

## Analýza signálu pulzů částečných výbojů

J. Pihera<sup>1</sup>, P. Martínek<sup>2</sup>, P. Trnka<sup>1</sup>, P. Netolický

<sup>1</sup> Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,

<sup>2</sup> Katedra energetiky a ekologie, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,

Univerzitní 26, Plzeň

E-mail : pihera@ket.zcu.cz, petrmart@kee.zcu.cz, pavel@ket.zcu

### Anotace:

Částečné výboje, jejich měření a následná analýza, jsou jedním z důležitých a výpovědíchopných nástrojů elektrotechnologické diagnostiky při hodnocení vlastností elektroizolačních systémů elektrických strojů a přístrojů.

Částečné výboje jsou většinou analyzovány ve vztahu k fázi napájecího napětí, jejich četnosti, amplitudě zdánlivého náboje, apod. Nicméně v článku je studována možnost analýzy parametrů signálu jednotlivých pulzů částečných výbojů několika modelových uspořádání. Sledovanými parametry jsou náběžná doba a amplituda pulzu. Hodnocení souboru naměřených dat je řešeno aplikací histogramu pro oba měřené parametry.

### ÚVOD

Uvnitř izolačních systémů elektrických strojů a zařízení existuje lokální rozložení elektrického pole, které je určeno zejména kapacitním a ohmickým charakterem izolace. Pokud existuje lokální elektrické pole v konkrétním malém prostoru dielektrika jehož intenzita je větší než průrazné napětí tohoto prostoru, dojde k lokálnímu průrazu, částečnému výboji. Tento průraz vytvoří lavinu nosičů náboje, která má většinou lokální degradační účinky na izolační materiál v okolí průrazu. Tento částečný výboj ovlivní rozložení lokálního elektrického pole a způsobí nepatrný pokles napětí na svorkách testovaného objektu.

Detekce částečných výbojů je většinou založena na měření nabíjecích proudů, kterých je zapotřebí k obnovení napětí na vzorku, které tam bylo v okamžiku před výskytem částečného výboje. Dalšími elektrickými metodami je například snímání elektromagnetického pole vyzářeného během částečného výboje.

Analýza signálu částečných výbojů je známým nástrojem pro monitorování degradace izolačních systémů elektrických strojů a zařízení. Na rozdíl od běžných postupů analýzy částečných výbojů z hlediska fáze a velikosti částečného výboje měřených během definovaného času, jsou také zkoumány metody založené na vyhodnocování parametrů jednotlivých pulzů [1,2]. Klasické analýzy jsou většinou založené na vyhodnocování fázového úhlu zkušebního napětí při kterém se částečné výboje objevují. Analýza částečných výbojů v pevných nebo kapalných izolantech odhaluje, že fázový úhel externího napětí nemusí být jediným a nejvýznamnějším parametrem částečných výbojů [2]. Zapálení částečného výboje je totiž určeno především lokálním elektrickým polem v místě vnitřní nehomogenity a nikoliv absolutní hodnotou nebo fázovým úhlem přiloženého napětí. Tato teorie je detailně popsána a studována v [2].

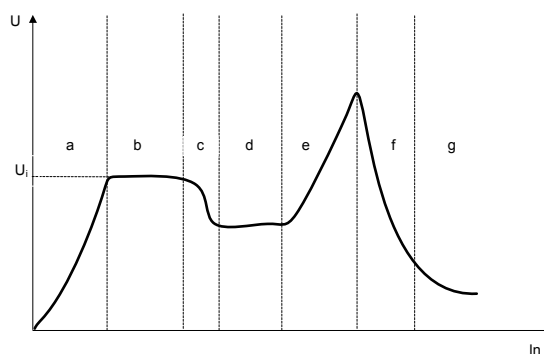
### TEORIE

#### A. Elektrické výboje v plynu

Plyn je při normální teplotě tvořen neutrálními atomy nebo molekulami a z hlediska elektrické vodivosti je velmi dobrý izolant. Pro umožnění průchodu proudu ve vnějším elektrickém poli je třeba ionizační činidlo. Může jím být ultrafialové, rentgenové,  $\gamma$  nebo kosmické záření, vysoká teplota, silné elektrické pole nebo částice s vysokou energií. Ve slabém elektrickém poli může atmosférou na zemském povrchu protékat pouze velmi slabý proud s hustotami  $10^{-12} \div 10^{-6} \text{ Am}^{-2}$  v důsledku přirozené ionizace způsobené radioaktivním zářením Země a kosmickým zářením vesmíru. Pro vedení elektrického proudu větší hustoty je třeba dodatečné ionizační činidlo. Výboje uskutečněné tímto způsobem jsou nazývány výboje nesamostatné.

V dostatečně silných elektrických polích případně ještě v kombinaci s nižším tlakem se vytváří počet iontů a elektronů vhodný pro samostatné udržení proudu a takové výboje nazýváme samostatné.

Ve V-A diagramu můžeme znázornit základní druhy elektrických výbojů (Obr. 1):



Obr. 1: Druhy elektrických výbojů [19]

Počáteční část křivky **a** znázorňuje nesamostatný výboj. Při něm prochází jen velmi slabý proud. Při napětí které dosáhne hodnoty tzv. zapalovacího napětí  $U_z$  je elektrické pole mezi elektrodami  $E$  dostatečně silné pro urychlení elektronů. Urychlené

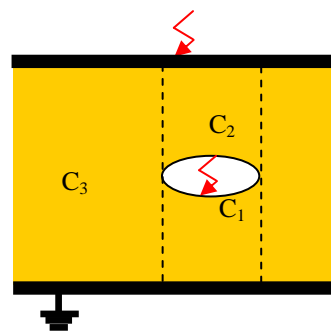
elektrony narážejí na ionty a mohou uvolňovat další elektrony v objemu výboje a urychlené ionty dopadající na katodu vyrážejí elektrony z materiálu katody v počtu dostatečném pro vytvoření dalších generací elektronů a udržení samostatného výboje. Proud v elektrických výbojích zpravidla vedou elektrony, neboť mají v porovnání s ionty menší hmotnost a v elektrickém poli větší pohyblivost. Při proudech  $10^{-10} \div 10^{-5}$  A jsou kinetické energie elektronů malé a srážky nejsou doprovázeny emisí viditelného záření. Tyto výboje znázorněné v části **b** se projevují slyšitelnými akustickými jevy a nazýváme je temným Townsendovým výbojem. Oblast **c** je charakteristická pro korónu. Výboj znázorněný v oblasti **d** se nazývá normální doutnavý výboj. Při tomto výboji je energie a hustota proudu nízká, a katoda i plyn v trubici zůstávají chladné. Výboj s parametry příslušejícími části **e** křivky se nazývá anomálním elektrickým výbojem. Je charakterizován vyššími proudovými hustotami a vyšší teplotou katody. Townsendův a doutnavý výboj probíhají většinou ve zředěných plynech a tlacích desetin procent atmosférického tlaku. Při proudech větších než kA v oblasti **f** probíhá jiskrový výboj. Zapaluje se při silném elektrickém poli. Jiskrový kanál má vysokou vodivost a po propojení obou elektrod se snižuje napětí mezi elektrodami. Výboj v části **g** se nazývá obloukový [19].

## B. Částečné výboje

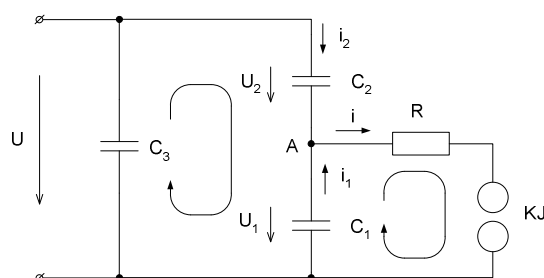
Částečný výboj je lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostuje vzdálenost mezi různými potenciály a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče. Částečné výboje jsou obvykle důsledkem koncentrace lokálního elektrického namáhání v izolaci nebo na povrchu izolace a vytvářejí proudové (napěťové) impulsy s dobou trvání mnohem menší než 1 $\mu$ s.

Teorie pro modelování chování výbojové činnosti vychází ze základního ekvivalentního tříkapacitního obvodu formulovaného v [3]. Výchozí podmínkou náhradního schématu na obr. 3 je existence pevného nebo kapalného dielektrika s jednou dutinou představující nehomogenní místo uvnitř objemu dielektrika (obr. 2).

Kapacita  $C_1$  v uvedeném ekvivalentním obvodu (obr. 3) představuje kapacitu vzduchové dutiny v pevném nebo tekutém dielektriku, ve které dojde ke vzniku částečných výbojů. Kapacita  $C_2$ , představuje výslednou kapacitu homogenního dielektrika v sérii s dutinou. Kapacita  $C_3$  je relativně velká kapacita zdravé části dielektrika paralelně řazené k sériové kombinaci  $C_1$  a  $C_2$ . Pro malou dutinu v dielektriku pak platí podmínka  $C_3 \gg C_1 \gg C_2$ . Jiskřiště KJ paralelně ke kapacitě  $C_1$  slouží k modelování průrazu vzduchem vyplněné dutiny, který nastává v okamžiku dosažení zápalného napětí  $U_i$  částečných výbojů na kapacitě  $C_1$ . Odpor R v sérii s jiskřištěm KJ představuje odpor výbojové dráhy překlenující vnitřní vzduchovou dutinu.

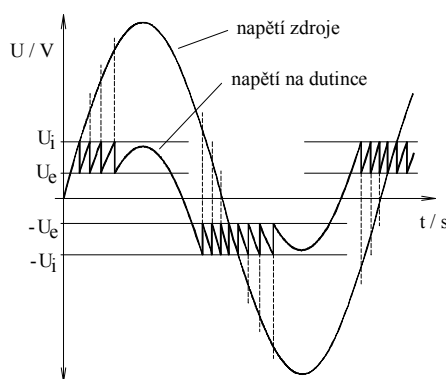


Obr. 2: Dielektrikum s jednou vnitřní nehomogenitou



Obr. 3: Gemant-Philippowův model dielektrika s vnitřní dutinou [3] kde:  
 $C_1$  - kapacita dutinky,  
 $C_2$  - kapacita dielektrika připojeného do série s kapacitou dutinky  
 $C_3$  - kapacita nepoškozené části dielektrika,  
 $R$  - odpor výbojového kanálu,  
 $KJ$  - kulové jiskřiště (jeho zapálení představuje částečný výboj).  
 $i$  - proudový impuls výboje  
 $i_1, i_2$  - nabíjecí proudy  
 $u_1, u_2$  - napětí na kapacitách  $C_1, C_2$

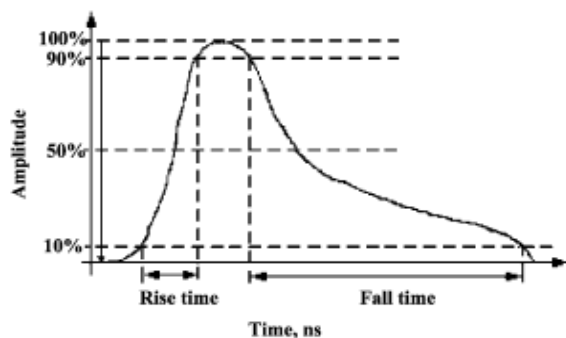
Obrázek 4 představuje průběhy napětí ve zkoumaném obvodu naznačeném na obr. 3.



Obr. 4: Gemant-Philippowův model a napěťové průběhy

Je zřejmé, že se při částečném výboji v dutince na výbojovém procesu nepodílejí pouze plochy vzduchových mezer, ale i určitá část jejich přímého okolí dielektrika. Po dobu přeskočení dochází nejen k poklesu napětí na dutince, ale i na jejím pevném rozhraní. Důsledkem je, že se nosiče náboje mohou pohybovat podél rozhraní a ovlivňovat tak napětí na dutince. Tuto skutečnost zohledňuje Böningův model (obr. 5) prostřednictvím kapacity  $C_4$ , přidané paralelně ke kapacitě vzduchové mezery  $C_1$ . Kapacita





Obr. 7: Typický tvar pulzu ČV (přejato z [4])

## EXPERIMENT

Každý jednotlivý pulz částečného výboje lze snímat pomocí vhodné snímače impedance a pozorovat rychlými digitálními osciloskopy.

Jak již bylo řečeno, existuje předpoklad, že různá výbojová uspořádání nebo i různě degradované izolační materiály mají odlišné průběhy snímaných pulzů [4]. Předpokladem pro provedení experimentu je názor, že hodnocení pomocí měření parametrů signálu ČV umožňuje analyzovat a rozpoznat nejen různě degradované varianty materiálu [4], ale i různé typy částečných výbojů. Například korona, vnitřní výboje a další.

Mezi hlavní sledované parametry jednotlivých pulzů patří např. jejich náběžná doba, sestupná doba, amplituda a jiné vhodné parametry.

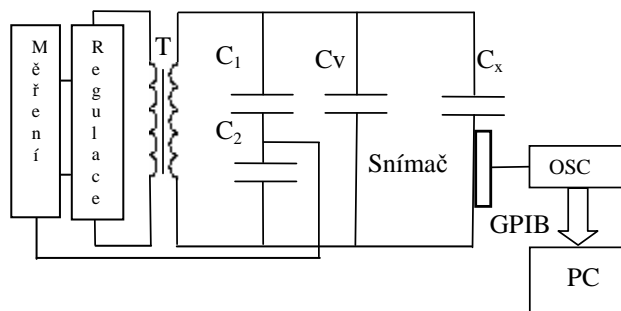
Jelikož je vznik částečného výboje v podstatě stochastickým jevem, je zapotřebí provést statistickou analýzu významného množství naměřených dat.

### Experimentální uspořádání

Pro pozorování a analýzu signálu pulzů částečných výbojů byly vybrány zkušební objekty typické pro vznik částečných výbojů:

- koronové uspořádání hrot-deska,
- vnitřní výboje (Plošné vzorky pevné izolace FR4 v dodaném stavu a po tepelné expozici 180°C, 168 hodin. Vnitřní nehomogenity těchto plošných vzorků byly zdrojem vnitřních výbojů.)

Pro detekci pulzů výbojové činnosti byl použit lineární induktivní snímač, který byl umístěn k zemnímu přívodu testovaného objektu (obr. 8). Záznam pulzů částečných výbojů byl proveden pomocí digitálního osciloskopu Agilent Infinium 54853A (20Gs/s, 2,5 Ghz, 16Mb) a naměřená data byla ukládána do PC pomocí GPIB rozhraní. Software pro záznam a uložení dat byl realizován v programovém prostředí Agilent VEE Pro.



Obr. 8: Experimentální uspořádání

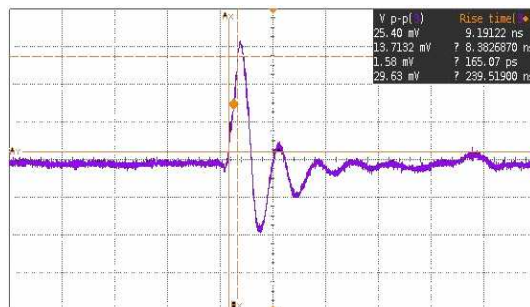
- Cx – zkoumaný objekt
- Cv – vazební kondenzátor
- C1, C2 – kapacitní děliče pro měření napětí

### Analýza pulzů částečných výbojů

Na obrázku 9 je představen záznam signálu pulzu částečného výboje snímaný lineárním induktivním snímačem. Pro potřeby analýzy byla měřena první náběžná doba pulzu (10 – 90 %) a peak-peak amplituda pulzu.

Pro dostatečnou statistickou vydatnost dat byl u každého objektu proveden záznam 1000 pulzů. Při vyhodnocování byly ze základního souboru odděleny hodnoty naměřené např. při „chybném“ triggeru osciloskopu, apod. Data byla statisticky zpracována do histogramů ve kterých nejsou zahrnuty výše zmíněné chybné odlehle hodnoty.

Měření náběžné doby a amplitudy pulzu koronového uspořádání hrot-deska probíhalo při hodnotě zapalovacího napětí 4,8 kV. Při měření plošných vzorků pevné izolace FR4 byly jevy studovány při stejné hladině zkušebního napětí 2 kV.



Obr. 9: Typický průběh pulzu částečného výboje snímaného L-senzorem

### Dosažené výsledky

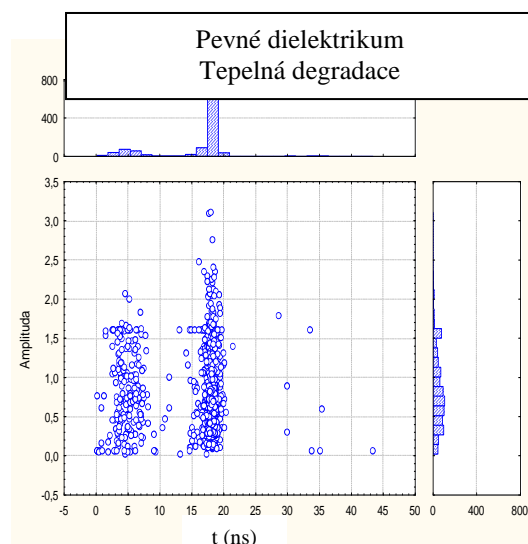
Při koronovém výboji je pulz poměrně přesně definován úzkým rozmezím dob náběhu a širší škálou zaznamenaných amplitud (mV) impulzů (viz. histogram obr. 10). U pevných dielektrik je více vnitřních nehomogenit různých velikostí. Existuje tedy variabilita náběžných dob, jelikož lavina elektronů, která musí pro vytvoření částečného výboje překlenout celou dutinu potřebuje u různých velikých dutin různý čas. Obrázky 11 a 12 představují histogramy částečných výbojů v pevné izolaci v dodaném stavu a po teplotní expozici 168 hodin při 180°C. Z grafického záznamu naměřených hodnot (obr. 11) lze poměrně snadno určit střední hodnotu

časů impulsu - histogram vykazuje přibližně normální rozdělení, střední hodnota je tedy aritmetický průměrem naměřených hodnot, tj. amplituda impulsu tvoří hodně zešikmené rozdělení, nejčetnější hustota naměřených hodnot je okolo amplitudy 0,10.

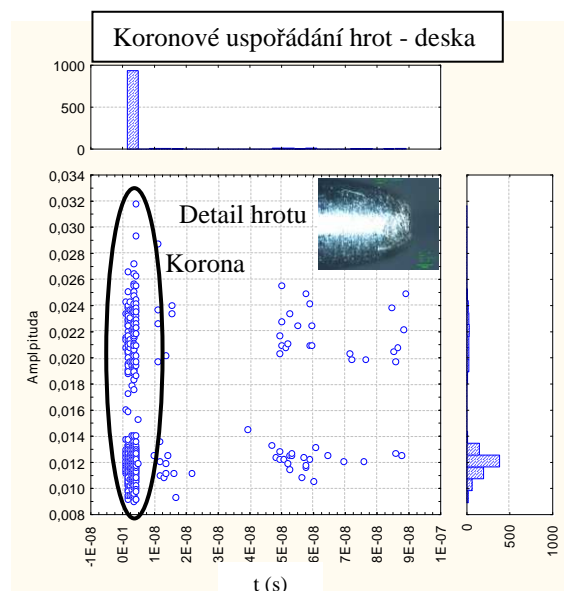
V případě stárnutého materiálu je zajímavý výskyt dvou skupin pulzů o různé amplitudě v relativně stejném čase (cca kolem 5 a 17 ns).

V grafu (obr.12) jsou dvě typické hodnoty časů (střední hodnoty vymezené skupiny hodnot). Skupina naměřených hodnot s časem náběhu cca 17 ns má mnohem vyšší četnost než druhá skupina měřených dat.

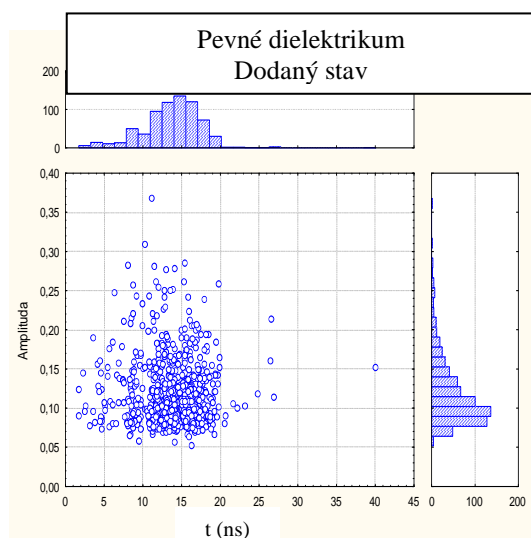
Amplituda pulzu u stárnutého pevného dielektrika má vyšší hodnoty než u materiálu v neexponovaném stavu. Je tomu tak zřejmě proto, že u stárnutého dielektrika jsou, mimo jiné fyzikální působení, větší vnitřní nehomogenity a energie nutná k zapálení výboje je větší.



Obr. 12: Bodový graf s histogramy teplotně degradované pevné izolace FR4



Obr. 10: Bodový graf s histogramy koronového uspořádání hrot-deska



Obr. 11: Bodový graf s histogramy pevné izolace FR4 v dodaném stavu

## ZÁVĚR

Pohled na chování pulzu částečného výboje v různých případech vzniku výbojové činnosti, přináší rozdílné výsledky při sledování náběžné doby pulzu a jeho amplitudy u různých pozorovaných případů. Sledování náběžné doby a amplitudy pulzu je jednou z možností jak hodnotit částečné výboje bez ohledu na jejich superponovanou polohu na sinusovce napájecího napětí.

Tyto parametry pulzu mohou být použity pro sledování typu částečného výboje a také pro hodnocení degradace izolačních systémů elektrických strojů.

Je-li izolace stárnutá jsou vnitřní nehomogenity vlivem působení degradačních činitelů větší než na počátku v dodaném stavu a tento jev vede k nárůstu amplitudy snímaného částečného výboje.

V budoucím výzkumu je předpokládáno ověření předloženého experimentu v širším spektru analyzovaných vzorků a modelů částečných výbojů.

## PODĚKOVÁNÍ

Tento výzkum je podporován výzkumným záměrem Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České Republiky, MSM 4977751310 – Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice.

## LITERATURA

- [1] 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, s.660 – 663
- [2] Patsch, R.; „PD-Source Identification and Characterization on the Basis of Pulse Shape Analysis”, In. CEIDP 2002, Cancun, Mexico, s. 728-731

- [3] Gemant A. and v. Philippoff W., Z. Techn. Phys., 13 (1932) 425.
- [4] Xiaolin Chen; „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, s. 724-730
- [5] Bartnikas, R.; „A comment concerning the rise times of partial discharge pulses“ Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Volume 12, Issue 2, April 2005 s.196 – 202
- [6] Patsch, R.; “The Role of Accumulated Charges in Partial Discharge Processes” In. ICSD 2007, Winchester, UK, s. 552-555
- [7] Veverka, A.: Technika vysokých napětí, SNTL/ALFA 1982
- [8] Technika zkoušek vysokým napětím – měření částečných výbojů ČSN EN 60270, ČSN, Prosinec 2001, Praha
- [9] Balogh, J.: Lineárne toroidálne induktívni sondy ich aplikácie v elektrotechnike, disertační práce Košice 2001
- [10] Krsňák I.: Detekcia čiastkových výbojov a analýza výpovedeschopných veličín, disertační práce, Košice 1996
- [11] Mentlík, V.: Dielektrické prvky a systémy, BEN 2006
- [12] Peter H. F. Morshuis: “Degradation of Solid Dielectrics due to Internal Partial Discharge”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 12, No. 5, October 2005
- [13] Stone, G.: ”PD diagnostics and system reliability”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 12, No. 5, s.891-904, October 2005
- [14] K. Wu, Y. Suzuoki, T. Mizutani, et al., A novel physical model for partial discharge in narrow channels, IEEE Trans. Dielectrics Electr. Insul. 6 (1999) 181–190.
- [15] Gulski, E.: Computer Aided Recognition of Discharge Pattern”, IEEE Trans. Dielectrics Electr. Insul. Vol.27, s. 82-92
- [16] Russwum, D. “On-Site Partial Discharge Monitoring using the differential LEMKE PROBE LDP-5 and its accessories”, HV Testing, Monitoring and Diagnostic Workshop 2000
- [17] Hudon, C. „Partial Discharge Signal Interpretation for Generator Diagnostics“, IEEE Transaction on Dielectrics 2005, Vol. 12, No. 2, pp. 297-319
- [18] Koch, R. “Lokalisierung von Isolationsfehlern in Generatorwicklungen durch Laufzeitortung der Teilentladungen” , Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Berlin 2002
- [19] Kubeš, P.: „Impulsní silnoproudé výboje a jejich diagnostika“ FEL ČVUT, PRAHA 2004
- [20] König, D., Rao, N. “Partial Discharges in Electrical Power Apparatus”, Berlin, 1993, ISBN 3-8007-1760-3