

Fakulta elektrotechnická
Katedra materiálů a technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Perspektivní elektroizolační materiály vhodné pro sériovou výrobu
elektromotorů

Autor práce: **Bc. Jan Huček**
Vedoucí práce: **prof. Ing. Pavel Trnka, Ph.D., MBA**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan HUČEK**
Osobní číslo: **E22N0004P**
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**
Téma práce: **Perspektivní elektroizolační materiály vhodné pro sériovou výrobu elektromotorů**
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Popište stávající technologie výroby elektroizolačních systémů pro točivé stroje.
2. Popište materiály používané v současnosti.
3. Uveďte perspektivní materiály pro elektroizolační systémy s ohledem na sériovou výrobu a udržitelnost.
4. Zhodnoďte dopady výroby na životní prostředí.

Rozsah diplomové práce: **40-60**
Rozsah grafických prací: **2**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

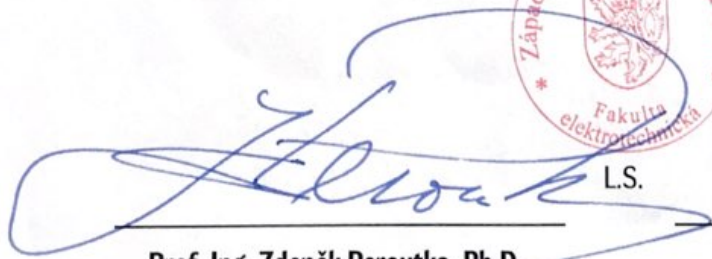
Seznam doporučené literatury:

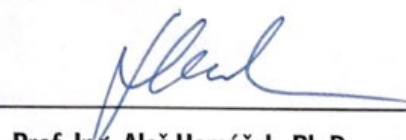
1. Elektronické informační zdroje.
2. Materiály KET.
3. Materiály výrobců EIS.

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**




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


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

V Plzni dne 6. října 2023

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá perspektivními elektroizolačními materiály použitelnými v dielektrickém podsystemu elektromotoru s ohledem na sériovou výrobu, životní prostředí a požadavky vývojového trendu elektromotorů. Popisuje současné izolační systémy elektromotorů, současné izolační materiály, jejich klasifikaci a faktory ovlivňující degradaci a stárnutí. Jednotlivé perspektivní materiály vhodné pro daný podsystem izolačního systému motoru pro nové elektromobily. Druhá část této práce popisuje experiment, ve kterém se pozorovala změna ztrátového činitele při zrychleném tepelném stárnutí na vzorcích izolovaných vodičů pro vinutí, pro které byla provedena také strukturální analýza a zhodnocení celého experimentu.

Klíčová slova

Izolační systém, izolační materiály, vlivy stárnutí, elektromobil, elektromobilita, 800V, vysokoteplotní polymery, PI, polyimid, PEEK, polyetheretherketon, vodiče pro vinutí, tepelné stárnutí, zrychlené tepelné stárnutí, ztrátový činitel, polarizační index, redukované resorpční křivky, STA, FTIR

Abstract

The thesis deals with perspective electrical insulating materials for the dielectric subsystem of an electric motor, considering serial production, environment impact, and the requirements of the development trend in electric motors. The thesis describes current insulation systems of electric motors, current insulation materials, their classification, and factors affecting degradation and ageing. It also describes specific perspective materials suitable for the given subsystem of the motor's insulation system for new electric vehicles. The second part of this thesis describes an experiment in which the change in the dissipation factor was observed during accelerated thermal aging on samples of insulated winding wires, for which structural analysis and evaluation of the entire experiment were also conducted.

Key Words

Insulating system, insulating materials, aging factors, electric vehicle, electromobility, 800 V, high temperature polymers, PI, polyimide, PEEK, polyetheretherketone, winding wires, thermal aging, accelerated thermal aging, dissipation factor, polarization index, reduced resorption curves, STA, FTIR.

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval prof. Ing. Pavlovi Trnkovi, Ph.D., MBA za trpělivost, ochotu, rady a zkušenosti, připomínky a vedení práce. Dále pak Ing. Jaroslavovi Hornakovi, Ph.D. za pomoc při měření a Ing. Petru Kadlecovi, Ph.D. za pomoc se strukturálními analýzami. V neposlední řadě své rodině za podporu při studiu.

Obsah

1	Úvod	- 1 -
2	Elektroizolační systém točivého stroje	- 1 -
2.1	Návrh a životnost elektroizolačního systému točivých strojů	- 1 -
2.2	Stárnutí elektrického stroje	- 2 -
	Vlivy provozního namáhání	- 2 -
2.2.2	Vlivy okolního prostředí.....	- 5 -
2.3	Izolační systém elektrických točivých strojů.....	- 8 -
2.3.1	Izolační systém nízkonapětových točivých strojů	- 8 -
2.3.1.3	Impregnace vinutí.....	- 8 -
	Izolační systém vysokonapětových točivých strojů.....	- 10 -
3	Elektroizolační materiály.....	- 12 -
3.1	Klasifikace elektroizolačních materiálů dle tepelných tříd.....	- 12 -
3.2	Charakteristické materiály pro jednotlivé tepelné třídy.....	- 13 -
	Tepelná třída 90 (Y)	- 13 -
	Tepelná třída 105 (A)	- 13 -
	Tepelná třída 120 (E).....	- 14 -
	Tepelná třída 130 (B).....	- 14 -
	Tepelná třída 155 (F)	- 14 -
	Tepelná třída 180 (H)	- 14 -
	Tepelná třída 200 (N)	- 15 -
	Tepelná třída 220 (R).....	- 15 -
	Tepelná třída 250 (-).....	- 15 -
	Materiály mimo tepelnou třídu	- 15 -
3.3	Současné používané materiály	- 15 -
	Skla.....	- 15 -
	Slída.....	- 16 -
	Keramika	- 16 -
	Přírodní materiály a pryskyřice.	- 16 -
	Plasty	- 17 -

4	Nové perspektivní materiály.....	- 19 -
4.1	Nové technologie v elektromobilitě.....	- 19 -
4.2	Požadavky na materiál	- 22 -
4.3	Izolace vinutí.....	- 24 -
4.4	Izolace drážek	- 26 -
4.5	Impregnace.....	- 27 -
4.6	Vylepšení vlastností materiálů.....	- 29 -
5	Dopad výroby na životní prostředí	- 31 -
6	Diagnostika perspektivních materiálů – Experiment	- 34 -
6.1	Popis vzorků a experimentu.....	- 34 -
6.2	Tepelné stárnutí.....	- 35 -
6.3	Dielektrické ztráty.....	- 37 -
6.4	Ztrátový činitel.....	- 37 -
6.4.1	Náhradní obvod	- 38 -
6.4.2	Měření ztrátového činitele	- 40 -
6.5	Dielektrická absorpce	- 41 -
	Časový průběh náboje a proudu dielektrické absorpce [1].....	- 41 -
	Parametry určované z absorpční a resorpční charakteristiky	- 44 -
6.6	Fenomenologické zkoušky naměřená a vypočítané hodnoty.....	- 46 -
	Polarizační index a redukované resorpční křivky.....	- 46 -
	Závislost ztrátového činitele na tepelném stárnutí	- 46 -
6.7	Strukturální zkoušky	- 50 -
6.7.1	Simultánní termická analýza STA.....	- 50 -
6.7.2	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací	- 50 -
6.8	Mikroskopická inspekce	- 55 -
6.8.1	Ztráta přilnavosti izolace k mědi	- 55 -
6.8.2	Vzniklá nová vrstva na stěně izolantu	- 56 -
6.8.3	Změna pigmentu vlivem stárnutí.....	- 57 -
7	Závěr.....	- 59 -
	Literatura	- 64 -

Seznam symbolů a zkratk

ATR	zeslabený úplný odraz
CR	odolný vůči částečným výbojům
ČV	částečné výboje
DSC	diferenční skenovací kalorimetrie
FTIR	infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
HPP	vysoce výkonný polymer
NN	nízké napětí
PDIV	zapalovací napětí částečných výbojů
PWM	pulzně šířková modulace
RRK	redukované resorpční křivky
REACH	nařízení Evropské unie ohledně chemických látek
STA	Simultání termická analýza
TG	termogravimetrie
VN	vysoké napětí

1 Úvod

Globální oteplování je stále více zjevné a jeho příčiny jsou způsobeny emisemi oxidu uhličitého (CO₂) v atmosféře. Tento vyvíjející se trend významně zhoršuje stav naší planety a má nezvratné dopady na životní prostředí. Jedním z hlavních zdrojů těchto emisí jsou fosilní paliva, která jsou využívána především v energetice a dopravě, zejména ve spalovacích motorech. Pro zvrácení této nepříznivé tendence je tedy nezbytné přejít na způsoby výroby elektrické energie bez produkování oxidu uhličitého během výroby a na udržitelnější způsoby dopravy, aby se snížila závislost na spalovacích motorech a snížily se emise CO₂ v dopravě [26, 55].

Tento proces přechodu zahrnuje obrovské investice do energetiky, do nabíjecí infrastruktury a do samotných elektromobilů. Tím bude docházet k odpovídajícímu nárůstu využívání elektromobilů jako našeho primárního dopravního prostředku. Klíčovou roli v zajištění dostupnosti a realizovatelnosti proto hraje vývoj nových technologií a materiálů pro sériovou výrobu v oblasti elektromobility.

Výzkum a vývoj v oblasti moderních elektromotorů směřuje k výraznému zvýšení výkonnosti a účinnosti motoru, práci při vyšších teplotách, tepelnému managementu, redukci velikosti a snížení objemu motoru, a inovacím umožňující dosažení udržitelnější výroby vzhledem k predikcím rostoucí poptávky v oblasti elektromobility.

Klíčové pro nové elektromotory a naplnění vývojového trendu je nalezení a ověření nových materiálů, které by splňovaly komplikované nároky oproti současným konvenčním materiálům. K dosažení požadovaných vlastností je kladena důležitost na neustálý pokrok v materiálovém inženýrství, ať už v oblasti kompozitních a nanokompozitních materiálů, modifikací a úpravou materiálů, či technologickou změnou na strukturální úrovni. Vzhledem k dnešní době zohledňující celý životní cyklus výrobku, je důležité při volbě materiálů pro elektromotor budoucnosti brát úvahu i dopad na životní prostředí a snažit se ho minimalizovat.

Výsledné produkty a znalosti vzhledem k neustálé elektrifikaci světa a jejím zdokonalování budou platné nejen v oblasti elektromobility, ale i jiných odvětvích jako jsou např. obnovitelné zdroje energie, letectví, lodní doprava nebo průmyslové aplikace. Dále znalosti materiálové inženýrství přesahující pole působnosti nalézají využití i v oblastech lékařství, konstrukčního a mechanického inženýrství nebo vesmírném programu.

2 Elektroizolační systém točivého stroje

2.1 Návrh a životnost elektroizolačního systému točivých strojů

Při návrhu elektrického stroje hraje elektroizolační systém klíčovou roli pro jeho bezchybnou činnost a dlouhou životnost. Řadí se tedy mezi jedno z nejdůležitějších odvětví v oblasti elektrotechnické výroby [1].

U zrodu rozvoje elektrických točivých strojů byly návrhy izolačního systému pro dosažení stanovené životnosti převážně metodou pokusů a omylů. Pokud část staršího návrhu izolačního systému předčasně selhala, přidala se dodatečná izolace nebo se v novém řešení provedla jiná nápravná opatření. Aby se předešlo předčasnému selhání, dimenzovaly se tyto systémy s určitou bezpečností rezervou, např. měděné vodiče měly větší průřez, než bylo nezbytně nutné, aby se zajistila nízká provozní teplota, hlavní izolace byly zesílené, aby se zabránilo elektrickému průrazu atd. Společným výsledkem byl tedy izolační systém, který výrazně převyšoval stanovenou životnost. Proto mnoho statorových a rotorových vinutí, která byla vyrobena v první polovině dvacátého století, je stále dodnes provozuschopných v důsledku tehdejšího konzervativního přístupu v návrhu a konstrukci elektrických strojů [2].

V druhé polovině dvacátého století dochází k výraznému technologickému pokroku ve vývoji elektroizolačních materiálů a technologií výroby, jde zejména o rozvoj polymerních materiálů. Tyto inovace umožnily změnit velikost motorů, provozuschopnost v náročnějších pracovních podmínkách a zvýšení velikosti nominálního výkonu. Snaha po zefektivnění elektrických strojů nabádala konstruktéry vtěsnat co největší výkon do co nejmenších rozměrů [1–4]. V té době došlo ke zjištění, že dimenzování strojů s bezpečností rezervou je nadměrné a výrazně zvyšuje náklady na rotor a stator, protože cena elektrického stroje je velmi závislá na hmotnosti ocele, mědi a izolace [2]. Například závěry z vývojového programu uvedené v článku [3] konstatují, že se jim povedlo optimalizací a konstrukční změnou dosáhnout redukce hmotnosti izolace o 12-57 %, hmotnosti použité mědi ve statoru o 8-45 %, mědi v rotoru o 15-49 % a oceli ve statoru a rotoru o 13-37 % při zachování stanovené životnosti. S rostoucím vývojem a poptávce po efektivnějších motorech, zvyšování pracovních podmínek ovšem dochází i ke zvýšenému namáhání elektrických strojů a jejich elektroizolačních materiálů ovlivňující jejich životnost [1, 2].

2.2 Stárnutí elektrického stroje

Stárnutí elektroizolačního systému se týká postupné degradace elektroizolačních materiálů a zhoršování jejich izolačních vlastností. Dielektrický podsystem elektrického stroje je nejvíce citlivý z hlediska jeho provozního namáhání, v případě selhání může být vzniklá porucha pro dané zařízení kritická. Obecně lze říct, že existuje mnoho různých druhů namáhání ovlivňující rychlost degradace, a tím pádem i jejich výslednou životnost. Působící vlivy lze rozdělit do dvou klíčových kategorií, tj. na vlivy namáhání během provozu a vlivy okolního prostředí. Nejběžnější z nich jsou ve stručnosti vypsány níže [1, 2, 5].

Vlivy provozního namáhání

2.2.1.1 Elektrické namáhání

Posuzujeme především podle velikosti intenzity elektrického pole, překročí-li se hodnota kritické intenzity, dochází u pevných izolantů k jejich průrazu, přestanou plnit svoji funkci izolantu. Průraz může nastat čistě elektrický při rychlém nárůstu intenzity elektrického pole či kombinací s jinými faktory může nastat elektrotepelný nebo elektrochemický průraz [5].

Elektrické namáhání zahrnuje všechny druhy namáhání, které jsou zapříčiněny působením elektrického napětí. Elektrické namáhání může být rozdělováno dle frekvence, tvaru, hladiny, determinovatelnosti nebo spojitosti napětí. Nejčastěji rozdělujeme elektrické namáhání dle druhu napětí, tj. střídavý se sinusovým průběhem nebo stejnosměrný. Největším problémem u namáhání stejnosměrným napětím je vytváření prostorového náboje. U střídavého napětí dochází k největšímu namáhání v oblasti výkonové elektroniky měniče kmitočtu či napětí, vytvářejí v obvodech řízených pohonů pulzní namáhání. Toto namáhání vzniká vlivem strmých nárůstů napětí na izolaci při vysoké frekvenci, tudíž se strmý nárůst napětí obdélníkového tvaru periodicky opakuje. Vysoká frekvence navíc způsobuje dielektrický ohřev materiálů. Pulzní namáhání je spojeno se zvýšenou aktivitou výbojové činnosti, z čehož vyplývá, že elektrické napětí má výrazný vliv, pokud dochází k částečným výbojům [2, 5].

2.2.1.2 Částečné výboje

Představují druh elektrických výbojů, které dokážou částečně přemostit izolaci mezi vodiči nebo elektrodami s rozdílnými potenciály. Tyto výboje se projevují jako impulzy, jejichž doba trvání je menší než 1 μ s [5, 7]. Při aktivitě těchto výbojů vzniká řada namáhání izolačního systému jejich tepelnými, elektrickými, mechanickými, erozivními a chemickými

účinky, které významným způsobem negativně ovlivňují vlastnosti izolačního systému a zhoršují jejich životnost a spolehlivost [5]. Proto částečné výboje představují podle mnoha literatur hlavní činitel degradace životnosti izolačního systému [6, 8]. Podle [8] jsou částečné výboje nejčastěji se vyskytující závada v izolačních materiálech, podle jejich statistických dat říkají, že 85 % poruch zařízení při středním a vysokém napětí souvisí s částečnými výboji. K zapálení částečného výboje dojde po překročení určité úrovně elektrického namáhání [1].

Podle místa jejich působení je můžeme obecně rozdělit na:

- Vnitřní částečné výboje, tj. výboje v plynech uvnitř dutinek, resp. které jsou obklopeny kapalnými či pevným dielektrikem [5]. Vzniku těchto plynem naplněných dutinek se i při největší preciznosti a technologické pečlivosti nevyhneme [1]. Takové výboje jsou právě např. v plynných dutinkách pevného dielektrika [5].
- Vnější částečné výboje jsou výboje v plynech v blízkosti elektrod s velkým zakřivením nebo malých poloměrů. Mezi takové výboje řadíme korónové výboje nebo doutnavé výboje [5].
- Povrchové částečné výboje probíhají v okolí elektrod v oblasti rozhraní pevného a plynného dielektrika. Jsou to klouzavé výboje na vstupu vinutí z drážky v točivých strojích, průchodkách a podobně [5].

2.2.1.3 Tepelné namáhání

Je vyvolané vlastním provozem zařízení (dielektrické ztráty) či teplotou okolního prostředí. Tepelná odolnost představuje většinou nejslabší článek z hlediska spolehlivosti celého elektrického stroje [5]. Tepelné stárnutí tedy představuje jednu z nejvíce studovaných oblastí namáhání elektrického stroje s rozsáhlými znalostmi, protože bylo nejčastější příčinou selhání izolace vinutí u starších typů izolačních systémů [2].

Působení již zmíněných vlivů způsobuje pomalé reakce v materiálech, které jsou iniciovány dodáním energie jednotlivým částicím, tato dodaná energie umožňuje částicím překonat energetické bariéry. Po srážce s částicemi zapojenými do reakcí se spouští uvedené degradační reakce. Dodání právě této energie, známé též jako aktivační energie, poskytuje částicím energii potřebnou k opuštění stabilního stavu a iniciování degradačních procesů uvnitř struktury [5].

2.2.1.4 Mechanické namáhání

Mezi mechanické namáhání patří rázové účinky zkratových proudů, přechodové jevy, působení odstředivé síly a vibrací. Vibrace mohou vzniknout nesouosostí rotoru, uvolněnými díly motoru, opotřebením převodovky a ložisek či nevyvážeností rotoru [5, 87, 89]. Právě špatné vyvážení je hlavním zdrojem vibrací, který představuje 50-60 % [89]. Během provozu ložisek, zajišťující přenos zatížení na jiné části konstrukce a otáčivý pohyb motorů, vznikají únavové trhlinky v okolí povrchu a mikroskopické částičky materiálů styčných ploch. Převalení ložiska přes poškozené místo vytvoří mechanický rázový impuls. Pro menší stroje se používají ložiska valivého typu, pro větší kluzná ložiska, u nich jsou vibrace vyvolané opotřebením vůle v uložení [5]. Podmínky měření a mezní hodnoty vibrací upravuje norma ČSN EN EIC 60034-14 [90].

Odstředivá síla působící na izolační systém rotoru má tendenci izolaci drtit nebo deformovat, jedná se o nevibrační sílu. Izolace je, nebo není schopna takové síly vydržet. To lze vyhodnotit různými krátkodobými mechanickými zkouškami. Ke stárnutí dochází jen v malé míře, i když některé materiály se mohou anelasticky deformovat neboli dochází k tzv. "creep" deformaci, tj. pomalu se vzdalují z místa s vysokým namáháním, což nakonec vede k poruše [2].

Další běžné mechanické namáhání je způsobeno proudem o síťové frekvenci, který vyvolává magnetickou sílu kmitající s dvojnásobnou síťovou frekvencí. Závity jsou ve satorové drážce uvolněné, působící elektromagnetická síla způsobuje vibraci závitů, a dochází k abrazi hlavní izolace mezi vinutím a jádrem statoru. Podobná magnetická síla působí i na výstupu vinutí z drážky, pro velké stroje jsou vibrace čel vinutí z predikce poruchy monitorována. Pokud jsou závity nebo satorové tyče volně vibrující vůči sobě navzájem nebo vůči blokovacím či podpěrným kroužkům, může opět dojít k oděru izolace [2, 5, 88].

Třetí významné mechanické namáhání způsobují přechodné jevy: zapínání motorů nebo synchronizace synchronních strojů. Obojí vyvolává velký přechodný proud o síťové frekvenci, který může být pětikrát nebo vícekrát větší než normální velikost proudu ve statoru. Výsledkem je, že magneticky indukovaná mechanická síla je 25krát nebo vícekrát silnější než při běžném provozu. Stejnoseměrná složka této přechodové síly má tendenci ohýbat závity na výstupu vinutí z drážky. Pokud izolace vinutí nevydrží působení této síly, praskne. Pokud dochází k mnoha přechodným jevům, například při častém spouštění motoru, pak se mohou závity na výstupu vinutí časem postupně uvolňovat, což umožňuje relativní pohyb mezi nimi, a způsobit abrazivní účinky na izolaci při běžném proudu o síťové

frekvenci, jak je popsáno výše. Výrobci často vypočítávají síly, které by mohly vzniknout při různých přechodových proudech, a určují, zda lze odolat jednomu přechodovému proudu. Stárnutí se obvykle nebere v úvahu [2].

Dojde-li k mezizávitovému zkratu u pólového vinutí, vznikne nevyvážený magnetický tah na rotor, na zkratovaném pólu se utvoří slabší magnetické pole než na ostatních, výsledná nesymetrie vyvolá kolísání rotoru [5].

Narozdíl od elektrického a tepelného namáhání neexistují, v případě mechanického namáhání žádné dostatečně akceptovatelné modely popisující vztah mezi amplitudou vibrací a životností. Ačkoli existují modely popisující míru abraze, ke které může dojít, nejsou praktické a žádný z nich se nestal základem pro standardní zkoušky zrychleného stárnutí při vibracích [2].

2.2.1.5 Chemické namáhání

Proces pomalu probíhající oxidace v izolantech, zejména u polymerů a izolační kapalin, vytváří kyselé skupiny. Tyto reakce vedou k zvýšení vodivosti a ztrátového činitele materiálů, kromě toho dochází ke štěpení polymerních řetězců u použitých pryskyřic, což ovlivňuje snížení mechanické pevnosti materiálů [5].

Důsledkem ztráty zvláčňovačů a přílišného vázání kyslíku polymerními řetězci dochází k postupnému tvrdnutí a křehnutí izolace. Tento jev začíná pomalým vypařováním látek s nižší molekulovou hmotností, poté nastává zvyšování přilnavosti sousedních řetězců během jejich současného rozkladu a zkracování. Řada těchto procesů má za výsledek zhoršení mechanických vlastností materiálu, jako jsou snížení pevnosti v tahu, ohybu a podobně [5].

Depolymerace představuje chemický proces, který působí na všechny polymery a probíhá pomaleji než oxidace, při vysokých teplotách k ní dochází i za nepřítomnosti kyslíku. Jedná se o proces rozkladu skeletu makromolekul na menší části [5].

Další reakce, které mohou v izolačním systému probíhat jsou například elektrolytické reakce nebo reakce vyvolané působením částečných výbojů [5].

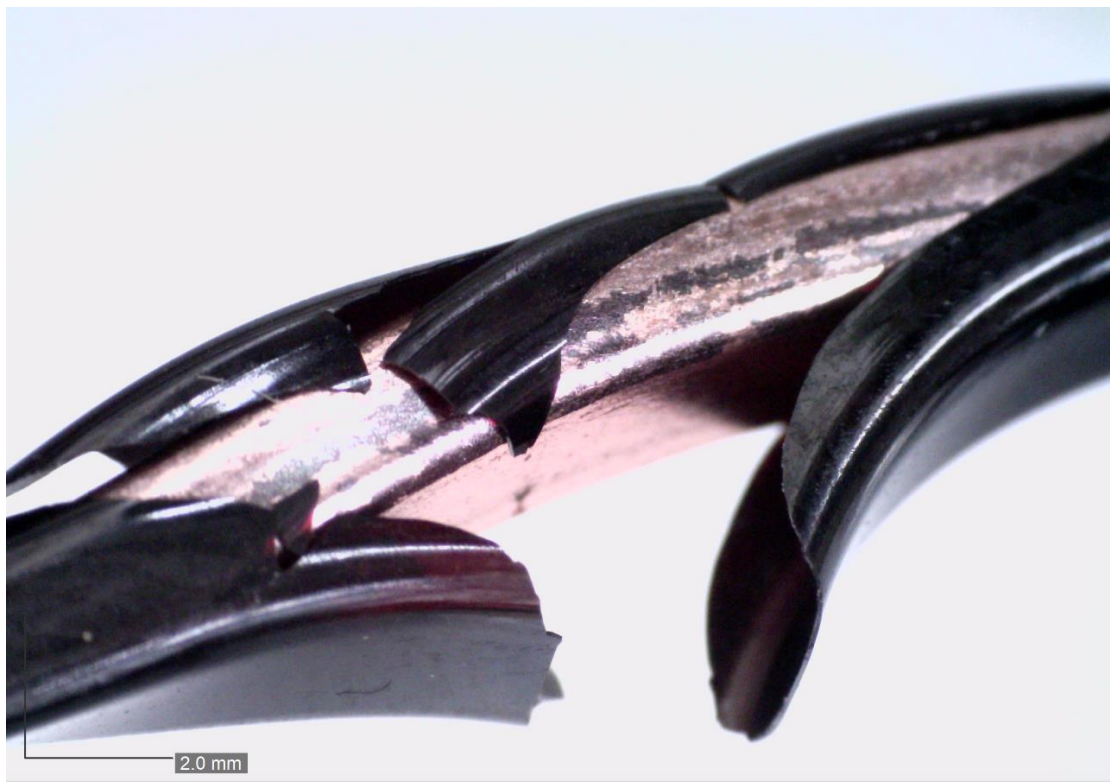
2.2.2 Vlivy okolního prostředí

Prostředí, ve kterém se daný motor či generátor nachází má vliv na chod točivého stroje, soubor faktorů okolního prostředí způsobuje určité namáhání, které může přispět či vést k poruše stroje [2]. Mezi hlavní faktory okolního prostředí patří zejména [2, 5]:

- Vysoká vlhkost, ať už vzduchu v okolí či zkondenzovaná na částech motoru je známá tím, že její přítomnost má za následek vytváření volných nosičů elektrického náboje, které vzniknou rozkladem molekul vody na menší části, přesněji ionty. Tyto částice se těmito nosiči stávají, čímž dochází k výraznému zhoršení elektrických vlastností, jako je snížení vnitřního a povrchového odporu, naopak permitivita dielektrické ztráty se zvyšují;
- Okolní teplota se ve specifikovaném rozmezí, pro které je stroj určen, často mění, což vyžaduje, aby byl dielektrický podsystém správně nadimenzován a byl schopen v daném teplotním intervalu plnit svoji funkci. Působení tepla probíhá většinou za přítomnosti kyslíku, jedná se tedy o termooxidační namáhání. Toto namáhání je velmi agresivní a komplikované;
- Agresivní chemické látky a činidla, které v závislosti na povaze dané látky mohou vyvolat různé interaktivní reakce, které změni původní charakter této látky;
- Nečistoty a částice vnesené do stroje z okolí, jako je poléťavý prach, hmyz, popel, uhelný prach a částice vzniklé jako vedlejší produkt souvisejících výrobních průmyslových procesů;
- Abrazivní částice v chladicím vzduchu nebo vodíku;
- Částice z opotřebení brzdých částí nebo opotřebení uhlíkových kartáčů uvnitř stroje, jsou-li instalovány;
- Záření s vyšší teplotou má silnější energetický dopad, přičemž nejničivější je ultrafialové záření. Kombinace záření a tepla je obzvláště nebezpečná, jelikož jejich vzájemné působení je mnohem účinnější než vliv obou faktorů samostatně;
- Radiace, která je způsobená jadernými reakcemi, se od ostatních vlivů okolního prostředí poněkud liší. Samotné záření může vést ke štěpení chemických vazeb, a tím ke křehnutí izolace. Čím vyšší je úroveň záření, tím rychlejší je stárnutí. Proces je podobný tepelnému stárnutí, přičemž rozdíl je, že povrch izolace stárne rychleji než vnitřek. Jedná se tedy o opačnou situaci, než je tomu u tepelného stárnutí. Působením radiačního záření jsou ohroženy pouze stroje provozované v jaderných elektrárnách nebo na lodi s jaderným pohonem.

Každý z těchto vlivů může různým způsobem ovlivnit izolaci rotoru a statoru, je důležité poznamenat, že výše uvedené vlivy stárnutí izolace jsou popsány obecně a nemusí platit pro všechny typy točivých strojů, protože každý typ elektrického stroje může být ovlivněn různými faktory. V některých případech tyto vlivy samy o sobě nezpůsobují stárnutí izolace, ale v kombinaci s jinými vlivy či namáháním mohou vést ke stárnutí. Například vlhkost a olej s částečně vodivými nečistotami, částicemi uhlíkových kartáčů atd. mohou na izolaci vytvořit částečně vodivý film, na kterém pak může elektrické napětí způsobovat povrchové proudy a vytvářet elektricky vodivé trasy. Podobně stejná kombinace oleje, vlhkosti a nečistot se může nahromadit ve ventilačních kanálech rotoru a statoru, nebo mezi cívkami ve výstupu z vinutí a blokovat tak proudění chladicího média, což zvyšuje riziko tepelného poškození [2].

Olej může být také mazivem, které usnadňuje relativní pohyb mezi cívkami a drážkami v rotorovém a statorovém vinutí, což vede k otěru izolace. Nízká vlhkost chladicího média snižuje průrazné napětí plynu, což ale vede k větší aktivitě částečných výbojů na výstupu vinutí z drážky [2].



Obr. 1 Viditelné popraskání laku vlivem tepelného namáhání

2.3 Izolační systém elektrických točivých strojů

Základní principy a modely izolačních technik byly vyvinuty již před desítkami let [4]. Izolační systémy elektrických točivých strojů rozdělujeme dle jejich pracovního napětí, tzn. na nízkonapěťové točivé stroje a vysokonapěťové točivé stroje [1, 13].

2.3.1 Izolační systém nízkonapěťových točivých strojů

Nízkonapěťové točivé stroje jsou v principu jednoduché stroje. Většinou se jedná o spotřební produkty s krátkou životností (v porovnání s vysokonapěťovými točivými stroji), kde cena představuje rozhodující faktor na volbu materiálů a použité technologie při výběru izolačního systému. Použité materiály musí být vybrány z hlediska vzájemné kompatibility a požadavků stroje [10, 11].

Izolační systém nízkonapěťových strojů se skládá ze tří základních částí – z izolace vodičů, vyložení drážek a impregnace vinutí [1, 4].

2.3.1.1 Izolace vodičů

Se skládá z laku (smaltu), opředení a ovinutím bavlnou, skleněnými vlákny a dalšími materiály, popř. kombinací pevné a nanášené izolace [1]. Lak představuje důležitou součást izolace a jeho volba závisí na tepelné třídě a použití stroje. Izolace vodičů musí požadovaně izolovat a mít dobrou přilnavost mezi vodičem a impregnantem [10].

2.3.1.2 Vyložení drážky

Představuje přídatnou izolaci mezi vinutím a stěnami drážky. Kromě izolační funkce, slouží především jako ochrana vinutí před poškozením o ostré hrany a stěny drážky. Materiály používané pro vyložení drážky jsou drážková lepenka, aramidový papír Nomex®, více vrstvé ohebné materiály či kombinace materiálů [1, 10]. Materiály pro drážkovou izolaci musí mít dobré elektroizolační vlastnosti, teplotní vlastnosti a mechanické vlastnosti, především pak dobrou ohebnost [1].

2.3.1.3 Impregnace vinutí

jedná se poslední část procesu při výrobě elektroizolačního systému. Impregnace má několik funkcí, kromě elektroizolační izolace také zesiluje mechanickou pevnost, což vede ke snížení vibrací vinutí, zlepšuje přenos tepla a zvyšuje tepelnou odolnost systému, a zajišťuje lepší odolnost proti vlivům okolního prostředí [10].

U nízkonapěťových strojů se impregnace provádí pomocí technik máčení, zaplavování a zakapávání [1, 11]. Zvolená technika závisí na velikosti stroje, jeho použití a na zvoleném impregnantu. Impregnant musí být nanášen tak, aby byl z izolačního systému

odstraněn vzduch, zároveň musí mít dobré penetrační a retenční vlastnosti při vytvrzování [11]. Použité impregnanly jsou na bázi polyesterové, epoxidové a polyesterimidové pryskyřice [4, 10].

V technice máčení je objekt ponořen do impregnační kapaliny, obvykle při okolní teplotě a tlaku. Vyjmut nad ponořovací nádrž, nechá se odkapat přebytečný impregnant a je umístěn do pece na vytvrzení. Používají se jednosložkové polyesterové pryskyřice vytvrzující se při nízkých teplotách pro tepelnou třídu H, polyesterimidové pryskyřice vytvrzované elektrickým proudem a UV zářením. Výhodou této technologie jsou nízké náklady, vysoká produktivita a univerzálnost. Nevýhodami jsou nadměrný odtok impregnantu z vinutí a cizí částice, které v impregnantu často zůstávají a mohou ho rychle znehodnotit. [1, 11].

V technice zaplavování se objekt vloží do prázdné impregnační nádoby. Impregnant se přečerpá ze zásobníku do impregnační nádoby a její stoupající hladina vytlačí vzduch z prostor vinutí. Poté je impregnant přečerpán zpět do zásobníku, nechá se odkapat přebytečný impregnant a je umístěn do pece na vytvrzení. Impregnantem pro tuto techniku jsou např. laky na bázi nenasycené polyesterimidové pryskyřice. Má stejné nevýhody jako technika máčení, ale má oproti ní obrovskou výhodu. Tou je víko, kterým je zakryta nádoba, aby se zabránilo odpařování rozpouštědla [1, 11].



Obr. 2 Impregnace pomocí techniky zakapávání (převzato z [12])

Zakapávání je technika, ve které se impregnant nanáší pouze tam, kde je to žádoucí, především na vinutí. Kapalina se ve správném množství vkápne na rotující a předehřáté vinutí. Podrobená část putuje do pece a vytvrzuje se za stálého otáčení. Pro tuto aplikaci lze použít roztok nenasycené polyesterimidové pryskyřice nebo epoxidové pryskyřice. Výhodami této techniky je nízká spotřeba impregnantu, vysoké procento plnění, čistý a

automatický proces a vysoká produktivita. Je ovšem velmi specializovaná a vyžaduje investice do zařízení [1, 11].

Izolační systém vysokonapětových točivých strojů

V současnosti se izolační systémy pro vysokonapětové stroje vyrábějí pomocí dvou hlavních technologií. První je tzv. Resin Rich, neboli v překladu „bohatý na pryskyřici“, a tou druhou je vakuově-tlaková impregnace neboli VPI (Vacuum Pressure Impregnation) [1, 13].

2.3.1.4 Izolační systém Resin Rich (RR)

Tato technologie byla vyvinuta společností General Electric. Základ této technologie tvoří třísložkový kompozit, ten se ve formě kompozitní slídové pásky s vysokým obsahem pryskyřice lepí a vytvrzuje na vodivé části. Kompozit obsahuje 30 až 40 % pojiva, jako pojivo se používá reaktoplastická bezrospouštědlová novolaková pryskyřice nebo cykloalifatická epoxidová pryskyřice. Nosná část je tvořena skleněnou tkaninou, která má z důvodu zmenšení tloušťky, zvýšení elektrické pevnosti a snížení dielektrických ztrát vlákna zarovnaná do roviny, oproti stáčeným vláknům, které se ale také používají. Plnivem je kalcinovaný slídový papír z rekonstruované slídy, papír je málo nasákavý, hutný s dobrými mechanickými vlastnostmi [1, 2, 13, 14].

Materiál je dodáván ve formě částečně předtvrzeného polotovaru, tzn. v tak-zvaném „B“ stavu. Zpracováním na vodivé části dojde k vytvoření izolační kompaktní trubky o požadované tloušťce stěny podle pracovního napětí. Navíjení materiálu může probíhat kontinuálně, kde pásy překrývají z poloviny, třetiny nebo dvou třetin svojí šířky. Nebo můžeme navíjet diskontinuálně, tzn. že rovná část umístěná v drážce je tvořena foliovým materiálem a čela vinutí jsou ovinuta páskou. V obou způsobech navíjení se přidává tloušťka izolace o několik procent více, a to z důvodu stlačení, které probíhá při vytvrzování. Vytvrzení probíhá dle předepsaných postupů při teplotě 160 až 170 °C, tento proces trvá zhruba hodinu. Hotové izolační části vinutí se vkládají přímo do drážek stroje, kde jsou pospojovány a dohotoveny čela připravené na provoz [1, 2, 13].

2.3.1.5 Izolační systém Vacuum Pressure Impregnation VPI

Tuto technologii vyvinula společnost Westinghouse Electric. Jak napovídá název této technologie, hlavní proces je vakuově tlaková impregnace. Základním materiálem pro tuto technologii je savý izolant obsahující pojivo max. do 7 %, většinou třísložkový kompozit ve formě pásky. Ten je tvořen z nosné části většinou polyimidovou fólií, ale může být použita

také polyesterová fólie nebo rouno, či skleněná tkanina. Plnivem je nekalcinovaná slída, která zajišťuje savost materiálu, tato vlastnost je důležitá, aby všechny vrstvy byly dokonale proimpregnované. Nekalcinovaná slída má také dobré mechanické vlastnosti, které jsou důležité při ovíjení materiálu, je tedy důležitá pevnost v tahu, neboť nesmí dojít k poruše slídového papíru. Použitým impregnantem v této technologii jsou bezrozpouštědlové epoxidové, silikonové a polyesterové pryskyřice se stoprocentním obsahem sušiny, aby došlo k dokonalému vyplnění prostor impregnovaného objektu [1, 2, 13, 14].

Impregnace probíhá v zařízení, které je tvořeno z vakuotěsného a tlakutěsného kotle se zabudovaným chladicím a ohřívacím zařízením. Nejdříve se z impregnovaný objektu odstraní vlhkost vysušením při teplotě vyšší než 100 °C, sušení trvá zhruba 20 hodin. Poté je objekt vložen do impregnačního kotle, kvůli odstranění zbytkové vlhkosti a těkavých látek je vytvořeno v kotli vakuum. V další fázi je ze zásobníků přečerpáván ohřátý impregnant, dokud nedojde k zaplavení, tento proces trvá zhruba hodinu. Dále se odstraní vakuum a nádoba kotle se na jednu hodinu přetlakuje. Poté je ochlazený impregnant přečerpán zpátky do zásobníku. Impregnovaný objekt se nechá odkapat a přemístí se do sušárny, kde dojde k vytvrzení. Nejdříve sušíme za mírného podtlaku, aby se urychleně odpařily těkavé látky, dále pak v atmosférickém tlaku za proudění teplého vzduchu dochází k samotnému vytvrzování. Takto můžeme impregnovat jednotlivé díly, nebo celé části elektrického stroje [1, 2, 13].

2.3.1.6 Porovnání technologií VPI a RR

Není možné jednoznačně stanovit, která technologie je lepší, každá má totiž své výhody a nevýhody, a je proto vhodná pro různé aplikace.

Pomocí Technologie VPI jsme schopni vyrobit homogenní izolační systém, dále dokážeme díky této technologii zkrátit délku cívek, aniž by se změnil výkon stroje, tzn. ušetříme až 6 % materiálu. Zároveň ale tato technologie vyžaduje náročné technické zařízení, což vede k nárůstu nákladů na pořízení. Další nevýhodou VPI je, že pokud bylo vinutí naimpregnováno jako jeden celek, není možné vyměnit nebo opravit jednotlivou část, pokud bude poškozena [1].

Oproti tomu u technologie Resin Rich lze poškozenou cívku jednoduše vyměnit. U izolačního systému však dochází ke vzniku nehomogenit, ke kterým u VPI nedochází. Náklady na pořízení technologie RR nejsou tak vysoké jako u VPI, zároveň není možné zkrátit délku cívek při zachování výkonu stroje [1].

3 Elektroizolační materiály

3.1 Klasifikace elektroizolačních materiálů dle tepelných tříd

Vznik poruch ve skutečnosti nezávisí pouze na působení jednoho druhu namáhání, které by způsobovalo postupné poškozování. Pro stárnutí je vždy nutné namáhání působením dvou či více vlivů, které se vzájemně ovlivňují, což právě vede ke zhoršení stavu izolačního systému [2].

Převládajícím faktorem způsobující stárnutí na elektroizolačním materiálu (EIM) daného zařízení je teplota. To dalo základ pro vznik systému klasifikace základních tepelných tříd, které jsou mezinárodně uznané [9].

Tabulka 1 Tepelné třídy izolantů (převzato z [9])

ATE nebo RTE °C		Tepelná třída °C	Písmenné označení
≥90	<105	90	Y
≥105	<120	105	A
≥120	<130	120	E
≥130	<155	130	B
≥155	<180	155	F
≥180	<200	180	H
≥200	<220	200	N
≥220	<250	220	R
≥250	<275	250	-

Norma [9] definuje **elektroizolační materiál (EIM)** jako pevnou či kapalnou látku, která má zanedbatelně nízkou elektrickou vodivost, nebo kombinaci takových látek. Jejím účelem je oddělení vodivých částí o rozdílných potenciálech v elektrických zařízeních. A **elektroizolační systém (EIS)** jako systém obsahující jeden nebo více EIM, které společně tvoří izolační strukturu použitou v elektrickém zařízení [9].

ATE znamená stanovený index tepelné odolnosti, který je známý či odvozen ze známých provozních zkušeností, pro referenční EIS nebo EIM. Oproti tomu **RTE** neboli relativní index tepelné odolnosti je dán porovnáním se známým ATE EIS či ATE EIM [9].

Tepelná třída představuje maximální hodnotu EIS ve stupních Celsia, ve kterém by elektrické zařízení mělo být schopno pracovat pro nepřetržité použití. Tepelná třída se musí přiřazovat na základě výsledků zkoušek založených na zkušebních postupech v souladu s předpisy určenými Mezinárodní elektrotechnickou komisí (IEC), nebo na základě provozních zkušeností [9].

Zařízení, která má EIS s definovanou tepelnou třídou, ovšem neznamená, že každý EIM použitý v tomto systému má stejnou tepelnou odolnost. Nemusí existovat přímá úměra tepelné odolnosti mezi EIS a jednotlivých EIM [9].

V EIS může dojít ke zlepšení vlastností tepelné odolnosti jednoho EIM, díky ochranné povaze jiného EIM a vzájemné kompatibility v celém systému, než je tepelná odolnost samotného EIM. Ovšem může být i případ nekompatibility použitých EIM, a snížit tak příslušnou tepelnou třídu EIS pod hodnoty použitých EIM. Z toho důvodu nelze odvozovat tepelné vlastnosti EIM pouze z EIS, jehož jsou součástí [9].

Jak již bylo popsáno v předchozí kapitole, elektroizolační systém (EIS) musí být schopen plnit svoji funkci, která je ovlivněna mnoha faktory namáhání. Proto by se měly výše zmíněné faktory vzít v úvahu při návrhu jednotlivého elektrického stroje [9].

Elektrické stroje, které byly navrženy a vyrobeny v souladu s normami založenými na tepelném hodnocení jejich elektroizolačního systému, byla dosažena přijatelná ekonomická životnost při provozování v normálních provozních podmínkách [9].

3.2 Charakteristické materiály pro jednotlivé tepelné třídy

Tepelná třída 90 (Y)

V této třídě se používají organické materiály – bavlna, dřevo, papír, hedvábí s používanými impregnanty. To jsou asfalty, šelak, oleje a bitumeny. Dále vrstvené tvrzené bukové dřevo a PVC [1].

Tepelná třída 105 (A)

Materiály této třídy jsou také organické materiály jako papír, dřevo, bavlna, syntetické a přírodní tkaniny, hedvábí, zde s odpovídajícím lakováním či impregnantem. Syntetické látky na bázi celulózy. Vhodnými impregnanty jsou olejové, asfaltové a celulózové laky a šelak [1].

Lepenky transformátorová, drážková, lesklá, hedvábná syntetická tkanina lakovaná olejo-pryskyřičným lakem, lepicí pásy na bázi papíru, akrylátu v kombinaci s papírem, PET fólií a kaučukem, lakovaná polyesterová tkanina nebo páska, tvrzená bavlněná tkanina s fenolickou pryskyřicí [1].

Tepelná třída 120 (E)

Do této tepelné třídy zařazujeme organické materiály tvrzený nebo celulózový papír, tvrzená tkanina, buničina v kombinaci s impregnanty jako jsou fenolická či fenolformaldehydová pryskyřice. Dále pak lisovaný fenol-melanový laminát. Kromě toho také kombinace PET fólie a elektrotechnické lepenky [1].

Tepelná třída 130 (B)

V této třídě se převážně používají anorganické materiály skleněná vlákna, sulfátový papír v kombinaci s ideálními pojivy na bázi epoxidů a fenolických pryskyřic, skleněný laminát s epoxidovým pojivem, lepicí pásy na bázi PET-kaučuk a PET-akrylát, materiál z polyesterové pryskyřice a skleněné rohože, polyesterové a PETP fólie, kombinace sulfátového papíru a PET [1].

Tepelná třída 155 (F)

Materiály této třídy představují empiricky vhodné materiály, jako jsou skleněná vlákna, slídový papír, aramidový papír, PEN, PET fólie, epoxidové a novolakové pryskyřice. Tyto materiály představují vhodné složky pro následný kompozitní materiál používaný pro tuto tepelnou třídu. Těmi jsou například kompozity na bázi skleněné tkaniny, PEN, PET fólie, rekonstruované slídy a pojiva polyesterové či epoxidové pryskyřice. Dále pak polyetylentereftalátové hedvábí, izolace na bázi kombinací aramidového papíru Nomex® a PET fólie, nízkoviskózní epoxidová pryskyřice na bázi bifenolu pro impregnaci, izolant na bázi slídového papíru, skleněných vláken a Nomexu® [1].

Tepelná třída 180 (H)

Pro izolační systémy a materiály této tepelné třídy se využívá silikonová a modifikovaná epoxidová pryskyřice jako pojivo. Další izolanty jsou polyestery, polyimidy, aramidy, slídový papír, slída.

Kompozitní materiály např. na bázi aramidového papíru Nomex® a polyesterové fólie, systém na bázi kalcinovaného slídového papíru, epoxidové pryskyřice a polyamidové fólie, kompozit složený ze skleněné tkaniny, slídového papíru a pružného silikonového elastomeru. Dále pak kompozitní materiál na bázi Nomexu®, slídového papíru a skleněných vláken, lepicí pásy na bázi Kaptonu® a silikonu, či kalandrovaný papír Nomex® s modifikovanou pryskyřicí [1].

Tepelná třída 200 (N)

Do této tepelné třídy řadíme materiály sklo, náhrady azbestu, aramidové papíry, převážně se silikonovými pojivy. Silikonovou pružnou zalévací hmotu zamezující tlaku, vibracím a jinému namáhání. V neposlední řadě impregnační laky na bázi polyesteralkydů [1].

Tepelná třída 220 (R)

V této tepelné třídě se používají skleněná vlákna, náhrady azbestu, aramidové papíry, silikonová pojiva, aromatický polyamid, impregnační lak na bázi polyesteralkydů. Dále např. tkaná skleněná dutinka se silikonovou izolací, nebo izolant na bázi aramidového papíru a silikonové pryskyřice [1].

Tepelná třída 250 (-)

Do této třídy řadíme aramidy (Nomex®), PTFE polytetrafluoretylen, polyimidy (Kapton®), polyamidové fólie. Také se zde využívají materiály tepelné třídy 220 s novými pojivy, jako jsou například slídový papír se silikonovým pojivem nebo slída se silikonovým pojivem [1].

Materiály mimo tepelnou třídu

Jsou to materiály pro speciální použití s vyšší tepelnou odolností, než udává norma tepelné třídy, popř. materiály, které mají hodnotu tepelné odolnosti nacházející se mezi hodnotami jednotlivých tepelných tříd.

Do této kategorie vysokoteplotních materiálů řadíme širokou škálu keramických izolantů, jako jsou oxidové, bezoxidové, silikátové, bezsilikátové. Dále pak fólie z kombinace skla a hliníku, krom toho také polyimidy [1].

3.3 Současné používané materiály**Skla**

Jedná se o nejvýznamnější anorganická amorfní dielektrika, využívají se ve formě vláken nebo tkaniny. Jsou to látky, které jsou silně polární, hodnota jejich relativní permitivity se pohybuje mezi 3 až 16 F/m, v některých případech i vyšší, a to v důsledku převážně iontové relaxační polarizace. Elektrická pevnost čistého skla dosahuje až 500 kV/mm, ale v praxi používané sklo má hodnotu zhruba o řád nižší. Struktura je tvořena ionty, kyslíkokřemíkovými tetraedry, popř. trojúhelníky boritého skla. Pro výrobu skelných vláken využívaných v kompozitech se používá hlinitoborokřemičité sklo [29].

Slída

Přírodní krystalický minerál vyskytující se v mnoha modifikacích. V elektroizolační aplikaci se nejčastěji používá slída draselná (muskovit) a slída hořečnatá (flogopit). Mají výborné elektroizolační vlastnosti, které se ale liší v kolmém směru krystalu a ve směru roviny. Jinak jsou její vlastnosti prakticky neměnné až do její kalcinační teploty, při které ztrácí ve své struktuře vázanou vodu, je tedy závislá na obsahu vody, např. její elektrická pevnost. Výrobky ze slídy dělíme na mikanity, jejichž podstatou jsou původní nezměněné slídové lístky. A materiály z rekonstruované slídy, které představují převážnou část výroby slídových izolantů. Slída je mechanicky nebo chemicky zpracována do remiky (jemné částičky slídy) a dále zpracována na papírenských strojích. Rekonstruovanou slídu není možné použít jako samostatný izolant, ale používá se jako složka kompozitního materiálu [1, 29].

Keramika

Semikrystalické materiály na bázi minerálů. Hlavní složkou jsou oxid hlinitý, oxid křemičitý a voda. Vykazují vysokou odolnost proti prudkým změnám teploty a odolnost vůči vysokým teplotám, proto se aplikují pro vyšší tepelné třídy. Odolnost vůči vlhkosti, chemickým vlivům a ionizujícímu záření. Jsou žáruvzdorné a prakticky nestárnou díky stabilitě jejich chemických a fyzikálních vlastností. Avšak vykazují vysokou křehkost, velkou smrštivost při technologickém procesu a je nutné je ošetřit glazurou. Pro výrobu keramik představuje práškový materiál výchozí surovinu. Výsledné materiály dělíme do následujících skupin: keramiky oxidové, keramiky bezoxidové, keramiky silikátové, keramiky bezsilikátové, porcelán, stealit, steatit, kamenina, korundová keramika a ultraporcelán [1, 29, 12].

Přírodní materiály a pryskyřice.

Jedná se o makromolekulární pevné přírodní izolanty, které mohou být původu rostlinného (bavlna, dřevo, jantar, kalafuna, kaučuk) nebo živočišného (hedvábí, šelak) [29].

Přírodní pryskyřice se objevují ve smolnatých rostlinách nebo vznikají biologickými pochody živočišných přírodních organizmů. Nejvýznamnější jsou šelak, který se používá jako pojivo pro mikafólie a mikatiny, nebo jako přísada do elektroizolačních laků. Dále kalafuna používaná pro přípravu kabelových impregnantů, tavidlo při pájení nebo surovina při výrobě elektroizolačních laků, získává se ze smol jehličnatých stromů. Kopály se aplikují jako přídatná složka k olejovým lakům, vyskytují se jako fosilní nebo čerstvé pryskyřice

z jehličnatých stromů. V neposlední řadě jantar, které má výborné elektroizolační vlastnosti a používá se k izolování přívodů velmi citlivých měřicích přístrojů. Jantar je netvrší fosilní pryskyřice, nejčastěji se vyskytuje na březích Baltického moře, kam je vyplaven, ale těží se jako hornina [29].

Dalším velké zastoupení ve využití přírodních izolantů jsou vláknité izolační materiály. Základní surovinou pro vláknité izolanty je celulóza neboli rostlinné organické vlákno. Téměř čistá celulóza je fundamentem bavlněného vlákna, používá se v textilních izolantech a jako složka do izolačních laků. Ale především je hlavní složkou bučiny, která představuje základní surovinu pro výrobu elektrotechnického papíru, nejčastěji ze sulfátového papíru. Dále se z přírodních materiálů vyrábějí lepenky, které rozlišujeme dle použití na lesklou, obyčejnou, drážkovou a transformátorovou. Posledním významným přírodním představitelem jsou pryže, jejíž základní složkou je přírodní kaučuk [29].

Plasty

jedná se o syntetické makromolekulární polymery. Nejčastějšími chemickými reakcemi pro vznik makromolekul jsou polykondenzace, polyadice a polymerace, můžeme je tedy dělit dle druhu polyreakcí či fyzikálně-mechanických vlastností na termoplasty, reaktoplasty a elastomery. V elektrotechnice jsou široce uplatňovány, protože splňují dielektrické a konstrukční požadavky, většina plastů se totiž chová jako izolanty, jsou levné a dobře zpracovatelné. Nejdůležitější technologií pro zpracování plastů je s využitím zvýšeného tlaku a teploty, vzhledem k jejich struktuře a schopnosti tvarování bez jejich poškození. Mezi hlavní technologie, které používají zvýšenou teplotu a tlak, patří vstřikování, přímé lisování, přetlačování, vytlačování, vyfukování, odstředivé lití a válcování. Plasty se dají zpracovávat bez použití tlaku, mezi takové technologie řadíme odlévání, povlakování, obrábění a spojování [29].

Mezi nejběžnější plasty připravené polymerací patří polyetylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyvinylchlor (PVC), polymethylmetakrylát [PMMA] a polytetrafluoretylen (PTFE) [29].

Plasty připravené polykondenzací jsou polyamidy (PA), polykarbonáty (PC), polyimidy (PI), fenoplasty (PF, CF), aminoplasty (UF, MF), polyestery (SP, UP), polyester polyethylentereftalát (PET), polyuretany (PUR), epoxidy (EP), silikony (SI), silikonové oleje, tmely, prykyřice a kaučuky [29].

Dále pak vrstvené materiály, nazývané též lamináty. Jsou to kompozity vyráběné s různě modifikovanými vlastnostmi podle konkrétní aplikace. Jsou charakteristické výbornými mechanickými vlastnostmi. K výrobě těchto kompozitů se nejčastěji používají termoreaktivní pryskyřice, jako jsou epoxidové, polyesterové, fenolformaldehydové nebo močovinoformaldehydové. Ty bývají vyztužené vlákny či tkaninami na bázi papíru, uhlíku, skla a bavlny. Dále se používají organické supervlákna, jako jsou aromatické polyamidy-aramidy, ke ztužování materiálů [29].

Elastomery představují samostatnou skupinu materiálů z hlediska jejich mechanických vlastností. Jsou to látky, které lze působením malých sil protáhnout, aniž by došlo k přetržení. V okamžiku, kdy přestane působit deformační síla, se elastomer vrací více či méně do původního stavu. Prvním takovým materiálem byl přírodní kaučuk. Z důvodu poptávky po širší aplikaci a lepších vlastnostech, se začaly vyrábět syntetické kaučuky jako jsou polydieny, kam patří butadien-styrenový kaučuk (SBR), polybutadienové kaučuky (BR), butadien-akrylonitrilový kaučuk (NBR), polyisopren (IR) a butadien-styrenové termoplastické kaučuky. Dále polyolefiny, kam řadíme kopolymery etyleny s vinylacetátem (EVA), etylen-propylenové elastomery (EPM), chlorsulfonovaný polyetylen (CSM), polyisobutylem (PIB), butylkaučuk (IRR) a polychloropren (CR) [29].

Termoplastické elastomery spojují vlastnosti termoplastů a elastomerů. Tyto materiály mají při pokojové teplotě vlastnosti elastomeru, ale dají se zpracovávat jako termoplasty. Dělíme je do skupin, jako jsou blokové styrenové kopolymery, polyuretany, polyéterestery, polyéteramidy a směsi elastomerů a termoplastů [29].

Nomex® je tepelně odolný a nehořlavý syntetický materiál vyrobený společností DuPont z krátkých vláken a malých vláknitých částic aromatických polyamidů, známých jako aramidy. Díky jeho výborným elektrickým, mechanickým a tepelným vlastnostem, odolností proti chemikáliím a záření, představuje stále více používaný materiál v elektrotechnice. Elektroizolační uplatnění má především v transformátorech a točivých strojích. Je zpracováván běžnými papírenskými technologiemi, dá se dobře laminovat do vrstev o různých tloušťkách, velmi dobře ho lze i kombinovat s jinými materiály [1, 79].

Kapton® je tepelně odolný a nehořlavý syntetický polyimidový materiál vyrobený společností DuPont, který se dodává ve formě fólií. Má výborné elektrické, mechanické a tepelné vlastnosti, je odolný proti organickým rozpouštědlům, avšak je citlivý na poškození mechanickým poškrábáním, využívá se tedy v kombinaci s jinými materiály. Uplatňuje se v izolování vinutí k dosažení vyšší účinnosti a nižší hmotnosti. Pro stroje namáhané činností ČV se používá modifikace Kapton® CR [1, 79].

4 Nové perspektivní materiály

4.1 Nové technologie v elektromobilitě

Většina elektromobilů v současnosti pracuje na napěťové hladině 400 V. Mezi hlavní nevýhody elektromobilů patří pořizovací cena, krátká dojezdová vzdálenost na jedno nabití, nedostatečná nabíjecí infrastruktura a dlouhá doba nabíjení [26, 47, 53].

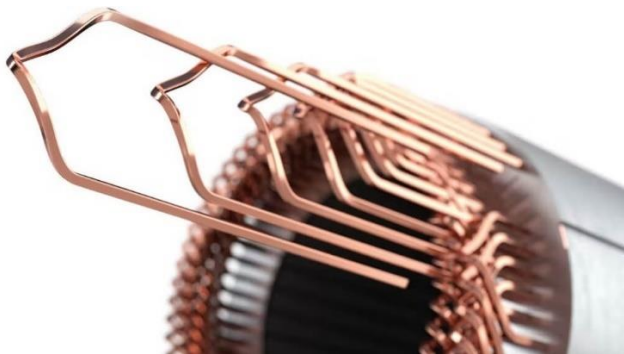
K tomu, aby nastal přelom a došlo k většímu prosazení elektromobilů a širšímu přijetí veřejností, čekají automobilový průmysl výzvy, které zahrnují nutnost zvýšení nabíjecí rychlosti, zvýšení výkonosti, snížení ztrát, snížení hmotnosti, zvýšení účinnosti a snížení pořizovacích nákladů [26, 47, 53].

Řešením se zdá být změna technologie a posunutí napěťové hladiny na 800 V. Díky přechodu na vyšší napěťovou hladinu jsme schopni nabíjet baterii nižším proudem, v důsledku toho během nabíjení nevzniká nežádoucí generování nadměrného tepla a nedochází tudíž k tepelným ztrátám. Lze tak využít maximální nabíjecí výkon, čímž dokážeme zkrátit dobu nabíjení baterií vozu až o polovinu, článek [53] dokonce popisuje zkrácení ze 40 na 15 minut, což už je výrazné přiblížení k času doplňování paliva konvenčních vozidel. Zachování větší energie během nabíjení lze využít ke zvýšení dojezdu. Nabíjení na nižší proudové hladině navíc může prodloužit životnost baterie [30, 34, 41, 49, 51, 53].

Transformace na nižší hladinu proudu umožňuje použít ve vinutí motoru vodiče s menším průřezem, díky čemu jsme schopní dosáhnout lepšího činitele plnění a to vede k vyšší účinnosti motoru. Vyšší hodnoty činitele plnění dosáhneme použitím vodičů s obdélníkovým průřezem oproti vodičům s kulatým průřezem. Proto pro konstruktéry elektrických strojů atraktivní a trendem ve vývoji technologie vinutí Hairpin. Jedná se o inovativní technologii způsobu vinutí motoru pomocí tvarovaných vodičů s obdélníkovým průřezem, které se usadí do drážek statoru. Použití této technologie přináší řadu výhod, jako jsou vysoký činitel plnění, zmenšení rozměrů a hmotnosti motoru a s tím spojené snížené ztráty v mědi, dosažení vyšší hustoty výkonu, účinnosti a točivého momentu motoru [26, 30, 45, 53, 54, 59].

Hlavním omezujícím faktorem pro zvýšení hustoty výkonu motoru je tepelná vodivost jeho vinutí, pokud se podaří zvýšit tepelnou vodivost vinutí, zlepší se chlazení motoru a můžeme dosáhnout vyšší hustoty výkonu. Abychom toho docílili je kladen požadavek na co největší činitel plnění. Čím lepší je činitel plnění, tím je lepší i tepelná

vodivost, protože měď má lepší tepelnou vodivost ve srovnání s epoxidem nebo vzduchem neboli než izolace mezi závity vinutí. Jak je popsáno v předchozím odstavci, díky vyššímu činiteli plnění lze minimalizovat ztráty v mědi, a tím i vznik tepla v motoru. V důsledku toho se očekává výrazné zvýšení hustoty trvalého výkonu motoru [56]. Činitel plnění je tedy nejcitlivější parametr pro odvod tepla [47]. To klade nároky na tenčí tloušťku stěny izolace [26]. Avšak hrozí že příliš tenká izolace by nemusela zvládnout působení intenzity elektrického pole, a mohlo by dojít k průrazu [53]. Elektrický průraz je nejčastějším projevem selhání dielektrika při zvýšených teplotách. Elektrická pevnost se při zvýšených teplotách rychle snižuje [1, 57]. Se zvýšenou tloušťkou izolace, která vydrží vyšší napětí, se musí snížit činitel plnění. To snižuje hustotu výkonu a účinnost motoru, je tedy nutné najít nějaký optimální kompromis [28].



Obr. 3 Technologie vinutí Hairpin (převzato z [91])

Přechod do vyšší napěťové hladiny podporuje i vývoj nových vysokonapěťových měničů na bázi karbidu křemíku SiC a nitridu galia GaN. Technologie měničů na napěťové hladině 400 V používala výkonové polovodiče IGBT, které spínaly se strmostí okolo 20 kV/ μ s. Nové měniče dokážou spínat se strmostí až 50 kV/ μ s a s rychlejší spínací frekvencí. Také poskytují možnost nižší hmotnosti, vyšší škálovatelnost, účinnost a hustotu výkonu [37, 39, 48, 53, 54].

Velký potenciál pro elektromobilitu představuje motor s axiálním tokem a technologie eAxle. Motor s axiálním tokem je zcela odlišný od konvenčního motoru s radiálním tokem válcovitého tvaru s rotorem umístěným uvnitř statoru. Tento motor má uspořádání statoru a rotoru ve tvaru disku, které jsou umístěné vedle sebe, existují různé modifikace a lze je uspořádat dle požadavků, například dva rotory a jeden stator. Díky této konstrukci je schopen ušetřit až 2/3 statorového železa, o 41 % mědi ve statoru méně a o 20 % magnetického materiálu v rotoru, ve výsledku tedy tvoří polovinu objemového prostoru oproti radiálnímu motoru při stejném výkonu. Tyto konstrukční výhody prodlouží dojezd o 7 % v případě jednoho motoru, o 20 % pokud jsou použity motory dva. Technologie

eAxle představuje integrovaný pohonový systém pro elektromobilitu. Tento systém kombinuje elektrický motor, převodovku a elektroniku do jednoho kompaktního a efektivního celku, který je umístěn na nápravě. Hlavní výhody této technologie představuje snížení použitých materiálů, ztrát, velikosti a dobrá účinnost motoru. Pravděpodobná budoucnost v konstrukci elektrických strojů představuje skloubení radiálního a axiálního motoru do jednoho funkčního stroje pro dosažení většího točivého momentu a dvojnásobného výkonu při stejné hmotnosti [27, 34, 57, 60].

Podle mnoha predikcí budou v budoucnu 800 V systémy dominovat trhu s elektrickými vozy. Právě přechodem na 800 V technologii lze dosáhnout kompaktnějšího vozu, který má zkrácenou dobu nabíjení, snížení objemu a hmotnosti, což vede k prodloužení dojezdu. Použitý motor má nižší energetické ztráty, lepší účinnost, točivý moment a vyšší hustotu výkonu. Výše zmíněné inovace umožní odlehčení vozu, následkem toho dosáhneme prodloužení dojezdové vzdálenosti. Celkově se díky snížení hmotnosti, lepšímu managementu energie a vyšší výkonosti motoru dosáhne lepší efektivity ujeté vzdálenosti na jednu kWh [40, 44, 49, 51, 53]. Podle ředitele pro E-mobilitu v Porsche [51], jsou nižší hmotnost, vyšší účinnost, a hlavně rychlejší nabíjení hlavními výhodami 800 V systémů, Porsche byla první automobilka, která uvedla na trh sériově vyráběný 800 V elektromobil. Naopak podle technologického ředitele automobilky Lucid Air [40], která je v současnosti jedinou automobilkou sériově vyrábějící vozidlo s 900 V architekturou, představuje tu největší výhodu přechodu na vyšší napětí vyšší účinnost měničů a elektroniky, která řídí motor. Zmíněné redukce použitých materiálů vedou k optimalizaci nákladů, nižší ceně a tím se by se mohly stát elektromobily dostupnější [46, 53].



Obr. 4 Axiální motor (převzato z [92])

4.2 Požadavky na materiál

Izolační systém běžných motorů je tvořen převážně z izolace vinutí a izolačního papíru v drážkách, tento systém ale zvětšuje velikost motoru a snižuje možnost redukce jeho hmotnosti. Použití nových polymerních materiálů pro VN systémy umožňuje snížit velikost izolace a zvýšit výkon motoru [35]. Selhání izolačního systému představuje až 70 % poruch točivých strojů, spolehlivost stroje bude tedy kriticky záviset na spolehlivosti izolace [53, 55, 66].

Model izolačního systému pro 800 V zůstává v principu stejný jako pro NN točivé stroje, skládajícího se z izolace vinutí, izolace drážek a impregnace [54]. Nicméně materiály použité v tomto systému musí splnit náročnější požadavky, dochází ke změnám v časové rychlosti náběhu pulzu a zvýšenou hladinou napětí, působí především na místech mezi vodiči v různých fázích, mezi vodičem a zemí, mezi sousedními závity a v oblasti polovodivé ochrany na výstupu z drážky. Tyto změny jsou považovány za hlavní zdroj elektrotepelného namáhání izolačních systémů [53, 63]. Vyšší požadavky vycházejí v podstatě z klasických požadavků na izolant, což znamená vysoký izolační odpor, vysoká elektrická pevnost, nízká relativní permitivita za účelem snížení dielektrických ztrát. Měl by mít dobré mechanické vlastnosti, jako je tuhost, pevnost, tažnost, být dobře zpracovatelný během výroby a poskytovat dobrou odolnost proti oděru. Chemicky odolný, včetně reakcí na dielektrické a chladicí kapaliny, malou pohltivost vody. Pro tuto aplikaci by měl mít vysokou hodnotu zapalovacího napětí částečných výbojů PDIV, vysokou tepelnou odolnost za stabilního provozu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ a dobrou tepelnou vodivost. V dnešní době s ohledem na celý životní cyklus by měl být materiál recyklovatelný v souladu s REACH a neobsahovat rozpouštědla [34, 38, 42].

S přechodem na 800 V vzroste intenzita elektrického pole, vysoká intenzita elektrického pole je považována za hlavní zdroj vzniku částečných výbojů [53]. Ty se začínají objevovat v prostředí, ve kterém je hladina napětí 650 V a vyšší [35]. Když je na vinutí statoru přivedeno velmi strmé pulzní napětí, může dojít k nerovnoměrnému rozložení napětí ve vinutí. V důsledku toho je na prvním závitu vinutí větší napětí, čímž by mohlo dojít k překročení zapalovacího napětí částečného výboje PDIV [62]. Je tedy nutné, aby vybrané materiály splňovaly požadavky normy ČSN EN 60034-18-42 [63], na elektroizolační systémy odolné proti částečným výbojům, neboli typ II. Jak bylo popsáno v přechozí části této práce, právě činnost částečných výbojů představuje jeden z majoritních faktorů degradace izolace, které vedou k předčasnému selhání izolace. Působení částečných výbojů

je extrémně škodlivé pro organické izolace, oproti anorganickým izolacím, které mají schopnost odolávat částečným výbojům [32, 64]. Výskyt částečných výbojů v této aplikaci můžeme omezit použitím topologie víceúrovňových měničů, které sníží elektrické namáhání a nedochází k tak rychlému stárnutí [53]. Popř. lze výskyt minimalizovat pomocí softwaru pro řízení pohonu [63].

Dakin a spol. definovali empirickou rovnicí popisující vztah mezi zapalovacím napětím částečných výbojů, relativní permitivitou materiálu a tloušťkou izolace [65]:

$$PDIV = 163 \cdot \left(\frac{t}{\varepsilon}\right)^{0,46}, \quad (4.1)$$

kde $PDIV$ je hodnota zapalovacího napětí částečných výbojů,

t je tloušťka izolace v mm,

ε je relativní permitivita materiálu.

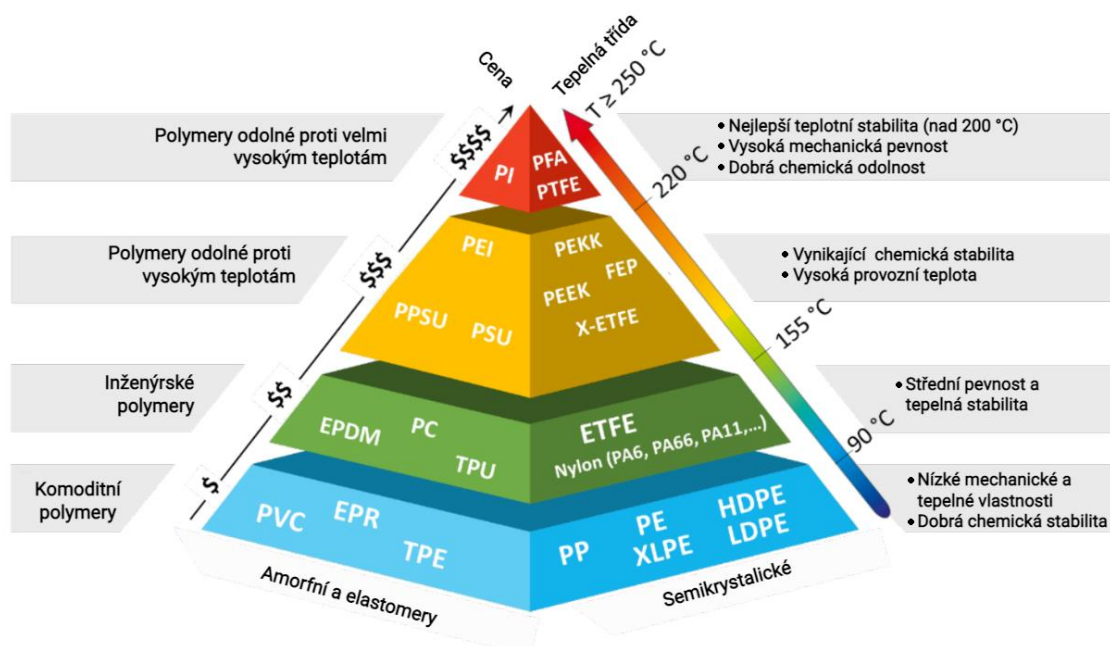
Tato rovnice může pomoci při navrhování tloušťky izolace, aby nedošlo ke vzniku částečných výbojů. Na druhou stranu nebere v úvahu okolní podmínky, jako je teplo. Permitivita materiálů se totiž mění v bodě skelného přechodu anebo při vyšších teplotách. Například u polymerů PEEK, PEI a PAI s rostoucí teplotou roste i permitivita a klesá PDIV [35, 61, 62]. Publikace [61] včetně Dakinova modelu představuje dalších sedm modelů pro predikci PDIV zohledňující okolní podmínky, které srovnává a vyhodnocuje na základě provedeného experimentu. K predikci PDIV lze využít také software AIRLIFT, který predikuje pro danou geometrii na základě rozložení elektrického pole vypočítaného pomocí metody konečných prvků [62].

Vzhledem k vyžadovaným požadavkům a faktu, že tloušťka izolačních materiálů používaných v elektromobilitě je ve srovnání s izolačními systémy VN malá, zdá se být použití polymerních materiálů vhodnou volbou jako izolant pro tyto aplikace. Polymery totiž mají jedinečnou kombinaci vlastností, které jsou schopny poskytnout řešení pro budoucí elektrickou architekturu. Ovšem žádný typ polymeru nemůže nabídnout všechny optimální vlastnosti, které by vedly ke zlepšení výkonu motoru [42, 43, 47, 53].

Volbu izolačních materiálů, které budou použity v izolačním systému je důležité zvážit, aby byla dosažena vzájemná kompatibilita materiálů a jejich vlastností, zajišťující tak spolehlivou funkčnost motoru [32, 36].

4.3 Izolace vinutí

Na základě požadovaných vlastností a nároků na izolant, které jsou popsané v předchozí kapitole, se jako vhodný kandidátský materiál pro tuto aplikaci jeví vysokoteplotní polymery, viz. Obr. 3. Právě protože vysokoteplotní izolace vinutí představuje klíčovou technologii pro provoz při vyšších teplotách [66].



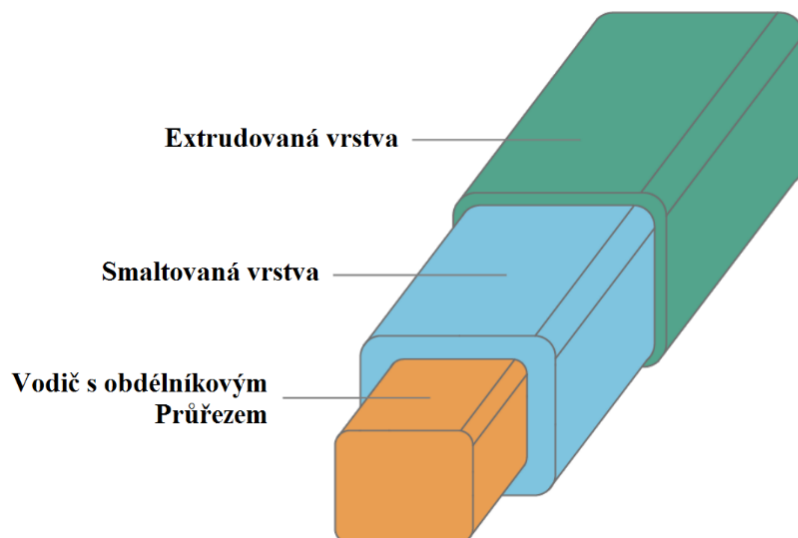
Obr. 5 Delaminace ztvrdlé a zkřehlé izolace vodiče po tepelném namáhání (převzato z [55])

Nejpoužívanějšími materiály v této aplikaci jsou tedy polymery PI, PAI, PEI, PEI (ether) PTFE, FPE, PFA, PEEK, PEKK, PAEK, PSU, PPS, TPI, FEP a ETFE [30, 33, 34, 55, 57, 69, 70, 71].

První generace 400 V motorů používala pro izolaci vodičů isokyanát polyamidimidu (ICN PAI) [48]. V prvních vodičích pro vinutí 800 V systémů se používaly polyesterimidy (PEI) a polyamidimidy (PAI), PEI mají nízkou permitivitu a vysokou PDIV, PAI má sice horší permitivitu, ale lepší tepelnou odolnost. Poté se vývojovým procesem přešlo na aplikování polyimidové folie, ty mají nízkou permitivitu a vysokou tepelnou odolnost a odolnost proti degradaci během zpracování vodiče. Polyimid má výborné vlastnosti, ale je velmi drahý, což představuje překážku pro komercializaci výroby, použitím vodiče s obdélníkovým průřezem se ale podařilo snížit cenu. Polyamid má oproti polyesterimidu menší permitivitu a oproti polyamidimidu lepší tepelnou odolnost [26].

Nejběžnější technologie pro izolování vodičů se provádí pomocí tenkovrstvých filmů, smaltováním a extruzí. Výše vybranými polymery se vytvoří vrstva či více vrstev do požadované tloušťky izolace. Vytváření vrstev je prováděno použitím jednoho polymeru,

nebo kombinací více polymerů s odlišnými vlastnostmi, [35, 36, 54, 64, 67, 70]. Například v [62, 68, 70, 74, 75, 76] je koncept, ve kterém je nejdříve vytvořena vrstva PEI na žíle a poté je nanášena další vrstva z PAI. V publikacích [35, 36, 72, 73] je popsán model izolačního systému vodičů pro vinutí, ve kterém je vytvořena první vrstva smaltováním a poté svrchní vrstva extruzí.



Obr. 6 Model izolace vinutí pro elektromobilitu (převzato z [36])

Co se týče technologie výroby, vlastností materiálů a energetické efektivity, extrudované vinutí má mnohonásobně větší odolnost proti průraznému napětí než smaltované vinutí. Izolování extruzí předčí konvenční smaltování i z hlediska rychlosti výroby. Vhodné polymery pro extruzi jsou PEEK, PAEK, PSU, PPSU, PPS, TPI [30, 48, 67]. Oproti tomu tyto polymery včetně PFA nejsou vhodné pro konvenční technologie smaltování [33].

Nejperspektivnějšími materiály pro izolaci vinutí v sériové výrobě se zdají být polymery na bázi polyimidu (PI) a Polyetheretherketone (PEEK). Použití polymerů na bázi PI aktuálně zůstává nejoblíbenější na trhu. PI má lepší tepelnou odolnost oproti PEEK, na druhou stranu PEEK má vyšší tepelnou vodivost. Vývojovým trendem se zdá být modifikace a vývoj PI, avšak i PEEK díky jeho univerzálním vlastnostem. V důsledku existence etherových vazeb má výborné mechanické vlastnosti a je vysoce odolný, což z něj dělá velmi atraktivní materiál v oblasti dielektrik, ale i např. konstrukce [26, 33, 38, 43, 57, 67].

4.4 Izolace drážek

Nejpoužívanějšími materiály pro izolování drážek jsou konvenční materiály na bázi PI a aramidového papíru, tedy Nomex®, Kapton® a lamináty vytvořené z těchto materiálů. Protože se jedná o II. typ izolantu, doporučuje se volit vnější vrstvu laminátu odolnou proti koróně a povrchovým výbojům, např. Nomex® řady 800 nebo Kapton® CRC [1, 54, 63, 64, 75, 79].

Velmi perspektivním materiálem pro drážkové izolace představují izolanty opět na bázi polymeru PEEK. Tyto izolanty lze vyrobit při výrazně tenčí tloušťce, řádově od 50 μm . Oproti konvenčním materiálům nebo laminátům [38, 48, 77]. Jak bylo již několikrát zmíněno, snížením tloušťky izolace vinutí a drážek pomocí nových drážkových materiálů a vinutí jsme schopni dosáhnout hodnoty činitele plnění 70 až 75 %, a tím zásadně ovlivnit účinnost motoru [64, 48]. Další výhodou jsou dielektrické a tepelné vlastnosti. V porovnání s jinými drážkovými materiály vykazuje PEEK až sedmkrát větší odolnost proti výbojové činnosti, více než dvojnásobnou elektrickou pevnost a vyšší tepelnou vodivost, což umožňuje snížení teploty o 3 až 13 $^{\circ}\text{C}$ [48, 70].

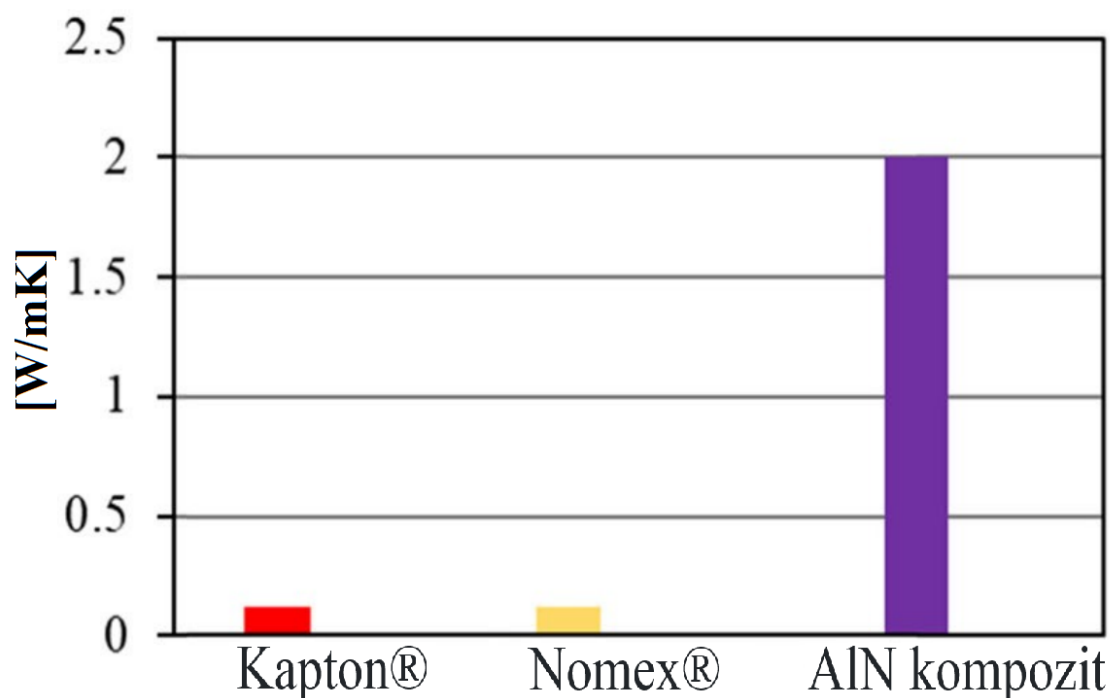
Tabulka 2 Porovnání materiálů drážkových izolací (převzato z [70])

Materiál	Tloušťka [mm]	Tepelná vodivost [W/mK]	Elektrická pevnost [kV/mm]
PEEK APTIV™ film	0,025 - 0.25	0.32 - 1.30	70 - 270
CeQuin I (3M)	0.25	0.195	27
ThermaVolt (3M)	0.25	0.23	36
Nomex® 410	0.25	0.139	33

Společnost SYENSQO produkuje i drážkovou izolaci na bázi polymeru LCP. Materiál Xydar® LCP kombinuje vysokou tekutost potřebnou k plnění dlouhých a tenkých dílů s nulovou deformací a dielektrickými vlastnostmi. Je tedy vhodný k vytvoření tenkého izolantu nebo zaplnění mezer pomocí vstříkovaní. Hodí jako cenově výhodná alternativa s vyšší dielektrickou pevností při zvýšených teplotách, tepelnou odolností až do 240 $^{\circ}\text{C}$ a lepší tepelnou vodivostí než běžné vícevrstvé fólie. Společnost produkuje termoplast s dlouhými vlákny Xencor™ LFT, který je na bázi speciální polymerů, jako jsou PPS, PPA a PARA, který je vhodný vhodnou pro výrobu drážkových klínů [42, 49]

Článek [78] popisuje vytvoření keramického kompozitu AlN, polymeru s nitridem hliníku. Jako alternativu drážkové izolace ke konvenčním materiálům a PEEK materiálům. Pomocí elektroforetického nanášení dojde k vytvoření elektroizolačního povlaku keramického kompozitu AlN. Vytvořený povlak kompozitu AlN má průměrnou tloušťku

100 μm a vykazuje výrazně vyšší tepelnou vodivost a stabilitu než konvenční drážkové materiály. Pomocí elektroforetického nanášení lze kompozit AlN nanést přímo na magnetické jádro jako drážkovou izolaci a na měděné vodiče jako izolaci vinutí. V porovnání s drážkovou izolací Nomex® vykazuje deseti až dvacetinásobnou vyšší tepelnou vodivost, dosahující až 2.0 W/mK, tepelný index 300 °C, o polovinu vyšší elektrickou a poloviční tloušťku [70, 78].



Obr. 7 Porovnání tepelné vodivosti tradičních materiálů a teplovodivého kompozitu (převzato z [70])

4.5 Impregnace

Používanými materiály jsou pryskyřice na bázi epoxidu, silikonu, polyamidimidu, polyamidu a polyesterimidu, nejpoužívanějšími jsou pak epoxidové a silikonové pryskyřice, protože je pro materiál vyžadována vyšší tepelná třída [31, 47, 54, 70]. Silikony jsou obecně materiály s nízkou teplotou skelného přechodu a dobrou tepelnou stabilitou i při vyšších teplotách, než je 200 °C. Silikony jsou také považovány za materiály poměrně dobře odolné proti vlhkosti, ale mohou vykazovat mírně nižší odolnost, pokud jsou vystaveny organickým chemikáliím. Kromě toho mají dobré elektroizolační vlastnosti a dobře se zpracovávají, avšak přilnavost silikonů je obvykle nízká. Tento parametr je považován za důležitý, pokud je pryskyřice použita např. jako zalévací materiál [54, 70]. Oproti tomu epoxidové pryskyřice, na základě publikace [70] hodnotící studie, které srovnávali impregnační materiály pro aplikace ve vyšší tepelné třídě, jsou nejlepší z hlediska chemické odolnosti,

tuhosti, pevnosti. Navíc mají lepší přilnavost než silikonové pryskyřice. Teplota skelného přechodu epoxidů je v rozmezí od pokojové teploty až do teplot nad 200 °C [54].

Vlastnosti materiálu pro impregnaci jsou důležitá výběrová kritéria pro výrobní proces, technologii a aplikaci stroje. Např. epoxidovou pryskyřici se doporučuje zvolit takovou, která má teplotu skelného přechodu nad provozní teplotou vinutí a koeficientem teplotní roztažnosti, která je blízká konstrukčním materiálům elektrického stroje, jako jsou ocelové plechy nebo meď vodičů vinutí. Zvolený impregnační materiál musí mít dobrou přilnavost, sladěné tepelné a mechanické vlastnosti s ostatními izolačními prvky, především pak s izolací vinutí, aby se docílilo maximální izolační kompatibility [36, 50, 54]. Impregnační technika máčení se nedoporučuje používat pro vysokonapěťové aplikace elektromobility, protože impregnant může často v některých částech chybět, především uvnitř statorových drážek. Z důvodů vyššího elektrického namáhání a možnému výskytu ČV, musí být izolace mezi jednotlivými závity vinutí dostatečně zajištěná [62, 64].

Vzhledem k problematice činnosti částečných výbojů a degradačním účinkům na organické izolace, je nutné aby se impregnační materiály neustále vyvíjely a modifikovaly, např. přidáním anorganických plniv, aby byly impregnanty schopny lépe odolávat účinkům těchto výbojů [31, 32].

Anorganická plniva zvyšují i tepelnou vodivost. Z důvodu trendu zmenšování velikosti motoru, zvyšujícímu výkonu a rostoucí hustotě výkonu dochází k zapouzdření motorů pryskyřicí. Aplikace v elektromotorech zahrnují tři typy zapouzdření: zalití statoru, zalití závity vinutí vystupující z drážky a zalití rotoru. Zalévání je možná nejoblíbenější impregnační proces pravděpodobně proto, že dosahuje lepšího přenosu tepla. Pro zalévání je optimální pryskyřice s vysokým obsahem plniv a odpovídající vysokou tepelnou vodivostí. Cílem je tedy zabránit ponechání jakýchkoli vzduchových mezer nebo bublin ve vinutí, aby bylo dosaženo co nejlepšího odvodu tepla. Zapouzdření navíc pomůže snížit vibrace, hluk, zvýší odolnosti proti tepelným šokům, chemikáliím, vlhkosti a chrání před nečistotami. Zalévací materiály mohou mít obvykle vysokou tepelnou vodivost až 3,5 W/mK. Vyšší tepelné vodivosti lze dosáhnout nanoprášky nebo mikroprášky na bázi kovů. Měly by však být nadimenzovány tak, aby si výsledný izolační materiál udržel dostatečné dielektrické vlastnosti [47, 50, 52, 70]. Článek [60] popisuje, že díky zalití vinutí na výstupu z drážky materiálem na bázi silikonu se jim podařilo zlepšit axiální tepelný tok o 5,6 %, což následně snížilo teplotu vinutí o 10,5 % při tepelných zkouškách stejnosměrného proudu v klidovém stavu.

4.6 Vylepšení vlastností materiálů

Pro zlepšení elektrických, tepelných a mechanických vlastností těchto izolačních materiálů byly provedeny rozsáhlé výzkumné práce v oblasti objemových modifikací, jako je přimíchávání nano/mikročásteček do základní polymerní matrice, a povrchových modifikací, jako je plazmová úprava, fluorace, magnetronové naprašování a implantace iontovým paprskem [55, 99].

Společnosti Phelps Dodge Industries a General Electric zveřejnily patenty, v nichž uvádějí, že přidáním kovových nebo nekovových oxidových nanočástic, jako jsou TiO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , ZnO atd. do polymerů, jako jsou polyimidy, polyamidy, nylony, epoxidové pryskyřice atd. může výrazně zlepšit schopnost odolávat výbojovému stárnutí při namáhání pulzním přepětí PWM [55].

V roce 1988 Johnson a spol. zjistili, že přidáním nanočástic oxidu křemičitého nebo oxidu hlinitého do polymeru může výrazně zlepšit odolnost polymerní matrice proti stárnutí korónou. Přibližně o 10 let později vyvinula společnost DuPont společně s firmami ABB a Siemens polyimidové fólie odolné proti koróně s odolností 500krát vyšší než u původního polyimidu. Tato fólie má sendvičovou strukturu, prostřední vrstvu tvoří polyimid, horní a spodní vrstvu kompozity polyimidu s vytvořeným povlakem na bázi oxidu hlinitého o tloušťce 50-500 nm obsahující 10-30 % nanočástic oxidu hlinitého [55]. Článek [96] kromě zmíněných přísad oxidu křemičitého nebo oxidu hlinitého, také zmiňuje oxid titaničitý, hydroxid horečnatý a oxid zinečnatý, které také zvyšují odolnost polymeru PI proti působení částečných výbojů. Vytvořením vícevrstvého laminátu či kompozitu s polovodivou vrstvou představuje jednu z možností ke zvýšení odolnosti proti ČV [97]. Vytvořením laminátu s anorganickou vrstvou lze vylepšit i jiné vlastnosti. Autoři článku [83] dosáhli zvýšení elektrické pevnosti vytvořením třívrstvého laminátu kompozitního filmu polyetherimidu s filmy na bázi nitridu boru, také se sendvičovou strukturou.

Článek [80] popisuje vytvoření tenkovrstvého povlaku na smaltovaných vodičích. Povlak byl by vytvořen na bázi polyimidu a oxidu křemičitého. Po tepelném zatížení vykazoval smaltovaný vodič vyšší průrazné napětí než vodič bez této úpravy. Zlepšení elektrické pevnosti pomocí oxidu křemičitého potvrzuje i publikace [81], ve které přímou konstrukcí materiálové matice na nanostruktury vytvořili kompozit izolačního papíru na bázi keramických vláken a porézního oxidu křemičitého.

Autoři článku [94] popisují, že pomocí denaturace chemické struktury se jim podařilo snížit permitivitu izolovaného vodiče pro vinutí na bázi PI o 3 desetiny na hodnotu 2,7, oproti původní hodnotě 3,0. Permitivitu polyimidu se jim podařilo snížit také vytvořením mikrobuněčného povlaku na tenkovrstvé fólie polyimidu. Tato úprava snížila hodnotu permitivity na 2,2 při 30 % množství mikrobuněk a 1,7 při 50 %. Touto úpravou se jim navíc podařilo zvýšit elektrickou pevnost téměř dvojnásobně, hodnotu PDIV posunout o 220 V při stejné tloušťce, pro stejnou hodnotu PDIV to umožňuje snížit tloušťku izolace o 30 % oproti neupravené PI izolaci.

Podobné výsledky jsou popsány i v článku [93], kde autoři vytvořili mikrobuněčný povlak na smaltovaný vodič pro vinutí na bázi PAI. Permitivitu snížili na 2,3 oproti neupravené izolaci s hodnotou 4,5. Velikost PDIV se podařilo při stejné tloušťce materiálů zvýšit také o 200 V.

Tepelnou vodivost lze zase zvýšit přidáním vhodného plniva s vysokou tepelnou vodivostí. Například tepelnou vodivost epoxidových pryskyřic ovlivníme přidáním plniv, jako jsou oxid hlinitý, nitrid boru, nitrid křemíku, oxid beryllia, oxid grafenu nebo diamant. Výsledný kompozit má poté lepší tepelnou vodivost, ale mohou se změnit i jiné vlastnosti, viz odstavec výše. [70]. Autoři článku [82] zjistili, že dle teoretických předpokladů ke zvýšení tepelné vodivosti epoxidové pryskyřice pomocí plniva oxidu hlinitého skutečně dojde, avšak za určité koncentrace plniva lze zlepšit i velikost ztrátového činitele. Použitím stejného plniva v nanokompozitu na bázi PEI (ether) a PEEK se autorům [98] podařilo dosáhnout podobným výsledkům. Kde také dosáhli mírného zlepšení ztrátového činitele, navíc i nižší permitivity výsledného materiálu.

Tabulka 3 Tepelná vodivost různých materiálů včetně anorganických plniv (převzato z [70])

Materiál	Epoxid	Nylon 6.6 (PAI)	Silikonový elastomer	Tavený SiO ₂	BaTiO ₃	Al ₂ O ₃	BeO	ZnO	Si ₃ N ₄
Tepelná vodivost [W/mK]	0.17 - 0.21	0.25	0.17 - 0.26	1.5 - 1.6	85	38 - 42	300	60	8
Materiál	Grafen oxid	Grafen (jednovrstvý)	Krystalický SiO ₂	SiC	Diamant	Grafit	BN	AlN	
Tepelná vodivost [W/mK]	2 - 1000	3080 - 5150	3	150 - 220	6.2	25 - 470	86 - 120	29 - 300	

Autoři článku [96] shrnuli studie kompozitů na bázi PI, jejich výrobní proces, kombinační metody, plniva a modifikace, k dosažení lepších vlastností polyimidu, jako jsou například změna teploty skelného přechodu, zvýšení tepelné vodivosti nebo mechanických vlastností. Ty lze např. vylepšit vytvořením kompozitu polyimidu a uhlíkových nanotrubic [95]. Článek [70] je zase úzce zaměřen na vylepšení tepelné vodivosti izolačních materiálů použitých pro elektrické stroje.

5 Dopad výroby na životní prostředí

Převažující skupinou použitých izolantů jsou polymerní technické materiály neboli plasty. Výroba komoditních plastů je levná a energeticky nenáročná, např. oproti výrobě kovů, sklu či keramice. Právě levná výroba a všestranné vlastnosti plastů přispěly k tomu, že za léta produkování se plastové materiály staly jedním z hlavních vlivů zatěžování životního prostředí. Jejich produkce [109] vzrostla z dvou milionů tun v roce 1950 až na 495,75 milionů tun v roce 2019. Nejškodlivější toxické chemické látky, které se v plastech vyskytují a které mají nebezpečný vliv na zdraví lidí a zvířat, jsou BPA (bisfenol), ftaláty, oxid antimonitý a polyfluorované chemické látky. Vlivem environmentálních faktorů, jako jsou fyzikální, chemické a biologické účinky, došlo k rozkladu plastového odpadu na tzv. mikroplasty. Mikroplasty aneb malé plastové částice pouhým okem neviditelné, zamořily téměř každý prostor naší planety od půdy přes vzduch až po vodní toky a oceány. Tyto částice se nacházejí v tělech živočichů i lidí, na které mají přímý dopad. U živočichů přímo ovlivňují růst, reprodukci, ucpávají trávicí cesty a jsou toxické. U lidí poškozují plíce, ledviny, játra, krev a kardiovaskulární systém [104, 29, 108, 103, 110, 109].

Likvidace plastů tedy představuje včetně globálního oteplování největší výzvy pro lidstvo z hlediska ovlivnění životního prostředí. Vzhledem ke skutečnosti, že jsou plasty nepostradatelnou součástí lidského života, jejich aplikacím v mnoha oblastech, jako je např. lékařství, obalový průmysl nebo stavebnictví. Bude potřeba vývoj a produkce biologicky rozložitelných a recyklovatelných plastů, nalézt metody detekce a likvidace mikroplastů, zodpovědnější přístup v nakládání a likvidaci plastového odpadu [104, 107, 109, 110]. Plasty se v současnosti likvidují pomocí následujících technik:

Skládkování představuje jeden z běžných způsobů nakládání s odpady. Více než 90 % odpadu z veřejných zdrojů a domácností, z nichž 10 % tvoří plasty, je uloženo na skládky. Vzhledem k nedostatku půdy se tento způsob nakládání s odpadem stává velkým problémem. Při této metodě dochází k mnoha environmentálním problémům, například se do atmosféry uvolňuje metan. Metan má přibližně dvacetkrát vyšší potenciál skleníkových plynů než oxid uhličitý. Dalším problémem jsou uvolněné látky, kvůli nimž dochází ke kontaminaci půdy a vody. Z těchto důvodů je tato metoda považována za škodlivou [104, 109].

Spalování plastů je považováno za vhodnější metodu než skládkování. Při spalování těchto plastů ve volném prostranství se do ovzduší uvolňují plyny jako furany, polychlorované bifenylly, dioxiny atd. Tyto plyny jsou vysoce toxické. Polyvinylchloridy při

dalším spalování způsobují uvolňování nebezpečných halogenů, které následně způsobují znečištění ovzduší a jsou zodpovědné za klimatickou změnu. Tyto toxické látky ovlivňují celé naše životní prostředí včetně vegetace a zdraví všech živých organismů. Polystyren přímo ovlivňuje centrální nervovou soustavu organismů. Všechny bromované sloučeniny se chovají jako mutageny a karcinogeny. Vzhledem k tomuto dopadu na životní prostředí se tato metoda nesmí používat a spalování plastů je možné pouze v zařízeních k tomu určených, v tzv. spalovnách, kde by bylo prováděno minimálně při 1100 °C [104, 105, 109].

Recyklování představuje další způsob nakládání s plastovým odpadem. Recyklace plastů znamená přepracování plastového odpadu na další použitelné výrobky [104, 109]. Recyklaci můžeme rozdělit do čtyř hlavních kategorií:

- Primární izolace je používaná pro nekontaminovaný odpad jednoho druhu plastu, ten je následně mechanicky přepracován a je vytvořen nový výrobek s téměř stejnými vlastnostmi [104, 106];
- Sekundární recyklace představuje opět mechanické přepracování odpadu s tím rozdílem, že zde je výsledkem výrobek z různých typů směsných plastových odpadů. Tudíž má výsledný výrobek odlišné vlastnosti od původního [104, 106];
- Terciální recyklace využívá technologické postupy k získávání chemických složek rozkladem polymerního materiálu na nízkomolekulární. Výsledné produkty jsou pak vhodné pro použití jako chemická surovina či energetické palivo [104, 106];
- Kvartérní recyklace využívá energetický potenciál plastového odpadu. Nejčastěji zastoupené komoditní plasty totiž mají srovnatelnou výhřevnost s materiály, jako jsou dřevo či papír. Jedná se tedy o získávání energie ze spalování plastového odpadu. Plastový odpad lze snadno spálit při teplotách kolem 900 °C [104, 106].

Pyrolýza je další ze způsobů likvidace plastů, přeměňuje plastový odpad na cenné produkty (jako je pyrolýzní olej, plyn nebo uhlí) prostřednictvím tepelného rozkladu nebo rozkladu za vysokých teplot za pomoci katalyzátoru. Plazmatická pyrolýza využívá kombinaci tepelně-chemických vlastností a pyrolýzy bez přístupu vzduchu k chemické degradaci materiálu. Pomocí plazmového oblouku při teplotě 700 až 1400 °C dojde k úplnému rozkladu odpadu, doba potřebná k přeměně odpadu je přibližně 0,01-0,05 s.

Výhodou plazmové pyrolýzy je, že nejen zcela rozkládá odpad, ale také snižuje objem organických látek, a to o více než 99 % po uvolnění ultrafialového záření [104, 106, 109],

Materiály pro izolační systém moderních elektromotorů představují vysoce tepelně odolné polymery, jedná se o tzv. vysoce výkonné polymery neboli HPP. Výroba těchto polymerů je velmi náročná na zdroje a energii, což má za následek vysoké dopady na životní prostředí a vysoké výrobní náklady oproti výrobě klasických komoditních plastů. Ve srovnání s komoditními plasty, jako je vysokohustotní polyethylen, jsou emise skleníkových plynů z HPP asi 2–3krát vyšší z pohledu celého životního cyklu od těžby suroviny až po likvidaci, a dokonce 4–8krát vyšší, díváme-li se pouze na část životního cyklu od těžby suroviny až po opuštění finálního materiálu z výrobního závodu [107].

Vyrábějí se z komplexních monomerů a vícestupňovou syntézou. Např. náklady na PEI jsou asi pět až desetkrát vyšší a tržby z prodeje jsou dokonce až dvacetkrát vyšší než u polyethylenu. Největší podíl z hlediska materiálových nákladů na výrobu HPP tvoří náklady na monomery, jejich cena ale kolísá v závislosti na ceně ropy. HPP mají výrazně vyšší uhlíkovou stopu než komoditní plasty, Přesto byly dopady HPP na životní prostředí v nedávných studiích globální produkce polymerů opomíjeny kvůli jejich relativně malým objemům výroby ve srovnání s komoditními plasty se očekává, že celosvětový trh s plasty poroste ročním tempem růstu 3,4 % [107]. V dnešní době více než 12 % tuhého komunálního odpadu tvoří plasty, navíc se očekává, že výroba plastů bude v budoucnu největším spotřebitelem těžby ropy a hlavním zdrojem emisí skleníkových plynů [104, 107].

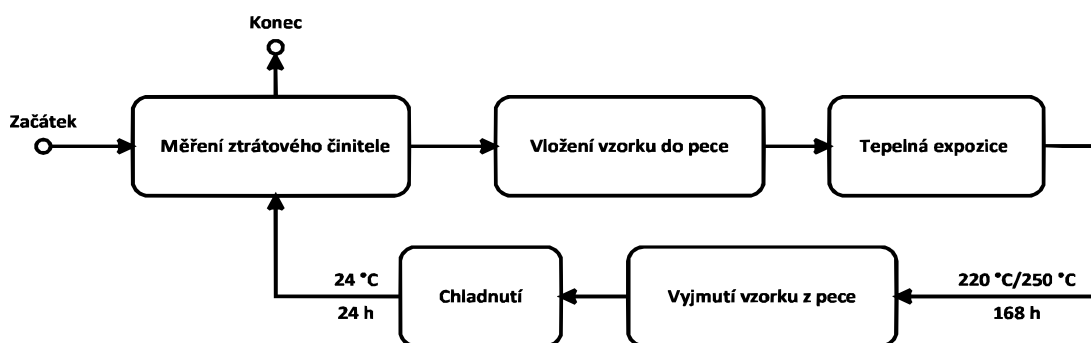
Kromě zlepšení současných HPP se zdá slibný vývoj nových HPP s nízkými náklady a dopady na životní prostředí [107]. Polyimidy zůstávají nejoblíbenější izolační materiál na trhu [33]. Problémem jejich výroby je použití vysoce toxických rozpouštědel. Izolační materiály pro elektromobilitu by tedy měly být recyklovatelné v souladu s REACH a neobsahovat vysoce toxická rozpouštědla, která se používají při smaltování a mohou mít nepříznivé účinky jak na zdraví pracovníků, tak na životní prostředí [33, 38, 111].

Na druhou stranu v kontextu této práce, použití nových materiálů by vedlo ke zvýšení hustoty výkonu, tím se sníží spotřeba surovin. Motory a motorové systémy představují přibližně 53 % celosvětové spotřeby elektřiny. Odhady ukazují, že zlepšení účinnosti všech světových motorů o pouhé jedno procento by snížilo spotřebu energie motorů o 94,5 TWh a zmenšilo jejich stopu oxidu uhličitého o ekvivalent 60 milionů metrických tun. [27, 56].

6 Diagnostika perspektivních materiálů – Experiment

6.1 Popis vzorků a experimentu

Praktická část této diplomové práce popisuje experiment, jehož cílem bylo zjistit změnu dielektrických ztrát v materiálech použitých pro izolování vodičů vinutí v závislosti na zrychleném tepelném stárnutí. Měřeným parametrem tohoto experimentu byl ztrátový činitel jako funkce času tepelné expozice vzorku. Stárnutí vzorků probíhalo při teplotách 220 a 250 °C. Pro výchozí a konečný stav vzorku byly navíc provedeny strukturální analýzy pomocí metod STA a FTIR. Před začátkem samotného experimentu byly změřeny absorpční a resorpční proudy k porovnání polarizačního indexu a redukovaných resorpčních křivek jednotlivých vzorků izolace vinutí.



Obr. 8 Proces měření experimentu

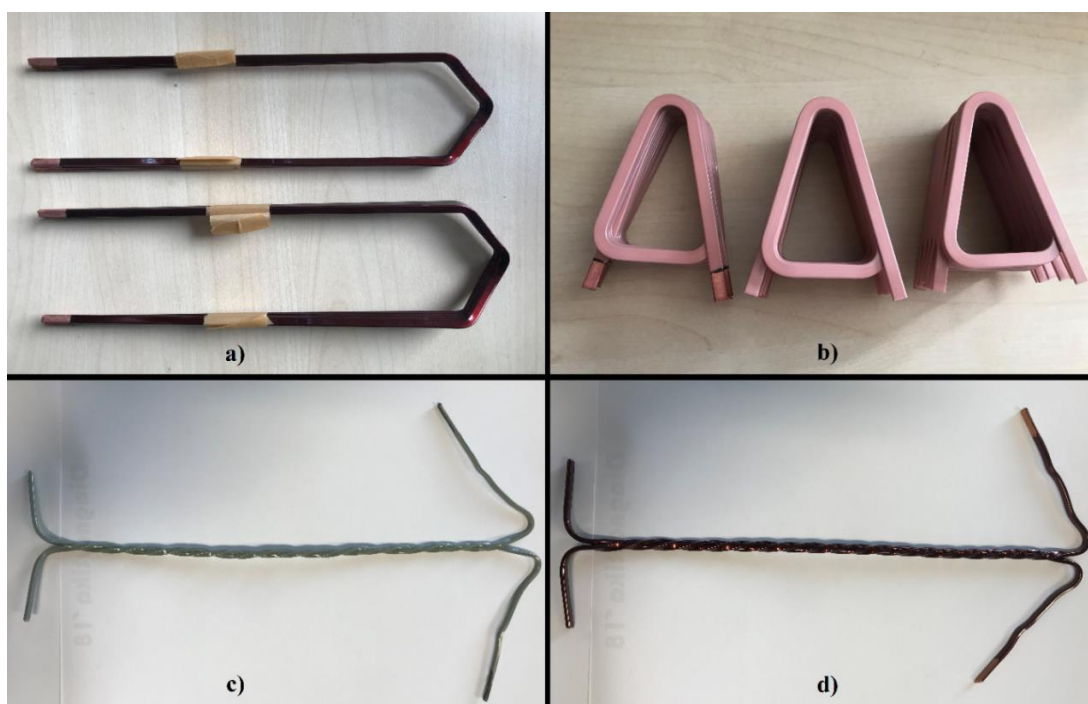
Testovanými vzorky jsou blíže nespecifikované vodiče dodané firmou ZF na bázi polymerů PEEK a PI určené pro vinutí moderních motorů v elektromobilitě. Jedná se o pět kroucených párů s PEEK extrudovanou izolací, pět kroucených párů s PI lakovanou izolací. Další sadu vzorků tvoří sedm lakovaných vodičů tvarovaného vinutí technologií Hairpin a osm tvarovaných vodičů s PEEK extrudovanou izolací pro vinutí axiálních motorů, ani pro tyto vzorky nebyly známé bližší specifikace. Všechny testované vzorky byly obdélníkového průřezu a určené pro vinutí motorů v elektromobilu.

Tabulka 4 Rozdělení vzorků dle teploty expozice

220 °C	TP PEEK 1	TP PEEK 2	TP PI 4	TP PI 5	AX PEEK 1	AX PEEK 2	AX PEEK 3	AX PEEK 4	HP 4	HP 5	HP 6	HP 7	
250 °C	TP PEEK 3	TP PEEK 4	TP PEEK 5	TP PI 1	TP PI 2	TP PI 3	AX PEEK 5	AX PEEK 6	AX PEEK 7	AX PEEK 8	HP 1	HP 2	HP 3
Poznámky:	PEEK = Polyetheretherketon			PI = Polyimid			TP = Twisted Pair (kroucený pár)			AX = Axial motor		HP = Hairpin	

Kroucené páry vodičů představují nejpoužívanější model izolace mezi jednotlivými závity vinutí. Příprava těchto vzorků je velmi jednoduchá, opakovatelná a levná [62]. Jejich výroba je dobře definovaná v normě ČSN EN 60851-5 [84]. Díky tomu je široce používaná pro různé testování izolace vinutí a takto připravené vzorky tedy můžeme nalézt v řadě vědeckých článků. Především výsledky chování kroucených párů nás zajímá více než ostatních vzorků, pro tyto vzorky byla provedena strukturální analýza.

Norma [84] dále definuje testování v lázni z kovových kuliček pro tvarovaná vinutí či vzorky navinuté do tvaru cívky. Vzorky axiálního vinutí a Hairpin vinutí budeme měřit umístěné v nádobě a obsypané kovovými kuličkami.



Obr. 9 Testované vzorky: a) Hairpin vinutí, b) axiální vinutí, c) kroucený pár PEEK, d) kroucený pár PI

6.2 Tepelné stárnutí

Protože teplota představuje jeden z nejvíce ovlivňujících degradačních vlivů, tvoří obvykle tepelná odolnost izolačního systému z hlediska spolehlivosti celého elektrického stroje nejslabší článek. Vlivem tepelného namáhání dochází následkem chemických degradačních reakcí k nevratným chemickým a fyzikálním změnám. Ty mohou ovlivnit dielektrické vlastnosti materiálu např. zvýšením dielektrických ztrát nebo elektrické vodivosti [5, 86].

Zkoušky zrychleného stárnutí se provádí, abychom byli schopni zařadit izolační systém do určité třídy tepelné odolnosti a predikovat jeho životnost [5]. Zkušební postup a vyhodnocení výsledků popisuje norma ČSN EN 60216-1 ed. 2 [85].

Životnost materiálu v závislosti na teplotě lze vyjádřit z Arrheniovy rovnice, popisující závislost rychlosti probíhajících reakcí na teplotě. Změna fyzikálních vlastností materiálu totiž úzce souvisí se změnou koncentrace aktivních molekul [1, 5].

Arrheniovy rovnice [5]:

$$\tau = a \cdot e^{\frac{W_a}{RT}}, \quad (6.1)$$

kde τ je životnost materiálu,

W_a je aktivační energie procesu,

a je konstanta závislá na koncentraci vzniklých aktivních molekul,

R je univerzální plynová konstanta,

T je absolutní teplota.

Životnost izolace se zvýšením teploty exponenciálně zkracuje, její dobu lze popsat exponenciální funkcí teploty stárnutí [5].

Životnost izolace v souvislosti s teplotou, při které materiál stárne, lze popsat pomocí empirického Montsingerova pravidla [5]:

$$\tau = A \cdot e^{-BT}, \quad (6.2)$$

kde A a B jsou materiálové konstanty určené experimentálně,

T je teplota.

Büssingův teorém uvažuje rychlost chemické reakce vyvolané působením teploty za rychlost stárnutí materiálů a zhoršování jejich fyzikálních vlastností. Výsledná přímka na osách logaritmu času a převrácené hodnotě absolutní teploty odpovídá životnosti izolace [5].

Büssingův teorém [5]:

$$\tau = C \cdot e^{\frac{b}{T}}, \quad (6.3)$$

kde b a C jsou materiálové konstanty,

T je absolutní teplota.

6.3 Dielektrické ztráty

Vyjadřují děje odehrávající se ve struktuře izolantu při působení vnějšího elektrického pole, při kterých dochází ke přeměně objemu energie za jednotku času na jiný druh energie. Nejčastěji se jedná o tepelnou energii, Dochází k nežádoucímu zahřívání izolantu [1] To může vést k jejich zrychlenému stárnutí [17]. Teplo vzniká třením kmitajících polárních molekul o sousední molekuly. Energie, která způsobuje toto zahřívání, pochází z přiloženého napětí [2]. Dielektrické ztráty vznikají při působení stejnosměrného i střídavého napětí [1].

Pohyby volných a vázaných nosičů elektrického náboje obsažených v izolantu a změnou orientace polarizace dochází ke vzniku dielektrických ztrát [1, 18]. Tento mechanismus vzniku záleží na vnitřní stavbě a skupenství, chemickém složení, obsahu nehomogenit a příměsí izolantu a vnějších fyzikálních podmínkách [1].

Dielektrické ztráty si můžeme rozdělit na:

- Vodivostní ztráty, ty jsou dány vodivostním proudem v dielektriku a proudem tekoucí na jeho povrchu. Čím větší konduktivita dielektrika, tím jsou větší i ztráty, rostou s teplotou a není závislá na frekvenci [1, 16].
- Ztráty relaxačními polarizacemi, vznikají při ztrátových druzích polarizací působením vnějšího elektrického pole, jako jsou iontová, dipólová relaxační nebo migrační. Část energie se mění na teplo a jsou frekvenčně i teplotně závislé [1, 16].
- Ionizační ztráty, výskyt nehomogenit ve formě dutinek naplněných plynem nebo delaminací může zapříčinit vznik dodatečných ztrát částečnými výboji [17].

Dielektrické ztráty popisujeme pomocí ztrátového činitele $\tan \delta$, ztrátového výkonu P_z a měrných dielektrických ztrát p_z [16]. Tyto ztráty v dielektriku jsou závislé na intenzitě elektrického pole, ztrátovém činiteli a frekvenci, uvažujeme-li harmonický průběh napětí [1].

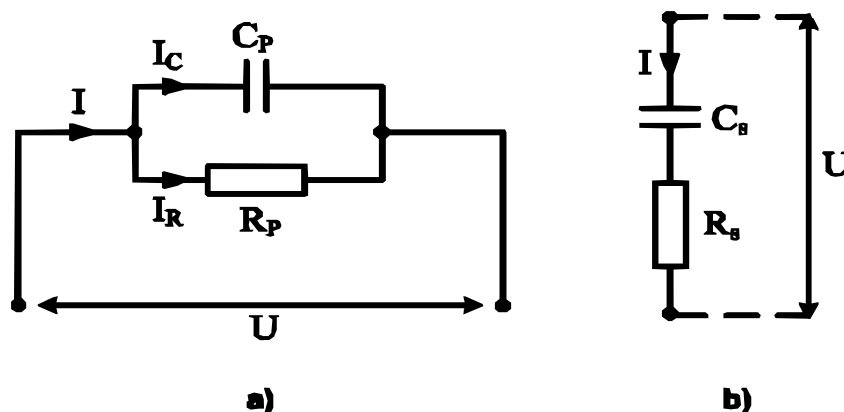
6.4 Ztrátový činitel

Jedná se o veličinu popisující činné polarizační ztráty energie v dielektriku [5]. Měření ztrátového činitele neboli $\tan \delta$ je v praxi široce používaná diagnostická metoda pro určení kvality izolace [15]. Hodnota této veličiny představuje klíčový ukazatel spolehlivosti a životnosti izolace [19], poskytuje informace o kvalitě a stavu izolace. Z jeho velikosti usuzujeme, zdali je izolace zestárlá, poškozená či navlhla [5, 19].

Za dobrou izolaci považujeme takovou, je-li její velikost $\text{tg } \delta$ menší než 10^{-3} . Naopak z elektroizolačního pohledu pokládáme za špatnou tu, která má velikost $\text{tg } \delta$ větší než 10^{-2} [1]. S rostoucí hodnotou ztrátového činitele dochází k většímu zahřívání izolace a rychlejšímu stárnutí. Platí tedy, že čím nižší velikost ztrátového činitele, tím kvalitnější a v lepší stavu izolace je. Za kvalitní izolaci uvažujeme takovou, jejíž hodnota ztrátového činitele zůstává nízká, nezávisle na velikosti přiloženého zkušební napětí [5].

6.4.1 Náhradní obvod

Náhradní obvody nám slouží, abychom dokázali nasimulovat vzájemné interakce technického dielektrika a kondenzátoru na vnější obvod. Neobjasňují ovšem fyzikální podstatu dielektrických ztrát. V obvodu je vždy zapojen kondenzátor s ideálním bezztrátovým dielektrikem a rezistor, zapojení je buď to sériové, nebo paralelní [1].



Obr. 10 Náhradní obvod: a) paralelní b) sériový (převzato z [19])

Ideální kondenzátor má fázový úhel mezi U a I 90° . V reálném technickém dielektriku je ovšem fázový úhel zmenšený o rozdíl $90^\circ - \delta$, tangenta úhlu δ je ztrátový činitel a vyjadřuje dielektrické ztráty [19, 21].

Výpočet ztrátového činitele na základě sériového náhradního obvodu [1]:

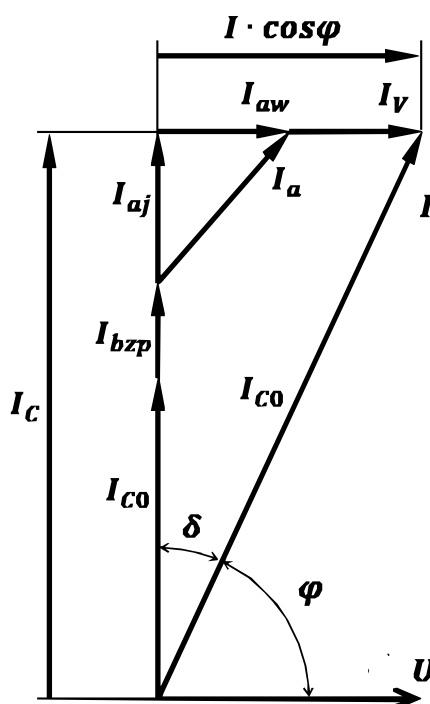
$$\text{tg } \delta = \frac{U_R}{U_C} \quad (6.4)$$

$$\text{tg } \delta = \omega \cdot C_S \cdot R_S \quad (6.5)$$

Výpočet ztrátového činitele na základě paralelního náhradního obvodu [1]:

$$\text{tg } \delta = \frac{I_R}{I_C} \quad (6.6)$$

$$\text{tg } \delta = \frac{1}{\omega \cdot C_P \cdot R_P} \quad (6.7)$$



Obr. 11 Fázorový diagram reálného technického dielektrika (převzato z [1])

Kde φ je fázový úhel roven 90° , δ je ztrátový úhel, I_{c0} je proud nabíjející geometrickou kapacitu, I_v je vodivostní proud, I_{aw} je složka odpovídající ztrátám v dielektriku, I_{aj} je jalová složka, I_{bzp} je proud odpovídající rychlým bezztrátovým polarizacím a I_a je absorpční proud [1].

Pokud při výpočtu zohledníme příslušné činné a jalové složky, bude splněna podmínka rovnosti ztrátových činitelů. Výpočet [1]:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C_S \cdot R_S = \frac{1}{\omega \cdot C_P \cdot R_P} \quad (6.8)$$

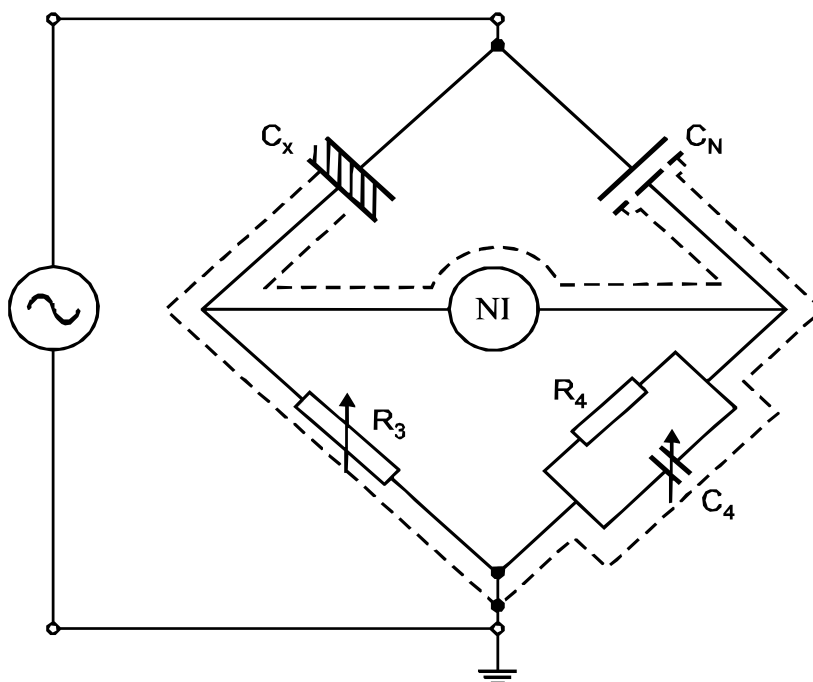
V případě malé velikosti ztrátového činitele se obě náhradní schémata liší nepatrně. Oproti tomu, pokud jsou v dielektriku velké dielektrické ztráty, rozdíl mezi náhradními obvody se zřetelně projeví [1].

Sériový náhradní obvod je adekvátně zvolený pro situaci, ve které na kondenzátoru vznikají ztráty zejména odporem přívodů a elektrod, přičemž v dielektrikum žádné ztráty nevznikají [1].

Paralelní náhradní obvod je adekvátní pro reálný kondenzátor, v němž vznikají dielektrické ztráty podmíněné elektrickou vodivostí příslušného dielektrika v širokém frekvenčním pásmu [1].

6.4.2 Měření ztrátového činitele

Pro měření veličiny ztrátového činitele se v diagnostické praxi nejvíce používá zapojení můstkových metod. Nejběžnější je potom zapojení Scheringova můstku [5]. Můstek se skládá ze dvou hlavních částí, které jsou od sebe galvanicky oddělené pomocí vzorku a kapacitního normálu. První část se nachází ve vysokonapěťovém prostoru zkušebny. Druhá nízkonapěťová část slouží k vyvážení můstku odporovou a kapacitní dekádou R_3 a C_4 umístěnou mimo vysokonapěťový prostor [1].



Obr. 12 Scheringův můstek (převzato z [13])

Popis Scheringova můstku

Scheringův můstek se skládá z:

C_x – reprezentující kapacitu vzorku, který měříme,

C_N – normálový neztrátový kondenzátor,

R_3 – rezistorem sloužícím k vyrovnání kapacitní složky,

C_4 – kondenzátor vyrovnávající odporovou složku.

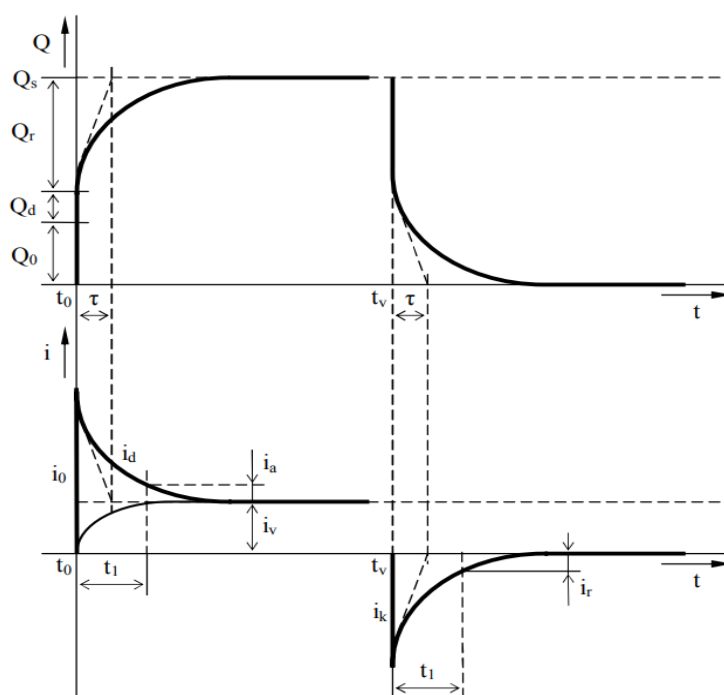
NI – Signalizaci k dosažení správného vyvážení můstku zajišťuje nulový indikátor

6.5 Dielektrická absorpce

Popisuje časově proměnné děje probíhající v reálném technickém dielektriku a jeho vnějších obvodech, je-li vystaveno působení stejnosměrného elektrického pole [1, 24, 25]. Dielektrikum není schopno reagovat skokově na přiložené napětí a dochází ke vzniku zpožděné reakce neboli dielektrické absorpce [1]. Důvodem této prodlevy na působení elektrického pole jsou aktivní relaxační procesy uvnitř dielektrika [23, 1]. Měření absorpčního a resorpčního proudu je metoda používána v diagnostice pro ověření integrity izolace [22], a to na základě skutečnosti, že tyto absorpční a resorpční proudy jsou závislé na charakteru a stárnutí daného izolačního materiálu [23].

Časový průběh náboje a proudu dielektrické absorpce [1]

Průběh tohoto děje si můžeme detailněji popsat a lépe pochopit pomocí grafického zobrazení na obrázku (x).



Obr. 13 Časový průběh náboje a proudu (převzato z [1])

6.5.1.1 Z pohledu náboje

V čase t_0 přivedeme na kondenzátor s technickým dielektrikem stejnosměrné napětí, dochází k počátečnímu nárůstu elektrického náboje Q_0 , představující nabití geometrické kapacity C_0 (kapacita kondenzátoru s vakuovým dielektrikem).

Poté dochází k velmi rychlému nárůstu náboje Q_d , který se dostane na elektrody v důsledku rychlých deformačních polarizací.

Následuje růst náboje Q_r , který přitéká na elektrody následkem relaxačních polarizací. Velikost nárůstu toho to náboje není již tak rychlý v této části, vezmeme-li v úvahu časovou závislost přitékajícího náboje na elektrody. Ten integrálem reprezentuje absorpční proud, který můžeme popsat rovnicí:

$$Q_r(t) = Q_s \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (6.9)$$

kde Q_s představuje velikost náboje $Q_r(t)$ v ustáleném čase,
 τ časovou konstantu neboli relaxační dobu,
 t čas blížící se nekonečnu.

Podíl ustáleného náboje Q_s a napětí U představuje absorpční kapacitu, ta vyjadřuje přírůstek kapacity kondenzátoru, vyvolaný relaxačními polarizacemi. Absorpční kapacita je tedy:

$$C_p = \frac{Q_r}{U} \quad (6.10)$$

V čase t_v dochází k odpojení stejnosměrného napětí a náboj se začne v závislosti na čase asymptoticky vybíjet.

6.5.1.2 Z pohledu protékajícího proudu

V čase t_0 je připojeno stejnosměrné napětí. Okamžitě se objeví nabíjecí proud i_0 , ten přísluší deformačním polarizacím a nabíjení geometrické kapacity.

Po doznění nabíjecího proudu i_0 začne protékat dobíjecí proud i_d , tento proud je dán součtem absorpčního proudu a vybíjecího proudu.

Absorpční proud, je dán součtem polarizačních proudů, ty odpovídají jednotlivým relaxačním polarizacím, které se v dielektriku odehrávají. Je časově proměnný a postupem času klesá k nule. Stav a struktura dané látky určuje rychlost poklesu absorpčního proudu $i_a(t)$.

Příčiny vzniku absorpčního proudu můžeme kategorizovat do tří skupin:

- Relaxační polarizace neboli polarizace silně vázaných nosičů náboje v elektrickém poli;
- Hromadění volných nosičů náboje na rozhraní nehomogenit;
- Vznik prostorových nábojů v blízkosti elektrod.

Vztah mezi absorpčním proudem $i_a(t)$ a nábojem $Q_r(t)$ popisuje tato rovnice:

$$Q_r(t) = \int_0^t i_a dt \quad (6.11)$$

Po ustálení polarizačních dějů prochází dielektrikem pouze vodivostní proud. Jeho velikost je pro neporušené a suché izolace extrémně malá a na čase nezávislá. Naopak u zvlhlé izolace je nutné brát v úvahu časovou závislost vodivostního proudu i_v , protože se zde silně uplatňuje iontová vodivost.

V čase t_v nastane současně odpojení napětí a vyzkratování elektrod. Následný tok časově proměnného proudu ve vnějším obvodu je vyvolán v důsledku vybíjení kondenzátoru. Ten je tvořen těmito složkami:

- i_k – vybíjecí proud, tento proud po odpojení začne velmi rychle odeznívat.
- $i_r(t)$ – resorpční proud, proud měnící se v čase, který se přibližuje jako asymptota k nulové hodnotě.

Pokud by v dielektriku probíhal pouze jediný typ relaxační polarizace s jednou relaxační dobou, poté bychom mohli popsat exponenciální průběh absorpčního proudu $i_a(t)$ v čase rovnicí:

$$i_a(t) = U \cdot G \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (6.12)$$

kde U je přivedené stejnosměrné napětí,

G je vodivost soustavy v čase $t = 0$,

τ je relaxační doba dané polarizace.

U technického dielektrika není průběh absorpčního proudu $i_a(t)$ v čase exponenciální, protože dielektrikum obsahuje více složek různé struktury a různé relaxační polarizace, proud tedy bude klesat pomaleji. Pomocí Curieovy funkce můžeme popsat integrál jednotlivých exponenciálních absorpčních proudů:

$$i_a(t) = U \cdot G \cdot t^{-n}, \quad (6.13)$$

Kde n je konstanta, jejíž hodnota je zjistitelná experimentálně.

Parametry určované z absorpční a resorpční charakteristiky

6.5.1.3 Polarizační index

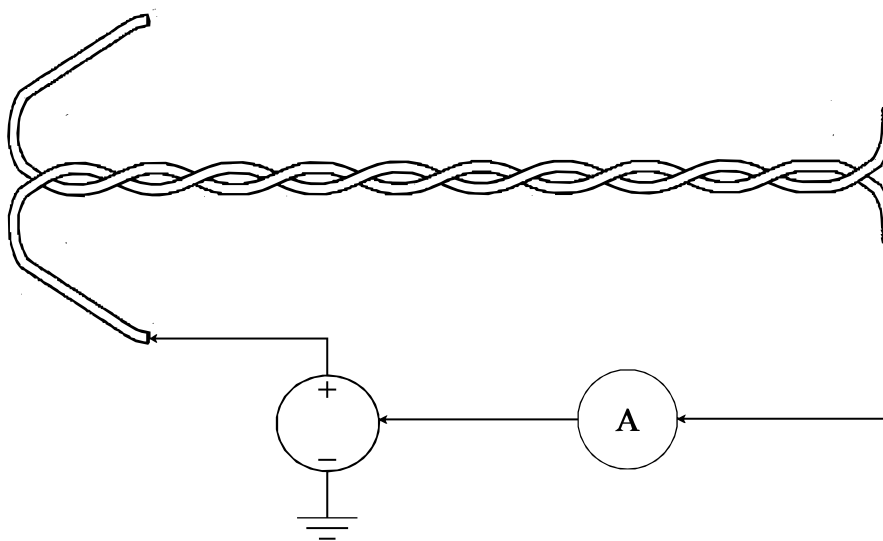
Polarizační index nám dává informaci o stavu izolace. Jedná se o podíl absorpčního proudu i_a v patnácté a šedesáté sekundě od okamžiku přiložení napětí pro jednodominutový polarizační index, pro desetiminutový polarizační index je vypočítán v hodnoty v první a desáté minutě. Jeho velikost se popisuje bezrozměrnou hodnotou [1, 2, 5].

Vztah pro výpočet polarizačního indexu [5]:

$$P_{i1} = \frac{i_{15}}{i_{60}} = \frac{i_{a15} + i_{\infty}}{i_{a60} + i_{\infty}}, \quad (6.14)$$

kde i_{15}, i_{60} jsou absorpční proudy v daném čase,
 i_{∞} je ustálený vodivostní proud.

Je-li izolace v dobrém stavu, tzn. uvažujeme suchou, neznečištěnou a nepoškozenou izolaci, bude její polarizační index p_i výrazně větší než jedna. Pro kvalitní izolace představuje polarizační index p_i velikost v rozmezí 3-6 [1]. Oproti tomu v případě poškozené nebo zvlhlé izolace se velikost polarizačního indexu p_i blíží jedné [1, 5].



Obr. 14 Schéma zapojení krouceného páru pro měření rezistivity voltampérovou metodou

Podle [13] je dostačující dielektrikum takové, jehož hodnota polarizačního indexu je větší než dva, a naopak izolační materiály, které můžeme považovat za pochybné, mají polarizační index řádově jedna nebo menší.

Stejnou váhu hodnocení formuluje obdobně i [2], kde hodnota polarizačního indexu větší než dvě platí pro suchý a čistý izolační systém, pokud je hodnota polarizačního indexu menší než jedna, izolace bude pravděpodobně navlhla nebo znečištěná.

6.5.1.4 Redukované resorpční křivky

Redukované resorpční křivky neboli RRK, jedná se o metodu, ve které dle daných matematických vztahů přepočítáváme naměřené hodnoty resorpčního proudu i_r [5].

Vztah transformace souřadnic [5]:

$$x = \ln(t) - \ln(15), \tag{6.15}$$

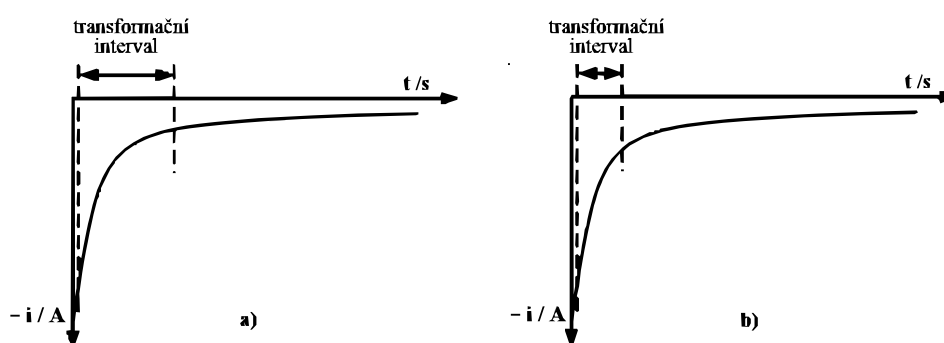
$$y = \text{ABS}[\ln(i_t) - \ln(i_{15})], \tag{6.16}$$

kde x, y jsou transformované souřadnice [-],

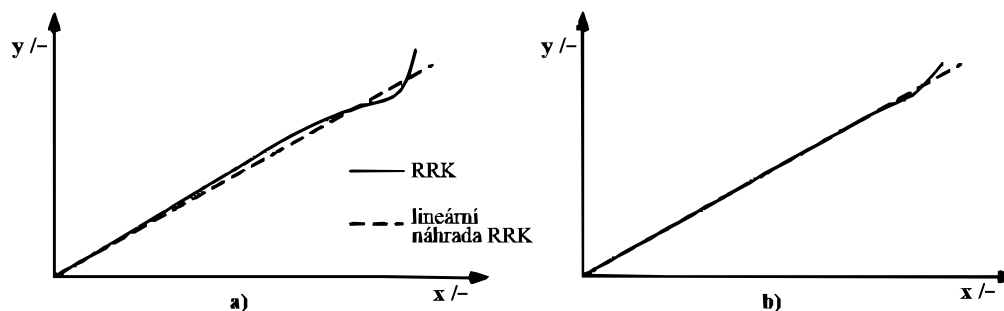
t čas [s],

i_t okamžitý proud v čase t [A],

i_{15} proud v patnácté sekundě [A].



Obr. 15 Volba transformačního intervalu: a) příliš dlouhý, b) optimální interval (převzato z [1])



Obr. 16 Volba Výsledný průběh RRK: a) příliš dlouhý interval, b) optimální interval (převzato z [1])

hodnotícím parametrem této metody je velikost směrnice. Čím větší směrnice, tím lepší má izolant vlastnosti. Naopak zmenšující se směrnice charakterizuje horší vlastnosti. Interval pro lineární náhradu je 15 až 300 sekund. Volba intervalu je klíčová pro hodnocení stupně zestárnutí. Příliš široký interval způsobuje zřetelnou nelinearitu výsledného průběhu křivky RRK z důvodu pozvolnější změny resorpčního proudu, viz Obr. x1 a Obr. x2 [5].

6.6 Fenomenologické zkoušky naměřená a vypočítané hodnoty

Polarizační index a redukované resorpční křivky

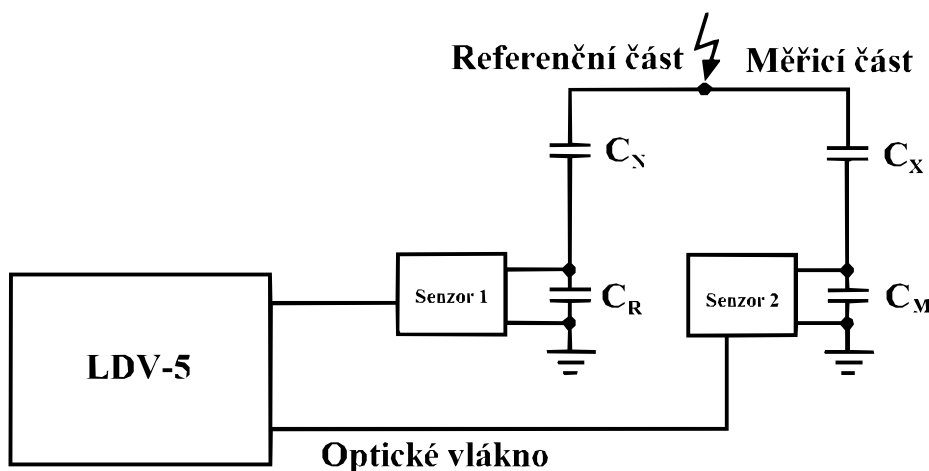
Měření parametrů dielektrické absorpce bylo provedeno pomocí elektrometru Keithley 6514 a vysokonapětového zdroje Keithley 240A.

Tabulka 5 Vypočítané polarizační indexy a směrnice RRK

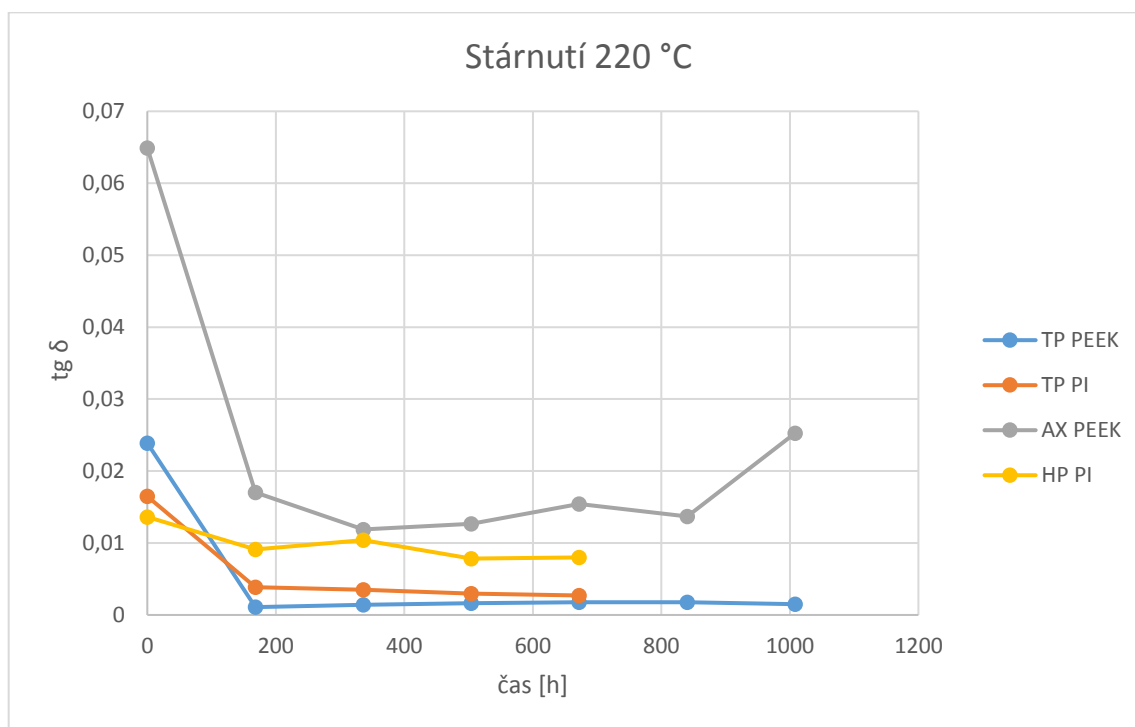
	TP_PEEK	TP_PI	AX_PEEK	HP
P _{i1}	3,2	1,51	1,99	6,1
P _{i10}	16,5	2,46	1,98	36,48
RRK směrnice	1,05	0,54	0,76	1,41

Závislost ztrátového činitele na tepelném stárnutí

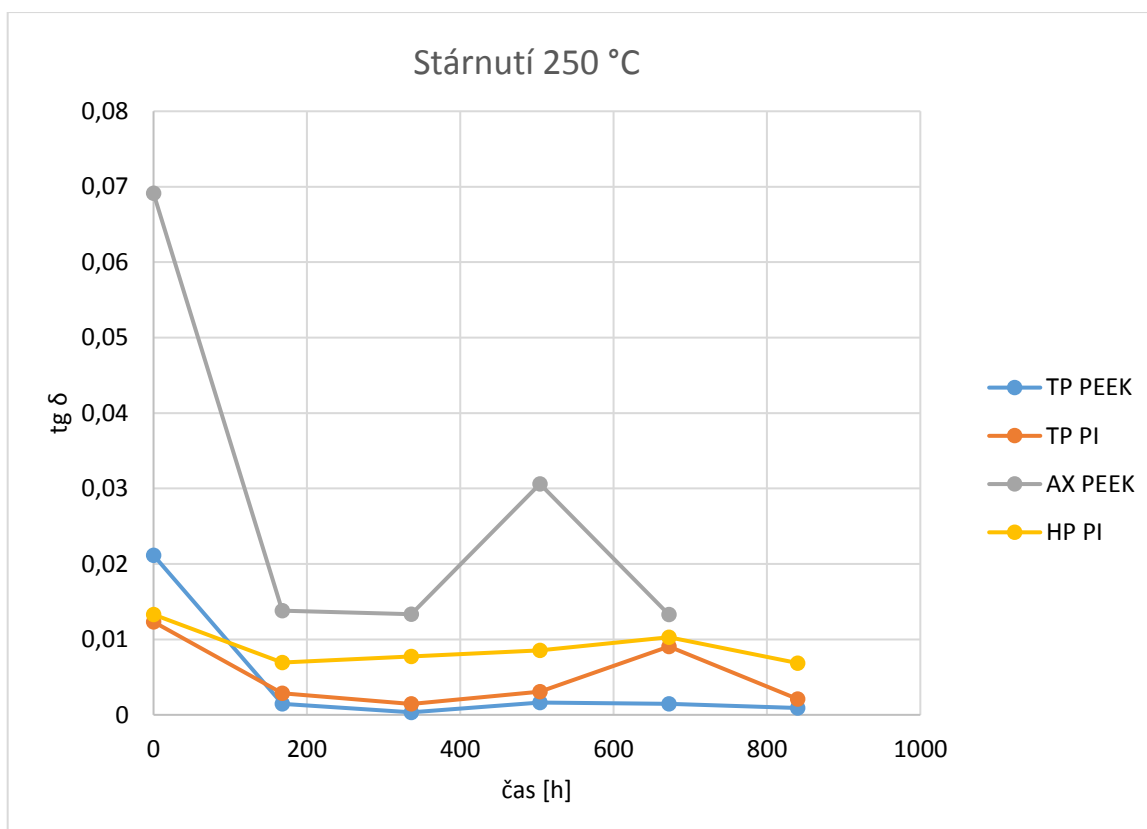
Pro měření ztrátového činitele byl použit automatický můstek LEMKE DIAGNOSTIC GmbH LDV-5. Automatický můstek vychází z principu Scheringova můstku a slouží k automatickému zobrazování $\tan \delta$, C_X , U_{ZK} , hodnotu ztrátového činitele určíme z měření fázového úhlu mezi napětími na impedancích v nízkonapětové větvi. Tato napětí jsou pomocí senzorů digitalizována, transformovaný signál je přenášen optickými kabely do počítače, kde pomocí FFT je určena hodnota ztrátového činitele. Větvě můstku jsou v podstatě kapacitními děliči vysokonapětové větve a nízkonapětové větve, není tedy nutné úplně vyvážení oproti konvenčním můstkům. Kapacita C_X se určí z dělicího poměru měřicí větve. Vzniklé parazitní kapacity a chyby umožňuje eliminovat použitím odporů a kondenzátorů v nízkonapětové části [1]. Tepelná expozice vzorků byla provedena v laboratorní peci Memmert.



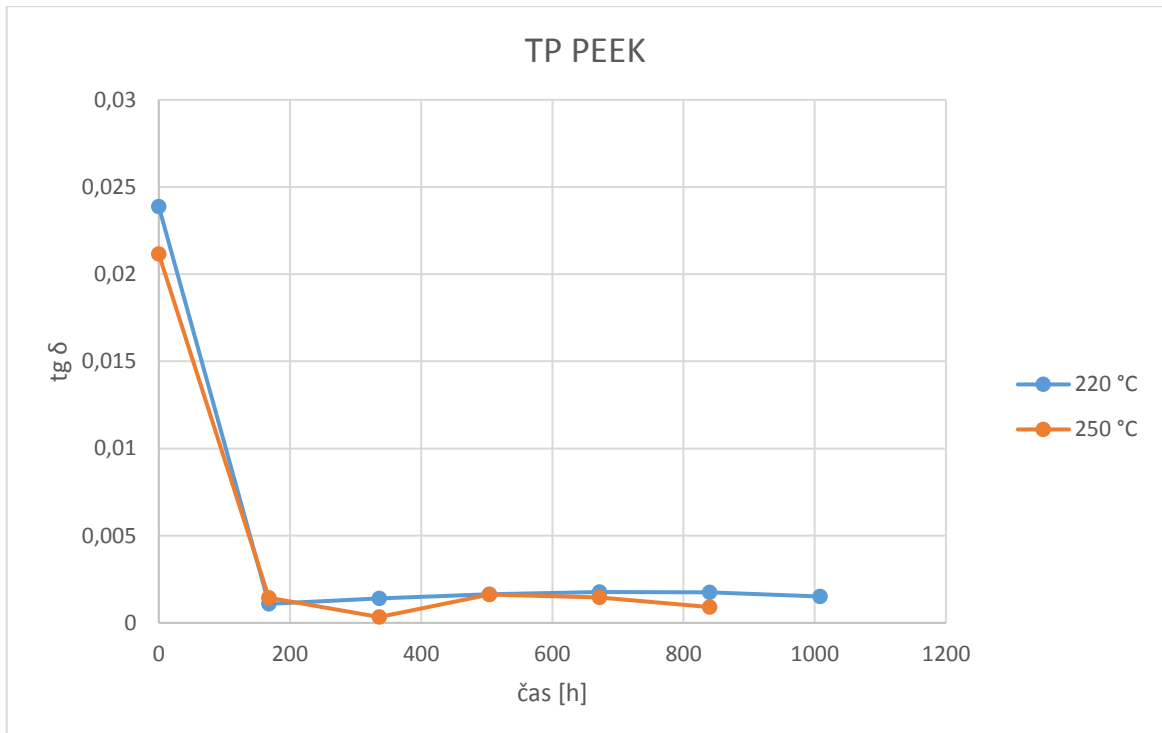
Obr. 17 Zapojení automatického můstku LDV-5 (převzato z [100])



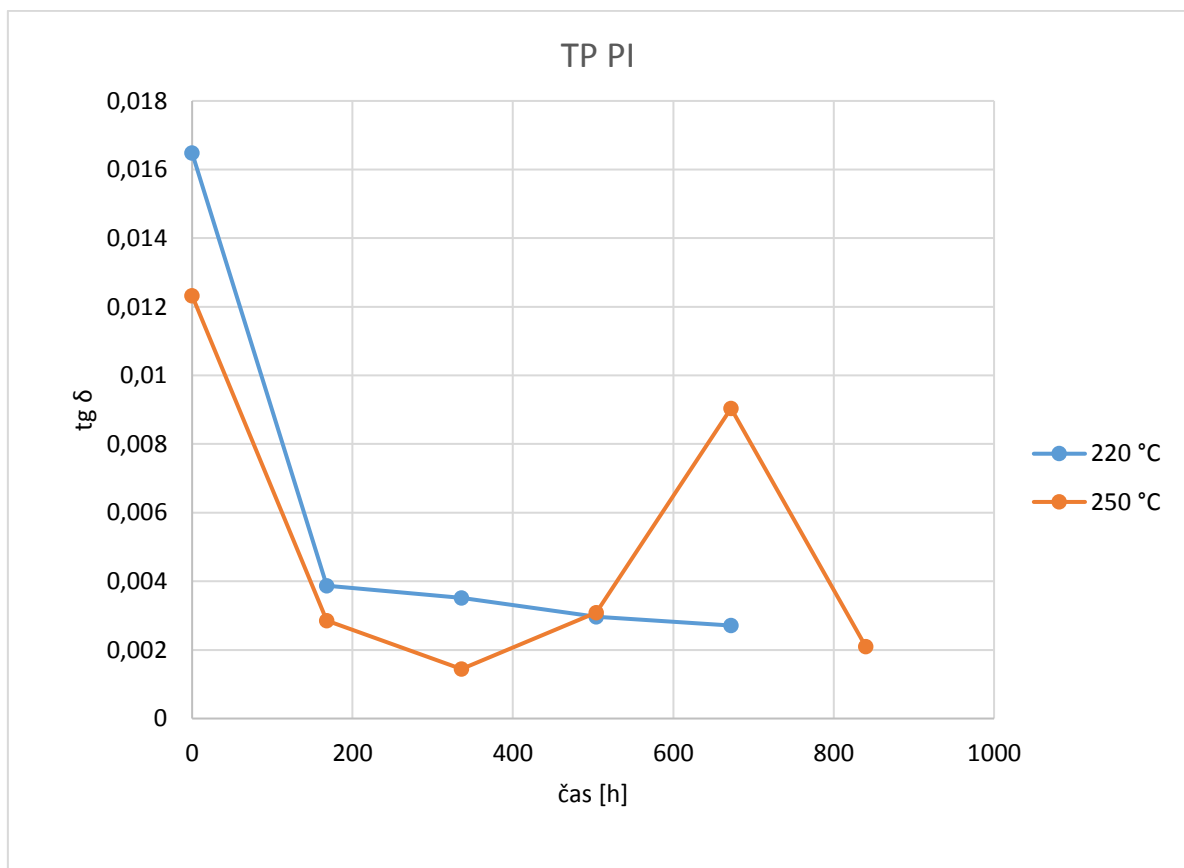
Obr. 18 Závislost všech vzorků stárnutých při 220 °C



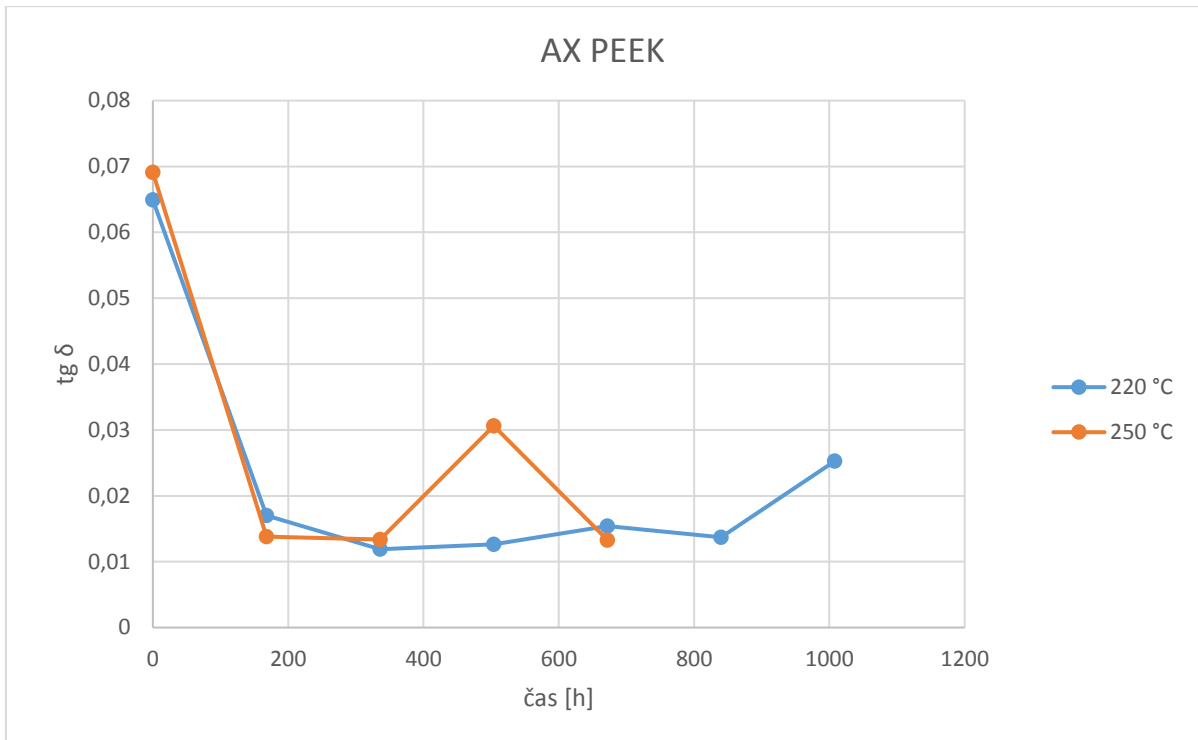
Obr. 19 Závislost všech vzorků stárnutých při 250 °C



Obr. 20 Závislost vzorků TP_PEEK



Obr. 21 Závislost vzorků TP_PI



Obr. 22 Závislost vzorků AX_PEEK

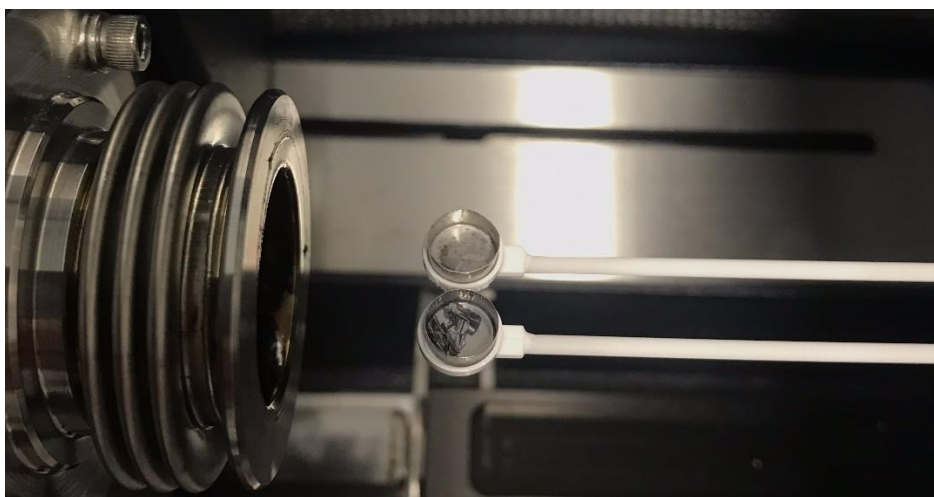


Obr. 23 Závislost vzorků HP

6.7 Strukturální zkoušky

6.7.1 Simultánní termická analýza STA

Je metoda, která v sobě kombinuje termogravimetrii TG a diferenční skenovací kalorimetrii DSC. Tato metoda nám umožňuje tedy sledovat chování hmotnosti látky jako funkce teploty neboli termogravimetrii. Během analýzy je vzorek zahříván řízeným tepelným programem, výstupem této techniky je informace o tepelné stabilitě látky a procesech jako je dehydratace, oxidace nebo rozklad látky. DSC zase zaznamenává rozdíl dodané energie do analyzované látky a inertního standartu, kde výstupem jako funkci teploty je tepelný tok. Z DCS jsme schopni určit při jaké teplotě dochází k exotermní či endotermní reakcím na základě píků zaznamenaných na termogramu, můžeme tedy odhalit i reakce, které nevedou k úbytku hmotnosti jako je např. krystalizace, skelný přechod, tavení. Výhodou je, že měříme najednou při stejných laboratorních podmínkách. Nevýhodou je konstrukční řešení, které snižuje citlivost jednotlivých metod [5].

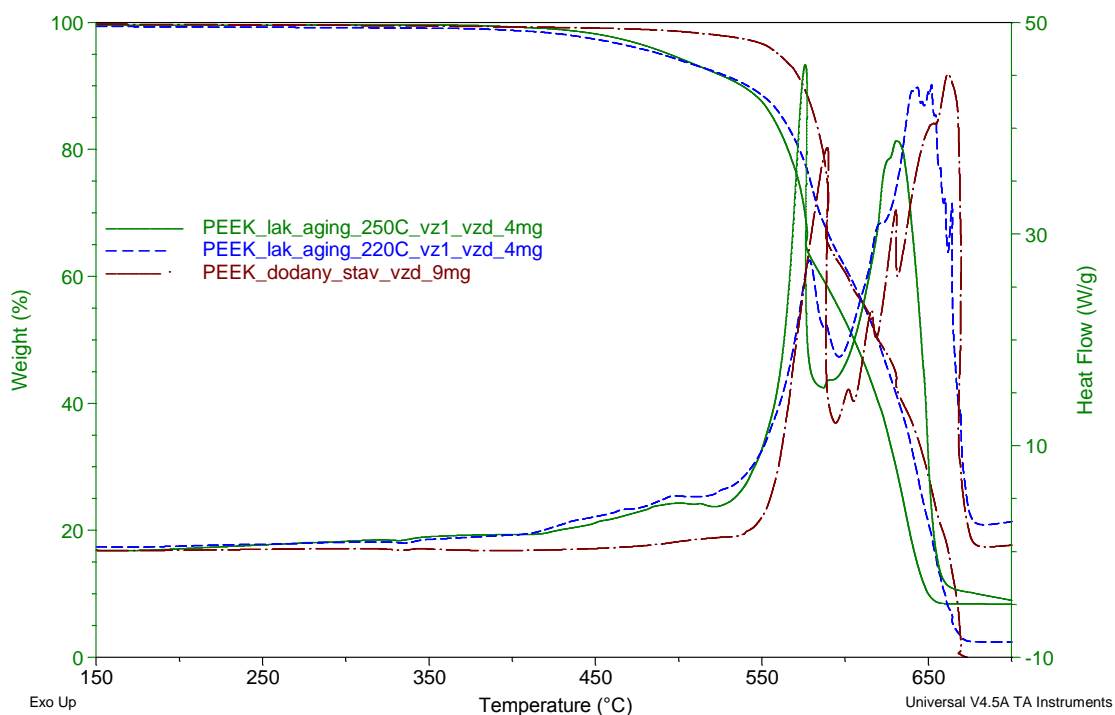


Obr. 24 Zůstatek neznámé látky po analýze STA

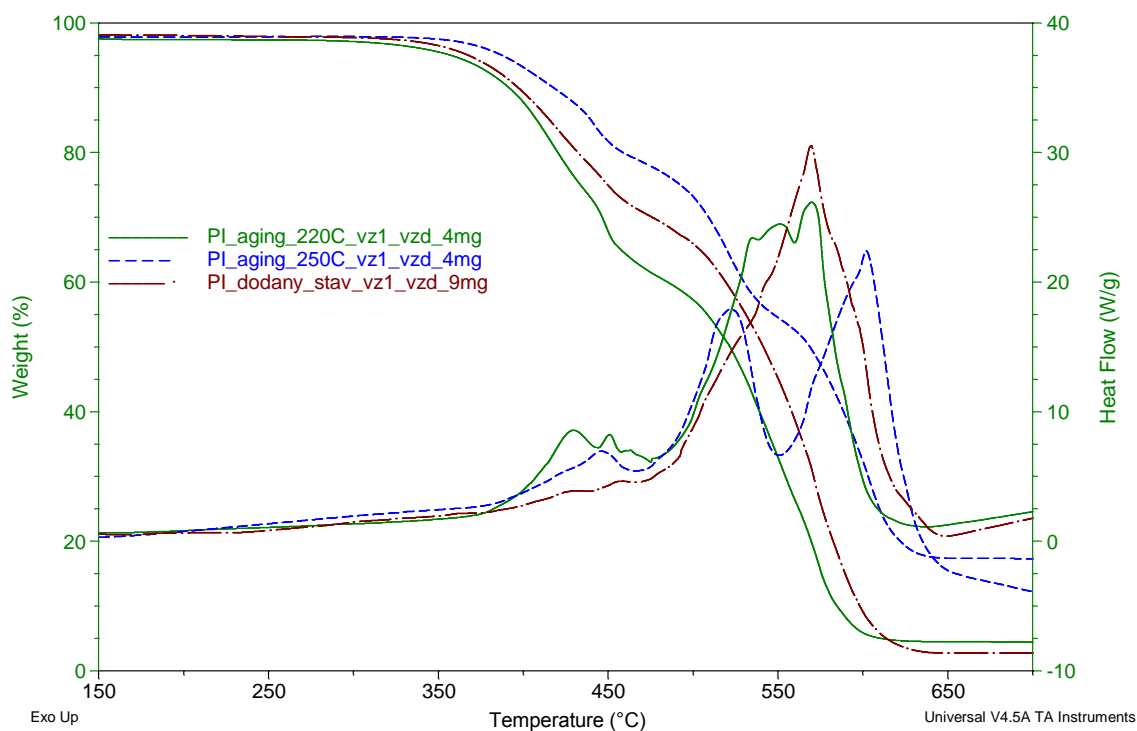
6.7.2 Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací

je spektroskopická technika využívající vibračního pohybu atomů v molekulách. Analyzovaný vzorek je uměle ozářen infračerveným světlem, ve chvíli kdy energie záření koresponduje s energií některých z molekul, dojde k absorpci záření vzorkem. Výsledkem infračerveného spektra je závislost absorbované energie jako funkci vlnové délky, ty lze přiřadit ke konkrétním chemickým vazbám, získáme tedy informace o struktuře látek, které navíc dokážeme identifikovat. Předností FTIR techniky je, že dokáže simultánně sledovat všechny frekvence najednou, díky tomu je provedená analýza výrazně rychlejší, narozdíl od disperzních přístrojů [5].

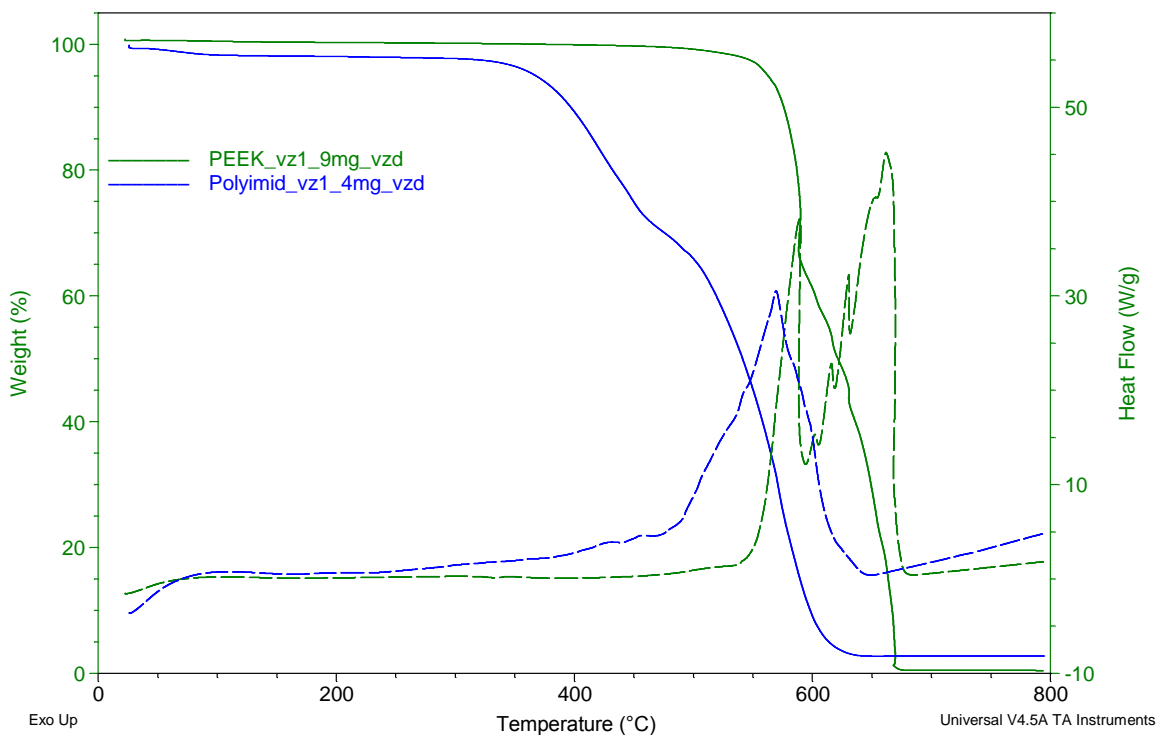
6.7.2.1 Výsledky STA



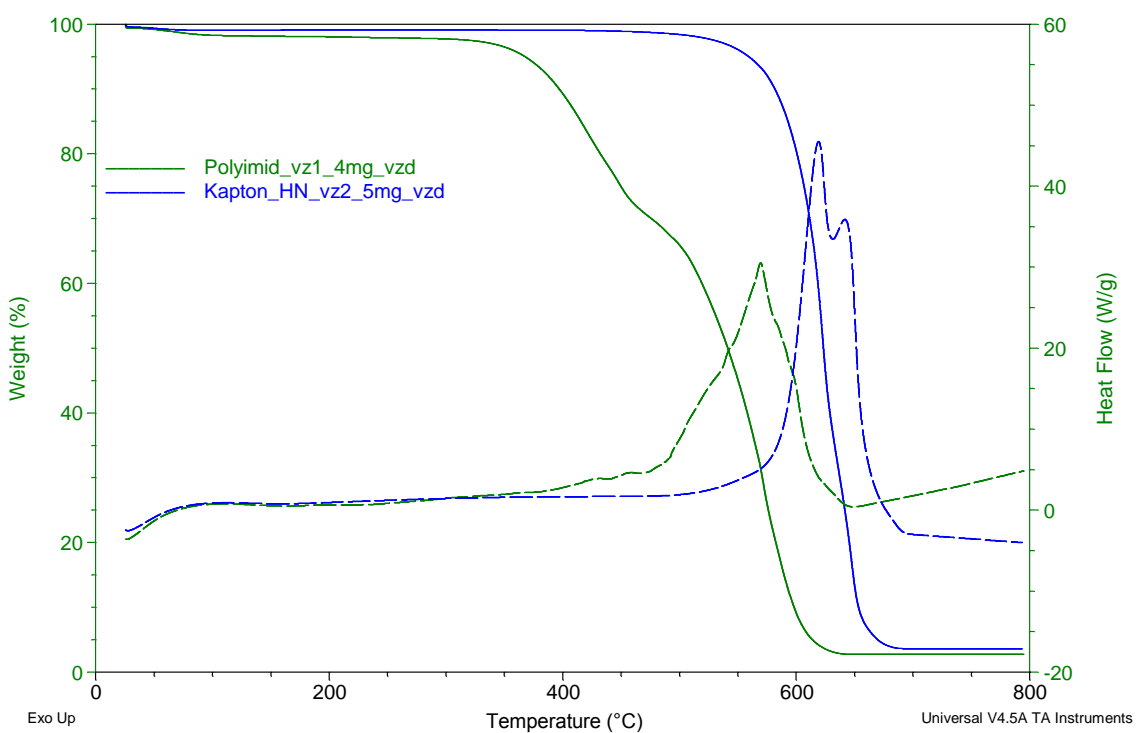
Obr. 25 STA pro vzorek TP_PEEK



Obr. 26 STA pro vzorek TP_PI

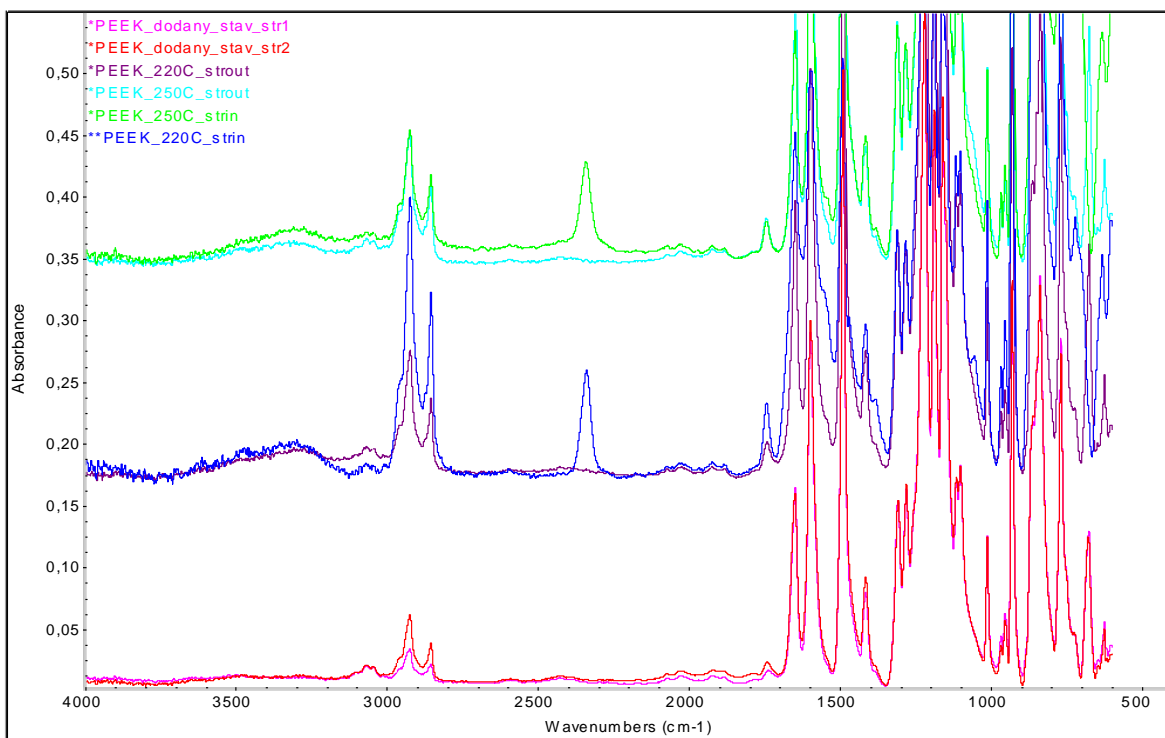


Obr. 27 Porovnání STA pro TP_PEEK a TP_PI

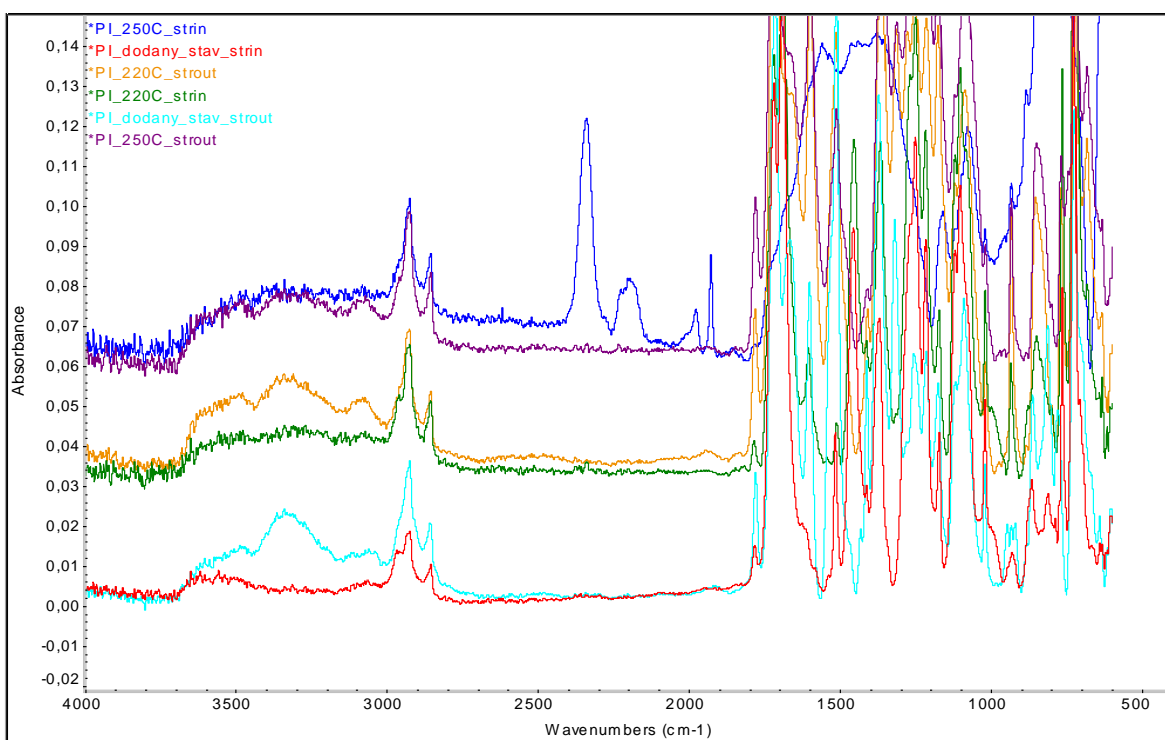


Obr. 28 Porovnání STA pro TP_PI a Kapton

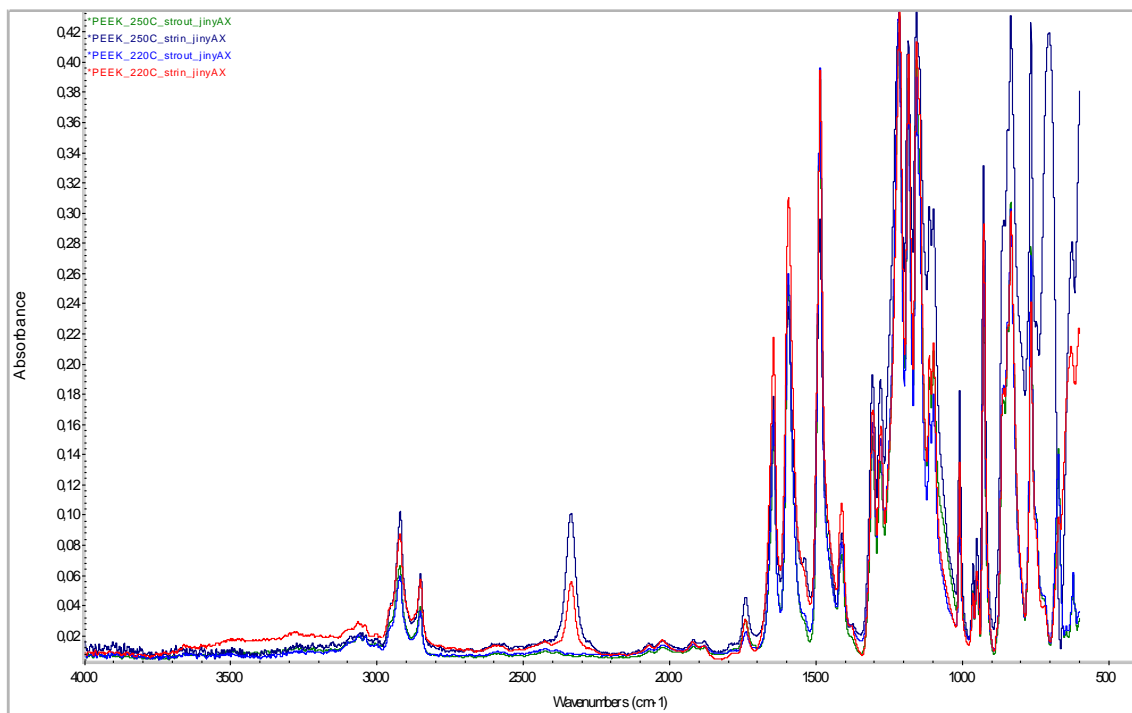
6.7.2.2 Výsledky FTIR



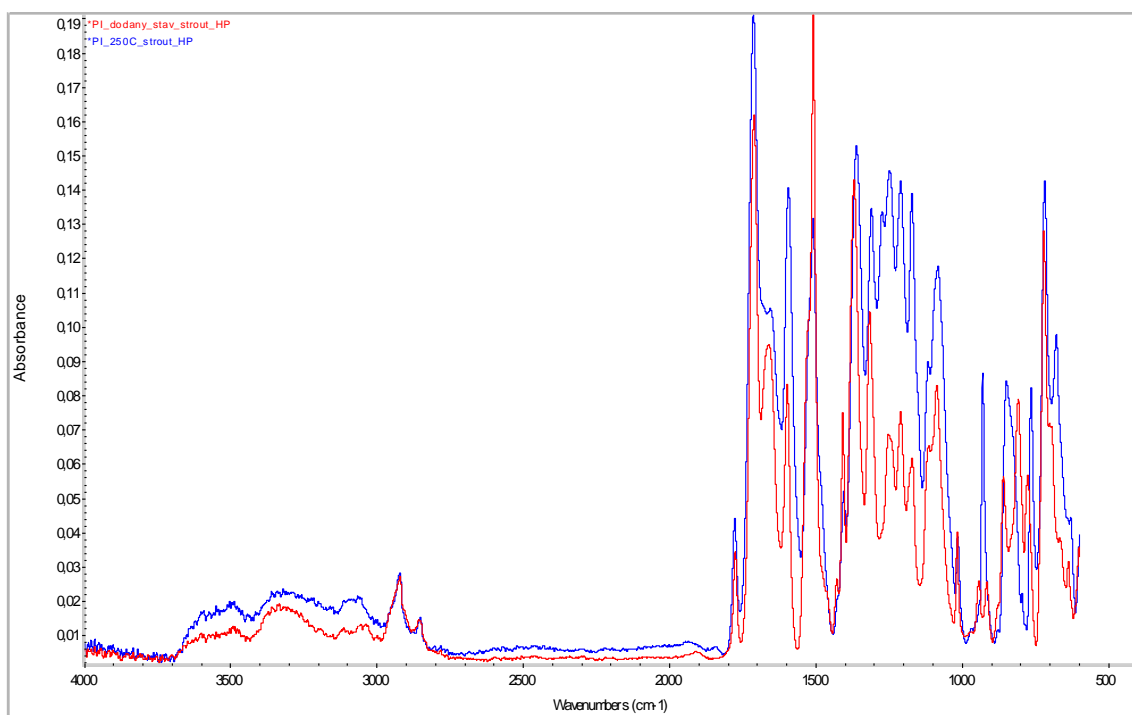
Obr. 29 FTIR pro vzorek TP_PEEK



Obr. 30 FTIR pro vzorek TP_PI



Obr. 31 FTIR pro vzorek AX PEEK



Obr. 32 FTIR pro vzorek HP

6.8 Mikroskopická inspekce

Během přípravy vzorků pro strukturální analýzy jsme zjistili, že během tepelné expozice došlo ke ztrátě přilnavosti mezi žílou izolací. U vzorků stačilo provést při oddělení od homogenní části izolace jeden řez a izolace šla velmi snadno oddělit od mědi.

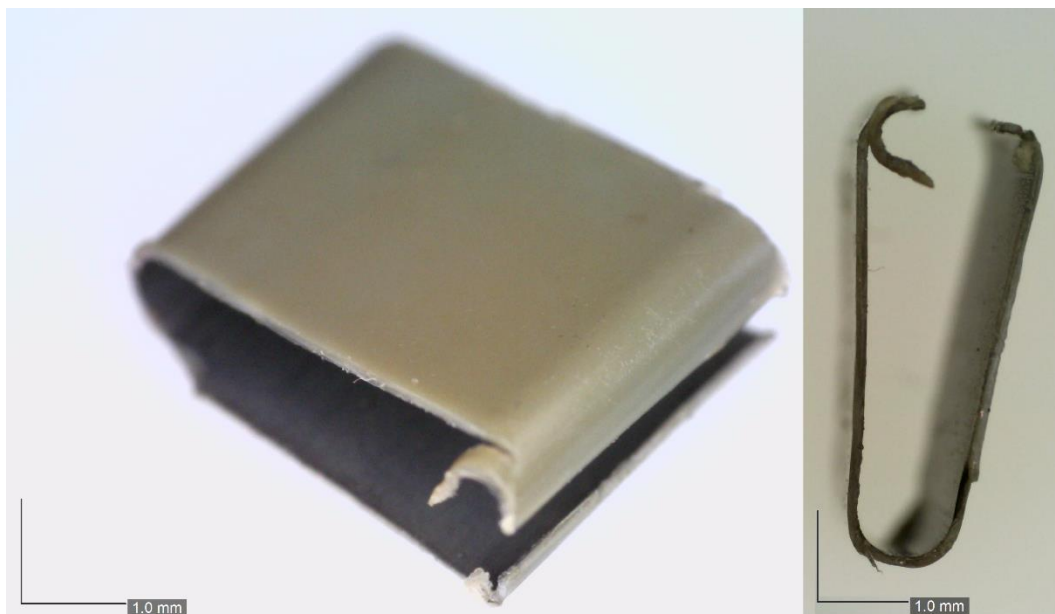
6.8.1 Ztráta přilnavosti izolace k mědi



Obr. 33 Vzorek TP_PI

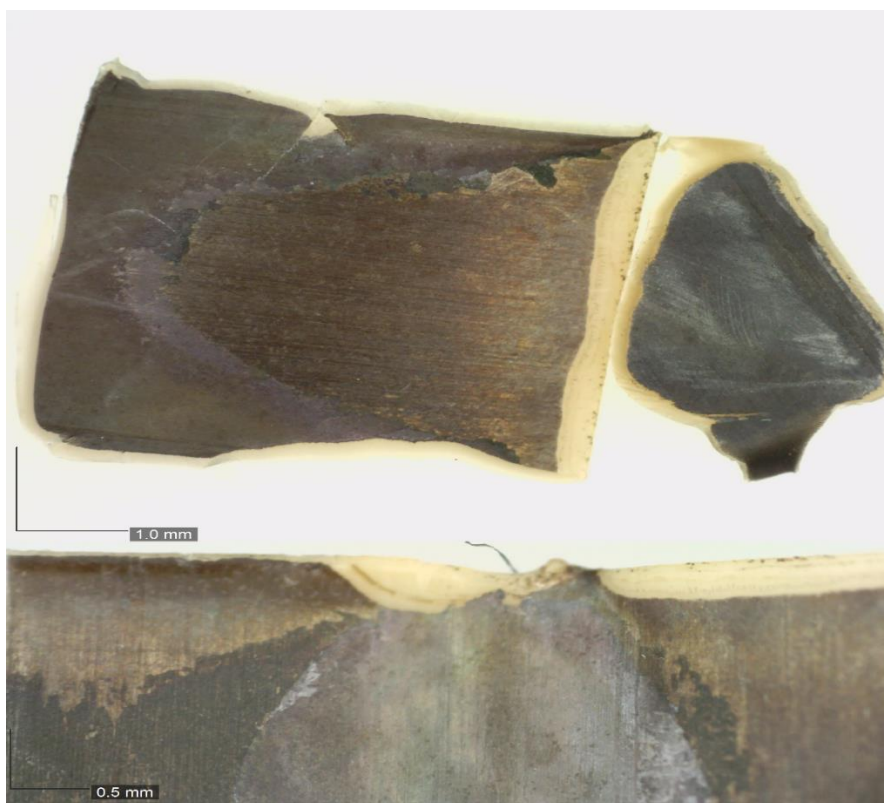


Obr. 34 Vzorek TP_PEEK

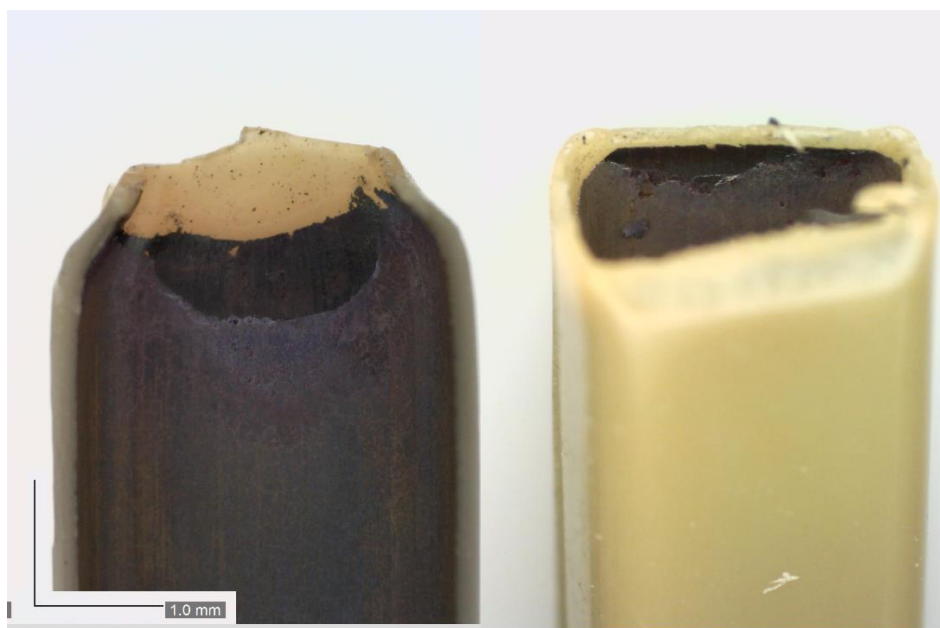


Obr. 35 Vzorek AX_PEEK

6.8.2 Vzniklá nová vrstva na stěně izolantu

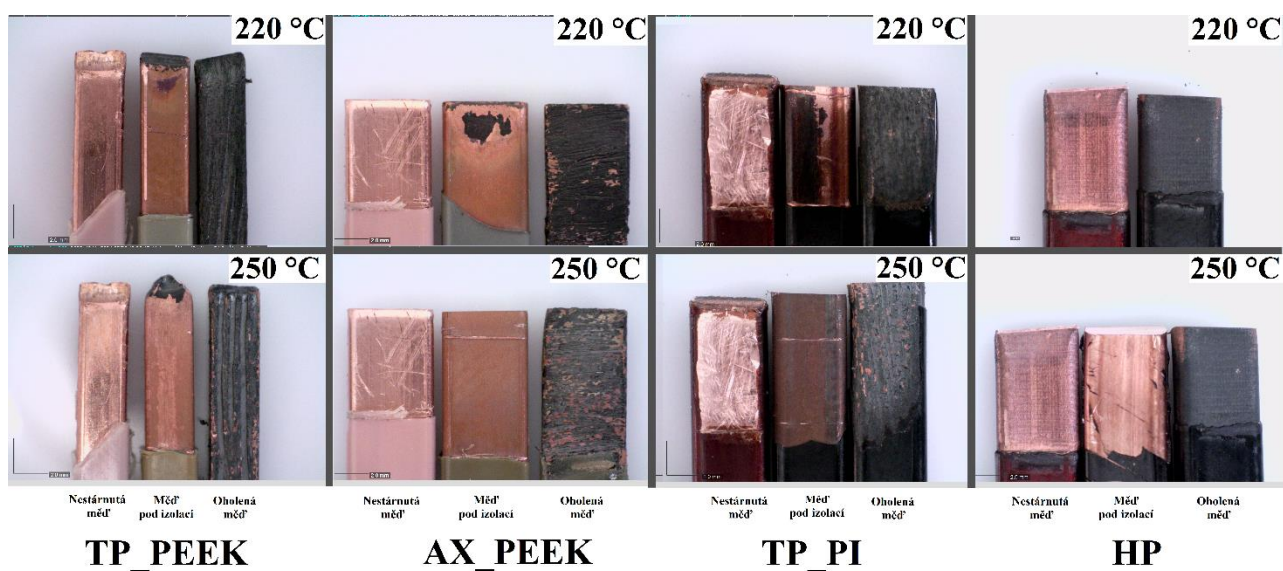


Obr. 36 Vzorek AX_PEEK



Obr. 37 Vzorek TP_PEEK

6.8.3 Změna pigmentu vlivem stárnutí



Obr. 38 Porovnání vizuální změny měděného jádra



Obr. 39 Změna pigmentu TP_PEEK



Obr. 40 Změna pigmentu AX_PEEK



Obr. 41 Změna pigmentu HP



Obr. 42 Změna pigmentu TP_PI

7 Závěr

V první části této práce byly popsány izolační systémy, izolační materiály včetně jejich tepelných tříd, vlivy, které způsobují stárnutí materiálů, nové perspektivní materiály, jejich možné vylepšení a dopady výroby na životní prostředí. Všechny vybrané perspektivní polymery je možné použít pro technologie sériové výroby izolačního systému motorů. Přestože je část práce více zaměřena na elektromobilitu, popsané technologie a materiály naleznou široké uplatnění také v oblasti železniční a lodní dopravy, letectví, trakčních aplikací či průmyslových motorech. Tyto technologie by mohly být nástrojem v boji proti globálnímu oteplování, avšak jak je popsáno v kapitole o dopadu na životní prostředí, představuje zároveň paradoxně další velkou zátěž na životní prostředí, kterou je potřeba inovovat, vyvíjet, zabývat se jí a řešit jí.

Ve druhé části této práce byl popsán experiment, jehož cílem bylo zjištění změn dielektrických ztrát perspektivních polymerů izolace vodičů vinutí na tepelném stárnutí.

Z vypočítaných hodnot změřených proudů dielektrické absorpce viz. tabulka 5, splňují vzorky TP_PEEK a HP minimální hodnotu polarizačního indexu 2,0, kterou norma [58] pro materiály na bázi syntetického reaktoplastu definuje. Vzorky TP_PI tuto hranici splňují pouze v desetiminutovém polarizačním indexu, je to pravděpodobně z důvodu, že se jedná o reaktoplastický materiál, u kterého se dle technologických výrobních postupů připravuje izolovaný vodič v takovém stavu, aby během provozu došlo k jeho plnému dotvrzení. Vzorky AX_PEEK se pohybují velmi těsně na hranici hodnoty stanovené normou. Z trendu vypočtených redukovaných resorpčních křivek se ukazuje, že nejvyšší směrnici mají vzorky HP, dále pak vzorky TP_PEEK, AX_PEEK a TP_PI, což potvrzuje reciprocitu kvality izolace s polarizačními indexy.

Z charakteristik Obr. 18 a Obr. 19 zrychleného stárnutí při obou teplotách vidíme, že téměř u všech vzorků po prvním týdnu tepelné expozice, došlo k vylepšení ztrátového činitele. Tuto reakci jsme predikovali pro vzorky TP_PI a HP, protože se jednalo o reaktoplastické materiály. Vidíme, že vzorky TP_PI svoji hodnotu vylepšily více než vzorky HP, vzhledem k hodnotám RRR a P_i usuzujeme, že vzorky HP mohly být ve vyšším stádiu vytvrzení než vzorky TP_PI, určitou roli hraje také materiálová rozdílnost. Výrazné zlepšení ztrátového činitele po tepelné expozici u vzorků TP_PEEK a AX_PEEK, které jsou na bázi semikrystalického polymeru PEEK, bylo vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o termoplast,

záhadou, dle teoretických předpokladů by se mohla vlivem tepelného namáhání měnit struktura, resp. poměr amorfni a krystalické složky materiálu [102], krystalinitu PEEK výrazně ovlivňuje způsob zchlazení materiálu. Každopádně vlivem tepelného namáhání se očekávalo, že dojde nejdříve k postupnému, až exponenciálnímu růstu ztrátového činitele, dle postupu normy i s ohledem, že norma [85] určení tepelné odolnosti materiál definuje pro 20 000 h, rostoucí charakter by se přesto měl začít projevovat. Výsledek této predikce publikují autoři článku [101], kde tímto trendem během zrychleného tepelného stárnutí ztrátový činitel u polymeru PEEK skutečně roste. Při přípravě vzorku pro strukturální analýzu po tepelném stárnutí jsme zjistili, že zkoumané vzorky TP_PEEK a AX_PEEK jsou vlastně kompozitní materiály. Tyto vzorky jsou tedy vyrobeny podle modelu izolace vinutí viz. obr. 6. Pod vrstvou extrudovaného PEEK polymeru se u obou skupin vzorků nachází ještě jedna, pravděpodobně reaktoplastická, vrstva viz obr. 36 a obr. 37. Tepelnou expozicí tedy došlo k dotvrzení pravděpodobně reaktoplastické vrstvy a vylepšení dielektrických vlastností.

Podíváme-li se na charakteristiky jednotlivých materiálů, vidíme že u materiálu TP_PEEK dojde ke zlepšení ztrátového činitele téměř o řád při obou teplotách. Jeho hodnota s rostoucí expozicí se prakticky nemění, avšak mezi poslední hodnotou a předposlední hodnotou lze zpozorovat charakter malého snížení ztrátového činitele.

U vzorků TP_PI vidíme, že při teplotě 250 °C dosáhneme lepšího vytvrzení než při teplotě 220 °C. Ovšem při teplotě 250 °C se začíná velmi projevovat vliv tepelného namáhání na ztrátový činitel, na rozdíl od stárnutí při 220 °C. Pro obě teploty je také vidět klesající charakter ztrátového činitele při posledním měření.

Vzorky AX_PEEK dosahují stejného zlepšení ztrátového činitele nezávisle na teplotě tepelné expozice. Pro teplotu 250 °C lze zpozorovat rostoucí charakter ztrátového činitele po 336 h stárnutí, tento trend lze vidět i pro teplotu 220 °C, nastává u ní ale až po 840 h stárnutí a charakter růstu není tak strmý jako při teplotě 250 °C. U posledního měření při teplotě 250 °C můžeme také vidět skokové snížení ztrátového činitele jako u předchozích vzorků.

Vzorky HP dosahují lepšího vytvrzení při 250 °C stejně jako vzorky TP_PI. Teplota 250 °C vykazuje kontinuálně zhoršující se izolaci, poté se opět skokovou změnu vylepší hodnota ztrátového činitele téměř jako u všech vzorků. Při teplotě 220 °C dojde k vytvrzení a následnému zlepšení ztrátového činitele, další pozorovatelná změna ale nenastává.

U několika vzorků, především pro vzorky stárnuté při 250 °C, můžeme vidět pro posledního měření náhlé klesající, až skokové vylepšení ztrátového činitele i přesto, že mohl doposud vykazovat rostoucí charakter. Tato změna by mohla být způsobená permitivitou vzduchu. Následkem delaminace smaltované reaktoplastické vrstvy mezi izolací a vodičem. Protože smaltované vodiče se po stárnutí stávají velmi křehké a ztrácí svoji přilnavost ke mědi [62], to potvrzují i [36, 74], navíc ztráta přilnavosti byla zpozorována při přípravě vzorků pro strukturální analýzu, viz Obr. 33, Obr. 34 a Obr. 35. Tepelné namáhání mohlo způsobit dle teoretických předpokladů [5] kromě růstu ztrátového činitele také postupné tvrdnutí a křehnutí izolace. Teoreticky by mohlo dojít ke vzniku a rozšíření vzduchového prostoru mezi izolací a mědí, čímž by permitivita vzduchu vylepšila velikost ztrátového činitele. Toto tvrzení je nutné nebrat s jistotou, neboť se jedná pouze o teorii, kterou nejsme na základě získaných informací schopni vyvrátit, nebo potvrdit. Tuto teorii lehce podporuje i vizuální zjištění a výsledky strukturální analýzy o vzniku nové vrstvy mezi původní izolací a mědí.

U všech testovaných vzorků došlo během stárnutí ke změně pigmentu materiálu, viz. Obr. 39, Obr. 40, Obr. 41 a Obr. 42

Z výsledků FTIR analýz v režimu ATR provedených pro všechny sady vzorků je patrné, že se pro vzorky TP_PEEK, TP_PI a AX_PEEK vyskytuje ve spektrogramech získaných z měření vnitřní strany vzorků (po oddělení od měděného jádra) samostatný spektrální pás s maximem na vlnočtu cca 2340 cm^{-1} . Tento spektrální pás nejspíše souvisí s anorganickou tenkou vrstvou na vnitřní straně polymerní izolace. Zmíněná vrstva je detekována na oddělené izolaci až u vzorků podrobených tepelnému stárnutí a např. dle článku [b86] může být zaznamenána přítomnost anorganických plniva a vytvoření vrstvy na bázi keramiky, která vykazuje vysokou odolnost proti částečným výbojům. Tato vytvořená vrstva je dobře patrná na Obr. 36. a Obr. 37 pro vzorky TP_PEEK a AX_PEEK. U sady vzorků TP_PI byla tato vrstva zjištěna pouze u vzorků stárnutých při 250 °C. U vzorků s izolací z materiálu PEEK se diskutovaná vrstva vytvořila i při teplotě 220 °C, usuzujeme, že daná teplota byla nedostatečná, aby došlo ke vzniku reakce, jejíž produktem by bylo vytvoření zmíněné vrstvy, popř. mohlo být použité jiné plnivo než u vzorků na bázi PEEK, či byla použita menší koncentrace plniva. To ostatně tvrdí článek [b87], ve kterém je popisují, že koncentrace plniva ovlivňuje vznik zmíněné vrstvy. Na základě analýzy FTIR

je vidět, že u vzorků HP se daná vrstva nevytvořila, je tedy pravděpodobně že neobsahují plnivo k vytvoření anorganické vrstvy odolné vůči částečným výbojům.

Vznik diskutované vrstvy potvrzuje také analýza STA, která byla provedena pro vzorky TP_PEEK a TP_PI. Vznik nové vrstvy lze předpokládat pro průběhy PEEK_lak_aging_220C a PEEK_lak_aging_250C. Je zajímavé že vzorek stárnutý při 220 °C vykazuje větší hmotnostní reziduum anorganické vrstvy, než při 250 °C viz. Obr. 25. Průběh tepelného toku pro vzorek TP_PI potvrzuje, že při 220 °C se nevytvořila zmiňovaná vrstva, ale průběh PI_aging_250C její existenci potvrzuje, tyto výsledky korelují s vizuálním zjištěním na Obr. 38, kde je patrné, že vzorky u kterých byla diskutovaná vrstva potvrzena pomocí analýz STA a FTIR, mají na mědi neznámý povlak, zatímco u vzorku TP_PI stárnutém při 220 °C tento povlak není. Tento vzorek má povlak připomínající nanosený lak, mohli bychom tedy usuzovat, že reakce způsobující vznik tenké blíže nespecifikované vrstvy neproběhla. Vzhledem ke zjištěnému hmotnostnímu reziduu viz. Obr. 24 a odolnosti teplotám větším než 600 °C, by plnivo způsobující vznik vrstvy mohlo být na keramické či uhlíkové bázi, dle černé barvy vzorku a zbytku látky v kelímku je uvažováno, že tepelně odolná složka by mohla být na bázi uhlíku. Odlišnost v trendu tepelného toku a úbytku hmotnosti v oblasti mezi teplotou 400 °C a 500 °C může představovat dekompozici organické složky laku, což by dle poměru laku mezi vzorky TP_PEEK a TP_PI odpovídalo. U vzorku TP_PI je patrné větší hmotnostní reziduum. Z porovnání výchozích vzorků TP_PEEK a TP_PI je zřejmé, že TP_PEEK má vyšší tepelnou stabilitu než TP_PI i vyšší teplotu rozkladu. Byla také provedena porovnávací měření (např. TP_PI a Kapton), na jejichž kterých byla potvrzena významná shoda.

Z původního zadání firmy, která nám poskytla jednu polovinu vzorků bylo zjištění čistě fenomenologické chování dielektrických ztrát na tepelném stárnutí. Dodané vzorky ke zkoumání byly velmi nedotvrzené, ale dle slov zástupců firmy se takto dodávají, neboť se dotvrzují během provozu. Pro vyšší výpovědi hodnost by chtělo více vzorků k testování, informace a katalogové listy přímo od výrobce izolovaných vodičů. Podrobnější sledování změn vytvrzování, které proběhlo v prvních 168 hodinách, také poslední část ve které mohlo dojít k delaminaci ovlivňující velikost ztrátového činitele, další strukturální analýzu včetně DSC, která byla provedena pro vzorky před stárnutím, ale z důvodu rozbitého chlazení nebylo možné provést pro porovnání analýzu po stárnutí. Po zjištění, že v materiálu dojde ke vzniku nové pravděpodobně anorganické vrstvy, by bylo vhodné připravit vzorky

materiálových výbrusů a provést mikroskopickou inspekci, dále ke zjištění změn struktury mikroskopickou inspekci pomocí elektronového mikroskopu.

Potvrzení či vyvrácení závěrů komplikuje i fakt, že k dané problematice, zatím není příliš publikací, se kterými by bylo možné porovnat výsledky tohoto experimentu. To ostatně potvrzuje zájem firmy ZF k získání zmíněné charakteristiky dielektrických ztrát na tepelném stárnutí, kterou dosud nikdo včetně výrobců vodičů neprovedl.

..

Literatura

- [1] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [2] STONE, Greg C.; BOULTER, Edward A.; CULBERT, Ian a DHIRANI, Hussein. *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*. IEEE Press series on power engineering. Piscataway: John Wiley, 2004. ISBN 0-471-44506-1.
- [3] MOORE, B.J.; REHDER, R.H. a DRAPER, R.E. Utilizing reduced build concepts in the development of insulation systems for large motors. Online. In: *Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference (Cat. No.99CH37035)*. IEEE, 1999, s. 347-352. ISBN 0-7803-5757-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/EEIC.1999.826237>. [cit. 2023-11-26].
- [4] FORT, E.M. Rotating machine insulation. Online. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. Roč. 25, č. 1, s. 137-140. ISSN 00189367. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/14.45240>. [cit. 2023-11-26].
- [5] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [6] HAMMARSTROM, T. J. A.; BENGTSSON, T. a GUBANSKI, S. M. Partial discharge characteristics in motor insulations under exposure to multi-level inverters. Online. In: *2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP)*. IEEE, 2017, s. 307-310. ISBN 978-1-5386-1194-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2017.8257448>. [cit. 2023-12-18].
- [7] GOCKENBACH, Ernst. High Voltage Engineering. Online. In: PAPAIOU, Konstantin O. (ed.). *Springer Handbook of Power Systems*. Springer Handbooks. Singapore: Springer Singapore, 2021, s. 131-182. ISBN 978-981-32-9937-5. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-981-32-9938-2_3. [cit. 2023-12-18].
- [8] REFAAT, Shady S. a SHAMS, Mohammed A. A review of partial discharge detection, diagnosis techniques in high voltage power cables. Online. In: *2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018)*. IEEE, 2018, s. 1-5. ISBN 978-1-5386-2508-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/CPE.2018.8372608>. [cit. 2024-02-18].

- [9] ČSN EN 60085 ED.2. *Elektrické izolace - Tepelné hodnocení a značení*. Praha: Český normalizační institut, 2008, 28 s. Třídící znak 33 0250.
- [10] CHAPMAN, M.; FROST, N. a BRUETSCH, R. Insulation Systems for Rotating Low-Voltage Machines. Online. In: *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. IEEE, 2008, s. 257-260. ISBN 978-1-4244-2091-9. ISSN 1089-084X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2008.4570323>. [cit. 2024-04-13].
- [11] FROST, N.; CHAPMAN, M. a BRUETSCH, R. Considerations for Rotating Low-Voltage Machine Insulation Designs. Online. In: *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. IEEE, 2008, s. 571-574. ISBN 978-1-4244-2091-9. ISSN 1089-084X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2008.4570397>. [cit. 2024-04-13].
- [12] HUNTSMAN CORPORATION. *Optimal Resin Systems for Trickle and Roll Dip Impregnation*. Online. © 2024. HUNTSMAN transportation. Dostupné z: <https://www.huntsman-transportation.com/EN/processes/processes-for-electronics/trickle-roll-dip-impregnation.html>. [cit. 2024-04-06].
- [13] JAMES, R. E. a SU, Q. Condition Assessment of High Voltage Insulation in Power System Equipment. Online. Institution of Engineering and Technology, 2008. ISBN 9780863417375. Dostupné z: <https://doi.org/10.1049/PBPO053E>. [cit. 2024-04-06].
- [14] BRUETSCH, Rudolf a CHAPMAN, Michael. Insulating systems for high voltage rotating machines and reliability considerations. Online. In: *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. IEEE, 2010, s. 1-5. ISBN 978-1-4244-6298-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2010.5549737>. [cit. 2024-04-14].
- [15] HEIDER, Md Zulfiker; RAHMAN, Mohammad Mominur a AL-ARAINY, A. A. Study of frequency variant tan delta diagnosis for MV cables insulation status assessment. Online. In: *2019 5th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*. IEEE, 2019, s. 260-264. ISBN 978-1-7281-4934-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICAEE48663.2019.8975616>. [cit. 2024-04-08].
- [16] MUDRUŇKOVÁ, Anna. *Elektrotechnické materiály I*. Praha: VOŠ a SPŠ elektrotechnická Františka Křižíka, 2016. ISBN: 978-80-88058-90-8. Dostupné online: <https://publi.cz/epubli/book/353-elektrotechnicke-materialy-i>

- [17] FLORKOWSKI, Marek; KUNIEWSKI, Maciej a MIKRUT, Paweł. Effect of voltage harmonics on dielectric losses and dissipation factor interpretation in high-voltage insulating materials. Online. Electric Power Systems Research. 2024, roč. 226. ISSN 03787796. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109973>. [cit. 2024-04-04].
- [18] UNIVERSITY OF CAMBRIDGE. Loss in dielectrics [online]. [cit. 2024-04-08]. Dostupné z: <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dielectrics/loss.php>
- [19] KOCATEPE, Celal; KUMRU, Celal Fadil; AYAZ, Ramazan; ARIKAN, Oktay a AKCA, Hakan. The influence of voltage and frequency variations on insulation quality of a high voltage cable. Online. In: Eurocon 2013. IEEE, 2013, s. 964-968. ISBN 978-1-4673-2232-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/EUROCON.2013.6625098>. [cit. 2024-04-05].
- [20] BERA, S.C a CHATTOPADHYAY, S. A modified Schering bridge for measurement of the dielectric parameters of a material and the capacitance of a capacitive transducer. Online. Measurement. 2003, roč. 33, č. 1, s. 3-7. ISSN 02632241. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0263-2241\(02\)00040-4](https://doi.org/10.1016/S0263-2241(02)00040-4). [cit. 2024-04-05].
- [21] CHAKRABARTY, Chandan Kumar; AVINASH, A.R. a AHMAD BASRI, A. G. Development of high frequency Tan Delta measurement method for 132kV transmission underground cables. Online. In: 2014 IEEE 2nd International Symposium on Telecommunication Technologies (ISTT). IEEE, 2014, s. 436-441. ISBN 978-1-4799-5982-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ISTT.2014.7238250>. [cit. 2024-04-09].
- [22] FARAHANI, M.; BORSI, H. a GOCKENBACH, E. Dielectric response studies on insulating system of high voltage rotating machines. Online. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2006, roč. 13, č. 2, s. 383-393. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2006.1624283>. [cit. 2024-04-08].
- [23] DEY, D.; CHATTERJEE, B.; CHAKRAVORTI, S. a MUNSHI, S. A Hybrid Filtering Scheme for Proper Denoising of Real-time Data in Dielectric Spectroscopy. Online. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2007, roč. 14, č. 5, s. 1323-1331. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2007.4339496>. [cit. 2024-04-08].

- [24] THOMAS, A.J. a SAHA, T.K. The analysis of DC and AC conductivity in the detection of water tree degradation in XLPE cables. Online. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE, 2005, s. 2081-2088. ISBN 0-7803-9157-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/PES.2005.1489508>. [cit. 2024-04-08].
- [25] ZAENGL, W.S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. I. Theoretical considerations. Online. IEEE Electrical Insulation Magazine. 2003, roč. 19, č. 5, s. 5-19. ISSN 0883-7554. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/MEI.2003.1238713>. [cit. 2024-04-08].
- [26] SATO, Atsushi; IIDUKA, Shinichi a KIMURA, Kouzou. *Magnet Wires for Driving Motors in Electric Vehicles. SEI Technical Review*. 2020, roč. 90, č. S0886A, s. 17-21. ISSN 1343-4349.
- [27] MOREELS, Daan a LEIJNEN, Peter. *THIS INSIDE-OUT MOTOR FOR EVS IS POWER DENSE AND (FINALLY) PRACTICAL*. Online. *IEEE Spectrum*. 2019. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/axial-flux-motor>. [cit. 2024-05-21].
- [28] TAU GROUP. *Fluoropolymers as Primary Insulation in Electric Motors*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.tau.group/post/fluoropolymers-as-primary-insulation-in-electric-motors>. [cit. 2024-05-21].
- [29] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [30] ROSENDAHL NEXTROM. *Hairpin extrusion: Paving the way for 800V and more*. Online. 2023. Dostupné z: <https://rosendahlnextrom.com/cable/news/hairpin-insulation-paving-the-way-for-800v-and-more/>. [cit. 2024-05-21].
- [31] INFINITI RESEARCH. *Winding Wires and Coating Resins for Electric Vehicle Motors – A Market Intelligence Success Story*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.infinitiresearch.com/casestudy/winding-wires-and-coating-resins-for-electric-vehicle-motors-a-market-intelligence-success-story/>. [cit. 2024-05-21].
- [32] CHARGED VIRTUAL CONFERENCE. *Winding Wires and Coating Resins for Electric Vehicle Motors – A Market Intelligence Success Story*. Online. 2021. Dostupné z: <https://chargedevs.com/apr-2021-session/insulation-systems-for-800-v-traction-motors/>. [cit. 2024-05-21].
- [33] TAU GROUP. *PFA MAGNET WIRE A new frontier for high performance stators*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.tau.group/post/pfa-magnet-wire>. [cit. 2024-05-21].

- [34] BARGENDE, Michael; REUSS, Hans-Christian a WAGNER, Andreas (ed.). 20. *Internationales Stuttgarter Symposium*. Online. *Proceedings*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. ISBN 978-3-658-29942-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-29943-9>. [cit. 2024-05-21].
- [35] ITO, Kiyoshi; SHIBATA, Takumi a KAWASAKI, Takashi. Development of High Voltage Wire for New Structure Motor in Full Hybrid Vehicle. Online. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*. 2016, roč. 5, č. 2, s. 272-277. ISSN 2167-4205. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2016-01-1221>. [cit. 2024-05-21].
- [36] BROWN, Kayla; SOUTHWORTH, Jeff; BALENO, Brian; SMITH, DeeDee a SHAIKH, Qasim. *High Voltage E-Motor PEEK Magnet Wire Insulation & Epoxy Secondary Insulation*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.epicresins.com/Content/files/Resources/111721-TechPaper-Epic-Sol.pdf>. [cit. 2024-05-21].
- [37] SLOVICK, Murray. *Taking More Steps Toward Adopting 800-V Systems for EVs*. Online. *Electronic Design*. 2023. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/markets/automotive/article/21260201/electronic-design-taking-more-steps-toward-adopting-800-v-systems-for-evs>. [cit. 2024-05-21].
- [38] VICTREX. *VICTREX Emotor solutions*. Online. © 2024. Dostupné z: <https://www.victrex.com/emotor-solutions>. [cit. 2024-05-21].

- [39] WIENER, Paul. *GaN Advantages Growing in 400V and 800V EV Traction Design*. Online. *Infineon*. Dostupné z: <https://gansystems.com/newsroom/gan-400v-800v-ev-traction/>. [cit. 2024-05-21].
- [40] ROSS, Philip E. Lucid Motors' Peter Rawlinson Talks E-Car Efficiency. Online. *IEEE Spectrum*. 2020. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/lucid-motors-says-ecar-design-all-about-efficiency>. [cit. 2024-05-21].
- [41] NEDELEA, Andrei. *Most Of The EV Industry To Shift To 800 Volts By 2025, Report Says*. Online. *INSIDEEVs*. 2022. Dostupné z: <https://insideevs.com/news/580829/ev-industry-shifting-to-800-volt-2025/>. [cit. 2024-05-21].
- [42] SYENSQO. *E-motors*. Online. © 2024. Dostupné z: <https://www.syensqo.com/en/solutions-market/automotive/emobility/emotorsr>. [cit. 2024-05-21].
- [43] AZO MATERIALS. *Powering Motor Performance with PEEK Extrusions*. Online. 2017. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=13873>. [cit. 2024-05-21].
- [44] SCHNEIDER, Thomas. "800-V systems will dominate the market in the future." Online. *MTZ worldwide*. 2023, roč. 84, č. 4, s. 24-27. ISSN 2192-9114. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s38313-023-1450-7>. [cit. 2024-05-21].
- [45] MOBILITY FORESIGHTS. *Electric vehicle magnet wire market*. Online. Dostupné z: <https://mobilityforesights.com/product/electric-vehicle-magnet-wire-market/>. [cit. 2024-05-21].
- [46] THE GUND COMPANY. *Electrical Insulation Considerations in High-Voltage Electric Vehicle Battery Design*. Online. Dostupné z: <https://thegundcompany.com/electrical-insulation-considerations-electric-vehicle/>. [cit. 2024-05-21].
- [47] ELECTRIC MOTOR ENGINEERING. *The role of Insulating Materials in the electric motor*. Online. Dostupné z: <https://www.electricmotorengineering.com/the-role-of-insulating-materials-in-the-electric-motor/>. [cit. 2024-05-21].
- [48] BALENO, Brian; SMITH, DeeDee; BATAILLEY, Nicolas; MARINO, Luigi; LEE, Victoria et al. *Material Solutions for 800 Volt eMotors, SiC Inverters, and eDrive Systems*. Online. *E-motec*. 2022. Dostupné z: <https://www.e-motec.net/material-solutions-for-800-volt-emotors-sic-inverters-and-edrive-systems>. [cit. 2024-05-22].

- [49] BALENO, Brian. *The Specialty Polymers Advantage in Higher-Voltage E-Mobility*. Online. *E-motec*. 2022. Dostupné z: <https://www.e-motec.net/the-specialty-polymers-advantage-in-higher-voltage-e-mobility>. [cit. 2024-05-22].
- [50] HUNTSMAN CORPORATION. *The future of electric motor insulation: encapsulation for 800-volt architectures*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.huntsman-transportation.com/news/2022-03-The-future-of-electric-motor-insulation-epoxy-impregnation-and-encapsulation-for-800-volt-architectures.html>. [cit. 2024-05-22].
- [51] JOLLEY, David. *Shifting to 800-volt systems: Why boosting motor power could be the key to better electric cars*. Online. *Drivemode*. 2021. Dostupné z: <http://drivemode-h2020.eu/shifting-to-800-volt-systems-why-boosting-motor-power-could-be-the-key-to-better-electric-cars/>. [cit. 2024-05-22].
- [52] E-MOBILITY ENGINEERING. *Insulation*. Online. Dostupné z: <https://www.emobility-engineering.com/thermal-insulation/>. [cit. 2024-05-22].
- [53] MOGHADAM, Davoud Esmaeil; HEROLD, Christoph a ZBINDEN, Rolf. *Electrical Insulation at 800 V Electric Vehicles*. Online. In: *2020 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)*. Tokyo, Japan: IEEE, 2020, s. 115-119. ISBN 978-4-88686-418-5. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9275700>. [cit. 2024-05-22].
- [54] CARLSSON, A.; JOSEFSSON, V.; NATEGH, S.; BOGLIETTI, A. a ARVIDSSON, R. *Insulation System Design for 800 V Traction Motors Used in E-mobility Applications*. Online. In: *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. IEEE, 2022, s. 1321-1326. ISBN 978-1-6654-1432-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICEM51905.2022.9910764>. [cit. 2024-05-22].
- [55] LI, Chuanyang; YANG, Yang; XU, Guoqiang; ZHOU, Yao; JIA, Mengshuo et al. *Insulating materials for realising carbon neutrality: Opportunities, remaining issues and challenges*. Online. *High Voltage*. 2022, roč. 7, č. 4, s. 610-632. ISSN 2397-7264. Dostupné z: <https://doi.org/10.1049/hve2.12232>. [cit. 2024-05-22].
- [56] STÖCK, Martin; LOHMEYER, Quentin a MEBOLDT, Mirko. *Increasing the Power Density of e-motors by Innovative Winding Design*. Online. *Procedia CIRP*. 2015, roč. 36, s. 236-241. ISSN 22128271. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.078>. [cit. 2024-05-22].

- [57] LIANG, Yujie; SUN, Wenjie; LI, Tianyu; CHEN, Yue; CHENG, Yonghong et al. All organic polymer dielectrics for high-temperature energy storage from the classification of heat-resistant insulation grades. Online. *Journal of Polymer Science*. 2023, roč. 61, č. 22, s. 2777-2795. ISSN 2642-4150. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/pol.20230334>. [cit. 2024-05-22].
- [58] ČSN EN 60034-27-4. *Točivé elektrické stroje - Část 27-4: Měření izolačního odporu a polarizačního indexu izolace vinutí točivých elektrických strojů*. Česká agentura pro standardizaci, 2018, 36 s. Třídící znak 35 0000.
- [59] SHAMS GHAHFAROKHI, Payam; PODGORNOVS, Andrejs; CARDOSO, Antonio J. Marques; KALLASTE, Ants; BELAHCEN, Anouar et al. Hairpin Windings for Electric Vehicle Motors: Modeling and Investigation of AC Loss-Mitigating Approaches. Online. *Machines*. 2022, roč. 10, č. 11. ISSN 2075-1702. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/machines10111029>. [cit. 2024-05-22].
- [60] BIAN, Xuejing; ZHAO, Mei; YAO, Tong; ZHANG, Huaqiang a XU, Yongxiang. Design and Comparison of two Axial Flux Motors for Electric Aircraft. Online. In: *2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. IEEE, 2022, s. 1-5. ISBN 978-1-6654-9302-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICEMS56177.2022.9983189>. [cit. 2024-05-22].
- [61] ELORZA AZPIAZU, Leire; ALMANDOZ, Gaizka; EGEA, Aritz; UGALDE, Gaizka a BADIOLA, Xabier. Study of Partial Discharge Inception Voltage in Inverter Fed Electric Motor Insulation Systems. Online. *Applied Sciences*. 2023, roč. 13, č. 4. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app13042417>. [cit. 2024-05-22].
- [62] SZCZEPANSKI, Mateusz; FETOUHI, Louiza; SABATOU, Marie; DREUILHE, Sarah; PIN, Samuel et al. How does PDIV change during isothermal aging of magnet wire. Online. In: *2022 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. IEEE, 2022, s. 266-271. ISBN 978-1-6654-8023-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/EIC51169.2022.9833193>. [cit. 2024-05-22].
- [63] ČSN EN 60034-18-42. *Točivé elektrické stroje - Část 18-42: Elektrické izolační systémy odolné částečným výbojům (typ II), používané v točivých elektrických strojích napájených z měničů napětí - Kvalifikační zkoušky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017, 44 s. Třídící znak 35 0000.

- [64] BAILONI, Martino; NATEGH, Shafigh; GAUSSENS, Benjamin; SHTYKA, Olga a TAJALLIPOUR, Ali. A Study on Insulation Components of High Voltage Electrical Machines Used in Electric Vehicles. Online. In: *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2022, s. 1-6. ISBN 978-1-6654-8025-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/IECON49645.2022.9968892>. [cit. 2024-05-22].
- [65] DAKIN, T. W.; PHILOFSKY, H. M. a DIVENS, W. C. Effect of electric discharges on the breakdown of solid insulation. Online. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics*. 1954, roč. 73, č. 2, s. 155-162. ISSN 0097-2452. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TCE.1954.6372131>. [cit. 2024-05-22].
- [66] TSHILOZ, Kavul; SMITH, Alexander Charles; TUOHY, Paul Michael a FEEHALLY, Tom. Investigation of wire insulation for high-temperature motor windings. Online. *The Journal of Engineering*. 2019, roč. 2019, č. 17, s. 4442-4445. ISSN 2051-3305. Dostupné z: <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8113>. [cit. 2024-05-22].
- [67] GEBAUER & GRILLER. *Winding Wires for E-Mobility*. Online. 2019. Dostupné z: https://www.gg-group.com/fileadmin/user_upload/2_content-fotos/7_service/3_downloads/3_kataloge/winding_wires_05_2019_online.pdf. [cit. 2024-05-22].
- [68] ESSEX FURUKAWA. *High Voltage Winding Wire (HVWW®): Outperforms Mono-Layer (PEEK) for EV Applications*. Online. 2024. Dostupné z: https://essexfurukawa.com/wp-content/uploads/2024/01/EFMW-HVWW-vs-Monolayer_2024-01.pdf. [cit. 2024-05-24].
- [69] HAGEDORN, Jürgen; BLANC, Florian Sell-Le a FLEISCHER, Jürgen (ed.). *Handbook of Coil Winding*. Online. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN 978-3-662-54401-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54402-0>. [cit. 2024-05-24].
- [70] KULAN, Mehmet Caglar; SAHIN, Samet a BAKER, Nick J. An Overview of Modern Thermo-Conductive Materials for Heat Extraction in Electrical Machines. Online. *IEEE Access*. 2020, roč. 8, s. 212114-212129. ISSN 2169-3536. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3040045>. [cit. 2024-05-22].

- [71] ZEUS. *Automotive*. Online. © 2024. Dostupné z: <https://www.zeusinc.com/markets/automotive/tries/automotive.html>. [cit. 2024-05-22]
- [72] MUTO, Daisuke; OYA, Makoto; AOI, Tsuneo a UENO, Takahiro. *A Study on Partial Discharge Phenomenon of the Winding Wires*. Online. *Furukawa Review*. 2014, č. 45, s. 13-21. Dostupné z: https://www.furukawa.co.jp/review/fr045/fr45_04.pdf. [cit. 2024-05-24].
- [73] INOUE, Masashi; TAKAMATSU, Hiromitsu; OGAMI, Masaki; NINOMIYA, Kenta; ITO, Kiyoshi et al. New-Structure Motor for Full Hybrid Electric Vehicle. Online. In: . 2016, -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2016-01-1225>. [cit. 2024-05-22].
- [74] KAVANAGH, Darren F.; GYFTAKIS, Konstantinos N. a MCCULLOCH, Malcolm D. Thermal Degradation Phenomena of Polymer Film on Magnet Wire for Electromagnetic Coils. Online. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2021, roč. 57, č. 1, s. 458-467. ISSN 0093-9994. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3040201>. [cit. 2024-05-22].
- [75] MANCINELLI, Paolo; STAGNITTA, Simone a CAVALLINI, Andrea. Qualification of Hairpin Motors Insulation for Automotive Applications. Online. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017, roč. 53, č. 3, s. 3110-3118. ISSN 0093-9994. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2619670>. [cit. 2024-05-22].
- [76] WIRTH, Felix; NGUYEN, Chien; HOFMANN, Janna a FLEISCHER, Jürgen. Characterization of Rectangular Copper Wire Forming Properties and Derivation of Control Concepts for the Kinematic Bending of Hairpin Coils. Online. *Procedia Manufacturing*. 2020, roč. 47, s. 678-685. ISSN 23519789. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.209>. [cit. 2024-05-22].
- [77] CTI-SYMPOSIUM. *Ajedium™ PEEK Slot Liner Enables 800V eMotor Downsizing & Weight Reduction*. Online. 2023. Dostupné z: <https://cti-symposium.world/ajedium-peek-slot-liner-enables-800v-emotor-downsizing-weight-reduction/>. [cit. 2024-05-24].
- [78] YIN, Weijun; YAKIMOV, Aharon; COMANZO, Holly; SICLOVAN, Oltea; SMIGELSKI, Paul et al. Highly thermally conductive insulation for high power density electric machines. Online. In: *AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum*.

Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019, -. ISBN 978-1-62410-590-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/6.2019-4510>. [cit. 2024-05-22].

[79] DUPONT. *Automotive*. Online. © 2024. Dostupné z: <https://www.dupont.com/industries/automotive.html>. [cit. 2024-05-22].

[b60] článok 10.1109/TIA.2018.2873528 zalití leteckýho alternátoru KULAN, Mehmet Caglar a BAKER, Nick J. Development of a Thermal Equivalent Circuit to Quantify the Effect of Thermal Paste on Heat Flow Through a Permanent Magnet Alternator. Online. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2019, roč. 55, č. 2, s. 1261-1271. ISSN 0093-9994. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2873528>. [cit. 2024-05-22].

[80] MORIKAWA, Atsushi; SUZUKI, Kazunori a ASANO, Kenji. Enameled Wire Having Polyimide-silica Hybrid Insulation Layer Prepared by Sol-gel Process. Online. *Journal of Photopolymer Science and Technology*. 2015, roč. 28, č. 2, s. 151-155. ISSN 0914-9244. Dostupné z: <https://doi.org/10.2494/photopolymer.28.151>. [cit. 2024-05-22].

[81] SIMA, Wenxia; HE, Jiahui; SUN, Potao; YANG, Ming; YIN, Ze et al. Novel nanostructure composite dielectric with high insulation performance: Silica-based nanometer-sized porous composite insulating paper reinforced by ceramic fibers. Online. *Scripta Materialia*. 2020, roč. 181, s. 58-61. ISSN 13596462. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.02.016>. [cit. 2024-05-22].

[82] TOMASKOVA, Tetjana; SVOBODA, Michal; SHLYKEVICH, Alexey a TRNKA, Pavel. Increase the thermal conductivity of high voltage electrical insulation systems. Online. In: *2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*. IEEE, 2015, s. 1-6. ISBN 978-9-0758-1522-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/EPE.2015.7309158>. [cit. 2024-05-22].

[83] LIU, Xue-Jie; CHENG, Meng; ZHANG, Yiyi; XING, Yunqi; DANG, Zhi-Min et al. High-temperature polymer dielectric films with excellent energy storage performance utilizing inorganic outerlayers. Online. *Composites Science and Technology*. 2024, roč. 245. ISSN 02663538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2023.110305>. [cit. 2024-05-22].

- [84] ČSN EN 60851-5 ED.2. *Vodiče pro vinutí - Zkušební metody - Část 5: Elektrické vlastnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 24 s. Třídící znak 34 7303.
- [85] ČSN EN 60216-1 ED.2. *Elektroizolační materiály - Vlastnosti tepelné odolnosti - Část 1: Proces stárnutí a vyhodnocení výsledků zkoušky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 32 s. Třídící znak 34 6416.
- [86] SOUCEK, Jakub a TRNKA, Pavel. A new statistical-physical model to the description of aging of electroinsulating systems. Online. In: *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. IEEE, 2014, s. 463-466. ISBN 978-1-4799-3807-0. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/EPE.2014.6839532>. [cit. 2024-05-22].
- [87] VISHWAKARMA, Manish; PUROHIT, Rajesh; HARSHLATA, V. a RAJPUT, P. Vibration Analysis & Condition Monitoring for Rotating Machines: A Review. Online. *Materials Today: Proceedings*. 2017, roč. 4, č. 2, s. 2659-2664. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.140>. [cit. 2024-05-22].
- [88] BISSONNETTE, Marc R. End-winding vibration monitoring and interpretation. Online. In: *2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. IEEE, 2012, s. 285-290. ISBN 978-1-4673-0487-0. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2012.6251474>. [cit. 2024-05-22].
- [89] BEHERA, Dipti Prakash a NAIKAN, Vallayil N.A. Virtual fault simulation for sympathetic vibrations of rotating machine. Online. In: *2014 IEEE International Advance Computing Conference (IACC)*. IEEE, 2014, s. 905-910. ISBN 978-1-4799-2572-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/IAdCC.2014.6779443>. [cit. 2024-05-22].
- [90] ČSN EN 60034-14 ED.3. *Točivé elektrické stroje - Část 14: Mechanické vibrace určitých strojů s výškou osy od 56 mm - Měření, hodnocení a mezní hodnoty mohutnosti vibrací*. Česká agentura pro standardizaci, 2019, 20 s. Třídící znak 35 0000.
- [91] MELANÇON, Stéphane. *WHAT IS A HAIRPIN MOTOR - BENEFITS & ASSEMBLY PROCESS*. Online. *Laserax*. 2023. Dostupné z: <https://www.laserax.com/blog/hairpin-motor>. [cit. 2024-05-24].

- [92] DITTRICH, Lukáš. *Elektromotor s axiálním magnetickým tokem – Revoluce ve světě elektromobilů?*. Online. *Automobil revue*. 2023. Dostupné z: https://www.automobilrevue.cz/rubriky/clanky/technika/elektromotor-s-axialnim-magnetickym-tokem-revoluce-ve-svete-elektromobilu_49358.html. [cit. 2024-05-24].
- [93] MUTO, Daisuke; IKEDA, Keisuke; TOMIZAWA, Keiichi; FUKUDA, Hideo; KOZAKO, Masahiro et al. *Partial Discharge Characteristics of Winding Wires Utilizing the Cellular Coating*. Online. *Furukawa Electric Review*. 2019, č. 50, s. 50-58. Dostupné z: <https://www.furukawa.co.jp/en/rd/review/fr050/09.html>. [cit. 2024-05-24].
- [94] OTA, Shinya; YAMAUCHI, Masaaki; MIZOGUCHI, Akira; YOSHIDA, Kengo a TAMURA, Yasushi. *Rectangular Magnet Wire for Electric and Hybrid Electric Inverter-Drive Motors*. Online. *SEI TECHNICAL REVIEW*. 2019, č. 88, s. 44-48. Dostupné z: https://sumitomoelectric.com/sites/default/files/2020-12/download_documents/E88-10.pdf. [cit. 2024-05-24].
- [95] CHEN, Beibei; LI, Xiaofang; LI, Xiang; JIA, Yuhan; YANG, Jin et al. *Friction and Wear Properties of Polyimide-Based Composites with a Multiscale Carbon Fiber-Carbon Nanotube Hybrid*. Online. *Tribology Letters*. 2017, roč. 65, č. 3. ISSN 1023-8883. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11249-017-0891-z>. [cit. 2024-05-22].
- [96] MA, Jinming; LIU, Xiangfu; WANG, Rongwen; LU, Chengxu; WEN, Xueqin et al. *Research Progress and Application of Polyimide-Based Nanocomposites*. Online. *Nanomaterials*. 2023, roč. 13, č. 4. ISSN 2079-4991. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/nano13040656>. [cit. 2024-05-22].
- [97] SHIN, Euy-Sik Eugene. *Feasibility of Micro-Multilayer Multifunctional Electrical Insulation (MMEI) System for High Voltage Applications*. Online. In: *2023 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. IEEE, 2023, s. 1-6. ISBN 978-1-6654-9341-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/EIC55835.2023.10177297>. [cit. 2024-05-24].
- [98] NIU, Sen; BAI, Xiaoxue; CHENG, Yimu; QIN, Hao; ZHANG, Yunhe et al. *Tuning high-temperature dielectric properties of poly ether ether ketone by using self-crosslinkable polyetherimide and nanoparticles*. Online. *Polymer Testing*. 2023, roč. 117. ISSN 01429418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107858>. [cit. 2024-05-22].

- [99] HEMMATI, Rasul; WU, Fan a EL-REFAIE, Ayman. Survey of Insulation Systems in Electrical Machines. Online. In: *2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*. IEEE, 2019, s. 2069-2076. ISBN 978-1-5386-9350-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2019.8785099>. [cit. 2024-05-22].
- [100] NEJDL, Radek; MENTLIK, Vaclav a TRNKA, Pavel. New casting materials in large rotary machines. Online. In: *2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*. IEEE, 2013, s. 521-524. ISBN 978-1-4673-4461-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICSD.2013.6619911>. [cit. 2024-05-22].
- [101] KHOWJA, Muhammad Raza; VAKIL, Gaurang; AHMAD, Syed Shahjahan; RAMANATHAN, Ramkumar; GERADA, Chris et al. Life Characterization of PEEK and Nanofilled Enamel Insulated Wires Under Thermal Ageing. Online. *IEEE Access*. 2024, roč. 12, s. 39470-39483. ISSN 2169-3536. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3374637>. [cit. 2024-05-22].
- [102] ABBAS, Karim; BALC, Nicolae; BREMEN, Sebastian a SKUPIN, Marco. Crystallization and Aging Behavior of Polyetheretherketone PEEK within Rapid Tooling and Rubber Molding. Online. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2022, roč. 6, č. 5. ISSN 2504-4494. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/jmmp6050093>. [cit. 2024-05-22].
- [103] SPOLEČNĚ UDRŽITELNĚ. *Kov, plast, sklo, nebo bioplast? A jaké jsou skryté nevýhody těchto materiálů? (1/2)*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.spolecne-udrzitelne.cz/aktuality/inspirace/kov-plast-sklo-nebo-bioplast-a-jake-jsou-skryte-nevyhody-techto-materialu-12/>. [cit. 2024-05-24].
- [104] KHARE, Richa a KHARE, Smriti. Polymer and its effect on environment. Online. *Journal of the Indian Chemical Society*. 2023, roč. 100, č. 1. ISSN 00194522. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100821>. [cit. 2024-05-24].
- [105] Zákon č. 201/2012 Sb. Zákon o ochraně ovzduší. In: *Zákony pro lidi* [online]. AION CS. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201>
- [106] IPCC S.R.O. *Odpadní plasty - odstraňování a recyklace*. Online. 2011. Dostupné z: <https://komunalweb.cz/odpadni-plasty-odstranovani-a-recyklace/>. [cit. 2024-05-24].
- [107] BACHMANN, Marvin; MARXEN, Annika; SCHOMÄCKER, Reinhard a BARDOW, André. High performance, but low cost and environmental impact? Integrated techno-economic and life cycle assessment of polyoxazolidinone as a

- novel high-performance polymer. Online. *Green Chemistry*. 2022, roč. 24, č. 23, s. 9143-9156. ISSN 1463-9262. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/D2GC02400D>. [cit. 2024-05-24].
- [108] VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010. ISBN 978-80-7080-741-5.
- [109] YANG, Yulu; JALALAH, Mohammed; ALSAREII, Saeed A.; HARRAZ, Farid A.; THAKUR, Nandini et al. Plastic wastes (PWs) and microplastics (MPs) formation: Management, migration, and environmental impact. Online. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2024, roč. 12, č. 3. ISSN 22133437. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112926>. [cit. 2024-05-24].
- [110] OJEDA, Telmo. Polymers and the Environment. Online. In: YLMAZ, Faris (ed.). *Polymer Science*. InTech, 2013. ISBN 978-953-51-0941-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/51057>. [cit. 2024-05-24].
- [111] ECHA. *Porozumět nařízení REACH*. Online. Dostupné z: <https://echa.europa.eu/cs/regulations/reach/understanding-reach>. [cit. 2024-05-24].

Přílohy

Stárnutí data pro 250 °C

Čas [h]	Čas	Název vzorku	tgδ
0	0 týden	TP PEEK 3	0,021502
168	1 týden	TP PEEK 3	0,001402
336	2 týden	TP PEEK 3	0,000735
504	3 týden	TP PEEK 3	0,002143
672	4 týden	TP PEEK 3	0,00148
840	5 týden	TP PEEK 3	0,000723
0	0 týden	TP PEEK 4	0,018806
168	1 týden	TP PEEK 4	0,001414
336	2 týden	TP PEEK 4	0,000133
504	3 týden	TP PEEK 4	0,001677
672	4 týden	TP PEEK 4	0,001310
840			0,000960
0	0 týden	Tp PEEK 5	0,023154
168	1 týden	Tp PEEK 5	0,001513
336	2 týden	Tp PEEK 5	0,000137
504	3 týden	Tp PEEK 5	0,001050
672	4 týden	Tp PEEK 5	0,001600
840			0,001030

0	0 týden	TP PI 1	0,013503
168	1 týden	TP PI 1	0,003022
336	2 týden	TP PI 1	0,001256
504	3 týden	TP PI 1	0,002165
672	4 týden	TP PI 1	0,002090
840			0,001850

0	0 týden	TP PI 2	0,011817
168	1 týden	TP PI 2	0,002862
336	2 týden	TP PI 2	0,00151
504	3 týden	TP PI 2	0,00234
672	4 týden	TP PI 2	0,00452
840			0,00234

0	0 týden	TP PI 3	0,011654
---	---------	---------	-----------------

168	1 týden	TP PI 3	0,002685
336	2 týden	TP PI 3	0,00156
504	3 týden	TP PI 3	0,004757
672	4 týden	TP PI 3	0,0205

0	0 týden	Hairpin 1	0,013054
168	1 týden	Hairpin 1	0,008789
336	2 týden	Hairpin 1	0,00723
504	3 týden	Hairpin 1	0,009749
672	4 týden	Hairpin 1	0,0122
840			0,00586

0	0 týden	Hairpin 2	0,013381
168	1 týden	Hairpin 2	0,005936
336	2 týden	Hairpin 2	0,00769
504	3 týden	Hairpin 2	0,00909
672	4 týden	Hairpin 2	0,00933
840			0,00463

0	0 týden	Hairpin 3	0,013452
168	1 týden	Hairpin 3	0,006074
336	2 týden	Hairpin 3	0,008295
504	3 týden	Hairpin 3	0,006816
672	4 týden	Hairpin 3	0,00937
840			0,0101

0	0 týden	Axial 5	0,075789
168	1 týden	Axial 5	0,0106
336	2 týden	Axial 5	0,013532
504	3 týden	Axial 5	0,026
672	4 týden	Axial 5	0,0122

0	0 týden	Axial 6	0,062179
168	1 týden	Axial 6	0,01255
336	2 týden	Axial 6	0,015171
504	3 týden	Axial 6	0,0267
672	4 týden	Axial 6	0,00786

0	0 týden	Axial 7	0,075978
---	---------	---------	-----------------

168	1 týden	Axial 7	0,0144
336	2 týden	Axial 7	0,013419
504	3 týden	Axial 7	0,0347
672	4 týden	Axial 7	0,0183

0	0 týden	Axial 8	0,062551
168	1 týden	Axial 8	0,0176
336	2 týden	Axial 8	0,011316
504	3 týden	Axial 8	0,035
672	4 týden	Axial 8	0,0148

Stárnutí data pro 220 °C

Čas [h]	Čas	Název vzorku	tgδ
0	0 týden	TP PEEK 1	0,022221
168	1 týden	TP PEEK 1	0,001077
336	2 týden	TP PEEK 1	0,001410
504	3 týden	TP PEEK 1	0,001612
672	4 týden	TP PEEK 1	0,001580
840	5 týden	TP PEEK 1	0,001904
1008	6 týden	TP PEEK 1	0,001172
0	0 týden	TP PEEK 2	0,025546
168	1 týden	TP PEEK 2	0,001106
336	2 týden	TP PEEK 2	0,001383
504	3 týden	TP PEEK 2	0,001672
672	4 týden	TP PEEK 2	0,001965
840	5 týden	TP PEEK 2	0,001609
1008	6 týden	TP PEEK 2	0,001840
0	0 týden	TP PI 4	0,015772
168	1 týden	TP PI 4	0,003727
336	2 týden	TP PI 4	0,003434
504	3 týden	TP PI 4	0,002910
672	4 týden	TP PI 4	0,002588

0	0 týden	TP PI 5	0,017191
168	1 týden	TP PI 5	0,004017
336	2 týden	TP PI 5	0,003595
504	3 týden	TP PI 5	0,003028
672	4 týden	TP PI 5	0,002834

0	0 týden	Axial 1	0,062903
168	1 týden	Axial 1	0,018513
336	2 týden	Axial 1	0,008457
504	3 týden	Axial 1	0,014247
672	4 týden	Axial 1	0,018334
840	5 týden	Axial 1	0,015162
1008	6 týden	Axial 1	0,039172

0	0 týden	Axial 2	0,057367
168	1 týden	Axial 2	0,018344
336	2 týden	Axial 2	0,012846
504	3 týden	Axial 2	0,015999
672	4 týden	Axial 2	0,013038
840	5 týden	Axial 2	0,008058
1008	6 týden	Axial 2	0,026364

0	0 týden	Axial 3	0,079218
168	1 týden	Axial 3	0,017521
336	2 týden	Axial 3	0,012186
504	3 týden	Axial 3	0,006816
672	4 týden	Axial 3	0,014987
840	5 týden	Axial 3	0,012920
1008	6 týden	Axial 3	0,013625

0	0 týden	Axial 4	0,060166
168	1 týden	Axial 4	0,013719
336	2 týden	Axial 4	0,014060
504	3 týden	Axial 4	0,013535
672	4 týden	Axial 4	0,015286
840	5 týden	Axial 4	0,018710
1008	6 týden	Axial 4	0,021876

0	0 týden	Hairpin 4	0,014273
---	---------	-----------	-----------------

168	1 týden	Hairpin 4	0,009130
336	2 týden	Hairpin 4	0,010451
504	3 týden	Hairpin 4	0,008464
672	4 týden	Hairpin 4	0,006817
0	0 týden	Hairpin 5	0,013550
168	1 týden	Hairpin 5	0,010922
336	2 týden	Hairpin 5	0,010115
504	3 týden	Hairpin 5	0,005803
672	4 týden	Hairpin 5	0,008973
0	0 týden	Hairpin 6	0,015764
168	1 týden	Hairpin 6	0,006131
336	2 týden	Hairpin 6	0,010564
504	3 týden	Hairpin 6	0,010650
672	4 týden	Hairpin 6	0,008193
0	0 týden	Hairpin 7	0,010916
168	1 týden	Hairpin 7	0,010270
336	2 týden	Hairpin 7	0,010545
504	3 týden	Hairpin 7	0,006438
672	4 týden	Hairpin 7	0,007956

Dielektrická absorpce AX_PEEK

VZOREK	č. 1		č. 2		č. 3		č. 4		č. 5		č. 6		č. 7		č. 8	
T [s]	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce
0	1,93685	-1,567	1,98	-1,194	2,49	-1,63	1,82	-1,31	3,5	-2,7	5,1	-4,2	5,7	-3,5	3,2	-1,87
15	1,29	-0,74	1,185	-0,621	1,36	-0,869	1,28	-0,74	2,1	-1,7	3,6	-2,97	2,1	-2,02	1,7	-0,89
30	1,08	-0,473	0,88	-0,239	1,04	-0,367	0,941	-0,392	1,7	-0,9	2,27	-1,36	1,8	-1,14	0,95	-0,378
60	0,785	-0,067	0,75	-0,144	0,93	-0,246	0,82	-0,218	1,2	-0,5	1,11	-0,542	1,25	-0,387	0,582	-0,149
120	0,639	-0,0569	0,67	-0,096	0,86	-0,156	0,695	-0,156	1	-0,292	0,93	-0,37	0,94	-0,207	0,512	-0,14
180	0,503	-0,0488	0,59	-0,089	0,81	-0,152	0,589	-0,152	0,97	-0,221	0,85	-0,287	0,97	-0,178	0,457	-0,132
240	0,488	-0,0427	0,51	-0,051	0,75	-0,146	0,527	-0,146	0,95	-0,191	0,81	-0,269	0,88	-0,154	0,435	-0,121
300	0,431	-0,0431	0,46	-0,039	0,7	-0,145	0,506	-0,145	0,87	-0,175	0,76	-0,247	0,91	-0,135	0,405	-0,128
360	0,405	-0,04	0,41	-0,031	0,65	-0,142	0,497	-0,142	0,81	-0,164	0,66	-0,232	0,68	-0,133	0,39	-0,126
420	0,396	-0,0387	0,38	-0,03	0,66	-0,139	0,5	-0,139	0,8	-0,153	0,59	-0,204	0,62	-0,129	0,374	-0,128
480	0,368	-0,0358	0,36	-0,023	0,65	-0,133	0,499	-0,129	0,77	-0,144	0,62	-0,174	0,71	-0,129	0,37	-0,114
540	0,323	-0,0331	0,34	-0,02	0,64	-0,134	0,48	-0,125	0,74	-0,137	0,59	-0,157	0,53	-0,128	0,369	-0,1132
600	0,278	-0,0309	0,32	-0,0187	0,62	-0,129	0,492	-0,124	0,66	-0,136	0,58	-0,143	0,56	-0,123	0,369	-0,1124
660	0,287	-0,0291	0,32	-0,0154	0,63	-0,127	0,498	-0,123	0,61	-0,133	0,61	-0,144	0,51	-0,117	0,368	-0,112
720	0,294	-0,0258	0,3	-0,0131	0,62	-0,125	0,429	-0,122	0,59	-0,132	0,59	-0,141	0,54	-0,119	0,366	-0,11
780	0,326	-0,0232	0,31	-0,011	0,61	-0,121	0,428	-0,121	0,56	-0,133	0,61	-0,139	0,53	-0,12	0,364	-0,089
840	0,258	-0,0203	0,3	-0,0107	0,59	-0,119	0,422	-0,121	0,56	-0,131	0,6	-0,14	0,51	-0,122	0,366	-0,086
900	0,271	-0,0178	0,29	-0,0103	0,58	-0,12	0,418	-0,122	0,53	-0,132	0,61	-0,138	0,52	-0,121	0,363	-0,087

Dielektrická absorpce TP_PEEK

VZOREK	č. 1		č. 2		č. 3		č. 4		č. 5	
T [s]	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce
0	2,086	-0,69731	1,9621	-2,059	2,0313	-2,0926	2,05252	-2,02578	2,025	-2,05276
15	0,6153	-0,5461	0,4593	-0,4348	0,5408	-0,51557	0,6737	-0,6821	0,7864	-0,7312
30	0,3524	-0,3524	0,2631	-0,2421	0,3421	-0,3417	0,4306	-0,4235	0,4327	-0,4216
60	0,1851	-0,1821	0,1251	-0,1106	0,1972	-0,1906	0,2415	-0,2416	0,2254	-0,2192
120	0,0911	-0,0833	0,05311	-0,04112	0,103	-0,101	0,1205	-0,1135	0,1021	-0,1004
180	0,05924	-0,05365	0,03626	-0,02505	0,0631	-0,06424	0,07011	-0,0641	0,06155	-0,05933
240	0,04364	-0,03651	0,03105	-0,01701	0,05199	-0,04842	0,04459	-0,04362	0,04135	-0,03924
300	0,0339	-0,0269	0,02512	-0,01465	0,03878	-0,03821	0,03163	-0,03103	0,02913	-0,02711
360	0,02628	-0,02083	0,02372	-0,01336	0,03191	-0,02704	0,02577	-0,02243	0,02122	-0,01977
420	0,02323	-0,01818	0,0202	-0,01178	0,02467	-0,0228	0,01932	-0,01668	0,01613	-0,01465
480	0,01822	-0,01416	0,01806	-0,00943	0,02012	-0,01766	0,01552	-0,01314	0,01317	-0,01151
540	0,01631	-0,01338	0,0174	-0,00888	0,01832	-0,01502	0,01226	-0,01103	0,01022	-0,00874
600	0,01324	-0,01039	0,01583	-0,00805	0,01548	-0,0136	0,01092	-0,00892	0,0087	-0,00704
660	0,01232	-0,00897	0,0148	-0,00746	0,01383	-0,01248	0,00941	-0,0067	0,00744	-0,00578
720	0,01211	-0,00808	0,01415	-0,00621	0,01226	-0,01016	0,00817	-0,0064	0,00641	-0,00486
780	0,00985	-0,00693	0,01303	-0,00614	0,01104	-0,00946	0,00771	-0,00481	0,00567	-0,00359
840	0,00984	-0,00572	0,0125	-0,00592	0,0097	-0,00867	0,00662	-0,0045	0,00523	-0,00323
900	0,00937	-0,00489	0,01191	-0,00529	0,00912	-0,00713	0,0057	-0,0043	0,00483	-0,00281

Dielektrická absorpce TP_PI

VZOREK	č. 1		č. 2		č. 3		č. 4		č. 5	
T [s]	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce
0	0,0989	-0,0681	0,4438	-0,3269	0,1722	-0,1316	0,4586	-0,2169	0,3004	-0,1647
dek 15	0,0704	-0,0455	0,3041	-0,2738	0,1322	-0,0924	0,2006	-0,1448	0,1436	-0,1048
30	0,0631	-0,0371	0,2424	-0,1801	0,1196	-0,0654	0,1612	-0,1061	0,1170	-0,0810
adek 60	0,0507	-0,0231	0,1892	-0,1149	0,0910	-0,0477	0,1301	-0,0782	0,0928	-0,0552
120	0,0414	-0,0162	0,1639	-0,0795	0,0681	-0,0309	0,1027	-0,0516	0,0701	-0,0371
180	0,0309	-0,0146	0,1240	-0,0606	0,0613	-0,0263	0,0944	-0,0415	0,0622	-0,0280
240	0,0281	-0,0109	0,1073	-0,0486	0,0550	-0,0213	0,0830	-0,0361	0,0552	-0,0241
300	0,0242	-0,0098	0,0972	-0,0428	0,0531	-0,0203	0,0770	-0,0318	0,0489	-0,0211
360	0,0239	-0,0081	0,0876	-0,0364	0,0499	-0,0194	0,0752	-0,0298	0,0476	-0,0172
420	0,0218	-0,0070	0,0788	-0,0313	0,0472	-0,0152	0,0691	-0,0269	0,0463	-0,0160
480	0,0215	-0,0061	0,0697	-0,0307	0,0461	-0,0138	0,0638	-0,0231	0,0404	-0,0142
540	0,0201	-0,0055	0,0656	-0,0266	0,0434	-0,0109	0,0619	-0,0204	0,0417	-0,0132
adek 600	0,0197	-0,0063	0,0623	-0,0232	0,0436	-0,0096	0,0574	-0,0197	0,0399	-0,0118
660	0,0194	-0,0047	0,0589	-0,0214	0,0410	-0,0108	0,0551	-0,0188	0,0397	-0,0102
720	0,0194	-0,0046	0,0574	-0,0215	0,0380	-0,0103	0,0553	-0,0188	0,0378	-0,0106
780	0,0184	-0,0036	0,0547	-0,0184	0,0398	-0,0099	0,0506	-0,0182	0,0369	-0,0088
840	0,0191	-0,0034	0,0526	-0,0155	0,0373	-0,0084	0,0495	-0,0166	0,0355	-0,0086
adek 900	0,0193	-0,0026	0,0498	-0,0173	0,0405	-0,008	0,0471	-0,0179	0,0345	-0,0080

Dielektrická absorpce HP

VZOREK	č. 1		č. 2		č. 3		č. 4		č. 5		č. 6		č. 7		č. 8	
T [s]	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce	Absorpce	Resorpce
0	11,7	-11,4	10,2	-9,7	18	-19,6	8	-6	1,88	-1,43	28	-16	19	-10,5	10,8	-9,6
15	3,4	-3,2	0,4	-1,9	9,2	-5,7	1,4	-0,97	0,48	-0,38	10,1	-9,6	4,48	-3,4	2,73	-2,5
30	2,3	-2,63	0,16	-0,34	3,51	-3	0,568	-0,27	0,27	-0,249	5,3	-4,9	2,7	-2,1	1,94	-1,76
60	1,13	-1,3	0,1	-0,31	1,33	-1	0,074	-0,015	0,142	-0,145	2,29	-2,31	0,76	-1,29	1,24	-1,11
120	0,49	-0,46	0,0548	-0,046	0,42	-0,39	0,0103	-0,0093	0,087	-0,097	0,537	-0,28	0,68	-0,69	0,731	-0,627
180	0,35	-0,288	0,0423	-0,0144	0,24	-0,21	0,05	-0,0082	0,065	-0,082	0,301	-0,111	0,62	-0,46	0,513	-0,428
240	0,25	-0,2	0,0301	-0,007	0,15	-0,086	0,0031	-0,0068	0,056	-0,069	0,241	-0,01733	0,58	-0,32	0,381	-0,303
300	0,24	-0,169	0,0089	-0,0064	0,12	-0,065	0,002	-0,00038	0,047	-0,064	0,22	-0,0143	0,53	-0,25	0,318	-0,241
360	0,179	-0,189	0,0033	-0,0041	0,06	-0,0702	0,0016	-0,00033	0,048	-0,057	0,194	-0,0104	0,48	-0,19	0,266	-0,184
420	0,17	-0,114	0,0022	-0,0039	0,059	-0,0253	0,00121	-0,00034	0,045	-0,051	0,188	0,035	0,49	-0,15	0,231	-0,143
480	0,183	-0,074	0,0017	-0,0044	0,08	-0,031	0,00103	-0,0003	0,036	-0,05	0,195	-0,061	0,44	-0,12	0,212	-0,123
540	0,154	-0,062	0,0014	-0,0028	0,029	-0,0157	0,00085	-0,00028	0,034	-0,048	0,186	-0,047	0,43	-0,09	0,194	-0,101
600	0,119	-0,054	0,0013	-0,002	0,049	-0,0009	0,00049	-0,00025	0,029	-0,047	0,168	-0,036	0,46	-0,077	0,175	-0,084
660	0,093	-0,046	0,0009	-0,0012	0,051	-0,0003	0,0009	-0,0003	0,034	-0,048	0,171	-0,03	0,41	-0,058	0,155	-0,078
720	0,106	-0,038	0,0008	-0,0006	0,053	-0,0001	0,00052	-0,00028	0,033	-0,045	0,173	-0,024	0,37	-0,047	0,149	-0,072
780	0,083	-0,028	0,0007	-0,0006	0,055	-0,0002	0,00075	-0,00026	0,028	-0,048	0,174	-0,027	0,38	-0,043	0,137	-0,062
840	0,109	-0,043	0,0006	-0,0005	0,067	-0,0001	0,00053	-0,00026	0,022	-0,049	0,172	-0,019	0,35	-0,042	0,134	-0,048
900	0,092	-0,025	0,0005	-0,0003	0,038	-0,0001	0,00056	-0,00029	0,02	-0,046	0,168	-0,02	0,35	-0,036	0,127	-0,046