

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra měření

Návrh diagnostického systému pro akustickou detekci částečných výbojů

Bc. Vojtěch Kouřil

Vedoucí: Ing. Radek Sedláček, Ph.D.
Obor: Elektronika a komunikace
Studijní program: Elektronika
Leden 2024

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Radku Sedláčkovi, za jeho odborné vedení a neobyčejnou trpělivost, které mi byly motivací při dokončování této práce.

Dále bych chtěl poděkovat svým kolegům v práci, kteří mi umožnili věnovat cenný čas laboratorním zkouškám a pomáhali mi s jejich přípravou, a měli užitečné nápady a připomínky během vývoje měřicího systému.

Velký dík patří také mé rodině za neochvějnou podporu, kterou mi během zpracování diplomové práce poskytla.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 1. ledna 2024

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá metodikou měření částečných výbojů s důrazem na akustické měření, následný návrh měřicího systému a jeho testování v laboratoři, posléze též na zařízení v reálném provozu. V teoretické části jsou popsány charakteristiky částečných výbojů a problematika jejich detekce a lokalizace. V praktické části je popis návrhu a implementace měřicího systému pro lokalizaci částečných výbojů. Testování v laboratoři prokázalo funkčnost systému a schopnost detekce a lokalizace výbojů, výsledky testů na zařízení v reálném provozu však nebyly schopny potvrdit použitelnost při provozním měření.

Klíčová slova: částečné výboje, měření, ultrazvuk, lokalizace

Vedoucí: Ing. Radek Sedláček, Ph.D.
ČVUT FEL,
Technická 2,
Praha 6

Abstract

This diploma thesis describes the methodology of measuring partial discharges with an emphasis on acoustic measurement, design of the measuring system and its testing in the laboratory and on a real equipment. The theoretical part describes the characteristics of partial discharges and the issue of their detection and localization. In the practical part, there is a description of the design and implementation of the measuring system for the localization of partial discharges. Testing in the laboratory proved the functionality of the system and the ability to detect and localize discharges, but the results of tests on real equipment were not able to confirm usability during on-field measurements.

Keywords: partial discharges, measurement, ultrasonic, localization

Title translation: Diagnostics system for partial discharge acoustic detection

Obsah

1 Úvod	1	3 Měření akustické emise	11
2 Teoretická část	3	3.1 Akustická emise	11
2.1 Částečné výboje	3	3.2 Metody lokalizace pomocí akustické detekce	13
2.1.1 Charakteristické veličiny	4	3.2.1 Amplitudová metoda	13
2.2 Metody měření částečných výbojů	5	3.2.2 Triangulace se známou rychlostí šíření - 2D	14
2.2.1 Elektrická metoda - vazební kondenzátor	5	3.2.3 Triangulace se známou rychlostí šíření - 3D	15
2.2.2 Elektrická metoda - vysokofrekvenční proudový transformátor	6	3.3 Měřicí systémy	16
2.2.3 Elektrická metoda - ztrátový činitel	6	3.3.1 Čistě akustický systém.....	17
2.2.4 Radiofrekvenční metoda - VHF	7	3.3.2 Elektro-akustický kombinovaný systém	17
2.2.5 Radiofrekvenční metoda - UHF	8	3.3.3 Online monitoring	17
2.2.6 Optická metoda	8	3.4 Požadavky na měřicí systém ...	18
2.2.7 Analýza rozpuštěných plynů - DGA.....	9	3.4.1 Záznamový systém	18
2.2.8 Akustické metody	10	3.4.2 Senzory	18
		3.4.3 Úprava signálu	20
		4 Návrh a implementace	21
		4.1 Hardware	22

4.1.1 Senzor	22
4.1.2 Předzesilovač	23
4.1.3 Záznam dat	26
4.2 Software	27
4.2.1 Záznam	28
4.2.2 Přenos dat	29
4.2.3 Zpracování dat	31
5 Testování	35
5.1 Testování v laboratorním prostředí	35
5.2 Testování na reálném zařízení ..	46
6 Závěr	51
A Literatura	53
B Zadání práce	55

Obrázky

2.1 Umístění vysokofrekvenčního proudového transformátoru na zemnicím spoji [1]	7
2.2 Systém pro měření částečných výbojů pomocí ztrátového činitele [2] 7	
2.3 Duvalův trojúhelník, převzato z [3] 9	
3.1 Základní princip měření akustické emise [4]	12
3.2 Extrakce klíčových parametrů signálového impulsu [4]	13
3.3 Příklad triangulace ve 2D prostoru [5]	14
4.1 Blokové schéma návrhu měřicího systému	21
4.2 Senzor akustické emise PXR15	22
4.3 Frekvenční charakteristika senzoru PXR15 uvedená výrobcem, převzato z https://www.ndttech.net/ae/sensors/pxr-series.html	23
4.4 Zjednodušené schéma fantomového napájení	24
4.5 Předzesilovač s fantomovým napaječem	25
4.6 Naměřená frekvenční charakteristika předzesilovače	25
4.7 Osciloskop OWON VDS3104	27
4.8 Blokové schéma softwarového systému	28
4.9 Schéma komunikace pomocí SCPI na TCP/IP protokolu	30
4.10 Hlavní okno programu AE Event Locator	32
4.11 Amplitudové spektrum použitého FIR filtru	32
5.1 Testovací nádoba s jiskřištěm (bez oleje)	36
5.2 Testovací sestava pro testování odezvy na vzduchu	36
5.3 Schéma testovacího obvodu se stejnosměrným zdrojem napětí	37
5.4 Odezva na výboj ve vzduchu, vzdálenost sonda-jiskřiště cca 10 cm 37	
5.5 Odezva na výboj v oleji, vzdálenost sonda-jiskřiště cca 10 cm	38
5.6 Odezva na výboj v oleji, detail na elektrickou vazbu a začátek akustické odezvy, vzdálenost sonda-jiskřiště cca 10 cm	39

5.7 Schéma pozic jiskřiště v testovací nádobě	39	5.17 Pozice naměřených bodů při testování lokalizace v bodě E, rovina X-Y	44
5.8 Výsledky z programu AE Event Locator při testování lokalizace v bodě A	40	5.18 Výsledky z programu AE Event Locator při testování lokalizace v bodě F	45
5.9 Pozice naměřených bodů při testování lokalizace v bodě A, rovina X-Y	40	5.19 Pozice naměřených bodů při testování lokalizace v bodě F, rovina X-Y	45
5.10 Výsledky z programu AE Event Locator při testování lokalizace v bodě B	41	5.20 Štítek transformátoru (Hesia Bratislava)	47
5.11 Pozice naměřených bodů při testování lokalizace v bodě B, rovina X-Y	41	5.21 Rozmístění ultrazvukových sond (Hesia Bratislava)	47
5.12 Výsledky z programu AE Event Locator při testování lokalizace v bodě C	42	5.22 Měřicí systém - záznamová jednotka se zesilovači a laptopem pro záznam hodnot	48
5.13 Pozice naměřených bodů při testování lokalizace v bodě C, rovina X-Y	42	5.23 Měřený transformátor s rozmístěnými ultrazvukovými sondami (Hesia Bratislava)	48
5.14 Výsledky z programu AE Event Locator při testování lokalizace v bodě D	43	5.24 Průběhy signálu po digitální filtraci z jednotlivých sond (CH1 až CH4)	49
5.15 Pozice naměřených bodů při testování lokalizace v bodě D, rovina X-Y	43		
5.16 Výsledky z programu AE Event Locator při testování lokalizace v bodě E	44		

Tabulky

4.1 Parametry senzoru PXR15	22
4.2 Parametry předzesilovače sE DM2 TNT	24
4.3 Parametry osciloskopu OWON VDS3104	26
5.1 Statistika výsledků testování lokalizace v laboratorním prostředí	46
5.2 Výsledky měření transformátoru z Hesia Bratislava	49

Kapitola 1

Úvod

S vysokonapětovými stroji se setkáváme v mnoha odvětvích energetického průmyslu, ať už jako generátory zdrojových systémů, nebo transformátory přenosových soustav. Vždy se jedná o rozměrná zařízení s vysokou pořizovací cenou a z toho plyne i požadavek na jejich dlouhou životnost v prakticky nepřetržitém provozu. Odstavení těchto strojů v důsledku poruchy, nebo dokonce jejich nevratná destrukce v případě havárie, přináší jejich provozovateli nejen nemalé ekonomické ztráty, ale i související problémy v oblasti bezpečnosti práce, či ohrožení životního prostředí.

Z těchto důvodů byly vyvinuty diagnostické metody, které mají předejít neplánovanému odstavení, či havárii strojů. Tyto diagnostické metody jsou zaměřeny na vyhodnocení izolačního stavu vinutí strojů, které je namáháno v důsledku mechanické, elektrické i tepelné zátěže. V důsledku poškození vinutí dochází k měřitelným změnám izolačního stavu, které se projeví

- snížením odporu izolace (metoda měření odporu stejnosměrným proudem)
- změnou kapacity a ztrátového činitele (metoda měření střídavým proudem)
- výboji na transformátorových vinutích a v jejich izolaci (metoda měření částečných výbojů)

Poslední z uvedených metod se věnuje i tato práce, která řeší návrh měřícího systému pro detekci částečných výbojů. Metod pro detekci a měření částečných

výbojů se používá více druhů, každá z těchto metod se zaměřuje na různé fyzikální projevy probíhající výbojové činnosti při provozu VN strojů. Jedním z projevů výbojové činnosti jsou mimo jiné také akustické emise, zejména v ultrazvukové oblasti. Měřením akustických emisí ve vhodném frekvenčním pásmu lze detekovat výbojovou činnost a ve vhodných podmínkách též pomocí této metody lokalizovat zdroj emisí, což významně zvyšuje pravděpodobnost odhalení a identifikace závady na stroji.

V následující kapitole práce pojednává o vzniku částečných výbojů, jejich projevech a metodách jejich měření. Kapitola 3 řeší teoretické principy funkce měřicího systému a stanovuje požadavky návrhu. V kapitole 4 je popis implementace měřicího systému a rozpracovává podrobně navržené schéma. Kapitola 5 obsahuje výsledky testování navrženého systému. Shrnutí výsledků a závěrečná stanovisko obsahuje kapitola 6.

Kapitola 2

Teoretická část

Důležitým krokem během návrhu měřicích systémů je shrnutí teoretických principů, na jejichž základě je měřicí systém postaven. V této části se věnuji nejdříve popisu částečných výbojů, příčinám jejich vzniku, jejich projevům a metodám jejich měření.

2.1 Částečné výboje

Částečný výboj je dle české technické normy IEC 60270 definován jako *lokální elektrický výboj, který pouze částečně přemostuje izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče*. Výbojová činnost zpravidla vzniká na povrchu izolace nebo uvnitř izolace, v místech s vysokou lokální koncentrací elektrického napětí. Výsledkem jsou proudové impulzy, které se mohou projevovat produkcí zvuku, vyzařováním světla, tepla a chemickými reakcemi. Tyto impulzy bývají zpravidla kratší než $1 \mu s$. Nejčastěji se tak částečné výboje projevují v místech se sníženou dielektrickou pevností a vedou k postupné degradaci izolačního materiálu, případně až k jeho destrukci. [6] Mezi tyto účinky řadíme:

- Elektroerozivní účinky - vznikají v důsledku vytvoření elektrického oblouku v izolantu nebo na povrchu izolantu. Proud elektronů a iontů poškozují elektrickou izolaci v okolí vodivého kanálu oblouku a dochází

k dalšímu rozšiřování vodivého kanálu. Tímto způsobem může nastat i lokální proražení izolantu.

- Tepelné účinky - teplotním ohřevem v důsledku procházejícího proudu se dále snižuje dielektrická pevnost izolace a povrchová vodivost, což vede ke zvýšení intenzity výbojové činnosti
- Chemické účinky - při elektrickém výboji zejména v plynném či kapalném prostředí vznikají agresivní chemické látky (např. ozon, jenž má silné oxidační účinky), které se dále podílejí na chemickém rozkladu izolace

Podle místa vzniku dělíme částečné výboje na:

- Vnější (externí) částečné výboje - částečné výboje v plynech v okolí elektrod malých poloměrů nebo zakřivení, jako např. doutnavé výboje a korónové výboje
- Vnitřní (interní) částečné výboje - částečné výboje v plynech, obklopené pevným či kapalným dielektrikem, jako např. výboje v plynných dutinkách v pevném izolantu
- Povrchové částečné výboje - částečné výboje v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného izolantu, např. klouzavé, nebo drážkové výboje

■ 2.1.1 Charakteristické veličiny

Pro vyhodnocování elektrického měření částečných výbojů se používají tzv. charakteristické veličiny, neboli parametry výbojů. Ty slouží pro měření a kvantifikaci výbojové činnosti, a používají se pro základní vyhodnocování aktivity částečných výbojů.

- Zdánlivý náboj q (apparent charge 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 částečného výboje. Zdánlivý náboj je obvykle vyjádřen v pikocoulombech (pC)
- Četnost impulzů n (pulse repetition rate n): je poměr mezi celkovým počtem impulzů částečných výbojů zaznamenaných ve vybraném časovém intervalu a dobou trvání tohoto intervalu. Bývá vyjádřena v s^{-1} . V praxi jsou uvažovány pouze impulzy nad určitou úrovní nebo v rámci úrovní předepsaného rozsahu

- Opakovací kmitočet impulzů N (pulse repetition frequency N): je počet impulzů částečných výbojů za sekundu v případě stejně vzdálených impulzů
- Fázový úhel φ : popisuje pozici impulzu vzhledem vůči fázi budícího napětí

2.2 Metody měření částečných výbojů

Problematika měření částečných výbojů je spojena s tím, že částečné výboje nemohou být měřeny přímou metodou. Komplikovaná je nejen jejich přesná lokalizace, ale problémy jsou i s měřením elektrických kvantit samotného výboje. Jednotlivé metody jsou proto založeny na měření vedlejších produktů výboje jako elektrické veličiny, chemické změny, elektromagnetické emise, vibrace, zvuk, světlo či teplo. Každá z těchto veličin má své výhody a nevýhody pro měření a detekci částečných výbojů. Níže jsou popsány jednotlivé měřicí metody pro měření částečných výbojů na výkonových transformátorech: [7]

2.2.1 Elektrická metoda - vazební kondenzátor

Jedná se o standardní a rozšířenou metodu, popsanou mezinárodní normou IEC 60270 [6] nebo také českou normou ČSN EN 60270 [8]. Používá se především pro měření ve výrobě a při výrobních zkouškách. Metoda využívá měření napětí na vazebním kondenzátoru připojeného k měřenému zařízení. Do obvodu je nejdříve vyslán kalibrační puls s definovanou velikostí náboje, který je zaznamenán jako změna napětí na vazebním kondenzátoru. Zaznamenaný napěťový rozdíl pak odpovídá ekvivalentnímu náboji (tzv. zdánlivý náboj) o velikosti kalibračního náboje, velikost zdánlivého náboje se měří v pC. Pro kalibraci se používá nábojový impuls s velikostí srovnatelnou s odhadovanou mírou výbojové činnosti na zařízení, běžně používaný rozsah je od jednotek pC (používaných při výrobních zkouškách), až po desítky či stovky tisíc pC (pro měření v terénu).

Mezi hlavní výhody metody elektrického měření přes vazební kondenzátor patří možnost kalibrovat měřicí aparaturu pro každé měřené zařízení zvlášť. Je tak možné měřit velikost výboje skrze zdánlivý náboj. Další výhodou je široká škála zařízení, kde lze metodu s vazebním kondenzátorem použít - používá se nejen při měření na výkonových transformátorech, ale také na dalších

elektrických zařízeních jako jsou sekce zapouzdřených rozvodů, tlumivky či vinutí motorů.

Nevýhodou této metody je nutnost instalace vazebního kondenzátoru na elektrické zařízení, k čemuž je nutné zařízení odstavit. Měření tak nelze provádět za provozu. Napájení pro měření musí být také nejlépe z bezvýbojového zdroje napětí, což dále zvyšuje nároky na měřicí aparaturu. Přesnost metody při měření v terénu je ovlivněna především šumovými vlivy okolního prostředí, což pak určuje minimální detekovatelnou hladinu výbojů na daném šumovém pozadí.

■ 2.2.2 Elektrická metoda - vysokofrekvenční proudový transformátor

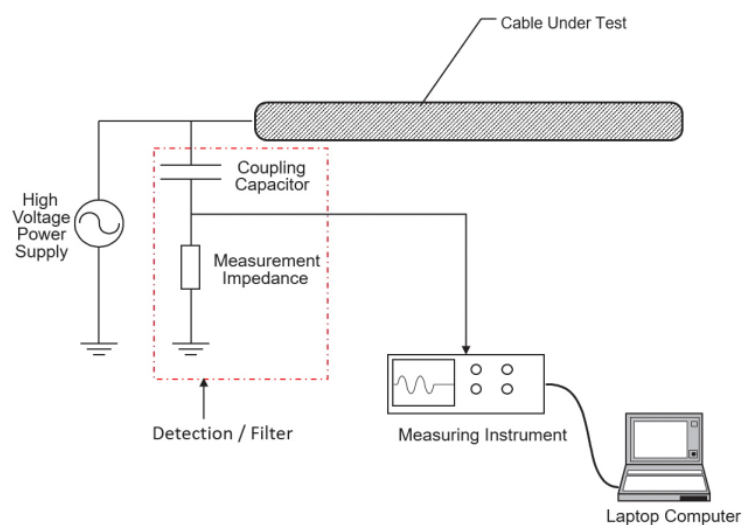
Vysokofrekvenční proudové transformátory (Radio-Frequency Current Transformers, RFCT) jsou určeny k měření proudu při frekvencích v řádu desítek až stovek MHz. Mohou být umístěny na průchodce nebo na zemnicím spoji (viz obrázek 2.1). Obecně je metoda měření částečných výbojů pomocí RFCT považována za neinvazivní, nicméně jejich instalace může vyžadovat odstávku stroje. Jejich instalace je nenáročná, zejména při použití kleštové konstrukce a mohou být použity pro offline i online měření.

■ 2.2.3 Elektrická metoda - ztrátový činitel

Metoda měření výbojů pomocí ztrátového činitele je založena na principu výkonových ztrát během probíhající výbojové činnosti. Čím vyšší je ztrátový činitel se stoupajícím měřicím napětím, tím více narůstají ztráty v elektrickém obvodu. Je-li nárůst ztrátového činitele příliš vysoký, ukazuje to na možné probíhající výboje na vyšších napěťových hladinách. Obecně se tato metoda používá pro zjištění stavu izolace či odhalení výrobních vad. Měření ztrátového činitele zpravidla probíhá pouze při odstávce za použití externího zdroje napětí, vazebního kondenzátoru a měřicí impedance. Ukázkové schéma zapojení je na obrázku 2.2.



Obrázek 2.1: Umístění vysokofrekvenčního proudového transformátoru na zemním spoji [1]



Obrázek 2.2: Systém pro měření částečných výbojů pomocí ztrátového činitele [2]

2.2.4 Radiofrekvenční metoda - VHF

Vysokofrekvenční měření radiových vln (Very High Frequency, VHF) se zaměřuje na frekvenční rozsah 30 MHz - 300 Mhz. Měření radiových vln produkovaných částečnými výboji je snímáno anténou klasické prutové konstrukce,

něméně jsou používány také obdélníkové antény. Útlum signálu je vyšší a poměr signál-šum má nižší hodnoty než v případě UHF. Tato metoda je vhodná pro měření radiových vln produkovaných během koronové výbojové činnosti, při které se tvoří radiové vlny o frekvenci až 300 MHz. [9]

2.2.5 Radiofrekvenční metoda - UHF

Měření radiových vln v pásmu ultra krátkých vln (Ultra high frequency, UHF) se zaměřuje na frekvenční pásmo 300 MHz - 3 GHz. Pro příjem vln v této frekvenční oblasti se používají obdélníkové antény. UHF měření se vyznačují nižší závislostí na vnějším šumu, nicméně silný vliv na kvalitu měření mohou mít televizní signály či mobilní sítě, které operují ve stejném frekvenčním rozsahu. Je proto doporučováno použití kvalitního stínění od těchto externích vlivů.

V tomto frekvenčním rozsahu také dochází k vyššímu útlumu signálu, zejména při delších vzdálenostech přijímače od zdroje signálu. Výboje přímo v oleji mají horní frekvenční limit v řádu stovek kHz, nicméně při silné výbojové činnosti dochází ke vzniku rozkladových plynů v oleji, ve kterých dále probíhají výboje detekovatelné ve frekvenčním rozsahu UHF. [9]

2.2.6 Optická metoda

Optická metoda operuje s optickým zářením v rozsahu vlnových délek přibližně 160 - 400 nm. Detekuje ultrafialové záření generované korunou, povrchovými výboji či obloukovými výboji. Hlavní část vlnové délky emitované těmito výboji se nachází v pásmu 280 - 400 nm, pro odstínění interferujícího slunečního záření se používá spíše měření v rozsahu 160 - 280 nm. Za použití citlivé kamery a slunečního filtru lze dnes provádět měření i za přímého slunečního světla.

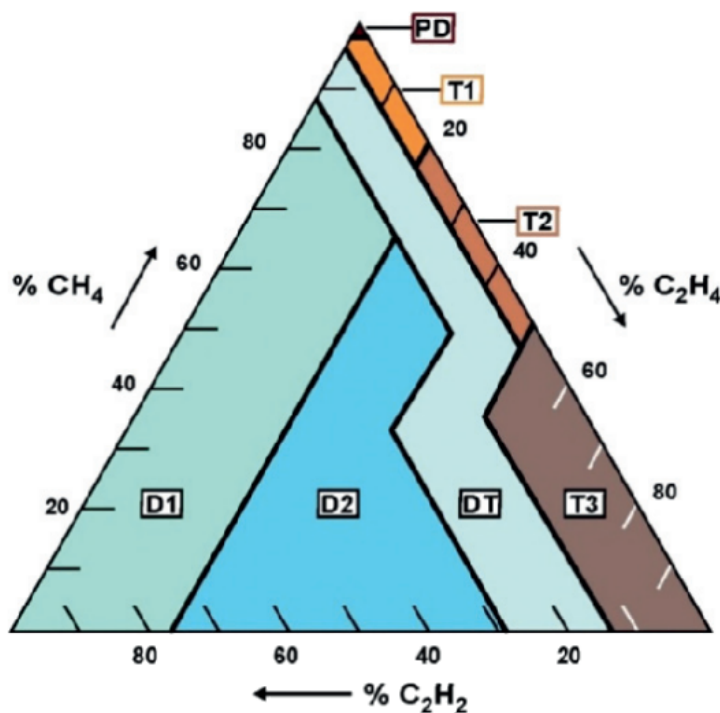
Hlavní nevýhodou této metody je, že vyžaduje přímou viditelnost na zdroj výbojů, což lze použít např. pro měření výbojů v okolí nebo na površích vysokonapěťových kabelů. Tuto metodu však není možné použít např. pro měření výbojů ve výkonových transformátorech. [9]

2.2.7 Analýza rozpuštěných plynů - DGA

Analýza rozpuštěných plynů (Dissolved Gas Analysis, DGA) je metoda detekce výbojů pomocí analýzy oleje a přítomných plynů vzniklých v důsledku výbojové činnosti. Jedná se zejména o vodík s významným obsahem metanu (kolem 10%) a dalšími minoritními složkami. Další zkoumanou složku je obsah uhlovodíků a oxidů uhlíku, které vznikají rozkladem celulózy při probíhající výbojové činnosti.

Metoda DGA je široce používaná pro včasnou detekci výbojové činnosti v olejových transformátorech. Její výhodou je široké spektrum detekovaných plynů - každý plyn je tvořen v jiných podmínkách, z čehož lze určit pravděpodobnou závadu na zařízení. Nevýhodou je, že nelze identifikovat závadu, která se neprojevuje generováním rozpuštěných plynů, nebo která neodpovídá typickým vzorcům ve spektru rozpuštěných plynů. [3]

K vyhodnocení se používá diagram, tzv. Duvalův trojúhelník, který je součástí mezinárodní normy IEC 60599 [10]. Znázorňuje pravděpodobnou příčinu poruchy na poměru obsahu rozpuštěných látek v izolačním oleji. Jednotlivé zóny slouží k identifikaci typu a poškození izolace měřeného objektu.



Obrázek 2.3: Duvalův trojúhelník, převzato z [3]

■ 2.2.8 Akustické metody

Mezi akustické metody řadíme měřicí postupy, které zkoumají vibrace prostředí, kterým se šíří akustické vlny vzniklé v důsledku probíhajících výbojů. V místě vzniku akustické vlny dochází při výboji k prudkému zahřátí dielektrika, což má za následek prudkou změnu tlaku v okolí protékajícího elektrického proudu během výboje. Tento tlakový impuls se dále šíří okolním prostředím, a je detekovatelný akustickými senzory jako akustická vlna.

Hlavní výhodou těchto metod je schopnost lokalizace zdroje akustického vlnění za použití vícesenzorového měření. Výsledky se dále zlepšují při vyšším poměru signál-šum. Nevýhodou je nutnost použití filtrace a zejména rušení v oblasti slyšitelného zvuku (do 20kHz). Také nelze jednoznačně určit velikost výbojů, jelikož na amplitudě akustické vlny hraje roli více faktorů, především vzdálenost, akustický útlum prostředí a jeho útlumové charakteristiky. [9]

Mezi hlavní používané metody řadíme amplitudovou metodu a metodu pomocí lokalizace. Těmto metodám se podrobně věnuji dále v kapitole 3.

Kapitola 3

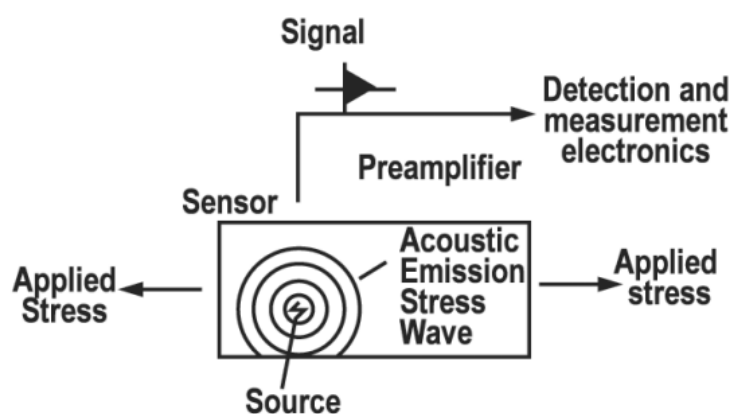
Měření akustické emise

V této kapitole se věnuji problematice měření akustické emise, metodám měření, měřicím systémům a následně požadavkům na měřicí systém.

3.1 Akustická emise

Za akustickou emisi považujeme rázové vlny vzniklé náhlým pohybem, či změnou vlastností materiálu. Klasickým typem vzniku rázové vlny je plastická deformace materiálu či vznik trhlin. V místě deformace dochází ke vzniku rázové vlny, která se pak šíří prostředím a vyvolává odezvu na přiložených senzorech. Princip je znázorněn na obrázku 3.1. Signály ze senzorů jsou poté zesilovány a zaznamenávány pro zpracování dat a jejich interpretaci. Jedná se o nedestruktivní metodu, jejíž výhodou je umístění zdroje signálu přímo v měřeném objektu, a není potřeba vnějšího buzení. Další výhodou je schopnost měřit celý objekt najednou, dovoluje-li to citlivost či počet sond. Měření akustické emise se používá v široké škále aplikací, ať už se jedná o testování mechanických vlastností materiálů v laboratorním prostředí [11], testování mechanických spojů a svárů ve výrobě [12] či testování únavy materiálu v provozu [13].

Akustické vlnění vzniklé náhlou deformací má tvar pulzu a odpovídá energii uvolněné při vzniku. Výška a šířka pulzu závisí na dynamice procesů vzniku vlnění. Vlnění se dále šíří ve všech směrech, může však také vykazovat směrovost v závislosti na procesu vzniku. Během šíření dochází ke změně



Obrázek 3.1: Základní princip měření akustické emise [4]

tvaru vlny, je proto vhodné zachytit signál co nejdříve, v případě velkých měřených objektů je nutné použít širokopásmové senzory. Dalším problémem je detekce odrazů od stejného zdroje - jelikož se šíří akustický signál všemi směry, dochází zpravidla k detekci odrazů, které se liší jak amplitudou, tak časovým zpožděním. Tento problém se dále prohlubuje v případě šíření vlnění v nehomogenním prostředí či v objektech se složitou geometrií.

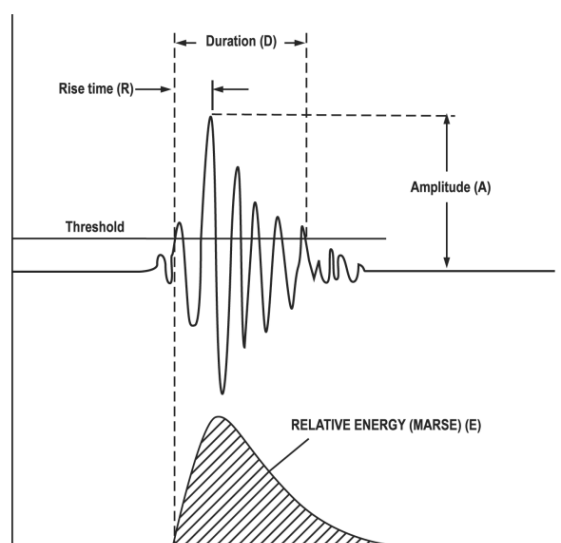
Pro detekování signálu je nezbytné použití komparátoru, který při překročení detekční hladiny spustí záznam signálu. Detekční hladina je klíčový parametr pro detekci signálu a je většinou nastavována ručně. Nastavení detekční hladiny spolu se zesílením předzesilovače má zásadní vliv na citlivost měření.

U prvních analogových přístrojů určených k měření akustické emise byl použit ve spojení s komparátorem čítač náběžných hran, který zaznamenával počet detekovaných přechodů. S narůstajícím zatížením docházelo k větší hustotě přechodů, a tím pádem k rychlejšímu nárůstu hodnoty čítače. Časový průběh hodnoty čítače pak byl vykreslován do XY grafu.

V následující generaci přístrojů založených na digitálním zpracování se ustálilo použití 5 klíčových parametrů: [4]

- Počet přechodů detekční hladiny
- Maximální amplituda impulsu - měřená na logaritmické škále v dBV
- Energie impulsu - měřená integrací obálky usměrněného impulsu
- Délka impulsu - čas od prvního k poslednímu detekovanému přechodu

- Strmost (Rise Time) - čas od první detekce k maximální špičce impulsu



Obrázek 3.2: Extrakce klíčových parametrů signálového impulsu [4]

Se zaznamenanými parametry a časovými průběhy lze dále pracovat, statisticky vyhodnocovat a zpracovávat průběhy. Mezi používaná zobrazení jsou časové průběhy energie v jednotlivých kanálech, nárůst energie impulsu v čase, závislost akustické energie na zatížení a statistiky popisující rozložení amplitudových špiček v čase.

3.2 Metody lokalizace pomocí akustické detekce

Významnou výhodou měření akustické odezvy je schopnost lokalizace zdroje akustického signálu. K tomuto účelu bylo vyvinuto několik metod, které popisují v této sekci.

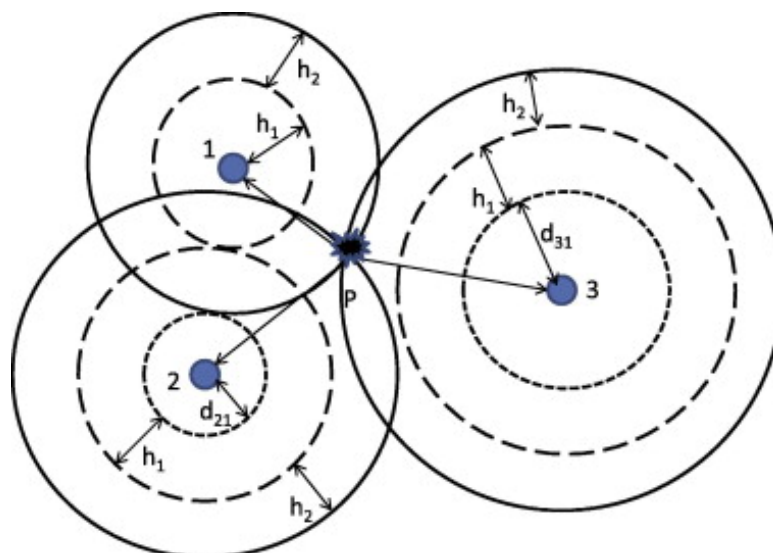
3.2.1 Amplitudová metoda

Nejjednodušší metodou pro lokalizaci zdroje akustického signálu je sledování amplitudy signálu a hledání lokace s největší odezvou. Tato metoda je použitelná pouze v případech, kdy je odezva reprodukovatelná (nedochází ke změně mezi měřeními). Při prvním měření se provede odhad lokace zdroje podle nejvyšší zaznamenané amplitudy signálu. Následně se relokují senzory

do blízkosti odhadované lokace, a provede se nové měření. Touto iterativní metodou lze dosáhnout poměrně dobré přesnosti, nicméně nelze pomocí ní určit hloubku zdroje pod měřeným povrchem. [14]

3.2.2 Triangulace se známou rychlostí šíření - 2D

Triangulační metoda [15] patří mezi nejpoužívanější lokalizační metody pro izotropické homogenní struktury. Metoda vyžaduje použití minimálně $n + 1$ senzorů pro n dimenzí objektu - pro měření 3D objektů je tak nutné využít minimálně 4 senzory, pro měření 2D objektů (např. kovových plechů) stačí 3 senzory. Po umístění senzorů na měřený objekt je změřena vzdálenost mezi jednotlivými senzory.



Obrázek 3.3: Příklad triangulace ve 2D prostoru [5]

Princip triangulace je popsán na obrázku 3.3. Mějme dány pozice 3 senzorů se souřadnicemi X_i, Y_i . V okamžiku vzniku akustického impulsu T_0 v místě P se souřadnicemi X_0, Y_0 se začne signál šířit všemi směry, a k jednotlivým senzorům dorazí v časech T_1, T_2 a T_3 . Jelikož není čas vzniku impulsu (T_0) vždy známý, nelze určit dobu šíření signálu t_1, t_2 a t_3 k jednotlivým senzorům. Dokážeme však vypočítat rozdíly časů t_1, t_2 a t_3 podle časových rozdílů příchodu k jednotlivým senzorům, což popisuje vztah 3.1.

$$t_{ij} = t_i - t_j = (T_i - T_0) - (T_j - T_0) = T_{ij} \quad (3.1)$$

Známe-li rychlost šíření vln v , můžeme tím pádem získat rozdíl drah d_{ij} dle vztahu

$$d_{ij} = v * t_{ij} = \sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2} \quad (3.2)$$

Rozepsáním vztahu 3.2 dostaneme soustavu lineárních rovnic 3.3, jejíž řešením dostaneme pozice X_0, Y_0 . Následně můžeme dopočítat ze vztahu 3.2 čas vzniku impulsu T_0 .

$$\begin{aligned} \sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2} - \sqrt{(X_2 - X_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2} &= v(T_1 - T_2) \\ \sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2} - \sqrt{(X_3 - x_0)^2 + (Y_3 - Y_0)^2} &= v(T_1 - T_3) \end{aligned} \quad (3.3)$$

3.2.3 Triangulace se známou rychlostí šíření - 3D

Princip triangulace můžeme jednoduše rozšířit i pro lokalizaci ve 3D prostoru. Pro kompletní informaci je nutné použití minimálně 4 senzorů se známou pozicí X_i, Y_i, Z_i . Je nutné zajistit, aby se senzory nenacházely v jedné rovině, jinak může dojít k nejednoznačnosti řešení. Stejně jako v případě 2D triangulace se snažíme zjistit čas vzniku akustického impulsu T_0 a jeho souřadnice X_0, Y_0, Z_0 . Vzdálenost d_i senzoru od zdroje signálu můžeme vyjádřit vztahem 3.4:

$$d_i = \sqrt{(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2} \quad (3.4)$$

Šíření akustického signálu je popsáno vztahem 3.2, jehož rozepsáním dostaneme soustavu lineárních rovnic 3.4.

$$\begin{aligned} d_1 &= v(T_1 - T_0) \\ d_2 &= v(T_2 - T_0) \\ d_3 &= v(T_3 - T_0) \\ d_4 &= v(T_4 - T_0) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Jelikož neznáme konkrétní čas vzniku akustického impulzu T_0 , jsme schopni pracovat pouze s časovými rozdíly příchodu signálu k jednotlivým sensorům t_{ij} a vzdálenostmi mezi jednotlivými senzory d_{ij} . Úpravou soustavy rovnic 3.5 získáme:

$$\begin{aligned}d_1 - d_2 &= v(T_1 - T_2) \\d_1 - d_3 &= v(T_1 - T_3) \\d_1 - d_4 &= v(T_1 - T_4)\end{aligned}\tag{3.6}$$

Řešením soustavy 3.6 získáme souřadnice vzniku akustického impulzu X_0, Y_0, Z_0 . Následně můžeme snadno dopočítat T_0 dle vztahu:

$$T_0 = T_1 - \frac{d_1}{v}\tag{3.7}$$

■ 3.3 Měřicí systémy

Akustické měření částečných výbojů se používá jak v laboratoři či zkušebním pracovišti, tak pro měření v provozních podmínkách. Slouží především k doplnění dalších měřicích metod (elektrických, radiofrekvenčních, chemických atd.), nicméně může být použité také k samostatné detekci a lokalizaci částečných výbojů. [9]

Mezi používané měřicí systémy patří:

- čistě akustický systém
- akustický systém v kombinaci s elektrickým měřením
- systém pro online monitorování

■ 3.3.1 Čistě akustický systém

Tento měřicí systém používá soustavu ultrazvukových senzorů ke snímání akustické emise částečných výbojů. Lokalizace zdroje je umožněna buďto použitím více senzorů, nebo měřením v několika měřicích bodech. Při této metodě je vyhledáván zdroj výbojové činnosti hledáním nejvyšší amplitudy detekovaného signálu. Další metodou je srovnání časů výskytu detekované události a lokalizace výbojové činnosti z časových rozdílů šíření akustické emise k jednotlivým senzorům.

Čistě akustický systém nevyžaduje žádné dodatečné měření napětí či proudu na transformátoru, což je výhoda především pro měření v provozních podmínkách. [9]

■ 3.3.2 Elektro-akustický kombinovaný systém

Tento systém využívá detekci částečných výbojů elektrickou metodou a srovnání s akustickou detekcí pro určení doby šíření akustické vlny. Pro akustickou detekci používá stejné senzory jako čistě akustický systém, a pro elektrické měření se nejčastěji používá měření napětí na vazebním kapacitoru. Lokalizace činnosti se určuje opět z časového rozdílu z jednotlivých senzorů, s tím rozdílem, že se časové zpoždění elektrické detekce považuje za nulové. Ve skutečném systému samozřejmě dochází k určitému zpoždění, které je však primárně dané zpracováním signálu z elektrického měření, a je cca v řádu jednotek mikrosekund.

Výhodou tohoto systému je, že detekované akustické vlny potvrzuje jakožto důsledek výbojové činnosti, a potlačuje tak případné externí šumové zdroje akustických vln. Dále se signál z elektrického měření využívá ke spuštění záznamu dat z akustických senzorů. [9]

■ 3.3.3 Online monitoring

Systém pro online monitorování se používá především v těžko přístupných lokacích s vysokou pravděpodobností vzniku částečných výbojů. Systém se skládá z několika senzorů, zesilovačů a řídicích jednotek, které průběžně signál zpracovávají a automaticky vyhodnocují. Většinou se jedná pouze

o sledování amplitudy signálu jednotlivých senzorů, záznam signálových průběhů je náročný především ze strany paměti či datové propustnosti. [9]

3.4 Požadavky na měřicí systém

Při akustickém měření částečných výbojů se používá celá řada měřicích vybavení. V této části se zaměřím na jednotlivé komponenty měřicího systému a požadavky na jejich parametry.

3.4.1 Záznamový systém

Pro běžná měření stačí typicky systém obsahující záznamovou jednotku, sadu vhodných senzorů a příslušenství - propojovací kabely a napájení. Dle doporučení organizace IEEE [9] by měla záznamová jednotka disponovat alespoň vzorkovací frekvencí 1 MS/s (milion vzorků za sekundu) a paměti na 5000 vzorků. Jako záznamová jednotka je vhodné použít též osciloskop s uvedenými parametry. Další funkce jako průměrování, detekce špiček, digitální měření a ukládání dat jsou užitečným doplňkem takového systému.

3.4.2 Senzory

Pro snímání ultrazvukové emise se používají piezoelektrické senzory v kompresním modu, mikrofony nebo senzory využívající akusticko-optické efekty. Piezoelektrické senzory dále můžeme rozdělit na dva typy: akcelerometry, které měří zrychlení a s typicky hladkou frekvenční charakteristikou, a druhým typem jsou senzory akustické emise, které měří rychlost a mají typicky tzv. dominantní rezonanční frekvence. Resonanční senzory jsou pro účely měření částečných výbojů preferované z důvodu vyšší citlivosti a specifické frekvenční charakteristiky.

Další dělení senzorů je dle typu napájení - pasivní senzory jsou bez napájení, zatímco aktivní senzory vyžadují napájení zpravidla pro předzesilovač v senzoru. Obecně je vhodné první zesilovací stupeň umístit co nejbližší senzoru kvůli potlačení šumu. [9]

Obecné charakteristiky senzoru obsahují tyto údaje:

- citlivost - senzitivita, uvádí se nejčastěji v dB či V/(m/s)
- frekvenční charakteristika - frekvenční rozsah, ve kterém je signál snímán
- teplotní charakteristika - pracovní teplotní rozsah senzoru

Zdroje v literatuře uvádějí frekvenční rozsah akustické emise částečných výbojů cca od 20 kHz do 500 kHz [16]. Mezi běžnými rezonančními frekvencemi senzorů akustické emise jsou 60 kHz a 150 kHz. Útlum akustických vln roste s jejich frekvencí, což mluví ve prospěch senzorů s nižší rezonanční frekvencí. S frekvencí však také roste útlum šumového pozadí, v silně zašuměných prostředích je vhodnější použít senzor s vyšší rezonanční frekvencí. Zatímco v laboratorním prostředí nebo při výrobních zkouškách lze šum okolí částečně eliminovat různými způsoby, při měření v provozních podmínkách to je často nemožné. Mezi běžné zdroje šumu v ultrazvukové oblasti při měření na transformátoru v provozu patří pohyblivé části stroje, ložiska pump, přepínače odboček, nebo též deformace magnetického jádra v důsledku magnetostrikčního jevu (Barkhausenův šum), který se vyskytuje až cca do 50 kHz. [9]

Akustické systémy kombinované s elektrickým měřením jsou méně náchylné k šumovým interferencím, a lze je tak použít pro měření i v nižším frekvenčním pásmu, kde se očekává vyšší šumová hladina.

Pro potlačení elektromagnetického šumu z okolního prostředí se používá několik metod. První metodou je použití diferenciálního senzoru, obsahujícího dva senzorové elementy (piezokrystaly) a využívajícího rozdílového signálu na výstupu. Další metodou je použití jednoho krystalu ve stíněném pouzdře spolu s předzesilovačem. Výhodou tohoto řešení je vysoká výstupní amplituda, nízká impedance a menší náchylnost k působení šumu na propojovací kabely.

Senzory mohou být umístěny jak na povrchu zařízení (externí senzor), tak uvnitř něj (interní senzor). Mezi hlavní výhody externích senzorů patří snadná rekonfigurovatelnost měřicího systému a možnost měření na více zařízeních, nevýhodou je větší citlivost k externím zdrojům šumu. Interní senzory často poskytují vyšší kvalitu signálu oproti externím senzorům a lepší odstup signál-šum, ale nelze je dále přesouvat v rámci měřeného zařízení či použít pro měření na jiném stroji. [9]

■ 3.4.3 Úprava signálu

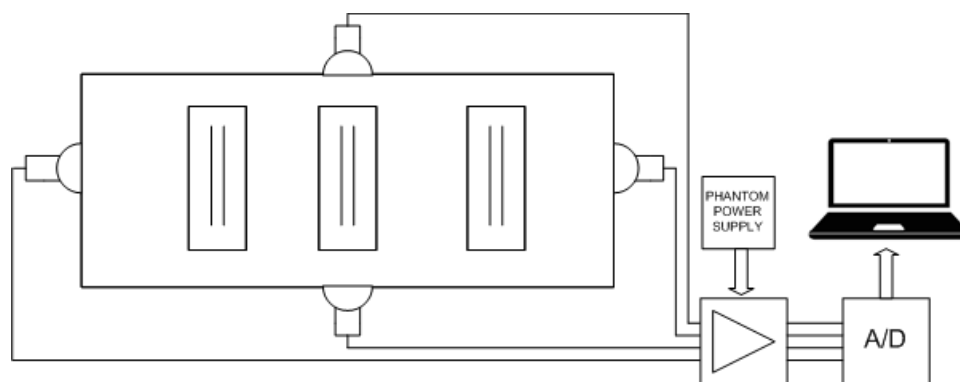
Obvody pro úpravu signálu slouží především k filtraci a zesílení užitečného signálu, případně ke zlepšení poměru signál-šum. Měly by umět pracovat s citlivostí a napěťovým rozsahem vstupních sensorů a respektovat napěťový rozsah a citlivost záznamového systému. Tyto parametry stanovují především požadavky na zesilovací člen. Požadavky na filtr jsou určeny frekvenční charakteristikou použitého senzoru. Jeho úlohou je propuštění užitečného signálu v daném frekvenčním rozsahu a odfiltrování ostatních nežádoucích složek. Jedná se tak vždy od filtr typu pásmová propust, případně může být nahrazen soustavou filtrů typu dolní a horní propusti. Dle doporučení organizace IEEE je doporučený útlum 24 dB / oktávu [9]. Pro filtry s rezonanční frekvencí 150 kHz je doporučený rozsah pásmové propusti 100 kHz - 300 kHz.

Kapitola 4

Návrh a implementace

V této části je popsán kompletní návrh měřicího systému pro akustické měření částečných výbojů. Systém se skládá ze tří částí, a to měřicí kanál, digitalizace a zpracování dat. Postupně se v této kapitole budu věnovat jednotlivým částem, jejich charakteristikám a funkcím.

Na obrázku 4.1 je zobrazeno základní blokové schéma návrhu. Zdrojem zpracovávaného signálu jsou senzory akustické emise, snímající akustický signál z měřeného objektu. Signál je dále zpracováván v měřicím kanálu, digitalizován a dále zpracováván v digitální podobě.



Obrázek 4.1: Blokové schéma návrhu měřicího systému

4.1 Hardware

Měřicí kanál je hlavní částí měřicího systému, která se stará o snímání, zesílení a úpravu užitečného signálu. Jelikož měřicí systém slouží pro detekci akustické emise, na vstupu měřicího kanálu je třeba použít vhodný akustický senzor.

4.1.1 Senzor

Na základě požadavků stanovených v předchozí kapitole byl zvolen senzor akustické emise PXR15, viz obr. 4.2. Jedná se o piezoelektrický rezonanční senzor akustické emise od výrobce PXR, mezi jehož hlavní výhody výrobce uvádí vysokou senzitivitu, teplotní stabilitu a cenovou dostupnost. Hlavní parametry senzoru jsou uvedeny v následující tabulce.

Typ	Rezonanční frekvence	Frekvenční pásmo (10dB)	Senzitivita	Rozměry	Materiál
PXR15	150 kHz	100-400 kHz	>65dB	ø18×17mm	hliník

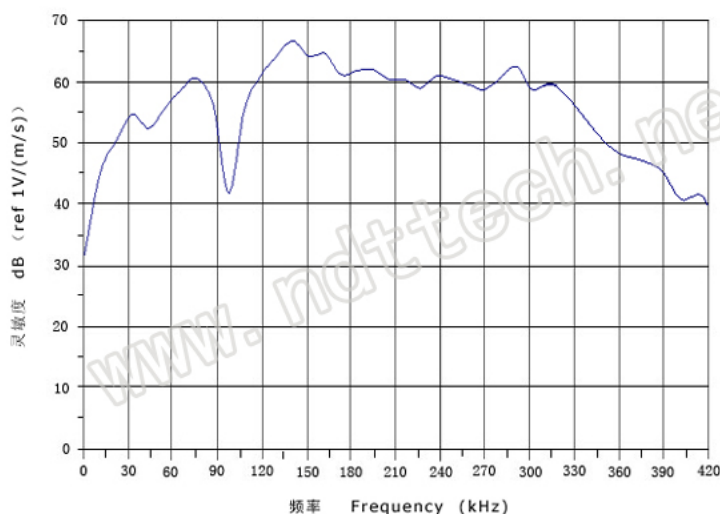
Tabulka 4.1: Parametry senzoru PXR15



Obrázek 4.2: Senzor akustické emise PXR15

Pro účely měření částečných výbojů je při návrhu nutné věnovat zvýšenou pozornost šumovým parametřům měřicího kanálu. Při měření v laboratorních podmínkách existuje řada možností, jak eliminovat zdroje šumu, které však při měření v terénu nebývají dostupné. V předchozí kapitole bylo zmíněno, že velká část šumových zdrojů se nachází ve frekvenční oblasti do 50 kHz.

Jednou z možností eliminace šumu je proto filtrace širokopásmovým filtrem či použití senzoru s vhodnou frekvenční charakteristikou.



Obrázek 4.3: Frekvenční charakteristika senzoru PXR15 uvedená výrobcem, převzato z <https://www.ndttech.net/ae/sensors/pxr-series.html>

Frekvenční charakteristika senzoru PXR15 uvedená výrobcem je na obrázku 4.3. V grafu lze vidět rezonanční frekvenci senzoru a frekvenční pásmo s poklesem do 10 dB. Frekvenční pásmo odpovídající šumovým zdrojům do 50 kHz vykazuje útlum >10 dB. Jelikož je nutné počítat s amplitudou akustického signálu řádově menší než amplituda nízkofrekvenčních šumových zdrojů, je vhodné použití filtru typu horní propust, blokující frekvence do 50 kHz.

4.1.2 Předzesilovač

Úlohou předzesilovače je zvětšení amplitudy signálu pro lepší detekci a následný záznam akustického signálu ze senzoru. Je proto doporučeno umístit předzesilovač co nejbližší akustickému senzoru. Signál ze senzoru je veden skrz konektor SMA na straně senzoru koaxiálním kabelem o délce 2 metry. Kabel je zakončen konektorem BNC a následně redukcí na XLR vstup předzesilovače.

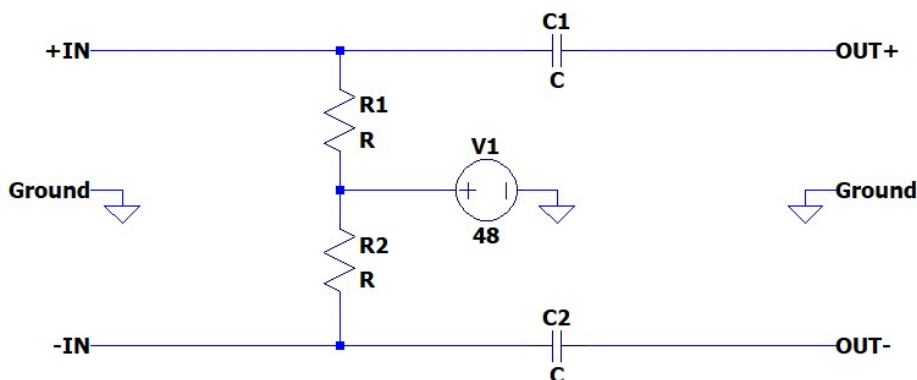
Pro předzesílení signálu byl zvolen mikrofonní zesilovač sE Electronics DM2 TNT, především díky nízkému inherentnímu šumu, dostatečnému zesílení a nastavitelné vstupní impedanci. Hlavní parametry předzesilovače jsou uvedeny v následující tabulce.

Napájení předzesilovače je nutné zajistit externím, tzv. fantomovým napa-

Parametr	sE DM2 TNT
Zesílení	15dB, 28dB
Frekvenční rozsah (-0,3dB)	10 Hz - 120 kHz
Frekvenční rozsah (-20dB)	10 Hz - 400 kHz
Maximální výstup	9,5 dBV (3,0 V)
Napájení	48V DC fantomové, 3,1 mA
Šumový práh	1 μ V, 6.6 μ V
Vstupní impedance	50 Ω , 200 Ω , 360 Ω , 1.5k Ω , 2.7k Ω , 6.8k Ω , 100k Ω , 10M Ω
Rozměry	\varnothing 19x96mm

Tabulka 4.2: Parametry předzesilovače sE DM2 TNT

ječem. Fantomové napájení je způsob napájení aktivních obvodových prvků skrze signálové vodiče. Využívá se zejména v mikrofonní technice, např. pro napájení elektrostatických kondenzátorových mikrofonů. Princip fantomového napájení je spektrální oddělení napájení od signálu. Zatímco akustický signál je zpravidla bez stejnosměrné složky, lze vhodným způsobem využít této vlastnosti k napájení stejnosměrným napětím. Principem fantomového napájení je znázorněn na schématu, viz obrázek 4.4.



Obrázek 4.4: Zjednodušené schéma fantomového napájení

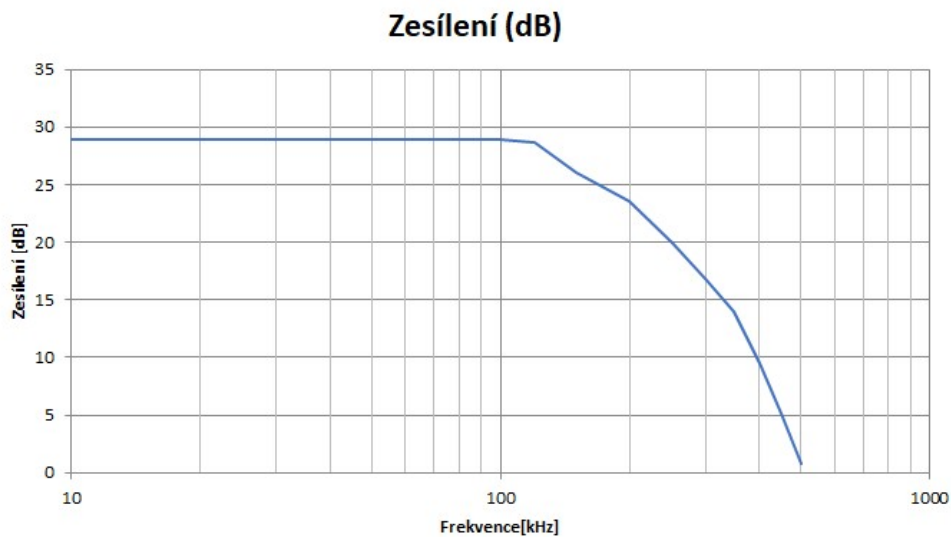
Předzesilovač sE DM2 TNT vyžaduje fantomové napájení 48V DC, které je zajišťováno přenosným fantomovým napaječem Xvive P1 Portable. Tento napaječ obsahuje vlastní akumulátor 2200 mAh / 3,7 V, který lze dobít přes microUSB rozhraní (vyhrazené čistě pro nabíjení akumulátoru). Napaječ dokáže poskytovat proud 12 mA, což postačuje pro napájení předzesilovače, který vyžaduje odběr 3,1 mA. Přepínačem lze nastavit výstupní napětí na 12 V DC nebo 48 V DC. Vnitřní akumulátor napaječe tak poskytuje výdrž cca 50 hodin neustálého provozu na jedno nabití.

Frekvenční charakteristika předzesilovače ukazuje na hlavní zlomový kmitočet na frekvenci 120 kHz, jednotkového zesílení pak dosáhne zesilovač při cca 500 kHz. V oblasti do 120 kHz je frekvenční charakteristika plochá s minimálním zvlněním (<0,1dB). Naměřená frekvenční charakteristika je na



Obrázek 4.5: Předzesilovač s fantomovým napáječem

obrázku 4.6.



Obrázek 4.6: Naměřená frekvenční charakteristika předzesilovače

Při měření rychlosti přeběhu zesilovače byl zesilovač buzen obdélníkovým signálem o amplitudě 5V špička-špička, a odezva měřena na osciloskopu OWON XDS3102A. Výsledky měření ukázaly na řádově vyšší rychlost přeběhu při sestupné hraně ($20V/\mu s$) než při náběžné ($1V/\mu s$).

Během měření napaječe byl detekován šum generovaný nábojovou pumpou na hladině 2mV na frekvenci cca 1,6 MHz. Během laboratorních testů se tento zdroj ukázal jako jeden z hlavních zdrojů šumu, proto byl později implementován digitální filtr typu dolní propust se zlomovou frekvencí 1 MHz, který slouží k odstranění této šumové složky (viz kapitola Software).

4.1.3 Záznam dat

Pro záznam a digitalizaci signálu bylo nutné zvolit vhodnou platformu, která by vyhovovala požadavkům na záznamové zařízení. Existuje řada dostupných řešení pro digitalizaci signálu:

- využití audio A/D převodníků ve zvukových kartách osobních počítačů
- použití osciloskopu (které jsou jako zařízení primárně určené pro záznam periodických signálů, lze je však také využít pro záznam neperiodických událostí)
- specializované dataloggery (Data Acquisition System, DAQ) určené ke sběru dat, ať už ve formě samostatných zařízení nebo přídavných karet pro PC

Jednotlivá řešení se liší především podporovanou záznamovou rychlostí, rozlišením A/D převodu, velikostí záznamu a cenou. Jako kompromis mezi těmito parametry byl zvolen osciloskop OWON VDS3104, jehož parametry shrnuje tabulka 4.3.

Parametr	OWON VDS3104
Počet kanálů	4
Šířka pásma	100 MHz
Rychlost vzorkování	1 GS/s
Velikost paměti	5 MS
Vstupní impedance	1M Ω
Maximální napětí na vstupu	40V
Horizontální zobrazení	2 ns/div - 100 s/div
Horizontální rozlišení	150 ps
Vertikální zobrazení	5 mV/div - 5V/div
Vertikální rozlišení	8 bitů
Rozhraní	USB 2.0 / (LAN)
Napájení	5.0V, 1A
Rozměry	190x120x18mm

Tabulka 4.3: Parametry osciloskopu OWON VDS3104

Napájení osciloskopu je řešeno přes rozhraní USB, takže není potřeba žádný externí napájecí zdroj. Při použití přenosného počítače (laptopu) tak lze provozovat celou měřicí sestavu pouze z bateriového napájení. Díky tomu je skvělým řešením při měření v místech, kde nelze zajistit napájení ze sítě.

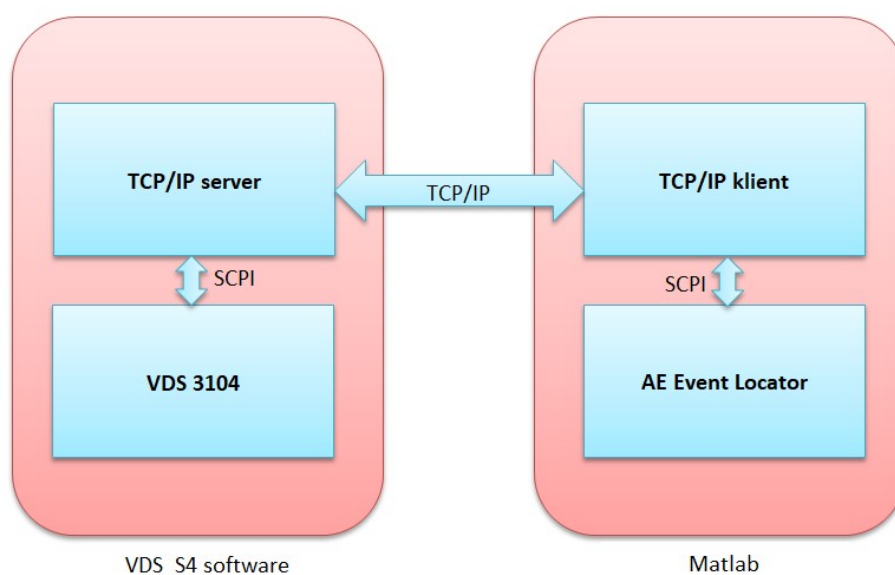


Obrázek 4.7: Osciloskop OWON VDS3104

Úlohou osciloskopu je zachycení a digitalizace signálu, následné zpracování je pak řešeno v rámci počítačového programu, který je popsán v následující sekci.

4.2 Software

Pro zpracování signálu získaného ze senzorů slouží řada systémů, které obstarávají digitalizaci, záznam, úpravy a zpracování signálu. Mezi hlavní funkce zpracování signálu patří úprava signálu pro lokalizaci, detekce kritických parametrů a samotný výpočet lokalizace. Systém je popsán na schématu 4.8. Je tvořen blokem pro záznam dat (VDS_S4 software), bloky pro komunikaci (TCP/IP server a klient) a programem pro lokalizaci zdrojů signálu (AE Event Locator), založeném na triangulační metodě v 3D homogenním prostředí.



Obrázek 4.8: Blokové schéma softwarového systému

4.2.1 Záznam

Signál je zaznamenáván pomocí osciloskopu OWON VDS3104, jehož parametry jsou popsány v sekci Hardware. Použití osciloskopu jako záznamového zařízení má výhodu jako levné řešení rychlého a kvalitního záznamu napětového signálu.

Ovládání osciloskopu zajišťuje program VDS_S4 distribuovaný jeho výrobcem. Komunikace osciloskopu s PC je zajišťována skrze rozhraní USB 2.0, USB driver pro komunikaci je součástí instalačního programu softwaru VDS_S4.

Hlavní okno programu VDS_S4 poskytuje přehledné zobrazení signálových průběhů ze všech kanálů, zobrazení základních parametrů jednotlivých signálů, tabulku parametrů záznamu, přehled používaných triggerů, ovládání jednotlivých kanálů a přístup k pokročilým funkcím osciloskopu.

Vzhledem k nízké očekávané amplitudě detekovaného signálu je důležité vhodné nastavení parametrů snímaných kanálů. Snímání zajišťuje čtveřice 8-bitových A/D převodníků, zesílení kanálu je nastavitelné v diskretních krocích v rozsahu 2 mV - 5V na dílek, přičemž plný rozsah zobrazení osciloskopu je 10 dílků. Při nejjemnějším nastavení kanálu tak má kanál maximální rozsah 20 mV a rozlišení $20mV/2^8 = 0.08mV$. Nejvyšší zobrazitelný rozsah je až 50V,

nicméně signál je omezen vstupními obvody osciloskopu na 40 V špička-špička. Vzhledem k použitým zesilovačům a očekávané nízké amplitudě signálu ze senzorů je doporučené nastavení rozlišení 10 mV na dílek, ovšem záleží na konkrétním prostředí a šumové hladině okolí.

Nastavení časové základny a délky záznamu závisí především na velikosti měřeného objektu a rychlosti šíření akustického signálu. Minimální časová délka záznamu byla zvolena taková, aby během časového záznamu signálu dokázal signál doputovat od zdroje signálu k libovolnému používanému senzoru, a aby rychlost vzorkování přitom neklesla pod 1 MS/s (dle požadavků v kap. 3.4.1). Pro minimální časovou délku záznamu tak platí vztah:

$$t_{min} = SR_{min} * MD = \frac{d_{max}}{v_{min}} \quad (4.1)$$

kde t_{min} je minimální časová délka záznamu, SR_{min} je minimální vzorkovací frekvence, MD je délka záznamu, d_{max} je nejdelší vzdálenost libovolného bodu měřeného objektu od senzoru a v_{min} je minimální rychlost šíření akustické odezvy v objektu.

Posledním důležitým krokem je nastavení hladiny triggeru, který bylo nutné nastavit těsně nad šumovou hladinou okolí. Hladinu triggeru lze nastavit pro každý kanál zvlášť, základním použitým typem triggeru je detekce náběžné hrany.

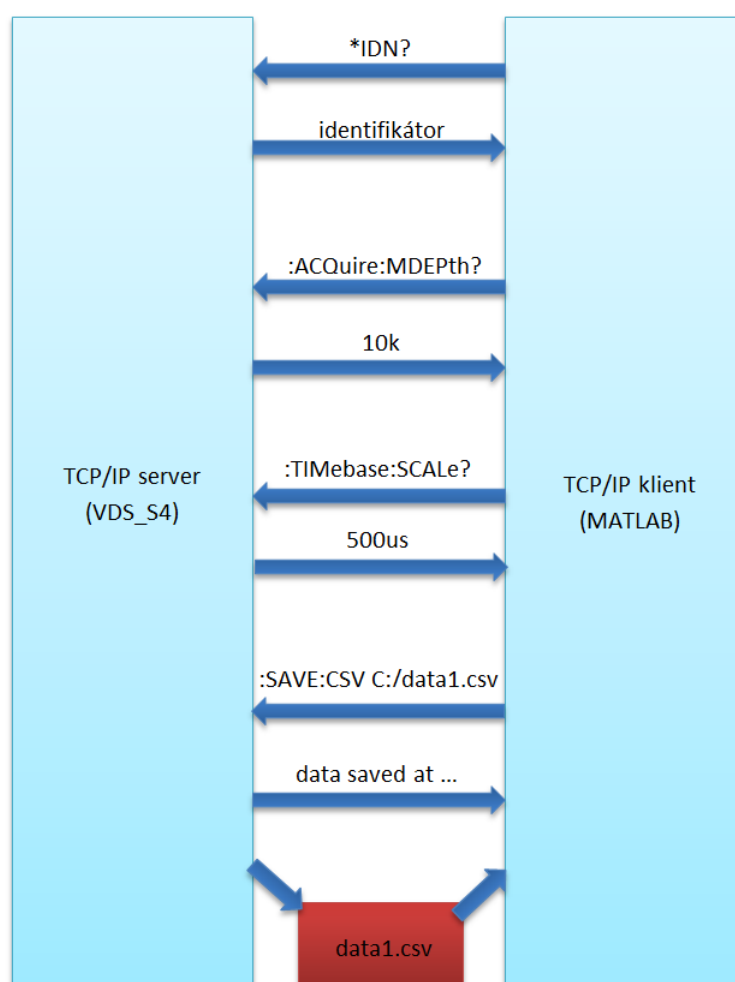
4.2.2 Přenos dat

K přenosu dat z osciloskopu je využit protokol SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments), který je osciloskopem VDS3104 podporován skrze TCP/IP protokol. Protokol SCPI je komunikační protokol, který obsahuje standardní příkazy pro nastavení, čtení a řízení testovacích a měřicích zařízení. Obsahuje standardní set příkazů, které jsou společné pro všechny zařízení využívající tento protokol, další příkazy jsou definované výrobcem pro účely konkrétního zařízení [17].

Struktura SCPI příkazů je hierarchická - každý příkaz se skládá z kořenového příkazu a jednoho či více doplňkových. Příkaz je vždy uvozen symbolem `:`, jednotlivá klíčová slova jsou oddělována symboly `:` a je zakončen buďto symbolem `?` v případě dotazu, nebo mezerou a parametrem v případě příkazu. V případě standardního příkazu je na začátku použit místo symbolu `:` symbol

*. První čtveřice písmen každého klíčového slova je psaná velkými písmeny a slouží jako jednoznačný identifikátor, lze tak místo vypsání celého klíčového slova použít v příkazu pouze první čtveřici písmen. V současnosti se používá nejnovější verze protokolu 1999.0.¹

Software VDS_S4 obsahuje vlastní TCP/IP server, který běží na hostitelském počítači. Přednastavený port pro komunikaci se serverem je 5188, pro komunikaci na lokální úrovni je použita adresa 127.0.0.1 (localhost). TCP/IP server slouží výhradně pro komunikaci přes protokol SCPI. Pro připojení k serveru slouží TCP/IP klient, který je vytvořen v prostředí MATLAB, a poskytuje data z osciloskopu ke zpracování aplikací v prostředí MATLAB. Schéma komunikace je popsáno na následujícím obrázku 4.9:



Obrázek 4.9: Schéma komunikace pomocí SCPI na TCP/IP protokolu

¹<https://www.ivifoundation.org/docs/scpi-99.pdf>

■ 4.2.3 Zpracování dat

Pro zpracování dat byl vytvořen program AE Event Locator, který běží v prostředí MATLAB. MATLAB je široce používaný výpočetní software, který slouží k provádění výpočtů a simulací, analýze dat, modelování a tvorbě skriptů. Obsahuje řadu knihoven (tzv. toolboxů), které usnadňují práci s různými typy dat, či jsou určeny k řešení daných problémů.

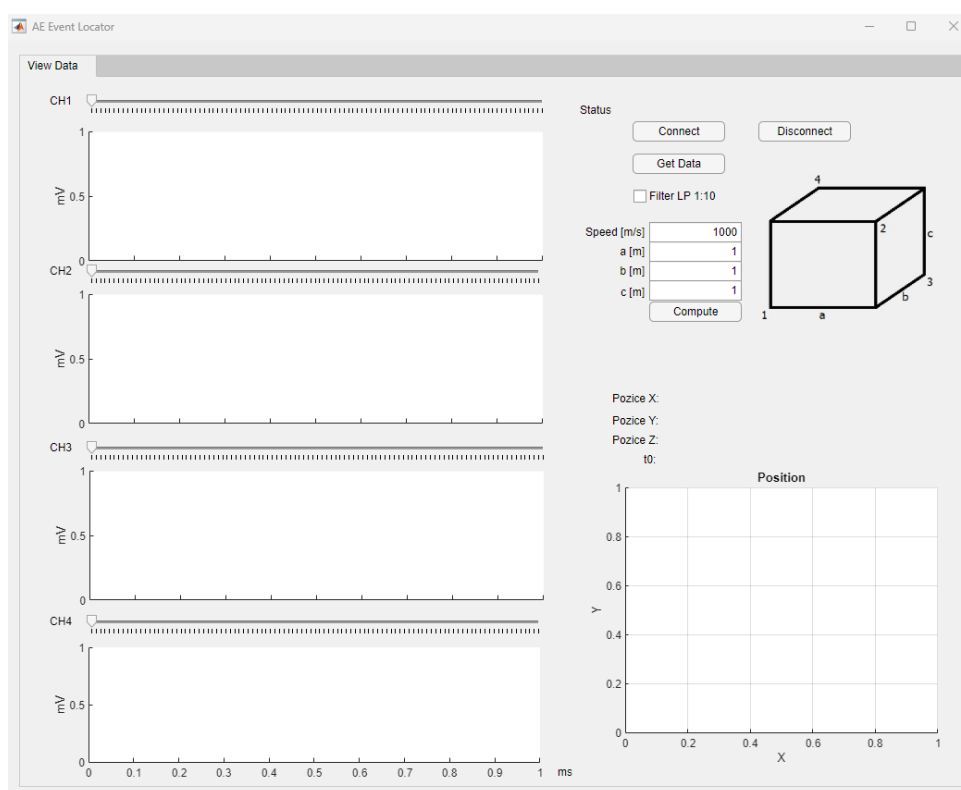
Pro psaní uživatelských procedur a programů poskytuje MATLAB vlastní programovací jazyk. Jazyk je určen k volání vnitřních funkcí MATLABu (případně import vlastních funkcí) a je v něm možné psát vlastní funkce a skripty, tzv. m-soubory. Jako nadstavbu skriptů poskytuje MATLAB tzv. Live-Scripty, které mohou obsahovat formátovaný text, obrázky a interaktivní grafy. Lze tak v jednom prostředí střídat úseky kódu a uživatelsky přístupného rozhraní.

Pro tvorbu vlastních aplikací s grafickým rozhraním (GUI) je vyhrazen toolbox "App Designer", ve kterém je možné tvořit jak grafické rozhraní programu, tak kód v pozadí. Obsahuje knihovnu standardních grafických objektů jako nadpisy, tlačítka, seznamy či pokročilé objekty jako interaktivní grafy. Funkce programu jsou volány skrze tzv. callbacky, které přiřazují interakci s grafickým objektem ke konkrétní funkci. Kód v pozadí je objektově orientovaný, přičemž jednotlivé objekty zpravidla reprezentují objekty v grafickém rozhraní. Editor rozděljuje kód uživatelské aplikace na část spravovanou App Designerem, která se stará o základní strukturu programu (jako konstruktory a deklarace funkcí), definice funkcí jsou pak editovatelné uživatelem. Pro předávání proměnných mezi funkcemi slouží soubor vlastností (Properties).

Hlavní okno programu AE Event Locator (viz obrázek 4.10 obsahuje ovládací tlačítka pro připojení a odpojení zařízení. Pro připojení k osciloskopu je nutné mít již spuštěný program VDS_S4 na stejném zařízení, který spravuje TCP/IP server. Po stisku tlačítka Connect se vytvoří TCP/IP klient a pokusí se navázat spojení se serverem. V případě úspěchu se zobrazí v horní části (Status) nápis "Connected" a identifikační číslo osciloskopu.

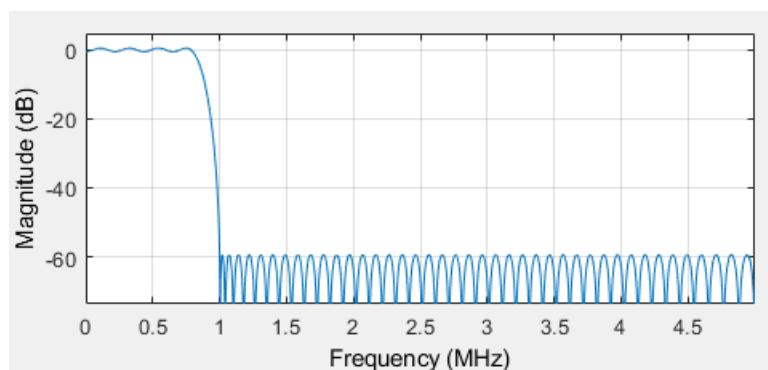
Po navázání spojení lze tlačítkem Get Data uložit data z osciloskopu do lokální složky a nahrát do programu. Dále jsou z osciloskopu získány informace o rychlosti vzorkování a hloubce paměti. Následně jsou data z jednotlivých kanálů zobrazeny na grafech v levé části okna. Osy grafů se automaticky upravují dle velikostí signálů. Při importu signálů lze také použít digitální filtr typu dolní propust. Filtr byl navržen v prostředí MATLAB s pomocí nástroje Filter Designer. Jedná se o FIR filtr (s konečnou odezvou) a má fixní

4. Návrh a implementace



Obrázek 4.10: Hlavní okno programu AE Event Locator

zlomový kmitočet 1/10 vzorkovací frekvence. Jeho spektrum je na obrázku 4.11.



Obrázek 4.11: Amplitudové spektrum použitého FIR filtru

Po nahrání a zobrazení signálů v grafech je třeba pomocí posuvníků nastavit začátek impulsu v jednotlivých kanálech. Zachycené impulsy mohou nabývat různých tvarů, je však nutné co nejpřesněji určit časový posun, kdy impuls dorazil k jednotlivým sensorům. Toto může být obtížné především v situacích, kdy se signál šíří různými cestami, náběh odezvy je pak postupný a je nutné provést nové měření v jiné konfiguraci.

Pro lokalizaci výboje je nutné nejdříve zadat rozmístění sond a rychlost šíření v majoritním prostředí. Na obrázku v okně programu je rozmístění sond do čtyřtění, pro přehlednost je doplněn model do tvaru krychle, jejíž rozměry uživatel zadává do tabulky. Stiskem tlačítka "Compute" je spuštěn výpočet lokalizace řešením soustavy lineárních rovnic dle metody popsané v kapitole 3.2. Výsledkem je odhadovaná pozice a čas vzniku zdroje signálu a výsledky jsou zobrazeny jak numericky, tak v interaktivním 3D grafu. V 3D grafu je kromě pozice odhadnutého zdroje také znázorněno umístění jednotlivých senzorů. Barevné značení senzorů odpovídá barevnému zobrazení průběhu signálů v grafech a v programu VDS_S4.

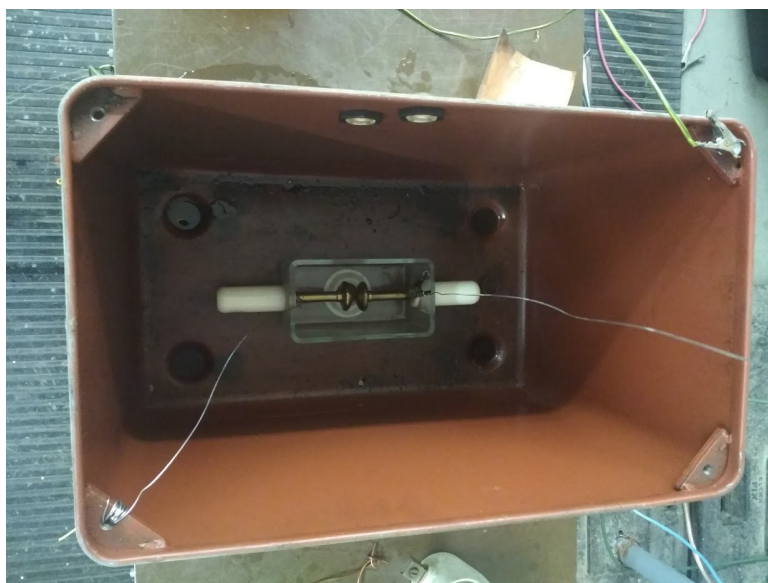
Kapitola 5

Testování

Pro účely ověření funkčnosti navrženého systému byly zvoleny dva způsoby. Nejprve byl celý systém testován v laboratorních podmínkách ve zkušebně E01 firmy ORGREZ a.s. v Praze-Karlín, a poté bylo provedeno testování na reálném zařízení - měření transformátoru v Hesia Bratislava.

5.1 Testování v laboratorním prostředí

K účelu testování systému byla sestavena testovací aparatura tvořená kovovou nádobou o objemu 80 litrů se stěnami o tloušťce 3 mm. Testovací nádoba byla naplněna použitým transformátorovým olejem, a do nádoby byla vložena plastová vanička s elektrodami coby jiskřiště. Jiskřiště se nacházelo zcela pod hladinou oleje, vzdálenost mezi elektrodami v jiskřišti byla nastavena na 1 mm. Foto nádoby je na obrázku 5.1.

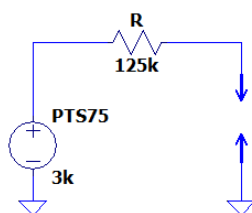


Obrázek 5.1: Testovací nádoba s jiskřištěm (bez oleje)



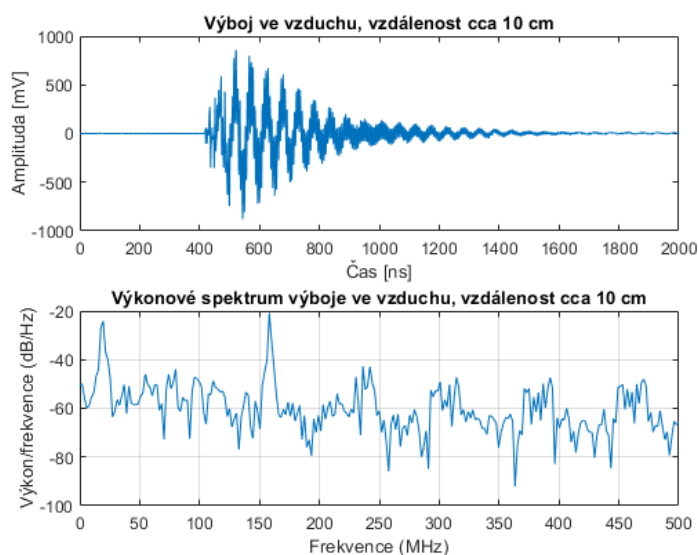
Obrázek 5.2: Testovací sestava pro testování odezvy na vzduchu

První měření bylo provedeno na testovacím obvodu se stejnosměrným vysokonapěťovým zdrojem High Voltage PTS-75 a vodním rezistorem s odporem $125\text{ k}\Omega$ (viz obr. 5.2). V tomto zapojení byly měřeny charakteristické vlastnosti akustické odezvy výboje, konkrétně amplituda a dominantní frekvence akustické odezvy. Charakteristické vlastnosti byly měřeny nejdříve ve vzduchu (teplota vzduchu 20°C), a poté s jiskřištěm ponořeným do oleje (teplota oleje 20°C). Schéma testovacího obvodu s jiskřištěm je zobrazeno na obr. 5.3.



Obrázek 5.3: Schéma testovacího obvodu se stejnosměrným zdrojem napětí

Na obrázku 5.4 je zobrazená naměřená odezva na výboj mezi elektrodami jiskřiště ve vzduchu. Následnou spektrální analýzou byly zjištěny dominantní frekvence 19,53 MHz a 158,2 MHz. Zjištěné frekvenční složky však neodpovídají frekvenčnímu rozsahu akustických odezev výbojů (<1 MHz). Zřejmě se tak jedná o elektrickou vazbu mezi napájecím obvodem a měřicím senzorem, akustický signál není znatelný, nejspíš kvůli slabé mechanické vazbě.

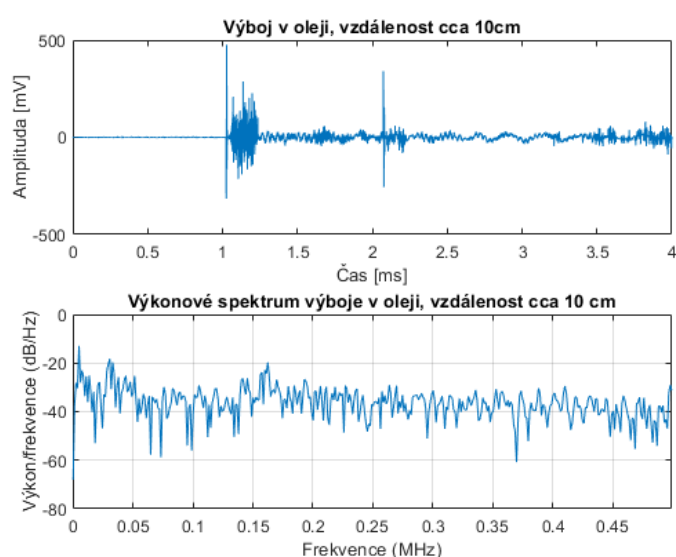


Obrázek 5.4: Odezva na výboj ve vzduchu, vzdálenost sonda-jiskřiště cca 10 cm

Na obrázku 5.5 je zobrazená naměřená odezva na výboj mezi elektrodami jiskřiště v oleji. Na časovém průběhu jsou rozeznatelné jednotlivé části odezvy, kde můžeme rozeznat:

- strmý impuls na začátku, pravděpodobně způsobený elektrickou vazbou mezi napájecím obvodem a senzorem

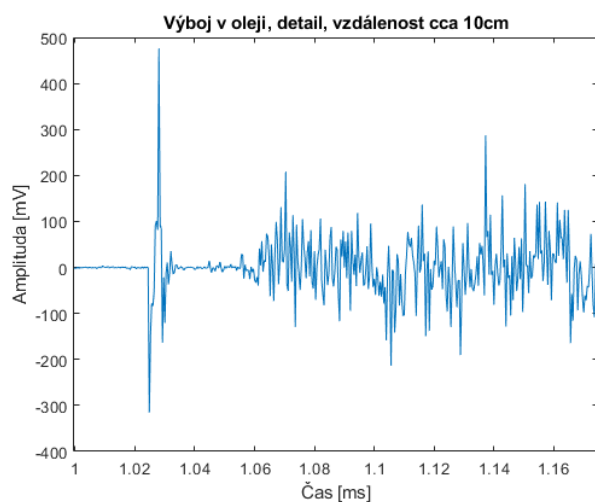
- náběh akustické odezvy s časovým odstupem, představující čas, za který akustický signál překoná vzdálenost mezi zdrojem impulsu a senzorem
- dozvuky na nižších frekvencích, pravděpodobně způsobené rezonancí akustických vln uvnitř testovací nádoby



Obrázek 5.5: Odezva na výboj v oleji, vzdálenost sonda-jiskřiště cca 10 cm

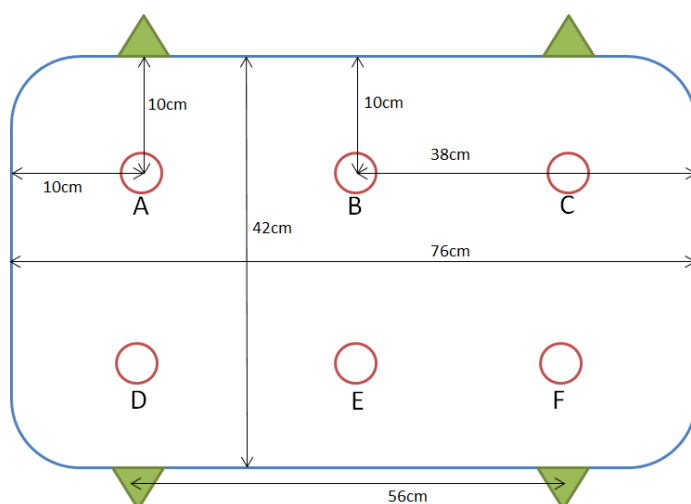
Z výkonového spektra byly zjištěny dominantní frekvence 4,8 kHz, 30,5 kHz a 162 kHz. Frekvence 4,8 kHz je hlavní složkou v oblasti mimo výbojové impulsy, jedná se tak o dominantní frekvenci dozvuků. Frekvence 30,5 kHz je znatelná též v celé délce dozvuku. Frekvence 162 kHz představuje rezonanční frekvenci senzoru a je dominantní v oblasti akustické odezvy výboje.

Na obrázku 5.6 můžeme vidět časový odstup počátečního strmého impulsu a postupného náběhu akustické odezvy, tento čas je úměrný vzdálenosti senzoru od bodu vzniku impulsu. Tento čas je také hlavním parametrem pro lokalizaci pomocí více senzorů, dle metody popsané v kapitole 3.

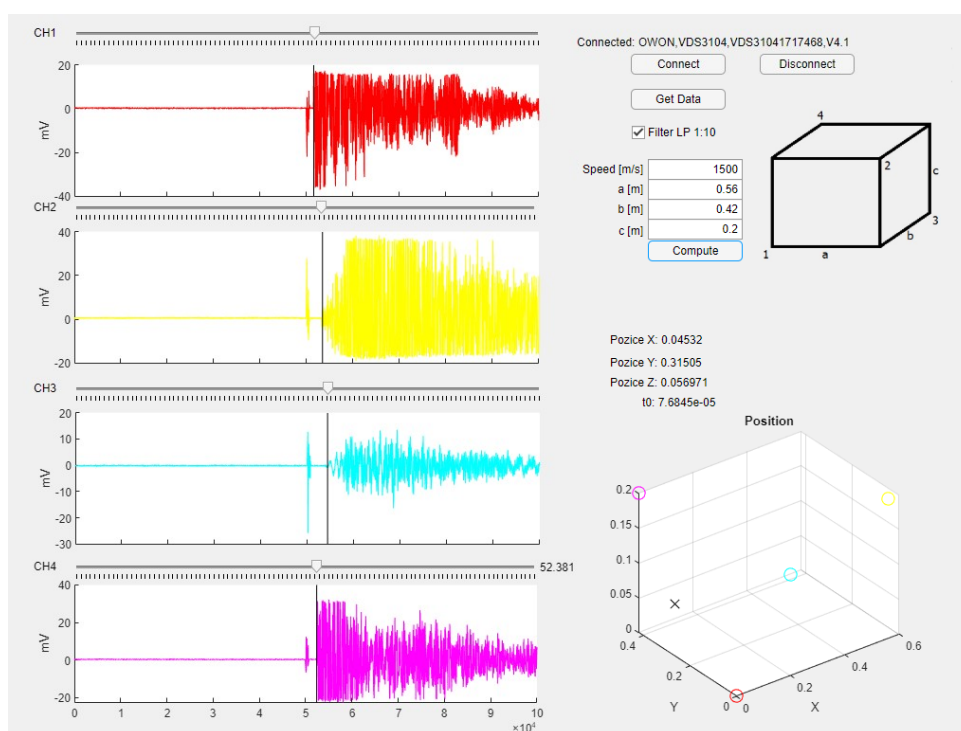


Obrázek 5.6: Odezva na výboj v oleji, detail na elektrickou vazbu a začátek akustické odezvy, vzdálenost sonda-jiskřiště cca 10 cm

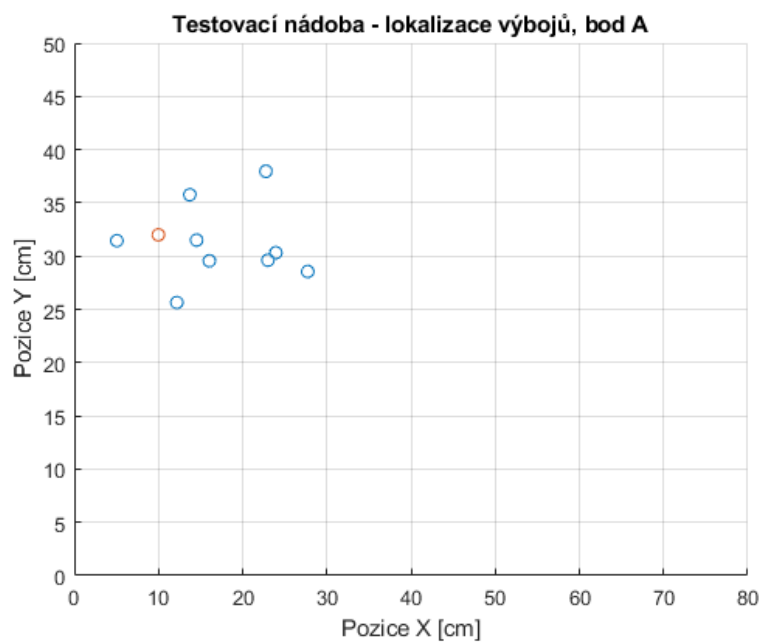
Testování lokalizace probíhalo za použití vysokonapěťového transformátoru 0,4/25 kV, vodního rezistoru s odporem 125 k Ω a testovací nádoby s jiskřištěm. Napětí bylo nastaveno na hodnotu, kdy začalo docházet k výbojům v jiskřišti. Testování postupně probíhalo na 6 pozicích jiskřiště uvnitř testovací nádoby. Jednotlivé pozice jiskřiště byly označeny písmeny A-F, schéma pozic je na obrázku 5.7. Sondy byly rozmístěny po delší straně nádoby na protilehlé stěny tak, aby tvořily tetraedr (čtyřstěn). V této konfiguraci je zajištěna vyšší odolnost vůči chybám měření a nemůže dojít k nejednoznačnosti řešení (viz kap. 3.2.3). V každém bodě bylo provedeno 10 měření, a výsledná pozice byla zaznamenána do tabulky. Tabulka výsledků je součástí přílohy.



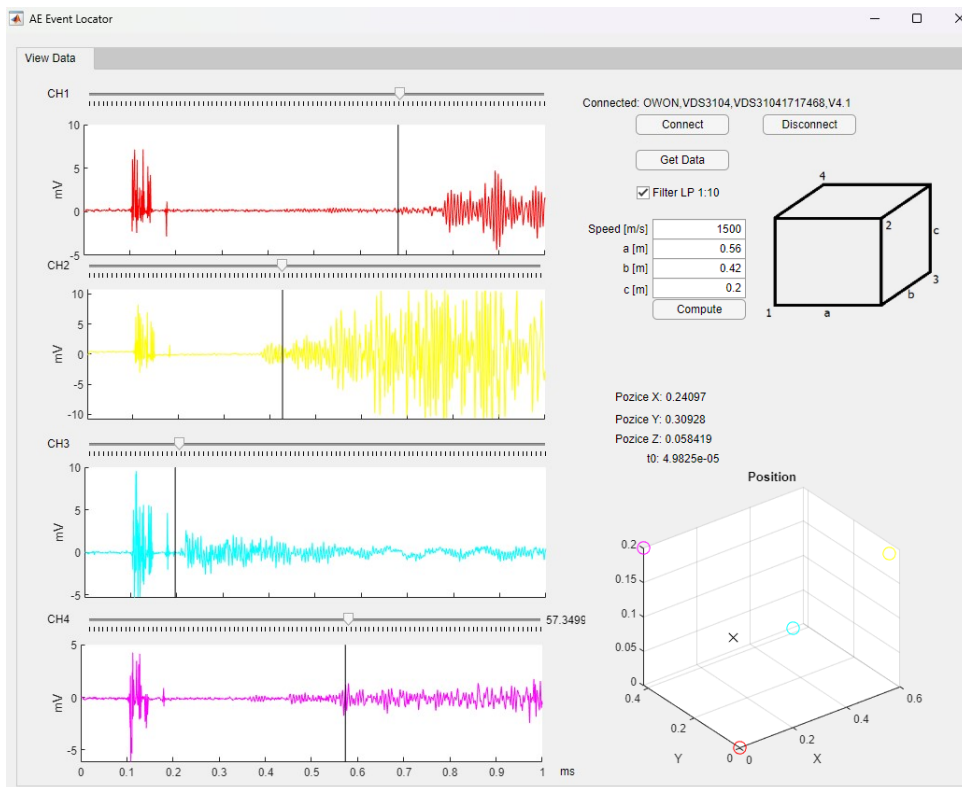
Obrázek 5.7: Schéma pozic jiskřiště v testovací nádobě



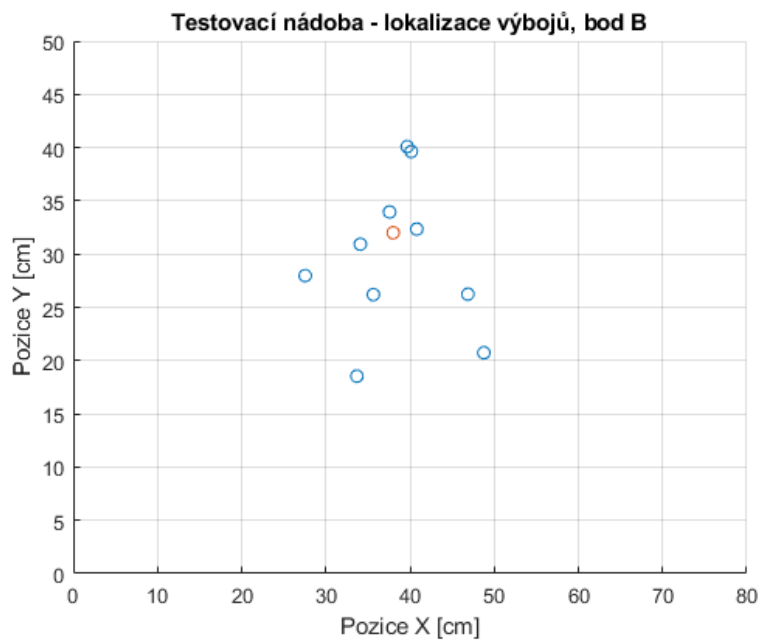
Obrázek 5.8: Výsledky z programu AE Event Locator při testování lokalizace v bodě A



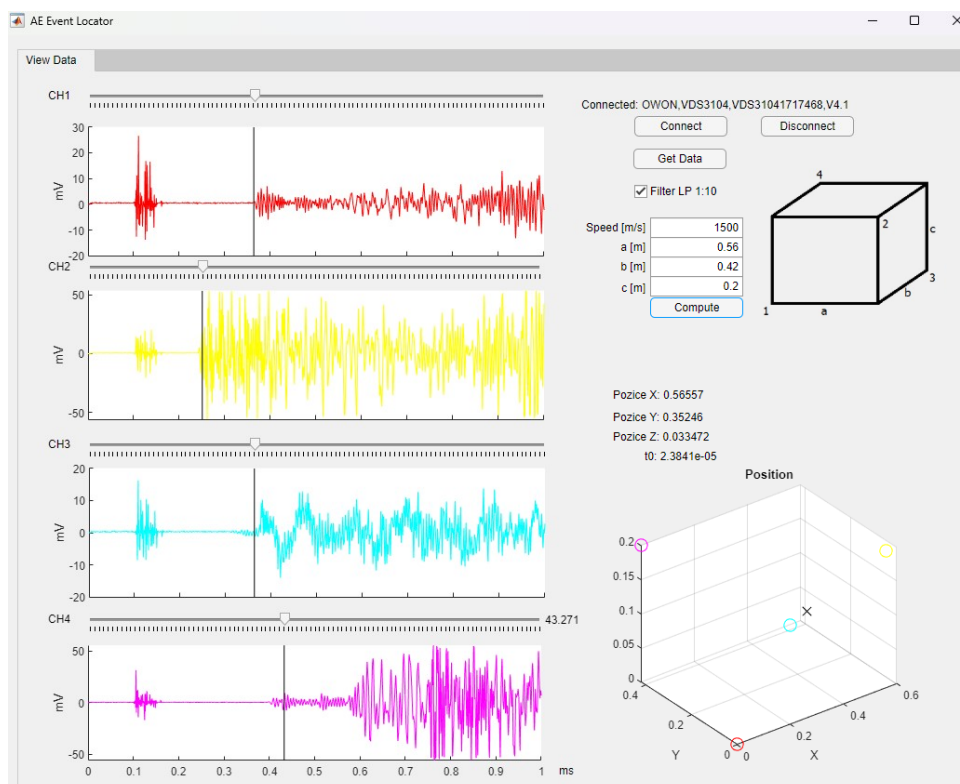
Obrázek 5.9: Pozice naměřených bodů při testování lokalizace v bodě A, rovina X-Y



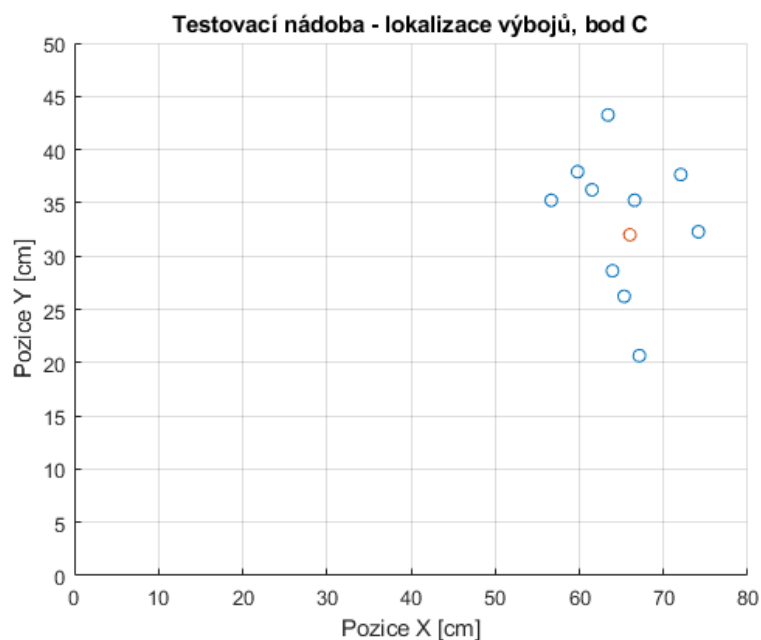
Obrázek 5.10: Výsledky z programu AE Event Locator při testování lokalizace v bodě B



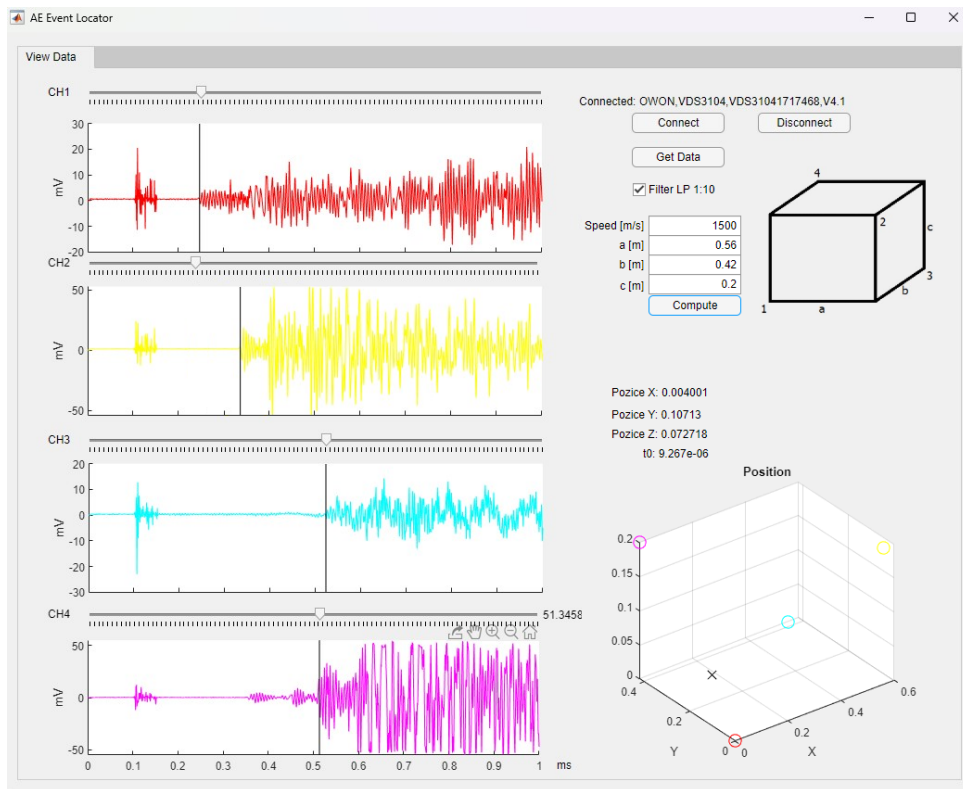
Obrázek 5.11: Pozice naměřených bodů při testování lokalizace v bodě B, rovina X-Y



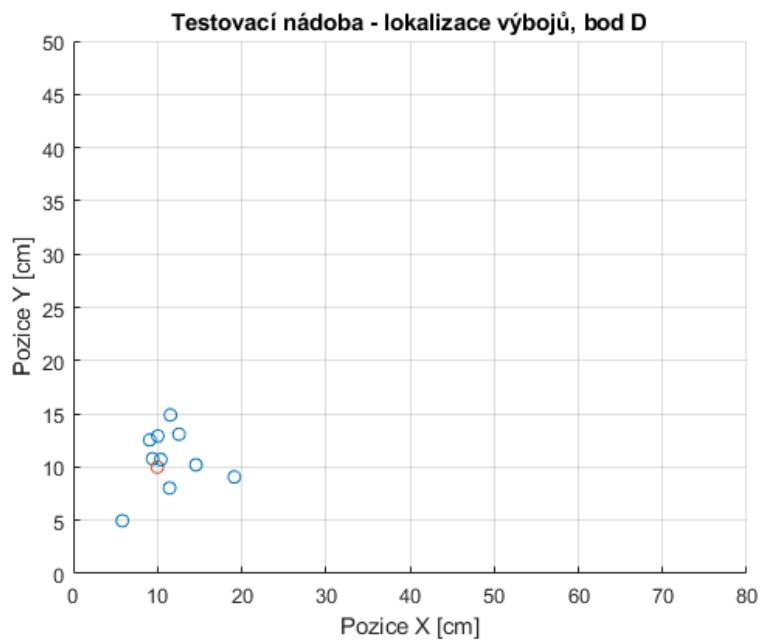
Obrázek 5.12: Výsledky z programu AE Event Locator při testování lokalizace v bodě C



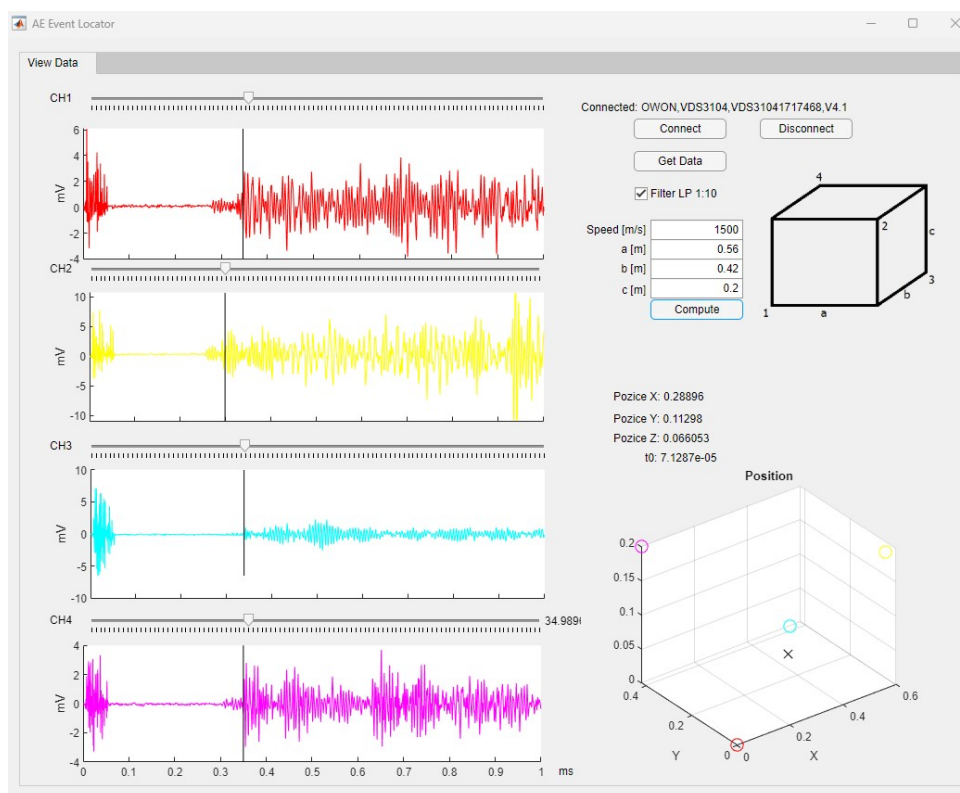
Obrázek 5.13: Pozice naměřených bodů při testování lokalizace v bodě C, rovina X-Y



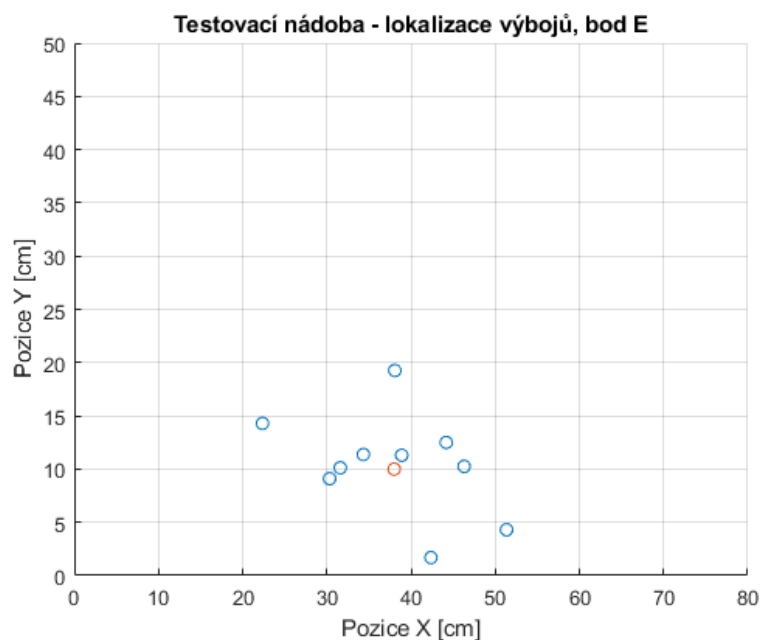
Obrázek 5.14: Výsledky z programu AE Event Locator při testování lokalizace v bodě D



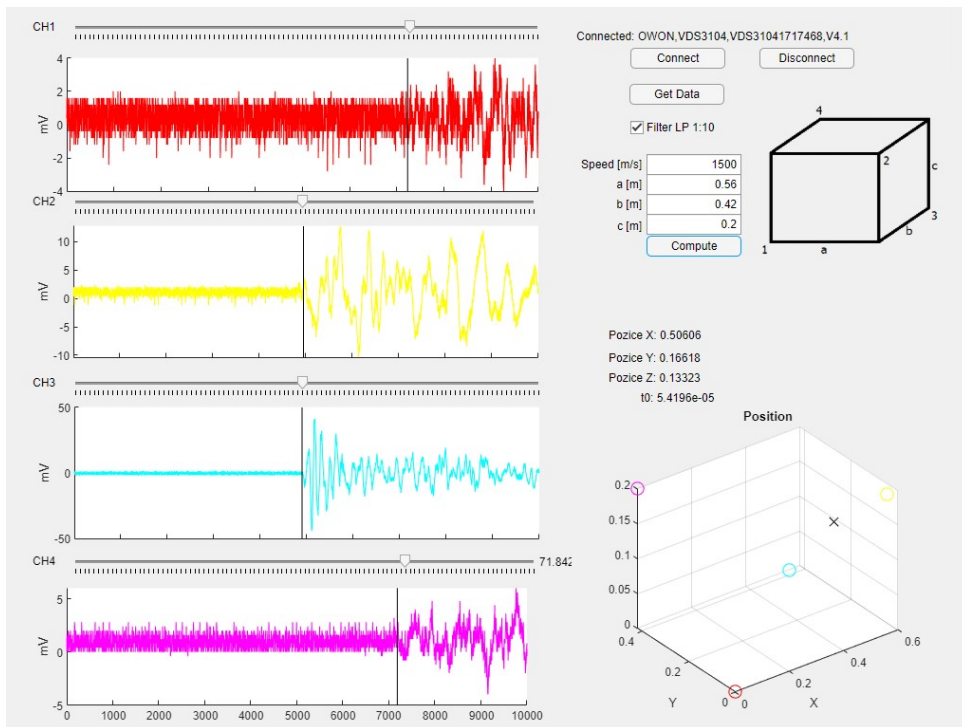
Obrázek 5.15: Pozice naměřených bodů při testování lokalizace v bodě D, rovina X-Y



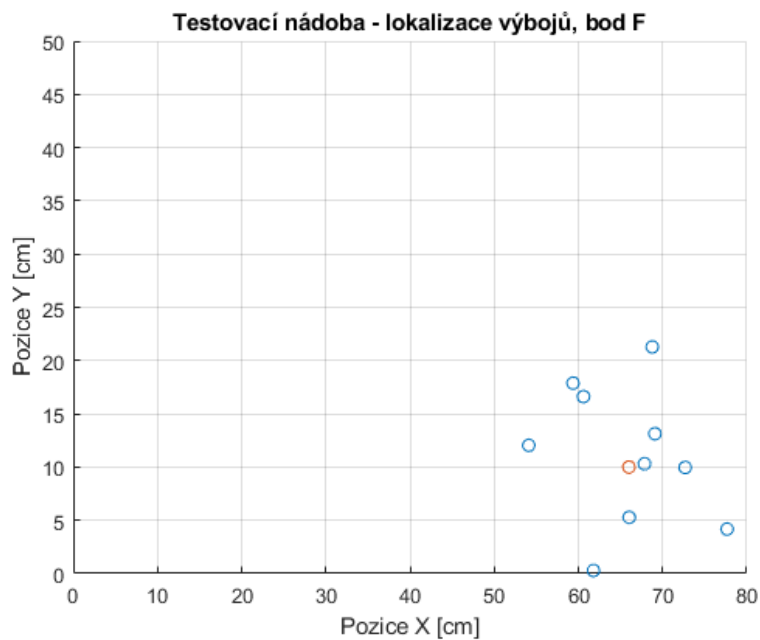
Obrázek 5.16: Výsledky z programu AE Event Locator při testování lokalizace v bodě E



Obrázek 5.17: Pozice naměřených bodů při testování lokalizace v bodě E, rovina X-Y



Obrázek 5.18: Výsledky z programu AE Event Locator při testování lokalizace v bodě F



Obrázek 5.19: Pozice naměřených bodů při testování lokalizace v bodě F, rovina X-Y

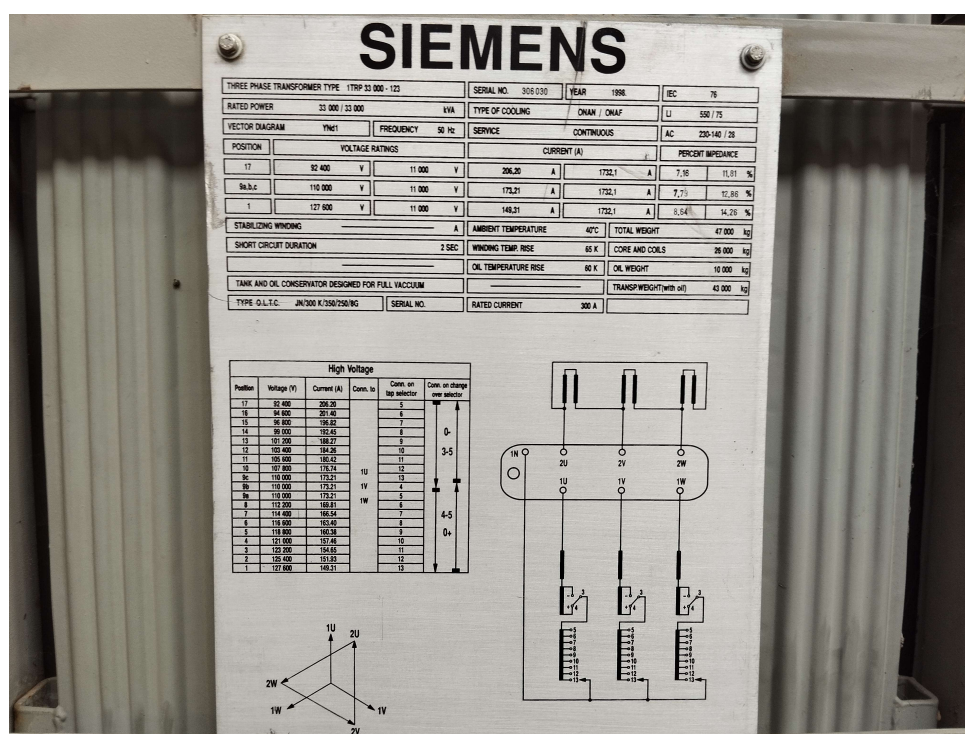
Bod	$ P - \hat{P} $ [cm]	σ [cm]	SE [cm]
A	7,36	11,79	3,72
B	3,12	10,54	3,33
C	1,82	9,67	3,05
D	1,95	4,94	1,56
E	1,15	10,21	3,23
F	1,13	11,23	3,55
Průměr	2,76	9,73	3,08

Tabulka 5.1: Statistika výsledků testování lokalizace v laboratorním prostředí

Statistika výsledků testování lokalizace je uvedena v tabulce 5.1. V prvním sloupci je uveden rozdíl průměrných hodnot odhadů pozic \hat{P} a reálné pozice P zdroje signálu. V druhém sloupci je uvedena hodnota rozptylu pro soubory měření v jednotlivých bodech. V posledním sloupci je uvedena chyba průměru (Standard Error, SE). Poslední řádek obsahuje průměrné hodnoty statistických veličin přes všechny měřené pozice.

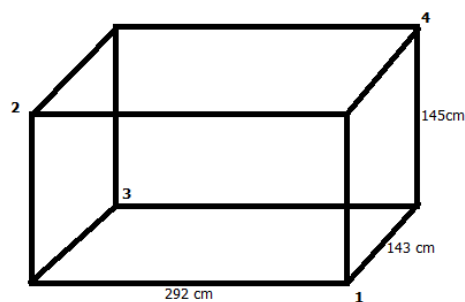
5.2 Testování na reálném zařízení

V rámci testování systému na reálném zařízení bylo provedeno měření na olejovém transformátoru ve firmě Heslia Bratislava. Na obrázku 5.20 je štítek měřeného transformátoru. Jedná se o 2-vinutový olejový transformátor firmy Siemens s jmenovitým napětím 110 kV / 11 kV a jmenovitým výkonem 33 MVA. Napájení bylo zajišťováno suchým transformátorem se jmenovitým napětím 10 kV / 0,4 kV a jmenovitým výkonem 1,25 MVA.



Obrázek 5.20: Štítek transformátoru (Hesia Bratislava)

Na transformátoru bylo provedena detekce částečných výbojů akustickou metodou. Detekce výbojů probíhala při napájecím napětí 10 kV z nízké strany, pomocí 4 sond umístěných ve vybraných měřících bodech. Umístění bodů bylo zvoleno tak, aby tvořily vrcholy čtyřstěny s největším objemem viz obrázek 5.21.



Obrázek 5.21: Rozmístění ultrazvukových sond (Hesia Bratislava)



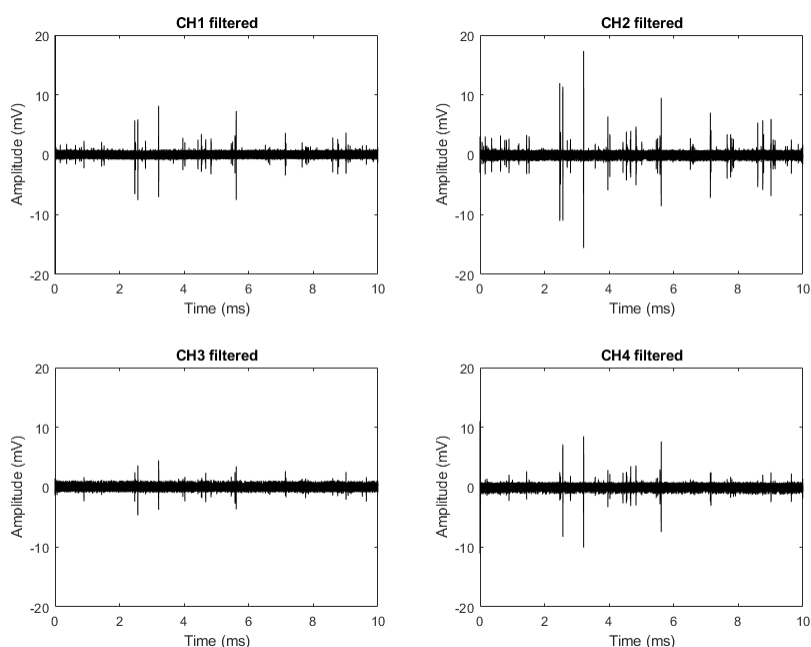
Obrázek 5.22: Měřicí systém - záznamová jednotka se zesilovači a laptopem pro záznam hodnot



Obrázek 5.23: Měřený transformátor s rozmístěnými ultrazvukovými sondami (Hesia Bratislava)

Průběhy signálu z jednotlivých sond jsou znázorněny na obrázku 5.24. Jelikož se v signálu objevovaly silné rušivé složky na nižších frekvencích, způsobované především provozem napájecího transformátoru a hlukem z okolí, byl zaznamenaný signál filtrován digitálním filtrem typu horní propust se zlomovým kmitočtem 70 kHz

Na průbězích jsou patrné špičky o amplitudě < 20 mV, jejichž dominantní frekvence je v pásmu 1 MHz - 3 MHz. Pozice těchto impulzů v čase je tožná, jedná se tak s největší pravděpodobností o elektrickou vazbu působící na všechny sondy stejně. Z tohoto důvodu nebylo možné použít akustickou metodu lokalizace za pomoci triangulace. Na žádost provozovatele bylo též provedeno měření na jednotlivých odbočkách transformátoru. Byly zaznamenány špičkové hodnoty odezvy a hodnoty RMS.



Obrázek 5.24: Průběhy signálu po digitální filtraci z jednotlivých sond (CH1 až CH4)

Kanál	RMS [mV]	Peak [mV]
CH1	0,2476	8,1819
CH2	0,2724	17,3462
CH3	0,2471	4,5054
CH4	0,2409	11,0356

Tabulka 5.2: Výsledky měření transformátoru z Hesla Bratislava

Během měření probíhala kontrola ultrazvukové emise na vybraných bodech pomocí akustické sondy Ultraprrobe 100 (UP1000SC) s rezonanční frekvencí 36 kHz - 44 kHz, a byla srovnávána s měřením v beznapětovém stavu. Měření akustickou sondou ve všech bodech zaznamenalo nulovou aktivitu v daném frekvenčním pásmu ultrazvuku. Závěrem měření tedy bylo, že v měřeném transformátoru neprobíhá významná výbojová činnost, sledovatelná v rámci akustického měření.

Kapitola 6

Závěr

Tato diplomová práce se zabývá metodikou měření částečných výbojů s důrazem na akustické měření, následný návrh měřicího systému a jeho testování v laboratoři, posléze též na zařízení používaném v reálném provozu. Primární účel měřicího systému je detekce a lokalizace částečných výbojů, které patří mezi hlavní poruchové faktory vysokonapěťových zařízení. V práci je uveden přehled používaných metod měření částečných výbojů a srovnání těchto metod. Z akustických metod byly popsány metody amplitudové detekce a lokalizace za pomoci triangulace v homogenním prostředí.

V praktické části práce jsou popsány jednotlivé části navrženého systému a jejich charakteristiky. Implementována byla lokalizační metoda pomocí triangulace v 3D homogenním prostředí za pomoci čtveřice ultrazvukových sond. Funkčnost systému byla ověřena na testovací aparatuře v laboratoři, a také byl proveden test na zařízení používaném v reálném provozu. Výsledky opakovaného testování v laboratoři prokázaly schopnost systému lokalizovat zdroj akustické odezvy v jednoduchém uspořádání testovací nádoby. Při měření na zařízení používaném v reálném provozu (olejový transformátor) se nepodařilo ověřit schopnost systému detekovat a případně lokalizovat částečné výboje, nicméně přítomnost výbojů nebyla detekována ani jiným akustickým systémem.

V rámci této práce tak byla otestována funkčnost metody lokalizace pro jednoduchý případ, tj. přítomnost jediného zdroje výbojů s jednoduchou konstrukcí měřeného objektu. V praxi se však můžeme setkat s případy, kdy se nám mohou kombinovat různé impulsové odezvy z několika zdrojů s možným překrytím a s různými cestami šíření. Pro důsledné ověření použitel-

nosti měřicího systému by bylo potřeba jej otestovat na zařízení se známým defektem a výbojovou činností. V případě měření vysokonapěťových zařízení používaných v reálném provozu však mohou nastat problémy s lokalizací kvůli členitosti vnitřní konstrukce zařízení. Pro přesnější výsledky by se muselo při vyhodnocování počítat s komplexním modelem zařízení, pokud možno též za použití metody lokalizace pro nehomogenní prostředí. Pro další zpřesnění lokalizace by bylo možné použít souběžně další neakustickou metodu, například vysokofrekvenční proudový transformátor v kombinaci s akustickým měřicím systémem.



Příloha A

Literatura

- [1] Sensor rfct-075 user manual ib02713006e rev.a. Accessed: 01.01.2024, available online at: <https://www.eaton.com/ecm/idcplg>.
- [2] W. Higinbotham. Online vs. offline partial discharge testing for cable assessment. *NetAWorld*, 2017.
- [3] Trnka P. Mužík M. Návrh online diagnostického systému. *Elektrotechnika a informatika*, 2018.
- [4] Adrian A. Pollock (PAC). Acoustic emission inspection. *PCI-2 Based AE System - User's Manual*, 2003.
- [5] Tribikram Kundu. Acoustic source localization. *Ultrasonics*, 54(1):25–38, 2014.
- [6] IEC 60270:2000 High-voltage test techniques - Partial discharge measurements. Standard, International Electrotechnical Commission, November 2015.
- [7] Ieee guide for the measurement of partial discharges in ac electric machinery. *IEEE Std 1434-2014 (Revision of IEEE Std 1434-2000)*, pages 1–89, 2014.
- [8] ČSN EN 60270 Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů. Norma, Český normalizační institut, December 2001.
- [9] Ieee guide for the detection and location of acoustic emissions from partial discharges in oil-immersed power transformers and reactors. *IEEE Std C57.127-2007 (Revision of IEEE Std C57.127-2000)*, pages 1–55, 2007.

- [10] IEC 60599:2022 Mineral oil-filled electrical equipment in service - Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis. Norma, IEC, May 2022.
- [11] S. J. Vahaviolos. Real time detection of microcracks in brittle materials using stress wave emission (swe). *IEEE Trans.*, Vol. PHP-10 (No. 3), 1974.
- [12] K. H. Pärtzel. Acoustic emission for crack inspection during fully automatic and manual straightening of transmission shafts. *Proceedings of the Acoustic Emission Symposium (Bad Neuheim)*, 1988.
- [13] R.K. Miller and P. McIntire. Acoustic emission testing. *American Society for Nondestructive Testing*, Vol. 5, 1987.
- [14] Wojciech Sikorski and Waldemar Ziomek. *Detection, Recognition and Location of Partial Discharge Sources Using Acoustic Emission Method*. 03 2012.
- [15] A. Tobias. Acoustic-emission source location in two dimensions by an array of three sensors. *Non-Destructive Testing*, 9(1):9–12, 1976.
- [16] H. Kols T. Bengtsson and B. Jonsson. Transformer pd diagnosis using acoustic emission technique. December 1997.
- [17] Vds series scpi protocol v1.6. Accessed: 23.05.2023, available online at: <https://www.owon.com.hk/download>.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kouřil** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **434893**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Elektronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh a realizace systému pro akustickou detekci částečných výbojů v olejových transformátorech

Název diplomové práce anglicky:

Design and implementation of a system for acoustic detection of partial discharges in oil transformers

Pokyny pro vypracování:

1. Shrňte současný stav poznání v oblasti měření a detekce částečných výbojů a jejich vlivu na stav izolačního systému VN elektrických strojů.
2. Detailně se zaměřte na princip akustické detekce částečných výbojů v olejových transformátorech.
3. Navrhněte a realizujte vhodný systém pro akustickou detekci částečných výbojů.
4. Realizujte patřičné softwarové vybavení systému pro vyhodnocení výsledků měření.
5. Ověřte funkčnost a měřicí schopnosti systému v laboratorních i v provozních podmínkách.
6. Zhodnoďte dosažené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] IEC 60270:2000+AMD1:2015 CSV Consolidated version: High-voltage test techniques - Partial discharge measurements. 3.1. 2015.
- [2] IEC 60270-ed.3.0: High-voltage test techniques - Partial discharge measurements. 3.0.2000
- [3] Mentlík, V., Pihera, J., Polanský, R., Prosr, P., Trnka, P.: Diagnostika elektrických zařízení. BEN-technická literatura, Praha 2008. ISBN 978-80-7300-232-9

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Radek Sedláček, Ph.D. katedra měření FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **14.02.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **09.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **22.09.2024**

Ing. Radek Sedláček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta