

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Závislost elektrických vlastností izolačního systému na  
míře jeho vytvrzení**

**vedoucí práce: Ing. Josef Pihera, Ph.D**

**2012**

**autor: Martin Radoš**



## **Anotace**

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku vytváření elektrické izolace ve velkých točivých strojích. Úvodní pasáž se zabývá hlavním rozdělením elektrické izolace a možnostmi nanášení. Následující úsek řeší způsoby vytvrzování izolace a její vlastnosti po použití těchto metod. Poslední část se zabývá on-line a offline diagnostickými metodami, pomocí kterých zjišťujeme kvalitu výsledného produktu.

## **Klíčová slova**

Elektrické točivé stroje, izolační systém, VPI, Resin-rich, epoxidové pryskyřice, parametry izolačního systému, částečné výboje, offline metoda, on-line metoda

## **Abstract**

The master thesis is focused on problems with creating of electrical isolation in big rotating machines. First text is dealing with main differencis of electrical isolation and possibilities of aplication. Next section is dealing with the ways of curing isolation and quality after using this methods. Last section follow up with on-line and offline diagnostic methods and integrity of final product.

## **Key words**

Electrical rotating machines, isolation system, VPI, Resin- rich, epoxy resin, parameters of the insulation system, partial discharge, offline method, on-line method

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou 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 práce, je legální.

V Plzni dne 5.6.2012

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Josefu Piherovi, Ph.D. za rady a podnětné připomínky při vedení mé práce a rodině za podporu a trpělivost.

## OBSAH

ÚVOD .....	9
SEZNAM SYMBOLŮ .....	10
<b>1 IZOLACE TOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ .....</b>	<b>11</b>
1.1 DOVOLENÁ OTEPLENÍ STROJŮ NEPŘÍMO CHLAZENÝCH VZDUCHEM .....	13
<b>2 VYTVRZOVÁNÍ EPOXIDOVÝCH PRYSKYŘIC .....</b>	<b>15</b>
2.1 TECHNOLOGIE RESIN-RICH .....	15
2.2 TECHNOLOGIE VPI .....	16
2.3 POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ VPI X RESIN-RICH .....	17
<b>3 EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE .....</b>	<b>18</b>
3.1 VYTVRZOVÁNÍ EPOXIDOVÝCH PRYSKYŘIC .....	18
3.1.1 <i>Reakce s polyaminy</i> .....	18
3.1.2 <i>Reakce s polythioly</i> .....	20
3.1.3 <i>Vytvrzování anhydridy</i> .....	20
3.1.4 <i>Polymerace epoxidových pryskyřic</i> .....	21
3.2 VYTVRZOVÁNÍ JINÝMI PRYSKYŘICEMI .....	21
3.2.1 <i>Epoxyestery</i> .....	22
3.3 EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE NA JINÉ NEŽ DIANOVÉ BÁZI .....	22
3.3.1 <i>Pryskyřice na bázi jiných fenolů</i> .....	23
3.3.2 <i>Pryskyřice připravené epoxidací dvojných vazeb</i> .....	23
3.3.3 <i>Glycidestery</i> .....	23
3.3.4 <i>Glycidylaminy</i> .....	23
3.3.5 <i>Plastifikace epoxidových pryskyřic</i> .....	23
<b>4 PARAMETRY IZOLAČNÍHO SYSTÉMU .....</b>	<b>24</b>
<b>5 ZJIŠŤOVÁNÍ KVALITY IZOLACE .....</b>	<b>26</b>
5.1 OFFLINE REŽIM .....	26
5.1.1 <i>Vizuální kontrola statorového vinutí</i> .....	26
5.1.2 <i>Izolační odpor statorového vinutí</i> .....	27
5.1.3 <i>Izolační odpor rotorového vinutí</i> .....	27
5.1.4 <i>Napětová závislost izolačního odporu vinutí na stejnosměrném napětí</i> .....	27
5.1.5 <i>Zrátový činitel <math>\tan \delta</math>, kapacita a časová konstanta statorového vinutí</i> .....	28
5.1.6 <i>Měření částečných výbojů statorového vinutí galvanickou metodou</i> .....	28
5.1.7 <i>Měření částečných výbojů statorového vinutí akustickou sondou</i> .....	29
5.1.8 <i>Měření částečných výbojů statorového vinutí diferenciální elektromagnetickou sondou</i> .....	29

5.1.9	<i>Měření částečných výbojů statorového vinutí induktivně vázanou sondou.....</i>	30
5.1.10	<i>Zkouška statorového vinutí střídavým napětím 50 Hz .....</i>	30
5.1.11	<i>Zkouška rotorového vinutí střídavým napětím 50 Hz.....</i>	30
5.1.12	<i>Zkouška statorového vinutí stejnosměrným napětím.....</i>	31
5.1.13	<i>Zkouška statorového vinutí napětím velmi nízkého kmitočtu .....</i>	31
5.1.14	<i>Zkouška závitové izolace statorového vinutí proudovými impulzy.....</i>	31
5.1.15	<i>Zkouška závitové izolace rotorového vinutí s vyniklými póly.....</i>	32
5.1.16	<i>Zkouška statorového vinutí stejnosměrným napětím.....</i>	32
5.2	<b>ON-LINE MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ.....</b>	33
5.2.1	<i>Detekce ozónu.....</i>	33
5.2.2	<i>Detekce příměsí v chladicím vodíku turboalternátorů.....</i>	34
5.2.3	<i>On-line monitoring částečných výbojů .....</i>	34
5.2.4	<i>Galvanická metoda on-line měření částečných výbojů.....</i>	35
5.2.5	<i>Používané senzory pro on-line měření částečných výbojů.....</i>	35
5.2.6	<i>Elektrická rušení při on-line měření částečných výbojů.....</i>	36
5.2.7	<i>On-line monitoring generátorů a vysokonapěťových motorů .....</i>	37
5.3	<b>ZÍSKÁNÍ A VYHODNOCENÍ DAT .....</b>	38
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>41</b>



## Úvod

Již od vzniku prvního elektrického stroje existuje snaha o výrobu menších, výkonnějších a odolnějších modelů. To ale není jednoduché, protože jsme omezeni technickými možnostmi. Pro daný výkon stroje nelze volit jakékoliv rozměry. Pro jádro se vypočítá nejlepší velikost, máme danou minimální výšku izolace, při manuální nebo automatické výrobě vznikají odchylky. Z těchto důvodů se snažíme o zdokonalování všech procesů výroby a hledání lepších materiálů a sloučenin. Při vývoji každé části motoru ale musíme dbát na množství faktorů a ne jen na ty elektrické. Jsme omezeni mechanickou pevností materiálů, kdy při provozu na točivých strojích vznikají obrovské odstředivé síly. Při plném zatížení strojů působí různé chemické reakce mezi částmi stroje a okolním prostředím. Průběhem času také dochází k degradaci materiálu například vlivem tepla, které vzniká při běhu stroje. Kvůli těmto faktorům zaměstnává izolace množství nejrůznějších oborů. Každý stroj je sestaven pro optimální rozložení materiálu, i nepatrné nepřesnosti mohou způsobit zvýšení lokálního zatížení, což vede k rychlému snížení životnosti celého stroje. Proto se snažíme při výrobě o co nejrovnoměrnější rozložení materiálu, zároveň vytvářet materiály bez nečistot a vzduchu a aby nám izolace vydržela co nejdéle. Dojde-li i přesto ke změnám v izolaci, musíme dané místo odhalit co nejdříve, aby nedošlo k poruše a odstavení stroje nebo dokonce zničení celého stroje. Velkým omezením při vývoji je ekonomické hledisko, kdy musíme hledat taková řešení, která jsou co nejlevnější a zároveň nejúčinnější.

Ve své práci se zabývám rozlišením materiálů elektrické izolace podle teplotního namáhání. Zmíním se i o výrobě, jelikož každý postup má svá pro a proti, která v příslušné kapitole srovnávám. Nejedná se pouze o rozdíly v nanášení izolace na části motoru, ale také o chemické složení jednotlivých typů izolace. To nám určuje podmínky, za kterých musí vytvrzování probíhat a je-li možné proces urychlit, aniž by došlo ke ztrátě jakosti. Je potřeba poukázat i na kontrolu kvality, bez níž se žádný závod neobejde. Jedná se metody zjišťující problémy před prvním spuštěním stroje, ale i o způsoby kontroly izolace za provozu. A zároveň bych chtěl zjistit, které z těchto metod jsou nejlepší pro využití v praxi.

## Seznam symbolů

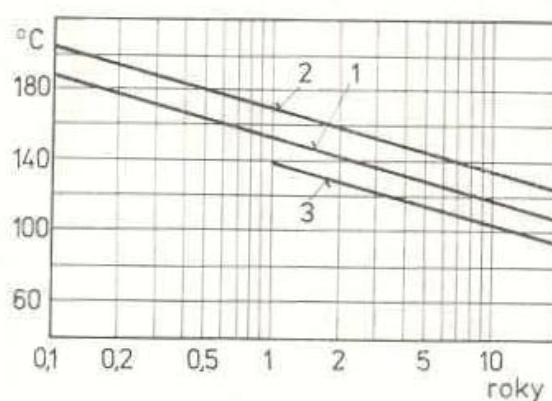
$P_z$ [W/m <sup>3</sup> ]	.....	měrné dielektrické ztráty
$E^2$ [W]	.....	intenzita elektrického pole
$\omega$ [Hz]	.....	frekvence
$\varepsilon_r$ [-]	.....	relativní permitivita izolantu
$\varepsilon_0$ [-]	.....	relativní permitivita vzduchu
$E_p$ [V/m]	.....	elektrická pevnost
$U_p$ [V]	.....	průrazné napětí
$d$ [mm]	.....	šířka
$U_n$ [V]	.....	jmenovité napětí
$U_{fN}$ [V]	.....	fázová hodnota jmenovitého napětí

## 1 Izolace točivých elektrických strojů

V elektrických otáčivých strojích využíváme nejrůznějších způsobů izolace, protože každý typ izolace má různé vlastnosti, které ovlivňují nejen odvádění tepla a elektrickou pevnost, ale závisí také na konstrukci elektrických strojů. Důležitá je zejména tloušťka izolace, délka izolačních vzdáleností či druh krytí. V každé části elektrického motoru používáme také jiný typ, který závisí na podmínkách, ve kterých se samotná izolace vyskytuje. Jelikož dochází při provozu k oteplení motoru, což působí také na izolaci, musí být izolace také v závislosti na teplotě málo roztažitelná a musí za daných teplot docházet k co nejmenšímu tepelnému stárnutí. Některé motory jsou schopné být v provozu i několik desítek let bez přerušení a je zbytečné je odstavovat kvůli špatné a poškozené izolaci.

Samotná izolace musí zabezpečit spolehlivý provoz stroje i při velkých tepelných výkyvech. Dnešní izolační materiály jsou řazeny do tříd dle tepelné stálosti – to je označení pro nejvyšší povolenou teplotu, za které je izolační systém schopen dlouhodobě pracovat bez ztráty jeho vlastností během celého období obvyklé životnosti stroje.

Tepelná odolnost izolantů velmi souvisí s otázkou stárnutí – mechanická pevnost izolace elektrických strojů v provozu podléhá působení tepla a ostatních fyzikálně chemických jevů. Dříve převážně u organických pojiv platilo, že při zvýšení teploty o každých 8 – 10 °C nad 100 °C klesá životnost izolace na polovinu. U dnešních umělých a vícesložkových pojiv to již neplatí, jelikož materiály mají zcela jiné vlastnosti.



Obr. 1. Životnost izolace v závislosti na teplotě

1-izolace třídy A v točivých strojích, 2-izolace třídy B v točivých strojích

3-izolace třídy A v olejových transformátorech [1]

Pro stroje chlazené nepřímo vzduchem v provozech, kde teplota vstupujícího vzduchu nepřekročí 40 °C, se udávají tyto třídy A, E, B, F, H.

Třída izolace	Y	A	E	B	F	H	200	220	250
Maximální přípustná teplota [°C]	90	105	120	130	155	180	200	220	250

Ve třídě Y jsou obsaženy vláknité materiály (organické) z celulózy, bavlny a přírodního hedvábí. Pro úpravu izolace se nepoužívají pojidla, impregnanty nebo povlaky. Dají se sem zařadit i jiné látky či jejich kombinace, je-li zkouškami prokázáno, že tyto materiály dokážou snášet teploty třídy Y. Výhodou jsou také nižší ceny a jsou ekologické. Příklad: vrstvené tvrzené dřevo, napuštěné tkaniny.

Třída A obsahuje látky jako je například bavlna, celulóza, přírodní nebo umělé hedvábí, papír nebo jejich kombinace a to správně impregnované, ponořené do izolační kapaliny nebo lakované. Také sem patří ostatní materiály, které byly zkouškou prověřeny. Příklad: šelak, olejové laky, celulózové laky, asfaltové laky.

Do třídy E patří syntetické organické materiály. Mohou být ve tvaru vláken nebo tkanin. Patří sem i pryskyřice a kompaundy. Můžeme sem zařadit i látky, které vydrží teploty o 15 °C vyšší než třída A. Příklad: tvrzený papír + fenolformaldehydová pryskyřice, kombinace PET folie a elektrotechnické lepenky.

Materiály na bázi slídy, azbestu a skelných vláken patří do třídy B. K úpravě izolace se využívá organických pojidel a impregnantů. Taktéž můžeme zařadit jiné látky odpovídající třídě B. Příklad: sklotextit s epoxidovým pojivem, polyesterová pryskyřice.

Třída F se skládá z látek jako slída, skleněné vlákniny, azbest a jiné nebo jejich kombinace s vhodnými pojivy, stejně tak i z látek, které nemusí být jen anorganické a všechny odpovídají třídě F. Příklad: sklotextit s epoxidovým pojivem, slídový papír + PET folie + novolak.

Do třídy H patří silikonové elastomery, kombinace slídy, skelných vláknin, azbestu apod. se správnými pojivy (např. některé silikonové pryskyřice). Mohou sem být zařazeny látky odpovídající skupině H. Příklad: slídový papír + skelná tkanina + pružný silikonový elastomer, polyamidové hedvábí.

Do třídy 200 patří materiály s teplotní odolností do 200 °C. Materiály jsou sklo, azbest, aramidové papíry, které většinou obsahují silikonová pojiva. Příklad: sklo + silikon, silikonová zalévací hmota.

Materiály třídy 220 vydrží do teploty 220 °C. Jsou to materiály jako sklo, azbest, aramidové papíry, silikonová pojiva. Příklad: tkaná skelná páska, aramidový papír + silikonová pryskyřice.

Třída 250 je nejvyšší používaná třída. Materiály jsou například polyamidy, aramidy či materiály třídy 220 s lepšími pojivy. Příklad: slída + silikonové pojivo, polyamidová folie (kapton).

Maximální možné teploty pro dané skupiny ovšem můžeme použít teprve tehdy, máme-li možnost kontrolovat teplotu a chování izolace v nejexponovanějších místech stroje vestavěnými termočlánky či termistory. Taková kontrola ale není vždy možná, a proto je v normách pro elektrické stroje určeno, jaké jsou nevyšší přípustné teploty cívek a částí vedoucí elektrický proud, v závislosti jak je měřená teplota.

Toto platí ovšem obecně. Pro každý motor platí různá dovolená oteplení jednotlivých částí. Záleží zde na typu a rychlosti chlazení.

### **1.1 Dovolená oteplení strojů nepřímo chlazených vzduchem**

Pro vinutí na střídavý proud turboalternátorů se jmenovitými výkony 5000 kVA a výše, pro vinutí nestřídavých proud strojů s vyjádřenými póly a asynchronních strojů se jmenovitými výkony 5000 kVA a výše nebo délkou železného jádra 1 m a více platí tato oteplení: pro třídu A teplota 60 °C, pro třídu E 70 °C, pro třídu B 80 °C, pro třídu F 100 °C a pro třídu H 125 °C.

Pro vinutí na střídavý proud strojů se jmenovitými výkony menšími než 5000 kVA a pro budící vinutí střídavých a stejnosměrných strojů s buzením stejnosměrným proudem jsou udávány tyto hodnoty: Pro třídu A je to teplota 60 °C pro třídu E 75 °C a ostatní teploty jsou stejné jako pro předešlý typ. Pro budící vinutí strojů s hladkým rotorem s buzením stejnosměrným proudem platí hodnoty o 5 – 10 °C vyšší kromě izolace třídy H, která je 125 °C.

Pro izolovaná vinutí trvale spojená nakrátko a magnetická jádra a jiné části, které nejsou ve styku s vinutím, nesmí dosáhnout tak vysokých hodnot, aby nebylo ohroženo vinutí, izolace nebo jiné sousední části.

Magnetická jádra a jiné části, které jsou ve styku s vinutím, mohou dosahovat hodnot pro třídu A do 60 °C, E do 75 °C, B do 80 °C, F do 100 °C a pro třídu H 125 °C. A například pro kluzná ložiska a valivá ložiska jsou maximální hodnoty oteplení u všech tříd do 50 °C a pro valivá ložiska se zvláštním tlukem až do 60 °C. Vycházelo se z hodnot, které byly měřeny vloženými sondami, pro měření částí až do budících vinutí střídavých a stejnosměrných strojů s buzením stejnosměrným proudem. Metodou z přírůstku odporu vinutí se dá měřit obecně u všech vinutí, kde se nepočítá s předešlými metodami. Dále při měření vinutí na střídavý proud strojů je potřeba uvedené hodnoty snížit při měření teploměrem oproti měření z přírůstku odporu o 10 – 20 °C. Pro stroje, které jsou instalované v nadmořské výšce nad 1000 m je potřeba uvedené hodnoty snížit o 1 % na každých 100 m, přičemž nejvyšší teplota chladícího vzduchu má být na každých 1000 m nad srovnávací výškou nejméně o 5 °C nižší než 40 °C.

Dovolená oteplení pro turboalternátory a synchronní kompenzátory při oběhovém chlazení vodíkem, s výjimkou strojů s přímým chlazením vodičů, jsou hodnoty díky lepšímu odvodu tepla vyšší, ale stále platí, že magnetické jádro a jiné části, které nejsou ve styku s vinutím, nesmí být tak vysoké.

[1] Petrov G.N.; Elektrické stroje 1; Academia, 1980

[2] Hassdenteufel J., Květ K. a kol.; Elektrotechnické materiály; SNTL, 1967

## 2 Vytvrzování epoxidových pryskyřic

### 2.1 Technologie resin-rich

Technologie resin-rich je nástupcem metod, které byly používány v minulosti. Resin-rich je technologie, kdy hlavní izolace rovných částí čel a cívek je při výrobě ovinuta speciálním materiálem. Používá se předimpregnovaný materiál – obsahuje všechny potřebné složky k vytvrzení (materiál a lepidlo). Pojivo zabírá 30 – 40 % celkové hmotnosti.

Základní požadavky na resin-rich materiály:

- musí být při zpracování suché
- musí být při zpracování nelepivé
- měly by mít co nejdelší dobu skladování

Nejlepší vlastnosti mají novolakové a cykloalifatické epoxidové pryskyřice v kombinaci s latentními tvrdidly (katalyzátory). Tvrdidla se přidávají jen v množství jednotek procent. Vytvrzování probíhá pomocí polymerace. K samotnému zahájení polymerace dochází až při dosažení určité teploty. U dnešních typů je to teplota přes 100 °C. V zásadě existují dva druhy zpracování – diskontinuální způsob a kontinuální způsob.

Diskontinuální způsob

- Je výhodný pro menší stroje.
- Máme oddělené pracovní postupy v rovné části a na čelech.
- Používáme jednoduché vytvrzovací přípravky.
- Ve výsledku je to ekonomicky vhodný způsob, který má nízkou energetickou náročnost.

Kontinuální způsob

- Používá se zejména pro velké točivé stroje.
- Při tomto postupu je cívka ovíjena jedním druhem pásky a vytvrzována v rovné části nebo celé délce.
- Izolace má shodné vlastnosti v drážkové části i v čelech.
- Nevýhodou je, že musíme vyrábět individuálně přípravky pro vytvrzování izolace čel.

## Výrobní postup resin-rich

1. etapa – Izolace je nejprve ohřívána a působí na ni jen kontaktní tlake, protože se pojivo nejdříve taví a při určité teplotě přechází do stavu gelu. V následujícím kroku se izolace stlačí do finálního tvaru a jednotlivé vrstvy se spojí v kompaktní celek.

2. etapa – Teplota je zvýšena na vytvrzovací a je udržována po předepsanou dobu. Poté následuje dotvrzení a chladnutí pryskyřice. Tento proces je pozvolný a tím se omezí vznik mechanických sil při chladnutí uvnitř materiálu (nedojde k popraskání materiálu) a zároveň se zachová kompaktnost izolačního systému.

## 2.2 Technologie VPI

VPI je zkratka slov Vacuum Pressure Impregnation, neboli impregnace pomocí podtlaku. Technologie VPI využívá jako izolační materiál hlavně savé pásy (porézní a suché) s malým množstvím pojiva (do 7 % celkové hmotnosti). Samotné pásy jsou vyráběny z nekalcinovaného slídového papíru a vhodného nosiče (například skleněná tkanina, syntetická fólie). Nejpoužívanější epoxidové pryskyřice jsou nízkomolekulární (nízkoviskózní). Pro zrychlení gelace impregnantu a k získání lepších a příznivějších vlastností používáme vytvrzování za přítomnosti urychlovače. Technologie VPI je vždy kontinuální. Výhodou tohoto způsobu je, že pojivo v pásce neobsahuje tvrdidlo a díky tomu mají dlouhou dobu skladovatelnosti oproti páskám používaným při resin-rich technologii.

Základní požadavky na pásy:

- Páska má dobré izolační a mechanické vlastnosti
- Má schopnost rychle se nasýtit impregnační pryskyřicí
- Má dobrou soudržnost nosiče a slídového papíru
- Páska je dostatečně elastická

Základní požadavky na pryskyřici:

- Nízká viskozita při relativně nízkých teplotách (40-60 °C)
- Musí mít krátký čas gelace
- Musí vydržet dostatečně dlouho v zásobní nádobě



Používáme dva způsoby zpracování izolačních systémů pomocí VPI

- Celkovou impregnaci – impregnujeme celý stator až po navinutí
- Impregnujeme pouze jednotlivé tyče

Rozdíl použití mezi těmito metodami závisí na velikosti stroje. Výhody technologie VPI se projeví až při vytvrzování pomocí celkové impregnace. Celé impregnační zařízení představuje velké investiční náklady, a proto se technologie VPI vyplatí spíše pro sériovou výrobu.

### 2.3 Porovnání technologií VPI x resin-rich

Obě technologie jsou použitelné prakticky pro všechny aplikace. Rozdíl spočívá zejména v době vytvrzování, množství vytvrzované části a hlavně v ceně. Proto se musí důkladně promýšlet využitelnost jednotlivých technologií.

Hlavní rozdíl mezi těmito způsoby vytvrzování je, že sice používáme v obou případech izolační pásy, ale v resin-rich materiálech máme již pojivo obsaženo v pásce a ve VPI materiálech pojivo musíme dodávat. Což je další krok navíc a promítne se to v celkové rychlosti vytvrzování. Neobsažnost pojiva je ale zároveň výhodou při skladování, protože takové pásy vydrží déle. Při technologii VPI je po vytvrzení celková homogenita vinutí vysoká a zvyšuje jeho životnost i provozní spolehlivost. Díky velmi dobré vazbě mezi vinutím a magnetickým obvodem stroje umožňuje vysokou odolnost proti vnějším vlivům – např. proti vlhku a chemicky agresivnímu prostředí. V konečném výsledku by se dalo říct, že resin-rich je metoda rychlá a levná, ale VPI má poté lepší vlastnosti a delší výdrž. Proto je metoda resin-rich dobrá pro menší stroje a VPI je vhodnější pro aplikace s méně častou údržbou.

[2] Hassdenteufel J., Květ K. a kol.; Elektrotechnické materiály; SNTL, 1967

[3] Wiedemann E., Kellenberger W.; Konstrukce elektrických strojů; SNTL, Praha, 1973

[4] Bartoš V.; Teorie elektrických strojů; Západočeská univerzita, Plzeň, 2006

[5] přednášky předmětu materiály v silnoprůdové elektrotechnice, KET/MSE, ZČU, 2011

### 3 Epoxidové pryskyřice

Jako epoxidové pryskyřice se označují látky, které ve své molekulové struktuře mají více než jednu epoxidovou skupinu. Díky této skupině jsou velmi reaktivní s ostatními látkami. Toho se využívá hlavně při výrobě pryskyřic jako lepidel, zalévacích a lisovacích hmot, laminátů a lékařských pryskyřic. Výsledně vytvrzené produkty výborně přilnou na kovy, sklo, keramiku, dřevo atd. Jejich chemické a elektroizolační vlastnosti jsou velmi dobré v poměrně široké oblasti teplot. Při jejich vytvrzování nedochází k vytváření zbytečných vedlejších produktů a dochází k většímu smrštění pryskyřice. Tyto pryskyřice mají také velmi dobrou odolnost vůči vodě, roztokům alkálií, kyselin a proti některým rozpouštědlům.

Epoxidové pryskyřice můžeme rozdělit na dvě skupiny:

- typy, jež mají glycidylové skupiny, které jsou připravené reakcí epichlorhydrinu s vhodnými surovinami
- typy, jež mají epoxidové skupiny, které jsou připravené epoxidací nenasycených sloučenin

Nejběžnějším typem epoxidových pryskyřic jsou produkty alkalické kondenzace epichlorhydrinu s bisfenolem A (neboli dian) [6].

#### 3.1 Vytvrzování epoxidových pryskyřic

Vytvrzování lze provádět více způsoby:

- polyadici probíhající na epoxidových skupinách
- polykondenzací na přítomných hydroxylových skupinách
- polymerací epoxidových skupin

K adici na epoxidovou skupinu se hodí v podstatě všechny sloučeniny s pohyblivými vodíkovými atomy. Největšího významu přesto dosahuje vytvrzování polyaminy a anhydridy polykarboxylových kyselin.

##### 3.1.1 Reakce s polyaminy

Primární a sekundární alifatické polyaminy umožňují vytvrzovat epoxidové pryskyřice za normálních teplot. Při reakci vzniká hydroxylová skupina a sekundární aminoskupina. Vzniklé sekundární aminoskupiny reagují stejným způsobem za vzniku

terciární aminoskupiny. Pro vznik zesíťovaného produktu je potřeba alespoň 3 aktivních atomů vodíku v molekule použitého polyaminu. Epoxidové pryskyřice jsou vytvrzovány alifatickými a cykloalifatickými polyaminy za normální teploty během poměrně krátké doby. Nejčastěji používané jsou diethylentriamin dipropylentriamin triethylentetramin nebo isoforondiamin.

Tyto polyaminy jsou používány zejména pro lepidla, tmely, nátěrové hmoty, licí podlahoviny a plastbetony. Potřebné množství tvrdidla lze přesně vypočítat, ale v praxi se přidává o něco více tvrdidla (do 10 %), jelikož použitý amin nebývá úplně čistý. Při větším množství ovšem dochází k rychlému zhoršení vlastností vytvrzené pryskyřice. Vytvrzení probíhá za nezvýšené teploty několik hodin, úplného vytvrzení se dosáhne až po několika dnech – tuto dobu ovšem můžeme snížit zvýšením teploty bez větších ztrát v pevnosti materiálu.

Nízkomolekulární alifatické polyaminy jako tvrdidla vytváří při zvýšené vlhkosti vzduchu a nižší teplotě filmy. Filmy po následné reakci s oxidem uhličitým a vodní párou tvoří uhličitany, projevující se zakalením povrchu. Při vytvrzování cykloalifatickými polyaminy se všem nevytváří. Potíže lze omezit přípravou produktu s nadbytkem polyaminu a epoxidové pryskyřice. Takové adukty vytváří tvrdé netěkavé pryskyřice, které můžeme využít jako tvrdidla. Mají značně nižší koncentraci aminových vodíků než výchozí polyamid, a proto se využívají pro vytvrzování epoxidových pryskyřic ve větším množství. To je jednodušší pro zpracování, jelikož si můžeme dovolit větší chybu při odměření složek. Těchto aduktových tvrdidel se používá pro nátěrové hmoty a plastbetony

Alifatickým polyamidům se podobají polyaminoamidy, které jsou připravované reakcí dimerních mastných kyselin s alifatickými polyaminy. Vytváří se tak, že se obě složky zahřívají na teplotu kolem 200 °C. Polyaminoamidy jsou relativně nízkomolekulární produkty, jejichž molekuly jsou zakončeny primárními aminoskupinami na alifatickém řetězci [6]. Vlastnostmi jsou viskózní a žlutohnědé kapaliny s typickým zápachem myšiny. Mají výhodu, že se vzhledem k nízkému obsahu reaktivních aminových vodíků používá na epoxidových pryskyřicích poměrně velké množství a dávkování nemusí být tedy moc přesné. V závislosti na množství polyaminoamidu jsou výsledné produkty buď vláčnější (při větším množství) nebo tvrdší (při menším množství). Vytvrzování je ovšem o něco pomalejší než vytvrzování alifatickými polyaminy. Celková životnost směsi tvrdidla s pryskyřicí je tedy delší. Vytvrzené filmy mají sice houževnatější charakter, ale již nejsou tolik odolné vůči

rozpouštědlům a kyselinám. Polyaminoamidy nachází uplatnění hlavně jako dvousložková lepidla, tmely a nátěrové hmoty.

Mezi účinná tvrdidla patří také kondenzační produkty fenolu s diethylentriaminem a formaldehydem. Jsou to viskózní kapaliny, které vytvrzují epoxidové pryskyřice značně rychleji než polyaminoamidy, díky urychlujícím účinkům fenolického hydroxyly. Tato tvrdidla se využívají zejména pro různé tmely a lepidla.

Aromatické polyaminy mají oproti alifatickým polyamidům vyšší tvarovou stálost za tepla, vyšší mechanickou pevnost, lepší elektroizolační vlastnosti a lepší odolnost proti chemikáliím. Směsi aromatických diaminů a pryskyřic se vyznačují za normální teploty dlouhou životností, ale pro vytvrzení je potřeba vyšší teplota (např. 1 h při 100 °C a 4 h při 150 °C). Nejčastější tvrdidlo je m-fenylendiamin či 4,4-diaminodifenylmethan. Využití je ve výrobě lisovacích hmot a skelných laminátů.

Dikyandiamid se stal významným tvrdidlem používaným pro lepidla, lamináty a práškové nátěrové hmoty. Jeho dobrou vlastností je, že není hygienicky závadné. Tvrdidlo je latentní a umožňuje formulaci jednosložkových systémů s velmi dlouhou dobou životnosti. Obsahuje 4 pohyblivé vodíky schopné reakce s epoxidovou skupinou. Vytvrzování probíhá za teplot od 160 do 200 °C. Proces vytvrzování se dá urychlit přidavkem tercaminů jako např.: p-chorfenyldimethylmočoviny, nebo 3,4-dichlorfenyldimethylmočoviny.

### **3.1.2 Reakce s polythioly**

Polythiolové sloučeniny obsahují skupinu SH, která reaguje s epoxidovými skupinami. Jsou vhodné pro vytvrzování za normálních teplot. Reakce se dá urychlit pomocí aminů. Polythioly existují jako sloučeniny ester kyseliny thioglykolové a trimethylolethanu nebo oligomerní polysulfidy s koncovými thiolovými skupinami.

### **3.1.3 Vytvrzování anhydridy**

Anhydridy polykarboxylových kyselin zastávají jednu z nejdůležitějších skupin tvrdidel epoxidových pryskyřic. Uplatnění nalézají jako zalévací, impregnační a laminační pryskyřice v elektrotechnice v kombinaci s nízkomolekulárními typy pryskyřic a pro práškové nátěrové hmoty v kombinaci s vícemolekulárními typy pryskyřic. Reakce epoxidů s anhydridy je velmi obtížná, má 3 hlavní části.

- Otevřením anhydridového kruhu alkoholickým hydroxylem (pocházejícím z epoxidových pryskyřic) za vzniku monoesteru.
- Reakcí takto vzniklé volné karboxylové skupiny s epoxidovou skupinou za vzniku diesteru a nové skupiny OH.
- Kyselou katalyzovanou polymerací epoxidových skupin za vzniku etherových vazeb. [6]

Kromě toho mohou v menším rozsahu reagovat i hydroxylové skupiny se skupinami epoxidovými.

Nejlepších výsledků při vytvrzování se dosahuje bez přítomnosti urychlovače a s 85 – 90 % teoretického množství tvrdidla. Vytvrzování trvá při 100 – 200 °C i několik hodin. K vytvrzování za normální teploty se používají tuhé anhydridy i kapalné anhydridy. Kladnou vlastností těchto směsí anhydridů s epoxidovými pryskyřicemi je, že mají dlouhou životnost při nižších teplotách.

#### **3.1.4 Polymerace epoxidových pryskyřic**

Jako katalyzátory polymerační reakce na epoxidových skupinách se používají ter.aminy a kvartérní amoniové sloučeniny nebo komplex fluoridu boritého. Samotné spojení molekul epoxidových pryskyřic se přitom provádí speciálně přes etherové můstky. Jako tvrdidla, ale s krátkou životností, můžeme využít např. benzyldimethylamin či trisfenol. Velkou katalýzou se vyznačují také imidazoly. Značného významu jako tvrdidlo epoxidových pryskyřic dosahuje fluorid boritý ve formě svých komplexů. Umožňuje rychlé vytvrzení i při nízkých teplotách (0 – 10 °C). Proto nachází využití např. v terénu pro zalévání kabelových koncovek.

### **3.2 Vytvrzování jinými pryskyřicemi**

Pro nátěrové hmoty se používají epoxidové pryskyřice vytvrzené ve směsích s jinými pryskyřicemi, hlavně s obsahem reaktivních alkoxy-methylových skupin (fenolformaldehydové, fenolformaldehydové, melaminformaldehydové pryskyřice). K vytvrzování dochází až za vyšších teplot od 120 do 200 °C současně za vzniku etherových můstků.

Kombinace epoxidových a fenolitických pryskyřic vznikají lakové filmy, které mají výbornou odolnost proti chemikáliím a rozpouštědlům s vysokou tvrdostí a zároveň mají dobrou

vláčnost. Využití najdou např. pro laky na konzervy, kovové sudy a kanystry a pro ochranu kovových výrobků vystavených horké vodě a vodní páře.

Epoxidové pryskyřice kombinované s močovinovými a melaminovými pryskyřicemi vytvářejí velmi odolné nátěry vůči světlu a s podobnými vlastnostmi jako předcházející kombinace. Mají ale nižší chemickou odolnost. Využití najdou při lakování kovových předmětů pro domácnost i ocelových plechů ve svitcích (tzv. coil coating).

Speciální použití epoxidodehtových kombinací je velmi široké zejména pro nátěry a tmely. Tyto pojiva lze vytvrdit za normální teploty polyaminy nebo polyaminoamidy. Výsledné vytvrzené vrstvy dobře přilnou na kov i beton a jsou vysoce odolné proti kyselým i alkalickým roztokům ve vodě. Využívají se proto jako povrchová ochrana konstrukcí v chemickém průmyslu, pro nátěry potrubí, přístavních, průplavních a lodních zařízení. Nevýhodou je jejich černé zbarvení.

### **3.2.1 Epoxyestery**

Pro výrobu lékařských pryskyřic jsou nejdůležitější esterifikace epoxidových pryskyřic karboxylovými kyselinami. Esterifikace se odehrává při teplotách od 80 do 150 °C. K přípravě těchto lékařských pryskyřic se používají zejména mastné kyseliny sojového, lněného a dehydratovaného ricinového oleje. Výsledné produkty obsahují i část hydroxylových skupin neesterifikovanou. Epoxyestery mastných kyselin vysychavých olejů vytváří laky, které po dodání kobaltového sušidla na vzduchu zasychají autooxidací. Zasychání probíhá rychleji než u alkydových laků. Lakové filmy jsou lépe adhezivní a tvrdší za velmi dobré vláčnosti i odolnosti proti vodě roztokům alkálií. Speciální epoxyesterové pryskyřice nacházejí využití jako nátěrové hmoty ředitelné vodou. Nejvíce se používají jako nátěrové hmoty nanášené elektrochemicky a základní nátěry nanášené máčením. Nízkomolekulární epoxidové pryskyřice esterifikované kyselinou akrylovou ve směsi s akrylovými estery diolů až tetrolů slouží jako pojiva pro dentální práce a pojiva pro tiskařské barvy, laky a fotoresity, které se velmi rychle vytvrzují UV-zářením (za přítomnosti fotoinicátorů) nebo elektronovým zářením. [6,7]

### **3.3 Epoxidové pryskyřice na jiné než dianové bázi**

Na světě představují epoxidové pryskyřice na bázi dianu zhruba 85% výroby. Mimo nich se vyrábí ještě typy na bázi jiných surovin.

### 3.3.1 Pryskyřice na bázi jiných fenolů

Řadí se sem pryskyřice upravené například tak, že mají sníženou hořlavost či tzv. epoxy novolaky. Jejich produkce zabírá téměř 10% světové výroby. Epoxy novolaky se vyznačují vyšší funkčností než dianové typy a mají vyšší tepelnou odolnost. Proto se používají hlavně pro elektroizolační účel.

### 3.3.2 Pryskyřice připravené epoxidací dvojných vazeb

Množství epoxidových sloučenin lze vyrobit epoxidací dvojných vazeb a to nejlépe kyselinou peroxyoctvou. Tato výroba je ovšem technologicky nebezpečná a musíme dbát bezpečnostních opatření.

### 3.3.3 Glycidestery

Podle vlastností a použití je můžeme zahrnout do cykloalifatických epoxidů. Nejvýznačnější z nich jsou vyrobeny z cykloalifatických dikarboxylových kyselin. Jsou snadno připravitelné a jejich hlavní výhodou je malá viskozita, velká reaktivita s anhydridy a skvělé elektroizolační vlastnosti.

### 3.3.4 Glycidylaminy

Pro zalévání se používá diglycidylanilin. Je to nažloutlá nízko viskózní kapalina. Řadí se sem i některé skelné lamináty se zvýšenou tepelnou odolností.

### 3.3.5 Plastifikace epoxidových pryskyřic

Některé aplikace vyžadují ještě pružnější a elastičtější pryskyřice z důvodu velkých a častých změn teplot. Proto musí docházet k výraznějšímu změkčování pryskyřic. Změkčují se buď zevnitř, nebo z vnějšku.

[6] Mleziva J., Šňupárek J.: Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití; Sabotáles, 2000

[7] Ducháček V.; Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití; Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha, 2005

## 4 Parametry izolačního systému

Vlastnosti izolačních materiálů nejsou za různých podmínek stejné. Dochází často i k velkým změnám vlastností a parametrů. Nejdůležitější vlastnosti izolačních materiálů jsou elektrické, mechanické, tepelné, fyzikálně-chemické a fyziologické. Samotné chování izolačních materiálů poté závisí na vnějších vlastnostech jako teplota, tlak, vlhkost, ale i na napětí či frekvenci procházející vodičem.

Elektrická vodivost izolačních materiálů závisí na samotné struktuře a složení příměsí, typech nosičů náboje (elektrony, díry, ionty) či samotném skupenství látek. U plynů dochází k přenosu za procesu fotoionizace, která se odehrává za vysokých teplot. Je to tzv. nesamostatná vodivost. K samostatné vodivosti dochází, když intenzita elektrického pole překročí určitou hodnotu a poté dochází k rozpadu molekul - částice těchto molekul poté nesou náboj. U kapalin je vodivost závislá na teplotě a na viskozitě. Jako izolanty se chovají pouze kapaliny s kovalentními vazbami. U pevných látek závisí na okolní teplotě a intenzitě elektrického pole. Vodivost látek se dělí na:

- vodiče 1. třídy – do této skupiny řadíme vodiče na bázi kovů s elektronovou vodivostí. Při přenosu elektrického proudu se jejich složení nemění.
- vodiče 2. třídy. – do této skupiny řadíme látky s vysokou iontovou vodivostí, což jsou například roztoky a taveniny iontových solí. Při přenosu elektrického proudu dochází ke změně složení.

Elektrický odpor izolačních materiálů je převrácená hodnota elektrické vodivosti. Odpor látky závisí na nečistotách obsažených v látce, teplotě či velikosti měřeného napětí. Dělí se na izolační odpor (což je celkový odpor), vnitřní a vnější odpor.

Elektrická polarizace izolačních materiálů znamená volný pohyb volných i vázaných nábojů vlivem vnějšího elektrického pole. Velikost závisí na struktuře látky, velikosti a druhu působícího napětí. Polarizace se dělí na pružné a nepružné. Pružné jsou velmi rychlé a prakticky nezávislé na vnějších podmínkách. Dochází při nich buď k elektronové, nebo iontové deformaci. Nepružné jsou pomalé a dochází k většímu posunu vázaných nábojů. Nejvíce závisí na tepelné struktuře látky.

Relativní permitivita je kvantitativní vyjádření polarizovatelnosti látek (neboli schopnost se polarizovat). Vyjadřuje jednu matematicky konkrétní hodnotu. Jedná se o poměr kapacity kondenzátoru s uvažovaným dielektrikem a s vakuem.



Dielektrické ztráty určují elektrickou energii přeměněnou v jinou energii za jednotku času v jednotce objemu. Jsou závislé hlavně na frekvenci, intenzitě elektrického pole, teplotě a ztrátovém čísle. Měrné dielektrické ztráty se dají vypočítat vztahem:

$$p_z [\text{W}/\text{m}^3] = E^2 \cdot \omega \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \text{tg}\delta$$

Tg  $\delta$  se označuje jako ztrátový činitel. Tg  $\delta$  značí tzv. čisté ztráty. Jedná se o míru ztracené energie v izolantu (energie přeměněná na teplo). Ohřevem některého dielektrika dochází ke snižování rezistivity, růstu vodivosti a polarizace - tím dochází k ohřevu a následnému urychlení stárnutí izolace.

Průrazné napětí je jedním z nejčastěji stanovovaných parametrů. Průrazné napětí závisí na vnějších podmínkách, skupenství látky a samotné struktuře. Nejvíce ji ovlivňují nečistoty a nežádoucí příměsi a také poruchy ve struktuře. Dělí se na 2 typy - průraz a přeskok. Průraz platí pro pevné látky a je to nejmenší napětí, při kterém dojde k průrazu izolantu neboli průchodu náboje skrz izolant. Dochází ke zničení pevného materiálu. Naproti tomu u kapalin dochází jenom k přeskoku náboje. Kapalína se zotaví a vrátí do původního stavu hned nebo do pár minut. Elektrická pevnost poté značí jak velkému napětí je materiál schopný odolat. Vypočítá se vztahem:

$$E_p [\text{V}/\text{m}] = \frac{U_p}{d}$$

Pro výsledný izolant chceme samozřejmě co nejlepší vlastnosti a obecně platí, že z uvedených vlastností požadujeme co největší rezistivitu, co nejnižší relativní permitivitu, ztrátový činitel také co nejmenší a celkovou elektrickou pevnost co nejvyšší (v desítkách kV na metr). Z fyzikálně mechanických vlastností poté dobrou pevnost v tahu a ohybu, rázovou houževnatost, a co nejmenší nasákavost a navlhavost.

[2] Hassdenteufel J., Květ K. a kol.; Elektrotechnické materiály; SNTL, 1967

[5] přednášky předmětu materiály v silnoproudé elektrotechnice, KET/MSE, ZČU, 2011

[8] Kučerová E.; Elektrotechnické materiály, Plzeň: Západočeská univerzita, 2002

## 5 Zjišťování kvality izolace

Elektrické stroje se skládají z více vzájemně provázaných částí, které plní různé funkce - elektrické, mechanické, magnetické, izolační apod. Nejcitlivější jsou však izolační systémy. Používáním strojů dochází ke stárnutí jednotlivých částí a tím i zhoršováním vlastností, proto je důležitá jejich pravidelná kontrola. U menších zařízení nemusí být kontroly tak náročné, ale u velkých strojů nastávají problémy. Například jsou potřeba velké skladovací prostory a čistota tohoto prostředí, vhodné a dostatečně velké nástroje, a jelikož tyto speciální zařízení nejsou levné, tak dochází i k finančnímu zatížení. Velké stroje jsou vyráběny, aby vydělaly co nejvíce peněz, a při odstávce dochází k nemalým ztrátám ve výdělku. Navíc ne každá metoda je jednoduchá a často se potřebují speciální nástroje jen pro jednu metodu. Proto diagnostické metody dělíme na online metody a offline metody. Při online diagnostice dochází ke zjišťování hodnot za běhu stroje - což je jednodušší a levnější, ale můžeme zjistit pouze omezené množství dat. Při offline režimu dochází k úplnému odstavení a lze stroj i po částech rozebrat a zjišťovat tak jednoduše jejich parametry.

### 5.1 Offline režim

#### 5.1.1 Vizuální kontrola statorového vinutí

Je to sice nejjednodušší, ale velmi důležitá kontrola. Už při letném prozkoumání částí stroje lze zjistit zvýšené působení různých namáhání (chemického, tepelného, mechanického) a tím získat první údaje o stavu izolace. Jejich následky jsou většinou vidět na první pohled a jsou od sebe dobře odlišitelné. Zvýšením teploty dochází v důsledku zvětšování objemu k uvolňování klínů v drážkové části vinutí. Stejně následky má například i chvění stroje. Kontroluje se na odpojeném a demontovaném elektrickém točivém stroji s vyjmutým rotorem. Při kontrole se zkoumá kvalita statorového vinutí, průchodky, stav teflonových hadic, průchodek vodního systému, systém měření teplot vinutí, železa, plynu a stav balení.

Při kontrole drážkové části zjišťujeme pevnost zaklínování drážkových klínů, měření odporu mezi polovodivým povlakem rovné části tyče a kovem statoru (je-li měření technicky možné). Po zjištění nevyhovujících klínů se vymění část nebo všechny, to závisí na jejich počtu.

Při kontrole čelních partií řádně očistíme povrch vinutí od nečistot. Provádí se mírným poklepem kladívka nebo přístroje pro měření tuhosti klínů na každý konstrukční element a sleduje se akustická nebo elektrická odezva. [9]

### **5.1.2 Izolační odpor statorového vinutí**

Odpor se měří také na vyčištěném stroji a před samotným měřením rozpojujeme uzel vinutí, je-li to možné a nemusí být ze stroje vyjmutý rotor. Chladí-li se ale stroj vodou, pak musí být vypuštěna a stroj se musí vysušit. Pro samotné měření se obvykle používají přístroje s vlastním zdrojem stejnosměrného vysokého napětí. Měří se v rozmezí napětí od 1 po 5 kV na každé fázi zvlášť. Toto napětí se přiloží na vstup měřené fáze, další se na vstupu uzemní a druhý konec zůstane nezapojen. U několikafázových vinutí, kde jsou vývody navzájem vodivě spojeny, se měření provádí jako celek. Hodnotu izolačního odporu a polarizačního indexu ovlivňuje zejména absorbovaná vlhkost či znečištění stroje. Když je výsledná hodnota polarizačního indexu menší než 2, tak to značí, že absorpční proudy ve statorové izolaci trvaly kratší dobu. To nám ukazuje, že materiál začíná navlhat a je degradovaný. Naopak hodnota polarizačního indexu větší než 2 říká, že je materiál ještě v pořádku.

### **5.1.3 Izolační odpor rotorového vinutí**

Izolační odpor rotorového vinutí je také jedním z důležitých parametrů systému. Rotor můžeme proměřovat vyjmutý nebo je-li stále ve stroji. V tom případě se musí ale zabezpečit proti pohybu. Před samotným měřením se odpojuje zemní ochrana rotoru a musí se odpojit i budicí obvod, a to vyjmutím kartáčů sběracích kroužků. Při zkoušce měříme izolační odpor vinutí magnetového kola, přívodních pasů a sběracích kruhů. Pro měření je doporučená teplota vinutí 20 - 30 °C, mají-li rotory vyniklé póly, měří se při chladnutí stroje z provozní teploty. Izolační odpor provádí měřičem izolace s vlastním zdrojem stejnosměrného napětí o velikosti 0,5 až 1,5 kV, které je přiložené mezi konec vinutí a hmotu rotoru.

### **5.1.4 Napět'ová závislost izolačního odporu vinutí na stejnosměrném napětí**

Při měření za konstantního napětí se nám odpor mění až na jednu ustálenou hodnotu, která je dána samotnou vodivostí dielektrika. Tento odpor nám ale se zvyšujícím se napětí klesá směrem k nule, než dojde k úplnému proražení materiálu. Ve výsledku dostaneme graf, který znázorňuje množství protékajících proudů izolací. Jeho vzhled je dán např. obsahem

nečistot nebo mírou degradace materiálu. Měření provádíme podobně jako v předchozích případech, jedna fáze je napájena a ostatní se uzemní. Napětí se zvyšuje krokově a současně měříme proud protékající izolací, dokud se nedosáhne ustálené hodnoty (v praxi není větší než 10 minut). Zároveň zaznamenáváme protékající nabíjecí proud. Poté z Ohmova zákona dopočítáme izolační odpor. Tento postup se opakuje, než se projeví výraznější zmenšení izolačního odporu. Napětí však nesmí být větší než hodnota zkušební napětí zkoumané izolace. Nakonec vypočteme poměr izolačního odporu z hodnot nabíjecího proudu a přiloženého napětí. Tato metoda je ovšem nevhodná zejména z hlediska času, protože k ustálení protékajícího proudu můžeme dojít až za dlouhou dobu. Proto se v praxi využívá nejvíce 10 minut.

### **5.1.5 Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ , kapacita a časová konstanta statorového vinutí**

Řadí se mezi důležité zkoušky elektrických strojů. Provádí se opět podobně jako předchozí případy a to tak, že se rozpojí uzel vinutí stroje, je-li to možné a rotor nemusí být vyjmutý ze stroje. Při stojích chlazených vodou musí být voda opět vypuštěna a stroj vysušený a měření se provádí za teplot od 5 do 30 °C. Opět přiložíme napětí na fázi a ostatní se uzemní. Měříme napět'ovou závislost ztrátového činitele a kapacity od 0,2  $U_n$  do 1  $U_n$ . Napětí se zvyšuje postupně o 0,2  $U_n$ . Velikost časové konstanty není závislá na typu stroje a vinutí stroje. To se hodí při porovnávání vlastností rozdílných typů izolací strojů.

### **5.1.6 Měření částečných výbojů statorového vinutí galvanickou metodou**

Je to metoda především pro porovnávání výsledků jednotlivých strojů a zjišťování stav zařízení. Ve výsledku je ale nejdůležitější sledování množství výbojů v závislosti na čase. Z výsledků měření lze odhadnout stupeň zničení celého izolačního systému. Test částečných výbojů zjišťuje různé proudové impulzy, které vznikají výbojovou činností uvnitř vinutí elektrického stroje při zkušebním napětí. Částečné výboje vznikají buď přímo v izolaci vodičů, mezi izolací a vodičem, mezi izolací a dnem drážky statoru nebo na povrchu izolace mimo drážku statoru. Každý z impulzů částečného výboj vznikne v jednom místě. Proudový impulz se šíří od místa výboje a část těchto pulzů dosahuje do míst měření. Při měření musí být odpojený uzel vinutí. Jedna fáze se připojuje na zdroj střídavého napětí 50 Hz, zbytek se uzemní. Rotor může zůstat ve stroji.

Při měření na prošetřované fázi zvyšujeme napětí až na jmenovité ( $U_n$ ). Při výskytu výboje nad limitní mezí, která bývá 1000 pC, se zaznamená  $U_i$  – hodnota zapalovacího napětí.

Jakmile dosáhneme  $U_n$ , necháme toto napětí poté působit po 30 minut. Tento čas se dodržuje, protože částečné výboje v okamžiku připojení plného zkušebního napětí mají vyšší hodnoty i četnosti než po dohodnutých 30 minutách. Poté napětí snižujeme po  $0,2 U_n$  a měříme hodnoty zdánlivého náboje nebo další parametry. Toto měření nám může vydat několik výsledků pro lepší analýzu jejich závislostí a charakteru. Hlavně měříme maximální velikost amplitudy částečného výboje. Hodnoty pulzů mohou mít různé jednotky v závislosti na tom, kterým přístrojem měříme. Např. milivolty při měření osciloskopem, miliampéry při měření vysokofrekvenčním proudovým transformátorem s feritovým jádrem a osciloskopem, či decibelech při měření spektrálním analyzátozem. Jsou zde ale různé rušivé faktory jako velikost vnitřní nehomogenity, kapacita vinutí či indukčnost mezi místem vzniku částečného výboje a měřičem těchto výbojů.

### **5.1.7 Měření částečných výbojů statorového vinutí akustickou sondou**

Tato metoda slouží k přesnému určení míst, kde vznikají částečné výboje. Hodí se hlavně pro alternátory a vysokonapěťové motory nebo také pro měření čelních partií vinutí. Používá se pro stroje s napětím od 1 kV. Touto metodou se provádí zejména kontrola navinuté a vytvrzené izolace samostatných tyčí cívek vinutí před založením cívek do drážek stroje. Vyskytne-li se výbojová činnost, musí se následně použít některá z galvanických metod pro přesné určení hodnot výbojů.

Měření je možné provádět hned po dosažení předepsaného napětí. Samotná zkouška probíhá přiložením mikrofónu a natočením na místo předpokládaného vzniku výboje. Ten je zaznamenán buď odchylkou na indikátoru při malých výbojích, nebo sluchem. Jedná se o rychlou metodu, ale pro přesné určení výboje je nutná další galvanická metoda. Existují i přístroje, které kombinují více způsobů měření a sou schopné naráz určit místo i velikost výboje. Jsou ovšem velmi drahé a tím se celá zkouška značně prodrazí.

### **5.1.8 Měření částečných výbojů statorového vinutí diferenciální elektromagnetickou sondou**

Slouží k měření částečných výbojů v jednotlivých drážkách vinutí. Touto metodou zjišťujeme maximální zdánlivý náboj částečných výbojů v měřené drážce. Fáze, kterou měříme, se napájí fázovým napětím z jedné strany a ostatní fáze se uzemní. Velikost napětí se zvyšuje od 0 do  $0,2 U_{fN}$  do  $U_{fN}$ . Objevíme-li v drážce částečný výboj, zaznamená se jeho amplituda a zapalovací napětí.

### **5.1.9 Měření částečných výbojů statorového vinutí induktivně vázanou sondou**

Tato zkouška je určena pro přesné zjištění místa vzniku částečného výboje, v konkrétní drážce. Pro tuto metodu je nutné vyjmout rotor. Měření se provádí na jedné fázi a ostatní jsou uzemněny. Přivede se zkušební napětí, které se zvyšuje po 1 kV až do jmenovitého napětí. Měření se provádí na frekvencích od 0,1 do 5 MHz. Na konci nám vznikne graf s kvazivrcholovými hodnotami zdánlivého náboje každé drážky.

### **5.1.10 Zkouška statorového vinutí střídavým napětím 50 Hz**

Jedná se o zkoušku zvýšeným napětím. To znamená, že se provádí testování za vyšších hodnot než při běžném provozu. Izolace strojů je sice konstruována na vyšší hodnoty, než jsou maximální předpokládaná napětí vznikající při běhu stroje, ale dochází k postupné degradaci izolace a tím snižování elektrické pevnosti. Proto se provádí měření se zvýšeným napětím, aby se odhalila nejkritičtější místa, než se stroj rozběhne. Jedná se v podstatě o destruktivní zkoušku, a proto se nehodí zvyšovat napětí až do průrazného napětí. Zkoušení probíhá na jedné fázi se zvýšeným napětím po dobu 1 minuty. Velikost elektrické pevnosti izolace vinutí je určena zkušebním napětím v době zkoušky. Během zkoušky se rozloží napětí na vinutí v poměru kapacit a odpovídá tak namáhání při provozu. Před měřením se rozpojuje uzel vinutí (můžeme-li to provést). Při zkoušce nemusí být vyjmutý rotor.

Při měření zapojíme zkušební napětí mezi konec zkoušeného vinutí a kostru stroje vodivě spojenou se zemí a s ostatními vinutími. U každého nezávislého vinutí se zkouší samostatně. Mohou být vinutí, která jsou v provozu spojena, mají ale vyvedeny oba konce vinutí - ty jsou považovány za nezávislá. Vícefázové vinutí, kde jsou začátky a konce vyvedeny na speciální svorky se zkouší jako celek. Vývody jsou navzájem vodivě spojeny. Nedojde-li k průrazu nebo přeskočení, je izolace vyhovující. Znamená to, že elektrická pevnost v době zkoušky byla větší než zkušební napětí

### **5.1.11 Zkouška rotorového vinutí střídavým napětím 50 Hz**

Opět se jedná o zkoušku výdrže izolace, která je namáhána cizím zkušebním napětím a musí vydržet předepsané hodnoty bez vzniku průrazu nebo přeskočení. Pro měření musíme odpojit budicí obvod vyjmutím kartáčů a vyplnit mezikruží izolací, aby nedošlo k přeskočení. Musí se také uzemnit budicí obvod a vinutí statoru. Po skončení zkoušky spojíme vinutí rotoru s tělesem rotoru. Při zkoušce přivádíme zkušební napětí mezi spojené vývody rotoru a magnetové kolo rotoru. Po dosažení 30% zkoušeného napětí je rychlost růstu 1 kV/10s a po

skončení zkoušky se napětí snižuje stejnou rychlostí. Měřením se zjistí jen, zda došlo či nedošlo k přeskoku.

#### **5.1.12 Zkouška statorového vinutí stejnosměrným napětím**

Jedná se o zkoušku zvýšeným napětím. Používají se ovšem stejnosměrné zdroje s relativně malým výkonem, který se pohybuje ve stovkách voltampér. Při zkoušce se rozloží napětí na vinutí v poměru odporů vinutí, což ne zcela odpovídá provoznímu namáhání izolace. Měření provádíme na vyčištěném stroji a musíme rozpojit uzel vinutí. Po měření je důležité jednotlivé fáze vybit a pak zkratovat. Zkušební napětí se propojí pomocí kostry stroje vodivě spojené se zemí a ostatními vinutími mezi vývody zkoušeného vinutí. Poměr mezi zkouškami stejnosměrným a střídavým napětím je dán složením izolace a jejího stáří. Velikost stejnosměrného zkušebního napětí by měla být 1,7 krát větší než u střídavého napětí.

#### **5.1.13 Zkouška statorového vinutí napětím velmi nízkého kmitočtu**

Je to metoda podobná jednominutové zkoušce při průmyslové frekvenci. Při nízkém kmitočtu ovšem vznikají určité výhody. Při zkoušce s frekvencí 0,1 Hz nedochází k viditelné degradaci dielektrika ani při častém měření. Zkouška se provádí na vyčištěném stroji a s rozpojeným uzlem vinutí, můžeme-li to provést. Po zkoušce se musí jednotlivé fáze vybit a zkratovat, aby se na vinutí nevyskytl zbytkový náboj. Zkouší se samostatně na každé fázi a jeden z vývodů vinutí musí být napojen na vývod zkušební vysokonapěťového zdroje. Zbylé fáze se spojí navzájem a se zemí. U vícefázových vinutí, která nemají speciálně vyvedené svorky, se zkouší dohromady, kde jsou vývody navzájem spojeny. Poté pomalu a plynule zvyšujeme zkušební napětí až do předepsané hodnoty, které zůstane po dobu 10 minut stejné. Po tomto čase se napětí pomalu snižuje až na nulu. Maximální hodnota zkušebního napětí o frekvenci 0,1 Hz je násobkem efektivní hodnoty zkušebního napětí při frekvenci 50 Hz.

#### **5.1.14 Zkouška závitové izolace statorového vinutí proudovými impulzy**

Jedná se o velmi dobrou zkoušku mezizávitové izolace vinutí a cívek. Touto metodou se dá zjistit, jak moc je izolace již opotřebována či začínající narušení mezi jednotlivými závity. Zkouška probíhá tak, že do vinutí zavedeme proudové impulzy a následným porovnáním výsledků dokážeme určit stav izolace či velikost poškození. Používá se napěťový impulz, který má velmi vysoký náběh impulzu, což způsobí nerovnoměrné rozložení napětí ve vinutí. Takové rozložení náboje vyvolá mezizávitovou napěťovou

diferenci. Zvyšováním vstupního pulzu se zvýší i napětí mezi závity. V případě poruchy dojde ke změně poměrů impedance vinutí stroje (resp. indukčnosti). Rozdíl mezi oscilací zdravého a poškozeného vinutí je zvýšené frekvenci v případě poškozeného. Změna se určuje dle prvního referenčního měření v jedné fázi, které se uloží do paměti osciloskopu. Po měření ve druhých dvou fázích dojde k porovnání s referenčním měřením.

#### **5.1.15 Zkouška závitové izolace rotorového vinutí s vyniklými póly**

V této zkoušce se také měří zkratky mezi jednotlivými závity. V přístrojích s vyniklými póly dochází k uvolňování cívek vinutí na pólech a k následnému narušení mezizávitové izolace. Při velkém poškození může docházet až ke zkratům. V tomto případě také dochází k rozdělení potenciálu na cívky rotoru. Zkratové závity tedy můžeme hledat elektromagnetickou sondou a sledovat na osciloskopu. Zkušební obvod napájíme transformátorem s frekvencí 50 Hz. Toto napětí přiložíme na zkoušenou část vinutí a velikost napětí by mělo být 1 až 2 V na závit. Můžeme zkoušet na jednotlivých pólech nebo po dvojici pólů. A tyto vadné cívky zjistíme přiložením napětí na póly.

Poškození izolace lze zjistit různými metodami. Nejjednodušší je metoda porovnávací, kdy přiložením napětí na póly s poškozeným závitěm naměříme větší proudy než na zdravých pólech. Je to způsobeno tím, že poškozený závit má nižší impedanci. Pro určení přesného místa poškození můžeme použít více metod – termovizní či za použití tónového generátoru. Při měření termovizí jsou rotorové cívky napájeny po dobu 10 minut. V místě zkratu jsou po této době vyšší teploty než v jejich okolí. Při použití tónového generátoru se snímací cívkou měříme magnetické pole podél zkoušené cívky. Z generátoru napájíme jeden pól cívky. Poté použijeme osciloskop, kdy na vertikální vstup osciloskopu přiložíme napájecí napětí z generátoru a na horizontální vstup připojíme napětí indukované z měřicí cívky. Nacházíme-li se při měření mimo zkratovaný závit, pak se v cívce indukuje odpovídající napětí. Zkratovaný závit vytváří další vlastní tok, který reaguje s normálním magnetickým tokem. V místě zkratu je tento tok největší a převládne nad normálním tokem. Na osciloskopu je toto vzájemné působení vidět jako změna Lissajousova obrazce (elipsy) a to obrácením o 180 stupňů.

#### **5.1.16 Zkouška statorového vinutí stejnosměrným napětím**

Jedná se o zkoušku zvýšeným napětím. Používají se ovšem stejnosměrné zdroje s relativně malým výkonem, který se pohybuje ve stovkách voltampér. Při zkoušce se rozloží



napětí na vinutí v poměru odporů vinutí, což ne zcela odpovídá provoznímu namáhání izolace. Měření provádíme na vyčištěném stroji a musíme rozpojit uzel vinutí. Po měření je důležité jednotlivé fáze vybit a pak zkratovat. Zkušební napětí se propojí pomocí kostry stroje vodič spojené se zemí a ostatními vinutími mezi vývody zkoušeného vinutí. Poměr mezi zkouškami stejnosměrným a střídavým napětím je dán složením izolace a jejího stáří. Velikost stejnosměrného zkušebního napětí by měla být 1,7 krát větší než u střídavého napětí.

Kromě zmíněných metod je také vhodné zkoumat přímo změny ve struktuře izolace. K tomu je ale potřeba experimentálního vzorku, který musíme po čase odebrat ze stroje. To ovšem zničí izolaci a lze toho využít jen v malém procentu případů. V některých případech můžeme do stroje například přidat destičky experimentální izolace do míst, ve kterých probíhají stejné děje jako ve stroji a to způsobí stejné či velmi podobné stárnutí materiálu. Z těchto destiček poté můžeme sbírat vzorky či je vyjmout a nahradit novými.

## **5.2 On-line měření elektrických strojů**

Jedná se o velmi dobrý způsob získávání dat z elektrických strojů. Hlavní výhodou je možnost sběru dat přímo za provozu stroje a nemusí vždy docházet k odstávce a rozebrání stroje. To je zejména ekonomicky výhodné. Můžeme také sledovat okamžité změny ve stroji například při změně napájení. Získávání dat při on-line metodách můžeme rozdělit na provozní a monitorovací. Při monitorování jsou čidla a senzory trvale umístěny ve stroji a diagnostika probíhá v reálném čase. V případě provozní metody nepotřebujeme experimentální materiál pro sběr dat a nemusí tak docházet k odstávce stroje, ale diagnostika neprobíhá v reálném čase.

### **5.2.1 Detekce ozónu**

Ozón při poruchách stroje vzniká při částečných výbojích nebo v jiných případech lokálního tepelného namáhání izolace, kdy dochází k ionizaci vzduchu. Hlavní výhodou této metody je rychlost, jednoduchost a tím i ekonomická výhoda. Při prvních náznacích vzniku ozónu můžeme rychle určit, že ve stroji došlo k nějaké poruše. Tím můžeme předejít většímu poškození izolace. Pro měření množství ozónu můžeme použít například metodu plynové chromatografie. Ta využívá reakcí ozónu s jinými prvky. Je to například fotometrická metoda či kolorimetrická metoda.

Fotometrická metoda využívá absorpce UV záření molekulami ozónu. Zdrojem záření bývá vysokotlaká rtuťová výbojka s vysokou stabilitou světelného záření. Množství ozónu se vyhodnocuje porovnáním měřeného vzorku a vzorku referenčního (bez ozónu). Množství absorbovaného UV záření je úměrné množství ozónu v měřeném vzorku.

Kalorimetrická metoda opět využívá absorpce ozónu, tentokrát v chloroformovém indikačním roztoku. Reakce ozónu je viditelná, jelikož při reakci se změní barva v roztoku. Dochází k obarvení modrého roztoku indiga. Poté podle kalibrační křivky, kdy známe velikost odbarvení, určíme množství ozónu v měřeném vzorku.

Obě metody jsou rychlé a levné, ovšem velikost ozónu nezávisí jen na poškození izolace ale i na jiných faktorech jako velikost provozního napětí, vlhkost vzduchu a podobně. Proto se doporučuje sledovat celý průběh změny koncentrace ozónu a nejen maximální hodnoty.

### **5.2.2 Detekce příměsí v chladicím vodíku turboalternátorů**

Jedná se o metodu, kdy zkoumáme chladicí médium. Teplotním namáháním izolace se ve vodíku objevují nové příměsi. Touto metodou zjišťujeme hlavně množství příměsí a jejich vzájemné poměry a koncentrace. Sledování je ovšem omezeno pravidelným doplňováním vodíku. To nám naruší pravidelný trend stoupání příměsí.

Metoda spočívá v odebrání vzorku a jeho následné diagnostice. Odběr vzorku se provádí skrz speciální ventil, který je pro to určený a nachází se na spodní straně stroje. Sběr se provádí dvojitým způsobem v závislosti na tom, co chceme určit. Pro určení čistoty cirkulujícího vodíku odebíráme chladicí médium do plynových vzorkovnic. Ty jsou skleněné o obsahu 1 litr. Pro zjišťování koncentrace stopových množství příměsí se používá složitější odběrová soustava. V té již dochází k úpravám odebrané směsi a separaci čistého vodíku a příměsí.

### **5.2.3 On-line monitoring částečných výbojů**

Jak již název napovídá, jedná se o sledování elektrických výbojů, které vznikají ve statoru elektrických strojů. Hlavní předností on-line monitoringu je to, že stroj sledujeme v reálném čase. Výboje vznikají přímo za plné funkčnosti stroje a za podmínek, které během offline monitorování nenastanou. Přítomnost částečných výbojů ve stroji značí, že ve stroji je porucha nebo samotné výboje poruchy způsobují. Proto jejich zkoumání za běhu poskytuje cenné informace o stavu izolace ve stroji.

Každý částečný výboj vyvolá proudový impuls, který se šíří ve statorovém vinutí stroje. Existují různé způsoby, jak tyto výboje detekovat a následně zpracovávat. Všechny způsoby ale pracují se stejnými základními částmi. Jsou to senzory a snímače a elektronické převodníky. Senzory mohou být například vysokonapěťové kondenzátory připojené na jednotlivých fázích nebo vysokofrekvenční proudové transformátory připojené na zemnicím přívodu stroje. K monitorování by měly být schopny zachytit vysokofrekvenční signály, které vyvolají částečné výboje, ale zároveň by neměly zachytávat signály vyvolané frekvencí napájecího napětí a její vyšší harmonické. Velká část senzorů dokáže pracovat v širokém rozmezí a má dostatečnou frekvenční citlivost. Obvyklé hodnoty jsou od několika hertzů až do 1 GHz. Elektronické převodníky převádějí analogové signály pulzů na digitální hodnoty. Máme snahu o takové zpracování signálu, které nám signály vyfiltrují na vyvolané výboji a vyvolané okolním rušením. To ocení zejména obsluha, která pak není zahrnuta mnoha i zbytečnými údaji a je tak jednodušší vyhodnotit získané informace. V případě výskytu rušivých vlivů se doporučuje připojit do obvodu odrušovací filtr nebo jiné odrušovací prostředky. Filtr může pracovat například tak, že sejmeme výboje z různých míst a pak je vzájemně porovnáme nebo například pomocí počítače a softwarové filtrace. Při správném zpracování signálu pak můžeme dokonce určit, jaká porucha se v izolačním systému vyskytla.

#### **5.2.4 Galvanická metoda on-line měření částečných výbojů**

Galvanická metoda je globálně velmi rozšířená a sledují se s její pomocí velikosti částečných výbojů. Metoda je podobná off-line testům, jelikož s ní sledujeme základní diagnostické parametry částečných výbojů. To je například zdánlivý náboj, střední proud částečných výbojů, četnost výbojů atd. V tomto případě ale můžeme sledovat změny ihned a poté vyhodnocovat v čase provozu stroje.

#### **5.2.5 Používané senzory pro on-line měření částečných výbojů**

K on-line měření částečných výbojů se používá nejrůznější typy senzorů, které jsou natrvalo připevněny ke stroji. Jedním z prvních způsobů měření výbojů byl vysokofrekvenční proudový transformátor s feritovým jádrem o 10 a 100 závitů. Velikost měřícího pásma se pohybuje od 100 kHz do 30 MHz při padesáti ohmové zátěži. Připojují se okolo vodiče, který spojuje střed vinutí generátoru se zemí nebo zemnicí impedancí. Transformátory sledují malé proudové impulzy v zemnicím přívodu. Impulzy jsou vyvolány částečnými výboji v izolaci a šíří se podél vinutí stroje. Možnou variantou je také použít tyto proudové transformátory na

každou fází. Díky tomu můžeme zvýšit úroveň získaného signálu, než tomu bylo u předchozího zapojení.

V nejnámějším a nejpoužívanějším způsobu on-line monitoringu používáme vysokonapěťové kondenzátory. Na každé fázi svorek je zapojen vždy jeden vysokonapěťový kondenzátor. Takový způsob zapojení zabraňuje jako v případě off-line monitoringu průchodu 50 Hz složky a detekuje prakticky jen vysokofrekvenční pulzy částečných výbojů. Dnes je nejpoužívanější kapacita kondenzátorů 80 pF. Zpočátku se používaly také kondenzátory o kapacitě v rozmezí od 375 do 1000 pF. Výstup kondenzátoru je nejčastěji připojen k padesáti ohmové zátěži. Šířka pásma je určena hornopropustným filtrem kondenzátoru a rezistoru v sérii. Kondenzátor s kapacitou 80 pF má šířku pásma vyšší než 40 MHz a např. u 1000 pF kondenzátoru jsou to frekvence vyšší než 3 MHz. Kondenzátory jsou připojeny jen k vysokému napětí. Dojde-li pak k poruše, nastane zemní spojení, což je pro stroj velmi špatné. Proto musí mít kondenzátory vysokou spolehlivost a odolnost proti průrazu.

Dalším způsobem on-line snímání je použití antén a snímačů, které jsou zabudovány přímo ve stroji. Nejnámějším a nejpoužívanějším typem antény je kapacitní drážková sonda. Sonda je uložena přímo ve statorových drážkách pod drážkovými klíny již při výrobě. Šířka sondy se rovná šířce drážky statoru a její délka odpovídá jedné čtvrtině délky vlny příslušné k žádané frekvenci odezvy snímače. Samotné signály poté přenáší pomocí koaxiálních kabelů. Sonda umí rozpoznat zdroj částečných výbojů přicházející od čel vinutí nebo z vnitřku drážky stroje. Velikost měřicího pásma se pohybuje od 10 do 1000 MHz. Drážková sonda má množství výhod a mezi hlavní patří potlačení okolního rušení.

### **5.2.6 Elektrická rušení při on-line měření částečných výbojů**

Při měření částečných výbojů v on-line režimu je největším problémem rušení při snímání signálů. V prostředí, kde se nachází snímače, se kromě pulzů z výbojů vyskytují vždy další nechtěné signály. V offline režimu je připojena většinou jenom část stroje a proto se zde nenachází tak velké množství rušení nebo jsou tyto rušení známá a je snadné je vyloučit. Při on-line měření jsou ale stroje připojeny do celé napájecí soustavy a existuje velké množství signálů, které obíhají ve stroji a jsou velmi podobné částečným výbojům.

Mezi tyto signály patří například:

- jiskření sběracích kroužků ve stroji
- korona z přenosového vedení
- špatné elektrické kontakty na přípojnicích zapříčiňující jiskření
- hřídelová napětí (proudy) a jiskření (vypalování), která tyto proudy způsobují
- rychlé přechodové děje způsobené pohony s pulzními měniči a počítačovými zdroji.

K rozeznání šumu od požadovaného signálu se dá použít některá z měřících metod nebo se hojně využívá zkušeností měřících pracovníků. Ty jsou díky zkušenostem schopni rozeznat šum od částečných výbojů, nicméně se jedná o subjektivní záležitost každého z nich. Což je největší problém tohoto postupu stejně jako ekonomická záležitost.

### **5.2.7 On-line monitoring generátorů a vysokonapěťových motorů**

Máme jen několik metod, které objektivně hodnotí on-line měření výbojové činnosti. Tyto metody dobře filtrují rušivé signály. Normálně se používají nejméně dva senzory, které jsou umístěny do stroje a poté se měří „čas příchodu“ signálu k oběma sensorům.

První metoda byla vytvořena hlavně pro stroje s vyniklými póly (např. hadrogenerátory), které mají velký průměr (přes 3 metry). Při této metodě se používají nejméně dvě snímačí impedance na každé fázi o kapacitě 80 pF. Snímače jsou instalovány na koncích spojovacích kruhů, v místě připojení k tyčím vinutím. Rušivé signály jsou částečně filtrovány z porovnání přichozích signálů a času mezi příchodem na každý snímač. Jsou-li přichozí časy málo rozdílné, pak se signál vyhodnotí jako rušení. Někdy ale takové rušení může upozornit na poruchu ve stroji a proto u vyhodnocovacích zařízení může být ještě jedno, které ukazuje odchylky v signálech. Ve výsledku se z časů příchodu na snímače určí poloha výbojové činnosti. Tato metoda bohužel nedokáže zaznamenávat rušení vnitřní a je zapotřebí dalších zařízení.

Druhá metoda se používá zejména pro diagnostiku motorů, generátorů malých turbín a některých hydrogenerátorů s vlnovým vinutím. U těch strojů ale nemůžeme umístit snímače přímo do konstrukce stroje. Jedná se opět o metodu porovnávání rozdílu příchodu signálu do snímačů. Při této metodě zapojíme dva 80 pF kondenzátory na sběrnici spojující generátor

s rozvodnou soustavou. Jeden snímací kondenzátor je poblíž satorového vinutí, druhý v blízkosti výkonového vypínače.

### 5.3 Získání a vyhodnocení dat

Množství částečných výbojů závisí na několika podmínkách. Patří mezi ně hlavně:

- Napětí statoru (zvýšení napětí způsobí zvýšení množství částečných výbojů)
- Tlak plynu (zvýšení tlaku způsobí snížení množství částečných výbojů)
- Vlhkost (zvýšená vlhkost způsobí snížení množství částečných výbojů, kvůli vodivějšímu prostředí)
- Teplota vinutí (zvýšení teploty způsobí snížení množství částečných výbojů)
- Zatížení stroje (jsou-li tyče v drážce uvolněné, zvyšují se magnetické síly na tyče a zvyšuje se množství částečných výbojů)

Důležitý je také fakt, že na novém stroji může být větší frekvence výskytu částečných výbojů, protože nová izolace ve stroji nemusí být úplně vytvrzená a postupně se při provozu dotvrzuje. Je to dáno tím, že nová izolace má větší permitivitu než vytvrzená a to způsobuje větší elektrické namáhání. Proto se data z prvních šesti měsíců neberou v potaz při hodnocení degradace izolace.

Výsledky měření jsou ve finále zaznamenány do několika typů grafů. Nejběžnějším je zobrazení částečných výbojů vzhledem k poloze fáze napájecího napětí. Také se zobrazuje počet pulzů v závislosti na velikosti amplitudy pulzu, která může být v závislosti na použitých snímačích v různých jednotkách- např. v picokulombech, milivoltech, miliampérech.

Pro vysvětlení výsledků výbojové činnosti existují doporučené postupy, ovšem v praxi se jedná zejména o porovnávání a sledování výbojové činnosti. Ani dnes není možné přesně specifikovat množství výbojů, které už je nebezpečné vůči následné poruše.

[9] Mentlík V., Pihera J., Polanský R., Prosr P., Trnka P.; Diagnostika elektrických zařízení; BEN- technická literatura, Praha, 2008

[10] Kreidl M., Petr J., Novák J., Houfek P., Doubek J.; Diagnostické systémy; ČVUT, Praha 6

## 6 Závěr

Vytvrzování elektrických izolačních systémů je velmi náročný proces. Výrobní stroje musí být velmi přesné a je nutno dodržovat předem stanovené podmínky během celého průběhu vytvrzování. Rovněž musí být zajištěna ochrana proti vniknutí nečistot. Při správné koncentraci pojiva a příměsí urychlujících vytvrzování na nosných páskách je nejnáročnější dodržení tlaku a teploty. K tomu jsou zapotřebí drahé a kvalitní součástky, které nezpůsobují odchylky. Nedodržení stanovených podmínek má za následek buď zvýšení křehkosti, snížení elektrické pevnosti nebo vznik míst, kde bude docházet ke zvýšenému namáhání izolace. V lepším případě se sníží celková životnost stroje, v horším případě dojde k rychlé lokální degradaci izolantu nebo vzniku částečných výbojů a hrozí zkrat. Poté je nutné celý díl buď vyměnit, nebo předělat. Vzhledem k celkové časové a finanční náročnosti procesu s ohledem na kvalitu výrobku si nemůžeme dovolit riskovat vznik chyb a jednodušší způsoby použít nelze.

Po vytvrzení izolace musíme přesto zkontrolovat její kvalitu před uvedením do provozu, protože každý postup není dokonalý. Snažíme se použít co nejjednodušší a časově málo náročné zkoušky, ale musí mít také odpovídající výsledky. Vizualní kontrola je jistě nejrychlejší a nejlevnější. Měla by následovat pokaždé jako první. Chyby na povrchu lze rozeznat ihned. Vzhledem k tomu, že lze očekávat výborné výsledky zkoušek, je nejlepší použít rychlé metody hledání poruch v izolaci. Při takových metodách porovnáváme měření s výsledky získanými při předchozích zkouškách nebo známe hodnoty, které by měly vyjít u nového stroje. Měřením napěťové závislosti izolačního odporu vinutí na stejnosměrném napětí získáme výsledky a veškeré změny jsou ihned viditelné. Zkouška je to sice časově náročnější, ale její efekt je vysoký. Zda nedošlo k lokálnímu poškození a výbojové činnosti se dá snadno zjistit měřením akustickou sondou. Jedná se o velmi rychlou metodu a lze zjistit i přesné místo poruchy. Kombinací těchto zkoušek bychom měli být schopni určit, zda se dá daný stroj uvést do provozu.

Pro další kontrolu izolace během provozu je nejlepší při výrobě vložit snímače a senzory do částí stroje a tak průběžně získávat informace. Je sice těžké vybrat pro ně takové místo, které nebude narušovat správný běh stroje a zároveň nebude docházet ke zkreslování výsledků, ale je to nejpřesnější a nejrychlejší metoda pro sběr informací. Nejvýhodnější je

kombinace galvanické metody a monitorování částečných výbojů. Ostatní metody se hodí spíše ke kontrolám při plánované odstávce nebo lokalizaci poruch po zaznamenání závad ve stroji.



## 7 Použitá literatura

- [1] Petrov G.N.; Elektrické stroje 1; Academia, 1980
- [2] Hassdenteufel J., Květ K. a kol.; Elektrotechnické materiály; SNTL, 1967
- [3] Wiedemann E., Kellenberger W.; Konstrukce elektrických strojů; SNTL, Praha, 1973
- [4] Bartoš V.; Teorie elektrických strojů; Západočeská univerzita, Plzeň, 2006
- [5] přednášky předmětu materiály v silnoproudé elektrotechnice, KET/MSE, ZČU, 2011
- [6] Mleziva J., Šňupárek J.: Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití; Sabotáles, 2000
- [7] Ducháček V.; Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití; Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha, 2005
- [8] Kučerová E.; Elektrotechnické materiály, Plzeň: Západočeská univerzita, 2002
- [9] Mentlík V., Pihera J., Polanský R., Prosr P., Trnka P.; Diagnostika elektrických zařízení; BEN- technická literatura, Praha, 2008
- [10] Kreidl M., Petr J., Novák J., Houfek P., Doubek J.; Diagnostické systémy; ČVUT, Praha 6