

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

VLIV ADITIV NA ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI EPOXIDOVÝCH PRYSKYŘIC

ADDITIVES EFFECT ON ELECTRICAL PROPERTIES OF THE EPOXY RESINS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Šebesta

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Frk, Ph.D.

BRNO 2016



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Petr Šebesta

ID: 146966

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Vliv aditiv na elektrické vlastnosti epoxidových pryskyřic

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zpracujte rešerši pojednávající o současném stavu a vývoji v oblasti elektroizolačních zalévacích hmot na bázi epoxidových pryskyřic používaných v elektrotechnickém průmyslu, včetně požadavků kladených na jejich vlastnosti. Prostudujte podstatu fyzikálních dějů odehrávajících se ve struktuře dielektrických materiálů a seznamte se s diagnostickými metodami používanými pro stanovení elektrických vlastností dielektrických materiálů ve stejnosměrném a střídavém elektrickém poli podle příslušných ČSN norem.

Ve spolupráci s firmou SYNPO, a. s. Pardubice si připravte několik sad vzorků epoxidových pryskyřic s různým druhem aditiva a proměřte jejich elektrické vlastnosti ve střídavém a stejnosměrném elektrickém poli. Teplotní rozsah volte s přihlédnutím k příslušné tepelné třídě materiálu. Dosažené výsledky graficky zpracujte, matematicky vyhodnoťte a podejte jejich možnou fyzikální interpretaci. Diskutujte možný přínos aditiv na materiálové vlastnosti složené soustavy ve srovnání se základním materiálem.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucho práce.

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 26.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Práce rozebírá současný stav ve výrobě a vývoji zalévacích hmot na bázi epoxidových pryskyřic. Práce probíhala ve spolupráci s firmou SYNPO, a.s. Pardubice, která poskytla vzorky pryskyřic s různými aditivami k měření. Práce je rozdělena do tří teoretických a jedné praktické kapitoly.

První kapitola pojednává o dielektrících obecně. Zabývá se jejich charakteristickými vlastnostmi a ději v nich probíhajícími. Druhá kapitola probírá epoxidové pryskyřice, jejich složení, výrobu a aplikaci ve výrobě. Třetí kapitola nabízí pohled na měřicí metody používané v elektrotechnice pro diagnostiku dielektrik.

V praktické části je popsán způsob výroby vzorků a jejich složení a následně způsob jejich měření s vyhodnocením naměřených dat.

Abstract:

Work was carried out in collaboration with SYNPO, Inc. Pardubice, which provided samples resins with various additives for measurement. The work is divided into three theoretical and one practical chapters.

The first chapter focuses on dielectrics in general. It deals with their properties and storyline running in them. The second chapter discusses epoxy resins, their formulation, production and application in manufacturing. The third chapter offers a view of the measurement methods used for diagnosing electrical dielectrics.

The practical part describes the preparation of samples and their composition, and consequently their measurement with the evaluation of measurement data.

Klíčová slova:

Dielektrika, izolanty, epoxidová pryskyřice, pryskyřice, Tettex, aditiva, výroba

Keywords:

Dielectrics, insulators, epoxy resin, resin, Tettex, additives, production

Bibliografická citace díla:

ŠEBESTA, P. *Vliv aditiv na elektrické vlastnosti epoxidových pryskyřic*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 76 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Frk, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Vliv aditiv na elektrické vlastnosti epoxidových pryskyřic* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Obsah

Úvod.....	5
1 Teoretická část: Dielektrika a izolanty.....	6
1.1 Definice dielektrik a izolantů.....	6
1.2 Základní vlastnosti dielektrik a izolantů.....	6
1.2.1 Dielektrické ztráty.....	6
1.2.1 Relativní permitivita.....	7
1.2.2 Ztrátový činitel.....	8
1.2.3 Vnitřní a povrchová rezistivita.....	10
1.2.4 Elektrická pevnost.....	12
1.2.5 Polarizace.....	13
1.2.6 Vodivost.....	16
1.2.7 Dielektrické ztráty.....	17
1.3 Druhy dielektrik a izolantů.....	17
1.3.1 Syntetické makromolekulární látky.....	18
1.3.2 Rozdělení plastů podle teplotního chování.....	19
1.3.3 Přísady (aditiva) plastů.....	21
2 Teoretická část: Reaktivní pryskyřice.....	22
2.1 Epoxidové pryskyřice.....	23
2.2 Výroba epoxidové pryskyřice.....	25
2.3 Elektroizolační zalévací hmoty.....	29
2.3.1 Epoxidové zalévací hmoty.....	30
2.3.2 Silikonové zalévací hmoty.....	31
2.3.3 Polyuretanové zalévací hmoty.....	34
2.4 Technologie výroby elektroizolačních zalévacích hmot.....	36
2.5 Defekty v zalévacích hmotách.....	38
2.6 Způsoby aplikace zalévacích hmot.....	41
2.6.1 Technologie Resinrich.....	41
2.6.2 Technologie VPI (Vacuum Pressure Impregnation).....	41
2.6.3 Porovnání Resinrich a VPI.....	42
3 Teoretická část: Metody měření.....	42
3.1 Stejnoseměrné měřicí metody.....	42
3.1.1 Metoda měření absorpčních a resorpčních charakteristik.....	43
3.1.2 Voltampérová metoda.....	43
3.1.3 Metoda Wheatstonova můstku.....	44
3.1.4 Kompenzační metoda.....	44
3.2 Střídavé měřicí metody.....	45
3.2.1 Metoda Scheringova můstku.....	45
3.2.2 Metoda čtyřkapacitního můstku.....	46
Praktická část.....	48
4 Použité vzorky.....	48
4.1 Plnivo.....	48
4.2 Tvrdidlo.....	48
4.3 Flexibilizátor.....	48
4.4 Urychlovač.....	49
4.5 Pigmentová pasta.....	49

5 Výroba vzorku	49
6 Příprava vzorků.....	51
7 Měřicí soustava	54
7.1 Tettex 2830/2831 – analyzátor olejů a pevných dielektrik.....	54
7.2 Tettex 2914 – testovací komora.....	55
8 Sestavení měřicího pracoviště.....	57
.....	58
.....	59
9 Naměřené a zpracované hodnoty	60
Závěr.....	69
Bibliografie.....	70
Seznam použitých symbolů.....	72
Seznam použitých obrázků.....	72
Seznam použitých tabulek.....	73

Úvod

Epoxidové pryskyřice se začaly vyrábět přibližně v polovině minulého století. Základní pryskyřice jsou viskózní kapaliny, které tvoří lineární řetězce. Po smísení s tvrdidly dochází k zesíťování a vzniká struktura poměrně hustě síťovaného polymeru. V průběhu několika desítek let nacházely uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích. Můžeme se s nimi proto setkat například v průmyslu nátěrových hmot, při výrobě lepidel, tmelů, zalévacích a krycích hmot. Epoxidové pryskyřice se vyznačují velmi dobrými vlastnostmi, jako jsou chemická odolnost, odolnost proti povětrnostnímu stárnutí, elektroizolační vlastnosti a jiné. V kombinaci se skleněnými, uhlíkovými, borovými a aramidovými vlákny je možno z epoxidových pryskyřic připravit kompozitní materiály. Na druhé straně ale vykazují vlastnosti, které je třeba s ohledem na jejich aplikace vylepšit.

Výhodou plastů obecně je, že se dají velmi snadno modifikovat. Aditiva jsou běžnou součástí epoxidových pryskyřic a díky nim lze upravovat jejich elektrické, tepelné i mechanické vlastnosti. Cílem této práce je prozkoumat vliv aditiv právě na elektrické vlastnosti epoxidových pryskyřic.

1 Teoretická část: Dielektrika a izolanty

1.1 Definice dielektrik a izolantů

Dielektrika a izolanty tvoří velmi rozsáhlou skupinu elektrotechnických materiálů, které se v praxi používají k různým účelům. Látku, která neobsahuje žádné volné nosiče náboje (a nevede tedy elektrický proud), nazýváme ideální izolant.

Hlavní technickou vlastností izolantu je tedy schopnost klást odpor průchodu proudu. Využívají se především k izolování vodivých těles s různým potenciálem. Jejich hlavním parametrem je rezistivita. Každý reálný izolant však obsahuje určité množství volných nosičů náboje, které mohou být pozůstatkem komponent z výroby nebo jiných nečistot, nebo které v něm vznikají za daných podmínek působením různých vlivů (záření, teplo, absorpce vody aj.).

Dielektrika jsou látky, jejichž hlavní technická vlastnost je schopnost se polarizovat v elektrickém poli. Využívají se k hromadění elektrické energie v kondenzátorech a jako kapacitní prvky v elektrických obvodech. Jejich hlavním parametrem je relativní permitivita. Můžeme říci, že každý izolant je dielektrikem, nikoli však obráceně. [1] [2]

1.2 Základní vlastnosti dielektrik a izolantů

Dielektrika a izolanty používané v technické praxi mají své typické vlastnosti fyzikální, chemické a technologické, které pak určují jejich chování elektrické, tepelné a mechanické. Mezi hlavní vlastnosti dielektrik řadíme:

1. Relativní permitivita ϵ_r
2. Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ (-)
3. Měrný vnitřní odpor (vnitřní rezistivita) ρ_V (Ωm)
4. Měrný povrchový odpor (povrchová rezistivita) ρ_P (Ω)
5. Elektrická pevnost E_P (V/m)

1.2.1 Dielektrické ztráty

Oproti ideálnímu dielektriku se reálné dielektrikum vyznačuje nenulovou elektrickou vodivostí, obsahem nečistot, vlhkostí atd. Po přiložení elektrického pole dochází k

nestacionárním dějům uvnitř dielektrika, jež jsou příčinou ztráty energie. Celkové ztráty dielektrik jsou součtem několika druhů ztrát, rozdílných svojí fyzikální podstatou, ale souhlasných ve svém konečném působení na dielektrikum. Z hlediska fyzikální podstaty se rozlišují ztráty vodivostní, polarizační a ionizační. Dielektrické ztráty přepočítané na jednotku objemu se nazývají hustota dielektrických ztrát.

Vodivostní ztráty se vyskytují u všech druhů dielektrik a jsou vyjádřeny vnitřní a vnější ohmickou vodivostí dielektrika. Vznikají při stejnosměrném i střídavém napětí a jejich důsledkem je přeměna určité části energie elektrického pole v neužitečné Jouleovo teplo. Ohřevem dochází ke zhoršení funkčních vlastností materiálu. Vodivostní ztráty vznikají v důsledku srážek volných nosičů nábojů s kmitajícími částicemi tvořící strukturu látky.

Významný podíl na celkové výši ztrát mají polarizační ztráty. Jsou podmíněny polarizačními pochody v dielektriku. U elektronové a iontové polarizace se polarizační ztráty prakticky nevyskytují. Velikost těchto ztrát a jejich teplotní a kmitočtové závislosti závisejí na druhu polarizace. Ke ztrátám polarizací patří ještě tzv. rezonanční ztráty, které se v dielektriku vyskytují až při frekvencích odpovídajících frekvenci světelného spektra.

U plynů a tuhých dielektrik, které mají plynové vměstky, se vyskytují ionizační ztráty. Ty se projeví při překročení tzv. prahu ionizace daného plynu. [3] [4] [5]

1.2.1 Relativní permitivita

Permitivita dielektrika charakterizuje vliv elektrického pole na elektrický stav dielektrika. Rozlišujeme absolutní permitivitu ϵ , permitivitu vakua ϵ_0 a relativní permitivitu ϵ_r . V praktických aplikacích se nejčastěji používá pro charakterizaci polarizačních dějů. Z Maxwellových materiálových rovnic vyplývá, že permitivita je činitelem úměrnosti mezi vektorem intenzity elektrického pole E a vektorem elektrické indukce D . Jelikož se permitivita používá téměř výhradně v relativní formě, zapisuje se tato rovnice ve tvaru

$$\vec{D} = \epsilon_0 * \epsilon_r * \vec{E} \quad (1.1)$$

kde ϵ_0 je (absolutní) permitivita vakua ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$) a ϵ_r je relativní permitivita. Zvýšení elektrické indukce D v důsledku polarizace se při konstantní intenzitě E projeví zvětšením náboje na elektrodách příslušného měřicího kondenzátoru. Tohoto jevu se

užívá při praktickém určování relativní permitivity, kdy se měření elektrické indukce převádí na měření kapacity. Vztah pro relativní permitivitu je

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (1.2)$$

kde C je kapacita kondenzátoru s dielektrikem s relativní permitivitou ε_r a C_0 je kapacita kondenzátoru stejného uspořádání, jehož dielektrikem je vakuum. Relativní permitivita souvisí s atomovou strukturou látky a je tudíž materiálovou veličinou. Hodnota relativní permitivity vakua je rovna jedné, neboť ve vakuu k polarizaci nemůže docházet. Pro jakoukoliv jinou elektroizolační látku nabývá hodnot větších než jedna. Její velikost se pohybuje od hodnot o něco větších než jedna pro plynné izolanty až k hodnotám řádově několika jednotek až desítek pro kapalně a tuhé izolační materiály. Relativní permitivita téměř všech používaných materiálů v elektrotechnice pro izolační i dielektrické aplikace se pohybuje přibližně v rozmezí 2 až 15. K definici dielektrických ztrát a polarizací je zavedena komplexní permitivita

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1.3)$$

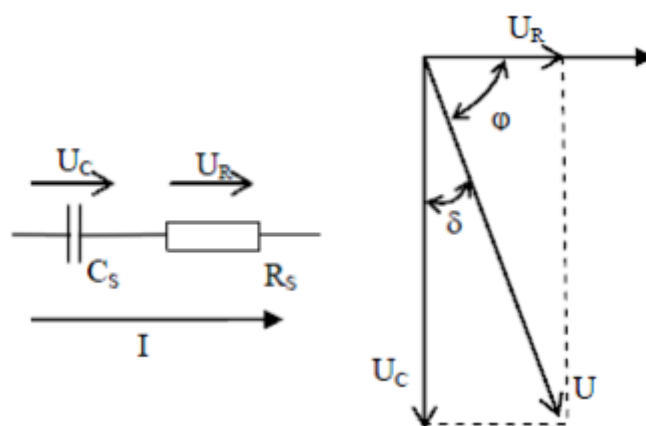
obecně definovaná poměrem elektrické indukce v daném prostředí k elektrické indukci ve vakuu. Reálná část komplexní permitivity charakterizuje velikost polarizace v dielektriku. Imaginární část má charakter ztrátového čísla, které zahrnuje dielektrické ztráty způsobené relaxačními polarizacemi a elektrickou vodivostí. Komplexní permitivita je závislá na teplotě dielektrika a frekvenci elektrického pole. [1] [6] [3]

1.2.2 Ztrátový činitel

Další veličinou, která charakterizuje izolant z hlediska jeho dielektrických ztrát je ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$. Čím větší je výsledné číslo, tím větší je výkon přeměněný na teplo a současně vyšší teplota dielektrika. S teplotou dielektrika souvisí proces tepelného stárnutí s následným nebezpečím tepelné destrukce izolantu (tepelný průraz). Z tohoto důvodu je snaha dielektrické ztráty minimalizovat a současně zajistit dostatečné chlazení izolantu.

Pro účely výpočtu P_z nebo $\operatorname{tg} \delta$ se ztrátové dielektrikum nahrazuje ekvivalentním sériovým (Obr. 1) nebo paralelním (Obr. 2) náhradním zapojením bezztrátových prvků a

prvků, charakterizujících ztráty. Požadavkem je, aby činný výkon a fázový úhel ztrátové soustavy byl ekvivalentní ztrátovému výkonu a fázovému úhlu ztrátového dielektrika. Pro tato náhradní zapojení se následně kreslí fázový diagram napětí a proudů, v němž je ztrátový úhel δ mírou nedokonalosti dielektrika.

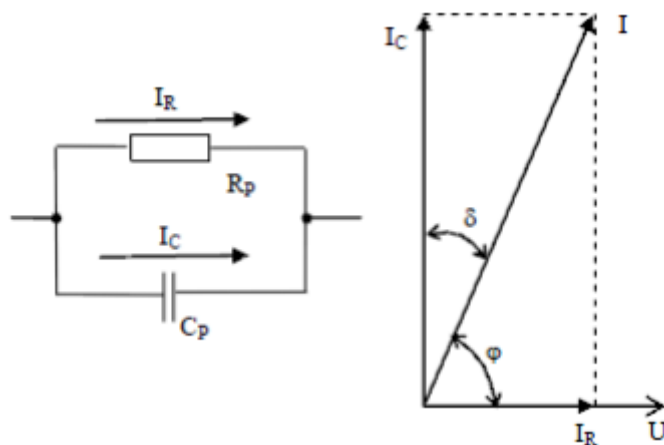


Obr. 1: Sériové náhradní schéma

Pro sériové zapojení platí následující vztahy:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_R}{U_C} = \omega * R_S * C_S \quad (-) \quad (1.4)$$

$$P_Z = I * U_R = U^2 * \omega * C_S * \frac{\operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (W) \quad (1.5)$$

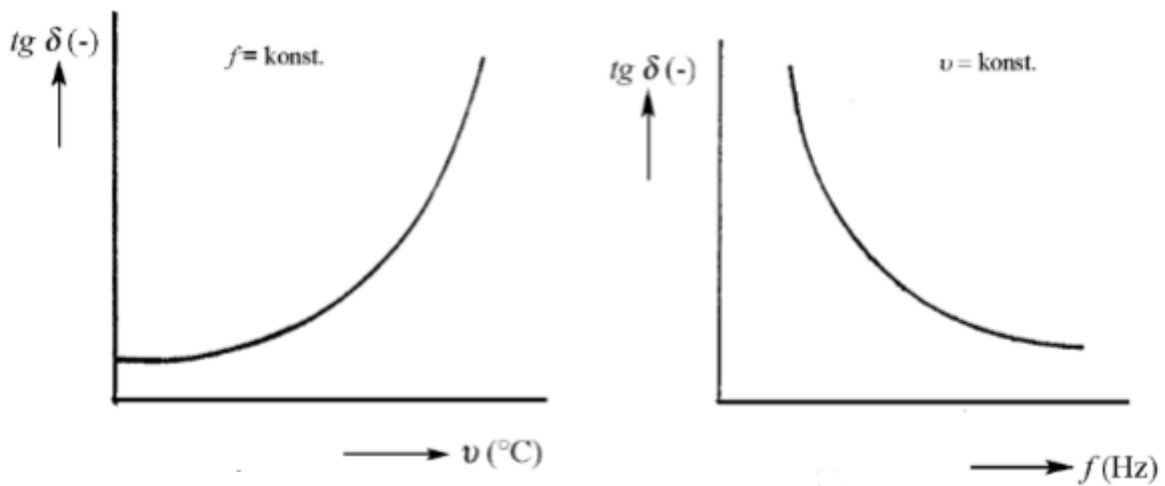


Obr. 2: Paralelní náhradní schéma

Pro paralelní zapojení platí vztahy:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega * R_P * C_P} \quad (-) \quad (1.6)$$

$$P_Z = U^2 * \omega * C_P * \operatorname{tg} \delta \quad (W) \quad (1.7)$$



Obr. 3: Grafy závislostí $\operatorname{tg} \delta$ na teplotě (vlevo) a kmitočtu (vpravo)

Ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ je bezrozměrná veličina. Číselně je vyjadřována desetinným číslem, násobkem mocniny deseti se záporným exponentem nebo v procentech. Ztrátový činitel je u dielektrik v rozmezí 10^{-5} až 10^{-1} . Hodnotu 10^{-5} má vzduch a běžně používaná dielektrika mají ztrátový činitel v rozmezí 10^{-4} až 10^{-1} . Mezi kvalitní izolanty je možné řadit materiály se ztrátovým činitelem $\operatorname{tg} \delta$ nižším než 10^{-3} . Ztrátový činitel ovlivňují především teplota (u všech dielektrik), kmitočet elektrického pole (u všech dielektrik) a intenzita elektrického pole (u feroelektrik a v případě ionizačních ztrát). Na Obr. 3 je znázorněna závislost ztrátového činitele na teplotě při konstantní frekvenci a charakteristická závislost ztrátového činitele na frekvenci při konstantní teplotě. [7] [4] [3]

1.2.3 Vnitřní a povrchová rezistivita

Pokud je materiál vložen do elektrického pole a mohou se v něm volně pohybovat volné nebo slabě vázané ionty příměsí a nečistot, mluvíme o elektrické vodivosti materiálu. Vodivost

materiálu je charakterizována vnitřní konduktivitou (měrnou vnitřní vodivostí) γ_V (S/m), která je převrácenou hodnotou vnitřní rezistivity (vnitřní měrný odpor). Vnitřní konduktivita je závislá na koncentraci nosičů nábojů n , na jejich pohyblivosti μ a náboji q . Je-li vodivost dána pouze jedním druhem nosičů, platí rovnice

$$\gamma_V = q * n * \mu. \quad (1.8)$$

Koncentrace i pohyblivost nosičů nábojů (iontů) jsou značně teplotně závislé (rostou s teplotou), proto i vnitřní konduktivita γ_V a vnitřní rezistivita ρ_V jsou závislé na teplotě. Exponenciální pokles ρ_V s teplotou vyjadřuje rovnice

$$\rho_V = A * e^{\frac{B}{T}}, \quad (1.9)$$

kde A a B jsou materiálové konstanty, T je absolutní teplota (K). Vnitřní rezistivitu lze měřit pomocí vnitřního odporu R_V , který se počítá jako poměr intenzity elektrického pole E a proudové hustoty uvnitř vzorku i_S (1.10). Číselně se rovná vnitřnímu odporu krychle ze zkoušeného materiálu o hraně 1 metr, měřenému mezi dvěma elektrodami, přiloženými na protilehlých stěnách.

$$\rho_V = \frac{E}{i_S} \quad (1.10)$$

Odpor lze také měřit přímo megaohmmetrem s následným výpočtem ρ_V z rozměrů vzorku (elektrodového systému) a odporu R_V . Podobně se ze změřeného povrchového odporu R_P vypočítá povrchová rezistivita ρ_P . Povrchová rezistivita materiálu se rovná poměru intenzity elektrického pole a proudové hustoty na povrchu vzorku. Číselně se rovná odporu čtverce povrchu zkoušeného materiálu o straně 1 metr, měřenému mezi dvěma elektrodami přiloženými na protilehlých stranách.

Pro povrchový odpor a povrchovou rezistivitu platí stejná pravidla a probíhají stejné děje. Proud neprotéká jen po povrchu, ale také částečně vnitřkem materiálu. Povrchový odpor není možno definovat tak jednoznačně jako vnitřní odpor. U čistého povrchu je naměřený povrchový odpor R_P řádově stejný nebo o něco vyšší než vnitřní odpor. U povrchu znečištěného vodivými částicemi (průmyslový spad), při současném navlhnutí nebo degradaci povrchu materiálu, se povrchový odpor prudce snižuje a proud potom teče převážně v povrchové, více vodivé vrstvě. Porovnání ρ_P čistého a znečištěného povrchu pak vypovídá o

zhoršených povrchových izolačních vlastnostech materiálu, kdy pak povrch může tvořit svod mezi vodivými částmi pod napětím.

Vnitřní a povrchová rezistivita jsou důležité materiálové veličiny, na jejichž základě je možné porovnat jednotlivé izolační materiály mezi sebou a současně u daného izolačního materiálu jsou měřítkem pro posouzení jeho stavu. K poklesu vnitřní rezistivity dochází v důsledku elektrického, tepelného, příp. kombinovaného namáhání materiálu (stárnutí). Pokles povrchové rezistivity pak může indikovat, mimo degradace, znečištění povrchu izolantu. [4] [7] [3] [1]

1.2.4 Elektrická pevnost

Elektrické namáhání izolantu se posuzuje podle velikosti intenzity elektrického pole. Dosáhne-li při zvyšování napětí intenzita pole určité velikosti, dochází u izolantů pevného skupenství k průrazu, u izolantů kapalných a plyných k přeskoku. Napětí, při němž nastává průraz, nebo přeskok, se nazývá průrazné napětí. Elektrický průraz vzniká nárazovou ionizací atomů v izolantu. Tepelný průraz může nastat u tuhých izolantů s velkým činitelem ztrát. Takový izolant se v elektrickém poli zahřívá, neboť vzniklé teplo nestačí odvádět svým povrchem do okolí. Tepelný průraz na rozdíl od elektrického probíhá pomalu. Hodnota elektrické pevnosti E_P v místě průrazu je rovna

$$E_P = \frac{U_P}{d}, \quad (1.11)$$

kde d je tloušťka izolantu v místě průrazu a U_P je průrazné napětí.

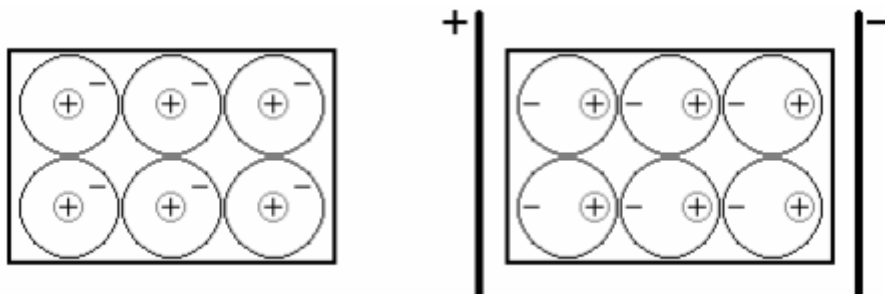
V případě, že se jedná o čistě elektrický průraz, jde o velmi rychlý průběh, většinou trvá 10^{-7} až 10^{-8} sekund. Místo průrazu je tvaru čistého otvoru bez jakýchkoliv stop opáleného okolí. Tepelný průraz má naopak průběh průrazu pomalý. Trvá několik sekund, někdy i minut. Po průrazu zůstane místo ve tvaru vypáleného otvoru se zuhelnatělým okolím. [3] [4] [1]

1.2.5 Polarizace

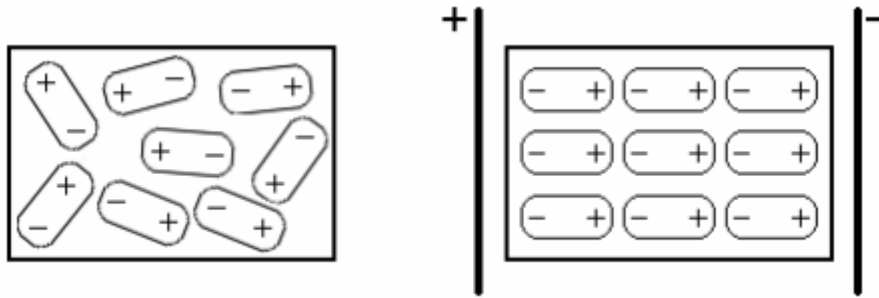
Polarizací se nazývá fyzikální děj, který probíhá v dielektriku při působení vnějšího i vnitřního elektrického pole. Elektricky vázané náboje dielektrika se následně přemísťují z rovnovážných poloh na malé omezené vzdálenosti. Obsahuje-li látka dipólové molekuly, tak tyto zaujmají orientaci ve směru přiloženého pole. Ve zvláštních případech mohou být příčinou polarizace i volné náboje v dielektriku. O průběhu polarizace rozhoduje struktura daného dielektrika. V dielektrických látkách se často vyskytuje současně několik druhů polarizací, kdy jsou slabší mechanismy překryty mechanismy silnějšími. Výsledná polarizace je dána součtem jednotlivých mechanismů. Dle způsobu, jakým dochází k polarizaci, lze rozdělit dielektrika na polární a nepolární.

Nepolární dielektrika jsou složena z atomů, jejichž vnitřní uspořádání je takové, že těžiště kladných i záporných nosičů náboje se překrývá. Nastane-li situace, kdy se nepolární dielektrikum dostane do elektrického pole, dojde na základě jeho působení k posunutí těžiště záporných nosičů náboje vůči těžišti kladných nosičů náboje. Výsledkem je, že se tyto atomy, či molekuly, stanou dipólem s dipólovým momentem. Takto vytvořený dipól se v elektrickém poli natočí tak, aby ležel ve směru intenzity přiloženého elektrického pole, jak je znázorněno na Obr. 4.

Polární dielektrika jsou obvykle tvořena kladnými a zápornými ionty, které se po přiložení elektrického pole natáčejí ve směru elektrické intenzity a tím dochází k polarizaci, což znázorňuje Obr. 5.



Obr. 4: Chování nepolárního dielektrika v elektrickém poli [5]



Obr. 5: Chování polárního dielektrika v elektrickém poli [5]

Polarizace vyvolané působením elektrického pole dělíme podle druhu nosičů elektrického náboje, jenž se na vyvolaném mechanismu polarizace podílejí. Je-li polarizace výsledkem posunu silně vázaných nosičů elektrického náboje, jedná se o deformační polarizace, které se někdy označují jako pružné nebo rychlé. Tyto polarizace proběhnou okamžitě a bez ztrát energie v dielektriku. Důležitá je i jejich nezávislost na kmitočtech používaných v elektrotechnice.

Jestliže přítomností elektrického pole dochází k posunu slabě vázaných nosičů elektrického náboje, jedná se o polarizaci relaxační. Po přiložení elektrického pole přibývá polarizace pomalu a po odpojení pole pomalu ubývá. Jsou velmi závislé na teplotě a vždy jsou doprovázeny ztrátami energie v dielektriku, které se tím ohřívá.

Polarizace spojené s pohybem volných nosičů náboje se nazývají migrační nebo také objemové polarizace. Jedná se o nejpomalejší polarizační mechanismus.

Druhou skupinu tvoří polarizace, kdy je dielektrikum zpolarizováno bez působení vnějšího elektrického pole. V těchto případech dochází ke zpolarizování jinými vlivy, kterými můžou být mechanické namáhání (u piezoelektrik) nebo případ, kdy je dielektrikum schopné udržet stav zpolarizování po odeznění vlivu, který polarizaci vyvolal (elektrety). Podrobnější dělení polarizačních mechanismů se dále rozděluje na:

Pružné polarizace (rychlé) - jsou charakterizovány posunem částic. Posunutá rovnovážná poloha je dána rovnováhou elektrických a vazebných sil. Tyto polarizace jsou velmi rychlé a vzhledem k mohutnosti vazebných sil téměř nezávislé na vnějších podmínkách.

Elektronová polarizace - vzniká posunutím elektronového obalu vzhledem k jádru atomu, převážně pohybem valenčních elektronů. Doba ustálení je řádově 10^{-15} s, vyskytuje se při všech používaných frekvencích a je nepřímo úměrně závislá na teplotě (vliv tepelné

roztažnosti na koncentraci). Vyskytuje se u všech dielektrik a není spojena s dielektrickými ztrátami.

Iontová pružná polarizace - je způsobena vychýlením iontů z jejich rovnovážných poloh elektrickým polem. Vyskytuje se u všech látek, jejichž charakter vazby mezi atomy je alespoň částečně iontový. Vzhledem k hmotnosti iontů je doba jejího ustálení delší než u elektronové a to 10^{-12} - 10^{-13} s. Odpovídající polarizace je přímo úměrná velikosti náboje iontu a nepřímo jejich hmotnosti. Vyskytuje se v celém rozsahu frekvencí a není spojena se ztrátami.

Polarizace pomalé (relaxační) – jsou spojeny se slabšími vazebnými silami a posunutí náboje je větší. Vzdálenost posunutí není úměrná elektrickému poli, ale určuje ji především struktura látky. Doba ustálení je poměrně dlouhá, s exponenciálním průběhem charakterizovaným tzv. relaxační dobou τ . Nepružné polarizace jsou závislé silně teplotně a frekvenčně.

Polarizace dipólová (orientační) - vyskytuje se u polárních látek a vzniká v důsledku natáčení dipólů působením elektrického pole. Tato polarizace je spojena s tepelným pohybem molekul. Je závislá na frekvenci a silně závislá na teplotě. Doba ustanovení je 10^{-8} - 10^{-12} s u látek nízkomolekulárních, ale u makromolekulárních látek je tato doba o mnoho řádů vyšší. Je doprovázená ztrátami energie v dielektriku.

Polarizace relaxační iontová – je typická pro látky jako anorganická skla a anorganické krystaly s velkým obsahem poruch. Její podstata spočívá v pohybu iontů uzavřených uvnitř dutiny. Je frekvenčně i teplotně závislá a její doba ustanovení je 10^{-8} - 10^{-12} s.

Polarizace zvláštní - tato skupina zahrnuje zvláštní polarizační mechanismy, které nemůžeme zařadit do žádné ze dvou předchozích skupin.

Polarizace migrační – je ze všech polarizačních mechanismů nejpomalejší (doba ustálení 10^{-8} - 10^{-12} s). Vyskytuje se u látek s makroskopickými nehomogenitami (látky s částicovými či vláknitými plnivými, pórové a pěnové materiály). Její podstatou je pohyb volných nábojů, které se hromadí v místech přechodů mezi látkami s různou vodivostí. Tato polarizace je doprovázena ztrátami energie a je závislá na teplotě. Projevuje se pouze v oblasti velmi nízkých kmitočtů.

Polarizace samovolná – vyskytuje se ve feroelektrikách, látkách obsahující tzv. domény – oblasti mající nesymetrické rozložení elektrického náboje bez přítomnosti vnějšího

elektrického pole. I když domény mají permanentní dipólový moment, látka jako celek se jeví nepolarizovaná, vzhledem k tomu, že jednotlivé domény jsou orientovány nahodile. Tyto látky mají vysoké hodnoty polarizace. Jelikož tepelný pohyb působí proti orientaci domén, tento typ polarizace s teplotou klesá, až při Currieho teplotě zcela zanikne.

Polarizace trvalá (permanentní) - se vyskytuje u některých polárních látek s malou elektrickou vodivostí. Technicky je této polarizace využíváno v látkách známých jako elektrety. Elektretem je dielektrická látka, která je po polarizaci schopna vytvářet ve svém okolí elektrické pole po dlouhou dobu.

Polarizace rezonanční – vzniká rezonancí frekvence vnějšího elektrického pole s frekvencí tepelných kmitů elektronů nebo iontů, nebo s charakteristickou frekvencí defektních elektronů. Projevuje se u všech dielektrik v optických kmitočtech. V případě defektních elektronů se projevuje na nižších frekvencích. [8] [9] [3] [1]

Zvláštní polarizační jevy - u dielektrik se mohou vyskytovat další polarizační jevy, mezi které patří tzv. elektrostrikce, pyroelektrický a piezoelektrický jev.

Elektrostrikce - vyjadřuje změnu geometrických rozměrů dielektrického tělesa následkem polarizace. Tento jev se vyskytuje u všech dielektrik.

Pyroelektrický jev - při zahřátí dielektrika, podléhajícímu pyroelektrickému jevu, se objeví polarizované elektrické náboje na protilehlých koncích krystalu. Tento jev se vyskytuje u všech přirozených krystalických elektretů.

Piezoelektrický jev - působením mechanického namáhání, jako je třeba tlak, tah, kroucení apod. se tělesa elektricky polarizují. Tento jev funguje i obráceně, tzn., že tělesa jsou schopna deformace působením vnějšího elektrického pole. Jev se vyskytuje v krystalech s anizotropními vlastnostmi, které nemají střed souměrnosti. Piezoelektrickému jevu podléhají všechny ferroelektrické látky. [5]

1.2.6 Vodivost

Všechny dielektrika i izolanty obsahují určité (ve srovnání s kovy a polovodiči velmi malé) množství volných nosičů náboje, a proto všechny tyto látky mají měřitelnou rezistivitu a konduktivitu.

Volné nosiče náboje v dielektrikách a izolantech vznikají odlišně ve slabých a silných elektrických polích. Kromě toho fyzikální děj vedení elektrického proudu probíhá odlišně v plynných, kapalných a tuhých dielektrících a izolantech.

V polích s malou intenzitou je vznik volných nosičů náboje v převážné většině dielektrik a izolantů způsoben ionizací, popř. disociací nečistot a příměsí. Podmínky pro tyto procesy jsou všeobecně tím příznivější, čím větší je relativní permitivita látky a čím vyšší je teplota. Protože volné částice náboje (ionty) vznikají z molekul cizích látek, hovoříme o nevlastní (příměšové) vodivosti. Částice, které vznikají při ionizaci a disociaci jsou ionty. Vodivost velké většiny dielektrik a izolantů má tedy iontový charakter. [4] [1]

1.2.7 Dielektrické ztráty

Z fyzikálního hlediska lze rozdělit polarizační ztráty na tři druhy. Vodivostní, polarizační a ionizační. V nepolárních pevných látkách se prakticky uplatňují pouze ztráty vodivostní, přičemž hlavním důvodem je, že se v nich vyskytují pouze pružné bezetrátové polarizace a proto jsou dielektrické ztráty v těchto látkách velice malé. Dielektrické ztráty v iontových izolantech závisí na těsnosti uložení částic. V iontových izolantech s těsným uložení iontů se vyskytují pružné bezetrátové polarizace. V iontových izolantech s netěsným uložení iontů se výrazně uplatňuje kromě pružných polarizací i iontová relaxační polarizace.

Ve střídavém elektrickém poli se tyto látky chovají téměř jako látky nepolární a dielektrické ztráty ve střídavém elektrickém poli jsou vodivostního charakteru. V těchto materiálech se vyskytují ztráty jak vodivostní, tak i polarizační.

Iontově amorfní látky mají také vodivostní i polarizační ztráty. Podle chemického složení, povahy nečistot a podle poruch vnitřní stavby může být v různých látkách různý poměr velikostí jednotlivých složek ztrát. To má za následek různé tvary teplotních a frekvenčních charakteristik dielektrických ztrát. V polárních pevných izolantech se výrazně projevuje ztrátová dipólová polarizace a dielektrické ztráty mají tak obě složky – vodivostní a polarizační. [1] [6] [2]

1.3 Druhy dielektrik a izolantů

Vzhledem k širokému rozsahu druhů a aplikací dielektrik a izolantů v elektrotechnice a elektronice, je nutné po jejich rozřídění podle základních kritérií (skupenství, původ, chemická podstata) probrat podrobněji jen ty skutečně nejvýznamnější materiály. Proto třídíme dielektrika a izolanty do pěti skupin:

1. Plynné izolanty
2. Kapalné izolanty
3. Přírodní makromolekulární izolanty
4. Syntetické makromolekulární látky
5. Anorganické látky

Z důvodu použitých vzorků, technické významnosti a rychlého rozvoje sortimentu aplikací je další pozornost věnována skupině syntetických makromolekulárních látek.

1.3.1 Syntetické makromolekulární látky

Tato problematika, i když svou podstatou spadá spíše do oblasti chemické technologie, se zařazuje do rámce elektrotechnologie hlavně proto, že jsou u daných plastů vyžadovány speciální fyzikální a elektrické parametry, které přitom úzce souvisí v parametry navazujících, často složitých a rozsáhlých zařízení.

Plasty se v elektrotechnice a elektronice využívají velmi široce pro výrobu dílů s funkcí dielektrik a izolantů, a jako látky pro pouzďení a ochranu součástek a obvodů. Syntetické makromolekulární látky se dnes získávají náročnými chemicko-technologickými postupy převážně z ropy.

Současný sortiment plastů je široký, protože mají specifické vlastnosti a je zde možnost jejich řízení v rozsáhlých mezích. Vysoká produktivita zpracovatelských technologií, malý odpad a nízká cena jsou hlavními důvody jejich rozšíření. Vzhledem k rychle postupující miniaturizaci elektronických součástek a obvodů vznikají velmi přísné nároky na zpracovatelské technologie plastů a především na jejich vlastnosti.

Vedle čistých přírodních makromolekulárních látek, jako jsou přírodní pryskyřice, celulóza, kaučuk, jsou pro výrobu elektrotechnických a elektronických zařízení důležité látky velké skupiny plastických hmot.

Plastické hmoty jsou z největší míry syntetické makromolekulární organické látky, někdy i uměle získané z přírodních látek. Rozdělujeme je podle jejich vzniku, podle výchozích látek, tepelných vlastností, chemického složení, technického využití a posléze i podle polárnosti hmot samotných.

Podle vzniku rozeznáváme hmoty vzniklé polykondenzací, polymerací, nebo polyadící.

Podle výchozích látek jsou plastické hmoty vyrobeny buď z nízkomolekulárních sloučenin, tj. z monomerů, nebo zušlechťováním přírodních látek. Z čistě elektrického hlediska se plastické hmoty rozdělují na nepolární, tedy neutrální s nízkou permitivitou, a polární s pohyblivými polárními skupinami při normální teplotě. [1] [10] [11]

1.3.2 Rozdělení plastů podle teplotního chování

Podstatou plastů jsou makromolekulární (vysokomolekulární) sloučeniny uhlíku s vodíkem, dále pak s kyslíkem a dusíkem, nebo také makromolekulární sloučeniny křemíku s kyslíkem, dále pak s uhlíkem, vodíkem a dusíkem. Makromolekulární sloučeniny jsou tvořeny molekulami, jejichž molekulová hmotnost (součet atomových hmotností atomů, které je tvoří) je větší než $5 \cdot 10^3$.

Makromolekulární sloučeniny vznikají v přírodě (kaučuky, pryskyřice, celulóza, škrob, bílkoviny aj.), a některé z nich jsou po úpravách podstatou četných technicky významných plastů.

Molekuly četných nízkomolekulových sloučenin, které za určitých podmínek jsou schopné se vzájemně slučovat, se nazývají monomery a jejich vzájemné slučování je polymerace. Polymerací vzniklá sloučenina má chemické složení shodné z monomerem, ale vlastnosti má značně odlišné. Odlišnost vzrůstá s polymeračním stupněm, který nabývá hodnot od 2 do n (2-dimer, 3-trimer, 10 až 100 je oligomer a nad 100 se jedná o polymer).

Sloučením stejných monomerů vznikají homopolymery, neboli unipolymery, z různých monomerů vznikají heteropolymery. Kopolymery ze dvou, terpolymery ze tří. Z vyššího počtu monomerů zatím nebyly heteropolymery vyrobeny.

Smísením různých polymerů vznikají směšové polymery. V závislosti na chemickém složení a uspořádání monomerů a podmínkách (teplota, tlak, katalyzátory, záření) polymerace vznikají makromolekuly s odlišnými strukturami. Změnami polymeračních podmínek je možné dostat z jednoho polymeru různé struktury. Mezi ty hlavní struktury patří:

- Vlákňitá lineární makromolekula
- Vlákňitá lomená makromolekula
- Vlákňitá spirálová makromolekula
- Vlákňitá nepravidelně rozvětvená makromolekula
- Vlákňitá pravidelně rozvětvená makromolekula

- Plošně nepravidelně síťovaná makromolekula
- Plošně pravidelně síťovaná makromolekula
- Prostorově nepravidelně síťovaná makromolekula
- Prostorově pravidelně síťovaná makromolekula

Nepravidelně uspořádané makromolekuly jsou příčinou amorfnosti polymerů. Orientací (pravidelným uspořádáním) makromolekul s pravidelnou strukturou vznikají v polymeru krystalické fáze (krystality). Jejich vznik a zánik a poměr k amorfní fázi závisí na chemickém složení a struktuře makromolekul a na velikosti a času trvání teplotních a mechanických účinků, které na polymer působily během polymerace.

Při vzrůstajících teplotách se polymery chovají dvěma způsoby. Termoplasticky, nebo termoseticky. [1] [10]

1.3.2.1 Termoplasty

Tvárnost a rozpustnost v odpovídajících rozpouštědlech jsou vlastnosti typické pro termoplasty. Charakteristické veličiny jsou teplota tuhnutí, při níž hmota tvrdne a teplota měknutí, která je vyznačena ztrátou pevnosti. Při dále se zvyšující teplotě se hmota stává elastickou až plastickou a v tomto stavu je velmi dobře zpracovatelná. Po překročení teploty tečení dochází již k tepelnému rozkladu termoplastické hmoty. Toto chování umožňuje jejich zpracování vytlačováním, válcováním, litím, vstřikováním apod.

Pro použití termoplastických hmot v elektrotechnice je nutné sledovat jejich dielektrické vlastnosti v závislosti na měnícím se kmitočtu, změnách teploty a vlhkosti. Mezi termoplastickými látkami mají největší význam nepolární a slabě polární termoplasty, které mají výborné elektroizolační vlastnosti a dobré dielektrické vlastnosti.

Mezi termoplasty řadíme například polyetylen (PE), polystyren (PS), polytetrafluoretylen (PTFE), polypropylen (PP), polyamid (PA) či polyvinylchlorid (PVC). [1] [10]

1.3.2.2 Reaktoplasty (termosety)

Reaktoplasty jsou látky, v nichž působením tepla, nebo chemických přísad (tvrdidla) dojde k prostorovému zesílení molekul, a tím k vytvrzení. Mezi nejdůležitější reaktoplastické elektroizolační materiály patří fenolformaldehydové pryskyřice, polyesterové pryskyřice, epoxidové pryskyřice a aminoplasty.

Fenolformaldehydové pryskyřice (fenoplasty) patří mezi nejstarší synteticky připravované pryskyřice (původní obchodní název je Bakelit). Používají se k výrobě laků, lepidel, jako zalévací a lisovací hmoty.

Polyesterové pryskyřice mají dobré elektrické vlastnosti a jsou chemicky velmi odolné. Používají se k výrobě laků, jako pojiva při výrobě sklolaminátů a jako lisovací, impregnační a zalévací hmoty.

Epoxidové pryskyřice jsou v současné době velmi perspektivní druh reaktoplastů. Mají velmi dobré elektrické vlastnosti, velkou mechanickou pevnost, velkou odolnost proti vlhkosti a proti atmosférickým vlivům. K vytvrzování dojde přidáním tvrdidla, jehož množství a kvalita významně ovlivňují vlastnosti výsledného materiálu. [1] [10]

1.3.3 Přísady (aditiva) plastů

Do polymerů se ve výrobních a také zpracovatelských stádiích přidávají tuhé, kapalné, nebo i plynné látky. Vznikají tak heterogenní soustavy. Účinek každé přísady má dvojí charakter: některé vlastnosti polymerů se zlepšují, některé zase zhoršují. Charakter a velikost účinku aditiva na polymer závisí na typu polymeru, fyzikálním stavu, chemické reakci a objemu přidaného aditiva poměrově k polymeru.

Významné místo mezi přísadami zabírají tuhé aditiva. Jsou to většinou látky anorganické práškové, nebo vláknité. Plniva zmenšují termické a mechanické objemové změny, zvětšují tuhost, tvrdost a teplotní vodivost, difusi plynů a kapalin, zhoršují chemickou odolnost a stálost a mění elektrické izolační vlastnosti.

Fyzikální a chemické vazby mezi přísadami a polymery (hlavně smáčivost) se zlepšují úpravou povrchu plniv silanizací, přidávkem organických titanátů, stearové kyseliny, chlórovaných parafinů a dalšími sloučeninami. Tím se dále ovlivňují technologické a funkční vlastnosti plastů.

Jako plniva se používají kysličníky (křemičitý, hlinitý, titaničitý, chromitý aj.), uhličitany (vápenatý), upravené přírodní látky (dřevo, celulóza, kaolin, mastek, slída), nebo syntetické látky (sklo). Specifická plniva (saze, grafit, bronz, měď, stříbro, zlato) zmenšují elektrický izolační odpor a průrazovou pevnost, zvětšují ztrátový činitel a potlačují elektrostatické chování plastů.

Vláknitá plniva, především skleněná, zvětšují zvláště výrazně tuhost, zatímco vlákna uhlíková, kovová, grafitová nebo bórová zlepšují tepelnou vodivost a teplotní stálost. Bavlněné, skleněné a jiné tkaniny nebo papír jsou zpevňovacím plnivem laminátů.

Ke zlepšení pružnosti a k omezení křehkosti se přidávají zvláčňovadla. Jsou to látky tuhé, ale častěji kapalné, které umožňují tepelné a mechanické relaxace makromolekul a zároveň absorbují mechanické napětí.

Ke zvýšení teplotní a chemické odolnosti, nevznětlivosti a nehořlavosti se přidávají specifické látky, které omezují aktivitu nízkomolekulárních produktů k termickému rozpadu, absorbují ultrafialové záření, otupují účinek kyslíku a jiných faktorů prostředí, při vlastním hoření produkují retardéry hoření, nebo zvyšují relativní kyslíkové číslo plastů a omezují vývoj kouře.

Pro zmenšení tření taveniny při tváření se přidávají maziva a pro omezení lepivosti ve formách se přidávají separátory, které penetrují k povrchu dílce a usnadňují vyjmutí z formy.

Biostabilizátory v plastech zabraňují růstu mikroorganismů a chrání plastové výrobky proti živočichům.

Přísady, jak už bylo zmíněno, mají i negativní charakter. Působí jako nečistoty a bývají iniciátory odbourávání molekulové hmotnosti. Velmi často se negativní účinek přísad projevuje až po delším provozu.

Plynné přísady zmenšují hustotu a mění strukturu a texturu plastů. Zavádějí se do nich pomocí tuhých, nebo kapalných přísad, nadouvadla, které se nanášejí na povrch granulátů. Během plastifikace se nadouvadla rozkládají a vznikají plyny jako je CO_2 , CO , N_2 , NH_3). [1]
[10]

2 Teoretická část: Reaktivní pryskyřice

Reaktivní pryskyřice tvoří skupinu termosetů, nejčastěji používanou při výrobě kompozitů. Jsou to kapalné, nebo tavitelné pryskyřice, které se buď samostatně, nebo za pomoci jiných složek – tvrdidel, tj. iniciátorů, katalyzátorů či urychlovačů vytvrzují polyadici, nebo polymerací bez odštěpení těkavých složek. Reaktivní pryskyřice též nazýváme licí, laminační, impregnační, prosycovací, nebo zalévací pryskyřice. Mezi nejdůležitější typy patří:

- Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R) – jednou jejich složkou je nenasycená karbová kyselina a nejméně jednou další složkou je alkohol. Pryskyřice je rozpuštěna v monomerním rozpouštědle (často ve styrenu), se kterým je kopolymerizovatelná.
- Vinylesterové pryskyřice (VE-R) – jsou vyrobeny z fenylových, nebo fenolenových derivátů. Jako koncovou skupinu mají řetězec kyseliny akrylové.
- Fenolické pryskyřice – vyrábějí se kondenzací fenolů a vodných roztoků aldehydů.
- Metakrylátové pryskyřice (MA-R) – vyrábějí se z polymerizovatelné směsi polymerních a monomerních esterů kyseliny metakrylové.
- Epoxidové pryskyřice (EP-R) – obsahují epoxidové skupiny pomáhající vytvrzení.

Reaktivní pryskyřice se vytvrzují smícháním s tvrdidly. Mezi nejdůležitější tvrdidla patří iniciátory a urychlovače, ale také aldehydy (fenol).

Tvrdidla jsou sloučeniny, které iniciují kataliticky polymeraci pryskyřic, případně ovlivňují vytvrzování v průběhu polyadice epoxidových pryskyřic.

Urychlovače jsou látky, které pokud jsou přidány v malém množství, urychlují zesíťování polymerů. [12] [1] [10]

2.1 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice, jsou za normální teploty kapalné, až pevné látky, které mohou obsahovat přidané pomocné látky, jako jsou rozpouštědla. V molekule obsahují nejméně jednu, většinou však dvě epoxidové skupiny, nutné jako funkční skupiny pro stavbu makromolekuly. Tvrdidlo se přidává v pevné, nebo kapalné formě a obsahuje v molekule aktivní vodíkové ionty, které reagují s epoxidovými skupinami pryskyřice. Epoxidové pryskyřice patří mezi velmi hodnotné termosety s velice dobrými mechanickými vlastnostmi, vysokou rozměrovou stálostí a přilnavostí k povrchu. Díky tomu se používají jako pojivo pro

DPS FR-4 a FR-5. Další využití nalézají jako zalévací hmoty pro elektrotechniku, nebo jako formy nástrojů.

Charakteristickým znakem nevytvrzené pryskyřice je epoxidová skupina, trojčlenný kruh, skládající se ze dvou uhlíkových a jednoho kyslíkového atomu. Protože je tento kruh napjatý, má snahu otevřít se působením aktivních vodíkových atomů. Základním reakčním mechanismem je polyadice, při níž se vodíkový atom tvrdidla (např. diaminu) váže na kyslíkový atom epoxidové skupiny. Vznikající OH- skupina je příčinou dobré přilnavosti epoxidových pryskyřic. Dusík aminové skupiny se váže na koncový atom uhlíku, diamin se čtyřmi vodíkovými atomy se váže na čtyři molekuly epoxidové pryskyřice. V zesíťované epoxidové pryskyřici nejsou již žádné volné epoxidové skupiny, přesto však název epoxidové pryskyřice zdomácněl a užívá se do dnes.

Polyadice není na rozdíl od radikálové reakce řetězovou reakcí, při které roste rychle několik řetězců. Naopak, jde o reakci pomalou, které se účastní několik molekul pryskyřice s několika málo molekulami tvrdidla, takže molekulární hmotnost stoupá jen velmi pomalu. Reakční směs zůstává tekutá, i když je již spojeno mnoho vazeb pryskyřice a tvrdidla a díky tomu se geluje až mnohem později.

U epoxidových pryskyřic je kromě běžných údajů charakterizován tzv. epoxidový ekvivalent, který udává, kolik epoxidových skupin obsahuje váhová jednotka. Při vysokém ekvivalentu lze předpokládat i vysoké zesíťování. Tento a další charakteristické údaje se využívají při výpočtu stechiometrických poměrů míchání pryskyřice a tvrdidla.

- Epoxidový ekvivalent – hmotnost pojiva (g), které obsahuje 1 mol epoxidové skupiny
- Epoxidační číslo – počet molů epoxidových skupin ve 100 g pryskyřice
- Vodíkový ekvivalent – hmotnost tvrdidla (g), které obsahují 1 mol aktivního vodíku

Stejně jako u jiných pryskyřic, i zde existují flexibilizované a samozhášivé typy a typy modifikované kaučukem, které vykazují vysokou tažnost, aniž by ztrácely hodnotu tvarové stálosti za tepla.

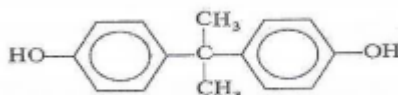
Viskozita směsi pryskyřice-tvrdidlo je většinou větší, než u ostatních pryskyřic, což zhoršuje prosycování vláken především při nižších teplotách. Proto byly vyvinuty nové nízkoviskozní systémy, vhodné pro nové technologie laminování velkých konstrukčních

dílců, kde musí pryskyřice prosytit velmi dlouhý úsek výztuže. Použití reaktivních ředidel a rozpouštědel je z důvodu ochrany ovzduší a ze zdravotních důvodů na ústupu.

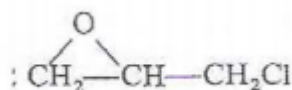
Reakční časy jsou u epoxidových pryskyřic poměrně delší než u ostatních pryskyřic z důvodu již zmiňované pomalejší polyadice vůči radikálové reakci. Pro urychlené vytvrzování pryskyřic bez vnitřního pnutí, se používá většinou postupného zvyšování teploty. Reakce se zahájí při nižší teplotě, přičemž pryskyřice, které jsou jen řídce zesít'ovány, vyrovnají částečně reakční smrštění relaxací. Tento účinek ještě zesílí následným zahříváním, až dojde ke zvýšení rychlosti vytvrzování. Taktéž ochlazování probíhá pozvolna, aby se zamezilo vzniku pnutí v materiálu. [10] [12]

2.2 Výroba epoxidové pryskyřice

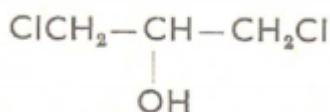
Vytvrzování epoxidových pryskyřic je proces, ve kterém se pomocí chemických reakcí převádějí nízkomolekulární, rozpustné a tavitelné epoxidové monomery na netavitelné a nerozpustné polymery, které mají převážně trojrozměrnou strukturu. Epoxidové pryskyřice po vytvrzení získávají nové vlastnosti, jako je elasticita, mechanická pevnost, tepelná odolnost a další. Tyto vlastnosti jsou velmi důležité pro většinu průmyslových aplikací. [12] Výchozími surovinami pro výrobu epoxidových pryskyřic jsou 2,2-bis(4-hydroxyfenyl)propan (jinak dian nebo bisfenol A) (Obr. 6), dichlorhydrin (Obr. 8) a epichlorhydrin (Obr. 7).



Obr. 6: Dian

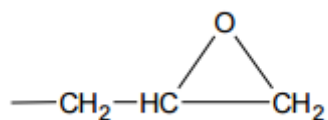


Obr. 7: Epichlorhydrin

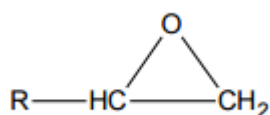


Obr. 8: Dichlorhydrin

Epoxidové pryskyřice lze v zásadě rozdělit na dvě skupiny: typy obsahující glycidylvé (2,3–epoxypropylvé) skupiny (Obr. 9), připravené reakcí epichlorhydrinu s vhodnými surovinami a typy obsahující epoxidové skupiny (Obr. 10), připravené epoxidací nenasycených sloučenin.

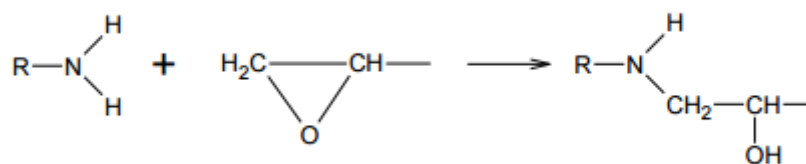


Obr. 9: Glycidylvé skupina



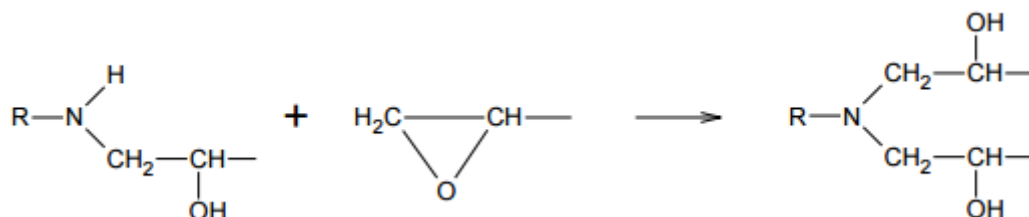
Obr. 10: Epoxidová skupina

Oxiranová skupina reaguje adicí s látkami obsahujícími aktivní vodíkové atomy za vzniku sekundární hydroxylové skupiny. Jestliže je v reakci primární amin, produkt obsahuje sekundární hydroxylovou a sekundární aminoskupinu (Obr. 11).



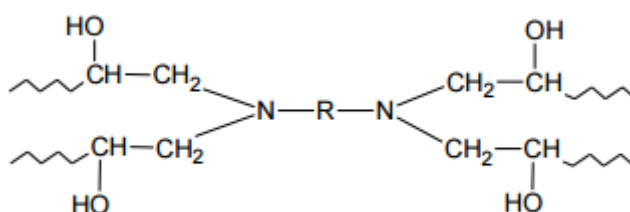
Obr. 11: Vytvrzovadlo s aktivními vodíkovými atomy + oxiranová skupina = vznik hydroxylové skupiny

Vzniklá sekundární aminoskupina reaguje stejným způsobem za vzniku terciární aminoskupiny (Obr. 12).



Obr. 12: Sekundární aminoskupina reaguje stejným způsobem za vzniku terciární aminoskupiny

Výsledný vytvrzený řetězec epoxidové pryskyřice (Obr. 13): [13] [7] [11]



Obr. 13: Vytvrzená epoxidová pryskyřice

Epoxidové pryskyřice odolávají velmi dobře zásadám i zředěným roztokům anorganických i organických kyselin. Jejich chemická odolnost stoupá s molekulovou hmotností a stupněm zesíťování. Velký vliv má i druh tvrdidla. Pryskyřice vytvrzované anhydridy dikarboxylových kyselin například obsahují menší koncentraci hydroxylových skupin, a proto jsou méně navlhavé. Tvrdidla s aromatickým jádrem propůjčují pryskyřicím zase větší teplotní odolnost než tvrdidla alifatická.

Po vytvrzení se mění epoxidová pryskyřice na pevnou hmotu, takové změně stavu se říká „želatinace“. Stav vytvrzování, při kterém vzniká první molekula s nekonečně vysokou molekulární hmotností, je bod gelace. Při dosažení takového bodu již není pryskyřice rozpustná v rozpouštědlech. Není tedy dál ve svém stavu zpracovatelná jako tekutá.

Schematický přehled o základním chování pryskyřic při vytvrzování udává rovnovážný diagram času na teplotě, tzv. TTT diagram (Time-Temperature-Transition). Diagram znázorňuje, v jakém stupni vytvrzení se nachází reakční směs v určitém čase a teplotě. Diagram je znázorněn na Obr. 14.

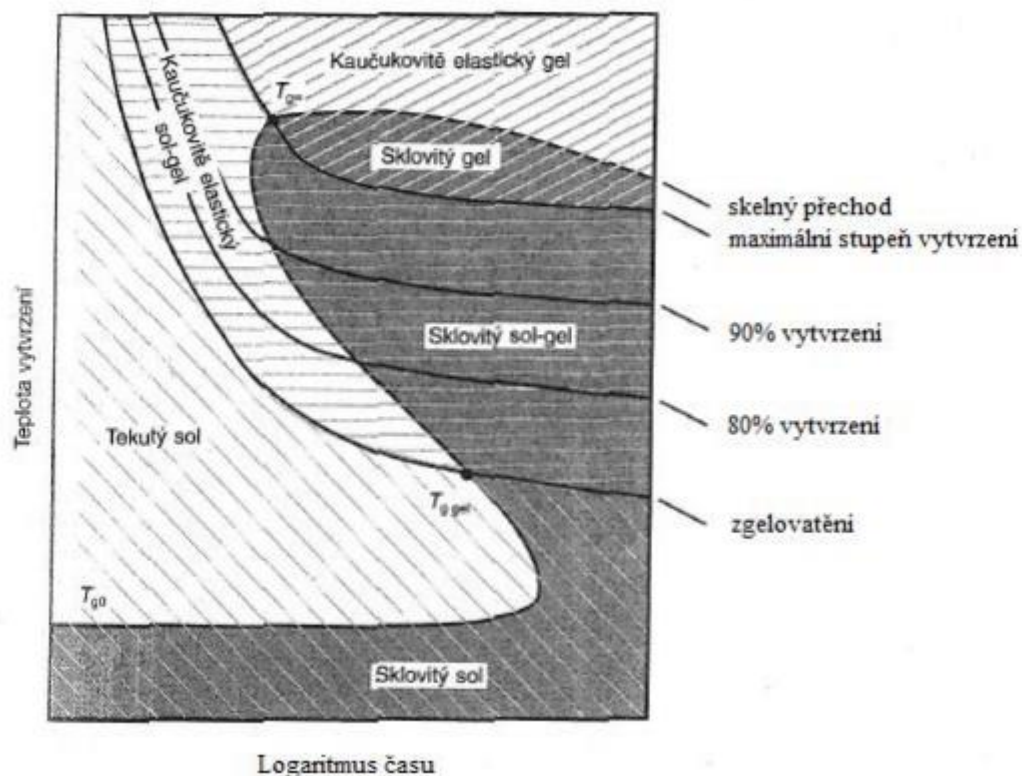
Teploty počátku skelného přechodu nezesíťované pryskyřice T_{g_0} , skelného přechodu gelující pryskyřice $T_{g_{gel}}$ a zcela vytvrzené pryskyřice T_{g_∞} jsou charakteristické teploty celého

epoxidového systému v určitých fázích. Teplota skleného přechodu se mění v závislosti na tom, jak dalece je systém vytvrzen a jak silně je zesíťováním omezen pohyb molekul.

I nezesíťovaný systém má teplotu T_g , která velmi často leží nízko, pod teplotou okolí. Pod touto teplotou, která se označuje T_{g0} , není možné provést vytvrzení, protože došlo k omezení pochodů jednotlivých, reakce schopných složek. Pryskyřice zůstává ve sklovitém výchozím tvaru.

Označení *sol* představuje roztok látky s částečně vytvrzeným podílem. Takováto látka je rozpustná v rozpouštědlech a nepřešla ještě do stavu gelu, který se vyznačuje zesíťováním. Nad teplotu T_{g0} je pryskyřice kapalná. Zvolíme-li příliš nízkou teplotu pod T_{gel} , vytvrdí se systém jen minimálně a po překročení křivky zesíťování systém na delší dobu zamrzne, aniž by předtím mohl zgelovatět.

Do oblasti úplného vytvrzení vstoupí pryskyřice teprve při vyšší teplotě. Po určité době zpracování překročí křivku „maximálního stupně vytvrzení“ a vstoupí do fáze sklovitého gelu, ve kterém se již nevyskytují ani rozpustné ani reaktivní výchozí složky. [14] [15]



Obr. 14: TTT diagram [15]

Sol je látka zcela rozpustná v rozpouštědlech, je málo vytvrzená. *Sol-gel* je směs rozpustných a nerozpustných podílů. *Gel* je zcela nerozpustná látka, která je zcela vytvrzená. [14]

2.3 Elektroizolační zalévací hmoty

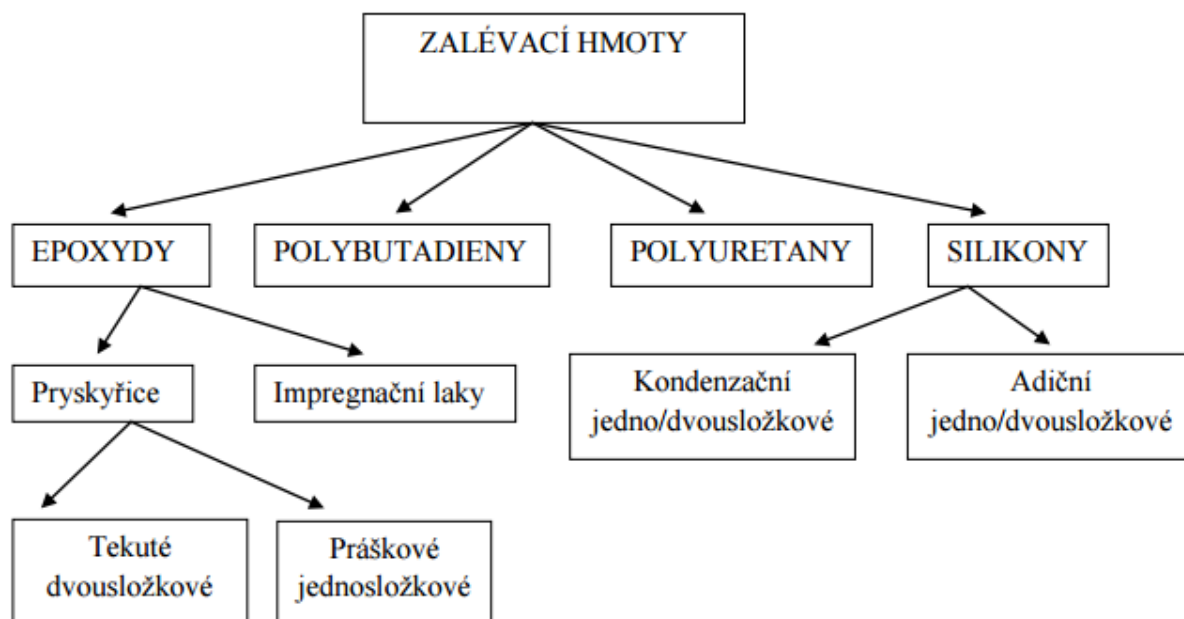
V technologii výroby produktů pro vysokonapěťové aplikace se elektroizolační zalévací hmoty používají nejčastěji pro zalévání transformátorů a další silnoproudé aplikace. Pro slaboproudé aplikace se pak jedná o zalévání DPS, či jednotlivých součástek. Hlavní složku těchto hmot tvoří epoxidové pryskyřice, polyuretany, nebo silikony. Hmoty se skládají z několika dalších složek a vytváří tak polymerní kompozitní materiál.

Hlavním důvodem použití zalévacích hmot v elektrotechnickém průmyslu jsou velmi dobré vlastnosti pro tento druh technologie. Mezi vlastnosti patří vynikající ochrana proti vlhkosti a jiným vlivům prostředí, dobrá mechanická ochrana, velmi dobrá přilnavost k různým plášťům kabelů, nízká teplota reakce, rychlá vytvrditelnost, výborná odolnost proti chemikáliím, výborné elektrické vlastnosti, odolnost proti teplotním a mechanickým šokům, neporóznost a velmi dobré izolační účinky. [15]

Dvousložkové zalévací hmoty jsou vhodné na ochranu elektrických komponent a také jejich zatěsňování proti vlhkosti. Mají jednoduchý poměr míchání pryskyřice i tvrdidla pro bezproblémové zpracování a aplikaci. Dvousložkové pryskyřice mohou být epoxidové, polyuretanové, nebo silikonové a mohou být vytvrzované pokojovou teplotou nebo za tepla. Pryskyřice vytvrzované za tepla jsou více univerzální, protože mají lepší zpracovatelnost a lépe se u nich kontroluje viskozita. U obou druhů je možnost použití plnidel. Pryskyřici bez plnidel použijeme tam, kde požadujeme co nejlepší stékavost do hůře přístupných míst. Plnidla použijeme u aplikací, kde chceme redukovat „scvrkávání“ materiálu, požadujeme vyšší odolnost vůči teplotním šokům.

Jednosložkové zalévací hmoty se používají jako drážková izolace menších elektromotorků. Dodávají se v předem namíchané práškové směsi, která zaručuje rovnoměrnou a homogenní aplikaci. Na impregnovanou část se nanášejí ponořováním, ručním stříkáním a může být použito také elektrostatické naprašování.

Na Obr. 15 je znázorněno další dělení zalévacích hmot.



Obr. 15: Dělení zalévacích hmot [16]

2.3.1 Epoxidové zalévací hmoty

V průmyslu je požíváno spousta epoxidových pryskyřic, díky jejich skvělým chemickým a elektroizolačním vlastnostem v široké škále teplot. Většinou jsou to tvrdé látky tvrdosti shore D 80-90 . Používají se v náročných aplikacích, kde dochází k dlouhodobému působení vyšších teplot, také vyššího napětí a chemicky agresivním prostředí. Při vytvrzování narůstá teplota a klesá viskozita (zalévací hmota je více tekutá) jakmile dojde k želatinaci hmoty tak prudce viskozita stoupne. To může vést ke vzniku značného mechanického napětí mezi zalitými součástkami a postupem času vlivem vibrací materiál začne praskat. Jejich emise jsou chemicky agresivní. Jejich použití je obdobné jaké u polyuretanů, maximální doporučená provozní teplota je 155°C. [16] Níže jsou uvedeny dva konkrétní typy:

Rhenatech

Představuje bezropouštědlovou epoxidovou pryskyřici. Je základní izolační zalévací pryskyřicí bílo-šedé barvy, která je vhodná pro četné aplikace v elektrotechnice. Používá se na malé transformátory, cívky, svorkovnice a senzory. Významnou roli hrají snadná manipulace a velmi dobrá skladovatelnost. Tvrzená pryskyřice má velmi dobré elektrické a mechanické

vlastnosti, ale i vysokou povrchovou kvalitou. Rhenatech je skvěle přilnavý s kovy, plasty, má malé celkové smrštění a vysokou pevnost.

Votastat

Je druh epoxidové pryskyřice, kterou aplikujeme pomocí VPI (vakuově tlakové impregnace). Má velmi dobrou skladovatelnost, mechanické a elektrické vlastnosti. Vytvrzuje se v rozmezí 160 – 200 °C. Používá se pro izolační systémy elektrických točivých strojů a trakčních motorů. [17]

2.3.2 Silikonové zalévací hmoty

Silikonovým polymerům a elastomerům jsou vlastní zejména základní fyzikální vlastnosti:

- Široké provozní teploty v rozsahu -115 až +300°C
- Vynikající elektrické izolační vlastnosti
- Pružnost
- Rozsah tvrdosti: měkké gely až středně tvrdé pryže
- Odolnost proti UV záření
- Dobrá chemická odolnost
- Odolnost proti vlhkosti a vodě
- Žádná nebo nízká toxicita
- Jednoduchost zpracování

Tyto přirozené vlastnosti mohou být dále vylepšeny za použití plniv a chemických aditiv pro poskytnutí dalších dodatečných vlastností, pokud je to potřeba pro např.: samozhášivost a odolnost proti hoření, tepelnou vodivost, elektrickou vodivost a adhezi. Výběrem polymeru a plniva je také možné modifikovat viskozitu, reologii, konečnou tvrdost a modul vytvrzeného materiálu. Rovněž je možné upravovat režim vytvrzení, jeho rychlost a vytvářet systémy vytvrzující za pokojové teploty nebo i vyšší. Silikony mohou být dodávány jako jedno, nebo dvousložkové systémy. Silikonové zalévací hmoty jsou velmi všestranné a poskytují širokou paletu možností pro návrh a výrobu zařízení.

Systémy, které vytvrzují nebo mění formu z tekutého stavu do pevného za pokojové teploty, jsou označovány jako RTV (Room Temperature Vulcanising). Silikonové zalévací hmoty se všeobecně dělí do dvou kategorií dle typu vytvrzování: kondenzační systém a adiční systém. Porozumnění rozdílu mezi těmito dvěma systémy je důležité pro správný výběr materiálu.

Kondenzační silikony - kondenzační systém vytvrzování používá vzdušnou vlhkost z atmosféry a nelze jej urychlit teplem (naopak: nadměrné zvyšování teploty během vytvrzování je škodlivé). Obvykle také vytvářejí při vytvrzování malé množství zplodin. Tyto dva faktory způsobují, že k vytvrzení dojde, pokud bude materiál při procesu přístupný k atmosféře. Vytvrzení bude nepříznivě ovlivněno, pokud hmota bude uzavřena v pouzdře ještě před ukončením procesu vytvrzení. Tento typ je obvykle užíván u jednosložkových lepidel a těsnících hmot, ochranných laků a jedno a dvousložkových zalévacích hmot.

Jednosložkové kondenzační hmoty (RTV) by neměly být používány při hloubce zalití větší než 10 mm, protože při hlubším zalití slouží vytvrzená hmota v horních vrstvách jako membrána proti pronikání vlhkosti dovnitř zalitého profilu, a tím brání spodním vrstvám hmoty ve vytvrzení.

Jednosložkové RTV pro vytvrzení používají celou řadu zesíťujících katalyzátorů. Tyto složky pak mají za následek tvorbu vedlejších produktů, některé z nich pak mohou poškodit citlivou elektroniku. Z tohoto důvodu pro použití v elektronice doporučeno používat zejména "Alkoxy" a "Acetonové" jednosložkové RTV jako materiály pro zalévání, jelikož nezpůsobují korozi, což přehledně ukazuje Tab. 1. Použití kondenzační metody a jednotlivé výhody a nevýhody shrnuje Tab. 2.

Tab. 1: Druhy RTV systémů a jejich nežádoucí účinky [18]

Jednosložkový RTV systém vytvrzení	Vedlejší účinek	Výsledek
Acetoxy	Kyselina octová	Korozivní
Oximový	Ketoxim	Mírně korozivní
Alkoxy	Metanol	Nekorozivní
Acetonový	Aceton	Nekorozivní

Reverze - kondenzační systém vytvrzení používající organický cínový katalyzátor se může za určitých okolností začít chemicky rozkládat a vracet se ke své původní kapalné formě. Tento proces může nastat v případě uzavření silikonu do hermeticky uzavřené nádoby, která je vystavena dlouhodobě vysoké teplotě (např. 6 měsíců při 90°C). Pokud materiál zůstane nějakou formou otevřen vůči atmosféře, potom k reverzi nedochází a materiál odolává zvýšeným teplotám (až 300°C).

Tab. 2: Výhody a nevýhody kondenzační metody [18]

Kondenzačně vytvrzující silikony	
Výhody	Nevýhody
Jednosložkové systémy	Jednosložkové systémy
snadná aplikace-bez míchání	maximální hloubka vytvrzení 10mm
snadné dávkování ze zásobníku	fixní rychlost vytvrzení
ideální pro tenkou část vytvrzení <7mm	omezení ve viskozitě
Dvousložkové systémy	Dvousložkové systémy
vysoká tolerance k odchylkám poměru katalyzátoru	mírně zvýšené limity smrštění než u adičního vytvrzování
omezené riziko inhibice	návrat k tekutému stavu, pokud dojde k zahřátí v uzavřené nádobě
hluboký bod vytvrzení	
k dispozici urychlovač pro urychlení vytvrzení	

Adiční silikony - používají pro zahájení procesu vytvrzení platinový katalyzátor. Nevytvářejí žádné vedlejší produkty (zplodiny) během vytvrzování. Po smíchání s katalyzátorem dojde k vytvrzení materiálu i v případě uzavřené jednotky a není nutné je ponechávat otevřené vůči atmosféře. Dvousložkové systémy mohou být navrženy pro vytvrzení při pokojové teplotě a pro jejich vytvrzení může být použito vytvrzování teplem bez negativních dopadů na vytvrzovaný silikon. Jednosložkové systémy pro vytvrzení obvykle vyžadují zvýšenou teplotu.

Platinový katalyzátor, který adiční silikony používají, je citlivý a podléhá negativním vlivům některých chemických sloučenin. To vede k inhibici vytvrzovacího mechanismu, což se projevuje neúplným vytvrzením materiálu. Nevytvrzený materiál by neměl během mísení a zpracování přijít do kontaktu s následujícími chemickými sloučeninami: dusíkem, sírou,

fosforem, arzémem, katalyzátory kondenzačních silikonů obsahující organický cín, PVC stabilizátory, katalyzátory epoxidových pryskyřic, vulkanizovanými gumami obsahujícími síru a kondenzačními silikony (kromě Alkoxy, které inhibiči nezpůsobují).

Tento systém vytvrzování také vyžaduje poměrně přesnou chemickou rovnováhu pro to, aby bylo dosaženo správných fyzikálních vlastností vytvrzeného materiálu. Proto je důležité, aby složky "A" i "B" byly vždy před smícháním pečlivě promíseny a aby poměr byl pečlivě zachován. Protože složky A a B jsou obvykle vyráběny jako vzájemně odpovídající sada, není doporučováno mísit materiál ze dvou rozdílných sad. Výhody a nevýhody porovnává Tab. 3.

Tab. 3: Výhody a nevýhody adiční metody [18]

Adičně vytvrzující silikony	
Výhody	Nevýhody
Jednosložkové systémy	Jednosložkové systémy
snadná aplikace-bez míchání	vyžadují teplo k vytvrzení
může být použit pro tenkou i silnou část vytvrzení	obtížnější dosáhnout dobré adheze
dobrá fyzikální pevnost	náchylné k inhibiči
Dvosložkové systémy	Dvosložkové systémy
vysoká tolerance k odchylkám poměru katalyzátoru	náchylné k inhibiči
omezené riziko inhibice	požadují přesný poměr míchání
hluboký bod vytvrzení	obtížné dosáhnout dobré adheze
k dispozici urychlovač pro urychlení vytvrzení	

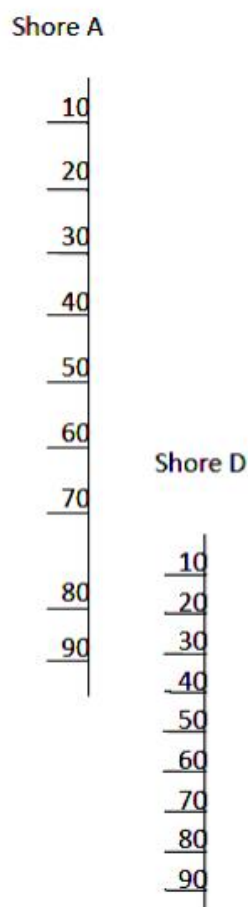
2.3.3 Polyuretanové zalévací hmoty

Použití polyuretanů je univerzální, existuje mnoho typů, kterými lze pokrýt široké spektrum aplikací. Mají dobré dielektrické vlastnosti, vysokou teplotní odolnost běžně do 120°C ale existují i speciální typy do 160°C. Mají velmi dobrou přilnavost k ostatním materiálům. V důsledku smrštění vyvíjí malý tlak na zalité komponenty, neabsorbují vodu, mají velkou chemickou odolnost. Mají nízkou viskozitu i při pokojových teplotách, takže

odpadá přehřívání komponent a také udržování určité teploty okolí. Na rozdíl od epoxidů nejsou hodnoceny jako nebezpečný odpad.

Polyuretany nejsou tak emisně agresivní jako epoxidy, proto pracoviště s polyuretany je daleko příjemnější pro pracovníky. Při skladování se musí jak složka hmoty, tak tvrdidlo uchovávat mimo dosah vlhkosti a také mimo teploty pod 5°C. Při vystavení tvrdidla teplotám nižším než 5°C, by se začaly tvořit krystaly a došlo by k jeho znehodnocení. Před použitím se hmota musí kontrolovat, jestli byla dobře rozmíchána, protože při dlouhodobém skladování vznikají usazeniny. Používají se v oblasti nízkého až vysokého napětí pro zapouzďování transformátorů, optických prvků, ponorných čerpadel a odrušovacích filtrů. [16]

U zalévací hmoty je důležitá tuhost materiálu, polyuretany existují od měkkých materiálů (tvrdost gumy) až po materiály které jsou tvrdé jako epoxid. Tvrdost je důležitá vlastnost a označuje se stupnicí shore. Stupnice shore A (silikony), tvrdost od 10 po 90 a stupnice shore D (tvrdé materiály epoxidy) tvrdost opět 10 až 90 s tím, že se tyto dvě stupnice překrývají shore A 80-90 odpovídá shore D 20-30. Na měření se používá shore A nebo shore D metr, který měří pomocí jehly tvrdost materiálu.



Obr. 16: Stupnice tvrdosti zalévacích hmot [16]

2.4 Technologie výroby elektroizolačních zalévacích hmot

Při technologii procesu zalévání vysokonapěťových produktů hraje velkou roli výběr správné epoxidové pryskyřice. Mezi základní parametry, které ovlivňují technologické zpracování elektroizolační hmoty, patří vytvrzování, flexibilita (ohebnost), teplotní klasifikace a druh plniva (Aditiva).

Potenciální namáhání vyvolané během vytvrzování anebo vyvolané komponenty může způsobit poškození výrobku. Zde je poté nutno zvážit použití pružné, středně pružné nebo tvrdé pryskyřice. Jestliže bude produkt s aplikovanou pryskyřicí teplotně, nebo mechanicky šokově namáhán, je vhodné volit co nejflexibilnější pryskyřici v souladu s ostatními vyžadovanými parametry.

Výběr teplotní třídy pryskyřice musí být proveden v souladu se zamýšleným použitím celého komponentu a také jednotlivých dílů v komponentu, které by mohli ovlivnit technické vlastnosti pryskyřice během provozu zejména tepelnou zátěží.

V oblasti výroby, kde je nutné použít pryskyřici s co největší tekutostí z důvodu co nejlepšího zatékání do špatně přístupných míst, bývá používáno pryskyřic bez plnidel a tedy s nižší viskozitou. Pryskyřice s plnidly jsou použity všude tam, kde je potřeba redukovat smrštění materiálu. Nižší exotermické vlastnosti a vyšší odolnost vůči teplotním šokům a tam, kde zvýšená viskozita pryskyřic nebrání aplikaci plnicími stroji. Tam, kde je potřeba použít pryskyřice s nízkým stékáním, jsou nasazeny pryskyřice s tixotropickými vlastnostmi. Druh tixotropické pryskyřice se chová po smíchání obou složek jako nestékavá pasta.

K těmto čtyřem uvedeným parametrům je nutné před návrhem použití epoxidové pryskyřice přidat další faktory, které mohou ovlivnit výběr typu pryskyřice zejména u fyzikálních a elektrických vlastností. Viskozita pryskyřice by měla být pečlivě zvolena dle potřeb aplikačního procesu. Kde je potřeba pryskyřice s nízkou viskozitou, např. impregnace vinutí, pryskyřice by měla být aplikována na přehřátý komponent z důvodu redukování počátečního stavu viskozity.

Při výběru správného druhu pryskyřice může nastat řada technologických problémů. Další problémy nastávají i při aplikaci konkrétní pryskyřice v technologickém procesu. Popis nejčastějších problémů vyplívajících z technologie výroby při použití epoxidových pryskyřic je uveden v Tab 4. Tabulka zahrnuje i technologické problémy při použití práškových pryskyřic a dále popis příčiny jednotlivých problémů a konkrétní návrh řešení, který dokáže problémy odstranit, případně celý proces výroby zlepšit. [15]

Tab. 4: Možné problémy při aplikaci epoxidové pryskyřice a jejich řešení [22]

Tato tabulka by měla být nápomocna při popisu a řešení některých případných problémů, které mohou vzniknout během použití a aplikace pryskyřice. Pokud nelze nalézt příčinu v této tabulce, obraťte se prosíme na firmu 3M Česko.		PROBLÉM						
		Unikající vzduch v pryskyřici v podobě bublin z malých škvír během vytvrzování	Nízká přilnavost, pryskyřice neulpívá na aplikovaný díl	Slabá odolnost vytvrzené pryskyřice, vrstva se láme a praská	Nízká odolnost teple a tepelná vodivost během aplikování pryskyřice	Nízká chem. odolnost, vrstva se rozpouští nebo hrudkovatí při styku s chemikálií	Vrstva se projevuje ve škvírách jako hrubá nebo má tendenci tvořit zvrásněný povrch	Vrstva vytvořena aplikací pryskyřice je příliš nízká
PŘÍČINA A ŘEŠENÍ	Zachycený vzduch v pryskyřici. Změnit teplotu předehřátí nebo vytvrzení	•						
	Komponent není čistý, zbytky oleje, maziva, činidel aj. na povrchu nebo mezi vrstvami. Důkladné vyčištění před aplikací	•	•	•				
	Tepelná vodivost dílu je nízká. Je vhodnější použít produkt s vyšší teplotní kapacitou				•			
	Prášková pryskyřice je zvlhlá. Uchovávejte pryskyřici v uzavřeném stavu nebo použijte vysušený vzduch k aplikaci	•						
	Nepřichytávající materiál (Teflon atd.). Změňte materiál		•					
	Pryskyřice není plně vytvrzena. Zkontrolujte vytvrzovací teplotu nebo důslednost vytvrzení, dobu vytvrzení nebo zda díl určený k vytvrzení je vytvrzován od počátku cyklu		•	•	•	•		
	Kontaminace prášku Zkontrolujte, zda se do prášku nedostávají zbytky ropných látek nebo vody, směs uchovávejte na čistém místě						•	
	Skladovací teplota je příliš vysoká. Skladujte při teplotě do 24 °C Pryskyřice je zestárlá. Zkontrolujte skladovatelnost a dobu použitelnosti pryskyřice						•	•
	Nedostatečné promíchání pryskyřice. Složky dodatečně promíchejte v ponořovací lázni						•	•
	Expoziční doba práškování je krátká. Prodlužte dobu práškování Příliš mnoho vzduchu během vzdušného promíchávání. Snižte průtok vzduchu Teplota předehřátí je nízká. Zvyšte teplotu předehřátí Díl je příliš malý k udržení předehřáté teploty. Zvyšte předehřívací teplotu, použijte opakovanou aplikaci nebo použijte elektrostatickou pryskyřici						•	•
	Napětí elektrostatické aplikace je příliš nízké. Zvyšte napětí Díl je příliš vzdálen od aplikátoru. Snižte vzdálenost od aplikátoru Nanášení pryskyřice je krátké. Prodlužte dobu nanášení Kontaminace prášku vlhkostí apod. Uchovávejte pryskyřici mimo místa s vlhkostí atd.							•

2.5 Defekty v zalévacích hmotách

Při výrobě zalévacích hmot se často vyskytuje problém s přílišnou vzdušností ve vzorku, což má za následek vznik bublinek a ty poté zeslabují elektroizolační, tepelné i mechanické vlastnosti. Na Obr. 17 je pryskyřice WEPURAN VT 3402 KK, ve které jsou jasně viditelné bublinky. Tyto bublinky vznikly již při míchání směsi. Velkou roli v tomto ohledu hraje výběr míchacího zařízení. Není doporučeno používat mixéry do domácnosti, či nástavce na vrtačky. Pro smíchání zalévacích pryskyřic jsou optimální míchadla s vyvrtanými otvory.



Obr. 17: Pryskyřice WEPURAN VT 3402 KK – vmíchané bublinky [24]

Příměsí vzduchu se však nedá zcela zabránit a k odstranění vmíchaného vzduchu je doporučeno umístit směs do vakua. Při cca 30 mBar bude veškerý vzduch v několika minutách spolehlivě odstraněn.

Další příčinou tvorby bublinek je vlhkost. Vytvrzovací složky u polyuretanové pryskyřice jsou na vlhkost citlivé. Reakcí vzdušné vlhkosti s tvrdidlem dochází ke vzniku CO₂. Nejčastěji je na vině parné počasí, nebo kondenzace na studených částech v teplém prostředí. Hmota pak vypadá naprosto bezchybně a bublinky jsou rozpoznatelné, až když s přibývajícím prosítováním zalévací hmoty nemůžou uniknout. Toto však může trvat i několik hodin a poté je již velmi obtížné se vzduchu zbavit. Aby se zabránilo reakcím s vlhkostí, měly by být součástky, které je potřeba zalévat, zahřívány asi 30 minut na teplotu 50–80 °C, a složky zalévací hmoty by měly být zahřáty na pokojovou teplotu, při které ji bude bezpečné používat. Tuto problematiku znázorňuje Obr. 18.



Obr. 18: Pryskyřice WEPURAN VT 3402 KK – vzdušná vlhkost [24]

K tvorbě bublin může vést také špatný míchací poměr obou složek. V takovém případě už nemůže nadbytečné množství tvrdidla reagovat se složkou zalévací hmoty. Místo toho způsobí reakci s vlhkostí. Proto by mělo být dbáno na co možná nejpřesnější odměření obou složek zalévací pryskyřice, což vystihuje Obr. 19.



Obr. 19: Pryskyřice WEPURAN VT 3402 KK – špatný míchací poměr [24]

2.6 Způsoby aplikace zalévacích hmot

V současné době se používají nejčastěji dva postupy. VPI (Vacuum Pressure Impregnation) a Resinrich. Oba způsoby jsou velmi rozdílné a mají řadu výhod i omezení.

2.6.1 Technologie Resinrich

Název této technologie lze přeložit jako bohatý na pryskyřici. Základem je tříslůžkový kompozit. Nosná část je tvořena skleněnou tkaninou, která je tvořena stáčenými vlákny a její tloušťka je kolem 0,14 mm. Díky nové technologii, kdy je možné vlákna nestáčet, ale rovnat do roviny je její tloušťka 0,12 mm. Díky tomu je též zvýšena elektrická pevnost (zhruba o 7%) a sníženy dielektrické ztráty. Izolační bariérou (plnivem) je kalcinovaný slídový papír, který je hutný, pevný a méně nasákový. Jako pojivo se používá epoxidová pryskyřice, jejíž obsah se pohybuje kolem 30 - 40 %. Tato izolační páska má tloušťku od 0,15 do 0,2 mm, dodává se ve formě polotovaru a v tzv. B stavu, což znamená, že je částečně vytvrzena.

Podle pracovního napětí stroje se potom potřebná vrstva této pásky nanáší na tyčové vinutí. K tomu jsou určeny dva způsoby. První způsob je kontinuální, kdy se po celé délce tyče a v čelech ovine materiál ve formě pásky o šířce 20 mm. Ovinutí se provádí s polovičním, třetinovým nebo dvoutřetinovým překrytím. Druhou možností je diskontinuální způsob. Tyčová část je tvořena fóliovým materiálem, na který v čelech navazuje ovin páskou.

U obou způsobů se dává větší tloušťka izolace než je plánovaná, to je tzv. přídavek na stlačení. Dále následuje proces vytvrzení probíhající ve formách, které umožňují stažení izolace na požadovaný rozměr. Vytvrzení probíhá za pomoci tzv. latentního tavidla při teplotě 160 – 170 °C po dobu, která je závislá na tloušťce izolace a typu použité pryskyřice. Dále je nutné řídit proces ochlazování tak, aby chládko stejně jádro i izolační trubka, protože jinak by mohlo dojít k oddělení izolace od jádra a tím ke vzniku nehomogenit. Po vyjmutí tyče vinutí z formy a jejím zchladnutí jsou tyto tyče bez dalších úprav připraveny k montáži do drážek. [19]

2.6.2 Technologie VPI (Vacuum Pressure Impregnation)

Hlavním rozdílem oproti technologii resinrich je to, že se vinutí ovine nenaimpregnovanou páskou a až poté se impregnuje celé ovinuté vinutí. Základem je tří komponentový savý izolant, který se při impregnačním procesu prosytí impregnantem. Jako nosná složka se používá skleněná tkanina nebo polyesterové rouno. Pojiva se používá do 7 % pro mechanické zpracování pásky. Nejdůležitější vlastností materiálu je savost, protože je

důležité, aby došlo k dokonalému naimpregnování všech vrstev i při jejich větším počtu. Jako materiál s dobrou savostí je používána nekalcinovaná slída. Jako impregnant se používají bezropouštědlové epoxidové, polyesterové a silikonové pryskyřice, které mají dobré elektrické a mechanické vlastnosti a relativně krátkou vytvrzovací dobu.

Vlastní impregnační proces probíhá v tlakově a vakuově těsném kotli a je od něj odvozen název této technologie. Nejprve probíhá sušení při teplotě vyšší než 100 °C po dobu 20 hodin, které má za úkol odstranit vlhkost. Dále je v impregnačním kotli zavedeno vakuum, které odstraní zbytek těkavých látek a vlhkosti. Následuje postupné zaplavení kotle ode dna impregnantem, který je předem zahřátý na určitou teplotu v ohřívacím zařízení. Pak se po zrušení vakua zavede opět přetlak. Po hodině se zruší přetlak, vypustí impregnant a předmět se přemístí do sušárny.

Nejprve sušení probíhá za mírného podtlaku, aby se urychlilo vyprcháání těkavých látek. Samotné vytvrzování probíhá za normálního tlaku za pomoci proudění teplého vzduchu. Stroj je nutné otáčet, aby nedocházelo ke stékání pryskyřice. Technologií VPI lze impregnovat kromě celků i jednotlivé části elektrických zařízení. [19]

2.6.3 Porovnání Resinrich a VPI

Každá technologie má svá pro a proti. VPI je technicky náročnější a dražší než resinrich. Dále pokud je u VPI vinutí impregnováno do kompaktního celku, není zde poté možnost oprav jednotlivých dílů. Naopak u resinrich lze snadno vadnou cívku vyměnit. Z hlediska homogenity systému je VPI lepší, protože u resinrich dochází k výskytu nehomogenit, které u VPI nejsou. VPI při využití průběžného systému izolace umožňuje zkrácení cívek a tím úsporu materiálu až o 6 %. V České Republice se setkáme v podstatě pouze s technologií resinrich. [19]

3 Teoretická část: Metody měření

3.1 Stejnoseměrné měřicí metody

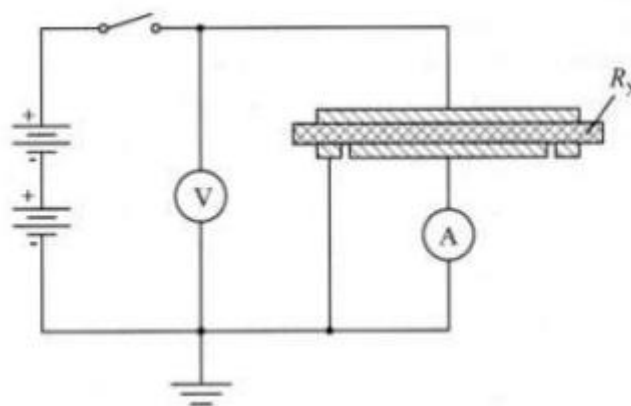
Metody používané pro měření odporu lze rozdělit na přímé – založeny na současném měření stejnosměrného napětí připojeného na neznámý odpor a proudu, který tímto odporem protéká (voltampérová metoda) a porovnávací – určují poměr neznámého odporu a známého odporníku v můstkovém zapojení nebo porovnávají proudy tekoucí přes odpory při konstantním napětí

3.1.1 Metoda měření absorpčních a resorpčních charakteristik

Je to metoda, při které se měří nabíjecí a vybíjecí proud, procházející vzorkem. Vyhodnocení absorpční a resorpční charakteristiky poskytuje cenné údaje. Jedná se o určení izolačního odporu R_x , polarizačních indexů p_{i1} , p_{i10} , dalších parametrů, kterými jsou redukované resorpční křivky a velikosti ploch pod absorpčními i resorpčními křivkami. Další získávané parametry z absorpčních a resorpčních charakteristik jsou výše zmiňované polarizační indexy, které se často využívají pro svou dobrou výpovědíschopnost. Pro popis stavu materiálu využívají časovou proměnnost absorpčního proudu. Polarizační indexy jsou nezávislé na rozměrech měřených předmětů. Hodnocení absorpce a resorpce lze provádět také vyjádřením (integrací) plochy pod absorpční, případně resorpční křivkou. V případě ideálního sledovaného průběhu absorpčního nebo resorpčního proudu, lze určit tuto plochu analytickou metodou, což je možné pouze v teoretické rovině. V praxi se využívá některá numerická metoda. [20]

3.1.2 Voltampérová metoda

Patří mezi nejpoužívanější metody pro přímé měření velmi malých proudů. Zdroj napětí pro tato měření musí být dostatečně stabilní. Napěťové hladiny stejnosměrného napětí se doporučují volit v rozsahu 100, 250, 500, 1 000, 2 500, 5 000, 10 000, 15 000 V. Pro měření protékajícího proudu se doporučuje používat ampérmetr s minimální citlivostí 10^{-12} A. Zapojení ukazuje Obr. 20.



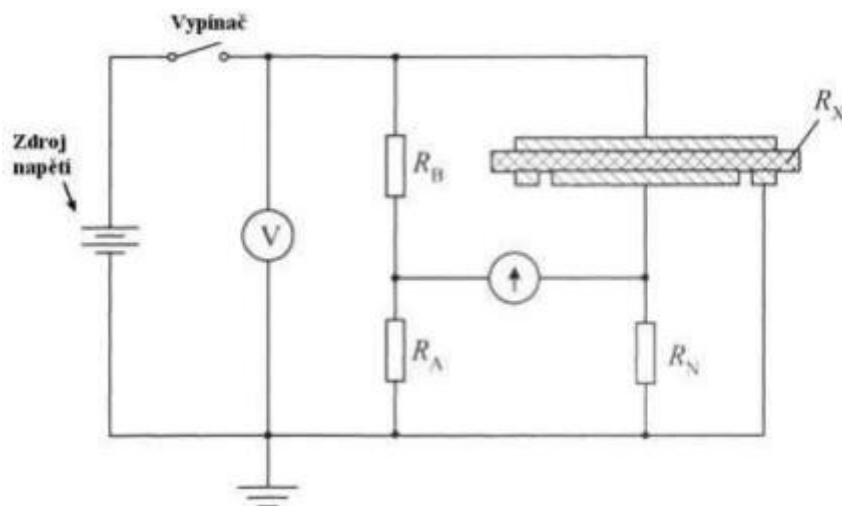
Obr. 20: Schéma zapojení voltampérové metody měření

3.1.3 Metoda Wheatstonova můstku

Tato metoda funguje na principu porovnávání neznámého odporu R_x se známým referenčním odporem R velké hodnoty. Jak je vidět na Obr. 21, neznámý odpor R se skládá ze tří sérioparalelně zapojených odporů. Odpor R_B , který se mění v dekadových stupních, odpor R_A , který slouží pro jemné vyrovnávání a odpor R_N , jehož hodnota se nemění. Jestliže je takové odporové zapojení vyvážené, protéká větví A i B stejný proud a nulový indikátor zobrazuje nulovou výchylku. V takovém případě platí pro neznámý odpor R_x vztah

$$R_x = R_N * \frac{R_B}{R_A}, \quad (3.1)$$

kde R_A , R_B a R_N jsou odpory můstku. Tato metoda se nehodí pro měření, kde proud tekoucí vzorkem je časově závislý a pochopitelně pro kvalitní izolanty. [20]



Obr. 21: Schéma zapojení Wheatstonovy metody

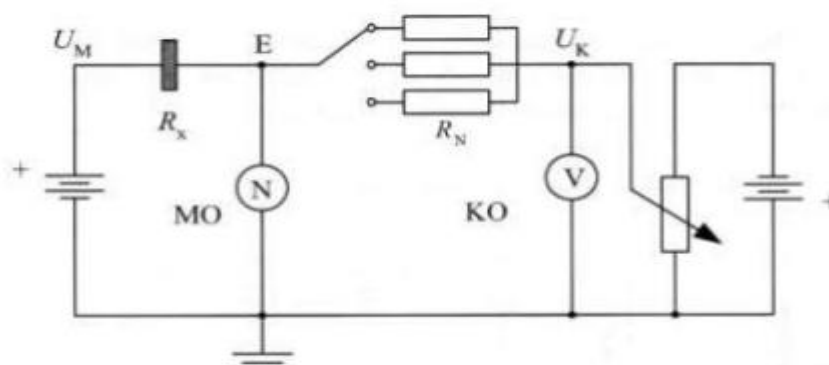
3.1.4 Kompenzační metoda

Princip této metody spočívá v kompenzaci úbytku napětí na odporovém normálu R_N pomocí proměnného napětí U_K . Při této metodě, jak je vidět na Obr. 22, se měřicí obvod skládá ze dvou částí. První část se nazývá měrný obvod a skládá se ze zdroje měrného napětí U_M , neznámého odporu R_x a nulového indikátoru N . Druhá část obvodu se nazývá kompenzační a skládá se z referenčního odporu R_N , zdroje kompenzačního napětí U_K a voltmetru V . V okamžiku, kdy bude měrným a kompenzačním obvodem protékat proud o

stejně velikosti, ukáže nulový indikátor nulovou výchylku a obvod se bude nacházet v tzv. vykompenzovaném stavu a pro neznámý odpor R_X bude platit vztah

$$R_X = R_N * \frac{U_M}{U_K}, \quad (3.2)$$

kde U_M je měrné napětí a U_K je kompenzační napětí měřené voltmetrem. [20]



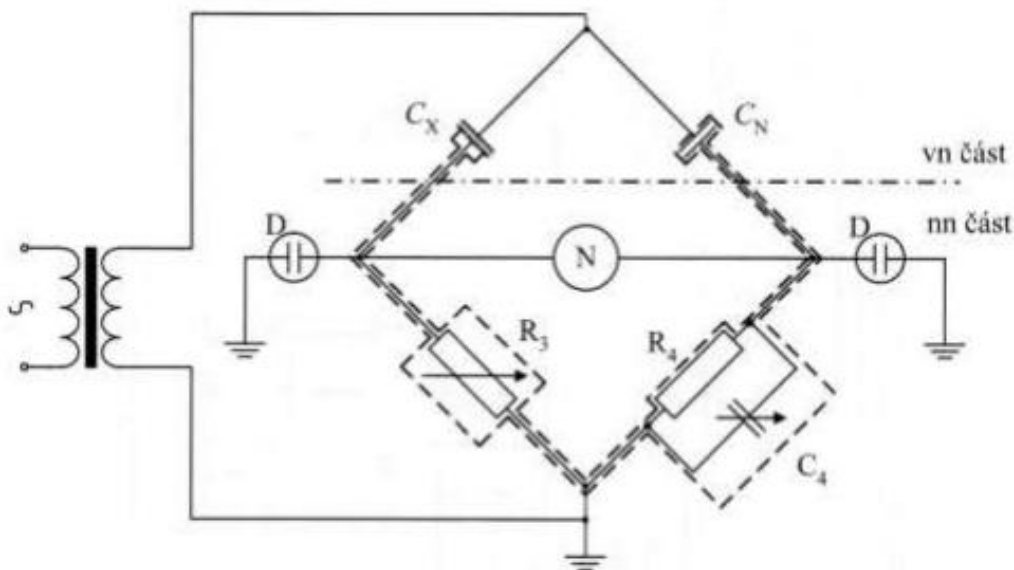
Obr. 22: Schéma kondenzační metody

3.2 Střídavé měřicí metody

Nejpoužívanějším principem je metoda využívající zapojení Scheringova můstku. Lze pochopitelně použít i jiné můstky jako například transformátorový, paralelní, T-můstek i další. Výrobci můstků rozvíjejí tyto metody co do přesnosti i co do zjednodušení obsluhy, tedy vlastně eliminace lidského faktoru a jím zanášených nepřesností do měření. V následujícím textu se zaměříme na metody, které jsou v praxi používány nejvíce.

3.2.1 Metoda Scheringova můstku

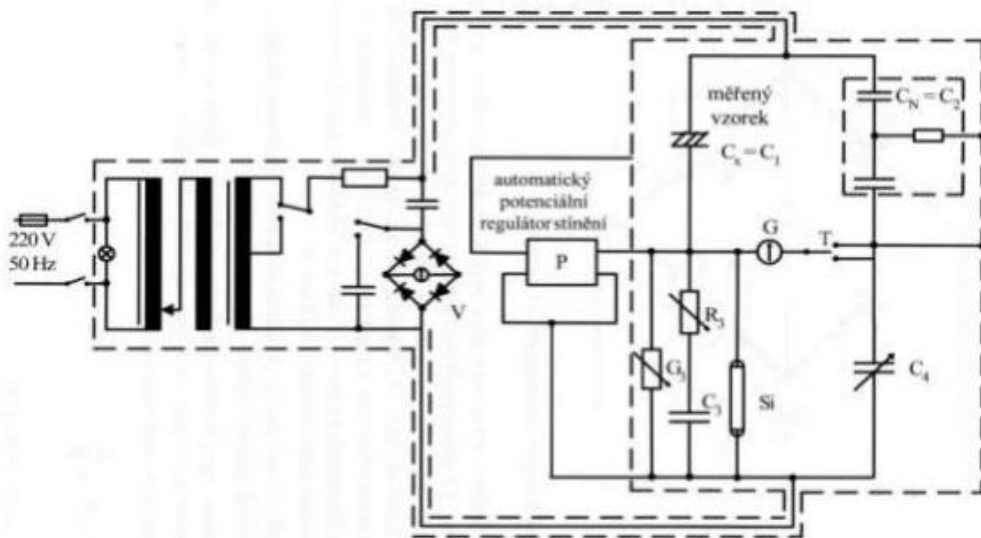
Můstek se skládá ze dvou hlavních částí. Z první části, jejíž prvky jsou umístěny ve vysokonapěťové části zkušebny a druhé části sloužící k vyvažování mimo vysokonapěťovou část. Galvanické oddělení obou částí tvoří vzorek v příslušném elektrodovém systému a kapacitní normál. Nízkonapěťová část slouží k nastavení rovnováhy. K vyvažování slouží odporová dekáda R_3 a kapacitní dekáda C_4 . Dekádou R_3 se vyrovnává kapacitní složka náhradního sériového obvodu a dekáda C_4 slouží k vyrovnání odporové složky. Rovnovážný stav indikuje nulový indikátor N . Nízkonapěťová část můstku musí být stíněna proti vlivu elektromagnetických parazitních polí, která mají vliv na přesnost měření. Schéma můstku je znázorněno na Obr. 23. [20]



Obr. 23: Schéma zapojení Scheringova můstku

3.2.2 Metoda čtyřkapacitního můstku

Tento můstek se odlišuje od Scheringova můstku tím, že má ve všech větvích kapacity, což má za následek zvýšenou impedanci ve všech větvích, a tím vyšší citlivost i přesnost měření. Můstek má zabudovaný vlastní napájecí zdroj, který zaručuje čistý sinusový průběh napětí. Parazitní kapacity přívodů a měrných kondenzátorů, které mohou ovlivnit měření, jsou kompenzovány zabudovaným stíněním a vestavěným automatickým potenciálním regulátorem P . Vyrovnání můstku se děje pomocí elektronického nulového indikátoru, který má regulovatelnou citlivost. Kapacitní dekáda C_4 vyrovnává měření neznámé kapacity C_x . Ztráty vzorku jsou vyrovnávány odporovou dekádou R_3 a vodivostní dekádou G_3 ve třetí můstkové větvi. Velikost ztrátového činitele $\operatorname{tg} \delta$ se odečítá přímo na stupnici ovládacích prvků můstku. Schéma můstku je znázorněno na Obr. 24. [20]



Obr. 24: Schéma zapojení čtyřkapacitního můstku

Praktická část

4 Použité vzorky

Použité vzorky CHS-EPODUR 494-1667 pro měření byly vyrobeny v Pardubicích ve firmě SYNPO a.s. Tyto vzorky se skládají z několika složek:

1. Modifikovaná epoxidová pryskyřice
2. Plnivo
3. Tvrdidlo
4. Flexibilizátor
5. Urychlovač
6. Pigmentová pasta

4.1 Plnivo

Plnivo tvoří přísada ovlivňující vlastnosti licí směsi i výrobku. Plniva jsou práškové nebo granulované látky používané pro dosažení požadovaných mechanických vlastností (pevnosti, tuhosti, tvrdosti, houževnatosti), tepelné odolnosti nebo vzhledu polymeru. Některé plniva také snižují cenu polymeru. Jako plnivo byl použit mikro jemný křemenný písek.

4.2 Tvrdidlo

Jako tvrdidlo byl použit tetrahydromethylftalát anhydrid. Epoxidová tvrdidla lze rozdělit na polyadiční a polymerační dle toho, zda se při vytvrzování stávají nebo nestávají součástí sítě. Tato klasifikace velmi málo souvisí s reakčním mechanismem při vytvrzování, protože např. polymerační tvrdidla ve většině případů reagují adičním mechanismem. Polyadiční tvrdidla obsahují většinou reaktivní vodíky, které se při reakci připojují na epoxidový kyslík za tvorby skupiny $-OH$ k uhlíku epoxidové skupiny, na který se připojil zbytek molekuly po odštěpení vodíku.

4.3 Flexibilizátor

Jako flexibilizátor byl použit polyetylen glykol. Flexibilizátory, též nazývány změkčovadla, nebo zvláčňovadla jsou ve své podstatě málo těkavé organické látky, které dodávají polymerům tvárnost a ohybnost. Zároveň zvyšují jejich termoplastičnost tím, že zmenšují viskozitu taveniny a snižují teplotu skelného přechodu, na což se dá pohlížet jako

negativní jev. Princip působení flexibilizátorů v reaktoplastech spočívá ve zvýšení pohyblivosti makromolekul.

4.4 Urychlovač

Jako urychlovač byl použit benzendimethylamin. Urychlovače jsou látky, které pokud jsou přidány v malém množství, urychlují zesíťování polymerů.

4.5 Pigmentová pasta

Jako barvivo byla použita pigmentová pasta E-pasta BF 135 M – BA. U pigmentových barev jde většinou o práškové barvy, dodávající plastům, pryskyřicím, nebo nátěrovým hmotám barevný odstín a kryvost a v některých případech mohou působit i jako plniva. Převážná část polymerů je totiž v základu čirá, nebo mléčně zakalená. Většina firem používá určité typy pigmentových barev, aby tak zvýraznili svou značku.

5 Výroba vzorku

Vzorek byl vyroben následujícím postupem:

1. Příprava formy. Očištění od nečistot a následné nanesení mikrofilmu separátoru pro snížení adheze vzorku k formě, což má za následek snadnější vyjmutí.
2. Umístění silikonových vzpruh do formy v požadované tloušťce vzorku 2 mm. Mikrofilm separátoru byl nanesen i na tyto silikonové vzpruhy.
3. Zkompletování obou polovin licí formy a umístění do fixátoru.
4. Umístění formy do pece, kvůli předehřátí formy.
5. Výroba odlévacích nástavců z alobalu.
6. Navážení přesného množství epoxidové pryskyřice.
7. Přidání plniva ve formě mikrojemného křemenného písku, tvrdidla, flexibilizátoru a pigmentové pasty.
8. Ruční míchání vzorku.
9. Mechanické míchání vzorku.
10. Odsávání vzduchu ze vzorku pomocí vakuové vývěvy.
11. Vylití předehřátých forem vzorkem a následné teplotní vytvrzování.

Všechny výše popsané složky je potřeba přidat v přesném poměru, který popisuje Tab. 5. Postup je takový, že na každých 100 hmotnostních dílů složky A, která je zastoupena epoxidovou pryskyřicí, je potřeba přidat 85 hmotnostních dílů složky B (tvrdidlo), 0,6 složky C (urychlovač), 17 dílů složky D (flexibilizátor) a 3 hmotnostní díly pigmentové pasty. Dále bylo přidáno speciální aditivum S1 a S2 v poměrech definovaných v tabulce. Jejich složení a účel však podléhají utajení. Na závěr je přidáno 382 gramů plniva v podobě křemenného písku.

Tab. 5: Poměry jednotlivých složek pro přípravu vzorku

Vzorek	CHS-EPODUR 494-1667				Pigmentová pasta	Aditivum	Plnivo písek ST6	
	Složka A	Složka B	Složka C	Složka D	BF135M	S1 / S2	(g)	(%)
1839	100	85	0,6	17	3	0	382	65,0
1840	100	85	0,6	17	3	10 (S1)	382	63,9
1841	100	85	0,6	17	3	20 (S1)	382	62,9
1842	100	85	0,6	17	3	2 (S2)	382	64,8
1843	100	85	0,6	17	3	3 (S2)	382	64,7

6 Příprava vzorků

Před započítáním samotného měření bylo potřeba změřit tloušťku vzorků, kvůli výpočtu permitivity a především kvůli dodržení normy ČSN EN 62631. Každý vzorek byl na více místech změřen mikrometrem a z naměřených hodnot potom spočten průměr, který posloužil pro výpočet směrodatné odchylky.

Tab. 6: Naměřené hodnoty pro sadu vzorků 1839

sada vzorků 1839					
číslo měření	vzorek I (mm)	vzorek II (mm)	vzorek III (mm)	vzorek IV (mm)	vzorek V (mm)
1	2,337	2,285	2,231	2,279	2,219
2	2,356	2,298	2,264	2,3	2,214
3	2,343	2,311	2,254	2,293	2,239
4	2,318	2,293	2,247	2,299	2,238
5	2,356	2,317	2,261	2,317	2,18
6	2,329	2,314	2,277	2,313	2,222
7	2,357	2,312	2,248	2,3	2,27
8	2,358	2,312	2,276	2,33	2,198
9	2,354	2,318	2,272	2,322	2,248
10	2,339	2,285	2,295	2,346	2,21
průměr	2,345	2,305	2,263	2,310	2,224
směrodatná odchylka	0,014	0,013	0,018	0,020	0,026

Tab. 7: Naměřené hodnoty pro sadu vzorků 1840

sada vzorků 1840					
číslo měření	vzorek I (mm)	vzorek II (mm)	vzorek III (mm)	vzorek IV (mm)	vzorek V (mm)
1	2,335	2,588	2,534	2,804	2,512
2	2,441	2,478	2,596	2,726	2,684
3	2,491	2,629	2,454	2,742	2,462
4	2,555	2,576	2,471	2,676	2,521
5	2,546	2,619	2,551	2,669	2,613
6	2,510	2,567	2,618	2,561	2,782
7	2,543	2,646	2,240	2,619	2,255
8	2,578	2,665	2,581	2,585	2,692
9	2,596	2,335	2,462	2,521	2,482
10	2,645	2,661	2,57	2,27	2,273
průměr	2,524	2,576	2,508	2,617	2,528
směrodatná odchylka	0,087	0,101	0,110	0,150	0,173

Tab. 8: Naměřené hodnoty pro sadu vzorků 1841

sada vzorků 1841					
číslo měření	vzorek I (mm)	vzorek II (mm)	vzorek III (mm)	vzorek IV (mm)	vzorek V (mm)
1	2,183	2,099	2,093	2,027	1,970
2	2,192	2,133	2,109	2,049	1,925
3	2,174	2,093	2,111	2,036	1,974
4	2,190	2,115	2,131	2,006	1,964
5	2,185	2,099	2,136	2,079	1,930
6	2,158	2,119	2,120	2,013	1,855
7	2,144	2,097	2,099	2,004	2,007
8	2,188	2,092	2,145	1,935	1,916
9	2,181	2,160	2,150	2,017	1,949
10	2,173	2,085	2,173	2,035	1,885
průměr	2,177	2,109	2,127	2,020	1,938
směrodatná odchylka	0,015	0,023	0,025	0,037	0,045

Tab. 9: Naměřené hodnoty pro sadu vzorků 1842

sada vzorků 1842					
číslo měření	vzorek I (mm)	vzorek II (mm)	vzorek III (mm)	vzorek IV (mm)	vzorek V (mm)
1	2,917	2,838	2,949	2,215	2,766
2	2,823	2,837	2,920	2,414	2,623
3	2,833	2,823	2,973	2,456	2,875
4	2,819	2,811	2,914	2,572	2,836
5	2,816	2,801	2,896	2,569	2,739
6	2,742	2,757	2,848	2,567	2,312
7	2,768	2,823	2,866	2,604	2,883
8	2,805	2,753	2,701	2,657	2,673
9	2,812	2,764	2,821	2,663	2,883
10	2,835	2,65	2,881	2,756	2,673
průměr	2,817	2,786	2,877	2,547	2,726
směrodatná odchylka	0,046	0,058	0,077	0,153	0,174

Tab. 10: Naměřené hodnoty pro sadu vzorků 1843

sada vzorků 1843					
číslo měření	vzorek I (mm)	vzorek II (mm)	vzorek III (mm)	vzorek IV (mm)	vzorek V (mm)
1	2,085	2,044	2,105	2,044	2,061
2	2,095	2,048	2,087	2,008	2,079
3	2,074	2,039	2,079	2,056	2,040
4	2,084	2,046	2,074	1,938	2,053
5	2,101	2,059	2,068	2,034	2,079
6	2,096	2,058	2,071	2,063	2,085
7	2,042	1,986	2,032	2,016	1,984
8	2,102	2,064	2,056	2,000	2,076
9	2,088	2,041	2,051	2,031	2,042
10	2,11	2,069	2,034	1,994	2,41
průměr	2,088	2,045	2,066	2,018	2,091
směrodatná odchylka	0,019	0,023	0,023	0,036	0,116

Příklad výpočtu směrodatné odchytky:

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.1)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{(10-1)} * \sum_{i=1}^{10} (2,085 - 2,088)^2 + (2,095 - 2,088)^2 + \dots + (2,11 - 2,088)^2} \quad (3.2)$$

$$s = 0,019 \text{ mm} \quad (3.3)$$

Na základě vyhodnocení směrodatné odchytky byly vybrány ty nejvhodnější vzorky od nejkvalitnějšího po nejméně kvalitní, nejméně však vždy pět z jedné řady.

7 Měřicí soustava

7.1 Tettex 2830/2831 – analyzátor olejů a pevných dielektrik

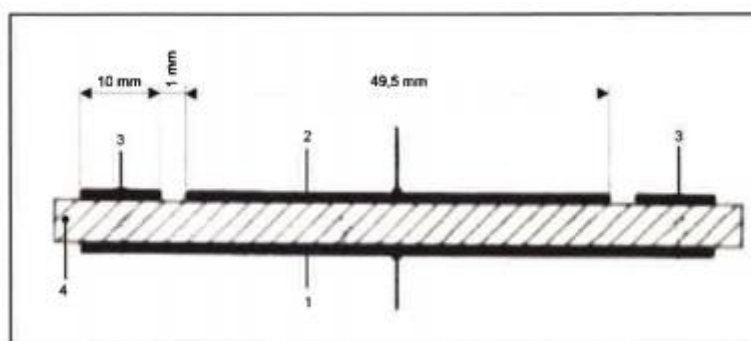
Analyzátor olejů a pevných dielektrik 2830/2831 je sestaven pro měření tekutých a pevných izolantů s velmi malým ztrátovým činitelem vysokonapěťových izolačních materiálů. Přístroj pracuje na principu kombinovaného vektorového můstku a je schopen analyzovat kapacitu, ztrátový činitel a také DC odpor s vysokou přesností a stabilitou certifikovanou metrologickým institutem.

Grafické uživatelské rozhraní je vysoce intuitivní, zaměřené na vyhovující využití vestavěných programů (např. předprogramované procedury dle norem), využívající velkou barevnou dotykovou obrazovku jako vstup. Uživatelé mohou volit mezi manuálním a automatickým režimem. Manuální režim nabízí rychlé měření, automatický režim podporuje kompletní automatizované sekvence dle požadavků norem.

Měřicí přístroj je plně automaticky vyvažován pomocí vestavěného PC , následně jsou naměřené hodnoty vypočítány a zobrazeny. Měření, resp. vypočítáno může být přes 13 různých parametrů. Měřicí přístroj automaticky rozpozná, určí a zobrazí typ měřeného objektu (induktivní/kapacitní). Zařízení obsahuje kromě vektormetrového můstku také teplotní regulátor, DC a AC napěťové zdroje a měřič DC odporu. Další technické údaje poskytuje Obr. 27.

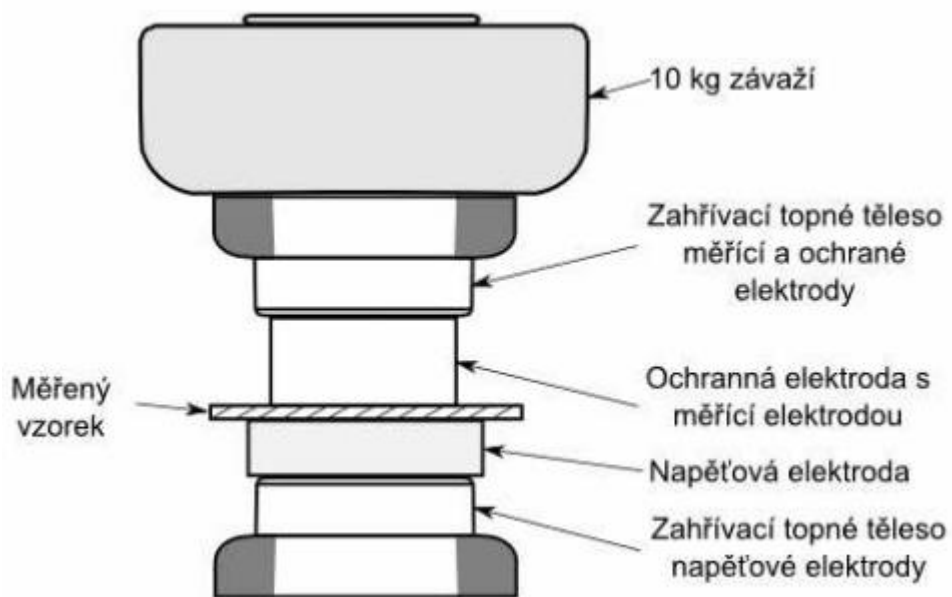
7.2 Tettex 2914 – testovací komora

Nejdůležitější částí testovací komory jsou samotné elektrody, mezi které se vkládá vzorek tuhého dielektrika. Vzorky je nutné upravit do plochého tvaru, ideálně kruhové destičky o průměru 75 mm, přičemž jejich tloušťka se může pohybovat v rozmezí od 1 mm do 10 mm. Obrázek č. 25 zobrazuje elektrodový systém,



Obr. 25: Elektrodový systém Tettexu 2914

kde 1 – elektroda s vysokým potenciálem, 2 – elektroda s nízkým potenciálem, 3 – bezpečnostní elektroda, 4 – testovaný vzorek.



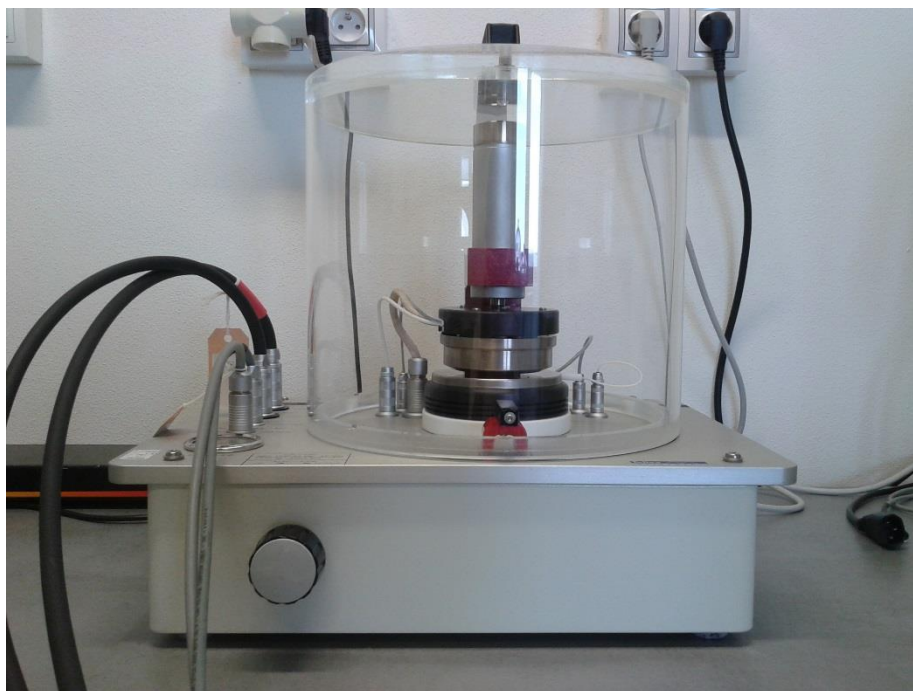
Obr. 26: Celkový pohled na elektrodový systém Tettex 2914 [23]

8 Sestavení měřícího pracoviště

K diplomové práci byly využity přístroje Tettex 2830/2831 (Obr. 27) a měřící komora Tettex 2914 (Obr. 28). Agilent 4339B (Obr. 29) s elektroodvzdušňovací systém 16008B. (Obr. 31) a tepelná komora Stericell (Obr. 30).



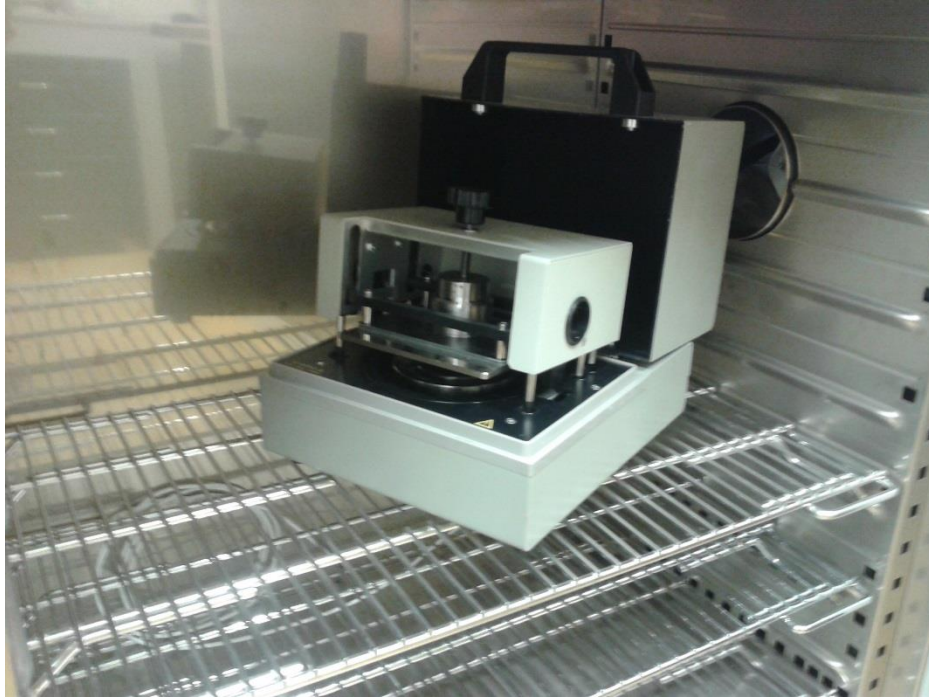
Obr. 27: Měřící přístroj Tettex 2830/2831



Obr. 28: Měřicí komora Tettex 2914



Obr. 29: Měřicí přístroj Agilent 4339B



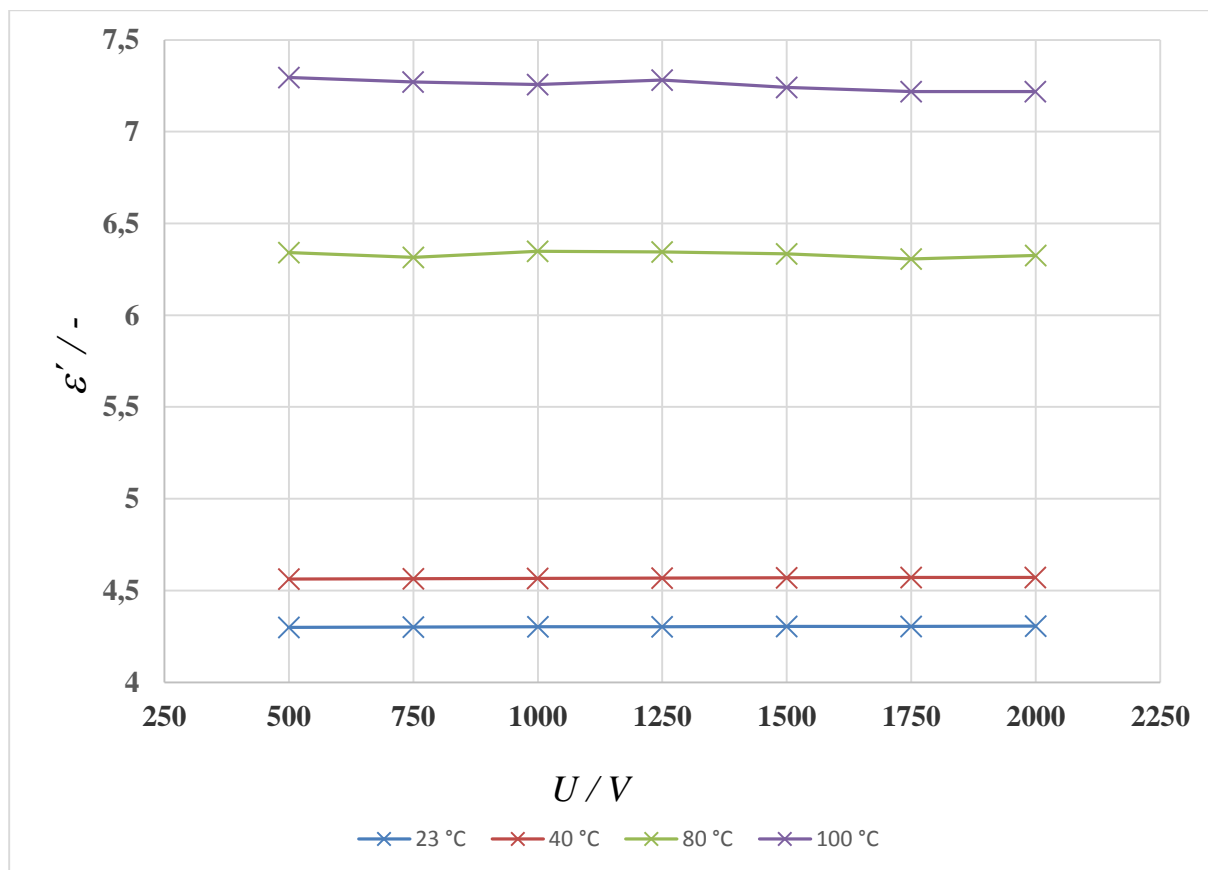
Obr. 30: Elektrodový systém Agilent 16008B umístěný v komoře Stericell



Obr. 31: Tepelná komora Stericell

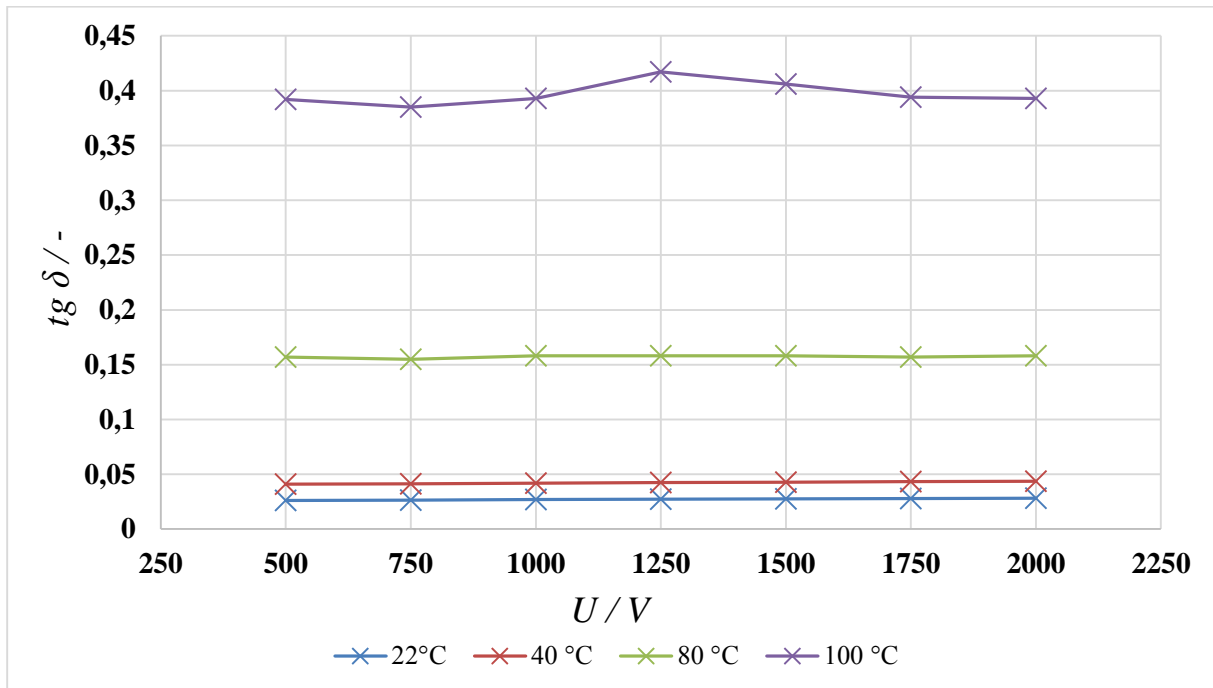
9 Naměřené a zpracované hodnoty

Ze začátku bylo provedeno několik orientačních měření. Jedno z nich je na grafu 32, ze kterého je jasně patrné, že rostoucí napětí v rozsahu 500-2000 V nemá na hodnotu permitivity žádný vliv.

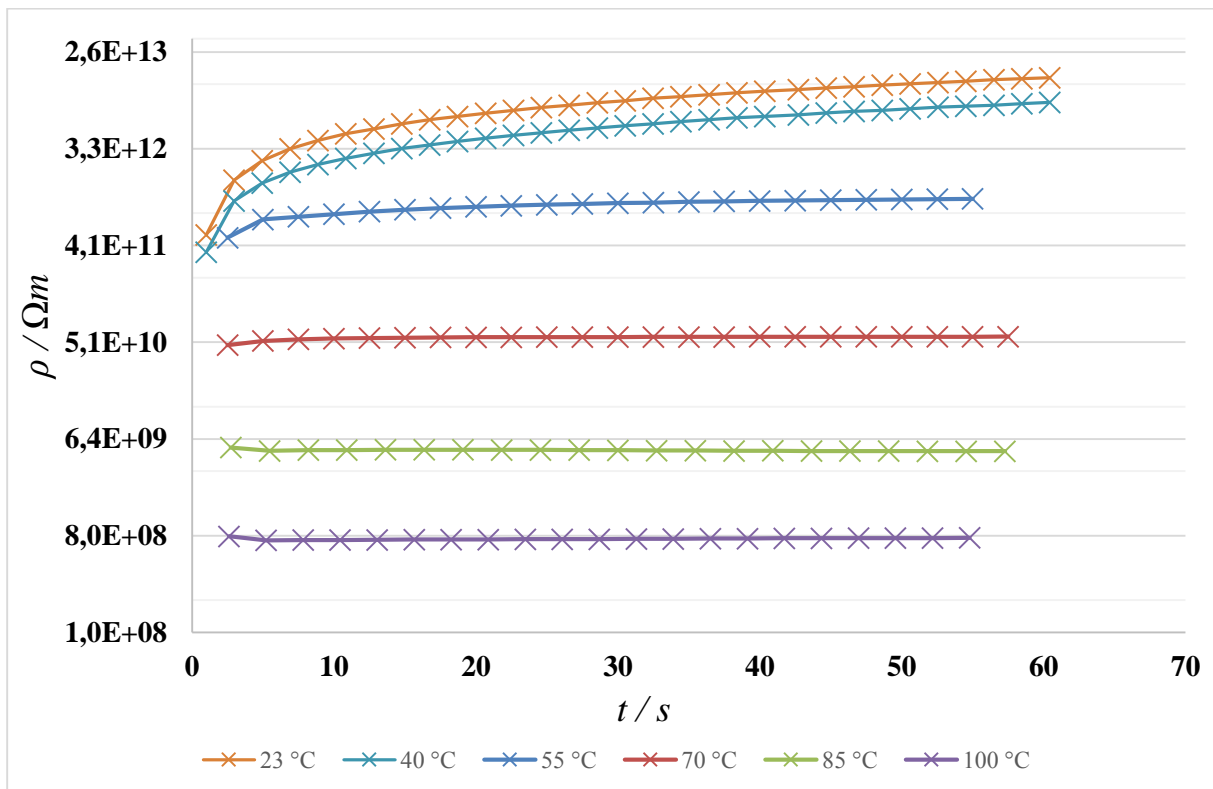


Obr. 32: Graf závislosti permitivity na napětí při různých teplotách - 1839

Z grafu 33 jde poznat, že měnící se napětí od 500-2000 V nemá vliv ani na hodnotu ztrátového činitele $tg \delta$.

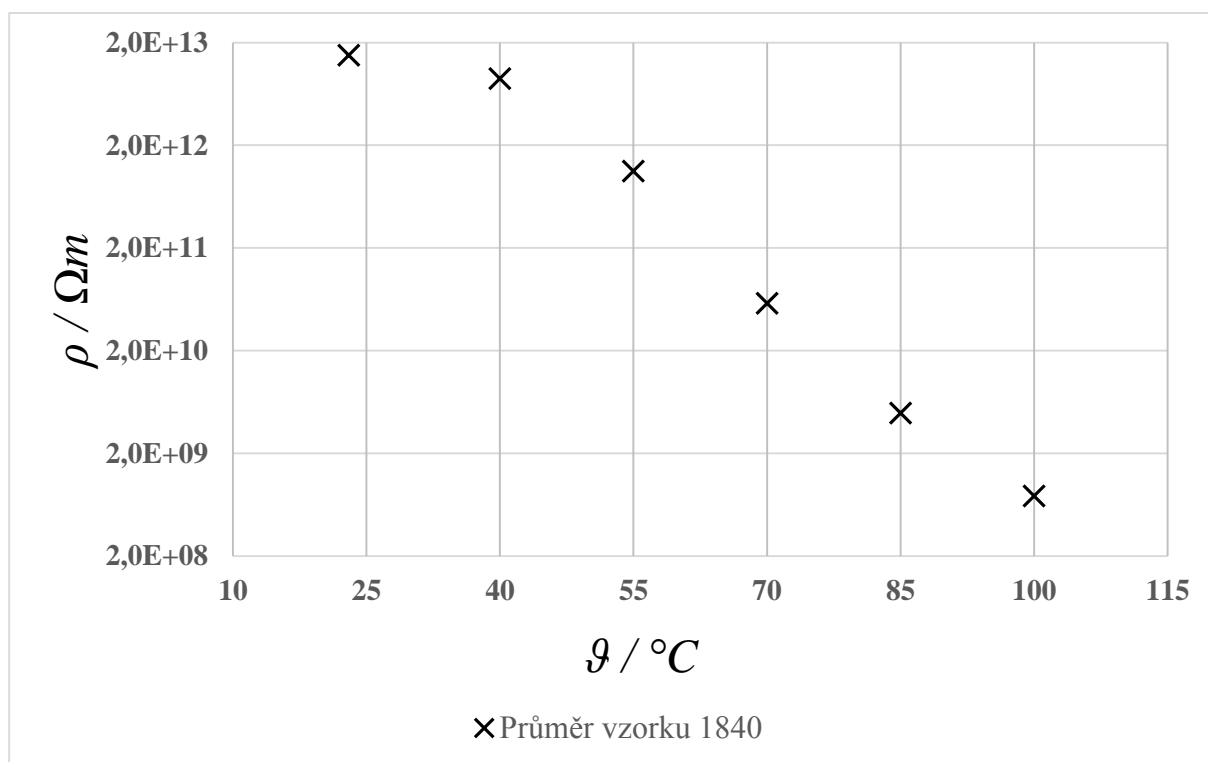


Obr. 33: Graf závislosti ztrátového činitele na napětí pro různé teploty - 1839



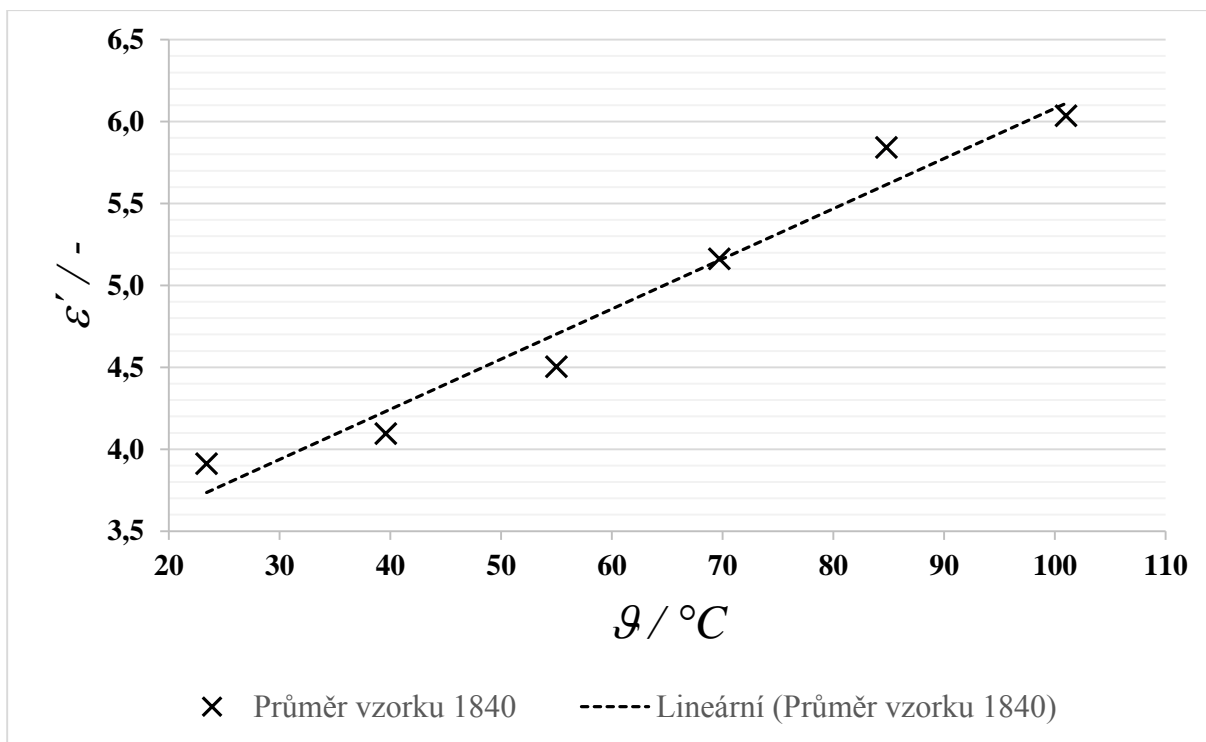
Obr. 34: Graf závislosti rezistivity na čase - 1839

Graf 34 znázorňuje průběh vnitřní rezistivity při různých teplotách v závislosti na čase. Je patrné, že s rostoucí teplotou klesá rezistivita, což je považováno u zalévacích elektroizolačních hmot za negativní jev. Za povšimnutí stojí prvních zhruba deset vteřin průběhu, jelikož zde dochází k polarizačním ztrátám, které způsobují „koleno“ v počátku průběhu měření. Poté se projeví vodivostní ztráty, které nejsou tak výrazné, ale na druhou stranu pomalu rostou po celou dobu měření. Při teplotách 80 °C a 100 °C polarizační ztráty probíhají příliš rychle na to, aby byly měřitelné, jelikož částice materiálu získaly dostatek energie a volnosti k tomu, aby se natáčely okamžitě.

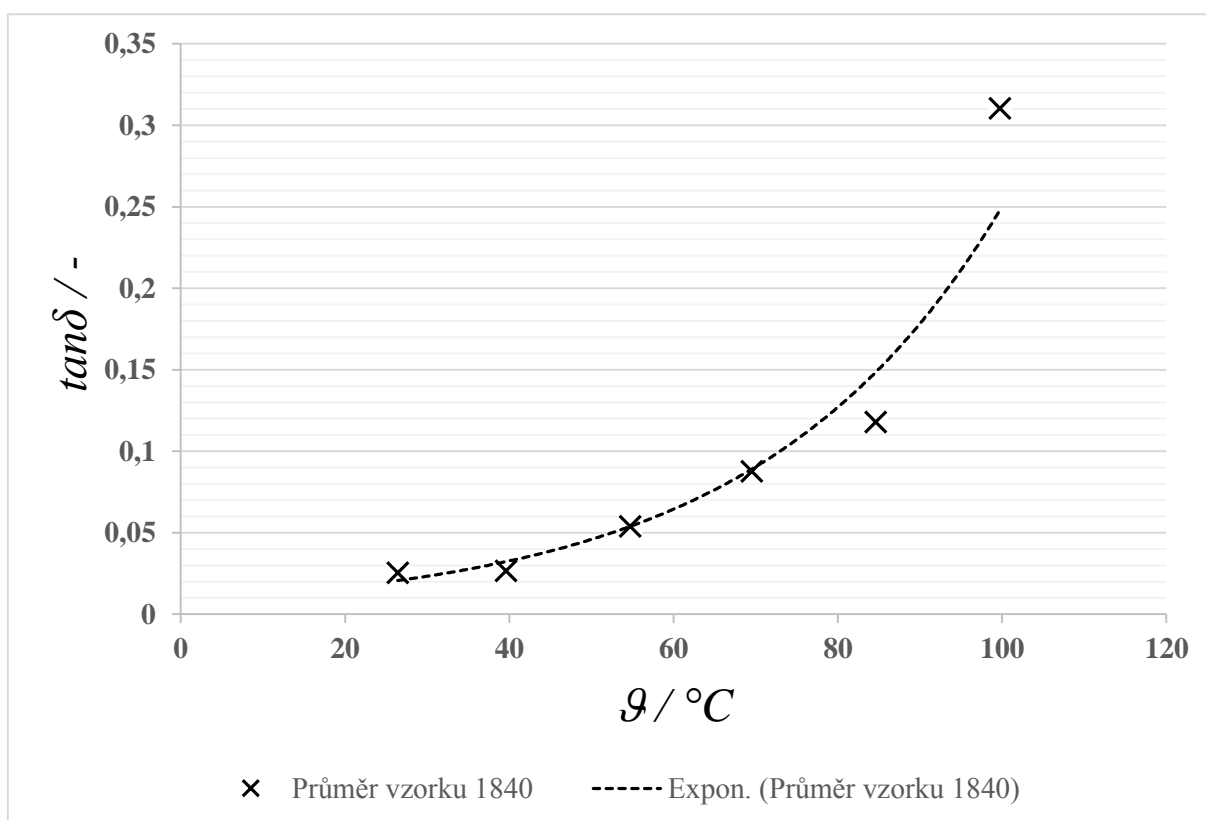


Obr. 35: Graf závislosti rezistivity na teplotě - 1840

Graf 35 ukazuje pokles vnitřní rezistivity v závislosti na teplotě. Oproti teplotě 20 °C klesne rezistivita na 100 °C až o čtyři řády. Pro lepší zobrazení hodnot bylo použito na ose y semilogaritmické měřítko.



Obr. 36: Graf závislosti permitivity na teplotě - 1840



Obr. 37: Graf závislosti ztrátového činitele na teplotě - 1840

Grafy 35, 36 a 37 znázorňují základní měřené veličiny u všech vzorků. Pro každý vzorek byl vytvořen graf permitivity, rezistivity a ztrátového činitele v závislosti na teplotě. Tyto výsledky byly následně zprůměrovány pro celou sadu, což reprezentují právě výše zmíněné grafy. Všechny sady vzorků jsou pak dohromady zobrazeny pro porovnání v grafech 38, 39 a 40. Měření probíhalo dle normy ČSN EN 62631. Každý vzorek byl při dané teplotě 20 minut temperován a následně proměřen při střídavém i stejnosměrném napětí v hodnotách 1000 V a 2000 V. Výsledný graf 38 zobrazuje závislost rezistivity na teplotě. Pro větší přehled byl graf proložen pomocí rovnice

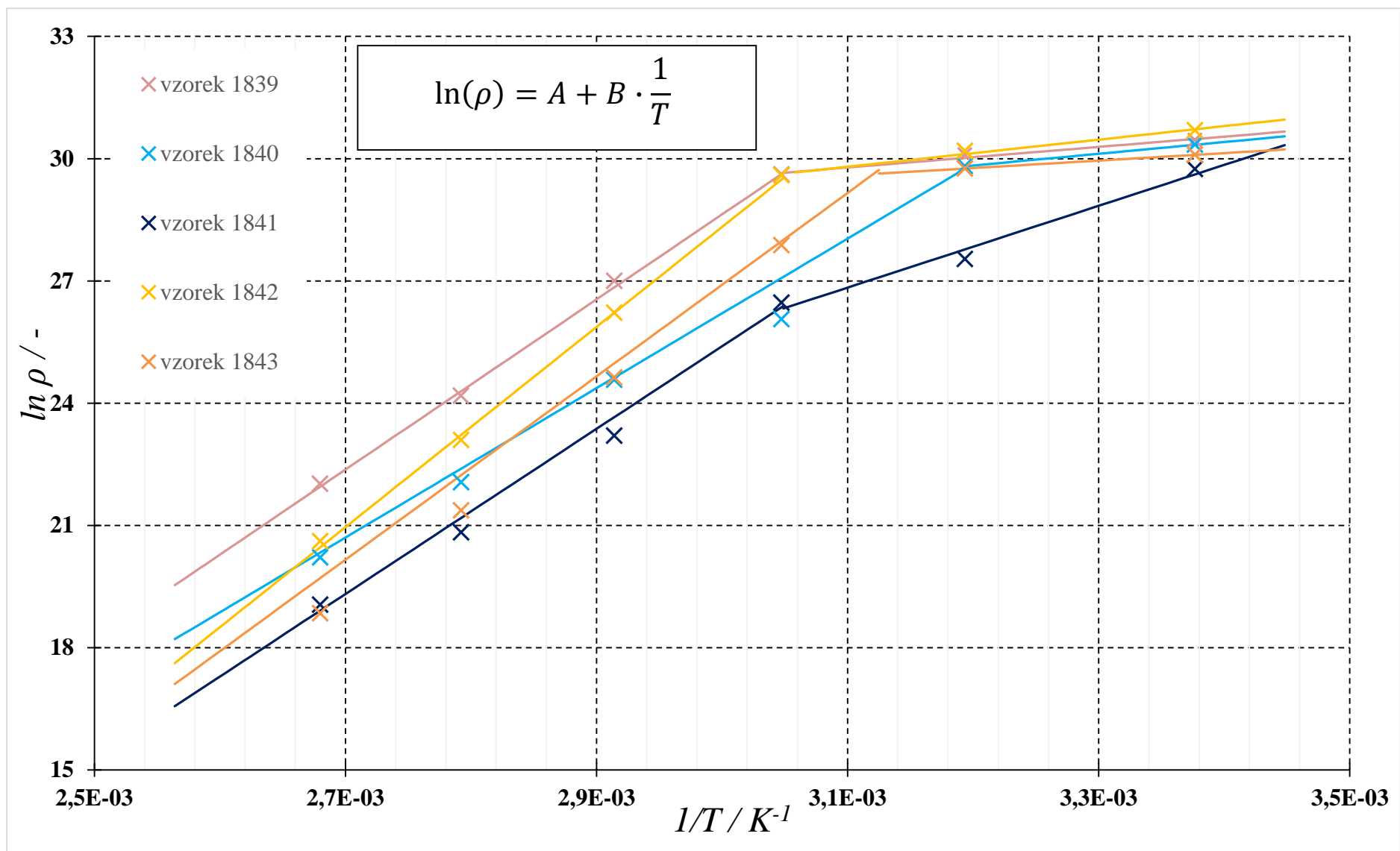
$$\ln(\rho) = A + B \cdot \frac{1}{T} \quad (9.1)$$

Vypočítané koeficienty A a B jsou pro všechny sady vzorků přiloženy v Tab. 11.

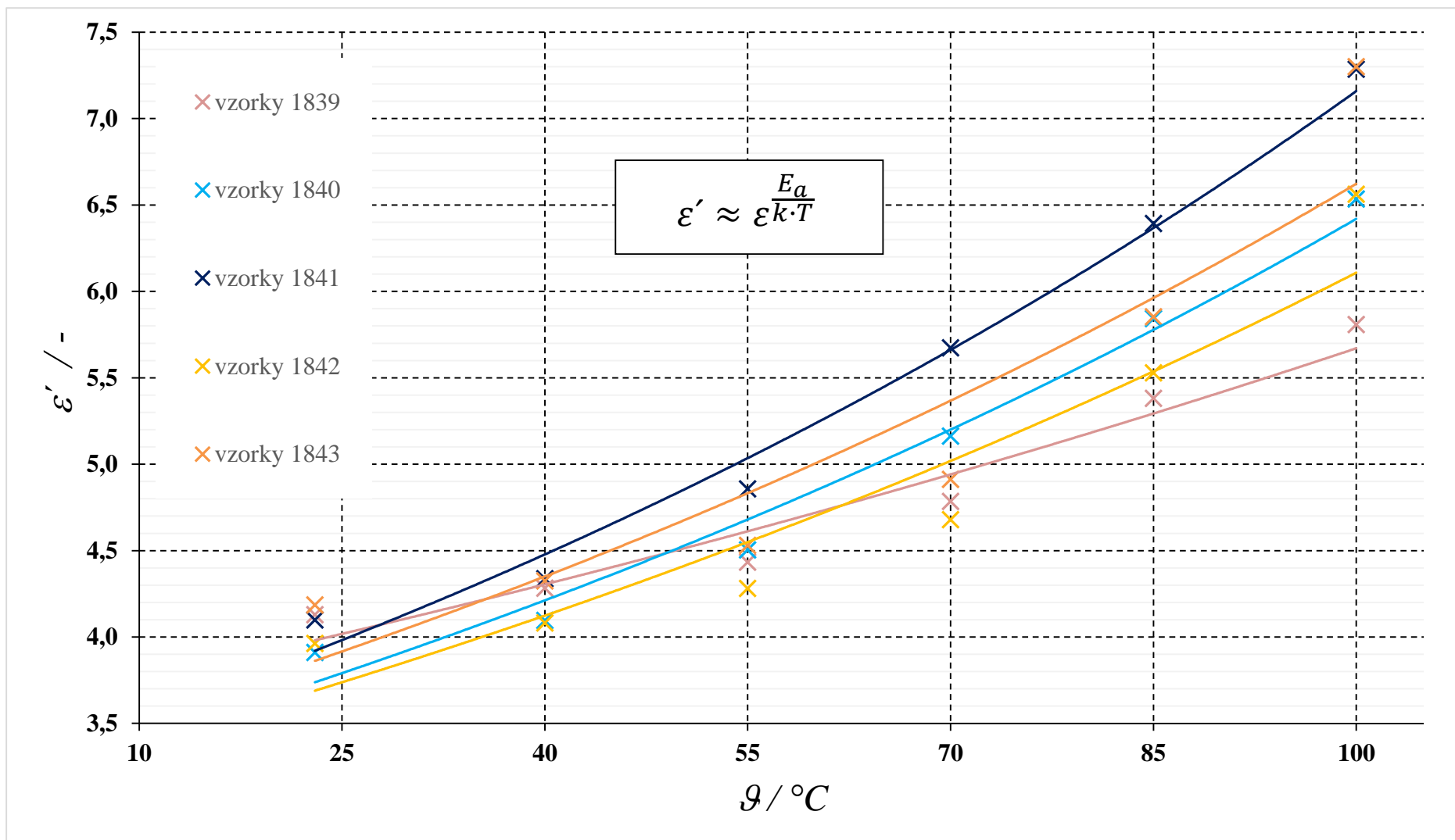
Tab. 11: Koeficienty A a B

Vzorek	Před zlomem		Po zlomu	
	Koeficient A	Koeficient B	Koeficient A	Koeficient B
1839	-34,002	20878,0	21,948	2527,3
1840	-28,525	18133,0	20,622	2877,9
1841	-35,240	20151,0	-4,276	1003,6
1842	-45,347	24557,0	19,490	3326,0
1843	-39,847	21984,0	23,897	1834,9

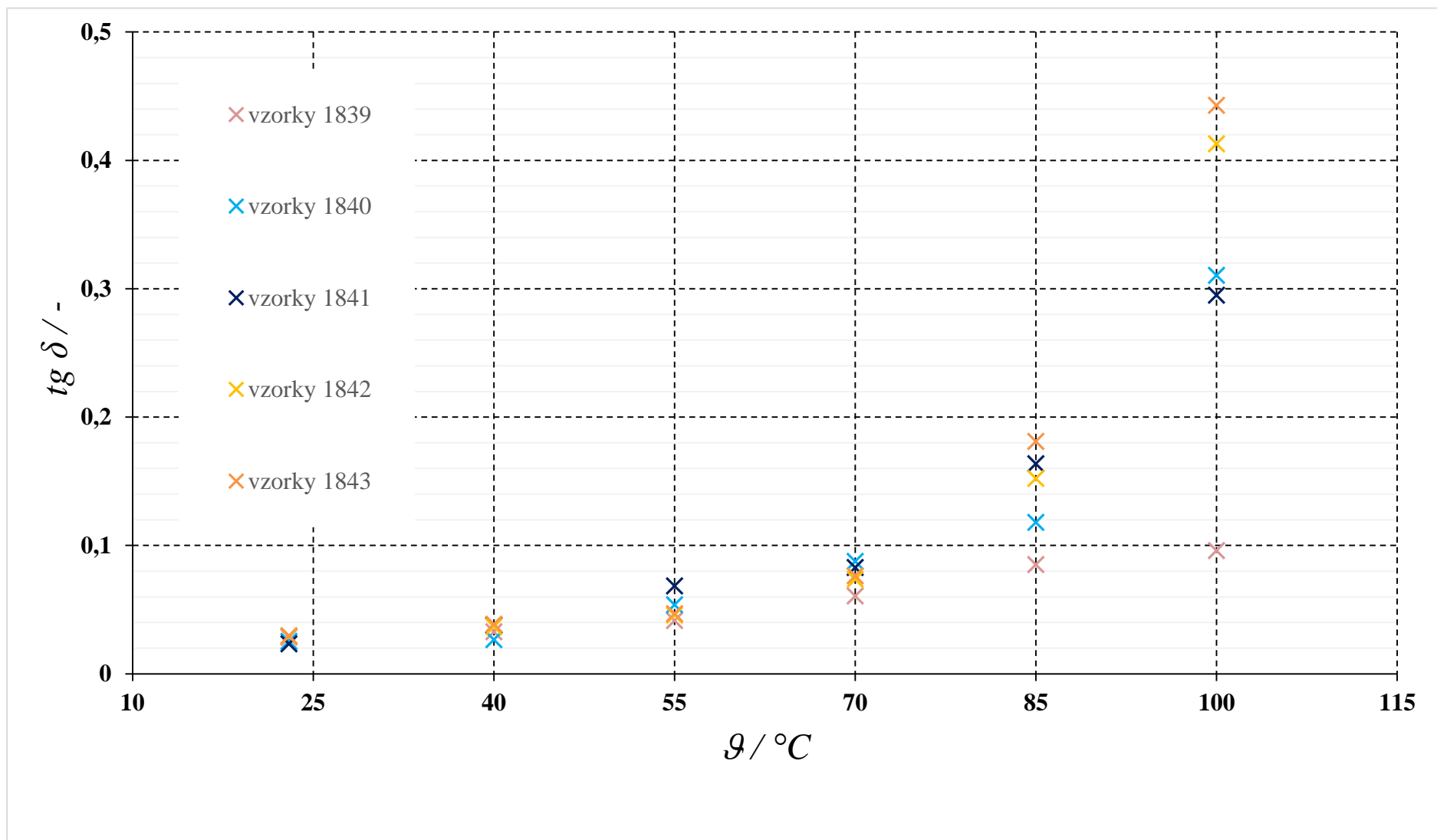
Z grafu je patrné, že aditiva S1 a S2 mají vliv na snižování rezistivity. Aditivum S2 jen o málo více, než aditivum S1. Graf 39 znázorňuje závislost permitivity na teplotě. Je zřejmé, že aditiva mají vliv i na výši permitivity, nejvíce pak aditivum S1. Na grafu 40 je zachycena závislost ztrátového činitele na teplotě. Zde vzorky s aditivu silně převyšují vzorek referenční. Při teplotě 100 °C dokonce až pětkrát. Aditivum S2 zvyšuje hodnotu ztrátového činitele více, než aditivum S1.



Obr. 38: Graf obsahující zprůměrované hodnoty závislosti vnitřní rezistivity na teplotě každé celé sady všech vzorků.



Obr. 39: Graf obsahující zprůměrované hodnoty permitivity závislé na teplotě pro každou celou sadu vzorků.



Obr. 40: Graf obsahující zprůměrované hodnoty ztrátového činitele v závislosti na teplotě pro každou celou sadu vzorků.

Tab. 12: Naměřené hodnoty zprůměrovaných sad vzorků

Teplota (°C)	Měřená veličina	Vzorek 1839	Vzorek 1840	Vzorek 1841	Vzorek 1842	Vzorek 1843
23	ε' (-)	4,129	3,910	4,098	3,962	4,185
	$\text{tg } \delta$ (-)	0,0287	0,0254	0,0235	0,0293	0,0297
	ρ (Ωm)	1,68E+13	1,51E+13	8,26E+12	2,14E+13	1,18E+13
40	ε' (-)	4,283	4,095	4,337	4,081	4,325
	$\text{tg } \delta$ (-)	0,0328	0,0266	0,0379	0,0368	0,0388
	ρ (Ωm)	1,18E+13	8,90E+12	9,08E+11	1,29E+13	8,40E+12
55	ε' (-)	4,433	4,503	4,857	4,281	4,530
	$\text{tg } \delta$ (-)	0,0416	0,0538	0,0684	0,0458	0,0470
	ρ (Ωm)	7,24E+12	2,08E+11	3,11E+11	7,09E+12	1,28E+12
70	ε' (-)	4,785	5,162	5,673	4,679	4,911
	$\text{tg } \delta$ (-)	0,0606	0,0877	0,0828	0,0737	0,0764
	ρ (Ωm)	5,31E+11	4,70E+10	1,19E+10	2,43E+11	4,98E+10
85	ε' (-)	5,381	5,842	6,392	5,528	5,852
	$\text{tg } \delta$ (-)	0,0851	0,118	0,1638	0,1522	0,1812
	ρ (Ωm)	3,17E+10	3,81E+09	1,11E+09	1,07E+10	1,90E+09
100	ε' (-)	5,807	6,534	7,286	6,562	7,299
	$\text{tg } \delta$ (-)	0,0961	0,3104	0,295	0,4129	0,443
	ρ (Ωm)	3,66E+09	6,00E+08	1,88E+08	8,92E+08	1,52E+08

V Tab. 12 jsou pro lepší přehlednost seřazeny všechny výsledné hodnoty z grafů 38, 39 a 40.

Závěr

V diplomové práci proběhla výroba pěti sad vzorků ve spolupráci s firmou SYNPO, a.s. Pardubice. Vzorky byly vyrobeny s přihlédnutím k normě ČSN EN 62631 a bylo použito dvou speciálních aditiv (S1 a S2) a jejich různých poměrů. Vzorky s označením 1839 představovaly referenční sadu pro porovnání vlivu aditiv. Ve vzorcích 1840 a 1841 bylo použito aditivum S1, přičemž v sadě 1840 byl poměr aditiva menší, než v sadě 1841. Vzorky 1842 a 1843 obsahovaly aditivum S2 a opět platilo, že první sada obsahovala aditiva méně. Vzorky byly vyhotoveny v čtvercových destičkách o tloušťce zhruba 2 mm. Ke každé sadě bylo vyrobeno sedm až deset vzorků, které byly následně vyselektovány na základě své tloušťky a rovnosti povrchu tak, aby co nejvíce odpovídaly normě. Z každé řady bylo následně vybráno pět nejkvalitnějších vzorků, na kterých bylo prováděno měření. Teplotní rozsah byl vzhledem k materiálu zvolen od 23 °C do 100 °C a v tomto rozsahu byly měřeny dielektrické veličiny, jako je vnitřní rezistivita, ztrátový činitel a permitivita pro každý jednotlivý vzorek zvlášť. Výsledné hodnoty byly zpracovány do grafů a následně bylo provedeno zprůměrování vzorků v jedné sadě do výsledných grafů. Tyto naměřené data reprezentují grafy 38, 39 a 40. Ve výsledku lze říci, že aditivum S1 a S2 snižují vnitřní rezistivitu materiálu, zvyšují ztrátový činitel a též zvyšují permitivitu materiálu. Díky neznámému složení aditiv a účelu jejich použití, který je předmětem utajení, nejde s jistotou prohlásit, zda jsou tyto výsledky uspokojivé, či nikoliv.

V průběhu práce se vyskytlo několik problémů. Přístroj Tettex nabízí možnost naprogramovat si měření vzorků a měření se tak dá zcela automatizovat. Bohužel, přístroj vykazoval neustále chyby, v některých případech i kritické, které měření přerušovaly a tak bylo potřeba všechny vzorky odměřit ručně, což značně prodloužilo potřebný čas k měření. Další obtíží byl měřicí rozsah přístroje, který nedokáže detekovat proudy menší než 500 pA, což znamenalo, že pro teploty 23 °C a 40 °C, kde vnitřní rezistivita byla stále příliš vysoká, musel být použit jiný přístroj. Vybrán byl Agilent 4339B s elektrodovým systémem Agilent 16008B, jenž dokáže detekovat proudy až do jednotek piko ampér. Bohužel, tento přístroj a k němu připojený elektrodový systém nedisponoval topným tělesem, které by vzorky zahřálo na potřebnou teplotu, takže bylo zapotřebí ještě tepelné komory Stericell, do které byl vložen elektrodový systém Agilent 16008B a ten následně celý i se vzorky zahřán na požadovanou teplotu. Tímto způsobem byly odměřeny hodnoty pro 23 °C a 40 °C a následně byly zpracovány do grafů z přístroje Tettex.

Bibliografie

- [1] ŠAVEL, J. *Elektrotechnologie*. Brno: BEN, 2013.
- [2] LIPTÁK J., Sedláček. *Úvod do elektrotechnických materiálů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005.
- [3] JABŮREK L., *Studium elektrického namáhání drážkové izolace* [Bc. práce]. Brno, 2009.
- [4] ARBATEUR J., Šedovič. *Izolanty a izolácie*. Bratislava: Alfa, 1969.
- [5] MOHYLA, P. *Vliv velikosti částic plniva na složky komplexní permitivity složené soustavy* [online]. Brno, 2008 [cit. 2016]. Dostupné z:
https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/15641/Bakalarska_Prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [6] MENTLÍK V., Pihera. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2008.
- [7] CHLEBOUN J., *Degradační testy polymerních materiálů vystavených klimatickým podmínkám* [online]. Brno, 2013.
- [8] RÁČEK, T. *Vliv teploty na dielektrické vlastnosti epoxidových licích pryskyřic plněných mletou slídou* [online]. Brno, 2008 [cit. 2016]. Dostupné z:
https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/15910/BP_xracek01.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [9] DRÁPALA J., Kurša. *Elektrotechnické materiály* [Učební text]. Ostrava, 2012.
- [10] ŠKEŘÍK, J. *Plasty*. Praha: SNTL, 1991.
- [11] MENŠÍK M., *Vliv aditiv na vlastnosti epoxidových pryskyřic* [online]. Zlín, 2008.
Dostupné také z:
http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/7539/men%C5%A1%C3%ADk_2008_bp.pdf?sequence=1
- [12] LIDARÍK, M. *Epoxidové pryskyřice*. Praha: SNTL, 1983.

- [13] BRUNNEROVÁ P., *Fosfazenové sloučeniny pro modifikace procesů sítování epoxidových pryskyřic* [online]. Brno, 2012.
- [14] EHREINSTEIN, G. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha: SCIENTA, s.r.o., 2009.
- [15] MUCHA, J. *Diagnostika vlastností elektroizolačních hmot* [online]. Brno, 2014 [cit. 2016].
- [16] ŠTAJNER, D. *Zalévací hmoty pro výkonovou elektroniku* [online]. Brno, 2014 [cit. 2016].
Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/files/697/30282778.pdf>
- [17] MIKOVCOVÁ, P. *Stupeň konverze reaktoplastických pryskyřic* [online]. Plzeň, b.r. [cit. 2016]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce4/61.pdf>
- [18] ACC SILICONES. *Silikonové zalévací a pouzdřící hmoty* [online]. 2016 [cit. 2016].
Dostupné z: <http://www.acc-silicones.cz/products/encapsulants.ashx>
- [19] SOKOL, J. *Technologické možnosti výztuh čel vinutí velkých točivých elektrických strojů* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2016]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/14661088-Zapadoceska-univerzita-v-plzni-fakulta-elektrotechnicka-katedra-technologie-a-mereni-diplomova-prace.html>
- [20] HANGYA J., *Účinky elektrického namáhání na vlastnosti elektroizolačních materiálů* [online]. Brno, 2014.
- [21] PALENČÁR, R.,. *Nejistoty měření III: nejistoty nepřímých měření*. Bratislava: Automa, 2001.
- [22] 3M ELEKTRO. *Katalog zalévacích hmot pro elektrotechniku* [online]. Praha, 2007 [cit. 2016]. Dostupné z:
http://www.g3.cz/img/Katalog/Elektro/3M_Pryskyrice_a_zalev.hmoty.pdf
- [23] BEDNÁŘ, P. *Dielektrické vlastnosti epoxidových licích pryskyřic plněných mletou slídou* [online]. Brno, 2008 [cit. 2016]. Dostupné z:
<https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/174/DP%20Pavel%20Bedn%C3%A1%201%20C5%99.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [24] MUNZ, Ch., *Zpracování zalévacích pryskyřic bez vzniku vzduchových bublin* [online]. Brno: DPS Elektronika od A do Z, 2011 [cit. 2016]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/vyroba/id:5334/zpracovani-zalevacich-pryskyric-bez-vzniku-vzduchovych-bublin>

Seznam použitých symbolů

ε_r	[-]	relativní permitivita
ε'	[-]	komplexní permitivita
$\operatorname{tg} \delta$	[-]	ztrátový činitel
ρ_V	[$\Omega \cdot \text{m}$]	vnitřní rezistivita
ρ_P	[Ω]	povrchová rezistivita
E_P	[V/m]	elektrická pevnost
C	[F]	kapacita
U_p	[V]	průrazné napětí
q	[C]	elektrický náboj
T_g	[$^{\circ}\text{C}$]	teplota skelného přechodu

Seznam použitých obrázků

Obr. 1: Sériové náhradní schéma	9
Obr. 2: Paralelní náhradní schéma	9
Obr. 3: Grafy závislosti $\operatorname{tg} \delta$ na teplotě (vlevo) a kmitočtu (vpravo)	10
Obr. 4: Chování nepolárního dielektrika v elektrickém poli [5]	13
Obr. 5: Chování polárního dielektrika v elektrickém poli [5]	14
Obr. 6: Dian	25
Obr. 7: Dichlorhydrin	25
Obr. 8: Epichlorhydrin	25
Obr. 9: Glycidyllová skupina	26
Obr. 10: Epoxidová skupina	26
Obr. 11: Vytvrzovadlo s aktivními vodíkovými atomy + oxiranová skupina = vznik hydroxylové skupiny	26
Obr. 12: Sekundární aminoskupina reaguje stejným způsobem za vzniku terciální aminoskupiny	27
Obr. 13: Vytvrzená epoxidová pryskyřice	27
Obr. 14: TTT diagram [15]	28

Obr. 15: Dělení zalévacích hmot [16]	30
Obr. 16: Stupnice tvrdosti zalévacích hmot [16].....	35
Obr. 17: Pryskyřice WEPURAN VT 3402 KK – vmíchané bublinky [24]	38
Obr. 18: Pryskyřice WEPURAN VT 3402 KK – vzdušná vlhkost [24]	39
Obr. 19: Pryskyřice WEPURAN VT 3402 KK – špatný míchací poměr [24].....	40
Obr. 20: Schéma zapojení voltampérové metody měření	43
Obr. 21: Schéma zapojení Wheatstonovy metody	44
Obr. 22: Schéma kondenzační metody.....	45
Obr. 23: Schéma zapojení Scheringova můstku.....	46
Obr. 24: Schéma zapojení čtyřkapacitního můstku.....	47
Obr. 25: Elektrodotový systém Tettexu 2914	55
Obr. 26: Celkový pohled na elektrodotový systém Tettex 2914 [23]	56
Obr. 27: Měřicí přístroj Tettex 2830/2831	57
Obr. 28: Měřicí komora Tettex 2914	58
Obr. 29: Měřicí přístroj Agilent 4339B.....	58
Obr. 31: Elektrodotový systém Agilent 16008B umístěný v komoře Stericell.....	59
Obr. 30: Tepelná komora Stericell	59
Obr. 36: Graf závislosti permitivity na teplotě - 1840	63
Obr. 37: Graf závislosti ztrátového činitele na teplotě - 1840	63
Obr. 38: Graf obsahující zprůměrované hodnoty závislosti vnitřní rezistivity na teplotě každé celé sady všech vzorků.	65
Obr. 39: Graf obsahující zprůměrované hodnoty permitivity závislé na teplotě pro každou celou sadu vzorků.	66
Obr. 40: Graf obsahující zprůměrované hodnoty ztrátového činitele v závislosti na teplotě pro každou celou sadu vzorků.....	67

Seznam použitých tabulek

Tab. 1: Druhy RTV systémů a jejich nežádoucí účinky [18].....	32
Tab. 2: Výhody a nevýhody kondenzační metody [18]	33
Tab. 3: Výhody a nevýhody adiční metody [18].....	34
Tab. 4: Možné problémy při aplikaci epoxidové pryskyřice a jejich řešení [22].....	37
Tab. 5: Poměry jednotlivých složek pro přípravu vzorku.....	50
Tab. 6: Naměřené hodnoty pro sadu vzorků 1839	51

Tab. 7: Naměřené hodnoty pro sadu vzorků 1840	52
Tab. 8: Naměřené hodnoty pro sadu vzorků 1841	52
Tab. 9: Naměřené hodnoty pro sadu vzorků 1842	53
Tab. 10: Naměřené hodnoty pro sadu vzorků 1842	53
Tab. 11: Koeficienty A a B	64
Tab. 12: Naměřené hodnoty zprůměrovaných sad vzorků.....	68