

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektrotechniky a ekologie**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Částečné výboje v diagnostice výkonových transformátorů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zdeněk URBAN**  
Osobní číslo: **E12N0126P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Částečné výboje v diagnostice výkonových transformátorů**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Uveďte stručný přehled profylaktických a diagnostických metod používaných u výkonových transformátorů pro sledování aktuálního stavu izolačního systému.
2. Diskutujte doporučení pro provádění těchto měření v průběhu života stroje, zaměřte se zejména na metody sledování částečných výbojů a vyhodnocení naměřených signálů.
3. Na základě zadaných geometrických a materiálových charakteristik stroje a akustických signálů částečných výbojů naměřených na transformátoru napište a ověřte výpočetní program pro lokalizaci poruchové lokality.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:


1. **Obraz, J. : Ultrazvuk v měřicí technice**
2. **ČSN EN 60076-3, ČSN EN 60270**
3. **Kreidl, M., Šmíd R. : Technická diagnostika**

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

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**  
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



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

V Plzni dne 14. října 2013

## **Anotace**

Tato diplomová práce je zaměřena na diagnostiku výkonových transformátorů, které tvoří důležitou součást přenosových sítí. Cílem je vytvořit počítačový program, který bude použit pro lokalizaci zdroje akustického signálu v izolačním systému transformátoru. Zpočátku je popsán stručný přehled profylaktických a diagnostických metod používaných u výkonových transformátorů pro sledování aktuálního stavu izolačního systému. Zaměřeno je především na akustickou diagnostiku používanou pro lokalizaci částečných výbojů. Z toho vychází napsání programu v MATLABU pro výpočet zdroje akustického zdroje. Program umožňuje lokalizaci částečných výbojů při zkouškách střídavým napětím.

## **Klíčová slova**

Částečné výboje, výkonový transformátor, šíření ultrazvuku, izolační systém, lokalizace zdroje.

## **Abstract**

The work is focused on the diagnosis of power transformers, which form an important component of the transmission networks. Aim is describe a PC script, which will be used for locating a source of an acoustic signal in the insulation system of the transformer. At first was described a brief overview of prophylactic and diagnostic methods used in power transformers for watching the current state of the insulation system. Of those methods, we was focused especially on acoustic diagnostics of power transformers used for localization faults. The PC script was made in program Matlab to calculate the source of an acoustic signal in an insulation defect. The Program can calculate the location of the partial discharge during the test using AC voltage.

## **Key words**

Partial discharges, power transformers, distribution ultrasound, insulation system, source localization.

## Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

V Plzni dne 19.5.2014

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D. za cenné profesionální rady, konzultace a metodické vedení práce. Poděkování za podporu během celého studia patří také mým rodičům a přátelům.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTORŮ</b> .....	<b>12</b>
1.1 ZKOUŠKY TRANSFORMÁTORŮ .....	13
1.1.1 Měření činného odporu vinutí .....	14
1.1.2 Měření izolačního odporu .....	15
1.1.3 Měření ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ a kapacity vinutí .....	16
1.1.4 Měření izolačního oleje kondenzátorových průchodek .....	17
1.1.5 Obsah plynů v oleji .....	17
1.1.6 Vlhkost v oleji .....	18
1.1.7 Měření poměru kapacit $C_2/C_{50}$ .....	20
<b>2 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE A JEJICH ÚČINKY</b> .....	<b>22</b>
2.1 ROZDĚLENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	22
2.2 PŮSOBENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ NA MATERIÁL .....	23
2.2.1 Chemické účinky .....	24
2.2.2 Elektrické účinky .....	24
2.2.3 Erozivní účinky .....	24
2.2.4 Tepelné účinky .....	24
<b>3 AKUSTICKÁ DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ</b> .....	<b>25</b>
3.1 MĚŘENÍ ULTRAZVUKEM .....	25
3.2 ZPŮSOBY ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKOVÝCH VLN .....	26
3.3 AKUSTICKÝ TLAK .....	27
3.4 DRUHY ULTRAZVUKOVÝCH VLN .....	28
3.5 RYCHLOST ŠÍŘENÍ .....	30
3.5.1 Tuhé látky .....	30
3.5.2 Kapaliny .....	31
3.6 PIEZOELEKTRICKÉ MĚNIČE .....	32
3.6.1 Přímý piezoelektrický jev .....	32
3.6.2 Nepřímý piezoelektrický jev .....	32
3.6.3 Elektromechanický faktor .....	32
3.6.4 Přímá sonda .....	33
3.6.5 Přímá sonda s předsádkou .....	33
3.6.6 Úhlová sonda .....	33
3.6.7 Dvojitá sonda .....	33
3.6.8 Speciální typy sond .....	33
<b>4 LOKALIZACE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ POMOCÍ ULTRAZVUKOVÝCH PROJEVŮ</b> .....	<b>34</b>
4.1 PRINCIP METODY .....	34
4.2 PROGRAM PRO LOKALIZACI ČÁSTEČNÉHO VÝBOJE .....	37
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>38</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>39</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>



## Úvod

V dnešní moderní automatizované době potřebuje elektrotechnika celistvé a věrohodné informace o všech jevech, které jejich oblast provází. Jedná se o informace jak o vstupních materiálech, tak o strojích a zařízeních ve všech fázích jejich vzniku i provozního života. Stupňují se zejména požadavky na přesnost, životnost a kvalitu při odpovídající ceně a maximální šetrnosti k životnímu prostředí. Důležitost a význam diagnostiky, která slouží jako prostředek k získávání informací, je tak zcela nezastupitelná.

Diagnostika svými výroky ovlivňuje všechny fáze výroby a snaží se předpovídat příští chování zkoumaných objektů. Nemají pouze technický, ale čím dál tím více i výrazný ekonomický význam. Jelikož nelze navrhnout přístroj z nekonečnou životností snažíme se tento faktor co nejvíce oddálit. K tomu nám slouží mnohé prostředky, které můžeme rozdělit na on-line nebo off-line. On-line diagnostika slouží k nepřetržitému sledování stavu strojů při jejich běžném provozu. Naměřená data se neustále vyhodnocují a v případě nalezení vad nebo mezních bezpečnostních stavů je pak nutné diagnostikovaný objekt odstavit z provozu. V tomto případě nebo při pravidelných kontrolních odstávkách využíváme off-line diagnostiku.

Tato práce se zaměřuje především na diagnostiku částečných výbojů. Pro bezporuchový provoz, potřebujeme v elektrotechnice zejména kvalitní izolační systém. I přes dodržování všech technických a provozních postupů je velice pravděpodobné, že se na zařízení objeví poruchy. V těchto místech se pak následně mohou vyskytnout částečné výboje, které mají postupně zničující účinky na izolační systém.

Včasným diagnostikováním zhoršení izolačního stavu systému, se dá předejít dlouhodobému zastavení provozu nebo nečekané havárii na zařízení. Předcházení dlouhodobého narušení provozu šetří technickým společnost velké finanční náklady, které by museli poskytnout na opravy zařízení. Díky tomu bude elektrotechnická diagnostika nadále silně spjata s průmyslovým odvětvím. Současná elektrotechnická diagnostika je branná jako progresivní a moderní věda.

## Seznam symbolů a zkratek

$p_{i1}$ .....	velikost polarizačního indexu	[-]
$i_{15}$ .....	absorpční proud odečtený v 15 s	[A]
$i_{60}$ .....	absorpční proud odečtený v 60 s	[A]
$\tau$ .....	časová konstanta	[s]
$R_{iz60}$ .....	velikost izolačního odporu určený v čase 60 s	[M $\Omega$ ]
$C_{50}$ .....	kapacita izolace změřená při 50Hz	[ $\mu$ F]
$tg\delta$ .....	ztrátový činitel	[Hz]
$C$ .....	kapacita	[ $\mu$ F]
$C_2$ .....	kapacita izolace při frekvenci 2 Hz	[Hz]
$C_{50}$ .....	kapacita izolace při frekvenci 50 Hz	[Hz]
$A$ .....	amplituda výchylky	[m]
$\omega$ .....	úhlová frekvence	[rad.s <sup>-1</sup> ]
$c$ .....	rychlost šíření vlny	[m.s <sup>-1</sup> ]
$x$ .....	souřadnice polohy	[m]
$r$ .....	poloměr vlnoplochy	[m]
$p$ .....	akustický tlak	[Pa]
$v$ .....	akustická rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
$z$ .....	měrná akustická impedance	
$\varphi$ .....	fázový úhel	[rad]
$\rho c$ .....	akustický vlnový odpor	[Pa m.s <sup>-1</sup> ]
$I$ .....	intenzita ultrazvukové vlny	[W m <sup>-2</sup> ]
$N$ .....	výkon ultrazvukové vlny	[W]
$P$ .....	amplituda akustického tlaku	[Pa]
$V$ .....	amplituda akustické rychlosti	[m s <sup>-1</sup> ]
$c_L$ .....	podélné vlnění	[m s <sup>-1</sup> ]
$c_T$ .....	příčné vlnění	[m s <sup>-1</sup> ]
$E$ .....	dynamický model pružnosti v tahu	[Pa]
$\mu$ .....	Poissonovo číslo	
$\rho$ .....	hustota	[Kg m <sup>-3</sup> ]
$S$ .....	obsah plochy	[m <sup>2</sup> ]
$G$ .....	modul pružnosti ve smyku	[Pa]
$K$ .....	adiabatický modul objemové pružnosti	[Pa]

P .....	tlak	[Pa]
$V_0$ .....	objem	[m <sup>3</sup> ]
$\beta_{ad}$ .....	adiabatická stlačitelnost	[Pa <sup>-1</sup> ]
$\beta_{iz}$ .....	izotermická stlačitelnost	[Pa <sup>-1</sup> ]
b .....	teplotní součinitel	[m s <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\Delta t$ .....	časový rozdíl mezi sondami	[s]
PET .....	Polyethylentereftalát	
PE .....	Polyethylen	
PTFE .....	Polytetrafluorethylen	

# 1 Diagnostika transformátorů

Transformátory umožňují přenos elektrické energie na velké vzdálenosti. V energetické soustavě se jedná o klíčové prvky, proto je důležitá jejich spolehlivost a správná funkčnost. Existují v mnoha velikostech a provedení v závislosti na přání zákazníka. Z toho důvodu existuje mnoho možností jejich dělení, a to podle použití, nebo podle provedení izolačního systému.

V provozu dochází k postupnému stárnutí transformátoru a tím i ke změnám mechanických a elektrických vlastností. Touto problematikou se v nemalé míře zabývá obor elektrotechnologické diagnostiky. Její hlavním úkolem je najít mez mezi funkčností stroje či jeho odstavením na základě dostupných měřených veličin. Z naměřených dat, by měla být dále patrná nejen míra změn, ale také zda se jedná o změny vratné nebo trvalé. Cílem diagnostiky transformátorů je ověření, zda stroj vyhovuje a splňuje předepsané normy a zda je v souladu s přáním zákazníka.

Diagnostika transformátorů se dá rozdělit do dvou skupin, a to na **off-line diagnostiku**, které se používá při odtavení stroje, nebo **on-line diagnostiky**, kdy je stroj pod neustálém pozorování stavu při běžném provozu. Speciální skupinu tvoří ověřování kapalných izolantů. Zkoušky podle rozsahu dělíme na:

- Kusové výrobní zkoušky
- Typové výrobní zkoušky
- Speciální výrobní zkoušky

Diagnostiku a měření na transformátorech můžeme nadále rozdělit na **výrobní** a **provozní**. Výrobní se zaměřuje na fázi vzniku a konstruování zařízení při jejich výrobě, tedy zkušeni ve výrobním závođe. Zahrnuje to vstupní kontroly používaného materiálu, přes kontroly mezioperační až po zkoušení kompletních transformátorů – tedy zkoušky kusové, typové a zvláštní.

Provozní zkoušky se provádějí na strojích zatěžovaných provozními vlivy. Sleduje se provozuschopnost, popřípadě stupeň opotřebení stroje. Cílem je prognózování dalšího vývoje sledovaných parametrů. Podle provedení se jedná buďto o off-line nebo on-line sledování transformátoru. [1]

## 1.1 Zkoušky transformátorů

Pro spolehlivý chod transformátoru je nejdůležitějším faktorem dobrý stav izolace vinutí. Za dobu svého chodu musí izolace vinutí odolávat vysokým teplotám, vlhkosti, mechanickému namáhání a mnoha dalších vlivů. Pro zajištění dlouhodobé spolehlivosti se dělají na transformátoru mnohé zkoušky jak ve výrobě, tak i v provozu při pravidelných kontrolách.

Perioda off-line diagnostiky transformátorů závisí na důležitosti stroje a jeho parametrů. U strojů vn/vn a vn/nn - 1 až 4 roky, vvn/vn – 1 až 2 roky, vvn/vvn a blokové transformátory s výkonem nad 100 MVA – 1 rok. [1]

Tab. 1.1 Zkoušky prováděné na transformátorech, převzato z [1]

Název zkoušky nebo měření	zkouška		
	typová	kusová	zvláštní
Měření izolačního odporu	+	+	-
Měření odporu vinutí za studena stejnosměrným proudem	+	+	-
Měření převodu napětí naprázdno na všech odbočkách	+	+	-
Kontrola natočení fází	+	+	-
Zkouška přiloženým napětím z cizího zdroje	+	+	-
Zkouška indukovaným napětím	+	+	-
Měření ztrát naprázdno proudu naprázdno	+	+	-
Měření charakteristiky naprázdno	+	-	-
Měření ztrát nakrátko a napětí nakrátko	+	+	-
Oteplovací zkouška	+	-	-
Zkouška elektrické pevnosti izolace atmosférickým impulsem:			
a) na vinutí se jmenovitým napětím do 132 kV	+	-	-
b) na vinutí se jmenovitým napětím nad 132 kV	+	+	-
Měření ztrátového činitele a kapacity vinutí na transformátoru			
a) se jmenovitým napětím menším než 110 kV	-	-	+
b) se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším	+	+	-
Zkratová zkouška	+	-	-
Měření nulové složky reaktance na transformátoru			
a) se jmenovitým napětím menším než 110 kV	-	-	+
b) se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším	-	-	+*)
Měření hluku na transformátoru			
a) s výkonem do 1600 kVA včetně	+	-	-
b) s výkonem nad 1600 kVA	-	-	+
Zkouška přepínače odboček	+	+	-
Zkouška el. pevnosti izolace spínacími impulzy	-	-	+
Měření částečných výbojů	-	-	+

Měření ochrany rádiového příjmu před rušením	-	-	+
Zkouška oleje pro transformátory příjmu před rušením			
a) zkouška průrazného oleje	+	+	-
b) měření obsahu vody v oleji transformátorů se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším	+	+	-
c) měření tgδ, R0 a ε <sub>r</sub> oleje transformátorů se jmenovitým výkonem 110 kV a vyšším	+	+	-
+ vykonává se - nevykonává se			
*) Pro transformátory určené pro energetiku - typová zkouška			

Ze zkoušek a měření se provádějí protokoly, kde se uvádějí štitkové hodnoty stroje, podmínky při měření, provozní hodnoty stroje (datum odstavení stroje, datum měření), naměřené a zpracované hodnoty, vyhodnocení měření a zhodnocení stavu izolace, číslo protokolu, jméno autora. [1]

Na následných stranách se pokusím vám přiblížit některá měření. Pokusil jsem se vybrat takové, které souvisejí s částečnými výboji, ale přímo jich se netýkají.

### 1.1.1 Měření činného odporu vinutí

Činný odpor se měří na všech vinutí transformátoru. Děje se tak na vstupní i výstupní straně. Proměřují se také všechny odbočky, na které se mohou měřicí přístroje připojit, při všech možných polohách přepínače odboček vinutí. Při měření musí být stroj úplně odpojený od zdroje a měl by mít přibližně teplotu jako je teplota okolí. Činný odpor se měří přímou metodou nebo pomocí můstku. Pokud se měří pouze jedno vinutí, zbylá musí být rozpojena. Velikost proudu nesmí při měření, stoupnou nad 0,2 násobek hodnoty jmenovitého proudu vinutí. Pokud jsou vyvedeny všechny konce vinutí, měří se činný odpor pro každou fázi zvlášť. Jestli jsou, ale fáze trvale spojena do hvězdy nebo trojúhelníka, měří se odpor mezi dvojicemi svorek a činný odpor se vypočítá pro jednotlivé fáze. [4]

Pro zjištění činného odporu nejprve změříme odpory mezi svorkami U, V, W – R<sub>UV</sub>, R<sub>UW</sub>, R<sub>VW</sub>. Pokud se při měření mezi svorkami mění hodnoty odporu jen minimálně nebo hledáme střední hodnotu odporu jedné fáze, můžeme stanovit odpor fáze R<sub>f</sub> podle vtahu:

$$R_f = \frac{1}{6}(R_{UV} + R_{UW} + R_{VW}) \quad [\Omega] \quad (1.1)$$

$$R_f = 0,5 * R_S \quad \text{pro připojení do hvězdy.} \quad (1.2)$$

$$R_f = 1,5 * R_S \quad \text{pro připojení do trojúhelníka.} \quad (1.3)$$

### 1.1.2 Měření izolačního odporu

Mezi jednu z nejstarších diagnostických metod v profylaktice transformátorů patří měření izolačního odporu. Izolační odpor poukazuje na nejslabší místo v izolačním systému. Změna velikosti je často spojena s vlhkostí a vlivem vodivých nečistot. Měření se provádí přiložením napětí na měřený objekt a odečtením absorpčního proudu v 15 a 60 sekundě. Kdy hodnota naměřená v čase 60 s se bere jako absolutní velikost izolačního odporu. Obě hodnoty jsou pak výchozí pro výpočet velikosti **polarizačního indexu**  $p_{i1}$ .

$$p_{i1} = i_{15}/i_{60} [-] \quad (1.4)$$

kde  $i_{15}$  - absorpční proud odečtený v 15 s

$i_{60}$  - absorpční proud odečtený v 60 s

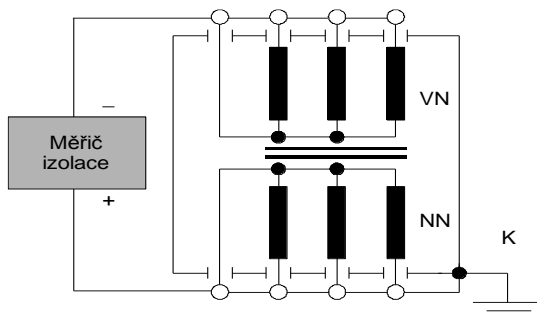
Další veličinou charakterizující stav izolačního systému je **časová konstanta**  $\tau$ . Časová konstanta je nezávislá na geometrických objektech stroje, proto můžeme objektivně srovnávat izolační stav jednotlivých strojů bez ohledu na jejich napětí, výkon a typ. Určíme ji z naměřených hodnot izolačního odporu a kapacity stroje. [1]

$$\tau = R_{iZ60} * C_{50} [s] \quad (1.5)$$

kde  $R_{iZ60}$  - velikost izolačního odporu určený v čase 60 s [ $M\Omega$ ]

$C_{50}$  - kapacita izolace změřená při 50Hz [ $\mu F$ ]

Měření se dělá za normálních podmínek, kdy relativní vlhkost nesmí přesáhnout 90 % (měření nelze provádět za deště, mlhy a sněžení). Stroj dále nesmí mít teplotu větší než 10 °C. Měření se provádí pomocí stejnosměrného napětí 2,5kV. Přiložené napětí by nemělo přesáhnout jmenovitou hodnotu napětí stroje. Aby nedošlo ke zkreslení naměřených dat, musí se přísně dodržovat vybíjecí intervaly. Na naměřené hodnoty může mít vliv případný zbytkový náboj.



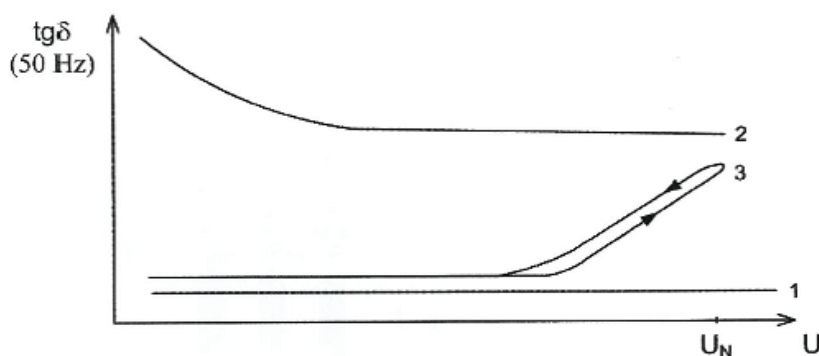
Obr. 1.1 Schéma pro měření izolačního odporu, převzato [1]

Před započítím měření musí být stroj oboustranně odpojen od zdroje. Dále se všechny vinutí transformátoru spojí na krátko a spojí s kostrou stroje, aby se vybil případný zbytkový náboj. Transformátorová nádoba musí být uzemněna a na zbylá vinutí nesmí být při měření nezapojena (buď se spojí s kostrou, nebo měřicím napětím).

Při opakovaném měření je žádoucí dodržet stejný sled jednotlivých měření, způsob zapojení a polaritu měřicího napětí. Aktuální výsledky se porovnávají s dřívějšími naměřenými hodnotami nebo s hodnotami nového stroje. Pokud je změna vyšší než 40 %, je nutné najít příčinu. Hodnota polarizačního indexu by neměla klesnout u nových strojů pod 1,7 a u strojů po revizi pod 1,3. Časová konstanta se pohybuje mezi 5 – 10 s v závislosti na provozním napětí. Pro všechny zjišťované hodnoty se musí respektovat výsledky zkoušek izolačního oleje. [4]

### 1.1.3 Měření ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ a kapacity vinutí

Velikost ztrátového činitele má vliv na činné ztráty, které jsou způsobené polarizací v izolaci. Čím větší je hodnota ztrátového činitele, tím více se izolace zahřívá a rychleji stárne. Můžeme si tím udělat celkový obraz o stavu izolace. Vlhkost v izolaci je ovlivněna kapalnou i pevnou částí dielektrika. Dá se určit, zda je izolace navlhla ne zestárlá.



Obr. 1.2 Průběh ztrátového činitele v závislosti na napětí, převzato [1]

1. Kvalitní izolace – nenavlhnutá, nízký ztrátový činitel, nezávislá na napětí.
2. Navlhnutá izolace – Z důvodu vlhkosti postupně klesá se zvyšujícím se napětím ztrátový činitel. Ztráty jsou vysoké ale poměrně stabilní.
3. Suchá, kvalitní izolace – při nízkém přiloženém napětí nedochází k podstatným změnám. Při vzniku částečných výbojů dochází k nárůstu ztrátového činitele. K poklesu a nárůstu dochází vlivem změnou zapalovacího a zhášecího napětí v místě defektu při nasazení tzv. ionizace.



Kapacita vinutí se pro hodnocení stavu stroje moc nevyužívá. Může však indikovat poškození izolace v případě její změny. Kvalita kapacity vinutí se tak sleduje jako jeden ze znaků kvality izolantu, která by se za provozu měla měnit co nejméně. [1]

$$tg\delta = \frac{tg\delta_1 \cdot C_1 + tg\delta_2 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad [\text{Hz}] \quad (1.6)$$

$$C = \frac{C_1 + C_2}{2} \quad [\mu\text{F}] \quad (1.7)$$

Kde  $C_1, tg\delta_1$  hodnoty změřené při jedné polaritě zdroje.

$C_2, tg\delta_2$  hodnoty změřené při opačné polaritě zdroje.

#### 1.1.4 Měření izolačního oleje kondenzátorových průchodek

Kondenzátorové průchodky mají velký vliv na celkové spolehlivosti transformátorů. Porucha průchodek je poměrně častým jevem z celkového počtu poruch na transformátorech. Měření stavu izolačního oleje nám může pomoci odhalit provozní zestárnutí průchodky a změnu vlhkosti. Normálně jsou průchodky hermetizovány, ale pro účely měření musíme přistoupit k demontáži. Průchodka se otevře a odebere se vzorek kapaliny a následně pak doplní novým olejem o objemu, který byl odebrán. Doporučuje se také vyměnit těsnění. Při každém měření hrozí riziko, že se nepodaří opětovně dokonale utěsnit průchodku.

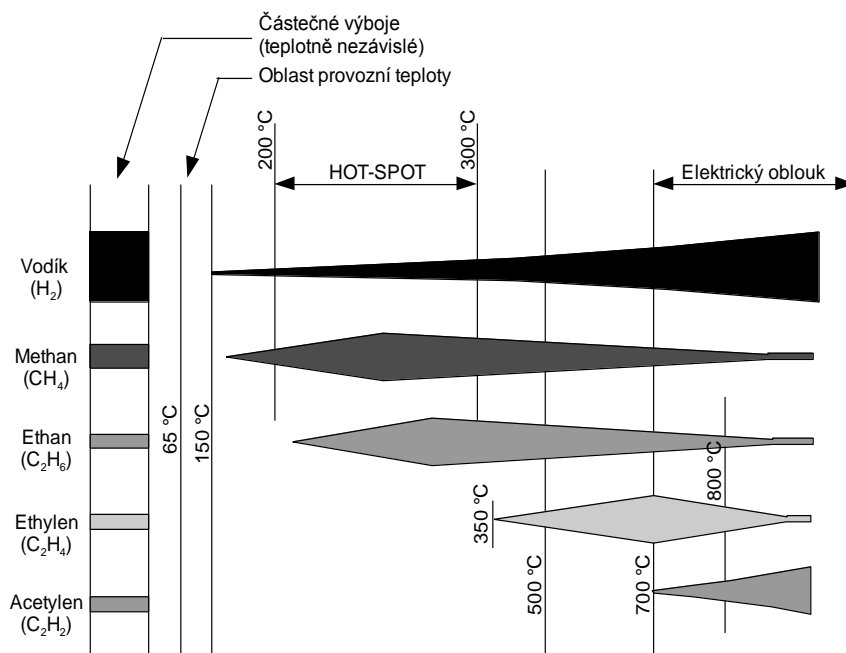
Odebírání vzorku provází pravidla, která se musí dodržet, aby se mohl vzorek použít. Jedním z nich je, že vzorek se musí odebrat za suchého počasí. Pokus to není možné, musíme před odběrem prostor dokonale vyčistit, vysušit a chránit před deštěm. Úkon by měl být proveden za co nejkratší dobu.

Rozbor odebraného oleje se provádí analýzou plynů rozpuštěných v oleji. Vzorek se dá použít dále i na zjištění obsahu vlhkosti, ale získat přesné výsledky není vůbec lehké. Vlhkost v papírové složce u průchodek bude vždy větší než v oleji. Navíc výsledky ovlivňují teploty průchodky, kdy se obsah vlhkosti jak v papíře, tak v oleji mění. Proto by se měl vzorek odebírat až za 48 hodin po té, co se teplota průchodky vyrovná s teplotou okolí. [4]

#### 1.1.5 Obsah plynů v oleji

Plyny v oleji mají negativní vliv na izolační vlastnosti oleje. Vznikají rozkladem oleje a pevné izolace příčinou tepelných a elektrických poruch. Minerální oleje používané jako izolant u výkonových transformátorů, je tvořen směsí uhlovodíkových molekul. Spojené dohromady molekulárními vazbami C-C a C-H.

Plyny v oleji nejčastěji vznikají za působení částečných výbojů. Při nichž se může na krátkou dobu dosáhnout až teploty několika tisíc stupňů Celsia. Olej elektrický oblouk rychle ochladí, ale při tom dochází ke vzniku plynů. Jestliže dojde k tepelné nebo elektrické poruše, může dojít k přetržení mezi vazbami C-C a C-H. Tím vznikají nestabilní fragmenty, které se nejčastěji rekombinují do molekul plynů, jako je ethylen, acetylen, methan a jiné. Plyny se poté rozpouštějí v oleji. Na tom jaký vznikne plyn, má vliv teplota. [1]



Obr. 1.3 Znárodnění plynů uvolňovaných při rozkladu oleje, převzato [1]

Plyny v oleji nemusí vznikat pouze tepelným působením při poruše. Můžou pocházet z působení koroze na nenatřených površích nebo ze špatných ochranných nátěrů. Uhlovodíky, které nejčastěji vznikají při poruše, se objevují i za normálního provozu následkem oxidačního stárnutí oleje v nádobě. Proto při vyhodnocení výsledků musíme přihlížet k celému předchozímu životu stroje.

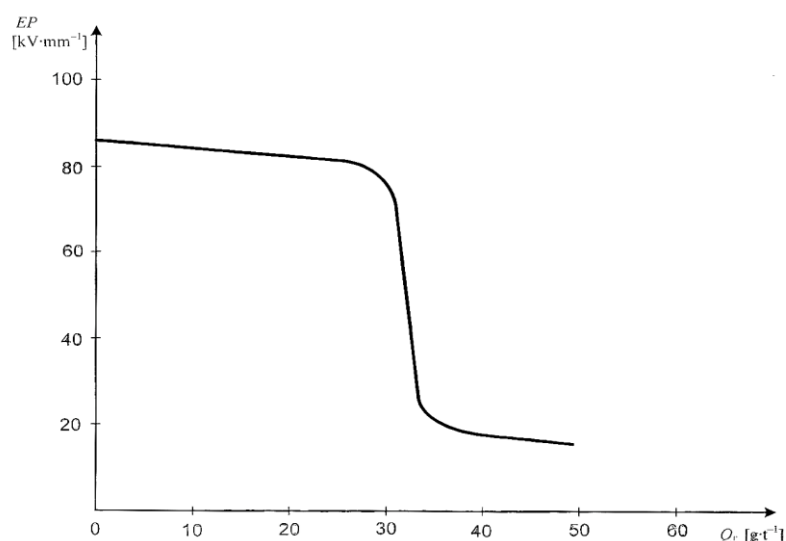
### 1.1.6 Vlhkost v oleji

Vlhkost je spolu s plyny další faktor, který velice degraduje vlastnosti minerálních olejů. Vlhkost snižuje povrchový odpor oleje a to má za následek vyšší riziko průrazu. Dále se zvyšuje působením vlhkosti vznik kyselin, které napadají kovové části a mohou způsobit korozi. Vše toto může vést ke zkrácení životnosti a spolehlivosti stroje.

Voda se do oleje dostává převážně ze vzduchu nebo vzniká jako produkt oxidačního stárnutí. V oleji se může voda vyskytovat v několika různých formách:

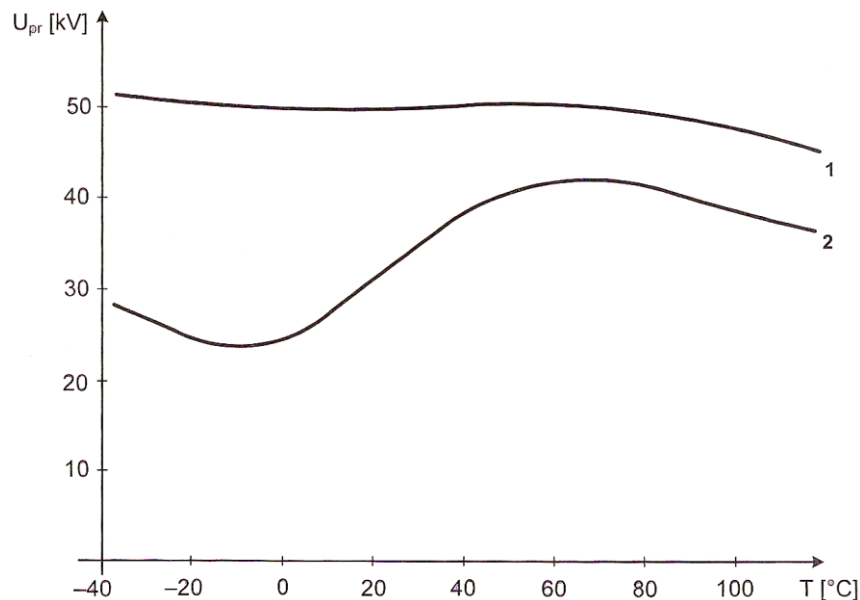
- **Volná voda** – se vyskytuje převážně na transformátorové nádoby. Do oleje se dostává vlivem jeho hydrofobních vlastností. Volná voda přímo neovlivňuje vlastnosti oleje, ale také není žádoucí. Vlivem teploty se může část vody rozpustit nebo emulgovat do oleje. Množství volné vody, které se v oleji může vyskytovat, závisí na jeho typu.
- **Rozpuštěná voda** - je možná díky vlastnosti oleje absorbovat vodu. Tento typ vody je velice nežádoucí a špatně se odstraňuje. Pro odstranění se musí olej rozstříkovat do vakua za snížených teplot.
- **Emulgovaná voda** – je v podstatě emulze, kterou tvoří voda a olej. Rozlišujeme dva typy. Hydrofilní emulze vznikne, když jsou v oleji látky, které se rozpustí ve vodě a oleji ne. Naopak u hydrofobní je to obráceně. Částice se rozpouštějí v oleji a ne ve vodě. Emulgovaná voda se dá těžko odstranit a zhoršuje dielektrické vlastnosti oleje. Zhoršuje se elektrická pevnost.
- **Reakční voda** – vzniká na nejteplejších místech transformátoru. Jedná se o chemickou reakci, kdy se vodo rozpouští při styku s chladnějšími oblastmi oleje.

V oleji se dokáže rozpustit jen určité množství vody. Nadbytečná voda se vyskytuje jako emulgovaná. Dokud je v oleji pouze voda rozpuštěná elektrická pevnost se sníží jen nepatrně. V případě nasycení oleje dojde k prudkému snížení elektrické pevnosti. Děje se tak při překročení obsahu vody  $Q_v > 30 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ . [1]



Obr. 1.4 Závislost elektrické pevnosti na obsahu vody v oleji, převzato z [1]

Dalším faktorem, který má vliv na to kolik vody se může v oleji rozpustit je, teplota. Teplota ovlivňuje, zda absorbuje vodu olej nebo celulózová izolace. Ze zvyšující se teplotou se v oleji může rozpustit více vody. Elektrická pevnost tím stoupá do doby, než se začnou vlivem vysoké teploty tvořit plynné bublinky a pevnost opět klesá.

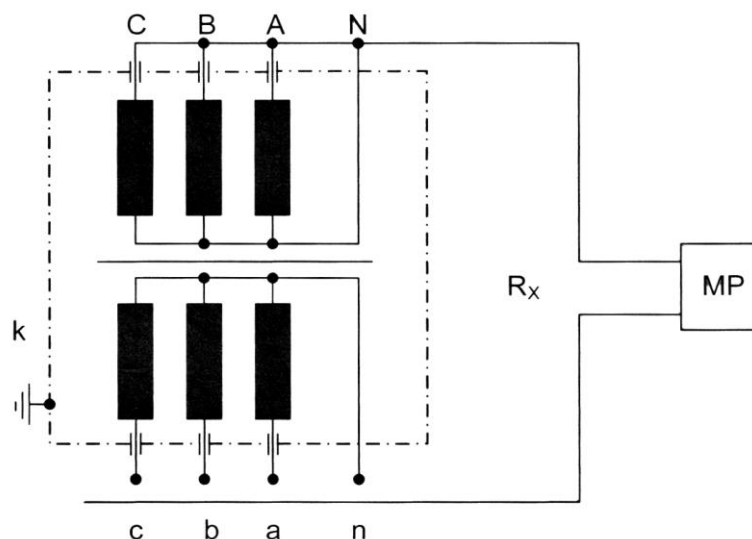


Obr. 1.5 Závislost průrazného napětí na teplotě, převzato z [1]

### 1.1.7 Měření poměru kapacit $C_2/C_{50}$

Měření poměru kapacit  $C_2/C_{50}$  je další metoda k zjišťování míry navlhnutí izolačního systému transformátorů plněné oleji. Kapacity se měří při různých frekvencích. Jak je z jejich názvu jasné jedna při 2 Hz ( $C_2$ ) a druhá při 50 Hz ( $C_{50}$ ). Při měření se vychází z toho, že kapacita suché izolace se s frekvencí mění velmi málo. Když je ale izolace navlhlá rozdíl mezi frekvencí 2 Hz a 50 Hz je značný. U vlhké izolace z rostoucí frekvencí kapacita klesá, proto se nejprve měří kapacita  $C_{50}$ . Změna kapacity vinutí se určí podle rozdílu  $C_2-C_{50}$ . Poměre  $C_2/C_{50}$  se počítá podle následujícího vztahu:

$$\frac{C_2}{C_{50}} = \frac{C_2 - C_{50}}{C_{50}} + 1 \quad [-] \quad (1.8)$$



- MP - měřicí přístroj  
 k - kostra stroje  
 A, B, C - vývody strany vyššího napětí  
 a, b, c - vývody strany nižšího napětí  
 N, n - nulovací svorky

Obr. 1.8 Schéma zapojení při měření kapacity transformátoru, převzato z [1]

Naměřené hodnoty se porovnávají s mezními hodnoty, které jsou povolené pro izolační systém stroje. V případě, že se hodnoty přibližují k vyšším hodnotám, doporučuje se provést na transformátoru jiné metody měření. Vyšší hodnoty signalizují navlhnutou izolaci. [1]

Tab. 1.2 Mezní hodnoty  $C_2/C_{50}$ , data z [1]

Teplota vinutí [°C]	10	20	30	40	50
Poměr $C_2/C_{50}$ [-]	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5

## 2 Částečné výboje a jejich účinky

Podle definice ČSN je částečný výboj elektrický výboj, který jen částečně přemostuje izolaci mezi vodiči. Takto vzniklý částečný výboj vyvolává přechodně v transformátoru změnu napětí vůči zemi na každé z vnější přístupné svorce. [11]

Obvyklá doba působení částečného výboje je mnohem kratší než 1 $\mu$ s. Dlouhodobé působení částečných výbojů má za následek postupnou degradaci izolačního systému a následnou destrukci izolace. Navíc impulzy vyvolané částečným výboji mohou rušit signály elektrických strojů a řízení (např. rádiové signály).

Částečným výbojům se bohužel nedá v současnosti vyhnout. Budeme se s nimi vždy setkávat při provozování vysokonapěťových strojů, přístrojů a elektrického vedení. Malému vzniku nehomogenit v dielektriku se nedá zabránit ve výrobě a už vůbec ne při provozu. Částečný výboj se může vyskytnout v izolačním systému na mnoha místech. Vzniká v izolaci vodičů, mezi izolací a vodičem, mezi kovovou konstrukcí stroje a izolací nebo i na povrchu izolace. Nevyhneme se jim ani na rozhraní dvou dielektrik kde mohou vzniknout (např. olej-vzduch, olej-papír) nebo v místech s nedostatečně uzemněnými částmi atd. Částečné výboje mohou vzniknout z důsledku nedodržení technologických postupů, špatně navrženého izolačního systému, nebo nedržení předpokládaných provozních podmínek. Sledováním částečných výbojů můžeme odhalit vznikající vady, předejít havárii či predikovat životnost stroje.

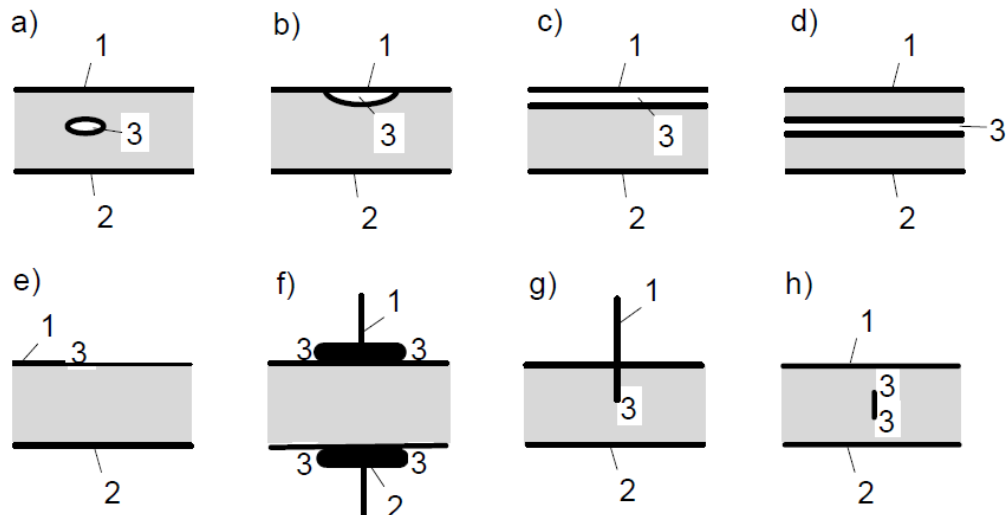
### 2.1 Rozdělení částečných výbojů

Nejčastěji se částečné výboje rozdělují podle místa výskytu.

- **Vnitřní (interní) částečné výboje** - Jedná se o částečné výboje v plynech, které jsou obklopené kapalným nebo pevným dielektrikem. Výboje vznikají v poruchách homogenního prostředí uvnitř izolace např. plynné dutinky v pevném dielektriku.
- **Vnější (externí) částečné výboje** – Jsou to částečné výboje, které vznikají v plynech v okolí elektrod malých poloměrů nebo zakřivení. Vyskytují se také na místech silné nehomogenity elektrického pole např. okolí ostrých hran nebo výstupky na povrchu elektrody. Projevují se jako doutnavé nebo korónové výboje.

- **Povrchové částečné výboje** – Vznikají v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného dielektrika. Může se jednat např. o klouzavé či drážkové výboje na výstupu vinutí z drážky točivých strojů, průchodkách atd. Výboje se vyskytují na povrchu izolace.

Typické elektrodové uspořádání, na kterých lze modelovat vnitřní a povrchové částečné výboje, jsou na obr. 2.1. Kde 1,2 značí elektrody a 3 místo výskytu výboje.



Obr 2.1 Možnosti vzniku částečných výbojů, převzato z [10]

## 2.2 Působení částečných výbojů na materiál

Rozvinutá výbojová činnost dlouhodobě namáhaných izolací způsobuje selhávání izolačních systémů. Je to způsobeno především výbojovou činností v nehomogenitách dielektrika. V konečném důsledku dochází k nevratným změnám a zhoršení elektrických vlastností daného materiálu.

Výbojová činnost nepůsobí na všechny skupiny izolačních materiálů stejně. Anorganické skupiny materiálů, např. porcelán, sklo, slída jsou vůči působení částečných výbojů dosti odolné i v dlouhodobém časovém horizontu. Oproti tomu organické materiály jsou velmi citlivé na degradační účinky částečných výbojů i v krátkodobých časových intervalech. Jedná se o materiály např. PET, PE, PTFE a kompozitní materiály obsahující epoxidová nebo silikonová pojiva. Hlavní pozornost by proto měla být zaměřena zejména na izolanty na organické bázi.[10]

### 2.2.1 Chemické účinky

Chemické účinky se projevují při déle trvajícím elektrickém namáhání. Zprvu se chemické reakce odehrávají ve vlhkosti nebo v dutinkách, které obsahují vzduch a vytváří se ozón. Postupně se výbojovou činností vytvářejí plynné, kapalné a pevné vedlejší produkty. Tyto produkty dále pomalu difundují do okolního pevného dielektrika a vytvářejí vodivější oblasti.

### 2.2.2 Elektrické účinky

Vyvine-li se v dutince elektrický oblouk, potom jeho následkem pravděpodobně dojde k vytvoření nové vodivé cesty. Při dosažení vysokých hodnot elektrického pole může nakonec dojít v místě koncentrace elektrického pole k čistě elektrickému průrazu a vodivá dráha se bude moci šířit dielektrikem. Ničivý účinek mají na vině ionty a elektrony které bombardují a narážejí do stěny dutinky.

### 2.2.3 Erozivní účinky

K erozivním účinkům dochází vlivem částečných výbojů v dielektriku. Zejména následkem iontů, které dopadají na stěny dutinky. To způsobuje její rozšiřování a při dostatečně dlouhém čase, může dojít až k proražení dielektrika.

### 2.2.4 Tepelné účinky

Teplo které vzniká při účinku částečných výbojů, může způsobit celkovou tepelnou nestabilitu dielektrika a zapříčinit tepelný průraz. Nicméně tento důsledek o vlivu tepoty na stárnutí dielektrika prozatím nebyl pořádně prokázán. Teplota nemá na každý typ dielektrika stejný efekt. Je však prokázáno, pokud se objeví v dielektriku elektrický stromeček, zvýšená teplota rapidně urychluje růst stromečku a tím zmenšuje dobu do průrazu.



### 3 Akustická detekce částečných výbojů

Tato metoda je jednou z mnoho možností jak detekovat výbojovou činnost. Zaměřuje se na sledování akustických projevů, které provázejí vznik částečného výboje. K měření akustických signálů se využívají piezoelektrické snímače, které jsou umístěny přímo v nádobě transformátoru. Počet snímačů se pohybuje od 3 do 12 podle složitosti nádoby a požadavku na přesnost lokalizace.

Výhoda tohoto typu sledování spočívá v možnosti vyhodnocení aktivity výbojové činnosti při provozu transformátoru. Metoda se používá k detekci a lokalizaci vzniku tlakových vln způsobené elektrickým výbojem. Při výboji se generuje elektromagnetický impulz, jehož energie se transformuje na mechanickou energii v podobě tlakové vlny. Tyto vlny se postupně šíří olejem pryč od místa zdroje, dokud nenarazí na pevnou konstrukční část nebo stěnu nádoby. Po nárazu čela vlny se tlaková vlna deformuje a přeměňuje a jiné typy vln s odlišnými rychlostmi šíření.

Zvukové vlny se zachycují pomocí v hodných akustických detektorů. Měření se provádí často v průmyslových oblastech z mnohými zdroji hluku. Z důvodu velkého rušení v pásmu slyšitelného spektra se detekují zejména ultrazvukové vlny. Vyznačují se větší směrovostí a lze s nimi snadněji lokalizovat polohu zdroje rušení. [3], [5]

#### 3.1 Měření ultrazvukem

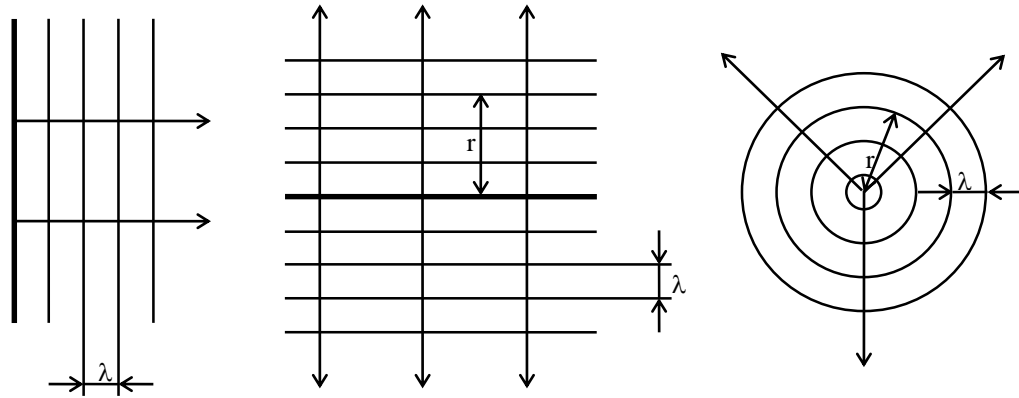
Ultrazvuk je stejně jako hluk a zvuk charakterizován mechanickými kmity částic prostředí, které kmitají kolem rovnovážné klidové polohy, ale s frekvencemi vyššími než 20 kHz. Pro ultrazvukovou defektoskopii se běžně používají frekvence od 100 kHz do 50 MHz. Ve speciálních případech můžeme dosahovat frekvence až 200 MHz. Podle účinku se dá ultrazvuk rozdělit na dva typy: aktivní a pasivní.

**Aktivní ultrazvuk** vytváří vlny, které se projevují v prostředí svými chemickými a fyzikálními účinky. Této vlastnosti se využívá v mnoha oblastech, jako je tomu při ultrazvukovém čištění, vrtání, svařování, působení na malé organismy, buňky apod.

**Pasivní ultrazvuk** má na rozdíl od aktivního velice malý až skoro zanedbatelný výkon. Využívá se k hledání vnitřních vad materiálu, diagnostiku v lékařství a pro ultrazvukové měřicí přístroje.

### 3.2 Způsoby šíření ultrazvukových vln

Ultrazvuková vlna se v neohraničeném prostředí šíří od svého zdroje prostorově pryč. Sousedící částice kmitající na stejné fázi tvoří vlnoplochu. Podle tvaru vlnoplochy poté rozeznáváme tři základní tvary vln. Jedná se o rovinnou, vlnovou a kulovou vlnu. [3]



Obr 3.1 Tvary vlnoploch, převzato z [3]

a) rovinná vlna

$$a = A \sin \omega \left( t - \frac{x}{c} \right)$$

b) válcová vlna

$$a = \frac{A}{\sqrt{r}} \sin \omega \left( t - \frac{r}{c} \right)$$

c) kulová vlna

$$a = \frac{A}{r} \sin \omega \left( t - \frac{r}{c} \right) \quad (3.1)$$

Kde	A	je amplituda výchylky v [m]
	$\omega$	kruhová frekvence [rad s <sup>-1</sup> ]
	c	rychlost šíření vlny [m s <sup>-1</sup> ]
	x	souřadnice polohy (dráhy) [m]
	r	poloměr vlnoplochy [m]
	a	rovinná vlna

Rovinná vlnoplocha tvoří rovinu vlnoplochy kolmou na rovinu šíření. Počátek vlny je v  $x = 0$ . Jiný tvar tvoří válcová vlna. Její vlnoplochy tvoří vzájemně sousedící válce. Zdroj vln je v tomto případě přímka nebo válec. Pro zdroje malých rozměrů (bodových) je charakteristická kulová vlna. Vlnoplocha má tvar soustředných kulových ploch se středem v bodovém zdroji. Intenzita vlny klesá úměrně s její vzdáleností. Při značně velkém poloměru přechází kulová vlna na rovinnou. [3]

### 3.3 Akustický tlak

Jedná se o jednu ze základních veličin v ultrazvukové defektoskopii. Průchodem ultrazvukové vlny prostředím vzniká akustický tlak  $p$ , který je definován vztahem

$$p = z * v \quad (3.2)$$

Kde	$p$	akustický tlak [Pa]
	$v$	akustická rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
	$z$	měrná akustická impedance

Výše uvedený vztah (3.1) je jakousi akustickou obdobou známého Ohmova zákona v elektrotechnice. Tlak  $p$  odpovídá elektrickému napětí, akustická rychlost  $v$  proudu a akustická impedance  $z$  po úpravě odpovídá odporu. Značný význam má akustická impedance, která je obecně komplexní, ale v případě kulové nebo postupné rovinné vlny, je reálná a nazýváme ji akustickým vlnovým odporem, definovaný výrazem  $z_c$ . Vlnový odpor definuje prostředí a má velký vliv na odraz a přestup ultrazvukových vln na rozhraní dvou prostředí. Akustické vlnové odpory některých prostředí jsou uvedeny v tab. 3.1

Tab. 3.1 Konstanty některých tuhých prostředí při teplotě 20 °C, data z [3]

Prostředí	Hustota $\rho \cdot 10^{-3}$ [ $\text{kg m}^{-3}$ ]	Poissonovo číslo $\mu$	Rychlost šíření ultrazvukových vln $c$ [ $\text{m s}^{-1}$ ]		Akustický vlnový odpor $z_c \cdot 10^{-6}$ [ $\text{Pa s m}^{-1}$ ]
			podélných $c_L$	příčných $c_T$	
<i>kovy</i>					
hliník	2,7	0,34	6320	3080	17
litina	7,2	-	3500 až 5600	2200 až 3200	25 až 40
měď	8,9	0,35	4700	2260	42
mosaz	8,1	0,35	3830	2123	31
ocel	7,8	0,28	5900 až 6000	3250	46,3
stříbro	10,5	0,38	3600	1560	38
olovo	11,4	0,44	2160	700	24,6
<i>Nekovy</i>					
plexisklo	1,18	0,35	2670	1121	3,2
porcelán	2,4	-	5300 až 5500	-	13
sklo křemenné	2,6	0,17	5570	3515	14,5
teflon	2,2	-	1350	-	3
<i>horniny</i>					
čedič	2,72	0,3	5930	3140	16,2
slída	2,81	0,458	7760	2160	21,8
břidlice	2,74	0,277	6500	3610	17,8

Akustická rychlost  $v$  reprezentuje rychlost kmitání částic kolem rovnovážné polohy. Získáme jí derivací okamžité výchylky  $a$ .

$$v = \frac{da}{dt} = \omega A \cos(\omega t - \varphi) \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (3.3)$$

Kde  $\omega(x/c) = \varphi$  fázový úhel [rad]

Projde-li ultrazvuková vlna prostředím s vlnovým odporem  $\rho c$  s akustickou rychlostí, vznikne v něm akustický tlak

$$p = \omega A \rho c \cos \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) \quad [\text{Pa}] \quad (3.4)$$

Kde  $\omega A \rho c = P$  amplituda akustického tlaku [Pa]

$\omega A = V$  amplituda akustické rychlosti [ $\text{m s}^{-1}$ ]

Dále si zavedeme efektivní veličiny.

$$p_{ef} = \frac{P}{\sqrt{2}}, \quad v_{ef} = \frac{V}{\sqrt{2}} \quad (3.5)$$

Použitím výše uvedených fiktivních veličin můžeme definovat intenzitu ultrazvukové kulové nebo rovinné vlny vztahem

$$I = p_{ef} v_{ef} = \frac{1}{2} P V = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho c} \quad [\text{W m}^{-2}]. \quad (3.6)$$

Ze vztahu vyplývá, že intenzita je výkon procházející jednotkou plochy  $S$  a je úměrná čtverci akustického tlaku. Výkon ultrazvukové vlny můžeme tedy definovat pomocí vztahu

$$N = P_{ef} v_{ef} S \quad [\text{W}] \quad (3.7)$$

### 3.4 Druhy ultrazvukových vln

Ultrazvukové vlny šířící se postupně prostředím, se dělí na několik druhů. Vlny se od sebe liší způsobem pohybu částic prostředí vzhledem ke směru postupu vlny. [3], [4]

- **Podélné vlny**

Jedná se o nejběžnější a nejznámější druh ultrazvukové vlny. Částice prostředí kmitají přímočaře ve směru pohybu vlny. Při tomto pohybu dochází ke střídavému zhušťování a zředování částic prostředí, což vede ke střídavé změně objemu. Tyto vlny se pokládají za nejdůležitější, jelikož se mnou šířit v pevném, kapalném i plynném prostředí. Podmínkou je, že rozměry prostředí budou dostatečně velké vzhledem k délce vlny  $\lambda$ .

- **Příčné vlny**

Charakteristickým znakem těchto vln je kmitání částic kolmo na směr šíření vlny. Vlny se mohou pohybovat v prostředí z rozměry mnohem většími, než je délka vlny, která odolává namáhání ve smyku. Tyto vlny se nemohou vyskytovat v plynech a kapalinách, protože tato skupenství neprojevují žádný odpor smykového namáhání. Při šíření příčných vln nedochází ke změně objemu, jak to můžeme vidět u podélné vlny. Příčná vlna má za stejné frekvence kratší délku než podélná, jelikož rychlost šíření příčných vln bude vždy menší než podélných.

- **Povrchové (Rayleighovy) vlny**

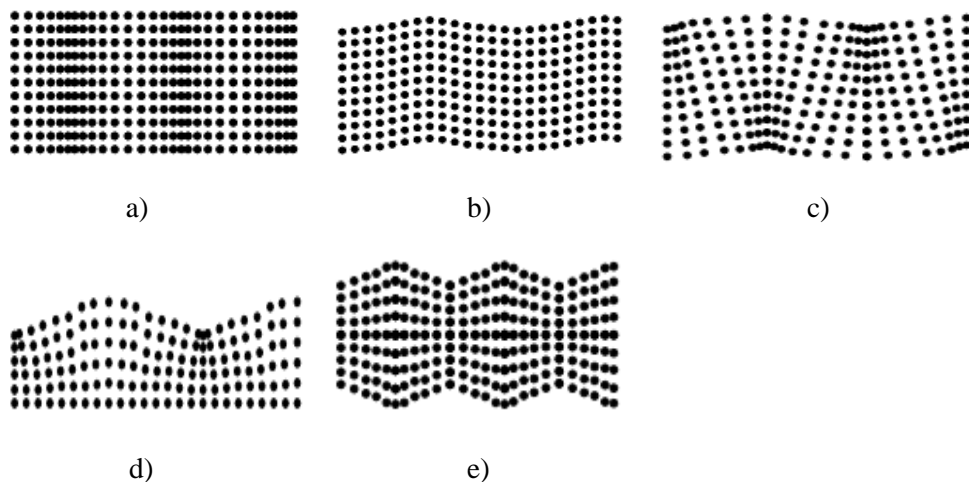
Mohou vznikat na povrchu tuhého prostředí a šířit se povrchově až do hloubky rovnající se délce vlny. Jedná se o zvláštní případ příčných vln. Kmitání částic kolem rovnovážné polohy se skládá ze dvou vektorů, kde vektor kolmý na směr šíření je mnohem větší než vektor s tímto směrem rovnoběžný. Výsledný pohyb částic se podobá protáhlé elipse

- **Loveovy vlny**

Částice kmitají jen příčným pohybem v rovině rovnoběžné s povrchem. Kmitají tedy kolmo k povrchu. Jedná se o příbuzný druh povrchových vln. Vyskytují se ve velmi tenkých vrstvách tuhého prostředí spojeného s jiným tuhým prostředím.

- **Deskové (Lambovy) vlny**

Vyskytují se v prostředí desek nebo drátů, kdy se se rozměry přibližují vlnové délce. Dělí se na dva druhy, a to na vlny symetrické (dilatační) a asymetrické (ohybové). U obou probíhá pohyb částic na povrchu po elipse, dále však u ohybové vlny částice ještě kmitají kolmo k povrchu a dilatační vlny kmitají podélně.



Obr. 3.2 Kmitání částic prostředí při šíření vlny, převzato [3]

a) Podélné, b) příčné, c) deskové (ohybové), d) povrchové, e) deskové (dilatační)

### 3.5 Rychlost šíření

Rychlost šíření ultrazvukové vlny závisí především na prostředí. Nejvyšší rychlosti se vyskytují u tuhých látek, menší u kapalin a nejmenší rychlosti můžeme vysledovat v plynech.

#### 3.5.1 Tuhé látky

Vysokých rychlostí šíření se dosahuje v tuhých látkách tím, že se liší od kapalin a plynů mnohem vyššími meziatomárními silami. Důsledkem toho snázejí i smykové namáhání. Jako jediné, mohou tyto látky přenášet všechny druhy ultrazvukových vln. Některé tuhé látky mohou být anizotropické a jiné izotropické nebo polykrystalické. U anizotropických látek závisí rychlost šíření na orientaci. Zbylé uvedené typy mají strukturu tvořenou náhodně a jako u kapalin se rychlost šíření nemění se směrem.

Rychlost šíření podélných vln  $c_L$  je v tuhých látkách především závislá na poměrech vlnové délky  $\lambda$  a rozměrů prostředí a je dána vztahy [3]:

a) V neohraničeném prostředí

$$c_L = \sqrt{\left(\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}\right)} \text{ [m s}^{-1}\text{]} \quad (3.8)$$

Kde  $E$  je dynamický modul pružnosti v tahu [Pa]

$\mu$  Poissonovo číslo

$\rho$  hustota [ $\text{Kg m}^{-3}$ ]

b) V prostředí, kde jeden nebo dva rozměry jsou kolmé na směr šíření. V prvním případě je omezen jeden rozměr v druhém dva rozměry. Dostaneme pro ně rovnice:

$$c_L = \sqrt{\left(\frac{E}{\rho} \frac{1}{1-\mu^2}\right)} \quad c_L = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho}\right)} \quad (3.9)$$

Rychlost šíření příčných vln v tuhých látkách udává vztah:

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\left(\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}\right)} \text{ [m s}^{-1}\text{]} \quad (3.10)$$

Kde  $G$  je modul pružnosti ve smyku [Pa]

Poměr mezi rychlostí šíření podélné a příčné vlny je dán pouze Poissonovým číslem  $\mu$ .

$$\frac{c_T}{c_L} = \sqrt{\left(\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}\right)} \quad (3.11)$$

### 3.5.2 Kapaliny

Rychlost šíření v kapalinách závisí na tlaku, hustotě prostředí a teplotě. Kapaliny nekladou odpor smykovému namáhání, až na výjimky, kdy se jedná o kapaliny s extrémně velkou viskozitou. Díky tomu se v kapalinách šíří pouze podélné vlny. V roztocích nebo směsích závisí rychlost šíření kromě více uvedeného, ještě na koncentraci jednotlivých složek. Zhušťování a zředování kmitajících částic, které doprovází šíření vlny, probíhá adiabaticky. Rychlost šíření je proto definována výrazem [3]:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\beta_{ad}\rho}} = \sqrt{\frac{x}{\beta_{iz}\rho}} \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (3.12)$$

Kde	$K = -(\partial P / \partial V_o) V_o$	je adiabatický modul objemové pružnosti [Pa]
	P	tlak [Pa]
	$V_o$	objem [m <sup>3</sup> ]
	$\beta_{iz}$	Izotermická stlačitelnost [Pa <sup>-1</sup> ]
	$\beta_{ad}$	adiabatická stlačitelnost [Pa <sup>-1</sup> ]
	$x = \beta_{iz} / \beta_{ad} = c_p / c_v$	poměr měrného tepla při konstantním tlaku p a objemu V, Poissonova konstanta

Tab. 3.2 Konstanty některých kapalin při teplotě 20 °C, data z [3]

Kapaliny	Hustota $\rho \cdot 10^{-3}$ [kg m <sup>-3</sup> ]	Rychlost šíření c [m s <sup>-1</sup> ]	Teplotní součinitel $b = \Delta c / \Delta \Theta$ [m s <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Akustický vlnový odpor $\rho c \cdot 10^{-4}$ [Pa s m <sup>-1</sup> ]
aceton	0,792	1192	-5,5	94
glycerin	1,261	1923	-1,8	242
benzín	-	1162	-4,14	-
metylalkohol	0,792	1128	-3,3	89
olej olivový	0,905	1405	-	127
olej parafinový	0,835	1444	-	121
olej lněný	0,922	1923	-	165
toluen	0,866	1328	-	65
voda	0,997	1483	2,5	148

### 3.6 Piezoelektrické měniče

Piezoelektrické měniče jsou nejužívanějším typem absolutních senzorů vibrací. Podstatou piezoelektrických senzorů je přímí piezoelektrický jev. Měníče se používají pro ultrazvukovou měřicí techniku a jsou vyrobeny z piezokeramiky a piezoelektrických polymerů a anizotropními vlastnostmi. Pro měření v teplotách nad 500 °C je nejlepší použít keramiku LiNbO<sub>3</sub> tzv. lithium niobát. Měníč vytváří podélnou nebo příčnou vlnu, podle směru orientace elektrického pole a polarizace piezoelektrického materiálu [4]

#### 3.6.1 Přímí piezoelektrický jev

Přímí piezoelektrický jev je dán piezoelektrickým deformačním součinitelem  $h_{ik}$ , který je definován napětím na prázdno  $U$  na elektrodách destičkového měniče  $\Delta l$ . Jelikož je při dopadu vlny deformace destičky způsobena tlakem, zavádí se piezoelektrický tlakový součinitel  $g_{ik}$ , který je dán napětím naprázdno  $U$  při jednotkovém rozměru plochy měniče namáhaného tlakem. [2]

#### 3.6.2 Nepřímí piezoelektrický jev

Nepřímí piezoelektrický jev je dán piezoelektrickým součinitelem  $d_{ik}$ , který je definován deformací  $\Delta l$  piezoelektrické destičky při napětí  $U$  na elektrodách.

#### 3.6.3 Elektromechanický faktor

Elektromechanický faktor  $k$  nám pak udává účinnost přeměny mechanické energie  $w_{mech}$  na elektrickou  $w_{el}$ , který platí pro oba výše uvedené piezoelektrické jevy a je dán vztahem:

$$k_{ik}^2 = d_{ik} \cdot h_{ik} \quad (3.13)$$

kde	$k$	elektromechanický faktor,
	$h_{ik}$	piezoelektrický deformační součinitel,
	$g_{ik}$	piezoelektrický tlakový součinitel.



### 3.6.4 Přímá sonda

Přímá sonda je sonda s jedním měničem pro vysílání nebo přijímání akustických vln s osou kolmou k povrchu objektu. Při využívání přímé sondy jak pro funkci jako vysílač, tak i pro funkci jako přijímač je generátor impulzů přes oddělovací diody přímo spojen se vstupem zesilovače. Následkem tohoto dokmitávající impulz prodlouží počáteční echo a způsobí tzv. mrtvou zónu sondy, ve které nelze rozpoznat vadové echo.

### 3.6.5 Přímá sonda s předsádkou

Před měnič se umísťuje tuhá nebo kapalná předsádka, která vytváří akustickou zpoždovací dráhu, která je stanovena tak, aby koncové echo z testovaného tělesa dosáhlo měniče později než druhé echo od styčného povrchu předsádky s povrchem. U této přímé sondy s předsádkou se neuplatňuje mrtvé pásmo. [2]

### 3.6.6 Úhlová sonda

Úhlová sonda vysílá ultrazvukový svazek do materiálu pod úhlem. Lomový klín je z materiálu (obvykle ze speciálního plexiskla), v němž je rychlost šíření podélných vln nižší, než je rychlost v měřeném objektu. Vzhledem k tomu, že dopadem podélné vlny na rozhraní dochází k transformaci vlny na příčnou vlnu, je nutné zamezit šíření obou vln současně, jelikož se tyto vlny šíří různou rychlostí, při lokalizaci vady mohlo by docházet k chybám. Pokud je nutné, aby se prostředím tělesa šířila pouze příčná vlna, musí se zajistit, aby úhel dopadu (lomu sondy) byl mezi prvním a druhým kritickým úhlem.

### 3.6.7 Dvojitá sonda

Dvojitá sonda má v jednom pouzdře dva akusticky izolované měniče. Jeden měnič je používán jako vysílač, druhý jako přijímač ultrazvukových vln. Tvar měniče je půlkruhový nebo obdélníkový. Měníče jsou upevněny s určitým sklonem na plastové předsádky, které zpožďují průchod vlny mezi měniči a povrchem zkoušeného materiálu. Maximální citlivost sondy je závislá na sklonu měniče a nachází se v průsečíku os akustických svazků obou měničů. Mrtvé pásmo se u dvojitých sond neuplatňuje [2]

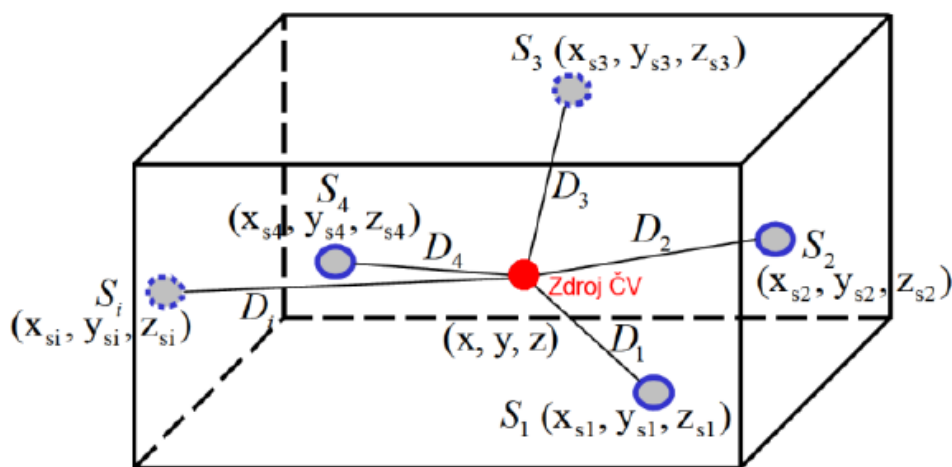
### 3.6.8 Speciální typy sond

Kromě výše uvedených typů sond se vyrábějí vodotěsné imerzní sondy s akustickou impedancí přizpůsobenou vodě, sondy přizpůsobené tvaru povrchu měřeného objektu, sondy s proměnným úhlem, odvalovací sondy, skupinové sondy atd.

## 4 Lokalizace částečných výbojů pomocí ultrazvukových projevů

### 4.1 Princip metody

Pro jednoduchost můžeme uvažovat, že se ultrazvuk šíří přímočaře, konstantní rychlostí. Zanedbáme všechny překážky. Ultrazvukové signály jsou indikovány pomocí senzorů, které jsou umístěny na stěnách zkoumaného objektu. Minimální množství pro 3D lokalizaci jsou 4 sondy. V našem případě je zkoumaný objekt transformátor. Představíme si ho jako kvádr, kde každá stěna je rovnoběžná s rovinou tvořenou z některé osy souřadného systému.

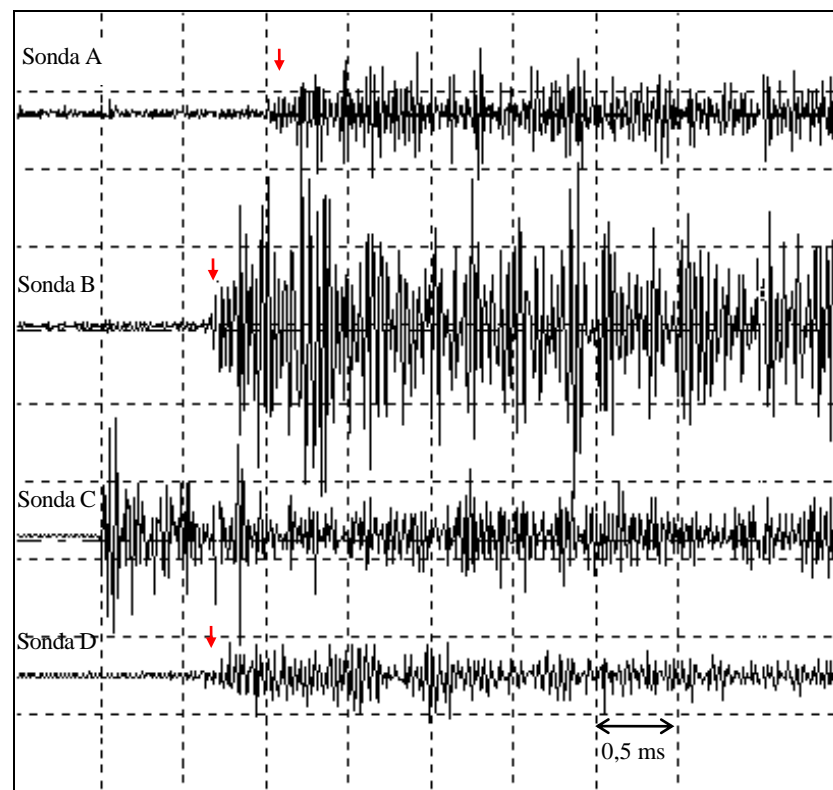


Obr. 4.1 Zjednodušený zkoumaný objekt, převzato z [6]

Na stěnách transformátoru jsou rozmístěné čtyři ultrazvukové snímače o souřadnicích:

$$\begin{array}{ll} S_1[X_{S1}, Y_{S1}, Z_{S1}] & S_2[X_{S2}, Y_{S2}, Z_{S2}] \\ S_3[X_{S3}, Y_{S3}, Z_{S3}] & S_4[X_{S4}, Y_{S4}, Z_{S4}] \end{array}$$

Tyto sondy přijmou ultrazvukový projev částečného výboje a na základě osciloskopického záznamu se pokusíme lokalizovat místo zdroje částečného výboje. Z neznalosti souřadnic hledaného místa nemůžeme určit z osciloskopického záznamu čas, který trvá mezi místem zdroje a sondou, která jako první zaznamenala ultrazvukový projev. Známe pouze časové rozdíly mezi jednotlivými sondami. Ze znalosti těchto hodnot potřebujeme získat souřadnice zdroje částečného výboje. Tento postup si můžeme demonstrovat na situaci z obrázku 5.2. Signál jako první zaznamenala sonda C. V tomto místě, zvolíme počátek vodorovné časové osy, která bude společná všem průběhům. Nyní můžeme odečíst časové zpoždění příchodu ultrazvukového projevu na sondách A, B a D. [5]



Obr. 4.2 Osciloskopický záznam měření částečných výbojů [5]

Každému časovému zpoždění odpovídá určitá vzdálenost, kterou za tento čas urazí čelo vlny ultrazvuku. Vzdálenost se vypočte pro všechny sondy podle vzorce:

$$a = v * \Delta t \quad (4.1)$$

Kde  $a$  vzdálenost [m]

$v$  rychlost šíření [m/s]

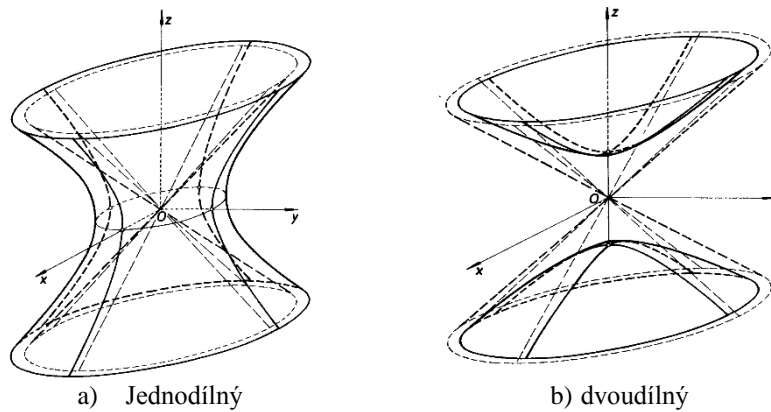
$\Delta t$  časový rozdíl mezi jednotlivými sondami [s]

Rychlost šíření volíme podle prostředí, ve kterém se ultrazvuk šíří. V praxi je však velice obtížné z akustické záznamu určit, zda signál přišel do snímače z oleje nebo z transformátorové nádoby. Velké rozdíly v rychlosti šíření v obou materiálech a nerovnoměrnost šíření velice komplikují lokalizaci částečného výboje. Budeme tedy uvažovat ideální stav, kdy se ultrazvuk šíří pouze v oleji. Následně si můžeme spočítat jednotlivé vzdálenosti sond od zdroje:

$$\begin{aligned} |S_1 Z| &= \sqrt{(X - X_{S1})^2 + (Y - Y_{S1})^2 + (Z - Z_{S1})^2} \\ |S_2 Z| &= \sqrt{(X - X_{S2})^2 + (Y - Y_{S2})^2 + (Z - Z_{S2})^2} \\ |S_3 Z| &= \sqrt{(X - X_{S3})^2 + (Y - Y_{S3})^2 + (Z - Z_{S3})^2} \\ |S_4 Z| &= \sqrt{(X - X_{S4})^2 + (Y - Y_{S4})^2 + (Z - Z_{S4})^2} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Kde	$ S_1Z ,  S_2Z ,  S_3Z ,  S_4Z $	vzdálenosti sond od zdroje
	$X, Y, Z$	souřadnice hledaného místa
	$X_{S1}, X_{S1}, X_{S1}$	souřadnice sondy 1
	$X_{S2}, X_{S2}, X_{S2}$	souřadnice sondy 2
	$X_{S3}, X_{S3}, X_{S3}$	souřadnice sondy 3
	$X_{S4}, X_{S4}, X_{S4}$	souřadnice sondy 4

Pro lokalizaci zdroje nadále využijeme vlastností hyperboly, přesněji hyperboloidu. Hyperbola je množina (geometrické místo) bodů  $X [x, y]$ , jejichž rozdíl vzdáleností od dvou pevných bodů  $F_1, F_2$  (tzv. ohnisek) je roven konstantě. Rotací hyperboly kolem jedné z os vzniká hyperboloid. [5]



Obr. 4.3 Hyperboloidy, převzato z [5]

Hyperboloid vzniklý rotací kolem osy  $z$  definován rovnicí:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (4.3)$$

V případě že se jedná o rotační hyperboloid (opět s osou rotace v ose  $z$ ), platí že  $a=b$ . Z touto znalostí můžeme soustavu 4.2 upravit do následujícího stavu:

$$\begin{aligned} \sqrt{(X - X_{S2})^2 + (Y - Y_{S2})^2 + (Z - Z_{S2})^2} - \sqrt{(X - X_{S1})^2 + (Y - Y_{S1})^2 + (Z - Z_{S1})^2} - v \cdot \Delta t_2 &= 0 \\ \sqrt{(X - X_{S3})^2 + (Y - Y_{S3})^2 + (Z - Z_{S3})^2} - \sqrt{(X - X_{S1})^2 + (Y - Y_{S1})^2 + (Z - Z_{S1})^2} - v \cdot \Delta t_3 &= 0 \\ \sqrt{(X - X_{S4})^2 + (Y - Y_{S4})^2 + (Z - Z_{S4})^2} - \sqrt{(X - X_{S1})^2 + (Y - Y_{S1})^2 + (Z - Z_{S1})^2} - v \cdot \Delta t_4 &= 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

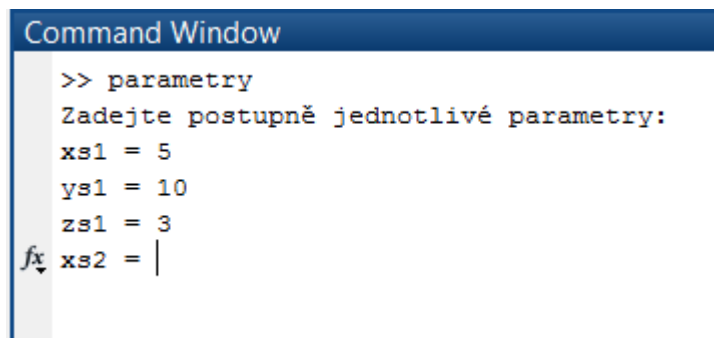
Pro úspěšné vypočtení se použije ještě Newtonova metoda, kterou zde pro svou složitost nebudu uvádět. K vypočtení lokalizace částečného výboje byl použit program MATLAB.

## 4.2 Program pro lokalizaci částečného výboje

Pro lokalizaci částečných výbojů uvnitř transformátoru byl vytvořen skript v programu MATLAB. Skript je uveden příloze 3. MATLAB byl vybrán, jelikož se jedná o program, který umí řešit složité matematické příklady a mezi uživateli je docela známí. Pro spuštění programu je nutné mít nainstalován program MATLAB.

Správná funkčnost byla nejprve testována na teoretickém příkladu. Mějme kvádr o rozměrech  $x = 5$  m,  $y = 2$  m a  $z = 2$  m. Čtyři sondy byly umístěny na libovolné místo. Pro ověření výsledků si zvolíme zdroj uvnitř transformátoru. Ze znalosti polohy zdroje si dopočítáme jednotlivé vzdálenosti k sondám. Po zvolení rychlosti šíření jsme schopni dopočítat časy příchodu akustické vlny k jednotlivým sondám. Následně si spočteme časové rozdíly mezi přichozími signály. Nyní již víme všechny potřebné údaje pro úspěšnou lokalizaci částečného výboje.

Program nemá žádné grafické rozhraní. Skript se otevře pomocí programu MATLAB. Poté již stačí zmáčknout na obrazovce na tlačítko run. Nalézá se na horní listě přibližně uprostřed, znázorněné zeleným trojúhelníkem. Po spuštění se přepneme do okna Command Window, kde postupně zadáme potřebné hodnoty. Program poté vypíše na obrazovku zjištěné souřadnice. Zjištěné souřadnice zdrojů částečných výbojů jsou uvedeny v příloze 1.



```
Command Window
>> parametry
Zadejte postupně jednotlivé parametry:
xs1 = 5
ys1 = 10
zs1 = 3
fx xs2 = |
```

Obr. 4.1

Zadávání hodnot v MATLABU

## Závěr

Tato diplomová práce se snaží postupně přiblížit problematiku diagnostiky elektrických zařízení. Stručně je popsáno, proč je nutné zabývat se diagnostikou z hlediska technologického, praktického a ekonomického. Práce je zaměřena zejména na problematiku částečných výbojů. Seznamuje čtenáře, proč jsou částečné výboje nežádoucím jevem a tedy proč je výhodné se jimi v praxi zabývat.

Za tímto účelem byl vytvořen počítačový skript k lokalizaci částečných výbojů. K výpočtu se využívá vlastností hyperboly. Testováním bylo zjištěno, že navrhnutí kvalitního a přesného lokalizačního programu je velmi náročnou záležitostí. Postupně byly otestovány tři transformátory.

Na transformátoru A byla objevena závada přibližně v polovině, tedy uprostřed transformátoru. Z matematického hlediska se jedná o ideální polohu výskytu částečného výboje. Závada vyšla podle uvedených předpokladů.

U transformátoru B došlo k výskytu výboje velice blízko zadní stěny v polovině transformátoru, přibližně v jedné třetina výšky vinutí.

Na transformátoru C se projevila nedokonalost testovací programu. Výboj byl v tomto případě detekován chybně než předpokládaný výsledek. Pravděpodobně došlo ke špatnému zapůsobení omezující podmínky, nebo byly špatně zadány vstupní data. Nevýhodu akustické diagnostiky, je nutnost správného vyhodnocení osciloskopických záznamů. Mnohdy je akustická odezva částečného výboje překryta parazitním signálem a je tak velice obtížné identifikovat přesný začátek.

Včasným diagnostikovaním zhoršení izolačního stavu systému, můžeme předejít dlouhodobému zastavení provozu nebo nečekané havárii na zařízení. Předcházení dlouhodobého narušení provozu šetří technickým společnost velké finanční náklady, které by museli poskytnout na opravy zařízení.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [2] KREIDL, Marcel. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 406 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0158-6.
- [3] OBRAZ, Jaroslav. *Ultrazvuk v měřicí technice*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976, 479 s.
- [4] HUMLOVÁ, Veronika. *Akustické odezvy částečných výbojů v diagnostice izolačních vad výkonových transformátorů*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. ZČU
- [5] BUŘIČ, Jan. *Využití ultrazvukových projevů k lokalizaci částečných výbojů v transformátoru*. Plzeň, 2000. Diplomová práce. ZČU.
- [6] PUDLO, Gregor. DOBLE LEMKE GMBH. *Power transformer advanced PD monitoring UHF 2009*.
- [7] MACHALA, Petr. *Metody lokalizace polohy zdroje impulzního širokospektrého signálu* [online]. 2013 [cit. 2014-03-18]. xi, 99 l.  
Dostupné z:  
<https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/27295>. Bakalářská práce. VUT.
- [8] TRNKA, P., a SVOBODA, M., Diagnostika výbojové činnosti v širším frekvenčním spektru. *ElectroScope* [online]. 2011 [cit. 2014-03-25].
- [9] BUJALOBOKOVÁ, M. a TRNKA, P. Detekce poruch vn strojů analýzou výbojové činnosti se zaměřením na transformátory. In: [online]. Plzeň [cit. 2014-04-3].  
Dostupné z:  
<http://dspace.vsb.cz/dspace/bitstream/10084/83878/1/AEEE-2007-6-3-112-Bujalobokova.pdf>
- [10] PRSKAVEC, Ladislav. *Měření částečných výbojů*. Praha, 2000. Semestrální projekt. ČVUT. Dostupné z: [http://poli.feld.cvut.cz/~xprskave/pdf/SP\\_Mcv.pdf](http://poli.feld.cvut.cz/~xprskave/pdf/SP_Mcv.pdf)
- [11] ČSN EN 60076-3. *Výkonové transformátory: Část 3: Izolační hladiny, dielektrické zkoušky a vnější vzdálenosti*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [12] ZAPLATÍLEK, Karel. *MATLAB pro začátečníky*. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 151 s. ISBN 80-730-0175-6.
- [13] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *MATLAB: tvorba uživatelských aplikací*. 1. vyd. Praha: BEN, 2004, 215 s. ISBN 80-730-0133-0.

## Přílohy

### Příloha 1: Tabulky zadávaných a vypočtených hodnot

#### Transformátor A

	Souřadnice sond			Zadávané hodnoty	
	x[m]	y[m]	z[m]	v [m.s <sup>-1</sup> ]	Δt [s]
sonda 1	2,85	0,2	1,2	1700	0,0005
sonda 2	3	1,5	3,2		0,00135
sonda 3	4,2	0,2	1,2		0,00065
sonda 4	3	0	3,2		0,00045
Rozměry	4,80	1,5	3,2		
Zdroj ČV.	2,875	0,751	2,140		

#### Transformátor B

	Souřadnice sond			Zadávané hodnoty	
	x[m]	y[m]	z[m]	v [m.s <sup>-1</sup> ]	Δt [s]
sonda 1	1,3	2	1,2	1700	0,00024
sonda 2	1,3	2	3,2		0,0006
sonda 3	2,1	2	1,2		0,00095
sonda 4	1,3	0,85	3,2		0,000325
Rozměry	3,40	2,2	5,75		
Zdroj ČV.	1,666	2,015	1,979		

#### Transformátor C

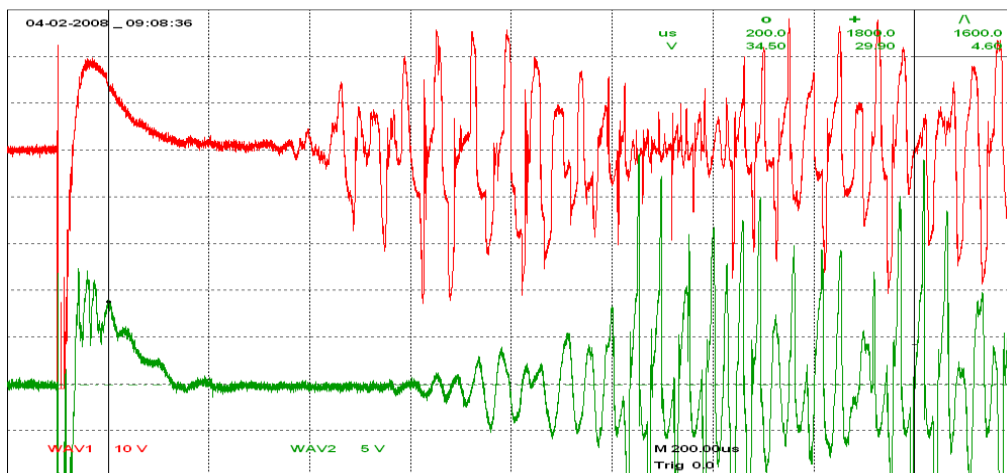
	Souřadnice sond			Zadávané hodnoty	
	x[m]	y[m]	z[m]	v [m.s <sup>-1</sup> ]	Δt [s]
sonda 1	4	0,2	0,1	1700	0,00015
sonda 2	1,2	1,6	2,1		0,00019
sonda 3	3,15	1,6	2,1		0,00105
sonda 4	4,35	0	1,95		0,0006
Rozměry	4,35	1,6	2,6		
Zdroj ČV.	2,302	-0,034	1,156		



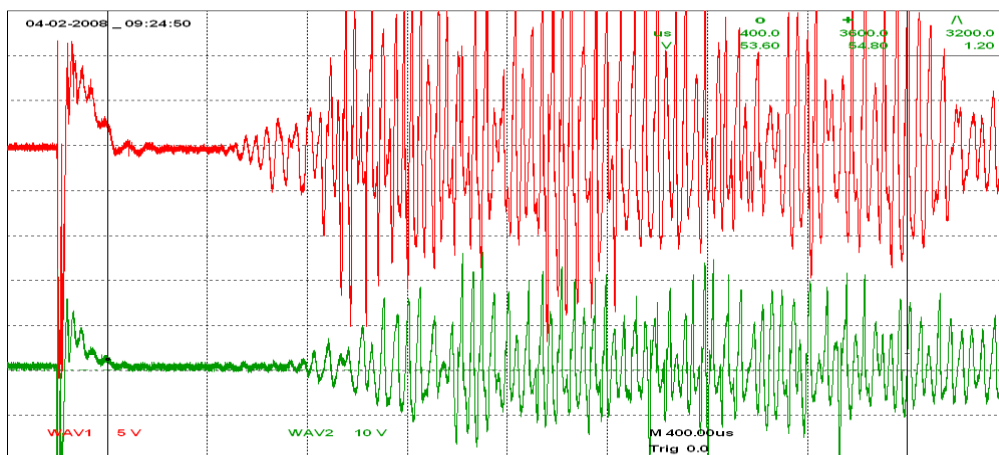
**Příloha 2: Osciloskopické záznamy**

**Transformátor A**

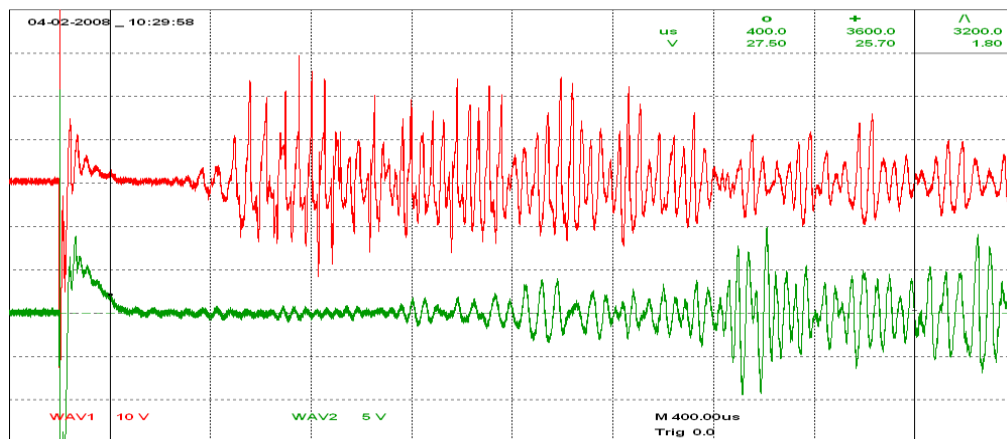
**TEK04(MB1), TEK06(MB1')**



**TEK07(MB1'), TEK09(MB1'')**

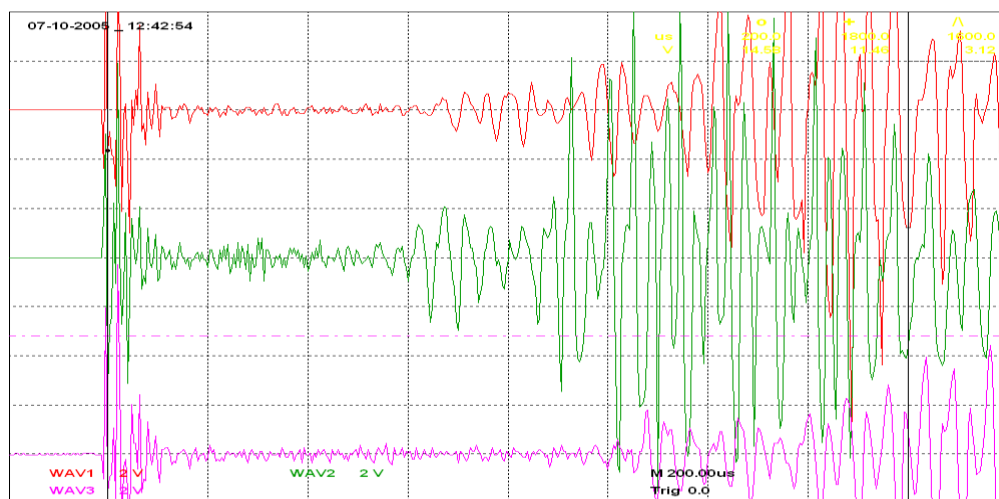


**TEK18(MB1), TEK23(MB2)**

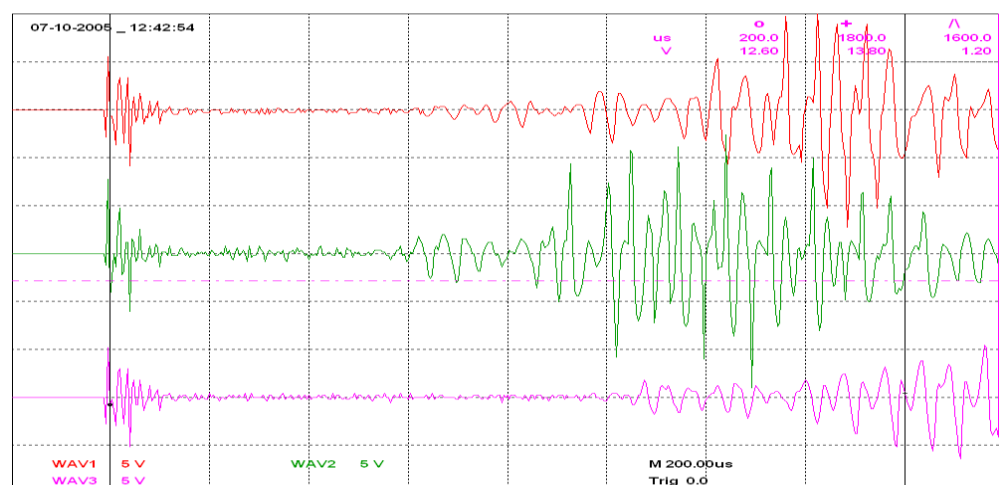


## Transformátor B

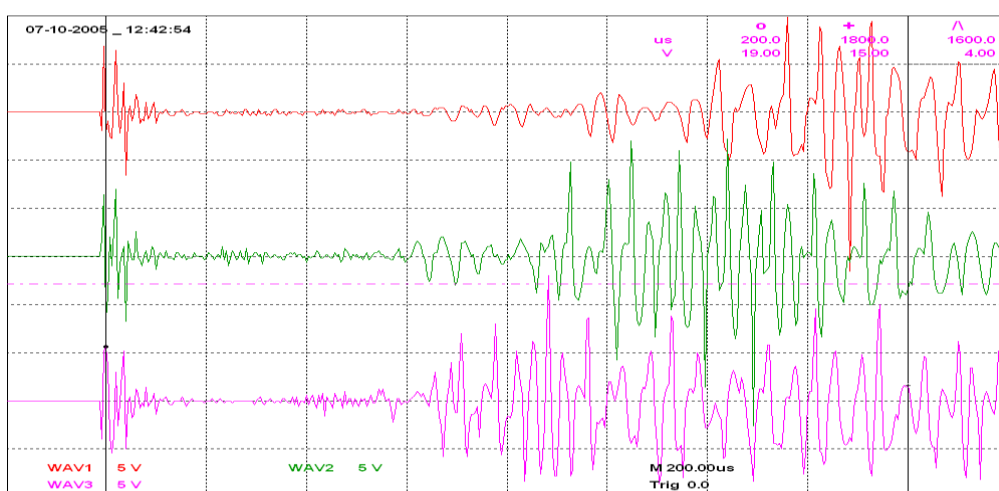
### TEK11(MB1), TEK12(MB2), TEK13(MB3)



### TEK14(MB1), TEK15(MB2), TEK16(MB3)

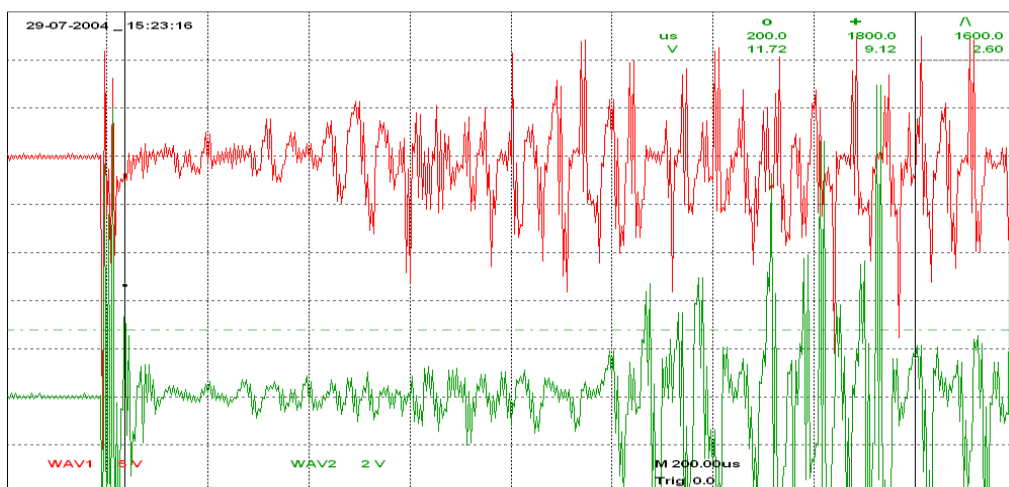


### TEK17(MB1), TEK18(MB2), TEK19(změna umístění MB3')

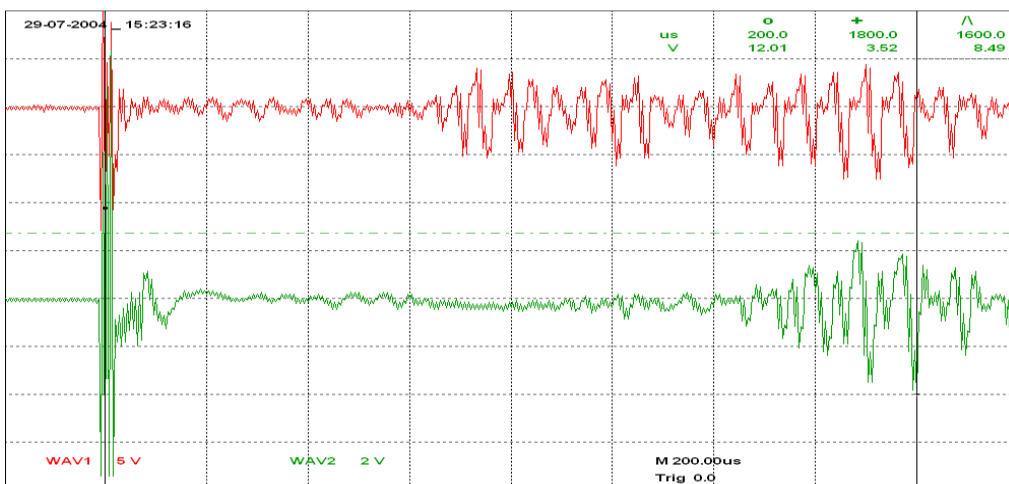


### Transformátor C

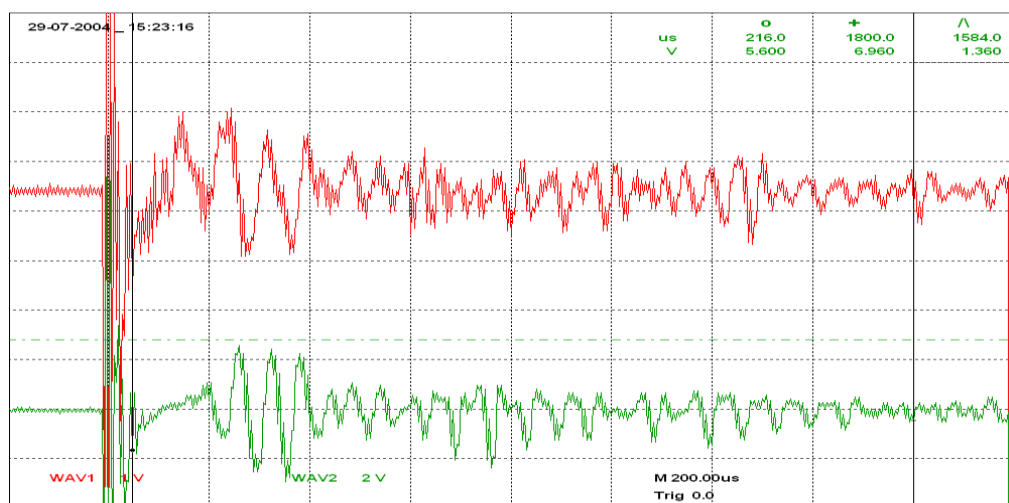
#### TEK76(MB1), TEK77(MB2')



#### TEK78(MB1), TEK79(MB2'')



#### TEK84(MB1), TEK85(MB2''')



**Příloha 3: Program pro lokalizaci částečného výboje**

```

disp('Zadejte postupně jednotlivé parametry:');

xs1=input('xs1 = ');
ys1=input('ys1 = ');
zs1=input('zs1 = ');

xs2=input('xs2 = ');
ys2=input('ys2 = ');
zs2=input('zs2 = ');

xs3=input('xs3 = ');
ys3=input('ys3 = ');
zs3=input('zs3 = ');

xs4=input('xs4 = ');
ys4=input('ys4 = ');
zs4=input('zs4 = ');

xt=input('xt = ');
yt=input('yt = ');
zt=input('zt = ');

t12=input('t12 = ');
t23=input('t23 = ');
t34=input('t34 = ');

v=input('v = ');

%Jednotlivé rovnice
sqrt((x-xs2)^2+(y-ys2)^2+(z-zs2)^2)-sqrt((x-xs1)^2+(y-ys1)^2+(z-zs1)^2)-
v*t12=0
sqrt((x-xs3)^2+(y-ys3)^2+(z-zs3)^2)-sqrt((x-xs1)^2+(y-ys1)^2+(z-zs1)^2)-
v*t23=0
sqrt((x-xs4)^2+(y-ys4)^2+(z-zs4)^2)-sqrt((x-xs1)^2+(y-ys1)^2+(z-zs1)^2)-
v*t34=0

%vytazeni souradnic
if(ref(1,1) == 1)
    x = refaxis;
    y = var(2);
    z = var(1);
elseif(ref(1,2) == 1)
    x = var(1);
    y = refaxis;
    z = var(2);
else
    x = var(1);
    y = var(2);
    z = refaxis;
end

%upravene Hyperbolicke rovnice
eq12 = sqrt((x-det(eqsort(1,1),1))^2 + (y-det(eqsort(1,1),2))^2 + (z-
det(eqsort(1,1),3))^2)...
- sqrt((x-det(eqsort(1,2),1))^2 + (y-det(eqsort(1,2),2))^2 + (z-
det(eqsort(1,2),3))^2)...

```

```

- (v_s*(tau(1,eqsort(1,1))/fsamp)) +
(v_s*(tau(1,eqsort(1,2))/fsamp));
eq23 = sqrt((x-det(eqsort(1,2),1))^2 + (y-det(eqsort(1,2),2))^2 + (z-
det(eqsort(1,2),3))^2)...
- sqrt((x-det(eqsort(1,3),1))^2 + (y-det(eqsort(1,3),2))^2 + (z-
det(eqsort(1,3),3))^2)...
- (v_s*(tau(1,eqsort(1,2))/fsamp)) +
(v_s*(tau(1,eqsort(1,3))/fsamp));
eq34 = sqrt((x-det(eqsort(1,3),1))^2 + (y-det(eqsort(1,3),2))^2 + (z-
det(eqsort(1,3),3))^2)...
- sqrt((x-det(eqsort(1,4),1))^2 + (y-det(eqsort(1,4),2))^2 + (z-
det(eqsort(1,4),3))^2)...
- (v_s*(tau(1,eqsort(1,3))/fsamp)) +
(v_s*(tau(1,eqsort(1,4))/fsamp));

F = [eq12; eq23; eq34];

%transformace souradnic
dim = [5, 3.2, 3];
dim = round(dim*10000)/10000;

%transformace souradnic
det1 = [4.6, 0, 1.5];
det1 = round(det1*10000)/10000;

det2 = [3.2, 0, 1.5];
det2 = round(det2*10000)/10000;

det3 = [1.8, 0, 1.5];
det3 = round(det3*10000)/10000;

det4 = [0.4, 0, 1.5];
det4 = round(det4*10000)/10000;

%nacteni retezce do Newtonovy metody
det1temp(1,1) = str2double(get(handles.det1X, 'String'));
det1temp(1,2) = str2double(get(handles.det1Y, 'String'));
det1temp(1,3) = str2double(get(handles.det1Z, 'String'));

det2temp(1,1) = str2double(get(handles.det2X, 'String'));
det2temp(1,2) = str2double(get(handles.det2Y, 'String'));
det2temp(1,3) = str2double(get(handles.det2Z, 'String'));

det3temp(1,1) = str2double(get(handles.det3X, 'String'));
det3temp(1,2) = str2double(get(handles.det3Y, 'String'));
det3temp(1,3) = str2double(get(handles.det3Z, 'String'));

det4temp(1,1) = str2double(get(handles.det4X, 'String'));
det4temp(1,2) = str2double(get(handles.det4Y, 'String'));
det4temp(1,3) = str2double(get(handles.det4Z, 'String'));

disp('Výpis výsledků:');
x
y
z

disp('Výsledky jednotlivých rovnic pro výsledné řešení:');
F=[F1;F2;F3]

```