

Diagnostika výbojové činnosti v širším frekvenčním spektru

P. Trnka, M. Svoboda

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

E-mail : pavel@ket.zcu.cz, michal88@ket.zcu.cz

Anotace:

Tento článek prezentuje možnost měření částečných výbojů v širším frekvenčním spektru než doporučuje současná norma IEC 60 270 převzatá jako ČSN EN 60270. Moderní plně digitální měřicí systémy pro diagnostiku částečných výbojů umožňují měření i v jiných frekvenčních pásmech, kde s výbojovou činností zatím nejsou dostatečné zkušenosti. Tímto měřením je možné získat nové informace, či případně upřesnit stávající a získat tak přesnější obraz o výbojové činnosti při daném uspořádání. Jsou zde prezentovány výsledky měření dvou nejtýpickejších izolačních systémů, a sice systému olej-papír používaného v transformátorech a izolačního systému pro tyče vinutí generátorů.

Abstract:

This paper presents the possibility of measuring partial of discharges in wide frequency range. Recent fully digital measuring systems allows such as measurement of partial discharge (PD). This test brings new information and helps to complete the view of partial discharge activity in tested setup. Presented study is concerned on two most typical insulating systems. The first is paper-oil insulating system for power transformers and second is insulating system of rotary machine insulated bars. Insulated bars create the stator winding of power generators.

ÚVOD

Měření částečných výbojů se s časem stalo jednou z důležitých diagnostických metod pro diagnostiku elektrických zařízení. Je to perspektivní metoda i do budoucnosti, kdy umožňuje nejen „Off-line“ měření, ale vznikají i „On-line“ diagnostické systémy. Částečné výboje jsou měřeny při diagnostice každého stroje, který slouží k výrobě nebo distribuci elektrické energie, ať už se jedná o generátory, jiné točivé stroje, vysokonapěťové transformátory, vysokonapěťové kabely nebo jiné části elektrizační soustavy.

Pozorování výbojové činnosti má v elektrotechnice dlouhou historii. Jedním z prvních přístrojů, když opomeneme vizuální pozorování, které byly používány k detekci výbojové činnosti, byly rádiové přijímače. Výboje tvořily vlastní elektromagnetické pole, které rušilo rádiové vysílání, a tím tedy mohla být detekována přítomnost výbojů. Dále byla používána celá řada akustických, optických a chemických metod. Některé z nich jsou používány dodnes, pro kvantitativní popis jsou však nezastupitelné elektrické metody. Běžně se používá kombinace různých metod, např. kombinace akustických a elektrických, kdy pomocí elektrických metod vyčíslíme parametry výbojů a pomocí akustických metod místo, kde výboje vznikají.

MĚŘENÍ DLE IEC 60270 vs. ŠIROKOPÁSMOVÁ MĚŘENÍ

Velké množství publikovaných výzkumů je založeno na měření ve frekvenčním rozsahu daném normou

ČSN EN 60270 (Technika zkoušek vysokým napětím - měření částečných výbojů). Typická fázová rozložení částečných výbojů byla pozorována a popsána pro výboje na zkušebních uspořádáních typu hrot proti desce ve vzduchu, pro povrchové a vnitřní výboje v pevném elektroizolačním materiálu atd. Rozdílné diagramy byly pozorovány při měřeních v elektroizolačních kapalinách.

Nové výsledky je možné získat při použití širšího frekvenčního rozsahu pro měření. V době analogových měřicích přístrojů byl standardizován frekvenční rozsah 100 kHz – 500 kHz. V té době byly potíže s redukcí šumu a s citlivostí ve vyšších frekvencích. Měřené signály byly snímány měřicí impedancí přes elektrické vedení za pomoci stíněných kabelů. Rozvoj digitální techniky přinesl později analogově-digitální převodníky s většími možnostmi. Největší výhodou oproti první generaci byla v možnosti měřit data, ukládat je a následně je vyhodnocovat. Tato zařízení též umožňovala měřit četnost pulzů. To přineslo nový pohled na problematiku částečných výbojů. Taktéž bylo možné vyhodnocovat 3D diagramy částečných výbojů - například zdánlivý náboj q (pC) v závislosti na fázi ($^\circ$) a četnosti pulzů P_c (-/s).

Jako příklad plně digitálního systému pro diagnostiku částečných výbojů lze uvést PD smart – víceúčelové digitální zařízení pro „On-line“ a „Off-line“ diagnostiku výkonových zařízení a vysokonapěťových izolačních systémů. Toto zařízení je možné použít jak pro laboratorní měření, tak pro potřeby vývoje nových izolačních materiálů, ale i pro měření „v terénu“. Umožňuje vícekanálové synchronní měření částečných výbojů například na

transformátorech podle normy ČSN EN 60270, VDE 0434, ANSI a též podle standardů IEEE.

Pro detekci nebezpečných částečných výbojů je možné použít LDP-5. Jedná se o přenosný diferenciální diagnostický systém pro vysokonapěťová zařízení (například těsnění kabelových koncovek a spojů, odporové bleskojistky, výkonové transformátory a točivé elektrické stroje), vyhodnocení výbojové činnosti na nízkonapěťových součástech (například v případě optočlenů, kapacitorů, transformátorů a motorů).

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Měření probíhala na vzorcích izolačního systému olej-lepenka pro vinutí vysokonapěťových transformátorů. Byly měřeny různé systémy, zejména s ekologicky šetrnými izolačními kapalinami. Dále probíhalo měření na vzorcích statorových tyčí velkých točivých strojů.

Pevné izolanty

Každý točivý stroj prochází řadou periodických zkoušek. Jedna z důležitých aplikovaných zkoušek je měření částečných výbojů. Obvykle je měřena jen hodnota zdánlivého náboje q (pC). U strojů velkých výkonů je sledován dlouhodobý trend hodnoty zdánlivého náboje částečných výbojů. Periodické testy jsou naplánovány v závislosti na době a způsobu provozování stroje. Někdy jsou částečné výboje měřeny i v případě dlouhodobých odstávek.

Na vzorcích byla měřena výbojová aktivita před a po stárnutí. Zrychlené stárnutí probíhalo pomocí vysokofrekvenčního pulzního napětí (simulace vlivu napájení pomocí výkonových polovodičových měničů) ± 3 kV, 3 kHz, 180 °C, rychlost nárůstu napětí 60 ns, 50 % střída pulzů dle vztahu (Duty Cycle - D):

$$D = \tau / T \quad (1)$$

Kde:

τ je délka pulzu (μs);

T je délka periody (μs).

Druhý experiment byl proveden na tyčích vyjmutých ze staršího generátoru. Tyto tyče byly dovezeny přímo z elektrárny a následně v laboratoři stárnutý zvýšenou teplotou 180 °C.

Kapalné izolanty v izolačním systému

Stejně jako při měření částečných výbojů na točivých strojích i na transformátorech je výbojová činnost monitorována. Tento článek je zaměřen na problematiku izolačního systému olej-papír.

První experiment byl proveden na kapalných dielektrických v systému olej-lepenka (transformátorová lepenka a lesklá kalandrovaná lepenka - pressahn). Tento systém byl vystaven

dlouhodobému teplotnímu stárnutí a při odběrech diagnostikován. Jako kapalná složka byly zkoušeny izolační kapaliny tří kategorií. První byly minerální izolační oleje, které jsou v praxi velmi používány (Technol, ITO 100, BTS, Shell Diala D). Dále byly zkoušeny perspektivní syntetické izolační kapaliny jako možná náhrada minerálních olejů (Butyl [DIBA], Ftalát [DBP], Oktyl [DOA]). Třetí skupinou byly rostlinné oleje (rafinovaný řepkový, rafinovaný slunečnicový a Envirotemp® FR3 Cooper) Pro možné nahrazení minerálních olejů byl nezbytný výzkum deteriorace systému olej-lepenka. Tato problematika byla popsána v [1]. Tento experiment se zabývá detekcí stárnutí pomocí měření částečných výbojů.

Částečné výboje a jiný frekvenční rozsah

Jak již bylo zmíněno, diagnostika částečných výbojů je neoddelitelnou částí vysokonapěťových energetických strojů. Aparatury pro měření částečných výbojů se s postupem doby stávají stále dokonalejšími. Jediný problém, který zůstává, je záležitost správné interpretace naměřených dat. V průběhu minulých let byly popsány a publikovány snahy o vytvoření slovníku pro rozpoznání různých druhů výbojové činnosti, ale žádná ucelená koncepce sjednocující popis degradační činnosti izolačních materiálů zatím popsána nebyla. Předchozí výzkumy dokazují, že předpoklady jednoduché závislosti některých parametrů částečných výbojů na době stárnutí nelze potvrdit. Například při měření zdánlivého náboje v závislosti na době stárnutí izolačního systému může jeho hodnota v průběhu času neočekávaně vzrůst. Toto je pozorováno v případě použití standardních metod pro měření částečných výbojů na generátorech. V laboratorních simulacích na vzorcích ze stejného izolačního systému je možné získat odlišné výsledky. Obvykle není pozorován vzrůst hodnoty zdánlivého náboje na izolacích obsahujících anorganické složky. Čistě organické izolace vykazují jasný trend stárnutí vzrůstem zdánlivého náboje během degradace [5].

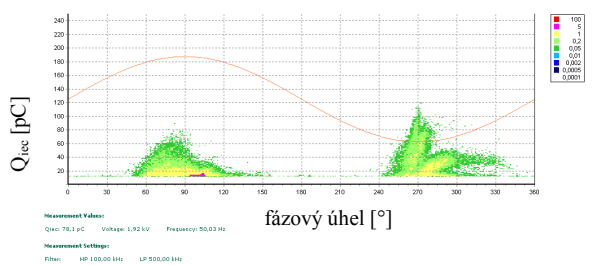
Další možností je sledovat četnost částečných výbojů v závislosti na čase, kdy na vodorovnou osu vynášíme fázovou polohu výbojů vzhledem k sinusovce napájecího (testovacího) napětí. Srovnáním naměřeného diagramu s charakteristickým diagramem pro známý typ částečných výbojů je možné získat informace o druhu výbojové činnosti ve zkoušeném zařízení. Tímto způsobem pak následně určit potenciální příčinu vzniku (chybná konstrukce, vada materiálu apod.).

Někdy je možné vyvodit potřebné závěry z 3D diagramu částečných výbojů. V tomto případě je možné zobrazovat zdánlivý náboj na jedné ose, zatímco na ostatních jsou vyneseny četnost pulsů a fázová poloha impulzů částečných výbojů.

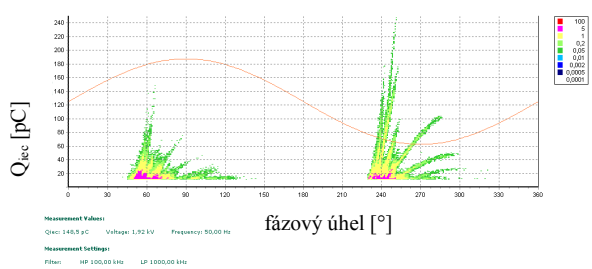
V případě měření částečných výbojů s měřicí soustavou, která neumožňuje zaznamenávat tvar

jednotlivého pulzu, můžeme sledovat například frekvenční spektrum jednotlivého impulsu. To bylo dokázáno v [2], kde doba nárůstu proudu částečných výbojů závisí na stárnutí (degradaci).

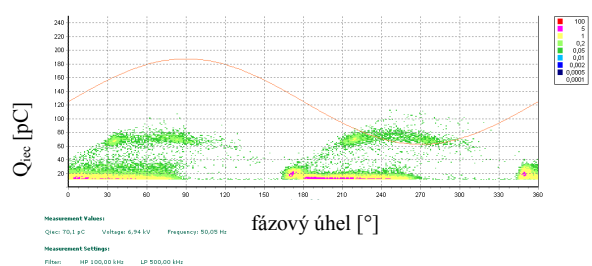
Na Obr. 1 je prezentován typický obraz částečných výbojů při měření stárnutého izolačního systému olej-lepenka dle stávající normy. Tloušťka lepenky je 0,5 mm. Měření bylo provedeno přímo v olejové lázni. Z Obr. 1 je dále možné vyvodit, že byly změřeny zejména vnitřní výboje. Amplituda zdánlivého náboje je 78 pC. Naproti tomu Obr. 2 popisuje měření při použití frekvenčního rozsahu 100 až 1000 kHz. Z tohoto měření bylo získáno jiné fázové rozložení výbojů vzhledem k testovacímu napětí. Amplituda zdánlivého náboje je nyní 149 pC.



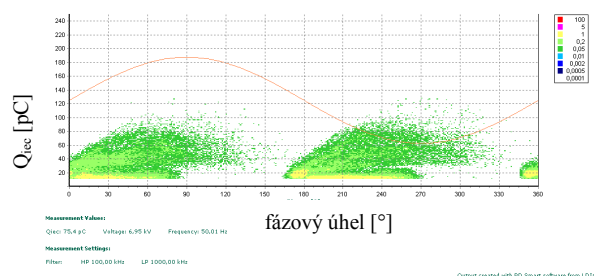
Obr. 1: Izolační systém olej - lepenka (lesklá), tloušťka 0,5 mm, CIV = 1,9 kV, zkušební napětí = CIV, treshold 11 pC, kalibrace 100pC, měřící frekvenční rozsah 100 – 500 kHz



Obr. 2: Izolační systém olej – lepenka (lesklá), tloušťka 0,5 mm, CIV = 1,9 kV, zkušební napětí = CIV, treshold 11pC, kalibrace 100 pC, měřící frekvenční rozsah 100 – 1000 kHz



Obr. 3: Izolační systém olej – lepenka (transformátorová), tloušťka 1 mm, CIV = 6,24 kV, zkušební napětí = 7 kV, treshold 11 pC, kalibrace 100 pC, měřící frekvenční rozsah 100 – 500 kHz



Obr. 4: Izolační systém olej – lepenka (transformátorová), tloušťka 1 mm, CIV = 6,24 kV, zkušební napětí = 7 kV, treshold 11 pC, kalibrace 100 pC, měřící frekvenční rozsah 100 – 1000 kHz

Analýza výsledků měření částečných výbojů prezentovaných na Obr. 1 a Obr. 2 může být následující: při měření dle doporučení normy ČSN EN 60270 můžeme získat hodnotu zdánlivého náboje a z obrazu četnosti v závislosti na fázi může být určen typ částečných výbojů jako výboje vnitřní. Za druhé, paprskovité rozložení výbojů na Obr. 2 dokazuje přítomnost vnitřních dutinek mezi jednotlivými vrstvami celulózoového papíru.

Výsledky měření provedené v systému olej-papír s transformátorovou lepenkou jsou uvedeny v Obr. 3 a Obr. 4. Je zde patrný rozdíl v pevné složce izolačního systému olej-lepenka. Protože transformátorová lepenka je porézní a olejová složka do ní může lépe zatékat, neprojeví se zde vnitřní nehomogenity.

Výsledky z měření na vzorcích tyčí z generátoru stárnutých pulzním napětím jsou zobrazeny v Tab. 1. Vzorky před a po testu jsou zobrazeny na Obr. 5. Je zde patrná destrukce izolačního systému na stárnutém vzorku (Obr. 5b). Tato destrukce vznikla vlivem silné aktivity klouzavých výbojů v průběhu elektrického a teplotního stárnutí.

Tab. 1: Měření částečných výbojů na pulzně stárnutých izolačních tyčích, ±3 kV, 3 kHz, 180 °C, různé frekvence

Měřící rozsah	0,1–0,5kHz		0,1–1 MHz		0,1–1,5 MHz		0,1–2 MHz	
Vzorek	Qiec (pC)	Pc (-/s)	Qiec (pC)	Pc (-/s)	Qiec (pC)	Pc (-/s)	Qiec (pC)	Pc (-/s)
Dodaný stav	606	5390	604	1630	606	1980	646	1895
Po expozici	369	4965	360	4955	132	5464	320	5393



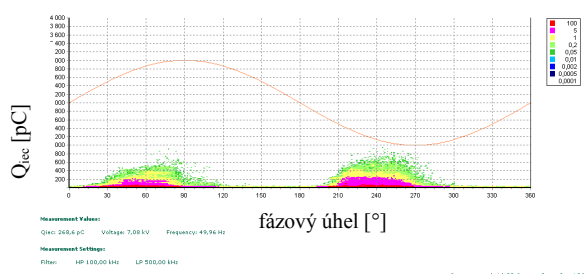
Obr. 5: Vzorky stárnuté pulzním napětím, ±3 kV, 3 kHz, 180 °C, a) původní stav, b) po expozici

Měření částečných výbojů na vzorcích izolovaných statorových tyčí získaných z generátoru jsou na obrázcích Obr. 6 až Obr. 8. Jmenovité napětí

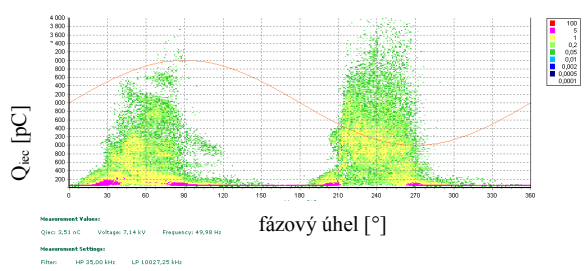
generátoru bylo 13,6 kV. Měření částečných výbojů dle ČSN EN 60270 ukazuje Obr. 6. Změřený zdánlivý náboj byl 267 pC, měřicí napětí 7 kV. Z obrázku je zřejmé, že byly detekovány zejména vnitřní výboje.

Při pohledu na Obr. 7, který zobrazuje shodné měření, ale ve frekvenčním rozsahu 35 - 10 000 kHz, je vidět typicky trojúhelníkový diagram klouzavých výbojů. Změřený zdánlivý náboj byl 3,51 nC.

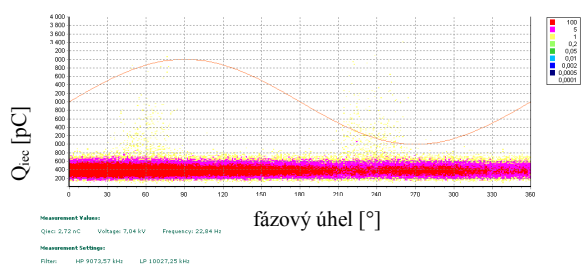
Na Obr. 8 je ukázán šumový signál na pozadí v rozsahu 9 až 10 MHz, který bylo nutné při měření potlačit.



Obr. 6: Izolační tyč generátoru, diagram četnosti pulzů v závislosti na amplitudě zdánlivého náboje a fázi dle současné normy, 7 kV, 267 pC



Obr. 7: Izolační tyč generátoru, diagram četnosti pulzů v závislosti na amplitudě zdánlivého náboje a fázi ve frekvenčním rozsahu 35 kHz - 10 MHz, 7 kV, 3,51 nC



Obr. 8: Izolační tyč generátoru, silný elektromagnetický šum ve frekvenčním rozsahu od 9 MHz do 10 MHz

Při měření na jiných frekvenčních rozsazích je nutné brát zvláštní ohledy na potřebu redukce šumu.

ZÁVĚRY

Výsledky prezentovaných experimentů ukazují, že interpretace výsledků v diagnostice částečných výbojů je problematická. Při měření částečných výbojů v širších frekvenčních rozsazích získáváme

nové informace užitečné pro diagnostiku zkoušeného objektu. Nové možnosti moderních měřicích aparatur obecně přinášejí nové výsledky. Jedna z nich je měření částečných výbojů na širším frekvenčním rozsahu. Další výhody jsou možnosti číslicového potlačení šumu. Bližší podrobnosti jsou prezentovány např. v [6].

Měření na izolačním systému olej-papír může být diskutováno na prezentovaných diagramech. Srovnáním Obr. 1 a Obr. 2 s Obr. 3 a Obr. 4 a analýzou výsledků je možné najít rozdíly mezi těmito dvěma izolačními systémy. Jeden je systém olej s lesklou lepenkou (presspahn) a druhý je systém s transformátorovou lepenkou. Při měření obou podle ČSN EN 60270 je možné sledovat rozdíly pouze v diagramech fázového rozložení výbojové činnosti. Naproti tomu při měření na širším frekvenčním rozsahu je možné konstatovat, že lesklá lepenka obsahuje četné vnitřní dutinky, které nejsou vyplněny izolační kapalinou, což způsobuje vnitřní výbojovou činnost. Zdánlivý náboj nabývá hodnot 78 pC (při měření dle normy) a 149 pC (při měření na širším frekvenčním rozsahu). Naproti tomu transformátorová lepenka vykazuje v obou případech zdánlivý náboj okolo 70 pC (respektive 70 a 75 pC). Tímto experimentem byly zjištěny skutečnosti, které se při postupu dle současné normy neprojeví.

Měření na vzorcích statorových tyčí stárnutých pulzním napětím o frekvenci 3 kHz nevykazuje žádný rozdíl v četnosti částečných výbojů v závislosti na fázi (měřeno dle stávající normy). Některé výsledky z experimentu jsou prezentovány v Tab. 1. Měřený zdánlivý náboj na stárnutých vzorcích je nižší než na vzorcích nových. To je možné interpretovat destrukcí pryskyřice v blízkosti elektrody. Zatímco pryskyřice (pojivo) byla zcela degradována, nosná složka (skleněná tkanina) a plnivo (slídový papír) zůstaly, vnitřní dutiny v pojivu dále neexistovaly a nemohly být měřeny jako vnitřní částečné výboje. Aktivita klouzavých výbojů je vyšší na nových vzorcích s hladkým povrchem. Zatímco degradace v izolaci pokračuje, povrch je čím dál více porézni. Elektrony urychlené vysokou intenzitou elektrického pole emitované elektrodou ulpívají na roztržené nosné složce. Tato část zdánlivého náboje q je taktéž potlačena. Oba tyto jevy jsou patrné snížením hodnoty zdánlivého náboje v čase. Degradace materiálu je však zřejmá na vzrůstu četnosti pulzů při měření v širším frekvenčním spektru, což je zřejmé z Tab. 1.

V případě měření na statorových tyčích generátoru je možné vyvodit ještě další závěry.

Měření na tyčích z generátoru poukazuje na širších frekvenčních rozsazích přítomnost klouzavých výbojů, které nejsou viditelné standardním měřením dle ČSN EN 60270, což je zřejmé z Obr. 6 a Obr. 7. Pro klouzavé výboje je typický trojúhelníkový diagram, Obr. 7. Trojúhelníkový diagram je

superponován na signál získaný standardním měřením částečných výbojů.

Během zkoušek statorových tyčí byly použity „polovodivé“ vrstvy na snížení gradientu pole na koncích měrné elektrody, které jak je vidět plní svůj účel právě jen pro určité frekvenční spektrum výbojové činnosti. Proto není patrná degradace povrchu izolačního materiálu jako v případě vzorků stárnutých pulzním napětím. Tato zkouška respektovala jen stárnutí za zvýšené teploty.

Zvláštní důraz je třeba klást na potlačení rušení. Detekovaná úroveň rušení je zobrazena na Obr. 8. Výhody plně digitálních měřicích zařízení jsou zde zřejmé. Pro řádnou diagnostiku elektroizolačního systému je však nutné zkoušet také další elektrické a strukturální parametry. Zřejmě bude možné vyvinout jednoduché diagnostické metody pro zkoušení elektrických zařízení širokofrekvenčním měřením částečných výbojů. V této oblasti je však nezbytný další výzkum.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek vznikl za podpory výzkumného záměru MSM 4977751310 a projektu NADACE ČEZ.

LITERATURA

- [1] Mentlík, V., Polanský, R., Prosr, P., „Influence of temperature aging on oxidation stability and activation energy of insulating liquids“, 2008, Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena, Québec, IEEE DEIS, 2008, pp. 52-55, ISBN 978-1-14244-2549-5
- [2] Patsch, R., „PD-source identification and characterization on the basis of pulse shape analysis“, In. CEIDP 2002, Cancun, Mexico, pp. 728 – 731.
- [3] Reiner, P., Menzel, J., Benzourek, D., „The use of the pulse sequence analysis to monitor the condition of oil“, In. CEIDP 2006, Kansas City, USA, pp. 660 – 663
- [4] Xiaolin CH., „Study of epoxy/mica insulation deterioration in generator stator using ultra-wide band partial discharge testing technique“, Polymer testing, Volume 25, Issue 6, September 2006, PP. 724 – 730.
- [5] Cavallini, A., Ciani, F., Montanari, C., The effect of space charge on phenomenology of partial discharges in insulation cavities, 2005 annual report, conference on electrical insulation and dielectric phenomena, IEEE DEIS, Nashville, TN, USA, 2005.
- [6] Li, J., Grzybowski, S., Du, L., Wang, Y., Extraction of partial discharges from noises by use of wavelet and pulse-shaped analysis, 2006,

IEEE CEIDP, IEEE conference on electrical insulation and dielectric phenomena, Kansas city, Missouri, USA, October 15-18, 2006