



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Akustické signály v diagnostice vn zařízení

Autor práce: Bc. Tomáš Kos
Vedoucí práce: Doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.

Plzeň 2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš KOS**
Osobní číslo: **E17N0010K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Akustické signály v diagnostice vn zařízení**
Zadávající 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. S využitím elektronických literárních zdrojů zpracujte přehled možností uplatnění snímání akustických signálů v diagnostice vn zařízení včetně používaných monitorovacích zařízení.
2. Analyzujte principy snímání a zpracování akustického signálu.
3. Na základě získaných poznatků navrhnete obvod pro snímání akustického signálu.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

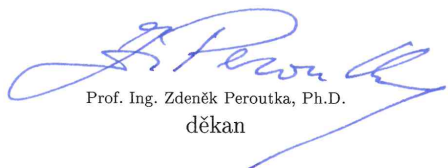
Seznam odborné literatury:

1. M. Kreidl, R. Šmíd: Technická diagnostika.
2. J. Obraz: Ultrazvuk v měřicí technice.
3. A method for the localization of partial discharge sources using partial discharge pulse information from acoustic emissions R. Ghosh; B. Chatterjee; S. Dalai IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, Volume: 24, Issue: 1.
4. Robust measurement, monitoring and analysis of partial discharges in transformers and other HV apparatus A. Kraetge; S. Hoek; M. Koch; W. Koltunowicz IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, Volume: 20, Issue: 6.


Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 30. května 2019


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




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

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na popis děje částečného výboje a měření tohoto děje. Dále se práce zabývá stručným popisem metod elektrických měření částečných výbojů a podrobným popisem metod neelektrických a to především metody akustické. Byl navržen a realizován zdroj akustické emise simulující akustické účinky částečného výboje a navržena měřicí úloha využívající piezoelektrických snímačů a akcelerometru. Výsledky měření byly vzájemně porovnány.

Klíčová slova

Částečný výboj, jiskřiště, piezoelektrický senzor, akcelerometr.

Abstract

Kos, Tomáš. *Acoustic signals in diagnostics of high-voltage equipments* [*Akustické signály v diagnostice vn zařízení*]. Pilsen, 2019. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electric power engineering and Ecology. Supervisor: Eva Müllerová

This thesis is focused on the description of the partial discharge and the measurement of this process. Furthermore, the work deals with a brief description methods of electrical measurements of partial discharges and a detailed description of non-electrical methods, especially acoustic methods. A source of acoustic emission simulating the acoustic effects of a partial discharge was designed and realized. Measurement task using piezoelectric sensors and accelerometer was designed and realized. The measurement results were compared with each other.

Keywords

Partial discharge, spark gap, piezoelectric sensor, accelerometer.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 26. května 2019

Bc. Tomáš Kos

.....

Podpis

Obsah

| | |
|--|----------|
| Seznam obrázků | ix |
| Seznam tabulek | x |
| Seznam symbolů a zkratek | xi |
| 1 Úvod | 1 |
| 2 Částečné výboje | 3 |
| 2.1 Definice částečného výboje | 3 |
| 2.2 Rozdělení částečných výbojů | 4 |
| 2.3 Náhradní schéma dielektrika s ČV | 4 |
| 2.4 Parametry částečného výboje | 5 |
| 2.4.1 Zdánlivý náboj | 6 |
| 2.4.2 Četnost impulzů | 6 |
| 2.4.3 Střední proud částečných výbojů | 6 |
| 2.4.4 Opakovací frekvence impulzů | 6 |
| 2.4.5 Výkon částečných výbojů | 6 |
| 2.4.6 Střední kvadratický součet | 7 |
| 2.4.7 Počáteční napětí částečných výbojů | 7 |
| 2.4.8 Zhášecí napětí částečných výbojů | 7 |
| 2.5 Škodlivé působení ČV na izolaci | 7 |
| 3 Metody měření částečných výbojů | 9 |
| 3.1 Konvenční metody | 9 |
| 3.1.1 Galvanická metoda | 9 |
| 3.1.2 Elektromagnetická metoda | 11 |
| 3.1.2.1 Konstrukce senzorů a měřicích systémů | 11 |
| 3.1.2.2 Umístění senzorů | 12 |
| 3.1.2.3 Venkovní použití | 13 |
| 3.1.2.4 Měření pomocí kapacitní a induktivní sondy | 13 |
| 3.1.3 TEV metoda | 15 |
| 3.2 Nekonvenční metody | 15 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.2.1 | Akustická metoda | 16 |
| 3.2.2 | Chemická metoda | 16 |
| 3.2.3 | Optická metoda | 16 |
| 4 | Koncepce akustické (ultrazvukové) metody | 17 |
| 4.1 | Piezelektrické senzory | 19 |
| 4.1.1 | Konstrukce piezo snímačů | 20 |
| 4.1.1.1 | Piezelektrické akcelerometry | 20 |
| 4.1.1.2 | MFC Macro fiber composite | 21 |
| 4.2 | Elektrostatický mikrofon | 22 |
| 4.3 | Akusticky-optické měniče | 23 |
| 4.4 | Komplexní systémy měření ČV | 24 |
| 4.4.1 | Kombinace TEV a akustické metody | 25 |
| 4.5 | Elektro-optické měniče | 26 |
| 4.6 | Opto-akustické měniče | 26 |
| 5 | Akustická emise a lokalizace | 27 |
| 5.1 | Akustický tlak a intenzita | 27 |
| 5.1.1 | Druhy šíření ultrazvukových vln | 28 |
| 5.1.2 | Rychlost šíření | 29 |
| 5.1.2.1 | Tuhé látky | 29 |
| 5.1.2.2 | Kapalné látky | 30 |
| 5.1.2.3 | Plynné látky | 30 |
| 5.2 | Lokalizace částečného výboje | 30 |
| 5.2.1 | Jednorozměrná lokalizace | 30 |
| 5.2.2 | Dvojrzměrná hyperbolická lokalizace | 31 |
| 5.2.3 | Prostorová lokalizace | 31 |
| 6 | Měření | 34 |
| 6.1 | Měření s piezo snímačem | 34 |
| 6.1.1 | Návrh předzesilovače | 34 |
| 6.2 | Měření s MEMS akcelerometrem | 36 |
| 6.3 | Realizace jiskřiště | 38 |
| 6.4 | Měření výbojů akcelerometrem | 40 |
| 6.5 | Měření výbojů piezomembránou | 41 |
| 6.5.1 | Záznam osciloskopem | 42 |
| 6.5.2 | Záznam zvukovou kartou | 43 |
| 7 | Závěr | 44 |
| | Reference, použitá literatura | 45 |

| | |
|-----------------------------|-----------|
| Přílohy | 48 |
| A Cenová kalkulace | 48 |
| B Datové listy | 51 |
| C Záznamy výbojů | 56 |
| D Simulace jiskřiště | 58 |

Seznam obrázků

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Charakteristické případy vzniku částečných výbojů s jednoduchým uspořádáním elektrod a) externí b) povrchové a klouzavé c,d,e,f) interní částečné výboje Převzato z [8] | 4 |
| 2.2 | Náhradní schéma pro vnitřní částečné výboje a) Pevný izolant s vnitřní plynovou dutinkou b) zjednodušené náhradní schéma Převzato z [11] | 4 |
| 2.3 | Časové průběhy napětí a proudu vnitřních částečných výbojů Převzato z [11] | 5 |
| 2.4 | Vlevo poškození transformátoru Převzato z [14] , vpravo zničený vývod zapouzdřeného vodiče 135 kV Převzato z [29] | 8 |
| 3.1 | Metody měření částečných výbojů Převzato z [3] | 9 |
| 3.2 | Zkušební obvody pro měření částečných výbojů dle normy IEC 60270. a) měřicí impedance v sérii s vazebním kondenzátorem b) měřicí impedance v sérii se zkoušeným objektem c) můstkový měřicí obvod Převzato z [8] | 10 |
| 3.3 | Šíření signálu částečných výbojů transformátoru, vnitřní-červené a vnější-modré. Převzato z [13] | 11 |
| 3.4 | Typy antén pro UHF senzory: a) monopól, b) lichoběžníkový monopól, c) spirálová anténa prostorová, d) disková anténa, e) kónická anténa, f) smyčková anténa, g) spirálová anténa plošná, h) Vivaldiho anténa. Převzato z [14] | 12 |
| 3.5 | a) Senzor pro umístění do vypouštěcího otvoru, b) vhodný ventil k instalaci sondy, c) nevhodný ventil k instalaci sondy, d) Senzor do dielektrického okna transformátoru, e) Dielektrické okno, f) Stabilní senzor jako náhrada servisních otvorů, Převzato z [13] | 12 |
| 3.6 | Vhodné umístění senzorů na měřeném objektu. | 13 |
| 3.7 | Zařízení k detekci a lokalizaci č.v. PD Hawk Převzato z [23] | 13 |
| 3.8 | Kapacitní senzor výrobce Lemke Diagnostics Převzato z [26] | 14 |
| 3.9 | Induktivní senzor pro měření částečných výbojů. Převzato z [26] | 14 |
| 3.10 | Senzory pro měření metodou TEV. Převzato z [27] | 15 |
| 3.11 | Kamera <i>DayCorSUPERB</i> a její použití. Převzato z [31] | 16 |
| 4.1 | Ruční ultrazvukový detektor. Převzato z [7] | 17 |
| 4.2 | Nejkratší a nejdelší cesta mezi zdrojem ČV a akustickým senzorem umístěným na stěně nádoby. Převzato z [7] | 18 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.3 | Piezo membrána | 20 |
| 4.4 | a) s tlakovou deformací, b) DELTA se stříhovou deformací, c) tříosé ORTHO se stříhovou deformací, d) model piezoelektrického akcelerometru. Převzato z [1] | 21 |
| 4.5 | a) uspořádání kapacitního akcelerometru, b) MEMS kapacitní akcelerometr ADXL150. Převzato z [1] | 21 |
| 4.6 | Vliv umístění akcelerometrů na frekvenční charakteristice Převzato z [1] | 22 |
| 4.7 | MFC (macro fiber composite) Převzato z [17] | 22 |
| 4.8 | Základní uspořádání tlakového elektrostatického mikrofonu (a) a jeho analogický akustický obvod (b) Převzato z [22] | 23 |
| 4.9 | Uspořádání mikrofونů pro akustickou kameru Převzato z [25] | 23 |
| 4.10 | Akustická kamera od firmy NL acoustics Převzato z [24] | 24 |
| 4.11 | Ukázka detekce částečných výbojů akustickou kamerou Převzato z [24] | 24 |
| 4.12 | Komplexní systém měření ČV <i>UltraTEV MonitorTM</i> od firmy <i>EATechnology</i> Převzato z [23] | 25 |
| 4.13 | Vlevo <i>UltraTEV Detector</i> a vpravo <i>UltraTEV Detector²</i> od firmy <i>EATechnology</i> Převzato z [23] | 25 |
| 4.14 | Vlevo <i>LiNbO₃</i> krystal jako Elektro-optický modulátor a vpravo blokové schéma měřicího systému. Převzato z [28] | 26 |
| 4.15 | Koncepce opto-akustické metody detekce ČV. Převzato z [3] | 26 |
| 5.1 | Kmitání částic prostředí při šíření vlny. Převzato z [2] | 28 |
| 5.2 | Princip jednorozměrné lokalizace. Převzato z [1] | 31 |
| 5.3 | Princip hyperbolické triangulace. Převzato z [1] | 31 |
| 5.4 | Prostorová lokalizace částečného výboje. | 32 |
| 5.5 | Záznam signálů pro různé metody prostorové lokalizace. | 33 |
| 6.1 | Předzesilovač pro piezoelektrický snímač | 34 |
| 6.2 | Plošný spoj pro předzesilovač | 35 |
| 6.3 | Piezoelektrické snímače | 36 |
| 6.4 | Zrealizovaný předzesilovač | 36 |
| 6.5 | Použitý akcelerometr ADXL335 a modul s akcelerometrem | 37 |
| 6.6 | Blokové schéma akcelerometru ADXL335 | 37 |
| 6.7 | Trojrozměrný návrh sestavy MEMS akcelerometru | 38 |
| 6.8 | Osazená sestava akcelerometru | 38 |
| 6.9 | Schéma zapojení jiskřiště | 39 |
| 6.10 | Zrealizované jiskřiště | 39 |
| 6.11 | Průběh napětí na elektrodách zapalovací svíčky Převzato z [20] | 40 |
| 6.12 | Blokové schéma měření s MEMS akcelerometrem | 40 |
| 6.13 | Měření výboje MEMS akcelerometrem | 41 |
| 6.14 | Blokové schéma měření s piezokeramickou membránou | 41 |
| 6.15 | Záznam výboje osciloskopem piezokeramickou membránou s ozvučnicí | 42 |

| | | |
|------|---|----|
| 6.16 | Záznam výboje osciloskopem piezokeramickou membránou bez ozvučnice | 42 |
| 6.17 | Záznam výboje piezokeramickou membránou s ozvučnicí vlevo a nalepená membrána vpravo | 43 |
| B.1 | Datový list R15I-AST. Převzato z [19] | 52 |
| B.2 | Datový list piezokeramického měniče KBI-2734 (1/3). Převzato z [30] | 53 |
| B.3 | Datový list piezokeramického měniče KBI-2734 (2/3). Převzato z [30] | 54 |
| B.4 | Datový list piezokeramického měniče KBI-2734 (3/3). Převzato z [30] | 55 |
| C.1 | Záznam částečných výbojů čidly R15I-AST, MFC-P1 a MFC-P2. Převzato z [9] | 56 |
| C.2 | Měření výboje MEMS akcelerometrem (x-růžová, y-zelená, z-modrá). | 57 |
| D.1 | Simulace jiskřiště v programu <i>PSpice</i> | 58 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----|---|----|
| 5.1 | Rychlosti šíření vln. | 29 |
| A.1 | Cenová kalkulace předzesilovače a piezoelektrického snímače | 49 |
| A.2 | Cenová kalkulace sestavy akcelerometru | 49 |
| A.3 | Cenová kalkulace sestavy jiskřiště | 50 |

Seznam symbolů a zkratek

| | |
|-----------------|---|
| AE | Acoustic emission. Akustická emise. |
| BNC | Bayonet Neill Concelman connector. Bajonetový konektor. |
| CAD | Computer-aided design. Počítačem podporované projektování. |
| ČV | Částečný výboj. |
| ČSN | Česká technická norma |
| GIS | Gas Insulated Systems. Plynem izolovaný systém. |
| GPS | Global Positioning System. Globální polohový systém. |
| HF | High-Frequency. Krátké vlny. |
| HV | High-Voltage. Vysoké napětí. |
| IEC | International Electrotechnical Commission. Mezinárodní elektrotechnická komise. |
| KJ | Kulové jiskřiště. |
| MFC | Macro Fiber Composite. Kompozitní makro vlákno. |
| MEMS | MicroElectroMechanical Systems. MikroElektroMechanické Systémy. |
| MI | Měřicí přístroj částečných výbojů. |
| PD | Partial Discharge. Částečný výboj. |
| TDOA | Time Difference of Arrival. Rozdíl časů příchodu. |
| TEV | Transient earth voltage. Přechodné zemní napětí. |
| UHF | Ultra-High-Frequency. Ultra krátké vlny. |
| VHF | Very-High-Frequency. Velmi krátké vlny. |
| vn | Vysoké napětí. |
| vvn | Velmi vysoké napětí. |
| A_U | Napěťové zesílení [-]. |
| B | Magnetická indukce [T]. |
| C | kapacita [μF]. |
| c | rychlost šíření [$m.s^{-1}$]. |
| D | Střední kvadratický součet [$C^2.s^{-1}$]. |
| d_{ik} | Piezoelektrický koeficient [mV^{-1}]. |
| $d_{i,j}$ | Piezoelektrický koeficient [C/N]. |
| E | Intenzita elektrického pole [mV^{-1}]. |
| E_p | Elektrická pevnost [$kVmm^{-1}$]. |

| | |
|-------------|---|
| G | Modul pružnosti ve smyku [Pa]. |
| H | Intenzita magnetického pole [$A.m^{-1}$]. |
| h_{ik} | Piezoelektrická deformační konstanta [mV^{-1}]. |
| I | Střední proud [$C.s^{-1}$ nebo A]. |
| I_{zvuk} | Intenzita ultrazvukové vlny [Wm^{-2}]. |
| K | Adiabatický modul [Pa]. |
| k | Elektromechanický faktor [-]. |
| N | Opakovací frekvence impulzů [-]. |
| n | Četnost impulzů [-]. |
| P | Výkon částečného výboje [W]. |
| p | Akustický tlak [Pa]. |
| R | Elektrický odpor [Ω]. |
| U_e | Zhášecí napětí částečného výboje [V]. |
| U_i | Počáteční napětí částečného výboje [V]. |
| U_v | Napětí na elektrodách měniče [V]. |
| u(t) | Okamžitá hodnota napětí [V]. |
| Δqi | Skutečný vybitý náboj [C]. |
| q | Zdánlivý náboj [C]. |
| q_i | Zdánlivý náboj [C]. |
| U_Z | Napětí v dutince [V]. |
| v | Akustická rychlost [$m.s^{-1}$]. |
| W | Výkon ultrazvukové vlny [W]. |
| w_{el} | Elektrická energie [J]. |
| w_{mech} | Mechanická energie [J]. |
| Z_m | Měřicí impedance [Ω]. |
| z | Akustická impedance [$Pa.s.m^{-1}$]. |
| λ | Vlnová délka [m]. |
| μ | Poissonovo číslo [-]. |

1

Úvod

Hlavní možností uplatnění snímání akustických signálů v diagnostice vn a vvn zařízení je odhalování ČV. Jedním ze základních požadavků vn a vvn zařízení je nulová nebo alespoň nízká hladina přítomnosti ČV. Přítomnost ČV má negativní vliv na stav izolace, jejich působením dochází k urychlení degradace izolačních materiálů a následným poruchám, které mohou vést až k destrukci zařízení. Bezvadný stav izolace elektrického zařízení je důležitým předpokladem dlouhodobého bezporuchového chodu zařízení. Odstavené zařízení z důvodu poruchy vzniklé působením ČV je finančně nákladné na opravu, případně výměnu. Důležité parametry a následky ČV jsou v práci blíže popsány. Vlivem poruchy může dojít k ohrožení zdraví nebo života osob v blízkosti poškozeného zařízení. Zařízení v elektrizační soustavě mají velkou pořizovací cenu a značný vliv na bezvadný chod této soustavy. Z důvodu cenové náročnosti jsou vyvíjeny stále nové a dokonalejší metody k monitorování těchto zařízení. Včasným odhalením a odstraněním poruchy lze zásadně prodloužit životnost konkrétního zařízení.

K odhalení ČV existuje mnoho metod. Nejstarší metodou je konvenční galvanická metoda. S její aplikací existují největší zkušenosti, ale má také určitá omezení, např. při tzv. on-line monitorování (problematika rušení, potřeba vazební kapacity). Také z těchto důvodů byly vyvinuty nové nekonvenční metody, které snímají elektrické projevy ČV nepřímou, nebo pracují s jinými projevy výbojové činnosti. Nekonvenční metody jsou v předkládané práci stručně popsány. Tato práce se zabývá především akustickou metodou on-line monitorování zařízení, která využívá vnější mechanické projevy ČV, tyto projevy se označují jako akustická emise (AE). Principy jednotlivých senzorů používaných k detekci AE a akustické parametry jsou následně detailně popsány. Akustická metoda disponuje mnoha výhodami, kterými jsou například nízká pořizovací cena, absence zásahu do konstrukce zařízení, citlivost nebo snadná lokalizace místa vzniku ČV. V poslední době dochází k velkému rozvoji akustické metody v oboru technické diagnostiky.

K efektivnímu odstranění závady vzniklé ČV je důležité místo rychle lokalizovat a to nejlépe během provozu zařízení. Důležité je projevy ČV od rušení oddělit a správně vyhodnotit. Lokalizaci je možné provést pomocí umístění více akustických senzorů v blízkosti zařízení a následně pomocí metod lokalizace popsaných v práci místo přibližně určit.

Metody k detekci a lokalizaci lze kombinovat např. akustickou a UHF metodu, protože každá má určité výhody a nevýhody.

Součástí práce je realizace obvodu pro snímání akustického signálu. Jako zdroj AE simulující ČV je využito jiskřiště a ke snímání signálu použity piezoelektrické snímače a akcelerometr. Výsledné průběhy jsou zaznamenány a následně vyhodnoceny.

2

Částečné výboje

Navzdory moderním technologiím výroby izolačních systémů zařízení provozovaných na vn a vvn zatím nelze zamezit vzniku nehomogenních míst nacházejících se uvnitř nebo na povrchu izolačního dielektrika. Obor, který se zabývá touto problematikou, se nazývá technická diagnostika. Jednou z oblastí technické diagnostiky, kde dochází k velkému rozvoji, jsou metody zabývající se částečnými výboji.

2.1 Definice částečného výboje

Podle normy ČSN 60270, která je převzata z normy IEC 60270, je ČV definován jako lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostuje izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče. ČV jsou většinou důsledkem koncentrace lokálního elektrického namáhání v izolaci nebo na povrchu izolace. Zpravidla se ČV objevují jako impulzy s dobou trvání menší než $1 \mu\text{s}$ [10].

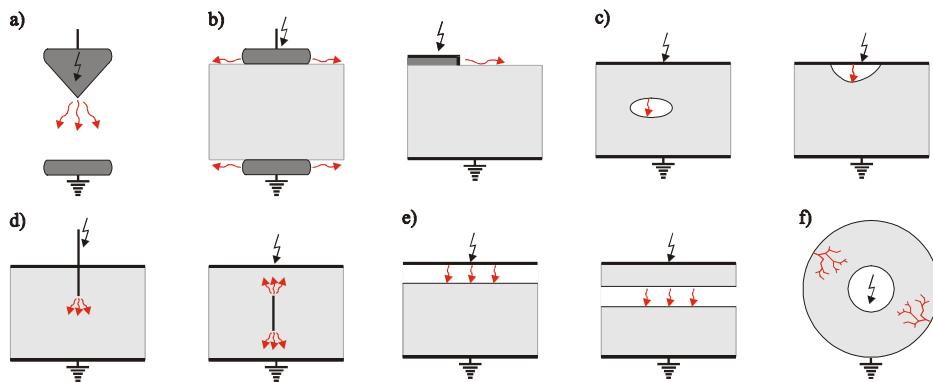
Náchylná místa, která se vyskytují uvnitř dielektrika, bývají obvykle lokálního charakteru. Pokud se tato místa nacházejí v prostoru ležícím mezi elektrodami, může dojít k překročení meze elektrické pevnosti konkrétní lokality a dojít až ke vzniku výboje. Takovéto výboje jsou typickým případem ČV a mají lavinový nebo jiskrový charakter.

Jev ČV obecně reprezentuje tzv. neúplný elektrický výboj, který se nachází v oblastech nehomogenit uvnitř dielektrika, čímž je dutina nebo bublina a dochází k přemostění pouze části vzdálenosti mezi elektrodami, přičemž zbytek neporušeného dielektrika je schopný nadále vzdorovat namáhání zkušebního nebo provozního napětí [8].

ČV mohou začít na elektrodě nebo na povrchu dutinky v dielektriku. Také se mohou projevit jako koróna na hranách či v podobě povrchových nebo klouzavých výbojů na povrchu dielektrika. ČV mohou vznikat přímo v izolaci vodičů, mezi izolací a vodičem, mezi izolací a elektricky vodivou konstrukcí stroje, nebo na povrchu izolace [8] [11]. Možnou příčinou vzniku ČV mohou být špatné nebo nedokonalé technologické postupy, chybný návrh izolačního systému nebo přetěžování daného zařízení.

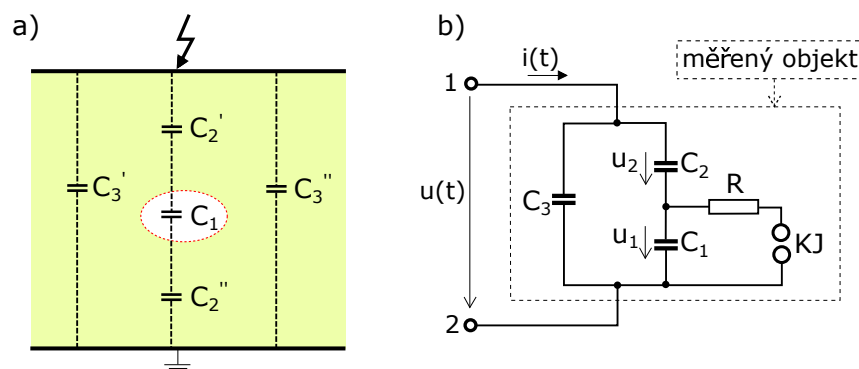
2.2 Rozdělení částečných výbojů

Na obr.2.1a je zobrazený externí výboj tzv. koronový výboj vznikající například na elektrodovém uspořádání typu hrot-deska, na tenkých vodičích v plynu, vzduchu nebo v tekutině. Na obr.2.1b jsou externí povrchové a klouzavé ČV a na obr.2.1e jsou interní ČV ve vrstvené izolaci, které vznikají na rozhraní různých prostředí při příčném a podélném namáhání izolací. Na obr.2.1c jsou interní ČV v dutinkách a na obr.2.1d jsou interní ČV na tenkém hrotu v dielektriku, které vznikají v tekutině nebo v pevném izolantu. Na obr.2.1f je znázorněn interní trvalý stromečkový ČV v pevném dielektriku, který je zapříčiněn nehomogenitou izolace, následkem tohoto druhu výboje je porucha izolačního materiálu.



Obr. 2.1: Charakteristické případy vzniku částečných výbojů s jednoduchým uspořádáním elektrod a) externí b) povrchové a klouzavé c,d,e,f) interní částečné výboje [Převzato z [8]]

2.3 Náhradní schéma dielektrika s ČV



Obr. 2.2: Náhradní schéma pro vnitřní částečné výboje a) Pevný izolant s vnitřní plynovou dutinkou b) zjednodušené náhradní schéma [Převzato z [11]]

Na obr.2.2 je kapacita plynové dutinky C_1 . Kapacita C_2 vyjadřuje kapacitu zbytkové části zdravé izolace v sérii s dutinkou (sériová kombinace kapacit C_2' a C_2''). Kapacita C_3 je poměrně velká kapacita zbytku izolantu (paralelní kombinace C_3' a C_3''). Paralelně

připojené kulové jiskřiště KJ ke kapacitě C_1 v náhradním obvodu představuje přeskok v plynové dutince. Rezistor R znázorňuje odpor výbojové cesty (kanálu) po přeskoku na KJ . V prostorových poměrech, které jsou ve skutečných dutinkách v izolaci, probíhá tento děj v jednotkách nanosekund [11].

Pokud na svorky 1 a 2 podle obr.2.2b připojíme střídavé napětí $u(t)$ a nedojde k přeskoku v dutince na KJ , bude průběh napětí $u_{10}(t)$ na kondenzátoru C_1 dán vztahem:

$$u_{10}(t) = \frac{C_2}{C_1 + C_2}u(t). \quad (2.1)$$

Na obr.2.3a jsou časové průběhy sinusového napětí $u(t)$, napětí na dutince $u_1(t)$ a fiktivního napětí $u_{10}(t)$. Při dosažení zapalovacího (průrazného) napětí v dutince U_Z dojde v dutince k průrazu. V důsledku opakovaných přeskoků v dutince se na kapacitní proud $i(t)$ superponují proudové pulzy vzniklé ČV podle obr.2.3b.

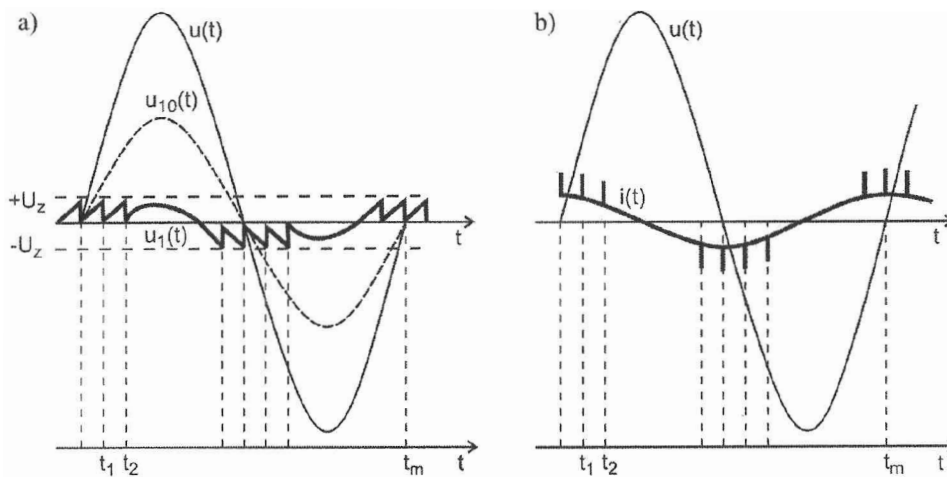
Proudové impulsy ČV mají v odlišných periodách odlišné polarity. Četnost výbojů je přímo úměrná napájecímu napětí a amplituda přibližně stejná [11].

Skutečně vybitý náboj Δq_i v dutince:

$$\Delta q_i = (C_1 + C_2)U_Z \quad (2.2)$$

Zdánlivý náboj, naměřený na svorkách testovaného objektu:

$$q = C_2U_Z \quad (2.3)$$



Obr. 2.3: Časové průběhy napětí a proudu vnitřních částečných výbojů [Převzato z [11]]

2.4 Parametry částečného výboje

K tomu, aby bylo možné porovnávat aktivitu ČV, je potřeba stanovit základní měřitelné charakteristické parametry. Tyto parametry se používají k vyhodnocení výbojové činnosti. Zajímá nás nejen velikost jednotlivých parametrů, ale také velikost těchto parametrů v závislosti na čase [11].

2.4.1 Zdánlivý náboj

Zdánlivý náboj q je takový unipolární náboj, který je-li injektován ve velmi krátkém čase mezi svorky zkoušeného objektu v předepsaném zkušebním obvodu, by měl na měřicím přístroji způsobit stejnou výchylku jako vlastní proudový impulz ČV. Zdánlivý náboj není roven množství náboje lokálně působícího v místě výboje, který nelze měřit přímo [10]. Většinou se udává v pC . Je to jedna z nejdůležitějších veličin k určení intenzity výbojové činnosti.

2.4.2 Četnost impulzů

Četnost impulzů n je poměr mezi celkovým počtem impulzů ČV zaznamenaných ve vybraném časovém intervalu a dobou trvání tohoto intervalu. Zpravidla se neuvažují všechny impulzy, ale jen impulzy s vyšší významovou hodnotou [10].

2.4.3 Střední proud částečných výbojů

Střední proud I je odvozená veličina, která představuje součet absolutních hodnot jednotlivých úrovní zdánlivého náboje q_i během zvoleného referenčního časového intervalu T_{ref} děleno tímto intervalem [10]:

$$I = \frac{1}{T_{ref}}(|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i|) \quad [C.s^{-1}neboA]. \quad (2.4)$$

Za předpoklad, že všechny výboje mají stejnou velikost zdánlivého náboje q , tak potom se vztah zjednoduší na:

$$I = nq \quad [C.s^{-1}neboA], \quad (2.5)$$

kde n je četnost ČV.

2.4.4 Opakovací frekvence impulzů

Opakovací frekvence impulzů N je počet impulzů ČV za sekundu v případě stejně vzdálených impulzů [10].

2.4.5 Výkon částečných výbojů

Výkon P je odvozená veličina, která vyjadřuje střední výkon impulzu dodaný na svorky zkoušeného objektu způsobený hodnotami zdánlivého výboje q_i během vybraného referenčního časového intervalu T_{ref} :

$$P = \frac{1}{T_{ref}}(q_1u_1 + q_2u_2 + \dots + q_iu_i) \quad [W]. \quad (2.6)$$

kde u_1, u_2, \dots, u_i jsou okamžité hodnoty zkušební napětí v okamžicích výskytu t_i jednotlivých úrovní zdánlivého náboje q_i [10].

2.4.6 Střední kvadratický součet

Střední kvadratický součet D je odvozená veličina, která je definována součtem ploch jednotlivých úrovní zdánlivého náboje q_i během zvoleného časového intervalu T_{ref} děleným tímto intervalem [10]:

$$D = \frac{1}{T_{ref}}(q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_m^2) \quad [C^2 \cdot s^{-1}]. \quad (2.7)$$

2.4.7 Počáteční napětí částečných výbojů

Počáteční napětí U_i je přiložené napětí, u kterého jsou poprvé ve zkoušeném objektu pozorovány opakující se ČV, pokud je napětí přiložené ke zkoušenému objektu postupně zvyšováno z nižší hodnoty, při které nejsou pozorovány žádné ČV.

Počáteční napětí představuje nejnižší přiložené napětí, při kterém se úroveň veličiny impulzu ČV rovná nebo převyšuje předepsanou nízkou hodnotu [10]. Počáteční napětí se udává ve voltech V.

2.4.8 Zhášecí napětí částečných výbojů

Zhášecí napětí U_e je přiložené napětí, u kterého se ve zkoušeném objektu přestávají objevovat opakující se ČV, pokud je napětí přiložené ke zkoušenému objektu postupně snižováno z vyšší hodnoty, při které jsou pozorovány ČV.

Zhášecí napětí představuje nejnižší přiložené napětí, při kterém se úroveň veličiny impulzu ČV rovná nebo je menší než předepsaná nízká hodnota [10]. Zhášecí napětí se udává ve voltech V.

2.5 Škodlivé působení ČV na izolaci

Izolanty vlivem času stárnou a dochází u nich ke snižování elektrické pevnosti až na hodnotu, kdy může dojít k průrazu materiálu. Působení ČV svými elektrickými, chemickými a tepelnými účinky často vede k urychlení degradace a erozi izolačního systému, následně až k úplnému selhání objektu.

Veškeré druhy výbojové činnosti mají neblahý vliv na izolační systém. ČV způsobují svými účinky změny fyzikálních a chemických vlastností izolantů. Změny způsobené ČV nejsou vratné a způsobují zkrácení životnosti izolačního systému. Nejškodlivější jsou chemické účinky, kdy působením ČV dochází k narušení povrchu dutinky. Úbytek materiálu izolantu je zapříčiněn chemickými reakcemi a přeměnou pevné látky izolantu na kapalné a plynné sloučeniny. Těmito reakcemi vznikají produkty, které se ukládají na stěnách dutinky a následně dochází k vzniku krystalů. K tomu aby se mohli tyto krystaly vytvářet musí být v prostředí, kde působí ČV prvky jako je kyslík, uhlík a vodík. Na hrotech a hranách vzniklých krystalů se vytváří vysoká intenzita elektrického pole, která usnadňuje vznik dalších výbojů.

Dobrou odolnost vůči působení ČV mají izolační materiály na anorganické bázi, např. slída porcelán a sklo. Materiály na organické bázi jsou na působení ČV velmi citlivé. Z hlediska působení ČV je kladen důraz především na organické materiály [11].

ČV se v dielektrikách projevují účinky:

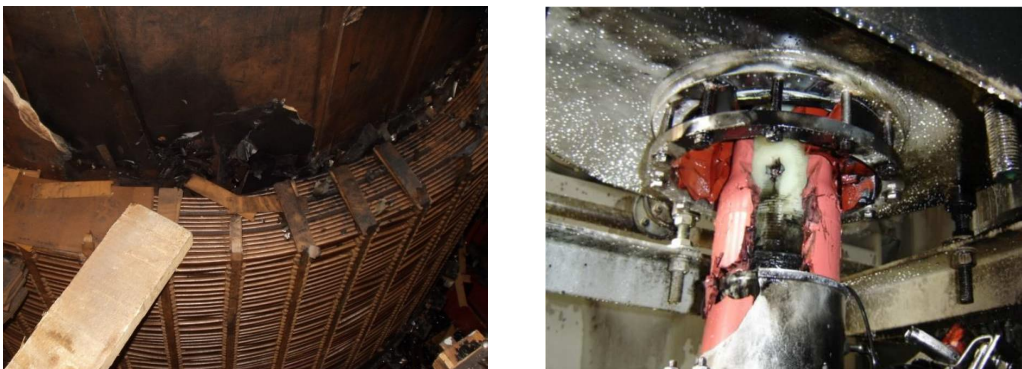
- Elektro-erozivními
- Chemickými
- Tepelnými

Elektro-erozivní účinky nastávají při vzniku oblouku v dutince. Vlivem velké intenzity elektrického pole může dojít k elektrickému průrazu. Vzniklé průrazy mohou vytvářet uhlíkové vodivé dráhy, které mají tvar tzv. elektrického stromečku. Elektrony a ionty mají také erozivní účinky tím, že mechanicky působí na stěny dutinky. Následně dochází k zvětšení rozměru dutinky, až dojde k přemostění elektrod a následnému průrazu [11].

Chemickým působením mohou v dutince vznikat různé látky. V dutince vlivem chemických procesů vzrůstá tlak a společně se změnou vodivosti stěn se mění i chování výbojů v dutince. Změnou vlastností prostředí jsou vytvořeny vhodné podmínky pro výbojovou činnost [11].

Výbojový kanál se zahřívá na vysokou teplotu, následně působí na stěny dutinky. Působením těchto tepelných účinků může dojít až k zuhelnatění povrchu v místě, kde vznikl tento kanál. Tím se zvyšuje elektrická vodivost povrchu dutinky. Pokud není vytvořené teplo izolačním materiálem dostatečně dobře odváděno, může dojít k přehřátí materiálu a následně k tepelnému průrazu [11].

Na obr.2.4 jsou příklady poškození vlivem působení ČV.



Obr. 2.4: Vlevo poškození transformátoru |Převzato z [14]|, vpravo zničený vývod zapouzdřeného vodiče 135 kV |Převzato z [29]|.

3

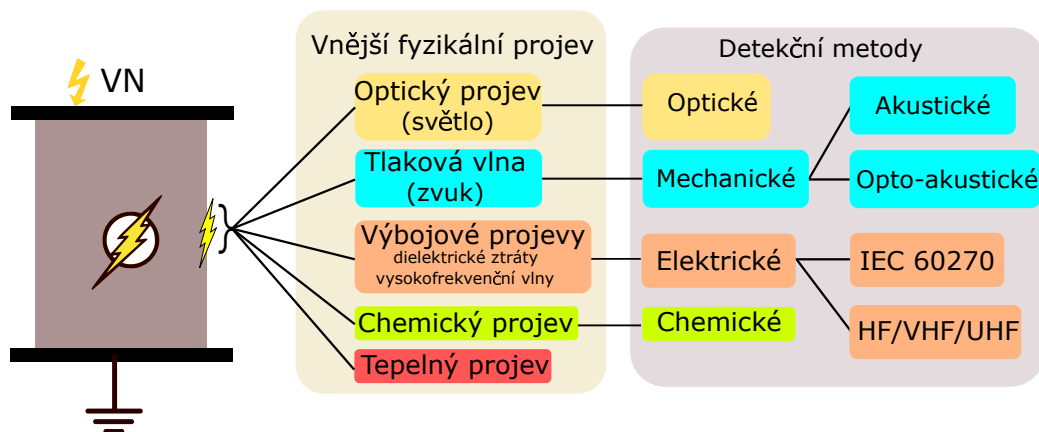
Metody měření částečných výbojů

K diagnostice elektrických zařízení se především používají citlivé nedestruktivní metody měření, které slouží k vyhodnocení stavu izolačního systému. Úkolem diagnostiky je určit typ a intenzitu výbojové činnosti. Dále se pokusit o alespoň přibližné určení místa vzniku částečného výboje.

Pro lokalizaci a detekci částečných výbojů se používají metody:

- Elektrické (konvenční)
- Neelektrické (nekonvenční)

Pro detekci a určení pozice částečných výbojů v elektrických zařízeních slouží různé technologie, které jsou znázorněny na (obr.3.1)



Obr. 3.1: Metody měření částečných výbojů [Převzato z [3]]

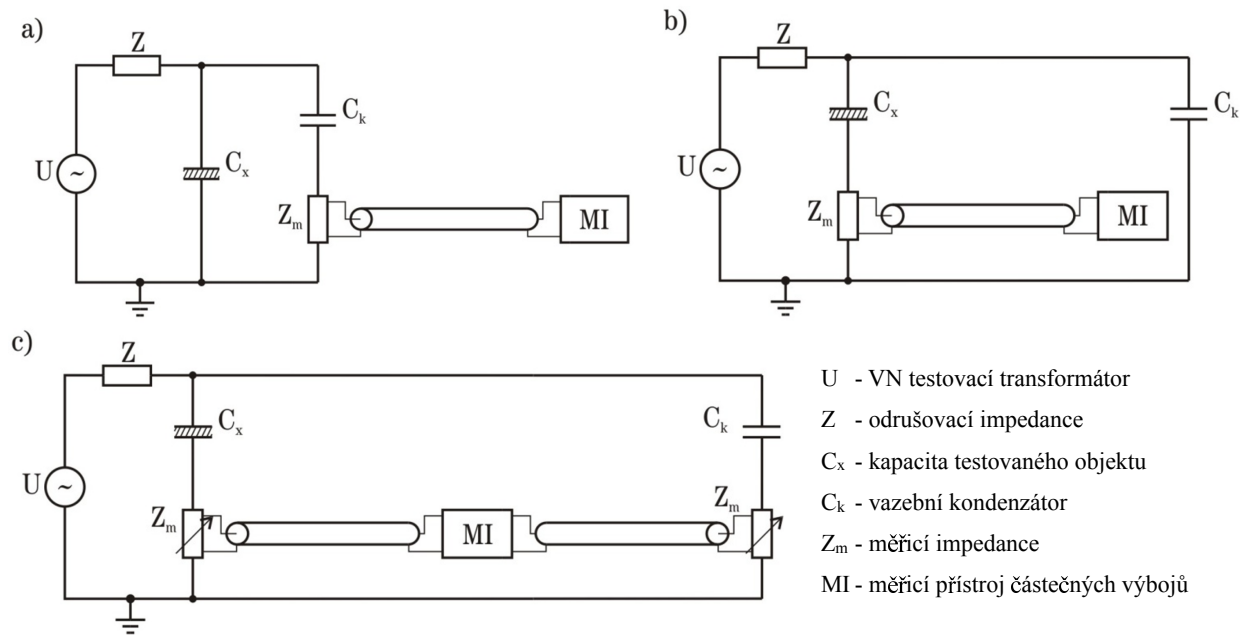
3.1 Konvenční metody

3.1.1 Galvanická metoda

Galvanická metoda měření je konvenční metodou měření částečných výbojů, která využívá přímých projevů těchto výbojů, jedná se tedy o elektrickou metodu měření ČV. Praktické

zkušenosti jsou největší, protože se jedná o nejužívanější a nejrozšířenější metodu. Měření se provádí podle normy IEC 60270:2000.

Pro měření galvanickou metodou podle IEC 60270 se používají tři základní obvody, které se liší zapojením měřicí impedance Z_m . Odrušovací impedance Z je nízkofrekvenční propust a nejčastěji řešena jako RLC člen. Z důvodu omezení rušení je přívod k měřicímu přístroji realizován koaxiálním kabelem.



Obr. 3.2: Zkušební obvody pro měření částečných výbojů dle normy IEC 60270. **a)** měřicí impedance v sérii s vazebním kondenzátorem **b)** měřicí impedance v sérii se zkoušeným objektem **c)** můstkový měřicí obvod |Převzato z [8]|

Na obr.3.2a je schéma zapojení v sérii s vazebním kondenzátorem C_k , přes který procházejí pulzy částečných výbojů na měřicí impedanci Z_m . Z praxe je výhodou, že testovaný objekt (kapacita C_x) je přímo uzemněn, a proto je vhodné použít toto zapojení v případech, kdy nelze odzemnit vývod měřeného objektu. V případě průrazu izolace na testovaném objektu nedochází ke zničení měřicího obvodu.

Na obr.3.2b je schéma, které lze použít tam, kde můžeme testovaný objekt odpojit od země. Výhodou je větší citlivost obvodu.

Na obr.3.2c je schéma pro měření částečných výbojů, kde je potřeba eliminovat elektromagnetické rušení. K měření je zapotřebí mít dvě nastavitelné impedance zapojené k zemi a testovanému objektu a zemi a vazebnímu kondenzátoru. Měřicí přístroj MI měří rozdílové napětí na impedancích. Pomocí diferenciálního zesilovače, který je před měřicím přístrojem, dojde k potlačení souhlasného rušivého napětí a měřidlo zareaguje pouze na částečné výboje.

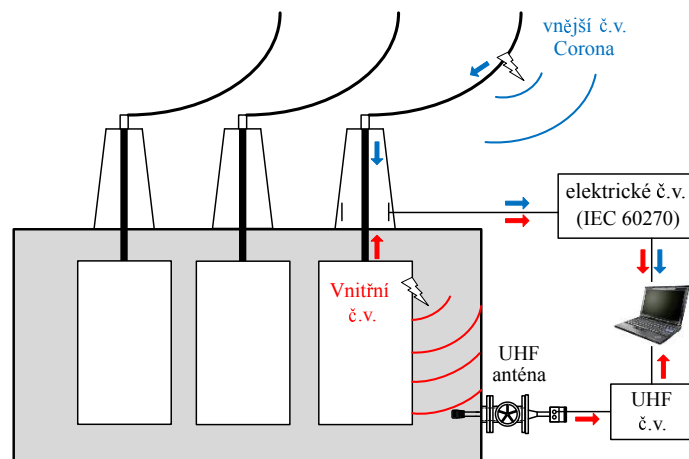
Galvanická metoda je citlivá na rušení od pulzů silové elektroniky, signály rádiových vysílačů, korony na vedení i kapacitních výbojů na částech pod napětím. K odstranění rušení se používají digitální filtry.

3.1.2 Elektromagnetická metoda

Metoda je též označována jako UHF metoda. K měření ČV uvnitř nádoby transformátoru se používá sonda, pro kterou je v nádobě předem definován otvor. Nevýhodou je, že se musí zasáhnout do konstrukce nádoby transformátoru, aby byla možná instalace sondy. K měření ČV na venkovním vn a vvn zařízení se používají speciální antény. Výhoda této metody spočívá v minimálním rušení externím akustickým šumem [6].

Princip funkce spočívá v detekování elektromagnetických (radiových) vln, které jsou emitovány částečnými výboji v zařízení vn a vvn. Rychlost šíření vln je přibližně $2.2 \cdot 10^8$ m/s. Pásmo UHF je definováno v kmitočtu od 300 MHz do 3 GHz. Elektromagnetická emise ČV je měřena pomocí UHF antény, která je přímo vložena do transformátorové nádrže. V současné době je UHF metoda jedna z nejpokročilejších metod užívaná k detekci a prostorové lokalizaci ČV Metodu UHF lze použít také pro plynem plněné systémy GIS [15]. Použití UHF metody pro výkonové transformátory není příliš časté z důvodu otvorů a dielektrických oken pro antény v nádobě, které musejí být definovány již při návrhu transformátoru. Dielektrická okna nejsou běžnou součástí transformátoru, a proto se k umístění antény používají servisní a jiné otvory v nádobě transformátoru. V posledních letech je snaha výrobců transformátorů umožnit měření a dokonce UHF sondy integrovat do nových transformátorů [14].

Na obr.3.3 je zobrazeno šíření signálu ČV, které je měřeno konvenční galvanickou metodou dle IEC 60270 a UHF metodou. V případě UHF metody je elektromagnetické záření detekováno na senzoru, který je složen z antény a zesilovače. Dále jde signál přes přípojné vedení do osciloskopu/digitizéru a následně je vyhodnocen v počítačovém softwaru.

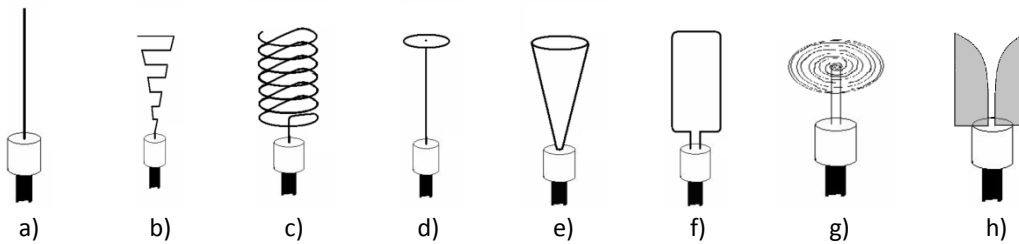


Obr. 3.3: Šíření signálu částečných výbojů transformátoru, vnitřní-červené a vnější-modré.
[Převzato z [13]]

3.1.2.1 Konstrukce senzorů a měřicích systémů

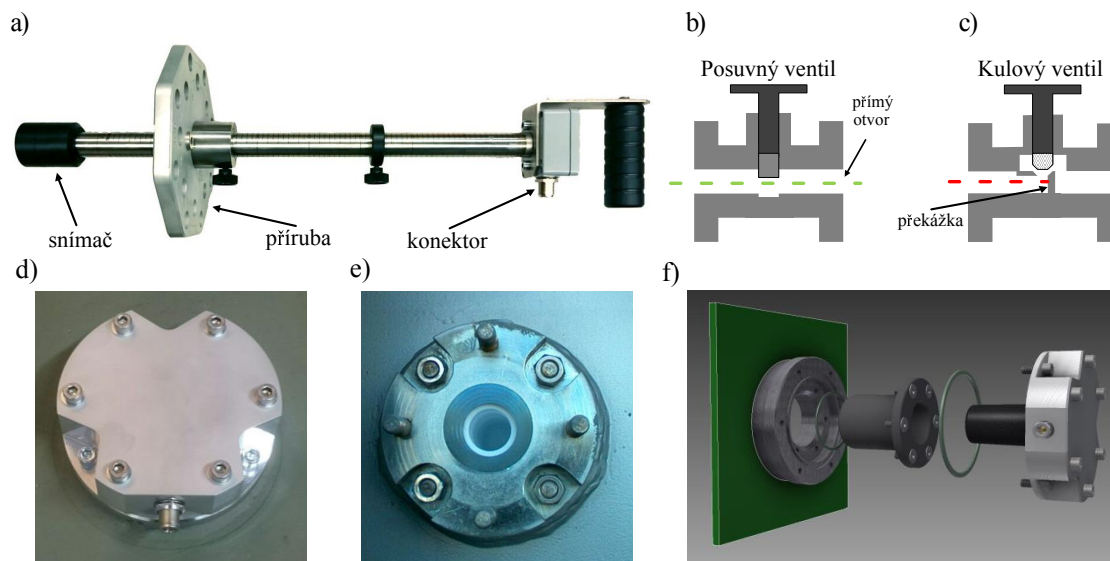
Senzor UHF se skládá z antény a zesilovače. Rozměr a typ antény je definován rozměry dielektrického okna a konstrukčním řešením transformátoru v konkrétním místě. Signál

na výstupu z antény je v řádu mikrovoltů až jednotek voltů, a proto musí být upraven na rozsah digitizéru nebo osciloskopu. Zesilovač je typicky umístěn přímo do senzoru, aby byl blízko antény. Na obr.3.3 jsou typy antén používaných v různých systémech.



Obr. 3.4: Typy antén pro UHF senzory: **a)** monopól, **b)** lichoběžníkový monopól, **c)** spirálová anténa prostorová, **d)** disková anténa, **e)** kónická anténa, **f)** smyčková anténa, **g)** spirálová anténa plošná, **h)** Vivaldiho anténa. [Převzato z [14]]

Z hlediska mechanické konstrukce lze senzory rozdělit podle umístění na transformátoru. Na obr.3.5a je senzor umístěn do vypouštěcího otvoru oleje, vypouštěcí otvor je opatřen ventilem, a proto je pro správnou funkci potřeba ventil s přímým otvorem, aby nedocházelo k rušení signálu viz obr.3.5b,c. Na obr.3.5d je odnímatelný senzor pro montáž do dielektrického okna, které je na obr.3.5e. Na obr.3.5f je senzor pro umístění do servisního otvoru. Sensory mohou být vestavěny od výrobců transformátorů [13].



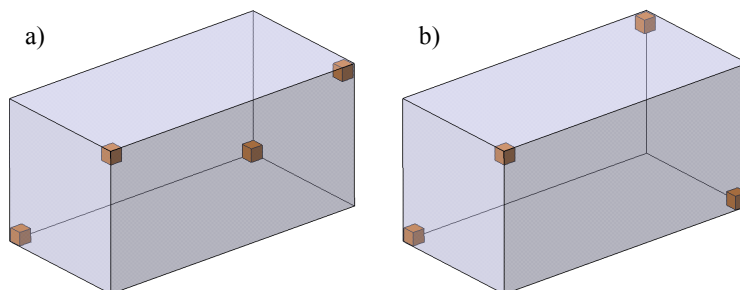
Obr. 3.5: **a)** Senzor pro umístění do vypouštěcího otvoru, **b)** vhodný ventil k instalaci sondy, **c)** nevhodný ventil k instalaci sondy, **d)** Senzor do dielektrického okna transformátoru, **e)** Dielektrické okno, **f)** Stabilní senzor jako náhrada servisních otvorů, [Převzato z [13]]

3.1.2.2 Umístění senzorů

Protože je k umístění UHF antén potřeba zasáhnout do konstrukce transformátoru, je vhodné umístění senzorů specifikovat již před samotnou výrobou. Při nevhodném umístění

může docházet k snížení možnosti přesné lokalizace.

Jako vhodné umístění UHF antén lze označit protilehlé umístění antén se souhlasnou orientací, které je znázorněné na obr.3.6a nebo vzájemně opačnou orientací podle obr.3.6b [14].



Obr. 3.6: Vhodné umístění senzorů na měřeném objektu.

3.1.2.3 Venkovní použití

Na obr.3.7 je ruční přístroj od firmy *EA Technology* určený k detekci a následné lokalizaci ČV. Přístroj se skládá z UHF směrové antény a vyhodnocovacího zařízení s možností konverze do akustického pásma. Technik v bezpečné vzdálenosti nasměruje anténu do místa vzniku ČV a následně detekuje výboj na displeji nebo pomocí sluchátek. Přístroj je schopný měřit aktivitu od 47 do 1000 MHz [23].

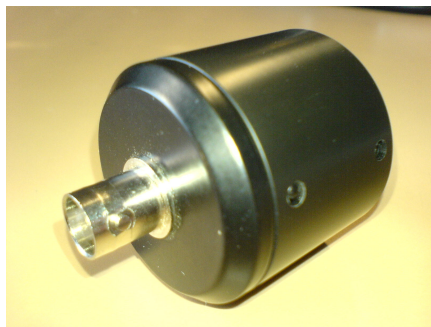


Obr. 3.7: Zařízení k detekci a lokalizaci č.v. PD Hawk [Převzato z [23]]

3.1.2.4 Měření pomocí kapacitní a induktivní sondy

V místě ČV dochází k vyzařování vysokofrekvenční energie do okolního prostředí. Vyzářený výkon se skládá ze dvou složek, elektrické a magnetické. Kapacitní sondy (snímače) snímají vyzařované elektrické pole a induktivní sondy (snímače) snímají pole magnetické. Oba tyto snímače se uplatňují především pro orientační měření za provozu zařízení. Průběhy kalibračních křivek pro tyto metody nejsou lineární, a proto je lze obtížně kvantifikovat.

Vhodnými kapacitními sondami je možné zachytit elektrické signály vyvolané ČV. Obvod pro zpracování signálu z kapacitních sond je obvykle tvořen rychlým diferenciálním zesilovačem, jehož výstupní signál je zesílen zesilovačem s proměnným zesílením a výsledný signál je zpracován analogově nebo digitálně. Nejpoužívanější typ kapacitního snímače je snímač koaxiálního tvaru, dalším typem je terčíkový typ. Koaxiální sondy se používají k detekci ČV například na kabelových koncovkách nebo v zapouzdřených rozvodnách. Kapacitní sondy měří pouze elektrické pole vyzářené do okolí a není proto možné určit zdroje ČV, které jsou elektricky odstíněné [11]. Příklad kapacitního senzoru je na obr.3.8



Obr. 3.8: Kapacitní senzor výrobce Lemke Diagnostics [Převzato z [26]]

Induktivní sondy můžeme rozdělit podle způsobu použití na lineární a toroidní.

Toroidní sondy mají proudové obvody vzájemně magneticky svázané, přičemž vodič pracovního uzemnění, který prochází středem toroidní cívky, tvoří primární vinutí magnetického obvodu. Vinutí sondy navinuté na toroidu je sekundární vinutí. Toroidní sondy jsou vhodné jako snímače proudových impulsů ČV v blízkostech uzemnění vn zařízení.

Lineární sondy pracují na principu snímání magnetického pole a umísťují se tak, aby podélná osa snímače byla orientována souhlasně s vektory magnetické indukce B a intenzity magnetického pole H . V porovnání s toroidními sondami není potřeba přerušování elektrického obvodu [11]. Příklad induktivního senzoru je na obr.3.9



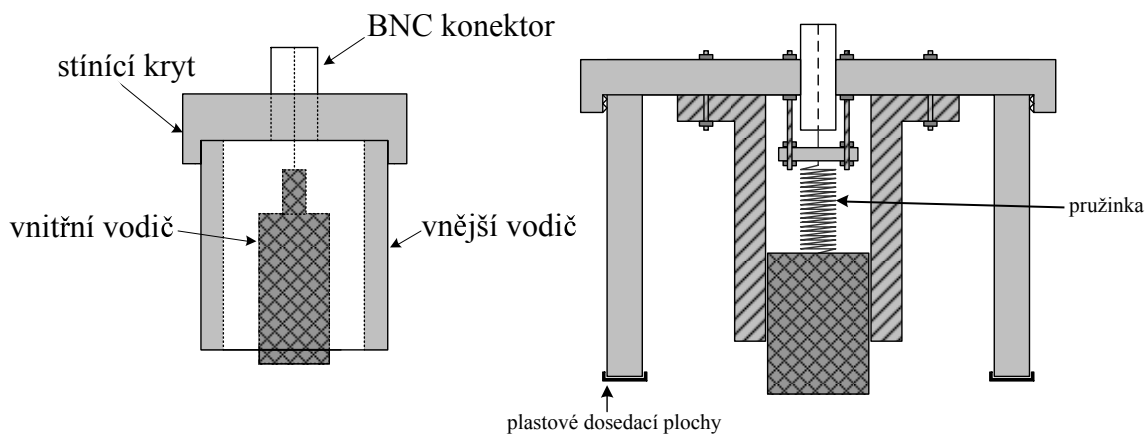
Obr. 3.9: Induktivní senzor pro měření částečných výbojů. [Převzato z [26]]

3.1.3 TEV metoda

Galvanická a elektromagnetická metoda mají určité nevýhody, např. požadavek na odstavení zařízení pro instalaci online monitoringu. K překonání těchto nevýhod byla navržena metoda TEV (Transient Earth Voltage). Technologie TEV byla vyvinuta firmou EA Technology.

Vyzařované elektromagnetické vlny ze zdroje ČV se indukují na povrchu plechových krytů a vytvářejí na něm malá pulsní napětí. Tato napětí se snímají senzory, které se přikládají na povrch plechových krytů. Jedná se o novou metodu, kterou provází mnoho komplikací a je potřeba další vývoj. Měřicí systém se skládá z neinvazivního kapacitního snímače, horní propusti a zařízení pro ukládání a zobrazování dat, což je často počítač nebo osciloskop.

Základní zapojení senzoru slouží k laboratorním účelům. Jedná se o koaxiální senzor, který se skládá z konektoru BNC, stínícího krytu, vnějšího a vnitřního vodiče. V praxi se používá vylepšená verze. Vylepšení spočívá v provedení vnitřního vodiče, který není přímo připojen k BNC konektoru, ale pomocí vodivé pružinky. To umožňuje po přiložení senzoru na plochu měřeného objektu vnitřní vodič zarovnat na stejnou úroveň s vnějším vodičem. Toto uspořádání zaručuje plný kontakt s povrchem měřeného objektu a tím je zajištěná vysoká citlivost a zároveň ochrana před vnějším rušením [27].



a) základní provedení TEV snímače

b) vylepšené provedení TEV snímače

Obr. 3.10: Senzory pro měření metodou TEV. [Převzato z [27]]

3.2 Nekonvenční metody

Částečné výboje vykazují kromě elektrických i neelektrické efekty, které můžeme pozorovat, ale i kvantifikovat. Jedná se o efekty optické, zvukové a chemické. Zvukové a optické efekty se především uplatňují v případech klouzavých a vnějších ČV. K těmto diagnostickým metodám se používá speciální přístrojová technika, např. přístroje pro noční vidění, fotonásobiče, nízkofrekvenční a ultrazvukové směrové mikrofony [11].

3.2.1 Akustická metoda

Ke snímání signálu a následné lokalizaci se používají především piezoelektrické měniče. V případě měření ČV v nádobě se snímače připevňují zvenčí nádoby bez nutnosti zásahu do konstrukce nádoby. Typicky je v blízkosti snímače předzesilovač, aby nedocházelo k rušení na přívodních vodičích. Výhodou akustických snímačů je snadná a rychlá instalace pomocí magnetických držáků na téměř kterékoliv místo nádoby. Ke zkreslení signálu částečných výbojů dochází rozdílnou strukturou vnitřních částí transformátoru. Síla signálu z piezoelektrického měniče především závisí na umístění ve vztahu k místu částečného výboje, obecně však platí, že síla signálu částečného výboje může být nižší než úroveň šumu, v tomto případě musíme k měření využít i metodu elektromagnetickou [6].

3.2.2 Chemická metoda

Částečné výboje mohou zanechat stopu v plynu nebo oleji přístroje v podobě produktů rozpuštěných v této látce. Následnou chemickou analýzou oleje nebo plynu přístroje je možné určit přítomnost částečných výbojů. Chemickou metodu nelze použít k určení místa působení výboje. Chemickou analýzou produktů vzniklých dlouhodobým působením ČV je možné odhadnout stav izolačního materiálu. Metoda k zjišťování koncentrace plynů v oleji se nazývá plynová chromatografie [11].

3.2.3 Optická metoda

Během výbojové činnosti vzniká viditelné světelné a ultrafialové záření. Ultrafialové záření je možné detekovat kamerami pracujícími v ultrafialovém pásmu. Emitované ultrafialové záření ČV má vyšší energii než viditelné záření. Optickou metodu lze použít například pro vnější výboje venkovního vedení [3].

Na obr.3.11 je kamera *DayCorSUPERB* a možné použití na venkovním vedení.

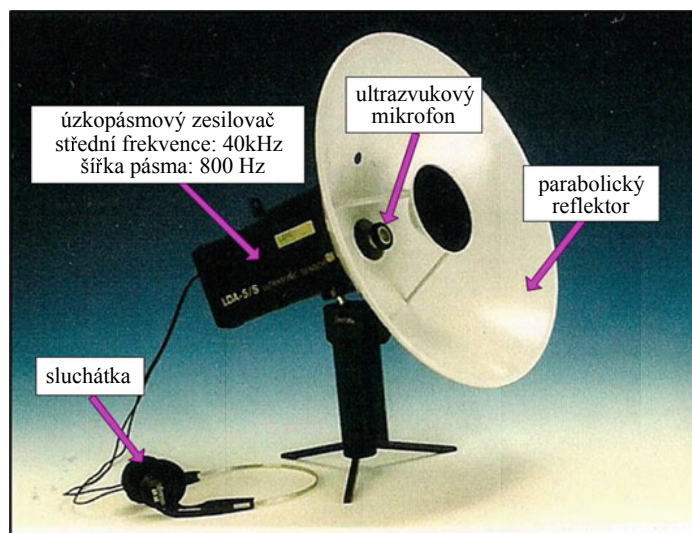


Obr. 3.11: Kamera *DayCorSUPERB* a její použití. [Převzato z [31]]

4

Koncepce akustické (ultrazvukové) metody

Částečné výboje nevyzařují pouze elektromagnetické vlny, ale také tlakové vlny pokrývající pásmo od jednotek kHz až do přibližně 200 kHz. Hlavní výhodou detekce pomocí akustické emise (AE) je odolnost proti elektromagnetickému rušení. Aby nedošlo k rušení mechanickými hluky, které nesouvisí s ČV, je frekvenční pásmo obvykle voleno od 40 kHz do několika stovek kHz. V oblasti vysokonapěťového inženýrství byla technika detekce akustické emise nejdříve použita pro detekci a lokalizaci výboje (korony) ve vzdušném prostředí, tedy na vedení vysokého napětí. Na obr.4.1 je ruční detektor ČV, který funguje na principu převedení ultrazvuku do slyšitelného pásma. Lokalizace zdroje spočívá v nasměrování detektoru do místa s nejvyšší intenzitou zvuku.



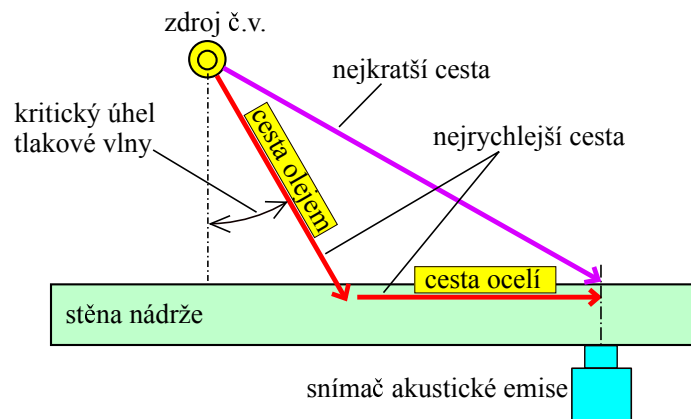
Obr. 4.1: Ruční ultrazvukový detektor. [Převzato z [7]]

K minimalizaci nepřesnosti lokalizace se akustická metoda běžně spojuje elektrickou metodou. To umožňuje spouštění (trigrování) osciloskopu elektrickým signálem, protože dochází k indikaci ČV téměř přesně v době vzniku. U elektrické metody je časové zpoždění menší než $1 \mu\text{s}$, tato doba je zanedbatelná, protože akustický signál v oleji za tuto dobu

urazí 1,2 mm. V kombinaci s elektrickou metodou je zajištěno ověření, že skutečně došlo k ČV, a ne pouze k rušivému akustickému šumu.

V podmínkách, kdy je zařízení v provozu, je výhodnější použít akustickou metodu v kombinaci s UHF metodou, protože má větší odstup signál-šum.

V souvislosti s určením polohy je důležité zmínit, že ke správným výsledkům můžeme dojít pouze, když je rychlost šíření zvuku konstantní. Vysokonapěťová zařízení jsou komplexní a skládají se z mnoha odlišných materiálů s odlišnou rychlostí šíření mechanického kmitání, a proto se mechanické kmitání nešíří nejrychleji nejkratší vzdáleností mezi ČV a senzorem, ale materiálem s nejvyšší rychlostí šíření mechanického kmitání viz obr.4.2. Rychlost šíření v oceli je přibližně čtyřikrát rychlejší než v oleji. Řešením jsou velmi složité rovnice získané pro rychlost šíření vln v reálném zařízení, které je možné řešit pomocí sofistikovaného softwaru.



Obr. 4.2: Nejkratší a nejdelší cesta mezi zdrojem ČV a akustickým senzorem umístěným na stěně nádoby. [Převzato z [7]]

Zařízení k akustické detekci a lokalizaci zdroje ČV ve vn zařízeních se skládají z určitého počtu senzorů akustické emise, vedení signálu (kabel nebo optická vazba) a vyhodnocovacího zařízení (digitální osciloskop nebo počítačový měřicí systém). Vyhodnocovací zařízení slouží k zpracování, vizualizaci a uložení naměřených dat. K měření akustické emise (mechanických tlakových vln) se běžně používají tyto typy převodníků:

- Piezoelektrické senzory
- Akcelerometry
- Elektrostatické mikrofony
- Akusticky-optické měniče
- Komplexní systémy měření č.v.
- Elektro-optické měniče
- Opto-akustické měniče

Senzory bývají v místě dotyku s měřeným objektem elektricky izolovány vrstvou epoxidu a opatřeny gelem nebo tukem, aby docházelo k lepšímu přenosu signálu.

Umístit předzesilovač do snímače je výhodné z důvodu vysokého odstupu signál-šum. Použití úzkopásmového zesilovače se střední frekvencí okolo 40 kHz přispívá ke spolehlivým výsledkům, protože se odfiltrují mechanické vibrace. Nevýhodou akustické metody měření ČV je útlum a rozptyl signálu při šíření různými materiály zařízení.

4.1 Piezoelektrické senzory

Jsou založeny na principu přímého piezoelektrického jevu, princip spočívá ve schopnosti krystalu (křemen, turmalín nebo Seignettova sůl) generovat elektrické napětí přímo úměrné namáhání v krystalu a závisí na směru vzhledem k osám tohoto krystalu. Opačným je nepřímý piezoelektrický jev, kdy v elektrickém poli dochází k mechanické deformaci krystalu [2].

Piezoelektrické konstanty popisují vztah mezi mechanickým a elektrickým chováním piezoelektrických látek. Piezoelektrický koeficient d_{ik} udává změnu rozměru Δl měniče v závislosti na elektrickém poli E , daném napětím U . Konstanta d_{ik} definuje nepřímý piezoelektrický jev a je označována jako vysílací konstanta měniče.

Piezoelektrický součinitel lze vyjádřit:

$$d_{ik} = \frac{\Delta l}{U_v} \quad [mV^{-1}] \quad (4.1)$$

kde $U_v = lE$ je napětí na elektrodách měniče. Piezoelektrická deformační konstanta h_{ik} definuje přímý piezoelektrický jev a je dána napětím naprázdno, vznikajícím na elektrodách měniče. Je dána vztahem:

$$h_{ik} = \frac{e_{ik}}{\varepsilon_{ik}} = \frac{U_p}{\Delta l} \quad [mV^{-1}] \quad (4.2)$$

kde U_p je napětí vznikající na elektrodách měniče, e_{ik} je piezoelektrický součinitel a ε_{ik} je permitivita měniče.

Piezoelektrická tlaková konstanta g_{ik} je definována napětím naprázdno U na elektrodách senzoru, který má jednotkový rozměr a je namáhán tlakem p . Je vyjádřena vztahem:

$$g_{ik} = \frac{U_p}{lp} \quad [Vm^{-1}Pa^{-1}] \quad (4.3)$$

kde l je rozměr měniče v uvažovaném směru.

Elektromechanický faktor k udává účinnost přeměny mechanické energie w_{mech} na energii elektrickou w_{el} dle vztahu :

$$k = \frac{w_{el}}{w_{mech}} \quad (4.4)$$

Vztah dle rov.4.6 platí pro přímý a nepřímý piezoelektrický jev dle vztahu:

$$k_{ik}^2 = d_{ik}h_{ik} \quad (4.5)$$

Piezelektrický koeficient $d_{i,j}$ určuje závislost hustoty elektrického náboje na síle působící na krystal podle vztahu:

$$d_{i,j} = \frac{\text{coulomb}/\text{metr}^2}{\text{newton}/\text{metr}^2} = \frac{\text{coulomb}}{\text{newton}} \quad [C/N] \quad (4.6)$$

4.1.1 Konstrukce piezo snímačů

Piezelektrické vlastnosti křemene nejsou příznivé pro příjem ultrazvuku, a proto se zde využívá piezelektrické keramiky nebo piezelektrických polymerů. Piezelektrická keramika se vyrábí lisováním jemného prášku a následně se vypálí v tunelové peci. Touto metodou lze vyrobit měniče libovolného tvaru. Vytvarovaná keramika se vybrousí a opatří se vpalovanými stříbrnými elektrodami. V ultrazvukové technice se využívá polarizovaná feroelektrická keramika. Polarizace feroelektrických látek se obvykle provádí v oleji při teplotě kolem 150 °C, přičemž se na elektrody přiloží napětí 3 kV po dobu až jedné hodiny. K výrobě piezokeramiky se používají materiály na základě titaničitanu barnatého BaTiO_3 , titaničitan olovnatý PbTiO_3 nebo zirkoničitan olovnatý PbZrO_3 . Na obr.4.3 je piezo membrána s piezokeramickým materiálem.

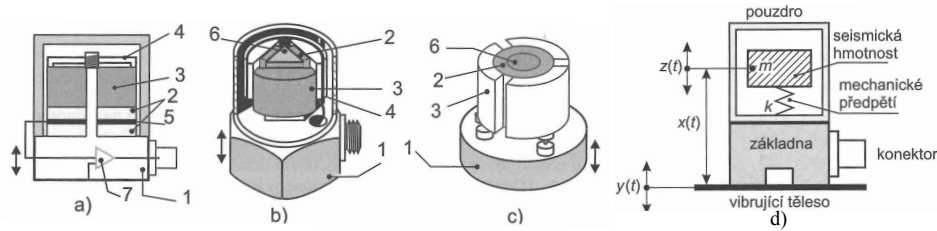


Obr. 4.3: Piezo membrána

4.1.1.1 Piezelektrické akcelerometry

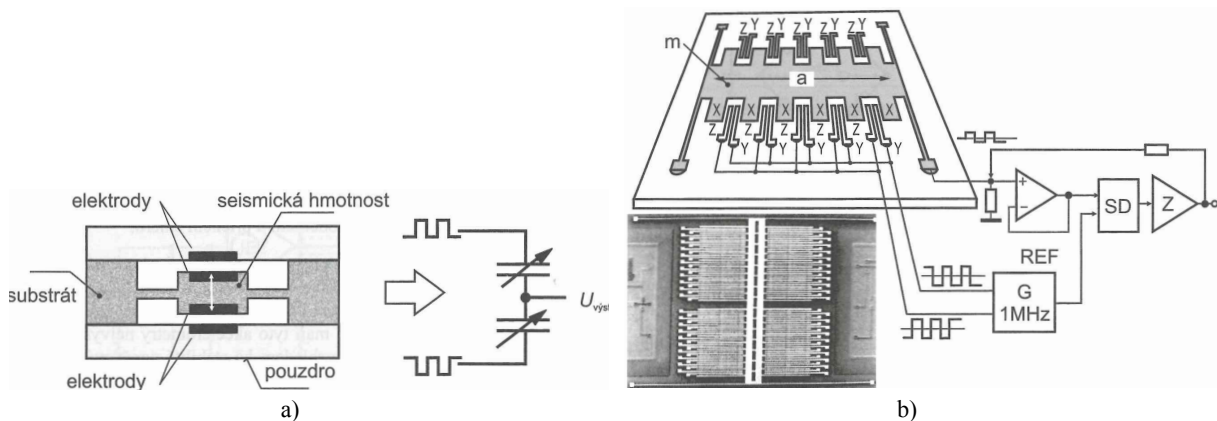
Pracují na principu přímého piezelektrického jevu a jsou nejpoužívanějším typem absolutních senzorů. Piezelektrický jev závisí na směru deformace vůči osám krystalové mřížky. Při využití piezelektrického jevu se rozlišuje dle směru působení vůči ose anizotropie (kolmo k elektrodám) podélný, příčný a stříhový jev. Na obr.4.4a-c je uspořádání piezelektrických akcelerometrů, kde 1 je základová deska, 2 jsou piezelektrické elementy, 3 je seismická hmotnost, 4 je mechanické předpětí, 5 je elektroda, 6 je trn a 7 je předzesilovač.

Piezorezistivní akcelerometry pracují na principu piezorezistivního jevu, který je definován vlivem krystalografické orientace hmoty na rezistivitu materiálu. Při namáhání ohybem se mění rezistivita piezorezistivních elementů. Rezonanční kmitočet je do 30 kHz a frekvenční rozsah od 0 Hz do 7 kHz. Mají vysoký poměr citlivosti vůči hmotnosti. Z důvodu stability napěťové citlivosti jsou vhodné k dlouhodobým testům. Nevýhodou je teplotní závislost.



Obr. 4.4: a) s tlakovou deformací, b) DELTA se stříhovou deformací, c) tříosé ORTHO se stříhovou deformací, d) model piezoelektrického akcelerometru. [Převzato z [1]]

Kapacitní akcelerometry jsou přesné a velmi citlivé, jejich frekvenční rozsah je od 0 Hz do 6 kHz. Pohybem seismické hmotnosti se jedna kapacita zvětšuje a druhá zmenšuje a vyhodnocuje se diference hodnot kapacit, princip kapacitního akcelerometru je na obr.4.5a.



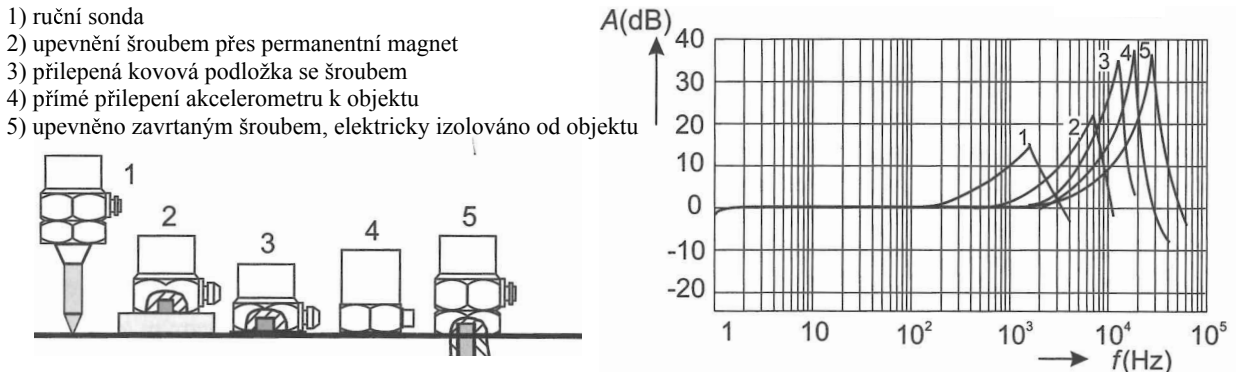
Obr. 4.5: a) uspořádání kapacitního akcelerometru, b) MEMS kapacitní akcelerometr ADXL150. [Převzato z [1]]

Technologie MEMS (Microelectromechanical systems) je znázorněna na obr.4.5b. Základem této technologie je monokrystalický substrát, na kterém je z polykrystalického křemíku na dvou pevných upevněních zavěšena seismická hmotnost m ve tvaru hřebínku. Každý zub hřebínku představuje střední pohyblivou elektrodu X soustavy diferenčních kapacitních senzorů s proměnnou vzduchovou mezerou a pevnými elektrodami Y,Z. Výstupní napětí z demodulátoru SD je přivedeno zpětnou elektrodou na elektrodu X, čímž je vyvolán elektrostatický silový účinek kompenzující působení měřeného zrychlení [1].

Na obr.4.6 je znázorněn vliv umístění akcelerometru na měřeném objektu v závislosti na frekvenční charakteristice. Z obrázku je patrné, že hrotové měření je vhodné pro nižší kmitočty, naopak při zvětšení styčné plochy a následným nalepením nebo upevněním šroubem je možné měřit vyšší kmitočty s vyšší citlivostí.

4.1.1.2 MFC Macro fiber composite

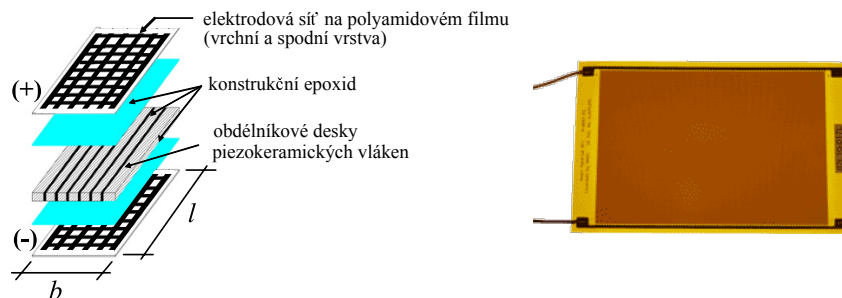
Kompozitní materiál (MFC) lze použít jako aktuátor nebo jako senzor. Po přivedení napětí na jednotlivé elektrody dochází k ohybu, naopak po nalepení na plochu měřeného



Obr. 4.6: Vliv umístění akcelerometrů na frekvenční charakteristice [Převzato z [1]]

objektu lze snímat vibrace v podobě napěťových pulzů [9].

MFC snímače se vyrábějí v podobě tenkých destiček o tloušťce kolem jednoho milimetru. Popis jednotlivých vrstev je na obr.4.7 vlevo [18]. Skládají se z obdélníkových piezokeramických destiček vložených mezi vrstvami konstrukčního epoxidu. Elektrody jsou připojeny k polyamidovému filmu v podobě pravidelných tenkých cest, které umožňují snímat napětí z piezokeramických vláken. Na obr.C.1 je porovnání citlivosti konvenčního senzoru s integrovaným předzesilovačem R15I-AST se senzory MFC.



Obr. 4.7: MFC (macro fiber composite) [Převzato z [17]]

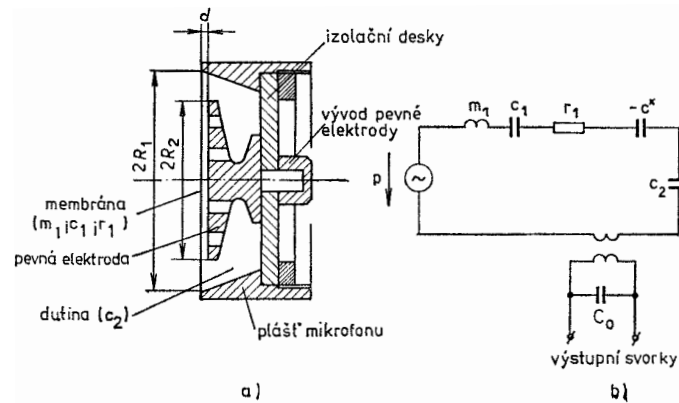
4.2 Elektrostatický mikrofón

Je často nesprávně označován jako kondenzátorový mikrofón.

Na obr.4.8 je schéma elektrostatického mikrofónu, kde m_1 je akustická hmota membrány, c_1 je její akustická poddajnost, c_2 je poddajnost dutiny pod membránou a r_1 je akustický odpor tlumící pohyb membrány. Negativní poddajnost c^* zahrnuje vliv elektrostatického pole mezi elektrodami.

Pro stabilitu mikrofónu je důležité, aby negativní poddajnost byla mnohonásobně menší než, akustická poddajnost.

Před pevně umístěnou plošnou elektrodou je napjata membrána ve vzdálenosti $d = 20$ až $30 \mu\text{m}$, která je vyrobena z kovové fólie anebo metalizované fólie z umělé hmoty (orientována vodivou stranou k pevné elektrodě). Na elektrody je přivedeno polarizační



Obr. 4.8: Základní uspořádání tlakového elektrostatického mikrofonu (a) a jeho analogický akustický obvod (b) |Převzato z [22]|

stejnoseměrné napětí od 30 do 200 V. Výstupní napětí následně vzniká mezi elektrodami.

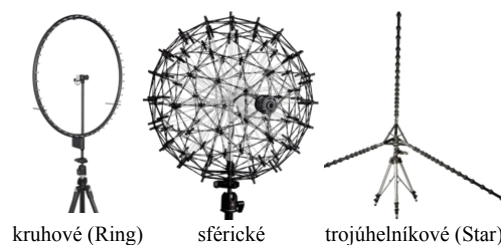
Změnou akustického tlaku dochází k pohybu membrány, čímž se mění kapacita těchto desek. Pokud zajistíme, aby se při změně kapacity desek náboj rychle vyrovnal, tak potom se zvětší napětí na kondenzátoru.

Kromě elektrostatických mikrofonů s vnějším polarizačním napětím existují i elektrostatické mikrofony elektretové. Elektretové materiály jsou dielektrické materiály nesoucí permanentní elektrický náboj, který zajišťuje polarizační napětí mikrofonu.

Elektrostatické mikrofony mají velkou vstupní impedanci, proto je vhodné co nejbližší k mikrofonu umístit předzesilovač. Disponují vysokou citlivostí, vyrovnanou frekvenční charakteristikou a malým zkreslením [22].

4.3 Akusticky-optické měniče

Akustická kamera, neboli hluková kamera je zařízení, které umí detailně identifikovat zdroje akustické emise pomocí mikrofonní soustavy a následně získaná data pomocí vizuální kamery graficky prezentovat. Detekce zdroje akustické emise je založena na principu rozdílné časové detekce akustického tlaku na mikrofonech v soustavě.



Obr. 4.9: Uspořádání mikrofonů pro akustickou kameru |Převzato z [25]|

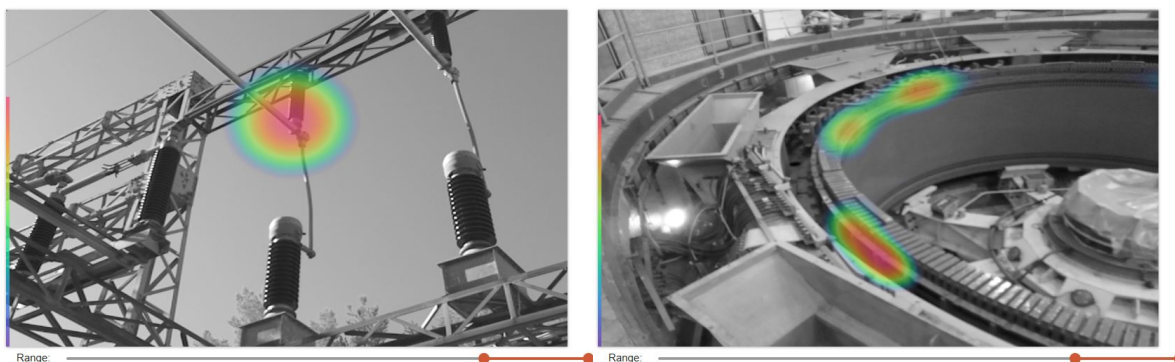
Soustava akustické kamery je složena z několika mikrofonních jednotek, které jsou uspořádány do kruhu, trojúhelníka anebo do sféry. Možná uspořádání jsou na obr.4.9.

Na obr.4.10 je akustická kamera, která umí detekovat částečné výboje na vzdálenost až 100 m v závislosti na prostředí. Kamera pracuje ve frekvenčním rozsahu od 2 kHz do 31 kHz. Síť mikrofonů, vyhodnocovací zařízení a obrazovka je součástí jednoho zařízení, což umožňuje snadnou manipulaci se zařízením.



Obr. 4.10: Akustická kamera od firmy NL acoustics [Převzato z [24]]

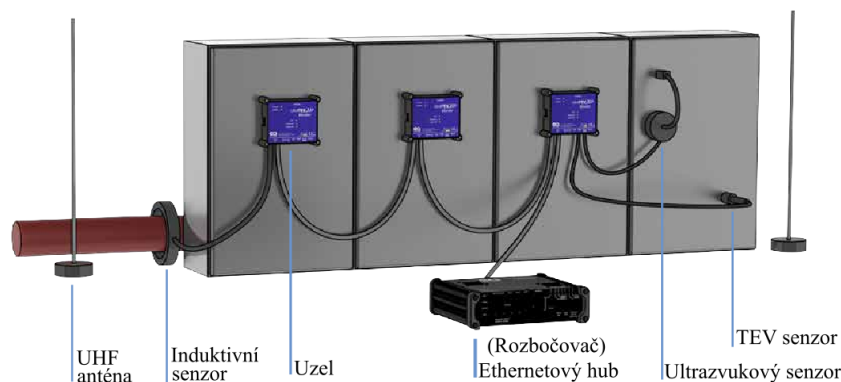
Na obr.4.11 je ukázka záznamu s detekovaným částečným výbojem. Zdroje výbojů jsou znázorněny červenou barvou.



Obr. 4.11: Ukázka detekce částečných výbojů akustickou kamerou [Převzato z [24]]

4.4 Komplexní systémy měření ČV

Jsou systémy zajišťující kompletní monitorovací systém, které využívají TEV, ultrazvukové a UHF metody. Dále zaznamenávají teplotu a vlhkost vzduchu okolí. Systém je dálkově ovladatelný s možností analýzy stavu zařízení. Jedná se o systémy, které jsou určeny pro kontinuální monitoring zařízení, který je důležitý pro bezporuchový chod. Na obr.4.12 je příklad zapojení s jednotlivými snímači. Výhodou tohoto systému je modularita.



Obr. 4.12: Komplexní systém měření ČV *UltraTEVMonitorTM* od firmy *EATechnology*
 [Převzato z [23]]

4.4.1 Kombinace TEV a akustické metody

Zařízení se skládá z elektromagnetického (TEV Transient Earth Voltage) senzoru a ultrazvukového snímače.

Elektromagnetickým senzorem lze měřit přechodové napětí, které vzniká vlivem ČV. Měření probíhá přiložením elektromagnetického snímače ke kovovým krytům vn zařízení. Ultrazvukový snímač v přístroji snímá akustickou emisi o frekvenci 40 kHz a lze sním po demontáži krytů výboj přesněji lokalizovat. Ultrazvukový signál je pro sluchátka upraven do slyšitelného pásma.

Na obr.4.13 jsou přístroje od firmy *EA Technology*, vpravo je novější varianta s možností připojit sluchátka. K detekci č.v. jsou přístroje vybaveny třemi LED indikačními diodami, které signalizují normální chod zařízení, zvýšenou kontrolu a potenciálně nebezpečný provoz. Výhodou je snadná detekce ČV ve vn zařízeních bez nutnosti demontáže krytů.



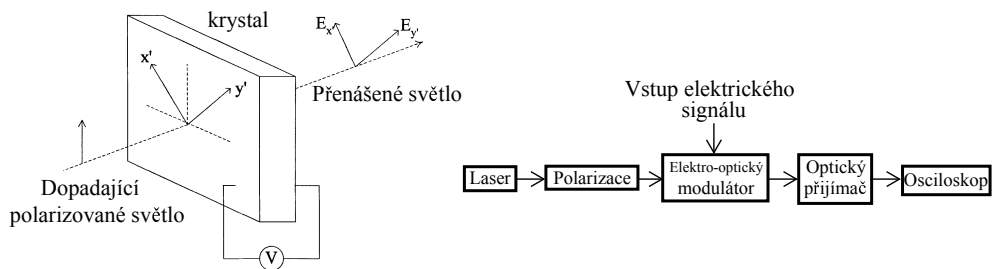
Obr. 4.13: Vlevo *UltraTEVDetector* a vpravo *UltraTEVDetector²* od firmy *EATechnology*
 [Převzato z [23]]

4.5 Elektro-optické měniče

Elektro-optická metoda slouží ke konverzi elektrického signálu z akustických měničů na optický signál, který nepodléhá elektromagnetickému rušení. K šíření optického signálu se používá optické vlákno, které je výhodné v porovnání s elektrickým vodičem malým zatlumením signálu a současně je udržena vysoká citlivost.

Základní princip je znázorněn na obr.4.14 vlevo, kde krystal je lithium niobát $LiNbO_3$. Přiložením napětí na krystal je způsobena změna indexu lomu světla. Světlo šířící se skrze krystal je rozloženo ve směru x a ve směru y s rozdílnou fází. Fázový posuv je lineárně závislý na přiloženém napětí V .

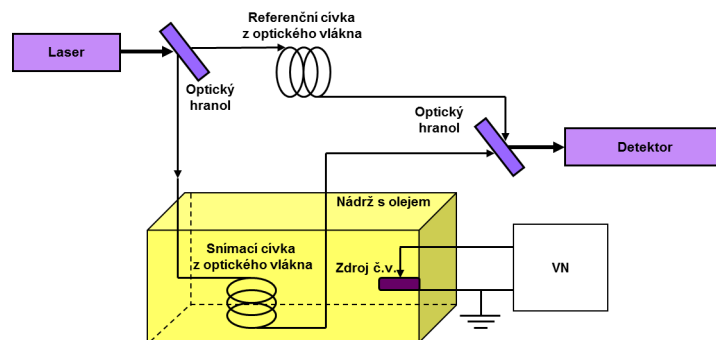
na obr.4.14 vpravo je blokové schéma elektro-optického systému, kdy je zaznamenaný signál ČV elektrickým snímačem převeden na signál optický[28].



Obr. 4.14: Vlevo $LiNbO_3$ krystal jako Elektro-optický modulátor a vpravo blokové schéma měřicího systému. [Převzato z [28]]

4.6 Opto-akustické měniče

Vyzářený paprsek laserem dopadá na polopropustný hranol a je rozdělen na dva paprsky. Jeden z paprsků prochází referenční cívkou a druhý prochází snímací cívkou. Obě cívky jsou shodné a jsou z optického vlákna. Oba dílčí paprsky dopadají na další polopropustný hranol, kde dojde k jejich sečtení. Mechanické kmitání způsobené ČV má vliv na snímací cívkou v podobě nepatrného prodloužení a smrštění optického vlákna, čímž dochází k fázovému posuvu mezi oběma paprsky a následné detekci. Základní princip je na obr.4.15.



Obr. 4.15: Koncepte opto-akustické metody detekce ČV. [Převzato z [3]]

5

Akustická emise a lokalizace

K akustické emisi dochází uvolněním energie vlivem stimulace vnitřními nebo vnějšími silami. Uvolněná energie se transformuje na mechanický napěťový impulz šířící se materiálem jako elastická napěťová podélná nebo příčná vlna.

V okamžiku, kdy dopadne vlna na rozhraní vzduchu a tělesa, dochází k částečnému odrazu a částečně k transformaci na jeden nebo více módů. Vlna se dále šíří povrchovou vlnou, ale dochází také k transformaci na deskové vlny aj. Jednotlivé typy vln se šíří různou rychlostí.

5.1 Akustický tlak a intenzita

Průchodem ultrazvukových vln prostředím vzniká akustický tlak p , který je definován jako součin akustické rychlosti v s měrnou akustickou impedancí z .

$$p = z \cdot v \quad (5.1)$$

Akustická impedance je obecně komplexní, protože mezi rychlostí a akustickým tlakem může být fázový posun. Akustická impedance má značný význam v případě postupné rovinné nebo kulové vlny v nekonečném prostředí, kde akustická impedance je reálná a je nazývána akustickým vlnovým odporem ρc . Tato veličina má významný vliv na odraz a přestup ultrazvukových vln na rozhraní dvou prostředí [2].

Intenzita I_{zvuk} ultrazvukové rovinné nebo kulové vlny je definována součinem efektivních hodnot akustického tlaku p_{ef} a rychlosti v_{ef} , je dána vztahem:

$$I_{zvuk} = p_{ef} v_{ef} = \frac{P}{\sqrt{2}} \frac{V}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho c} \quad [W m^{-2}] \quad (5.2)$$

Výkon ultrazvukové vlny je dán výrazem:

$$W = p_{ef} v_{ef} S \quad [W] \quad (5.3)$$

5.1.1 Druhy šíření ultrazvukových vln

Ultrazvukové vlny šířící se prostředím, dělíme podle způsobu pohybu částic prostředí vzhledem ke směru postupu vlny na:

- Podélné (longitudinální)
- Příčné (transverzální)
- Povrchové (Rayleighovy)
- Loveovy
- Deskové (Lambovy)

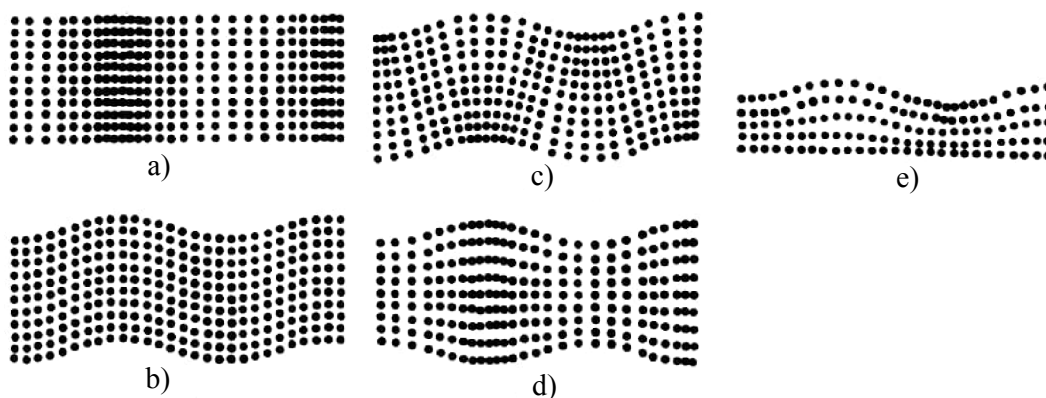
Při podélném šíření částice prostředí kmitají přímočaře ve směru šíření vlny. Jsou nejběžnějším a nejnámějším druhem vln. Mohou se šířit kapalným, tuhým i plynným prostředím. Podélné šíření částic je na obr.5.1a.

Pokud se částice pohybují kolmo na směr šíření vlny, tak se jedná o příčné vlny. K příčnému šíření může docházet pouze v pevném skupenství. Příčné šíření částic je na obr.5.1b.

Na volném povrchu tuhého prostředí se mohou šířit povrchové vlny asi do hloubky přibližně se rovnající délce vlny. Jedná se o zvláštní případ příčných vln, protože kmitání částic kolem rovnovážné polohy je složeno ze dvou vektorů, jedná se o vektor kolmý ke směru šíření vln s vyšší velikostí a vektor rovnoběžný se směrem šíření vln. Povrchové vlny jsou na obr.5.1e.

Podobným typem povrchových vln jsou Loveovy vlny, u kterých částice prostředí kmitají jen příčným pohybem v rovině rovnoběžné s povrchem.

Lambovy vlny vznikají v prostředí desek nebo drátů, kdy alespoň jeden rozměr je blízký délce vlny. Vyskytují se buď jako asymetrické nebo symetrické. Lambovy vlny asymetrické (ohybové) jsou na obr.5.1c. Lambovy vlny symetrické (dilatační) jsou na obr.5.1d.



Obr. 5.1: Kmitání částic prostředí při šíření vlny. [Převzato z [2]]

5.1.2 Rychlost šíření

Konkrétní vlny se šíří pouze určitým skupenstvím látky a to pomocí sil, které působí mezi částicemi. Rychlost šíření je závislá na prostředí, vlastnostech prostředí a na teplotě. Konstanty rychlostí šíření v některých látkách při teplotě 20 °C jsou v tab.5.1.

Tab. 5.1

| Prostředí | Rychlost šíření podélných vln c_L [m s ⁻¹] | Rychlost šíření příčných vln c_T [m s ⁻¹] |
|-----------------------|---|--|
| hliník | 6 320 | 3 080 |
| měď | 4 700 | 2 260 |
| ocel | 5 900 až 6 000 | 3 260 |
| keramika | 3 000 až 6 500 | - |
| voda | 1 483 | - |
| olej transformátorový | 1 390 | - |
| vzduch | 343 | - |

Tab. 5.1: Rychlosti šíření vln.

5.1.2.1 Tuhé látky

Tuhé látky jsou jediné, které mohou přenášet všechny druhy vln. Anizotropické látky např. krystaly mají závislou rychlost šíření vln na orientaci. Rychlost šíření vln v izotropních látkách není závislá na orientaci. V tuhých látkách se rychlost šíření podélných vln c_L liší podle rozměrů prostředí a poměrů vlnové délky λ . V neohraničeném prostředí je rychlost dána vztahem:

$$c_L = \sqrt{\left(\frac{E}{\rho} \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}\right)} \quad [ms^{-1}], \quad (5.4)$$

kde E je dynamický modul pružnosti [Pa], ρ je hustota [kg m⁻³], μ je Poissonovo číslo. Rychlost šíření příčných vln c_T v tuhých látkách je dán vztahem:

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{S}} = \sqrt{\left(\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \mu)}\right)} \quad [ms^{-1}], \quad (5.5)$$

kde G je modul pružnosti ve smyku [Pa].

Poměr rychlosti šíření podélné a příčné vlny závisí pouze na Poissonově čísle. Poměr rychlosti je dán vztahem:

$$\frac{c_T}{c_L} = \sqrt{\frac{1 - 2\mu}{2(1 - \mu)}}, \quad (5.6)$$

kde Poissonovo číslo μ je převrácená hodnota Poissonovy konstanty m , která označuje poměr relativního prodloužení tyče k jejímu relativnímu zkrácení. Poissonovo číslo je dáno vztahem:

$$\mu = \frac{1}{m} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}, \quad (5.7)$$

kde ε_y je poměrná deformace v podélném a ε_x je poměrná deformace v příčném směru.

5.1.2.2 Kapalné látky

Rychlost šíření ultrazvukových vln v kapalinách je závislá na tlaku a hustotě prostředí. Kapaliny nekladou odpor při smykovém namáhání, až na výjimku při vysoké viskozitě a z tohoto důvodu se v kapalinách šíří pouze podélné vlny. Zředování a zhušťování kmitajících částí probíhá adiabaticky, takže děj probíhá bez výměny tepla s okolím. Rychlost šíření ultrazvukových vln se mění s teplotou. Rychlost šíření je dána vztahem:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\beta_{ad}\rho}} = \sqrt{\frac{\kappa}{\beta_{iz}\rho}} \quad [ms^{-1}], \quad (5.8)$$

kde $K = -(\frac{\partial P}{\partial V_0})V_0$ je adiabatický modul objemové pružnosti [Pa], P je tlak [Pa], V_0 je objem [m^3], β_{ad} je adiabatická stlačitelnost [Pa^{-1}], β_{iz} je izotermická stlačitelnost, $\kappa = \beta_{iz}/\beta_{ad=c/c_v}$ je poměr měrného tepla při konstantním tlaku p a objemu V , Poissonova konstanta.

5.1.2.3 Plynné látky

Rychlost šíření ultrazvuku v ideálním plynu lze vyjádřit výrazem:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}} \quad [ms^{-1}], \quad (5.9)$$

kde p je tlak [Pa] a $\kappa = c_p/c_v$ je poměr měrných tepel [2].

5.2 Lokalizace částečného výboje

K lokalizaci emisního zdroje je potřeba nejméně dvou senzorů, s vyšším počtem senzorů lze zdroj lokalizovat ve více rozměrech a s větší přesností.

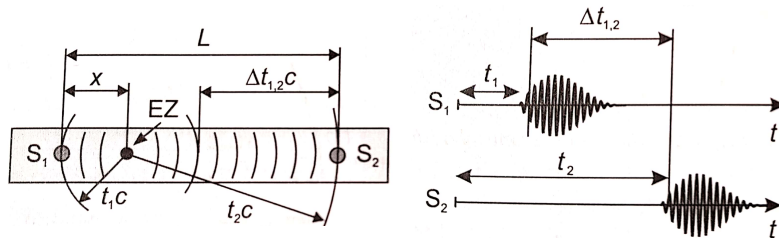
5.2.1 Jednorozměrná lokalizace

Princip je založený na změření rozdílu Δt časů začátků událostí akustického impulzu z emisního zdroje mezi dvěma senzory a ze znalosti šíření akustické vlny c podle obr. 5.2. K určení vzdálenosti x platí vztah:

$$x = \frac{L - \Delta t_{1,2}c}{2} \quad (5.10)$$

Pokud není možné přesně stanovit začátek události, tak lze použít rozdíl časů maximální amplitudy události akustického impulsu. Rychlost šíření vlny se obvykle zjišťuje tzv. Hsu-Nielsenovo metodou, která spočívá v kalibraci umělou emisní událostí např. zlomením mikrotuhy.

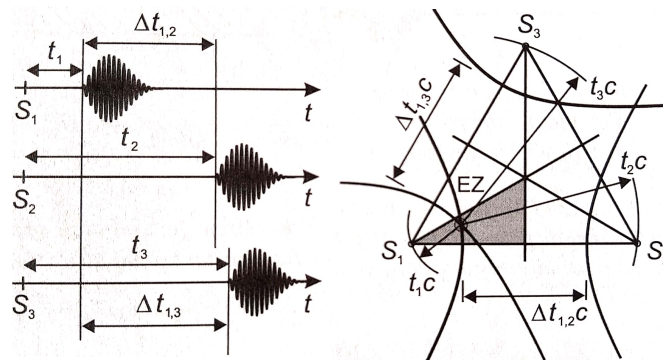
Jednorozměrnou lokalizaci lze uplatnit pouze pokud je emisní zdroj umístěn mezi senzory, snímá pouze jeden druh vlny a neuvažujeme odrazy.



Obr. 5.2: Princip jednorozměrné lokalizace. |Převzato z [1]|

5.2.2 Dvojměrná hyperbolická lokalizace

Při dvojměrné hyperbolické lokalizaci jsou senzory rozmístěny do sítě dle obr.5.3, nejčastěji do sítě rovnostranných trojúhelníků. Mezi kterýmikoliv dvěma senzory lze z rozdílu času příchodu vln z emisního zdroje lokalizovat tento zdroj jako geometrické místo bodů, jejichž vzdálenost je od obou senzorů konstantní, tj. emisní zdroj leží na hyperbole, jejichž ohniska jsou definována polohou obou senzorů. Podle sledu impulsů lze ihned stanovit, v jakém ze šesti segmentů trojúhelníka nastala emisní událost [1].

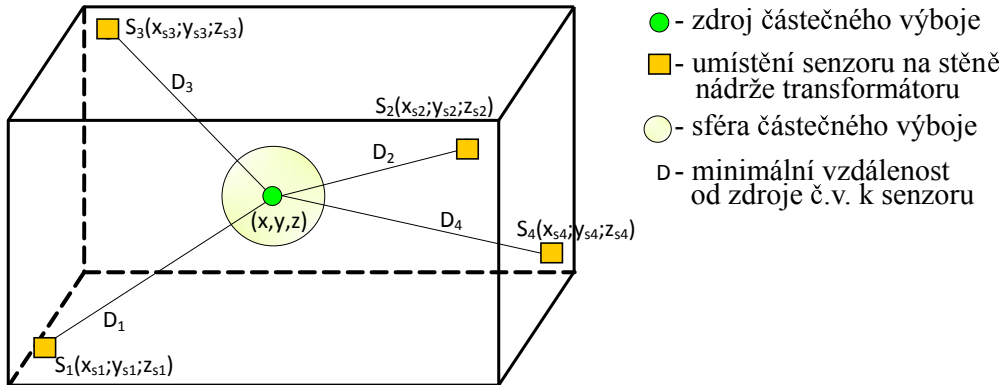


Obr. 5.3: Princip hyperbolické triangulace. |Převzato z [1]|

5.2.3 Prostorová lokalizace

Lokalizace se provádí pomocí rozdílného času detekce na konkrétním senzoru. K sestavení rovnic pro prostorovou lokalizaci zdroje č.v. je možné využít několika metod. Nejjednodušší metodou je systém absolutní lokalizace, který je však nepoužitelný pro UHF metodu

samotnou, protože vychází ze znalosti času vzniku výboje, který je u UHF metody neznámý. Systém absolutní lokalizace má své uplatnění při použití akustické metody, kdy UHF metoda je použita jako referenční metoda detekce času vzniku signálu č.v. Rychlost šíření elektromagnetického vlnění v porovnání s akustickými vlnami je mnohonásobně vyšší, a proto lze považovat čas signálu z UHF senzoru jako čas vzniku č.v.



Obr. 5.4: Prostorová lokalizace částečného výboje.

Poloha se určí vyřešením soustavy nelineárních rovnic. K určení pozice pomocí absolutní metody použijeme rovnice 5.11, kde $S_i(x_{S_i}, y_{S_i}, z_{S_i})$ jsou souřadnice pozice senzoru, T_{S_i} jsou absolutní časy šíření signálu a v_S je rychlost šíření elektromagnetického vlnění v oleji [16]. Výsledná pozice je dána geometrickým průnikem kulových ploch (sfér) s poloměry odpovídajícími pravým stranám rovnice. Záznam signálu pro určení pozice č.v. pomocí absolutní metody je na obr. 5.5a.

$$\begin{aligned} (x-x_{S1})^2+(y-y_{S1})^2+(z-z_{S1})^2 &= (v_S \cdot T_{S1})^2, \\ (x-x_{S2})^2+(y-y_{S2})^2+(z-z_{S2})^2 &= (v_S \cdot T_{S2})^2, \\ (x-x_{S3})^2+(y-y_{S3})^2+(z-z_{S3})^2 &= (v_S \cdot T_{S3})^2. \end{aligned} \quad (5.11)$$

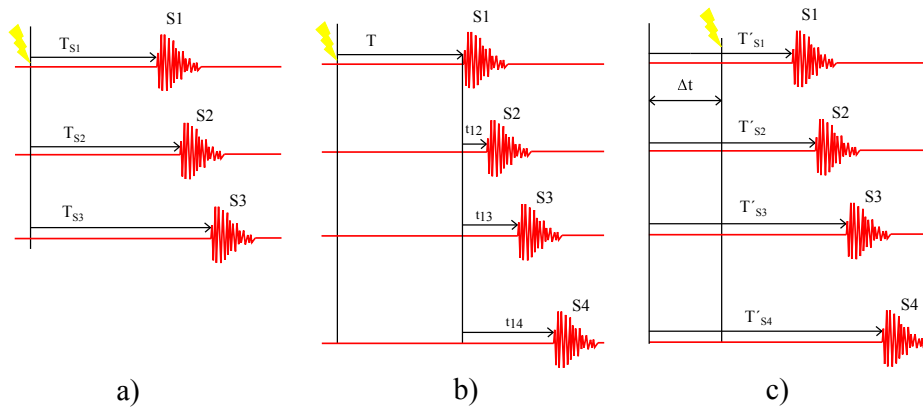
Pro použití UHF metody lze provést lokalizaci pomocí metody rozdílů časů příchodu známé pod anglickým označením TDOA (Time Difference of Arrival). Záznam signálu pro TDOA metodu je na obr. 5.5b. Pro tuto metodu je signál zaznamenáván na základě překročení spouštěcí úrovně měřicího kanálu, na který dorazí signál jako první. Následně jsou detekovány signály ostatními senzory a vypočítány rozdíly dob jejich příchodu na senzory. Místo vzniku č.v. se lokalizuje podle soustavy rovnic 5.12, kde T je doba šíření signálu od místa vzniku č.v. k nejbližšímu senzoru, časy t_{12}, t_{13}, t_{14} udávají rozdíl dopadu signálu mezi určenými anténami. Geometrickým řešením je průnik symetrických rotačních hyperboloidů. Nevýhodou oproti absolutní metodě je potřeba čtyř senzorů. Rovnice 5.12 se skládá ze čtyř rovnic pro čtyři neznámé (x, y, z, T) . Rovnice se numericky řeší například pomocí Newtonovy metody [16].

$$\begin{aligned}
(x-x_{S1})^2+(y-y_{S1})^2+(z-z_{S1})^2 &= (v_S \cdot T)^2, \\
(x-x_{S2})^2+(y-y_{S2})^2+(z-z_{S2})^2 &= (v_S \cdot (T+t_{12}))^2, \\
(x-x_{S3})^2+(y-y_{S3})^2+(z-z_{S3})^2 &= (v_S \cdot (T+t_{13}))^2, \\
(x-x_{S4})^2+(y-y_{S4})^2+(z-z_{S4})^2 &= (v_S \cdot (T+t_{14}))^2.
\end{aligned} \tag{5.12}$$

Další variantou je metoda, jejíž princip je založený na obráceném principu lokalizace geopozičním systémem GPS, což znamená jeden vysílač a více přijímačů. Princip metody spočívá v zavedení časového intervalu Δt mezi zvoleným počátkem časové osy a časem vzniku signálu. Dále jsou do soustavy zavedeny časy T_{si} , které představují časy příchodu signálu na jednotlivé senzory počítané od voleného počátku časové osy. Těmito úpravami je soustava rovnic 5.13 symetrizována a usnadňuje to tak její řešení.

$$\begin{aligned}
(x-x_{S1})^2+(y-y_{S1})^2+(z-z_{S1})^2 &= (v_S \cdot (T'_{s1} + \Delta t))^2, \\
(x-x_{S2})^2+(y-y_{S2})^2+(z-z_{S2})^2 &= (v_S \cdot (T'_{s2} + \Delta t))^2, \\
(x-x_{S3})^2+(y-y_{S3})^2+(z-z_{S3})^2 &= (v_S \cdot (T'_{s3} + \Delta t))^2, \\
(x-x_{S4})^2+(y-y_{S4})^2+(z-z_{S4})^2 &= (v_S \cdot (T'_{s4} + \Delta t))^2.
\end{aligned} \tag{5.13}$$

Uvedené rovnice se řeší pomocí Bancroftovy metody nebo hyperbolické lokalizace.



Obr. 5.5: Záznam signálů pro různé metody prostorové lokalizace.

6

Měření

K měření je vybrána nádoba o rozměrech 65x45x40 cm, která je naplněna transformátorem olejem. Nádoba simuluje nádobu olejového transformátoru. Snímače jsou umístěny na stěnu nádrže. Jako snímače akustické emise ČV jsou vybrány piezoelektrické membrány a MEMS akcelerometr.

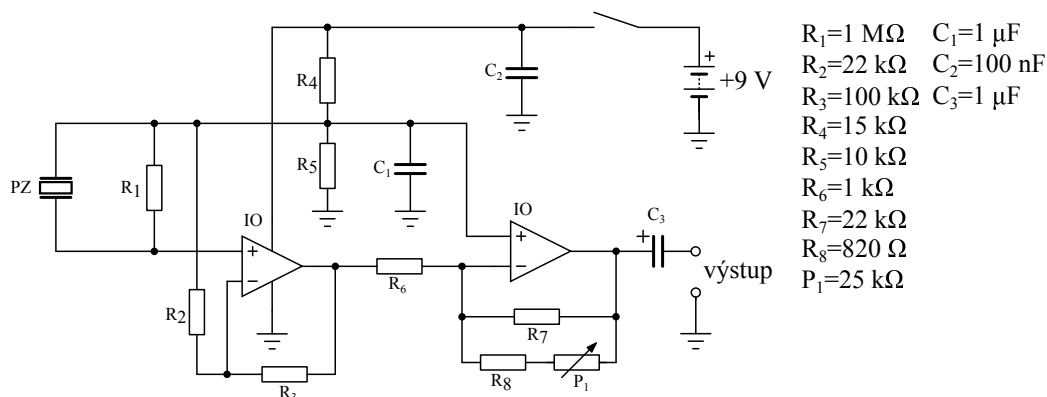
Zdrojem akustické emise simulující účinky částečného výboje je automobilová zapalovací svíčka řízena mikrokontrolérem. Svíčka je ponořena do nádoby ve vzdálenosti 30 cm od plochy s umístěnými senzory.

Data zaznamenaná senzory jsou vyhodnoceny na digitálním osciloskopu a pomocí zvukové karty v počítači. V případě vyhodnocení na počítači je zapotřebí předzesilovač.

6.1 Měření s piezo snímačem

6.1.1 Návrh předzesilovače

K měření č.v. pomocí elektroakustických snímačů je vhodné využít předzesilovač umístěný co nejbližší ke konkrétnímu snímači, aby nedošlo k útlumu signálu mezi snímačem a vyhodnocovacím zařízením.



Obr. 6.1: Předzesilovač pro piezoelektrický snímač

Na obr.6.1 je schéma navrženého předzesilovače s operačním zesilovačem TLC27L2.

Piezoelektrická membrána PZ je připojena paralelně k rezistoru R_1 , který upravuje vstupní impedanci. Operační zesilovač IO se skládá ze dvou stupňů. Oba stupně jsou zapojeny jako neinvertující zesilovač. Zesílení prvního stupně je dáno poměrem rezistorů R_3 a R_2 podle vzorce:

$$A_{U1} = 1 + \frac{R_3}{R_2} = 1 + \frac{100k}{22k} = 5,55 \quad (6.1)$$

Rezistory R_4 a R_5 slouží k vytvoření předpětí, protože zesilovač je napájen nesymetricky z 9 V baterie. Blokovací kondenzátor C_2 je připojen paralelně za spínačem napájení. Kondenzátor C_1 je zapojen jako dolní propust a jeho hodnota je dána vztahem:

$$f_D = \frac{1}{2\pi C_3(R_4 || R_5)} \quad [Hz] \quad (6.2)$$

Zesílení druhého stupně je dáno poměrem sério-paralelní kombinací potenciometru P_1 , rezistorem R_8 a rezistoru R_7 paralelně k rezistoru R_6 . Zesílení je volitelné potenciometrem P_1 od přibližně 1,8 do do 12,8. Hodnota potenciometru P_1 je 0 až 25 k Ω Zesílení se vypočte podle vzorce:

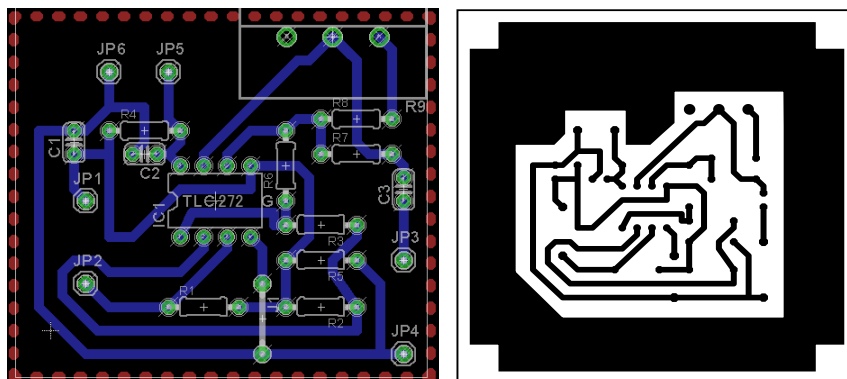
$$A_{U2} = 1 + \frac{R_7 || (R_8 + P_1)}{R_6} = 1 + \frac{22k || (820 + P_1)}{1k} = 1,79 \sim 12,8 \quad (6.3)$$

Celkové zesílení předzesilovače je dáno součinem obou stupňů podle vzorce:

$$A_U = A_{U1} * A_{U2} = 10 \sim 70 \quad (6.4)$$

Kondenzátor C_3 je zapojen jako horní propust, jeho hodnota je dána vstupní impedancí vyhodnocovacího zařízení v tomto případě osciloskopu $R_{osciloskopu}$, která je obvykle 1 M Ω . Hodnoty kondenzátorů C_1 a C_3 jsou voleny s ohledem na frekvenční rozsah od 20 Hz do 20 kHz. Hodnota kondenzátoru C_3 se vypočte dle vzorce:

$$f_H = \frac{1}{2\pi C_3 R_{osciloskopu}} \quad [Hz] \quad (6.5)$$



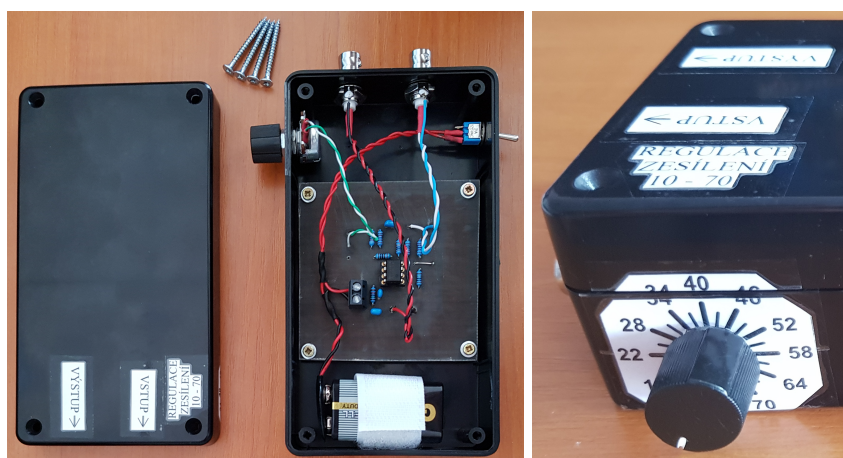
Obr. 6.2: Plošný spoj pro předzesilovač

Na obr.6.2 je navržený plošný spoj v programu *EaglePCBdesign*. Plošný spoj byl realizován vytištěním cesty plošného spoje laserovou tiskárnou na speciální folii a následným nažehlením na cuprexitovou desku. Po přenesení obrazce nažehlením byla deska vyleptána v roztoku chloridu železitého.



Obr. 6.3: Piezoelektrické snímače

Na obr.6.3 jsou piezoelektrické membrány se stíněným kabelem a jsou zakončeny BNC konektory. Provedení bez ozvučnice je zapotřebí přilepit pomocí lepidla na měřený objekt. U provedení s válcovou ozvučnicí je membrána nalepena na skleněnou styčnou plochu pomocí kyanoakrylátového lepidla a následně se snímač přiloží ke snímanému objektu. Dosedací plochu mezi snímačem a měřeným objektem je vhodné opatřit lubrikantem, aby došlo k dobrému přenosu mechanického kmitání.

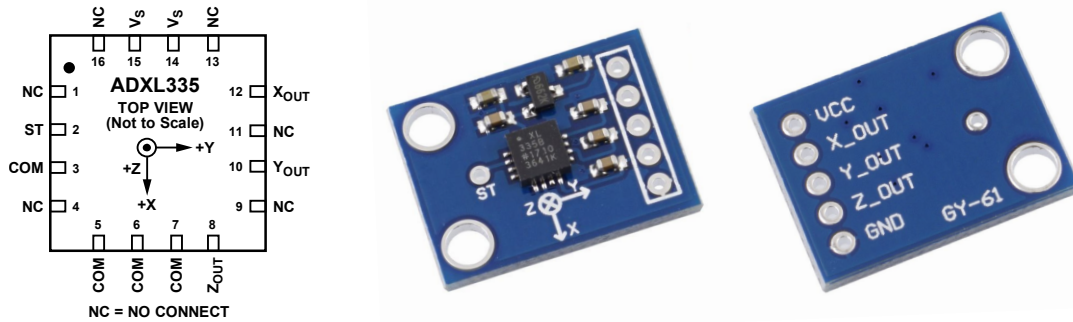


Obr. 6.4: Zrealizovaný předzesilovač

Na obr.6.4 vlevo je zrealizovaná sestava předzesilovače, výstupy jsou řešeny BNC konektory. Na obr.6.4 vpravo je regulace pomocí potenciometru od zesílení 10 do 70. Celková cena předzesilovače se snímači je 495 Kč.

6.2 Měření s MEMS akcelerometrem

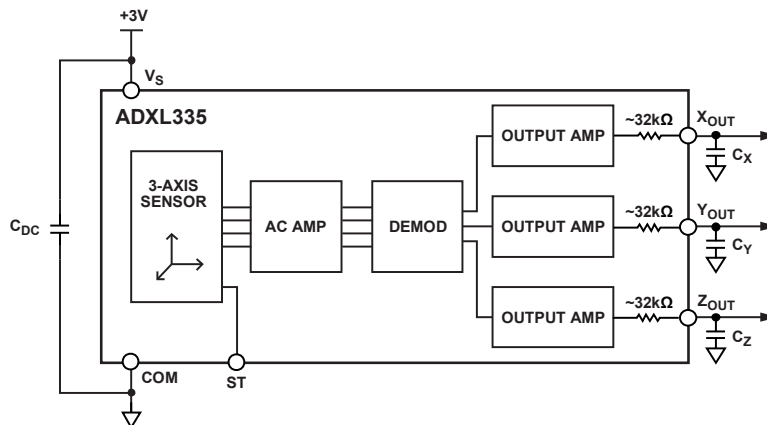
K měření byl použit MEMS akcelerometr ADXL335, který je možné zakoupit na modulu GY-61. Modul je následně jednoduše propojit s jednotlivými konektory a napájecím zdrojem.



Obr. 6.5: Použitý akcelerometr ADXL335 a modul s akcelerometrem

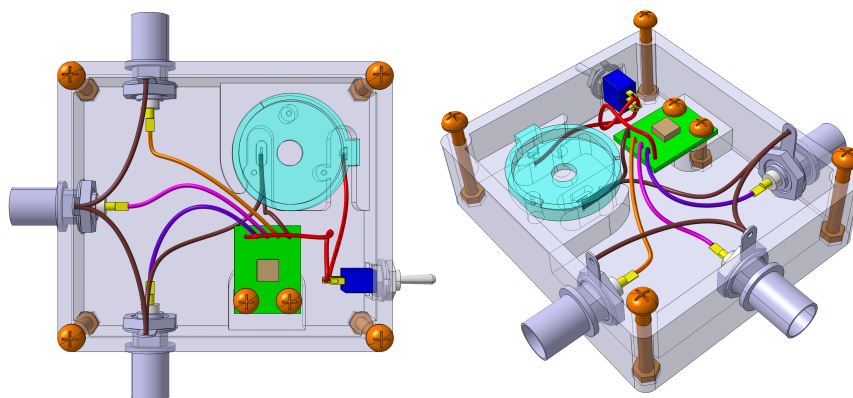
Blokové schéma akcelerometru ADXL335 je na obr.6.6. Akcelerometr je tříosý s dynamickým rozsahem ± 3 g. Dynamický rozsah udává maximální velikost zrychlení, kterým lze na snímač působit a zároveň nedojde ke zkreslení. Dynamický rozsah se udává jako násobek tíhového zrychlení.

Výstup *ST* (Self Test) umožňuje ověření správné funkce akcelerometru. Pokud je výstup připojen na napájecí napětí, tak potom je na vnitřní strukturu vyvíjena elektrostatická síla a na výstupech budou následující napětí: $X = -325$ mV, $Y = 320$ mV a $Z = 550$ mV. V normálním provozu je výstup *ST* nepřipojen nebo může být uzemněn. Rezistor 32 k Ω s kondenzátory C_X , C_Y a C_Z tvoří dolní propust, která zajišťuje snížení šumu a vlivu antialiasingu. Kondenzátor C_{DC} plní funkci blokovacího kondenzátoru. Frekvenční rozsah je pro osy X a Y od $0,5$ Hz do 1600 Hz. Pro osu Z je rozsah omezen od $0,5$ Hz do 550 Hz z důvodu konstrukčního řešení.



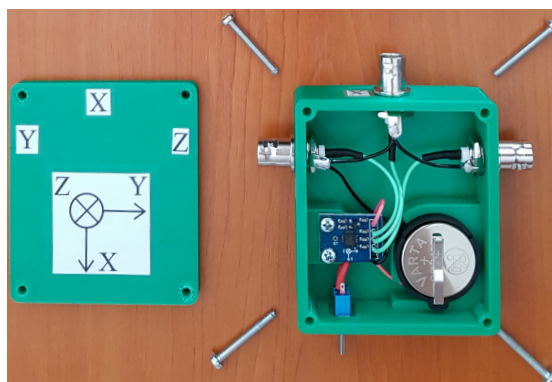
Obr. 6.6: Blokové schéma akcelerometru ADXL335

Na obr.6.7 je návrh krabičky, rozmístění BNC konektorů a napájecího zdroje. Sestava byla namodelována v programu *Catia*. K napájení může být použit akumulátor od $1,8$ V do $3,6$ V. Pro tuto konkrétní aplikaci je použita 3 V baterie CR2430 s kapacitou 280 mAh, spotřeba akcelerometru je 350 μ A. Tato baterie by měla být schopna napájet akcelerometr až 800 hodin. Přenos mechanického kmitání na senzor je zajištěn šrouby, kterými je modul akcelerometru upevněn v krabičce.



Obr. 6.7: Trojrozměrný návrh sestavy MEMS akcelerometru

Finální verze sestavy akcelerometru je na obr.6.8. Krabička sestavy byla vyrobena metodou trojrozměrného tisku. Na víčku krabičky jsou znázorněny směry jednotlivých os akcelerometru. Cena sestavy akcelerometru je 410 Kč.

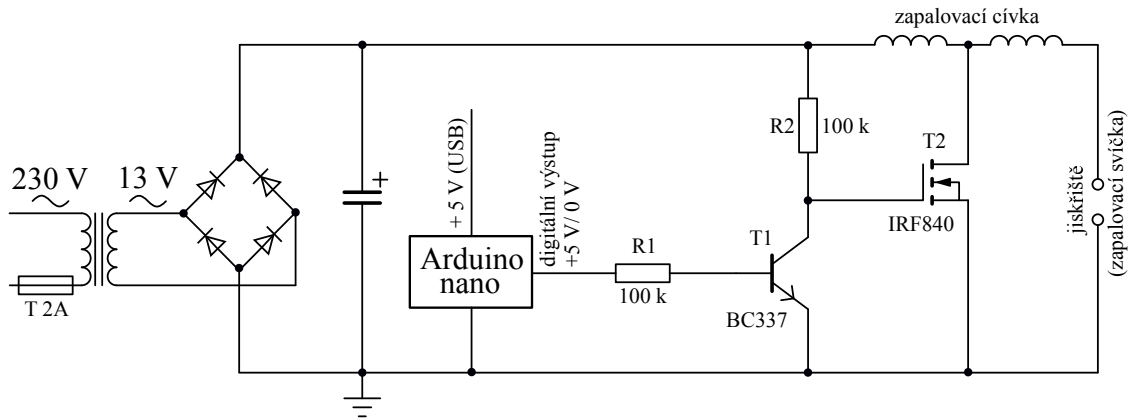


Obr. 6.8: Osazená sestava akcelerometru

6.3 Realizace jiskřiště

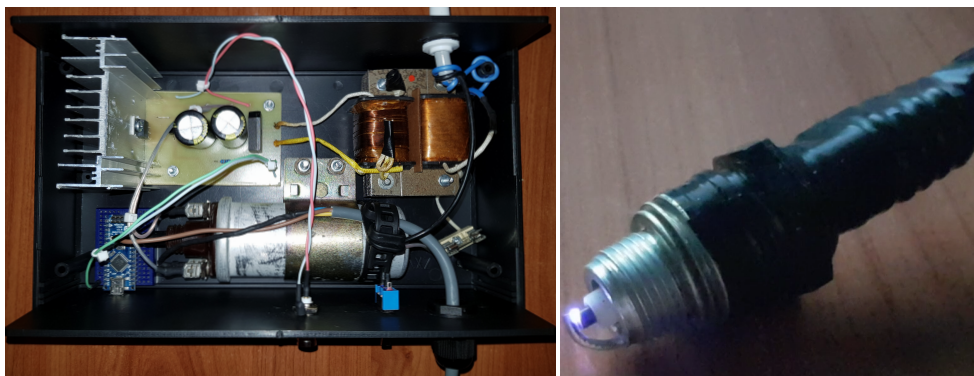
Na obr.6.9 je schéma zrealizovaného jiskřiště. Jiskřiště je napájeno síťovým napětím 230 V. Na výstupu transformátoru je před usměrněním 13 V. Následně je napětí dvoucestně usměrněno Graetzovým můstkem, na kterém vzniká úbytek přibližně 1 V a vyfiltrováno elektrolytickými kondenzátory o celkové kapacitě 4400 μF . Výstupní napětí zdroje je přibližně 17 V.

Ke řízení spínání byl vybrán jednodeskový počítač *Arduino nano* s mikrokontrolérem *AT Mega*. K řízení jiskřiště je potřeba digitální výstup +5/0 V. Spínání je zajištěno bipolárním tranzistorem *T1* a unipolárním tranzistorem *T2*. Rezistor *R1* slouží k proudovému omezení výstupu mikrokontroléru, protože maximální zatěžovací proud výstupu mikrokontroléru je 300 mA. Rezistor *R2* plní funkci omezení kolektorového proudu. Pokud je na výstupu mikrokontroléru 0 V, tak potom je tranzistor *T1* uzavřený a na řídicí elektrodě tranzistoru *T2* je napětí zdroje. Tranzistor *T2* je otevřený a dochází k akumulaci energie



Obr. 6.9: Schéma zapojení jiskřiště

do vlastního magnetického pole cívky. Pokud je na výstupu 5 V, tak tranzistor $T1$ je otevřený a napětí na řídicí elektrodě tranzistoru $T2$ je nulové a tranzistor $T2$ je uzavřen, následně dochází k napěťovému impulsu na vinutí vysokého napětí. Následkem impulsu je výboj na zapalovací svíče.

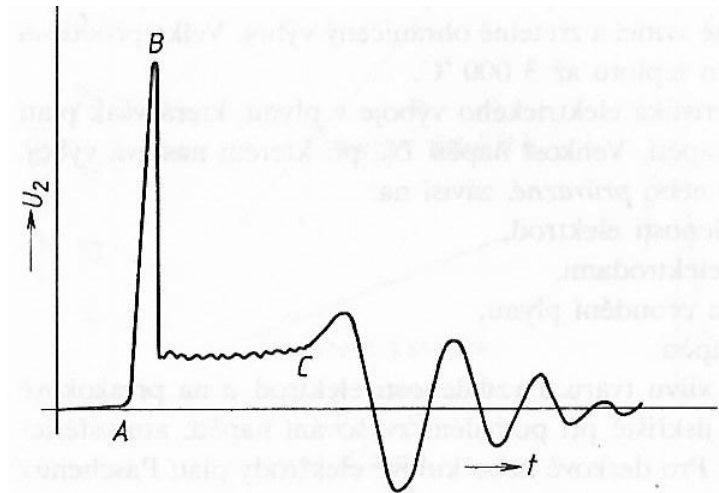


Obr. 6.10: Zrealizované jiskřiště

Transformace napětí je řešena zapalovací cívkou na 6 V systém. Na obr.6.10 vlevo je zrealizovaná sestava jiskřiště. Na obr.6.10 vpravo je jiskřiště, které je realizováno zapalovací svíčkou. Napětí na rezistoru $R2$ je vyvedeno na BNC konektor, aby bylo možné připojit osciloskop a následně určit čas vzniku výboje. Celkové náklady na sestavu jiskřiště činí 383 Kč.

Na obr.6.11 je průběh napětí na zapalovací svíčce. Průběh napětí závisí na vlastnostech zdroje napětí a podmínkách v prostoru jiskřiště. Po přerušení proudu v primárním obvodu zapalovací cívky stoupne sekundární napětí z bodu A do bodu B , kde nastává průraz. Napětí poklesne do okamžiku C , kde po odčerpání větší části energie zhasíná. Další průběh napětí představuje dokmitávání systému bez výboje [20].

Při překročení určité kritické úrovně elektrického napětí na hrotech zapalovací svíčky dochází k přeskoku. Tomuto napětí se říká průrazné napětí a označuje se U_p . Poměrem průrazného napětí U_p ke vzdálenosti elektrod d získáme hodnotu elektrické pevnosti E_p , která udává napětí, které je potřebné k přeskoku:



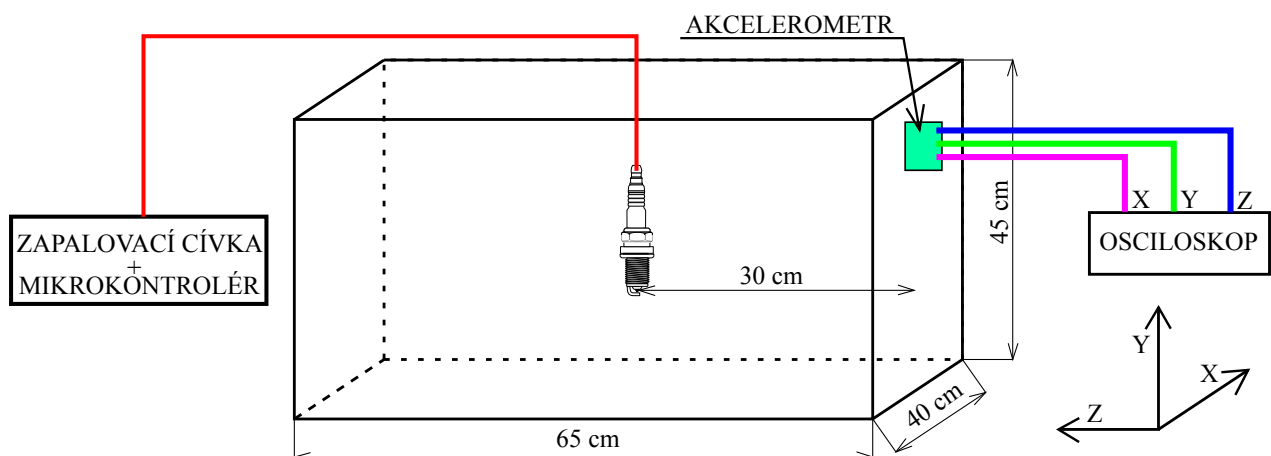
Obr. 6.11: Průběh napětí na elektrodách zapalovací svíčky [Převzato z [20]]

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (6.6)$$

Pro vzduch je elektrická pevnost přibližně 3 kV/mm. Pro transformátorový olej se udává pevnost přibližně 10 kV/mm. To znamená, že pro zrealizované jiskřiště bylo potřeba vyššího napájecího napětí cívky a zmenšení vzdálenosti hrotů zapalovací svíčky.

6.4 Měření výbojů akcelerometrem

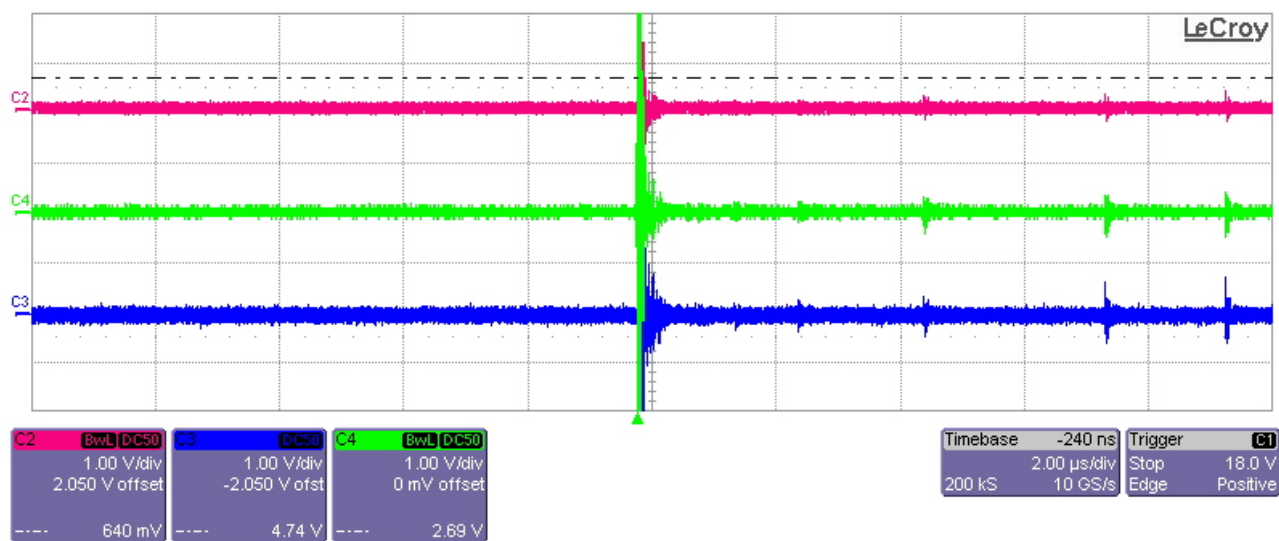
Měřicí úloha byla zapojena podle obr.6.12. Nádoba je naplněna transformátorovým olejem. Uchycení akcelerometru k nádobě bylo řešeno pomocí truhlářské svěrky. Zapalovací svíčka byla ponořena do nádoby ve vzdálenosti 30 cm od stěny s akcelerometrem. K zamezení přenosu signálu výboje přes přívodní kabel svíčky do nádoby, byl přívodní kabel upevněn nad nádobou.



Obr. 6.12: Blokové schéma měření s MEMS akcelerometrem

Na obr.6.13 je záznam výboje z osciloskopu, kde růžovou barvou je znázorněna osa X, zelenou osa Y a modrou osa Z. Z obrázku je patrné, že nejvyšší amplituda byla naměřena

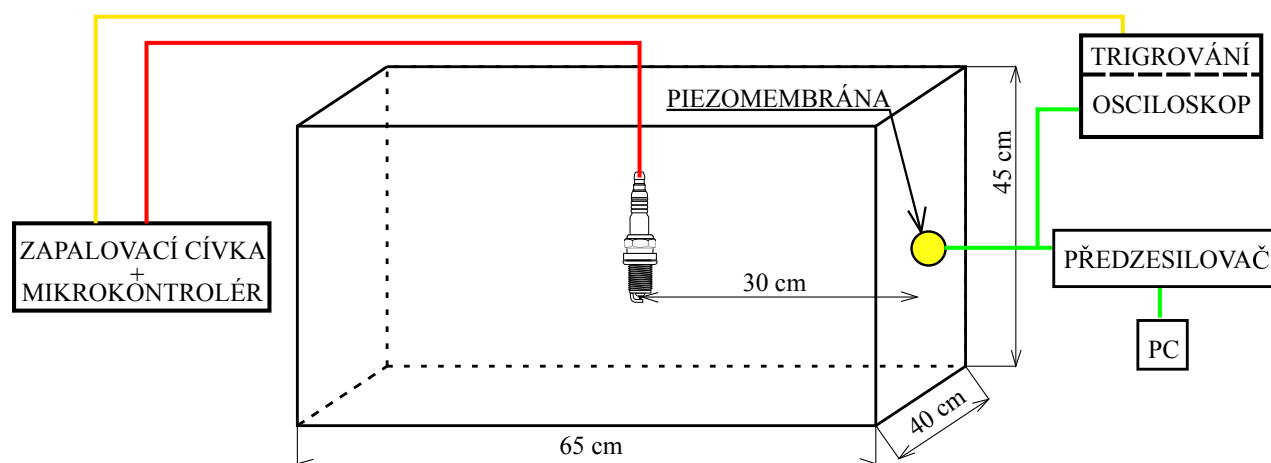
pro osu Z , i když má akcelerometr pro osu Z nejmenší citlivost. Impulzy zaznamenané po výboji jsou pravděpodobně odrazy výboje v nádobě. Detail naměřených hodnot je na obr.C.2.



Obr. 6.13: Měření výboje MEMS akcelerometrem

6.5 Měření výbojů piezomembránou

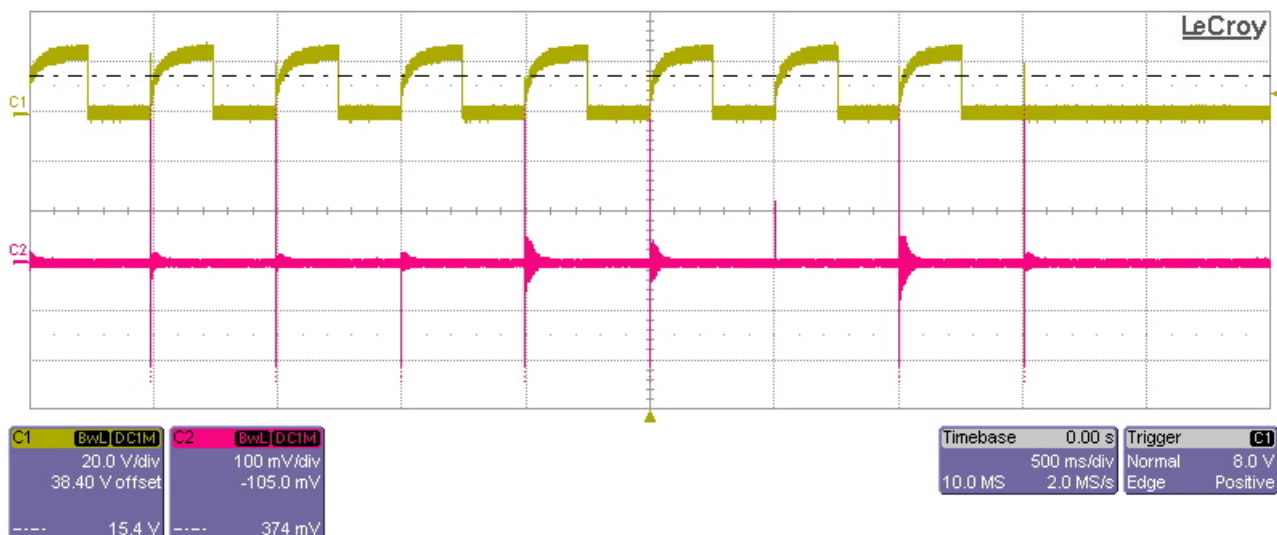
K měření byly vybrány piezokeramické membrány o průměru 27 mm znázorněné na obr.6.3. Mezi styčnou plochu membrány s ozvučnicí a nádobou byl nanesen gel a membrána byla zajištěna lepenkou k nádobě. Membrána bez ozvučnice byla přilepena k nádobě kyanoakrylátovým lepidlem. Měřená úloha byla zapojena podle schematu na obr.6.14.



Obr. 6.14: Blokové schéma měření s piezokeramickou membránou

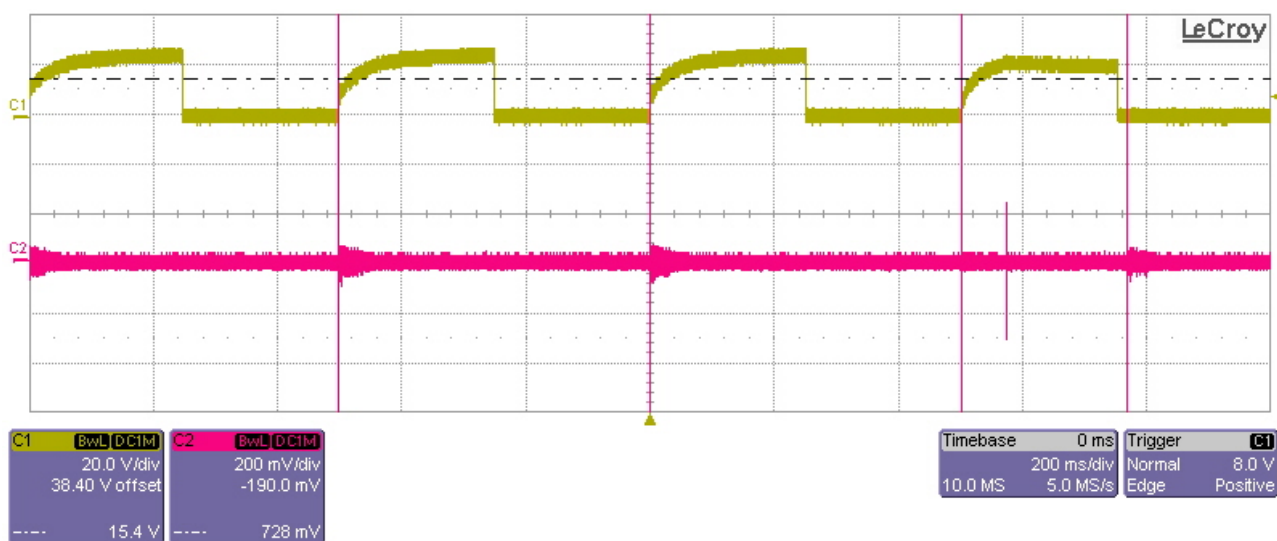
6.5.1 Záznam osciloskopem

Na vstup osciloskopu byl přiveden spouštěcí (trigrovací) signál z jiskřiště a signál zaznamenaný jednotlivými membránami. Na obr.6.15 a 6.16 je žlutou barvou trigrovací signál a růžovou barvou měřený signál. Ze záznamů je patrné, že k výboji nedochází pravidelně podle spínání mikrokontrolérem, ale nahodile a to i mimo čas sepnutí. Frekvence spínání mikrokontroléru byla 2 Hz. Tuto vlastnost přisuzují vyšší elektrické pevnosti oleje a také zanesením elektrod nečistotami, které vznikají v důsledku elektrických výbojů.



Obr. 6.15: Záznam výboje osciloskopem piezokeramickou membránou s ozvučnicí

Z obr.6.15 a 6.16 je patrné, že přímo nalepená membrána má vyšší citlivost. Pro membránu s ozvučnicí byla naměřena úroveň signálu při vzniku výboje 300 mV a bez ozvučnice přibližně 1 V.

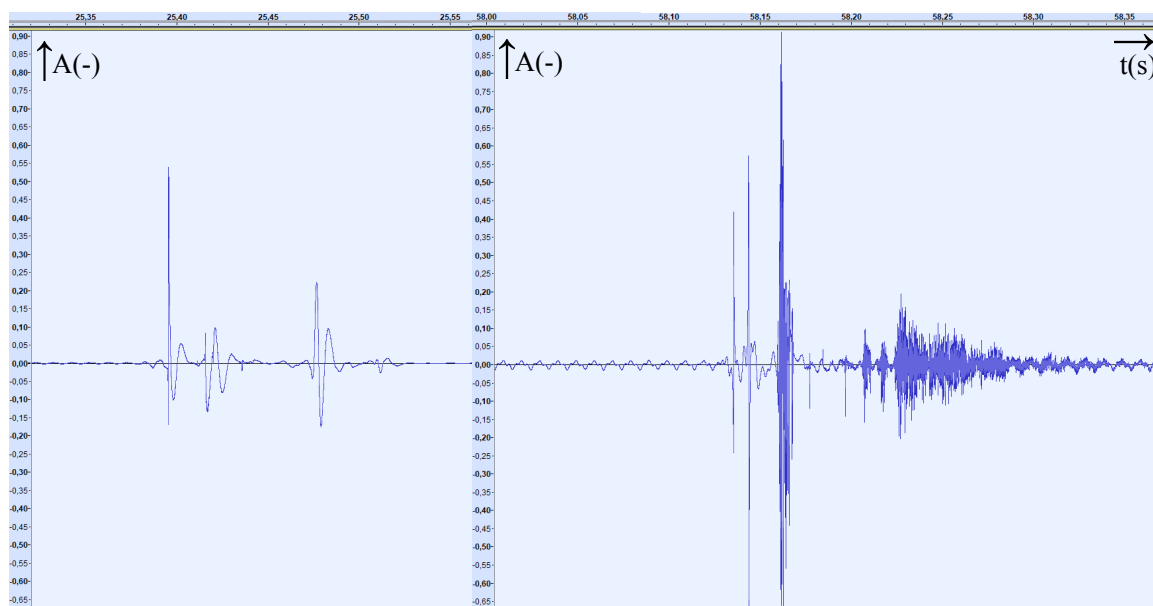


Obr. 6.16: Záznam výboje osciloskopem piezokeramickou membránou bez ozvučnice

6.5.2 Záznam zvukovou kartou

Zvuková karta má vzorkovací frekvenci 44,1 kHz, která odpovídá dvojnásobku slyšitelného frekvenčního pásma 20 kHz. Mezi snímač a zvukovou kartu byl zapojen zrealizovaný předzesilovač, na kterém bylo nastaveno zesílení 10. Další funkce předzesilovače je oddělení stejnosměrné složky, protože na výstupu předzesilovače je kondenzátor.

Na obr.6.17 je porovnání změřeného výboje membránou s ozvučnicí a přímo nalepené membrány. Vyšší citlivost přímo nalepené membrány je patrná ze záznamu výboje a záznamu síťového kmitočtu transformátoru jiskříště. K vyhodnocení výboje v počítači byl použit program *Audacity*.



Obr. 6.17: Záznam výboje piezokeramickou membránou s ozvučnicí vlevo a nalepená membrána vpravo

7

Závěr

V předkládané práci byly definovány ČV, jejich parametry a popsány vlivy těchto výbojů. Dále byla stručně popsána konvenční galvanická, elektromagnetická a TEV metoda měření ČV. Následně stručně popsány metody nekonvenční akustické, chemické a optické.

Detailně byla popsána koncepce akustické metody a to především konstrukce jednotlivých snímačů a princip jejich funkce. U jednotlivých snímačů byl definován současný stav a případně popsáno zařízení od konkrétního výrobce.

V práci byly definovány parametry akustické emise. Blíže specifikovány druhy šíření ultrazvukových vln a jejich rychlost šíření v různém prostředí. Dále byl popsán princip lokalizace pro jednorozměrné, dvojrozměrné a prostorové prostředí.

Součástí práce je návrh obvodu pro snímání akustického signálu pomocí piezoelektrické membrány a MEMS akcelerometru přiloženým k nádobě s transformátorovým olejem. Měření byla provedena pro následující provedení snímačů:

- Piezomembránou bez ozvučnice
- Piezomembránou s ozvučnicí
- MEMS akcelerometrem

Ozvučnice a sestava akcelerometru byla navržena v CAD programu *Catia* a následně zhotovena pomocí trojrozměrného tisku. Jako zdroj AE bylo zrealizováno jiskřiště. Jiskřiště disponuje výstupem ze spínacího obvodu, který slouží k určení času vzniku výboje. Výsledný záznam signálu byl zpracován osciloskopem a zvukovou kartou v počítači. V případě záznamu signálu zvukovou kartou byl před zvukovou kartu umístěn zrealizovaný předzesilovač, aby byla zajištěna dostačující úroveň signálu.

U měření s piezomembránou bylo docíleno vyšší citlivosti nalepením na nádobu bez ozvučnice. Nejvyšší citlivosti bylo docíleno měřením MEMS akcelerometrem.

Při ponoření jiskřiště do nádoby s transformátorovým olejem bylo možné měřit četnost výbojů pouze v řádech jednotek za vteřinu, a proto nebylo možné měřit frekvenční charakteristiku z důvodu vyšší elektrické pevnosti oleje v porovnání se vzduchem. Na vzduchu bylo možné nastavit frekvenci jiskřiště až do jednotek kHz.

Literatura

- [1] KREIDL, Marcel a ŠMÍD, Radislav. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. 406 s. Senzory neelektrických veličin; 4. ISBN 80-7300-158-6.
- [2] OBRAZ, Jaroslav. *Ultrazvuk v měřicí technice*. 2., upr. vyd. Praha: SNTL, 1984. 485 s.
- [3] MUHR, M.: *IEC 62478 A Prospective Standard for Acoustic and Electromagnetic Partial Discharge Measurements*. University of Technology Graz 2009.
- [4] GHOSH, R.; CHATTERJEE B.; DALAI S. *A method for the localization of partial discharge sources using partial discharge pulse information from acoustic emissions*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, Volume: 24, Issue: 1
- [5] KRAETGE A.; HOEK S.; KOCH M.; KOLTUNOWICZ W. *Robust measurement, monitoring and analysis of partial discharges in transformers and other HV apparatus*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, Volume: 20, Issue: 6
- [6] BELTLE, Michael; COENEN, S.; MUELLER, A.; KORNHUBER, Stefan. *UHF and Acoustic Partial Discharge Localisation in Power Transformers*. International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, 2011.
- [7] HAUSCHILD, Wolfgang. *High-voltage test and measuring techniques*. Heidelberg: Springer, [2013]. ISBN 978-364-2453-519.
- [8] MARTÍNEK, P.: *Teoretická a experimentální analýza částečných výbojů v dielektriku elektrických strojů*. Disertační práce ZČU, Plzeň 2005.
- [9] de CASTRO, Bruno; de MELO BRUNINY, Danilo; BAPTISTA, Fabricio; ANDREOLI, Andre; COVOLAN ULSON, Alfredo. *Assessment of Macro Fiber Composite Sensors for Measurement of Acoustic Partial Discharge Signals in Power Transformers*. (2017) IEEE Sensors Journal. PP. 1-1. 10.1109/JSEN.2017.2735858.
- [10] ČSN EN 60270: *Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů*. Praha: úřad pro technickou normalizaci metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

- [11] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2005. 135 s. Česká matice technická; roč. 110, č. spisu 501. ISBN 80-200-1358-X.
- [12] KRUGER, Michael; HOEK, S. *Transformer Life Management Symposium Düsseldorf / Neuss 2014 Fault investigation on transformers with electric measurement methods fehlerengrenzung an transformatoren mit hilfe elektrischer messverfahren*. Austria. (2014)
- [13] TENBOHLEN, S.; SIEGEL, M.; BELTLE, M. *Partial Discharge Monitoring of Power Transformers by UHF Sensors* [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.ieh.uni-stuttgart.de/dokumente/publikationen/2016'Siegel'Beltle'Partial'Discharge Monitoring'of'Power'Transformers'by'UHF'Sensors.pdf>
- [14] ČÁP, Martin. *Detekce a prostorová lokalizace částečných výbojů ve výkonových transformátorech metodou UHF*. Brno, 2016/2017. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Petr Drexler.
- [15] OKABE, S.; UETA, G.; HAMA H.; ITO T.; HIKITA M.; OKUBO, H. *New aspects of UHF PD diagnostics on gas-insulated systems*, in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 21, no. 5, pp. 2245-2258, Oct. 2014. doi: 10.1109/TDEI.2014.004391
- [16] MARKALOUS, S. M.; STREHL, T. *New approaches in arrival time-based PD location in transformers*, 2006 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Kansas City, MO, 2006, pp. 652-655. doi: 10.1109/CE-IDP.2006.312016
- [17] *Smart-Material* [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.smart-material.com/MFC-product-main.html>
- [18] *ResearchGate* [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/228362906>
- [19] *PHYSICAL ACOUSTICS* [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <http://www.physicalacoustics.com/content/literature/sensors/Model'R15I-AST.pdf>
- [20] ŠŤASTNÝ, Jiří a REMEK, Branko. *Autoelektrika a autoelektronika.2.*, opr. vyd. Praha: Nakladatelství T. Malina, 1995. ISBN 80-900759-9-1.
- [21] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.

- [22] SMETANA, Ctirad. *Praktická elektroakustika*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [23] *EA Technology* [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.eatechnology.com/engineering-products/partial-discharge-solutions/>
- [24] *NL acoustics* [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://nlacoustics.com/>
- [25] *EKOLA Group* [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <http://www.ekolagroup.cz/cs/akusticka-kamera/>
- [26] BUJALOBOKOVÁ, M. a TRNKA, P. *Detekce poruch vn strojů analýzou výbojové činnosti se zaměřením na transformátory* [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/77336504-Detekce-poruch-vn-stroj-analyzou-vybojove-innosti-se-zamenim-na-transformatory.html>
- [27] LUO, Guomin. *Transient earth voltage (TEV) based partial discharge detection and analysis* [online]. Nanyang, 2013 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://repository.ntu.edu.sg/handle/10356/54865>. Diplomová práce. Technological University.
- [28] TIAN, Y.; LEWIN, P. L.; POMMERENKE, D.; WILKINSON, J. S.; SUTTON, S. J. *Partial discharge on-line monitoring for HV cable systems using electro-optic modulators* [online]. IEEE, 2004 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1349792&isnumber=29684>. Diplomová práce. Technological University.
- [29] BOLTZE, M. *Teilentladungs-Detektion an Hochspannungs- und Mittelspannungsschaltanlagen im Rahmen von Abnahme- und Inspektionsprüfungen*. Doble-Lemke GmbH, Deutschland 2012.
- [30] *GM electronic* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.641-001.1.pdf>
- [31] *OFIL SYSTEMS* [online]. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <http://www.ofilsystems.com/products/superb.html>

Příloha A

Cenová kalkulace

Tab. A.1

| Počet kusů | Název | Cena Kč/ks |
|------------|--|------------|
| 1 | Krabička dvoudílná KP 58 ABS a ozvučnice | 50 |
| 1 | 9V Baterie | 18 |
| 1 | BNC kabel | 41 |
| 1 | Bateriové pouzdro 9V | 6 |
| 1 | Fólie pro výrobu plošných spojů | 90 |
| 1 | Kuprextit deska | 60 |
| 1 | Patice DIL08 | 7,90 |
| 1 | Operační zesilovač TLC27L2CP | 27 |
| 1 | Páčkový spínač SMTS-102 | 11 |
| 2 | Piezokeramický měnič 27mm | 15 |
| 1 | Svorkovnice | 6,10 |
| 2 | Koaxiální konektor BNC | 15 |
| 2 | Keramický kondenzátor 1 μ F | 4,10 |
| 1 | Keramický kondenzátor 100 nF | 2,60 |
| 1 | Potenciometr 25 k Ω | 17 |
| 1 | Uhlíkový rezistor 1 M Ω 0,5 W | 2,60 |

Tabulka pokračuje na další straně...

Tab. A.1 – pokračování

| Počet kusů | Název | Cena Kč/ks |
|------------|--|------------|
| 2 | Uhlíkový rezistor 22 k Ω 0,5 W | 2,60 |
| 1 | Uhlíkový rezistor 100 k Ω 0,5 W | 2,60 |
| 1 | Uhlíkový rezistor 15 k Ω 0,5 W | 2,10 |
| 1 | Uhlíkový rezistor 10 k Ω 0,6 W | 2,60 |
| 1 | Uhlíkový rezistor 820 Ω 0,6 W | 2,60 |
| 1 | Uhlíkový rezistor 1 k Ω 0,5 W | 2,60 |
| 1 | Ozvučnice 3D tisk | 50 |
| 1 | skleněná dosedací ploška | 20 |

Tab. A.1: Cenová kalkulace předzesilovače a piezoelektrického snímače

Tab. A.2

| Počet kusů | Název | Cena Kč/ks |
|------------|--|------------|
| 1 | Krabička dvoudílná 3D tisk | 100 |
| 1 | Modul tříosého akcelerometru, analogový výstup | 198 |
| 1 | Páčkový spínač SMTS-102 | 11 |
| 3 | Koaxiální konektor BNC | 15 |
| 1 | Držák baterie do DPS BH2430 | 23 |
| 1 | Baterie lithiová CR2430 3 V | 33 |

Tab. A.2: Cenová kalkulace sestavy akcelerometru

Tab. A.3

| Počet kusů | Název | Cena Kč/ks |
|------------|------------------------|------------|
| 1 | Krabička čtyřdílná | 110 |
| 1 | Koaxiální konektor BNC | 15 |
| 1 | Páčkový spínač | 22 |

Tabulka pokračuje na další straně...

Tab. A.3 – pokračování

| Počet kusů | Název | Cena Kč/ks |
|------------|---------------------------------------|------------|
| 1 | Unipolární tranzistor IRF840 | 24 |
| 1 | Zapalovací cívka 6 V + svíčka | - |
| 1 | Rezistor 1 k Ω 0,5 W | 2 |
| 1 | Rezistor 1 k Ω 1 W | 2 |
| 1 | Bipolární tranzistor BC337 | 1,70 |
| 1 | Arduino nano | 100 |
| 2 | Elektrolytický kondenzátor 2200uF/63V | 39 |
| 1 | Diodový můstek | 14 |
| 1 | Transformátor 12V | - |
| 1 | Pojistka T 2A + pouzdro | 14 |

Tab. A.3: Cenová kalkulace sestavy jiskřiště

Příloha B

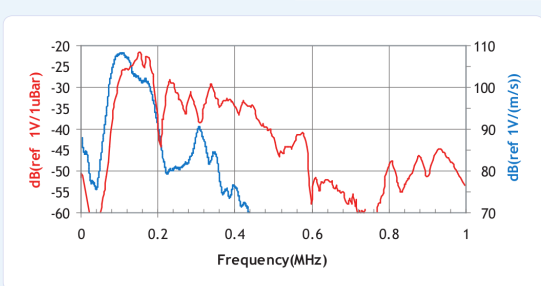
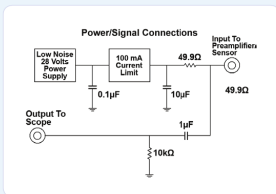
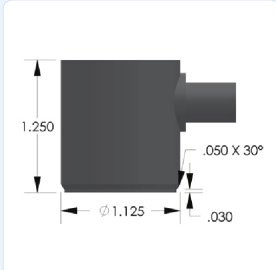
Datové listy



Product Data Sheet

R15i-ast sensor

Integral Preamplifier Sensor



Description and Features

Physical Acoustics' integral preamp sensors were specifically engineered to attain high sensitivity and have the capability to drive long cables without the need for a separate preamplifier. Incorporating a low-noise input, 40 dB preamplifier and a filter all inside the sensor housing, these transducers are completely enclosed in metal stainless steel (or aluminum) housings that are treated to minimize RFI/EMI interference. Care has also been taken to thermally isolate the critical input stage of the preamplifier in order to provide excellent temperature stability over the range of -35° to 75° C.

Their integrated Auto Sensor Test (AST*) capability allows these sensors to pulse as well as receive. This feature lets you verify the sensor coupling and performance at any time throughout the test.

Applications

This general purpose sensor provides a good mix of high sensitivity and high low frequency reject on. These properties make it very useful for monitoring common structures such as pipelines, vessels, bridges, and storage tanks in petroleum, refineries, chemical plants, of shore platforms, as well as factory and process monitoring applications. It is Physical Acoustics' most popular and highest volume selling sensor.

Operating Specifications

Dynamic

| | |
|--------------------------------------|------------|
| Peak Sensitivity, Ref V/(m/s)..... | 109 dB |
| Peak Sensitivity, Ref V/µbar..... | -22 dB |
| Operating Frequency Range..... | 50-400 kHz |
| Resonant Frequency, Ref V/(m/s)..... | 75 kHz |
| Resonant Frequency, Ref V/µbar..... | 150 kHz |
| Directivity..... | +/-1.5 dB |

Environmental

| | |
|--|-------------|
| Temperature Range..... | -35 to 75°C |
| Shock Limit..... | 500 g |
| Completely enclosed crystal for RFI/EMI immunity | |

Physical

| | |
|--------------------------|-----------------------|
| Dimensions..... | 1.13"OD X 1.23"H |
| | 29 mm OD X 31 mm H |
| Weight..... | 70 grams |
| Case Material..... | Stainless Steel (304) |
| Face Material..... | Ceramic |
| Connector..... | BNC |
| Connector Locations..... | Side |

Electrical

| | |
|-----------------------------|--------------------------------|
| Gain..... | 40 dB |
| Power Requirements..... | 20-30 VDC @ 25 mA |
| Dynamic Range..... | > 87 dB |
| Noise Level (RMS RTI)..... | < 3 µV |
| Output Drive Impedance..... | 50 Ω |
| Grounding..... | Case Grounding, |
| | Isolated from mounting surface |

Ordering Information and Accessories

| | |
|--|------------|
| R15i-AST..... | R15i-AST |
| Cable (specify length in 'XX' m at end of PN)..... | 1234 - X |
| Magnetic Hold-Down..... | MHR15i |
| Amplifier Subsystems..... | AE2A, AE5A |

Sensors include

NIST Calibrate & Warranty

* AST — Auto Sensor Test feature allows AE systems to control the sensor as a pulser and a receiver at the same time. It can therefore characterize its own condition as well as send out a simulated acoustic emission wave that other sensors can detect, so the condition of the nearby sensors also can be tested.



WORLDWIDE HEADQUARTERS:
195 Clarksville Rd •
Princeton Jct, NJ 08550 • USA
T: +1.609.716.4000 • F: +1.609.716.0706
E-MAIL: sales.systems@mistrasgroup.com

CANADA T: +1.403.556.1350
CHINA T: +86.10.5877.3672
FRANCE T: +331.498.26040
GERMANY T: +49.040.2000.4025
GREECE T: +30.210.2846.801

HOLLAND T: +31.010.245.0325
INDIA T: +91.22.2586.2444
JAPAN T: +81.33.498.3570
MIDDLE EAST T: +44(0)1954.231.612
RUSSIA T: +7495.789.4549

SCANDINAVIA T: +46(0)31.252040
S. AMERICA T: +55.11.3082.5111
UK T: +44(0)1954.231.612

Obr. B.1: Datový list R15I-AST. [Převzato z [19]]

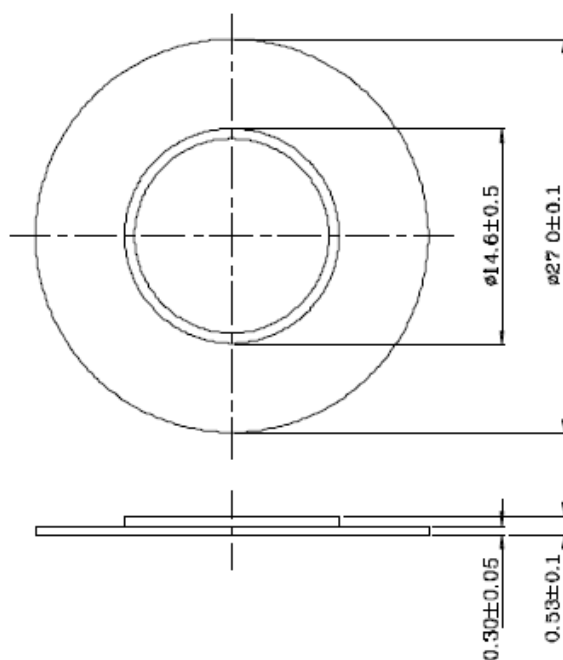
A. SCOPE 範疇

This specification applies piezoelectric diaphragm, KBI-2734
此規格書適用於壓電式蜂鳴片, KBI-2734

B. SPECIFICATION 規格

■ Test condition: TEMP=25°C±2°C Related humidity=65±5%

| No. | Item | Unit | Specification | Condition |
|-----|--------------------------------|------|----------------|------------------------------------|
| 1 | Max. input voltage 最大輸入電壓 | Vp-p | MAX 30 | |
| 2 | Resonant frequency 共振頻率 | KHz | 3.4 ± 0.5 | |
| 3 | Resonant impedance 共振阻抗 | ohm | MAX 1000 | |
| 4 | Electrostatic capacity 靜電容量 | pF | 13,000 ± 30% | at 120Hz/1V |
| 5 | Operating temp. 操作溫度 | °C | -20 ~ +60 | |
| 6 | Storage temp. 儲存溫度 | °C | -20 ~ +70 | |
| 7 | Dimension 尺寸 | mm | φ 27.0 x H0.53 | See appearance drawing 請參照外觀尺寸圖 |
| 8 | MATERIAL 材質 | | BRASS | |

C. APPEARANCE DRAWING 外觀尺寸圖

Tol : ±0.5
Unit: mm

志豐電子股份有限公司 KINGSTATE ELECTRONICS CORP 2/5

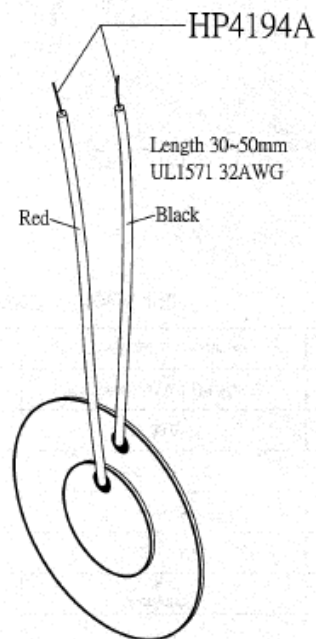
Obr. B.2: Datový list piezokeramického měniče KBI-2734 (1/3). |Převzato z [30]|

D. MEASURING METHOD 測量方法**1. Resonant frequency / Resonant impedance 共振頻率/共振阻抗**

Piezoelectric diaphragm shall be clamped at a node point as shown in following figure to be free from any mechanical stress, and measured its resonant frequency and resonant impedance by using vector impedance analyzer or equivalent.

When the input frequency is swept within 100 Hz to 5KHz, the resonant frequency is defined the frequency where the impedance shows minimum value, and this impedance shall be the resonant impedance

將壓電式振動片之節點夾住,如下圖,在無任何機械壓力狀況下,以交流阻抗分析儀測量其共振頻率及共振阻抗。以掃頻的方式輸入 100Hz~5kHz 頻率,共振頻率為阻抗最低的那一點,且此阻抗即共振阻抗。

**2. Static capacitance 靜電容量**

An electrostatic capacity capacitance shall be measured at 120Hz by using L.C.R. meter, ex HP4194A(H.P.), or equivalent. The part shall be clamped in the same way as the measurement of resonant frequency/ resonant impedance mentioned in the above.

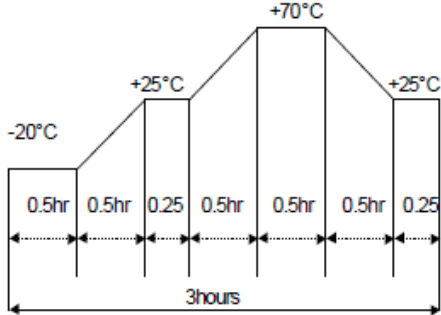
以 HP4194A 測量在 120Hz 時振動片的靜電容量。夾住振動片方式與上述測共振頻率及共振阻抗的夾法相同。

E. MECHANICAL CHARACTERISTICS 機械特性

| No | Item | Test Condition | Evaluation standard |
|----|-------------------|---|---|
| 1 | Vibration 振動試驗 | Diaphragm shall be measured after being applied vibration of amplitude of 1.5mm with 10 to 55Hz band of vibration frequency to each of 3 perpendicular directions for 2 hours. 振動週波數 10~55Hz、全振幅 1.5mm 於 XYZ 3 個方向,各 2 小時。 | The value of resonant frequency should be in $\pm 10\%$, electrostatic capacity should be $\pm 20\%$, which is compared with initial ones . |
| 2 | Shock 衝擊試驗 | Diaphragm shall be measured after being applied shock(980m/s^2) for each three mutually perpendicular directions to each of 3 times by half sine wave. 以加速度 980m/s^2 、1/2 正弦波衝擊施於 XYZ 3 個方向,各 3 回。 | The resonant impedance should be 2000ohm max 與試驗前相較,試驗後的共振頻率變化量須在 $\pm 10\%$ 內,靜電容量須在 $\pm 20\%$ 內,共振阻抗為 2000ohm 以下 |

志豐電子股份有限公司 KINGSTATE ELECTRONICS CORP 3/5

Obr. B.3: Datový list piezokeramického měniče KBI-2734 (2/3). |Převzato z [30]|

| F. ENVIRONMENT TEST 環境測試 | | | |
|--------------------------|----------------------------|---|---|
| No | Item | Test Condition | Evaluation standard |
| 1 | High temp. test 高溫測試 | After being placed in a chamber at +70 °C for 240 hours 置於+70 °C環境中 240 小時 | Being placed for 4 hours at +25°C, diaphragm shall be measured The value of resonant frequency should be in ±10%, electrostatic capacity should be ±20%, which is compared with initial ones . The resonant impedance should be 2000 ohm max. 經測試後，靜置於+25°C（室溫）環境中 4 小時後，與試驗前相較，試驗後的共振頻率變化量須在±10%內，靜電容量須在±20%內，共振阻抗為 2000ohm 以下。 |
| 2 | Low temp. test 低溫測試 | After being placed in a chamber with -20 °C for 240 hours 置於-20 °C 環境中 240 小時 | |
| 3 | Humidity test 相對濕度測試 | After being placed in a chamber at +40 °C and 90±5% relative humidity for 240 hours 置於+40 °C，相對濕度 90±5% 環境中 240 小時 | |
| 4 | Temp. cycle test 溫度循環試驗 | The part shall be subjected to 5 cycles. One cycle shall be consist of. 單體承受溫度循環測試 5 次，其循環內容如圖示：  | |

TEST CONDITION.

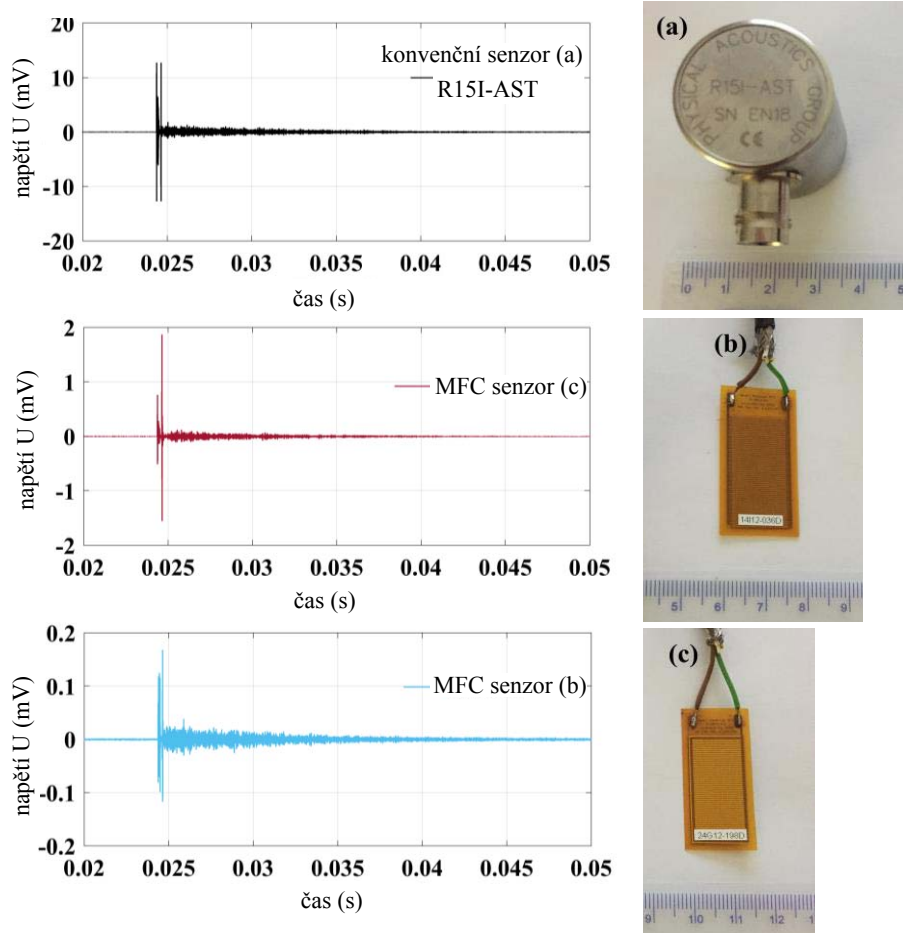
| | | | | |
|------------------------------------|---|----------------------------|----------------------|----------------------------|
| Standard Test Condition 一般測試條件 | : | a) Temperature : +5~+35°C | b) Humidity : 45-85% | c) Pressure : 860-1060mbar |
| Judgement Test Condition 標準測試條件 | : | a) 溫度 : +5~+35°C | b) 濕度 : 45-85% | c) 氣壓 : 860-1060mbar |
| | : | a) Temperature : +25 ± 2°C | b) Humidity : 60-70% | c) Pressure : 860-1060mbar |
| | : | a) 溫度 : +25 ± 2°C | b) 濕度 : 60-70% | c) 氣壓 : 860-1060mbar |

志豐電子股份有限公司 KINGSTATE ELECTRONICS CORP 4/5

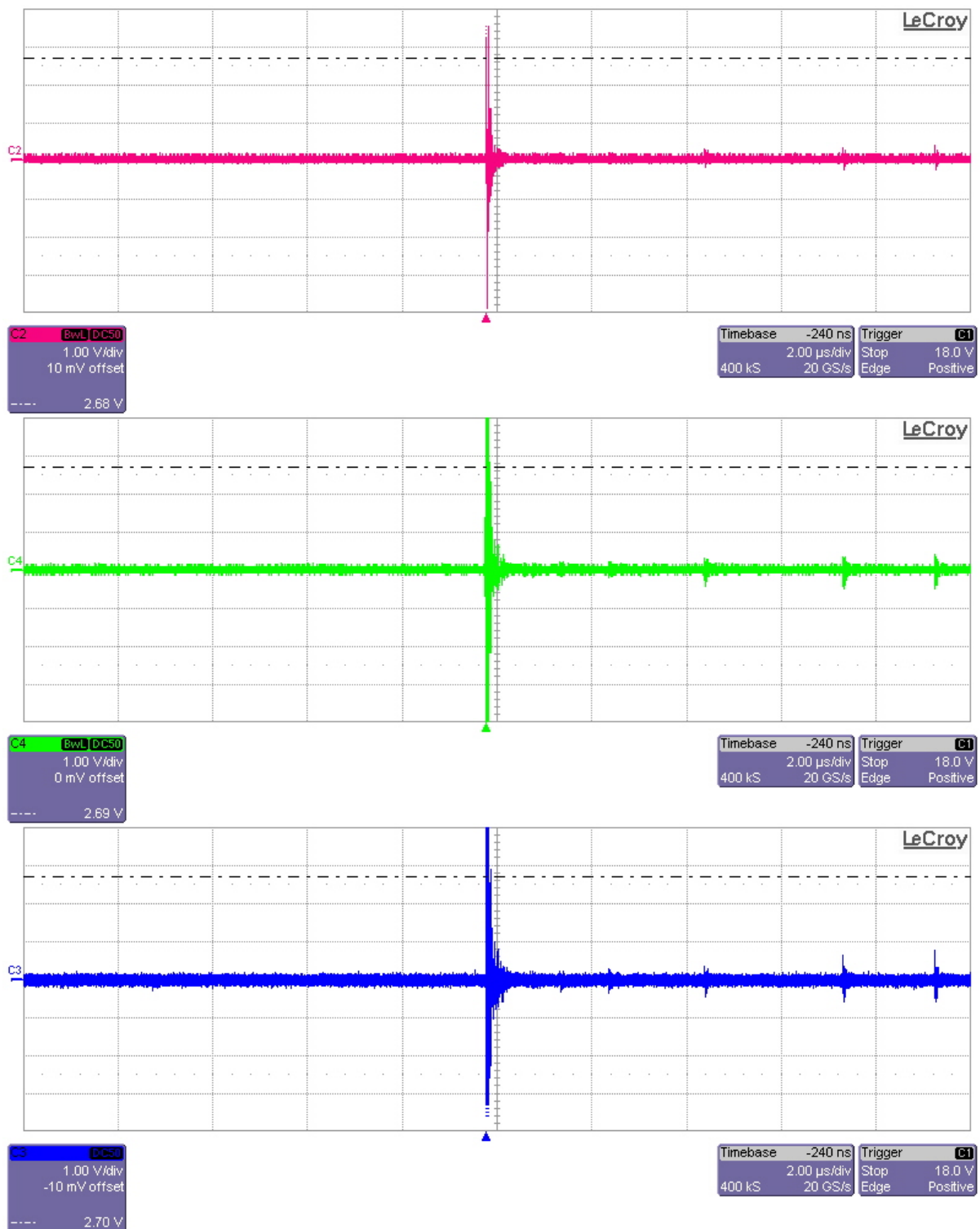
Obr. B.4: Datový list piezokeramického měniče KBI-2734 (3/3). [Převzato z [30]]

Příloha C

Záznamy výbojů



Obr. C.1: Záznam částečných výbojů čidly R15I-AST, MFC-P1 a MFC-P2. |Převzato z [9]|

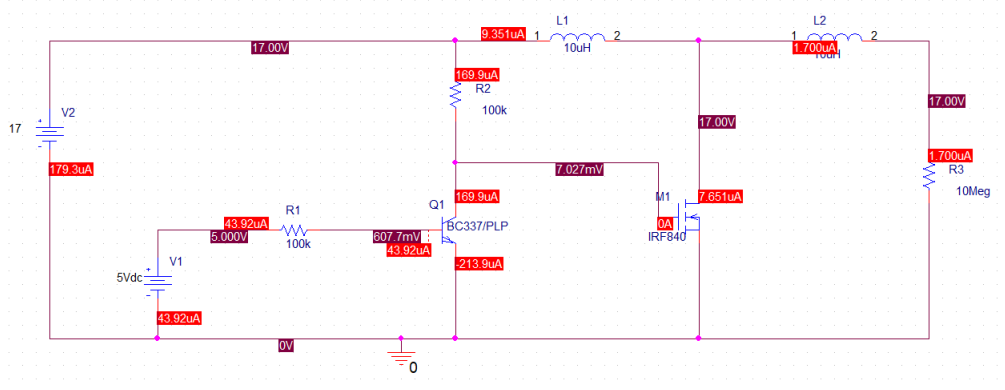


Obr. C.2: Měření výboje MEMS akcelerometrem (x-růžová, y-zelená, z-modrá).

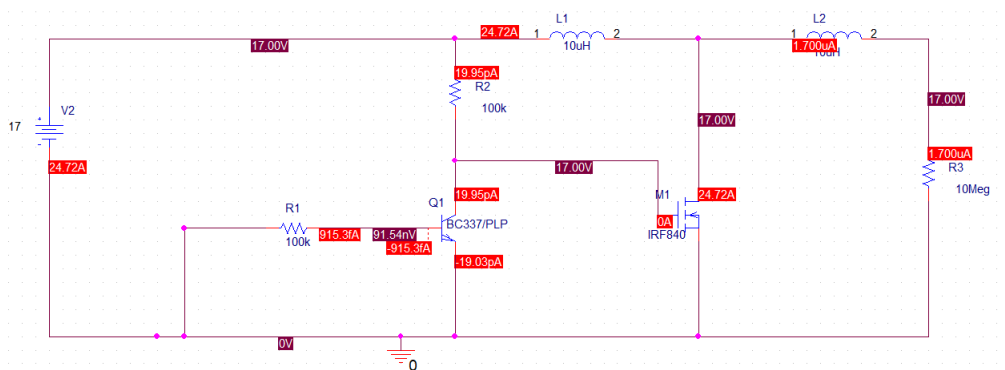
Příloha D

Simulace jiskřiště

Sepnuto (+5 V)



Rozepnuto (0 V)



Obr. D.1: Simulace jiskřiště v programu *PSpice*.