VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ ELEKTROMAGNETICKÉ A AKUSTICKÉ EMISE PŘI MECHANICKÉM ZATĚŽOVÁNÍ PEVNÝCH LÁTEK

PROCESSING OF ELECTROMAGNETIC AND ACOUSTIC EMISSION SIGNALS DURING MECHANICAL STRESSING OF SOLIDS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. MARTIN ŠOPÍK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. PAVEL KOKTAVÝ, CSc. Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2008

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Šopík Martin, Bc. ***ID:*** 88540
Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2007/08

NÁZEV TÉMATU:

Zpracování signálů elektromagnetické a akustické emise při mechanickém zatěžování pevných látek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem generace signálů elektromagnetické (EME) a akustické (AE) emise při mechanickém zatěžování nevodivých pevných látek. Popište metody jejich snímání. Navrhněte způsob korekce vedoucí k odstranění transformace zdrojového signálu použitým měřicím obvodem. Dále navrhněte metodiku zpracování těchto signálů s ohledem na potřebu stanovení počátku jednotlivých signálů, určení jejich dominantních frekvencí a dalších parametrů.
Předpokládá se znalost problematiky zpracování signálů a základů programování v prostředí Matlab nebo C++ Builder.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Pavel Koktavý. Nedestruktivní diagnostika a fyzika dielektrik, FEKT VUT v Brně. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006. s. 1-102.
[2] KOKTAVÝ, P., PAVELKA, J., ŠIKULA, J. Characterization of acoustic and electromagnetic emission sources. Measurement Science and Technology, 2004, roč. 15, č. 1, s. 973-977. ISSN: 0957-0233.

Termín zadání: 11.2.2008 ***Termín odevzdání:*** 28.5.2008

Vedoucí projektu: doc. Ing. Pavel Koktavý, CSc. Ph.D.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Martin Šopík

Bytem: K Myslivně 242, 69127, Popice

Narozen/a (datum a místo): 29.11.1983, Hustopeče

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

Článek 1
Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
   - ☐ disertační práce
   - ☐ diplomová práce
   - ☐ bakalářská práce
   - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako ……..……

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Zpracování signálů elektromagnetické a akustické emise při mechanickém zatěžování pevných látek

Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Pavel Koktavý, CSc. Ph.D.

Ústav: Ústav telekomunikací

Datum obhajoby VŠKP: ……

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- ☐ tištěné formě – počet exemplářů ……..
- ☐ elektronické formě – počet exemplářů ……..

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2
Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizovaní výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
   - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
   - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
   - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
   - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
   - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy

   (z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3
Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísni a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: …….

…….	……
Nabyvatel	Autor

ABSTRAKT

Elektromagnetická emise a akustická emise jsou fyzikální jevy vyvolané náhlým uvolnění energie v nevodivém materiálu, kterou generují vznikající trhliny v jeho struktuře. Významný je přitom fakt, že generované signály se objevují již ve stádiu zatěžování látek, čehož lze využít např. u nedestruktivní diagnostiky stavebních materiálů a konstrukcí. Vhodný způsob zpracování těchto signálů pak může poskytnout cenné informace pro studium fyzikálních vlastností trhlin. V této práci jsou popsány metody zjišťování důležitých parametrů signálů v časové, frekvenční i časově-frekvenční oblasti. Jedná se např. o zjištění počátků signálů, maximálních hodnot, dominantních frekvencí apod. Všechny metody jsou implementovány do jednoho hlavního programu. Dále je vyjádřena transformace zdrojového signálu, kterou vnáší použitý měřicí obvod. Zvolena byla analytická metoda, což znamenalo nalezení náhradního elektrického obvodu s konstantními hodnotami prvků. Výsledný obvod aproximuje původní měřicí obvod s menší kvadratickou chybou než dosavadní způsob řešení. Transformace je vyjádřena pomocí diferenciální rovnice druhého řádu s konstantními koeficienty. Pro všechny výpočty a návrhy byl použit software MATLAB.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektromagnetická emise, akustická emise, zpracování signálu, diferenciální rovnice, nedestruktivní diagnostika, EME, AE, MATLAB

ABSTRACT

Electromagnetic emission and acoustic emission are physical phenomena evoked in non-conductive material by the sudden release of energy that generate rising cracks in material structure. The significant is a fact that these emission signals are detected already in stadium of materials loading whereof can be used e.g. at non-destructive diagnostics of building materials and constructions. In the appropriate manner processing of the emitted signals then make possible to obtain valuable informations for study physical properties of cracks. Master's thesis describes methods designed for important signal data ascertainment in time, frequency even time-frequency domain. It can be e.g. start time, maximum value, dominant frequency in spectrum etc. All these methods are implemented into main program. Next load is formularization of source signal transformation which is given by used measuring circuit. Analytical method is chosen for solving. It means finding out reserve electrical circuit with constant element values. Resultant circuit approaches original circuit with less square error than existing way. The signal transformation is described by differential equation of second order with constant coefficients. MATLAB software is used for all computations and projections.

KEYWORDS

Electromagnetic emission, acoustic emission, signal processing, differential equation, non-destructive diagnostic, EME, AE, MATLAB

Bibliografická citace:

ŠOPÍK, M. *Zpracování signálů elektromagnetické a akustické emise při mechanickém zatěžování pevných látek.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 80 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Koktavý, CSc. Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma **Zpracování signálů elektromagnetické a akustické emise při mechanickém zatěžování pevných látek** jsem 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 diplomové 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 27.5.2008 .....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlu Koktavému, CSc. Ph.D. za příkladnou a velmi užitečnou metodickou pomoc, náměty a cenné rady při zpracování diplomové práce. Děkuji také svým rodičům za trpělivou podporu během studia.

Tato diplomová práce vznikla za podpory grantu GAČR GA 103/06/0708 a výzkumného záměru MSM 0021630503.

V Brně dne 27.5.2008 .....

podpis autora

OBSAH

Úvod **12**

1 Elekromagnetická a akustická emise v pevných látkách **13**
1.1 Generace signálů EME a AE 13
1.2 Metoda snímání signálů EME 14
1.2.1 Kapacitní snímač 14
1.2.2 Indukční snímač 15
1.2.3 Výběr snímače 16
1.3 Metoda snímání signálů AE 16
1.3.1 Piezoelektrický snímač 16
1.4 Pracoviště pro snímání signálů 17
1.4.1 Technické parametry použitých přístrojů 18
1.5 Charakteristika měřeného materiálu 21

2 Signály elektromagnetické a akustické emise **23**
2.1 Obecná klasifikace signálů 24
2.1.1 Spojitý a diskrétní signál 24
2.1.2 Periodický a aperiodický signál 24
2.1.3 Deterministický a stochastický signál 25
2.1.4 Stacionární a nestacionární signál 25
2.1.5 Klasifikace signálů EME a AE 26
2.2 Signály akustické emise 27
2.2.1 Spojitá akustická emise 27
2.2.3 Nespojitá akustická emise 28
2.3 Signály elektromagnetické emise 29
2.3.1 Typické průběhy signálů 29

3 Zpracování signálů elektromagnetické a akustické emise **32**
3.1 Popis programu zpracování signálů 32
3.1.1 Struktura programu 32
3.1.2 Ovládání 34
3.2 Filtrace signálu 36
3.2.1 Návrh filtru 36
3.2.2 Filtrovací metoda 38
3.3 Parametry signálů EME a AE v časové oblasti 38
3.3.1 Doba příchodu 38
3.3.2 Doba náběhu 39
3.3.3 Doba trvání 40
3.3.4 Počet průchodů nulou 40
3.3.5 Počet průchodů nulou před maximální hodnotou 41
3.3.6 Maximální hodnota 41
3.3.7 Energie události 41
3.3.8 Efektivní hodnota 42
3.4 Parametry signálů EME a AE ve spektrální oblasti 42
3.4.1 Výkonová spektrální hustota 42

3.5 Časově-frekvenční analýza ... 44
3.5.1 Spektrogram ... 44

4 Transformace zdrojového signálu ... 46
4.1 Metoda určení přenosové charakteristiky ... 46
4.2 Metoda analytického vyjádření transformace ... 46
4.2.1 Náhradní model zkoumaného vzorku ... 47
4.2.2 Výpočet kvadratické odchylky ... 49
4.2.3 Aplikace zákona zachování energie ... 51
4.2.4 Určení indukovaného napětí při obecné zatěžovací impedanci ... 53
4.2.5 Odvození diferenciálních rovnic ... 54
4.2.6 Možnosti využití odvozených rovnic ... 57
4.2.7 Vliv rušivého napětí ... 57

5 Ovládací program osciloskopu HS4 ... 59
5.1 Připojení osciloskopu k počítači ... 59
5.2 Popis programu ... 60
5.2.1 Nastavení obecných parametrů ... 61
5.2.2 Nastavení parametrů měření ... 62
5.2.3 Ovládání programu ... 63

6 Závěr ... 65

Seznam literatury ... 67

Seznam symbolů, veličin a zkratek ... 69

Seznam příloh ... 71

A Pracoviště pro měření signálů EME a AE ... 72
A.1 Vzorek se snímačem signálu EME ... 72
A.2 Snímače signálu AE ... 72
A.3 Článek RC ... 73
A.4 Snímač zatížení HBM C2 ... 73
A.5 Zesilovač 3S SEDLAK PA15 ... 74
A.6 Zesilovač 3S SEDLAK PA31 ... 74
A.7 Digitální multimetr Agilent 34410A, zesilovač EG&G Princeton 5113, napájecí zdroj Agilent E3631A ... 75
A.8 Osciloskop TiePie Handyscope HS4 ... 76
A.9 Stíněná část pracoviště ... 76
A.10 Celkové zapojení pracoviště ... 77

B Program zpracování signálů EME a AE ... 78
B.1 Okno programu ... 78

C Ovládací program osciloskopu HS4 ... 79
C.1 Okno programu ... 79

D Obsah přiloženého CD ... 80

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Kapacitní snímač ve tvaru deskového kondenzátoru [6]. 14
Obr. 1.2: Zatěžovací impedance pro praktické použití [6]. 15
Obr. 1.3: Vzájemná poloha snímací cívky a kmitajícího náboje [6]. 15
Obr. 1.4: Uspořádání piezoelektrického senzoru akustické emise [10]. 17
Obr. 1.5: Blokové schéma navrženého pracoviště pro snímání signálů EME a AE. 18
Obr. 2.1: Reálný signál EME a AE, soubor extren87.005. 23
Obr. 2.2: Ukázka nespojitého signálu AE, soubor extren67.052. 28
Obr. 2.3: Průběhy signálů EME: a) typ I, extren68.014, b) typ II, extren61.008, c) typ III, extren60.060, d) typ IV, extren60.040, e) typ V, extren67.052, f) typ VI, extren60.021. 30
Obr. 2.4: Průběh signálu EME, typ VII, extren51.011: a) celý průběh, b) detail. 31
Obr. 3.1: Zjednodušený vývojový diagram programu zpracování signálů. 33
Obr. 3.2: Ovládání programu zpracování signálů. 34
Obr. 3.3: Modulová a fázová charakteristika filtru. 37
Obr. 3.4. Impulzní charakteristika filtru. 37
Obr. 3.5: Znázornění některých parametrů signálu v časové oblasti. 39
Obr. 3.6: Přiblížené časové průběhy analyzovaných signálů EME a AE, soubor 16.4.08_c.5_2.txt. 43
Obr. 3.7: Výsledky spektrální analýzy signálů EME a AE, soubor 16.4.08_c.5_2.txt. 43
Obr. 3.8: Výsledky časově-frekvenční analýzy signálů EME a AE, soubor 16.4.08_c.5_2.txt. 45
Obr. 4.1: Změřené závislosti paralelního odporu a paralelní kapacity na frekvenci pro vzorek s elektrodami. 47
Obr. 4.2: Modely vzorku s elektrodami: a) při měření charakteristik, b) náhradní obvod s konstantními prvky. 48
Obr. 4.3: Průběhy změřené a teoretické impedance vzorku s elektrodami. 49
Obr. 4.4: Kapacitní snímač ve tvaru deskového kondenzátoru [6]. 51
Obr. 4.5: Zatěžovací impedance pro praktické použití doplněná o náhradní model z pohledu ZZE. 52
Obr. 4.6: Zatěžovací impedance pro praktické použití doplněná o náhradní model a ekvivalentní zdroj proudu. 53
Obr. 4.7: Analyzovaný obvod s uvedenými dílčími proudy a napětími. 54
Obr. 5.1: Zjednodušený vývojový diagram ovládacího programu. 60
Obr. 5.2: Obecné nastavení měření. 61
Obr. 5.3: Výchozí nastavení parametrů měření. 62
Obr. 5.4: Ovládání a informační výpis. 64

ÚVOD

V současné době je možné sledovat významný nárůst pozornosti na měřicí metody z oblasti nedestruktivní diagnostiky stavu materiálů. Podstatný je přitom fakt, že tyto metody dokáží poskytnout informace o stavu materiálu již v době před jeho makroskopickým rozrušením. Mezi tyto perspektivní metody patří elektromagnetická a akustická emise. Významu nabývají především ve výzkumu plastické deformace materiálu, vzniku mikroskopických trhlin a jejich šíření či zjišťování úniků kapalin ze zásobníků a potrubí [6], [10].

S ohledem na zadané úkoly, které mají být v diplomové práci řešeny, se v následujícím textu zabývám nejprve seznámením s těmito velmi zajímavými metodami. Uvádím jejich základním principy a způsoby měření.

Následujícím úkolem je uvedení do problematiky zpracování signálů, které vznikají elektromagnetickou a akustickou emisí. Praktickým úkolem je předložení návrhu vhodné metodiky zpracování signálů s ohledem na potřebu stanovení důležitých parametrů, jako např. počátků jednotlivých signálů, zjištění maximálních hodnot, dominantní frekvencí apod.

Dalším praktickým úkolem je návrh způsobu korekce vedoucí k odstranění transformace zdrojového signálu použitým měřicím obvodem. Vyjádřenou transformací je pak možné ze změřené veličiny zpětně určit děj v materiálu při vzniku trhliny.

Praktické úkoly jsou z hlediska postupů a úvah při řešení přehledně popsány v jednotlivých kapitolách. Při tvorbě návrhů vycházím ze změřených reálných signálů, které byly k dispozici na Ústavu fyziky FAST a FEKT VUT v Brně. Pro většinu návrhů jsem použil prostředí MATLAB verze 7.1, které lze považovat za nejrozšířenější pro řešení inženýrských výpočtů a vývoj.

1 ELEKROMAGNETICKÁ A AKUSTICKÁ EMISE V PEVNÝCH LÁTKÁCH

Elektromagnetická emise (EME) a akustická emise (AE) jsou jevy, které jsou vyvolány při náhlém uvolnění energie v nevodivé látce, která je mechanicky namáhána např. vnějším tlakem, ohybem, tahem, při úderu apod. Pro vysvětlení těchto jevů lze použít řadu modelů, které jsou založeny na představě, že při mechanickém působení na látku dochází k vzniku trhlin. Stěny trhlin se nabíjejí opačnými náboji a vykazují mechanické kmitání. Stávají se potom zdrojem elektromagnetického pole a mechanického vlnění. V případě jevu EME tedy látka generuje elektromagnetické pole a v případě AE generuje elastické mechanické vlny v ultrazvukovém pásmu [7].

Uvedená problematika je v současné době velmi aktuální. Výzkum probíhá zejména na poli stavebnictví a geofyziky. Významný je přitom fakt, že signály EME a AE se objevují již ve stádiu zatěžování látek, čehož lze využít např. při nedestruktivní diagnostice stavebních materiálů a konstrukcí. Nevýhodou je velmi malá emitovaná energie a tedy nebezpečí ztráty signálů v šumovém pozadí snímače.

Přestože existuje mnoho studií zabývajících se jevem elektromagnetické emise, skutečnost, že v průběhu vzniku trhliny se na jejích stěnách objevují elektrické náboje, nebyla dosud uspokojivě vysvětlena. Na Ústavech fyziky FEKT a FAST VUT v Brně byl tento problém řešen v rámci grantových projektů.

1.1 Generace signálů EME a AE

Při mechanickém namáhání pevné látky dochází v její struktuře k fyzikálním jevům, během kterých dochází k redistribuci elektrických nábojů obsažených v atomech. Náboje pak generují elektromagnetické pole, které může zprostředkovat informace o probíhajícím procesu v látce. Transformace charakteristik elektrických nábojů na charakteristiky elektromagnetického pole a dále pak na měřitelné veličiny tvoří základní problém při zjišťování důležitých informací o daném procesu [6].

Aplikovaný model generace EME je založen na pohybu nabitých stěn trhliny. Elektrický náboj vytváří na stěnách nově vytvořené trhliny elektrický dipól a díky jejich kmitání má signál EME frekvenci odpovídající délce trhliny. Signál AE, který se objevuje se zpožděním, má díky mechanickým kmitům samotného vzorku látky frekvenci danou rozměry vzorku. Četnost obou signálů je velmi malá, pohybuje-li se namáhání látky v rozsahu Hookova zákona, vysokých hodnot četnosti však dosahuje v blízkosti zničení vzorku. Zde se také zvyšuje amplituda generovaných signálů [7], [8].

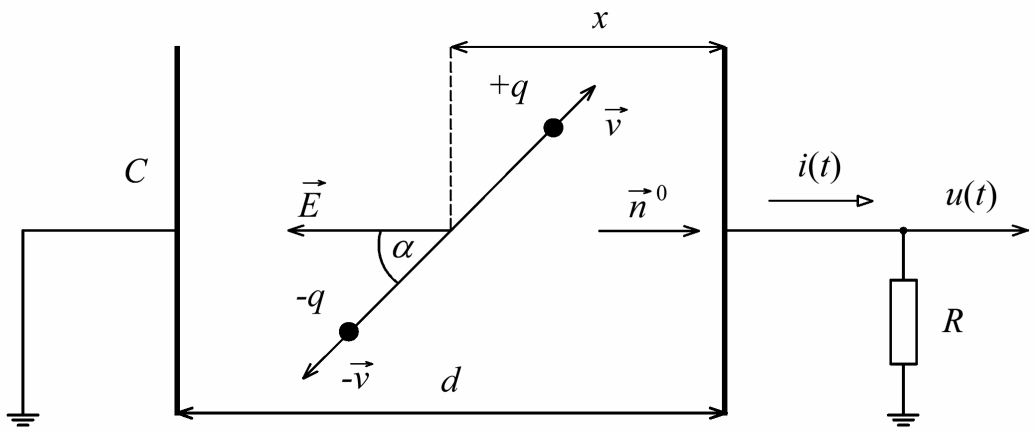
1.2 Metoda snímání signálů EME

Při snímání signálů elektromagnetické emise je nutné vyšetřit, jakými způsoby a metodami lze provést snímání jednotlivých parametrů generovaného elektromagnetického pole. Jedná se především o vektor intenzity elektrického pole $\vec{E}$, snímaný kapacitním snímačem, a magnetické indukce $\vec{B}$, snímané indukčním snímačem. Pro další zpracování analyzátorem je pak nutné provést převod (transformaci) těchto veličin na měřitelné elektrické napětí.

1.2.1 Kapacitní snímač

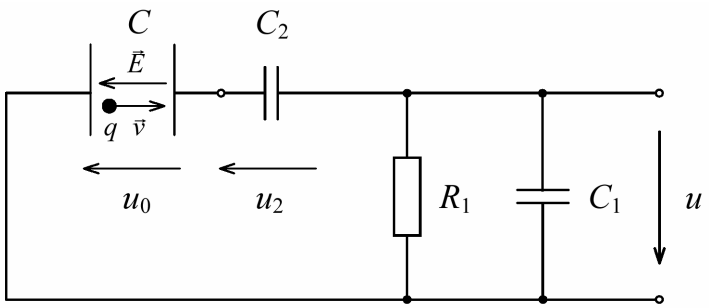
V laboratorních podmínkách se jako nejvhodnější pro snímání signálů elektromagnetické emise jeví kapacitní snímač (kondenzátor) uvedený na obr. 1.1. Dielektrikem je vzorek sledované látky ve tvaru pravoúhlé desky. Kapacitní snímač je pak tvořen dvěmi vodivými deskami, které jsou z obou stran vzorku látky. Tyto deskové elektrody mohou být z pevného materiálu např. cuprextitové desky nebo jako vodivá vrstva, vrstva grafitu nebo laku s obsahem stříbra, nanesena na zkoumaném vzorku.

V souladu s použitým teoretickým modelem lze předpokládat, že se při vzniku trhliny v materiálu na jejích stěnách vytváří elektrické náboje $+q$ a $-q$, které způsobují, že mezi deskami kapacitního snímače vzniká elektrické pole $\vec{E}$. Dále, pokud se elektrický náboj q pohybuje v elektrickém poli o intenzitě $\vec{E}$ rychlostí $\vec{v}$, protéká zatěžovacím odporem R elektrický proud i a tím vytváří na odporu R elektrické napětí u. Vzniklé napětí je měřenou veličinou signálu EME a je časově proměnné v závislosti na generaci elektrického náboje, pohybu stěn trhliny a elektrické vodivosti vzorku [6].



Obr. 1.1: Kapacitní snímač ve tvaru deskového kondenzátoru [6].

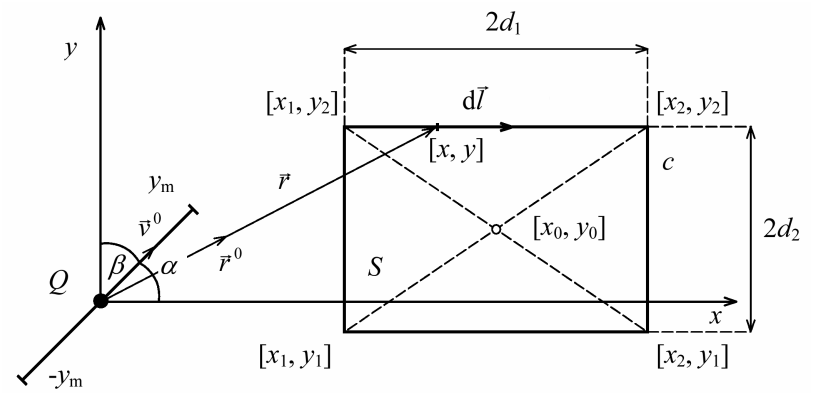
Pro praktické použití je z důvodu zvýšení citlivosti měření vhodné zapojit kapacitní snímač dle obr. 1.2. Kapacita C značí vlastní kapacitu snímače, C_2R_1 tvoří filtr typu horní propust, C_1 je vstupní kapacita kabelu a následného předzesilovače, R_1 je paralelní kombinace vstupního odporu následného předzesilovače a zatěžovacího odporu R. Touto modifikací zapojení se dosáhne snížení přijímaného rušení z okolí, především v nízkofrekvenční oblasti [6].



Obr. 1.2: Zatěžovací impedance pro praktické použití [6].

1.2.2 Indukční snímač

Pro snímání magnetické složky signálu elektromagnetické emise se používá indukční snímač, který je tvořen obdélníkovou cívkou vhodných rozměrů s několika závity a jehož konfigurace je zobrazena na obr. 1.3.



Obr. 1.3: Vzájemná poloha snímací cívky a kmitajícího náboje [6].

Předpokladem pro jednodušší vysvětlení jeho funkce je, že ve směru daném vektorem $\vec{v}^0$ kmitá náboj výchylkou y a rychlostí v. Snímáním magnetické indukce $\vec{B}$ se měřené napětí indukuje v cívce. Toto indukované napětí je úměrné velikosti náboje Q, počtu závitů cívky n, zrychlení náboje a, permeabilitě jádra μ a poloze cívky

vhledem ke kmitajícímu náboji. . Snímací cívka má rozměry $x_2 - x_1$, $y_2 - y_1$ se středem v bodě $[x_0, y_0]$ ležící v rovině xy [6].

Indukované napětí tedy závisí na poloze snímací cívky vzhledem k poloze a směru kmitání náboje Q. Lze zjistit, že maximální hodnoty napětí se dosáhne v polohách cívky, kdy je náboj nejblíže její hranici. To také znamená, že indukované napětí bude vždy nulové, pokud náboj Q kmitá přímo ve středu cívky. Další nevýhodou je selektivita snímače, neboť cívka tvoří s kapacitami na vstupu předzesilovače rezonanční obvod [6].

1.2.3 Výběr snímače

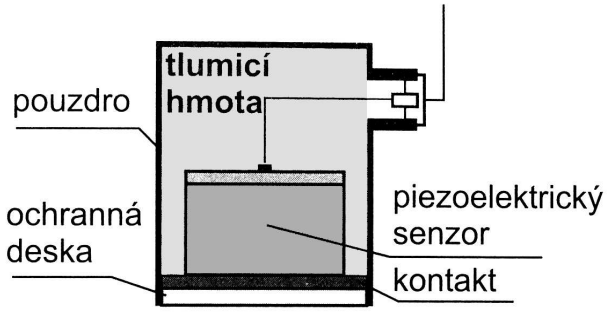
Experimentálním studiem bylo zjištěno, že spektrum elektromagnetického vlnění generovaného sledovanou látkou při mechanickém vybuzení obsahuje široký interval frekvencí. Snímané signály se mohou nalézat ve frekvenční oblasti od 100 Hz až do 10 MHz. Proto je důležité znát vlastnosti snímačů nejen z hlediska amplitudy přenosové funkce, ale též s ohledem na frekvenční charakteristiku. Z tohoto hlediska je při laboratorních podmínkách pro účely studia a měření vzorků pravoúhlého tvaru vhodné použít kapacitní snímač. Především pro jeho větší citlivost a výhodnější přenosovou charakteristiku [6], [7].

1.3 Metoda snímání signálů AE

Jak již bylo uvedeno v úvodu kapitoly, signál akustické emise AE se generuje současně se signálem EME při vzniku trhliny v materiálu. Pro vyhodnocování signálu je nutné provést převod mechanických elastických vln na měřitelnou veličinu, kterou nejčastěji bývá elektrické napětí patřičné úrovně.

1.3.1 Piezoelektrický snímač

Piezoelektrický snímač akustické emise je založen na piezoelektrickém jevu, který nastává při mechanickém namáhání krystalu určité látky, např. horniny s obsahem křemene. Krystalická látka, nejčastěji ve tvaru tenké destičky, je stlačována resp. natahována, čímž se deformují kromě samotné destičky i její molekuly. Změní se tím polohy částic s nábojem a na protějších stranách destičky se objeví stejně velké opačné náboje. Tento vznikající povrchový elektrický náboj je přímo úměrný mechanickému namáhání. Jsou-li na destičce umístěny elektrody (staniolové polepy), lze na nich detekovat piezoelektrické napětí, jehož velikost a polarita závisí na velikosti a směru deformace krystalu. Uspořádání typického piezoelektrického senzoru je zobrazeno na obr. 1.4. [10], [11].



Obr. 1.4: Uspořádání piezoelektrického senzoru akustické emise [10].

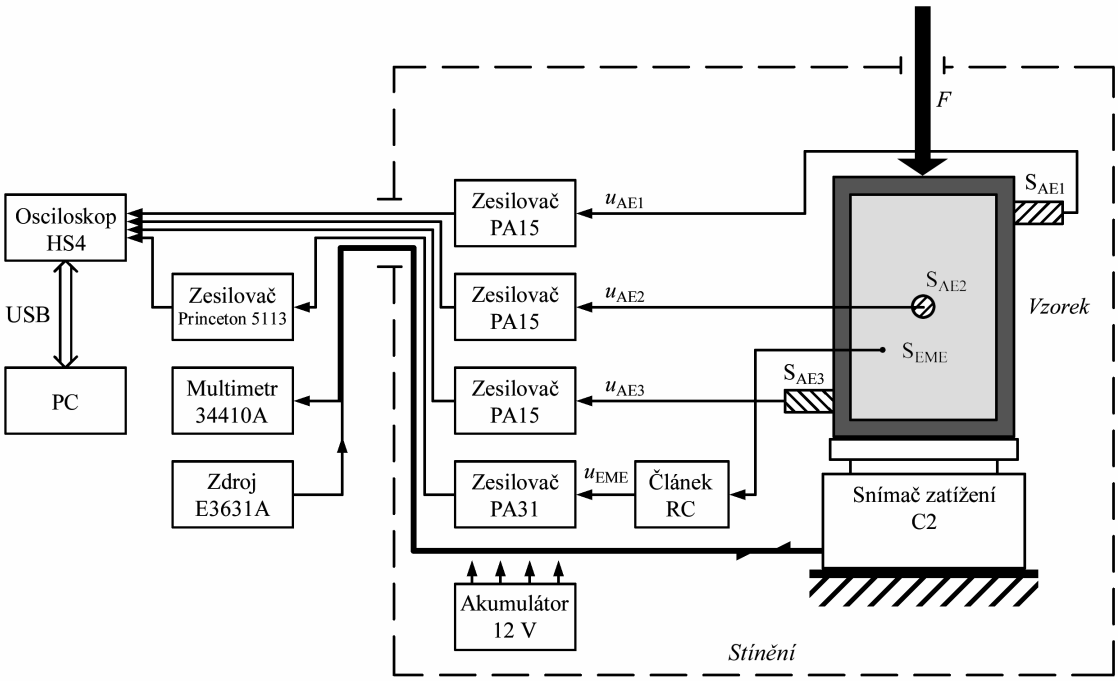
Piezoelektrický jev se dá využít i opačně. Přivedením dostatečně velkého napětí na elektrody destičky piezokrystalu se dosáhne její deformace. Jedná-li se o střídavé napětí, lze takto získat zdroj zvuku nebo ultrazvuku. Využití je možno nalézt jako miniaturní zdroje zvuku pro mobilní telefony, hodinky nebo v oblasti medicíny jako ultrazvukové zobrazování lidského plodu či likvidace ledvinových a žlučníkových kamenů.

1.4 Pracoviště pro snímání signálů

Jako nejvhodnější řešení pro snímání a zpracování signálů EME a AE se ukázalo pracoviště zobrazené na blokovém schématu na obr. 1.5. Jeho reálná podoba je pak zobrazena v příloze A.10. Navržené pracoviště umožňuje automatickou detekci, vyhodnocení a záznam signálů. Obsluha je nutná pouze pro ovládání hydraulického lisu, kterým je vyvíjena tlaková síla na sledovaný vzorek látky. Stručný popis jednotlivých bloků pracoviště je uveden v následující podkapitole.

Z blokového schématu je vidět, že pracoviště obsahuje jeden kapacitní snímač EME signálu a tři piezoelektrické snímače AE signálu. Každý snímač AE je připojen na nezávislý zesilovač, zesílený signál je veden do samostatného vstupu digitálního osciloskopu. Za snímačem EME je umístěna zatěžovací impedance, která byla probrána výše a jejíž zapojení je uvedeno obr. 1.2. Následně je signál EME zesilován kaskádou dvou zesilovačů, výsledný zesílený signál je veden do zbylého vstupu digitálního osciloskopu. Osciloskop je připojen k PC přes rozhraní USB, přes které probíhá přenos naměřených dat a řídící příkazy z ovládacího programu v počítači. Získaná data se zpracovávají navrženým programem v prostředí MATLAB. Zdroj napětí slouží pro napájení snímače zatížení, multimetr pak pro měření napětí na měřicím mostu ve snímači zatížení. Ke zmenšení vlivu rušivých napětí je zkoumaný vzorek s citlivými měřicími přístroji umístěny ve stíněné plechové krabici s otvory pro signálové kabely a

píst hydraulického lisu. Skutečná podoba stíněné části měřicího pracoviště je uvedena v příloze A.9.



Obr. 1.5: Blokové schéma navrženého pracoviště pro snímání signálů EME a AE.

Výběr nízkošumových zesilovačů musí být zvolen nejen z hlediska dostatečného stínění před okolním rušením, ale také s ohledem na zesilování snímaných signálů v celém jejich frekvenčním spektru. Proto je vhodné použít zesilovače s horní mezní frekvencí přenášeného pásma alespoň 10 MHz u signálu EME a 1 MHz u signálu AE. Nízkošumové předzesilovače dále musí mít dostatečně vysoký vstupní odpor z důvodu vysokých vnitřních odporů snímačů. Předzesilovač u kapacitního snímače musí mít vstupní odpor minimálně 10 MΩ, u piezoelektrického snímače pak minimálně 1 MΩ.

1.4.1 Technické parametry použitých přístrojů

U každého měření jsou vyžadovány parametry použitých přístrojů, především pro možnost sestavení pracoviště a opakování měření nebo pro inspiraci k vybudování pracoviště nového. Proto je na místě uvést stručný základní popis a přehled parametrů použitých přístrojů. Pro názornost jsou v přílohách A.1 - A.8 uvedeny jejich fotografie.

Snímač signálu EME

Jak již bylo uvedeno výše, pro snímání signálu EME je vhodné použít kapacitní snímač, jehož dielektrikem je zkoumaný vzorek. V tomto případě (viz příloha A.1) je

zkoumaný vzorek opatřen dvěma planparalelními elektrodami tvořenými tenkou vrstvou grafitového laku, které jsou umístěny na protějších stěnách vzorku. K elektrodám jsou přívodní vodiče připevněny grafitem a poté včelím voskem.

Snímače signálu AE

Pro snímání signálů AE byly použity dostupné piezoelektrické snímače od výrobců 3S SEDLAK, ZD Rpety-Dakel, konkrétně typ Midi 2001 No.b52 a od výrobce Brüel & Kjaer byl použit snímač typu 4344. Tyto snímače jsou dlouhodobě používány pro laboratorní měření, jejich frekvenční pásmo odpovídá pásmu signálů AE.

Článek RC

Protože se na deskách kapacitního snímače detekuje pouze elektrické pole, je nutné jej převést na elektrické napětí. K tomuto účelu slouží článek RC, který má zapojení dle obr. 1.2. Konkrétní hodnoty prvků jsou R_1 = 10 MΩ, C_2 = 120pF. Zároveň tento obvod slouží jako horní propust, takže nepropouští nízké frekvence rušivého elektromagnetického pole.

Snímač zatížení HBM C2

Pro měření vynakládané síly na zkoumaný vzorek byl použit snímač zatížení HBM C2. Snímač byl umístěn pod vzorkem, pokud možno co nejpřesněji v ose. Je napájen stejnosměrným napětím a výstupní napětí lineárně odpovídá působícímu zatížení v poměru 1 mV ~ 20 kN. Další technické parametry dle [4] jsou např.

- jmenovité zatížení 50 kg až 50t
- třída přesnosti 0,1 %
- napájecí napětí +5 V
- krytí IP 67

Zesilovač 3S SEDLAK PA15

Jde o nízkošumový zesilovač sloužící k zesílení signálu AE. Zvolen byl pro velmi malý vlastní šum, pro vyhovující šířku zpracovávaného pásma a vstupní impedanci. Pro zmenšení vlivu rušivých napětí je umístěn uvnitř stíněné krabice. Zesílení bylo nastaveno nejčastěji na 40dB. Technické parametry zesilovače jsou

- vstupní impedance 2 × 10 MΩ / 40 pF,
- výstupní impedance 50 Ω,
- šířka pásma (-3dB) 3 Hz až 1 MHz,
- zisk 40 / 0 / 20 dB,
- šumové napětí < 2 nV / √Hz.

Zesilovač 3S SEDLAK PA31

Tento nízkošumový zesilovač slouží k předzesílení signálu EME. Zvolen byl pro velmi malý vlastní šum, širší šířku zpracovávaného pásma než má PA15 a pro jeho vysokou vstupní impedanci. Pro zmenšení vlivu rušivých napětí je též umístěn uvnitř stíněné krabice. Zesílení bylo nastaveno nejčastěji na 40dB. Technické parametry zesilovače jsou

- vstupní impedance 2 × 10 MΩ / 20 pF,
- výstupní impedance 50 Ω,
- šířka pásma (-3dB) 20 Hz až 10 MHz,
- zisk 40 / 6 / 20 dB,
- šumové napětí < 1,8 nV / √Hz.

Zesilovač EG&G Princeton 5113

Zde se jedná o nízkošumový zesilovač umístěný jako druhý v kaskádě zesilovačů pro signál EME. Je umístěn již mimo stínění. Tento druhý zesilovač byl použit proto, neboť signál EME je mnohem slabší, než signál AE. Navíc umožňuje vstupní signál filtrovat dle nastavení uživatele. Obsahuje LCD displej, který je možno vypnout pro ještě větší zmírnění vlastního šumu. Technické parametry dle [12] zesilovače jsou

- vstupní impedance 10 MΩ nebo 100 MΩ / 25 pF,
- výstupní impedance 50 Ω,
- šířka flat pásma DC až 1 MHz,
- šířka pásma filtru HP 0,03 Hz až 300 kHz, sklon 6 nebo 12dB / okt.,
- šířka pásma filtru DP 0,03 Hz až 300 kHz, sklon 6 nebo 12dB / okt.,
- zisk – hrubě ×5 až ×50 000, krok 1-2,5-5, přesnost ±1%,
- zisk – jemně ×1 až ×100 000, krok 20% hrubého, přesnost ±2%,
- šumové napětí 4 nV / √Hz při 1 KHz.

Napájecí zdroj Agilent E3631A

Tento stejnosměrný napájecí zdroj sloužil k dodávání +5V napětí pro napájení snímače zatížení HBM C2. Zdroj má tři výstupy, malý šum a umožňuje komunikaci po sběrnici GPIB. Může poskytnout celkový výkon až 80W. Bližší informace lze nalézt na stránkách výrobce [2].

Digitální multimetr Agilent 34410A

Multimetr byl využíván pro měření výstupního napětí ze snímače zatížení HBM C2. Mimo jiné přístroj dokáže měřit odpor, frekvenci, obsahuje paměť na 50 000 naměřených hodnot, komunikaci po sběrnici USB, GPIB či síti LAN, apod. Jedná se

tedy o velmi přesný měřicí přístroj, který byl pro účely tohoto měření, stejně jako napájecí zdroj Agilent, naddimenzovaný. Bližší informace lze nalézt na stránkách výrobce [1]

Osciloskop TiePie Handyscope HS4

Digitální osciloskop HS4 byl pro měření signálů EME a AE zvolen především pro jeho počet vstupů, vysokou vzorkovací frekvenci a bitové rozlišení. Mimo jiné osciloskop obsahuje praktickou funkci „pre-trigger," která umožňuje zaznamenat část signálu ještě před spouštěcím okamžikem. To je výhodné především pro určení šumových podmínek měření. Osciloskop byl ovládán a pracoval pod programem vytvořeným v prostředí MATLAB. Popis programu je uveden v dalších kapitolách. Pro podrobnější informace o osciloskopu lze navštívit stránky výrobce, základní technické parametry dle [14] jsou

- počet kanálů 4 analogové vstupy, konektory BNC,
- vzorkovací frekvence max. 50 MHz,
- délka záznamu max. 131060 vzorků na kanál,
- měřené napětí max. 80V,
- sběrnice USB,
- napájecí napětí přes USB, (dodatečné z PS/2).

Hydraulický lis AUTOTECH

Ruční hydraulický lis AUTOTECH, konkrétně jeho nízké provedení, je umístěn v laboratoři na Ústavu Fyziky FEKT a byl používán pro vyvinutí mechanické síly pro vznik EME a AE ve zkoumaných vzorcích. Výhodou je jeho ruční pohon, díky němuž se po nastavení dané síly nepřenáší do systému žádné rušivé vibrace a dále se osvědčila relativně dobrá časová stálost síly. Lis dokáže vyvinout zcela dostačující sílu (dle vyznačeného údaje až F = 200 kN), což bylo potvrzeno několika zničenými vzorky.

1.5 Charakteristika měřeného materiálu

Jako vhodné materiály pro ověření metodiky detekce trhlin pomocí EME a AE v pevných látkách se osvědčily žula a kompozitní materiál extren 500. Především tento kompozitní materiál se ukázal jako velmi vhodný, neboť vykazuje ve většině případů silnou generaci EME signálů s dostatečnou úrovní pro snímání a další zpracování [7].

Kompozitní materiál (kompozit) je složen ze dvou nebo více materiálů, které mají odlišné vlastnosti. Jejich kombinací získá výsledný materiál vlastnosti nové, často lepší, než které mají samostatné materiály. V případě zkoumaného kompozitu se jedná o

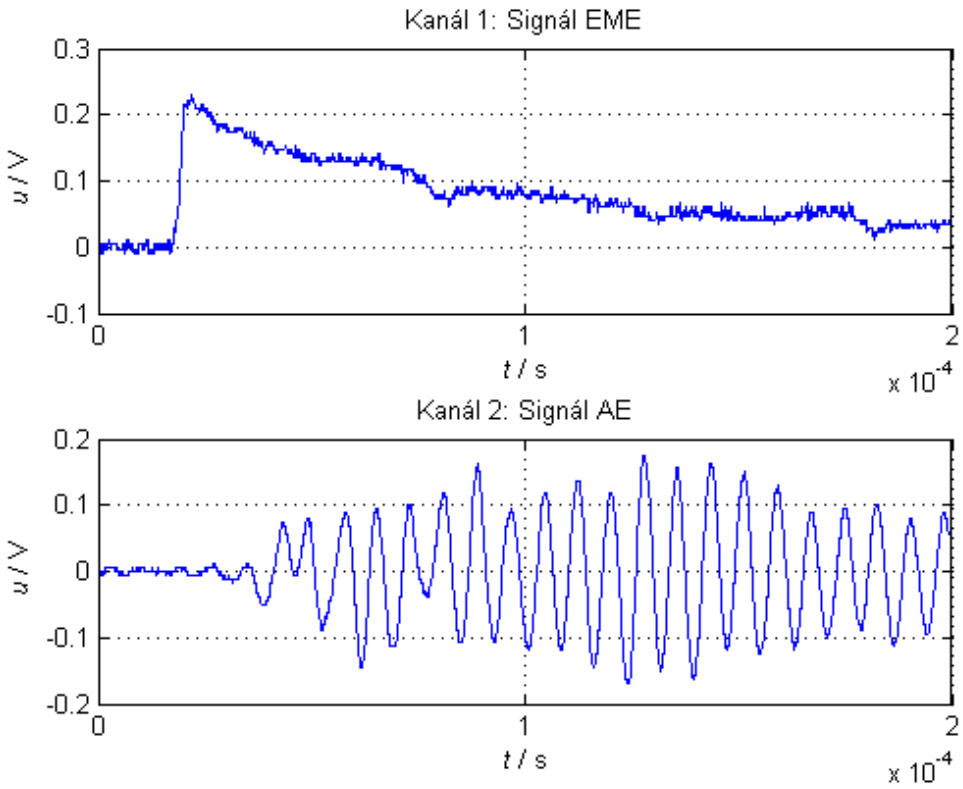
kombinaci výztuže skelnými vlákny pojených polyesterovou pryskyřicí. Pryskyřice tvoří pojivou matrici, která udržuje výztuž v požadovaném tvaru a chrání ji před mechanickým poškozením. U vláknových kompozitů je pevnost a tuhost dána vyztužujícími vlákny, které mají o jeden až dva řády větší pevnost a tuhost než pojivo a při mechanickém namáhání se deformují méně. Vlákna tedy nesou veškeré působící napětí. Nepevné, deformovatelné pojivo se v tomto směru na pevnosti nepodílí. Hlavními výhodami kompozitů jsou např.: až 5× menší hmotnost než ocel, nízká tepelná vodivost, nekorozivost a elektrická nevodivost. Nevýhodou může být vysoká cena. Uplatnění nalézají u staveb lehkých konstrukcí, v agresivních prostředích, jako perspektivní se jeví uplatnění v dopravě. Z hlediska metody snímání EME signálu je významné to, že na rozhraní dvou různých materiálů pojiva a skelného vlákna dochází při vzniku trhlin k značné elektrické aktivitě. Díky tomu lze signály EME snáze detekovat a následně podrobit analýze [7].

Pro laboratorní měření byl zkoumaný kompozitní materiál ve tvaru kvádru, tloušťky nejčastěji 9 mm a velikosti 40 mm × 70 mm. Konkrétní velikost však byla u vzorků mírně odlišná, protože vzorky byly vyrobeny rozřezáním konstrukčních profilů materiálu extren 500. Zatěžování bylo prováděno kolmo na směr skelných vláken, protože při zatěžování kompozitu ve směru vláken nedocházelo ke generaci signálů měřitelných úrovní.

2 SIGNÁLY ELEKTROMAGNETICKÉ A AKUSTICKÉ EMISE

Na samotný pojem *signál* je v odborné literatuře pohlíženo různě a liší se jejím zaměřením. Jiný pohled na signál bude mít zřejmě odborník přes automatizované řízení a jiný bude mít odborník přes informační techniku. V prvním případě půjde o signál ve vztahu k vyjádření určitého *stavu* nebo *chování* systému vhledem k okolí, zatímco v druhém případě půjde spíše o signál vztahující se k pojmům *zpráva* nebo *informace*. Obecně se dá říci, že signál je fyzikální veličina, která nese nějakou informaci, údaj či sdělení.

Pro účely vyhodnocování informací o trhlinách vzniklých při zatěžování je nutné snímané signály EME a AE vhodně popsat a určitým způsobem zpracovat. Je tedy dobré pro lepší orientaci a přehled si signály rozdělit dle současných známých kritérií, což je důležité pro další postup při zpracování. Typický průběh signálu EME a AE je uveden na obr. 2.1. Slouží jako názorný příklad k lepšímu vysvětlení níže uvedeného roztřídění.



Obr. 2.1: Reálný signál EME a AE, soubor extren87.005.

2.1 Obecná klasifikace signálů

Kdykoliv se projevuje snaha něco klasifikovat (rozdělit), vždy se zohledňuje především účel, za jakým se provádí. Z hlediska bližšího popisu signálů EME a AE lze tyto signály klasifikovat vždy do některé z níže uvedených dvojic kategorií. Pokud nebude řečeno jinak, vždy se bude jednat o jednorozměrný signál, jehož průběh např. ve formě grafického znázornění obsahuje jen jednu nezávisle proměnnou (nejčastěji čas *t*) a jednu závisle proměnnou (např. napětí *u(t)*), viz obr. 2.1.

2.1.1 Spojitý a diskrétní signál

Spojitý signál vyjadřuje spojitou funkci *f(t)* spojité nezávisle proměnné *t*. Jinými slovy, spojitým signálem lze nazvat veličinu, která je definována v libovolném bodě časové osy. Spojitý signál se často označuje i za signál se spojitým časem [13], [16].

Diskrétní signál, též signál s diskrétním časem, je posloupnost hodnot $f_n = f(n)$, která je funkcí celočíselného indexu *n*. Zjednodušeně, diskrétním signálem se rozumí veličina, která je definována jen v určitých diskrétních bodech časové osy (v diskrétních okamžicích). V této souvislosti se velmi často o posloupnosti hodnot hovoří jako o posloupnosti vzorků spojitého signálu [13].

Jistým druhem diskrétního signálu je číslicový signál, jehož hodnoty jsou vyjádřeny čísly z konečné číselné množiny (např. 0 … 255 při osmibitovém binárním vyjádření).

2.1.2 Periodický a aperiodický signál

Za periodický signál lze považovat takový signál, jehož funkční hodnoty se opakují v pravidelných intervalech, které se nazývají opakovací perioda T_p. Přitom se nemusí vyloženě jednat pouze o nejznámější periodický signál – harmonický signál funkce sinus nebo cosinus. Jedná-li se o spojitý periodický signál označený např. písmenem *s*, pak lze jeho periodicitu zapsat jako:

$$s(t) = s(t + kT_p), \tag{2.1}$$

kde *k* je celé číslo. V případě, kdy se bude jednat o signál v diskrétní podobě, podmínka periodicity bude mít tvar:

$$s(n) = s(n + N_p), \tag{2.2}$$

kde *n* je celé číslo označující index (pořadí) vzorku v posloupnosti, N_p je celé kladné číslo vyjadřující opakovací periodu. Nejmenší možná hodnota T_p resp. N_p se nazývá základní perioda [13], [16].

Z teorie signálů vyplývá, že periodický signál je definován na časovém intervalu $t \in (-\infty, +\infty)$. Signál, který by byl nekonečně dlouhý však není možno sestrojit. V praxi, při práci s reálnými signály, se matematická definice často přizpůsobuje konkrétním požadavkům. S úspěchem lze říci, že jsou-li signály z globálního hlediska aperiodické, avšak obsahují časové úseky, které vyhovují podmínce periodicity (2.1) a obsahují dostatečný počet svých cyklů, lze signály v těchto úsecích považovat za periodické [5].

Na druhé straně oproti periodickému signálu stojí signál aperiodický. Funkční hodnoty signálu se neopakují v pravidelných intervalech, což také znamená, že tento signál nevyhovuje základní podmínce periodicity (2.1), popř. (2.2). Některé druhy těchto signálů se mnohdy nazývají *impulzy* [5].

2.1.3 Deterministický a stochastický signál

Pod pojmem deterministický signál si lze představit takový signál, který je možno přesně popsat (modelovat) v libovolném časovém okamžiku, neboť jeho chování je přesně analyticky popsáno. Avšak, přestože jsou známy matematické funkce a rovnice, které signál popisují, nejsou použité modely schopny vystihnout všechny podrobnosti. Snahou je především minimalizace chyby mezi reálným a deterministickým signálem.

V praxi má obvykle význam zkoumat signál, o kterém není předem známo, jakých hodnot bude nabývat, jaké vytvoří posloupnosti apod. Z tohoto pohledu je vhodné tyto signály považovat za náhodné – stochastické. To znamená, brát měřený spojitý signál jako jednu realizaci náhodného procesu $\xi(t)$, který je tvořen systémem náhodných veličin $\{\xi_t,\ t \in \boldsymbol{R}\}$, z celkové množiny potenciálních realizací. V případě diskrétního náhodného procesu je jedna realizace $\xi(n)$ tvořena systémem náhodných veličin $\{\xi_n,\ n \in \boldsymbol{Z}\}$ z celkové množiny realizací. Veličina n značí normovaný diskrétní čas [13].

Náhodné signály se popisují především využitím pravděpodobnostních charakteristik jako jsou vícerozměrné distribuční funkce, hustoty rozdělení pravděpodobnosti, rozptyl, korelační funkce apod. Pro jejich fundamentální popis by bylo nutno více se ponořit do problematiky teorie signálů, což není v tuto chvíli podstatné. Souhrnně lze o stochastických signálech říci, že jejich chování lze předem určit s menší či větší pravděpodobností [5], [13].

2.1.4 Stacionární a nestacionární signál

Stacionarita signálu (ustálenost, nehybnost signálu) je v úzké souvislosti se stochastickým signálem. Jestliže pro korektní popis stochastického signálu se využívá pravděpodobnostních charakteristik, pak u stacionárního signálu se dále vyhodnocuje, zda jsou tyto charakteristiky závislé na čase. Jinými slovy, za stacionární náhodný proces se považuje takový náhodný proces, jehož statistické charakteristiky nejsou

závislé na volbě počátku časové osy vyšetřovaného signálu. Charakteristiky jsou časově invariantní (neměnné) k libovolnému posunu na časové ose [5].

V tomto směru se určuje stacionární náhodný proces *v užším smyslu*, právě když jeho *n*-rozměrná hustota rozdělení pravděpodobnosti je časově invariantní, tj. hustota se nemění s posunutím všech vyšetřovaných bodů o stejný časový úsek. V některé literatuře je možno se setkat s názvem silně stacionární signál [13].

Při praktických situacích se zpravidla využívá slabší definice stacionárních náhodných procesů *v širším smyslu*, někdy označovaných jako slabě stacionární procesy. Tato definice vyžaduje pouze, aby střední hodnota a rozptyl byly konstantní (časově invariantní) a aby korelační (autokorelační) funkce závisela na časovém rozdílu dvou sousedních bodů (rozdílu indexů zkoumaných vzorků u diskrétního signálu) [13].

Zjišťování vlastností náhodných procesů vede k odhadům pravděpodobnostních charakteristik pomocí průměrů souboru realizací. S rostoucím počtem realizací bude i přesnost odhadu charakteristik vzrůstat. Získávání většího počtu realizací náhodného procesu však může znamenat značné potíže. Existují ale náhodné procesy, jejichž všechny realizace mají stejné statistické vlastnosti. Tyto procesy se nazývají *ergodické* náhodné procesy. Vyznačují se tím, že odhad každé jejich statistické charakteristiky je možný i z pouhé jediné, dostatečně dlouhé realizace. Výhodou pak je, že není nutné náročně průměrovat několik realizací. V limitním případě délky zpracovávané realizace rostoucí nade všechny meze dosahuje odhad správných (teoretických) hodnot [5], [13].

Pro nestacionární signál (náhodný proces) intuitivně vyplývá, že jeho statistické vlastnosti se v průběhu času budou měnit. Obecně je nestacionarita vyjadřována tak, že statistické vlastnosti závisejí na konkrétních časových okamžicích. Rozhodnutí o tom, zda se bude jednat o stacionární signál či ne, je nutno zvážit s ohledem na zkoumanou délku signálu. Původně nestacionární signál se např. může z pohledu několikrát delší doby jevit jako stacionární [5], [10], [13].

2.1.5 Klasifikace signálů EME a AE

Vzhledem k výše uvedeným klasifikačním skupinám signálů lze vyslovit počáteční rozdělení, resp. základní vlastnosti snímaných signálů EME a AE. Přestože signály EME a AE vznikající při tvorbě trhliny mají spojitou formu, navržené pracoviště na obr. 1.5 obsahuje digitální osciloskop, který generovaný a následně zesílený spojitý signál vzorkuje a kvantuje. Tím dochází k převodu na *diskrétní* signál a potom číslicový. Data jsou pak posílána do počítače do obslužného programu v prostředí MATLAB, který pracuje s ryze číslicovým signálem.

Na základě mnoha experimentálně provedených měření, lze signály elektromagnetické i akustické emise klasifikovat jako *aperiodické*. Reálné signály jsou

často povahy impulzů. V některých případech mohou být signály EME a AE v určitých časových intervalech považovány za kvazi-periodické. Dále se signálům EME a AE přiřazuje povaha *stochastického* procesu. Z výsledků dosavadního výzkumu nevyplývá jednoznačná odpověď na otázku, jak předem určit, kdy, s jakou velikostí energie či s jakou četností mohou nastat mikrotrhliny v materiálu. Nelze tedy signál přesně popsat matematickou rovnicí, což znamená, že nelze považovat emisi za jednoznačně deterministický signál. Dále, generované signály jsou z globálního hlediska *nestacionární* povahy. V krátkých časových úsecích však lze na ně pohlížet jako na *stacionární*. Tyto úvahy umožňují, aby byl možný výpočet důležitých parametrů uvedených níže [6], [8].

2.2 Signály akustické emise

Z kapitoly 1, zabývající se fyzikální podstatou vzniku emisních signálu, vyplývá, že ke vzniku těchto signálů dochází při náhlém uvolnění energie v materiálu vystavenému mechanickému namáhání. V případě AE je část uvolněné energie transformována na mechanický signál, který se šíří materiálem ke snímači, který přicházející mechanické signály převede na elektrické. Signály AE mohou být dvojího druhu, spojité a nespojité z hlediska časového určení realizací.

2.2.1 Spojitá akustická emise

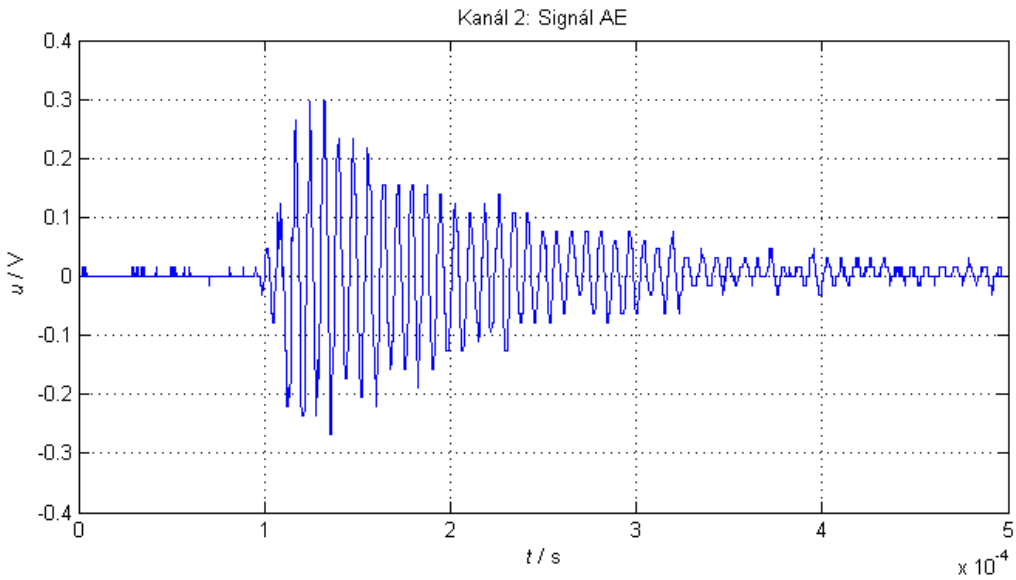
Signály spojité akustické emise jsou události, které nemají časově oddělené realizace. Jde většinou o signály, které jsou výsledkem řady vzájemně se ovlivňujících fyzikálních jevů a tedy jednoznačné časové rozlišení akustické vlny není téměř možné. Příkladem pro vznik spojité AE může být např. únik kapaliny otvorem v potrubí nebo nádobě. Protože zde dochází k interferencím různých složek vln přímých i odražených, je časový průběh výsledného signálu podobný signálu náhodného charakteru [10]. U spojité AE se vyhodnocuje řada parametrů. Dle [10] to jsou

- střední, efektivní a maximální hodnota,
- histogram amplitud,
- amplitudová distribuční funkce,
- spektrální hustota výkonu,
- standardní odchylka, rozptyl,
- energie emisních událostí,
- počet překmitů přes prahovou úroveň.

Spojitá AE je zmíněna jen pro úplnost. Pro účely této diplomové práce jsou vhodnější především signály nespojité AE. Proto se spojitým signálům dále věnovat nebude.

2.2.3 Nespojitá akustická emise

Signály nespojité akustické emise, někdy též nazývané impulzní, jsou chápány jako časově oddělené realizace, které jsou vyvolány časově oddělenými událostmi. Z tohoto hlediska lze u signálů úspěšně určovat začátek a konec jeho trvání. Ukázka signálu nespojité AE je uvedena na obr. 2.2.



Obr. 2.2: Ukázka nespojitého signálu AE, soubor extren67.052.

Typickým zdrojem nespojité AE bývá měnící se trhlina v materiálu. Vzniklý impulzní signál AE pak souvisí s jejím vznikem a případným rozšiřováním. Někdy se tento typ signálu nazývá anglickým slovem „burst,“ neboli shluk hodnot, který průběh na obrázku připomíná [10]. Dle [7] signály akustické emise často vykazují kvaziharmonické časové průběhy s rozsahem kmitočtů 120 – 150 kHz.

Měřicí metody založené na akustické emisi jsou v praxi velmi rozšířeny. Dokonce existuje i technická norma ČSN EN 1330-9, která definuje např. popis, význam, názvosloví apod. parametrů pro zpracování emisních signálů. U nespojitého impulzního signálu akustické emise se dle [10] vyhodnocuje

- časový okamžik prvního překročení signálu prahovou úrovní,
- doba náběhu, tj. doba od překročení prahové úrovně do dosažení maximální hodnoty signálu,

- doba trvání signálu,
- maximální hodnota signálu,
- počet překmitů nulou nebo četnost překmitů přes zvolenou prahovou úroveň,
- četnost nespojité akustické emise, tj. počet událostí nespojité akustické emise za časový interval,
- energie impulzu,
- amplitudové spektrum signálu,
- popis tvaru impulzu pomocí časově-frekvenční analýzy.

2.3 Signály elektromagnetické emise

V případě EME je část uvolněné energie z trhliny transformována na elektromagnetický signál, jehož elektrická složka je detekována kapacitním snímačem ve formě intenzity elektrického pole. Další transformací je pak získáno měřené elektrické napětí.

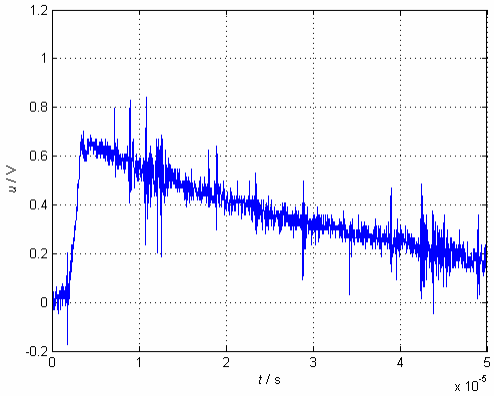
Vytváření trhliny v materiálu se skládá ze dvou fází. V první fázi dochází k rozevírání trhliny, čímž vznikají opačné náboje na protilehlých stěnách trhliny. V druhé fázi je možné uvažovat pouze mechanický pohyb stěn, náboj lze považovat za stabilizovaný. Obecněji lze říci, že z tvaru náběžné a sestupné hrany impulsu EME lze přibližně odhadnout charakter dynamického děje při vzniku trhliny. Frekvenční rozsah signálu EME může sahat až do 10 MHz. V současné době jsou měřeny pouze v laboratorních podmínkách a jsou tématem intenzivního výzkumu. Proto nejsou ještě zavedeny konkrétní parametry, které je potřebné zjišťovat [7].

2.3.1 Typické průběhy signálů

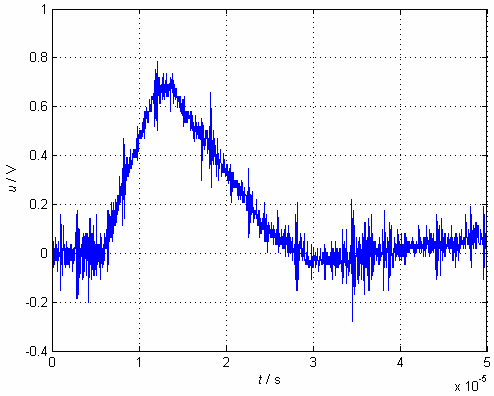
Automatizovaným měřením bylo získáno mnoho emisních signálů, které byly uloženy do souborů pro následné další vyhodnocení. Z výsledků vyplývá, že signály EME pro materiál extren 500 lze rozdělit do zhruba 7 základních skupin [7], viz obr. 2.3 a obr. 2.4.

I. skupinu signálů EME lze charakterizovat strmým nárůstem náběžné hrany impulzu a exponenciálním průběhem sestupné hrany, viz obr. 2.3a. Tyto signály odpovídají prudkému rozevření trhliny bez dalšího pohybu jejích stěn. Trhlina nemá tendenci k uzavření. Statisticky lze do této skupiny zařadit 7 % z celkového počtu naměřených signálů.

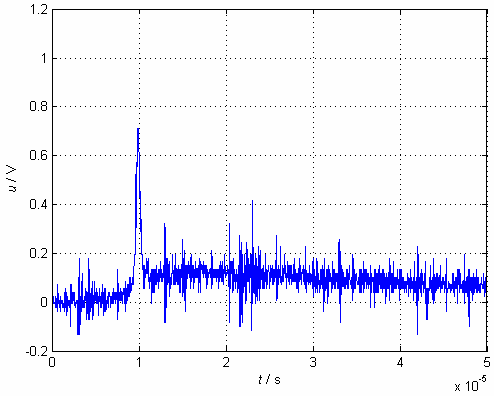
II. skupina sdružuje signály EME s pomalým nárůstem a pomalým klesáním napětí, což odpovídá pomalému rozevírání a následnému zavírání trhliny, viz obr. 2.3b. Četnost tohoto typu signálů je 11 %.



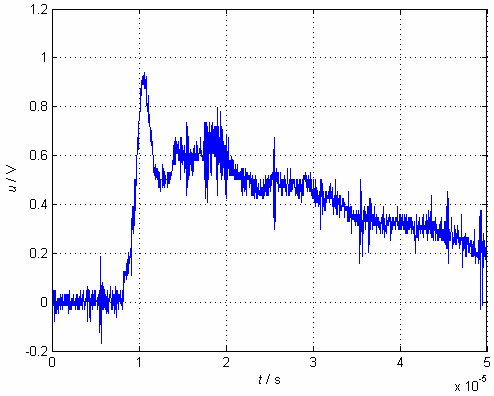
a)



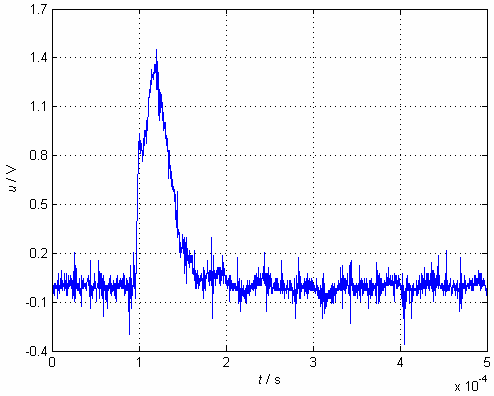
b)



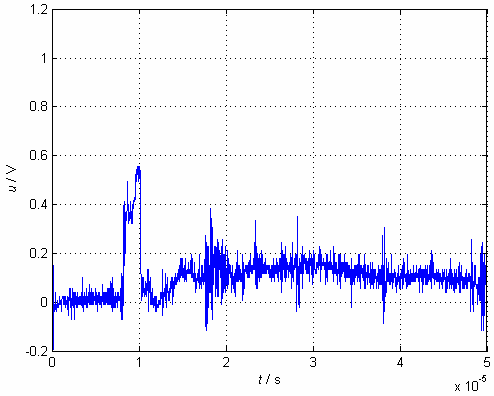
c)



d)



e)



f)

Obr. 2.3: Průběhy signálů EME: a) typ I, extren68.014, b) typ II, extren61.008, c) typ III, extren60.060, d) typ IV, extren60.040, e) typ V, extren67.052, f) typ VI, extren60.021.

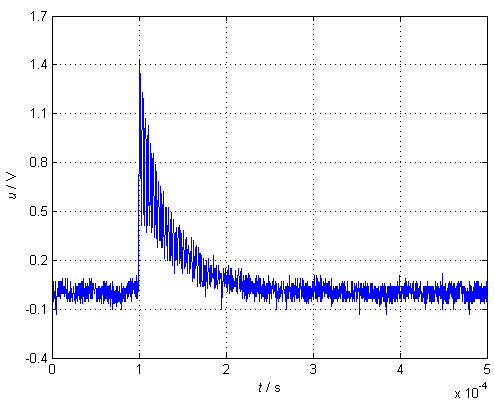
III. skupinu signálů tvoří realizace s prudkým nárůstem a prudkým poklesem napětí, viz obr. 2.3c. Odpovídající charakter trhliny je její prudké otevření a prudké částečné zavření. Pravděpodobnost tohoto typu signálu je 15 %.

Signály IV. skupiny odpovídají trhlině, u které po jejím otevření dochází k tlumenému kmitavému pohybu stěn, viz obr. 2.3d. Tento nejčastější případ nastává v 28 % realizací.

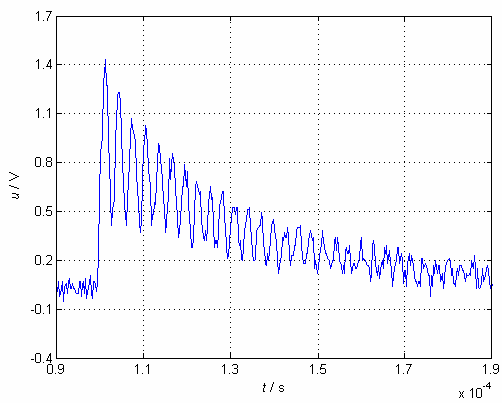
U V. skupiny realizací dochází při tvorbě trhliny k zákmitům stěn, viz obr. 2.3e. Podíl signálů je okolo 7 %.

VI. skupina sdružuje signály realizací, u kterých se při otevírání nebo zavírání trhliny objevuje mezi jejími stěnami elektrický výboj. Ten se projeví prudkým poklesem signálu, viz obr. 2.3f. Do této skupiny lze zahrnout 8 % realizací.

Poslední VII. skupina signálů EME je z hlediska zkoumání tvorby trhlin velice významná. Napěťový průběh signálu odpovídá trhlině, jejichž stěny vykazují tlumený pohyb kvaziharmonického průběhu, viz obr. 2.4. Frekvence tohoto kvaziharmonického průběhu pak odpovídá tvaru trhliny. Četnost signálů je 24 %.



a)



b)

Obr. 2.4: Průběh signálu EME, typ VII, extren51.011:
a) celý průběh, b) detail.

3 ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ ELEKTROMAGNETICKÉ A AKUSTICKÉ EMISE

Základním pro studium signálů EME a AE je jejich adekvátní způsob zpracování a zjišťování potřebných parametrů. S odkazem na předchozí kapitolu zabývající se vlastnostmi emisních signálů je potřebné k tomuto účelu navrhnout vhodné metody. Tento úkol jsem provedl realizací programu, do kterého jsem implementoval navržené metody zjišťování vybraných parametrů. Jedná se především o parametry, které se v současné době využívají a měří v praktických aplikacích např. v rámci řešení projektů na Ústavu fyziky FEKT a FAST.

V této kapitole tedy nejprve stručně popíši strukturu programu a způsob ovládání. Následovat bude popis jednotlivých metod. Především se bude jednat o principy funkčnosti a úvahy při tvorbě dílčích řešení. V neposlední řadě také uvedu komentáře a výsledky, které je možné ze zjištěných parametrů odvodit.

3.1 Popis programu zpracování signálů

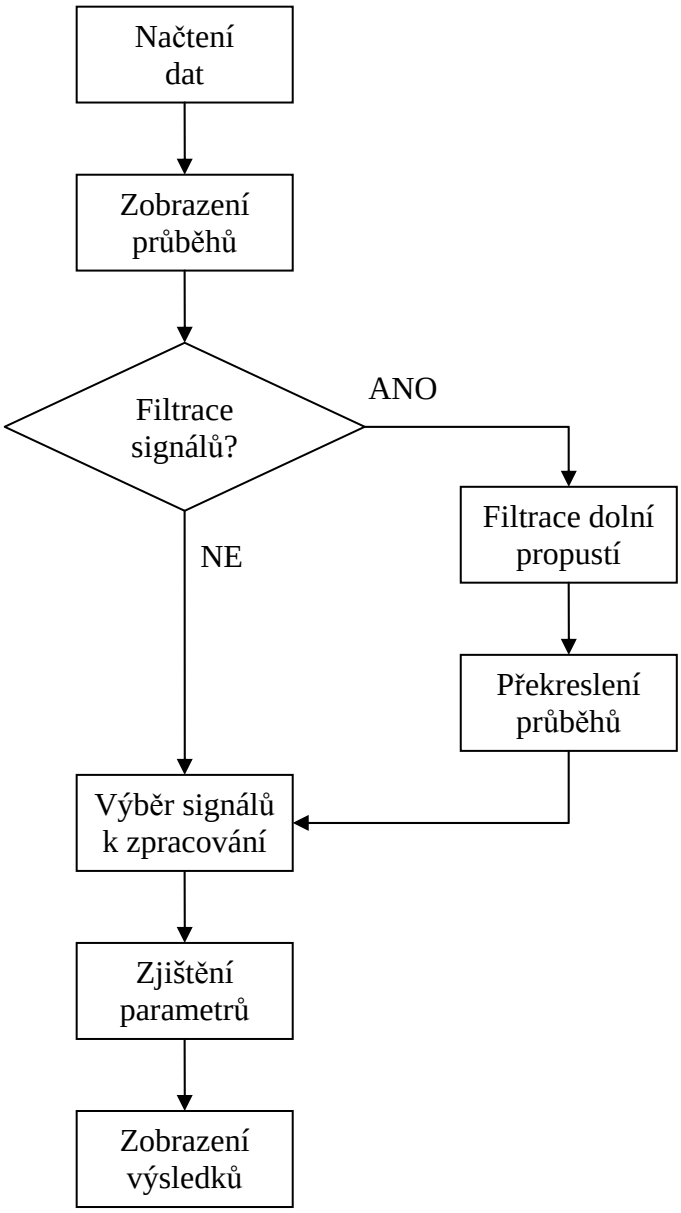
Pro tvorbu metod zpracování signálů jsem použil programový balík s názvem MATLAB, použita byla verze 7.1, ve které je program plně funkční a je vhodné jej v této verzi i spouštět. Navržené metody zjišťování parametrů jsem aplikoval na signály EME a AE, které byly změřeny v laboratoři na Ústavu fyziky FAST a dále v laboratoři na Ústavu fyziky FEKT v rámci praktické činnosti při návrhu měřicího pracoviště. Data změřených signálů byla uložena v textových souborech. Všechny navržené metody jsem implementoval do jednoho hlavního programu, který jsem dále doplnil o grafické prostředí GUI pro snadnější používání a názornost. Náhled hlavního okna je zobrazen v příloze B.1.

Hlavní program a použité metody, které jsou uloženy v jednotlivých **.m* souborech, se nachází na přiloženém CD v adresáři *program_zpracovani_signalu*. Na pevný disk počítače musí být přenesen nejlépe celý adresář, který se následně nastaví jako pracovní. Zápisem příkazu *zpracovani_signalu* do příkazového okna prostředí MATLAB se program spustí. Optimalizován je pro rozlišení monitoru 1024 × 768 bodů.

3.1.1 Struktura programu

Na obr. 3.1 je uveden zjednodušený vývojový diagram funkčnosti programu. Jeho chod lze popsat následujícím popisem. Načtením souboru s daty signálů dojde

k vykreslení jejich průběhů do připravených polí. Následuje možnost signál filtrovat dolní propustí, čímž dojde k částečnému potlačení šumu v signále. Průběhy jsou ihned překresleny pro možnost pozorování změny oproti původnímu signálu. Dále je možno zvolit, které signály budou podrobeny analýze. Posledním nastavením je výběr kanálu, ve kterém se nachází signál EME. Tato volba je zde zavedena z toho důvodu, neboť u signálu EME se oproti signálu AE neurčují nějaké parametry.



Obr. 3.1: Zjednodušený vývojový diagram programu zpracování signálů.

Po nastavení se může přikročit jednak k vlastnímu zjištění parametrů signálů nebo k zahájení spektrální nebo časově-frekvenční analýzy. Výsledky jsou pak vyznačeny přímo do časových průběhů analyzovaných signálů, do určeného informačního pole nebo do samostatných oken ve formě grafů.

3.1.2 Ovládání

Pro maximální přehlednost a automatizované zpracování program obsahuje pouze nezbytné množství nastavovacích prvků. Snadné ovládání je dále podpořeno jejich proměnlivou aktivací a deaktivací. Ukázka rámce ovládání a informačních polí je na obr. 3.2. Pro úplnost, mimo toto pole v pravé horní části okna programu se nachází tlačítko pro zobrazení časových průběhů v samostatném okně.

Obr. 3.2: Ovládání programu zpracování signálů.

Otevřít soubor

Tímto tlačítkem dojde vyvolání standardního naváděcího okna pro výběr souboru. Po výběru se provede zkouška, zda soubor obsahuje požadovaná data. Zdrojové signály jsou totiž uloženy v jistém formátu. Z fakulty stavební jsou vektory hodnot v souboru

uloženy v 8-bitových úrovních, začátek textového souboru obsahuje hlavičku s nastavením měřicího pracoviště. Soubory změřené na FEKT obsahují vektory dat s hodnotami již přepočítané na napětí. Bylo tedy nutné vytvořit propracovanou část pro načítání dat. To umožňovalo korektní převod bitových hladin na napěťové úrovně a převod pořadových čísel vzorků signálu v pozice na časové ose s ohledem na vzorkovací frekvenci. Pokud byl při výběru zvolen nesprávný soubor, který neodpovídá zmíněnému formátu zápisu, je vypsáno chybové hlášení.

Šipky < >

Tato dvě tlačítka spolupracují s níže uvedeným seznamem zobrazující soubory ve vybrané složce. Slouží především pro rychlé načítání a zobrazování průběhů.

Složka

Za tímto statickým textem se zobrazuje název aktuálně vybrané složky. Seznam umístěný pod názvem vypisuje názvy obsažených souborů, názvy adresářů vypisovány nejsou. Výběrem jednotlivých názvů dochází ihned k vykreslení obsažených dat.

Filtrace signálů

Volba, zda budou všechny signály před analýzou podrobeny filtraci dolní propustí. Po výběru dochází ihned k překreslení průběhů, v případě zrušení se vykreslí původní data. Vymazány jsou také dříve zjištěné parametry, které již neodpovídají zobrazeným průběhům. Popis použitého filtru je uveden dále.

Zpracovat signál

Touto volbou se definují signály, které budou zpracovány popř. jen vykresleny v samostatném okně. V řadě případů totiž není potřebné zpracovávat všechny signály. Např. z důvodu, že se v souboru dat jedná o „falešný“ signál, který byl způsoben např. chybným zapojením kanálu v osciloskopu, přičemž ostatní signály jsou v pořádku. Důvodem také může být potřeba detailního zobrazení pouze jednoho průběhu signálu nebo výsledku spektrální či časově-frekvenční analýzy přes celou plochu monitoru.

Signál EME

Volba zavedena z důvodu, že u signálu EME se neurčuje dobu náběhu, počet průchodů nulou a průměrná frekvence. Dále může nastat situace, že v souboru dat nemusí být signál EME vůbec přítomen nebo je umístěn v jiném pořadí. Je proto na uživateli programu, aby pohledem na charakteristicky rozdílné signály rozhodl, který signál je, nebo zda vůbec je, signálem EME. V případě, že není signál EME přítomen je daný signál považován za signál AE.

Zjistit parametry

Jde o hlavní tlačítko, kterým je spuštěna analýza v časové oblasti. Po proběhnutí všech metod u vybraných signálů se výsledky zobrazí graficky do časových průběhů signálů, tak i přehledně do připravené tabulky.

Spektrogram

Tlačítko slouží k spuštění časově-frekvenční analýzy. Výsledné spektrogramy zpracovaných signálů jsou zobrazeny v novém okně.

PSD

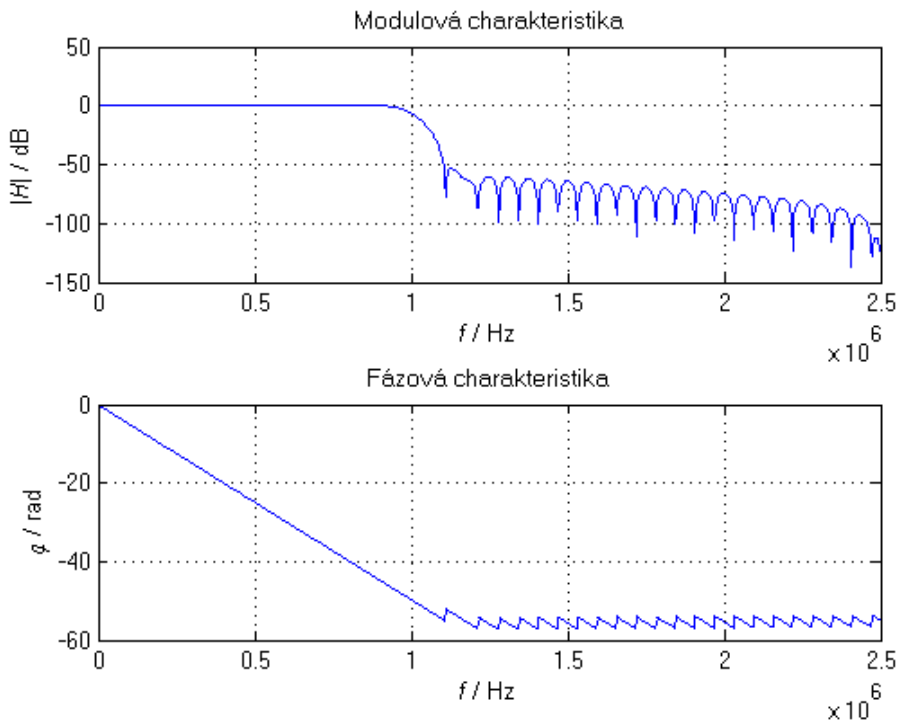
Tlačítkem je spuštěna spektrální analýza, kterou je zjišťována výkonová spektrální hustota. Stejně jako u spektrogramu jsou výsledky zobrazeny v novém okně.

3.2 Filtrace signálu

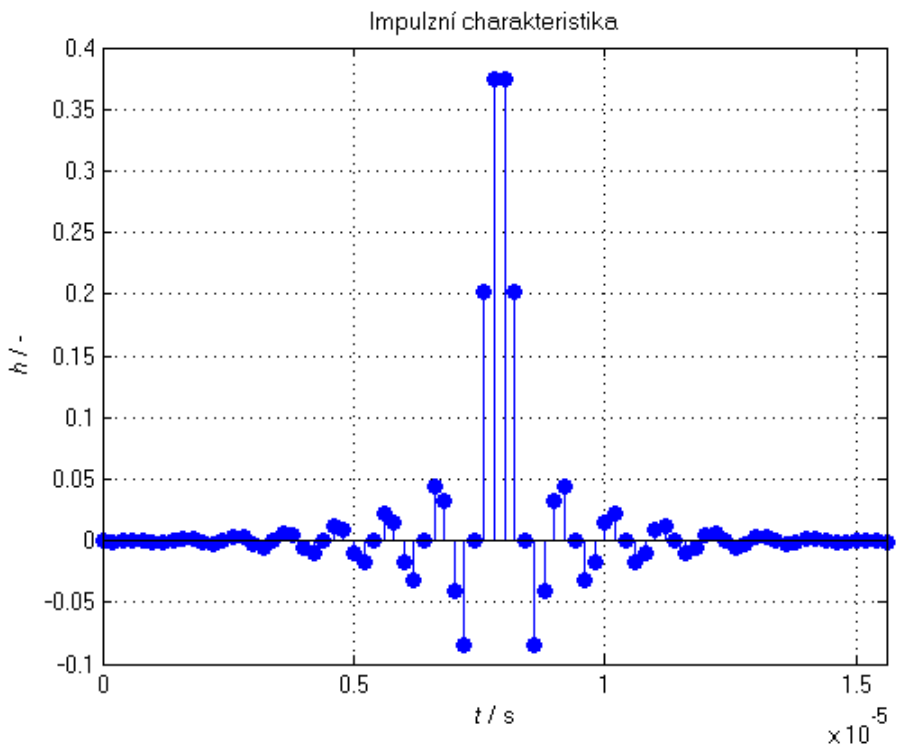
Vzhledem k tomu, že nežádoucí šum v signálech znehodnocuje výsledky jejich analýzy, je na místě tento rušivý signál potlačovat. Děje se tak nejprve kvalitním stíněním pracoviště a volbou kvalitních nízkošumových přístrojů, viz kapitola 1.4. Dalším postupem může být filtrace, která se v případě číslicového vyjádření signálů provádí číslicovými filtry.

3.2.1 Návrh filtru

Při intuitivním návrhu filtru jsem vycházel z předpokladu, že jeho vliv na všechny měřené signály je stejný. Jejich získávání se provádí ve stejné stíněné skříni, výstupní zesilovače mají své frekvenční pásmo omezeno stejnou maximální frekvencí. Nic tedy nebrání tomu, použít pro signály EME a AE stejnou dolní propust, jejíž mezní frekvence f_m = 1 MHz je dána maximální frekvencí zpracovávaného pásma zesilovačů. Na této frekvenci má filtr útlum signálu -6dB, což lze pozorovat z frekvenční charakteristiky uvedené na horním průběhu obr. 3.3. Zároveň jsem požadoval, aby zpoždění jednotlivých frekvencí bylo lineární, aby filtr měl lineární fázovou charakteristiku. Tomuto vyhovuje navržený filtr typu FIR, který navíc vždy splňuje podmínku stability, neboť všechny jeho póly jsou uvnitř jednotkové kružnice. Průběh fázové charakteristiky je uveden na dolním obr. 3.3. S ohledem na kompromis mezi dobrou strmostí propustného pásma a zároveň nepříliš vysokým řádem jsem navržený filtr určil řádu N = 80. Impulzní charakteristika má pak stejný počet koeficientů. Váhována je Hammingovým oknem. Její zobrazení při vzorkovací frekvenci f_{vz} = 5MHz je na obr. 3.4.



Obr. 3.3: Modulová a fázová charakteristika filtru.



Obr. 3.4. Impulzní charakteristika filtru.

3.2.2 Filtrovací metoda

Samotná filtrace signálu je provedena konvolucí zkoumaného signálu $x(n)$ a impulzní charakteristiky $h(n)$, což odpovídá násobení jejich spekter $X(\omega)$ a $H(\omega)$. Filtrovaný signál $y(n)$ je tedy dán

$$y(n) = x(n) * h(n) \Leftrightarrow Y(\omega) = X(\omega)H(\omega)\,, \tag{3.1}$$

přičemž $Y(\omega)$ je spektrum filtrovaného signálu, n značí diskrétní vzorky a ω je úhlový kmitočet. Je zřejmé, že při výpočtu výstupu uvedeným způsobem bude výsledná odezva systému delší o N-1 vzorků. V odezvě je totiž přítomen přechodný děj, ustálená odezva a doznívání. Proto je nutné na začátku a na konci výstupního signálu odebrat (N-1)/2 vzorků. Tímto způsobem je dle [9] odstraněna pouze polovina znehodnocených vzorků. Praktickými zkouškami jsem však ověřil, že u navržených metod, které pracují s mnohem většími počty vzorků, než o kterých se jedná v případě znehodnocených, se tento nedostatek neprojeví a je možné jej tolerovat.

3.3 Parametry signálů EME a AE v časové oblasti

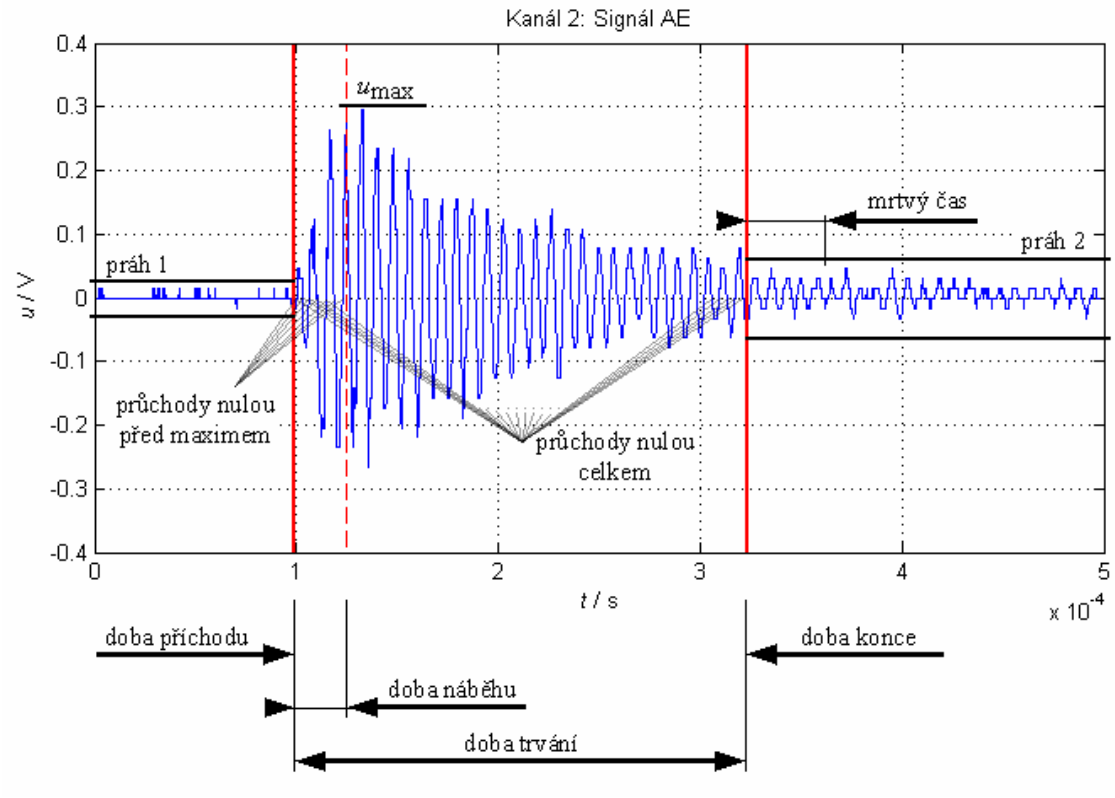
Jak již bylo uvedeno, parametrů v časové oblasti, které je možno u emisních signálů studovat, je relativně mnoho. Zjišťovány tedy budou jen vybrané, metody navržené k tomuto účelu jsou z hlediska principu popsány dále. Pokud nebude uvedeno jinak, popisovaná metoda se vztahuje jak k signálu EME, tak k AE. K názornějšímu vysvětlení je na obr. 3.5 uveden ilustrační obrázek typického průběhu signálu AE s některými vyznačenými parametry.

Časovou oblastí signálů je myšlena originální oblast, ve které byly signály pořízeny. Číslicová data signálů jsou pak tvořena časovou posloupností vzorků. V tomto smyslu jsou myšleny i další formulace odkazující se na časová okna a různé další časové okamžiky. Vždy se bude jednat o počet diskrétních vzorků, avšak přepočetných na časové údaje dle vzorkovací periody. Odkazy na výsledky je možné směrovat na náhled okna programu, viz příloha B.1.

3.3.1 Doba příchodu

Jde o časový okamžik, kdy velikost signálu poprvé překročí uživatelsky zvolenou prahovou hodnotu. Z pohledu časové analýzy signálu se jedná o jeden z nejdůležitějších parametrů, od kterého se odvíjejí zbylé další parametry. Určení doby příchodu signálu však naráží na nemalý problém nastavení prahové úrovně, která může být pro konkrétní aplikace různá. Nutné je zohlednit vliv okolí a především velikost šumu v signálu [10].

Problematiku určení velikosti prahu jsem vyřešil způsobem, kdy přibližně prvních 8% hodnot signálu považuji jako reprezentaci šumových podmínek měření. Z této oblasti je vybrána maximální absolutní hodnota, která je pak vynásobena konstantou 1,5. Velikost této konstanty jsem určil empirickým způsobem. Výsledné číslo udává velikost prahového napětí. Je-li některý další vzorek v absolutní hodnotě větší než tento práh, pak je nalezen počátek signálu. Časový údaj je v průběhu signálu značen plnou svislou červenou čarou, číselný údaj je vypsán do tabulky parametrů.



Obr. 3.5: Znázornění některých parametrů signálu v časové oblasti.

3.3.2 Doba náběhu

Jedná se o časový interval, který je určen rozdílem doby příchodu signálu a časového údaje, ve kterém signál nabývá maximální špičkové hodnoty (v případě harmonického průběhu – amplitudy). Parametr je určován pouze u signálu AE, neboť je velmi spekulativní, jakým způsobem jej zjišťovat u signálu EME. Obzvláště s odkazem na podkapitolu 2.3.1 zabývající se druhy signálů EME by analýza tohoto typu byla téměř neproveditelná a často i nesmyslná.

Metoda zjišťování doby náběhu je jednoduše realizována rozdílem hodnot doby příchodu signálu a doby, ve které signál nabývá maximální hodnoty. Údaj je zprostředkován pouze jako číselný údaj v tabulce.

3.3.3 Doba trvání

Tento parametr udává skutečnou dobu (délku) trvání signálu určenou rozdílem časových údajů, kdy signál poprvé a pak naposled překročí prahovou úroveň. Přitom obecně nemusí platit, že oba prahy jsou si rovny [10]. I zde je nutno zohlednit především velikost úrovně šumu v signálu. Častý předpoklad, že velikost úrovně šumu (rušivého napětí) bude stejná na začátku i na konci signálu, nemusí být vždy splněn. To většinou potvrzují i praktická měření.

Velikost prahu pro nalezení konce signálu jsem určoval obdobným způsobem jako u metody zjišťování počátků, avšak oblast šumu tentokrát tvořilo posledních 8% vzorků. V této oblasti lze považovat proběhnutý děj v materiálu za ukončený a přítomen by měl být pouze zvýšený rušivý signál. Zde se vyhledá maximální absolutní hodnota, která se vynásobí známou konstantou 1,5.

Následně jsou zjištěny okamžiky, ve kterých absolutní hodnota signálu přesahuje prahovou hodnotu. Jsou-li od sebe dva sousední časové okamžiky vzdáleny více jak velikost časového okna (dle [10] tzv. „mrtvý čas“), pak je určen konec signálu prvním z těchto okamžiků. Velikost časového okna byla empiricky zvolena jako 10 period signálu o frekvenci 250 kHz. Této frekvence mohou dosahovat dominantní složky jak signálu AE, tak signálu EME VII. typu. Je zřejmé, že se jedná o kompromis. Údaj o době trvání je zobrazen číselně v tabulce parametrů. Okamžik konce signálu je vyznačen do časového průběhu plnou červenou čarou.

3.3.4 Počet průchodů nulou

Parametr udává počet průchodů nulovou úrovní signálu během doby jeho trvání. Jinými slovy udává počet, kolikrát signál změní své znaménko oproti nulové úrovni. Určuje se pouze u signálu AE, protože má střídavý charakter.

I zde jsem využil pro určení délky posuvného časového okna periody fiktivního signálu o frekvenci 250 kHz. V tomto případě však pouze její jedné poloviny. Požadavkem bylo, aby se nezapočítávaly falešné přechody způsobené zákmity a dalšími rušivými prvky.

Prvním krokem metody je vytvoření seznamu míst, kde dochází k změnám polarity signálu. Následuje použití okna, které začíná na pozici první změny. Pokud jsou v rámci tohoto okna maximálně 2 změny, tzn. že signál přechází z jedné polarity do druhé a zpět, je okno přesunuto na následující místo. Pokud tomu tak není, tzn. že

v rámci okna jsou více jak 2 změny, algoritmus posunuje okno do místa, kde je podmínka už splněna. Mezilehlé pozice jsou pak vynulovány. Tímto postupem se pokračuje od počátku signálu až k jeho konci. Výsledný počet průchodů je dán součtem počtu změn v aktualizovaném seznamu a je uveden v tabulce parametrů ve formě číselného údaje.

3.3.5 Počet průchodů nulou před maximální hodnotou

Tento parametr je částečně zahrnut v předchozím. Z určitých důvodů je užitečné znát počet změn polarity zkoumaného signálu mezi jeho začátkem a dobou, ve které signál nabývá své špičkové hodnoty. Opět je určován jen u signálů AE.

Metoda zjištění tohoto parametru je stejná jako výše uvedená s tím rozdílem, že se bere v úvahu délka signálu od jeho počátku do doby maximální hodnoty. Výsledek je zobrazen číselně v tabulce parametrů.

3.3.6 Maximální hodnota

Zde se jedná o velmi snadno zjistitelný parametr signálu, který udává maximální hodnotu signálu během celé jeho doby trvání. Je-li signál vyjádřen číslicově ve formě vektoru, pak se jedná o zjištění prvku s maximální kladnou hodnotou.

Špičková hodnota signálu se v prostředí MATLAB zjišťuje relativně snadno, neboť obsahuje funkci, která vyhledává největší číselnou hodnotu v daném vektoru čísel a dále funkci, která nalezne její pozici (okamžik) ve vektoru. V časovém průběhu je tato doba znázorněna přerušovanou červenou svislou čárou. Číselný údaj velikosti maximální hodnoty ve voltech je vypisován do tabulky parametrů.

3.3.7 Energie události

Energie signálu je v jeho spojité formě dána integrací výkonu za určitou dobu. V případě, že se jedná o diskrétní číslicový signál, přejde integrace v sumu. Energie E diskrétního signálu $s(k)$ je tedy součet kvadrátů hodnot všech vzorků signálu po dobu jeho trvání, resp. součet vzorků okamžitého výkonu. Proto platí

$$E = \sum_{k=0}^{N-1} s^2(k) \cdot NT_{vz}, \tag{3.2}$$

kde k značí pořadí vzorku, N celkový počet vzorků signálu $s(k)$ a T_{vz} značí vzorkovací periodu [10], [16]. Jedná se tedy o číselný údaj vyjádřený v jednotkách V^2s. Konkrétní hodnoty jsou vypočteny metodou vycházející z uvedeného vzorce, výsledky jsou zobrazeny v tabulce parametrů.

3.3.8 Efektivní hodnota

Efektivní hodnotou (RMS) střídavého napětí je v technické praxi myšleno napětí stejnosměrné, které vyvolá stejné tepelné účinky na odporové zátěži jako měřené napětí střídavé. Matematicky by výpočet šel zapsat

$$U_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} s^2(k)}\,, \tag{3.3}$$

kde k značí pořadí vzorku, N celkový počet vzorků signálu $s(k)$. Ze vztahu je zřejmé, že se jedná o odmocninu středního normovaného výkonu [16].

U signálů AE je určování tohoto parametru opodstatněné, neboť tyto signály vykazují střídavý kvaziharmonický charakter. U signálu EME však toto neplatí, nicméně určování tohoto parametru nic nebrání. V tomto případě jde spíše jen o informativní údaj. Číselné výsledky metody, která je založena na prostém výpočtu hodnot dle vzorce (3.3), jsou zobrazeny do posledního sloupce tabulky parametrů.

3.4 Parametry signálů EME a AE ve spektrální oblasti

Možností jak poznat další vlastnosti a parametry signálu je využití výpočtu jeho spektra. Pro popis signálu ve spektrální oblasti je třeba použít některou z lineárních transformací na originální průběh signálu. Úkolem lineární transformace je rozložit originální průběh na jednotlivé složky spektra pomocí základních (bazických) funkcí. V případě Fourierovy transformace to znamená, že originální signál lze popsat pomocí jednotlivých harmonických funkcí sinus a kosinus – frekvencí. U náhodných signálů, kterými signály EME a AE jsou, se nejčastěji vyhodnocuje výkonová spektrální hustota.

3.4.1 Výkonová spektrální hustota

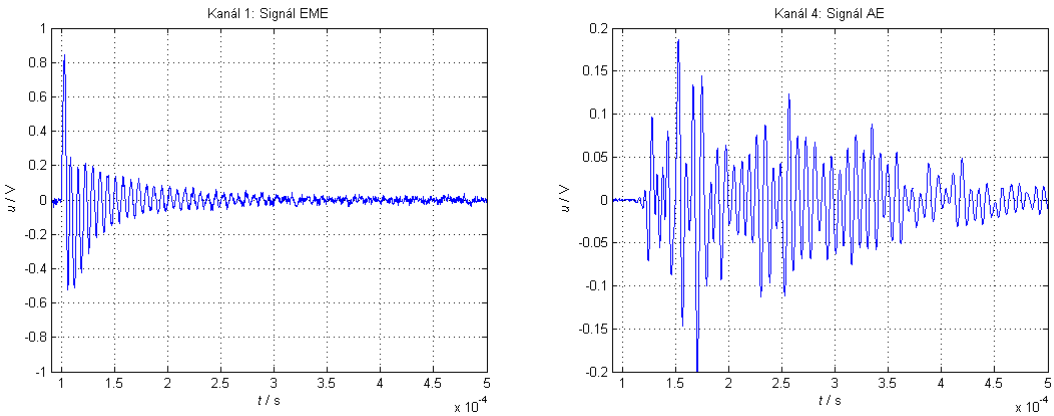
Výkonová spektrální hustota (PSD) je důležitý parametr, který charakterizuje rozložení energie ve spektru stacionárních náhodných procesů. Výkonovým spektrem stacionárního náhodného procesu lze nazvat funkci, která je dána souborovou střední hodnotou kvadrátu amplitudového spektra z konečného počtu realizací, resp. odhadem souborové střední hodnoty. Udává průměrný střední výkon vztažený na jednotkovou šířku frekvenčního pásma. Podle [5] se výpočet provádí

$$S_{xx}(\omega) \approx \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\frac{1}{N}\left|X_{w_i}(\omega)\right|^2\,, \tag{3.4}$$

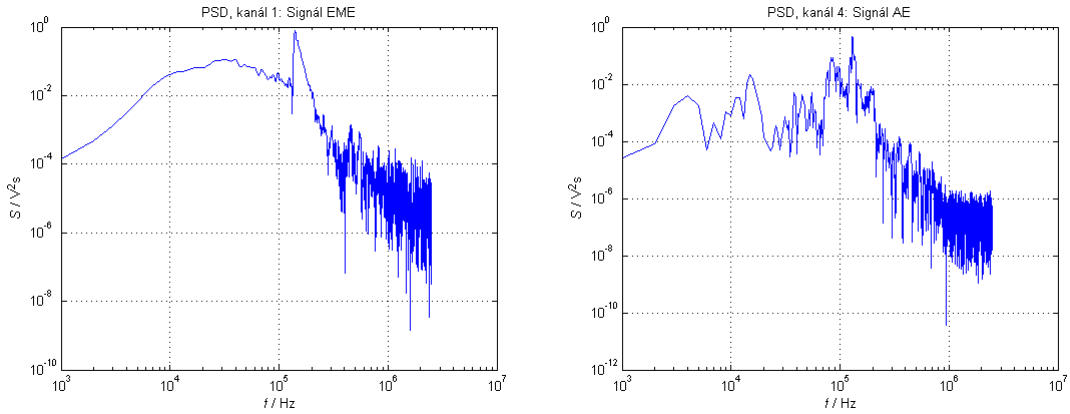
kde $X_w(\omega)$ je spektrum jedné realizace náhodného procesu $x_w(n)$, M značí počet realizací, N počet vzorků, ω je úhlový kmitočet. Jednotkou výkonové spektrální hustoty

je W.s, v případě napěťového signálu pak V^2.s. Ze vzorce je vidět, že se jedná o odhad průměrné hodnoty z konečného množství realizací. V případě emisních signálů se pak jedná o jednu realizaci. Ne však z důvodu jejich ergodicity, ale z důvodu neopakovatelnosti signálu [5], [6], [9].

Spektrální analýza má smysl pouze u signálů AE a dále u signálů EME typu VII, který obsahuje kvaziharmonický průběh. Navržená metoda zjištění PSD vychází ze vzorce (3.4). Vypočte výkonové spektrum zkoumaného signálu a zobrazí jej v samostatném okně. Pro názorný příklad analýzy jsem vybral signály EME a AE, jejichž přiblížené časové průběhy jsou na obr. 3.6. Výsledky spektrální analýzy jsou pak uvedeny na obr. 3.7. Zde jsou jasně vidět dominantní složky v blízkosti frekvence f = 100 kHz. Potvrzuje se tím teoretický předpoklad i dosavadní výsledky výzkumu.



Obr. 3.6: Přiblížené časové průběhy analyzovaných signálů EME a AE, soubor 16.4.08_c.5_2.txt.



Obr. 3.7: Výsledky spektrální analýzy signálů EME a AE, soubor 16.4.08_c.5_2.txt.

Pro výpočet spektra jsou používány všechny vzorky záznamu. V případě, že je určen začátek a konec signálu, pak se bere v úvahu jen tato část. To by však způsobilo menší rozlišení ve spektrální oblasti. Z tohoto důvodu doplním odstraněné vzorky nulami na jejich původní počet, čímž se frekvenční rozlišení opět vrátí k původnímu. Operace se dle [16] někdy nazývá „zero padding.“

Pro úplnost je dobré uvést, že energie signálu spočítaná v časové oblasti dle vzorce (3.2), zobrazená ve formě číselného údaje v tabulce parametrů, musí být rovna energii spočítané ve spektrální oblasti dle vzorce (3.4). Tato formulace se nazývá Parsevalův teorém [5], [6]. Pomocí numerické integrace jsem, ověřil že navržená metoda toto pravidlo splňuje.

3.5 Časově-frekvenční analýza

Protože Fourierova transformace odstraňuje informaci o čase, má smysl popisovat ve spektrální oblasti pouze celé realizace náhodných procesů. U řady signálů nestacionární povahy (typickým příkladem jsou signály řeči, EKG a také EME a AE) dochází k rychlým časovým změnám a signály vykazují přechodový charakter. Z tohoto důvodu se jako další účelný způsob analýzy jeví zjišťování vývoje krátkodobého spektra signálu v čase [5], [9]. Tímto způsobem pak lze studovat dynamický děj v materiálu při vzniku trhliny z pohledu vývoje spektra zprostředkujícího signálu.

V čistě teoretické podobě Fourierova transformace pracuje s nekonečně dlouhými realizacemi. Prakticky se však počítá vždy s konečnou délkou, která je vymezena časovým oknem. Bude-li toto okno vhodně zvolené a klouzavé po časové ose, lze hovořit o časově-frekvenční analýze. Volba velikosti okna je zásadní pro přesnost požadovaných výsledků. Bude-li např. okno příliš krátké, časové rozlišení bude velmi jemné zatímco spektrální bude hrubé z důvodu malého počtu vzorků pro výpočet koeficientů transformace. Dlouhé okno naopak způsobí jemné rozlišení spektra, avšak časová lokalizace nebude možná. Může nastat až mezní stav, kdy je okno rovno délce signálu, čímž se vypočítá jedno spektrum celého signálu [5], [9].

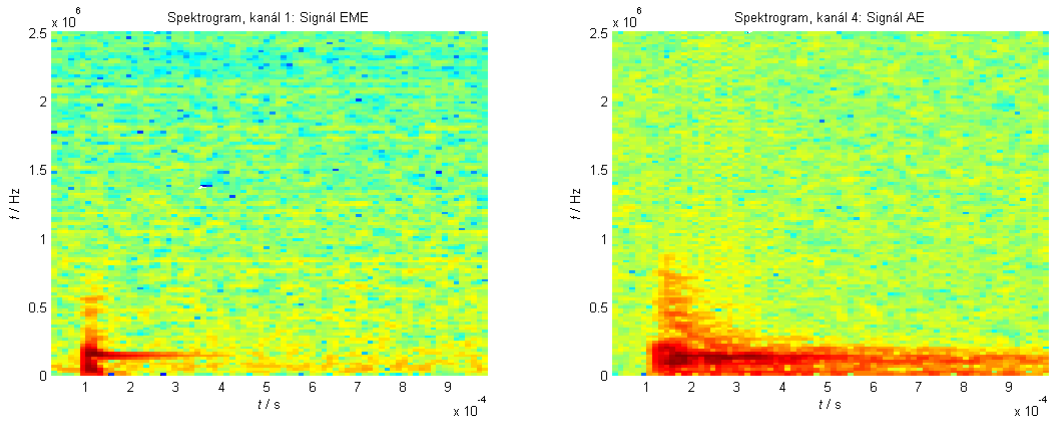
3.5.1 Spektrogram

Navržená metoda spektrogramu je založena výpočtu krátkodobé Fourierovy transformace STFT. Krátkodobé z toho důvodu, neboť se pro analýzu vybírá krátká posloupnost vzorků daná délkou časového okna. S ohledem na výše zmíněnou problematiku určení jeho délky jsem zvolil kompromis mezi časovou a frekvenční rozlišovací schopností.

Metoda pracuje způsobem, že rozdělí celkový počet vzorků záznamu na 20 stejných oken. Každé okno vzorků je násobeno Hammingovou váhovací funkcí pro zmenšení prosakování spekter. Posuv oken po časové ose byl zvolen na 25% jeho délky. To znamená, že dvě sousední okna se překrývají ze 75%, tj. obsahují 75% stejných vzorků pro výpočet spektra. Časová lokalizace výsledného spektra je posunuta do okamžiku posledního vzorku příslušného okna. Je zřejmé, že překrýváním oken se jejich počet zvýší.Celkový celočíselný počet oken k je dán vzorcem

$$k = \left\{ \frac{N_{\mathrm{x}} - N_{\mathrm{n}}}{N_{\mathrm{w}} - N_{\mathrm{n}}} \right\}_{\mathrm{INT}}, \tag{3.5}$$

kde N_{x} je celkový počet vzorků analyzovaného signálu, N_{n} je počet překrývajících se vzorků okna, N_{w} je počet vzorků okna. Výsledkem analýzy je 3-rozměrný graf, který má nezávisle proměnnou časovou a kmitočtovou osu. Na třetí osu je vynášena amplituda harmonických složek spektra. Graf je orientován pro pohled shora, velikost amplitudy je nejčastěji rozlišována intenzitou barvy nebo v tomto případě barvou spektra bílého světla. Na obr. 3.8 jsou vidět průběhy spektrogramů již dříve analyzovaných signálů EME a AE ve spektrální oblasti. Významné jsou tmavé odstíny červené až hnědé, které značí vysokou amplitudu harmonické složky dané frekvence v daném vyvíjejícím se čase. Pro výpočet se používá vždy celá délka záznamu, aby bylo možné výsledek lépe srovnávat s časovým průběhem.



Obr. 3.8: Výsledky časově-frekvenční analýzy signálů EME a AE, soubor 16.4.08_c.5_2.txt.

4 TRANSFORMACE ZDROJOVÉHO SIGNÁLU

Aby bylo možné zkoumat základní údaje o trhlině, je nutné vyjádřit transformaci (přeměnu) primárního signálu, kterou vnáší použité měřicí pracoviště. Základními údaji o trhlině jsou velikost náboje a jeho rychlost v elektromagnetickém poli. Protože se vychází z aplikace modelování trhlin pomocí zdroje proudu, primárním signálem je myšlen proud, který z tohoto zdroje vytéká. Pro snímání tohoto proudu se využívá kapacitní snímač doplněný o zatěžovací impedancí. Tímto obvodem je primární signál (proud) transformován na sekundární signál (napětí), který je možno detekovat již běžnými přístroji. Na změřené napětí, získané z řady zesilovačů zpracovávajících signály ze snímače, je tedy možné pohlížet jako na určitým způsobem transformované zdrojové veličiny, které udávají základní informace o trhlině. Bude-li se postupovat „obráceně“, kdy je-li známa tato transformace, velikost a průběh napětí, pak lze předpokládat, že aplikací inverzní formy lze tyto veličiny zpětně určit. Druhou částí zadání diplomové práce je tedy vyjádření této transformace. K tomuto účelu je možné použít dvě různé metody.

4.1 Metoda určení přenosové charakteristiky

Metoda je založena na znalosti vstupního a výstupního signálu. Princip je takový, že na vstup systému se přivede signál známé velikosti a průběhu, na výstupu se pak detekuje výstupní transformovaný signál. Ze vzájemné závislosti obou signálů se pak sleduje přenosová charakteristika systému – jakým způsobem se vstupní signál transformoval na výstupní. Ze znalosti této přenosové charakteristiky lze použitím její inverzní formy zjistit vstupní signál na základě výstupního.

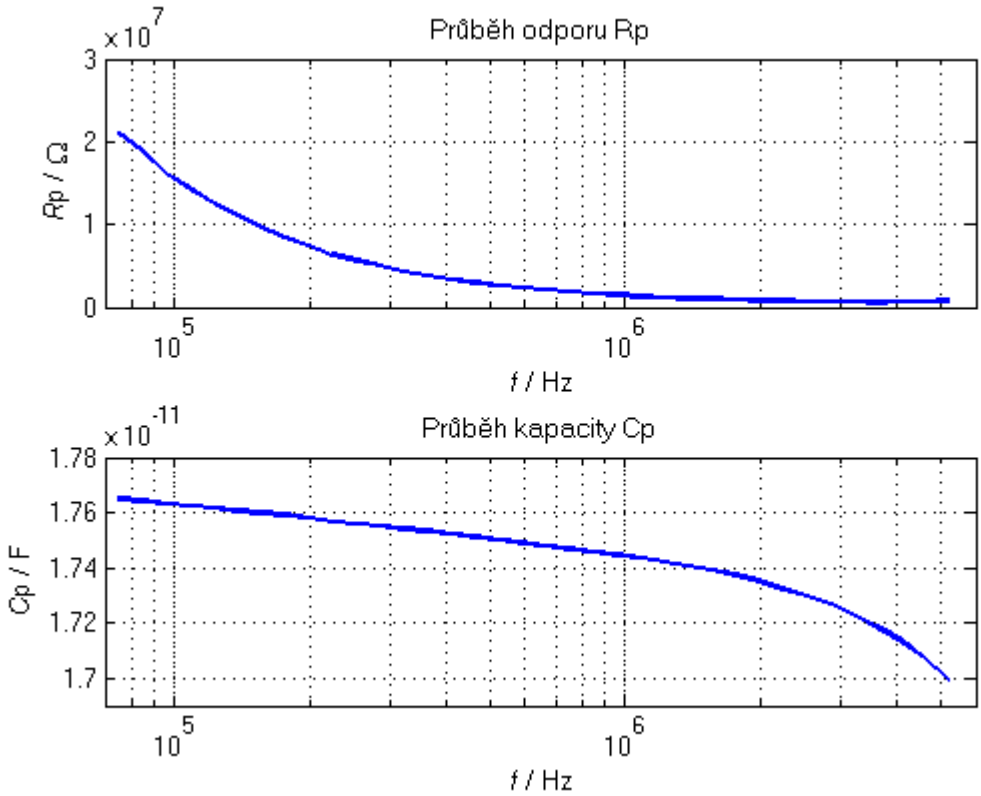
Klíčové je vhodně zvolit způsob, jak volit parametry vstupního signálu, nastavení přístrojů apod. Je zřejmé, že pokud by byly zvoleny určité parametry nevhodně, které by neodpovídaly charakteru při měření skutečných signálů, byly by získány chybné informace o vlivu daného systému.

4.2 Metoda analytického vyjádření transformace

Tato metoda vychází z matematického popisu prvků použitých v měřicím pracovišti. Nejčastěji se jedná o popis pomocí diferenciálních rovnic s konstantními koeficienty. Pro návrh korekce k odstranění transformace zdrojového signálu jsem zvolil právě tuto metodu, především pro její komplexní postoj k problému.

4.2.1 Náhradní model zkoumaného vzorku

Prvním krokem k analytickému řešení je určení náhradního elektrického modelu zkoumaného vzorku s připevněnými elektrodami, tedy samotné snímací části použitého kapacitního snímače, jehož dielektrikem je zkoumaný materiál. Na Ústavu fyziky FEKT proběhla řada měření závislosti odporu a kapacity snímací části na frekvenci, jejichž typický výsledek je na obr. 4.1. Z těchto závislostí jsem vycházel při určování náhradního modelu snímače, což bylo nutné, neboť tyto závislosti nejsou konstantní. Jsou závislé na kmitočtu. To znamená, že v diferenciální rovnici by nebylo možno použít konstantní koeficienty a tím by se řešení velmi zkomplikovalo.



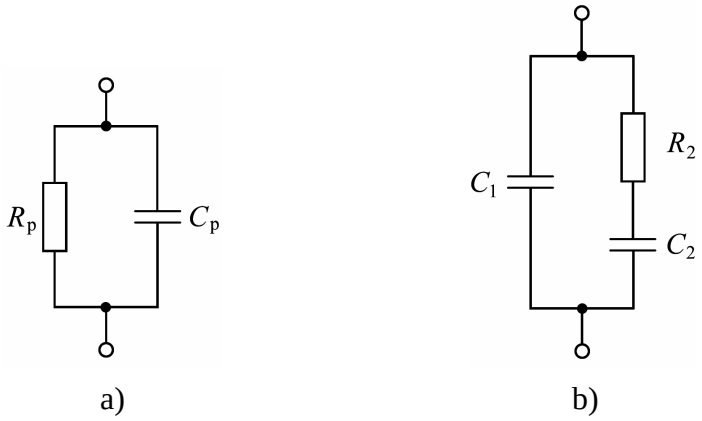
Obr. 4.1: Změřené závislosti paralelního odporu a paralelní kapacity na frekvenci pro vzorek s elektrodami.

Uvedené průběhy byly získány pomocí měřiče HP 4285A - Precision LCR Meter 75kHz-30MHz. Tento přístroj vyhodnocoval měřená data v konfiguraci paralelního zapojení prvků R_p a C_p. Schéma je znázorněno na obr. 4.2a. Z tohoto zapojení jsem určil komplexní impedanci Z_M pomocí vztahu

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{M}} = \frac{R_{\mathrm{p}} \cdot 1/\, j\omega C_{\mathrm{p}}}{R_{\mathrm{p}} + 1/\, j\omega C_{\mathrm{p}}}, \tag{4.1}$$

kde R_{p} je paralelní odpor a C_{p} je paralelní kapacita měřeného snímače se vzorkem, ω je úhlový kmitočet daný $\omega = 2\pi f$, přičemž f je měřicí frekvence.

Vypočtená komplexní impedance sloužila jako klíčový faktor k nalezení náhradního modelu. Pro jeho nalezení jsem předpokládal, že hlavní charakter celkové impedance bude vnášet samotná paralelní kapacita C_{p} zkoumaného vzorku s elektrodami. Pro modelování její frekvenční závislosti pak bude sloužit další větev složená nejen z paralelního odporu R_{p}. Využitím programu Micro-Cap jsem tedy experimentálně zjišťoval možná řešení pro obvod, jehož průběh modulové i fázové charakteristiky bude podobný změřeným charakteristikám. Optimální volbou z hlediska teoretického předpokladu a požadavku nenáročné další analýzy se jevil obvod, který je uveden na obr. 4.2b.



Obr. 4.2: Modely vzorku s elektrodami:
a) při měření charakteristik, b) náhradní obvod s konstantními prvky.

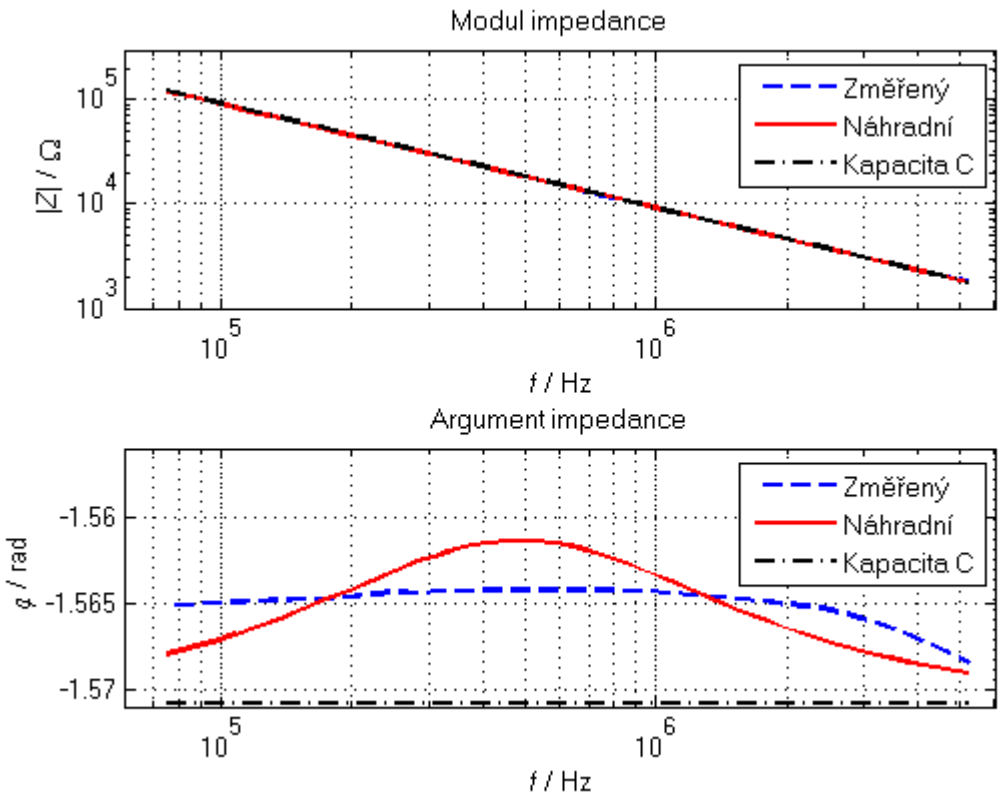
Matematické vyjádření komplexní impedance $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{N}}$ nově nalezeného obvodu je

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{N}} = \frac{1/\, j\omega C_1 \cdot (1/\, j\omega C_2 + R_2)}{1/\, j\omega C_1 + 1/\, j\omega C_2 + R_2}. \tag{4.2}$$

Vhodným dosazením hodnot prvků C_1, C_2, R_2 do této rovnice lze získat pouze přibližný průběh impedance $\boldsymbol{Z}_M$. Důležité ale je, že se jedná o konstantní hodnoty prvků, které jsou potřebné pro řešení diferenciální rovnice.

V prostředí MATLAB jsem ověřil, že pro hodnoty obvodových prvků C_1 = 17,3 pF, C_2 = 0,33 pF, R_2 = 1 MΩ se průběhy změřené a náhradní impedance téměř shodují. Srovnání průběhů absolutních hodnot impedancí je uvedeno na horním

obr. 4.3. Při řešení však bylo obtížné především dosáhnout odpovídajícího průběhu fázové charakteristiky impedance, neboť změny hodnot prvků C_2 a R_2 se na průběhu absolutní hodnoty impedance tak neprojevují, jako na průběhu fáze. Na dolním obr. 4.3 jsou vidět průběhy fázových charakteristik, které se sice také téměř shodují, avšak chyba je zde více viditelná. Velikost odchylky lze odhadovat v řádu setin radiánu. Nicméně i toto je možno považovat za velmi dobrý výsledek. Především z pohledu výpočtu kvadratické chyby.



Obr. 4.3: Průběhy změřené a teoretické impedance vzorku s elektrodami.

4.2.2 Výpočet kvadratické odchylky

Při hledání aproximačního průběhu funkce k experimentálně zjištěným hodnotám, získaných např. měřením, se velmi často používá metoda nejmenších čtverců. Jedná se o metodu regresní analýzy, která umožňuje nalézt takové řešení, aby součet kvadrátů chyb mezi změřeným a aproximovaným průběhem byl nejmenší. Operace výpočtu kvadratické odchylky ρ^2 lze dle [3] zapsat do tvaru

$$\rho^2(c_1,...c_m) = \sum_{i=1}^{N} \left(y_i - P_m(x_i)\right)^2 , \tag{4.3}$$

kde i = 1, 2 … N, N značí počet odhadovaných hodnot, $c_1,\ldots c_m$ jsou reálná čísla, y_i jsou experimentální data, x_i je nezávisle proměnná veličina. Přitom je dán soubor funkcí

$$P_m(x) = \sum_{i=1}^{m} c_i \varphi_i(x)\,, \tag{4.4}$$

kde $m < N$, φ_i jsou dané funkce. Z tohoto souboru se pak hledá taková funkce φ_i, pro niž kvadratická odchylka ρ^2 nabývá minimální hodnoty a tato funkce pak tvoří nejlepší aproximaci experimentálních dat.

Protože daná funkce již byla nalezena, výše uvedené vyhodnocení kvality aproximace pomocí zmíněné metody aplikuji na navržený náhradní model a na teoretický případ použití ideálního kapacitoru. Na obr. 4.3 je společně s charakteristikami změřené a náhradní impedance uveden i teoretický průběh impedance, který by nastal v případě použití pouze samotné kapacity $C = C_1$, jak bylo uvedeno v úvodní kapitole na obr. 1.2. Je vidět, že průběh fáze tohoto případu ve srovnání s průběhem změřeným vnese větší chybu, neboť teoretický konstantní fázový posuv -π/2 u ideálního kapacitoru je více vzdálen od změřeného. Naproti tomu náhradní obvod, který se snaží průběh fáze změřené impedance svým způsobem napodobovat, opticky vnáší chybu menší. Tuto skutečnost potvrdí i výpočet kvadratické chyby. Výpočet lze provést např. způsobem, kdy chyba absolutní hodnoty komplexní impedance pro náhradní obvod je

$$\rho^2{}_{\mathrm{abs}} = \sum_{i=1}^{N} \left(\left|\boldsymbol{Z}_{\mathrm{M}}(i)\right| - \left|\boldsymbol{Z}_{\mathrm{N}}(i)\right|\right)^2 = 8{,}711.10^4\,\Omega^2\,, \tag{4.5}$$

v případě samotné kapacity C_1 je chyba

$$\rho^2{}_{\mathrm{abs'}} = \sum_{i=1}^{N} \left(\left|\boldsymbol{Z}_{\mathrm{M}}(i)\right| - \left|\boldsymbol{X}_{C1}(i)\right|\right)^2 = 2{,}307.10^7\,\Omega^2\,. \tag{4.6}$$

Chyba hodnoty fáze pro náhradní obvod je

$$\rho^2{}_{\mathrm{arg}} = \sum_{i=1}^{N} \left(\arg(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{M}}) - \arg(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{N}})\right)^2 = 1{,}131.10^{-4}\,rad^2\,, \tag{4.7}$$

v případě samotné kapacity C_1 je chyba

$$\rho^2{}_{\mathrm{arg'}} = \sum_{i=1}^{N} \left(\arg(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{M}}) - \arg(\boldsymbol{X}_{C1})\right)^2 = 1{,}244.10^{-3}\,rad^2\,. \tag{4.8}$$

Ve všech případech platí, že $\boldsymbol{Z}_M$ je změřená komplexní impedance, $\boldsymbol{Z}_N$ je komplexní impedance náhradního obvodu, $\boldsymbol{X}_{C1}$ je kapacitní reaktance kondenzátoru C_1, přičemž i značí index měřicích frekvencí a nabývá hodnot i = 1, 2 … N.

Vypočtenou chybu lze určitým způsobem považovat za celkovou chybu aproximace křivky, nikoliv jako průměrnou chybu při odhadu jedné hodnoty. Z výsledků je zřejmé, že v případě absolutní hodnoty impedance i fáze je vypočtená chyba při použití náhradního obvodu menší, než v případě použití pouhé kapacity. Z toho lze vyvodit, že použití náhradního obvodu má své opodstatnění.

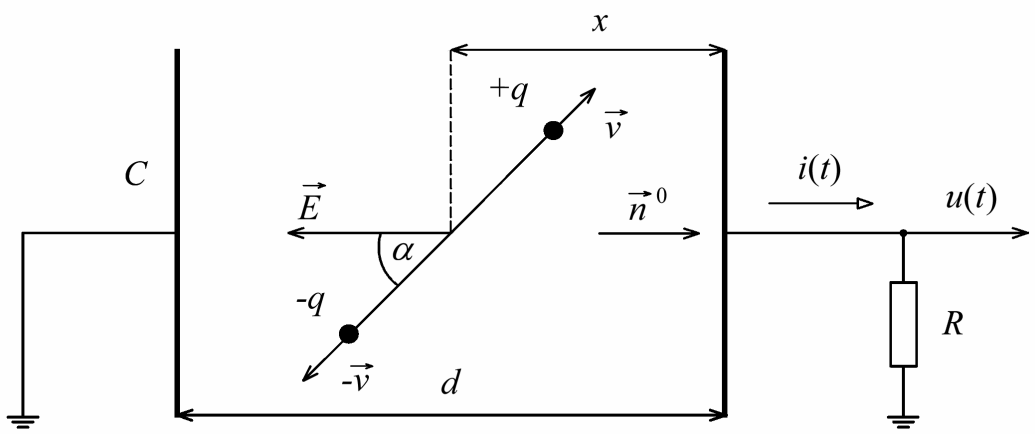
4.2.3 Aplikace zákona zachování energie

Zákon zachování energie (ZZE) je jedním ze základních fyzikálních zákonů. Zjednodušeně tento zákon konstatuje, že při všech dějích v soustavě těles přechází energie z jednoho tělesa na druhé, nebo se jedna forma energie mění v jinou, přičemž celková energie soustavy těles se nemění. Je zřejmé, že definice není zcela fyzikálně přesná, ovšem pro dané účely postačí. Z tvrzení totiž vyplývá dosti důležitá, avšak ne zcela zřetelná skutečnost a to ta, že lze použít ZZE pro určení indukovaného proudu v sériovém obvodu dle obr. 1.1. Tento obvod je pro přehlednost uveden také na obr. 4.4 [7], [15].

Princip je takový, že během elementárního času dt elektrický náboj q pohybující se v elektrickém poli $\vec{E}$ rychlostí $\vec{v}$ změní svoji polohu o $\mathrm{d}\vec{r} = \vec{v}\mathrm{d}t$. Vnější síla $\vec{F}$, jejímž zdrojem je v aplikovaném případě hydraulický lis, vyvolá pohyb náboje a koná tedy dle [7] práci

$$\mathrm{d}W = -q\vec{E}\vec{v}\mathrm{d}t + \mathrm{d}\left(\frac{1}{2}mv^2\right), \tag{4.9}$$

kde m je hmotnost částice, která nese elektrický náboj q.



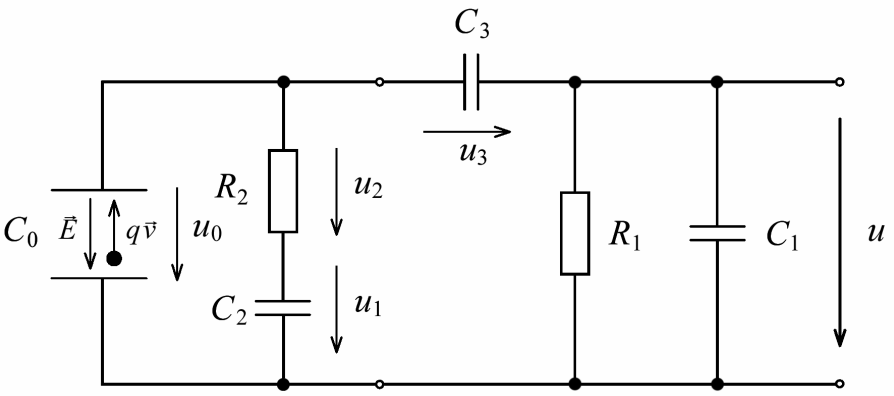
Obr. 4.4: Kapacitní snímač ve tvaru deskového kondenzátoru [6].

Dále podle [7] vyplývá, že první člen na pravé straně diferenciální rovnice představuje přírůstek energie elektrického pole, druhý člen představuje přírůstek kinetické energie částice. Přírůstek energie elektrického pole se projeví jako Jouleovo teplo v rezistoru ($u^2 / R\,\mathrm{d}t$) a elementární přírůstek energie kondenzátoru d(1/2 Cu^2), kde R a C jsou parametry obvodu na obr. 4.4. Tato práce je vykonaná nábojem, který odebírá část mechanické energie dodané soustavě vnější silou. Dle [7] tedy platí

$$-q\vec{E}\vec{v}\mathrm{d}t = \frac{u^2}{R}\mathrm{d}t + Cu\mathrm{d}u\,. \tag{4.10}$$

Jak již bylo zmíněno v podkapitole 1.2.1, pro zlepšení vlastností měřicího zařízení je vhodné použít kapacitní snímač podle konfigurace na obr. 1.2. Nyní lze do této konfigurace místo ideální kapacity snímače C vložit nově navrhnutý náhradní obvod zkoumaného vzorku uvedeného na obr. 4.2b.

Náhradní obvod však představuje vzorek s elektrodami jako celek. Z tohoto důvodu vyvstává na povrch otázka, v kterých místech obvodu se bude nacházet aktivní část, ve které bude docházet k pohybu elektrických nábojů q a tím k generaci elektrického proudu i do obvodu. Intuitivním řešením se jeví konfigurace na obr. 4.5.



Obr. 4.5: Zatěžovací impedance pro praktické použití doplněná o náhradní model z pohledu ZZE.

Aktivní část je tvořena kondenzátorem C_0, který představuje snímací kondenzátor, přičemž na sériovou kombinaci odporu R_2 a kondenzátoru C_2 je možné pohlížet jako na materiálové a parazitní vlastnosti vzorku materiálu.

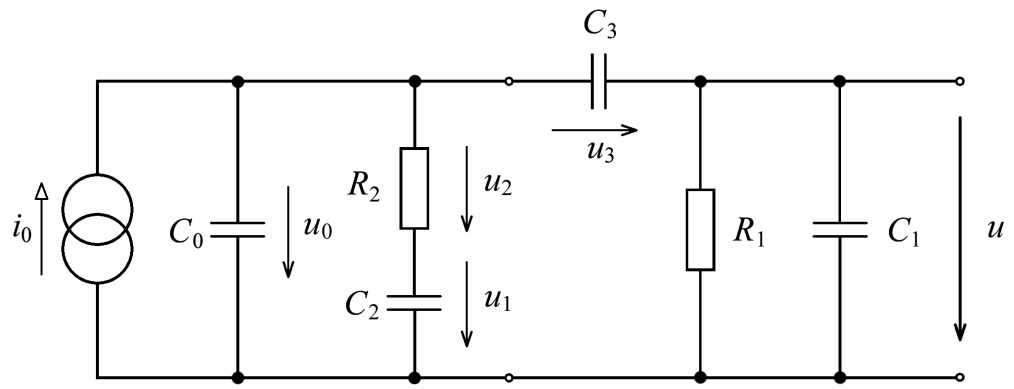
Pro daný obvod pak podle [7] platí analogický vztah

$$-q\vec{E}\vec{v}\mathrm{d}t = \frac{u^2}{R_1}\mathrm{d}t + \frac{u^2}{R_2}\mathrm{d}t + C_1 u\mathrm{d}u + C_2 u_1 \mathrm{d}u_1 + C_3 u_3 \mathrm{d}u_3 + C_0 u_0 \mathrm{d}u_0\,, \tag{4.11}$$

kde jednotlivé sčítance v diferenciální rovnici tvoří dílčí rozložení celkové energie v soustavě, což teoreticky odpovídá ZZE.

4.2.4 Určení indukovaného napětí při obecné zatěžovací impedanci

Řešení pro rovnici (4.9) patrně existuje, ovšem vhodnější alternativní metodou je náhrada snímacího kondenzátoru C_0 z obr. 4.5 ekvivalentním zdrojem proudu a paralelně připojeným běžným kondenzátorem C_0 stejné kapacity, jako má snímací kondenzátor. Uvažovaná konfigurace je zobrazena na obr. 4.6 [7].



Obr. 4.6: Zatěžovací impedance pro praktické použití doplněná o náhradní model a ekvivalentní zdroj proudu.

V souladu s ZZE pak platí, že proud i_0 tekoucí zdrojem odpovídá

$$i_0 = -q\vec{E}_1\vec{v}\,, \tag{4.12}$$

přičemž platí

$$\vec{E}_1 = \frac{\vec{E}}{u}\,. \tag{4.13}$$

Pro intenzitu elektrického pole $\vec{E}$ deskového kondenzátoru platí

$$\vec{E} = \frac{u}{d}\,, \tag{4.14}$$

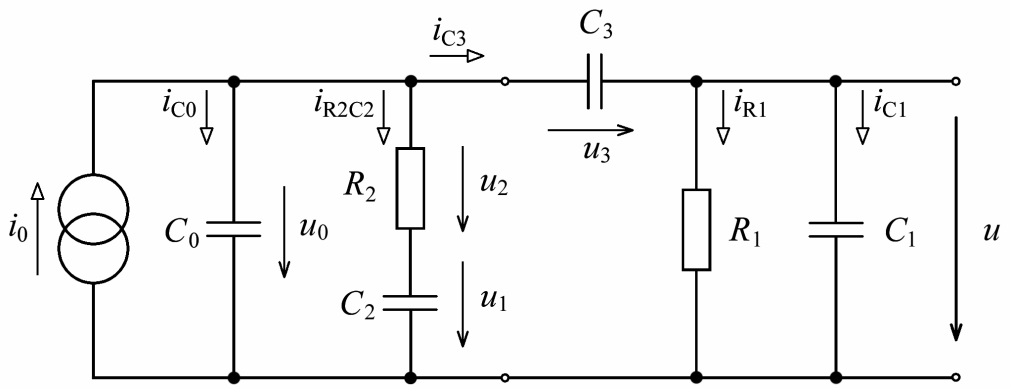
kde d značí vzdálenost elektrod kondenzátoru. Potom je možné vztah (4.12) upravit do finálního vztahu

$$i_0 = -q\frac{1}{d}\vec{n}^{\,0}\vec{v}\,, \tag{4.15}$$

kde $\vec{n}^0$ je jednotkový vektor ve směru normály k elektrodám kondenzátoru. Tento obvod je potom možné řešit obvyklými analytickými metodami s časově proměnnými proudy [7].

4.2.5 Odvození diferenciálních rovnic

V případě analýzy složitějších obvodů se většinou použije některá z univerzálních metod. Základem bude, že formulace diferenciálních rovnic obvodu v zásadě vycházejí z obou Kirchhoffových zákonů. Dále je pro lepší názornost uveden analyzovaný obvod společně s vyznačenými dílčími proudy a napětími, viz obr. 4.7.



Obr. 4.7: Analyzovaný obvod s uvedenými dílčími proudy a napětími.

Nejprve je nutné si určit počáteční rovnice, z kterých se bude dále vycházet. První Kirchhoffův zákon vychází z principu zachování náboje a říká, že součet všech proudů vtékajících do uzlu je roven nule. Pro první uzel v obvodu tedy platí

$$i_0 - i_{C0} - i_{R2C2} - i_{C3} = 0\,, \tag{4.16}$$

pro druhý platí

$$i_{C3} - i_{R1} - i_{C1} = 0\,. \tag{4.17}$$

Druhý Kirchhoffův zákon vychází ze zákona zachování energie a říká, že součet napětí na všech obvodových prvcích v jakékoliv uzavřené smyčce je roven nule. Pro prostřední smyčku v obvodu lze pak napsat

$$u_3 + u - u_1 - u_2 = 0 \tag{4.18}$$

a pro vedlejší smyčku vlevo lze napsat

$$u_2 + u_1 - u_0 = 0\,. \tag{4.19}$$

Nyní se může přikročit k vyjádření dílčích napětí a proudů. Nejprve jsem si vyjádřil úpravou vzorce (4.17) proud tekoucí kondenzátorem C_3. Pro časově proměnný proud i_{C3} pak platí diferenciální rovnice

$$i_{C3} = i_{C1} + i_{R1} = C_3 \frac{\mathrm{d}u_3}{\mathrm{d}t} = C_1 \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} + \frac{u}{R_1}. \tag{4.20}$$

Z tohoto proudu je možné vyjádřit napětí na kondenzátoru C_3. Vhodné je ale ponechat časově proměnné napětí u_3 v derivaci. Derivované napětí je

$$\frac{\mathrm{d}u_3}{\mathrm{d}t} = \frac{C_1}{C_3}\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} + \frac{u}{R_1 C_3}. \tag{4.21}$$

Rovnici (4.18) lze zapsat do tvaru

$$u_1 + u_2 = u_3 + u, \tag{4.22}$$

a rovnici (4.19) do tvaru

$$u_0 = u_1 + u_2. \tag{4.23}$$

V těchto rovnicích je společné $u_1 + u_2$. Spojením těchto rovnic jsem vyjádřil napětí u_0

$$u_0 = u_3 + u. \tag{4.24}$$

Následnou derivací obou stran této rovnice se původní rovnost nezmění. Využije-li se navíc vztahu (4.21), dostanu derivované dílčí napětí u_0

$$\frac{\mathrm{d}u_0}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}u_3}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} = \frac{C_1}{C_3}\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} + \frac{u}{R_1 C_3} + \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}. \tag{4.25}$$

Z tohoto napětí jsem vypočítal proud tekoucí kondenzátorem C_0

$$i_{C0} = C_0 \frac{\mathrm{d}u_0}{\mathrm{d}t} = \left(C_0 + \frac{C_0 C_1}{C_3}\right)\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} + \frac{C_0}{R_1 C_3} u. \tag{4.26}$$

V této chvíli si můžu upravit vzorec (4.16) do podoby

$$i_{R2C2} = i_0 - i_{C0} - i_{C3}. \tag{4.27}$$

Dosadím-li do něj vzorce (4.26) a (4.20), časově proměnný prou i_{R2C2} bude dán vztahem

$$i_{R2C2} = C_2 \frac{\mathrm{d}u_1}{\mathrm{d}t} = i_0 - \left(C_0 + \frac{C_0 C_1}{C_3}\right)\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} - \frac{C_0}{R_1 C_3} u - C_1 \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} - \frac{u}{R_1}, \tag{4.28}$$

a z něj jsem určil kýžené derivované napětí na kondenzátoru C_2. Upravený vztah je

$$\frac{\mathrm{d}u_1}{\mathrm{d}t} = \frac{i_0}{C_2} - \left(\frac{C_0}{C_2} + \frac{C_1}{C_2} + \frac{C_0 C_1}{C_2 C_3}\right)\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} - \left(\frac{1}{R_1 C_2} + \frac{C_0}{R_1 C_2 C_3}\right)u\,. \tag{4.29}$$

Posledním dílčím napětím je napětí na odporu R_2. Z Ohmova zákona lze jednoduše určit toto napětí součinem velikosti odporu s protékajícím proudem. Derivací tohoto součinu se zákon nezmění, tudíž jsem využil vztahu (4.28) a derivované napětí vyjádřil upraveným vztahem

$$\frac{\mathrm{d}u_2}{\mathrm{d}t} = R_2 \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} =$$

$$= R_2 \frac{\mathrm{d}i_0}{\mathrm{d}t} - \left(R_2 C_0 + R_2 C_1 + \frac{R_2 C_0 C_1}{C_3}\right)\frac{\mathrm{d}^2 u}{\mathrm{d}t^2} - \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2 C_0}{R_1 C_3}\right)\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}\,. \tag{4.30}$$

Nyní jsou všechna potřebná dílčí napětí vyjádřena pomocí diferenciálních rovnic. Nic již nebrání tomu, abych vyjádřil celkovou transformaci zdrojového signálu - proudu i_0 na snímané napětí u na přípravku. Výchozí je derivovaný vztah (4.18)

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}u_1}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}u_2}{\mathrm{d}t} - \frac{\mathrm{d}u_3}{\mathrm{d}t}\,, \tag{4.31}$$

do kterého jsem dosadil vztahy (4.29), (4.30) a (4.21). Tento vztah je příliš dlouhý a je zbytečné jej uvádět. Jeho úpravou a separací částí se stejnými proměnnými veličinami a řády derivací jsem obdržel výsledný požadovaný tvar

$$A\frac{\mathrm{d}^2 u}{\mathrm{d}t^2} + B\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} + Cu = D\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + Ei\,, \tag{4.32}$$

přičemž substituční konstanty jsou vyjádřeny:

$$A = R_2 C_0 + R_2 C_1 + \frac{R_2 C_0 C_1}{C_3}\,, \tag{4.33}$$

$$B = 1 + \frac{C_1}{C_2} + \frac{C_0 C_1}{C_2 C_3} + \frac{C_1}{C_3} + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2 C_0}{R_1 C_3} + \frac{C_0}{C_2}\,, \tag{4.34}$$

$$C = \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{C_0}{R_1 C_2 C_3} + \frac{1}{R_1 C_3}\,, \tag{4.35}$$

$$D = R_2\,, \tag{4.36}$$

$$E = \frac{1}{C_2}\,. \tag{4.37}$$

Na levé straně rovnice (4.32) je výstupní napětí, které je navíc dvakrát derivováno, z čehož plyne, že celá rovnice je druhého řádu. Na pravé straně je pak neznámý proud vznikající pohybem nábojů ve vzorku. Tento proud je dán vztahem (4.12).

4.2.6 Možnosti využití odvozených rovnic

V úvodu kapitoly bylo naznačeno, že ze znalosti vnášené transformace lze ze změřeného napětí zjistit neznámé zdrojové veličiny. Přesněji řečeno, dosazením časově proměnného indukovaného napětí u do rovnice (4.32) je možné zpětně zjistit časovou závislost součinu náboje q a rychlosti v. Tedy dynamického děje chování trhliny. Tímto způsobem však nelze zjistit samostatně náboj nebo rychlost. Možnost zjištění samostatného průběhu pohybu stěn trhliny v ze změřeného napětí je pouze v případě, kdy se velikost náboje q považuje za konstantní. Tedy v případě, kdy po rozevření trhliny nedochází ke změně elektrického náboje [7].

Příklad využití odvozené diferenciální rovnice (4.32) může být takový, že se do ní dosadí rovnice (4.15). Pak bude mít rovnice tvar

$$A\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}t^2}+B\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}+Cu=D\left(-q\frac{1}{d}\vec{n}^0\frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}\right)+E\left(-q\frac{1}{d}\vec{n}^0\vec{v}\right). \tag{4.38}$$

Tato rovnice již obsahuje známé hodnoty kromě zdrojových veličin q a v.

Pro úplnost je vhodné uvést, že lze postupovat i reverzním způsobem. Ze znalosti součinu $q.v$ lze určit výstupní napětí u. Tento méně častý způsob použití může být vhodný např. v případech, kdy se z nějakého důvodu simuluje vznik trhliny (např. ze známé energie) a sleduje se výstupní napětí. Neboli sleduje se odezva systému na vstupní děj. Získané údaje pak mohou sloužit pro porovnání s reálně změřenými signály.

4.2.7 Vliv rušivého napětí

Vzhledem k tomu, že výsledná diferenciální rovnice (4.32) vyšla 2. řádu, je na místě zamyslet se nad problematikou vlivu rušivého napětí, které se velmi často projevuje jako aditivní složka celkového snímaného napětí.

Rušivé napětí je ve většině případů tvořeno šumem, někdy doprovázeným periodickou nebo kvaziperiodickou složkou dalších rušivých napětí o nižších frekvencích. Šum může být jednak „bílý,“ jehož spektrum je konstantní a obsahuje široké rozpětí frekvencí, nebo se jedná o šum „barevný,“ jehož spektrum je konstantní jen v určitém pásmu frekvencí. Tato rušivá napětí mohou generovat vlastní prvky v systému nebo se do systému vnáší z vnějšího okolí. Z tohoto důvodu je nutné volit nízkošumové přístroje a kvalitní stínění od okolí.

Předpokládá-li se vliv aditivního šumu, pak je možné celkové snímané napětí u uvažovat jako

$$u = u_{\mathrm{S}} + u_{\check{\mathrm{S}}}, \tag{4.39}$$

kde u_{S} je užitečný signál a $u_{\check{\mathrm{S}}}$ je rušivý signál. Dosadí-li se toto napětí do levé strany diferenciální rovnice (4.32), její podoba bude

$$L = A\frac{\mathrm{d}^2\left(u_{\mathrm{S}} + u_{\check{\mathrm{S}}}\right)}{\mathrm{d}t^2} + B\frac{\mathrm{d}\left(u_{\mathrm{S}} + u_{\check{\mathrm{S}}}\right)}{\mathrm{d}t} + C\left(u_{\mathrm{S}} + u_{\check{\mathrm{S}}}\right). \tag{4.40}$$

Tato levá strana obsahující derivace součtu napětí se rozdělí na součet derivací užitečného signálu a derivací šumu, tedy

$$L = \left(A\frac{\mathrm{d}^2\left(u_{\mathrm{S}}\right)}{\mathrm{d}t^2} + B\frac{\mathrm{d}\left(u_{\mathrm{S}}\right)}{\mathrm{d}t} + C\left(u_{\mathrm{S}}\right)\right) + \left(A\frac{\mathrm{d}^2\left(u_{\check{\mathrm{S}}}\right)}{\mathrm{d}t^2} + B\frac{\mathrm{d}\left(u_{\check{\mathrm{S}}}\right)}{\mathrm{d}t} + C\left(u_{\check{\mathrm{S}}}\right)\right). \tag{4.41}$$

Z matematiky je známo, že derivace vyjadřuje rychlost změny funkce podle nějaké veličiny. V tomto případě se uvažují změny úrovně signálu podle času. Bude-li tedy signál prudce stoupat a klesat během velmi krátkých časových okamžiků, pak bude 1. derivace a obzvláště 2. derivace velmi vysoká. Dále lze předpokládat, že povaha šumu je ryze náhodná a jeho průběh lze charakterizovat jako prudké střídání hodnot určité velikosti dané jejich rozptylem. V tomto případě hrozí výsledný efekt, že derivované prudké špičky rušivého napětí velmi nebo zcela znehodnotí snímané napětí. Neboli pravá část levé strany rovnice obsahující derivace rušivého napětí převládne nad částí obsahující užitečný signál. Je proto opět nutné zdůraznit použití kvalitních nízkošumových přístrojů a kvalitního stínění. Při analýze zarušeného signálu pak použít filtrační metodiky odstranění rušivých složek.

5 OVLÁDACÍ PROGRAM OSCILOSKOPU HS4

Nad rámec úkolu, který je zadán tématem diplomové práce, jsem prováděl praktická měření a tedy získávání reálných EME a AE signálů v laboratoři na Ústavu fyziky FEKT VUT v Brně. S odkazem na obr. 1.5 v kapitole popisující měřící pracoviště je vhodné se zmínit, že návrh tohoto pracoviště spadal do týmové spolupráce. Doplňujícím úkolem, který mi byl svěřen v rámci návrhu pracoviště, byla tvorba ovládacího programu pro osciloskop HandyScope HS4 holandské firmy TiePie. Tento 4-kanálový digitální osciloskop je samozřejmě dodáván se standardním softwarovým vybavením, avšak nevyhovoval zcela našim potřebám a účelům. Především záznamu změřených dat ve vhodném formátu. Vznikl tedy požadavek na ovládací program, který jsem vytvořil v prostředí MATLAB verze 7.1. Doplněn je o grafické uživatelské prostředí GUI, které slouží pro lepší manipulaci. Níže uvedený popis programu je možné chápat jako stručnou nápovědu k použití.

5.1 Připojení osciloskopu k počítači

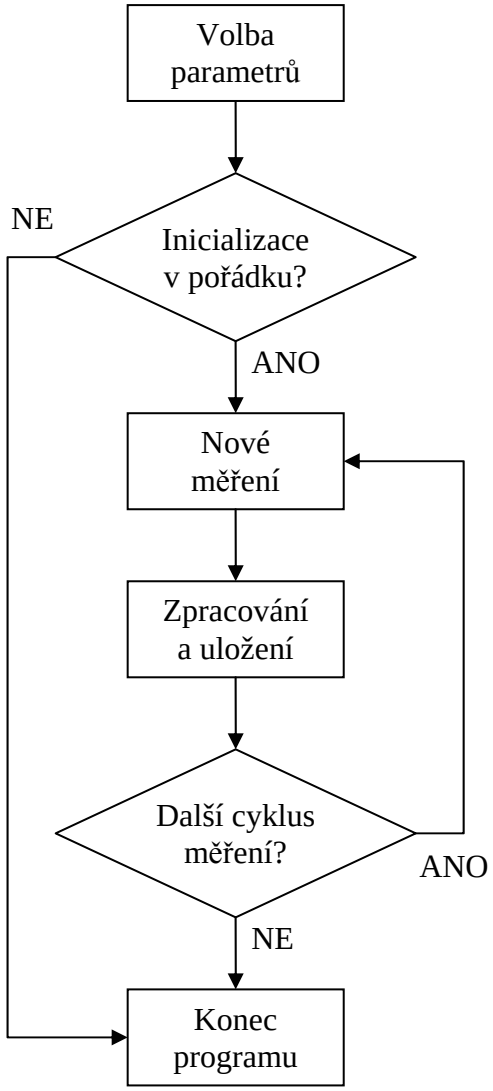
Pro zajištění komunikace osciloskopu s počítačem a dále s programem MATLAB je nutné osciloskop připojit pomocí USB rozhraní, podporována je i rychlá verze USB 2.0. Přes toto rozhraní je osciloskop zároveň napájen, avšak z důvodu stability je dobré použít přídavné napájení pomocí redukce ke konektoru PS/2, která je součástí balení. Samotná instalace osciloskopu pro požadované účely není na stránkách výrobce [14] úplně přesně dokumentována. Osvědčil se však níže uvedený postup.

Před samotným připojením osciloskopu k počítači je nutné nejprve nainstalovat ovladač, který je volně ke stáhnutí na stránkách výrobce a pracuje na počítačích pod systémem Windows. Je vyžadováno, aby během instalace ovladače nebyl osciloskop k počítači připojen. Po instalaci ovladače je vhodné počítač restartovat. Poté lze osciloskop připojit k počítači pomocí rozhraní USB. Následné výzvy k instalaci dalších potřebných ovladačů je možné ignorovat.

Aby osciloskop spolupracoval s prostředím MATLAB, je nutné, aby v jeho podadresáři *..\Bin\Win32* a dále v pracovním adresáři navrženého ovládacího programu byla umístěna knihovna *HS4.dll*, **.hex* soubory a soubor *tiepie.h*. Všechny tyto soubory jsou dostupné na stránkách výrobce v sekci *download*. Uloženy jsou také na přiloženém CD. Název pracovního adresáře s ovládacím programem nesmí obsahovat mezery.

5.2 Popis programu

Zjednodušený vývojový diagram programu je uveden na obr. 5.1. Názorná ukázka celého okna je uvedena v příloze C.1.



Obr. 5.1: Zjednodušený vývojový diagram ovládacího programu.

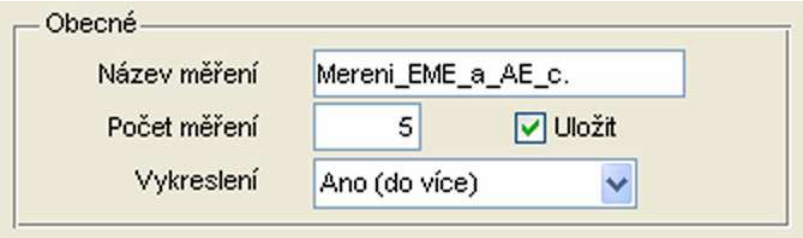
Koncepce programu je taková, že po jeho spuštění se nejprve provede inicializace celého osciloskopu, tj. čtením instalované knihovny se použijí rozšiřující příkazy k nastavení parametrů do osciloskopu pro měření, které zadal uživatel. Jedná se např. o vzorkovací frekvenci, délku signálu (počet vzorků), spouštěcí úroveň (trigger), kanál pro spouštění měření apod. Nastavené parametry jsou po úspěšné inicializaci přehledně vypisovány do informačního bloku a do příkazového okna MATLABu. Zároveň

dochází k aktivaci měření. Vlastní měřicí proces začíná překročením zadané prahové hodnoty v určeném kanálu osciloskopu. To způsobí sejmutí vzorků signálů přítomných na všech vstupech osciloskopu. Jakmile dojde k sejmutí nastaveného počtu vzorků, vykreslí se časový průběh změřených hodnot. Hodnoty jsou společně s údaji o nastavení osciloskopu uloženy před koncem měření do textových souborů. Soubory jsou ukládány do složky */DATA* v pracovním adresáři. Zamezí se tím ztráty změřených dat, pokud by došlo k neočekávané chybě. Tím je jeden měřicí cyklus ukončen. Stejně jako každý jiný parametr i počet cyklů je nutné nastavit ještě před spuštěním programu. Za běhu parametry nelze měnit. Po proběhnutí nastaveného počtu měření je program ukončen.

Potřebné soubory pro spuštění programu se nachází na přiloženém CD v adresáři *program_osciloskop_HS4*. Na pevný disk počítače musí být přenesen nejlépe celý adresář, který se následně nastaví jako pracovní. Jsou-li na obslužném počítači nainstalovány potřebné ovladače pro komunikaci osciloskopu s počítačem, je možné ovládací program spustit zápisem příkazu *osciloskop_HS4* do příkazového okna prostředí MATLAB. Program je optimalizován pro rozlišení monitoru 1024 × 768 bodů.

5.2.1 Nastavení obecných parametrů

Prvním krokem k nastavení měření je určení obecných informací. Na obr. 5.2 je uveden rámec hlavního okna programu s výchozím nastavením. Vysvětlení k položkám je uvedeno dále.



Obr. 5.2: Obecné nastavení měření.

Název měření

Udává název souboru, do kterého se uloží hodnoty z jednoho cyklu měření. Je-li nastaveno více měřicích cyklů, pak je název doplněn o číselný údaj, který se s dalším prováděným měřením inkrementuje. Soubory jsou ukládány v textovém formátu.

Počet měření

Volba počtu měřicích cyklů. Dokud všechny neproběhnou, nelze program ukončit.

Uložit

Volba, zda se budou naměřená data ukládat do souboru nebo se budou jen případně vykreslovat. Měření bez ukládání jsme používali při ladění pracoviště, kdy časová prodleva zdržovala práci.

Vykreslení

Změřená data je možno nevykreslovat, vykreslit do společného grafu např. pro lepší pozorování vzájemného časového posunu signálů, nebo vykreslit do samostatných grafů použitých kanálů.

5.2.2 Nastavení parametrů měření

Vlastní nastavení měřicích parametrů osciloskopu se provádí v rámci okna programu uvedeném na obr. 5.3. Význam jednotlivých položek je zřejmý z běžné technické praxe. Jejich upřesnění je uvedeno dále.

Obr. 5.3: Výchozí nastavení parametrů měření.

Počet kanálů

Volba počtu po sobě jdoucích kanálů, které budou zahrnuty do měření.

Citlivost

Jde o rozsah kladného a záporného napětí signálu, který osciloskop vzorkuje. Signál mimo toto rozmezí je oříznut. Nastavovat lze pevně určené hodnoty.

Spouštěcí úroveň

Tato napěťová úroveň je rozhodující pro celé měření. Jakmile tuto hodnotu překročí vstupní signál ve spouštěcím kanále, je měření spuštěno ve všech zahrnutých kanálech.

Spouštěcí kanál

Definování kanálu, kterým bude spouštěno měření. Při praktickém měření byl na tento kanál přiveden signál EME. Signál EME má vyšší rychlost šíření než signál AE, proto okamžik jeho příchodu lze považovat za okamžik vzniku trhliny.

Vzorkovací frekvence

Udává počet sejmutých vzorků signálu za 1 s na všech kanálech osciloskopu.

Rozlišení

Tímto parametrem lze měnit přesnost převodu napětí analogového signálu na číslicový údaj. Větší počet bitů značí více kvantovacích úrovní. Změnou rozlišení se však změní maximální vzorkovací frekvence.

Počet vzorků záznamu

Číslo udává počet vzorků, které budou sejmuty ze signálu v měřeném kanálu. Jejich maximální počet je 131060, dle údajů výrobce osciloskopu.

Vzorků před spuštěním

Osciloskop podporuje velmi užitečnou funkci průběžného ukládání hodnot do své paměti. Jakmile je spuštěno měření překročením spouštěcí úrovně, osciloskop vzorkovaný signál doplní o vzorky, které sejmul ještě před spouštěcí úrovní. Nastavovaný parametr je v programu udáván v procentech z celkového počtu vzorků záznamu signálu.

5.2.3 Ovládání programu

Celý program je vytvořen v rámci jednoho okna, pro přehlednost je dobré jej maximalizovat. Informační údaje o nastavení osciloskopu a prováděných akcích jsou přehledně vypisovány do informačního bloku a do příkazového okna prostředí MATLAB. Ovládací tlačítka a informační blok je vidět na obr. 5.4.

Obr. 5.4: Ovládání a informační výpis.

START

Jsou-li nastaveny potřebné parametry, tlačítkem je započata inicializace osciloskopu a následná měření.

Načíst

Pomocí tlačítka lze zobrazit dříve změřená a uložená data tímto programem a nebo data získaná z měření provedená na Ústavu fyziky FAST. Soubory totiž obsahují před samotnými vektory dat parametry měření, což umožní správné vykreslení. Jiné druhy souborů nejsou podporovány.

Nové okno

Umožněno je také pomocí tohoto tlačítka zobrazení v dalším okně se standardním menu a nabídkou úpravy grafů. To dovoluje průběhy zvětšovat, posouvat apod.

6 ZÁVĚR

Metody elektromagnetické a akustické emise se jeví jako velmi perspektivní techniky spadající do oblasti nedestruktivního zkoumání vlastností látek. Jejich aplikace mohou tvořit alternativu k řešení úloh např. v materiálovém inženýrství. V této diplomové práci jsem v prvních dvou kapitolách uvedl jejich podstatu. Byly nastíněny základní informace o principu a způsobech měření emisních signálů, používaných snímačích a uspořádání měřicího pracoviště. Dále jsem uvedl základní vlastnosti signálů EME a AE, často zjišťované parametry a pro názornost typické časové průběhy.

Neoddělitelnou součástí metod je adekvátní zpracování generovaných emisních signálů. Prvním praktickým úkolem diplomové práce je tedy návrh vhodné metodiky zpracování signálů EME a AE. Tento návrh jsem zhotovil ve formě programu spustitelného v prostředí MATLAB. Umožňuje pohodlné načtení, vykreslení a zpracování zkoumaných signálů, dobrá ovladatelnost je podpořena grafickým uživatelským prostředím. Program zjišťuje většinu známých parametrů v časové, frekvenční i časově-frekvenční oblasti. K tomuto účelu navržené metody jsem společně se samotnou strukturou programu přehledně popsal v 3. kapitole. Analyzované signály jsem měl k dispozici z Ústavu fyziky FAST a FEKT VUT v Brně. V drtivé většině případů navržené metody pracovaly s velmi dobrým výsledkem. Jejich přesnost může být snížena u velmi zašuměných signálů nebo u signálů zcela netypických průběhů či nevyhovujících výchozím předpokladům. Využití programu a daných metod může posloužit např. k zpřesnění dalších procesů analýzy signálů a výzkumu materiálů.

Druhým zadaným úkolem bylo navržení způsobu korekce vedoucí k odstranění transformace zdrojového signálu použitým měřicím obvodem. Tomuto úkolu se věnuji ve 4. kapitole. Pro řešení jsem zvolil analytickou metodu, což znamenalo nalezení náhradního elektrického obvodu snímací části kapacitního snímače. Ověřil jsem, že vypočtené charakteristiky nalezeného náhradního obvodu téměř odpovídají charakteristikám obvodu změřeného. Správnost návrhu jsem podpořil výpočtem střední kvadratické chyby. Ta byla ve srovnání s pouhým nahrazením měřeného obvodu ideálním kapacitorem menší o několik řádů. Přínosné je, že v náhradním obvodu vystupují pouze prvky s konstantními hodnotami, nezávislými na frekvenci, což je důležité pro odvození výsledné diferenciální rovnice vyjadřující transformaci. Využití rovnice se nabízí pomocí změřeného časově proměnného napětí, jehož dosazením do výsledné rovnice lze zjistit průběh dynamického děje v materiálu při vzniku trhliny.

Zadané úkoly tedy byly splněny. Nad rámec tématu diplomové práce jsem se podílel na tvorbě měřicího pracoviště signálů EME a AE v laboratoři na Ústavu fyziky FEKT VUT. Mým úkolem byla tvorba ovládacího programu pro nově zakoupený digitální osciloskop HandyScope HS4. Jeho popisu se stručně věnuji v kapitole 5. Na tomto pracovišti jsem prováděl praktická měření emisních signálů, jehož některé výsledky jsem použil v navrženém programu zpracování signálů.

Nicméně vždy je co zlepšovat a tento případ nebude výjimkou. Jako další rozšíření práce z hlediska analýzy signálů se jeví čím dál více nasazované neuronové sítě. Perspektivním řešením může být také analýza pomocí vlnkové transformace. Vytvořený program by mohl být pro lepší přenositelnost realizován např. v jazyce C++ společně s dalšími funkcemi a zjišťovanými parametry apod. Z tohoto důvodu může diplomová práce velmi dobře posloužit pro inspiraci k další činnosti. O tom, že se jedná o velmi aktuální a zajímavou oblast výzkumu, svědčí i přijetí článku na toto téma do sborníku v rámci studentské soutěže EEICT 2008.

SEZNAM LITERATURY

[1] *Agilent Technologies : 34410A Digital Multimeter, 6½ Digit High Performance* [online]. Agilent, © 2000-2008 [cit. 2008-05-15]. Dostupný z WWW: <http://www.home.agilent.com/agilent/product.jspx?nid=-536902435.536908384.00&cc=US&lc=eng>.

[2] *Agilent Technologies : E3631A 80W Triple Output Power Supply, 6V, 5A & ±25V, 1A* [online]. Agilent, © 2000-2008 [cit. 2008-05-15]. Dostupný z WWW: <http://www.home.agilent.com/agilent/product.jspx?pn=E3631A>.

[3] FAJMON, Břetislav, RŮŽIČKOVÁ, Irena. Matematika 3. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006. 254 s.

[4] *HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GmbH : Ing. Ivan Wasgestian HBP* [online]. [2008] , 23. dubna 2008 [cit. 2008-05-24]. Dokument pdf. Dostupný z WWW: <http://www.hbm.cz/Prospekty/Zatizeni/C2/p_C2_e.pdf>.

[5] JAN, Jiří. *Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálů*. 2. upravené a rozšířené vyd. Brno: VUTIUM, 2002. 427 s. ISBN 80-214-2911-9.

[6] KOKTAVÝ, Pavel. *Nedestruktivní diagnostika a fyzika dielektrik*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006. 102 s.

[7] KOKTAVÝ, Pavel. *Využití impulzních náhodných procesů pro diagnostiku materiálů a součástek*. 2006. 118 s. Habilitační práce.

[8] KOKTAVÝ, Pavel, PAVELKA, Jan, ŠIKULA, Josef. Characterization of acoustic and electromagnetic emission sources. *Measurement Science and Technology* [online]. 2004, vol. 15, no. 1 [cit. 2007-11-20], s. 973-977. Dostupný z WWW: <http://www.iop.org/EJ/article/0957-0233/15/5/028/mst4_5_028.pdf>. ISSN 0957-0233.

[9] KOZUMPLÍK, Jiří, KOLÁŘ, Radim, JAN, Jiří. *Číslicové zpracování signálů v prostředí Matlab*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Ústav biomedicínského inženýrství, 2001. 73 s. ISBN 80-214-1964-4.

[10] KREIDL, Marcel, ŠMÍD, Radislav. *Technická diagnostika: Senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006. 408 s. Senzory neelektrických veličin; sv. 4. ISBN 80-7300-158-6.

[11] *Piezoelektrický jev: Vysvětlení jevu* [online]. © 2006-2007 [cit. 2007-11-03]. Dostupný z WWW: <http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=419>.

[12] *SIGNAL RECOVERY : Model 5113 Low-Noise Voltage Preamplifier* [online]. AMETEK, Inc., © 2008 [cit. 2008-05-24]. Dostupný z WWW: <http://www.signalrecovery.com/5113page.htm>.

[13] ŠEBESTA, Vladimír, SMÉKAL, Zdeněk. *Signály a soustavy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2004. 167 s.

[14] *USB Oscilloscope - Handyscope HS4 : Description* [online]. TiePie engineering, © 1996-2008 [cit. 2008-05-24]. Dostupný z WWW: <http://www.tiepie.com/uk/products/External_Instruments/USB_Oscilloscope/Handyscope_HS4.html>.

[15] *Zákon zachování energie* [online]. © 2006 - 2008 [cit. 2008-12-04]. Dostupný z WWW: <http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=50>.

[16] ZAPLATÍLEK, Karel, DOŇAR, Bohuslav. *MATLAB - začínáme se signály*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006. 272 s. ISBN 80-7300-200-0.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

AE	akustická emise
BNC	Bayonet Neill-Concelman (bajonetový konektor připojení koaxiálních kabelů)
CD	Compact Disc (kompaktní disk)
ČSN	česká technická norma (často neoficiálně také Česká soustava norem)
DC	Direct Current (stejnosměrný proud)
EEICT	Electrical Engineering, Information and Communication Technologies (studentská konference a soutěž)
EME	elektromagnetická emise
EN	evropská norma
FIR	Finite Impulse Response (filtr s konečnou impulsní charakteristikou)
GPIB	General Purpose Interface Bus (sběrnice pro propojení měřicích přístrojů)
GUI	Graphical User Interface (grafické uživatelské rozhraní)
IP	International Protection (stupeň konstrukčního opatření proti vniknutí)
LAN	Local Area Network (lokální síť malé rozlohy)
LCD	Liquid Crystal Display (displej z tekutých krystalů)
PSD	Power Spectral Density (výkonová spektrální hustota)
PS/2	Personal System 2 (konektor připojení klávesnice nebo myši k počítači)
RMS	Root Mean Square (efektivní hodnota)
USB	Universal Serial Bus (datové rozhraní počítače)
ZZE	zákon zachování energie
a	zrychlení
$\vec{B}$	vektor magnetické indukce
C	kapacita
d	vzdálenost desek kondenzátoru
E	energie
$\vec{E}$	vektor intenzity elektrického pole
$\vec{F}$	vektor síly
$h(n)$	impulsní charakteristika

$H(\omega)$	modulová frekvenční charakteristika
$i(t)$	okamžitá hodnota proudu
j	imaginární jednotka komplexního čísla
m	hmotnost
$+q, -q$	kladný, záporný náboj
$P_m(x)$	soubor aproximujících funkcí
Q	velikost náboje
R	elektrický odpor
$\boldsymbol{R}$	množina reálných čísel
$s(t)$	obecné označení signálu
$S(\omega)$	obecné označení spektra signálu
T, T_{vz}	perioda, vzorkovací perioda
f, f_{vz}	frekvence, vzorkovací frekvence
$u(t)$	okamžitá hodnota napětí
U_{RMS}	efektivní hodnota napětí
v, $\vec{v}$	rychlost, vektor rychlosti
$\vec{v}^{\,0}$	normálový vektor rychlosti
W	práce
$x(n)$	vstupní signál
$X(\omega)$	spektrum vstupního signálu
x, y	délková jednotka v ose x, y
$y(n)$	výstupní signál
$Y(\omega)$	spektrum výstupního signálu
$\boldsymbol{Z}$	množina celých čísel, v jiném kontextu komplexní impedance
μ	permeabilita
$\xi(t)$	realizace časově spojitého náhodného procesu
ω	úhlový kmitočet
ρ^2	kvadratická odchylka
$\varphi(x)$	aproximující funkce

SEZNAM PŘÍLOH

A Pracoviště pro měření signálů EME a AE 72
A.1 Vzorek se snímačem signálu EME 72
A.2 Snímače signálu AE 72
A.3 Článek RC 73
A.4 Snímač zatížení HBM C2 73
A.5 Zesilovač 3S SEDLAK PA15 74
A.6 Zesilovač 3S SEDLAK PA31 74
A.7 Digitální multimetr Agilent 34410A, zesilovač EG&G Princeton 5113, napájecí zdroj Agilent E3631A 75
A.8 Osciloskop TiePie Handyscope HS4 76
A.9 Stíněná část pracoviště 76
A.10 Celkové zapojení pracoviště 77

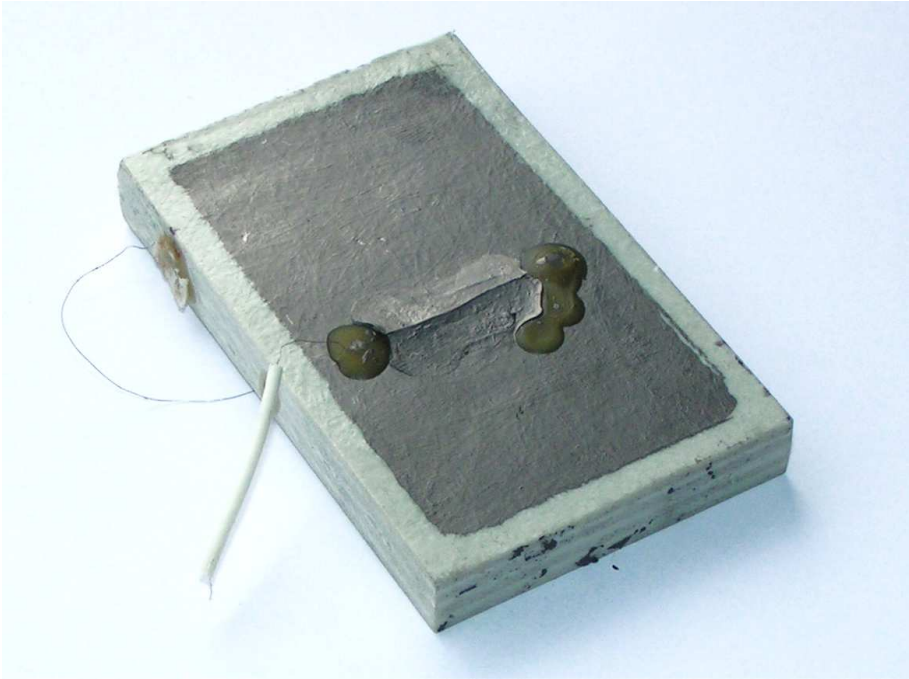
B Program zpracování signálů EME a AE 78
B.1 Okno programu 78

C Ovládací program osciloskopu HS4 79
C.1 Okno programu 79

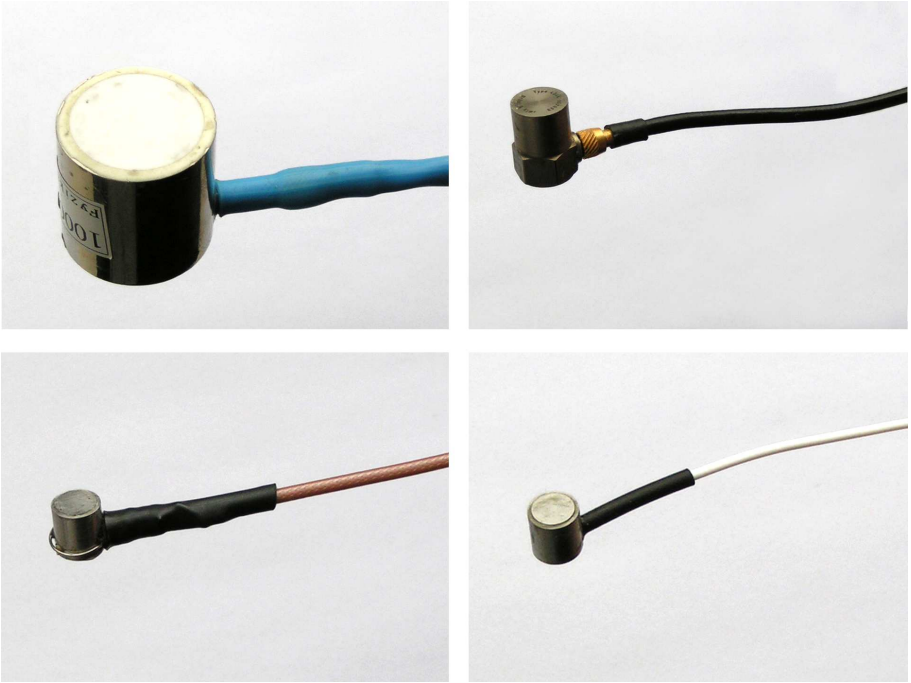
D Obsah přiloženého CD 80

A PRACOVIŠTĚ PRO MĚŘENÍ SIGNÁLŮ EME A AE

A.1 Vzorek se snímačem signálu EME

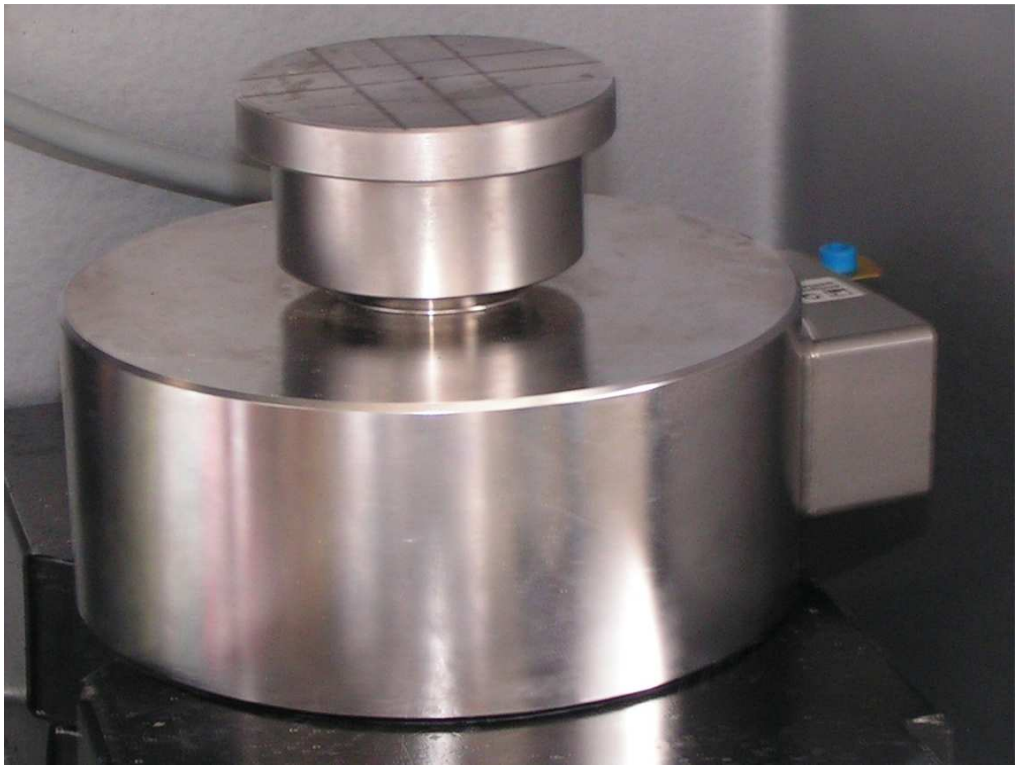


A.2 Snímače signálu AE

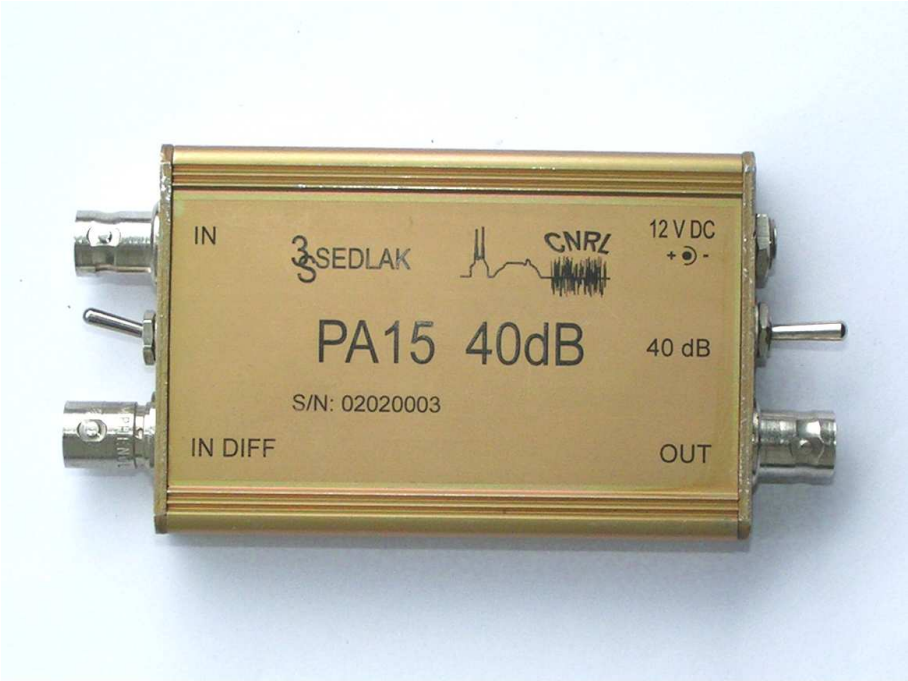


A.3 Článek RC

A.4 Snímač zatížení HBM C2

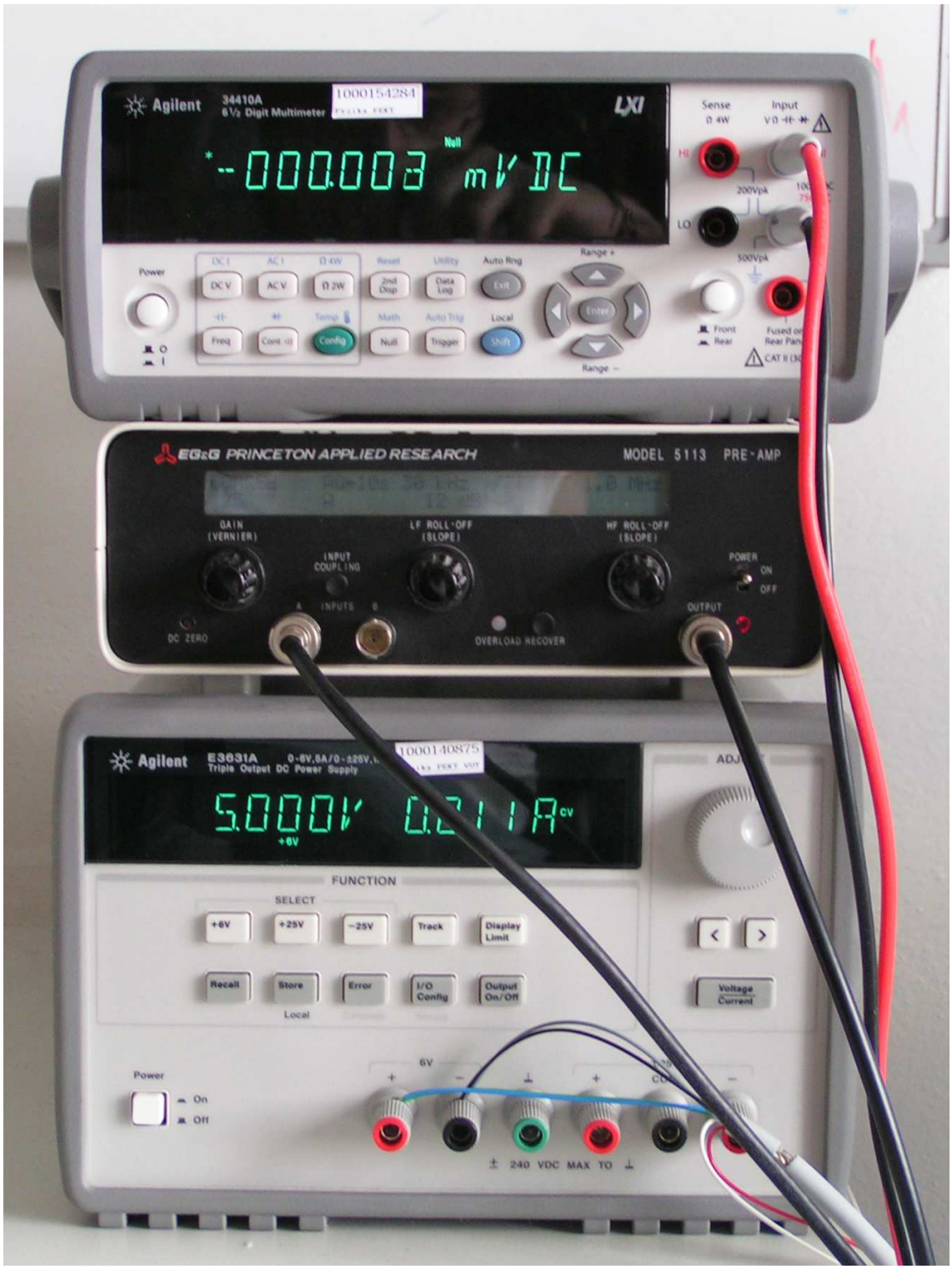


A.5 Zesilovač 3S SEDLAK PA15



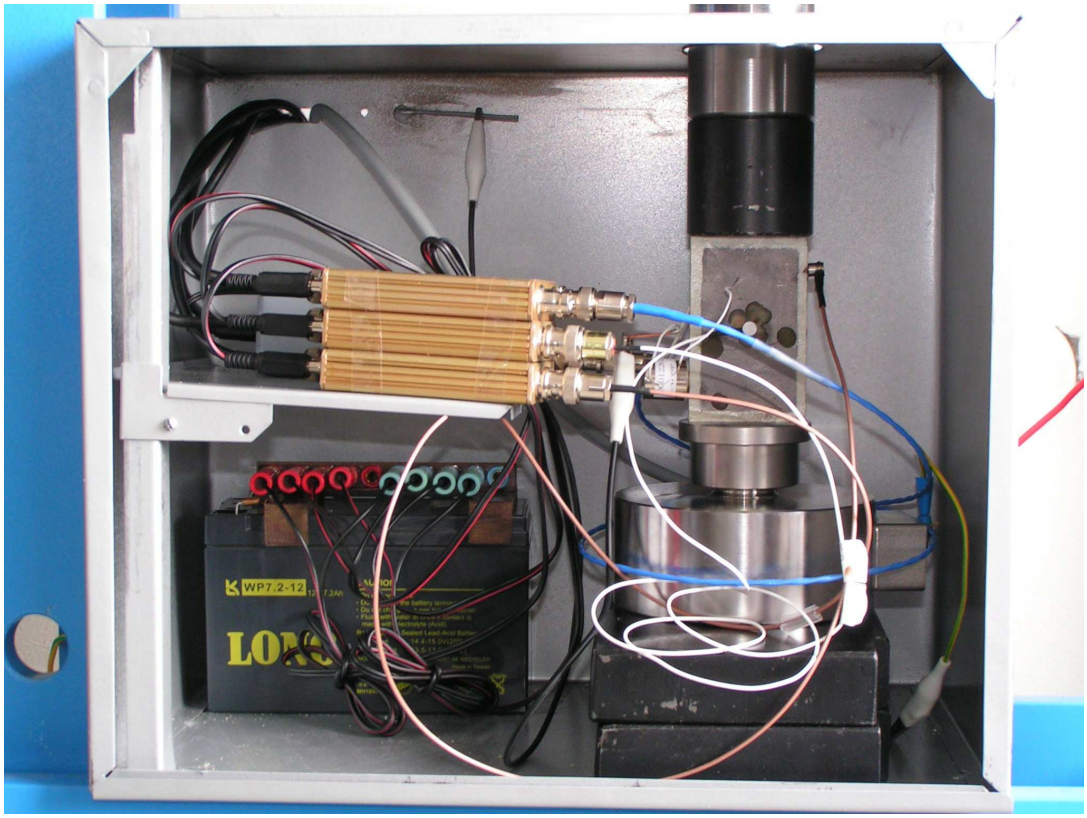
A.6 Zesilovač 3S SEDLAK PA31

A.7 Digitální multimetr Agilent 34410A, zesilovač EG&G Princeton 5113, napájecí zdroj Agilent E3631A

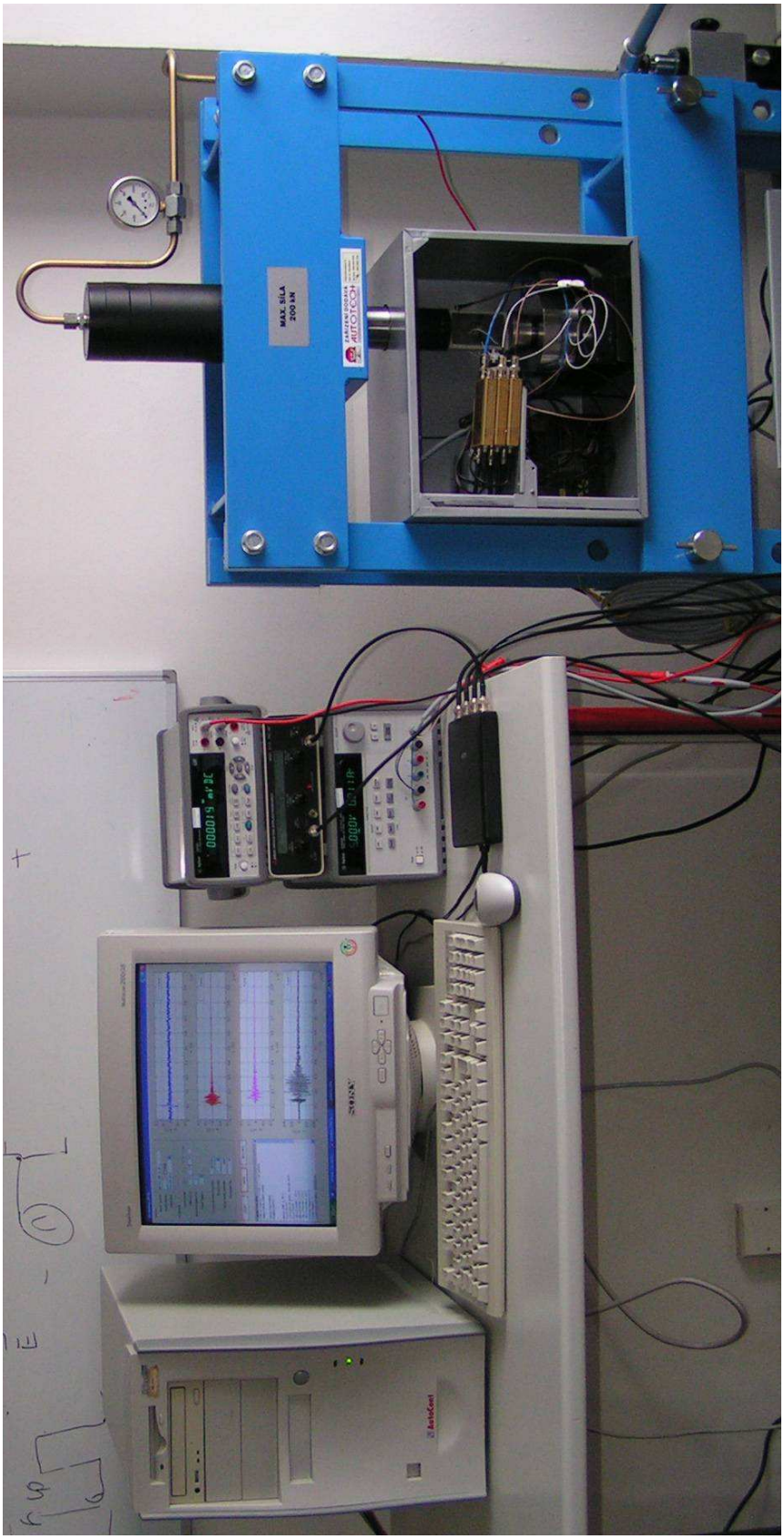


A.8 Osciloskop TiePie Handyscope HS4

A.9 Stíněná část pracoviště

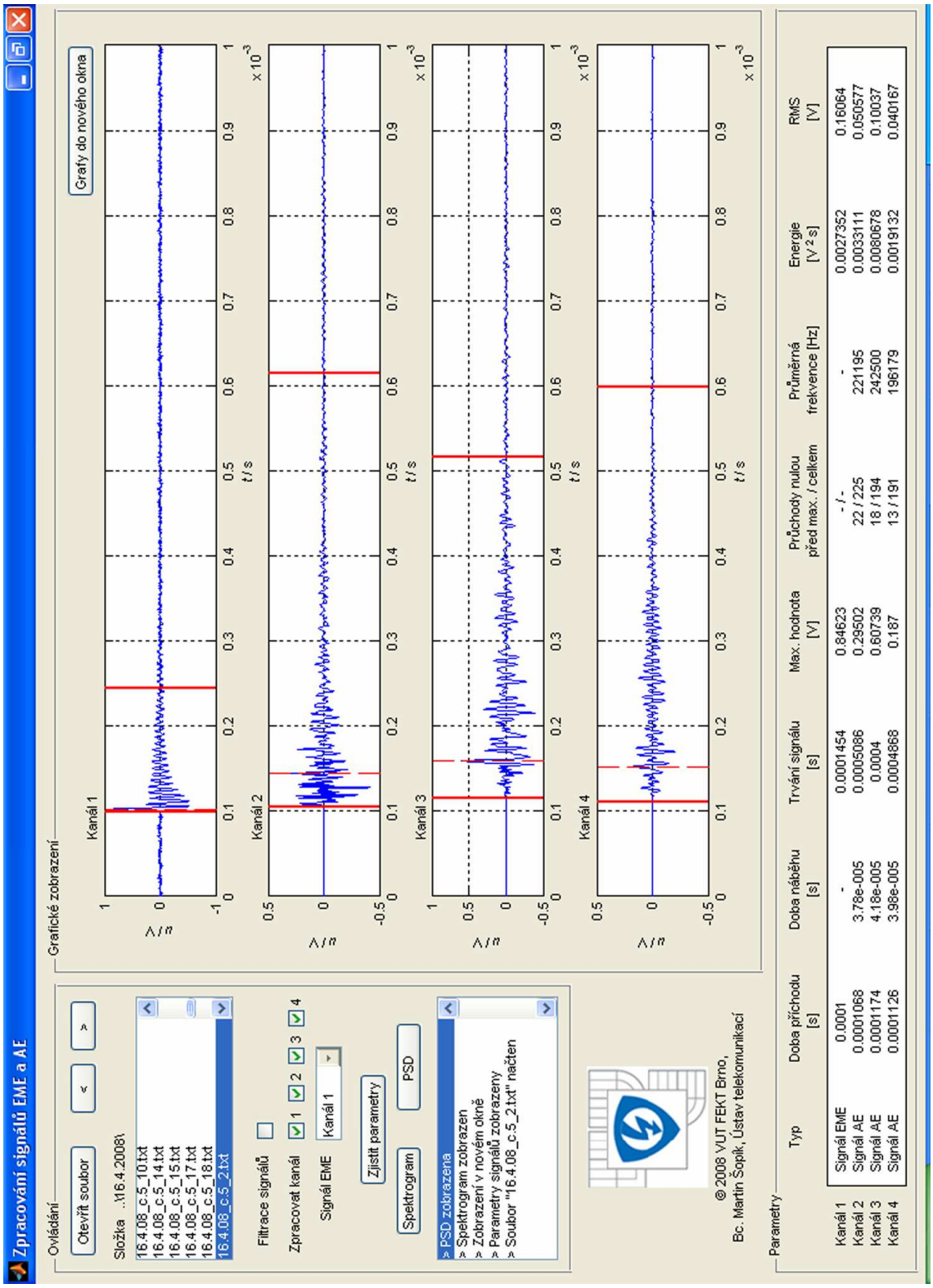


A.10 Celkové zapojení pracoviště



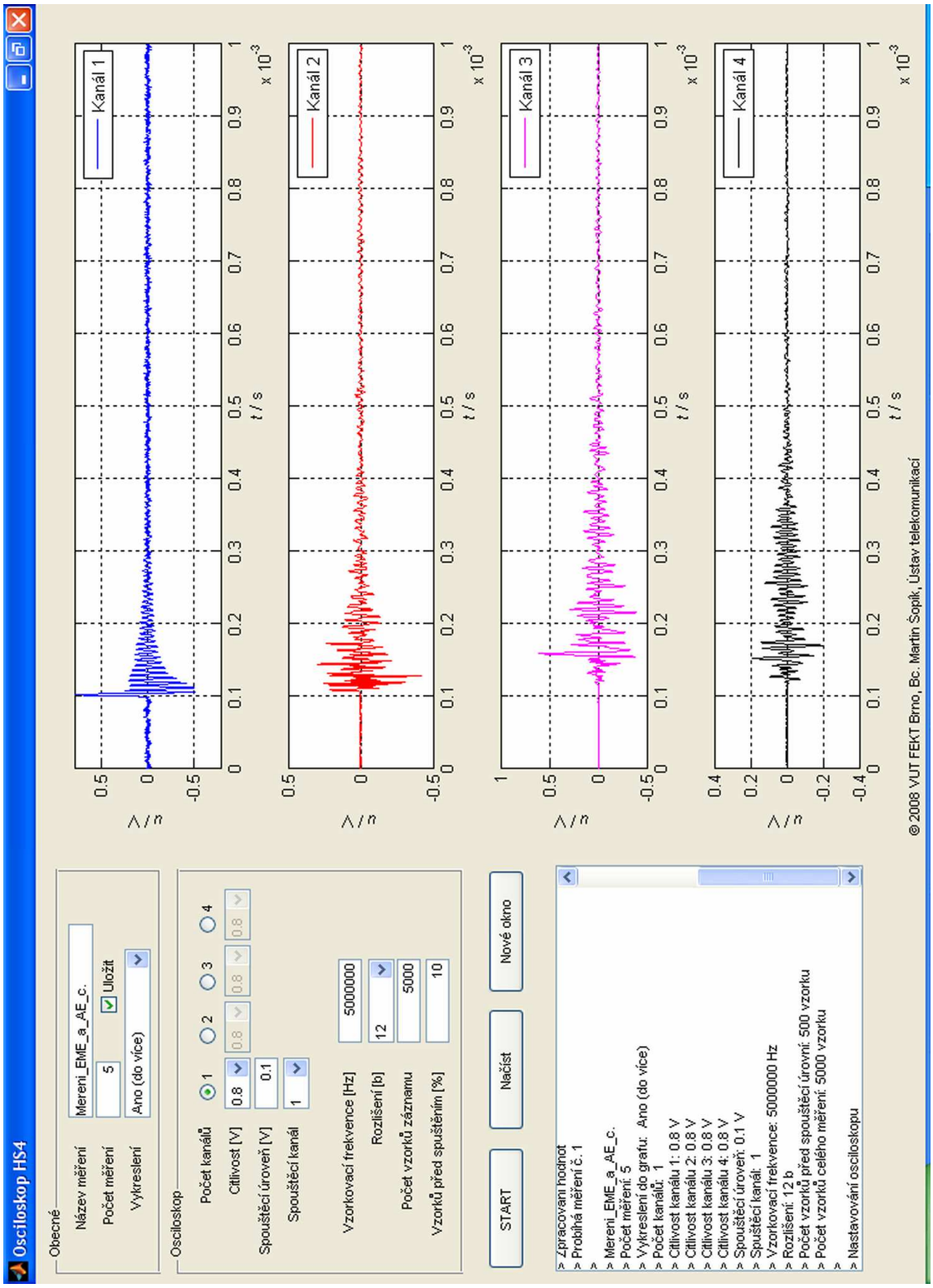
B PROGRAM ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ EME A AE

B.1 Okno programu



C OVLÁDACÍ PROGRAM OSCILOSKOPU HS4

C.1 Okno programu



D OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Vlastní text práce a metadata

V kořenovém adresáři je umístěn vlastní text diplomové práce a metadata popisného souboru práce. Oba dokumenty jsou ve formátu pdf.

Program zpracování signálů EME a AE

Adresář *program_zpracovani_signalu* obsahuje zdrojové soubory ke spuštění programu zpracování signálů EME a AE v prostředí MATLAB.

Ovládací program osciloskopu HS4

Adresář *program_osciloskop_HS4* obsahuje zdrojové soubory ke spuštění ovládacího programu v prostředí MATLAB. Další podadresář s názvem *HS4* obsahuje potřebné soubory k instalaci osciloskopu HS4 na počítač.

Soubory změřených signálů

Adresář *signaly_EME_a_AE* obsahuje některé vybrané signály EME a AE z praktických měření.

Soubory použité při řešení náhradního obvodu

Adresář *soubory_transformace* obsahuje m-soubory použité při řešení náhradního obvodu a dále soubor dat získaných z měření paralelní kapacity a paralelního odporu vzorku s elektrodami.