

# DETEKCE PORUCH VN STROJŮ ANALÝZOU VÝBOJOVÉ ČINNOSTI SE ZAMĚŘENÍM NA TRANSFORMÁTORY

## FAIL DETECTION OF HV MACHINES THROUGH DISCHARGE ANALYSIS – FOCUSED ON TRANSFORMERS

M. Bujaloboková<sup>1</sup>, P. Trnka<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ETD Transformátory a.s.

Zborovská 22/54, Plzeň, tel.: +420 378 117 525, mail: magdalena.bujalobokova@etd-bez.cz

<sup>2</sup>Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,

Univerzitní 26, Plzeň tel.: +420 377 634 518, pavel@ket.zcu.cz

**Anotace** Provoz výkonových transformátorů vyžaduje zachování vysoké provozní spolehlivosti. Rychlé zjištění poruch a jejich odstranění bylo vždy prioritou. V současné době čelí výrobci výkonových transformátorů tlaku spotřebitelů nejen na detekci a predikci poruchy, ale také její identifikaci. Další ekonomické tlaky si žádají zlevňování opravárenských prostředků a tudíž je třeba, aby diagnostický systém prováděl také určení typu poruchy transformátoru. Umožní se tím připravenost opravárenských týmů a tím i zkrácení doby odstávky. Veškeré dosud známé metody detekce poruch je možné provést buď v provozu transformátoru (tzv. on-line diagnostika) nebo podmínky nutné k provedení metod si vyžadují vyřazení transformátoru z provozu (tzv. off-line diagnostika). Obě skupiny metod jsou doprovázeny určitými omezeními a získané výsledky neposkytují vždy požadovanou informaci. Článek se zabývá shrnutím současně využívaných metod detekce a měření částečných výbojů (ČV) a diskutuje možnosti jejich aplikace při diagnostice výkonového transformátoru.

**Summary** High operational reliability of the power transformers is one of the most important features. Fast failure detection is the main aim. The power transformers producer faces the customer's pressure not only for failure detection and prediction. Recently is also requested a failure identification. Economical pressure requires reducing of the revisions budget. This is the reason why the system of diagnostics has to identify transformer failure. It helps to reduce the time needed for preparation and repair. Recent known detection methods can be divided to on-line and off-line method. Both methods have their own advantages and disadvantages. The results are not always satisfactory. Paper deals with summarization of recently used partial discharges (PD) detection methods and their application in the power transformer diagnostics.

### 1. ÚVOD

Existuje celá řada metod měření částečných výbojů (ČV). Metody detekce výbojové činnosti můžeme rozdělit na metody bezkontaktní a metody galvanické. Samotné výboje lze detekovat na základě jejich akustických, elektromagnetických, tepelných, chemických či vizuálních účinků. Všechny tyto metody jsou popisovány v řadě vědeckých publikací a jsou prezentovány příklady jejich aplikace při diagnostice různých vysokonapěťových zařízení. Téměř vždy je v závěrech prací diskutována přesnost, vypovídací schopnost a omezení metody. Výbojová činnost je charakteristická pro různá prostředí v nichž vzniká. Různá rozložení výbojů na křivce sinusového napětí získáme měřením částečných výbojů v kapalině, plynu či pevném dielektriku. Záleží také na složení okolního prostředí. S použitím jiných izolačních olejů v transformátoru se změni i složení rozkladných produktů [5][6].

Při měření výbojové činnosti se setkáváme s problematikou rušivých elektromagnetických polí, problematikou přenosu signálu k vyhodnocovací jednotce. U zařízení vn a vvn se potýkáme s problémem, jak připojit měřící obvod, snímací impedanci k měřenému objektu.

Zde přichází ke slovu bezkontaktní metody, metody chemické, akustické apod.



Obr. 1. Výkonový transformátor.

Fig. 1. Power transformer.

Použití měřicích postupů a metod při sledování výbojové činnosti ve výkonovém transformátoru je často problematické, řada v laboratorních podmínkách postupů zde selhává.

### 2. PARAMETRY VÝBOJŮ

Při měření výbojové činnosti se využívají tyto hlavní parametry:

- Zapalovací napětí částečných výbojů  $U_i$  (kV), v zahraniční literatuře označované jako CIV nebo PDIV (Corona Inception Voltage, Partial Discharges Inception Voltage).

- Zhášecí napětí částečných výbojů  $U_e$  (kV), CEV nebo PDEV (Corona Extinction Voltage, Partial Discharges Extinction Voltage).
- Náboj částečných výbojů  $q$  (pC), (Apparent Charge).
- Četnost impulzů částečných výbojů  $n$  (-), (Pulse Count, Pulse Repetition Rate).
- Poloha částečných výbojů na křivce napětí, (Partial Discharges Pattern).

Dalším problémem je záznam tvaru jednotlivých impulzů částečných výbojů, který se v poslední době objevuje. Sledována je strmost nárůstu impulzu částečného výboje.

Otázkou dalšího výzkumu zůstává, jak se tyto parametry mění s degradací izolačních systémů sledovaného zařízení (např. [7]).

### 3. MĚŘENÍ POMOCÍ KAPACITNÍ SONDY

Metoda měření výbojové činnosti pomocí kapacitní sondy je jedna z mnoha metod detekce a měření částečných výbojů. Kapacitní sonda (př. na obr. 2) se vloží do zařízení co nejbližší k místu, kde chceme výbojovou činnost měřit. Jsou aplikace, kde je tato metoda laboratorně odzkoušena. Například kapacitní drážková sonda vložená pod klín do drážky statorového vinutí točivých strojů. Metoda umožňuje přesnou lokalizaci výbojové činnosti. Z polohy jednotlivých kapacitních sond na zkoumaném zařízení, lze analýzou měřicích signálů zjistit místo zvýšené výbojové činnosti v tomto zařízení. Tato sonda je tvořena izolačním materiálem, na jehož jedné straně je vodivá kovová folie (stínění) a na druhé úzký pásek vodiče sloužící jako snímač.

Koaxiální kapacitní sonda bývá používána např. při měření částečných výbojů na vysokonapěťových kabelech.

Ve výkonovém transformátoru je ovšem použití metody kapacitní sondy značně problematické. Nádoba výkonového transformátoru je optimalizována pro magnetický obvod a jednotlivá vinutí, odbočky apod. Umístění kapacitní sondy v blízkosti vinutí přináší řadu problémů. Nejen, že od sondy musí vést vodič ven z nádoby transformátoru, ten navíc musí splňovat řadu parametrů.



Obr. 2. Kapacitní senzor výrobce Lemke Diagnostics.  
Fig. 2. Capacitive sensor made by Lemke Diagnostics.

Přenést naměřený signál o náboji v řádech pC v okolí částí vinutí vn a vvn transformátoru je téměř nemožné. Kromě jiného je třeba se vyrovnat s problémy práce zařízení v transformátorovém oleji. Největší problém však nastává v ovlivnění magnetických toků transformátoru.

### Frekvenční odezva kapacitního senzoru

Jedním z faktorů, který je nutné u kapacitního senzoru znát, je jeho odezva ve frekvenční oblasti. Vlastnosti měřicího systému ve frekvenční oblasti jsou závislé na daném měřicím uspořádání. K problému můžeme přistoupit jako k hledání frekvenční charakteristiky - tzv. „black box“. Na vstup měřicího systému se přivádí sinusový signál měnící se frekvence. Na výstupu z měřicího systému je měřena odezva. Zaznamenávána je frekvence a fáze ve vztahu ke vstupnímu signálu. Zisk se vypočítá pro každou frekvenci jako poměr výstupní amplitudy ke vstupní amplitudě (1).

$$Z = 20 \log |F(j\omega)| = 20 \log \left| \frac{A_2}{A_1} \right| \quad (1)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}\{F(j\omega)\}}{\text{Re}\{F(j\omega)\}} \quad (2)$$

kde:

$Z$  je zisk (dB),

$A_1$  a  $A_2$  jsou vstupní a výstupní amplituda,

$F(j\omega)$  je přenosová funkce sledovaného senzoru,

$\omega$  je úhlová frekvence.

Přesný model lze získat jen za předpokladu, že měřicí systém je časově invariantní a lineární.

Známe-li frekvenční odezvu senzoru, můžeme určit i mezní frekvence pro přesné měření tvaru impulzu.

### 4. MĚŘENÍ POMOCÍ INDUKTIVNÍ SONDY

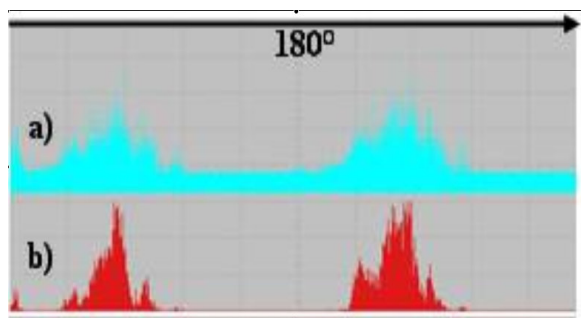
Měření částečných výbojů pomocí induktivní sondy (př. na obr. 3) se provádí na principu snímání magnetického pole vyzařovaného zdrojem ČV. Výhodou této metody je vysoká citlivost, v porovnání ve předchozím popsaným kapacitním senzorům. Velkým problémem tohoto způsobu měření je indukce vnějšího rušení do měřicího obvodu. Proto se tato metoda používá hlavně v oblasti velmi malých proudů. To ji vylučuje pro použití ve výkonovém transformátoru. Další nevýhodou je rychlost odezvy senzoru, která závisí také na vlastnostech jádra induktivního senzoru a na velikosti koeritivní síly  $H_c$  ( $A \cdot m^{-1}$ ). Obecně platí, že materiály vhodné pro rychlou odezvu se hodí spíše pro slabá magnetická pole, což je pro tuto metodu další vylučující faktor pro použití ve výkonovém transformátoru.



Obr. 3. Induktivní senzor pro měření částečných výbojů.  
Fig. 3. Inductive sensor for PD detection.

## 5. MĚŘENÍ POMOCÍ SENZORŮ POLE

Negalvanické měření pomocí senzorů elektrického nebo magnetického pole je zde odděleno od měření pomocí kapacitního nebo induktivního senzoru. Přístroje jako Lemke sonda, umožňují použít kapacitní, induktivní nebo diferenciální senzor k měření ČV. Kapacitní senzor slouží jako směrová anténa. Tímto způsobem je možno měřit ČV z určité vzdálenosti od testovaného objektu a to bez galvanického spojení s objektem (v předchozím byl kapacitní nebo induktivní senzor spojen s vyhodnocovací a měřicí jednotkou galvanicky), čímž je možné měřit bez nutnosti zkoumaný objekt vyřadit z provozu. Není zde také limitující hodnota napětí přiváděného na tento objekt. V [3] bylo provedeno porovnání této metody a metody s měřicí impedancí dle IEC 60270. Je zde vidět, že je možné provádět touto metodou přesná měření, do určité vzdálenosti sondy od zkoušeného objektu v laboratorních podmínkách. V průmyslovém prostředí, díky rušení z okolí je tato metoda vhodná spíše k lokalizaci výbojové činnosti, než k samotné kvantifikaci výbojové činnosti. Na obr. 4 je příklad naměřené výbojové činnosti pomocí bezkontaktní metody.



Obr.4. Příklad naměřených výsledků pomocí Lemke sondy – bezkontaktní měření. a) – zdánlivý náboj částečných výbojů, b) – četnost impulzů částečných výbojů. Měření 30 s při 2,5 kV – Test materiálu Relanex dodaný stav.  
Fig. 4. Partial discharges measurement result example, Lemke probe. a) – Apparent charge, b) - PD pulse count. Captured during 30 s/2,5 kV, material Relanex.

## 6. UHF SENZORY PRO MĚŘENÍ ČV

Metoda použití *UHF* (Ultra High Frequency) senzorů pro měření částečných výbojů vychází z faktu, že během výboje jsou elektrony odtrženy od atomu nebo molekuly. Z klidové polohy jsou náhle akcelerovány elektrickým polem (nárůst proudu) a za krátký okamžik opět uvedeny do klidové polohy (pokles proudu). Při změnách rychlosti pohybu elektrického náboje dochází ke vzniku elektromagnetického pole. Do okolí se všemi směry šíří rázová vlna.

Matematický popis vychází jak z časové, tak frekvenční oblasti. Jelikož je časová doména inverzní k frekvenční, kratší impulzy částečných výbojů mají vyšší spektrální energii na vyšších frekvencích. To lze popsat následujícím vztahem [1]:

$$i(t) = \frac{I}{T} t e^{(1-t/T)} \quad (3)$$

kde:

$t$  je čas (s),

$I$  je maximální proud (A),

$T$  rychlost náběhu proudového impulzu (V/s).

Potom náboj  $q$  (C) jednoho impulzu můžeme vyjádřit jako:

$$q = eIT \quad (4)$$

a jeho amplituda ve frekvenční oblasti:

$$I(\omega) = \left| \frac{q}{(j + T\omega)^2} \right| \quad (5)$$

kde:

$\omega$  je kruhová frekvence.

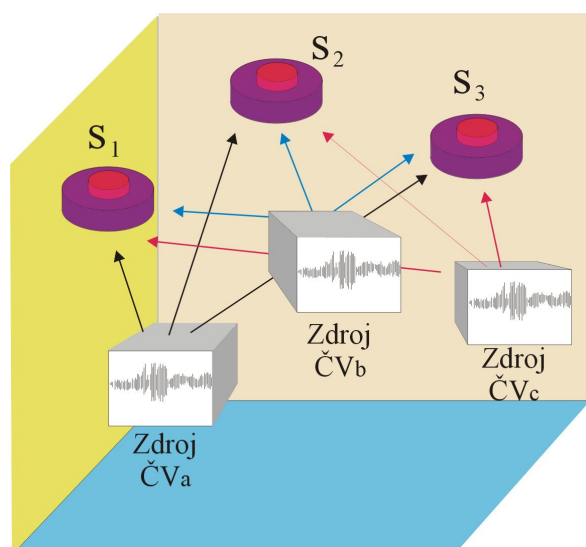
Jakmile je UHF signál generován pulzem ČV, jeho energie se ztrácí v okolí (v izolacích transformátoru, na povrchu vodičů a induktorů apod.). Elektromagnetický pulz (důsledek částečného výboje) se šíří rychlostí světla od místa výbojové činnosti všemi směry. V nádobě transformátoru dochází k útlumu i odrazům. Proto naměřený signál vykazuje útlumovou rezonanci.

Z těchto skutečností se musí vyjít při analýze naměřených signálů útlumových rezonancí.

Samotný senzor je většinou metalická destička umístěná v trubici naplněné stlačeným plynem. Detekované frekvence jsou nastaveny pomocí filtru typu horní propust a nastavitelné vstupní impedance.

### Praktické použití UHF senzorů

Možné použití UHF senzorů je zapojení několika senzorů rozmístěných na zkoumaném zařízení. Minimální citlivost senzorů by měla být 0,3 – 3 GHz. Příklad použití na transformátoru je uveden na obr. 5 [1].



Obr. 5. Příklad rozmístění UHF senzorů k lokalizaci místa výbojové činnosti.  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  – UHF senzory.

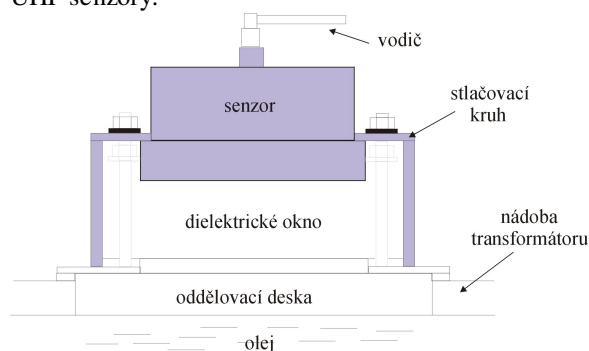
Fig. 5. Example of UHF sensors disposition for PD source localization.  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  – are UHF sensors.

Představíme-li si jeden zdroj částečných výbojů (obr. 5), UHF signál dorazí a bude zachycen jednotlivými senzory  $S_1$ – $S_3$  s určitým časovým zpožděním odpovídajícím vzdálenosti výbojové činnosti. Tu lze poté vypočítat. Pokud dochází k výbojové činnosti na několika místech současně, na záznamu se začnou projevovat opakující se časové diference  $\Delta t$  odpovídající jednotlivým místům výbojové činnosti. Po naměření dostatečného množství těchto časových diferencí, je možno určit místa jednotlivých zdrojů částečných výbojů.

### Umístění UHF senzorů

Senzory je vhodné umístit na dielektrická okna v nádobě transformátoru, čímž se dosáhne snadného průchodu elektromagnetických vln způsobených částečnými výboji a jejich zachycení UHF senzorem viz. obr. 6.

Na samotné nádobě transformátoru je nutné vytvořit několik těchto dielektrických oken a osadit UHF senzory.



Obr. 6. Dielektrické okénko v nádobě transformátoru a umístění UHF senzoru.

Fig. 6. Dielectric window in transformer tank and UHF sensor mounting.

Praktický výpočet šíření UHF vln způsobených výbojovou činností je ovšem záležitostí složitého numerického výpočtu. Je třeba vytvořit 3D model šíření UHF signálu daným transformátorem, brát v úvahu jednotlivá prostředí, jimiž se měřený signál pohybuje, jeho dráhy a útlum. Dalším problémem jsou odrazy uvnitř nádoby.

Tab. 1 představuje jednotlivé nejpoužívanější metody měření výbojové činnosti a diskutuje jejich použitelnost.

Tab. 1. Přehled metod měření ČV.  
Table 1 Partial discharge measurement methods.

Metoda měření ČV	Popis/Použití
Kapacitní senzor	Drážková sonda/laboratorní účely
Induktivní senzor	Malé proudy/slabá magnetická pole
Senzory pole	Laboratorní měření/Lokalizace ČV
UHF senzory	Detekce elmg. projevů
Odporový senzor	Zachování tvaru impulzů
Analýza chladicích plynů	Generátory
Akustické projevy	Lokalizace koróny

## 7. ZÁVĚR

Vývoji spolehlivé metody jak monitorovat chod výkonového transformátoru pomocí měření částečných výbojů se věnují pracoviště po celém světě. Je řada cest, kterými se vydávají. Metody měření částečných výbojů naráží ve výkonové technice a v průmyslu na celou řadu úskalí. V průmyslovém prostředí je celá řada faktorů, které ovlivňují použitelnost metody v praxi. Významnou míru zde hraje i cena samotného zařízení. Ve výkonovém transformátoru je problém se silnými magnetickými poli, jejich ovlivnění senzorem a naopak, ovlivnění senzoru rušením (problém blízkosti vysokého a velmi vysokého napětí a silných elektromagnetických polí). V článku je diskutován měřicí systém z práce [1] za použití UHF senzorů. Princip a použití metody je jednoduché. Ovšem konečné vyhodnocení místa vzniku výbojové činnosti a rozlišení výbojové činnosti v praktické aplikaci je náročný problém. V [1] byl sestaven trojrozměrný model šíření UHF projevů výbojové činnosti k senzorům. Tento model se snaží zohlednit různé cesty signálu k senzorům, různé vzdálenosti a rychlosti šíření vzhledem k materiálům, které jsou pro signál překážkou. Problém je značně komplikovaný a model je třeba vytvářet pro každý typ a konstrukci transformátoru zvlášť.

Článek vznikl za účelem shrnout aktuální metody měření částečných výbojů. Rovněž se snaží poukázat na problémy, se kterými se detekce a měření částečných výbojů potýká. Nekladl si za cíl zhodnotit funkci některého již existujícího a komerčně dostupného diagnostického systému. Z uvedených

faktů a diskuse vyplývá, že metody detekce částečných výbojů jsou značně propracovány. Globální metody určení celkové výbojové činnosti ve stroji se již staly běžnou záležitostí. V současné době se začínají objevovat pokusy, jak výbojovou činnost lokalizovat, stále však neexistuje spolehlivá cesta, jak určit počátek poruchy v izolačním systému stroje a současně určit o jakou poruchu se jedná. To je záležitost budoucích výzkumů a poté záležitost implementace do diagnostických systémů.

## LITERATURA

- [1] JUDD, M. D., YANG, L., HUNTER, I. B. B.: Partial Discharge Monitoring for Power Transformers using UHF Sensor Part 1: Sensors and Signal Interpretation, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol 21., No. 2., March/April 2005, pp. 5-14, ISSN 0883-7554.
- [2] STREHL T.: On- and Off-Line Measurement, Diagnostics and Monitoring of Partial Discharges on High-Voltage Equipment, HV Testing, Monitoring and Diagnostics Workshop, September 2000, Alexandria, Virginia, USA.
- [3] MENTLÍK, V., PIHERA, J., TRNKA, P., MARTÍNEK, P.: Partial discharge potential free test methods, In 2006 annual report Conference on electrical insulation and dielectric phenomena, Kansas City, IEEE DEIS, 2006. pp. 586-589, ISBN 1-4244-0547-5.
- [4] WEISSEBERG, W. G.: PD-On-Site Test and Diagnostics of EVH-XLPE Cable Systems, Cabex 2005, Russia, Dostupné z: <http://www.bruggcables.com/pdf/CABEX2004.pdf>
- [5] MENTLÍK, V., PROSR, P., PIHERA, J., POLANSKÝ, R.: New Possibilities of the Oil-paper Insulating Systems. In Proceedings of the 20th Nordic Insulation Symposium. Trondheim, Tapir Academic Press, 2007. s. 157-160, ISBN 978-82-519-2232-6.
- [6] MENTLÍK, V., POLANSKÝ, R., PROSR, P.: The release of volatiles during the thermal stress of electric insulating materials. In 2006 Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena. Kansas City, IEEE DEIS, 2006, s. 485-488. ISBN 1-4244-0547-5.
- [7] GRZYBOWSKI, S., TRNKA, P., FULPER, J.D.: Aging of High Voltage Cables by Switching Impulse In Electric Ship Technologies Symposium, 2007, ESTS '07, IEEE, Arlington, VA, IEEE, 2007. pp. 165-168, ISBN 1-4244-0947-0.
- [8] TRNKA, P.: Interakce izolantů s pulzním namáháním, [dizertační práce], str. 30, ZČU, FEL, Plzeň, 2005.
- [9] MENTLÍK, V., PROSR, P., TRNKA, P.: Aspekty provozní diagnostiky transformátorů, In Nové směry v diagnostice a opravách elektrických strojů a zařízení, Žilina, EDIS - Žilinská univerzita, 2006. s. 9-12, ISBN 80-8070-545-3.
- [10] PROSR P.: On-line diagnostický systém výkonových transformátorů, [dizertační práce], Plzeň, ZČU v Plzni, 2005. 134 s.