

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Detekce samoregenerace foliového kondenzátoru

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav KŘIVANEC**
Osobní číslo: **E12N0013K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Detekce samoregenerace foliového kondenzátoru**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Popište konstrukci a technologii výroby kondenzátorů z metalizované fólie.
2. Vypracujte přehled diagnostických metod ke sledování stavu svitkových kondenzátorů.
3. Navrhněte metodu a zařízení ke sledování samoregenace vnitřní části foliového kondenzátoru.
4. Ověřte a vyhodnoťte navrženou metodu.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- 1. Přednášky či skripta doporučených předmětů.**
- 2. Elektronické informační zdroje.**
- 3. Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Jiří Laurenc, CSc.

Katedra elektroenergetiky a ekologie

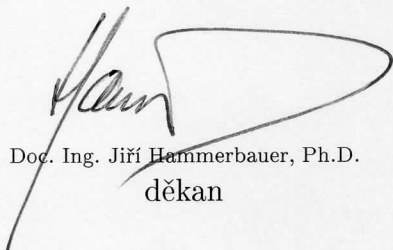
Konzultant diplomové práce:

Ing. Ota Erben

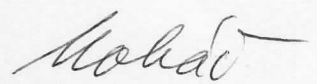
Vishay Electronic spol. s r. o.

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na teoretický rozbor svitkového kondenzátoru vyráběného MKP technologií, popis výrobního procesu a rizik, které mohou při výrobě nastat a ovlivnit tak kvalitu kondenzátoru. Nedílnou součástí výroby kondenzátoru jsou elektrické testy, které odhalí nedostatky kondenzátoru. Jejich následné analýzy pak pomohou určit příčiny. Součástí této diplomové práce je hledání nové doplňující metody pro vyhodnocení. Jedná se možnost detekce samoregeneračních výbojů vznikajících uvnitř kondenzátoru během elektrického testu.

Klíčová slova

Kondenzátor, svitkový kondenzátor, dielektrikum, MKP technologie, samoregenerace, self-healing, kapacita, činitel jakosti, ...

Abstract

The master thesis is focused on the theoretical analysis of winding capacitor made by MKP technology, description of manufacturing process and risks, which have influence on capacitor quality. Important part of capacitor production are electrical tests which serve to finding of capacitor deficiency. Analysis can help determine the causes. The par of this thesis is research of new additional method to evaluation. Is it possibility of detection of self-healing discharges which occur inside the capacitor during electrical test.

Key words

Capacitor, winding capacitor, dielectric, MKP technology, self-healing, capacity, quality factor, ...

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou 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 diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 6.5.2013

Václav Křivanec

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Jiřímu Laurencovi CSc. a Ing. Otě Erbenovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	9
1 KONDENZÁTOR.....	10
1.1 KONDENZÁTOROVÝ SVITEK.....	11
1.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA KONDENZÁTORU.....	13
1.3 ZTRÁTOVÝ ČINITEL.....	14
1.4 MKP TECHNOLOGIE	15
1.5 SAMOREGENERACE (SELF-HEALING)	16
2 VÝROBNÍ PROCES SVITKOVÉHO KONDENZÁTORU	18
2.1 NAVÍJECÍ PROCES.....	19
2.1.1 Více-sériové fólie	19
2.1.2 Navinutí.....	20
2.2 ŽÁROVÉ POKOVENÍ.....	21
2.3 TEMPERACE.....	22
3 DIAGNOSTIKA SVITKOVÉHO KONDENZÁTORU	22
3.1 REGENERACE.....	23
3.2 NAPĚŤOVÝ TEST	23
3.3 MĚŘENÍ KAPACITY A ZTRÁTOVÉHO ČINITELE	26
4 MOŽNOSTI DETEKCE SAMOREGENERACE	28
4.1 PIEZOTRON	30
4.1.1 Implementace 1 – neautomatizovaný test.....	31
4.1.2 Test funkčnosti	31
4.1.3 Vyhodnocení neautomatizovaného testu	31
4.1.4 Implementace 2 – automatizovaný test	32
4.1.5 Vyhodnocení 2 – automatizovaný test.....	32
4.2 DALŠÍ MOŽNOSTI SLEDOVÁNÍ	32
4.2.1 Detekce částečných výbojů.....	32
5 ZÁVĚR	35
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	36

Seznam symbolů a zkratek

C	Kapacita [F]
D	Elektrická indukce [C/m^2]
d	Tloušťka dielektrika [m]
E	Intenzita elektrického pole [V/m]
f	Frekvence [Hz]
I	Elektrický proud [A]
Q	Elektrický náboj [C]
S	Plocha elektrody [m^2]
U	Elektrické napětí [V]
X_C	Reaktance kapacitní [Ω]
ε	Permitivita prostředí [F/m]
$tg \delta$	Ztrátový činitel [-]

Úvod

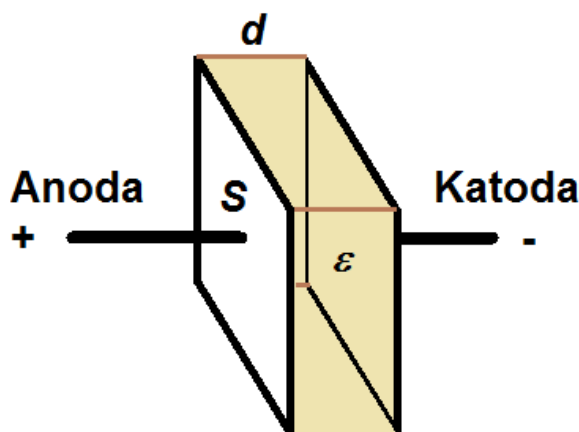
Předkládaná práce je zaměřena na výrobu a elektrický test svitkového kondenzátoru. Během výroby může docházet k jevům, které negativně ovlivní kvalitu kondenzátoru. Tyto jevy jsou zde rozebírány a jsou popsány jejich vyhodnocovací metody.

Text je rozdělen do čtyř částí. První se zabývá teorií kondenzátoru. Druhá je zaměřena na přímou výrobu svitkového kondenzátoru. Ve třetí části se zaměřuji na elektrické testy, které jsou nutné pro uvolnění výrobku. Poslední část je věnována způsobům detekce samoregeneračních procesů uvnitř kondenzátoru vyrobených MKP technologií s využitím vlastností, jež provází tento jev.

1 Kondenzátor

Kondenzátor je jedna ze tří základních pasivních elektronických součástek používaná téměř ve všech elektrických obvodech. Její základní princip využití je dočasné uchování elektrického náboje. Velikost uchovaného náboje pak závisí na druhu kondenzátoru, respektive dielektriku a jeho složení a napětí. To je limitováno opět dielektrikem a celkovou konstrukcí kondenzátoru.

Zjednodušíme-li si pohled na kondenzátor, jedná se v principu o dvě vodivé desky o plochách S (elektrody), jež jsou od sebe odděleny dielektrikem (elektroizolačním materiálem) o permitivitě ϵ ve vzdálenosti d (Obr. 1).



Obr. 1: Kondenzátor

Po připojení napětí na elektrody dojde k nahromadění elektrického náboje Q na povrchu vodivé desky. Množství náboje na jednotku plochy nazýváme elektrická indukce D . Můžeme ji tedy vyjádřit vztahem:

$$D = \frac{Q}{S} \quad [C \cdot m^{-2}] \quad (1-1)$$

Mezi deskami pak vzniká homogenní elektrické pole o intenzitě E , které je nepřímo úměrné permitivitě prostředí. Permitivita je pak určena konstantou ϵ_0 (permitivita vakua) zvětšenou násobkem relativní permitivity, která určuje kolikrát je permitivita materiálu větší než permitivita vakua.

$$E = \frac{Q}{S \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} = \frac{D}{\epsilon} \quad [V \cdot m^{-m}] \quad (1-2)$$

Jako příklad je zde uvedena tabulka několika materiálů a jejich relativní permitivity prostředí.

Materiál	Relativní permitivita ϵ_r
<i>Vzduch</i>	1,00054
<i>Papír</i>	1,6 – 2,6
<i>Polypropylen</i>	2,0 - 2,2
<i>Suché dřevo</i>	2,0 – 6,0
<i>Sklo</i>	3,7 - 10

Tabulka 1: Relativní permitivita dielektrik [5]

Pro homogenní elektrické pole, které se nalézá v kondenzátoru, pak můžeme použít vztah pro výpočet napětí:

$$U = E \cdot d = \frac{Q}{S \cdot \epsilon} \cdot d \quad [V] \quad (1-3)$$

Z výše uvedeného pak je patrné, že sestavíme-li kondenzátor, konstanty S , ϵ a d jsou dále neměnné, zanedbáme-li vlivy oteplení a postupnou degradaci materiálu. A právě tyto konstanty nepřímo úměrně určují kapacitu kondenzátoru. Tedy:

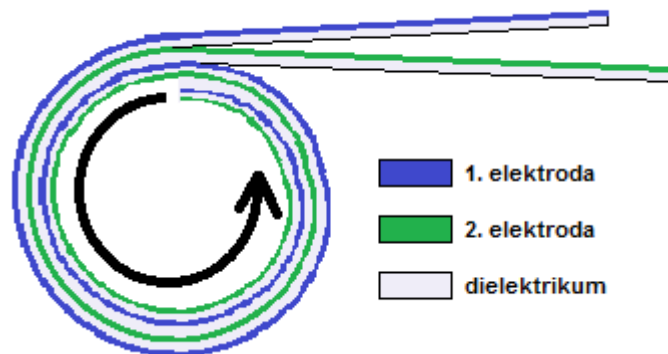
$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{d} \quad [F] \quad (1-4)$$

1.1 Kondenzátorový svitek

Pojem kondenzátorový svitek můžeme nalézt hned ve dvou normách. Jedna z nich, ČSN_EN_61071, Kondenzátory pro výkonovou elektroniku, definuje kondenzátorový svitek (nebo jen svitek) jako „část kondenzátorové jednotky sestávající ze dvou elektrod oddělených

(izolovaných)¹. Druhá norma, ČSN_EN_60831-1, hovoří o kondenzátorovém svitku jako o „části zařízení sestávající ze dvou elektrod oddělených od sebe dielektrikem“².

My si jej můžeme definovat jako dvě a více elektrod, navzájem oddělených dielektrikem, navinutých do tvaru svitku (více viz bod 2.1). Rozměry jsou pak závislé na požadovaném napětí a kapacitě kondenzátoru. V principu to pak vypadá tak, jak je uvedeno na následujících obrázcích.



Obr. 2: Svitkový kondenzátor



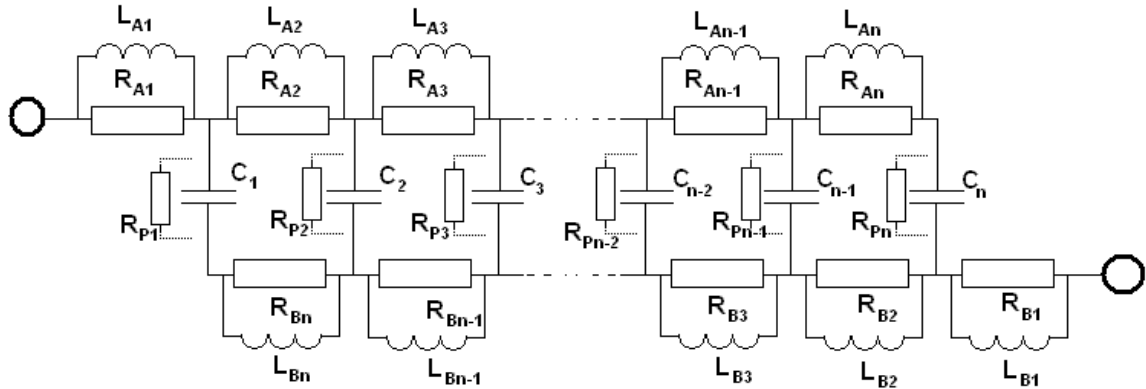
Obr. 3: Příklad reálných svitkových kondenzátorů MKP

¹ Citace z [2] s. 10, odstavec 3.1.

² Citace z [3] s. 10, odstavec 3.1.

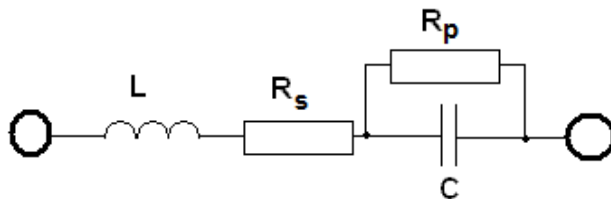
1.2 Náhradní schéma kondenzátoru

Každý kondenzátorový svitek s vnitřním jedno-sériovým zapojením (viz bod 2.1) lze prakticky rozdělit na nekonečné množství sérioparalelních spojení RLC prvků. Neuvažujeme nyní přívody.



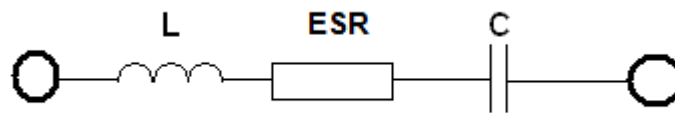
Obr. 4: Reálný svitkový kondenzátor

Pro zjednodušení: rezistivitu R_A a R_B můžeme vyjádřit ekvivalentním odporem R_S což je součet rezistivit kovových desek (elektrod), žárově nanesené připojovací kovové vrstvy (bod 2.22.2) a povrchových ztrát. R_P pak vyjadřuje elektrický odpor dielektrika, ať již polypropylenové fólie nebo vzduchu, tak i případný povrchový odpor v místech vzniku samoregeneračního průrazu. Indukčnost je v tomto případě, dá se říci, zanedbatelná, neboť přívody, které mají největší vliv na indukčnost, zde uvažovány nejsou. Přesto v náhradním schématu (Obr. 5) je zakreslena jako L . Její vliv se projeví při vysokých frekvencích (řádově nad stovky kilohertz). C je pak již jen součet dílčích, vzájemně paralelních kapacit, které jsou v ideálním případě v každé části stejné.



Obr. 5: Náhradní schéma reálného svitkového kondenzátoru

V praxi se dnes používá zjednodušené náhradní schéma kondenzátoru pro průběh střídavého proudu, kde R_S a R_P nahrazuje **ESR** = Ekvivalentní sériový odpor kondenzátoru. Opět zde nalezneme indukčnost L , vyjadřující induktivitu připojovacích drátů a spojení (pro nás zanedbatelná) a vlastní kapacitu kondenzátoru C .



Obr. 6: Zjednodušené náhradní schéma reálného kondenzátoru

1.3 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel, jinak také $\text{tg}\delta$, udává reálné činné ztráty v poměru k jalovým ztrátám kondenzátoru. Jedná se o kmitočtově závislou veličinu. Tudiž její parametr určuje, zda je daný kondenzátor vyhovující pro konkrétní aplikaci, nebo ne. Je-li v měřicím (testovacím) protokolu uváděn ztrátový činitel, je u něj uvedena i frekvence, při které byl ztrátový činitel měřen.

$$\text{tg}\delta = \frac{P}{Q} \quad [-] \quad (1-5)$$

Z Obr. 6 plyne, že činné ztráty lze vypočítat pomocí celkového proudu kondenzátoru procházejícím ekvivalentním sériovým odporem ESR (1-6). Jalová složka kondenzátoru je ryze kapacitního charakteru a lze ji vyjádřit podle vzorce (1-7). Složka Indukční je natolik zanedbatelná, že se zde neuvažuje.

$$P = I^2 \cdot ESR \quad [W] \quad (1-6)$$

$$Q = I^2 \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} \quad [Var] \quad (1-7)$$

Dosazením do vzorce (1-5) a jeho úpravou dostaneme vztah (1-8). Z toho je již jasně patrné, že ztrátový činitel pro daný kondenzátor je závislý na kmitočtu.

$$\text{tg}\delta = ESR \cdot \omega \cdot C \quad [-] \quad (1-8)$$

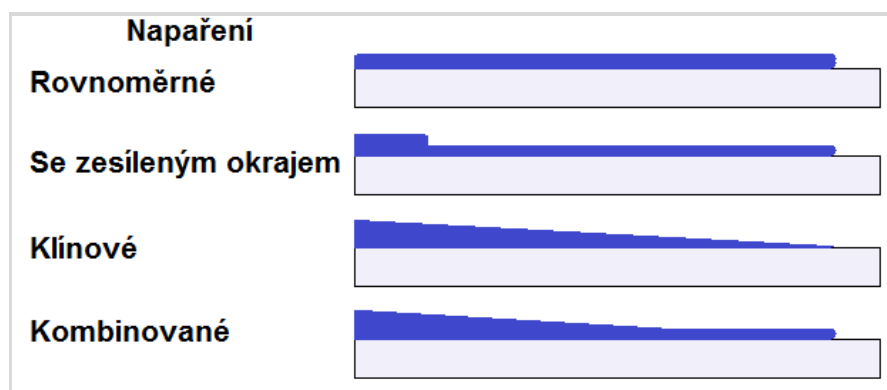
1.4 MKP technologie

Tato diplomová práce je zaměřena na svitkové kondenzátory vyráběné MKP technologií. Zkratka MKP vychází z německého výrazu „Metallisiertet Kunststoff Polypropylen“ a jedná se o polypropylenovou fólii, na které je napařena slabá vodivá vrstva kovu, převážně zinku, nebo hliníku. Vzhledem k tomu, že čistý zinek neulpívá dobře na polypropylenové fólii, je pokovení buďto v jednom kroku směsicí 95 % zinku a 5% hliníku (tzv. Alloy), nebo ve dvou krocích, přičemž v prvním kroku se nejprve nanáší slabá vrstva stříbra a následně se napařuje zinková vrstva (Obr. 7). Tento proces se provádí pod vakuem a k dobré přilnavosti a přenosu par kovů se využívá elektrostatického napětí. Vrstva nanášené metalizace je řádově desítky nanometrů. Polypropylenové fólie se pak používají řádově jednotky mikrometru silné.



Obr. 7: Řez pokovenou polypropylenovou fólií (MKP)

Stejně jako průřez a délka drátu určuje jeho odpor, tak odpovídá síla napařené vrstvy nepřímo úměrně velikosti plošného odporu metalizace. Různé druhy použití kondenzátorů vyžadují různé druhy metalizace. Zda je odpor lineární nebo se zvyšuje se vzdáleností od kontaktu nelineárně, závisí na způsobu napaření vodivé vrstvy. V tom případě pak hovoříme o profilu metalizace. Ten je závislý na požadavcích kondenzátoru. Příklady profilů metalizace jsou uvedeny v následujícím přehledu. Zesílený okraj je určen pro vytváření kontaktů.



Obr. 8: Profily metalizace

1.5 Samoregenerace (Self-Healing)

Samoregenerace, nebo také často užívaný anglický termín Self-Healing, je samovolný proces vznikající při poruchách dielektrika kondenzátoru vytvořených MKP technologií. Její základní vlastností je v případě průrazu odizolovat dvě elektrody o různém potenciálu a tím udržet kondenzátor dále provozuschopný bez výrazné změny kapacity nebo ztrátového činitele.

Norma ČSN_EN_61071 definuje samoregenerační kondenzátor s pokoveným dielektrikem jako „kondenzátor, jehož nejméně jedna elektroda obsahuje kovovou vrstvu nanesenou na dielektriku“³. Dále norma ČSN_EN_60831-1 definuje samoregenerační kondenzátor jako „kondenzátor, jehož elektrické vlastnosti se urychleně uvedou do původního stavu po místním průrazu dielektrika“⁴.

Provedeme-li řez svitkovým kondenzátorem, zjistíme v místě řezu, že se v principu jedná o vrstvený kondenzátor, jehož každá sudá vrstva (elektroda) má stejný potenciál. Stejně tak každá lichá vrstva (Obr. 9). Tyto vrstvy jsou galvanicky spojeny.

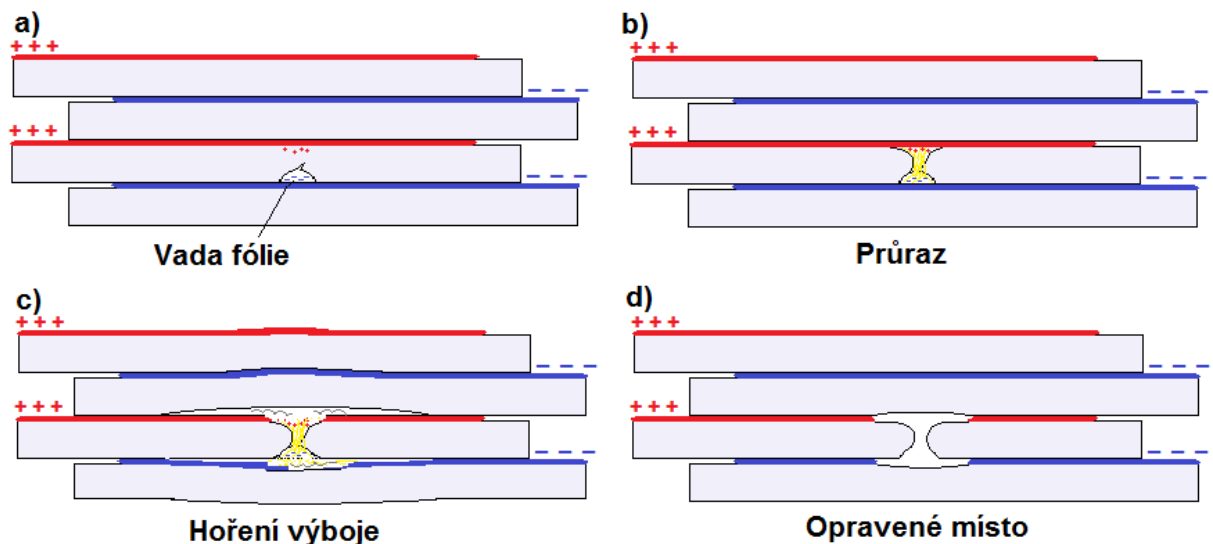


Obr. 9: Řez svitkovým kondenzátorem

Jedná-li se o kondenzátor s vnitřním jedno-sériovým zapojením, je mezi dvěma vrstvami plné napětí kondenzátoru. To je limitováno elektrickou pevností jediné vrstvy polypropylenu. U dvoj-sériové kombinace je pak napětí poloviční atd. Právě vnitřní nečistoty či bublinky v polypropylenu nebo jeho zeslabení (protlačení) vlivem výrobního procesu (nečistoty) mohou snížit elektrickou pevnost a zvýšit tak riziko průrazu uvnitř kondenzátoru. Princip samoregenerace je znázorněn na obrázku Obr. 10.

³ Citace z [2] s. 11, odstavec 3.8.

⁴ Citace z [3] s. 11, odstavec 3.3.



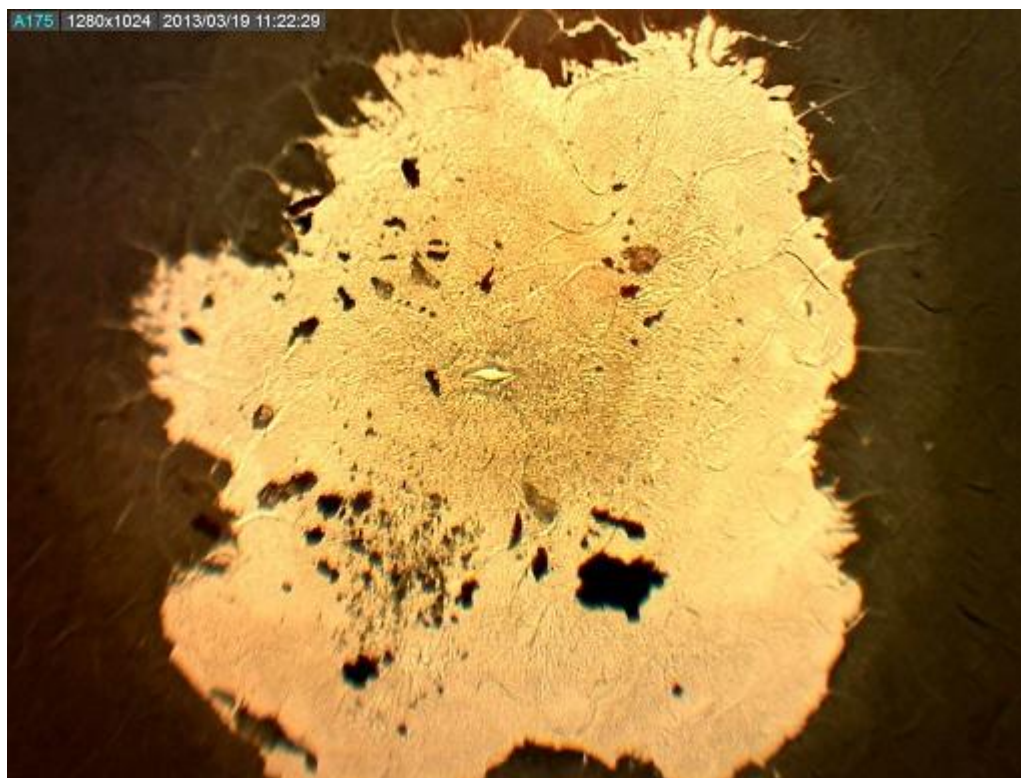
Obr. 10: Princip samoregenerace

Po přivedení napětí na elektrody a jeho postupném zvyšování se zvyšuje i intenzita elektrického pole mezi jednotlivými vrstvami. Po dosažení určitého napětí je pro zdravé dielektrikum intenzita pod kritickou mezí. V místech vady fólie (Obr. 10a) je však tato mez lokálně překročena a dojde k výboji, který způsobí průraz dielektrikem (Obr. 10b). V tu chvíli se zde vytvoří vodivý kanál mezi elektrodami a začne hořet elektrický oblouk, jenž je napájen energií kondenzátoru (Obr. 10c). Během hoření se vlivem velmi vysokého proudu opalují (vypařují) okraje vodivé vrstvy elektrod v okolí průrazu čímž se zvětšuje průměr opáleného bodu. Tím se zároveň zvětšuje vzdálenost mezi elektrodami a elektrický oblouk se s časem prodlužuje. Vzhledem k tomu že vodivá vrstva má záměrně určitou rezistivitu, napětí ve zdravé části svitku sice dodává energii i postiženému místu, ale z principu nabíjecí charakteristiky kondenzátoru jde o dobíjení postupné a napětí v místě průrazu je tedy nižší. S postupujícím časem tedy přijde chvíle, kdy vzdálenost elektrod je již velká a napětí v místech průrazu již není dostatečné na udržení oblouku. Tím dojde k samovolnému zhašení. To vše se děje v čase řádově μs až ms . V tak krátkém čase se nestačí dielektrikum (polypropylen) roztavit natolik, aby pomohl ke zkrácení dráhy výboje. Výsledkem tedy je sice v bodě porušená vrstva dielektrika, ale metalizace v jeho okolí je odstraněna, čímž se elektrody od sebe odizolují (Obr. 10d).

Následující obrázky ukazují self-healing v praxi.



Obr. 11: Self-healing v praxi



Obr. 12: Self-healing 300x zvětšení

2 Výrobní proces svitkového kondenzátoru

Výrobní proces svitkového kondenzátoru se dá rozdělit do tří částí:

- Navinutí svitku
- Vytvoření kontaktních ploch

- Temperace

Všechny tyto tři kroky mohou více či méně ovlivnit jakost kondenzátoru.

2.1 Navíjecí proces

Navinutí svitkového kondenzátoru je nejkritičtější fází výroby kondenzátorů. Při této části je kladen velký důraz na jakost prostředí výrobních prostor. Jedná se o limity teplot, vlhkosti a prašnosti nebo o čistotu obecně. Stejně důležitá je i údržba navíjecích strojů.

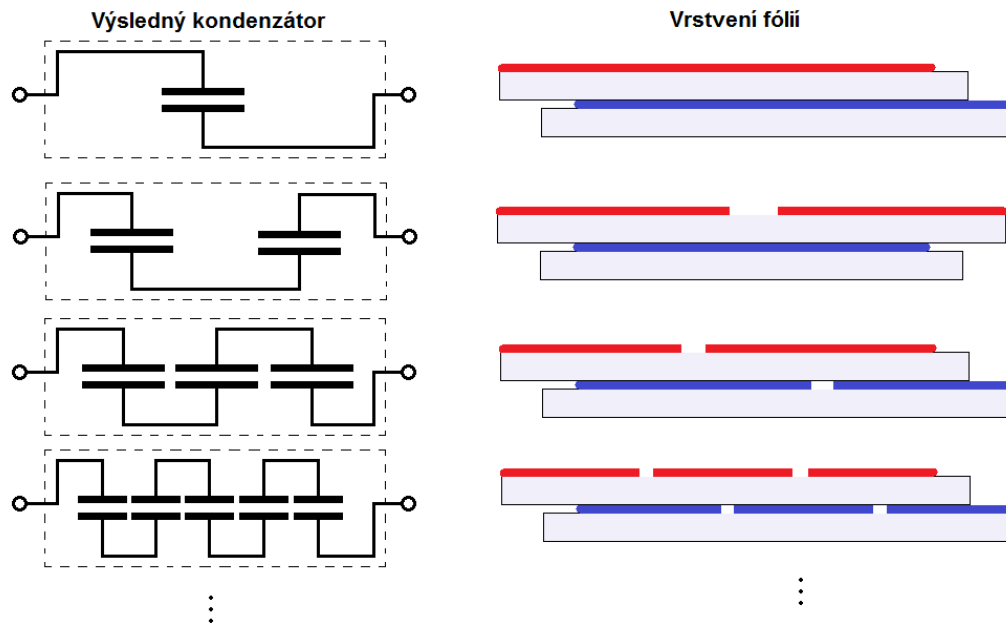
Samotné navíjení je pak v podstatě proces skládání jednotlivých vrstev pokoveného dielektrika. Podíváme-li se zpět na řez fólií (Obr. 7), všimneme si, že na jedné straně není metalizace po celé šířce fólie. Tato volná oblast slouží k tomu, aby se zamezilo přeskočení napětí přes okraj fólie z jedné elektrody na druhou (Obr. 13). Stejně důležitý je pak přesah fólií. Metalizované fólie se skládají s určitým přesahem. Ten zaručuje stabilitu kapacity pro všechny svitky a zároveň vytváří prostor pro uchycení kontaktů k metalizované vrstvě pomocí žárového pokovení (viz kapitola 2.2)



Obr. 13: Skládání fólií

2.1.1 Více-sériové fólie

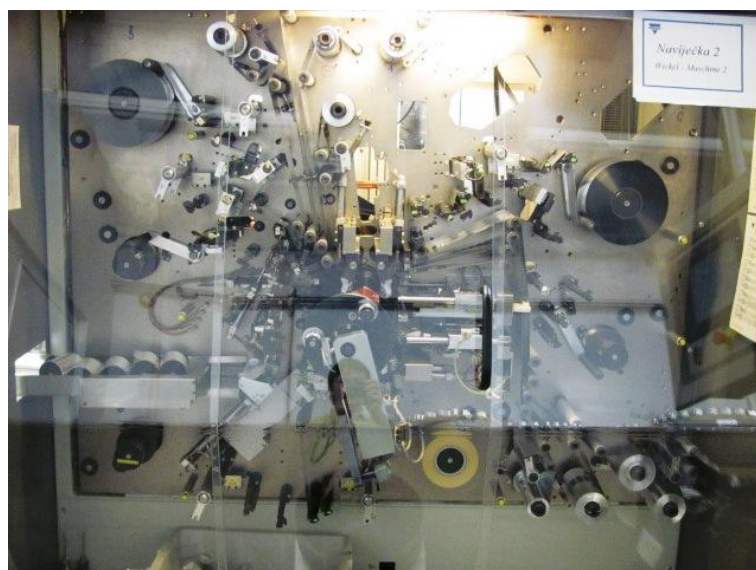
V závislosti na segmentaci fólií lze vytvářet více-sériové zapojení kondenzátoru v jednom jediném svitku. V zásadě jde o podélně přerušovanou vrstvu metalizace, kde pak každý pruh vytváří novou elektrodu. Následující tabulka znázorňuje princip skládání segmentovaných (sériových) fólií.



Obr. 14: Skládání sériových fólií

2.1.2 Navinutí

Základem svitku je pevné jádro o délce korespondující s výškou svitku. Následují vrstvy aktivní fólie. Ty jsou natáčeny na jádro za zvýšeného tahu fólie a zároveň jsou tlačeny k jádru přítlačnými válečky, čímž se minimalizuje množství vzduchu mezi jednotlivými vrstvami. Důvodem je tedy snaha o dosažení co největší homogenity a stability dielektrika. Po navinutí metalizované fólie se nakonec navine ještě několik vrstev čisté polypropylenové fólie, která má ochranný charakter proti mechanickému poškození a udržuje svitek kompaktní.



Obr. 15: Navíjecí stroj



Obr. 16: Navinuté svítky v přepravním platu

2.2 Žárové pokovení

Dalším důležitým krokem je žárové pokovení. Jedná se o nanesení vrstvy, na kterou je možné pájet další kontakty a připojení. V principu jde o elektrický oblouk mezi dvěma posunujícími se dráty obsahujícími 99,9% zinku, které se taví a následně jsou rozprašovány tlakem vzduchu na svitek.



Obr. 17: Žárové pokovení

Zde je důležité dodržet správnou vzdálenost svitku od elektrického oblouku, aby došlo k dostatečnému natavení fólie a zinek ulpěl na aktivní vrstvě a zároveň, aby se polypropylen nespálil. V opačných případech pak dojde k nekvalitní vodivé vrstvě, což má při proudovém zatížení za následek spálení přechodu žárově pokovené vrstvy a metalizované fólie. Stejně tak nečistoty, které se mohou usadit na obnažené aktivní vrstvě před pokovením (prach atp.) mohou mít stejný následek. Zinkový nástřík zapadne mezi jednotlivé vrstvy, jak znázorňuje následující obrázek.



Obr. 18: Princip žárového nástříku

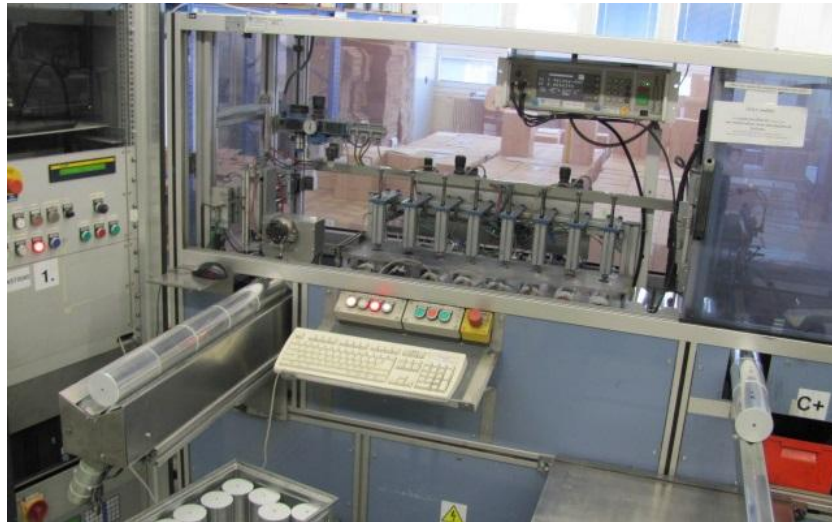
2.3 Temperace

Temperací svitků se rozumí proces, kdy jsou svitky vystaveny specifické teplotě, při níž dochází ke smršťování fólie, nikoli však k jejímu tavení. Polypropylenové fólie, ať již základní fólie určené pro metalizaci (aktivní fólie), nebo krycí fólie, jsou vyráběny metodou tažením. Z granulátu se „odlévá“ pás polypropylenu, jenž se následně znovu ohřívá a za tepla je natahován. Vznikají tak několikametrové role, které mají již potřebnou tloušťku a řezou se pouze na požadované pruhy.

Během procesu temperace pak dochází k vyvolání „paměťového efektu“, neboli fólie má tendenci se vracet se do původních rozměrů. Tím dojde ke stažení jednotlivých vrstev ještě větší silou, než bylo docíleno během procesu navíjení. Zároveň se stáhne i krycí fólie, která se tím zpevní a zlepší svoji krycí schopnost.

3 Diagnostika svitkového kondenzátoru

Před použitím hotového svitkového kondenzátoru určeného následně k výrobě zapouzdřeného kondenzátoru, musí být svitek podroben předběžnému elektrickému testu. Tím se docílí toho, že pro další výrobu jsou použity svitky požadované jakosti. Systém předběžného elektrického testu se skládá z několika částí. První část je tzv. regenerační. V druhé části je svitek podroben napěťovému a proudovému zatížení. Třetí část slouží ke změření a vyhodnocení kapacity a ztrátového činitele.



Obr. 19: Automatizované zařízení pro elektrický test a vyhodnocení svitkových kondenzátorů

3.1 Regenerace

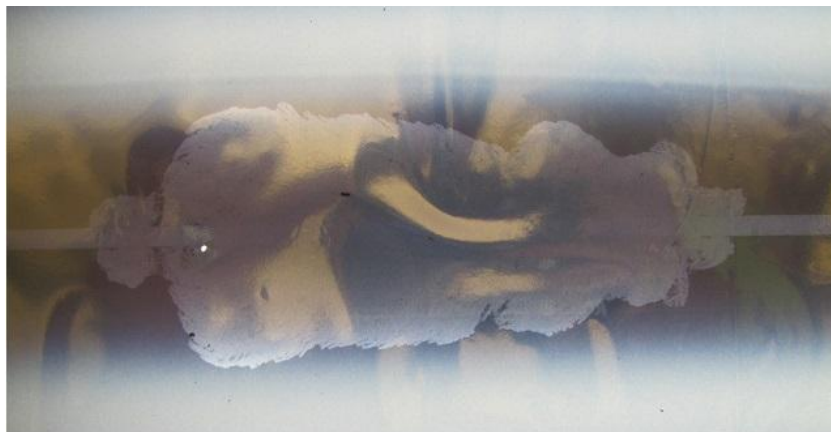
Při procesu regenerace je svitek zapojen do obvodu střídavého proudu. Zde je vystaven působení střídavého proudu s energií dostatečnou na to, aby „vyléčila“ místa přímého styku elektrod (nečistoty v dielektriku), která by následně v druhém kroku vysoké DC napětí nemohlo „vyléčit“, neboť nabíjecí proud stejnosměrného vysokonapěťového zdroje je pouze řádově stovky miliampér. Zároveň zde dochází k proudovému namáhání pokovených vrstev a v případě zeslabení metalizace způsobené poškrábáním dojde k narušení této zeslabené vrstvy (odpaření vlivem vysokého proudu). Lepšího efektu se ale v tomto případě dosáhne při vybíjení HV testu. V případě tvrdého zkratu (neregenerativní průraz, špatné vnitřní zapojení fólií atp.) by obvod působil jako zdroj na krátko. Z toho důvodu je do série zapojen rezistor, který limituje maximální proud.

3.2 Napěťový test

Tato část zkoušky slouží k otestování, zda svitek je schopen vydržet napětí, na které je kondenzátor navržen, s dostatečnou rezervou krátkodobého přepětí. Můžeme ji rozdělit do dvou částí. První část je nabíjení a vystavení svitku působení vysokého napětí. Druhá část zahrnuje proces vybíjení.

V první části se během nabíjení opět „léčí“ vady na fólii a to principem, který je popsán v kapitole 1.5. Zároveň se otestuje, zda svitek nemá takové chyby, které by mohly způsobit masivní průraz, nebo destrukci kondenzátoru. To může být například nedostatečné stažení fólií, což může mít za důsledek přeskok napětí ve volném prostoru u sériových fólií. Stejně

efekty pak může způsobit průraz právě poblíž volného středu u sériových fólií. Vznikajícím a rozpínajícím se plynem se od sebe fólie vzdálí, čímž vznikne volný prostor, kde může dojít k přeskoku, jak je vidět na Obr. 20. Světlý bod je bod průrazu, světlá mapa je odmetalizovaná část fólie, kde po přeskoku došlo k samoregeneraci. Ve valné většině zde princip self-healingu zafunguje a místo se skutečně opraví, dojde-li k tomu ale v posledních závitech svitku, může dojít k destrukci posledních vrstev (Obr. 21). Tím je svitek znehodnocen.



Obr. 20: Přeskok a následné „vyléčení“ v místě průrazu

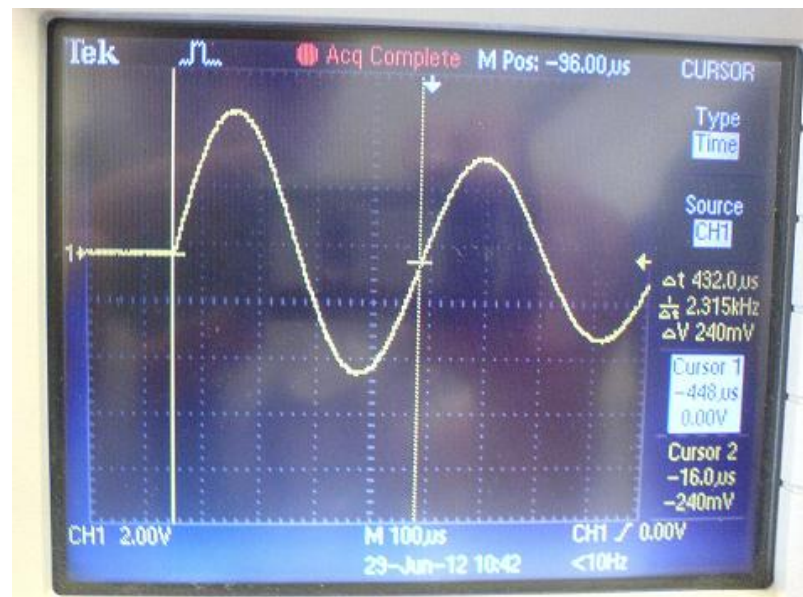


Obr. 21: Svitky po přeskoku v posledních závitech aktivní fólie

Další skutečně zatěžovací částí testu je vybíjení. Při vybíjení je svitek zapojen do jednoduchého obvodu na krátko, jež je tvořen spínacím prvkem a tlumící indukčností, neboť vodiče tvoří jen velmi malou rezistivitu. Po připojení kontaktů dojde k sepnutí spínače, který je v tomto případě tvořen vakuovým odpínačem, jehož výhodou je dlouhá životnost a minimální nároky na rozměry při zachování dostatečné elektrické pevnosti a spolehlivosti vůbec.

Špičkový proud při vybíjení bez tlumivky dosahuje i desítky kA (limitováno pouze přechodovými odpory, rezistivitou a indukčností vodičů). Změříme-li osciloskopem průběh vybíjení kondenzátoru (Obr. 22), z odečtených hodnot amplitudy a jejího poklesu a ze známých hodnot napětí kondenzátoru před vybitím a jeho kapacity lze spočítat vybíjecí

proud. Například pro námi sledovaný kondenzátorový svitek 85 μF a napětí 2 kV vznikne špičkový vybíjecí proud 1,79 kA. Zvedneme-li testovací napětí na 4,14 kV, dosáhneme špičkového proudu 4,32 kA.



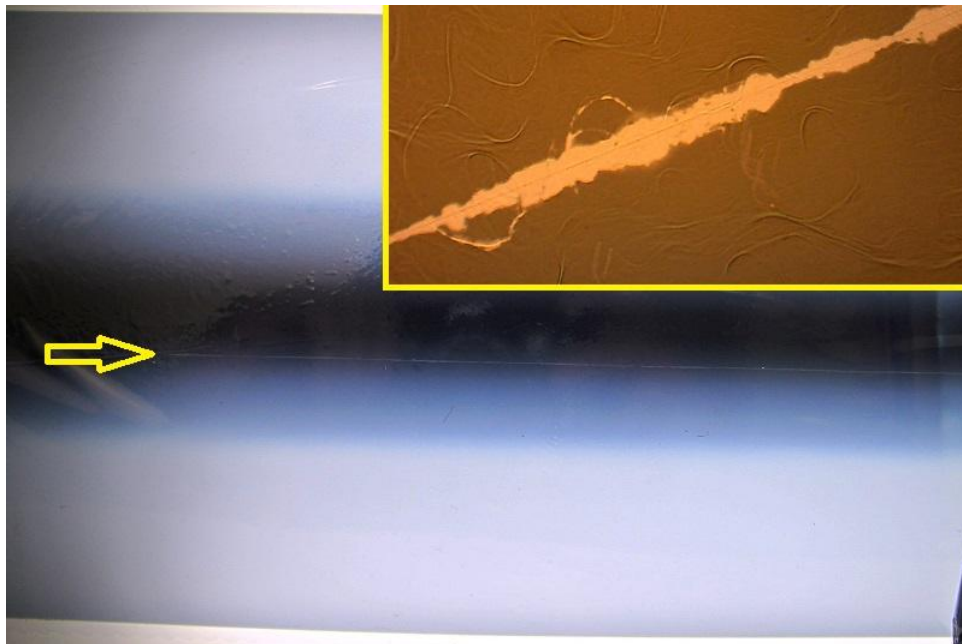
Obr. 22: Osciloskopem měřený průběh vybíjení kondenzátoru při $U=2\text{kV}$, $C=85\ \mu\text{F}$

Z toho důvodu je do obvodu zařazena do série indukčnost, která má za úkol snížit vybíjecí proud na přijatelnou míru. Ta je závislá na délce fólie, přes kterou proud prochází a na metalizaci fólie. Připojíme-li však přídavnou tlumivku 100mH, sníží se špičkový proud při 4,14 kV na 2,6 kA, tzn. o 40 %.

V případě špatného kontaktu mezi žárovým pokovením a metalizovanou vrstvou (viz kapitola 2.2) dojde pak ke spálení vrstvy a jejímu oddělení. To se projeví ve výsledku jako mnohonásobně zvýšená t_{gd} . Stejně tak narušení metalizované vrstvy poškrábáním a následným působením vysokého vybíjecího proudu způsobí její přerušení. Je-li přerušení po celé délce fólie, sníží se jeho kapacita v poměru rozdělení aktivní plochy škrábancem. Je-li přerušení jen částečné, opět je vyhodnocen svitek v následujícím kroku jako defektní se zvýšenou T_g . V praxi to pak vypadá, jak ukazují následující obrázky.



Obr. 23: Příklady nekvalitně pokovené vrstvy podrobené proudovému zatížení



Obr. 24: Nepatrná rýha na metalizaci a její 500 násobné zvětšení

3.3 Měření kapacity a ztrátového činitele

Závěrečný test má za úkol vyhodnotit kapacity a ztrátového činitele svitkového kondenzátoru. Jedná se o čtyřbodové měření můstkovou metodou, kterou v praxi realizuje například zařízení firmy Quadtech. Nedostatky a poškození kondenzátoru se během předešlých napěťových zkoušek umocnily a nyní se defekty projeví zvýšením ztrátového činitele a snížením kapacity.

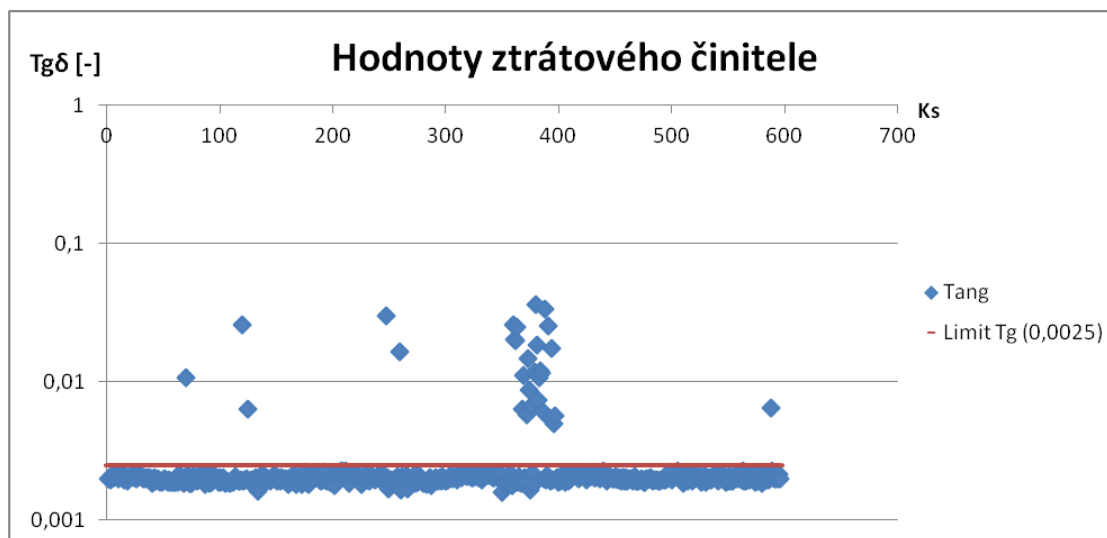
Jako příklad si uvedeme dávku kondenzátorů, kde během navíjecího procesu došlo k poškození aktivní fólie.

Bylo elektricky otestováno a změřeno 910 svitkových kondenzátorů navinutých z dvou-sériové fólie na jmenovitou kapacitu 32 μF . Dielektrikum o tloušťce 6,5 μm . Byly podrobeny testovacímu napětí 4485 VDC po dobu 2s a měření kapacity a ztrátového činitele při 1 kHz. Během testu bylo automaticky vyřazeno 34 kusů, přičemž 6 jako chyba kapacity a 26 se zvýšenou $\text{Tg}\delta$.

Analýzou změřených hodnot a vadných svitků jsem zjistil následující: Kusy, které byly vyřazeny jako kondenzátory s nízkou kapacitou (označené jako „C-“) mají sice ztrátový činitel v limitu, ale jejich celková kapacita je 21,9 μF u všech 6 svitků. Následnou analýzou fólie byl objeven škrábanec po celé délce fólie, čímž došlo k rozdělení elektrody a zmenšení její aktivní plochy.

Kusy, které byly vyřazeny pro vysoký ztrátový činitel, měly stejnou povahu poškození fólie s rozdílem, že poškození nebylo po celé délce fólie, ale pouze místy. Tím se prodloužila dráha pro nabití celé deskové elektrody kondenzátoru a zvýšil se tak celkový plošný odpor, který je jednou ze složek ztrátového činitele. Právě jeho zvýšení pak může mít za následek nadměrné zahřívání kondenzátoru (tepelné = činné ztráty) a způsobit tak degradaci dielektrika a kondenzátoru vůbec.

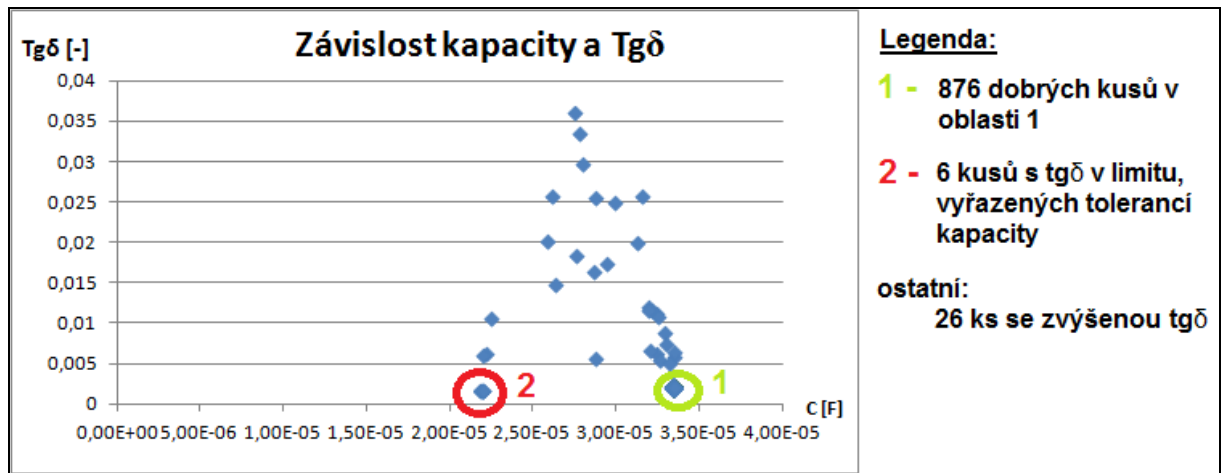
Promítneme-li si hodnoty všech svitků do grafu (Obr. 25), zjistíme patrný odstup poškozených a dobrých svitků. Počet vadných svitků koresponduje s množstvím vyrobeným z jedné role navíjecího materiálu.



Obr. 25: Hodnoty tg jednotlivých svitků vynesných do grafu

Promítneme-li si svitky do jednoho grafu jako závislost kapacity a ztrátového činitele (Obr. 26), vidíme, že všechny dobré kusy se vejdu do jednoho bodu označeného zelenou

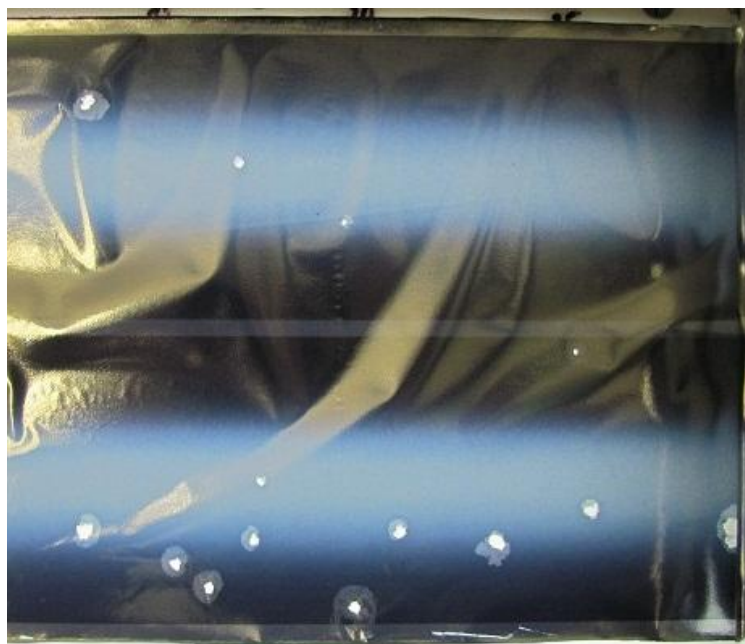
oblastí 1. V červené oblasti nalezneme svitky s čistě přerušenou metalizací, a tedy sníženou kapacitou. Ztrátový činitel by byl tedy v pořádku, leč kapacita je zcela mimo toleranci.



Obr. 26: Závislost kapacity a ztrátového činitele pro 1 kHz

4 Možnosti detekce samoregenerace

Během výroby se však občas objeví takový navíjecí materiál, u kterého není jednoznačné, zda se jedná o dobrý nebo špatný materiál. Budeme se věnovat případu zvýšeného výskytu bodů self-healingu. Důvody zvýšeného množství těchto bodů mohou být dva. V jednom případě je skutečně nekvalitní podkladový materiál, což může znamenat příliš porézní strukturu, nekvalitní zpracování a podobně. Elektrická pevnost je pak v lokálních oblastech příliš nízká a dochází k častým průrazům dielektrika. V tomto případě se jedná o rizikový a tedy nepoužitelný materiál a řešení je jednoduché – reklamace celé šarže dodavateli. Takový materiál pak může vypadat po elektrickém testu třeba takto.

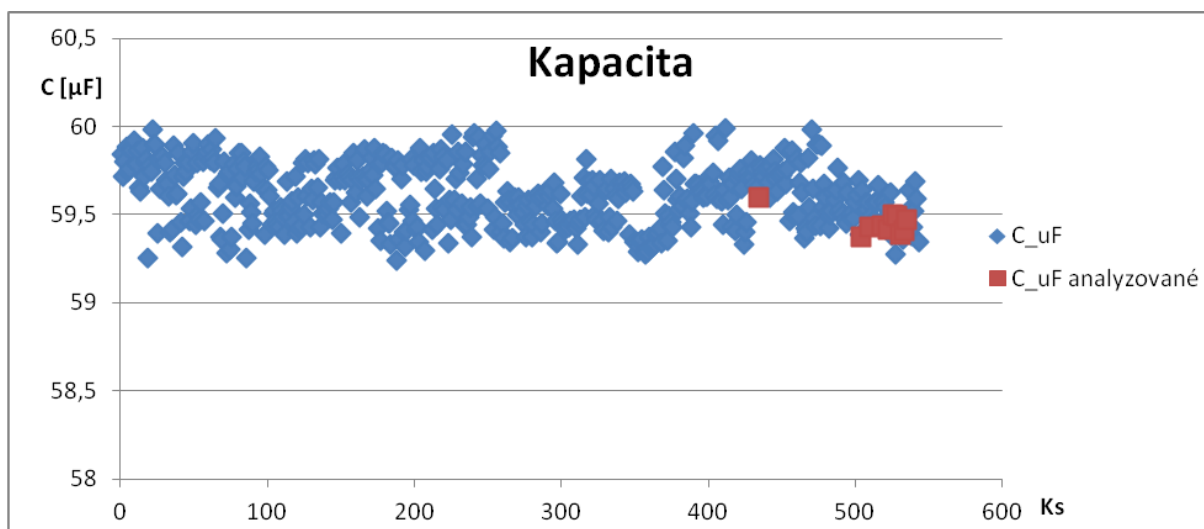


Obr. 27: Velké množství chaoticky se vyskytujícího self-healingu

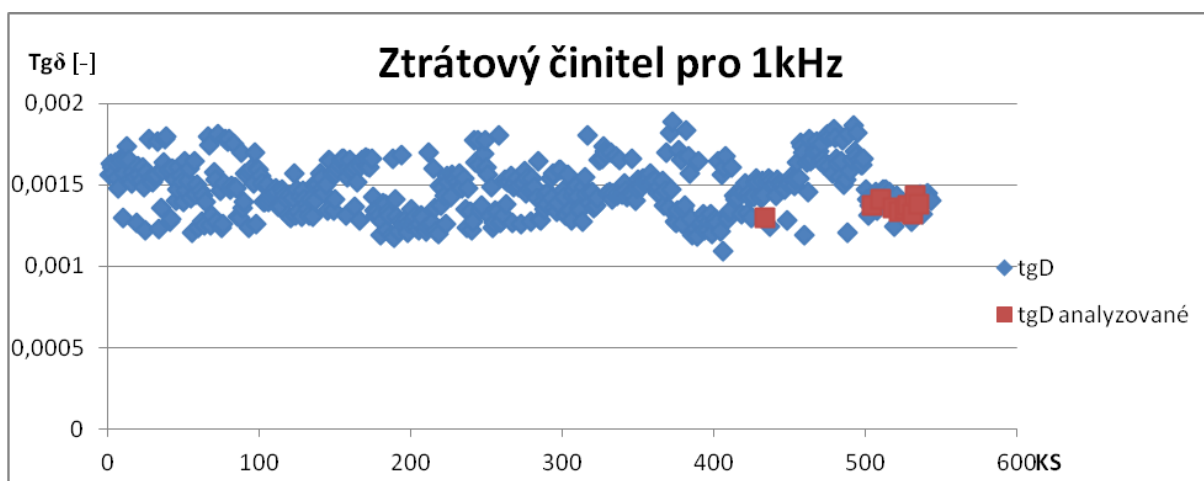
V druhém případě může jít o periodicky se opakující defekty, způsobené průchodem fólie přes rolny (propíchnutí, zeslabení), buď v navíjecím zařízení, nebo při výrobě u dodavatele. Nicméně vždy se může jednat třeba pouze o několik svitků z několika set až tisíc. Tedy z jedné navíjecí role. Z krátkodobého hlediska je možné kondenzátor považovat za zdravý. V každém postiženém bodě proběhne samoregenerace a kondenzátor pak splňuje požadované parametry. Z dlouhodobého hlediska, zejména u velkých kondenzátorů, které obsahují více než sto svitkových jednotek a na které se vztahuje záruka třeba i přes třicet let, však vyšší počet těchto bodů může znamenat předčasné stárnutí (snížení kapacity) a do budoucna příliš velké náklady na opravy a výměnu.

Analyzujeme-li hodnoty z měřené dávky, kde se vyskytl periodický self-healing, zjistíme, že není způsob jak jednoznačně vyhodnotit postižené kusy. V tomto případě se jedná o svitky navíjené na $59,5 \mu\text{F}$, testované napětím $3,45 \text{ kV}$. Dielektrikum je silné $9,8 \mu\text{m}$. Limit $Tg\delta = 0,002$ pro 1 kHz .

Z naměřených a následně analyzovaných hodnot je vidět, že postižené kusy skutečně mají charakter dobrého kusu a nelze je nijak odlišit od ostatních. V grafech jsou znázorněny červenými body. Výboje během těchto jevů jsou provázány silným specifickým akustickým šumem.



Obr. 28: Kapacity měřených kondenzátorů. Červeně zvýrazněny hodnoty kondenzátorů, u nichž proběhl zvýšený self-healing.



Obr. 29: Ztrátový činitel měřených kondenzátorů. Červeně zvýrazněny hodnoty kondenzátorů, u nichž proběhl zvýšený self-healing.

4.1 Piezotron

Jednou z možností detekce self-healingu je využití jeho akustického projevu. Pro tyto účely bylo použito zařízení od firmy KISTLER Instrument Corporation. Jedná se o akustický snímač šumu a vibrací. Zařízení pracuje na principu piezoelektrického snímače. Akustický signál vytváří vibracemi v senzoru elektrický signál, který je přes kapacitní vazbu, která odfiltruje stejnosměrnou složku, zesilován na požadovanou úroveň a následně oříznut pásmovou propustí v rozmezí 50-1000 kHz. Tento střídavý signál je pak usměřňován a určen ke zpracování. Na výstup tohoto sériově vyráběného zařízení je připojen jednoduchý komparátor, na jehož výstupu je LED indikující akustický signál o určité hladině. Zároveň je

k zařízení připojen ručičkový milivoltmetr, jenž zobrazuje velikost akustického signálu. V zásadě jde o zařízení pro akustické měření částečných výbojů uvnitř kondenzátoru.

4.1.1 Implementace 1 – neautomatizovaný test

Zařízení bylo zakomponováno do ručního testovacího přístroje. Jedná se o zařízení, kde napěťový test není automatizován a dochází k němu až po vložení a nastavení kondenzátoru do měřicího prostoru a uzavření ochranného krytu. Test kapacity a ztrátového činitele se měří v jiné části zkušebního prostoru po ruční manipulaci.

Pro ověření použitelnosti přístroje jsem senzor připevnil přímo na tělo postiženého svitkového kondenzátoru. Během testu byly vyhodnoceny výboje dle očekávání. Pro snadnou opakovatelnost testu byl tedy senzor připevněn přímo k upínacímu zařízení. Přenos vibrací způsobených výboji byl dostatečný a při měření docházelo jen k minimálnímu útlumu.

4.1.2 Test funkčnosti

Pro ověření správné rozlišovací schopnosti byly vybrány 4 špatné a 6 dobrých svitků. Během testu špatných kusů bylo možné sledovat velké množství výbojů v podobě velkých výchylek mV-metru a blikání LED. Zlom nastával při napětí ca 3kV, což při síle dielektrika 9,8 μ m znamená elektrickou pevnost 306 V/ μ m, což je pro navržený kondenzátor nedostatečné. U kusů dobrých se projevila jen občasná samoregenerace, což je v pořádku. Všechny kusy byly roztrženy dobře.

4.1.3 Vyhodnocení neautomatizovaného testu

Protože se metoda jeví jako použitelná, přecházím do druhé fáze. Digitalizace výsledku, neboli: Je kondenzátor dobrý? ANO/NE.

Vzhledem k tomu, že i u dobrých kusů dochází self-healingu, nastává otázka, jak určit kdy je ještě svitek dobrý a kdy ne. Jednoduchou odpovědí je připojení čítače impulzů. Pro naše účely je přes emitorový sledovač připojen průmyslově vyráběný čítač impulzů firmy OMRON H7CX s čítací frekvencí do 5kHz. Následnými testy a sledováním mezi dobrými a špatnými byla zvolena hranice 50 impulzů.

Přeměřeno 450 svitků, touto metodou vyřazeno 26 kusů, které jsem podrobil analýze. V 15 případech byl objeven silný periodický sel-healing v rozestupech 110 mm. V 9 kusech se self-healing objevoval zřídka, avšak vždy v celých násobcích 110 mm. Ve dvou kusech se nejednalo o periodické body. Předpokládáme-li že dobré kusy byly skutečně v pořádku, dá se

úspěšnost hodnotit 92%. Vyřazení dobrých kusů je sice neekonomické, avšak z hlediska zákazníka bezpečnější řešení.

4.1.4 Implementace 2 – automatizovaný test

Relativně dobrými výsledky přecházím k dalšímu bodu. Zakomponování tohoto testu do automatizovaného zařízení, které je co do rychlosti 5x efektivnější. Již při umístování senzoru narážím na problém nedostatku prostoru pro upevnění svitku. Nakonec je nejlepší volbou připevnění senzoru k přítlačnému pístu svitku na pozici č. 2.



Obr. 30: Rozložení testů v automatu

4.1.5 Vyhodnocení 2 – automatizovaný test

Již během prvních testů je jasné že tuto metodu není možné použít pro toto automatizované zařízení. Během procesů měření, napětového testování a vybíjení dochází k tolika mechanickým posunům a otřesům, že vibrace zařízení daleko převyšují akustické hladiny vzniklé výboji uvnitř kondenzátoru.

4.2 Další možnosti sledování

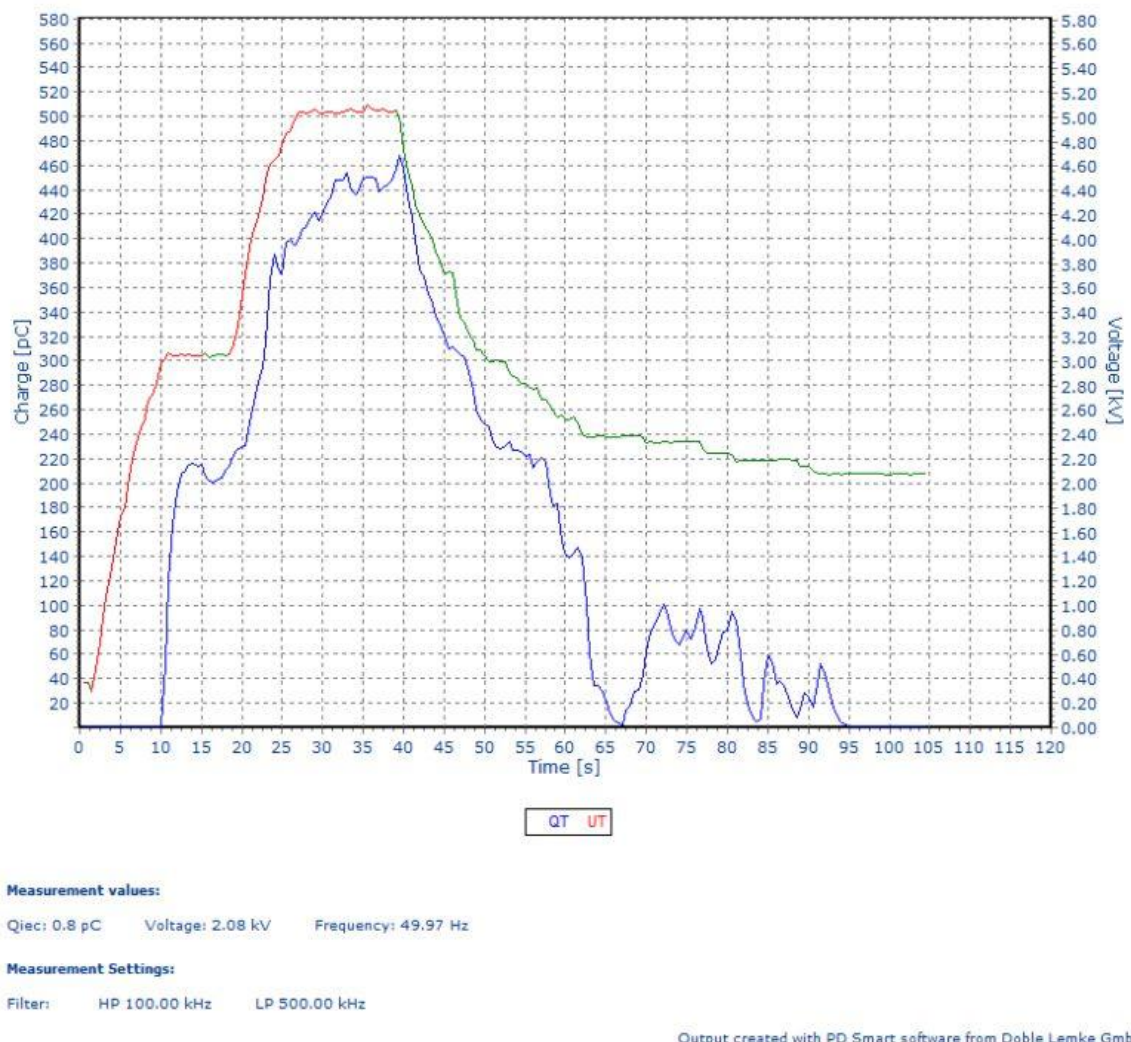
Vzhledem k obtížnosti sledování nezbyvá než hledat i další možnosti detekce výbojů. Jedna z nich by mohla být detekce částečných výbojů.

4.2.1 Detekce částečných výbojů

Pro velké výkonové kondenzátorové jednotky je často od zákazníka požadavek na maximální částečné výboje vznikající mezi kondenzátorem, resp. paketem svitkových kondenzátorů a obalem (dále označováno jako T-C). V tomto případě se využívá zařízení pro

měření částečných výbojů. Toto zařízení se dá rozdělit na tři části. První je VN zdroj, jenž je schopný dodávat požadované testovací napětí. Další částí je můstkový obvod, kde se kompenzují vlivy vnějšího rušení. K průmyslově vyráběnému impedančnímu můstku LDB-5 od f. Doble Lemke určenému přímo pro diagnostický test částečných výbojů je připojen normalizovaný plynový kondenzátor a testovaný kondenzátor, jež je tvořen aktivní částí kondenzátorové jednotky (jako jedna elektroda) a ochranným obalem (druhá elektroda). Po vyvážení můstku a odfiltrování rušivých složek je výstupní signál připojen do poslední části, která slouží k měření. V tomto případě se jedná o PD Smart opět od f. Doble Lemke, odkud jsou měřené hodnoty přenášeny do PC, kde jsou softwarově analyzovány a vyhodnocovány.

Průběh měření částečných výbojů T-C pak, může vypadat takto.



Obr. 31: Průběh měření částečných výbojů uvnitř izolace výkonového kondenzátoru

Toto zařízení je však navrženo na kapacity C_{T-C} řádově nF. Vrátime-li se tedy na začátek, zjistíme, že při síťovém kmitočtu 50 Hz a kapacitě svitkového kondenzátoru např. $32\mu\text{F}$

bychom pro testovací napětí 4kV potřebovali podle vzorce (4-1) transformátor dimenzovaný na více než 40A.

$$I = \frac{U}{X_{C_{T-C}}} = U \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{T-C} \quad [A] \quad (4-1)$$

I přes fakt, že výsledky by byly přesné, zařízení je jednoznačně neefektivní, neboť měření jednoho svitkového kondenzátoru by se protáhlo z několika sekund na minuty.

5 Závěr

Shrneme-li si poznatky z předchozích testů, můžeme říci, že akustická metoda vyhodnocování zvýšeného výskytu self-healinu je použitelná, nicméně ve stávajícím provedení ji není možné použít pro masivní výrobu, z důvodu nemožnosti integrovat ji do automatizovaného systému. To by znamenalo nákladnou, ne-li nemožnou rekonstrukci automatizovaného zařízení, jeho pohonu a posuvů, z důvodu snížení celkového hluku. Další možností by mohla být odizolování části vysokonapěťového testu tlumícími prvky.

Nicméně do té doby prvotní signál o podezřelém materiálu prozatím musí přijít vždy od obsluhy měřícího zařízení. Ta v případě akustického jevu upozorní na podezřelou dávku, která je následně přeměřena na ručním zařízení s implementovaným akustickým detektorem.

Sledování částečných výbojů rovněž není možné z důvodu časové náročnosti na nastavení, měření a vyhodnocení.

Nadále jsou prováděny další testy pro zjišťování zvýšeného výskytu self-healingu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Interní zdroje a dokumentace firmy VISHAY ELECTRONIC s r.o.
- [2] Norma CSN_EN_61071 *Kondenzátory pro výkonovou elektroniku*. 2008.
- [3] CSN_EN_60831-1. *Paralelní silové kondenzátory samoregeneračního typu pro střídavé výkonové systémy s jmenovitým napětím do 1 kV včetně*. 1998.
- [4] DOLEČEK, Jaroslav. *Základy elektroniky, ideální a reálné prvky*. 1. vyd. Praha: BEN, - technická literatura 2005. 334 s. ISBN 80-7300-146-2.
- [5] *WWW.DINEL.CZ: Tabulka relativních permitivit vybraných materiálů* [pdf]. Dostupné z: <http://www.dinel.cz/uploads/pdf/100831100313-relativni-permitivity.pdf>