

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Materiálová kompatibilita přírodních esterů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jan KŘÍČEK**
Osobní číslo: **E18B0145P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Materiálová kompatibilita přírodních esterů**
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši použitých polymerních materiálů v transformátorech.
2. Vyhledejte dostupné normy pro kompatibilitu materiálů.
3. Zpracujte přehled nových přírodních izolačních kapalin.
4. Posudte kompatibilitu polymerů v přírodních izolačních kapalinách.



Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Dielektrické prvky a systémy; Mentlík V.
2. Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie; Mentlík V., Trmka. P., Trnková M., Šašek L.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Mužík**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**



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





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

V Plzni dne 9. října 2020

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá materiálovou kompatibilitou přírodních esterů v transformátorech. Text je rozdělen do čtyř kapitol. Začátek bakalářské práce je sepsán jako teoretický úvod k transformátorům a následná kapitola se zaměřuje na polymerní materiály využívané v transformátorech. Další část obsahuje příklady nových odbouratelných izolačních kapalin a jejich vlastností. Poslední část se zabývá materiálovou kompatibilitou polymerních látek, testy kompatibility a jejich normami kompatibility v minerálních olejích a v přírodních esterech.

Klíčová slova

Materiálová kompatibilita, polymerní materiály, izolační kapaliny transformátoru, přírodní estery, normy kompatibility

Abstract

This bachelor thesis deals with the material compatibility of natural esters in transformers. The text is divided into four chapters. The beginning of the bachelor thesis is written as a theoretical introduction to transformers and the following chapter focuses on polymeric materials used in transformers. The next part contains examples of new biodegradable insulating liquids and their properties. The last part deals with material compatibility of polymeric substances, compatibility tests and their compatibility standards in mineral oils and natural esters.

Key words

Material compatibility, polymeric materials, transformer insulating liquids, natural esters, compatibility standards

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 27.5.2021

Jan Kříček

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinovi Mužíkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 TEORETICKÝ ÚVOD K TRANSFORMÁTORŮM	11
1.1 PRINCIP TRANSFORMÁTORU	11
1.2 DĚLENÍ TRANSFORMÁTORŮ	12
1.2.1 Podle počtu fází	12
1.2.2 Podle počtu vinutí.....	13
1.2.3 Podle použití.....	14
1.2.4 Podle provedení chlazení.....	15
1.3 CHLADICÍ SYSTÉMY TRANSFORMÁTORŮ	15
1.3.1 AN.....	15
1.3.2 AF.....	16
1.3.3 ONAN	16
1.3.4 ONAF.....	16
1.3.5 OFAF.....	16
1.3.6 ONWF.....	17
1.3.7 OFWF.....	17
2 POLYMERNÍ MATERIÁLY V TRANSFORMÁTORECH	18
2.1 EPOXIDOVÁ PRYSKYŘICE	19
2.2 PRVKY TVOŘENÉ Z CELULÓZY.....	21
2.2.1 Papír.....	22
2.2.2 KRAFTOVÝ PAPIR	23
2.2.3 Lepenka.....	24
2.3 OLEJE	24
2.3.1 Minerální oleje	26
2.3.2 Syntetické oleje	27
2.3.3 Rostlinné oleje	28
3 PŘÍRODNÍ ODBOURATELNÉ IZOLAČNÍ KAPALINY	29
3.1 KOKOSOVÝ A PALMOVÝ OLEJ.....	29
3.2 SLUNEČNICOVÝ OLEJ.....	29
3.3 OLEJ Z RÝŽOVÝCH OTRUB	30
3.4 KUKUŘIČNÝ OLEJ	30
3.5 SÓJOVÝ OLEJ	31
4 NORMY PRO KOMPATIBILITU MATERIÁLŮ	32
4.1 NÁVRH NORMY Č.112/478/NP	33
4.2 NORMA ABNT NBR 16431	35
4.3 NORMA ABNT NBR 14274	35
ZÁVĚR	37
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	39

Úvod

Transformátory mají nesmírnou roli v našem každodenním životě. Proto není divu, že jich existuje spousta typů a je na ně kladeno tolik požadavků. Jedním takovým požadavkem je kritérium materiálové kompatibility. Vzhledem k tomu, kolik různých druhů materiálů se v transformátorech nachází, je potřeba zjistit vliv každé izolační kapaliny na každý druh materiálu, se kterým bude kapalina přicházet do kontaktu. K zjišťování a zaručení kompatibility materiálů máme normy, jejichž dodržení zajistí požadované vlastnosti izolačních kapalin i konstrukčních materiálů transformátoru po jeho určité době provozu. V případě havárie nebo nedostačující kompatibility může dojít k úniku izolační kapaliny, což by znamenalo v mnoha případech značný problém, protože většina transformátorů je plněná minerálními oleji na bázi ropy. Tyto oleje jsou environmentálně škodlivé a při úniku by docházelo ke kontaminaci půdy. Kvůli tomuto důvodu a neustále se zvyšujícím požadavkům na ochranu životního prostředí je potřeba najít jejich alternativu. Dobrou náhradu nacházíme v přírodních olejích. Mají totiž podobné vlastnosti jako minerální oleje, ale jsou netoxické a biologicky dobře odbouratelné, takže při jejich úniku nehrozí znečištění půdy. Protože se minerální oleje v transformátorech používají velmi dlouhou dobu, existuje četné množství norem pro zjištění jejich kompatibility. Přírodní oleje se oproti minerálním olejům v transformátorech tak dlouho nevyskytují, a proto je snaha upravit sestavené normy pro minerální oleje tak, aby byla odpovídající kompatibilita vhodná i pro přírodní oleje.

Seznam symbolů a zkratk

N_1	počet závitů na primárním vinutí
N_2	počet závitů na sekundárním vinutí
U_1	napětí na primárním vinutí
U_2	napětí na sekundárním vinutí
I_1	proud na primárním vinutí
I_2	proud na sekundárním vinutí
kVA	kilovoltampér
MVA	megavoltampér
AN	air natural
AF	air forced
ONAN	oil natural air natural
ONAF	oil natural air forced
OFAF	oil forced air forced
ONWF	oil natural water forced
OFWF	oil forced water forced
°C	stupeň Celsiův
N/mm^2	Newton na milimetr čtvereční
RTE	relativní index teplotní odolnosti
MPa	megapascal
mm^2/s	milimetr čtvereční za sekundu
μK^{-1}	mikro reciproký kelvin
Hz	hertz
$T\Omega/cm$	tera ohm na centimetr
ml	mililitr
cm^2	centimetr čtvereční
L/min	litr za minutu
kV/mm	kilovolt na milimetr

1 Teoretický úvod k transformátorům

Transformátory jsou elektrické přístroje, které převádějí elektřinu z jednoho obvodu do jiného se změnou napětí, aniž by měnily nebo ovlivňovaly frekvenci. Pomáhají vylepšit bezpečnost a efektivitu energetických systémů snížením, nebo zvýšením hodnoty napětí podle požadavků. Jejich využití má široký rozsah především v domovních a průmyslových aplikacích, ale nejvíce důležitými prvky jsou v oblasti distribuce a regulace energie na velké vzdálenosti. [1]

1.1 Princip transformátoru

Transformátory fungují na jednom ze základních principů elektrotechniky. V okamžiku, kdy střídavý elektrický proud začne protékat vodičem, začne se kolem něj generovat magnetické pole neboli magnetický tok. Síla magnetismu (hustota magnetického pole) je přímo úměrná velikosti elektrického proudu. Jinak řečeno, čím větší bude elektrický proud, tím větší bude velikost magnetického pole. V přítomnosti nehomogenního magnetického pole kolem vodiče začne v drátu vznikat elektrický proud. Přiložením druhé cívky do dostatečné blízkosti naší první cívky, do které necháme přivádět střídavý elektrický proud, vytvoříme elektrický proud i na té druhé cívce. Tímto principem, který nazýváme elektromagnetická indukce, jsme schopni přenášet elektrický proud prázdňným prostorem, aniž by bylo zapotřebí drátového propojení. Pro zajištění více efektivnějšího způsobu přenosu elektrické energie můžeme cívky ovinout okolo transformátorového jádra. K vytvoření cívky vytváříme závity kolem feromagnetického jádra. První cívku nazýváme primárním vinutím a druhou sekundárním vinutím. Jestliže bude mít sekundární vinutí stejný počet závitů jako primární vinutí, tak elektrický proud bude na sekundárním prakticky stejně velký jako na primárním. Počtem závitů jsme tedy schopni ovlivňovat velikost elektrického napětí a proudu. V případě, že sekundární vinutí bude mít menší počet závitů než primární, tak na něm bude menší napětí ale větší proud.

Převod lze tedy zapsat jako $p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$. [2]

1.2 Dělení transformátorů

Vyrábí se spousta druhů transformátorů, které se používají v elektrických systémech pro mnoho různých účelů. Pro vyjmenování pár typů transformátorů existují např. snižovací a zvyšovací transformátory, autotransformátory, oddělovací a regulační transformátory anebo distribuční transformátory [3]. Dělíme je do skupin např. podle napěťových úrovní, použitého materiálu jádra, uspořádání vinutí, použití nebo také místa instalace [4].

1.2.1 Podle počtu fází

Tato kategorie se dále dá dělit na jednofázové, třífázové nebo speciální, které mají dvě nebo více fází anebo měniče počtu fází. Jednofázové transformátory využívají jednofázový střídavý proud, což znamená, že spoléhají na napěťový cyklus, který pracuje v jednotné časové fázi [5]. Používají se při distribuci energie v mimoměstských oblastech, protože jejich poptávka a cena jsou mnohem nižší než třífázové transformátory. Využívají se ke snížení napětí na požadovanou hodnotu, aniž by měnily frekvenci. Kvůli těmto účelům se běžně používají k napájení elektronických zařízení v obydlích. Jednoduché jednofázové transformátory mají každé vinutí navinuté válcově na jedno rameno jádra. Na základě toho jak jsou vinutí navinuta kolem centrálního ocelového laminovaného jádra, je konstrukce transformátoru rozdělena na dva typy, jádrový a plášťový. V případě jádrového typu je jenom polovina vinutí navinuta válcově na rameno transformátoru, aby se zlepšila magnetická vazba. Tento typ konstrukce zajišťuje, že magnetické siločáry protékají oběma vinutími současně. Hlavní nevýhodou je ztrátový tok, ke kterému dochází důsledkem toku malého podílu magnetických siločar mimo jádro. V plášťovém transformátoru jsou primární a sekundární vinutí umístěny na střední část kostičky, což má za následek dvojnásobnou plochu průřezu než u vinutí na vnější kostičce. Existují zde dvě uzavřené magnetické cesty. Vnější části mají o polovinu menší magnetický tok než vnitřní část kostičky. Plášťový transformátor potlačuje ztrátový tok, snižuje ztráty v jádře a zvyšuje účinnost. [6]

Vzhledem k tomu, jak často se v distribučních sítích používá třífázová soustava, není divu, že je zapotřebí i třífázových transformátorů. I když máme možnost využít spojení tří jednofázových transformátorů, tak přesto se používají třífázové transformátory kvůli ušetření materiálů, menším rozměrům anebo menší hmotnosti. Nevýhoda poté nastává při

poruše. Ve chvíli, kdy dojde k poškození nebo zničení transformátoru, je třeba jej celý vyměnit za mnohem větší náklady, než by byla výměna pouze jednoho jednofázového transformátoru. Třífázové transformátory jsou tvořeny ze tří sad primárního i sekundárního vinutí, kde každé z nich je navinuto okolo části jádra. Tato primární a sekundární vinutí budou propojeny v konfiguraci buď do hvězdy, nebo do trojúhelníku. [7]

1.2.2 Podle počtu vinutí

Transformátory můžeme dělit také podle počtu vinutí a to na dvouvinutový, které mají primární a sekundární vinutí, trojvinutový které mají k předešle zmíněným ještě terciární vinutí anebo na vícevinutový. [8]

Princip dvouvinutových transformátorů není složitý, ale podle jejich účelu se liší požadavky na jejich vinutí. Mezi funkce dvouvinutových transformátorů patří například přeměna napětí, transformace impedance, izolace a stabilizace napětí. Primární vinutí přijímá napětí ze zdroje a sekundární vinutí většinou dodává toto napětí v jiné velikosti. Role primárního a sekundárního vinutí mohou být zaměněny, ale v případě feritového jádra se nesmí objevit na vinutí větší jmenovité napětí při jmenovité frekvenci, jinak by se budící proud stal nadměrným. [9], [10]

V některých případech je zapotřebí ještě třetího vinutí, které je označováno jako terciární. Obvykle se na všech třech vinutích nacházejí odlišná napětí. Primární vinutí mají nejvyšší napětí a terciární vinutí ty nejnižší. Hlavní výhodou třívínutového transformátoru je cena jejich konstrukce a vysoká efektivita. Třetí vinutí je v transformátorech poskytováno, aby splnilo alespoň jeden z těchto požadavků. Snižuje nevyváženost v primárním vinutí vznikající kvůli nevyváženosti třífázové zátěže. Přerozděluje tok zkratového proudu. Někdy je kromě hlavní a sekundární zátěže vyžadováno napájení pomocných zátěží v jiné napěťové úrovni a toto napětí lze převzít z terciárního vinutí. Vzhledem k tomu že je terciární vinutí zapojeno do trojúhelníku, tak pomáhá s omezením zkratového proudu z fáze na nulový vodič. [11], [12]

Vícevinutové transformátory jsou ty, které mají více než primární a sekundární vinutí zapojené ve specifickém typu konfigurace, aby poskytovaly požadované úrovně výstupního napětí nebo poháněly určitý počet zátěží na výstupu [13]. Většinou mají jedno primární vinutí se dvěma nebo více sekundárními vinutími. Mohou být jednofázové nebo

třífázové. Lze je využít také jako snižovací, zvyšovací nebo kombinace obou mezi různými vinutími. Na stejném jádře může být několik sekundárních vinutí, přičemž každé z nich bude poskytovat jinou výstupní úroveň napětí nebo proudu. [14]

1.2.3 Podle použití

Využití mají transformátory mnoho, a proto je i hodně oblastí, kde je lze použít. Konkrétně se podle použití dělí na energetické (elektrický generátor elektrárny na vedení velmi vysokého napětí), napájecí (pro transformaci nízkého napětí na vyšší), bezpečnostní (pro napájení v hračkách, v zdravotnictví a ve spotřebičích třídy III), rozptylové (s magnetickým bočníkem, napájení výbojek a pro svařování), regulační (autotransformátory), měřicí (napěťové, proudové) a distribuční (z vedení velmi vysokého napětí nebo vysokého napětí ke spotřebiteli). [15]

Distribuční transformátory jsou kategorizovány do různých typů, jako jsou jednofázové, třífázové, podzemní anebo transformátory namontované na podložkách a sloupech. Jednofázové transformátory se používají v sítích, kde není třeba třífázových. Většinou se používají pro průmyslová osvětlení a v energetických aplikacích. Třífázové distribuční transformátory používáme k zadržování elektrické energie z hlavního distribučního obvodu do menšího distribučního obvodu. Přenášejí proud do sekundárního obvodu a také snižují napětí primárního obvodu. Toto snížení je ovlivněno podle požadavků spotřebitele. Transformátory namontované na betonových podložkách jsou uzamčeny ocelovou skříní a jsou instalovány na místech, kde není dostatečný prostor pro oplocení k zamezení přístupu. Jeden transformátor tohoto typu může sloužit několika domům nebo velké budově. Výkon tohoto transformátoru se pohybuje od 75 kVA do 5000 kVA. Transformátory montované na sloupy elektrického vedení jsou používány k transformaci na napětí o velikostech 120 nebo 230 voltů. Jsou umístěny v širokých venkovských oblastech a jejich výkon je v rozmezích od 16 kVA do 100 kVA. Jsou malé a jednoduše umístitelné na jeden samotný sloup. Nádoby transformátoru lze tvarovat a chránit před korozivními materiály a hromaděním vody. V pobřežních oblastech mohou být nádoby chráněny pozinkováním a ve vysoce korozivních oblastech se používají nerezové nádoby. [16]

1.2.4 Podle provedení chlazení

Chlazení transformátorů se dělá především pomocí vzduchu, oleje nebo zalitím do tuhého izolantu. Vzduch je pro chlazení využíván u malých transformátorů a olej zase u velkých transformátorů. Voda se pro přímé chlazení nepoužívá, protože i při sebemenším znečištění je vodivá a vlivem elektrického proudu by docházelo k rozložení na výbušnou směs vodíku a kyslíku. [17]

1.3 Chladicí systémy transformátorů

Chladicí systémy se označují složením písmen kde každé písmenko znamená buď způsob oběhu chladiva (N – přirozený, F – nucený přirozený, D – nucený řízený) nebo podle druhu chladicího média (O – oleje, A – vzduch, W - voda, L – nehořlavá izolační kapalina, G – plyn, S – pevný izolant). První písmeno označuje vnitřní chladicí médium, druhé vnitřní mechanismus chlazení, třetí externí chladicí médium a čtvrté označuje externí chladicí médium.[18] Vhodnější a lepší metodou je pro transformátor chlazení přirozené obzvláště pokud se jedná o transformátory suché, které potřebují pro zaručení kvalitní funkce u podlahy studený vzduch, který je nasáván cívkami ve spodní části. Teplý vzduch samotížně stoupá nahoru. Z důvodu šetření se dnes setkáváme častěji s chlazením nuceným, protože se transformátory uzavírají do uzavřených prostorů, jejichž stěny jsou vyzděny z velmi dobře tepelného izolačního materiálu a tím je odvod tepla takřka vyloučen. Ve dveřích jsou ve výšce alespoň půl metru nad zemí (kvůli případnému sněhu v zimě) chladicí žaluzie a na druhé straně místnosti se instaluje vysokoobrátkový ventilátor. [19]

1.3.1 AN

Metodou chlazení AN je generované teplo v transformátoru chlazeno cirkulací přírodního vzduchu. Když se teplota transformátoru zvýší ve srovnání s teplotou okolního vzduchu, bude procesem přirozené konvekce nahrazen ohřátý vzduch chladným vzduchem. Tato metoda je také známá jako metoda s vlastním chlazením. Používá se k chlazení menších jmenovitých výkonů transformátorů, které dosahují až 1,5 MVA. [20]

1.3.2 AF

U této metody je generované teplo ochlazováno pomocí nucené cirkulace vzduchu. Díky ventilátorům a dmychadlům je na jádro a vinutí transformátoru tlačěn vzduch za vysokých rychlostí. Jakmile je teplota uvnitř transformátoru vyšší než standardní bezpečná úroveň, tak se aktivuje alarm a automaticky se zapnou ventilátory a dmychadla. Tato metoda se používá pro transformátory do 15 MVA. [20]

1.3.3 ONAN

Toto je nejjednodušší chladicí systém transformátoru. Zde se pro chlazení využívá přirozený konvekční tok horkého oleje. Při konvekční cirkulaci oleje proudí horký olej do horní části nádrže transformátoru a volné místo je obsazeno studeným olejem. Tento horký olej, který přichází na horní stranu, bude odvádět teplo přirozeným vedením, konvekcí a zářením ve vzduchu a stane se studeným. Tímto způsobem olej v nádrži transformátoru neustále cirkuluje, když je transformátor zatěžován. Protože rychlost odvádění tepla ve vzduchu závisí na rozptylovacím povrchu olejové nádrže, je nezbytné zvýšit její efektivní povrchovou plochu. Proto se používá další rozptylující povrch ve formě trubek nebo radiátorů připojených k transformátorové nádrži. Toto se nazývá radiátor transformátoru. [21]

1.3.4 ONAF

Ztráta tepla může být zjevně zvýšena, pokud je zvětšena rozptylující plocha. Při aplikaci nuceného proudění vzduchu na tuto rozptylovací plochu se může být ztráta tepla ještě rychlejší. U této metody jsou použity ventilátory vhánějící vzduch na chladicí plochu. Nucený vzduch odvádí teplo z povrchu chladiče a poskytuje lepší chlazení než u proudění přirozeného vzduchu. Vzhledem k tomu, že rychlost je u metody chlazení transformátorů ONAF rychlejší než u chladicího systému ONAN, lze transformátor elektrické energie mnohem více zatížit, aniž by došlo k překročení přípustných teplotních limitů. [21]

1.3.5 OFAF

V přirozeném chladicím systému transformátoru s nuceným vzduchem je odvod tepla urychlován pomocí nuceného vzduchu na odvádějším povrchu, ale cirkulace horkého oleje v nádrži transformátoru je přirozeným konvekčním tokem. Rychlost rozptylu lze ještě

dále zvýšit, pokud je tato cirkulace oleje urychlena působením určité síly. V chladicím systému OFAF je olej nucen cirkulovat v uzavřené smyčce nádrže transformátoru pomocí olejových čerpadel. Hlavní výhodou tohoto systému je, jak moc je kompaktní a že pro stejnou chladicí kapacitu OFAF zabírá mnohem méně místa. Ve skutečnosti v přirozeném chladicím systému oleje vychází teplo z vodivé části transformátoru, které je přemístěno ze svého místa pomaleji v důsledku konvekčního proudění oleje. V systému chlazení s nuceným olejem je teplo přemístěno od svého počátku, jakmile přijde, což zaručuje zrychlení ochlazování. [21]

1.3.6 ONWF

U této metody jsou měděné chladicí cívky namontovány nad jádrem transformátoru a budou plně ponořeny do oleje. Spolu s přirozeným chlazením oleje prochází teplo z jádra do měděných cívek a cirkulační voda uvnitř bude odebírat teplo. Nevýhodou této metody je, že při vstupu vody do transformátoru, bude jakýkoliv únik kontaminovat transformátorový olej. Kvůli tomu, že teplo přechází třikrát rychleji z měděné chladicí trubky do vody než z oleje do trubek, tak jsou trubky opatřeny ventilátory ke zvýšení přenosu tepla z oleje. Přívodní a odtokové potrubí jsou zpomalovaná, aby se zabránilo kondenzaci vlhkosti v okolním vzduchu z potrubí a do oleje. [22]

1.3.7 OFWF

Tato metoda je podobná metodě OFAF, s tím rozdílem, že se zde používá nucený průtok vody k rozptýlení tepla z tepelných výměníků. Tlak oleje musí být vyšší než tlak vody. Olej je nucen protékat výměníkem tepla pomocí čerpadla, kde je teplo odváděno do vody, která je taktéž nucena proudit. Ohřátá voda je odváděna k chlazení v samostatných chladičích. Tento druh chlazení se používá u transformátorů s velmi vysokými výkony až do řádů stovek MVA. Do okruhu jednoho čerpadla lze připojit maximálně až tři transformátory. Výhodou této metody oproti ONWF je, že velikost transformátoru je menší a voda do transformátoru nevstupuje. Druh chlazení OFWF je široce používán u transformátorů určených pro vodní elektrárny. [22], [23]

2 Polymerní materiály v transformátorech

Polymery označujeme jako spojení makromolekul, které jsou složeny z více molekul a to jednoho nebo i více typů atomů (nebo skupin atomů). Jejich chemické i fyzikální vlastnosti se nezmění, ani kdyby jim byla odebrána nebo přidána jedna či více podobných konstitučních jednotek. Polymery mají široké uplatnění v mnoha oborech elektrotechniky. Využití nachází jako pouzdrící materiály, magnetické plasty, konstrukční prvky ale uplatnění nacházejí i v optice, akustice nebo i jako dielektrika a v poslední době i jako vodiče a polovodiče. [24]

Polymery můžeme rozdělit na dvě velké skupiny a to na plasty a elastomery. Plasty dále dělíme na termoplasty a reaktoplasty. Mezi nejznámější zástupce termoplastů patří například polyetylén, polystyren, polypropylen, polyamidy a polyimidy. Polyimidy jsou zrovna jedním z typů polymerů, které své vlastnosti uplatní mimo jiné i na izolaci závitů, vrstev a přívodů v transformátorech. Využívají se jako vytvrzované laky, které mají dobrou adhezi k mědi a odolávají více než 20 000 hodin při teplotě 220 °C. Polyimidy běžně odolávají teplotám do 260 °C, ale ve speciálních aplikacích je však možné dosáhnout ještě vyšších teplotních odolností a to až do 480 °C. K jejich výhodným vlastnostem patří dobré elektroizolační vlastnosti, nízká teplotní roztažnost a nízká cena. Mezi jejich nevýhody patří, že neodolávají hydrolýze vroucí vody a neodolávají kyselinám a zásadám. [25], [26]

Mezi zástupce reaktoplastů řadíme fenoplasty, aminoplasty, epoxidy a silikony. Epoxidy se v elektrotechnice používají k lepení dílů a součástí, anebo k zalévání součástí i celých obvodů. Epoxidové lisovací materiály mají široké uplatnění ve výrobě jemných členitých součástí a rozměrných tlustostěnných technických dílů. Jako jemné členité součásti tvoří opláštění statorů, rotorů, transformátorů, základních desek anebo také jako kryty spínačů, přepínačů a regulátorů. Tepelná odolnost epoxidů je velmi dobrá. Dle jednotlivých typů se pohybují v rozmezí od -30 °C do 150 °C. Nejlepší epoxidy při dlouhodobém zatížení jsou schopné snést teploty až do 160 °C. Chemická odolnost také není špatná. Odolávají zředěným kyselinám, aromatickým uhlovodíkům, hydroxidům a alkoholům, ale špatně odolávají esterům, acetonům a chlorovaným uhlovodíkům. Z elektrických vlastností vynikají epoxidy především svojí vysokou hodnotou povrchového odporu a elektrickou pevností. Kvůli vysoké polaritě epoxidových funkčních

skupin je jejich permitivita a činitel dielektrických ztrát značně frekvenčně ovlivněn. [25]–[27]

Silikony mají také skvělé teplotní vlastnosti. Dlouhodobě jsou schopné snášet teploty do 200 °C a krátkodobě dokonce až do 350 °C. Teplota má též úplně minimální dopad na jejich základní fyzikální a mechanické vlastnosti. Další jejich výhodou je skvělá odolnost vůči chemickým a oxidačním vlivům. Teplotně a frekvenčně jsou u silikonů jen mírně ovlivněny dokonce i jejich elektroizolační vlastnosti, elektrická pevnost a dielektrické vlastnosti. Silikonové oleje se používají jako oleje do transformátorů nebo jako silikonová olejová dielektrika, která slouží ke zlepšení izolačních vlastností. Lze je taktéž dále použít jako izolační náplně u zařízení, které jsou značně teplotně namáhány. V elektronice a i v mikroelektronice se využívá silikonových pryskyřic, které se uplatňují jako zalévací a pouzdřicí materiály pro součástky. Dále jsou používány jako izolace vodičů pro výrobu elektrických strojů nebo transformátorů. Za nevýhodu silikonů by se dala považovat jejich vyšší cena oproti jiným plastům. [25]–[27]

2.1 Epoxidová pryskyřice

Epoxidová pryskyřice neboli epoxid je sloučenina obsahující ve svých molekulách více než jednu epoxidovou skupinu a řadíme ji mezi reaktoplasty. Reaktoplasty se po vytvrzení stávají netavitelnými a nerozpustnými [28]. Polymery, které obsahují nezreagované epoxidové jednotky, nazýváme polyepoxydy [29]. Výroba epoxidových pryskyřic začala v průmyslovém měřítku již během druhé světové války, ale k jejímu masovému rozšíření došlo až v době poválečné [30]. V dnešní době se vyrábějí v různých variantách a to v tuhém stavu nebo i ve formě viskózních sirupových kapalin. Používají se jako konstrukční materiály, nátěrové hmoty anebo lepidla [29], [31].

Z elektronických zařízení je můžeme například nalézt v transformátorech, motorech, generátorech, nebo také v izolátorech. Pružné epoxidové pryskyřice nacházejí své využití pro zalévání transformátorů a induktorů. K odstranění vzduchových mezer mezi vinutím, vinutím mezi jádry a vinutím k izolátoru se používá vakuové impregnace na ještě nevytvrzený epoxid. Vytvrzená epoxidová pryskyřice je velmi dobrý elektrický izolátor a je také mnohem lepší vodič tepla se srovnáním oproti vzduchu. Díky tomu jsou žhavá

místa transformátoru značně snížena, což má za příčinu stabilnější a delší životnost než u produktu, který by potažen nebyl. [32]

V suchých transformátorech se jako izolační materiál používá kompozit tvořený epoxidovou pryskyřicí a skelnými vlákny, který vzniká za zvýšených teplot a při nízkém tlaku, který se blíží svými hodnotami k vakuu. Výsledkem je vysoká mechanická pevnost, zkratová odolnost, vynikající odvod tepla z vnitřních částí cívky a značná výkonová a proudová přetížitelnost. Velmi důležitým faktorem je složení samotné pryskyřice, protože se z toho poté odvíjejí její vlastnosti. Zejména záleží na její pevnosti v tahu a teplotní roztažnosti vrstvené hmoty ve vztahu k vodivému materiálu. Dále se uvádí jejich protažení v procentech, tvrdost, tepelná vodivost, dielektrická pevnost, dielektrická konstanta a elektrický odpor [33]. U obyčejných suchých transformátorů se skládá pryskyřice ze 70 % z minerálního plniva (převážně křemičitá moučka). Tato hmota bude mít pevnost v tahu pouze epoxidové pryskyřice, což je zhruba 50 N/mm^2 . Izolační systémy obsahující kompozitní materiál tvořený epoxidovou pryskyřicí a skelnými vlákny, která jsou navinuta mezi jednotlivými vrstvami vinutí a na povrchu je pevnost v tahu přibližně 120 N/mm^2 neboli více než dvojnásobná. Takových pevností dosahují některé oceli. Takovýto kompozitní materiál má i výhodnější koeficient teplotní délkové roztažnosti a pohybuje se okolo hodnot roztažnosti mezi mědí a hliníkem. Koeficient tepelné roztažnosti pryskyřice s křemičitou moučkou (66 %) se pohybuje kolem $38 \mu\text{K}^{-1}$, zatímco u kompozitního materiálu složeného z pryskyřice a skelných vláken je tento koeficient pouze $20 \mu\text{K}^{-1}$. [34]

Epoxidové pryskyřice mají také teplotní třídy. Dříve se tyto třídy označovali písmeny Y, A, E, B, F, H. V tomto pořadí přesně vyjadřují svojí úroveň, kde Y bylo třídou nejnižší a H teplotní třídou nejvyšší. Toto písemné označení dnes již není vyhovující, a proto se označuje přesně jmenovitými teplotami. Dále zde máme relativní index teplotní odolnosti RTE, který udává teplotu ve stupních Celsia, při níž má materiál po předpokládanou dobu své životnosti dostatečně uspokojivé vlastnosti v porovnání se známým standardním materiálem. Doba vytvrzení záleží jednak na množství epoxidu, tak také na teplotě, při které pryskyřice tuhne a samozřejmě i na jejím složení a typu. Pro uvedení příkladu určité dvousložkové epoxidové pryskyřice, které jsou vytvrzované teplem tak při váze 100 gramů a teplotě $95 \text{ }^\circ\text{C}$ tvrdnou 8 hodin nebo při teplotě $120 \text{ }^\circ\text{C}$ (což se již blíží k maximu jejich teplotní třídy) tvrdnou pouze 3 hodiny. Epoxidové pryskyřice nemají kvůli různým příměsím stejnou barvu. Můžou být např. hnědé nebo červeno-hnědé, černé, jantarově čiré

a bílé nebo krémově bílé. Dalším rozdílem je, jestli obsahují nebo neobsahují plnidla, anebo jestli jsou tixotropické. Ty bez plnidel mají nejnižší viskozitu, neboli jsou nejvíce tekuté a z tohoto důvodu se používají pro zatékání do špatně přístupných míst. Pryskyřice s plnidly se používají tam, kde je zapotřebí redukovat smršťení materiálu. Kvůli svým nižším exotermickým vlastnostem a vyšším odolnostem vůči teplotním šokům se jich využívá tam, kde zvýšená viskozita nebrání aplikaci plnicími stroji. Pryskyřice s tixotropickými vlastnostmi se uplatňuje v místech, kde je potřeba nízkého stékání. Tento druh se po smíchání obou složek chová jako nestékavá pasta. [33], [35], [36]

2.2 Prvky tvořené z celulózy

Celulóza je organická sloučenina, polysacharid sestávající z lineárního řetězce několika stovek až mnoha tisíců vázaných jednotek beta-D-glukózy (nejhojnější monosacharid, jednoduchý cukr). Celulóza je jedním z nejčastějších polymerů na Zemi. Používá se především k výrobě lepenky a papíru. Méně tak často se využívá na širokou škálu derivátových produktů, jako je celofán nebo umělé hedvábí. Pro průmyslové použití se získává hlavně z buničiny a bavlny. Papír pro elektrickou izolaci se používá v různých formách jako izolace v transformátorech, kabelech a jiných elektrických zařízeních. Taková izolace přispívá mnohem víc než jako pouhé oddělení mezi vodiči. Přispívá k celkovým dielektrickým vlastnostem jakékoli kompozitní izolace, jejíž je součástí. Přítomnost celulózové izolace ovlivňuje rozložení napětí v heterogenních dielektrických systémech, přispívá k dielektrickým ztrátám, určuje krátkodobou dielektrickou sílu a do značné míry životnost izolovaného systému jako celku. Hydroxylové spojení celulózy ve vodě vytváří tvarovatelný nástřikový materiál jako alternativu plastů a pryskyřic. Recyklovatelný materiál je schopný být odolný jak vůči vodě, tak i vůči ohni a k tomu ještě může být ošetřen kyselinou boritou, která funguje jako zpomalovač hoření. Celulózová izolace se stává populárním materiálem vhodným z hlediska životního prostředí. Je bez zápachu, hydrofilní, nerozpustná ve vodě a většině organických rozpouštědel, je chirální a biologicky odbouratelná. Může být chemicky rozložena na své glukózové jednotky zpracováním koncentrovanými minerálními kyselinami při vysoké teplotě a v roce 2016 se ukázalo, že její bod tání je při 467 °C. U běžného papíru, který má vlákna v průměru desítky mikrometrů se mez pevnosti v tahu pohybuje v jednotkách MPa. Jestliže by byla vlákna z celulózy větší (desítky nanometrů), tak by se pevnost v tahu zvýšila na řád stovek MPa. Celulóza přechází z krystalické do amorfní struktury při teplotě 320 °C a

tlaku 25 MPa. Elektrický náboj vzniká v celulóзовých materiálech při styku s vodou pomocí adsorce kationtů nebo aniontů nebo důsledkem dosociace povrchových ionizovatelných skupin z celulóзовého materiálu. Většinou je nabitá záporně, protože odštěpuje protony (má kyselou povahu). [37]–[42]

2.2.1 Papír

Izolační systém v transformátorech se skládá z izolačního oleje a celulózy (papíru). S přibývajícím časem se dielektrické vlastnosti zhoršují a za konec životnosti transformátoru se označuje okamžik, kdy izolace papíru ztratí dielektrickou pevnost. Jak papír stárne, jeho pevnost v tahu klesá a tím pádem je transformátor náchylnější k poruchám vinutí během mechanického namáhání, jako jsou vibrace, zkratky, elektrický oblouk atd. Stárnutí oleje lze zvrátit, ale stárnutí papíru je nevratné. Životnost transformátoru je tedy definována životností izolace papíru. I když je stárnutí papíru nevratné, lze rychlost stárnutí ovlivnit provozem, údržbou a monitorováním stavu transformátoru. [43]

I když je papír ošetřen nebo impregnován, stále může absorbovat vlhkost z obklopujícího vzduchu nebo oleje. V transformátorech naplněných olejem bude suchý papír pomalu absorbovat vlhkost z oleje. Vlhkost se bude distribuovat mezi papír a olej v určitém poměru, kde v konečném stavu bude vlhkost papíru mnohem vyšší než v oleji. Vnikání vlhkosti do izolace zvyšuje dielektrické ztráty a snižuje efektivní dielektrickou sílu papíru. Množství vody, které je papír do sebe schopný nasát ve vysoko výkonových transformátorech, může být až několik stovek litrů. Kvůli zhoršujícím se vlastnostem je důležité odstraňování vlhkosti z papíru v olejových transformátorech. Celulóзовé izolace se tradičně suší zahříváním v peci za atmosférického tlaku anebo zahříváním v peci za sníženého tlaku. Problémem je odstranit vlhkost z izolace v rozsahu odpovídajícím technickým požadavkům bez ovlivnění chemických vlastností. Odstranění vlhkosti z celulóзовé izolace vyžaduje vysokých teplot v rozmezí 100 až 120 °C. Při nadměrném zahřívání je však extrémně obtížné zabránit degradaci celulózy a přesto zajistit úplné odstranění absorbované a adsorbované vlhkosti z izolace. Při sušení se vlhkost pohybuje difúzí z nejnvnitřnějších vrstev na vnější povrch. Z tohoto povrchu je odstraněn difúzí do okolního média. Když se celulóзовá fólie na vzduchu zahřívá při konstantní teplotě, tak ztráta vody je zpočátku rychlá. Nakonec se však rychlost odstraňování vody zpomalí a

nakonec se dosáhne rovnovážného stavu s okolní atmosférou. V závislosti na kapacitě transformátoru se těchto sušících cyklů ohřevu provádí několik. Když hodnota vlhkosti v pevné izolaci klesne na méně než 0,5%, tak je materiál považován za plně vysušený. [38]

2.2.2 Kraftový papír

Kraftový papír je mix 78-80% celulózy, 10-20% hemicelulózy a 2-6% ligninu [44]. Kraftový papír je jedna z možností k výběru jako hlavní pevný izolátor pro vinutí vodiče. Jako izolátor je kraftový papír materiál, který se vyhýbá toku elektrického proudu mezi vodiči. V případě 150 MVA transformátoru může obsahovat až 80 tun oleje a až 30 tun kraftového papíru. Takový izolační systém za provozních podmínek trpí elektrickým, tepelným, environmentálním a mechanickým namáháním v důsledku přítomnosti stop vzduchu a vody, které zhoršují elektrické vlastnosti papíru a oleje. Vývoj stárnutí v izolačním systému výkonových transformátorů souvisí hlavně s teplotním profilem. Jakmile jsou v předchozí části pro vinutí transformátoru dosaženy rozdíly mezi teplotami v horkém místě minerálního a rostlinného oleje (přibližně 20 °C), tak je dalším krokem vyhodnocení degradace kraftového papíru v olejích při různých teplotách. Experimenty se stárnutím, prováděné v laboratoři za provozních podmínek výkonových transformátorů, vyžadují obrovské časové období a jsou velmi nákladné. Z těchto důvodů musí kontrolované laboratorní experimenty zavést podmínky pro rychlé zhoršení izolace, aby bylo možné kvantifikovat její selhání. V současné době je standardizovaná metoda používaná k hodnocení životnosti pevné izolace ve výkonových transformátorech založena na normě IEC 60216-1/2001 [45], která stanovuje, že izolační materiál musí být podroben stárnutí při třech různých teplotách. [46]

Kraftový papír v obou olejích (minerálním a přírodní ester) potřebuje více než dvakrát takovou dobu než oleje k získání podobné degradace, při snížení teploty o 20 °C. Toto chování lze pozorovat v obou směrech vláken (podélném a příčném). Nejen že teplota má zásadní dopad na redukci meze pevnosti, ale také na přetížení pod maximální silou a velikosti zóny poruchy. Posouzení mechanických vlastností také určuje dopad použitého typu oleje. Rychlost degradace mechanických vlastností u kraftového papíru je přibližně dvakrát vyšší, pokud byl kraftový papír ponořen do minerálního oleje ve srovnání s rostlinným. Chemický rozklad kraftového papíru probíhá buď hydrolyzou, oxidací nebo

pyrolýzou. Tepelné stárnutí v minerálním oleji se liší od stárnutí v přírodním esteru díky třem charakteristikám: rovnováhou vlhkosti mezi olejem a papírem, hydrolyzní reakcí a transesterifikací papíru. V izolačních systémech na bázi rostlinného oleje má vlhkost tendenci zůstat v oleji, zatímco v případě použití minerálního oleje má vlhkost tendenci zůstat v pevné izolaci. Díky tomu je ponořený izolační kraftový papír transformátoru sušší v přírodním esteru, což zvyšuje jeho životnost. Na druhou stranu proces hydrolyzy a transesterifikace může změnit chemickou strukturu izolačního papíru. Izolační kraftový papír ponořený do minerálního oleje se zhoršuje především oxidací, zatímco v rostlinném oleji se bude zhoršovat hlavně procesem hydrolyzy. [47]

2.2.3 Lepenka

Technická lepenka, někdy nazývaná jako karton, se používá již od roku 1683. Jedná se o druh elektroizolačního papíru vyrobeného z celulózových vláken. Dnes se z lepenky vyrábí velké množství výrobků. Můžeme ji najít v běžném životě od kancelářských složek až k nábytku, ale své využití našla také v mnoha průmyslových odvětvích a to například jako izolační materiál v transformátorech. V transformátorech se využívá především kvůli její vynikající kompresi při statickém a dynamickém zatížení, dobré mechanické a elektrické pevnosti a vynikající pevnosti v ohybu. Elektrotechnickou lepenku můžeme dělit do několika skupin. Na strojní elektrotechnickou lepenku, transformátorovou lepenku, ušlechtilou strojní lepenku a kondenzátorovou lepenku. Transformátorová lepenka se používá jako izolační součást olejových transformátorů, vertikální izolace nebo jako izolace jader. Má tloušťky od 0,05 až po 6 milimetrů, anebo jde nalézt slepovanou, jejíž tloušťky se pohybují od 7 až po 30 milimetrů. Vlastnosti a technické požadavky na elektrotechnickou lepenku jsou sepsány v normě ČSN EN 60641-3-1 a její zkoušení musí probíhat podle normy ČSN EN 60641-2. Patří do tepelné třídy A do 105 °C. Pevnost v ohybu je od 115 do 130 MPa a pevnost v tahu se pohybuje od 50 do 70 MPa. Elektrickou pevnost v oleji má přibližně 14 kV/mm a absorpce oleje je od 10 až po 12,5 %. [48]–[50]

2.3 Oleje

Transformátorové oleje (také nazývané izolační) jsou speciálním druhem oleje, které mají vynikající elektrické izolační vlastnosti a jsou stabilní při vysokých teplotách. Používají se v olejových elektrických transformátorech k izolaci, zatavení jiskření a korónového výboje a jako chladicí kapalina k rozptylu tepla transformátoru. Dále slouží

k ochraně jádra a transformátorového vinutí a další důležitou vlastností je schopnost zabránit oxidaci celulózové papírové izolaci. Olej působí jako bariéra mezi atmosférickým kyslíkem a celulózou, čímž minimalizuje oxidaci. K určení použitelnosti oleje je třeba vzít v úvahu jeho některé specifické vlastnosti např. elektrické, chemické nebo fyzikální parametry. [51], [52]

Dielektrická pevnost transformátorového oleje je také známá jako průrazné napětí. Měří se sledováním toho, při jakém napětí dojde k jiskření mezi dvěma elektrodami ponořenými v oleji, které jsou odděleny specifickou mezerou (2,5 nebo 4 milimetry). Nízká hodnota dielektrické pevnosti naznačuje přítomnost vlhkosti a vodivých látek v oleji. Specifický odpor oleje je měřítkem stejnosměrného odporu mezi dvěma protilehlými stranami jednoho kubického centimetru bloku oleje. Zvýšením teploty oleje hodnota odporu rapidně klesá. Okamžitě po zapojení transformátoru po dlouhém odstavení, bude teplota oleje přibližně stejná jako teplota okolí a při plném zatížení může stoupnout až na 90 °C. Proto musí být měrný odpor izolačního oleje měřen jak při 27 °C tak i při 90 °C. Minimální standardní měrný odpor transformátorového oleje je při 90 °C 35 TΩ/cm a při 27 °C je 1500 TΩ/cm. Vlhkost nebo obsah vody v transformátorovém oleji je velmi nežádoucí, protože nepříznivě ovlivňuje dielektrické vlastnosti oleje. Obsah vody také ovlivňuje papírovou izolaci jádra a vinutí transformátoru. V nabitém transformátoru se olej zahřívá a tím se zvyšuje rozpustnost vody v oleji. Proto je teplota oleje v době odběru vzorku pro zkoušku kritická. Během oxidace se v oleji tvoří kyselina, která způsobuje rozpustnost vody v oleji. Kyselina spojená s vodou dále rozkládá olej za vzniku více kyselin a vody, čímž se zvyšuje rychlost degradace. Bod vzplanutí transformátorového oleje je teplota, při které olej dává dostatek výparů k vytvoření hořlavé směsi se vzduchem. Tato směs poskytuje okamžitý záblesk při výskytu plamene za standardních podmínek. Tento údaj je velmi důležitý, protože určuje pravděpodobnost nebezpečí požáru v transformátoru. Obecně je tento bod více než 140 °C. Bod tuhnutí je minimální teplota, při které za normálních podmínek začne olej protékat. Tento údaj je obzvláště důležitý v chladných podnebí. Pokud teplota oleje klesne pod bod tuhnutí, zastaví se proudění transformátorového oleje a tím znemožní chlazení transformátoru. Bod tuhnutí hlavně závisí na obsahu vosku v oleji. Viskozitu transformátorového oleje lze popsat, jako odpor průtoku za normálních podmínek. Odpor proti proudění transformátorového oleje znamená překážku konvekční cirkulace oleje uvnitř transformátoru. Dobrý olej by měl mít nízkou viskozitu, aby poskytoval menší odpor vůči konvenčnímu toku oleje, a tím neovlivňoval

chlazení transformátoru. Nízká viskozita oleje je zásadní, ale stejně tak důležité je, aby se co nejméně zvyšovala při poklesu teploty. Řádným testováním se prodlužuje životnost transformátoru, což snižuje náklady na výměnu. Transformátorové oleje mohou díky správné údržbě a regeneraci vydržet až 30 let. [51]

2.3.1 Minerální oleje

Tento druh oleje se běžně používá v transformátorech pro své chemické vlastnosti a dielektrickou pevnost. Funguje jako izolátor a chladicí prvek. Minerální transformátorový olej se vyrábí rafinací částí uhlovodíků shromážděných během destilace surové ropy. Jaký bude bod varu, druh a stupeň rafinačního procesu se volí tak, aby výsledný olej měl vlastnosti, které spadají do limitů stanovených pro použití v transformátorech. Vzhledem k široké dostupnosti a nákladovým výhodám jsou transformátorové oleje na bázi ropy pravděpodobně nejpoužívanější elektroizolační kapalinou v dnešní době a minulém století. Běžný transformátor namontovaný na sloupu, který je dimenzován na 25 kVA obsahuje přibližně 20 galonů (75,7 litrů) oleje. Z pohledu druhé strany extrému, jednotka ve stanici na výrobu elektrické energie, která zvyšuje napětí pro přenos energie na velké vzdálenosti, může být dimenzována na 400MVA nebo i více a může obsahovat více než 10 000 galonů (37 854,1 litrů) oleje. Chemické, elektrické a fyzikální vlastnosti minerálních olejů produkovaných různými dodavateli jsou do určité míry jedinečné. Viskozita minerálního oleje je hlavním parametrem při konstrukčních výpočtech pro přenos tepla buď přirozenou konvekcí v menších samo chlazených transformátorech, nebo nucenou konvekcí ve větších transformátorech s čerpadly. Dynamická viskozita je měřítkem odporu kapaliny, který na sebe klade vlastním pohybem. Kinematická viskozita je poměr dynamické viskozity kapaliny k její hustotě. Obecně se viskozita směsi zvyšuje se zvyšováním molekulárních velikostí a molekulových hmotností. Relevantní charakteristikou oleje mohou být jeho vnitřní vlastnosti použité při konstrukci transformátoru, nebo to může být koncentrace konkrétní složky nebo nečistoty. Za normálních provozních podmínek dojde oxidací a znečištěním k minimálnímu zhoršení kvality oleje. Oxidace je kyselina, která se tvoří v oleji při kontaktu s kyslíkem. Kyselina vytvoří kal, který se usazuje na vinutí transformátoru, což má za následek snížení odvodu tepla. Vinutí budou žhavější, čímž se vytvoří více kalu, který opět vytvoří ještě více tepla a takto se to bude více a více stupňovat. Vysoký obsah kyselin a zvýšené teploty urychlí zhoršení izolačních vlastností oleje, a pokud se to nebude řešit, tak poté způsobí poruchu transformátoru. Běžně se

vyskytující kontaminace v transformátorovém oleji zahrnuje vodu a částice. Přítomnost některého z těchto kontaminantů také sníží izolační vlastnosti oleje. Testování oleje by mělo být roční preventivní údržbou transformátoru. Testování oleje pomůže určit, kdy jsou nutná opravná opatření. Počáteční testování nastaví základ k porovnávání a roční testování ukáže všechny interní změny v transformátoru. [53], [54]

2.3.2 Syntetické oleje

Komplexní analýzou může izolační olej na bázi syntetického esteru zcela nahradit minerální olej a silikonové kapaliny. Se zvyšováním bezpečnostních norem a ochrany životního prostředí to vypadá, že nejlepší volbou budou izolační oleje na bázi syntetického esteru. V porovnání s minerálním olejem mají syntetické oleje bod vzplanutí mnohem vyšší. Bod vzplanutí minerálního oleje je okolo 150 °C, zatímco u syntetického až na 260 °C, což je také teplota, při které dochází ke vzplanutí u silikonových kapalin. Nelze ignorovat neočekávané úniky kapaliny. Hlavními faktory pro posouzení vlivu transformátorové kapaliny na životní prostředí je biologická rozložitelnost, riziko znečištění vody a vliv na vodní ekosystém. Syntetický olej na bázi esteru je netoxický a snadno biologicky odbouratelný na rozdíl od minerálních olejů. Průměrná životnost transformátoru je 30 let a je ovlivněna výměnou transformátorové kapaliny podle její odolnosti proti oxidaci a odolnosti proti stárnutí. Principem je detekce spotřeby kyslíku ke kontrole oxidace oleje. Pokud je tlakový pokles konstantní, znamená to delší časovou náročnost neboli silnější oxidační stabilitu transformátorové kapaliny. Doba spotřeby kyslíku u syntetického oleje je oproti minerálnímu oleji velmi dobrá. Kyselost je klíčovým indikátorem stárnutí kapaliny transformátoru. Za podmínek 125 °C, 150 °C a 160 °C se kyselost syntetického esteru udržela pod předepsanými limity sepsaných v IEC 61203, což znamená, že odolnost proti stárnutí je velmi dobrá. V průběhu období experimentu byly sledovány i další parametry jako je viskozita, hustota a vznícení. Test ukázal, že se ani jeden z těchto parametrů příliš nezměnil. Kromě toho syntetický olej na bázi esteru během experimentu nevyprodukoval žíravou síru ani jiné sedimenty. To vše ukazuje, že stabilita je dobrá a může prodloužit cyklus výměny kapaliny transformátoru. Proto tento olej může zlepšit stabilitu transformátoru, prodloužit cyklus údržby a snížit náklady na údržbu. [55]

2.3.3 Rostlinné oleje

Požadavky na životní prostředí způsobily, že lidé z odvětví průmyslu pro přenos a distribuci elektrické energie začali hledat vhodné alternativy za minerální oleje. Aby byla alternativa vhodná, musí být ekologicky přijatelná, ekonomická a musí nabízet vysoké elektrické standardy po dlouhou dobu životnosti. Není tomu tak dávno, co se začaly znovu objevovat rostlinné oleje na bázi esterů. Tyto estery se vyrábějí z rostlinných olejů, které se produkují z rostlinných plodin. Jejich výhodou je vysoký bod vzplanutí i dobrá biologická rozložitelnost, ale všechny typy přírodních esterů trpí tím, že nejsou tak oxidačně stabilní jako jiné druhy izolačních kapalin. Ačkoliv lze esterové kapaliny vyrábět z nejrůznějších rostlinných olejů, pro elektrické aplikace se nejčastěji vyrábějí ze sójového, řepkového a slunečnicového oleje. To je způsobeno faktory, jako jsou náklady, dostupnost a výkonostní charakteristiky. Průrazné napětí střídavého proudu testováno podle IEC 60165, které využívá vzdálenost elektrod 2,5 milimetru a rychlost nárůstu napětí 2000 voltů za sekundu ukázalo, že jsou na tom rostlinné oleje stejně jako syntetické a dosahují lepších hodnot než oleje minerální. Rostlinné oleje mají vyšší bod tuhnutí než minerální oleje, který se obvykle pohybuje v rozmezí $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, ale testy prokázaly úspěšný studený start až do $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zkoušky také ukázaly, že je možné provozovat transformátor při vyšších teplotách s použitím esterů než s minerálním olejem. Estery jsou odbouratelné, což je výhodou i nevýhodou, protože zatímco odbouratelnost je výhodou při úniku kapaliny, tak je ale třeba zabránit degradaci oleje uvnitř transformátoru, který se bude rozkládat v přítomnosti kyslíku. Estery jsou nejvíce náchylné k oxidaci z alternativních izolačních kapalin. Proto je hermetické utěsnění nejlepším způsobem pro využití jejich vlastností. Výhody použití rostlinných olejů jsou tedy například snížení rozlití v případě úniku kvůli jejich vyšší viskozitě, možnost vyššího zatížení stávajících transformátorů, požární bezpečnost kvůli vyššímu bodu vzplanutí a jednodušší výměně samotného oleje z transformátoru. [56]

3 Přírodní odbouratelné izolační kapaliny

Biologicky odbouratelné přírodní izolační kapaliny jsou dobrou alternativou pro minerální oleje, zejména v situacích, kdy je třeba transformátor instalovat na místech, kde jsou stanoveny omezené předpisy na ochranu životního prostředí. Vedle mnoha pozitivních aspektů, jako je lepší biologická rozložitelnost, vyšší bod vzplanutí a dobré vlastnosti týkající se velikosti elektrického střídavého proudu, mají také negativní vlastnosti, které by měly být brány v úvahu při navrhování. Projektant by měl vědět, že estery jsou citlivé na působení koncentrovaného tepelného toku a mají horší chladicí vlastnosti než minerální oleje. Výkonový transformátor naplněný přírodní odbouratelnou izolační kapalinou bude dražším zařízením, ale s přihlédnutím k proekologickým tendencím vládnoucím na trhu a stále rostoucí poptávce po nových produktech šetrných k životnímu prostředí budou v budoucnu náklady určitě nižší, než jsou dnes. [57]

3.1 Kokosový a palmový olej

V současné době se začíná uvažovat o používání palmových a kokosových olejů jako dielektrických kapalinách v transformátorech. Oba tyto oleje jsou biologicky odbouratelné a netoxické, což je činí žádoucími pro transformátorové aplikace. Bylo zjištěno, že jejich fyzikální a chemické vlastnosti jsou velmi podobné vlastnostem přírodních esterů, které se již v transformátorech používají. Existují různé typy palmových olejů, které lze získat z palmových ořechů. Jedná se o surový palmový olej, palmojádrový olej a rafinovaný, bělený a dezodorizovaný palmový olej. Z těchto olejů je rafinovaný, bělený a dezodorizovaný palmový olej navrhován nejčastěji pro aplikace transformátorů. Je to kvůli tomu, že má vyšší průrazné napětí, nízký ztrátový faktor a vysokou relativní permitivitu ve srovnání s minerálním olejem. Kokosový olej je bezbarvá až světle hnědavě žlutá kapalina extrahovaná z jádra zralých kokosových palem. Po procesech čištění zahrnujících neutralizaci, bělení a dezodorizaci jsou vlastnosti kokosového oleje vhodné pro použití do transformátorů. [58]

3.2 Slunečnicový olej

Slunečnicový olej je neiontové a netěkavé povahy. Má menší citlivost na pH a iontové změny. Slunečnicové semínka obsahují 48-52 % jedlého oleje nejvyšší kvality a 40-50 % bílkovin. Viskozita slunečnicového oleje je při teplotě 29 °C 20,57 mm²/s, při 40 °C

19,52 mm²/s a při 60 °C 15,48 mm²/s. Tyto hodnoty ukazují, že slunečnicový olej splňuje požadavky na viskozitu pro použití jako izolační kapalina podle ISO 3104 a ASTM D 445 při 20 °C a 40 °C. Minimální dielektrická pevnost oleje použitého v transformátoru by měla být 15 kV/mm při mezeře elektrod 2,5 mm aby splňovala požadavky IEC 60156. Slunečnicový olej má dielektrickou pevnost při teplotě 20 °C 17,27 kV/mm, což tuto normu splňuje. Tato dielektrická pevnost dokazuje, že může být použit v transformátorech pro izolační a chladící účely. [59]

3.3 Olej z rýžových otrub

Při hledání nových izolačních kapalin musí dojít k testování jejich určitých vlastností, aby se zjistilo, zda je možné je použít. Mezi tyto kritické vlastnosti považujeme například průrazné napětí, bod vzplanutí, viskozitu a měrný odpor. Při zkoumání se zjistilo, že oleje z rýžových otrub mají průrazné napětí vyšší než kukuřičné oleje a minerální oleje na bázi ropy. Bod vzplanutí má olej z rýžových otrub také vyšší než u minerálních olejů. Dále i viskozita u rýžového oleje je vyšší než u kukuřičného a minerálního oleje. Při zvýšených teplotách vykazují přírodní estery náhlé snížení viskozity, zatímco minerální oleje vykazují pokles rovnoměrnější. Co se týká měrného odporu, opět je mnohem vyšší, než u klasických minerálních olejů. Jedním z důvodů, proč má rýžový olej lepší vlastnosti ve srovnání s tradičním minerálním olejem, může být bohatý obsah mastných kyselin z rostlinných plodin. Minerální oleje vyhrávají proti oleji z rýžových otrub především z pohledu ztrátového faktoru a kyselosti. [60]

3.4 Kukuřičný olej

V literatuře se udává jako přijatelná hodnota průrazného napětí 30 kV/2,5mm. Průrazné napětí kukuřičného oleje bylo vypočteno jako průměrná hodnota testu dělaného podle normy IEC 60156. Tato hodnota byla 52,73 kV/2,5mm, což splňuje požadavky izolačních kapalin. Dielektrická konstanta minerálního oleje v rozmezí od 1 kV až do 12 kV byla 2,19 a hodnota kukuřičného oleje byla 3,12. Z těchto hodnot tedy může usoudit, že kukuřičný olej je vhodný z hlediska relativní dielektrické konstanty. Je žádoucí, aby oleje měly co nejvyšší měrný odpor. V tomto případě byla rezistivita minerálního a kukuřičné oleje měřena v rozsahu 1 kV – 12 kV a 50 Hz – 400Hz. Výsledky ukázaly, že měrný odpor obou olejů klesal s rostoucí frekvencí a napětím. Rezistivita minerálního oleje je vyšší než u kukuřičného oleje ve všech frekvenčních rozsazích. [61]

3.5 Sójový olej

Sója pochází z Číny. Primárně se pěstuje pro obsah bílkovin a sekundárně pro olej. Pěstitelé sóji údajně produkují 22,7 % oleje a 45,5 % bílkovin z pohledu hmotnosti. Na základě výsledků získaných z různých testů vlastností prováděných na rafinovaném sójovém oleji, byl bio transformátorový olej v souladu s hodnotami konvenčního transformátorového oleje potřebných podle ASTM. To naznačuje, že sójové boby jsou kvalitním olejovým plodem pro bio transformátorový olej. Elektrické zkoušky, zejména průrazné napětí, odpovídaly specifikaci ASTM transformačních olejů. Jedním z problémů, kterým je exploze transformátoru v důsledku tlaku z akumulovaných plynů v nádrži transformátoru, jde pomocí tohoto oleje odstranit. Takovýto bio transformátorový olej může být dobrou náhradou za konvenční transformátorové oleje, protože je šetrný k životnímu prostředí. Olej, jako je ten ze sójových bobů, může také odstranit strach z vyčerpání ropy, protože je zcela z obnovitelných zdrojů. Pokud se přejde na tyto bio transformátorové oleje, mohlo by to představovat velký a výnosný trh pro zemědělce. [62]

4 Normy pro kompatibilitu materiálů

Započnutím používání vysokoteplotních izolačních systémů byly silikonové oleje, syntetické estery a přírodní estery komercializovány kvůli svým vyšším bodům vzplanutí a zlepšení kvality. Tím pádem je zapotřebí zkušebních metod pro kompatibilitu materiálů s elektrickými izolačními kapalinami v oblastech transformátorů naplněných kapalinou, výkonových kondenzátorů a v dalších elektrických zařízeních ponořených do kapaliny. Zkoušky kompatibility kapalin s konstrukčními vnitřními materiály transformátorů se obvykle provádějí, aby nedošlo k nekompatibilitě izolační kapaliny například s pryží použitou v těsnění. V okamžiku projevení nekompatibility by začalo docházet k úniku izolační kapaliny. Kompatibilita těchto dvou materiálů je proto zásadní pro minimalizaci úniků kapalin z transformátorů a jejich následných dopadů na životní prostředí. To je další z důvodů, proč se čím dál častěji konstruuji transformátory obsahující přírodní esterové izolační kapaliny, které jsou biologicky odbouratelné a netoxické. Tyto nové izolační kapaliny musí být prozkoumány z pohledu jejich kompatibility s jinými materiály před použitím v transformátorech. Byly provedeny testy [61] kompatibility nové esterové kapaliny na materiály jako je 2K epoxidový lak, polyamidové lakované dráty a na nitrilové a fluorové elastomery. Během testování byl přírodní ester zhodnocen jako kompatibilní a je tedy vhodný pro bezpečný provoz s tímto epoxidovým lakem. U polyamidových lakovaných drátů byla testována a hodnocena tloušťka povlaku, celková povrchová úprava a průrazné napětí po skladování v esterové tekutině. Lakované vodiče vykazují po stárnutí v přírodních esterech přijatelné hodnoty průrazného napětí, a proto je můžeme považovat také za kompatibilní. Pro nitrilové a fluorové elastomery byly testovány a hodnoceny vlastnosti, jako je tvrdost a stlačitelnost. Dále byl také zkoumán vliv elastomerů na tekutinu testováním vlastností oleje před a po skladování. Výsledky testu poukazují na to, že použití těsnění nitrilových elastomerů s tímto přírodním esterem není možné. Naproti tomu fluorový elastomer nevykazuje po skladování v izolační kapalině žádný vliv na jeho vlastnosti a může být použit jako těsnění v transformátorech ponořených do přírodního esteru. Kromě toho nedochází k žádným změnám charakteristik jako je tvrdost a stlačitelnost fluorového elastomeru, což znamená, že v této kapalině je také zaručená funkce těsnění. [63]–[65]

Další materiály, které se používají v transformátorech, jako jsou celulózové izolační materiály, kabelové spony vyrobené z polyamidových a polyesterových pásek, byly testovány na kompatibilitu s přírodní esterovou kapalinou a porovnány s hodnotami po skladování v minerálním oleji. Hodnoty mechanických vlastností po stárnutí celulózových izolačních materiálů v přírodním esteru jsou srovnatelné s hodnotami po stárnutí v minerálním oleji. Ne všechny polyamidové a polyesterové materiály jsou kompatibilní s testovaným přírodním esterem, a proto je nutné je pečlivě vybrat. Protože se viskozita přírodní esterové kapaliny liší od ostatních kapalin, bylo nutné zkoumat její impregnační chování. Ve srovnání s impregnačním syntetickým esterem byla testována impregnace tří různých izolačních materiálů a to lepenky, laminovaných desek a laminovaného dřeva. Z výsledků bylo zjištěno, že absorpce oleje přírodního esteru je o něco lepší než absorpce syntetického esteru. [64]

Existují normy jako ASTM D3455 a ASTM D5282 pro testování kompatibility konstrukčních materiálů v minerální a silikonové izolační kapalině. Žádná z nich ale nepokrývá novější izolační kapaliny, jako jsou syntetické estery, přírodní estery, modifikované estery atd. Kromě toho současné normy nepokrývaly vysokoteplotní izolační systémy definované normou IEC 60076-14, který překračují 100 °C definovaný ASTM D3455-11 nebo 120 °C definovaný podle ASTM D5282. Současné normy jsou ještě k tomu nejednoznačné. Je třeba ještě doplnit zkušební metody a kritéria pro konstrukční materiály, jako jsou těsnící kroužky a laky. [65]

4.1 Návrh normy č.112/478/NP

Testování u tohoto návrhu normy začíná vzorkováním. Velikost zkušební vzorku musí být taková, aby poměr povrchové plochy k objemu oleje byl čtyřikrát větší než poměr zjištěný při běžném používání v elektrických zařízeních. Některé navrhované poměry jsou následující: Pokud lze měřit zkušební vzorek, na každých 800 ml oleje se využije nejméně 52 cm². Pokud je zkušební vzorek nerozpustný v oleji a nelze měřit jeho povrchovou plochu, použije se zkušební vzorek v množství 1 % hmotnosti oleje. Pokud je materiál rozpustný v oleji, použije se zkušební vzorek v množství 0,5% hmotnosti oleje. Těsnící materiály se zkouší v poměru 65 cm² povrchu na 800 ml oleje. Lakované dráty se zkouší v poměru 1300 cm² povrchu na 800 ml oleje. Dále se pokračuje přípravou vzorků. Je třeba předušit všechny pevné materiály po dobu 16 hodin v troubě při teplotě 105 ± 5 °C.

Poté se zkušební vzorek vyjme z trouby a vloží se do jednolitrové nádoby s 800 ml schválené izolační kapaliny splňující všechny limity požadované pro nový olej. Dále se probublává olej suchým dusíkem přibližně 10 minut a následně se položí víko na nádobu. K tomu je nutná příprava referenčního vzorku oleje z 800 ml samotného schváleného oleje jako kontrola pro každou skupinu testovaných vzorků. Pokračuje se umístěním skleněné nádoby do pece při teplotě, která odpovídá teplotním třídám izolačního systému (např. 105 °C, 130 °C a 155 °C atd.). Délka experimentu je navrhována jako 168 hodin nebo násobku 168. Po tepelném stárnutí se vzorky vyjmou z trouby a nechají se zchladit na pokojovou teplotu. Poté se vyjme zkušební vzorek z oleje a provede se požadovaná zkouška. Testovány jsou vlastnosti izolačních kapalin i stavebních materiálů. Navrhované vlastnosti izolačních kapalin jsou uvedeny v tabulce Tab. 4.I a navrhované vlastnosti konstrukčních materiálů jsou uvedeny v tabulce Tab. 4.II [65]

Tab. 4.I Navrhované vlastnosti izolačních kapalin [65]

vlastnost	norma
mezifázové napětí	ASTM D971
průrazné napětí	IEC 60156
faktor rozptylu dielektrika	IEC 60247
viskozita	ISO 3104

Tab. 4.II Navrhované vlastnosti konstrukčních materiálů [65]

vlastnost	norma
změna rozměrů	ISO 1817:2016
změna hmotnosti	ISO 1817:2016
tvrdost	ISO 868-2003
průrazné napětí lakovaného drátu	IEC 60851-5
pevnost v tahu	ISO 37-2012

Výsledky zkoušek získané na izolačních kapalinách obsahujících zkušební vzorky musí být porovnány s výsledky referenčního vzorku oleje, aby se určily případné rozdíly. Velký rozdíl referenčního oleje v kterémkoli z výsledků může naznačovat problém s přizpůsobením materiálu experimentu nebo problém s izolační kapalinou. V takovém případě by měl být experiment znovu přehodnocen. Velikost rozdílů ve vlastnostech mezi referenčním olejem a zkušebním olejem by měla být stanovena před zkouškou po dohodě mezi kupujícím a dodavatelem. [65]

4.2 Norma ABNT NBR 16431

V současné době existují normy jak předešle zmíněná ASTM D3455 a ABNT NBR 16431, které by mohly být referencemi pro normy na kompatibilitu pro přírodní estery. ASTM D3455 prověřuje kompatibilitu zrychleným tepelným testem při 100 ± 1 °C po dobu 164 hodin. Revize parametrů izolační kapaliny by měla být vyhodnocena po cyklech stárnutí a porovnána s typickým měřítkem pro vyhodnocení stavu kompatibility. Rozsah působnosti ASTM D3455 je však pouze na minerální oleje. Dále by měla být diskutována možnost jeho rozšíření na přírodní ester. Proveditelnost této normy použité pro přírodní ester stále ještě nebyla ověřena. Na rozdíl od ASTM D3455 je ABNT NBR 16431 normou kompatibility přírodních esterů a podmínky testu zrychleného tepelného stárnutí jsou stejné jako u normy ASTM D3455. Norma ABNT NBR 16431 tedy ještě specifikuje vlastnosti a přípustný rozsah variací před a po stárnutí. U přetěžovaného transformátoru je však maximální teplota vyšší než 100 °C, což je uvedeno ve výše uvedených dvou normách. Například podle předchozích diskutovaných článků je teplota horkého bodu 117,9 °C pro typický transformátor S13-m (b) -400/10. Zrychlený test tepelného stárnutí 100 ± 1 °C během 164 hodin pro přírodní estery je tedy mírný. [66]

4.3 Norma ABNT NBR 14274

Další norma, která se snaží rozšířit i na přírodní estery je brazilská norma ABNT NBR 14274 pro testování materiálové kompatibility. Hlavním cílem je zjištění vlastností konstrukčních materiálů jako je kraftový papír, lak a těsnicí materiály s minerálními oleji a přírodními estery za použití stejného postupu a referenčních hodnot použitých z ABNT NBR 14274 a z ASTM D3455 pro minerální oleje. Všechny testy kompatibility byly provedeny duplicitně na základě experimentálního postupu popsáno v ABNT NBR 14274. Nejprve se vzorky suší v peci při teplotě 105 °C po dobu 16 hodin. Poté se vyjmou z pece a umístí se do exsikátoru, aby se ochladily na teplotu místnosti. Vysušené vzorky se ponoří do olejů v jednolitrových skleněných lahvích a následně se probublávají dusíkem po dobu 2 minut při průtoku přibližně 1 l/min v každé nádobě obsahující minerální olej. Po probublávání dusíkem se nádoby uzavrou a umístí do pece při teplotě 100 °C po dobu 164 hodin. Používají se například tyto poměry mezi testovanými materiály a oleji: referenční olej (pouze stárnoucí olej, bez zkoušeného materiálu): 800 ml oleje, těsnicí materiál: 65 cm² v 800 ml oleje, lak: natřený plát 1300 cm² v 800 ml oleje, jádrová ocel: 6200 cm² v 800 ml oleje, neutrální

sulfátový papír: 800 cm² v 52 ml oleje. Po 164 hodinách se nádoby vyjmou z pece a ponechají se vychladnout na teplotu místnosti. Poté se provádí následující měření: mezi povrchové napětí (ASTM D971), číslo kyselosti (ASTM D974) a disipační faktor při 90 °C (ASTM D924). Výsledky pro stárnutý olej v přítomnosti testovaného materiálu se porovnají s výsledky získanými pro referenční olej za účelem stanovení změny hodnot fyzikálně-chemické analýzy. [63]

Závěr

Na začátku této práce byl sepsán teoretický úvod k transformátorům. Byl zde stručně popsán samotný princip transformátoru, dělení transformátorů, a dále typy chladicích systémů transformátorů. Další kapitola pojednávala o polymerních materiálech v transformátorech, proč se používají, k čemu slouží, jak se vyrábějí a byly zde popsány jejich elektrické, fyzikální a chemické vlastnosti. Do této kategorie spadají i izolační oleje. Mezi ně patří i minerální oleje, které vznikají rafinací surové ropy. Stále se jedná o nejvíce zastoupený chladicí izolační olej v transformátorech i přes zvyšující se požadavky na ochranu životního prostředí. Faktem ale je, že se vyrábějí z neobnovitelných zdrojů a to je jeden z důvodů, proč potřebujeme najít jejich alternativu. Data z testů nasvědčují tomu, že dobrou náhradou budou syntetické a rostlinné oleje. Ty jsou na rozdíl od minerálních olejů biologicky odbouratelné, netoxické a vyrábějí se z obnovitelných zdrojů. Bohužel velké pozitivum odbouratelnosti je i jedním z jejich negativ. Zatímco při úniku se jedná o výhodu, tak během normálního provozu je kvůli tomu potřeba hermetického uzavření, aby vlivem kyslíku nedocházelo k degradaci a následnému rozkládání oleje. Syntetické a rostlinné oleje mají především mnohem vyšší bod vzplanutí, který v některých případech může být téměř až dvojnásobný. Ve třetí kapitole byly uvedeny nové přírodní odbouratelné izolační kapaliny, o kterých se uvažuje jako o nové variantě za minerální oleje. Kokosový olej, palmový olej, slunečnicový olej, kukuřičný olej, sójový olej a olej z rýžových otrub mají všechny potřebné vlastnosti k tomu, aby jednou nahradily minerální oleje. Největší šanci být náhradou mají sójový, řepkový a slunečnicový olej. Způsobují to především faktory, jako jsou náklady, dostupnost a výkonnostní charakteristiky. Až se jednou na tyto bio transformátorové oleje přejde, bude to znamenat velkou šanci na nový, velký a výnosný trh pro zemědělce. V další kapitole byla probírána kompatibilita polymerních materiálů s přírodní esterovou kapalinou. Bylo zjištěno, že epoxidový lak, polyamidové lakované dráty a fluorové elastomery jsou s touto kapalinou kompatibilní. Naopak nitrilové elastomery ve zkouškách neobstály a kvůli svým vlastnostem jako jsou tvrdost a stlačitelnost je nelze použít pro těsnění transformátoru. Dále byly zkoumány normy materiálové kompatibility. Důsledkem dlouhého využívání minerálního oleje jako izolační a chladicí kapaliny je, že pro něj existuje mnoho norem, které posuzují jeho kompatibilitu s materiály používaných v transformátorech. Protože rostlinné oleje se v transformátorech tak dlouho nevyužívají, je snaha o reference norem pro kompatibilitu minerálních olejů. V této práci jsou zmíněné tři normy a jeden návrh normy pro kompatibilitu materiálu.

Normy ASTM D3455, ABNT NBR 16431 a ABNT NBR 14274 by se měly rozšířit z materiálové kompatibility minerálních olejů i na kompatibilitu esterových kapalin.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] D & F Liquidators, „The Basics of Electrical Transformers“, 2018.
<https://www.dfliq.net/blog/the-basics-of-electrical-transformers/> (viděno dub. 05, 2021).
- [2] C. Woordford, „How do electricity transformers work? - Explain that Stuff“, *Explainthatstuff.Com*. 2019. Dostupné z:
<https://www.explainthatstuff.com/transformers.html> (viděno dub. 05, 2021).
- [3] „Types of Transformer - different types of transformer - Circuit Globe“.
<https://circuitglobe.com/types-of-transformer.html> (viděno dub. 06, 2021).
- [4] A. Velling, „Types of Metal and Their Applications | Classification of Metals“, *fractory*, 2019. <https://www.elprocus.com/various-types-of-transformers-applications/> (viděno dub. 06, 2021).
- [5] „Single-phase transformer“. <https://www.emworks.com/application/single-phase-transformer> (viděno dub. 06, 2021).
- [6] „Single Phase Transformer : Working Principle, Construction & Applications“.
<https://www.elprocus.com/what-is-a-single-phase-transformer-construction-and-its-working/> (viděno dub. 06, 2021).
- [7] „Three-phase Transformer Circuits | Polyphase AC Circuits | Electronics Textbook“.
<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-10/three-phase-transformer-circuits/> (viděno dub. 06, 2021).
- [8] „Multiple Winding Transformer and Multicoil Transformers“.
<https://www.electronics-tutorials.ws/transformer/multiple-winding-transformers.html> (viděno kvě. 26, 2021).
- [9] „What is a Double Winding Transformer - YueBian Electric Co.,Ltd“.
<https://www.zjyb-electric.com/what-is-a-double-winding-transformer.html> (viděno dub. 11, 2021).
- [10] „The Two-Winding Transformer“.
http://www.vias.org/matsch_capmag/matsch_caps_magnetics_chap6_03.html (viděno dub. 11, 2021).
- [11] „What is Third-Winding Transformer? - Definition, Equivalent Circuit, Short Circuit & Open Circuit Test - Circuit Globe“.
<https://circuitglobe.com/three-winding-transformer.html> (viděno dub. 11, 2021).
- [12] „Tertiary Winding of Transformer | Three Winding Transformer | Electrical4U“.
<https://www.electrical4u.com/tertiary-winding-of-transformer-three-winding-transformer/> (viděno dub. 11, 2021).
- [13] „▷ Multiple Winding Transformers“. <https://engineering.electrical-equipment.org/electrical-distribution/multiple-winding-transformers.html> (viděno dub. 11, 2021).

- [14] „Vícenásobné vinutí transformátoru a vícejádrové transformátory". <https://www.electronics-tutorials.ws/transformer/multiple-winding-transformers.html> (viděno dub. 11, 2021).
- [15] „Types of Transformer - different types of transformer - Circuit Globe". <https://circuitglobe.com/types-of-transformer.html> (viděno kvě. 26, 2021).
- [16] „Distribution Transformer : Construction, Types and Its Uses". <https://www.elprocus.com/what-is-a-distribution-transformer-construction-and-its-types/> (viděno dub. 11, 2021).
- [17] „Cooling Methods of a Transformer | electricaleasy.com". <https://www.electricaleasy.com/2014/06/cooling-methods-of-transformer.html> (viděno kvě. 26, 2021).
- [18] „Třídy chlazení transformátorů". <https://crushtymks.com/cs/transformers/1537-transformer-cooling-classes.html> (viděno dub. 11, 2021).
- [19] „No Titl ě". Dostupné z: <https://www.elpro-energo.cz/download/navrh-chlizeni-transformatoru-1.pdf> (viděno dub. 12, 2021).
- [20] „Chlazení transformátoru a metody chlazení - Circuit Globe". [https://circuitglobe.com/cooling-of-transformer-and-methods-of-cooling.html#AirNatural\(AN\)](https://circuitglobe.com/cooling-of-transformer-and-methods-of-cooling.html#AirNatural(AN)) (viděno dub. 17, 2021).
- [21] „Chladicí systém a metody transformátorů Elektrické 4U". <https://www.electrical4u.com/transformer-cooling-system-and-methods/> (viděno dub. 17, 2021).
- [22] „Chlazení transformátorů - sova". <https://owlcation.com/stem/Cooling-of-transformers> (viděno dub. 17, 2021).
- [23] „Metody chlazení transformátoru | electriceasy.com". <https://www.electricaleasy.com/2014/06/cooling-methods-of-transformer.html> (viděno dub. 17, 2021).
- [24] „Polymer | Top-ArmyShop.cz". <https://www.top-armyshop.cz/slovník-pojmu/polymer> (viděno kvě. 03, 2021).
- [25] J. MLEZIVA, J. ŠŇUPÁREK, *Polymery výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Praha, 2000.
- [26] J. ŠKEŘÍK, *Plasty v elektrotechnice a elektronice*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1991.
- [27] A. HRUBÝ, V. GREGER, M. NĚMEC, J. SILBERNAGEL, *Přehled materiálového inženýrství*. Ostrava: Kovosil, 2010.
- [28] „Reaktoplasty". <https://publi.cz/books/180/21.html> (viděno kvě. 06, 2021).
- [29] „Epoxid". <https://cs.dbpedia.org/page/Epoxid> (viděno kvě. 26, 2021).

- [30] P. MICHLÍČEK, *Simulace odlévání epoxidu do forem přístrojových transformátorů a senzorů vysokého napětí*. Brno, 2007.
- [31] „Epoxidová pryskyřice nachází široké uplatnění". <https://www.chytrebydleni.cz/rekonstrukce/epoxidova-pryskyrice-nachazi-siroke-uplatneni> (viděno kvě. 26, 2021).
- [32] „Vysoce výkonné pryskyřice pro ochranu elektroniky". <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:35698/z-aktualniho-vydani-casopisu-vysoce-vykonne-pryskyrice-pro-ochranu-elektroniky> (viděno kvě. 26, 2021).
- [33] „(No Title)". https://www.g3.cz/img/Katalog/Elektro/3M_Pryskyrice_a_zalev.hmoty.pdf (viděno kvě. 08, 2021).
- [34] „Výhody suchých transformátorů SGB".
- [35] V. Mentlík, *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006.
- [36] J. MUCHA, *Diagnostika vlastností elektroizolačních hmot*. Brno, 2014.
- [37] „Ekologické produkty z celulózy | EKO-plasty.cz - ekologické produkty, drogerie, nádobí, domácnost". <https://www.eko-plasty.cz/produkty-z-celulozy/> (viděno kvě. 26, 2021).
- [38] „Transformer Insulation Materials and Ageing", in *Transformer Ageing*, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 2017, s. 1–33.
- [39] „Millisecond Pulsed Films Unify the Mechanisms of Cellulose Fragmentation | Chemistry of Materials". <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemmater.6b00580> (viděno kvě. 09, 2021).
- [40] J. KOMÁREK, *Deriváty celulózy*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966.
- [41] „Deriváty celulózy | Techportál.cz". <https://www.techportal.cz/33/derivaty-celulozy-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1GxiWg1SjfvX08/> (viděno kvě. 26, 2021).
- [42] E. Šnévajsová, „Chemické úpravy celulózy pro použití v polymerních kompozitech".
- [43] „Stárnutí celulózové izolace v transformátorech AGC odpadní olej znovu definuje odvodnění základního oleje". <https://agcinternational.com/the-aging-of-cellulose-insulation-in-transformers.htm> (viděno kvě. 09, 2021).
- [44] M. H. G. Ese, K. B. Liland, C. Lesaint, a M. Kes, „Esterification of low molecular weight acids in cellulose", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, roč. 21, č. 2, s. 662–665, 2014, doi: 10.1109/TDEI.2013.004238.
- [45] „IEC 60216-1:2013 Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 1: Ageing procedures and evaluation of test results." .

- [46] „(No Title)".
<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/11184/ThermalDegradationAssessment.pdf?sequence=3&isAllowed=y> (viděno kvě. 11, 2021).
- [47] C. A. Fernández-Diego Ortiz I A Carrascal I Fernández C J Renedo F Delgado S Diego, C. Fernández-Diego, Á. A. Ortiz Á I Fernández Á C J Renedo Á F Delgado, a I. A. Carrascal Á S Diego, „Damage assessment of transformer Kraft paper insulation aged in mineral and vegetable oils", doi: 10.1007/s10570-019-02246-x.
- [48] „Vlastnosti desky transformátoru - elektrická izolace".
<https://dielectricmfg.com/knowledge-base/transformer-board/> (viděno kvě. 15, 2021).
- [49] „Elektrotechnická lepenka od společnosti Techlep - Časopis Elektro - Odborné časopisy". <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/clanek/elektrotechnicka-lepenka-od-spolecnosti-techlep--1855> (viděno kvě. 15, 2021).
- [50] „DLX - Elektroizolačné materiály". <http://www.dlx.sk/sk/stranka.php?article=34> (viděno kvě. 15, 2021).
- [51] „Transformátorový olej: testování, typy a vlastnosti | Elektrické 4U".
<https://www.electrical4u.com/transformer-insulating-oil-and-types-of-transformer-oil/> (viděno kvě. 15, 2021).
- [52] „Transformer Oil and You in 2021 - RecondOil". <https://recondoil.com/transformer-oil/> (viděno kvě. 15, 2021).
- [53] T. O. Rouse, „Mineral insulating oil in transformers", *IEEE Electr. Insul. Mag.*, roč. 14, č. 3, s. 6–16, 1998, doi: 10.1109/57.675572.
- [54] „Údržba transformátorového oleje".
<https://electricenergyonline.com/energy/magazine/172/article/Transformer-Oil-Maintenance.htm> (viděno kvě. 17, 2021).
- [55] S. Jia LIU, „Performance Comparison and Selection of Transformer Fluid", doi: 10.1051/02009.
- [56] „TRANSMISSION AND DISTRIBUTION".
- [57] P. Rozga, „Properties of new environmentally friendly biodegradable insulating fluids for power transformers", *Annu. Int. Interdiscip. Conf.*, roč. 5, č. 1, s. 24–26, 2013. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4444533/> (viděno kvě. 18, 2021).
- [58] N. I. A. Katim, M. T. Ishak, N. A. M. Amin, M. H. A. Hamid, K. A. Ahmad, a N. Azis, „Lightning Breakdown Voltage Evaluation of Palm Oil and Coconut Oil as Transformer Oil under Quasi-Uniform Field Conditions", *Energies*, roč. 11, č. 10, s. 2676, říj. 2018, doi: 10.3390/en11102676.
- [59] A. K. Karmaker, M. M. Sikder, M. J. Hossain, a M. R. Ahmed, „Investigation and Analysis of Electro-physical Properties of Biodegradable Vegetable Oil for Insulation and Cooling Application in Transformers", *J. Electron. Mater.*, roč. 49, č.

- 1, s. 787–797, 2020, doi: 10.1007/s11664-019-07693-7.
- [60] S. S. Kumar, M. W. Iruthayarajan, a M. Bakrutheen, „Investigations on the suitability of rice bran oil and corn oil as alternative insulating liquids for transformers", *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, roč. 11, č. 1, s. 10–14, led. 2016, doi: 10.1002/tee.22182.
- [61] E. Taslak, C. Kocatepe, O. Arkan, a C. F. Kumru, „Electrical Analysis of Corn Oil as an Alternative to Mineral Oil in Power Transformers", *Int. J. Electr. Commun. Eng.*, roč. 9, č. 8, s. 873–877, 2015. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/281454396_Electrical_Analysis_of_Corn_Oil_as_an_Alternative_to_Mineral_Oil_in_Power_Transformers (viděno kvě. 22, 2021).
- [62] „Egbuna Samuel1". .
- [63] H. M. Wilhelm, V. Franch, L. Tulio, a A. F. Franch, „Compatibility of transformer construction materials with natural ester-based insulating fluids", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, roč. 22, č. 5, s. 2703–2708, říj. 2015, doi: 10.1109/TDEI.2015.004755.
- [64] K. Zafeiris *et al.*, „INVESTIGATION ON NATURAL ESTER FLUIDS CONCERNING GASSING AND COMPATIBILITY WITH TRANSFORMER MATERIALS".
- [65] B. Komanschek, „112/478/np", 2020.
- [66] Y. Wang, X. Zhang, H. Yu, X. Li, a Y. Xu, „Investigation on the compatibility of transformer construction materials with natural ester", *Proc. - IEEE Int. Conf. Dielectr. Liq.*, roč. 2019-June, č. Icdl, s. 2019–2022, 2019, doi: 10.1109/ICDL.2019.8796536.