

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Kompozitní materiály pro elektrotechniku

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David ČECH**
Osobní číslo: **E13B0270P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Kompozitní materiály pro elektrotechniku**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte přehled kompozitních materiálů.
2. Popište využití kompozitních materiálů v elektrotechnice a jejich moderní vývojové trendy.
3. Stanovte diagnostický systém pro určení základních elektrických vlastností.
4. Proveďte měření základních elektrických vlastností kompozitního materiálu a výsledky měření vyhodnoťte.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická


Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, V. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-7300-189-6.
2. Ehrenstein, G. W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
3. Kučerová, E. Elektrotechnické materiály. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002, 174 s. ISBN 80-7082-940-0.
4. Elektronické informační zdroje (databáze IEEE Xplore apod.).


Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jaroslav Hornak
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

První část této bakalářské práce se zabývá obecně kompozitními materiály a jejich rozdělením podle druhu výztuže a matrice. V druhé části je popsáno využití kompozitních materiálů v elektrotechnice a moderní vývojové trendy. Třetí část obsahuje diagnostický systém pro určování několika důležitých parametrů izolačních kompozitních materiálů. V závěru práce jsou tyto parametry změřeny pro materiály Relanex a Relastik.

Klíčová slova

Kompozitní materiály, matrice, výztuž, absorpční křivky, resorpční křivky, vnitřní rezistivita, elektrická pevnost, ztrátový činitel, permitivita, kapacita, dielektrikum, systém Resin-Rich, systém VPI, Relanex, Relastik.

Abstract

First part of this bachelor thesis is about composite materials in general and their distribution by types of reinforcement and matrix. Second part describes how to use composite materials in electrotechnics and modern evolutionary trend. Third part contains diagnostic system for determining several important parameters of insulating composite materials. At the end of thesis are these parameters measured for materials Relanex and Relastik.

Key words

Composite materials, matrix, reinforcement, absorption curve, desorption curve, inner resistivity, electric strength, lossy factor, permittivity, capacity, dielectric, system Resin-Rich, system VPI, Relanex, Relastik.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 1.6.2016

David Čech

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jaroslavu Hornakovi, za pomoc a rady při zpracování této práce.

Také bych rád poděkoval celé své rodině, za velkou podporu po dobu mého studia.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	10
1.1 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	10
1.1.1 Dělení podle druhu matrice	10
1.1.2 Dělení podle druhu výztuží	12
1.2 MATRICE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	13
1.2.1 Polymerní matrice	13
1.2.2 Kovové matrice.....	15
1.2.3 Keramické matrice	16
1.2.4 Uhlíkové matrice	16
1.3 VÝZTUŽE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	17
1.3.1 Skleněná vlákna.....	18
1.3.2 Uhlíková vlákna	19
1.3.3 Polymerní vlákna.....	19
1.3.4 Čedičová vlákna	20
1.3.5 Proteinová vlákna	20
1.3.6 Borová vlákna	20
1.3.7 Keramická vlákna.....	21
2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V ELEKTROTECHNICE	22
2.1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY PRO VÝROBU DPS.....	22
2.1.1 FR-2.....	22
2.1.2 FR-3.....	22
2.1.3 FR-4, FR-5.....	23
2.2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V ELEKTROIZOLAČNÍCH SYSTÉMECH	23
2.2.1 Kompozitní materiály v EIS točivých elektrických strojů	23
2.2.2 Kompozitní materiály v EIS transformátorů.....	24
3 MODERNÍ VÝVOJOVÉ TRENDY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	25
3.1 NANOKOMPOZITNÍ MATERIÁLY	25
3.2 NANOKAPALINY	26
3.3 MIKROKOMPOZITNÍ MATERIÁLY	26
4 DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM	27
4.1 SLEDOVANÉ PARAMETRY	27
4.1.1 Absorpční a resorpční křivky	27
4.1.2 Ztrátový činitel a permitivita dielektrika	27
4.1.3 Elektrická pevnost izolanů	28
4.2 SPECIFIKACE VZORKŮ	28
4.3 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ	29
4.3.1 Měření absorpčních a resorpčních křivek	29
4.3.2 Měření ztrátového činitele, permitivity a kapacity dielektrika	30
4.3.3 Měření elektrické pevnosti izolanů.....	33
ZÁVĚR	34
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	35
PŘÍLOHY	1

Úvod

Kompozitní materiály jsou v dnešní době hojně využívány ve všech různých odvětvích, ať už v průmyslu, sportu, letectví, medicíně nebo elektrotechnice. Hlavní důvod jejich využití spočívá v jejich vlastnostech. Spojením dvou různých materiálů totiž výsledný materiál získá vlastnosti, které by samostatně neměl ani jeden z těchto materiálů.

Spolehlivost a životnost elektrických zařízení záleží na mnoha faktorech. Největší vliv na tyto parametry má izolační systém, který je v zařízeních většinou nejslabším článkem. Je proto nutné izolaci neustále zdokonalovat a vylepšovat. Velké zlepšení v oblasti dielektrických kompozitních materiálech přináší přidání nanočástic a mikročástic do výstuže materiálu. Proto se nyní výzkum a vývoj ubírá směrem nanokompozitních a mikrokompzitních materiálů. Jak již bylo řečeno nanokompozity a mikrokompzity mají výstuž tvořenou částicemi, tyto částice mají rozměry v jednotkách až stovkách mikrometrů nebo nanometrů.

Seznam symbolů a zkratk

PMC.....	polymer matrix composite
MMC	metal matrix composite
CMC	ceramic matrix composite
CMC	carbon matrix composite
CVD.....	Chemical Vapor Deposition
UP.....	nenasycený polyester
VE.....	vinylesterová pryskyřice
EP.....	epoxidové pryskyřice
DPS.....	deska plošných spojů
EIS	elektroizolační systém
PET.....	polyethylenterephthalát
PEN.....	polyethylennaphtalát
VPI.....	vacuum pressure impregnation
VIW	vakuum impregnated winding method
VIB	vakuum impregnated bar method
d	délka [m]
R_x	izolační odpor [Ω]
ρ_v	vnitřní rezistivita [Ωm]
$\text{tg } \delta$	ztrátový činitel [-]
ϵ_r	relativní permitivita [-]
C_x	kapacita dielektrika [F]
U_p	průrazné napětí [V]
E_p	elektrická pevnost [kV/mm]
\bar{x}	aritmetický průměr
σ	směrodatná odchylka
V	variační koeficient [%]
T.....	teplota [$^{\circ}\text{C}$]
U	elektrické napětí [V]
I.....	elektrický proud [A]
p_{i1}	minutový polarizační index [-]
p_{i10}	deseti minutový polarizační index [-]

1 Kompozitní materiály

Kompozitní materiál nebo také kompozit, je materiál složený ze dvou a více jiných rozdílných materiálů s různými vlastnostmi. Tyto materiály poté výslednému kompozitnímu materiálu dávají nové vlastnosti, které by samostatně neměla ani jedna z jeho složek. Tužší, tvrdší a pevnější nespojitě složce se říká výztuž, druhé složce, spojitě a poddajnější, zastupující funkci jakéhosi pojiva výztuže, se říká matrice. [1]

Aby výsledný materiál mohl být zařazen mezi kompozitní materiály, je nutné, aby splňoval následující tři podmínky:

- a) podíl výztuže musí být větší než 5%,
- b) chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti výztuže a matrice se musí lišit,
- c) kompozit musí být připraven spojením složek. [1]

1.1 Základní dělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály se základně dělí podle druhu použité matrice a podle druhu použité výztuže. Matrice se dělí hlavně podle použitého materiálu. Výztuže se poté dělí podle použitých vláken (dlouhovláknové, krátkovláknové) nebo částic.

1.1.1 Dělení podle druhu matrice

Podle druhu matrice dělíme kompozitní materiály na:

- a) kompozitní materiály s polymerní matricí,
- b) kompozitní materiály s kovovou matricí,
- c) kompozitní materiály s keramickou matricí,
- d) kompozitní materiály s uhlíkovou matricí. [1]

Kompozitní materiály s polymerní matricí

U kompozitních materiálů s polymerní matricí (PMC – polymer matrix composite) se jako matrice používají termoplasty, jako například polypropylen, polyamid, polykarbonát. Dále se zde pro matrice používají rektoplasty, jako třeba nenasyčený polyester nebo epoxid. Také se používá síťovaný elastomer. [1]

Jako výztuž se zpravidla používají vláknové materiály, jako jsou sklo, uhlík nebo polymery na bázi aromatických polyamidů. [1]

Kompozitní materiály s kovovou matricí

Kompozitní materiály s kovovou matricí tzv. MMC (metal matrix composite) jsou vyráběny spojením kovu s jiným materiálem. Matrice pro tento typ kompozitního materiálu většinou bývají lehké slitiny hliníku, hořčíku, titanu, mohou to být také slitiny železa, kobaltu, mědi. [1]

Pro výztuž se používají keramické materiály, jako třeba vlákna z karbidu křemíku nebo některé kovové materiály, například wolframová vlákna, ocel. [1]

Kompozitní materiály s keramickou matricí

V těchto kompozitních materiálech (CMC – ceramic matrix composite), je pro matrici použita keramika. Jedná se například o karbid a nitrid křemíku nebo oxidy zirkonia a křemíku. [1]

Pro výztuž se zde používají keramická nebo uhlíková vlákna. [1]

Kompozitní materiály s uhlíkovou matricí

U kompozitních materiálů s uhlíkovou matricí (CMC – carbon matrix composite) se jako matrice používá uhlík v různých strukturách uspořádání. [1]

Výztuži pro zpevnění kompozitu jsou zde uhlíková vlákna. [1]

1.1.2 Dělení podle druhu výztuží

Podle druhu použité výztuže dělíme kompozitní materiály na:

- a) částicové kompozitní materiály,
- b) krátkovláknou a dlouhovláknou kompozitní materiály,
- c) hybridní kompozitní materiály. [1]

Částicové kompozitní materiály

Částicové nebo také partikulou kompozitní materiály, nemají výztuž tvořenou vlákny. Jeden rozměr útvarů, tvořících výztuž, tedy výrazně nepřesahuje rozměry ostatních. Vyztužující částice mohou mít tvar kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý nebo nepravidelný. Částice se výztuži mohou být preferovaně nebo náhodně orientována. Velikost použitých částic v kompozitním materiálu určuje míru podílení se výztuže na celkových vlastnostech materiálu. [1][3][6]

Krátkovláknové kompozitní materiály

U krátkovláknitých kompozitních materiálů se ve výztuži používají vlákna s délkou okolo stonásobku jejich tloušťky. Tyto vlákna ve výztuži mohou být orientována náhodně nebo s přednostní orientací. Pro změnu elektrických vlastností materiálu se také mohou přidávat vlákna vodivá. Krátkovláknové kompozitní materiály mají většinou lepší mechanické vlastnosti, než jsou vlastnosti nevyztužených materiálů. Takové materiály tedy mohou konkurovat materiálům jako jsou například oceli a slitiny hliníku. [1][3][6]

Dlouhovláknové kompozitní materiály

Výztuž v dlouhovláknitých kompozitních materiálech tvoří vlákna o délce desítek až stovek mm. Tato vlákna mohou být stejně jako u krátkovláknitých orientována náhodně nebo s určitou orientací. Výztuž zde také mohou tvořit nepřetržitá vlákna s jednosměrnou, dvousměrnou nebo trojsměrnou orientací. [1][3][6]

Hybridní kompozitní materiály

Hybridní kompozitní materiály vznikají kombinováním výztuží různého typu. Kompozitní materiály s výztuží z vláken, plněné částicovými plnivými, se také řadí mezi hybridní kompozitní materiály. [1]

1.2 Matrice kompozitních materiálů

Hlavním úkolem matrice v kompozitním materiálu je spojovat výztuž a chránit jí před okolními vlivy. Funkci pojiva by si matrice měla udržet i po prvních poruchách vláken výztuže. Při tahovém namáhání by mělo mezní poměrné prodloužení matrice být větší než mezní prodloužení vláken. Toto je však splněno pouze u polymerních a kovových matic. [8]

1.2.1 Polymerní matrice

Kompozity s polymerní maticí jsou nejstaršími kompozity, první záznamy o těchto kompozitech jsou již z roku 1916. Nejvíce se používají polymerní matrice rektoplastické a termoplastické. Rektoplasty jsou polymerní materiály, které vytvářejí husté, prostorově sesíťované struktury. Procesu, při kterém dochází k sesíťování, říkáme vytvrzování. V těchto sesíťovaných strukturách jsou atomy uhlíku vzájemně provázány kovalentními vazbami. Rektoplasty jsou ve vytvrzeném stavu netavitelné a nerozpustné. Termoplasty se při zahřívání stávají plastickými. V tomto stavu je můžeme snadno tvářet a zpracovávat. Do tuhého stavu přecházejí po ochlazení pod teplotu tání nebo po ochlazení pod teplotu viskozního toku amorfních plastů. Jelikož při zahřívání nedochází ke změně chemické struktury, můžeme tento proces opakovat bez omezení. [1]

Rektoplasty

Nenasycené polyestery

Nenasycené polyestery (UP) se vytvářejí z lineárního nenasyceného polyesteru. Tento polyester se připravuje reakcí dvou složek, polypropylenglykolu a kyseliny ftalové, kyseliny kumaronové, kyseliny meleinové nebo anhydridu (ftalanhydridu, meleianhydridu). Takto vytvořený předpolymer se potom rozpouští v reaktivní rozpouštědle, obvykle styrenu. Na trhu jsou však i nestyrenové nenasycené polyesterové pryskyřice. Zde se používá jako reaktivní rozpouštědlo některý typ methakrylátu. [9]

Vinylesterové pryskyřice

Vinylesterové pryskyřice (VE) jsou nasycené estery epoxidových pryskyřic. Jsou vyráběny z bisfenolu nebo jako novolakové VE pryskyřice. Makromolekula předpolymeru této pryskyřice má v porovnání s nenasycenými polyestery méně reaktivních míst. Kompozitní materiály s touto pryskyřicí mají větší ohebnost a menší pravděpodobnost tvoření mikrotrhlin. [1][9]

Vinylesterové pryskyřice oproti nenasyceným polyesterům mají:

- a) lepší odolnost proti korozi,
- b) větší tepelnou odolnost,
- c) vyšší cenu,
- d) pomalejší vytvrzování,
- e) větší mezilaminární smykovou pevnost,
- f) větší houževnatost,
- g) schopnost odolávat absorpci vody. [1]

Epoxidové pryskyřice

Nejvšestrannější rektoplasty pro konstrukční použití jsou epoxidové pryskyřice (EP). Jejich chemické vlastnosti závisí na chemické struktuře, použitém tvrdidle a případných modifikujících složkách. Mezi její výhody patří, dobrá houževnatost, odolnost vůči tečení a únavě, velmi dobrá přilnavost k vláknům, dobrá teplotní a výborná chemická odolnost, dobré elektroizolační vlastnosti a malé smrštění při tuhnutí. [1][9]

V nevytvrzeném stavu mají epoxidové pryskyřice větší viskozitu než UP a VE. Podle molekulové hmotnosti se EP klasifikují jako kapaliny až tuhé nelepivé látky. Užité i technologické vlastnosti výsledné směsi, můžeme měnit v širokém spektru. Tyto vlastnosti lze ovlivnit přidáním složek, jako je reaktivní ředidlo nebo modifikující složka pro zvýšení houževnatosti. [1][9]

Termoplasty

Termoplasty jsou polymerní materiály. Při zahřívání termoplast přechází do plastického stavu, kde je možné ho snadno tvarovat a zpracovávat. Zpět do tuhého stavu přejdou po následném ochlazení pod teplotu tání u semikrystalických plastů a teplotu viskozního toku u amorfních plastů. [1]

Výhody termoplastů jako matric kompozitních materiálů jsou:

- a) neomezená skladovací doba prepregu,
- b) výborná chemická odolnost,
- c) neabsorbují vlhkost,
- d) velmi dobrá houževnatost oproti nemodifikovaným rektoplastům,
- e) výroba dílů tvarováním ohřátých desek. [9]

1.2.2 Kovové matrice

Kompozitní materiály s touto matricí jsou kovy, zpevněné jinými kovovými materiály (wolfram, ocel). Výztuží mohou také být keramická vlákna, například vlákna z karbidu křemíku nebo whiskery z karbidu křemíku nebo whiskery z nitridu křemíku. [1]

Kompozity s kovovou matricí mají velmi vysokou pevnost, vysokou mez únavy, velkou houževnatost vysoký modul pružnosti. Jsou žáruvzdorné, elektricky i teplotně vodivé a odolné vůči vlhkému prostředí. [1]

Kovové matrice se vytváří několika způsoby. Mohou být tvořeny z prášku, z fólie nebo z taveniny. Z prášku se kovová matrice vytváří například plazmovým nanášením, z fólie lisováním za tepla nebo válcováním a z taveniny například litím nebo infiltrací. Výrobní proces však musíme vybrat takový, aby nedošlo k poškození použitých vláken, a aby se matrice s vlákny dokonale smísila. [1]

Podle charakteru kovové matrice rozlišujeme základní typy kompozitů na:

- a) kompozity hliníku a jeho slitin,
- b) kompozity hořčíku a jeho slitin,
- c) kompozity titanu a jeho slitin. [1]

1.2.3 Keramické matrice

Jako keramiku si můžeme představit čisté oxidy, nitridy, boridy a karbidy. Keramika je dobrým materiálem v oblasti vysokých teplot. Keramické matrice při vysokých teplotách odolávají v tahu více než některé kovové matrice. Mají také výbornou odolnost vůči oxidaci a relativně nízkou hustotu. Při teplotách přesahujících 1000°C má keramika SiC, Si₃N₄ a Al₂O₃ pevnost v tahu kolem 800MPa. Kompozitní materiál vytvořený s kontinuálními keramickými vlákny a keramickou maticí má větší lomovou houževnatost v porovnání s monolitickou keramikou. Lomovou houževnatost tím sice zvýšíme na hodnotu kolem 30 MPa, ale v porovnání s kovy je tato hodnota malá. [1][9]

1.2.4 Uhlíkové matrice

Uhlíkové matrice se často používají ve spojení s uhlíkovými výztužemi. Uhlíkové matrice jsou křehké, podobně jako matrice keramické. Používají se zejména pro aplikace kde je velké tepelné namáhání, například pro tepelné izolace raketoplánu. [6]

Kompozity vytvořeny z uhlíkové matrice a s uhlíkovými výztužemi se nazývají kompozity uhlík-uhlík. [1]

Tyto kompozity se vyznačují vlastnostmi:

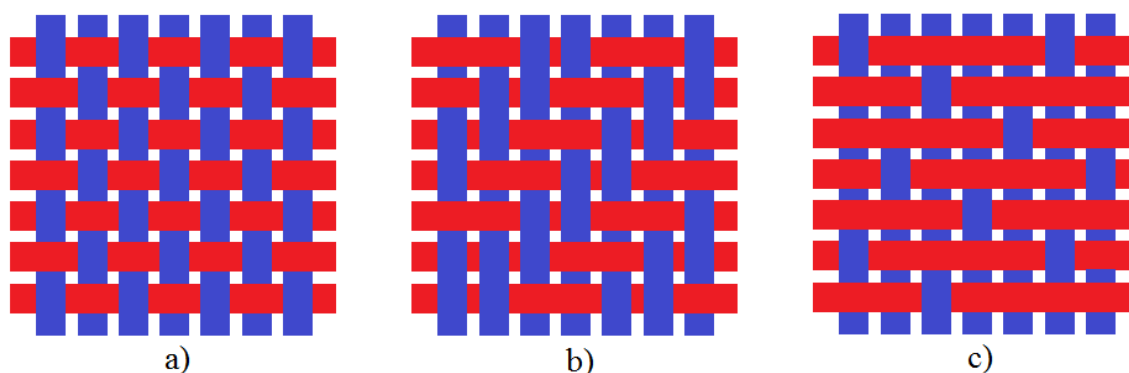
- a) odolnost proti vysokým teplotám,
- b) odolnost proti ionizujícímu záření,
- c) výborná odolnost proti teplotním šokům,
- d) velmi dobrá pevnost i v kolmém směru na vlákna (roste s teplotou)
- e) velmi dobrá chemická odolnost,
- f) nízká hustota. [1]

Nevýhodou těchto kompozitů je malá odolnost proti oxidaci při teplotách 500°C a vyšších. Proto se používají antioxidační aditiva nebo povrch chráníme povlakem SiC. [1]

1.3 Výztuže kompozitních materiálů

V kompozitním materiálu má výztuž za úkol zajistit hlavně mechanické vlastnosti, jako je pevnost a tuhost. Výztuž však také ovlivňuje i elektrické vlastnosti výsledného materiálu. Typ výztuže má tedy klíčový vliv na celkové vlastnosti vytvořeného kompozitního materiálu. [2]

Jelikož vlákna, z kterých jsou výztuže tvořeny, jsou velmi malá a tenká, je potřeba je vázat do svazků. S těmito svazky se později pracuje jako s výztuží. Vlákna mohou být zpracována několika způsoby. Tři základní způsoby jsou plátňová vazba, keprová vazba a atlasová vazba. [3]



Obr. 1: Typy vazeb a) plátňová vazba, b) keprová vazba, c) atlasová vazba [4]

Vláknové kompozitní materiály mohou mít vlákna:

- a) skleněná,
- b) uhlíková,
- c) polymerní,
- d) čedičová,
- e) proteinová
- f) borová,
- g) keramická. [1]

1.3.1 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna jsou nejpoužívanější výztuží pro kompozitní materiály vůbec. Skleněná vlákna mají obecně nižší modul pružnosti v porovnání s aramidovými nebo uhlíkovými vlákny a dosahují větší deformace při přetržení. [1]

Vyrábějí se tažením roztavené směsi oxidů Si s přidáním příměsí oxidů Al, Ca, Mg, Pb a B a většinou s malým obsahem oxidů alkalických kovů Na a K. Sklo teče tryskami o průměru 1 mm a jeho dloužením se dosahuje požadovaného průměru vlákna. Konečný průměr vlákna je však určen rozdílem rychlostí vytékání vlákna a rychlostí odtahování vlákna. Na samostatná vlákna se poté ještě za horka nanáší povrchová vrstva, která chrání vlákna proti mechanickému poškození a také usnadňuje jejich další zpracování. Takto upravená vlákna se následně sdruží do pramenů a navíjejí se na cívku. [5]

Skleněná vlákna se vyrábějí z různých druhů skloviny. Takováto skla se označují například E-sklo, S-sklo, C-sklo. [1]

Vlákna z E skloviny

Je to bezalkalické vápenato-hlinito-boro-křemičité sklo. Takovéto sklo disponuje velmi dobrou kombinací mechanických a elektrických vlastností. Vlákna ze skloviny E mají nízkou teplotu tavení, jsou nevodivá, mají velký povrchový odpor a relativně malou relativní permitivitu (5,9 až 6,4). Mají také dobrou odolnost proti hydrolýze (rozklad látky v horké vodě) a jsou nejlevnější (1,6 až 3,15 \$/kg). [5]

Vlákna z S skloviny

Tyto vlákna mají větší podíl oxidu křemíku a hliníku. Jsou také dražší, jejich cena se pohybuje v rozmezí od 19 do 31,6 \$/kg. S-sklo má větší pevnost v tahu a větší modul pružnosti v tahu než standardní vlákna z E-skla. Ve většině případů se používají v kompozitních materiálech s epoxidovou matricí. [5]

Vlákna z C skloviny

Čím více alkálií, tím mají nižší teplotu měknutí, jsou méně pevná a jejich mechanické vlastnosti rychle klesají s rostoucí teplotou. Větší množství alkalických prvků však zlepšuje odolnost C-skla proti kyselinám. [1]

1.3.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (také karbonová vlákna) jsou vlákna obsahující uhlík v různých modifikacích. Atomy uhlíku ve vláknech jsou orientovány souměrně s osou vlákna a jsou spojeny dohromady v mikroskopické krystaly. Mezi těmito krystaly jsou mikroskopické dutinky. Tyto dutinky pak zajišťují nízkou hmotnost vlákna při zachování vysoké pevnosti. Uhlíková vlákna mají velký modul pružnosti, tepelnou odolnost a vysokou únavovou pevnost. Jsou elektricky vodivá. Jejich nevýhodou je však velká křehkost a elektrochemická koroze při kontaktu s méně ušlechtilými kovy. [1][6]

1.3.3 Polymerní vlákna

Polymerní vlákna mají malou hustotu, což je jejich největší předností. Mají vysokou pevnost a tuhost, které je dosaženo téměř dokonalou orientací tuhých lineárních molekul v podélném směru vlákna. [6]

Jeden z nejznámějších produktů z polymerních vláken, přesněji z vláken aromatických polyamidů neboli aramidů, je Kevlar vyráběný společností DuPont. Kevlar výborně pohlcuje energii, je odolný vůči plamenu, je samozhášivý a netaví se. Díky těmto vlastnostem má Kevlar využití ve velké řadě odvětví, jako například letecký, armádní nebo lodní průmysl. Z Kevlaru se například vyrábějí záruvzdorné a nehořlavé oděvy a rukavice nebo také neprůstřelné vesty. [3][6]

1.3.4 Čedičová vlákna

Čedičová vlákna se získávají z čedičové horniny. Takováto hornina obsahuje složky jako je olivín a nefelín. Čedičová vlákna se vlastnostmi velmi podobají skleněným vláknům typu S. Oproti těmto vláknům je jejich cena asi 60 % z ceny skleněných vláken typu S, což je jejich velkou výhodou. Čedičová vlákna mají vysokou pevnost, nízkou tažnost a jsou také dobře chemicky odolná. Jejich nevýhodou je však jejich křehkost. Čedičová vlákna se hojně uplatňují jako tepelně i zvukově izolační desky a také jako rozbrušovací kotouče, lamináty nebo brzdové destičky. [1][6]

1.3.5 Proteinová vlákna

Proteinová vlákna jsou vlákna pavoučí. Tyto vlákna mají velké prodloužení při přetržení, až o jeden řád větší než například vlákna Kevlarová. Vnikají svojí velkou houževnatostí. [5]

Tyto vlákna však nejsou v potřebném množství dostupná. Nelze totiž uskutečnit hromadný chov pavouků pro jejich velkou agresivitu a potřebu kontroly svého teritoria. Proto se žlázné geny pavouků transplantují do mléčných žláz koz, tudíž jejich mléko pak obsahuje potřebné proteiny. Toto mléko se poté dvakrát odstředí, přidá se do něj určitý druh soli a znovu se odstředí. Poté se vzniklá usazenina rozpouští ve vodě, vznikne zlatavá emulze a z ní se poté spřádají proteinová vlákna. [1]

1.3.6 Borová vlákna

Borová vlákna se vyrábějí metodou CVD (Chemical Vapor Deposition), což je chemická depozice z plynné fáze. Tato metoda spočívá v tom, že páry borového halogenidu kondenzují na wolframový drát nebo uhlíkové vlákno. Z toho je jasné, že borová vlákna jsou sama také kompozitním materiálem. [6]

Borová vlákna jsou hojně využívána pro vysokoteplotní aplikace. Tyto vlákna mají pevnost v tahu 3,45 Gpa, v tlaku asi 6,9 Gpa a modul pružnosti 400 Gpa. Borová vlákna mají průměr $10^2 \mu\text{m}$, což je oproti ostatním vláknům hodně. [1]

1.3.7 Keramická vlákna

Keramická vlákna jsou také jako borová, určeny pro vysokoteplotní aplikace. Tato vlákna mají velkou odolnost vůči vysokým teplotám, vysokou pevnost, velkou odolnost vůči chemikáliím a jsou elektricky nevodivá. [6][7]

Keramická vlákna se vyrábějí vícero způsoby, povlakováním chemickými výpary, pyrolýzou polymerů nebo nejpoužívanější metodou v průmyslu sol-gel. [6]

2 Kompozitní materiály v elektrotechnice

Díky svým výborným mechanickým, tepelným i elektrickým vlastnostem se kompozitní materiály v elektrotechnice hojně využívají. Jejich dobré elektrické vlastnosti jsou zejména velká elektrická pevnost, velká vnitřní a povrchová rezistivita a dobrá odolnost vůči elektrickému oblouku. Pro tyto vlastnosti se kompozitní materiály používají jako konstrukční prvky, tedy pro desky plošných spojů. Dále se také používají v elektroizolačních systémech (EIS) elektrických strojů a přístrojů. [1]

2.1 Kompozitní materiály pro výrobu DPS

Desky plošných spojů slouží k podpoře elektronických součástek a k jejich vzájemnému propojení. Na materiálu, který zvolíme pro DPS je závislá konečná spolehlivost výrobku. Desky plošných spojů se skládají například z organických pryskyřic, která je použita jako pojivo. Druhým materiálem je výztuž, která může být například skelná tkanina nebo celulózový papír. [1]

2.1.1 FR-2

- tvrzený papír a fenolformaldehydová pryskyřice
- pro jednodušší aplikace
- dobře se vrtá a mechanicky opracovává
- nevýhodou jsou horší mechanické vlastnosti a navlhavost [12]

2.1.2 FR-3

- tvrzený papír a epoxidová pryskyřice
- pro náročnější aplikace než FR-2
- lepší mechanické, elektrické i tepelné vlastnosti než FR-2
- nevýhodou je vyšší cena a horší mechanické opracování [12]

2.1.3 FR-4, FR-5

- skelná tkanina a epoxidová pryskyřice
- výborné mechanické a elektrické vlastnosti, vyšší teplotní odolnost a malá nasákavost
- nevýhodou je těžší mechanické opracování a vyšší cena
- FR-5 větší teplotní odolnost než FR-4 [12]

2.2 Kompozitní materiály v elektroizolačních systémech

Požadavky na elektroizolační materiál jsou zejména vysoká elektrická pevnost, vysoká rezistivita, nízká relativní permitivita a velmi nízké dielektrické ztráty. Na elektroizolaci může působit mnoho nepříznivých vlivů, ať už chemické nebo klimatické. Působí na ni také vlivy tepelné, mechanické nebo elektromagnetické. Všem těmto vlivům by měla izolace co nejlépe odolávat. [1]

2.2.1 Kompozitní materiály v EIS točivých elektrických strojů

V elektrických zařízeních čím dál víc roste použití kompozitních materiálů jako izolačních. U elektrických strojů se používají dva systémy. Systém Resin – Rich a systém VPI. [1]

Systém Resin – Rich

Základní tříslůžkový kompozitní materiál, který je již předimpregnován materiálem s 20 až 40 procenty pojiva, se dodává jako polotovar. Zpracováním tohoto materiálu na vodivé části se vytvoří izolace s požadovanou tloušťkou. Tyto cívky nebo části vinutí jsou poté vkládány do drážek magnetického obvodu. Po pospojování částí vinutí a dodělání čel je vinutí hotové. [1][13]

Skleněná tkanina zde tvoří nosnou složku. Je tvořena stáčenými vlákny a má výslednou tloušťku kolem 0,14 mm nebo s vlákny srovnanými do roviny má tloušťku okolo 0,12 mm. Nosná složka může být také tvořena polyethylenterephtalátovou (PET) fólií nebo polyethylenaphtalátovou (PEN) fólií. Dielektrickou bariéru zde tvoří kalcinovaný slídový papír. Tento materiál je vázán na nosnou složku nejčastěji rektoplastickou pryskyřicí. U materiálů kde nosnou vrstvu tvoří fólie, dielektrickou bariéru částečně tvoří i tato vrstva. [1][13]

System VPI

U systému VPI je základním materiálem savá slídová páska. Tato páska se při procesu impregnace prosytí impregnačním lakem. Nosná složka je zde tvořena skelnou tkaninou, polyesterovým roumem, případně polyimidovou nebopolyethylenphtalátovou fólií. Jako impregnant se používají bezrozpuštědlové epoxidové, polyesterové nebo silikonové pryskyřice.[1][13]

Aplikace VPI se provádí dvěma způsoby. První způsob je celková impregnace někdy označovaná jako VIW (vakuum impregnated winding method). Při této metodě se impregnuje celý stator až po navinutí. Druhá metoda je impregnace jednotlivých tyčí. Tato metoda je označována jako VIB (vacuum impregnated bar method). Malé a střední stroje se impregnují metodou VIW a velké metodou VIB. [13]

2.2.2 Kompozitní materiály v EIS transformátorů

Podle provedení izolačního systému můžeme transformátory rozdělit na suché zalévané a spojení kapalných a tuhých izolantů. Zalévané transformátory mají cívky zalité do pryskyřice nebo se používá kompaktní izolování cívek metodou vakuově tlakové impregnace VPI nebo metodou Resin – Rich. Obě tyto metody používají třínožkový kompozitní materiál. [1]

3 Moderní vývojové trendy kompozitních materiálů

V dnešní době se trend kompozitních materiálů ubírá směrem nanokompozitních a mikrokompozitních materiálů. Využívají se hlavně kvůli zmenšení rozměrů a tím pádem také snížení nákladů. Například u izolačních systémů točivých strojů zmenšení rozměrů izolace vede k celkovému zmenšení stroje při stejných parametrech.

3.1 Nanokompozitní materiály

Nanokompozitní materiály jsou nové a zcela unikátní materiály. Tyto materiály se skládají ze dvou nebo více různých složek, z kterých minimálně jedna musí být v podobě částic. Tyto částice pak mají velikost jednotek až desítek nanometrů. Ve většině případů se jedná o částice aktivní látky s dobrými magnetickými, elektrickými nebo jinými vlastnostmi. Aktivní látka je poté rovnoměrně rozptýlena inertní maticí. Inertní matrice má za úkol nést a spojovat nanočástice a bránit jejich přímému kontaktu. Aktivní látka ve formě částic má kvalitativně odlišné fyzikální vlastnosti než objemový materiál. Odlišné vlastnosti jsou způsobeny velkým poměrem počtu povrchových atomů vůči atomům vnitřním, monodoménovou strukturou nanočástic nebo a nemožností vzájemných interakcí nanočástic mezi sebou. [10][11]

Vlastnosti nanokompozitních materiálů jsou určeny složením a zároveň také velikostí částic, jejich morfologií a uspořádáním. Nanokompozity mají široké využití. Používají se pro ukládání informací, magnetické chlazení, ferrofluidy [22], zobrazovací metody v medicíně [23], různé senzory, elektromechanické [24] a magnetomechanické měniče, antiseptická vlákna, v izolační technice (nanodielektrika) [25] a další. Při nízkých teplotách tyto materiály mohou být supravodivé a jejich vodivost lze ovlivňovat přítomností iontů [10][11]

3.2 Nanokapaliny

Transformátory jsou v elektrickém napájecím systému důležitou součástí, proto je nutné zlepšovat jejich životnost. Největší vliv na jejich životnost má jejich izolační systém, který u velkých transformátorů bývá vytvořen olejovou lázní, ve které je samotný transformátor umístěn. Další funkcí této lázně je přenos tepla z aktivní části transformátoru na stěny nádrže, odkud může být následně rozptýleno do okolí. Možností jak prodloužit životnost tohoto izolačního systému je přidat do oleje nanočástice. Jedna z možností jsou nanokapaliny na bázi TiO_2 . [21]

3.3 Mikrokompozitní materiály

Mikrokompozitní materiály jsou materiály s částicemi, u kterých největší příčný rozměr může mít až sto mikrometrů. Kovy a slitiny kovů v porovnání s mikrokompozity mají větší hustotu a horší poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě. Dosahují tedy celkově menší měrné pevnosti. [11]

Ve studii [26] se autoři zabývali tepelnou vodivostí a průrazným napětím. Zjistili, že asi nejlepším plnivem je nitrid boru a další je oxid hlinitý. Přidáním plniva se zvyšuje tepelná vodivost a také průrazné napětí. Pro zlepšení těchto parametrů je velmi důležité aby byly odstraněny makroskopické dutiny v materiálu

Ve studii [27] autoři zkoumali, jaký vliv bude mít přidání nanočástic do mikrokompozitního materiálu na tepelné a elektrické vlastnosti. Tyto vlastnosti testovali na dvou materiálech a to na mikrokompozitech oxidu hlinitém a oxidu křemičitého. Bylo prokázáno, že přidání nanočástic v objemu menším než 1 % zlepšuje jak tepelné tak elektrické vlastnosti. Ve studii autoři dokázali, že přídavek hexagonálního nitridu boritého do mikrokompozitu oxidu křemičitého v objemu 0,6 %, zvýšil tepelnou vodivost o 30 %, střídavé průrazné napětí o 65 % a stejnosměrné průrazné napětí o 50 %.

4 Diagnostický systém

Izolační systém v elektrických zařízeních je velmi citlivou částí na namáhání a stárnutí. Zhoršují se tím jeho izolační vlastnosti a tím může dojít k poškození zařízení. U elektrických zařízení je spolehlivost důležitým parametrem a tato spolehlivost je velmi ovlivňována touto důležitou částí zařízení. Kvůli tomu je nutné izolační systém diagnostikovat. Nejvíce se pro takovou diagnostiku využívá fenomenologického přístupu, kde se zkoumají vlivy vstupních parametrů na parametry výstupní. [14]

4.1 Sledované parametry

4.1.1 Absorpční a resorpční křivky

Z absorpčních a resorpčních křivek můžeme vyvodit důležité parametry o stavu měřeného izolantu. Tyto parametry jsou izolační odpor R_X [Ω], vnitřní rezistivita ρ_v [Ωm] a polarizační indexy jako je minutový p_{i1} [-] a desetiminutový p_{i10} [-]. Nejčastěji se pro toto měření používá Voltampérová metoda nebo Wheastsonův můstek. Existují však také další metoda jako například kompenzační metoda. Měření absorpčních a resorpčních křivek je popsáno v normě ČSN IEC 93 [19]. [14]

4.1.2 Ztrátový činitel a permitivita dielektrika

Pro určení technického stavu dielektrika, je potřeba znát prvky náhradního schématu reálného kondenzátoru. Reálný kondenzátor je tvořen paralelní kombinací kondenzátoru a rezistoru, který reprezentuje ztráty. Při určování ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ [-] a relativní permitivity ϵ_r [-] je nutné zohlednit závislost na teplotě, napětí a frekvenci. Tyto závislosti jsou řešeny různými metodami, které jsou popsány v normě ČSN IEC 250 [16]. [14]

4.1.3 Elektrická pevnost izolanů

Maximálně přípustné elektrické namáhání izolačního systému je dáno velikostí elektrické pevnosti. Pokud tato intenzita, při zvyšování napětí, dosáhne určité úrovně, dojde u kapalných a plyných izolanů k přeskoce a u pevných k průrazu. Velikost napětí při průrazu nebo přeskoce se nazývá průrazné napětí. Intenzitě elektrického pole při tomto průrazném napětí se říká elektrická pevnost E_P [kV/mm]. Elektrická pevnost je pak dána poměrem průrazného napětí U_P [kV] a tloušťky izolantu d [mm] v místě průrazu (1). Norma ČSN EN 60243-1 (346463) [20] popisuje měření elektrické pevnosti. [15]

$$E_P = \frac{U_P}{d} [kV/mm] \quad (1)$$

4.2 Specifikace vzorků

Měření probíhalo na dvou rozdílných materiálech. Tyto materiály byly Relanex a Relastik. Relanex je materiál kde nosnou složku tvoří skleněná tkanina a jako pojivo je zde použita epoxy-novolaková pryskyřice. Relastik je vyroben z kalcinovaného slídového papíru, PET nebo PEN fólie a taktéž jako u Relanexu zde pojivo zajišťuje epoxy-novolaková pryskyřice. [17][18]

Tab.1: Tloušťky vzorků Relanexu

Relanex	d [mm]					průměr
#1	0,408	0,377	0,384	0,385	0,389	0,389
#2	0,383	0,359	0,362	0,36	0,394	0,372
#3	0,366	0,362	0,392	0,361	0,348	0,366
#4	0,405	0,399	0,389	0,348	0,399	0,388
#5	0,417	0,404	0,397	0,386	0,414	0,404

Tab.2: Tloušťky vzorků Relastiku

Relastik	d [mm]					průměr
#1	0,302	0,277	0,69	0,268	0,267	0,361
#2	0,274	0,276	0,276	0,273	0,271	0,274
#3	0,289	0,26	0,278	0,273	0,285	0,277
#4	0,256	0,275	0,254	0,247	0,269	0,260
#5	0,245	0,258	0,237	0,257	0,248	0,249

4.3 Výsledky a vyhodnocení měření elektrických parametrů

4.3.1 Měření absorpčních a resorpčních křivek

Vzorky byly vloženy mezi dvě elektrody, na kterých bylo připojeno stejnosměrné napětí 500V. Při tomto napětí byl sledován proud protékající izolantem, který se pohyboval v řádech pA. Z hodnot ustáleného proudu se vypočetla vnitřní rezistivita dle vztahu (2), kde U [V] je napětí, d [cm] je tloušťka vzorku a I [A] je proud. Poté byl spočten její průměr dle vztahu (3). Nakonec byly spočteny polarizační indexy p_{i1} (4) a p_{i10} (5). Tabulky hodnot jednotlivých vzorků viz přílohy (Tab. 9 – Tab. 13 a Tab. 19 – Tab. 23 pro Relanex, Tab. 14 – Tab. 18 a Tab. 24 – Tab. 28 pro Relastik). Měření proběhlo dle normy ČSN IEC 93 [19].

$$\rho = \frac{22,9 \cdot U}{t_c \cdot I} \quad (2)$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^6 \rho_n \quad (3)$$

$$p_{i1} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{i_{15}}{i_{60}} \quad (4)$$

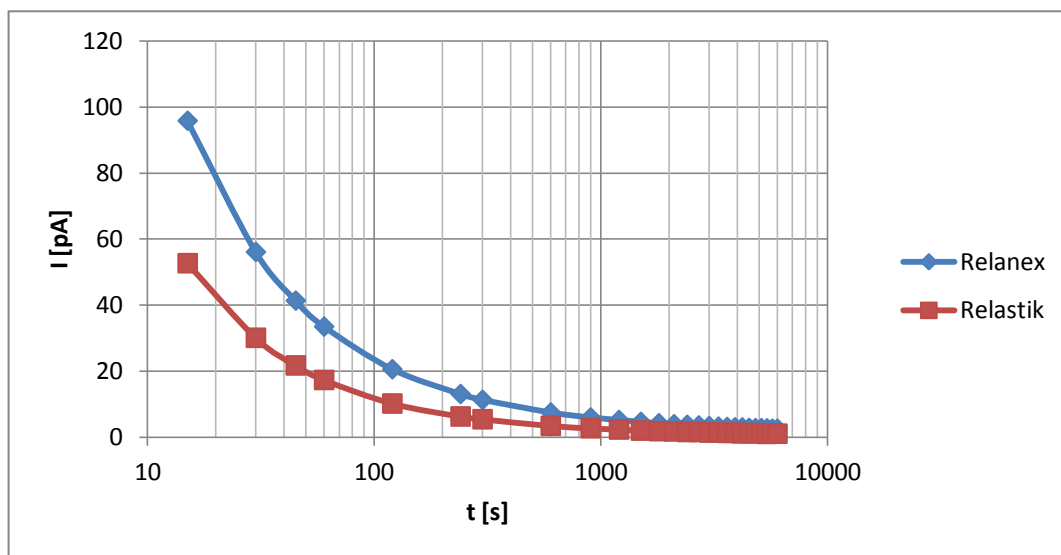
$$p_{i10} = \frac{R_{600}}{R_{15}} = \frac{i_{15}}{i_{600}} \quad (5)$$

Tab. 3: Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro Relanex

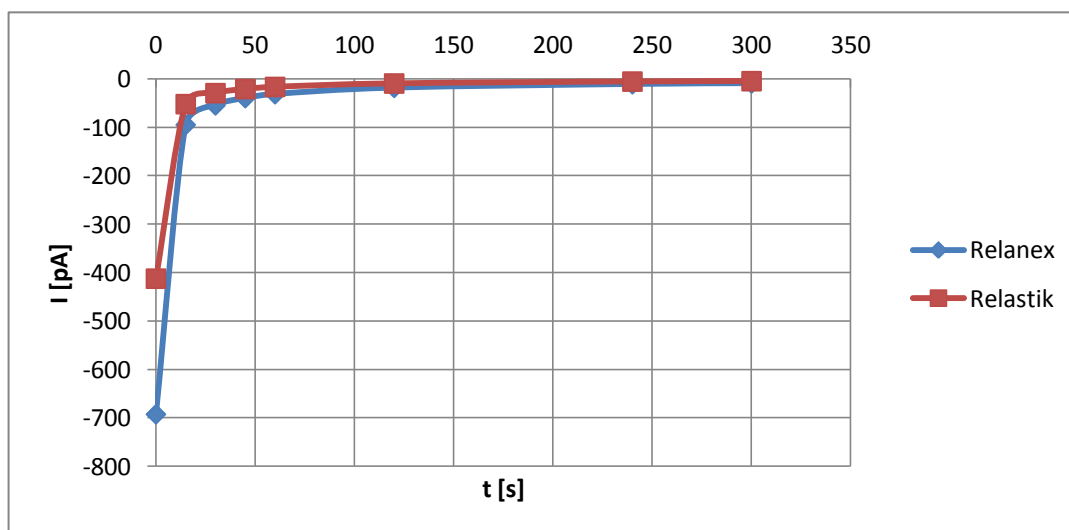
vzorek	#1	#2	#3	#4	#5	průměr
ρ [Ωm]	1,50E+15	1,74E+15	1,64E+15	1,17E+15	6,11E+14	1,11E+15
p_{i1} [-]	3,042	3,047	2,976	2,833	2,574	2,894
p_{i10} [-]	14,872	14,966	14,395	13,398	9,576	13,441
i_{6000} [pA]	1,96	1,77	1,91	2,52	4,64	2,561

Tab. 4: Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro Relastik

vzorek	#1	#2	#3	#4	#5	průměr
ρ [Ωm]	2,70E+15	5,04E+15	4,24E+15	3,21E+15	4,86E+15	3,34E+15
p_{i1} [-]	2,973	3,004	3,168	2,872	3,168	2,531
p_{i10} [-]	14,635	3,004	17,053	12,598	17,758	10,841
i_{6000} [pA]	1,18	0,83	0,98	1,37	0,95	0,88



Obr. 2: Graf absorpčních charakteristik proudu



Obr. 3: Graf resorpčních charakteristik proudu

4.3.2 Měření ztrátového činitele, permitivity a kapacity dielektrika

Měření probíhalo na přístroji Tetex 2830. Vzorek materiálu byl vložen mezi dvě elektrody, na kterých bylo připojeno střídavé napětí 500 V o frekvenci 50 Hz. Při měření byla nastavována teplota po deseti stupních Celsia od 30°C do 120°C a odečítány hodnoty parametrů. Poté bylo nutné zchladit elektrody a pokračovat s měřením dalšího vzorku. Z naměřených hodnot (viz přílohy Tab. 29 – Tab. 33 pro Relanex, Tab. 34 – Tab. 38 pro Relastik) byly ke každému materiálu vypočítány průměry (6), směrodatné odchylky (7) a variační koeficienty (8). Měření proběhlo dle normy ČSN IEC 250 [16].

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^6 x_n \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^6 (x_n - \bar{x})^2} \quad (7)$$

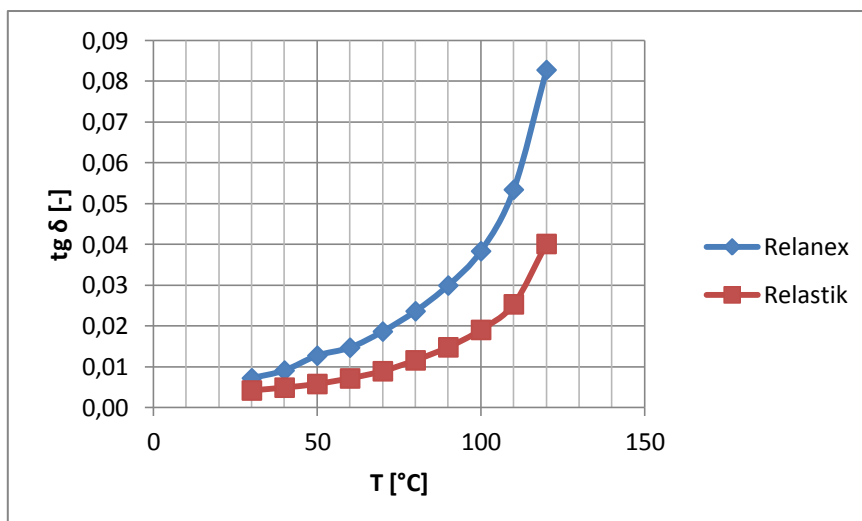
$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (8)$$

Tab. 5: Souhrn statistických ukazatelů pro materiál Relanex

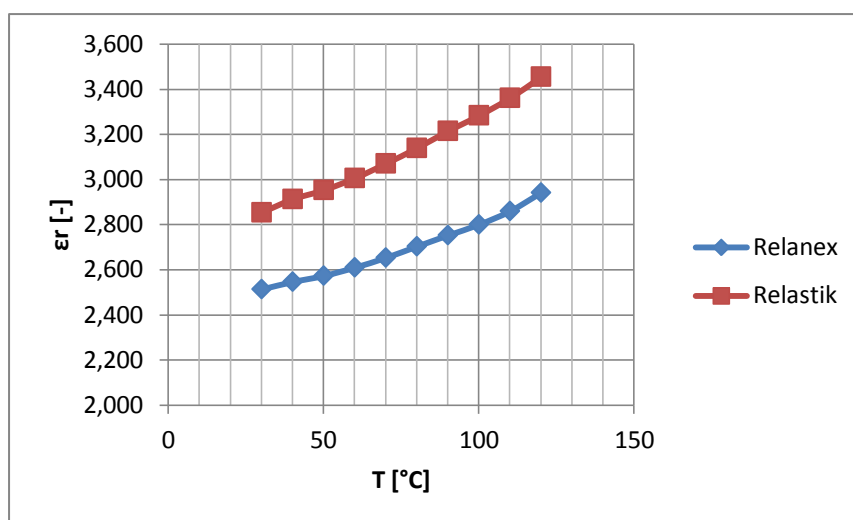
	T [°C]	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Průměr	tg δ [-]	0,0072	0,0091	0,0127	0,0147	0,0187	0,0236	0,0299	0,0384	0,0534	0,0828
	εr [-]	2,513	2,546	2,573	2,609	2,653	2,703	2,752	2,800	2,859	2,941
	Cx [pF]	156,38	158,42	160,08	162,36	165,04	168,18	171,25	174,22	177,91	182,99
směrodatná odchylka	tg δ [-]	0,0003	0,0003	0,0026	0,0008	0,0012	0,0019	0,0153	0,0071	0,0131	0,0255
	εr [-]	0,092	0,094	0,096	0,098	0,100	0,103	0,104	0,108	0,113	0,121
	Cx [pF]	5,73	5,83	5,97	6,13	6,24	6,41	6,46	6,73	7,05	7,53
variační koeficient	tg δ [%]	4,6895	2,9505	20,7946	5,1449	6,3009	7,9661	39,9742	18,5859	24,4723	30,8549
	εr [%]	3,665	3,678	3,721	3,765	3,777	3,812	3,777	3,860	3,968	4,118
	Cx [%]	3,67	3,68	3,73	3,77	3,78	3,81	3,77	3,86	3,96	4,12

Tab. 6: Souhrn statistických ukazatelů pro materiál Relanex

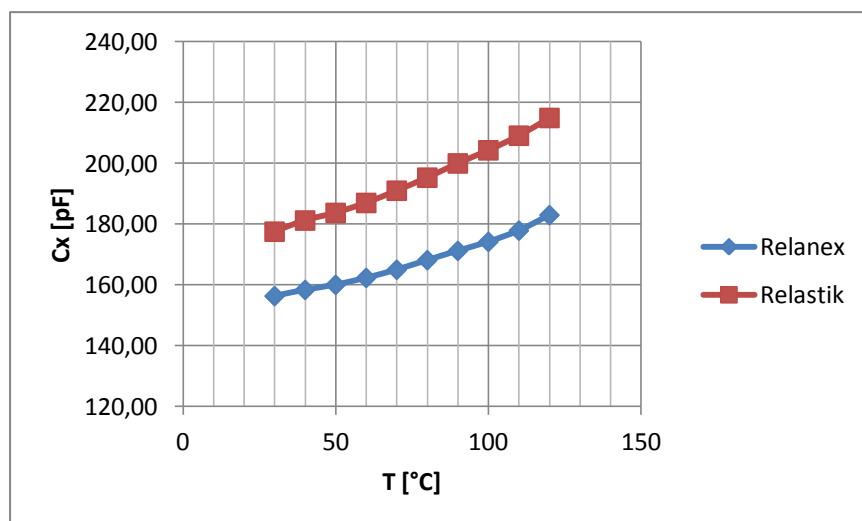
	T [°C]	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Průměr	tg δ [-]	0,0042	0,0049	0,0058	0,0072	0,0089	0,0116	0,0148	0,0191	0,0253	0,0401
	εr [-]	2,853	2,912	2,953	3,005	3,070	3,139	3,214	3,283	3,361	3,454
	Cx [pF]	177,55	181,22	183,73	187,00	191,02	195,30	200,00	204,31	209,11	214,94
směrodatná odchylka	tg δ [-]	0,0003	0,0004	0,0005	0,0007	0,0008	0,0011	0,0011	0,0012	0,0019	0,0041
	εr [-]	0,090	0,100	0,106	0,111	0,120	0,130	0,142	0,149	0,158	0,167
	Cx [pF]	5,61	6,19	6,59	6,93	7,50	8,06	8,82	9,29	9,84	10,38
variační koeficient	tg δ [%]	7,1200	7,7922	8,3388	9,4823	9,0997	9,1233	7,5361	6,4735	7,4735	10,1949
	εr [%]	3,153	3,427	3,593	3,701	3,924	4,128	4,417	4,543	4,696	4,826
	Cx [%]	3,16	3,42	3,59	3,70	3,92	4,13	4,41	4,55	4,70	4,83



Obr. 4: Graf závislosti ztrátového činitele izolantů na teplotě



Obr. 5: Graf závislosti permitivity izolantů na teplotě



Obr. 6: Graf závislosti kapacity izolantů na teplotě

4.3.3 Měření elektrické pevnosti izolanů

Měření elektrické pevnosti izolanů se provádělo pomocí speciálních elektrod (viz přílohy obr. 6), mezi které byl vzorek materiálu vložen. Poté se postupně začalo zvedat stejnosměrné napětí až do okamžiku průrazu. Průrazné napětí U_p [kV] bylo zaznamenáno a následovalo měření dalšího vzorku. Po změření průrazných napětí bylo ještě nutné doměřit tloušťky jednotlivých vzorků v místě průrazu. Z těchto dvou hodnot byla následně ze vztahu (1) spočtena elektrická pevnost. Ze všech hodnot byl také spočítán průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient podle rovnic (6), (7) a (8). Měření proběhlo dle normy ČSN EN 60243-1 (346463) [20].

Tab. 7: Tabulka hodnot měření elektrické pevnosti Relanexu

vzorek	Relanex		
	U_p [kV]	d [μm]	E_p [kV/mm]
#1	36,45	310	117,58
#2	33,76	301	112,16
#3	40,98	326	125,71
#4	34,85	304	114,64
#5	36,87	317	116,31
#6	35,93	312	115,16
průměr	36,47	312	116,93
směr. odch.	2,26	8	4,26
var. koef.	6,21	3	3,64

Tab. 8: Tabulka hodnot měření elektrické pevnosti Relastiku

vzorek	Relastik		
	U_p [kV]	d [μm]	E_p [kV/mm]
#1	40,28	285	141,33
#2	31,27	278	112,48
#3	34,7	281	123,49
#4	39,06	296	131,96
#5	37,78	287	131,64
#6	37,18	291	127,77
průměr	36,71	286	128,11
směr. odch.	2,98	6	8,83
var. koef.	8,12	2	6,89

Závěr

Kompozitní materiál je složen ze dvou a více rozdílných materiálů. Jeho hlavní složky jsou výztuž a matrice. Výztuž je tvrdší, pevnější a slouží jako nosná složka pro matici. Matrice je poddajnější a zastupuje funkci pojiva výztuže. Výztuže se dělí podle použitých vláken na dlouhovláknové a krátkovláknové nebo na výztuže částicové a používají se pro ni různé druhy materiálů jako je sklo, keramika, uhlík, bor a další. Matrice kompozitních materiálů se dělí podle použitého materiálu na polymerní, kovové, keramické a uhlíkové matrice.

Kvůli vysokým požadavkům na spolehlivost elektrických zařízení jsme pořád nuceni tyto zařízení zdokonalovat. Jedna cesta jak zlepšit spolehlivost celého zařízení je zdokonalit jeho izolační systém, proto se zde začínají více používat nanokompozitní a mikrokompozitní materiály. Do těchto materiálů se přidávají částice, které poté zlepšují celkové magnetické nebo elektrické vlastnosti materiálu. Přidání těchto částic také vede ke zmenšování rozměrů při zachování stejných parametrů.

V praktické části této bakalářské práce bylo měřeno několik parametrů určujících vlastnosti izolantů. Prvním parametrem bylo měření vnitřní rezistivity a s tím související měření absorpčních a resorpčních křivek. Dalším měřením bylo měření teplotní závislosti ztrátového činitele, permitivity a kapacity vybraných izolačních materiálů. Posledním měřeným parametrem bylo průrazné napětí a z něho vypočítaná elektrická pevnost izolantů. Všechny tyto parametry byly měřeny na dvou kompozitních materiálech. Prvním byl materiál Relanex a druhým byl materiál Relastik.

Ze změřených absorpčních a resorpčních charakteristik je vidět, že Relastik má větší vnitřní odpor, jelikož se jeho proud ustálil na nižší hodnotě než u Relanexu. Vnitřní rezistivita Relastiku je $3,34 \cdot 10^{15} \Omega\text{m}$ a vnitřní rezistivita Relanexu je $1,11 \cdot 10^{15} \Omega\text{m}$. Z druhého měření lze vidět, že závislost permitivity a kapacity na teplotě je téměř lineární, závislost ztrátového činitele na teplotě je však spíše exponenciální. Z vynesných grafů je zřejmé že Relanex má větší ztrátový činitel než Relastik, naproti tomu má však menší permitivitu a kapacitu. Z třetího měření je patrné, že s elektrickou pevností je na tom Relastik o trochu lépe. Jeho průměrná hodnota byla spočítána na 128,11 kV/mm. Průměrná hodnota elektrické pevnosti Relanexu byla 116,93 kV/mm.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] TOMÁŠKOVÁ, Tetjana. *Perspektivní kompozity pro elektrotechniku*. Plzeň, 2012.
Dostupné také z:
<https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/3930/Perspektivni%20kompozity%20pro%20elektrotechniku.pdf?sequence=1>.
Západočeská univerzita v Plzni.
- [2] Kompozity.doc. *GDP Koral Composites* [online]. [cit. 2016-03-08].
Dostupné z: <http://www.gdpkoral.cz/UserFiles/File/PDF-design-manual/kompozity.pdf>
- [3] SÝKORA, Radek. *Obrábění kompozitních materiálů*. Plzeň, 2012.
Dostupné také z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2606/bakalarsk%20prace.pdf?sequence=1>.
- [4] Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů. *Havel Composites* [online]. [cit. 2016-02-28].
Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>
- [5] Vlakna.pdf. KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity* [online]. [cit. 2016-03-07].
Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
- [6] MIKULA, Martin. *Kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken*. Brno, 2012.
Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54627.
Vysoké učení technické v Brně.
- [7] Keramická a speciální vlákna. *Hennlich* [online]. [cit. 2016-03-07].
Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/produkty/tesneni-ostatni-sortiment-termoizolacni-tesneni-2710/keramicka-a-specialni-vlakna.html>
- [8] 6_Kompozitni-materialy.pdf. *Ústav materiálového inženýrství Fakulta strojní* [online]. [cit. 2016-03-07].
Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf
- [9] Matrice.pdf. KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity* [online]. [cit. 2016-03-07].
Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/matrice.pdf>

- [10] Nanokompozity. *Informační a vzdělávací centrum kompozitních technologií* [online]. [cit. 2016-03-19].
Dostupné z: <http://www.kompozity.info/index.php?pr=15>
- [11] KROUPA, Tomáš. *Obrábění kompozitních materiálů*. Plzeň, 2014.
Dostupné také z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/15058/DP_kveten23.5_zaloha.pdf?sequence=1.
Západočeská univerzita, Fakulta strojní.
- [12] MYNARČÍK, Miroslav. *Konstrukce zařízení pro recyklaci PC desek*. Zlín, 2009.
Dostupné také z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/10992/mynar%C4%8D%C3%ADk_2009_bp.pdf?sequence=1.
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická.
- [13] ŽIVNÝ, Petr. *Izolační systém resin rich pro vinutí generátorů*. Plzeň, 2013.
Dostupné také z: <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/10072>.
Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická.
- [14] KUBEŠ, Jan. *Aspekty diagnostiky elektrických zařízení*. Plzeň, 2015.
Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická.
- [15] Elektrická pevnost. *Profi elektřina* [online]. [cit. 2016-04-22].
Dostupné z: <http://elektrika.cz/terminolog/eterminolog2definition.2006-04-22.5895106704>
- [16] *Doporučené postupy ke stanovení permitivity a ztrátového činitele elektroizolačních materiálů při průmyslových, akustických a rozhlasových kmitočtech včetně metrových vlnových délek*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [17] Slídové materiály typu Resin Rich s nosnou skleněnou tkaninou pro vysokonapěťové izolace točivých elektrických strojů. *Ketsrv.fel.zcu.cz*[online]. Tábor [cit. 2016-05-03]. Dostupné z:
<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce3/60.pdf>
- [18] RESIN RICH IZOLAČNÍ SYSTÉM. *Vuki Trade* [online]. [cit. 2016-05-03].
Dostupné z: http://www.vukitrade.sk/content/download/Brochure%20coils%20RR_2009%20CZ.pdf
- [19] *Skúšky tuhých elektroizolačných materiálov. Metódy merania vnútornej resistivity a povrchovej resistivity tuhých elektroizolačných materiálov*. Bratislava: VÚKI Bratislava, 1993.
- [20] *Elektrická pevnost izolačních materiálů - Zkušební metody - Část 1: Zkoušky při průmyslových kmitočtech*. Plzeň: Český normalizační institut, 1999.

- [21] RAFIQ, Muhammad, WEI WANG, KAIBO MA, YOU ZHOU, QI WANG, CHENGRONG LI a YUZHEN LV. Insulating and aging properties of transformer oil-based TiO₂ nanofluids. In: *2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)* [online]. IEEE, 2014, s. 457-461 [cit. 2016-05-21]. DOI: 10.1109/CEIDP.2014.6995798. ISBN 978-1-4799-7525-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6995798>
- [22] NKURIKIYIMFURA, Innocent, YANMIN WANG, ZHIDONG PAN a DAWEI HU. Enhancement of thermal conductivity of magnetic nanofluids in magnetic field. In: *2011 International Conference on Materials for Renewable Energy & Environment* [online]. IEEE, 2011, s. 1333-1337 [cit. 2016-05-27]. DOI: 10.1109/ICMREE.2011.5930581. ISBN 978-1-61284-749-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5930581>
- [23] DECLAVILLE CHRISTIANSEN, Jesper, Catalina-Gabriela POTARNICHE, Zina VULUGA a Aleksey DROZDOV. Nanomaterials in biomedical applications. In: *2011 2nd International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology (Wireless VITAE)* [online]. IEEE, 2011, s. 1-5 [cit. 2016-05-27]. DOI: 10.1109/WIRELESSVITAE.2011.5940843. ISBN 978-1-4577-0786-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5940843>
- [24] STAMPFOR, C., A. JUNGEN a C. HIEROLD. Nano electromechanical transducer based on single walled carbon nanotubes. In: *The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2005. Digest of Technical Papers. TRANSDUCERS '05* [online]. IEEE, 2005, s. 2103-2106 [cit. 2016-05-27]. DOI: 10.1109/SENSOR.2005.1497518. ISBN 0-7803-8994-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1497518>
- [25] TANAKA, Toshikatsu a Takahiro IMAI. Advances in nanodielectric materials over the past 50 years. *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. 2013, **29**(1), 10-23 [cit. 2016-05-27]. DOI: 10.1109/MEI.2013.6410535. ISSN 0883-7554. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6410535>

- [26] TANAKA, Toshikastu, Masahiro KOZAKO a Kenji OKAMOTO. Toward High Thermal Conductivity Nano Micro Epoxy Composites with Sufficient Endurance Voltage. *Journal of International Council on Electrical Engineering* [online]. 2014, **2**(1), 90-98 [cit. 2016-05-27]. DOI: 10.5370/JICEE.2012.2.1.090. ISSN 2234-8972. Dostupné z:
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.5370/JICEE.2012.2.1.090>
- [27] TSEKMES, I. A., P. H. F. MORSHUIS, J. J. SMIT a R. KOCHETOV. Enhancing the thermal and electrical performance of epoxy microcomposites with the addition of nanofillers. *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. 2015, **31**(3), 32-42 [cit. 2016-05-27]. DOI: 10.1109/MEI.2015.7089120. ISSN 0883-7554. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7089120>

Přílohy

Příloha I. Naměřené a vypočtené hodnoty

Tabulky absorpčních křivek

Tab. 9: Tabulka hodnot měření absorpčních křivek pro Relanex #1

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300	600
I [pA]	706,33	92,71	52,82	38,06	30,48	18,04	11,15	9,54	6,23
t [s]	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000	3300
I [pA]	4,65	4,24	3,53	3,38	2,95	2,81	2,75	2,55	2,43
t [s]	3600	3900	4200	4500	4800	5100	5400	5700	6000
I [pA]	2,39	2,20	2,17	2,09	1,97	2,06	1,89	1,91	1,96

Tab. 10: Tabulka hodnot měření absorpčních křivek pro Relanex #2

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300	600
I [pA]	626,05	80,32	45,49	32,99	26,36	15,71	9,67	8,27	5,37
t [s]	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000	3300
I [pA]	4,28	3,62	3,08	2,81	2,58	2,52	2,44	2,21	2,10
t [s]	3600	3900	4200	4500	4800	5100	5400	5700	6000
I [pA]	2,02	2,00	2,01	1,79	1,72	1,77	1,68	1,60	1,77

Tab. 11: Tabulka hodnot měření absorpčních křivek pro Relanex #3

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300	600
I [pA]	665,78	87,87	50,51	36,73	29,52	17,96	11,12	9,63	6,10
t [s]	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000	3300
I [pA]	4,83	4,16	3,80	3,40	3,11	2,94	2,82	2,79	2,52
t [s]	3600	3900	4200	4500	4800	5100	5400	5700	6000
I [pA]	2,51	2,27	2,23	2,14	2,12	2,20	2,08	1,95	1,91

Tab. 12: Tabulka hodnot měření absorpčních křivek pro Relanex #4

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300	600
I [pA]	684,73	103,91	61,41	45,51	36,68	22,45	14,11	12,00	7,76
t [s]	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000	3300
I [pA]	6,18	5,29	4,81	4,07	4,03	3,91	3,44	3,22	3,15
t [s]	3600	3900	4200	4500	4800	5100	5400	5700	6000
I [pA]	2,88	2,91	2,84	2,72	2,66	2,57	2,56	2,49	2,52

Tab. 13: Tabulka hodnot měření absorpčních křivek pro Relanex #5

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300	600
I [pA]	716,85	114,25	70,24	53,50	44,39	28,76	19,31	17,12	11,93
t [s]	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000	3300
I [pA]	9,92	8,73	7,95	7,46	6,92	6,56	6,32	6,06	5,80
t [s]	3600	3900	4200	4500	4800	5100	5400	5700	6000
I [pA]	5,62	5,51	5,47	5,19	5,21	5,08	5,11	4,80	4,64

Tab. 14: Tabulka hodnot měření absorpčních křivek pro Relastik #1

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300	600
I [pA]	368,40	48,10	27,81	20,20	16,18	9,70	6,07	5,17	3,29
t [s]	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000	3300
I [pA]	2,49	2,26	1,82	1,77	1,80	1,34	1,52	1,36	1,24
t [s]	3600	3900	4200	4500	4800	5100	5400	5700	6000
I [pA]	1,39	1,37	1,25	1,08	1,06	1,19	0,91	1,04	1,18

Tab. 15: Tabulka hodnot měření absorpčních křivek pro Relastik #2

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300	600
I [pA]	337,35	44,17	25,47	18,61	14,70	8,67	5,35	4,52	2,88
t [s]	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000	3300
I [pA]	2,32	2,09	1,77	1,76	1,57	1,43	1,36	1,18	1,31
t [s]	3600	3900	4200	4500	4800	5100	5400	5700	6000
I [pA]	1,02	1,12	1,10	1,04	1,13	0,96	0,92	1,06	0,83

Tab. 16: Tabulka hodnot měření absorpčních křivek pro Relastik #3

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300	600
I [pA]	431,92	55,60	31,28	22,25	17,55	9,97	5,93	5,25	3,26
t [s]	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000	3300
I [pA]	2,58	2,03	1,81	1,59	1,42	1,32	1,51	1,37	1,13
t [s]	3600	3900	4200	4500	4800	5100	5400	5700	6000
I [pA]	1,09	1,24	0,90	1,10	1,12	1,05	0,88	0,89	0,98

Tab. 17: Tabulka hodnot měření absorpčních křivek pro Relastik #4

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300	600
I [pA]	406,30	53,72	31,26	22,99	18,70	11,45	7,33	6,37	4,26
t [s]	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000	3300
I [pA]	3,53	3,05	2,57	2,13	2,20	2,14	1,89	1,74	1,82
t [s]	3600	3900	4200	4500	4800	5100	5400	5700	6000
I [pA]	1,76	1,49	1,42	1,52	1,52	1,54	1,31	1,32	1,37

Tab. 18: Tabulka hodnot měření absorpčních křivek pro Relastik #5

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300	600
I [pA]	498,96	61,81	34,63	24,58	19,51	11,19	6,65	5,84	3,48
t [s]	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000	3300
I [pA]	2,60	2,21	1,99	1,84	1,70	1,60	1,56	1,40	1,40
t [s]	3600	3900	4200	4500	4800	5100	5400	5700	6000
I [pA]	1,27	1,27	1,13	1,26	1,22	1,08	0,95	0,97	0,95

Tabulky resorpčních křivek

Tab. 19: Tabulka hodnot měření resorpčních křivek pro Relanex #1

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300
I [pA]	-705,14	-91,41	-51,29	-36,57	-28,73	-16,15	-9,37	-7,76

Tab. 20: Tabulka hodnot měření resorpčních křivek pro Relanex #2

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300
I [pA]	-628,11	-79,33	-44,27	-31,49	-24,81	-14,05	-7,98	-6,73

Tab. 21: Tabulka hodnot měření resorpčních křivek pro Relanex #3

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300
I [pA]	-674,07	-86,52	-48,76	-34,98	-27,71	-15,76	-9,08	-7,63

Tab. 22: Tabulka hodnot měření resorpčních křivek pro Relanex #4

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300
I [pA]	-714,40	-102,68	-59,40	-43,05	-34,29	-19,84	-11,47	-9,71

Tab. 23: Tabulka hodnot měření resorpčních křivek pro Relanex #5

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300
I [pA]	-738,32	-112,30	-67,12	-49,87	-40,35	-24,49	-15,03	-12,72

Tab. 24: Tabulka hodnot měření resorpčních křivek pro Relastik #1

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300
I [pA]	-367,16	-47,01	-26,55	-18,98	-14,99	-8,59	-4,73	-3,99

Tab. 25: Tabulka hodnot měření resorpčních křivek pro Relastik #2

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300
I [pA]	-351,58	-43,66	-24,64	-17,51	-13,83	-7,69	-4,33	-3,65

Tab. 26: Tabulka hodnot měření resorpčních křivek pro Relastik #3

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300
I [pA]	-440,83	-55,33	-30,54	-21,52	-16,87	-9,13	-5,10	-4,28

Tab. 27: Tabulka hodnot měření resorpčních křivek pro Relastik #4

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300
I [pA]	-409,45	-51,38	-29,37	-20,98	-16,75	-9,56	-5,67	-4,76

Tab. 28: Tabulka hodnot měření resorpčních křivek pro Relastik #5

t [s]	0	15	30	45	60	120	240	300
I [pA]	-490,64	-60,89	-33,60	-23,59	-18,30	-10,15	-5,46	-4,57

Tabulky ztrátového činitele, permitivity a kapacity dielektrika

Tab. 29: Tabulka hodnot ztrátového činitele, permitivity a kapacity dielektrika pro Relanex #1

T [°C]	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
tg δ [-]	0,00659	0,00875	0,0109	0,0134	0,0172	0,0219	0,0275	0,0334	0,0447	0,0669
ε _r [-]	2,347	2,381	2,403	2,436	2,477	2,526	2,577	2,618	2,671	2,745
C _x [pF]	146,06	148,17	149,52	151,57	154,12	157,18	160,36	162,93	166,23	170,83

Tab. 30: Tabulka hodnot ztrátového činitele, permitivity a kapacity dielektrika pro Relanex #2

T [°C]	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
tg δ [-]	0,00735	0,00903	0,0117	0,0146	0,0184	0,0222	0,0268	0,0333	0,0445	0,0666
ε _r [-]	2,477	2,501	2,529	2,563	2,604	2,645	2,688	2,734	2,788	2,864
C _x [pF]	154,15	155,61	157,34	159,46	162,01	164,59	167,28	170,1	173,51	178,2

Tab. 31: Tabulka hodnot ztrátového činitele, permitivity a kapacity dielektrika pro Relanex #3

T [°C]	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
tg δ [-]	0,0073	0,0093	0,018	0,0147	0,018	0,0226	0,0277	0,0335	0,044	0,061
ε _r [-]	2,584	2,618	2,644	2,679	2,721	2,774	2,825	2,871	2,929	3,004
C _x [pF]	160,81	162,91	164,55	166,73	169,3	172,63	175,79	178,68	182,25	186,94

Tab. 32: Tabulka hodnot ztrátového činitele, permitivity a kapacity dielektrika pro Relanex #4

T [°C]	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
tg δ [-]	0,00725	0,00894	0,0113	0,0151	0,019	0,0246	0,0312	0,0399	0,056	0,0894
ε _r [-]	2,572	2,611	2,643	2,689	2,74	2,794	2,845	2,904	2,978	3,086
C _x [pF]	160,07	162,49	164,46	167,32	170,49	173,86	177,02	180,71	185,31	192,03

Tab. 33: Tabulka hodnot ztrátového činitele, permitivity a kapacity dielektrika pro Relanex #5

T [°C]	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
tg δ [-]	0,00761	0,00951	0,0118	0,0157	0,0207	0,0269	0,0365	0,0517	0,078	0,13
ε _r [-]	2,584	2,618	2,644	2,679	2,721	2,774	2,825	2,871	2,929	3,004
C _x [pF]	160,81	162,91	164,55	166,73	169,3	172,63	175,79	178,68	182,25	186,94

Tab. 34: Tabulka hodnot ztrátového činitele, permitivity a kapacity dielektrika pro Relastik #1

T [°C]	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
tg δ [-]	0,00403	0,00461	0,00534	0,00632	0,00797	0,0105	0,0138	0,0182	0,0249	0,0429
ε _r [-]	2,786	2,841	2,881	2,934	3,002	3,076	3,16	3,236	3,325	3,437
C _x [pF]	173,34	176,81	179,26	182,55	186,77	191,39	196,62	201,35	206,87	213,88

Tab. 35: Tabulka hodnot ztrátového činitele, permitivity a kapacity dielektrika pro Relastik #2

T [°C]	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
tg δ [-]	0,00443	0,00519	0,00605	0,00758	0,00932	0,0121	0,0152	0,0198	0,0266	0,0447
εr [-]	2,828	2,864	2,889	2,928	2,97	3,018	3,068	3,122	3,182	3,26
Cx [pF]	175,98	178,25	179,78	182,2	184,79	187,8	190,94	194,26	198	202,83

Tab. 36: Tabulka hodnot ztrátového činitele, permitivity a kapacity dielektrika pro Relastik #3

T [°C]	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
tg δ [-]	0,00389	0,00448	0,00525	0,00654	0,00815	0,0107	0,0136	0,0177	0,0231	0,0361
εr [-]	2,737	2,794	2,833	2,885	2,947	3,01	3,077	3,14	3,208	3,287
Cx [pF]	170,32	173,87	176,3	179,52	183,4	187,32	191,44	195,41	199,6	204,51

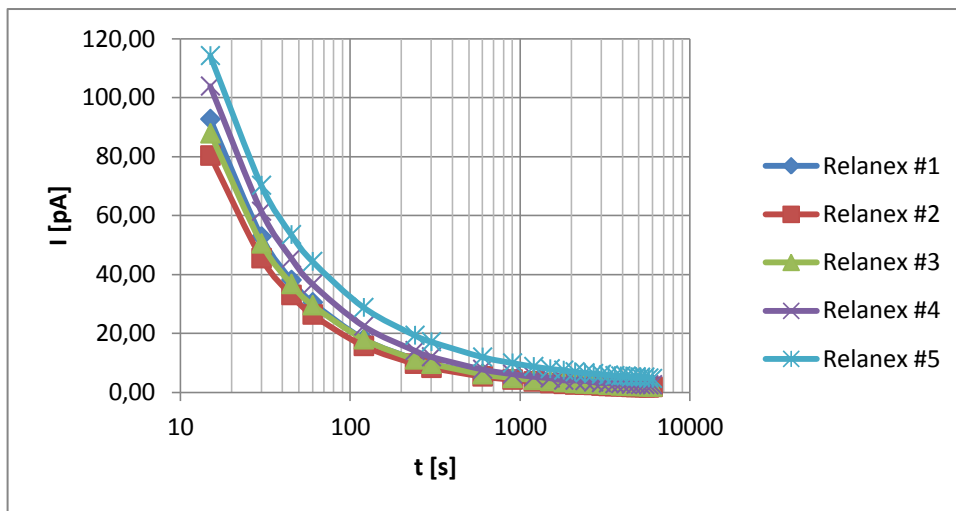
Tab. 37: Tabulka hodnot ztrátového činitele, permitivity a kapacity dielektrika pro Relastik #4

T [°C]	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
tg δ [-]	0,00469	0,0055	0,00657	0,00818	0,0102	0,0134	0,0167	0,0211	0,0283	0,0426
εr [-]	2,952	3,021	3,067	3,127	3,2	3,282	3,365	3,44	3,524	3,622
Cx [pF]	183,72	187,96	190,85	194,56	199,13	204,25	209,37	214,08	219,3	225,41

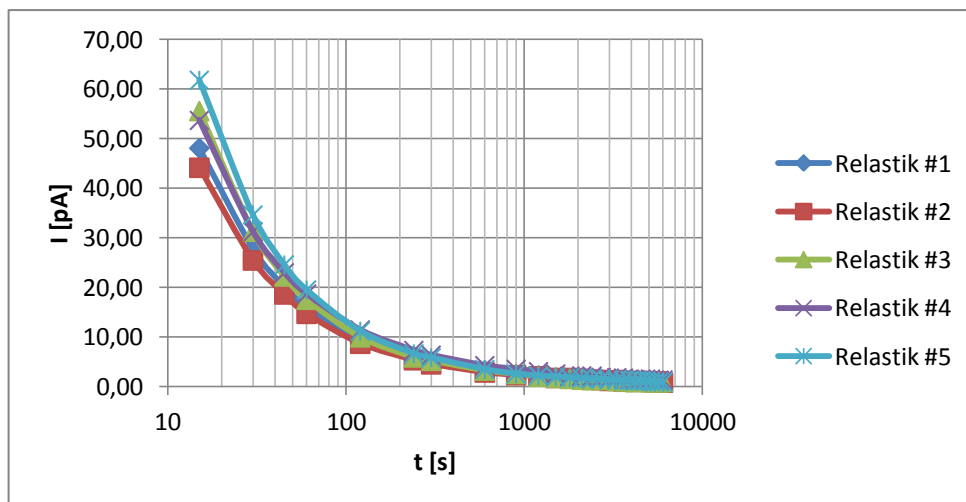
Tab. 38: Tabulka hodnot ztrátového činitele, permitivity a kapacity dielektrika pro Relastik #5

T [°C]	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
tg δ [-]	0,00402	0,00474	0,00579	0,00723	0,00902	0,0113	0,0147	0,0185	0,0238	0,0344
εr [-]	2,963	3,041	3,093	3,152	3,231	3,307	3,401	3,478	3,564	3,666
Cx [pF]	184,39	189,22	192,44	196,16	201,03	205,76	211,61	216,44	221,8	228,09

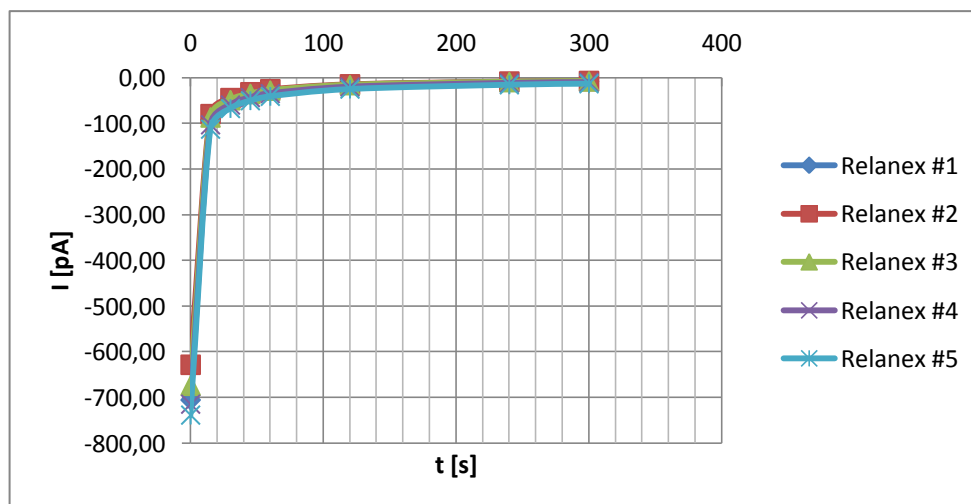
Příloha II. Grafické znázornění měřených parametrů



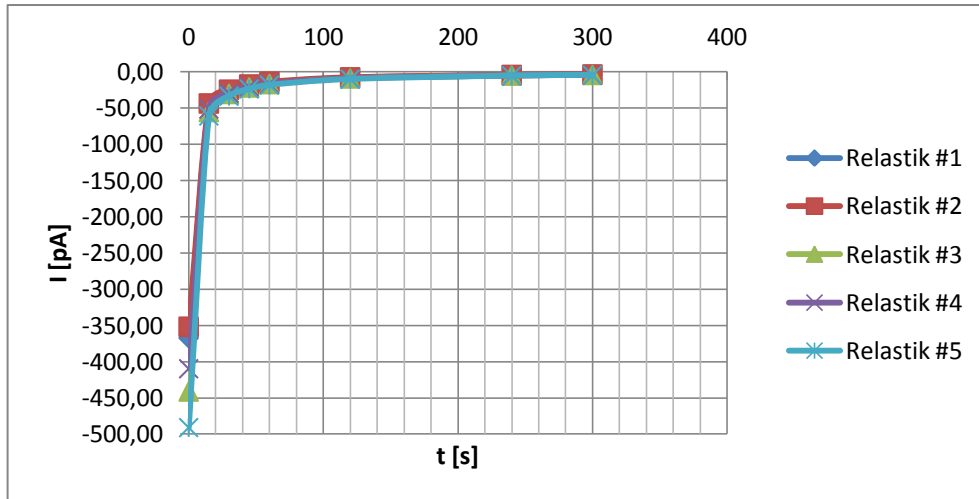
Obr. 7: Graf absorpčních křivek proudu pro vzorky Relanexu



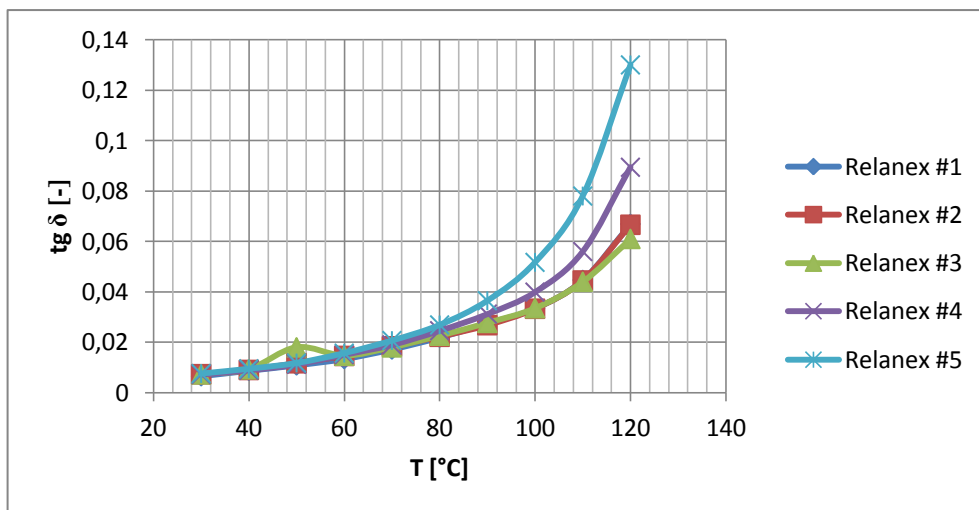
Obr. 8: Graf absorpčních křivek proudu pro vzorky Relastiku



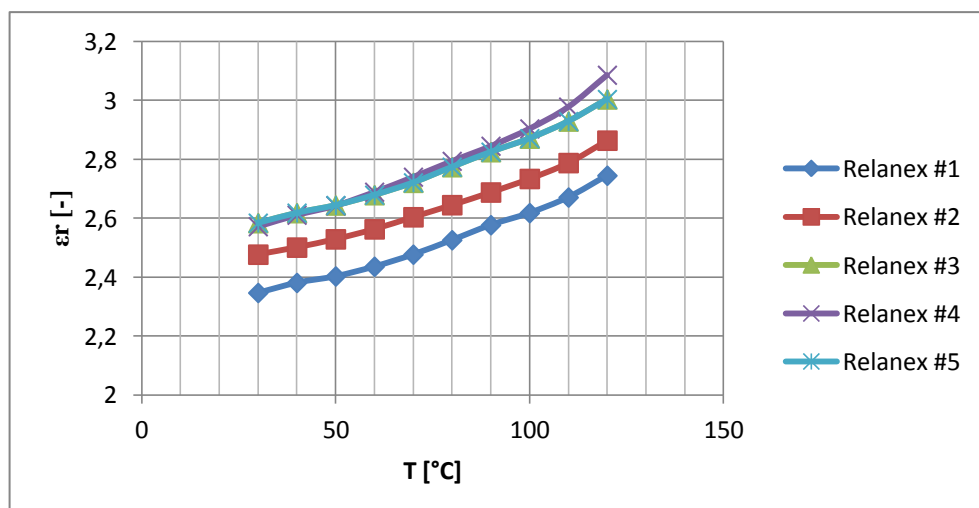
Obr. 9: Graf resorpčních křivek proudu pro vzorky Relanexu



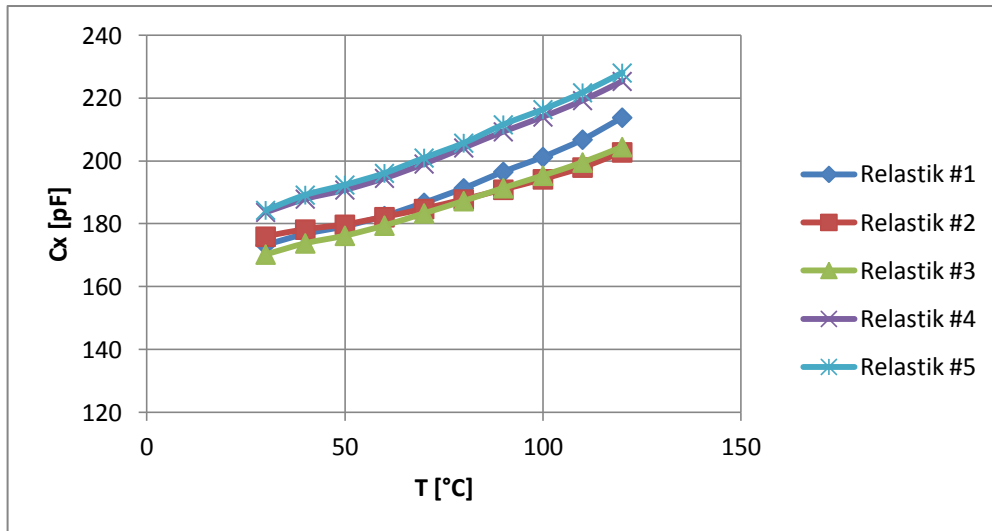
Obr. 10: Graf resorpčních křivek proudu pro vzorky Relastiku



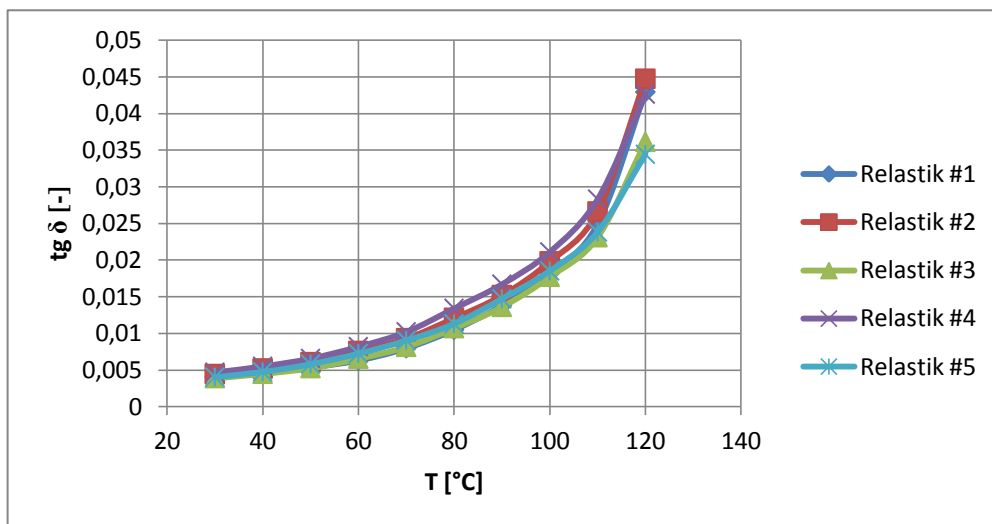
Obr. 11: Graf závislosti ztrátového činitele izolantu na teplotě pro vzorky Relanexu



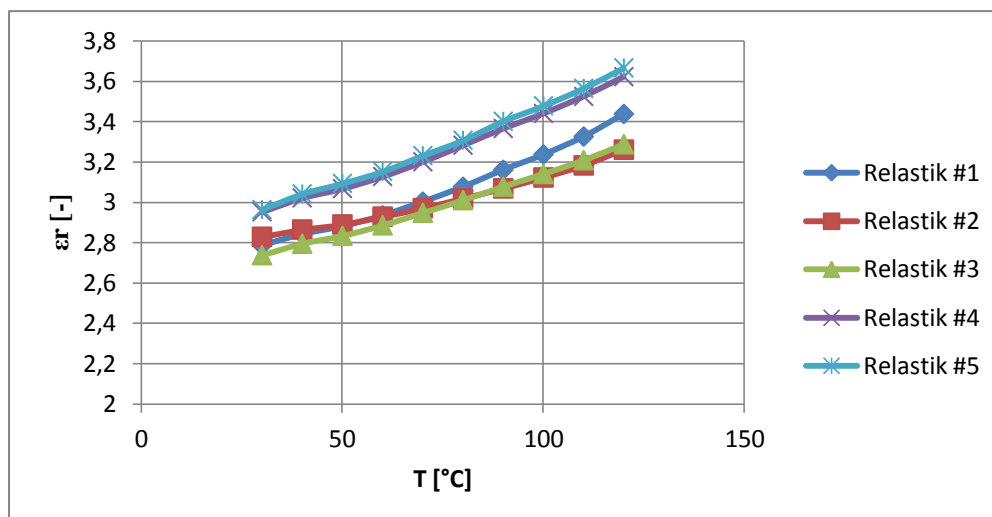
Obr. 12: Graf závislosti permitivity izolantu na teplotě pro vzorky Relanexu



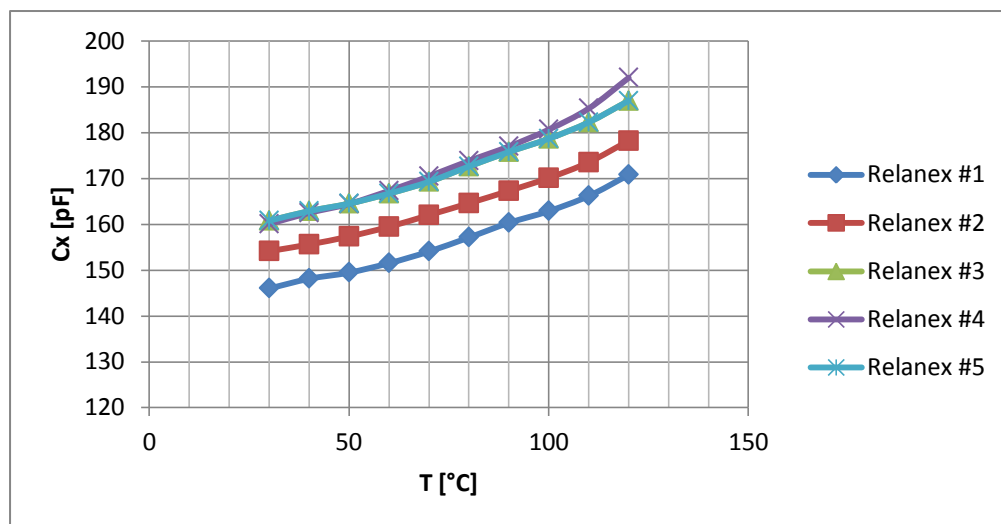
Obr. 13: Graf závislosti kapacity izolantu na teplotě pro vzorky Relanexu



Obr. 14: Graf závislosti ztrátového činitele izolantu na teplotě pro vzorky Relastiku

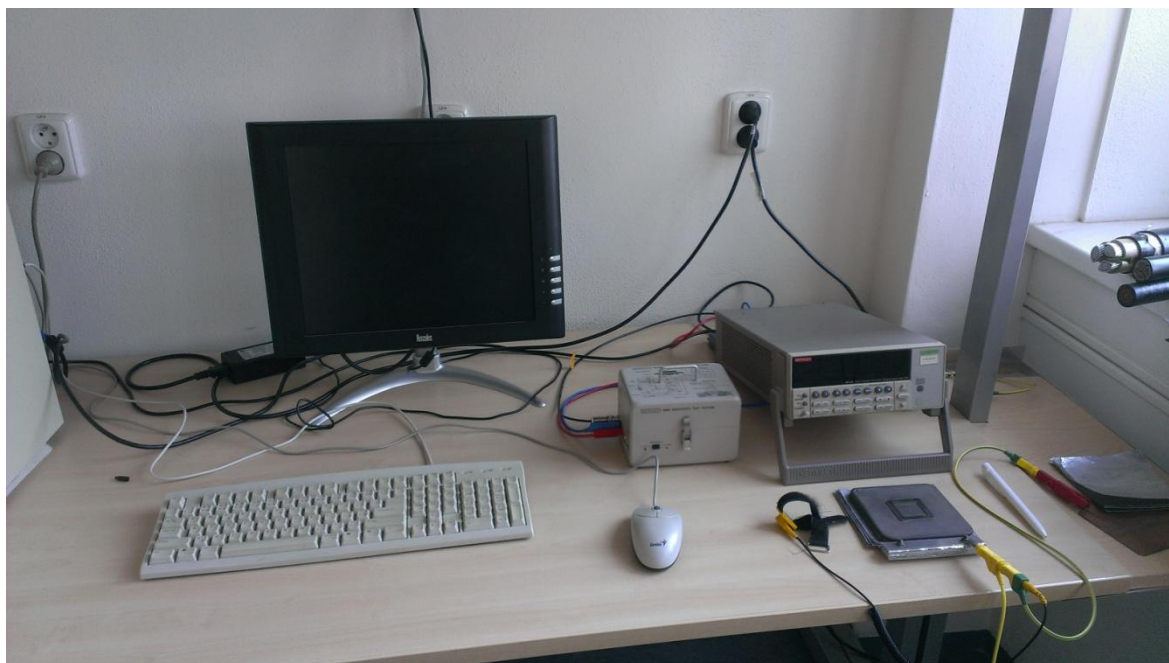


Obr. 15: Graf závislosti permitivity izolantu na teplotě pro vzorky Relastiku



Obr. 16: Graf závislosti kapacity izolantu na teplotě pro vzorky Relanexu

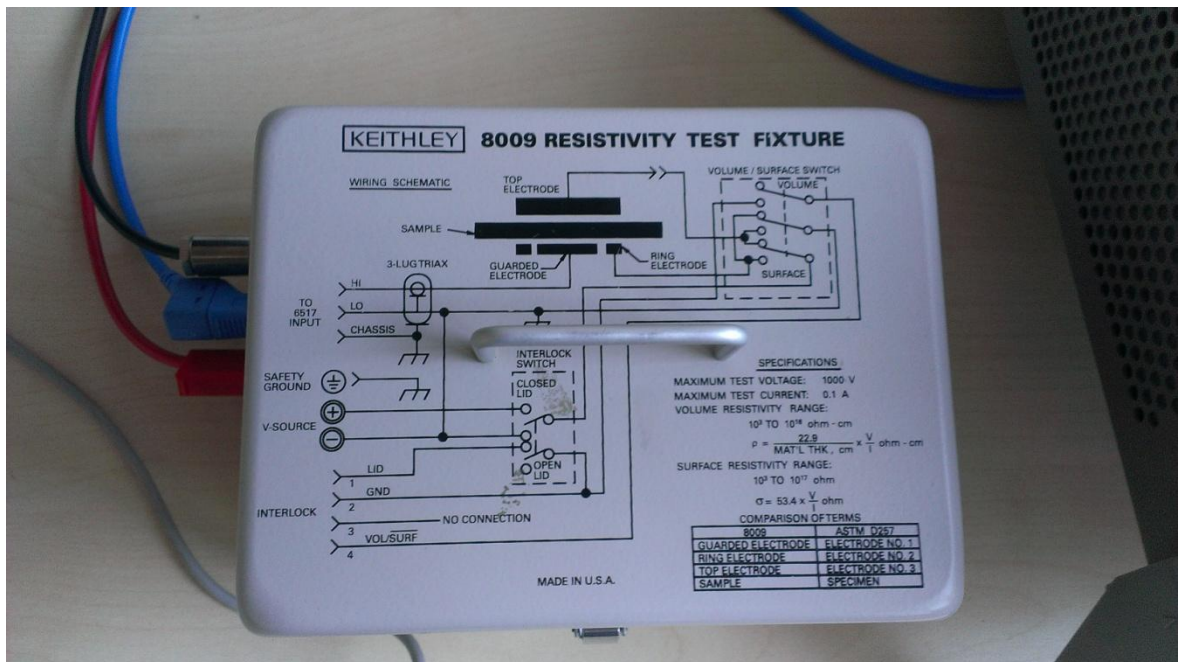
Příloha III. Fotodokumentace



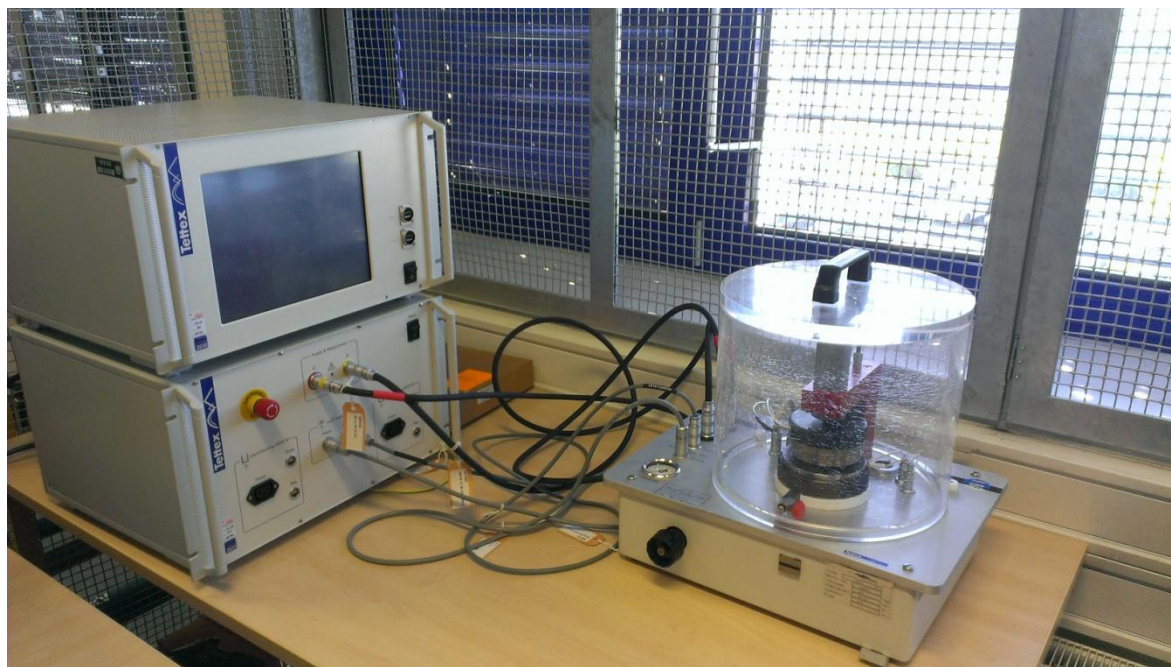
Obr. 17: Pracoviště pro měření absorpčních a resorpčních křivek



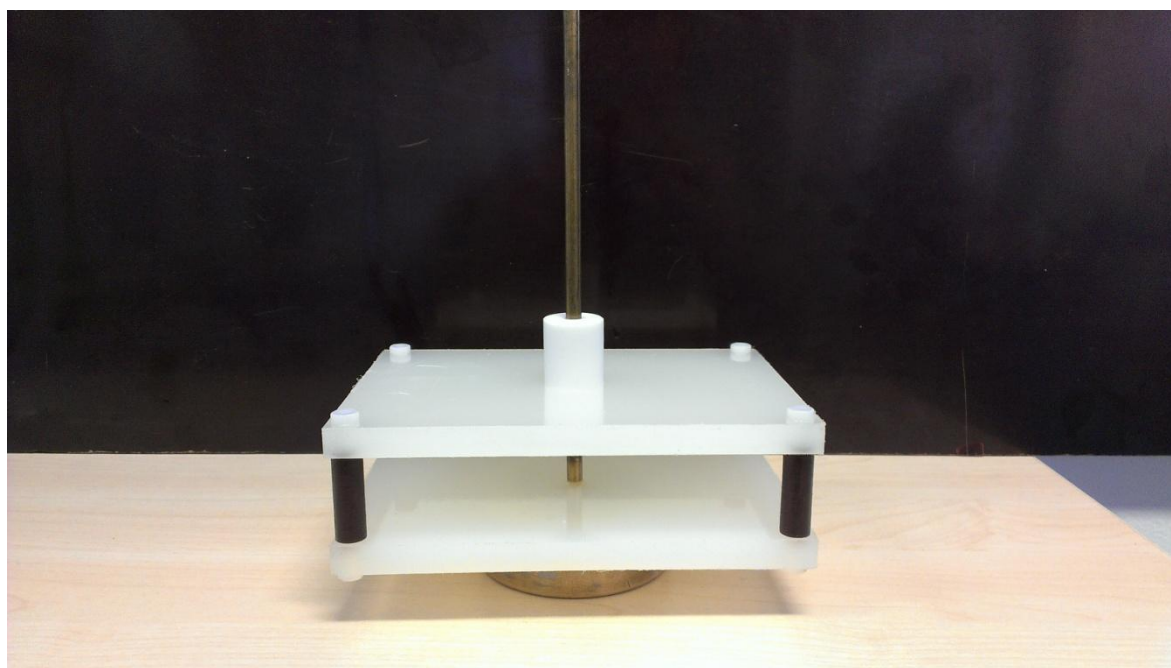
Obr. 18: Ampérmetr Keithley 6517A pro měření malých proudů izolantem



Obr. 19: Elektrody pro měření absorpčních a resorpčních křivek



Obr. 20: Pracoviště pro měření ztrátového činitele, permitivity a kapacity izolantu



Obr. 21: Elektrody pro měření průrazného napětí



Obr. 22: Přístroj pro regulaci a měření průrazného napětí