

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Aspekty diagnostiky elektrických zařízení

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan KUBEŠ**
Osobní číslo: **E12B0227P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Aspekty diagnostiky elektrických zařízení**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

1. Definujte termín "Diagnostika".
2. Specifikujte diagnostické signály a metody jejich zjišťování.
3. Specifikujte fenomenologický přístup.
4. Specifikujte strukturální analýzy.
5. Aplikujte na dodaném vzorku některé zjištěné metody.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.


Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lukáš Harvánek
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2014

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2015


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá technickou diagnostikou elektrických zařízení a jejími aspekty. Práce je rozdělena do sedmi částí. V první části jsou shrnuty a vysvětleny všechny důležité informace a pojmy, které se v technické diagnostice vyskytují. Dále se práce zaměřuje na metody z hlediska jejich přístupu k diagnostikování. Tyto metody slouží k zjišťování jednotlivých parametrů a vlastností, kterými se vyhodnocuje technický stav zařízení nebo předpovídá místo, vznik a průběh možné vady. Některé tyto informace a znalosti jsou v poslední části použity na testovaných vzorcích. Vzorky byly zkoušeny několika diagnostickými metodami. Ze změřených hodnot diagnostických metod byly následně vyhodnoceny výsledky.

Klíčová slova

Technická diagnostika, diagnostický systém, fenomenologický přístup, strukturální přístup

Abstrakt

This bachelor's thesis deals with a technical diagnostics of electrical equipment and its aspects. The work is divided into seven parts. The first section summarizes and explains all the important information and concepts that appears in technical diagnostics. The next section focuses on methods of diagnosing terms of their access. These methods are used to detect various parameters and properties, which evaluates the technical condition of the equipment or predicted location, the development and cause of possible defects. Some of this information and knowledge is used in the last part of the test samples. Samples were tested several diagnostic methods and subsequently. The measured values were compare to the measurement results.

Key words

Technical diagnostics, diagnostic system, phenomenological approach, structural approach

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 1.6.2015

Jan Kubeš

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukášovi Harvánkovi za cenné rady, připomínky a metodické vedení této práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 ZÁKLADY DIAGNOSTIKY	12
1.1 POJMY V DIAGNOSTICE	13
1.2 OBORY TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY	14
2 DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM	16
2.1 DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM V REŽIMU ON-LINE	16
2.2 DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM V REŽIMU OFF-LINE	17
2.3 KLASIFIKACE DIAGNOSTICKÉHO SYSTÉMU	17
2.3.1 <i>Staniční diagnostický systém</i>	17
2.3.2 <i>Palubní diagnostický systém</i>	18
2.3.3 <i>Komplexní diagnostický systém</i>	18
2.3.4 <i>Distribuovaný diagnostický systém</i>	19
2.3.5 <i>Speciální diagnostický systém</i>	19
3 SIGNÁLY V DIAGNOSTICE	20
3.1 SIGNÁLY DETERMINISTICKÉ	20
3.2 SIGNÁLY NAHODILÉ	21
3.3 SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA SIGNÁLU	21
3.4 DIGITÁLNÍ SIGNÁLY	21
4 DIAGNOSTICKÉ PŘÍSTUPY	23
4.1 POROVNÁNÍ PŘÍSTUPŮ	23
5 FENOMENOLOGICKÝ PŘÍSTUP	24
5.1 DIAGNOSTIKA IZOLANTŮ	24
5.2 ELEKTRICKÝ IZOLANT A DIELEKTRIKUM	24
5.3 ABSORPČNÍ A RESORPČNÍ CHARAKTERISTIKY	25
5.3.1 <i>Polarizační indexy</i>	27
5.4 ZTRÁTOVÝ ČINITEL A PERMITIVITA DIELEKTRIKA	27
5.5 ELEKTRICKÁ PEVNOST IZOLANTŮ	28
6 STRUKTURÁLNÍ PŘÍSTUP	31
6.1 VLIVY OKOLÍ NA ZAŘÍZENÍ	31
6.1.1 <i>Vlivy prostředí</i>	31
6.1.2 <i>Vlivy provozu</i>	32
6.2 ROZDĚLENÍ STRUKTURÁLNÍCH ANALÝZ	32
6.2.1 <i>Metody založené na zjišťování hmotnosti</i>	32
6.2.2 <i>Metody založené na měření energie</i>	33
6.2.3 <i>Metody zaměřené na měření mechanických vlastností</i>	35
6.2.4 <i>Metody jiných principů</i>	35
7 TESTOVÁNÍ VZORKŮ	37
7.1 MĚŘENÉ VELIČINY	37
7.2 VZORKY	38
7.2.1 <i>Epoxidová pryskyřice</i>	39

7.3	BĚŽNĚ POUŽÍVANÉ IZOLANTY	39
7.3.1	<i>Kartit</i>	39
7.3.2	<i>Slídový papír</i>	40
7.3.3	<i>Sklotextit</i>	40
7.3.4	<i>Relanex</i>	40
7.3.5	<i>Relastik</i>	40
7.3.6	<i>Kalastik</i>	40
7.3.7	<i>Thermikanit</i>	41
7.3.8	<i>Elektroizolační lepenka</i>	41
7.4	POUŽITÉ PŘÍSTROJE	41
7.5	MĚŘENÍ	41
7.5.1	<i>Absorpce a resorpce</i>	42
7.5.2	<i>Ztrátový činitel</i>	42
7.5.3	<i>Elektrická pevnost</i>	42
7.6	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	42
7.7	DISKUSE VÝSLEDKŮ	45
	ZÁVĚR	48
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	49
	PŘÍLOHY	53

Seznam symbolů a zkratk

ε_r	Relativní permitivita dielektrika [-]
ε_0	Permitivita vakua [$8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m]
ε	Absolutní permitivita dielektrika [F/m]
ρ_p	Povrchová rezistivita izolantu [$\Omega \cdot m$]
ρ_v	Vnitřní rezistivita izolantu [$\Omega \cdot m$]
d	Tloušťka izolantu [m]
E	Intenzita výsledného elektrostatického pole [V/m]
E_0	Intenzita vnějšího elektrostatického pole [V/m]
E_p	Elektrická pevnost [V/m]
f_{max}	Maximální frekvence frekvenčních složek signálu [Hz]
f_{vz}	Vzorkovací frekvence [Hz]
I_x	Elektrický proud izolantem [A]
U	Stejnoseměrné napětí na izolantu [V]
U_p	Průrazné napětí [V]
p_{i1}	Polarizační index minutový [-]
p_{i10}	Polarizační index desetiminutový [-]
R_i	Izolační odpor [Ω]
R_x	Odpor izolantu [Ω]
$tg \delta$	Ztrátový činitel dielektrika [-]
DGEBA	Diglycidylether bisfenol-A
DMA	Dynamická mechanická analýza
DSC	Diferenční skenování kalorimetrie
DTA	Diferenční termická analýza
FT-IR	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
GC	Plynová chromatografie
GPC	Gelová permeační chromatografie
IR	Infračervená spektroskopie
TGA	Termogravimetrie
TMA	Termomechanická analýza

Úvod

Pro rozvoj společnosti byly vždy spouštěcími impulzy technologické pokroky, které zlepšovaly používané technologie výroby, vytvářely nové možnosti používaných materiálů, umožnily zlepšovat zařízení nebo vyrábět úplně nová zařízení, která byla menší a výkonnější. Postupným rozvojem se společnost dostala k zavádění strojů do výroby, kterým došlo ke snížení nákladů výroby, zrychlení výroby a tím snížení ceny jednotlivých výrobků. Postupně se tak stala výroba většinou plně automatizovaná a jakýkoliv výpadek jednoho stroje znamenal zastavené celé linky. Tím bylo nutné utvořit vědní obor, diagnostiku, která se zaměřuje na zjišťování parametrů zařízení a následně vyhodnocuje technický stav zařízení.

Diagnostika se rychle rozšířila do širokého spektra vědních oborů, ve kterých našla uplatnění a postupně se rozdělila na několik samostatných oborů diagnostiky, které se specializují na jednotlivá technická oddělení. Diagnostika umožňuje při provozu kontrolovat, zda se v zařízení neobjevují některé anomálie, které by mohly vést k poškození zařízení a zastavení celé linky. Diagnostikou můžeme také kontrolovat zařízení při výrobě, zda není použítá část jakkoliv poškozena a přístroj by nemohl fungovat. Tím diagnostika pomáhá zlepšovat spolehlivost zařízení včasnou detekcí chyb. Každé zařízení, včetně elektrických, se musí v určitých intervalech podrobit pravidelné údržbě. Diagnostika, v tomto případě pomocí jednotlivých oborů technické diagnostiky, zkontroluje všechny části zařízení, které jsou v rámci pravidelné údržby mimo provoz, vyhodnotí jeho přesný technický stav a zjistí všechny poruchy v zařízení, objeví i ty, které by se v provozu nedaly zjistit. Toto téma bakalářské práce jsem si vybral, protože diagnostika je dnes velmi rozšířený obor a najdeme ji téměř všude. Proto jsem se o této problematice chtěl dovědět více a zjistit, jak diagnostika funguje a probíhá celý proces diagnostikování včetně měření potřebných parametrů materiálů.

1 Základy diagnostiky

Diagnostika je vědní obor, který se zaměřuje na zjištění technického stavu zařízení bez jeho poškození nebo rozebrání [1]. Včasným odhalením chyb nebo odhadem jejího výskytu můžeme zabránit destrukci zařízení nebo jeho výpadku např. ve výrobním procesu, který by způsobil nemalou finanční ztrátu [2]. Všechna zařízení se musí v pravidelných intervalech podrobit pravidelné údržbě, ve které jsou diagnostikou prozkoumány všechny části zařízení a určen jeho technický stav. Tím je spolehlivost zařízení velmi úzce spojena s kvalitou provedené diagnostiky a provedené údržby.

Diagnostika zajišťuje všechny nezbytné informace o systémech a podsystémech elektrických zařízení [3]. Pro zjištění informací diagnostika zahrnuje metody a prostředky, které slouží k určení vlastností, parametrů nebo stavu diagnostikovaného objektu např. elektrického zařízení [4]. Data s poruchami zařízení jsou uchovávána a vyhodnocována [2]. Při opakujících se chybách poslouží získané informace k návrhu upravení konstrukčního řešení zařízení a tím odstranění opakujících se chyb [5].

Diagnostika má v dnešní době zastoupení u mnoha oborů [6]. V technice se diagnostika používá v materiálovém inženýrství, mezioperačních kontrolách, výstupních kontrolách a kontrolách zařízení např. motorů, strojů [5]. V materiálovém inženýrství zajišťuje a kontroluje strukturu materiálu, která musí splňovat požadované vlastnosti a parametry. V mezioperačních kontrolách diagnostika slouží k vyloučení vadné části nebo celého dílu, který by způsobil nefunkčnost celého zařízení. U výstupních kontrol je vyzkoušeno vyrobené zařízení. Při zjištění závady je zařízení vyřazeno. Tímto dochází k vyhnutí se brzkým reklamaci zařízení. V neposlední řadě diagnostika sleduje „život“ technického zařízení, tato diagnostika se nazývá provozní. Provozní diagnostika nejen sleduje správnou funkčnost zařízení, ale uchovává data a vytváří databáze parametrů, které popisují změny jednotlivých částí zařízení. Z těchto dat lze určit např. průběh opotřebení části stroje a naplánovat výměnu této části, aby zařízení fungovalo spolehlivě do následné pravidelné údržby. Diagnostika se ovšem neuplatňuje pouze v technice. Své využití našla v medicíně, kde se používá např. pro zjištění nádorů [6].

Výše uvedené důvody, při nichž snižuje technická diagnostika včasnou detekcí vady náklady, dávají diagnostice jedinečnou a nezastupitelnou roli. Ta je podporována také ekonomickými požadavky, které jsou na všechna zařízení kladeny. Prvním požadavkem je cena zařízení, při které se dbá na krátkou návratnost investovaných financí. Druhým požadavkem je pohotovost zařízení, tedy, aby zařízení spolehlivě pracovalo, co možná nejdéle. Údržba by měla mít dlouhé intervaly mezi sebou a krátkou dobu uvedení zařízení zpět do provozu při poruše. [5]

1.1 Pojmy v diagnostice

Nyní se zaměříme na vysvětlení často používaných diagnostických pojmů, které se také v dalších částech práce vyskytují.

Diagnostický objekt je celek, složený spojením prvků a podsystemů, které jsou diagnostikovány. Diagnostikovaný objekt je po většinu času v bezporuchovém stavu, ve kterém plní všechny své funkce v tolerančních mezích. [7]

Diagnóza je zjištění aktuálního stavu zařízení, který se vyhodnotí diagnostickou metodou zjištěním potřebných parametrů částí zařízení. [8]

Prognóza je odhad stavu zařízení v budoucnosti na základě pravděpodobnosti poruchy, mírou opotřebení částí a dílčích provedených oprav. Budoucí stav zařízení se předikuje pomocí statistických metod, můžeme využít i pro odhad místa a času vzniku možné vady. [3]

Geneze zjišťuje vznik a vývoj poruchy nebo předčasného opotřebení zařízení. Provádí se analýza poruchy v zařízení, které se staly. Informace o vzniku a vývoji popřípadě důvodům předčasného opotřebení jsou důležité pro odhalení konstrukčních vad a možné úpravy konstrukčního návrhu. [5]

Diagnostická veličina je označení signálu, který obsahuje informace o diagnostickém objektu. Pokud potřebuje získat informace o změnách ve struktuře zařízení, musíme je určit nepřímými metodami, tedy přes jiné parametry, které jsou touto změnou ve struktuře ovlivněny. Velmi často získáváme signál s proměnnými hodnotami veličiny. Pro následné zpracování využíváme statistické metody, tedy střední hodnotu signálu s určitými rozptyly. [8]

Diagnostické prostředky jsou všechny přístroje, prostředky a pracovní postupy, které potřebujeme k zjištění stavu diagnostického objektu [2]. Diagnostické prostředky se dělí do dvou skupin na vnitřní a vnější [9]. Vnitřní prostředky jsou integrované v zařízení a tudíž od něj neoddělitelné. Snímání veličin probíhá pomocí integrovaných senzorů v zařízení, které mají předem určenou měřenou veličinu. Velmi často se jedná o určování teploty uvnitř přístroje. Za vnější prostředky se označují měřicí přístroje, které se dají od zařízení oddělit, např. různé měřicí přístroje. Jsou multifunkční a velmi často se používají nejen pro diagnostiku stavu zařízení ale také pro měření.

Diagnostickým modelem se označuje nahrazení diagnostikovaného objektu, který se při stejných podmínkách chová velmi podobně. Jedná se o náhradu, která slouží k simulacím zařízení v provozu, může odhalit konstrukční vady nebo rychlost opotřebování jednotlivých dílů. Modely mohou být fyzické nebo matematické. Fyzický model je zmenšený model zařízení, často využíván pro zácvik obsluhy zařízení. Matematický model je vytvořen soustavou rovnic, které věrohodně popisují chování jednotlivých bloků diagnostikovaného zařízení. Matematické modely musí být spuštěny ve speciálních programech na počítačích. Fyzické modely oproti matematickým nabízí věrohodnější chování zařízení, ale náklady na vytvoření zmenšeného modelu zařízení jsou výrazně vyšší. [7]

1.2 Obory technické diagnostiky

Technickou diagnostiku můžeme rozdělit na několik samostatných oborů, které se postupně utvořily. Každý obor technické diagnostiky se zaměřuje na rozdílné části zařízení a k vyhodnocení technického stavu využívá jiné metody a principy pro zjištění potřebných informací. [10]

Vibrační diagnostika se výhradně zaměřuje na diagnostikování technického stavu rotujících strojů. Informace o zařízení získává pomocí sledování vibrací a vývoje vibrací jeho částí. Vibrace rotujících strojů jsou totiž ovlivněny dynamickým namáháním stroje a trhlinami v materiálu. Pomocí vibrací může vibrační diagnostika zjistit technický stav ložisek, trhliny ve struktuře, opotřebení stroje, souosost a vyváženost točivých komponent zařízení. Pro měření vibrací zařízení se používají velmi moderní multianalyzátory, které samy provedou měření průběhu vibrací v zařízení. [11]

Akustická diagnostika vyhodnocuje stav zařízení za pomoci akustických veličin. Sleduje akustický tlak, akustickou rychlost, akustický výkon, intenzitu a rychlost zvuku. K snímání akustických veličin se velmi často využívají mikrofony, kterými zjišťujeme změny akustických veličin po průchodu zařízením. Zvuk se poté vyhodnocuje ve frekvenčním pásmu, které zobrazí všechny obsažené frekvence. Tím můžeme odstranit například provozní šum, který neobsahuje vhodné informace pro diagnostiku. Vibrační a akustická diagnostika jsou si velmi podobné obory technické diagnostiky, které se navzájem doplňují a prolínají, a proto vznikla **vibroakustická diagnostika**, která označuje jejich sloučení. [11]

Termodiagnostika nalézá využití kdekoliv, kde potřebujeme zjistit tepelné změny zařízení nebo tepelné úniky v zařízení. Používá se tedy v energetice, elektrických strojích, u vedení tepla. Pro měření využívá termodiagnostika klasická dotyková měřidla, mezi které patří například termočlánek nebo častěji používaná bezdotyková měřidla např. termokamery a infračervené teploměry. Z těchto měřidel termodiagnostika získá infračervený obraz, který zobrazuje rozložení tepla v jednotlivých částech zařízení. [10]

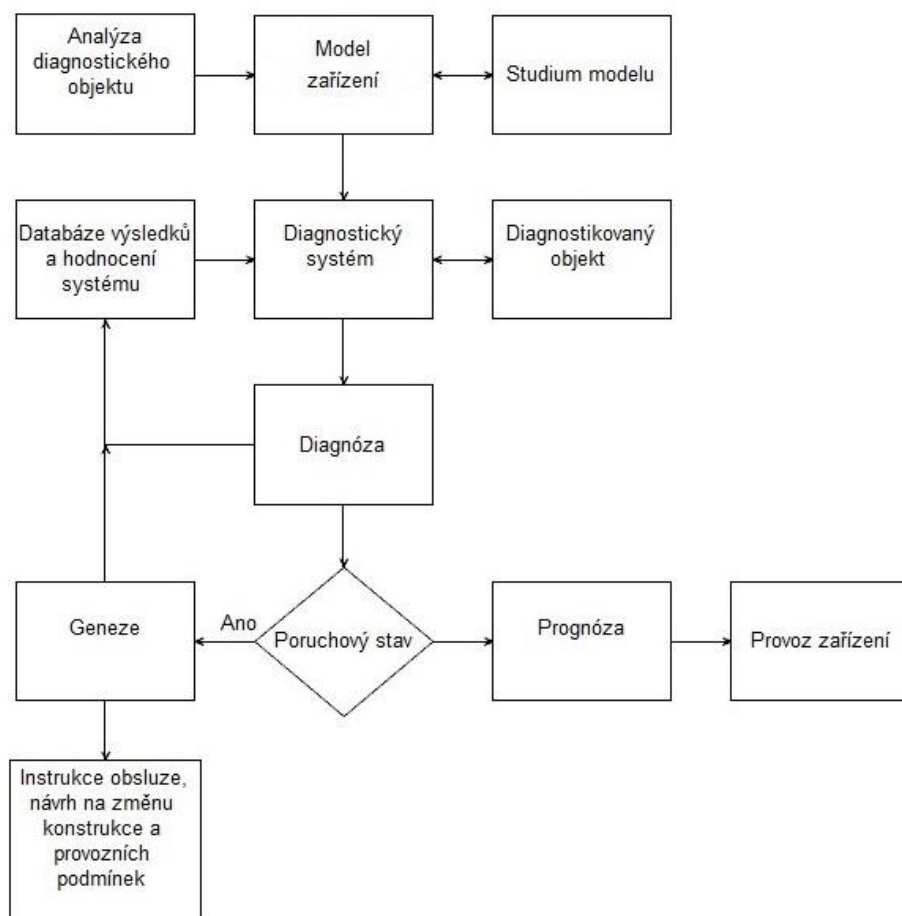
Tribodiagnostika se zaměřuje na třecí části točivých strojů. Diagnostiku technického stavu zařízení provádí z informací získaných analýzou oleje a dalších technických kapalin zařízení. Parametry technických kapalin a obsažené nečistoty vypovídají o stavu a opotřebení částí, se kterým olej v zařízení přichází do styku. [12]

Elektrodiagnostika se zaměřuje na sledování elektrických parametrů u zařízení. Značná část elektrodiagnostiky se zabývá diagnostikovaním stavu izolace, jejíž porucha by ve stroji umožnila vznik nebezpečného zkratu nebo výboje, který by způsobil poškození zařízení. Význam elektrodiagnostiky poslední dobou výrazně roste v komunikačních a výpočetních oborech. V trendu neustálého zmenšování součástek se snižuje jejich odolnost i proti menším napěťovým výbojům, které dokáží integrované obvody poškodit. [10]

Jednotlivé obory technické diagnostiky se mohou používat samostatně a nebo v různých kombinacích v závislosti na diagnostikovaném zařízení a informacím, které potřebujeme pro vyhodnocení technického stavu. Trendem dnešní doby je zaměření diagnostiky na bezdemontážní diagnostické metody, které lze provádět v plném provozním zatížení. [10]

2 Diagnostický systém

Diagnostický systém je souhrnné označení diagnostických prostředků, diagnostikovaných objektů, použitých metod, zvoleného přístupu diagnostikování a potřebné obsluhy k získání všech informací z parametrů objektu a následného vyhodnocení jeho stavu. Diagnostický systém může pracovat při dvou stavech diagnostikovaného objektu. První stav se jmenuje on-line a diagnostikovaný objekt je v provozním zatížení. Druhý stav se jmenuje off-line a diagnostikovaný objekt je v tomto případě vyřazený z provozu. Většinou se jedná o zařízení, které je určeno k pravidelné kontrole a údržbě nebo se v zařízení objevila závada. [9]



Obr. 2.1: Blokové schéma diagnostického systému, převzato z [7].

2.1 Diagnostický systém v režimu on-line

Diagnostický systém on-line funguje při provozu diagnostikovaného objektu. Zařízení je tak podrobena provozním vlivům, který diagnostický systém zpracovává jako provozní signály. Diagnostický systém získává z diagnostikovaného zařízení jeho odezvy a reakce na tyto vlivy. Ze získaných signálů diagnostický systém porovnává odezvy zařízení s dovolenými odchylkami a provádí diagnózu technického stavu. [7]

2.2 Diagnostický systém v režimu off-line

Diagnostický systém off-line vyhodnocuje stav zařízení, které není v provozu. Diagnostický systém má uložený algoritmus diagnózy, kterým postupně pomocí signálů a kontrol ověřuje jednotlivé části diagnostikovaného objektu. Reakce na signály jsou následně vyhodnoceny a porovnány s výsledky, které odpovídají správné funkci jednotlivých částí zařízení. Tím získáme přesné informace o zjištěných poruchách v zařízení, které se při provozním zatížení nemusely projevit. [7]

2.3 Klasifikace diagnostického systému

Klasifikace diagnostického systému pomáhá k vhodnému výběru diagnostického systému podle účelových požadavků, využití diagnostických informací a diagnostikovaného objektu. Pro výběr diagnostického systému je potřeba vypracovat kvalifikovaný plán, který musí vyhodnotit cíle diagnostikování, vlastnosti diagnostikovaného objektu a ekonomické náklady. Diagnostické systémy se rozdělují podle konfigurace technického zabezpečení systémů na staniční, palubní, komplexní, distribuované a speciální diagnostické systémy. [10]

2.3.1 Staniční diagnostický systém

Staniční diagnostický systém pracuje pouze v režimu off-line. Diagnostický systém tak nemůže zjišťovat provozní parametry, ale pouze vyhodnocuje technický stav zařízení, které je mimo provoz. [3]

Staniční diagnostický systém můžeme rozdělit do tří skupin na stacionární, mobilní a kombinovaný. Stacionární diagnostický systém má výhodu z hlediska většího množství zjišťovaných veličin, ale diagnostický objekt je nutné k diagnostickému zařízení dopravit. Mobilní diagnostický systém je přenosné zařízení, které ovšem nabízí oproti stacionárnímu menší možnosti u zjišťovaných veličin, kterých zvládne zařízení jen malé množství. Kombinovaný systém je tvořen kombinací stacionárního a mobilního staničního systému a kombinuje jejich výhody a redukuje nevýhody jednotlivých systémů při diagnostikování. [13]

2.3.2 Palubní diagnostický systém

Palubní diagnostický systém diagnostikuje pouze zařízení, které je v plném provozním zatížení. Tím získáváme aktuální hodnoty parametrů, které jsou nutné pro určení technického stavu. Můžeme z nich odhadnout jejich budoucí vývoj a možný vznik poruch. Palubní diagnostický systém je tvořen měřicí, autodiagnostickou a monitorovací částí. Dále obsahuje registry k uložení zjištěných parametrů diagnostikovaného zařízení. Modernější diagnostické systémy bývají doplněny sledováním prvků diagnostického zařízení pro možný automatický zásah do činnosti zařízení. Palubní diagnostický systém rozdělujeme podle způsobu nakládání s naměřenými daty na adaptivní a neadaptivní palubní diagnostický systém. [13]

Palubní adaptivní diagnostický systém zaznamenává a ukládá pouze informace o změnách stavu části zařízení, které jsou mimo toleranční meze od parametrů, které odpovídají správné funkci zařízení. Tímto způsobem diagnostický systém zpracovává méně hodnot a ušetří tak výpočetní výkon, který můžeme využít k vyhodnocování stavu zařízení a předpovídání chyb. Neadaptivní palubní systém zpracovává a ukládá všechny hodnoty, které jsou v zařízení zjištěny. Výpočetní výkon je tak zcela využit a pro vyhodnocení stavu zařízení je nutné připojení počítače, který zjištěné informace zpracuje. [5]

2.3.3 Komplexní diagnostický systém

Komplexní diagnostický systém využívá výhody staničního a palubního diagnostického systému, tedy výhody off-line a on-line diagnostiky. Staniční diagnostický systém zjišťuje potřebné parametry zařízení, které můžeme diagnostikovat pouze na zařízení mimo provoz a palubní diagnostický systém zjišťuje změny v provozních parametrech. Vždy je tedy funkční pouze jedna část z tohoto systému. Komplexní diagnostický systém můžeme provozovat samostatně nebo doplnit o samostatné vyhodnocovací zařízení. [7]

Pokud komplexní diagnostický systém budeme provozovat samostatně, provedeme standardní diagnostiku. Při zkoumání provozních parametrů zařízení bude výpočetní výkon staniční části využit pro vyhodnocení technického stavu. Při doplnění o samostatnou vyhodnocovací jednotku se vyhodnocovací doba technického stavu zařízení výrazně zkrátí, ale vyhodnocovací jednotka zvýší pořizovací cenu diagnostického systému. [13]

2.3.4 Distribuovaný diagnostický systém

Distribuovaný diagnostický systém má jednotlivé části diagnostického systému oddělené. Přenos informací mezi částmi diagnostického systému může být realizován kartami, ze kterých si část diagnostického systému načte zjištěné hodnoty parametrů z předchozí části nebo obsluha tyto data ručně zadá. Tento typ diagnostického systému je vhodný pro větší firmy, které mají více diagnostických zařízení a vyhodnocovací zařízení soustředěné v jiné místnosti nebo stavebním objektu. [10]

2.3.5 Speciální diagnostický systém

Speciální diagnostické systémy zjišťují parametry pro určení technického stavu pomocí energetických projevů v objektu. Mezi tyto energetické projevy patří mechanické vlnění, tepelné a optické záření. Speciální diagnostický systém potřebuje drahá měřicí a vyhodnocovací zařízení, která musí být schopná energetické změny zaznamenat a vyhodnotit. [3]

3 Signály v diagnostice

Signály v diagnostice se označují jako diagnostické veličiny a obsahují informace o stavu zařízení nebo jeho části [8]. Informace obsažené v diagnostickém signálu závisí na typu diagnostické metody a veličiny, která jsou zapotřebí zjistit. Pro určení hodnot jednotlivých veličin zařízení jsou potřebná rozdílná diagnostická čidla, která zaznamenávají změny a postupný vývoj jednotlivých veličin, ze kterých je poté vyhodnocován celkový technický stav, opotřebení zařízení a odhadovány možné vzniky poruch. Diagnostický signál tak může být detailní nebo souhrnný [14]. Detailní diagnostický signál popisuje vlastnosti a parametry skupiny nebo jednoho prvku ze zařízení. Souhrnný diagnostický signál popisuje vlastnosti a parametry celého diagnostického objektu nebo jednoho bloku.

Diagnostické signály můžeme rozdělit podle náhodnosti průběhu signálu na deterministické a nahodilé. Pomocí deterministických signálů můžeme jednotlivé časové hodnoty přesně určit a tím celý signál popsat určitou rovnicí. Pokud opakujeme při stejných podmínkách měření veličiny, bude mít signál opět stejný průběh. Nahodilý signál nemá ustálené hodnoty signálu v jednotlivých časech. Hodnota se pohybuje v určitém intervalu, proto musíme využít statistické metody pro popsání takového signálu. [1]

3.1 Signály deterministické

Tyto signály charakterizujeme funkčními předpisy. Mezi deterministické signály řadíme periodické, kvaziperiodické, přechodné a pseudonáhodné diagnostické signály. [1]

Periodické signály jsou složeny pouze z harmonických signálů, které mají celistvý násobek základní frekvence. Kvaziperiodické signály jsou tvořeny harmonickými signály o frekvenci, která je násobkem alespoň dvou základních frekvencí současně. Tyto násobky základních frekvencí nelze zapsat jako podíl dvou celých čísel. Přechodné signály jsou časově omezené. V tomto časovém úseku jsou nenulové a většinou popisují přechodné děje nebo reakce na jednotkový skok. Pseudonáhodné signály mají velkou periodu a velmi se podobají nahodilým signálům. [5]

3.2 Signály nahodilé

Pro popis těchto signálů se musí použít statistické parametry: střední hodnota a rozptyl signálu, mohou být popsány pomocí hustoty pravděpodobnosti nebo distribuční funkce rozdělení těchto signálů. Mezi nahodilé signály řadíme stacionární, nestacionární a cyklostacionární signály. [3]

Stacionární signály mají statické vlastnosti neměnicí se v čase. U nestacionárních signálů se tyto vlastnosti, jako je například střední hodnota signálu, mění v čase. U cyklostacionárních signálů můžeme najít určité cykly, ve kterých se tyto vlastnosti mění. [1]

3.3 Spektrální analýza signálu

Signál může obsahovat kromě užitečných informací, které obsahují vlastnosti a parametry diagnostikovaného zařízení, šumy [15]. Za šumy jsou považovány rušivé signály a vlivy, které nemají s funkcí zařízení nic společného. Pokud, například v akustické diagnostice, akustický signál sleduje část zařízení a zjišťuje, jestli v této části zařízení nejsou volné poletující části, které by mohli poškodit zařízení, jako šum můžeme označit i akustické vlivy způsobené provozem zařízení. Jednotlivé provozní a vnější vlivy mají vždy jinou frekvenční složku. K rozložení signálu do frekvenční oblasti, kterým zjistíme zastoupení jednotlivých frekvenčních složek signálu, se používá spektrální analýza [1]. Pro spektrální analýzu se může použít Fourierova, vlnková, kosinová nebo Walsh-Hadamardova transformace, ale nejpoužívanější je Fourierova transformace.

3.4 Digitální signály

V dnešní době digitálních zařízení získáváme z diagnostikované části zařízení analogový signál, který obsahuje spojité informace o měřených veličinách. Tento spojitý analogový signál poté pomocí převodníku převedeme na diskrétní digitální signál. Digitální signál oproti spojitému analogovému signálu není ovlivňován vnějšími rušivými vlivy, které mohou způsobit úpravu signálu a tím i obsažených informací o zařízení, dále se lépe přenáší a zpracovává. [16]

Digitalizace signálu se provádí ve dvou krocích [17]. Nejprve signál rozdělíme podle zvolené vzorkovací frekvence na pravidelné časové úseky a zjistíme velikost signálu v těchto úsecích. Aby nedošlo ke ztracení informace ze signálu, tedy aliasingu, zvolením špatné vzorkovací frekvence, musí vzorkování splňovat podmínky Shannon-Nyquistovy věty [1]. Spojitý signál má frekvenční složky s určitou maximální frekvencí f_{\max} . Vzorkovací frekvence f_{vz} poté musí být větší než dvojnásobek frekvence f_{\max} . Toto pravidlo vytváří jen teoretickou frekvenční hranici, a proto se v praxi častěji využívá vícenásobné frekvence f_{\max} . V následujícím kroku přiřadíme těmto časovým vzorkům číselnou hodnotu v binární soustavě.

Celý proces digitalizace signálu provádí AD převodník, který se stává ve zpracování signálu kritickým článkem. Při špatném zvolení parametrů převodníku, ovlivní tato chyba následně celý diagnostický systém. Tyto volené parametry jsou maximální vzorkovací frekvence, rozsah amplitudy signálu a rozlišení převodníku. Maximální vzorkovací frekvence určuje frekvenční pásmo, ve kterém se všechny frekvenční složky spojitého signálu musí nacházet. Rozsah velikosti amplitudy převodníku umožňuje zpracovávat pouze signály s menší amplitudou. Při použití na signály s větší amplitudou, která je mimo rozsah převodníku, dojde u těchto vzorků ke špatnému přiřazení číselných hodnot. Rozlišení převodníku udává jeho citlivost, tedy velikost změny, kterou je schopen zaznamenat. [7]

4 Diagnostické přístupy

Diagnostika pro svou funkci využívá dva druhy diagnostických přístupů. Na tyto druhy jsou přístupy rozděleny podle pohledu, kterým se na zařízení dívají a na veličiny, na které se přístup zaměřuje. Tyto přístupy jsou fenomenologické a strukturální. U fenomenologického přístupu je pro diagnostiku diagnostikovaný objekt „černá skříňka“ a zajímají ji pouze výstupní signály, které reagují na vstupní signály a podněty. Strukturální přístup oproti tomu se zaměřuje na strukturu a její změny v diagnostikovaném objektu, které jsou vyvolány provozem a vnějšími vlivy. [18]

4.1 Porovnání přístupů

Jak již bylo řečeno, hlavním rozdílem mezi přístupy jsou zjišťované veličiny a pohled na diagnostikované zařízení. Oba přístupy tak mají své výhodné a nevýhodné vlastnosti, které ovlivňují použitelnost při diagnostikování.

Strukturální přístup svým zaměřením na zjišťování změn ve struktuře vyžaduje výrazně nákladnější diagnostická zařízení a kvalitně vyškolenou obsluhu zařízení. Mnoho strukturálních diagnostických metod můžeme použít na vzorku materiálu pouze jednou, protože při těchto metodách dojde k úplné deformaci materiálu. Tím dochází k velké spotřebě materiálu a tyto destruktivní metody jsou finančně nákladnější. Získáme ale přesnější výpovědní parametry oproti fenomenologickému přístupu. Fenomenologický přístup nepotřebuje velmi moderní zařízení, a tím se mohl používat dříve než strukturální přístup. Pro použití fenomenologického přístupu tak není nutné přeškolení obsluhu, jako je nutné u strukturálního přístupu. Většina metod fenomenologického přístupu jsou nedestruktivní metody a tím vzorky materiálu můžeme vícekrát použít i pro více měření nebo metod. Tím se stává fenomenologický přístup finančně méně nákladný než strukturální. [5]

5 Fenomenologický přístup

Fenomenologický přístup zjišťuje pouze reakce diagnostikovaného objektu na vstupní podněty. Tedy výstupní signály nebo veličiny zařízení, které jsou vyvolány vstupními diagnostickými signály. Tím oproti strukturálnímu přístupu, který se zaměřuje na změny ve struktuře, získává méně informací. Fenomenologické metody můžeme rozdělit na stejnosměrné a střídavé. Metody se rozdělují podle charakteristiky proudů, tedy stejnosměrného nebo střídavého. Mezi stejnosměrné metody patří absorpční a resorpční charakteristiky. Střídavými metodami označujeme metody pro určení ztrátového činitele a permitivity dielektrika. [3]

5.1 Diagnostika izolantů

Nejcitlivější částí elektrického zařízení je izolační systém, který vlivem vnějšího prostředí a provozním namáháním stárne a zhoršují se jeho izolační vlastnosti. Tím může dojít k proražení izolace a poškození zařízení. U elektrického zařízení, zejména elektrického točivého stroje, je důležitá jeho spolehlivost, která je nejvíce ovlivněna touto nejcitlivější částí. Z těchto důvodů je důležitá diagnostika izolantů, tvořící izolační systém zařízení. Diagnostika izolantů nejčastěji využívá fenomenologický přístup pro rychlejší a finančně dostupnější diagnostikování. K diagnostikování stavu izolantů se využívají absorpční a resorpční charakteristiky, polarizační indexy, elektrická pevnost, hodnota ztrátového činitele, permitivita dielektrika apod. [5]

5.2 Elektrický izolant a dielektrikum

Elektrický izolant je materiál, který ideálně neobsahuje žádné volné částice nebo jich má jen velmi málo. Proud tak nemůže materiálem protékat a můžeme jím izolovat dvě místa s rozdílným potenciálem. Izolanty mohou být pevné, kapalné a plynné. Mezi pevné patří skla, slída, kalafuna, šelak a plasty. Kapalné izolanty jsou rostlinné oleje, minerální oleje a syntetické kapaliny např. chlorované uhlovodíky. Plynné izolanty mohou být vzduch, vodík, chlór, fluor a vzácné plyny helium, argon. Velkou výhodou kapalných a plynných izolantů je jejich regenerace po elektrickém průrazu. Kapalné izolanty mají navíc vysokou elektrickou pevnost a velký izolační odpor. U plynných izolantů lze elektrickou pevnost zvýšit zvýšením tlaku, oproti kapalným izolantům vyplňují celý prostor. [19]

Elektrická pevnost zástupce kapalného izolantu, silikonového oleje, je 15 kV/mm [20]. Papír, zástupce pevných izolantů, má elektrickou pevnost 30 kV/mm [21]. Nejčastějším plynným izolantem je vzduch, jehož elektrická pevnost je 3 kV/mm.

Dielektrikum je materiál, který je možné polarizovat [21]. Pokud je materiál izolantem je i dielektrikem. Polarizace dielektrika vzniká při vystavení materiálu elektrickému poli a může být dvojího typu. Prvním typem je atomová polarizace, u které v materiálu dojde k utvoření elektrických dipólů, tedy rozložení částic s nábojem a bez náboje uvnitř atomu. Druhým typem je orientační polarizace, při které dojde pouze k uspořádání dipólů, které materiál již obsahoval. Elektrické dipóly jsou vždy polarizovány opačně vůči vnějšímu elektrostatickému poli a tím toto pole zmenšují. Relativní permitivita dielektrika ϵ_r tedy udává poměr vnějšího elektrostatického pole E_0 a výsledného elektrostatického pole E (rovnice 5.1). Relativní permitivita je materiálová konstanta, která hodnotí materiál vůči dielektriku vakua [22]. Pokud ji vynásobíme permitivitou vakua ϵ_0 , získáme absolutní permitivitu materiálu ϵ (rovnice 5.2).

$$\epsilon_r = \frac{E_0}{E} \quad [-] \quad (5.1)$$

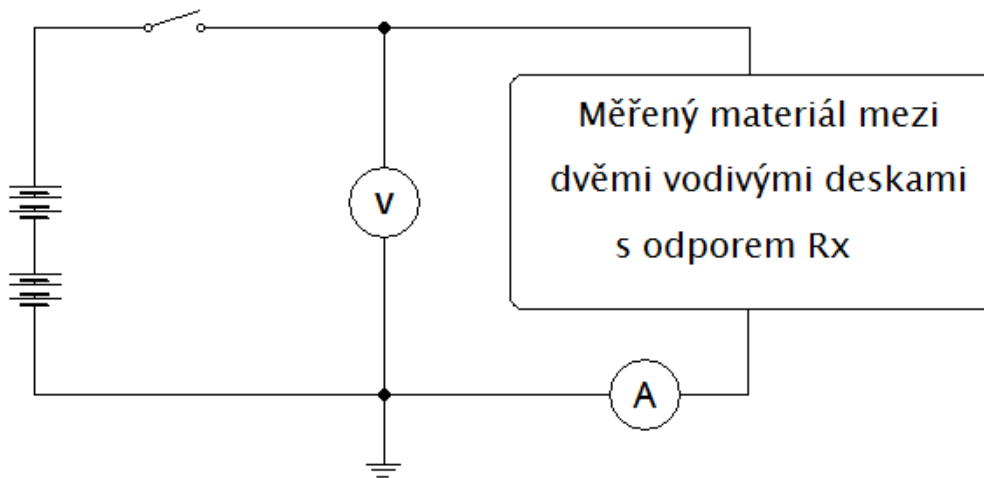
$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad [F/m] \quad (5.2)$$

5.3 Absorpční a resorpční charakteristiky

Absorpční a resorpční charakteristiky obsahují důležité informace o stavu diagnostikovaného izolantu. Tyto charakteristiky označují parametry izolantu, mezi které patří izolační odpor izolantu R_x , povrchová rezistivita ρ_p , vnitřní rezistivita ρ_v a polarizační indexy minutový p_{i1} a desetiminutový p_{i10} . K měření odporu izolantu se nejčastěji používá Voltampérová metoda a metoda Wheatstonova můstku. Kromě těchto dvou metod existují i další, například kompenzační metoda. [7]

Voltampérová metoda se řadí mezi přímé metody. Měřený odpor izolantu R_x se vypočítá dosazením konstantního napětí U a proudu procházejícím izolantem I_x v čase 6 000 s, tedy v ustáleném stavu (rovnice 5.3). Procházející proud izolantem je velmi malý, řádově pA. [18]

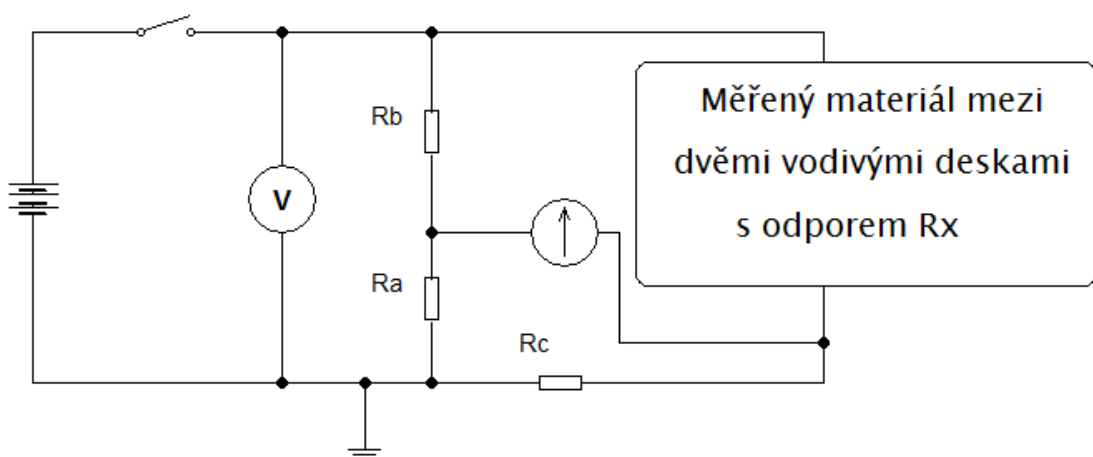
$$R_x = \frac{U}{I_x} \text{ [}\Omega\text{]} \quad (5.3)$$



Obr. 5.1: Schéma zapojení Voltampérové hodnoty pro měření odporu izolantu [18]

Wheatstonův můstek je porovnávací metoda, u které srovnáváme hodnotu neznámého vnitřního odporu materiálu s referenční hodnotou. Tato metoda je vhodná pro měření odporů řádově 10^{13} až 10^{14} Ω , ale nemůžeme ji použít, pokud je proud procházející materiálem časově závislý nebo se jedná o kvalitní izolant. Můstek je nutné vyvážit odpory můstku R_N , R_A , R_B a R_X na nulovou hodnotu, poté pro vnitřní odpor materiálu R_x platí vztah rovnice (5.4). [18]

$$R_x = \frac{R_N \cdot R_B}{R_A} \text{ [}\Omega\text{]} \quad (5.4)$$



Obr. 5.2: Schéma zapojení Wheatstonova můstku pro měření izolačního odporu [18]

5.3.1 Polarizační indexy

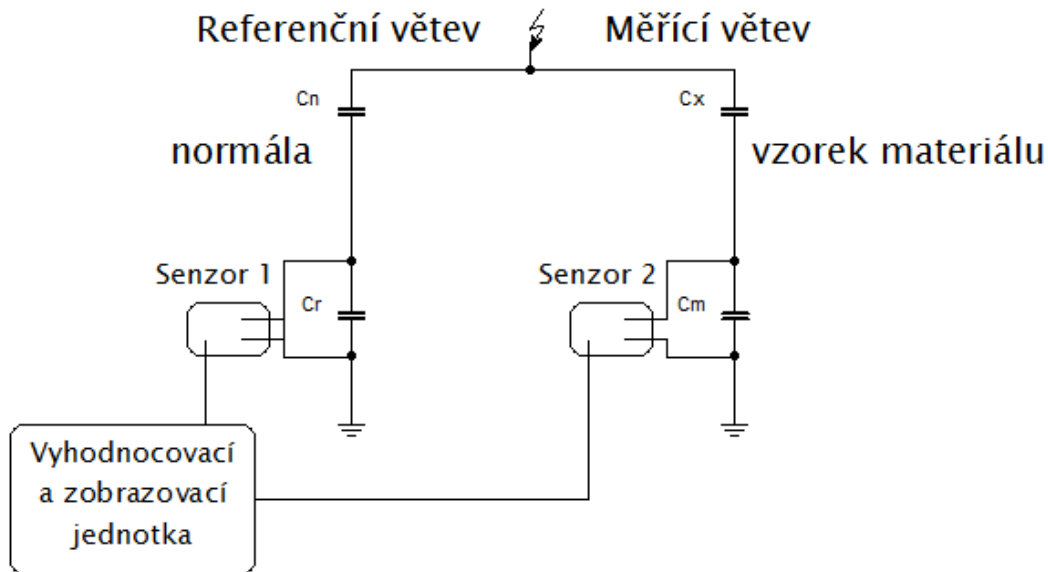
Polarizační indexy pracují s časovou proměnností odporu izolantu. Vzorek je vystaven přiloženému napětí, které ve vzorku vyvolá absorpční proud $i(t)$. Měření zjišťuje vývoj absorpčních proudů v patnácté i_{15} a šedesáté sekundě i_{60} od přiložení napětí, časové okamžiky mohou být i jiné. Pro výpočet se používá rovnice (5.5). Polarizační jednodominutový index p_{il} by měl být při kvalitní a vyhovující izolaci co největší. U kvalitního izolantu totiž po přiložení napětí roste jeho izolační odpor. Pokud je izolace poškozená, vlhká nebo znečištěná, hodnota polarizačního indexu klesá pod jedna. Hodnota polarizačního indexu kvalitního izolantu se pohybuje v rozmezí 3 – 5. [23]

$$p_{il} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{i_{15}}{i_{60}} = \frac{i_{a15} + i_{\infty}}{i_{a60} + i_{\infty}} \quad [-] \quad (5.5)$$

5.4 Ztrátový činitel a permitivita dielektrika

Pro získání informací, které jsou nutné pro určení technického stavu dielektrika, musíme určit dílčí prvky náhradního schématu reálného kondenzátoru, který je tvořen paralelní kombinací kondenzátoru a rezistoru reprezentujícího ztráty. Při určování ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ a relativní permeability ε_r musíme zohlednit jejich závislost na teplotě, napětí a frekvenci. Tyto závislosti jsou řešeny pomocí různých metod, pro které vznikla norma s doporučeními pro měření a určování permitivity a ztrátového činitele ČSN IEC 250. [7]

Automatický můstek je metoda zapojení pro měření dielektrických ztrát, která používá princip Scheringova můstku a je určena pro nižší frekvence, tedy řádově do 1 kHz. Tímto zapojením získáme zobrazení $\text{tg } \delta$. Automatický můstek má čtyři kondenzátory rozložených do dvou větví, referenční a měřicí. Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ je poté určen z fázového úhlu mezi napětími na nízkonapětíových kondenzátorech. Z dělicího poměru můstku můžeme rovněž zjistit kapacitu kondenzátoru C_x . Automatický můstek má výhodu oproti ostatním v použití kondenzátorů v nízkonapětíové části a tím eliminuje chyby od parazitních příčných kapacit. Na těchto nízkonapětíových kondenzátorech jsou senzory, které předávají hodnoty napětí do počítače nebo jiné vyhodnocovací a zobrazovací jednotky, které zpracuje informace s využitím rychlé Fourierovy transformace a zobrazí hodnotu ztrátového činitele $\text{tg } \delta$. [18]



Obr. 5.3: Schéma zapojení Automatického můstku měření ztrátového činitele, převzato z [18]

5.5 Elektrická pevnost izolantů

Při elektrickém namáhání izolantu dochází při určité hodnotě intenzity elektrického pole u pevných materiálů k jeho průrazu a u plyných a kapalných materiálů k přeskoku. Tato hodnota intenzity se nazývá elektrická pevnost E_p a je dána poměrem napětí při průrazu U_p a tloušťkou materiálu d (rovnice 5.6). [24]

$$E_p = \frac{U_p}{d} \text{ [kV/mm]} \quad (5.6)$$

Kapalné a plyné izolanty mají schopnost regenerace materiálu po přeskoku, tím je materiál opět schopen správně plnit funkci izolantu. U pevných izolantů dojde k průrazu izolantu a tím k vytvoření vodivé cesty materiálem, která znemožní další správné fungování izolantu. Toto zvyšuje finanční náročnost zkoušek určující elektrickou pevnost pevných izolantů. Průraz pevného izolantu může proběhnout třemi způsoby elektrického namáhání. [7]

Čistý elektrický průraz vzniká při rychlém nárůstu intenzity elektrického pole, která způsobí průraz v nejslabším místě izolantu. Rychlý nárůst intenzity elektrického pole zajistí, že izolant nebude vystaven ohřátí a tím stárnutí vlivem teploty. Čistý elektrický průraz je závislý na homogenitě elektrického pole, struktuře a chemickým složením izolantu. Jakékoliv vady v izolantu se stanou nejslabší místem, jehož elektrická pevnost bude výrazně nižší než zbytku materiálu. Pro průraz pevných izolantů je důležitá koncentrace volných elektronů. Při malé koncentraci elektronů, překročí-li intenzita elektrického pole hodnotu elektrické pevnosti, dojde k prudkému nárůstu volných elektronů, které způsobí tok elektrického proudu. Dojde k nárůstu teploty izolantu a jeho struktura se zničí tepelnou nebo chemickou cestou. [23]

Tepelný průraz vzniká při dlouhodobém namáhání izolantu elektrickým polem, při kterém dochází k jeho lokálnímu ohřevu. Při nízké hodnotě přiloženého napětí se vytvoří dynamická rovnováha izolantu, tedy množství vzniklého tepla je stejné jako množství tepla, které je izolant schopen odvést přes svůj povrch do okolí. Průběh odváděného tepla a vzniklého tepla se tak protnou v grafu celkem ve dvou bodech. Izolant mezi těmito dynamickými rovnováhami i po vychýlení vnějšími vlivy udržuje svou teplotu na konstantní hodnotě. Pokud velikost napětí neumožní vytvoření dynamické rovnováhy, nebo se dynamická rovnováha nestihne ustavit z důvodu skokového nárůstu napětí, dojde k nárůstu tepla nad množství, které je izolant schopen odvést, tím dojde ke zvýšení elektrické vodivosti a následné tepelné destrukci a průrazu tohoto místa v izolantu. Velikost napětí by tak musela být vyšší než průrazné napětí. Při hodnotě rovné průraznému napětí má izolant pouze jeden rovnovážný stav, ve kterém zároveň přechází do labilní části. I velmi malé zvýšení přiloženého napětí způsobí průraz izolantu. [5]

Elektrochemický průraz je ovlivněn stárnutím izolantu, který je vystaven provozním činitelům, které v izolantu vyvolávají vratné nebo nevratné děje. Vratné děje nemají téměř žádný vliv na změnu izolačních vlastností materiálu. Největší vliv mají nevratné děje, které způsobují změny ve struktuře a tím vyvolávají proces stárnutí izolantu. Při procesu stárnutí izolantu vznikají uvnitř izolantu poruchy, které snižují elektrickou pevnost. Jedná se o dutinky, které jsou vyplněny vzduchem a mají menší elektrickou pevnost než izolant. V těchto dutinkách vznikají částečné výboje, při kterých se na stěnách dutinek hromadí náboj, který vytvoří opačně polarizované elektrické pole. Takto vytvořené elektrické pole působí proti vnějšímu poli a v dutince je tak kompenzováno. Tyto výboje způsobují chemické a fyzikální změny ve své bezprostřední blízkosti. Chemické změny jsou zejména ovlivněny ultrafialovým zářením, které vzniká při výbojích. Při vzniku velkého počtu dutinek dojde k selhání dlouhodobě namáhaného izolantu. Nejvíce jsou částečnými výboji ovlivňovány organické izolanty, u anorganických izolantu nemají částečné výboje žádný vliv na elektrickou pevnost. U organických izolantů vytváří výbojové dutinky postupné spojování do výbojového kanálu. Postupně dochází k přesunům jednotlivých výbojových kanálů. Postupně se rozvětvují a vytváří stromečkové útvary. Ty postupně pronikají hlouběji izolantem, až projdou přes celý izolant a nastává průraz izolantu. [18]

6 Strukturální přístup

Strukturální přístup získává více informací o diagnostikovaném objektu než fenomenologický přístup, protože se zaměřuje na změny ve struktuře. Získáváme tím výsledky s menším rozptylem a lepší schopnost zjistit technický stav [3]. V dnešních elektrických zařízeních se často objevují části, které jsou vytvořeny z organických materiálů. Svou náchylností vůči prostředí nebo provoznímu namáhání se stávají citlivým článkem. Změnou struktury mimo dovolené tolerance těchto částí může dojít k poškození části a následně celého zařízení [7].

6.1 Vlivy okolí na zařízení

Vlivy, které působí na zařízení, se mohou rozdělit na dvě velké skupiny. Na vlivy prostředí a vlivy provozu. Těmito vlivy dochází v zařízení k namáhání, které výrazně ovlivňuje části zařízení. Zařízení je vždy vystaveno určité kombinaci těchto vlivů a proto musí být zařízení vhodně navrženo pro určené použití. [25]

6.1.1 Vlivy prostředí

Teplota může negativně ovlivňovat části zařízení při vysokých i nízkých hodnotách. Nemusí se jednat jen o teplotu okolního prostředí, ve kterém je zařízení provozováno, ale z důvodu tření součástí vnikají lokální místa se zvýšenou teplotou. Vysoká teplota způsobuje stárnutí izolantů, měknutí materiálu a látek s nízkým bodem měknutí. Nízká teplota snižuje pružnost látek, materiály mohou křehnout nebo tvrdnout. Může snižovat viskozitu maziv a olejů. Při neustálé, rychle se měnící teplotě dochází k změně rozměrů materiálů, která vede k popraskání nebo vzniku nežádoucích mezer a netěsností. [10]

Vlivem **atmosférické vlhkosti** se zhorší elektrické vlastnosti izolantů. Při přímém styku vody nebo vlhkosti s materiálem dochází k pohlcení vody na povrch a do objemu. Absorbování vlhkosti do objemu dochází k nabobtnání materiálu, které může způsobit korozi některých částí zařízení. Při nízké okolní vlhkosti a vysoké teplotě dochází k vysychání materiálů, které vedou ke změně vlastností. [3]

Záření ovlivňuje struktury při přímé interakci s materiály. Na materiál může záření působit ve třech svých typech. Vlivem slunečního záření na materiál a absorpci záření dochází k jeho degradaci fotochemickou nebo fotooxidační cestou. UV záření urychluje zhoršování organických izolantů. Infračervené záření ohřívá povrch materiálu, a tím se mění elektrické a fyzikální vlastnosti. [25]

6.1.2 Vlivy provozu

Elektrické namáhání záleží na velikosti intenzity elektrického pole, při jeho překročení dochází k průrazu pevných izolantů a u kapalných nebo plyných izolantů k přeskoku, po kterém následuje jejich regenerace. K elektrickému namáhání patří také výboje a napěťové rázy. [5]

Mechanické namáhání a tepelné namáhání jsou způsobeny provozem zařízení, které se vlastním provozem může ohřívát, pokud jde o točivý stroj vznikají i vibrace. Mezi mechanické namáhání patří i zkratové účinky proudu. [7]

6.2 Rozdělení strukturálních analýz

Strukturální analýzy zjišťují obsazení prvků ve vzorku nebo reakce vzorku materiálu na vlivy prostředí, kterými dochází ke změnám struktury a tím se zhoršují vlastnosti materiálu. Strukturální analýzy se dělí podle zaměření metod, které se zabývají zjišťování stejných nebo podobných fyzikálních reakcí. Dělí se tak na metody zaměřující se na zjišťování hmotnosti, měření energie, měření mechanických vlastností metody založené na jiných principech. [3]

6.2.1 Metody založené na zjišťování hmotnosti

Metody zaměřující se na zjišťování hmotnosti jsou termogravimetrie, plynová chromatografie a gelová permeační chromatografie. [7]

Termogravimetrie, zkratka TGA nebo TG, je nejjednodušší termická analýza [26]. Termické analýzy patří mezi nejdůležitější metody, které zkoumají fyzikálně-chemické změny v materiálu, pro jejich zkoumání se využívá jen vzorek materiálu. Termogravimetrie zkoumá procesy spojené se změnou hmotnosti vzorku materiálu, který je vystaven tepelnému namáhání [27]. Tepelné namáhání může být vytvořeno rovnoměrným zvyšováním teploty,

tedy dynamický způsob. Druhý typ tepelného namáhání je při konstantní teplotě, nazývá se statický způsob. Průběh změny hmotnosti vzorku materiálu v závislosti na teplotě, nebo času, vytváří termogravimetrickou křivku [28]. Termogravimetrickou křivku nám ukazuje počet rozkladných reakcí, hmotnost vzorku, která se při reakcích mění, a teploty vzniku a zániku reakce. Termogravimetrie tím dokáže určit tzv. tepelně-oxidační stabilitu materiálu, nebo-li teplotní odolnost materiálu [26]. Dále také určuje stárnutí materiálu způsobené tepelným namáháním. Z těchto znalostí termogravimetrie lze zjistit složení materiálu, eventuálně zastoupení složek v materiálu [27].

Plynová chromatografie, zkratka GC, je metoda sloužící k identifikaci a složení plynů, kapalin a pevných látek, které mají bod varu kolem 400 °C [29]. Při této metodě dochází k dávkování vzorku do vyhřívaného bloku, kde se materiál odpaří a mobilní fáze jej odnese do kolony. Mobilní fáze je tvořena nosným plynem. Jako nosný plyn se používá dusík a nebo vzácné plyny helium a argon [30]. Kolona je část, ve které se nachází stacionární fáze. Kolona obsahuje částičky nosiče, které se volí podle oblasti analýzy, potažené mikrofilmem stacionární fáze. Procházející nosný plyn s částmi identifikované látky prochází přes kolonu a tyto části s částičkami nosiče spolu se sebou vzájemně působí. Při vzájemném působení se části identifikované látky zpomalují. Složky jsou nosným plynem nesené na konec kolony, kde se nachází detektor [29]. Detektor zjišťuje koncentraci látek v nosném plynu. Výsledkem této metody je chromatogram, což je grafický záznam signálu z detektoru v závislosti na čase.

Gelová permeační chromatografie, zkratka GPC, je metoda pro oddělení molekul látek ze směsi, které mají rozdílnou velikost [31]. V tomto případě je kolona ve svislém směru a je vyplněna gelem [32]. V tomto gelu jsou póry a tvoří tak síto. Směs látek dáme na povrch gelu. Mobilní fáze tvoří roztok, který je stejný jako roztok v pórech kolony. Velké molekuly směsi nemohou pronikat do pórů a kolonou projdou s nosnou fází. Molekuly velikosti pórů nebo menší pronikají do pórů a tím se velmi zpomalují a k detektoru za kolonou dorazí později. Používá se k stanovení molekulární hmotnosti směsi, složení směsi nebo odebrání nízkomolekulární sloučeniny ze směsi [31].

6.2.2 Metody založené na měření energie

Metody zaměřující se na měření energie jsou diferenční termická analýza a diferenční skenování kalorimetrie [7].

Diferenční termická analýza, zkratka DTA, pracuje na principu rozdílu teplot dvou vzorků, které se konstantně ohřívají nebo ochlazují [33]. Jeden vzorek je zkoumaný materiál, druhý vzorek je referenční teplotně stabilní látka. Stabilní látka nesmí teplotně reagovat v měřeném intervalu a měla by mít co nejpodobnější tepelné vlastnosti jako měřený vzorek. Nejčastěji se používá oxid hlinitý, oxid hořečnatý nebo některé čisté kovy [27]. Diferenční termická analýza zkoumá vnitřní energii měřeného vzorku, jako ukazatel využívá entalpii materiálu [33]. Teplota referenčního stabilního vzorku je shodná s teplotou pece, teplota měřeného vzorku je ovlivněna chemickými reakcemi a fyzikálními změnami. Těmito chemicko-fyzikálními změnami dochází k uvolňování, nebo přijímání tepelné energie, a tím se mění teplota vzorku. Výsledkem této analýzy je termogram, na kterém jsou patrná lokální maxima a minima, která znázorňují tepelné reakce materiálu.

Diferenční skenovací kalorimetrie, zkratka DSC, metoda pracuje tak, že vyrovnává teploty měřeného vzorku a referenčního vzorku, které jsou konstantně ohřívány. V měřeném vzorku dochází k reakcím, při kterých vzorek uvolňuje tepelnou energii nebo přijímá okolní tepelnou energii. Pro udržení nulového teplotního rozdílu měřeného a referenčního vzorku musíme měřenému vzorku energii odebrat nebo dodat. Diferenční skenování kalorimetrie je dvojího typu, první typ je s kompenzací příkonu a druhý s tepelným tokem. [7]

U typu DSC s kompenzací příkonu se každý vzorek nalézá samostatně s vlastním tepelným zdrojem. Referenční i měřicí vzorek jsou zahřívány stejnou rychlostí. Při reakcích měřeného vzorku se snižuje nebo zvyšuje dodávaná tepelná energie. Výslednou veličinou, kterou zjišťujeme, je elektrický příkon ohříváče, kterým je udržován nulový tepelný rozdíl vzorků. Oproti DTA může DSC s kompenzací příkonu měřit i velmi malé tepelné změny a je velmi vhodná pro zkoumání izotermických jevů. Výsledkem DSC je křivka s lokálními extrémy. [34]

U typu DSC s tepelným tokem jsou oba vzorky spojeny tepelným mostem. Každý vzorek má samostatné tepelné čidlo. Při vnitřních dějích v měřeném vzorku dochází k tepelnému toku přes tepelný most mezi stabilním vzorkem. Tepelným tokem dojde k vyrovnání teplot vzorků. Vyhodnocení metody dochází na základě tepelné energie, které měřený vzorek odevzdal nebo přijal od stabilního vzorku. [3]

6.2.3 Metody zaměřené na měření mechanických vlastností

Metody zaměřující se na měření mechanických vlastností jsou termomechanická analýza a dynamická mechanická analýza. [7]

Termomechanická analýza, zkratka TMA, zkoumá deformaci měřeného vzorku materiálu v závislosti na čase nebo teplotě [35]. Deformace materiálu může vzniknout při statickém nebo dynamickém zatížení. Velmi podobná metoda jako je TMA je dilatometrie [36]. Dilatometrie zjišťuje změny rozměrů materiálu pouze při tepelném namáhání, který je mechanicky velmi málo nebo zcela nezatížen. Dilatometry, ale neumožňují změnu zatížení, tím jsou konstrukčně jednodušší než velké aparatury TMA. Díky TMA můžeme u látek určit koeficient tepelné roztažnosti ve zvoleném teplotním rozsahu, bod měknutí, tání materiálu, viskozitu pevných látek a teplotu skelného přechodu.

U TMA je důležité zvolení sondy, která závisí na zkoumaném materiálu a zjišťovaných parametřích materiálu. Pro zjištění teploty skelného přechodu, teplotu tavení a teplotní závislost materiálu se používá expanzní a penetrační sonda. [36]

Dynamická mechanická analýza, zkratka DMA, zkoumá kovové a polymerní materiály. Vzorek zkoumaného materiálu je vystaven teplotnímu a mechanickému namáhání. Mechanické namáhání je většinou ve formě vibrací, u kterých lze zvolit frekvenci v rozmezí mHz až desítky Hz a amplitudu vibrací. Zvolené vibrace způsobují v materiálu deformace. Tímto způsobem se zjišťují viskoelastické parametry zkoumaného materiálu, při teplotě do 500 °C. Z těchto parametrů poté lze u materiálu určit odolnost materiálu při tepelném a mechanickém namáhání, bod měknutí materiálu, viskozitu materiálu, skelný přechod. [37]

6.2.4 Metody jiných principů

Metody, které používají k měření jiné než výše uvedené principy, jsou infračervená spektroskopie, infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací a rentgenová fluorescenční spektroskopie. [7]

Infračervená spektroskopie, zkratka IR, je nedestruktivní analytická metoda, která zkoumá reakci materiálu na infračervené záření. Infračervené záření je elektromagnetické záření s vlnovou délkou 800 nm až 500 μm. Infračervená spektroskopie se dělí na tři druhy

podle vlnových délek na dalekou, střední a blízkou. Pro zjišťování struktur materiálů se nejvíce využívá střední, která má vlnovou délku v rozmezí asi 2,5 μm až 50 μm . Energie, která je přes dopadající fotony infračerveného záření dodávána, způsobuje změnu vibračního stavu nebo rotačního stavu molekul v materiálu. Při vibračním pohybu molekul je energie přeměňována mezi potencionální a kinetickou formou energie. Pro použití metody infračervené spektroskopie se využívají tři základní přístroje, a to disperzní, nedisperzní a interferometrický. [38]

Disperzní spektrometr používá jako zdroj infračerveného záření keramickou tyčinku, která má uvnitř odporový drát rozžhavený na vysokou teplotu. Záření prochází měřeným vzorkem a poté prochází monochromátorem, který rozkládá infračervené záření na difrakční mřížce. Za difrakční mřížkou je detektor, který infračervené záření převede na elektrickou veličinu. Nedisperzní spektrometr na rozdíl od disperzního nemá monochromátor, protože jako zdroj infračerveného záření používá vysoce monochromatické lasery. [7]

Interferometrický spektrometr používá jako zdroj infračervené záření stejně jako disperzní spektrometr keramickou tyčinku s rozžhaveným odporovým drátem. Na rozdíl od disperzního přístroje, ale tento typ spektrometru má interferometr, který dělí infračervené záření mezi pohyblivé a pevné zrcadlo podle principu Michelsonova interferometru. Paprsky z obou zrcadel spolu navzájem interferují. Interference mohou být konstruktivní nebo destruktivní. Z detektoru získáváme interferogram, který má všechny spektrální informace. Interferogram musíme pomocí Fourierovy transformace přetransformovat z časové do frekvenční oblasti. [5]

Rentgenová fluorescenční spektroskopie, zkratka XRF, slouží k prvkovému složení materiálu. Rentgenové záření, emitující rentgenkou, dopadá na materiál a dochází k vyražení vnitřních elektronů z vyšších energetických hladin, a tím se vyzáří sekundární rentgenové záření, které je pro každý prvek nebo látku jedinečné. Toto rentgenové záření dopadá na detektor, který jej následně vyhodnotí. Detektory mohou být dvojího typu, a to vlnově disperzní a energicky disperzní spektroskop. Vlnově disperzní spektroskop rozděljuje rentgenové záření podle vlnových délek a toto dělení provádí krystal. Energicky disperzní spektroskop zjišťuje energetické hodnoty fotonů rentgenového záření. [39]

7 Testování vzorků

Diagnostikování vzorků bylo provedeno na základě fenomenologického přístupu, přičemž testované vzorky byly podrobeny zkouškám pro zjištění parametrů absorpce a resorpce, určení ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ a zkouškám průrazu.

7.1 Měřené veličiny

Při testování vzorků bylo zapotřebí, pro následné vyhodnocení technického stavu, změřit hodnotu izolačního odporu, vnitřní rezistivitu, ztrátový činitel v závislosti na teplotě a elektrickou pevnost materiálu.

Izolační odpor R_i je udáván jako poměr stejnosměrného napětí U a proudu procházející materiálem po připojení $i(t = 0)$ podle rovnice 7.1. Jednotkou izolačního odporu je Ω . [5]

$$R_i = \frac{U}{i(0)} \quad (7.1)$$

Vnitřní odpor R_x se určuje obdobně, jako izolační odpor materiálu, ale hodnotu proudu $i(t)$ použijeme až po jeho ustálení (rovnice 7.2). Nejčastěji se používá po jedné minutě od připojení k napájení. Jednotkou vnitřního odporu je Ω . [7]

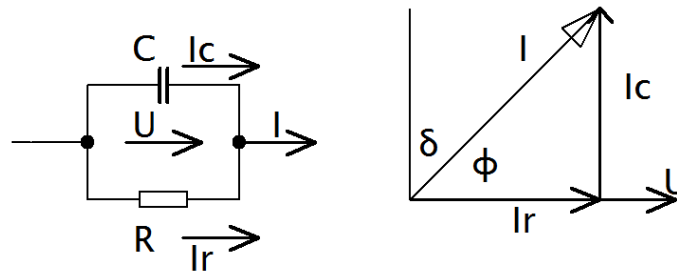
$$R_x = \frac{U}{i(\infty)} \quad (7.2)$$

Vnitřní rezistivita ρ_v udává poměr intenzity elektrického stejnosměrného pole a ustálené hustoty proudu procházející přes materiál. Vnitřní odpor R_x vztažený na objem vzorku, S udává plochu vzorku a d tloušťku (rovnice 7.3). Jednotkou vnitřní rezistivity je $\Omega \cdot \text{m}$. [18]

$$\rho_v = R_x \cdot \frac{S}{d} \quad (7.3)$$

Ztrátový činitel $\tan \delta$ popisuje izolant z hlediska jeho dielektrických ztrát. Nejlépe se určuje v náhradním schématu kondenzátoru z posunu proudů na ztrátovém rezistoru I_r a na ideálním kondenzátoru I_c podle rovnice 7.4. Ztrátový činitel je bezrozměrný. [23]

$$\tan \delta = \frac{I_r}{I_c} \quad (7.4)$$



Obr. 7.1: Náhradní schéma reálného kondenzátoru, převzato z [18]

Elektrická pevnost E_p je určena jako podíl napětí při průrazu izolantu U_p a tloušťky izolantu d podle rovnice 7.5. Průraz pevného izolantu je nevratný děj, při kterém je izolant zcela poškozen. Použitá jednotka elektrické pevnosti je kV/mm. [24]

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (7.5)$$

7.2 Vzorky

K měření a testování izolačních vlastností byl využit kompozitní materiál pro široké komerční využití. Dále pro lepší vyhodnocení vlastností měřeného kompozitu bylo provedeno porovnání se standardně používanými izolanty, které jsou v následující části představeny. Za porovnávané izolanty byly zvoleny izolanty, které jsou velmi snadno dostupné a často používané v elektrotechnických aplikacích.

7.2.1 Epoxidová pryskyřice

Epoxidové pryskyřice patří mezi reaktoplastické látky a jsou kapalné s nažloutlou barvou. Pro získání pevné látky se musí epoxidové pryskyřice vytvrdit polyadací přidáním tvrdidla. V molekule tím dojde ke vzniku alespoň jedné epoxidové vazby, která je nutná pro stavbu makromolekul. Díky této vlastnosti se epoxidové pryskyřice používají jako zalévací hmoty pro elektrotechniku a v kompozitních materiálech jako pojivo. Epoxidové pryskyřice mají velmi dobrou přilnavost k ostatním materiálům, vysokou tepelnou a chemickou odolnost, vysokou rozměrovou stálost, po vytvrzení jsou pevné a výrobní cena je relativně nízká. [40]



Obr. 7.2: Vzorek kompozitu

7.3 Běžně používané izolanty

Pro porovnání naměřených hodnot vzorků kompozitu byly zvoleny běžně v praxi používané izolanty. K těmto izolantům byly získány od výrobců katalogové listy s uváděnými parametry. Uváděné parametry izolantů se odvíjí od použití daného izolantu [43].

7.3.1 Kartit

Kartit je materiál, který je tvořen celulóзовým papírem a pojivem formaldehydovou pryskyřicí. Kartitové izolanty se vyznačují vysokou mechanickou a elektrickou pevností. Může se použít jako izolační materiál pro izolační mezistěny transformátorů, kryty, izolační podložky. [45]

7.3.2 Slídový papír

Slídový papír je organický materiál s velmi dobrými dielektrickými vlastnostmi odolávající vysokým teplotám. Je vytvořen ze slídy, ze které je vyrobena slídová kaše, ze které se následně vyrobí slídový papír. Používá se slída muskovit a flogopit, volba slídy ovlivňuje svými vlastnostmi možné použití slídového papíru. Slídový papír může být dále zkombinován s různými nosnými materiály pro získání požadovaných mechanických vlastností. Slídový papír se používá v elektrotechnice jako izolace vodičů, izolace čel cívek. [44]

7.3.3 Sklotextit

Sklotextit je kompozitní materiál vytvořen skelnou tkaninou a epoxidovou pryskyřicí. Sklotextit má nízký ztrátový činitel, vysokou elektrickou pevnost a tepelnou odolnost. Používá se v rozvodnách, transformátorech, rozvaděčích, elektrických strojích a v elektrických zařízeních umístěných ve vlhkém prostředí. [46]

7.3.4 Relanex

Izolant Relanex je tvořen skleněnou tkaninou, která vytváří nosnou složku výsledného kompozitu. Pojivá složka je tvořena novolakovou epoxidovou pryskyřicí. Epoxidová pryskyřice spojuje skleněnou tkaninu se slídovým papírem, který se kalcinuje. Relanex se používá v točivých elektrických strojích zejména jako izolace statorového vinutí. [47]

7.3.5 Relastik

Relastik je podobný izolant jako Relanex, ale místo skleněné tkaniny používá jako nosnou složku polyesterovou fólii. Tím došlo ke zkrácení vytvrzovacího cyklu pojivé složky a snížení teplotní závislosti ztrátového činitele. [47]

7.3.6 Kalastik

Kalastik je vytvořený ze slídového papíru, k jeho vytvoření se použila slída muskovit. Další složkou Kalastiku je polyethyltereftalátová fólie. Tyto dvě složky jsou spojeny epoxidovou pryskyřicí. Využívá se na izolace měděných vodičů pro vinutí elektrických strojů s provozním napětím do 11 kV. [48]

7.3.7 Thermikanit

Thermikanit je pružný izolační materiál, který má velmi dobré tepelné vlastnosti a neobsahuje azbest. Je složen ze slídového papíru, skelné tkaniny a pojiva silikonové pryskyřice. Používá se jako tepelná a elektrická izolace topných těles průmyslových pecí, ve kterých musí odolat teplotám přes 1000 °C. [49]

7.3.8 Elektroizolační lepenka

Elektroizolační lepenka je vyrobená slisováním mokrého papíru, který se postupně vrství a následně nechává uschnout [18]. Nejčastěji se používá sulfátová buničina, která může být následně, dle potřeby impregnovaná olejem. Dosahuje vysoké elektrické pevnosti, je ohebná a elastická [50]. Slouží k izolaci vodičů motorů a transformátorů nebo izolace koster cívek. Má velmi malou tepelnou odolnost, dají se použít do teplot kolem 100 °C.

7.4 Použité přístroje

K měření parametrů absorpce a resorpce byly použity přístroje High Voltage Supply 240 A – Keithley, Solid State Electrometer 610C (Příloha A obr. 7 – oba přístroje) a tříelektrokový měřicí systém (Příloha A obr. 1). Pro měření ztrátového činitele $\tan \delta$ byly využity přístroje automatického můstku High Volt (Příloha A obr. 6) a měřicího PC LDV-5 – LDIC (Příloha A obr 4). Pro zjištění elektrické pevnosti izolantů byly použita High Volt sestava (Příloha A obr. 4), zdroj vysokého napětí (Příloha A obr. 5), nádoba s olejem (Příloha A obr. 3) a elektrokový systém (Příloha A obr. 2).

7.5 Měření

Měření izolačních vlastností vzorků byly provedeny pomocí metod fenomenologického přístupu, které jsou snadnější na realizaci a umožňují opakování měření a použití více měřících metod na jednom vzorku materiálu. Vzorky byly vždy změřeny v několika místech a výsledná hodnota jednotlivých měřených veličin byla zprůměrována pro zmenšení vlivu nehomogenit materiálu.

7.5.1 Absorpce a resorpce

Nejprve byly vzorky vloženy mezi dvě vodivé desky, které byly uzemněny. To bylo provedeno z důvodu zbavení vzorků povrchového náboje, který by způsobil nepřesnost naměřené hodnoty stejnosměrného proudu, který se pohybuje v řádu pA. K měření byla využita Voltampérova metoda a schéma zapojení viz obr. 5.1. Poté po 100 minutách byla zapsána hodnota ustáleného proudu vzorkem při stejnosměrném napětí 500 V.

7.5.2 Ztrátový činitel

Pro měření ztrátového činitele $\tan \delta$ byla zvolena metoda automatického můstku, která zjednodušuje měření a získává přesnější informace. Metoda byla zapojena dle schématu zapojení viz obr. 5.3. Následně byl spuštěn program, který automaticky vyvážil můstek a změřil hodnotu ztrátového činitele.

7.5.3 Elektrická pevnost

Měření elektrické pevnosti testovaných vzorků bylo zaměřeno na čistě elektrický průběh průrazu měřeného vzorku. Vzorek byl vložen mezi dvě elektrody a celý systém ponořen do nádoby s olejem pro zamezení přeskoků mezi elektrodami mimo měřený materiál. Postupně byla zvyšována hodnota elektrického napětí, dokud nedošlo k průrazu v materiálu. Hodnota napětí byla zaznamenána a dále použita k vypočítání elektrické pevnosti podle rovnice 5.6.

7.6 Výsledky měření

Měření vzorků jednotlivými metodami pro určení všech zjišťovaných parametrů byla vždy opakována na stejném vzorku kompozitu v několika v různých místech. Následně byly po měření vypočítány zjišťované parametry podle příslušných rovnic, které jsou uvedeny v části 5 této práce. Průměrná hodnota byla následně zapsána do tabulky (tab.1 Příloha C). Průměr hodnot byl proveden pro zmenšení nepřesností způsobených nehomogenitami v epoxidové pryskyřici, ve které mohou při vytvrzování vzniknout malé vzduchové bubliny. Těmto vadám se nedá úplně zabránit ani při přesném dodržení výrobního procesu kompozitu, ale správným postupem se může tento výskyt výrazně minimalizovat. Výsledky měření byly dány do grafů pro názorné grafické porovnání. Přesné hodnoty jsou zapsány v tab. 1 (Příloha C).

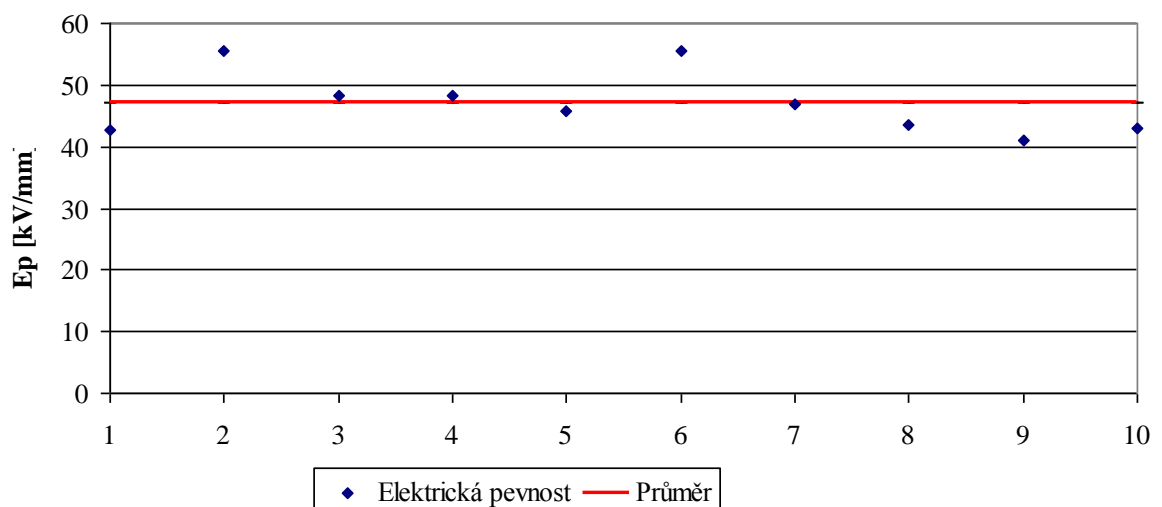
K naměřeným hodnotám (Příloha C tab.1) byly dopočítány průměry, směrodatné odchylky a variační koeficienty. Průměrná hodnota \bar{x} se vypočítá podle rovnice 7.6 jako součet naměřených hodnot x_i vydělen počtem měření N . Směrodatná odchylka se podle rovnice 7.7 vypočte jako součet kvadrátů z rozdílu mezi naměřenou hodnotou x_i a průměrnou hodnotou \bar{x} . To je poté vyděleno počtem měření N a odmocněno. Variační koeficient v_x se podle rovnice 7.8 vypočte jako podíl směrodatné odchylky σ a průměru \bar{x} .

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i \quad (7.6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (7.7)$$

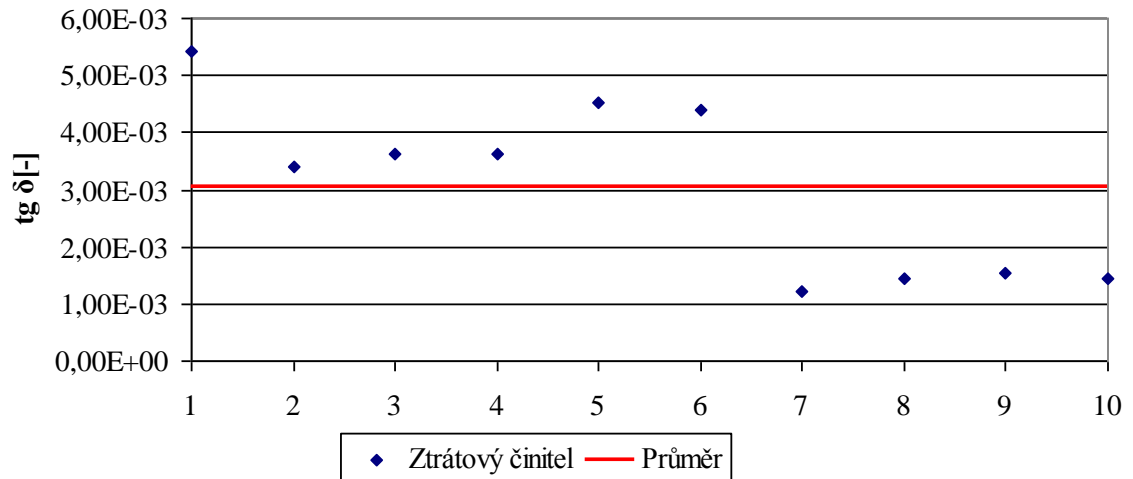
$$v_x = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100 [\%] \quad (7.8)$$

Nejvyšší elektrická pevnost byla naměřena na vzorcích číslo 2 a 6. Jejich elektrická pevnost dosahovala hodnoty 55,5 kV/mm. U ostatních měřených vzorků se elektrická pevnost pohybovala v rozmezí 40 – 48 kV/mm. Graficky zobrazená elektrická pevnost jednotlivých vzorků je na obrázku 7.3. Průměrná elektrická pevnost vzorků byla 47,05 kV/mm se směrodatnou odchylkou 4,84 kV/mm.



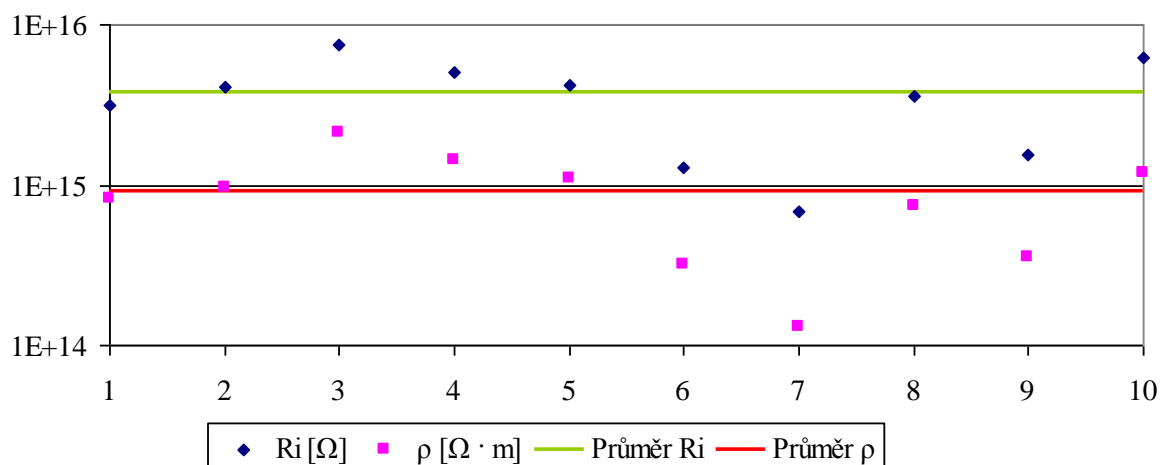
Obr. 7.3: Elektrická pevnost naměřených vzorků

U prvních šesti vzorků byl ztrátový činitel v rozmezí $3,6 - 5,4 \cdot 10^{-3}$. Od sedmého vzorku se ztrátový činitel pohyboval v rozmezí $1,2 - 1,6 \cdot 10^{-3}$ (obr. 7.4). Průměrný ztrátový činitel vzorků má hodnotu $3,06 \cdot 10^{-3}$ se směrodatnou odchylkou $1,45 \cdot 10^{-3}$.



Obr. 7.4: Ztrátový činitel naměřených vzorků

Nejnižší hodnota izolačního odporu a vnitřní rezistivity byla změřena u vzorku 7. U ostatních se izolační odpor pohyboval v rozmezí $3 - 5 \cdot 10^{15} \Omega$ a vnitřní rezistivita kolem $1 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{m}$ (obr. 7.5). Průměrná hodnota izolačního odporu byla $3,73 \cdot 10^{15} \Omega$ se směrodatnou odchylkou $2,07 \cdot 10^{15} \Omega$. Průměrná hodnota vnitřní rezistivity byla $9,1 \cdot 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ se směrodatnou odchylkou $5,56 \cdot 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$.



Obr. 7.5: Izolační odpor a vnitřní rezistivita naměřených vzorků

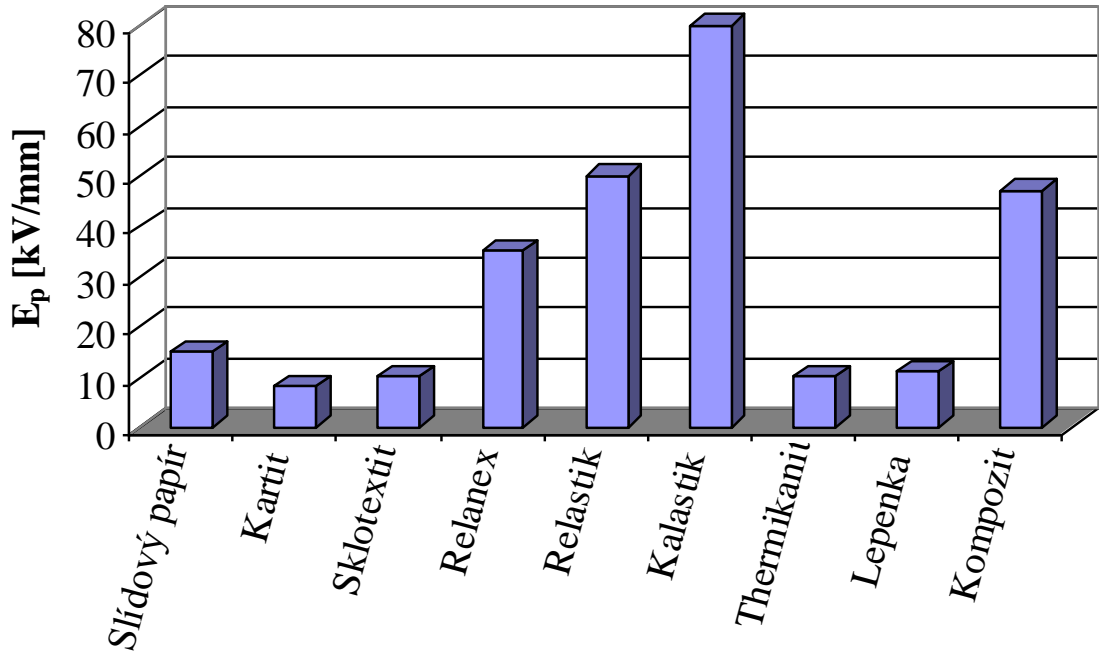
7.7 Diskuse výsledků

Po provedení měření a zjištění hledaných parametrů pro všechny dostupné vzorky, které byly vytvořeny všechny stejným způsobem a mají téměř stejnou strukturu, je možné vidět velmi malé rozdíly u měřených veličin mezi jednotlivými vzorky. Nejvýraznější rozdíly hodnot vzorků jsou u elektrické pevnosti. Všechny tyto rozdíly jsou způsobeny možnými nehomogenitami ve vzorcích a výskytu malých vzduchových bublin, které vznikají při výrobě kompozitu a nejvýrazněji snižují právě elektrickou pevnost, protože vzduch má nižší průrazné napětí než vzorek. Pro porovnání měřených vzorků byly zvoleny běžně používané izolanty, které byly již představeny ve třetí části této kapitoly. Pro tyto izolanty byly získány katalogové listy přímo od výrobce. Katalogové listy Relanexu, Relastiku, Kalastiku, Thermikanitu a Elektroizolační lepenky se nacházejí v příloze B. Katalogové listy Kartitu a Sklotextitu byly získány z [45] respektive [46]. U Slídivého papíru z porovnávaných veličin byla uvedena pouze elektrická pevnost, získána byla z [43].

Při opakování měření na stejných vzorcích kompozitu jsou očekávány hodnoty elektrické pevnosti 45 – 50 kV/mm, izolační odpor $4 \cdot 10^{15} \Omega$, ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ přibližně $3 \cdot 10^{-3}$, rezistivita kolem $1 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{m}$, jednominutový polarizační index 4 a desetiminutový polarizační index 4.

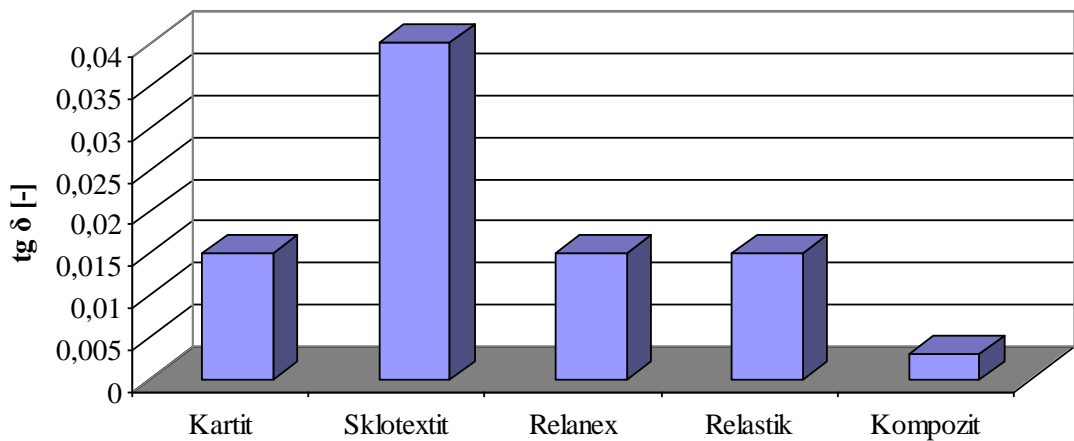
Zjištěné hodnoty veličin byly sepsány do tabulky (Příloha C tab. 2) a následně porovnány s průměrnými naměřenými hodnotami. Udávané katalogové hodnoty v katalogovém listu výrobcem jsou závislé na použití daného izolantu. Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ se například uvádí zejména pro izolanty, které se používají jako hlavní izolace elektrických strojů. [43]

Z tabulky (Příloha C tab. 2) je patrné, že nejčastěji se v katalogovém listu izolantů, kromě technického popisu a mechanických vlastností, uvádí elektrická pevnost, nejméně pak rezistivita. Při porovnání testovaného vzorku s ostatními izolanty je možné vidět, že kompozit má elektrickou pevnost srovnatelnou s Relastikem tedy přibližně 50 kV/mm. Nejvyšší elektrickou pevnost z porovnávaných izolantů dosahuje Kalastik (obr.7.6). U ostatních izolantů se pohybuje elektrická pevnost kolem hranice 10 kV/mm.



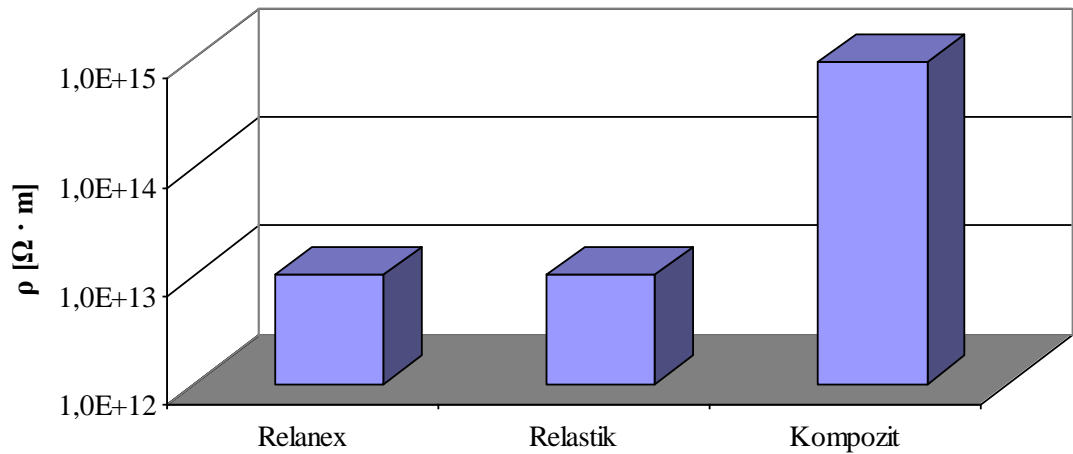
Obr. 7.6 : Porovnání elektrických pevností běžně používaných izolanů

Měřený vzorek kompozitu má ze všech porovnávaných izolanů nejnižší ztrátový činitel, který má hodnotu $3,06 \cdot 10^{-3}$. Kartit, Relanex i Relastik mají uváděný ztrátový činitel $15 \cdot 10^{-3}$. Sklotextit má ztrátový činitel téměř 3x větší než Kartit, Relanex a Relastik, tedy $40 \cdot 10^{-3}$. Toto porovnání je názorně zobrazeno v grafu na obr. 7.7.



Obr. 7.7 : Porovnání ztrátových činitelů běžně používaných izolanů

Poslední uváděný elektrický parametr v katalozích je vnitřní rezistivita. Z porovnávaných izolanů byla uvedena pouze pro Relanex a Relastik. Naměřené vzorky kompozitu mají vyšší vnitřní rezistivitu než Relanex a Relastik a to přibližně o dva řády (obr 7.8).



Obr. 7.8: Porovnání vnitřní rezistivity běžně používaných izolačních materiálů

Toto porovnání je bohužel velmi orientační, protože udávané hodnoty v katalogových listech jsou měřeny pro podmínky, které se podobají provozním podmínkám, ve kterých se izolanty používají. Tyto podmínky jsou tedy odlišné od podmínek, ve kterých bylo provedeno měření kompozitu.

Závěr

Tato bakalářská práce je zaměřená na diagnostiku elektrických zařízení, zejména pak na diagnostiku jejich izolačních systémů, které jsou nejslabším článkem a výrazně ovlivňují celkovou spolehlivost zařízení. Pro diagnostiku izolačního systému byl zvolen kompozitní materiál. Tyto kompozity jsou vyvíjeny pro získání lepších vlastností než mají běžně používané izolanty.

Vzorky kompozitu byly testovány metodami fenomenologického přístupu, které posloužily k určení ztrátového činitele, vnitřní rezistivity, polarizačních indexů, elektrické pevnosti a izolačního odporu. Změřené hodnoty jsou sepsány v tabulce 1 přílohy C. K těmto hodnotám dále byly vypočteny průměry, směrodatné odchylky a variační koeficienty. Tyto hodnoty a následné porovnání s ostatními, běžně používanými izolanty, ukazuje, že kompozitní materiál má velmi dobré elektrické parametry. Zatím tak má, v průběhu testování, velmi slibné výsledky a potenciál nahradit některé z běžně používaných izolantů v některých izolačních systémech. Praktické použití izolantu je závislé na zdokonalení výrobního procesoru kompozitu.

Porovnání parametrů kompozitu s běžně používanými izolanty je pouze orientační. Katalogové hodnoty jsou uváděny pro specifické podmínky, které odpovídají podmínkám použití daného izolantu. Dále výrobce uvádí z elektrických veličin pouze ty nejnnutnější, které jsou zásadní pro danou aplikaci.

Při další práci na tomto výzkumu, bych doporučil nasimulovat při měření podmínky, které by například odpovídaly prostředí točivého elektrického stroje a zjistit, jak se změni elektrické vlastnosti vůči těmto výsledkům, které byly změřeny v laboratorních podmínkách. Poté by bylo možné rozhodnout, v kterých oblastech a aplikacích může představený kompozit dosahovat nejlepších vlastností a v budoucnu může nahradit běžně používané izolanty.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KREIDL, M. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0158-6
- [2] *Diagnostika v řídicích systémech*. Odborné časopisy [online]. 2007, [cit. 2014-09-01]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36672
- [3] MENTLÍK, V. *Aspekty strukturální elektrotechnické analýzy*. Odborné časopisy [online]. 2008, č. 05 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37214
- [4] Diagnostika. *Diagnostické pojmy* [online]. 2013-2014 [cit. 2014-08-31]. Dostupné z: <http://www.zat.cz/cs/produkty-a-sluzby/servis-a-udrba/diagnostika>
- [5] MENTLÍK, V. *Aspekty a perspektivy diagnostiky elektrických silnoproudých zařízení*. Odborné časopisy [online]. 2004, č. 11 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26027
- [6] *Diagnóza*. In: Wikipedia [online]. San Francisco : Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-09-01]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Diagn%C3%B3za>
- [7] MENTLÍK, V. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [8] *Diagnostika a testování el. systémů*. Ústav mikroelektroniky, FEKT, VUT Brno [online]. 2012 [cit. 2014-09-01]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/bdts/>
- [9] TŮMA, L. *Základní pojmy tech. diagnostiky*. Ústav řízení systémů a spolehlivosti, Technická univerzita Liberec [online]. 2007 [cit. 2014-09-03]. Dostupné z: http://www.rss.tul.cz/download/tdg/P1a2_zakl_diag_a_spolehl.pdf
- [10] VDOLEČEK, F. *Technická diagnostika v systémech údržby*. Odborné časopisy [online]. 2014 [cit. 2014-09-03]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37313
- [11] *Vibrační diagnostika*. PressHammer [online]. 2013 [cit. 2014-09-03]. Dostupné z: <http://www.press-hammer.cz/vibracni-diagnostika.html>
- [12] PEXA, M. *Tribotechnická diagnostika*. Provoz a údržba strojů, Technická fakulta ČZU Praha [online]. 2010 [cit. 2014-09-03]. Dostupné z: http://tf.czu.cz/~pexa/Predmety/PUS/Prednasky/8_Tribo_Vibro_CB.pdf
- [13] KUKLA, P. *Diagnostické systémy a spolehlivost dopravních prostředků*. VŠB-TU Ostrava, Univerzita Pardubice [online]. 2013 [cit. 2014-09-18]. Dostupné z: www.vvvd.cz/doc/cms_library/op-vvvd-2012_m17-dsasdp-391.pdf
- [14] POŠTA, J. *Diagnostické metody, základ preventivní údržby podle technického stavu*. Technická fakulta ČZU Praha [online]. 2012 [cit. 2014-09-15]. Dostupné z: <http://udrzbapodniku.cz/hlavni-menu/artikuly/artikul/article/diagnosticke-metody-zaklad-preventivni-udrzby-podle-technickeho-stavu/>
- [15] LIŠKA, J. *Zpracování signálů pro diagnostiku a jeho aplikace*. Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií [online]. 2010 [cit. 2014-09-17]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_08_1012.pdf

- [16] *Diskrétní signál*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-09-16]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Diskr%C3%A9tn%C3%AD_sign%C3%A1l
- [17] *Digitalizace signálu*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-09-16]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Digitalizace_sign%C3%A1lu
- [18] MENTLÍK, V. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [19] *Elektrický izolant*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-11-23]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%BD_izolant
- [20] *Dielektrická pevnost*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Dielektrick%C3%A1_pevnost
- [21] *Dielektrikum*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-11-23]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Dielektrikum>
- [22] *Permitivita*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Permitivita>
- [23] SMETANA, J. *Měření vybraných parametrů izolace*. Odborné časopisy [online]. 2009 [cit. 2014-11-25]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=39496
- [24] ŠAVEL, J. *Elektrická pevnost*. Elekrika [online]. 1998-2014 [cit. 2014-12-25]. Dostupné z: <http://elekrika.cz/terminolog/eterminolog2definition.2006-04-22.5895106704>
- [25] MORWITZOVÁ, G. *Klimatotechnologické zkušebnictví*. Elektrotechnologie, ZČU FEL KET Plzeň [online]. 2009 [cit. 2014-09-05]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce4/47.pdf>
- [26] KUČERÍK, J. *Termogravimetrie*. Fakulta chemická VUT Brno [online]. 2011 [cit. 2014-09-08]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/kucerik-1>
- [27] *Termická analýza*. VŠCHT Praha [online]. 2011 [cit. 2014-09-08]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_termicka_analyza/teorie.htm
- [28] POLANSKÝ, R. *Teorie a praxe termogravimetrické analýzy*. KET FEL ZČU Plzeň [online]. 2008 [cit. 2014-09-08]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/449/r1c1c5.pdf?sequence=1>
- [29] ZACHAŘ, P a D. SÝKORA. *Plynová chromatografie*. VŠCHT Praha [online]. 2009-2013 [cit. 2014-09-08]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/anl/lach2/GC.pdf>
- [30] *Plynová chromatografie*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-09-08]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Plynov%C3%A1_chromatografie

- [31] *Gelová permeační chromatografie*. VSCHT Praha [online]. 2012 [cit. 2014-09-08]. Dostupné z:http://biomikro.vscht.cz/vyuka/ib/4_prednaska2012.pdf
- [32] *Gelová chromatografie*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-09-08]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Gelov%C3%A1_chromatografie
- [33] POLANSKÝ, R. *Diferenční termická analýza a její využití v elektrotechnické diagnostice*. Elektrotechnika [online]. 2008, č. 12 [cit. 2014-09-09]. Dostupné z: www.elektrotechnika.cz/file.php?id=200000210-dd18edf0cd
- [34] KLOUŽKOVÁ A., P. ZEMENOVÁ, J. KLOUŽEK a W. PABST. *Termická analýza*. VSCHT Praha [online]. 2012 [cit. 2014-09-09]. Dostupné z: <http://tresen.vscht.cz/sil/sites/default/files/Termick%C3%A1%20anal%C3%BDza.pdf>
- [35] VANÍČEK, J. *Metody termické analýzy*. Katedra textilních materiálů, Technická fakulta Liberec [online]. 2013 [cit. 2014-09-10]. Dostupné z: http://www.kmi.tul.cz/studijni_materialy/data/2013-04-17/08-43-33.pdf
- [36] POLANSKÝ, R. *Teoretické a praktické aspekty termomechanické analýzy*. Elektrotechnika [online]. 2008, č. 15 [cit. 2014-09-10]. Dostupné z: www.elektrotechnika.cz/file.php?id=200000214-e6c1de8b5b
- [37] KUČERÍK, J. *Dynamická mechanická analýza*. Fakulta chemická VUT Brno [online]. 2011 [cit. 2014-09-10]. Dostupné z:<http://www.chempoint.cz/kucerik-3>
- [38] KANIA, P. *Infračervená spektroskopie*. VSCHT Praha [online]. 2014 [cit. 2014-09-10]. Dostupné z:http://www.vscht.cz/anl/lach1/7_IC.pdf
- [39] KOPLÍK, J. *Rentgenová fluorescenční spektroskopie*. Fakulta technická VUT Brno [online]. 2011 [cit. 2014-09-11]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/rentgenova-fluorescencni-spektrometrie>
- [40] HARVÁNEK, L. *Nanokompozity pro elektrotechnické aplikace*. [Písemná práce ke státní doktorské zkoušce]. Plzeň: FEL ZČU, 2014
- [41] *Hydrofobie*. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Hydrofobie>
- [42] *Aerosil 974*. Evonik Industries [online]. 2008 [cit. 2015-02-27]. Dostupné z:<http://www.novochem.ro/letoltes/aerosil%20r%20974%20en.pdf>
- [43] TIMORANSKÝ, Z. *Ústní sdělení*, COGEBI a.s. Tábor [cit. 2015-04-07].
- [44] *Slidové materiály*. Silent-Czech [online]. 2011-2015 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: <http://www.silent-czech.cz/produkty/izolacni-materialy/slidove-materialy/>
- [45] *Kartitové desky*. Elektroizolanty [online]. 2011-2015 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z:<http://www.elektroizolanty.cz/elektroizolanty/1-KARTIT-Pertinax>
- [46] *Sklotextitové desky*. Elektroizolanty [online]. 2011-2015 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z:<http://www.elektroizolanty.cz/elektroizolanty/3-SKLOTEXTIT>
- [47] BEZDĚK, Z. *Slidové materiály typu Resin Rich s nosnou skleněnou tkaninou pro vysokonapěťové izolace*. Cogebi Tábor [online]. [cit. 2015-03-01]. Dostupné z:<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce3/60.pdf>

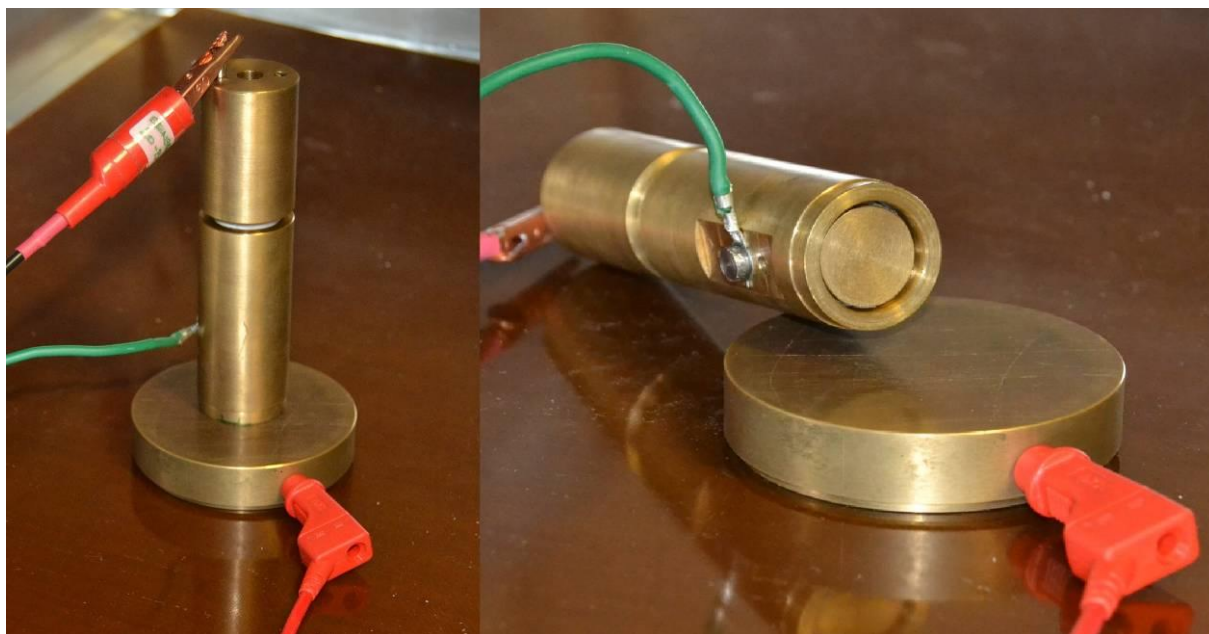
- [48] *Kalastik*. Cogebi [online]. 2015 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://www.fkaeng.com/userfiles/Kalastik45000.pdf>
- [49] *Thermikanit*. Cogebi [online]. 2015 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://fkaeng.com/userfiles/Thermikanit%2046.010.pdf>
- [50] *Elektroizolační lepenka*. Techlep [online]. 2011 [cit. 2015-03-03]. Dostupné z: <http://www.techlep.cz/elektroizolacni-lepenka.html>
- [51] *Relanex*. Cogebi [online]. 2015 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: http://www.fkaeng.com/userfiles/45011RLX_cogebi1.pdf
- [52] *Relastik*. Cogebi [online]. 2015 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: http://www.fkaeng.com/userfiles/45013REL_cogebi.pdf

Přílohy

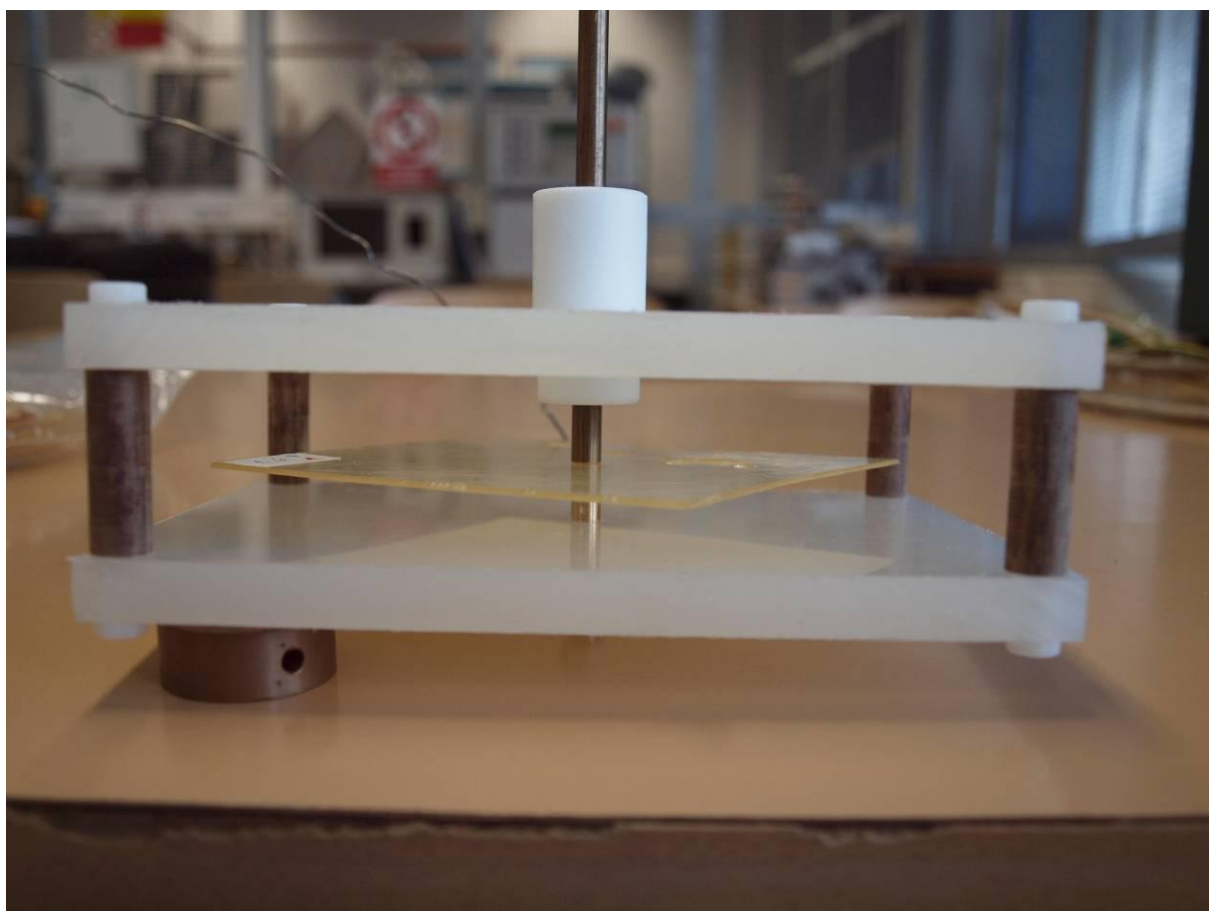
Seznam příloh

- A** Použité přístroje
- B** Katalogy běžně používaných izolantů
- C** Naměřené hodnoty

Příloha A : Použité přístroje



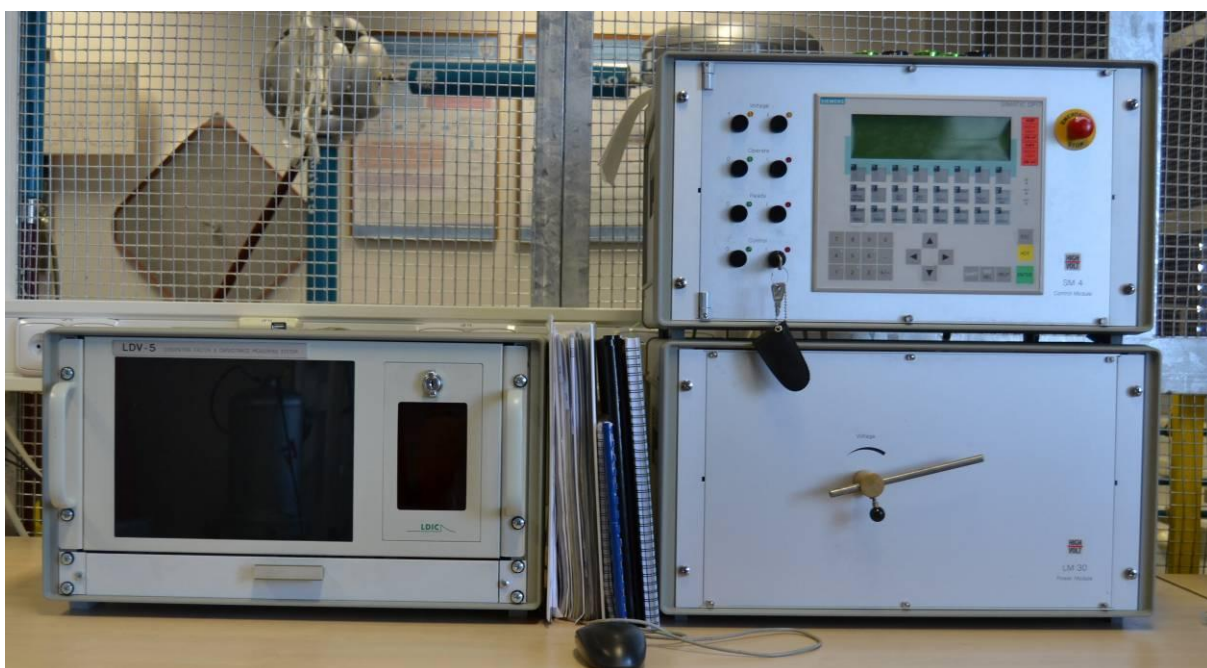
Obr. 1: Tříelektrová soustava pro měření absorpce, resorpce a polarizačních indexů



Obr. 2: Měřený vzorek mezi elektrodami pro měření elektrické pevnosti



Obr. 3: Nádoba s olejem



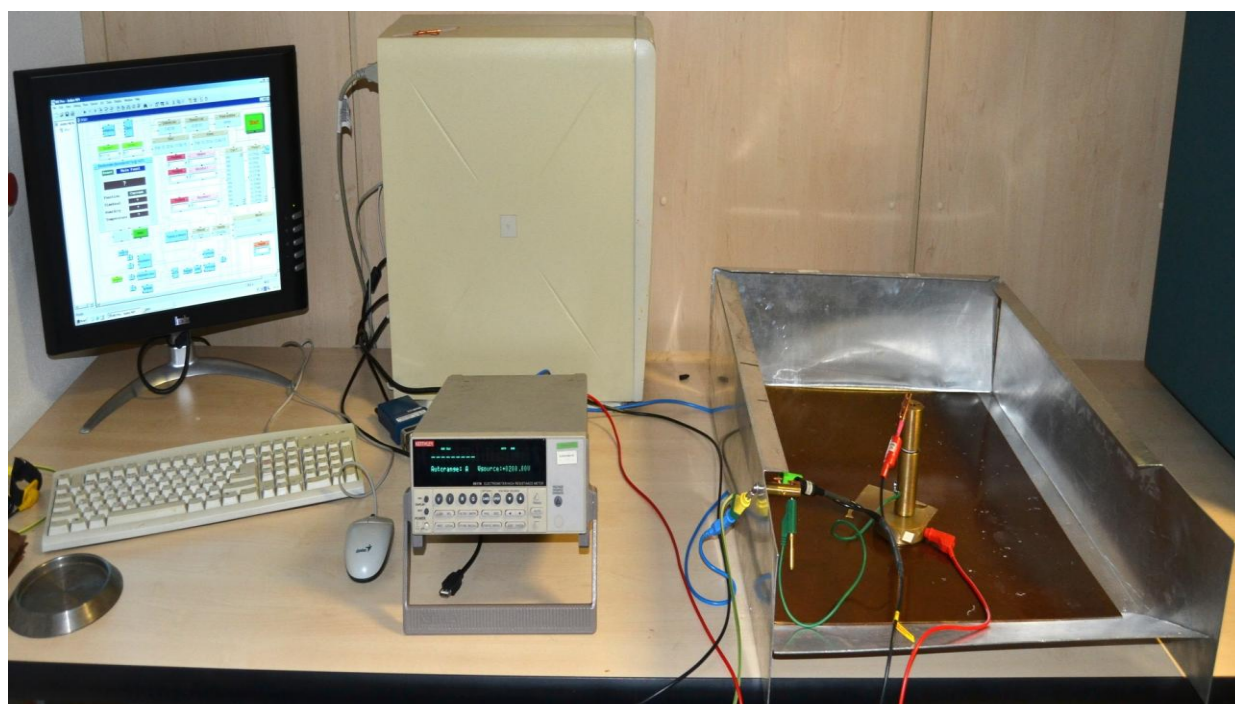
Obr. 4: Automatický systém měření LDV – 5 a High Volt sestava pro měření elektrické pevnosti



Obr. 5: Zdroj vysokého napětí pro měření elektrické pevnosti



Obr. 6: Senzor automatického systému LDV – 5 pro měření ztrátového činitele



Obr. 7: Měření absorpce, resorpce a polarizačních indexů

Příloha B: Katalogy běžně používaných izolantů



Relanex 45.011

Flexible Mica Tapes and Foils

General Description

Relanex 45.011 is a thermosetting insulating material, flexible at room temperatures, plastic and sticky at elevated temperatures. It is made of calcinated mica paper Remika (Muscovite) and a glass cloth, bonded together with epoxy-novolac resin. Relanex 45.011 according to IEC 371-3-6 corresponds to the type 6.1.04.

Characteristics

	mm	0.12	0.15	0.19	0.21	IEC 371-2
Nominal thickness	mm	0.12	0.15	0.19	0.21	IEC 371-2
Tolerance	mm	± 0.02	± 0.02	± 0.02	± 0.02	IEC 371-2
Square weight	g.m ⁻²	168 ± 15	214 ± 15	263 ± 15	295 ± 20	IEC 371-2
Mica paper	g.m ⁻²	75 ± 5	100 ± 5	130 ± 5	150 ± 8	IEC 371-2
Glass cloth	g.m ⁻²	33 ± 2	33 ± 2	33 ± 2	33 ± 2	IEC 371-2
Bond content	g.m ⁻²	60 ± 8	81 ± 11	100 ± 13	112 ± 15	IEC 371-2
(informative value)	%	36 ± 3	38 ± 3	38 ± 3	38 ± 3	
Volatile matters	%	max. 0.8	max. 0.8	max. 0.8	max. 0.8	IEC 371-2
Tensile strength	N/10mm	min. 80	min. 80	min. 80	min. 80	IEC 371-2

Curing conditions:

curing temperature	130 ÷ 180 °C
curing time *	0.5 ÷ 8 hours
pressure	2 ÷ 3 MPa

minimum curing condition:	20 minutes*	at 165 °C	2 ÷ 3 MPa
recommended curing condition:	1 hour*	at 165 °C	2 ÷ 3 MPa

Maximum qualities are achieved after 3 hours at 165 °C.
(*after the material has achieved the curing temperature)

Properties after curing process (a model insulation sheet, thickness 1 mm)

Curing process: 3 hours at temperature 165 °C, at 110 ± 10 °C increase of pressure to 1 MPa

Volume resistivity	Ω.m	min. 1.10 ¹³	IEC 93
Loss factor tg δ *	(E = 1 kV.mm ⁻¹)		IEC 250
23 °C		max. 0.015	
130 °C		max. 0.060	
155 °C		max. 0.160	
Dielectric strength *	kV.mm ⁻¹	min. 35	IEC 243-1
Flexural strength *	MPa	min. 150	IEC 371-2
Tracking resistance	CTI		IEC 112
- from side of glass cloth		475	
- from side of mica paper		200	
Thermal conductivity	W.K ⁻¹ .m ⁻¹	approx. 0.2	
Coefficient of linear expansion	K ⁻¹	(1 ÷ 10).10 ⁻⁵	IEC 112

* the values are measured on the sample of th. 0.25 mm



FKA Eng Co. Exclusive Representative of Elinar and Cogebi in Iran

Address : 2nd floor, No.307, Habibollahi St. Satarkhan St., Tehran, Iran

Tel/Fax: (+98) 21 66557276-9/ 66519830

email: info@fkaeng.com

www.fkaeng.com

Katalog 1: Relanex, převzato z [51]



Relastik 45.013

Flexible Mica Foils

General Description

Relastik 45.013 is a thermosetting insulating material, flexible at room temperatures, plastic and sticky at elevated temperatures. It is made of calcinated mica paper Remika (Muscovite) and a polyethyleneterephthalate (PETP) foil, bonded together with epoxy-novolac resin.

Characteristics

Nominal thickness	mm	0.16	IEC 371-2
Tolerance	mm	± 0.01	IEC 371-2
Square weight	g.m ⁻²	240 ± 12	IEC 371-2
Mica paper	g.m ⁻²	150 ± 5	IEC 371-2
PETP foil	g.m ⁻²	32 ± 2	IEC 371-2
Bond content	g.m ⁻²	58 ± 5	IEC 371-2
	%	24	Informative value
Volatile matters	%	max. 0.5	IEC 371-2
Tensile strength	N/10 mm	min. 30	IEC 371-2

Properties after curing process (a model insulation sheet, thickness 1 mm)
Curing process: 3 hours at temperature 160 °C, pressure 2 MPa

Volume resistivity	Ω.m	min. 1.10 ¹³	IEC 93
Loss factor tg δ (E = 1 kV.mm ⁻¹)			IEC 250
23 °C		max. 0.015	
130 °C		max. 0.100	
155 °C		max. 0.350	
Dielectric strength *	kV.mm ⁻¹	min. 50	IEC 243-1
Flexural strength	MPa	min. 240	IEC 371-2
Density	g.cm ⁻³	1.8 + 2.0	IEC 371-2
Thermal conductivity	W.K ⁻¹ .m ⁻¹	approx. 0.25	

* the values are measured on the sample of th. 0.25 mm

Application

Relastik 45.013 is used for the insulation of the coil slot parts of the electric machines, mainly for high output motors with an operating voltage up to 11 kV, working under the conditions of the thermal insulation class F (155 °C). Relastik is usually applied by the hot ironing. It is cured in a press at elevated temperatures and pressures.

Storage

6 months at temperature 20 °C
12 months at temperature 5 °C

Delivery form

Rolls width min. 980 mm
inside diameter of core is 150 mm

The values from this datasheet have informative character only.



FKA Eng Co. Exclusive Representative of Elinar and Cogebi in Iran

Address : 2nd floor, No.307, Habibollahi St. Satarikhan St., Tehran, Iran

Tei/Fax: (+98) 21 66557276-9/ 66519830

email: info@fkaeng.com

www.fkaeng.com

Katalog 2: Relastik, převzato z [52]



Kalastik 45.000

Flexible Mica Tapes

General Description

Kalastik 45.000 is a thermosetting insulating material, flexible at room temperatures, plastic and sticky at elevated temperatures. It is made of calcinated mica paper Remika (Muscovite) and a polyethyleneterephthalate (PET) foil, bonded together with modified epoxy resin. The tape is wound up on a core by the mica paper from outside.

Characteristics

	mm	0.06	0.07	0.09	IEC 371-2
Nominal thickness	mm	0.06	0.07	0.09	IEC 371-2
Tolerance	mm	± 0.01	± 0.01	± 0.01	IEC 371-2
Square weight	g.m ⁻²	90 ± 8	102 ± 10	130 ± 10	IEC 371-2
Mica paper	g.m ⁻²	50 ± 4	50 ± 5	75 ± 5	IEC 371-2
PETP foil	g.m ⁻²	32 ± 2	42 ± 2	42 ± 2	IEC 371-2
Bond content	g.m ⁻²	8 ± 2	10 ± 3	13 ± 3	IEC 371-2
Volatile matters	%	max. 0.60	max. 0.60	max. 0.80	IEC 371-2
Elongation at break	%	min. 20	min. 20	min. 20	IEC 371-2
Tensile strength	N/10mm	min. 20	min. 30	min. 30	IEC 371-2
Breakdown voltage	kV	min. 5	min. 6	min. 7	IEC 243-1

Application

Kalastik 45.000 is used mainly for the insulation of copper and other conductors of a rectangular or round cross-section up to 10 mm² that are used for windings of the electric machines with an operating voltage of up to 11 kV and the thermal insulation class F (155 °C). The conductors are wrapped with Kalastik 45.000 manually or by machine with a 50 % or 33 % overlap in the necessary number of layers.

Storage

min. 24 months at temperature 20 °C
min. 48 months at temperature 5 °C

Delivery form

Tapes widths from 6 mm upwards
standard widths are 6, 8, 10, 12, 15, 16, 20, 25 mm
width tolerance up to 20 mm: ± 0.5 mm, over 20 mm: ± 1.0 mm
inside diameter of core is 55 mm or 76 mm
OD max 400 mm

The values from this datasheet have informative character only.



FKA Eng Co. Exclusive Representative of Elinar and Cogebi in Iran

Address : 2nd floor, No.307, Habibollahi St. Satarikhan St., Tehran, Iran

Tel/Fax: (+98) 21 6657276-9/ 66519830

email: info@fkaeng.com

www.fkaeng.com

Katalog 3: Kalastik, převzato z [48]



Thermikanit 46.010

General description

Thermikanit 46.010 is an **asbestos free** flexible insulating material. It consists of mica paper (Phlogopite), a glass cloth and silicone resin. The material has excellent thermal properties and remains flexible after the heat treatment. Thermikanit 46.010 is covered on both sides with the glass cloth in order to improve final mechanical properties.

Applications

Thermikanit 46.010 is used for the thermal and electrical insulation of the heating elements in industrial ovens, induction furnaces and similar equipments. It resists temperatures up to 1200°C.

Availability

Rolls width: 1000mm±10 mm
inside diameter of core: 150 mm
standard length of roll: 30 m +2 / -0 m (Roll may contain 1 joint)

Storage

Max. 12 months at temperature 20°C
Max. 24 months at temperature 5°C

Characteristics

Nominal thickness	mm	1,00	IEC 371-2
(informative)			
Square weight	g.m ⁻²	1295 ± 160	IEC 371-2
Mica paper	g.m ⁻²	4 x (250 ± 25)	IEC 371-2
Glass cloth	g.m ⁻²	4 x (34 ± 8)	IEC 371-2
Resin	g.m ⁻²	160 ± 40	IEC 371-2
Breakdown voltage	kV	min. 10	IEC 243-1
Thermal conductivity	W.K ⁻¹ .m ⁻¹	max. 0,2	DIN 52 612

Data are average results of laboratory tests conducted under standard procedures and are subject to variation. These do not constitute a warranty or representation for which we assume legal responsibility.

m v/161009- 1/1

COGEBI n.v.
Huymanslaan 85
B-1651 LOT BELGIUM
Phone : +32 2 334 91 11
Fax : +32 2 378 12 09
E-mail : mica@cogebi.com
sales@cogebi.com

COGEBI inc.
Cresby Road Industrial Park
14 Faraday Drive DOVER N.H.
03820 - USA
Phone : +1 603 749 88 98
Fax : +1 603 749 89 58
E-mail : mica.inc@cogebi.com
sales.inc@cogebi.com

COGEBI a.s.
Voticka 2104
390 02 TABOR
CZECH REPUBLIC
Phone : +420 381 281 113
Fax : +420 381 281 567
E-mail : mica@cogebi.com
sales@cogebi.com

COGEBI Asia Sdn Bhd - Lot 752,
No. 3, Jalan Subang 3 - Taman
Perindustrian Sungai Penaga
47610 Subang Jaya, Selangor
Darul Ehsan - MALAYSIA.
Phone : +603 56 35 08 00
Fax : +603 56 35 21 90
E-mail : mica.asia@cogebi.com
sales.asia@cogebi.com

COGEBI PRC (China)
Shanghai Representative Office
Suite 321, 3/F Apollo Building,
1440 Yanan Road (C), Shanghai
PRC - CHINA
E-mail : mica.china@cogebi.com
sales.china@cogebi.com

www.cogebi.com

Member of the Elinar Group

Katalog 4: Thermikanit, převzato z [49]



KATALOG

TECHNICKÁ LEPENKA PC9075

Charakteristika výrobku

Technická lepenka PC9075 je speciálním druhem trvanlivé slisované papíroviny, určené k izolaci elektrických strojů. Vyrábí se zplstěním rostlinných vláken za mokra s následným vrstvením, lisováním a kalandrováním. Je hladká, ohebná, elastická, hnědé barvy a ekologicky šetrná. Má vysokou dielektrickou pevnost.

Technická lepenka PC9075 se používá k izolaci elektrických vodičů v motorech, transformátorech a jiných elektrických zařízeních. Pro tento účel se vyrobené archy řezou na vhodné pásy, ohýbají se a vkládají do drážek elektromotorů, vyrábějí se z nich kostry cívek a izolace do transformátorů, nebo se upravují na jiný žádoucí tvar.

Pro své dobré mechanické vlastnosti se také používá na výrobu kancelářských složek a rychlovažaců a na výrobu šablon převážně pro textilní a obuvnický průmysl, dále také jako podložka do vysekávacích lisů atd.

Technické požadavky a vlastnosti elektroizolační technické lepenky jsou stanoveny ČSN EN 60641-3-1. Zkouší se podle ČSN EN 60641-2.

Technické údaje

Vlastnosti		Jednotka	Hodnota	
Formát	délka	[mm]	1000	1020
	šířka	[mm]	750	1550
Tloušťka		[mm]	0,45 – 2,00	0,45 – 2,00
Tolerance tloušťky		[%]	+ 10, - 10	
Elektrická pevnost po vysušení		[kV/mm]	> 11,0 *	
Elektrická pevnost po ohybu a vysušení do tloušťky 0,60mm		[kV/mm]	> 7,5 **	
Objemová hmotnost		[g/cm ³]	1,1 - 1,3	
Pevnost v tahu	podélný směr	[Mpa]	>59	
	příčný směr	[Mpa]	>39	
Tažnost při přetržení	podélný směr	[%]	>3 ***	
	příčný směr	[%]	>3 ***	
Obsah vlhkosti	maximálně	[%]	10	
Obsah popela	maximálně	[%]	7	
Izolace třídy A	maximálně	[°C]	105	

* Elektrická pevnost po vysušení u jednotlivých měření musí být nejméně 11kV/mm.

** Elektrická pevnost po ohybu a vysušení u jednotlivých měření musí být nejméně 6,5kV/mm.

*** Tažnost při přetržení u tloušťky nad 0,60mm je nejméně 2%.

K expedici se balí do balíků chráněných dřevěnými rámkami do váhy 70 kg, nebo na přepravní palety do váhy 500kg.

Sídlo: 756 54 Zubří Nad Fojstvím 1318 Česká republika	Prodejní sklad: 756 61 Rožnov p. R. Pivovarská 30	Tel.: +420 605 146 217 Tel.: +420 732 209 395 Email: mickalova@techlep.cz mickalova@techlep.cz	IČO: 87646722 DIČ: CZ-7852235424 http:// www.techlep.cz
--	---	---	---

Příloha C : Naměřené hodnoty

Tab 1: Naměřené hodnoty jednotlivých vzorků kompozitu

Vzorek	E_p [kV/mm]	R_i [Ω]	$\text{tg } \delta$ [-]	ρ [$\Omega \cdot \text{m}$]	pi_1 [-]	pi_{10} [-]
1	42,72	$3,41 \cdot 10^{15}$	$5,42 \cdot 10^{-3}$	$8,14 \cdot 10^{14}$	4,32	1,45
2	55,58	$4,08 \cdot 10^{15}$	$3,39 \cdot 10^{-3}$	$9,58 \cdot 10^{14}$	2,6	2,9
3	48,16	$7,47 \cdot 10^{15}$	$3,62 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{15}$	3,97	1,22
4	48,16	$5,1 \cdot 10^{15}$	$3,62 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{15}$	3,03	7,27
5	45,89	$4,2 \cdot 10^{15}$	$4,52 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{15}$	4,51	12,02
6	55,56	$1,27 \cdot 10^{15}$	$4,40 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{14}$	14,34	1,84
7	46,99	$6,84 \cdot 10^{14}$	$1,22 \cdot 10^{-3}$	$1,31 \cdot 10^{14}$	3,27	1,83
8	43,55	$3,54 \cdot 10^{15}$	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{14}$	3,29	5,13
9	40,97	$1,55 \cdot 10^{15}$	$1,55 \cdot 10^{-3}$	$3,56 \cdot 10^{14}$	2,96	4,17
10	42,89	$6,22 \cdot 10^{15}$	$1,43 \cdot 10^{-3}$	$1,18 \cdot 10^{15}$	3,16	5,28
Průměr	47,05	$3,76 \cdot 10^{15}$	$3,06 \cdot 10^{-3}$	$9,10 \cdot 10^{14}$	4,55	4,31
σ	4,84	$2,07 \cdot 10^{15}$	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$5,56 \cdot 10^{14}$	3,32	3,19
v_x	10%	56%	47%	61%	73%	74%

Tab. 2: Zjištěné parametry porovnávaných izolantů z katalogových listů

Vzorek	E_p [kV/mm]	$\text{tg } \delta$ [-]	ρ [$\Omega \cdot \text{m}$]
Slídový papír	15	-	-
Kartit	8	$15 \cdot 10^{-3}$	-
Sklotextit	10	$40 \cdot 10^{-3}$	-
Relanex	35	$15 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{13}$
Relastik	50	$15 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{13}$
Kalastik	80	-	-
Thermikanit	10	-	-
Elektro lepenka	11	-	-
Kompozit	47,05	$3,06 \cdot 10^{-3}$	$9,10 \cdot 10^{14}$