *Detekce a lokalizace poruchy*
- Metody
 - Elektrické
 - Akustické
 - Optické



■ ČSN EN 60216 Elektroizolační materiály - Vlastnosti tepelné odolnosti

- *Odhady životnosti* elektroizolačních materiálů a systémů
- *Tepelné a elektrické zrychlené stárnutí (AC, DC)*
- *UV stárnutí* (omezeně)



■ Mechanické zkoušky

- *Univerzální zkušební stroje*
(250 N, 1 kN, 10 kN s vyhřívanou komorou a 100 kN)
- *Termomechanická analýza*
(TMA Q400EM, TA Instruments)
- *Dynamická mechanická analýza*
(DMA Q800, TA Instruments)



■ Strukturální a termické analýzy

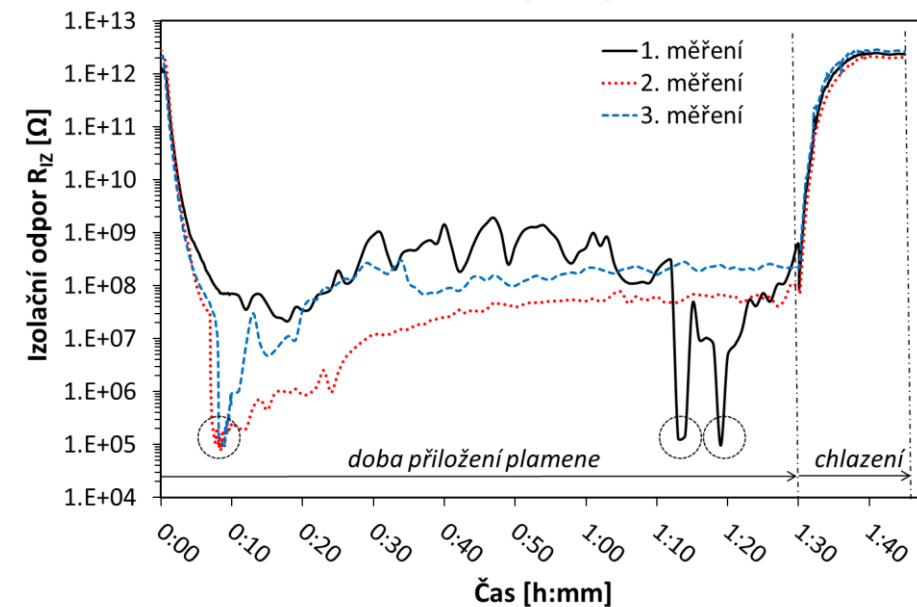
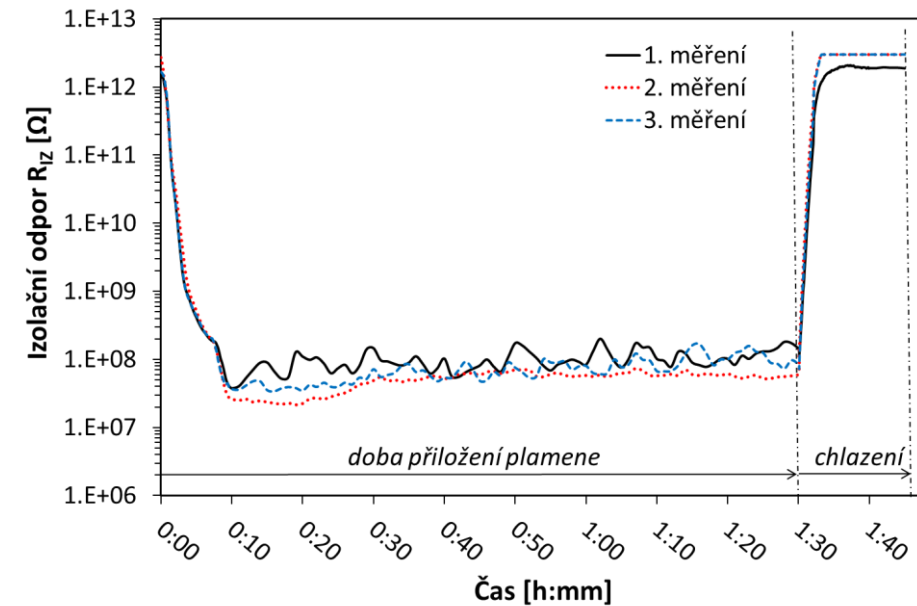
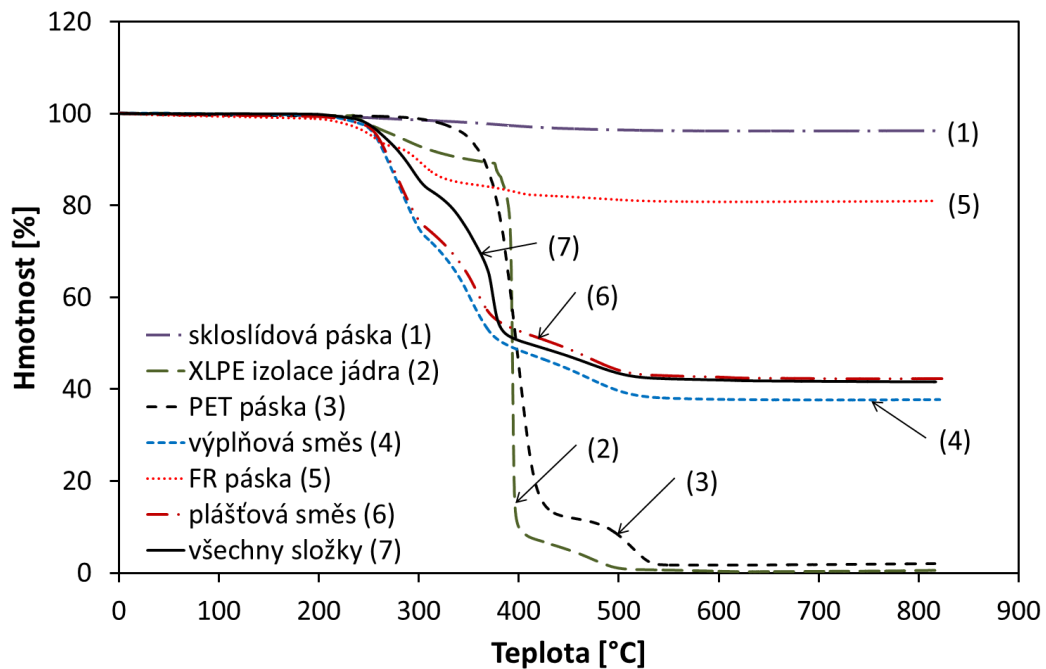
- *Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací*
(Nicolet 380)
- *Mikroskopové techniky*
(optická, konfokální a elektronová mikroskopie)
- *Rentgenová počítačová mikro-tomografie*
(Phoenix V|tome|x S240, GE)
- *Diferenční skenovací kalorimetrie*
(DSC Q2000, TA Instruments)
- *Simultánní termická analýza*
(SDT Q600 a SDT 650, TA Instruments)



5. AKTUÁLNĚ ŘEŠENÁ TÉMATA

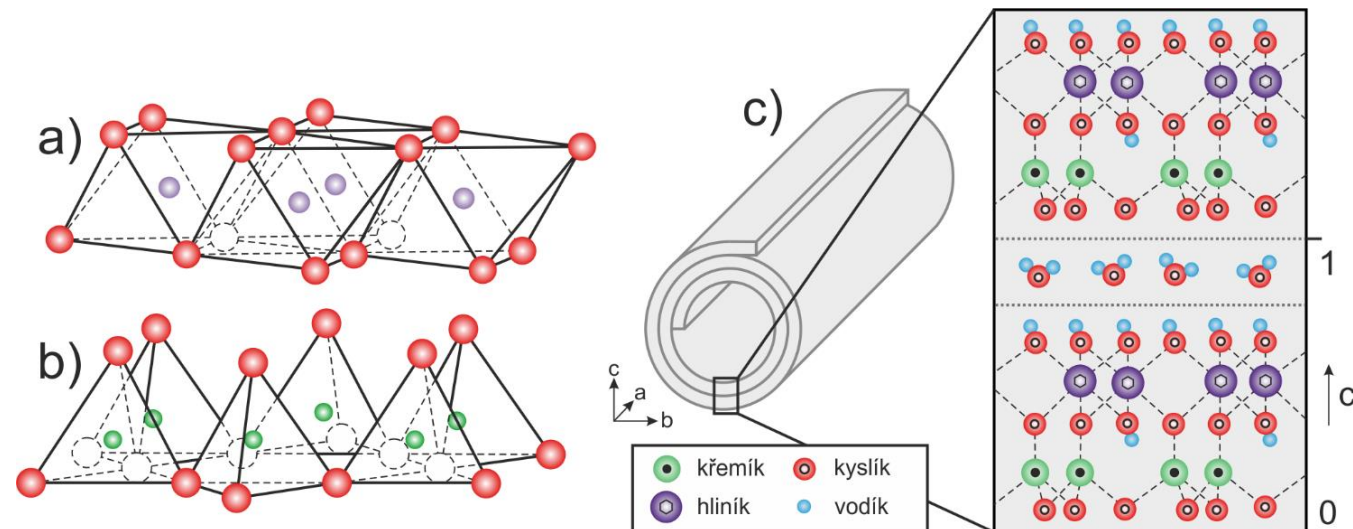
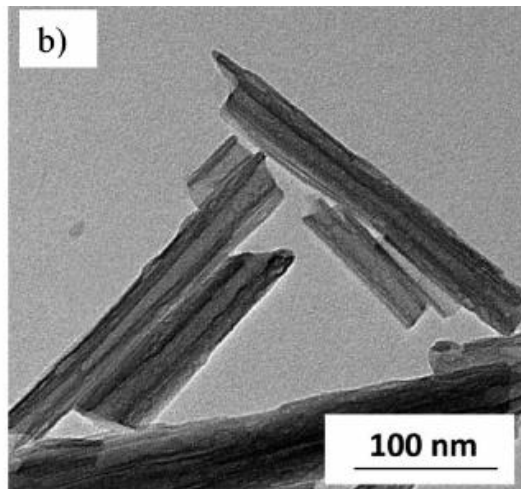
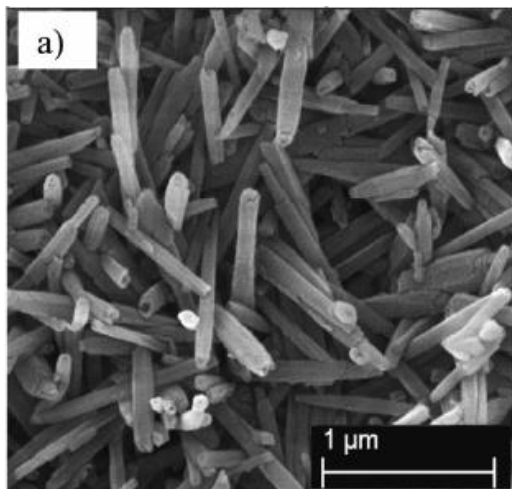
- **5.1 Využití retardérů hoření při snižování hořlavosti kabelových izolací**
- 5.2 Samouzdravující materiály pro elektrotechniku
- 5.3 Polymerní kompozity s inovativními funkcionalitami
- 5.4 Kompozitní konstrukce pro venkovní vn vedení

Vliv požáru na vlastnosti kabelové izolace



Halloysit v tubulární formě (*Halloysite nanotubes*, HNT)

- Perspektivní aditivum pro **žilovou izolaci LFHC**.
- Jílový vrstevnatý minerál s částicemi ve tvaru dutých nanotrubiček.
- Mezivrstva nanotrubiček je vyplněna molekulami slabě vázané vody.
- Prokázané oheň retardační účinky – interval rozkladu **400 – 500 °C**.



Zobrazení chemické struktury HNT ↑: a) prostorové znázornění tetraedrické sítě, b) prostorové znázornění oktaedrické sítě, c) struktura HNT v rovině kolmé na osu částice HNT

5. AKTUÁLNĚ ŘEŠENÁ TÉMATA

- 5.1 Využití retardérů hoření při snižování hořlavosti kabelových izolací
- **5.2 Samouzdravující materiály pro elektrotechniku**
- 5.3 Polymerní kompozity s inovativními funkcionalitami
- 5.4 Kompozitní konstrukce pro venkovní vn vedení

■ Hlavní partneři ve výzkumu

- **Advanced Catalysis Research Group, Institute of Physical and Chemical Research, RIKEN (Japonsko)**
 - Výzkumný institut založený v roce 1917 a zaměstnávající více než 3000 vědců v sedmi kampusech po celém Japonsku.
 - **Termoplastické kopolymery propylenu/ethylenu s katalyzátory na bázi vzácných zemin¹.**

- **Institute of Polymer Science and Technology (ICTP), The Spanish National Research Council, CSIC**
 - Výzkumný ústav Španělské národní rady pro výzkum.
 - **Elastomery na bázi styren-butadienového kaučuku síťovaného pomocí oxidu zinečnatého, kyseliny stearové a síry².**



Dr. Zhaomin Hou



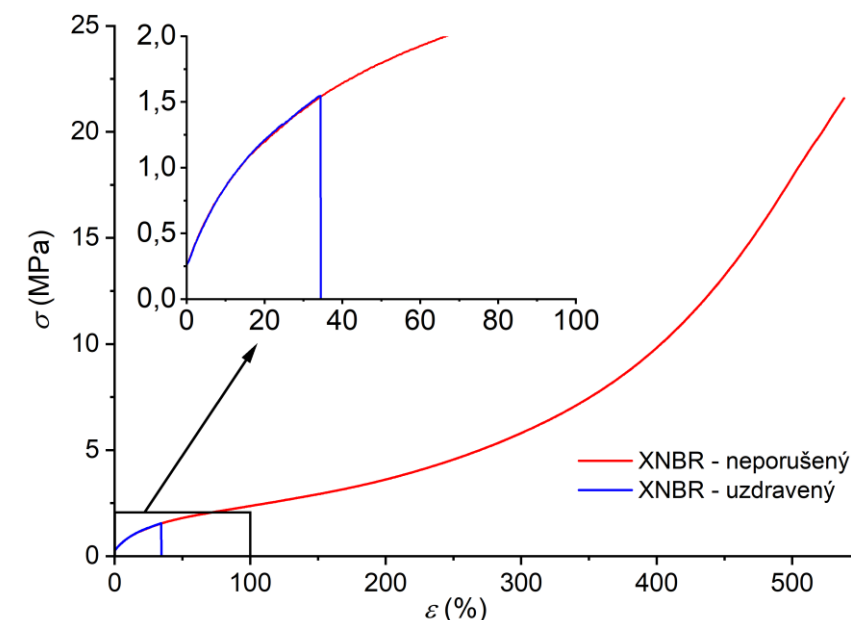
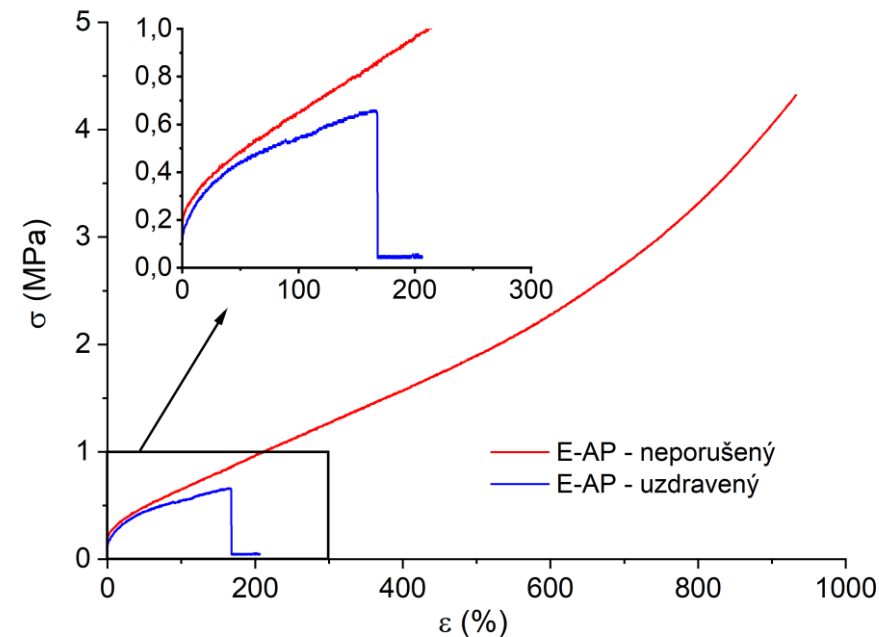
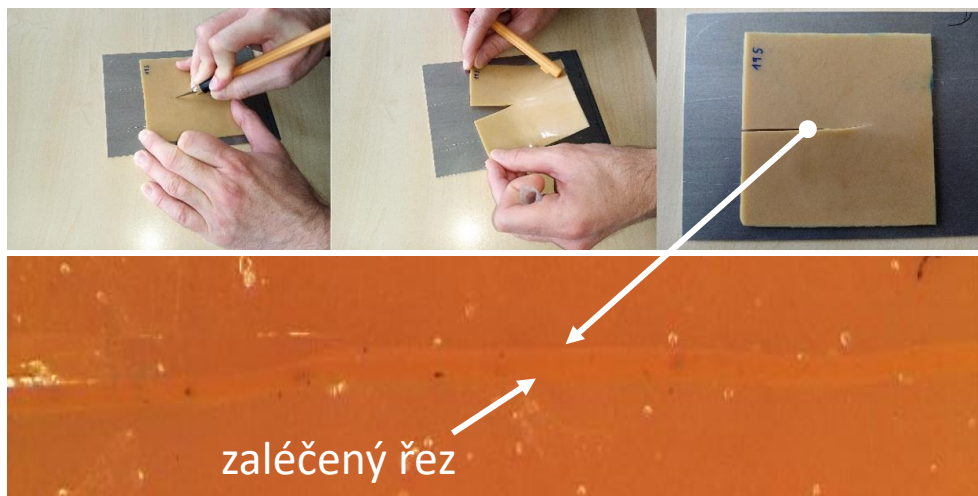
Dr. Marianella H. Santana

¹Wang, H., Yang, Y. Nishiura, M. et al. *Journal of the American Chemical Society*. 2019, 141(7), 3249-3257. 47 / 55

²Araujo-Morera, J., Santana, M. H., Verdejo, R. et al. *Polymers*. 2019, 11(12).

■ Míra obnovy mechanických vlastností

- **Termoplastické kopolymery (E-AP, RIKEN)**
 - Proces uzdravování při **laboratorní teplotě**.
 - Stabilní míra uzdravení **18 až 20 %** (prodloužení při přetržení).
- **Elastomery (XNBR, ICTP)**
 - Proces uzdravování při **zvýšené teplotě (70 °C)**
 - Míra uzdravení **3 až 7 %** (prodloužení při přetržení).

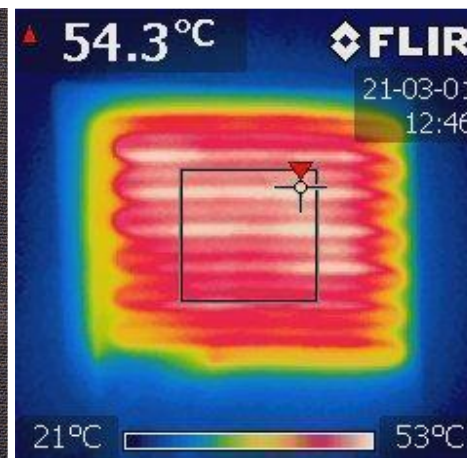
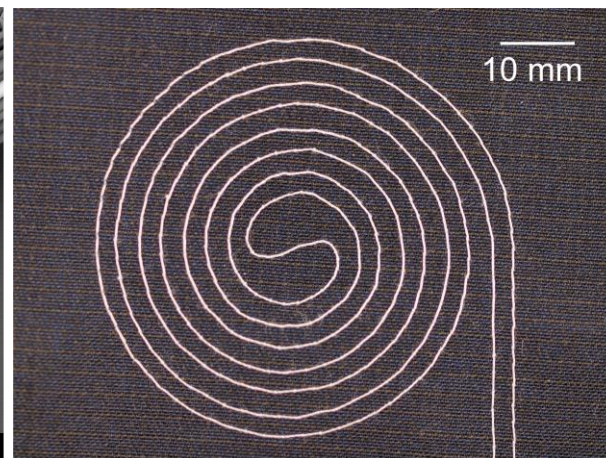
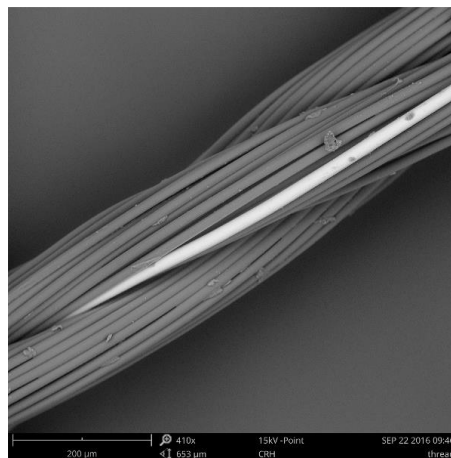


5. AKTUÁLNĚ ŘEŠENÁ TÉMATA

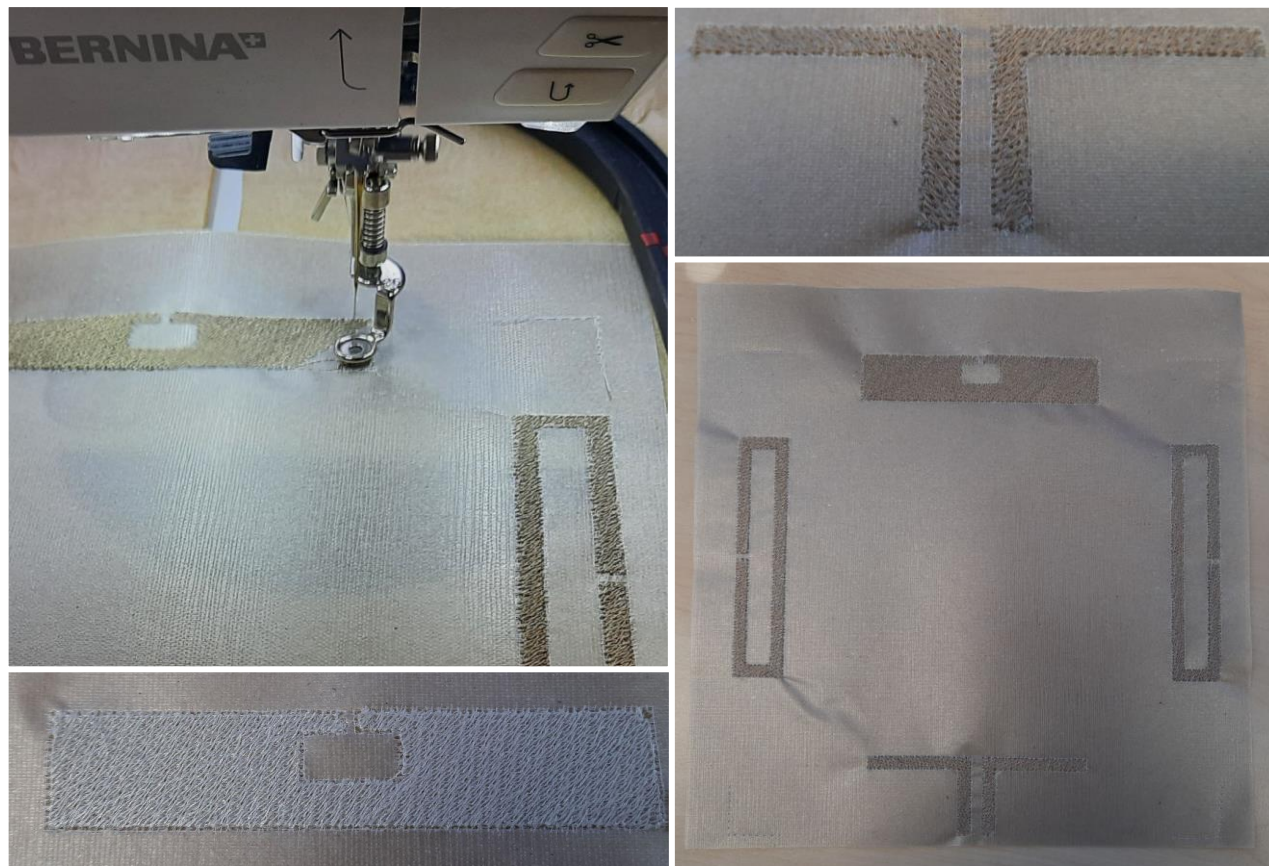
- 5.1 Využití retardérů hoření při snižování hořlavosti kabelových izolací
- 5.2 Samouzdravující materiály pro elektrotechniku
- **5.3 Polymerní kompozity s inovativními funkcionalitami**
- 5.4 Kompozitní konstrukce pro venkovní vn vedení

■ Přidaná funkcionality?

- *Vodivé*, příp. *odporové hybridní nitě*.
- Pro **integraci elektronických komponent** (*senzory*, *antény*, *topné elementy*) do **textilních materiálů**.
- **Polymerní** (*PES, PA, PI...*) a **vodivá/odporová vlákna** v různých vzájemných kombinacích.
- **Snadná integrace** (šicí stroje) do materiálových struktur.
- **Dlouhodobá ochrana** struktur díky reaktoplastické matici.



■ Vyšívání antén



■ Kontaktování (odporové svařování)



5. AKTUÁLNĚ ŘEŠENÁ TÉMATA

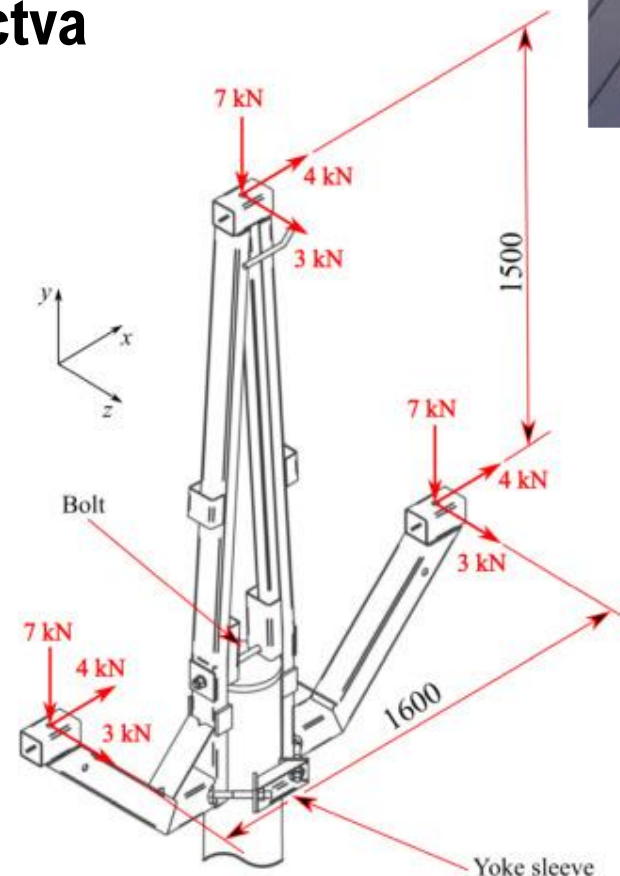
- 5.1 Využití retardérů hoření při snižování hořlavosti kabelových izolací
- 5.2 Samouzdravující materiály pro elektrotechniku
- 5.3 Polymerní kompozity s inovativními funkcionalitami
- **5.4 Kompozitní konstrukce pro venkovní vn vedení**

■ Nevýhody současného řešení

- **Vysoká hmotnost**
(porcelánové, skleněné, silikonové nebo epoxidové izolátory na ocelovém profilu)
- **Kombinace vodivých a nevodivých materiálů**
- **Koroze a nutnost dodatečné ochrany ptactva**

■ Spolupráce

- **Fakulta aplikovaných věd, ZČU v Plzni**
(mechanické modely)
- **Katedra elektrotechniky a počítačového modelování, FEL ZČU v Plzni**
(elektrické modely)
- **5M s.r.o.**
- **Technofiber s.r.o.**



■ Přínosy využití polymerního kompozitu

- Menší hmotnost
(30 vs 70 kg)
- Srovnatelné maximální hodnoty napětí a deformace
- Možnost použití dodatečných ochranných povlaků
(např. RTV – *Room Temperature Vulcanizing*)
- V současné době probíhají dlouhodobé provozní zkoušky za přirozených klimatických podmínek a při mechanickém zatížení.



6. ZÁVĚREČNÉ SHRNUÍ



- *Elektroizolační technika* je ryze **multioborové odvětví**.
- *Pokročilé materiálové struktury* otevírají **zcela nové možnosti** a mohou podstatně **zvýšit užitnou hodnotu** současně používaných materiálů.
- **Hlavní výzvy v oboru:**
 - další vylepšování **dielektrických vlastností** (např. *nanoaditiva*),
 - prodloužení **životnosti** a **spolehlivosti** elektrotechnických celků (*samouzdravující materiály*),
 - **zefektivnění výroby** elektroizolačních materiálů (např. *aditivní výroba*),
 - otázka **životního prostředí** (*recyklovatelné reaktoplasty*).

Děkuji za pozornost

Radek Polanský
+420 377 634 517
rpolansk@fel.zcu.cz



FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

