

Konstrukční návrh a realizace diagnostické jednotky pro sledování rozložení prostorového náboje v dielektrických materiálech

J. Hornak, P. Trnka

Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,
Univerzitní 26, Plzeň

E-mail : jhornak@ket.zcu.cz, pavel@ket.zcu.cz

Anotace:

Tento článek je zaměřen na problematiku výskytu prostorového náboje v dielektrických materiálech, konkrétně na návrh základních prvků diagnostické jednotky pro jeho měření. Metoda, založená na principu elektroakustického pulzu (PEA), která je v současné době nejpoužívanější, je detailně popsána v úvodu tohoto článku. Značná pozornost je dále věnována výpočtu hodnot jednotlivých komponent, jako jsou vazební kondenzátor, vysokonapěťový rezistor, tloušťka piezoelektrického převodníku PVDF a rozlišení měřicího systému. Tento článek dále popisuje stavbu jednotlivých částí diagnostické jednotky – vysokonapěťovou elektrodu, zemnicí elektrodu a detekční část.

Abstract:

This paper deals with the space charge phenomenon and its diagnosis in dielectric materials, especially with the development of diagnostic unit for its measurement. Commonly used method based on electro-acoustic pulse (PEA) principle is described in this paper. Considerable attention is devoted to calculations of values of key elements, which are coupling capacitor, high voltage resistor, thickness of piezoelectric transducer and resolution of measuring system. This paper also describes individual parts of diagnostic unit – high voltage electrode, ground electrode and detector.

ÚVOD

V současné době jsou elektrické, mechanické a tepelné vlastnosti elektroizolačních systémů základním požadavkem při jejich návrhu a následné realizaci. Požadovaných vlastností je možno docílit použitím kompozitních - tedy nehomogenních - materiálů, které využívají vzájemné synergie jednotlivých složek. Jednotlivé složky se od sebe navzájem svými vlastnostmi odlišují, ale při správné kombinaci tvoří kompaktní celek. Nejčastěji se jedná o dvou- nebo tříslučkové kompozitní materiály, které jsou složeny z nosné složky, plniva a pojiva. Mezi jednotlivými složkami s rozdílnými materiálovými konstantami však vznikají rozhraní [1], která přispívají k tomu, že na nich za určitých okolností utkví volný nosič náboje, který se v nejčastějším případě do materiálu injektuje z rozhraní kovizolant [2] a vytvoří tak tzv. prostorový náboj. Tento jev může také nastat při zachycení volných nosičů náboje na defektech krystalové mřížky.

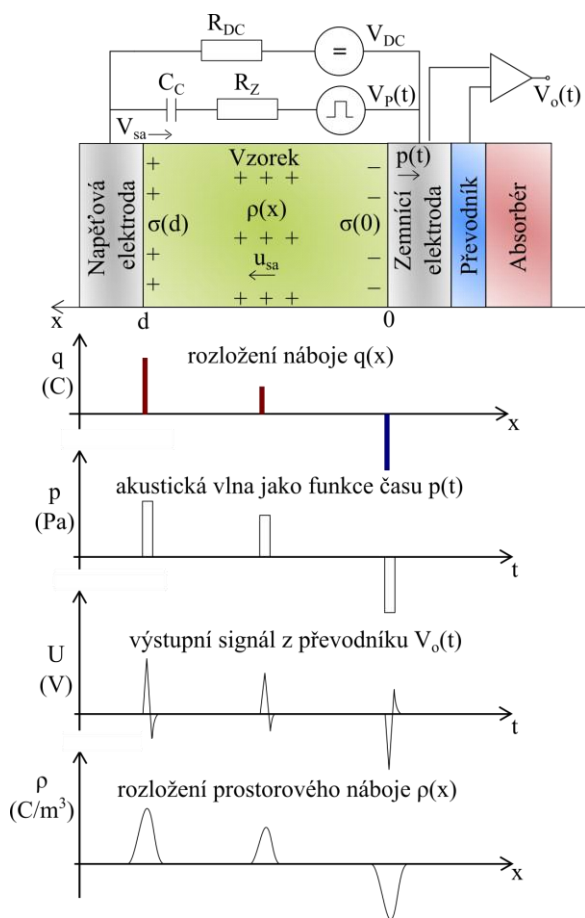
Proto se prostorový náboj vyskytuje i v makroskopicky homogenních materiálech, které mohou být nehomogenní pouze v části jejich strukturální stavby. Polarita a pozice prostorového náboje je navíc také závislá na samotném elektroizolačním materiálu. Kladná prostorový náboj se nejčastěji vyskytuje např. v polyetylenu (PE), naproti tomu záporný prostorový náboj může vznikat např. v zesíťované polyetylenu (XLPE). Prostorový náboj je tedy z hlediska životnosti izolačního systému dalším důležitým diagnostickým parametrem [3].

PRINCIP MĚŘENÍ PROSTOROVÉHO NÁBOJE PEA JEDNOTKOU

Pro sledování rozložení prostorového náboje se využívá několika metod. Z hlediska historického vývoje měření prostorového náboje lze zmínit první pokusy, při nichž bylo dielektrikum rozřezáno na tenké destičky. Na takto upravený materiál byl následně nanesen prášek citlivý na polaritu náboje a výsledný nahromaděný prostorový náboj byl sledován pomocí lidského zraku [1]. V současnosti jsou metody měření více sofistikované a založeny na jiných principech. Mezi nejpoužívanější metody měření prostorového náboje patří metoda laserem indukovaného tlakového pulzu – LIPP [4], metoda pulzní tlakové vlny - PWP [5], metoda tepelného pulzu - TP [6] nebo pulzní elektroakustická metoda - PEA [7], jejíž princip a návrh parametrů základních prvků je popsán v následujícím textu.

Uspořádání pro měřicí jednotku, která je založena na principu PEA metody, je znázorněno na obrázku 1. Při působení stejnosměrného napětí V_{DC} na plošný vzorek, dojde k akumulaci prostorového náboje $\rho(x)$ v jeho vnitřní struktuře. Přivedením vysokonapěťového pulzu $V_p(t)$ na vzorek, vznikne síla $F(x)$ působící na náboj dle Coulombova zákona. Důsledkem tohoto jevu je mírné vychýlení vázaných nosičů náboje ze svých pozic, což vede ke generování akustické vlny $p(t)$, která je přímo úměrná rozložení prostorového náboje $\rho(x)$ a její rychlost je dána akustickou rychlostí u_{sa} daného materiálu. Tato

akustická vlna prochází dále zemnicí elektrodou až do piezoelektrického převodníku z polyvinyliden fluoridu (PVDF). Akustická vlna je tímto převodníkem převedena na napěťový signál $V_o(t)$. V porovnání s PWP metodou zde neslouží piezoelektrický člen jako generátor tlakové vlny, ale jako detektor signálu [1,8]. Takto získaný elektrický signál je zesílen a následně zobrazen na obrazovce digitálního osciloskopu. Vazební kondenzátor (C_C) zajišťuje galvanické oddělení mezi zdrojem stejnosměrného napětí a pulzním generátorem, rezistor (R_{DC}) v sérii s vysokonapěťovým obvodem způsobuje omezení proudu. Impedanční přizpůsobení (R_Z) zde slouží k optimalizaci přenosu vlny z pulzního generátoru [1,8].



Obr. 1: Princip PEA metody a znázornění jednotlivých signálů [9]

URČENÍ PARAMETRŮ KLÍČOVÝCH SOUČÁSTEK PEA JEDNOTKY

Pro možnost návrhu jednotlivých parametrů je třeba znát šířku napěťového pulzu ΔT_p [s]. Ta se u běžně používaných PEA měřicích systémů pohybuje v rozmezí od 5 do 200 ns. Amplituda napěťových pulzů se pohybuje v rozmezí 200 V až 2 kV. Stejnosečné napětí využívané k nabíjení vzorků je nejčastěji voleno v rozmezí 5 až 10 kV.

Pro další výpočty bude uvažována hodnota $\Delta T_p=10$ ns, plocha vysokonapěťové elektrody

$s=3,14$ cm² a vzorek epoxidové pryskyřice tloušťky $d=0,5$ mm mající hodnotu akustické rychlosti $u_{sa}=2400$ m/s [10] a hodnotu relativní permitivity $\epsilon_r=3,5$.

Relativní rozlišení měřicí jednotky

Relativní rozlišení měřicí jednotky η [%] udává možnou odchylku výsledného signálu od skutečného místa akumulace prostorového náboje v ose x a je dáno šířkou napěťového pulzu, tloušťkou vzorku a okamžitou akustickou rychlostí daného materiálu [9]

$$\eta = \frac{\Delta T_p}{d} \cdot 100, \quad (1)$$

Po dosazení je výsledné prostorové rozlišení přibližně 5 procent. Ze vztahu (1) jasně vyplývá, že při použití tlustších vzorků je relativní rozlišení nižší a naopak. Absolutní rozlišení pro výše uvedený vzorek tl. 0,5 mm lze poté určit přibližně jako 25 μ m.

Vazební kondenzátor

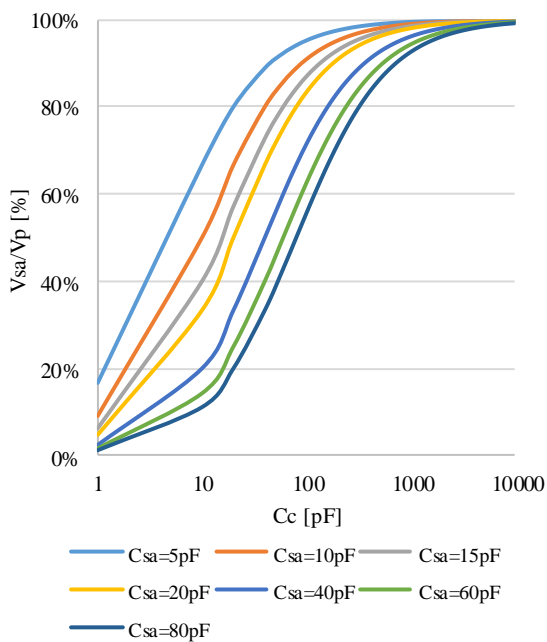
Vazební kondenzátor je důležitou součástí měřicí jednotky. Zprostředkovává vodivé spojení mezi pulzním generátorem a napěťovou elektrodou, zároveň odděluje pulzní generátor od zdroje stejnosměrného napětí a tím umožňuje stejnosměrné napěťové působení na materiálový vzorek. Hodnota kapacity vazebního kondenzátoru C_c [F] musí být zvolena mnohonásobně vyšší, než je kapacita měřeného vzorku C_{sa} [F], aby rozdíl mezi hodnotou pulzního napětí a napětí procházejícím vzorkem, byl minimální. Obecně platí vztah

$$C_c \geq 100 \cdot C_{sa}, \quad (2)$$

přičemž kapacita vzorku C_{sa} může být definována jako

$$C_{sa} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{s}{d}, \quad (3)$$

kde ϵ_0 [F/m] je permitivita vakua, ϵ_r [-] je relativní permitivita vzorku, s [m²] plocha elektrod a d [m] tloušťka vzorku. Pro výše definované parametry je hodnota kapacity vzorku epoxidové pryskyřice 19,5 pF, z čehož následně vyplývá volba hodnoty vazebního kondenzátoru. V tomto případě může být použit např. vysokonapěťový keramický kondenzátor použitelný do 10 kV s kapacitou v řádu jednotek nF. Kondenzátory mající kapacitu ≥ 10 nF by mohly způsobovat parazitní jevy ovlivňující výsledný signál [9]. Obrázek 2 znázorňuje poměr skutečného napětí působícího na vzorek (V_{sa}) k hodnotě pulzního napětí (V_p) v závislosti na kapacitě vzorku (C_{sa}) a hodnotě vazební kapacity (C_c). Samotný výpočet V_{sa} je dán [9,13] rovnicí (4).



Obr. 2: Podíl V_{sa}/V_p pro volbu vazební kapacity C_c v závislosti na kapacitě vzorku C_{sa}

$$V_{sa} = \frac{V_p \cdot C_c}{C_c + C_{sa}} \quad (4)$$

S přihlédnutím k výše uvedeným skutečnostem je jednotka osazena vysokonapěťovým keramickým diskovým kondenzátorem s kapacitou 2200 pF.

Sériový rezistor

Rezistor v sérii s vysokonapěťovým zdrojem je zařazen pro omezení proudu tekoucího od pulzního generátoru k vysokonapěťovému zdroji a také k ochraně vysokonapěťového zdroje v případě průrazu testovaného vzorku. Minimální hodnotu sériového rezistoru lze určit ze vztahu [9]

$$R_{DC} \geq 500 \cdot \frac{1}{2\pi \cdot f_p \cdot C_{sa}} \quad (5)$$

kde f_p [Hz] je hlavní frekvenční složka napěťového pulzu dána vztahem [9]

$$f_p = \frac{1}{2\Delta T_p} \quad (6)$$

Výsledná minimální hodnota sériového rezistoru je v tomto případě 81 k Ω . Je nutno brát v potaz, že takto určená hodnota odporu je platná pro výše uvedenou kapacitu vzorku a šířku pulzu. Pro zahrnutí širšího spektra kapacit vzorků, šířek napěťových pulzů a také pro ochranu měřicího obvodu při průrazu vzorku je však vhodnější použít vysokonapěťový rezistor s vyšší hodnotou elektrického odporu např. jednotkách M Ω a s příkonem v jednotkách W. Pro omezení povrchové výbojové činnosti při

vysokém napěťovém působení je vhodné využít rezistor s délkou od 4 do 8 cm [9]. Proto byla jednotka osazena odporem 15 M Ω , 5W, 10 kV.

Piezelektrický člen

V současnosti se jako piezelektrický člen nejčastěji používá tenký PVDF film, který nahradil dříve využívaný piezelektrický krystalický materiál LiNbO₃. PVDF má široký frekvenční rozsah a nízkou akustickou impedanci. Tloušťku b [m] piezelektrického materiálu lze určit ze vztahu [9]

$$b \leq \Delta T_p \cdot u_b \quad (7)$$

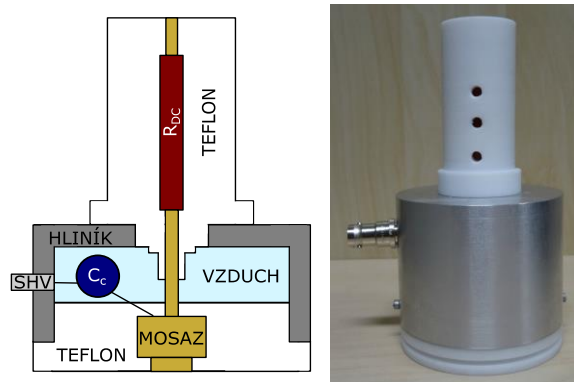
kde u_b [m/s] je akustická rychlost piezelektrického převodníku (u PVDF $u_b=2200$ m/s [11]). Pro šířku napěťového pulzu 10 ns je minimální tloušťka PVDF převodníku 22 μ m. Pro vyšší citlivost měřicího systému je možno použít komerčně dostupný oboustranně pokovený PVDF materiál tloušťky 9 μ m.

KONSTRUKCE DIAGNOSTICKÉ JEDNOTKY

Mezi základní konstrukční prvky měřicí jednotky patří vysokonapěťová elektroda, zemnicí elektroda a detektor akustické vlny. Tyto jednotlivé části jsou podrobně popsány v následujícím textu.

Vysokonapěťová elektroda

Vysokonapěťová elektroda slouží k přivedení vysokonapěťového pulzu a stejnosměrného napětí na vzorek. Jak již bylo uvedeno, vazební kondenzátor zajišťuje galvanické oddělení mezi zdrojem stejnosměrného napětí a pulzním generátorem a rezistor v sérii s vysokonapěťovým obvodem způsobuje omezení proudu. Vysokonapěťová elektroda je dle předchozích výpočtů osazena sériovým vysokonapěťovým rezistorem 15 M Ω , 5W, 10 kV umístěným v PTFE válci s otvory zajišťujícími odvod tepla, a vazebním keramickým kondenzátorem 2200 pF, 10 kV, spojeným s SHV konektorem a mosaznou napěťovou částí elektrody. Uspořádání elektrody je znázorněno na obrázku 3.



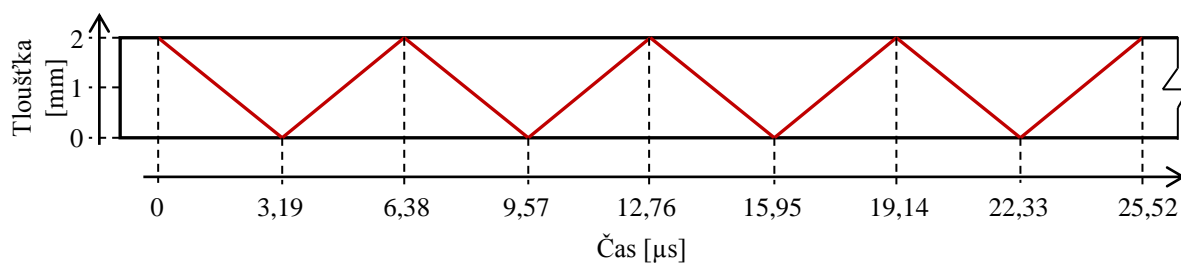
Obr. 3: Uspořádání vysokonapěťové elektrody včetně realizovaného provedení

Zemnicí elektroda

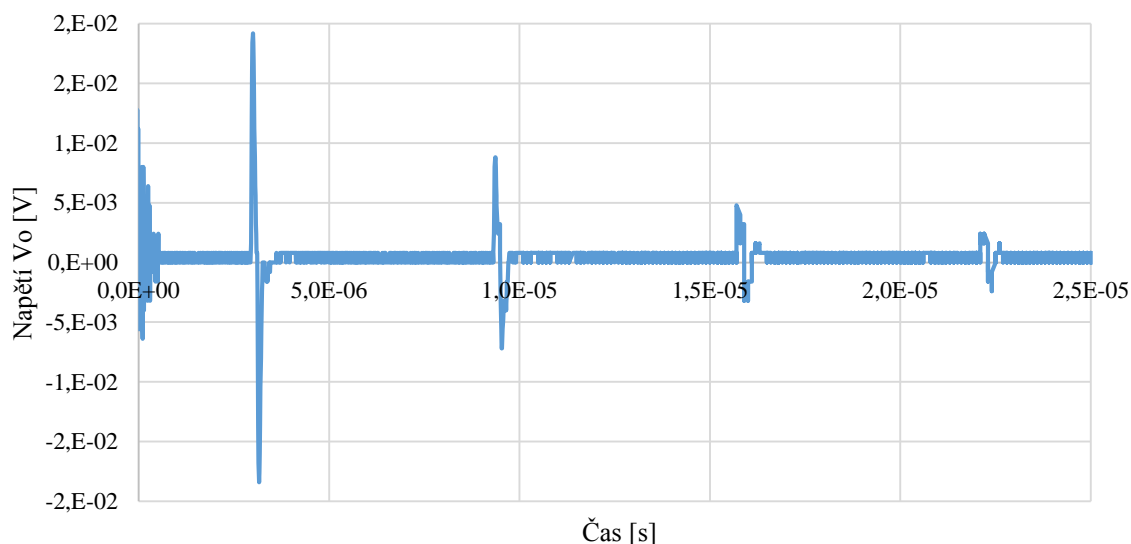
Aluminiová zemnicí elektroda umožňuje průchod akustické vlny, která je způsobena interakcí zachyceného elektrického náboje s vysokonapěťovým pulzem. Odražená akustická vlna by mohla způsobit ovlivnění měřeného signálu, proto je tloušťka elektrody stanovena na 20 mm [12-14], což zaručuje dostatečné zpoždění znovu odraženého utlumeného signálu.

Čas průchodu akustické vlny elektrodou je dán výpočtem (8), kde $u_{Al}=6260$ m/s $d_{Al}=0,02$ m a znázorněn na obrázku 4 grafickým výstupem napěťového signálu.

$$t_{Al} = \frac{d_{Al}}{v_{Al}} = \frac{0,02}{6260} = 3,19\mu s. \quad (8)$$



a)

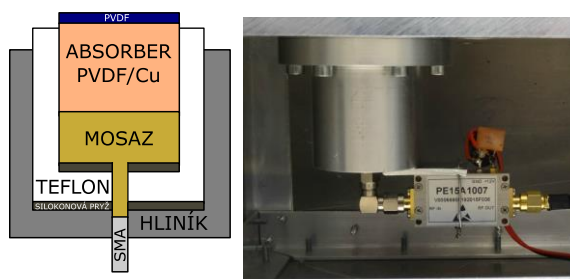


b)

Obr. 4: Chování akustické vlny – a) odrazy a tlumení v čase [15], b) reálný napěťový výstup z navržené PEA jednotky

Detektor akustické vlny

Pro převod akustické vlny na elektrický signál je použit PVDF piezoelektrický převodník tloušťky 9 μ m s Cr/Al povrchovou úpravou. Pro tlumení odrazu je pod piezoelektrický převodník umístěn absorbér akustické vlny - váleček PVDF tloušťky 20 mm, s povrchovou úpravou Cu zaručující vodivé spojení mezi piezoelektrickým převodníkem a výstupem na zesilovač. Vnější část detektoru tvoří izolační válec z PTFE a Al stínění, které je spojeno se zemnicí elektrodou. Pro připojení k zesilovači je použit SMA konektor. Pro zesílení získaného signálu je nainstalován širokopásmový nízkošumový zesilovač Pasternack 9 kHz – 3 GHz se ziskem 32 dB. Uspořádání detektoru je znázorněno na obrázku 5.



Obr. 5: Uspořádání detektoru akustické vlny a jeho skutečná podoba

Šasi jednotky

Pro omezení vnějších vlivů a rušení je spodní část jednotky obsahující zemnicí elektrodu a detektor umístěna do aluminiového šasi, které je vybaveno

napájecím konektorem pro nízkošumový vysokofrekvenční zesilovač, BNC konektorem pro možnost zobrazení elektrického signálu na obrazovku osciloskopu a zemnicím konektorem. Jednotlivé komponenty použité v diagnostické jednotce jsou shrnuty v tabulce 1. Kompletní konstrukce je vyobrazena na obrázku 6.



Obr. 6: Kompletní konstrukce diagnostické jednotky
Tab. 1: Shrnutí základních komponent PEA jednotky

<i>Komponent</i>	<i>Charakteristika</i>
Rezistor R_{DC}	15 M Ω , 5W, 10 kV
Kondenzátor C_c	2200 pF, 10 kV
Převodník PVDF	9 μ m, Cr/Al
Zesilovač	0,09-30 MHz, 32 dB

ZÁVĚR

Hlavním cílem článku bylo popsat klíčové komponenty diagnostické jednotky (vazební kondenzátor, sériový rezistor, piezoelektrický převodník), numerické výpočty pro stanovení jejich minimálních hodnot a následně konstrukční provedení měřicího zařízení. Z dosud provedených měření je patrná schopnost diagnostické jednotky detekovat tlakové vlny způsobené pulzním napětím působícím na vzorek. Další práce bude zaměřena na tvorbu zjednodušeného matematického modelu pro převod napěťového signálu na hodnoty prostorového náboje a na tvorbu vhodně impedančně přizpůsobeného pulzního zdroje.

PODĚKOVÁNÍ

Autoři článku by rádi poděkovali panu Jaroslavu Bartoňovi za jeho pomoc při obrábění jednotlivých částí konstrukce diagnostické jednotky. Tento výzkum vznikl s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu RICE – Nové technologie a koncepce pro inteligentní systémy, číslo projektu LO1607, a byl podpořen grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2015-020 Technologické a materiálové systémy v elektrotechnice.

LITERATURA

- [1] Mentlík, V., Dielektrické prvky a systémy. 1. ed. Praha: BEN - Technická Literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [2] Kao, K., Dielectric Phenomena in Solids with Emphasis on Physical Concepts of Electronic Processes. Amsterdam: Academic, 2004, ISBN: 978-0-12-396561-5.
- [3] Li, J., Zhang, Y., Xia, Z., Qin, X. a Peng, Z., "Action of space charge on aging and breakdown of polymers", Chinese Science Bulletin, Vol. 46, pp. 796-800, 2001.
- [4] Tanaka, T., Shirai, H., Kisanuki, O. a Uchiumi, M., "Laser-induced pressure pulse measurements of space charge in PE/EVA laminates," International Symposium on Electrical Insulating Materials, vol., no., pp.427,430, 1995.
- [5] Lewiner, J., Hole, S. a Ditchi, T., "Pressure wave propagation methods: a rich history and a bright future," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.12, no.1, pp.114,126, 2005.
- [6] DeReggi, A.S., Guttman, C.M., Mopsik, F.I., Davis, G.T. a Broadhurst, M.G., "Determination of Charge or Polarization Distribution Across Polymer Electrets by the Thermal Pulse Method and Fourier Analysis", Phys. Rev. Lett., vol. 40, pp.413-416, 1978.
- [7] Gallot-lavallee, O. a Teyssedre. G., "Space charge measurement in solid dielectrics by the pulsed electro-acoustic technique," Solid Dielectrics, 2004. ICSD 2004. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on , vol.1, no., pp.268,271 Vol.1, 5-9, 2004.
- [8] Ahmed, N. H. a Srinivas, N.N., "Review of space charge measurements in dielectrics," Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on , vol.4, no.5, pp.644,656, 1997.
- [9] Takada T., et.al. 2006. Space Charge Measurement in Dielectrics and Insulating Materials. CIGRE Task Force D1.12.01-288.2006.
- [10] Gallot-Lavallée, O., Teyssède, G., Laurent, C. a Rowe, R., "Space charge behaviour in an epoxy resin: the influence of fillers temperature and electrode material", J. Phys. D: Appl. Phys, vol. 38, pp. 2017-2025, 2005.
- [11] Foster, F.S., Harasiewicz, K.A. a Sherar, M.D., "A history of medical and biological imaging with polyvinylidene fluoride (PVDF) transducers," in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency

- Control, vol. 47, no. 6, pp. 1363-1371, Nov. 2000.
- [12] J.M. Alison, "A high field pulsed electroacoustic apparatus for space charge and external circuit current measurement within solid insulators", J. Meas. Sci. & Technol. vol. 9 pp. 1737-1750, (1998).
- [13] A. Penttinen, "Design of Pulsed Electroacoustic Measurement System for Space Charge Characterisation" MSc Thesis, Lappeenranta University of Technology. 2012
- [14] Dennison, J. R. a Pearson, L.H., "Pulsed electroacoustic (PEA) measurements of embedded charge distributions." SPIE Optical Engineering+ Applications. International Society for Optics and Photonics, 2013.
- [15] Fukuma, M., Tomita H. a Maeno, T., "Space charge measurement for 27mm thick XLPE sample in PEA method," Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), , Niigata, 2014, pp. 89-92