

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Izolační materiály ve vysokonapět'ové technice

**vedoucí práce: Ing. Josef Pihera Ph.D.
autor: Pavel Hawelka**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel HAWELKA**
Osobní číslo: **E08B0062P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Izolační materiály ve vysokonapěťové technice**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

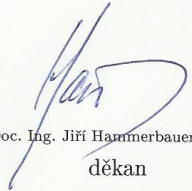
1. Vytvořte přehled izolačních systémů ve VN technice.
2. Proveďte přehledné rozdělení izolačních systémů podle typu elektrických strojů.
3. Popište vybrané izolační systémy z hlediska jejich vlastností.
4. Proveďte srovnání vlastností izolačních systémů jednotlivých výrobců.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

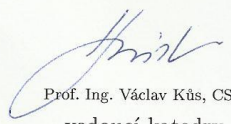
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Pihera, Ph.D.
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 17. října 2011
Termín odevzdání bakalářské práce: 3. června 2012


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Tato bakalářská práce je zaměřena na izolační materiály a systémy ve vysokonapěťové technice. Je zde popsáno rozdělení izolačních materiálů a jsou zde popsány některé vlastnosti jednotlivých materiálů. Dále jsou zde uvedeny způsoby výroby izolačních systémů.

Klíčová slova

Izolační materiál, izolace, izolační systém, pevné izolanty, kapalně izolanty, plynné izolanty

Insulating materials used in high voltage devices

Abstract

This bachelor thesis is focused on insulating materials and systems in the high voltage technology. It describes division of insulating materials and there are described some characteristics of each material here. In addition, there are listed the manufacture methods of insulation systems here.

Key words

Insulation material, insulation, insulation system, solid insulators, insulators liquid, gaseous insulators

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou/ diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 7.6.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Josefu Piherovi Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

V neposlední řadě mi je milou povinností poděkovat rodičům, kteří mě jak morálně, tak finančně během celého studia podporovali, a všem vyučujícím, kteří se na mém vzdělání na ZČU podíleli.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
1 ROZDĚLENÍ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	10
1.1 PLYNNÉ IZOLANTY	10
1.2 KAPALNÉ IZOLANTY	11
1.3 PEVNÉ IZOLANTY	11
2 IZOLAČNÍ SYSTÉMY	14
2.1 IZOLAČNÍ SYSTÉM TRANSFORMÁTORŮ	14
2.1.1 Materiály pro izolační systémy transformátorů	14
2.1.1.1 Fluorid sýrový SF ₆	14
2.1.1.2 Papír	15
2.1.1.2.1 Druhy papírů	16
2.1.1.2.1.1 Hlazený izolační papír Thermavolt	16
2.1.1.2.1.2 Thermal shield	17
2.1.1.2.1.3 CEQUIN I, II	17
2.1.1.3 Oleje	18
2.1.1.3.1 Vývoj v oblasti kapalných izolantů	19
2.1.1.3.2 Technické požadavky na biologicky odbouratelná média na neropné bázi, chemická struktura a užitečné vlastnosti potenciálních produktů	20
2.1.1.3.2.1 Transformátorový olej N-A	21
2.1.1.3.2.2 Olej MIDEL 7131	22
2.1.1.3.3 Životnost transformátoru	22
2.1.1.3.4 Stárnutí transformátorových olejů	23
2.1.1.3.5 Oxidační stárnutí transformátorového oleje	23
2.1.1.3.6 Kaly	24
2.1.1.3.7 Účinky kalů	24
2.2 VYSOKONAPĚŤOVÉ IZOLAČNÍ SYSTÉMY TOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ	25
2.2.1 Systém resin-rich	25
2.2.2 Systém VPI (Vaccum Pressure Impregnation)	27
2.2.3 Porovnání technologií resin-rich a VPI	28
2.3 IZOLAČNÍ MATERIÁLY PRO GENERÁTORY	28
2.3.1 Kollektor Samicanit	28
2.3.2 Samicanit (trubky)	29
2.3.3 Cogemica Tape 608ASR	29
2.3.4 Relanex 45.033	29
2.3.5 Dellite	29
3 POROVNÁNÍ RŮZNÝCH DRUHŮ IZOLACÍ OD RŮZNÝCH VÝROBCŮ	29
4 ZÁVĚR	30
POUŽITÁ LITERATURA	31

Úvod

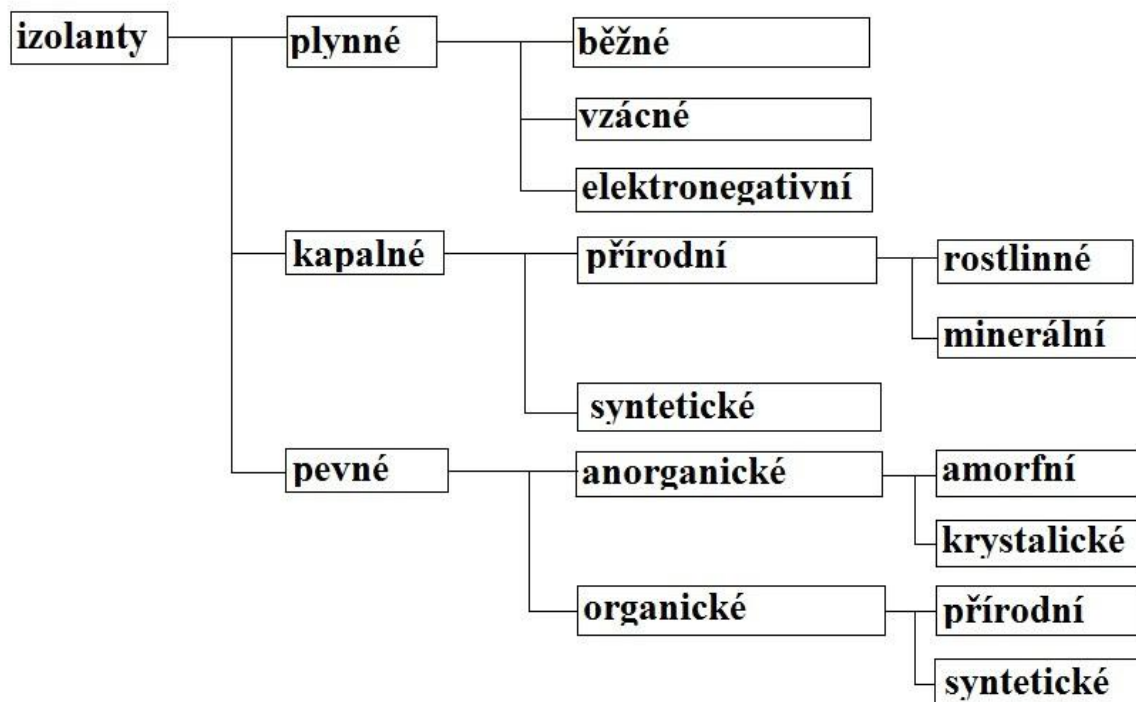
V této bakalářské práci se budu zabývat rozdělením izolačních materiálů pro vysokonapěťovou techniku.

Elektrické zařízení můžeme rozdělit do určitých podsystemů a to do mechanického, magnetického, elektrického, dielektrického a termoventilačního. Z hlediska spolehlivosti a správné činnosti, je nejdůležitější dielektrický podsystem. [1]

Chování dielektrického podsystemu je závislé na fyzikálních vlastnostech jednotlivých elementů. Proto, aby byl zvolen ideální materiál pro daný produkt, je nutné znát přibližné chování izolantů, které vychází z dějů odehrávajících se v jeho struktuře. Při výrobě vznikají interakce, které také pochopitelně ovlivňují jeho vlastnosti. V neposlední řadě je také nutné brát ohled na interakci mezi zařízením a prostředím ve které bude pracovat. [1]

1 Rozdělení izolačních materiálů

Izolační materiály můžeme rozdělit podle skupenství na pevné, plynné a kapalné. Dále se dají tyto materiály rozdělit podle jejich původu (viz Obr. 1).



Obr. 1: Rozdělení izolačních materiálů převzato z [2]

1.1 Plynné izolanty

Plynné izolanty v porovnání s ostatními izolanty mají dielektrické ztráty prakticky nezávislé na frekvenci, mají i nejnižší relativní permitivitu. Plyny mají výhodu v tom že, rovnoměrně vyplní celý prostor a jsou schopny regenerace, to znamená že, po přeskočení obnoví svoje izolační vlastnosti. Porovnání některých používaných materiálů z hlediska elektrické pevnosti je v tab. 1. [2]

Nejčastěji používaným plynným izolantem je vzduch. Používá se například u venkovních vedení, vzduchových kondenzátorů a transformátorů. [2]

Mezi běžné plyny používané k izolačním účelům patří vodík, dusík a oxid uhličitý. Vodík má 14x nižší hustotu a 7x vyšší měrnou tepelnou vodivost než vzduch. Používá se jako chladicí médium u velkých točivých elektrických strojů, odvádí až o 50 % více než vzduch, dále jako umělá atmosféra v elektrických pecích. Dusík, který se používá jako chladicí a izolační látka v suchých výkonových transformátorech. Oxid uhličitý, ten se používá jako

dielektrikum vysokonapěťových kapacitních normálů. [2]

Do skupiny vzácných plynů patří helium, neon, argon, krypton, xenon. Tyto plyny netvoří sloučeniny, jedná se o tzv. inertní plyny. Všechny se používají jako náplně do výbojek. [2]

Nejčastěji používaným elektronegativním plynem je fluorid sírový (SF_6). Dále se zde používají fluorkarbonové sloučeniny, které mají tepelnou odolnost až do $220\text{ }^\circ\text{C}$ a fluorchlorkarbovové sloučeniny, které se používají ve vysokonapěťových transformátorech. [1]

plyn	chemický vzorec	poměr elektrické pevnosti ke vzduchu	bod zkapalnění $^\circ\text{C}$
dusík	N_2	1	-195,8
vodík	H_2	0,6	-253
oxid uhličitý	CO_2	0,9	-78
hexafluoride síry	SF_6	2,3 ÷ 2,5	-63,8

Tab. 1: Porovnání elektrické pevnosti plynů [2]

1.2 Kapalné izolanty

Mají v elektrotechnice široké použití. Používají se jako izolační kapaliny a vzhledem k jejich dobré tepelné vodivosti a viskozitě se používají i jako chladicí média. Stejně jako plynné izolanty dobře vyplňují daný prostor, odvádějí vzniklé teplo a také vyplňují póry tuhých izolantů a tím přispívají k eliminaci výbojové činnosti. Dají se rozdělit podle vzniku na rostlinné oleje, minerální oleje a syntetické kapaliny. [2]

1.3 Pevné izolanty

Pevné izolanty lze rozdělit na anorganické a organické. Anorganické izolanty se dále dělí na amorfni (např. sklo) a krystalické (např. azbest, slída, keramika).

Nejvýznamnějšími amorfními anorganickými izolanty jsou skla. Strukturní uspořádání je ve větší části prostoru chaotické. Uspořádanou strukturu tvoří kyslíkokřemíkové tetraedry SiO_4 u křemičitého skla. Sklovitou strukturu s podobnými vlastnostmi může vytvářet i B_2O_3 , ten tvoří síť trojúhelníků BO_3 – borité sklo. [2]

Vlastnosti skel jsou: je velmi silně polární, jejich relativní permitivita se pohybuje od $\epsilon_r = 3,7$ (čistě křemenné skla) až $\epsilon_r = 16$ (olovnatá skla) u speciálních případů to však může

být i více. U čistého skla se elektrická pevnost pohybuje v rozmezí $200 \div 500 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$, v praxi je ale podstatně menší a to $40 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$. Uplatnění skla je velmi vysoké, používají se v izolační oblasti, pro vn techniku se používá zejména borosilikátové sklo (Simax), pro výrobu skelných vláken hlinitoborokřemičité sklo (Eutal). [2]

Skla se dají rozdělit podle způsobu použití a to na nízkoztrátová, zátavová, obyčejná alkalická, skleněná vlákna, skleněné pájky. [2]

Azbest jsou nazývány dvě skupiny vláknitých silikátových minerálů. Chryzolit je nejčastěji zpracováván, protože se snadno dělí na vlákna o průměru 5 mm a délce $2 \div 100$ mm. Výhody azbestu jsou, že je odolný vůči vysokým teplotám, oxidaci, korozi, biologické degradaci, kyselinám a zásadám, je ohebný a nehořlavý. Použitý nejdelších vláken je v elektronice pro pryže, kratší vlákna pro lepenku a papír. Z nejkratších vláken se dělaly azbestocementové desky. Azbestový papír, který byl tvrzený silikonovou pryskyřičí byl používán jako izolant teplotní třídy H, azbestová lepenka se používala pro vnitřní izolace plechových krytů vypínačů. Lakovaný azbestový papír byl používán jako mezizávitová izolace v elektrických točivých strojích. Azbest má však jednu velkou nevýhodu a to že je zdravotně závadný, proto se jeho použití velmi omezuje a tam kde se dá, se azbest nahrazuje materiály na bázi skleněných nebo keramických vláken, kevlaru, polypropylenu a polyakrylnitrilu. Jeho použití je možné jenom tam kde se nedají nahradit jeho vlastnosti jinými materiály, ale musí se dodržovat předepsaná technologie. [2]

Slída je krystalický minerál s výrazně vrstvenou strukturou. Využívá, pro technické účely, se slída draselná – muskovit a slída hořečnatá – flogopit. Jejich elektroizolační vlastnosti jsou výborné (viz Tab. 2). Tyto vlastnosti se liší pouze ve směru roviny krystalu a ve směru kolmém. Jejich elektrická pevnost je dána obsahem vody a jejich dielektrické ztráty jsou výrazně závislé na teplotě a frekvenci. Čistá slída se moc pro izolanty nepoužívá. Většina slídy se zpracovává chemickým (Bardetovým) nebo mechanickým (Heymannovým) způsobem, pak je to tzv slídový papír – remika (rekonstruovaná slída). To je rozmělněná slída na jemné částičky a poté zpracovaná na papírenských strojích. Takto vyrobená remika není možná využít jako samostatný izolant, proto se musí využít ve formě kompozitů, kde je ještě nutná nosná složka a pojivo. Tímto způsobem se vyrábí fólie (remikafólie) nebo pásky, jejichž hlavní využití je jako izolační systém elektrických stojů. [2]

vlastnost	jednotka	muskovit	flogopit
hustota	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2,7 ÷ 3,2	2,6 ÷ 2,8
kalcinační teplota	$^{\circ}\text{C}$	700 ÷ 800	900 ÷ 1000
tepelná vodivost	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0,3 ÷ 0,56	0,5 ÷ 0,6
ϵ_r	-	6 ÷ 7	5 ÷ 6
$\text{tg } \delta$	-	1 ÷ $3\cdot 10^{-4}$	10 ÷ $50\cdot 10^{-4}$
E_p	$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$	60	45
ρ_v	$\Omega\cdot\text{m}$	$10^{13} \div 10^{14}$	$10^{10} \div 10^{12}$
max. provozní teplota	$^{\circ}\text{C}$	600	900

Tab. 2: Vlastnosti muskovitu a flogopitu [2]

Jedním z nejdůležitějších polykrystalických materiálů pro elektrotechniku je keramika. Její využití je od izolačních hmot až po speciální dielektrika. Vyrábí se z práškové látky. Požadovaný trav dostaneme díky formám, kde je tato hmota v peci vypálena. [2]

Z chemického hlediska jsou nejdůležitější oxid hlinitý, oxid křemičitý a voda. Po vypálení obsahuje fázi krystalickou, ta určuje hlavně fyzikální vlastnosti, amorfni, ta určuje technologické vlastnosti a plynnou, tato fáze ale bohužel nepříznivě ovlivňuje elektrické vlastnosti.

Vlastnosti keramik:

- odolnost vůči vysokým teplotám a prudkým změnám teplot,
- odolnost vůči vlhkosti, chemickým vlivům, ionizujícímu záření,
- žáruvzdornost,
- stabilita fyzikálních a chemických vlastností,
- dostupnost surovin na domácím trhu. [2]

Nepříznivé vlastnosti u keramik jsou křehkost, velká smrštivost při spékání a po vypálení se dají upravovat jen broušením. Navíc když se keramika vypálí, má povrch porézni, proto se musím glazurovat. [2]

Keramika se dá rozdělit podle chemického složení a struktury, ty mají vliv na technologii a podmiňují charakteristické vlastnosti (viz. Tab. 3), do následujících skupin:

- keramiky silikátové – to je směs krystalických oxidů kovů a silikátů s podílem sklené fáze (např. porcelán, kamenina, steatit, ultraporcelán, korund),
- keramiky bezsilikátové – to jsou sloučeniny nebo pevné roztoky oxidů kovů (feroelektrika, piezoelektrika, keramické polovodiče),

- keramiky oxidové – ty jsou vyrobené z jediného žáruvzdorného oxidu kovu (např. Al_2O_3 , MgO , ThO_2 , UO_2),
- keramiky bezoxidové – které jsou vyrobené z vysokotavitelných sloučenin (např. karbidy, nitridy, boridy). [2]

Organické můžeme rozdělit na přírodní a syntetické. Pevné izolanty, na rozdíl od plynných a kapalných nejsou schopny regenerace. [2]

2 Izolační systémy

2.1 Izolační systém transformátorů

Tyto izolační systémy mohou být rozděleny podle jejich provedení do dvou základních skupin. [1]

První skupinu jsou suché transformátory, u nichž není použitý tekutý impregnant. Jako hlavní chladivo a pracovní prostředí je u nich plyn. Může to být vzduch nebo fluorid sírový SF_6 , proto mají omezené možnosti. Jako izolační prvky se používají papír, Nomex, lepenky, kombinované materiály. [1]

Druhá skupina jsou zalévané stroje, cívky jsou zalité do pryskyřice. Příkladem může být zalévací pryskyřice na bázi alifatických glycidyleterů s tvrdidlem. [1]

2.1.1 Materiály pro izolační systémy transformátorů

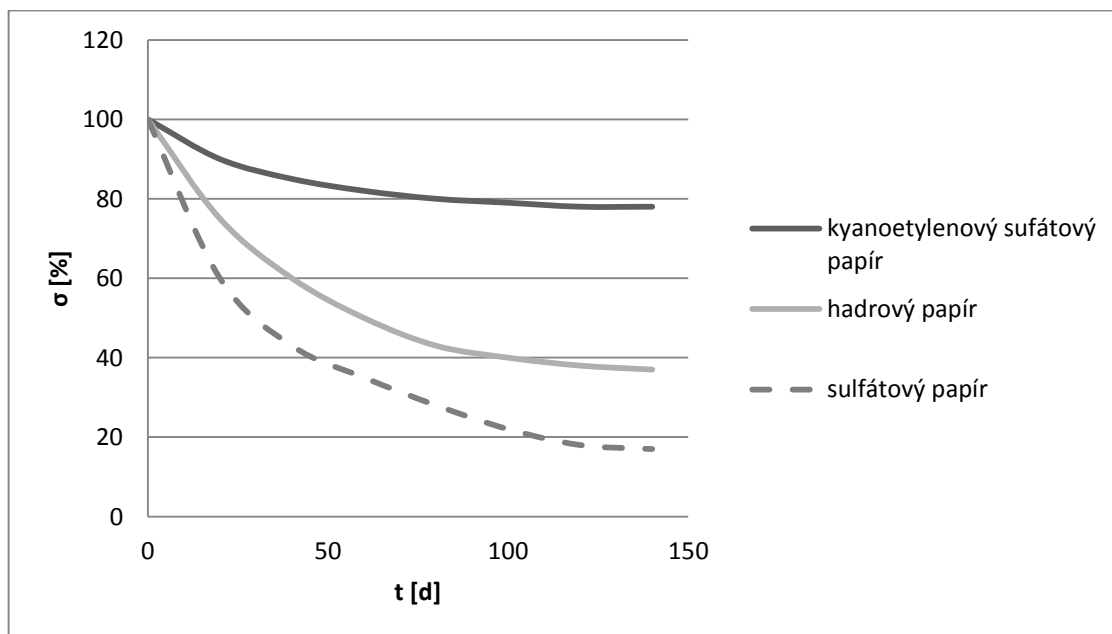
2.1.1.1 Fluorid sírový SF_6

Fluorid sírový SF_6 . Tento plyn je bezbarvý, bez zápachu, netoxický. Jeho elektrická pevnost je téměř třikrát větší než u vzduchu a má vysokou vypínací schopnost, která je téměř desetkrát větší než u vzduchu. Po uhašení oblouku ve zlomku sekundy opět zregeneruje. Permittivita se blíží jedné a má prakticky neměřitelné dielektrické ztráty. Je chemicky netečný, při normálních teplotách je stálý. Jeho nevýhodou je to, že je pětikrát těžší než vzduch a tím pádem je nebezpečný v uzavřených prostorech (výkopech, kabelové šachty). [1]

2.1.1.2 Papír

Používá se papíru vyrobeného ze sulfátové bučiny. Nesmí obsahovat látky, které by měly vliv na kvalitu transformátorového oleje a musí také být množství elektricky vodivých částic v papíru co nejmenší. Zvláště důležitá je také rovnoměrnost papíru. Papírová izolace je při sušení a impregnování ale hlavně při provozu transformátoru velice tepelně namáhána, je tepelná stálost u papíru důležitým ukazatelem kvality. Z důvodů zvětšení zatížitelnosti transformátorů, byl vyvinut papír, který je vyrobený z kvanoetylenové sulfátové bučiny. U tohoto papíru probíhá tepelná destrukce mnohem pomaleji než u papírů z neupravené sulfátové bučiny (obr. 2). [2]

Nejčastější tloušťka papíru pro izolování vinutí transformátorů bývá 30 až 120 μm , objemová váha 0,7 g/cm^3 . Těchto papírů se využívá na izolace vodičů nebo jako izolace mezi jednotlivé polohy vinutí. Na izolaci vývodů se někdy využívá krepovaného papíru. [2]



Obr. 2, Vliv stárnutí na pevnost v tahu převzato z [2]

Pro elektrotechniku se papír a lepenka většinou vyrábí z nebělené sulfátové buničiny a jen v menší míře ze sulfitové buničiny. Pomocí sulfátového způsobu výroby se dostane buničina s velkou pevností, což u sulfitového způsobu výroby není možné. Buničina s velkou pevností se nazývá „Kraft“. U určitých druhů lepenek se do papíroviny přidává bavlněná a lněná hadrovina. [2]

Pro výrobu papíru se používají stroje s dlouhými drátěnými sítě. Po odvodnění na síti se odvádí mokrý „papírový“ pás, který je nesený plstí do lisové části. Poté prochází přes sušící část, hladící zařízení, chladící válce, vlhčící zařízení na navíjecí zařízení. Tyto kotouče

jsou dosti široké proto poté dochází k jejich rozřezání na užší kotouče, buď podle normy nebo podle požadavků odběratele. Při výrobě dvouvrstvých papírů, jsou používány stroje se dvěma sítými umístěními nad sebou. Ke spojení mokré papírové pásky dojde na konci sít, projdou lisovací částí a dále již postupují jako jedna vrstva. Výhodou dvouvrstvých papírů je jejich větší rovnoměrnost a díky tomu lepší mechanické vlastnosti a větší elektrická pevnost než u jednovrstvého papíru. [2]

Pro výrobu lepenek se využívají stroje s dlouhým sítem, dále se také používají stroje s jedním nebo větším počtem bubnových sít. U těchto strojů je způsob výroby takový, že bubnové síto se otáčí v nádobě, která je naplněna papírovinou, nabírá na sebe vlákna. Voda projde sítem a je odváděna po stranách bubnu. Na velký formátový válec se navíjí mokrá „papírový“ pás. Když je dosaženo požadované tloušťky tak se mokrá lepenka, která je na formátovém válci, ručně rozřeže a pak se suší mimo lepenkový stroj na vysoušecím válci. Takto vyrobené lepenky se říká ruční lepenka. Když je potřeba může se po vysušení ještě hladit na kalandru nebo leštit. Tato lepenka se dodává v arších. Další způsob je kontinuální (strojová lepenka). U tohoto způsobu se používá většího počtu bubnových sít a mokré „papírové“ pásy se vrství a jdou dále do lisovací a sušící části. Tato lepenka se dodává v kotoučích. [2]

2.1.1.2.1 Druhy papírů

2.1.1.2.1.1 Hlazený izolační papír Thermavolt

Tento anorganický papír byl vyvinut, aby splnil požadavky na vysokou účinnost při použití ve vysokoteplotních suchých transformátorech. Má dobré dielektrické charakteristiky a dobrou tepelnou vodivost, díky tomu je vhodný na izolaci mezi páskovým vinutím v cívkách. Je používán jako hlavní izolace koster cívek, na izolaci fází a proklad vinutí pro konstrukce s páskovým vinutím. Výhody u tohoto papíru jsou vysoký obsah anorganických látek, výborná tepelná vodivost, dobrá odolnost proti dielektrickému průrazu a nízká absorpce vlhkosti. Jednotlivé vlastnosti jsou popsány v tab. 3.[3]

Jmenovitá tloušťka	mm	0,8	0,13	0,18	0,25
Základní hmotnost	g/m ²	92	168	260	385
Pevnost v tahu, stř.	kN/m	1,1	3,2	4,4	7
Poměrné prodloužení	%, min.	3	3	3	3
Dielektrická pevnost	kV	1	3	4	6
Tepelná vodivost	W/mK	0,21	0,21	0,21	0,21

Tab. 3: Vlastnosti Thermavoltu [3]

2.1.1.2.1.2 Thermal shield

Je pro aplikace kde se vyžaduje odolnost proti dlouhodobému působení vysokých teplot nebo proti chemikáliím, rozpouštědel a většiny kyselin a zásad. Díky tomu že není citlivý na hydrolyzu lze ho používat v mnoha aplikacích bez sušení. Lze ho laminovat, impregnovat či lakovat, díky čemuž se zlepší jeho funkční charakteristiky. Používá se pro izolace koster cívek, izolace fází, polohová izolace a jako proklad vinutí pro cívky s fóliovým vinutím. [3]

Je kompatibilní s oleji a odolný proti rozkladu při vyšších teplotách, které vznikají při přetížení. Je dodáván v šířkách do 1,65 m. Jeho vlastnosti jsou popsány v tab. 4. [3]

Jmenovitá tloušťka	mm	0,05	0,08	0,1	0,13	0,18
Základní hmotnost	g/m ²	44	62	80	95	112
Pevnost v tahu, stř.	kN/m	1,6	2,8	4,4	4,9	6
Prodloužení, stř.	%,min.	8	9	10	12	14
Dielektrická pevnost	V	350	450	500	600	700

Tab. 4: Vlastnosti ThermalShieldu [3]

2.1.1.2.1.3 CCEQUIN I, II

Je to papír s největším obsahem anorganických látek. Tvoří ho zejména skleněná vlákna a mikrovlákna, anorganická plniva a méně než 10 % organického pojiva. Je dlouhodobě funkční při provozních teplotách až 250°C. Dodává se v tloušťkách od 0,13 mm do 0,76 mm. Typické vlastnosti pro tento materiál jsou popsány v tab. 5. [3]

Má výbornou tepelnou vodivost, díky čemuž se zvyšuje životnost, protože dokáže lépe odvádět nahromaděné teplo. U cívek suchých transformátorů vykazuje až o 10-15°C nižší

průměrnou teplotu. Další jeho vlastností je, že má malou absorpci vlhkosti a to i ve velmi vlhkých podmínkách, takže před lakováním není nutno provádět tolik vysoušecích cyklů. Jeho vlastnosti jsou v tab. 6.[3]

Jmenovitá tloušťka	mm	0,13	0,18	0,25	0,38	0,63	0,76
Základní hmotnost	kg/m ²	0,13	0,19	0,27	0,41	0,67	0,81
Pevnost v tahu, stř.	kN/m	1	1,6	2,1	2,8	3,5	4
Poměrné prodloužení	%	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Dielektrická pevnost	kV	1	1,3	1,8	2,6	3,2	3,8
Absorbce vlhkosti	%	<1	<1	<1	<1	<1	<1

Tab. 5: Vlastnosti CeQUIN I [3]

Jmenovitá tloušťka	0,76	1	1,5
Základní hmotnost	0,81	1,08	1,67
Pevnost v tahu, stř.	8,9	9,6	10,6
Poměrné prodloužení	<2	<2	<2
Dielektrická pevnost	6,5	8,8	9,2
Absorbce vlhkosti	<1	<1	<1

Tab. 6: Vlastnosti CeQUIN II [3]

2.1.1.3 Oleje

Kapalné izolanty mohou být buď přírodní (minerální) nebo syntetické kapaliny, které v transformátorech plní funkci izolační i chladicí. [2]

Minerální oleje získávají se pomocí destilace ropy s následnou rafinací. Směsi různých uhlovodíků, jejichž chemické složení je velmi komplikované. Rozdělujeme podle druhu použité ropné suroviny a podle toho jakých uhlovodíků obsahují větší množství. Oleje parafinické, které obsahují větší podíly parafinických uhlovodíků. Další druh tvoří naftenické oleje, které jsou tvořené jádrem naftenického a aromatického typu i v kombinaci s lineárními řetězci. [2]

Průrazné napětí u minerálních olejů se pohybuje mezi 60 až 70 kV/2,5 mm, $\text{tg } \delta = 0,001$
 $\epsilon_r = 2,1 \div 2,4$.

Syntetické izolační kapaliny můžeme rozdělit podle způsobu a složení na:

- kapaliny, které vznikly polymerací nenasycených uhlovodíků, takto vzniklé kapaliny jsou nepolární, ekologicky nezávadné látky a mají stabilní vlastnosti,
- fluorované sloučeniny, které jsou stálé do 500 °C a mají lepší vlastnosti než minerální oleje,
- organické estery,

- silikonové kapaliny, které jsou nehořlavé, ekologicky nezávadné, teplotně stálé v širokém rozmezí teplot, s výbornými elektroizolačními vlastnostmi. [2]

Průrazné napětí u syntetických izolačních kapalin se pohybuje mezi 60÷105 kV / 2,5 mm, $\text{tg } \delta = 0,001 \div 0,0002$, $\epsilon_r = 2,5 \div 2,8$. Vybrané vzorky jsou popsány v tab. 7. [2]

druh kapaliny	hustota $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	T_1 °C	ϵ_r 50 Hz	$\text{tg } \delta$ 50 Hz	E_p $\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$
isopropyldifenyl (IPD)	988	-55	2,8	0,002	23
dioktylfthalát (DOP)	990	-45	5,2	0,01	13,8
polydimetylsiloxan	960	-55	2,7	0,001	42

Tab. 7: Charakteristické vlastnosti vybraných syntetických kapalných izolantů [2]

2.1.1.3.1 Vývoj v oblasti kapalných izolantů

Pro elektrické přístroje vn a vvn je nejlepším izolačním médiem izolační olej na bázi ropy. Bohužel kvůli jejímu ubývání, bude nutné používání minerálního oleje omezit jeho spotřebu nebo ho nahradit. Proto, je důležité v předstihu hledat v hodné materiály, kterými bude možné ropné produkty nahradit. [4]

Již na počátku 19. století se pro konstrukci elektrických přístrojů nn a vn používaly přírodní rostlinné izolační oleje. Byli to oleje rostlinného původu a to oleje lněné nebo lisované z řepky olejné. [4]

Tyto rostlinné oleje mají výhodu, že se lépe odbourávají. Další výhodou je, že tyto elektroizolační kapaliny jsou prosazovány zejména kvůli ochraně životního prostředí.

Díky zvyšování spotřeby ropných produktů, také vznikaly i první výrobky syntetických izolačních olejů. Tyto výrobky se začali dostávat na trh a postupně používat v druhé polovině 20. století. Pro jejich výrobu se dalo využít poznatků z automobilového průmyslu, neboť zde je snaha vytvářet ekologicky nezávadné oleje velmi žádané, protože spotřeba motorových olejů je zde daleko větší ve srovnání se spotřebou v elektroizolační technice. [4]

Po prozkoumání trhu v oblasti olejů je patrné, že některé oleje by se díky jejich vlastnostem, uvedených v katalogových listech dali využívat i v elektroizolační technice a to hlavně díky jejich dobré biologické odbouratelnosti. Bohužel některé by se dali použít jen v některých případech a to jen na nižším napětí, ale i díky tomu by se snížila spotřeba ropných olejů. Díky průmyslové výrobě se dají vytvořit a využít oleje motorové, hydraulické také se vyrábí velmi kvalitní oleje využívané v leteckém provozu ale i oleje, které se používají

v elektrotechnice. Musí se ale jejich vhodnost v této oblasti řádně ověřit v laboratořích. Bohužel některé lze využít jen ve speciálních případech. V současnosti se na trhu vyskytuje a používá řepkový olej. Díky svým vlastnostem je hlavně použitelný jako automobilové palivo, ale díky určitým úpravám se dá použít jako izolant na hladině nn. Vlastnosti, které jsou velmi podobné, má etylester řepkového oleje s přidanými ropnými uhlovodíky. Velice vzácně se objevují i netoxické silikonové elektroizolační kapaliny, které se ovšem nedají mísit s jinými oleji. [4]

Syntetické elektroizolační kapaliny, které jsou na našem trhu k dispozici jsou např. MIDEL 7131, ARAL 4569, SHELL FLUID 4600, tyto oleje se však vyznačují vyšší cenou mají však lepší biologickou odbouratelnost, dále mají vyšší hustotu, viskozitu a sníženou hořlavost. [4]

Největším reprezentantem v oblasti odbouratelných elektroizolačních kapalin jsou především japonské patenty a publikace. Jsou patentovány různé kompozice, které se odlišují strukturou a použitými estery a změnami aditivace. Zkoumají se elektroizolační vlastnosti přírodních olejů. Využití nových elektroizolačních kapalin se také věnují vědci v USA, odkud jsou uváděny i první zkušenosti. [4]

2.1.1.3.2 Technické požadavky na biologicky odbouratelná média na neropné bázi, chemická struktura a užitečné vlastnosti potenciálních produktů

U biologicky odbouratelných elektroizolačních olejů, které jsou na přírodní nebo syntetické bázi, jsou patrné odlišné chemicko-fyzikální vlastnosti než u ropných produktů, což se promítne do možností využití. Tyto rozdílné chemicko-fyzikální vlastnosti syntetických olejů, byly potvrzeny i při měřeních a praktickém ověřování. Proto chceme-li použít tyto oleje, musí se jejich konstrukce a provoz elektrických zařízení vlastnostem těchto olejů přizpůsobit. [4]

Kapalně izolanty, které se dají použít jako izolační médium do elektrických zařízení a mají podobné vlastnosti, jako minerální izolační oleje můžeme rozdělit do čtyř skupin:

- rostlinné kapaliny, ty jsou však použitelné jen v omezené míře,
- syntetické kapaliny s obsahem fluoru a chloru, jejich výhodou je že jsou nehořlavé, ale s problematickou ekotoxicitou,
- syntetické silikonové kapaliny, mají velice dobré nejen izolační ale zároveň

velice dobré chladicí vlastnosti a proto se používají jako izolační a chladicí média do elektrických zařízení,

- Syntetické kapaliny na přírodní bázi nebo esterifikaci, vyrábí se za pomoci chemické syntézy a mají uzavřenou strukturu tak, aby se odstranila centra nestability v oblastech, kde již ropné oleje nevyhovují. Některé se dají použít jako kapalné elektroizolanty. [4]

Rostlinné oleje jsou daleko jednodušší skupinou látek vzájemně podobného chemického složení vysokovroucího charakteru, oproti ropným olejům, které jsou multikomponentní směsí uhlovodíků určitého destilačního rozmezí. Velmi podobně je na tom situace u symetrických esterů polyfunkčních alkoholů, které se po syntéze už často neretifikují a to z důvodu aby se zachovala variabilita produktů. Z tohoto důvodu musí tedy technické požadavky na kapalné izolanty respektovat odlišnosti v chemickém složení, to se projeví např. u esterů při podobných elektroizolačních vlastnostech v teplotně-viskozitních parametrech, v technicko-oxidační stabilitě a ve snížení hořlavosti. Dalším odlišným parametrem bývá hustota, která se blíží 1000 kg/m^3 , to má za následek zvýšení hmotnosti náplně elektroizolačního oleje v elektrickém zařízení a to oproti ropnému oleji až o 15 %. U větších objemů už je to celkem významná odlišnost a je nutné s tím počítat již při projekci zařízení. Z důvodu toho, že je vyšší kinetická viskozita u syntetických kapalin, budou také vyšší energetické náklady na provoz oběhových čerpadel a dále se to také projeví ve zhoršení přestupu tepla. Protože syntetické kapaliny mají bod vzplanutí o cca $100 \text{ }^\circ\text{C}$ vyšší, než běžné trafooleje na ropné bázi můžeme je tedy považovat za obtížně hořlavé. Esterové oleje mají bohužel takovou vlastnost, že rozpouští větší množství vody než ropné oleje, to se nám negativně projeví na elektrických vlastnostech. Proto, aby byla zajištěna co nejvyšší oxidační stabilita, u esterových olejů je nutné předpokládat, že budou obsahovat nenasycené vazby, tak jak je tomu u nemodifikovaných rostlinných olejů. [4]

2.1.1.3.2.1 Transformátorový olej N-A

Tento olej je neinhibovaný s vynikajícími elektroizolačními vlastnostmi. Vyrábí se z jakostního hydrogenovaného hluboce rafinovaného základového oleje. Má velmi dobrou oxidační stabilitu a dá se mísit s neinhibovanými izolačními oleji. [5]

Je určen jako izolační a chladicí kapalina do transformátorů všech napěťových hladin, včetně strojů nejvyšších napětí a výkonů. Může se použít do spínačů, kondenzátorů a jiných elektrických zařízení. Jeho charakteristické vlastnosti jsou nízký bod tuhnutí, vysoké

povrchové napětí, velmi dobré elektroizolační vlastnosti, vynikající oxidační stabilitu a dlouhou životnost.[5]

2.1.1.3.2 Olej MIDEL 7131

Jde o biologicky odbouratelný, nehořlavý transformátorový olej. JE na esterové bázi typu T1, je také ekologicky šetrný. Jeho vlastnosti jsou v tab. 8. [6]

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Hustota při 20 °C	g/ml	0,97
Kin. visk. při 40 °C	mm ² /s	28
Kin. visk. při -20 °C	mm ² /s	1500
Bod vzplanutí	°C	275
Bod hoření	°C	322
Bod tuhnutí	°C	-60
Průrazné napětí	kV/2,5mm	>70
Dielektrický ztrátový činitel při 90 °C, 50 Hz	-	<0,03
Měrný odpor (stejn. proud) při 90 °C	GΩ·m	>50

Tab. 8: Vlastnosti oleje MIDEL 7131 [6]

2.1.1.3.3 Životnost transformátoru

Životnost u transformátoru je závislá hlavně na životnosti papírové izolacevinutí, protože její mechanická pevnost se postupně snižuje. Papírová izolace má totiž obvykle výrazně kratší životnost než ostatní konstrukční prvky. Pokud není ošetřována olejová náplň transformátoru, tento rozdíl mezi životností papírové izolace a ostatních konstrukčních materiálů se ještě více zvětší. Existuje totiž vzájemná závislost mezi stárnutím oleje a papíru: produkty, které vzniknou rozkladem oleje, totiž absorbuje papír a naopak a to má za následek urychlení stárnutí. Pokud se totiž zestárlá olejová náplň nevymění nebo nezregeneruje, urychlí se tím nevratná degenerace papírové izolace a tím pádem rychleji dojde k havárii transformátoru. [7]

U transformátoru je, během provozu, možná jen výměna pouze olejové náplně. Její životnost je však asi dvakrát až třikrát menší než životnost papíru, když tedy nedojde k urychlení degradace vlivem ukončení životnosti olejové náplně. Proto je velice důležité znát stav olejové náplně (tj. diagnostikovat) a díky těmto znalostem vykonávat efektivní údržbu, což zahrnuje zejména sušení a výměnu nebo regeneraci před tím než dojde k ukončení životnosti olejové náplně. Pokud se toto zanedbá, dojde ke snížení životnosti transformátoru.

To vede k výrazné ekonomické ztrátě, při předčasném ukončení doby života, ale také se musí brát v potaz hledisko ekologie v případě havárie. [7]

2.1.1.3.4 Stárnutí transformátorových olejů

Za stárnutí oleje lze považovat určité pochody, které nastávají při provozních podmínkách a při nichž dochází ke změnám fyzikálních, chemických nebo elektrických vlastností a to způsobí zmenšení provozní bezpečnosti z hlediska izolačních vlastností. Důvody snížení provozní bezpečnosti jsou:

- zhoršení chlazení následkem usazování, stárnutí vzniklého kalu v olejových kanálcích a na vinutí,
- zmenšení mechanické pevnosti celulózových izolantů následkem jejich napadení kyselinami vzniklými stárnutím,
- zmenšení elektrické pevnosti oleje a izolační soustavy olej-papír vlivem produktů stárnutí, především vody. [7]

Dále se vlivy, které způsobují stárnutí, dají rozdělit na:

- účinek kyslíku za současného působení tepla nebo jiných energií, popř. i katalyzátorů a vody,
- účinek energií, které jsou tepelné, elektrického pole a elektrických výbojů,
- účinek chemických látek kyselého a alkalického povahy,
- vliv rovnoměrnosti zařízení, úrovně zatížení, chvění a účinnost chlazení. [7]

Stárnutí olejů lze rozdělit na oxidační, tepelné a vlivem cizích příměsí.

2.1.1.3.5 Oxidační stárnutí transformátorového oleje

Díky tomuto stárnutí nejprve vzniká množství kyslíkatých organických látek (alkoholy, estery, aldehydy, ketony, kyseliny atd.), které mají molekuly podstatně pomalejší než molekuly původních uhlovodíků a jsou v oleji rozpustné. Vznikají také vedlejší produkty jako je oxid uhličitý a reakční voda. Tyto produkty mají za následek zhoršení elektrických vlastností oleje a kyseliny naopak působí negativně na kovové materiály (zvětšují iontovou vodivost oleje). [7]

Za pomoci polymerace a polykondenzace primárních kyslíkatých produktů s

reaktivními skupinami vznikají makromolekulární látky. Tyto látky jsou v první fázi v oleji rozpustné. Dále tyto látky způsobí, že se zvýší viskozita a hustota izolačního oleje, také se změní barva a také se zhorší elektrické vlastnosti. Po pokračování polymerace a polykondenzace vzniknou nerozpustné nepropustné makromolekuly – kaly. Oleje se díky těmto kalům stává heterogenní soustavou, která má hlavní nedostatek ve vylučování kalu a to vede k nevratnému poškození elektroizolačního systému olej-papír. Vedlejším produktem při polykondenzační reakci je reakční voda. [7]

2.1.1.3.6 Kaly

Kaly tvoří malé pevné částice, které k sobě vážou polární uhlovodíky, dále jsou tvořeny mýdly vyšších mastných kyselin a zoxidovanými aromatickými uhlovodíky, které jsou ve formě asfalténů a asfaltogenních kyselin. [7]

Z oxidace uhlovodíků vznikají mastné kyseliny a jiné kyslíkaté látky, tyto látky také vznikají reakcí peroxidů s tvořeními radikály ale také katalyckým působením kovů na volné radikály. Za pomoci mastných kyselin, pevných částic a vody vznikají mýdla. [7]

Pomocí oxidace aromatických a aromaticko-cyklanických uhlovodíků vznikají asfaltény. Ty spolu s aromatickým podílem snadno vážou vodu. Kvůli chvění a stárnutí pevných částí, hlavně celulózy, vznikají pevné částice. [7]

Části, které jsou pokryté kaly, se více ohřívají a díky tomu dochází k dalším polymeračním reakcím. Kvůli této reakci jsou kaly přeměňovány na částečně polymerovaný gel. Tento gel se už není rozpustný v oleji ani při vyšších teplotách. [7]

2.1.1.3.7 Účinky kalů

Mimo to že kaly působí, jako katalyzátor stárnutí oleje se ještě v transformátoru usazují na povrchu teplejších míst vinutí a na povrchu plechů. Díky tomu se ucpávají chladicí kanály mezi vinutími a to způsobuje zhoršení odvodu tepla z povrchu vinutí. Čím vyšší je teplota vodičů tím více se na povrchu usazují kaly, až dojde k úplnému zastavení proudění oleje a předávání tepla z povrchu vinutí do oleje. Z tohoto důvodu dochází k urychlení stárnutí papírové izolace vodičů (zvýší-li se teplota papíru o 8 °C jeho životnost se tím sníží o 50% - Montsingerovo pravidlo) a poté k jejímu zničení buďto mezizávitovým zkratem nebo

elektrickým přeskokem. [7]

Kvůli tomu, že kaly mají vlastnost udržovat v sobě vodu, může se snížit izolační odpor mezi závity ve vinutí a to bude mít za následek vznik mezizávitového zkratu nebo nastane elektrický přeskok mezi živými částmi transformátoru. [7]

2.2 Vysokonapětové izolační systémy točivých elektrických strojů

Vysokonapětové izolační systémy elektrických točivých strojů je možné vyrobit dvojí technologií. Obě tyto technologie mají řadu výhod, specifik i omezení v provedení, materiálech i aplikačních aspektech. Jeden způsob se nazývá resinrich, což lze pojमत jako „již obsahující pryskyřici“ a druhý způsob s názvem vakuovětlakové impregnace označovanou VPI (Vacuum Pressure Impregnation) [1].

2.2.1 Systém resin-rich

U tohoto systému jde v podstatě o tříslložkový kompozit s výchozím izolačním předimpregnovaným materiálem, který se dodává ve formě polotovaru s obvykle 30 až 40 procenty pojiva. Zpracováním tohoto pojiva na připraveném základu – vodivé části – se vytvoří izolační kompaktní trubka, která má požadovanou tloušťku stěny. Když jsou části vynutí takto připravené, vkládají se přímo do drážek stroje a prakticky po pospojování a dohotovení čel je bez dalších úprav vinutí schopno plnit svoji funkci. Elektrická pevnost izolace je velmi dobrá stejně jako ostatní požadované parametry, což zcela vyhovuje kladeným požadavkům. [1]

Tříslložkový systém je základem pro tento systém. Skleněná vlákna tvoří nosnou část. Běžnou skleněnou tkaninu tvoří stáčená vlákna, která mají tloušťku kolem 0,14 mm. Pomocí nové technologie, kde se vlákna nestáčí nýbrž rovnají do roviny, lze dosáhnout tloušťky 0,12 mm. Materiály u kterých je použita takto tkanina mají ekvivalentní mechanické vlastnosti jako se stáčenými vlákny. Vznikne nám velká prostorová rezerva a díky tomu je tu možnost úspory ve výrobě strojů. Elektrická pevnost se zvýší zhruba o 7 % a dielektrické ztráty se sníží, takže tento způsob úpravy skleněné tkaniny je výhodnější. Kalcinovaný papír se používá jako izolační bariéra. Tento papír je hutný, pevnější a méně nasákový. Jako pojiva se zde používají buď reaktoplastická bezrospouštědlová novolaková nebo cykloalifatická epoxidová pryskyřice. Dodává se v tak zvaném B tvaru, což znamená, že je částečně

předtvrzena. Musí být suchý, nelepivý a s co nejdelší skladovatelností. Jeho tloušťka se pohybuje v rozmezí od 0,15 až 0,2 mm. Podle provozního napětí stroje se na připraveném základu vinutí vytvoří potřebná vrstva, která se dá vytvořit dvojím způsobem. První způsob se nazývá kontinuální. Navineme materiál ve formě pásky, která má šířku obvykle 20 mm. Navinout ji můžeme s polovičním, třetinovým nebo dvoutřetinovým překrytím po celé délce tyče i v čelech. Druhý způsob se nazývá diskontinuální. Jeho rovná část je tvořena fóliovým materiálem, který se v čelních partiích nahrazuje ovin páskou. V obou případech se materiálu dává v závislosti na finální tloušťce o několik procent více, což znamená přípravek na stlačení. Vytvrzení se provádí ve formách, které umožňují stažení vinutí na předepsaný rozměr. To se provádí ve fázi gelace pryskyřice. U tohoto typu se používají tak zvaná latentní tvrdidla (katalyzátory). To jsou tvrdidla založená na bázi komplexů amínů flouridu boritého, který se do pryskyřic přidává v řádově v jednotkách procent. Díky nim se dosáhne toho, že k rozpadu komplexu flouridu boritého a tím k zahájení polymerační reakce dochází až při určité teplotě (100 °C). Takováto vlastnost je dobrá vzhledem ke skladovatelnosti materiálu. Po dosažení legační teploty se forma uzavře a dotáhne na doraz. Jakmile začne probíhat reakce není možné dotažení. Dále je nutné udělat odplynění izolace, proto se doporučuje před dosažením gelového stádia předformování nižším tlakem, dále se může otevřít forma pro odchod plynných složek. Používané způsoby se v tomto případě liší počtem otevření formy i teplotou, při které se odplynění provádí. Pro homogenitu mají tato opatření velký význam. Vytvrzení se tedy provádí při teplotě 160 °C až 170 °C. Doba po jakou se to vytvrzuje, závisí na použité pryskyřici a tloušťce izolační trubky (řádově se jedná o hodinu). Ochlazování musí být řízeno tak, aby bylo patřičně pozvolné a nedocházelo k defektům vlivem rozdílného chladnutí jádra a izolační trubky. Tímto způsobem by mohlo dojít k oddělení izolace od jádra vznikem nehomogenit znehodnocujících výrobek. Je nutné vysušit izolaci. Musí se počítat s určitým objemem těkavin a vlhkostí, což je nutné před vytvrzením odstranit. Separační fólie se používá proto, aby se výrobek neslepil s formou. Na vrchní vrstvu izolace se dává polovodivá páska, s jedním ovinem a s polovičním překrytím. Výstupy z drážek se opatřují odstupňovanými polovodivými vrstvami (pásky, nátěry). Tyto vrstvy pomáhají upravit pole ve smyslu maximální eliminace výbojové činnosti v této oblasti, která by podstatně mohla narušit izolaci. Mohou být součástí izolace a vytvrzeny spolu s ní nebo jsou nalepeny jako zvláštní vrstva.[1]

Po tom co se tyče vinutí vyjmou z formy a zchladnou, je připravena bez dalších úprav k montáži do stroje. [1]

2.2.2 Systém VPI (Vaccum Pressure Impregnation)

Tým to způsobem se vyrábí hlavní izolace. Nazýváme ho podle rozhodující výrobní operace – vakuově tlakové impregnace. U tohoto systému je základním materiálem savá slídová páska, která se při impregnačním procesu prosytí přes impregnant. Tato technologie se používá zejména u trakčních motorů, kde zapotřebí dokonalý impregnační systém, který zpevní vinutí a má zároveň výborné izolační a teplotní vlastnosti. Protože se u této technologie používají bezrozpouštědlové pryskyřice, je tato technologie šetrná k životnímu prostředí. [1]

Základ tvoří savý izolant, který je většinou ve formě pásky, která se skládá ze tří komponent. Nosnou část je ze skleněné tkaniny, polyesterového rouna nebo fólie, nejčastěji z polyamidové fólie. Pojiva se používá jen do sedmi procent pro mechanické zajištění možnosti zpracování pásky, dále musí být kompatibilní s použitým impregnantem, aby nemohlo dojít ke vzájemnému napadení při finálním zpracování. Nejdůležitější však je savost materiálu. Tato vlastnost zaručuje, že i při větším počtu vrstev (10 a více) dojde k dokonalému proimpregnování všech vrstev. Proto, aby byl materiál dobře savý, je nutné použít nekalcinovanou slídu, která má hrubší zrnění tím pádem splňuje tento předpoklad při odpovídajících mechanických vlastnostech. Tyto vlastnosti jsou ohebnost a minimální pevnost v tahu při ovíjení, kdy nesmí dojít k porušení slídového papíru. Pevnost materiálu nesmí být menší než 80 N na centimetr šířky.[1]

Jako impregnanty se u této technologie používají bezrozpouštědlové epoxidové, polyesterové a silikonové pryskyřice, které obsahují stoprocent sušin. To umožňuje zcela vyplnit prostor impregnovaného objektu již při jednoduché impregnaci. Jejich elektrické i mechanické vlastnosti jsou dobré, jejich vytvrzovací doba je relativně krátká a lze je použít pro třídy 180 a 200. Nejvíce používaný je impregnant na bázi epoxidové pryskyřice s kapalným anhydridem, základní materiál u tohoto impregnantu musí obsahovat urychlovač. Urychlovač slouží ke katalyzaci při vytvrzování polymerační reakcí. Díky tomu se zkrátí želatinační doba a sníží se její teplota. [1]

Impregnační zařízení sestává z tlakové a vakuotěsné kotle vybaveného ohřívacím a chladicím zařízením, dále se skládá ze zásobníků impregnantu. To jsou tlakovzdušné nádoby, u kterých je možný ohřev nebo chlazení. Impregnant je v nich skladován za snížené teploty pod přetlakem inertního plynu. Ještě před impregnací projde impregnant skrz ohřívací zařízení. Zde je ohřeje určité množství impregnantu na danou teplotu. Potom za neustálého intenzivního míchání dochází ve vakuu k odplynění. Další součástí impregnačního zařízení

jsou sušárny. Jsou v nevybušném provedení s teplotním rozsahem do 200 °C. Dochází zde k vytvrzení naimpregnovaného vinutí. K zařízení také patří ještě vývěvy, kompresory, chladičí zařízení, vymrazovací zařízení na sušení vzduchu a soustava potrubí a měřidel. [1]

Impregnační proces se skládá z více částí. V první řadě je sušení, díky kterému se odstraní vlhkost. To se provádí při teplotě vyšší než 100 °C po dobu asi 20 hodin. Po té je předmět přesunut do impregnačního kotle. Tam se zavede vakuum (odstraní se zbytek těkavin a vlhkosti) a následně zaplavíme ode dna. Doba zaplavení může být až hodinu. Poté je zrušeno vakuum a na hodinu opět zaveden přetlak. Následuje vypuštění laku a odkapání předmětu, a jeho následné přemístění do sušárny. Zde je předmět sušen ve dvou částech. První část se skládá ze sušení za mírného podtlaku, toto sušení urychlí vyprchání těkavých složek. Pak následuje samotné vytvrzení, které probíhá při proudění teplého vzduchu za normálního tlaku. Kvalita se sleduje pomocí měření ztrátového činitele. Touto metodou se dají impregnovat jak celky, tak i části elektrických zařízení.[1]

2.2.3 Porovnání technologií resin-rich a VPI

Největší rozdíl je, že u technologie VPI se potřebují poměrně náročné a tím pádem i drahé technické zařízení. U resin-rich se potřebují přesné přípravky pro vytvrzování. VPI je tedy z hlediska technické vybavenosti jednoznačně náročnější, hlavně u velkých strojů. VPI technologie je lepší i co se týká homogenity. U technologie VPI není možná oprava jednotlivých dílů vinutí, pokud byli proimpregnováni do kompaktního celku, pokud jsou impregnovány jednotlivé části, je výměna a oprava možná. U technologie resin-rich je výměna vadné cívky snadná. Při použití VPI technologie se dá, za použití průběžného systému izolace, provést úspora materiálu až o 6 % a výkon stroje zůstane zachován. Každá technologie má své výhody a nevýhody a proto nelze říct, jaká technologie je lepší. Vždy se musíme rozhodnout podle situace. [1]

2.3 Izolační materiály pro generátory

2.3.1 Kollektor Samicanit

Je to slídový papír s epoxidovou pryskyřicí, který je dodáván v stříbrných deskách o tloušťce 0,3 ÷ 2 mm. Pracovní teplota pro tento materiál je do 300 °C Jeho vlastnosti jsou minimální stlačitelnost, vysoká tvrdost, výborná mechanická a elektrická pevnost pro vyšší teploty, má nízkou tepelnou vodivost a nasákavost. Mimo generátory se používá také pro

trakční motory. [8]

2.3.2 Samicanit (trubky)

Skládá se ze slídového papíru a silikonové pryskyřice. Jsou to trubky s vnitřním průměrem 15 ÷ 1500 mm a o délce 950 mm, jeho pracovní teplota je do 450 °C. Má nízkou tepelnou vodivost a při vysokých teplotách má výbornou mechanickou a elektrickou pevnost. Tyto trubky se používají jak pro generátory tak také pro transformátory a trakční motory. [8]

2.3.3 Cogemica Tape 608ASR

Je to slídová páska s vysokou pórovitostí, která se skládá ze skleněného podkladu a netkaného polyesteru, pojivo je speciálně formulovaný epoxidem. Tyto pásy obsahují zinkový naphtenate jako akcelerátor. Používají se hlavně při výrobě VPI. Vlastnosti závisí na kvalitě impregnační pryskyřice, která je použita. [9]

2.3.4 Relanex 45.033

Je to izolační materiál, který je při pokojové teplotě pružný, při vyšších teplotách je lepkavý. Je vyroben z nekalcinovaného slídového papíru a skelné tkaniny. [9]

2.3.5 Dellite

Je to papír, který je vyrobený z bučiny impregnované fenolickými nebo epoxidovými pryskyřicemi. Používá se pro elektrické izolace a lehké konstrukce. [10]

3 Porovnání různých druhů izolací od různých výrobců

Izolační hlazený papír Thermavolt má pro hodnotu tloušťky 0,25 mm hodnotu průrazného napětí 6 kV, pro stejnou hodnotu tloušťky má papír označovaný NE, kde N-polyesterová rohož a E-polyesterová fólie, hodnotu průrazného napětí 9 kV. Izolační papír CeQUIM I má hodnotu průrazného napětí 1,8 kV Pro hodnotu tloušťky 0,24 má papír označovaný WG-1 hodnotu průrazného napětí 13 kV. Poměné prodloužení u Thermalvoltage je 3 %, u NE je 2,5 % a u CeQUIM I je menší než 2 %. [3;11]

4 Závěr

Izolační materiály se dají rozdělit podle skupenství. Mezi pevné materiály patří skla, slída. Vlastnosti skel jsou, že mají $\epsilon_r = 3,7$ (čistě křemičitá skla) až $\epsilon_r = 16$ (olovnatá skla), dále mají vysokou elektrickou pevnost $200 \div 500 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$, bohužel tato pevnost ale neplatí v praxi, neboť skla mají malou povrchovou rezistivitu, která snižuje tuto hodnotu až osmkrát. Výrobky z čisté slídy se v elektronice moc nepoužívají. Slída je zpracována dvě způsoby a to buď mechanicky nebo chemicky. Každý z těchto způsobů dá slídovému papíru jiné elektroizolační vlastnosti. Mechanický způsob zaručí větší porozitu, zatím co chemický způsob zaručuje lepší elektroizolační vlastnosti.

Z plynných izolantů je hodně používám plyn SF_6 . Tento plyn je bezbarvý, bez zápachu, netoxický. Má elektrickou pevnost, která je téměř třikrát větší než u vzduchu a má vysokou vypínací schopnost, která je téměř desetkrát větší než u vzduchu.

Kapalné izolanty plní v elektrotechnických zařízeních nejen funkci izolační ale také chladicí. Používají se minerální oleje, které jsou vyrobené z ropy. Je nutné se o ně starat, jinak by ztratily své izolační vlastnosti. Syntetické kapaliny se vyvíjením, jako náhrada hořlavých minerálních olejů.

Papírů používaných v elektrotechnice je spousta druhů. Hlazení papír je vhodný pro použití ve vysokoteplotních suchých transformátorech. Díky svým vlastnostem se používá i na izolaci mezi páskovým vinutím. Thermal shield je vhodný pro použití kde je nutné dlouhodobé odolávání vůči vysokým teplotám, proti chemikáliím. Může se používat i v aplikacích bez sušení. Díky laminaci, impregnaci a lakování se zlepšují jeho vlastnosti. Jeho použití je na izolace koster, izolace fází.

Výroba izolačních systémů se provádí dvěma způsoby resin-rich nebo VPI. Pro výrobu pomocí VPI se používá izolační páska vyrobená mechanickým způsobem. Z důvodu že tato technologie je drahá, je vhodná hlavně pro sériovou výrobu. U této technologie je také rozdíl v tom, že pásky, které jsou na to zapotřebí neobsahují tvrdidlo a proto se dají déle skladovat. Nevýhodou je ovšem to, že se celý stroj impregnuje v jednom kuse a při poruše se nedá rozebrat. V systému resin-rich se jednotlivé části ovíjení zvlášť a proto je možné je při poruše vyměnit.

Použitá literatura

- [1] Mentlík, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha : BEN - technická literatura, 2006
- [2] Kučerová, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Plzeň : Západočeská univerzita, 2002
- [3] *3M Izolační materiál pro výrobu cívek, transformátorů a elektromotorů* [online]. 2008 [cit. 2012-05-17]. Aztech.cz. Dostupné z: www.aztech.cz
- [4] Perspektivy v oblasti kapalných izolantů. [online]. 5.5.2012 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/105.pdf>
- [5] Transformátorový olej N-A. [online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: http://oleje.cz/eshop/show_prod.php?id=404
- [6] MIDEL 7131. [online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: http://midel.sk/image/_soubor_nabidka.php?id=6
- [7] Diagnostika transformátorových olejů v návaznosti na prodloužení životnosti transformátorů. [online]. 6.5.2012 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25085
- [8] ISOMA [online]. [cit. 2012-06-05]. Dostupné z: <http://www.isoma.cz/materialy/samicanit>
- [9] COGEBI.: [online]. [cit. 2012-06-05]. Dostupné z: http://www.cogebi.com/product_finder_result.php
- [10] Von Roll. [online]. [cit. 2012-06-05]. Dostupné z: <http://www.vonroll.com/en/prepregs.html>
- [11] *Dr. izolace NE* [online]. [cit. 2012-06-04]. Dostupné z: <http://www.suma-msec.cz>