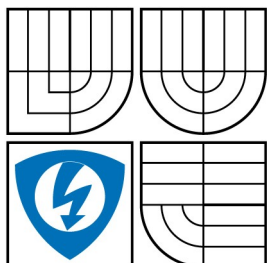


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELEKTRONICS

## TERMOAKUSTICKÉ MĚŘENÍ VÝKONU ULTRAZVUKU TERMOACOUSTIC MEASUREMENT OF ULTRASONIC POWER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

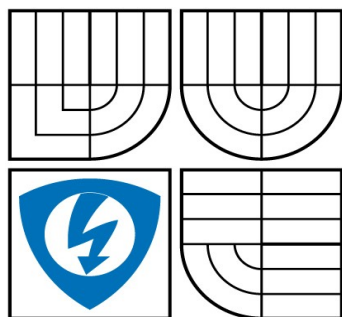
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ladislav Vysoudil

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Rozman, CSc

BRNO 2007



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Elektronika a sdělovací technika

**Student:**  
**Ročník:**

Ladislav Vysoudil  
3

**ID:** 77793  
**Akademický rok:** 2008/2009

**NÁZEV TÉMATU:**

**Termoakustické měření výkonu ultrazvuku**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s principy metod měření výkonu v ultrazvukových polích a zaměřte se na úrovně aplikované v diagnostických zobrazovacích systémech.

Pro testování intenzity ultrazvuku diagnostických systémů navrhnete konstrukční řešení termoakustického snímače a experimentálně ověřte jeho funkci. Dosažené výsledky porovnejte s měřeními pomocí hydrofonu v ultrazvukové měřicí vaně.

**DOPORUCENÁ LITERATURA:**

- [1] ROZMAN, J. Ultrazvuková technika v lékařství. Skriptum. Brno: FE VUT v Brně, 1979
- [2] ZISKIN M.C., LEWIN P.A. Ultrasonic exposimetry. CRC Press, Boca Raton, 1993

**Termín zadání:**

9.2.2009

**Termín odevzdání:** 5.6.2009

**Vedoucí práce:**

doc. Ing. Jiří Rozman, Csc.

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**  
Předseda oborové rady

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následku 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.

## Abstrakt

Zadáním této práce je navrhnout konstrukční řešení termoakustického snímače a experimentálně ověřit jeho funkci pro testování intenzity ultrazvuku diagnostických systémů. Dále pak změřené výsledky porovnat s měřením pomocí hydrofonu v ultrazvukové měřicí vaně. Úvodní část práce je zaměřena na popis funkce snímačů a jejich konstrukci včetně popisu funkce a konstrukce hydrofonu. Zbytek práce se zabývá samotným návrhem termoakustického senzoru, měřením se senzorem a hydrofonem a vyhodnocením výsledků měření. Záměrem práce je ověřit funkci navrženého termoakustického senzoru pomocí srovnávacího měření s hydrofonem.

## Klíčová slova

Termoakustický senzor, hydrofon, ultrazvuk, intenzita, výkon.

## Abstract

The assignment of this work is to suggest structural design of thermoacoustic sensor and experimentally verify his function for testing intensity of ultrasound diagnostic systems. Then the measured results are compared with measurement by the hydrophone in ultrasonic measuring tank. Opening part of this work is focused on functional description of sensors and their construction, including functional description and construction of hydrophone. The rest of the work deals with project of thermoacoustic sensor and measuring with sensor and hydrophone and evaluation results of measurement. Intention of this work is to verify the correct function of designed thermoacoustic sensor with the help of comparison measurement with hydrophone.

## Keywords

Thermoacoustic sensor, hydrophone, ultrasound, intensity, power.

VYSOUDIL, L. *Termoakustické měření výkonu ultrazvuku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2009. 43 s., 7 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. ing. Jiří Rozman, CSc.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Termoakustické měření výkonu ultrazvuku jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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 2. června 2009

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. ing. Jiřímu Rozmanovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....  
(podpis autora)

# Obsah

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Seznam obrázků.....                                                  | ix |
| Seznam tabulek.....                                                  | x  |
| 1 Úvod.....                                                          | 1  |
| 2 Metody měření výkonu ultrazvuku.....                               | 1  |
| 2.1 Hydrofon.....                                                    | 1  |
| 2.2 Termoakustický senzor.....                                       | 3  |
| 2.2.1 Dvouvrstvý senzor .....                                        | 4  |
| 2.2.2 Jednovrstvý senzor.....                                        | 5  |
| 2.2.3 Jednovrstvý senzor s kmitočtově nezávislou detekcí výkonu..... | 7  |
| 2.2.4 Tepelná čidla pro termoakustický senzor.....                   | 8  |
| 3 Experimentální ověření.....                                        | 14 |
| 3.1 Návrh termoakustického senzoru.....                              | 14 |
| 3.2 Měření hydrofonem.....                                           | 15 |
| 3.2.1 Postup měření hydrofonem.....                                  | 16 |
| 3.2.2 Měření .....                                                   | 17 |
| 3.3 Měření termoakustickým senzorem.....                             | 19 |
| 3.3.1 Postup měření termoakustickým senzorem.....                    | 19 |
| 3.3.2 Měření .....                                                   | 20 |
| 3.4 Výsledky.....                                                    | 23 |
| 4 Dosažené výsledky.....                                             | 23 |
| 5 Závěr.....                                                         | 22 |
| Literatura.....                                                      | 26 |
| Seznam symbolů, veličin a zkratk.....                                | 27 |
| Seznam příloh.....                                                   | 28 |
| Přílohy.....                                                         | 30 |

## Seznam obrázků

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 2.1: Hydrofon MH - 28 v držáku.....                                                                                  | 1  |
| Obr. 2.2: Dvouvrstvý termoakustický senzor.....                                                                           | 5  |
| Obr. 2.3: Jednovrstvý termoakustický senzor.....                                                                          | 7  |
| Obr. 2.4: Jednovrstvý termoakustický senzor s kmitočtově nezávislou detekcí výkonu.....                                   | 8  |
| Obr. 2.5: Termočlánek.....                                                                                                | 10 |
| Obr. 2.6: Kompenzační krabice.....                                                                                        | 11 |
| Obr. 2.7: Wheatstonův můstek s tříodičovým zapojením měřeného odporu.....                                                 | 13 |
| Obr. 3.1: Termoakustický senzor.....                                                                                      | 14 |
| Obr. 3.2: Příklad průběhu napětí.....                                                                                     | 16 |
| Obr. 3.3: Sestava pro měření hydrofonem - výstup hydrofonu, USBscope 50, USB kabel, PC s<br>průběhem měřeného napětí..... | 17 |
| Obr. 3.4: Graf závislosti citlivosti na frekvenci hydrofonu.....                                                          | 18 |
| Obr. 3.5: Měření hydrofonem.....                                                                                          | 19 |
| Obr. 3.5: Blokové schéma sestavy pro měření s termoakustickým senzorem.....                                               | 20 |
| Obr. 3.6: Průběh změřeného výkonu.....                                                                                    | 21 |
| Obr. 3.7: Průměrný (vyhlazený) průběh výkonu.....                                                                         | 21 |
| Obr. 3.8: Průběh změřené intenzity.....                                                                                   | 22 |
| Obr. 3.9: Průměrný průběh intenzity.....                                                                                  | 22 |

**Seznam tabulek**

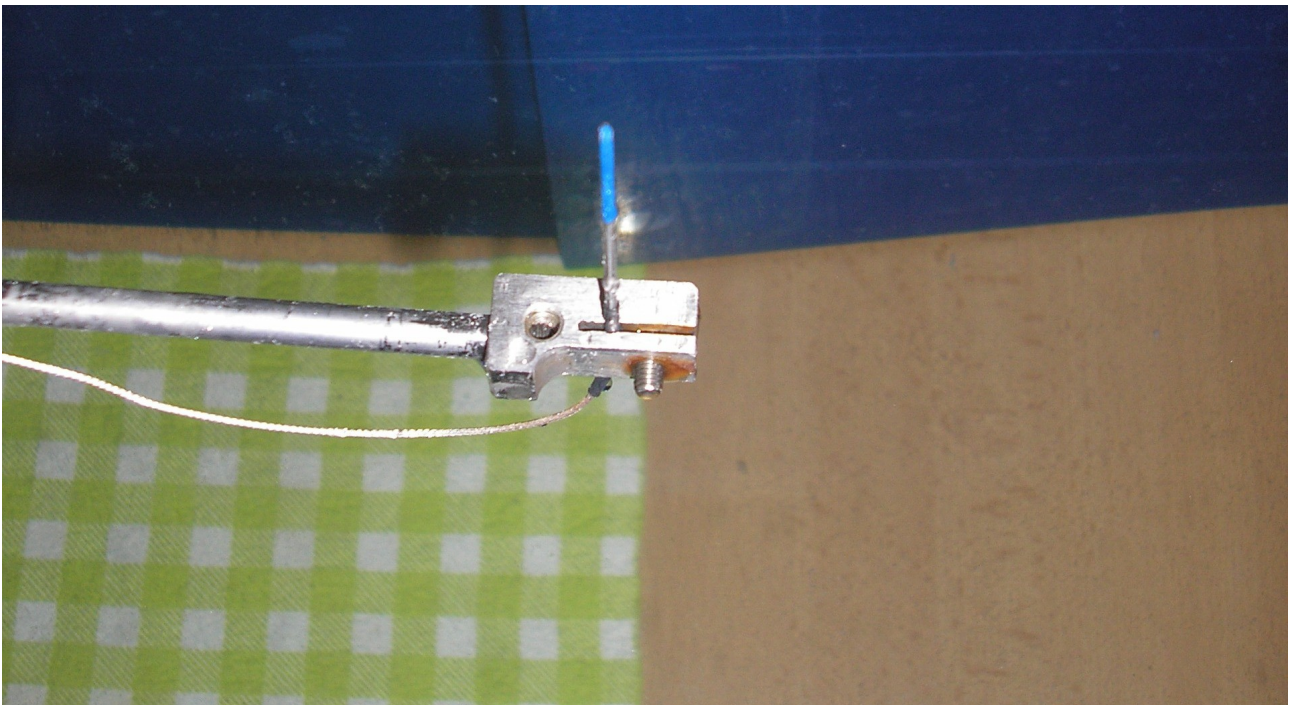
Tab. 1: Přehled termočlánků.....9

# 1 Úvod

Mým úkolem v této práci je seznámit se s principy metod měření výkonu v ultrazvukových polích a dále pak pro testování intenzity ultrazvuku diagnostických systémů navrhnout konstrukční řešení termoakustického snímače a experimentálně ověřit jeho funkci. Změřené výsledky potom porovnat s měřením pomocí hydrofonu v ultrazvukové měřicí vaně. Ultrazvukem chápeme mechanické kmitání o frekvenci od 16 kHz do 1 GHz. Zatímco pomocí hydrofonu se měří intenzita ultrazvuku nepřímo, tedy musí se vypočítat ze změřeného průběhu napětí, termoakustický senzor měří výkon přímo. To umožňuje využití termoakustického senzoru v oblastech, ve kterých hydrofon použít nelze. V rámci této práce zkonstruujeme termoakustický senzor se kterým provedeme několik měření výkonu a výsledky srovnáme s měřením pomocí hydrofonu. Kromě přímé a nepřímé metody měření, se hydrofon a termoakustický senzor liší v měřené veličině. Hydrofon měří akustickou intenzitu a termoakustický senzor měří akustický výkon. Abychom tedy mohli obě zařízení srovnávat, přepočítáme akustickou intenzitu, měřenou hydrofonem, na akustický výkon. V první části práce budeme termoakustický senzor a hydrofon popisovat teoreticky, poté popíšeme návrh senzoru a způsoby měření. V další části pak uvedeme výsledky měření a vyhodnotíme je.

## 2 Metody měření výkonu ultrazvuku

### 2.1 Hydrofon



*Obr. 2.1 : Hydrofon MH - 28 v držáku.*

Měření intenzity ultrazvuku hydrofonem (piezoelektrickou sondou) má oproti jiným metodám výhodu v relativně velké citlivosti. Můžeme měřit intenzity od  $100 \text{ W/m}^2$  ( $10 \text{ mW/cm}^2$ ).

Abychom měřící sondou nenarušili tvar uzv pole, musí být její rozměry menší než délka vlny. Použijeme-li sondu s rozměry podstatně většími než délka vlny, měříme střední hodnotu intenzity dopadajícího vlnění na sondu [1].

Nevýhodou hydrofonů je jejich frekvenční závislost v blízkosti vlastní rezonance. K měření proto používáme měniče s vlastní rezonanční frekvencí podstatně vyšší než frekvence měřeného vlnění. Citlivost sondy se tím sice sníží, ale její frekvenční charakteristika je v určitém pásmu vyrovnaná. Tyto sondy se s výhodou používají pro mapování uzv polí [1].

Základní konstrukční prvek hydrofonu je piezoelektrický měnič. Používá se pro rozsah pracovních frekvencí vyšších než 100 kHz. Tyto měniče využívají přímého a nepřímého (inverzního) piezoelektrického jevu, objeveného bratry Curiovými. Přímý piezoelektrický jev popisuje vznik elektrických nábojů na plochách měniče při jeho namáhání v tlaku, tahu či krutu. Vznik mechanických deformací vlivem působícího elektrického pole je označován jako nepřímý piezoelektrický jev [1].

Piezoelektrické materiály jsou zvláštní skupinou dielektrik a jev sám představuje jejich elektrickou polarizaci. S polarizací bývá vždy spojena deformace dielektrika, nezávislá na smyslu přiloženého vnějšího pole, nazývaná elektrostriktce. Elektrostriktční jev se projevuje u všech dielektrik. Nezávisí na smyslu použitého vnějšího elektrického pole a není podmíněn žádnou zvláštní strukturou dielektrika. Reciproký jev k elektrostriktci není znám. Je to jev kvadratický, jeho mechanická deformace je zpravidla mnohem menší než u lineárního jevu piezoelektrického [1].

Sílu vztaženou na jednotku plochy nazýváme napětí. Podle Voigta můžeme psát vztahy mezi elastickým napětím  $T$  a deformací  $S$ , jako zobecněný Hookův zákon takto [1]:

$$T_{\lambda} = \sum_{\mu} c_{\lambda\mu} \cdot S_{\mu}, \quad (2.1)$$

$$S_{\mu} = \sum_{\lambda} s_{\lambda\mu} \cdot T_{\lambda}, \quad (2.2)$$

kde  $T_{\lambda}$  a  $S_{\mu}$  jsou složky napětí a deformace,

$c_{\lambda\mu}$  ... elastický modul,

$s_{\lambda\mu}$  ... elastická konstanta.

Oba uvedené koeficienty jsou tenzory. Symetričnost tenzorů 2., 3. a 4. řádu v dvojicích indexů umožňuje jejich zjednodušený zápis pomocí tzv. Voigtovy (nebo maticové) notace.

Kvantizační popis obou piezoelektrických jevů je možný dvěma dvojicemi veličin: tenzorů deformace  $S_{\lambda}$  a elastického napětí  $T_{\lambda}$ , a složek vektorů intenzity elektrického pole  $E_i$  a indukce  $D_i$  ( $D = D_0 + P$ , kde  $P$  je polarizace dielektrika – pole indukovaných nábojů)[1].

Pro přímý piezoelektrický jev platí[1]:

$$D_i = d_{i\mu} \cdot T_{\lambda} + \varepsilon_{ij} \cdot E_j, \quad (2.3)$$

nebo

$$E_i = d_{i\mu} \cdot T_{\mu} + \varepsilon_{ij}^{-1} \cdot E_j. \quad (2.4)$$

Pro nepřímý piezoelektrický jev píšeme[1]:

$$S_{\lambda} = s_{\lambda\mu} \cdot T_{\lambda} + d_{j\lambda} \cdot E_j, \quad (2.5)$$

nebo

$$S_{\lambda} = s_{\lambda\mu} \cdot T_{\lambda} + g_{j\lambda} \cdot D_j . \quad (2.6)$$

Rovnice (3.20) a (3.22) lze interpretovat v ortogonální soustavě souřadnic: čísla 1, 2, 3 jsou přiřazena osám x, y, z a čísla 4, 5, 6 rovinám yz, xz, xy. Vektor polarizace je rovnoběžný s osou z. Obě mechanické veličiny (elastické napětí  $T_{\lambda}$  a deformace  $S_{\lambda}$ ) mají po šesti složkách ( $\lambda = 1 - 6$ ), obě elektrické veličiny (intenzita pole  $E_i$  a indukce  $D_i$ ) mají po třech složkách ( $i = 1 - 3$ ). Rovnice lze rozepsat do složek užitím Einsteinova pravidla, nebo násobením příslušných matic [1].

Rozměry jednotek piezoelektrických konstant [1]:

|                                         |   |                                                                                                                 |
|-----------------------------------------|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| – piezoelektrický modul (vysílací)      | d | $\left[ \frac{m}{V} \right], \left[ \frac{A \cdot s}{N} \right]$                                                |
| – piezoelektrická konstanta (přijímací) | g | $\left[ \frac{V \cdot m}{N} \right], \left[ \frac{m^2}{A \cdot s} \right], \left[ \frac{V}{m \cdot Pa} \right]$ |
| – piezoelektrický koeficient            | e | $\left[ \frac{N}{V \cdot m} \right], \left[ \frac{A \cdot s}{m^2} \right], \left[ \frac{m \cdot Pa}{V} \right]$ |
| – elastický modul                       | c | $\left[ \frac{N}{m^2} \right]$                                                                                  |
| – elastická konstanta                   | s | $\left[ \frac{m^2}{N} \right]$                                                                                  |

Vztahy mezi piezoelektrickými moduly  $d_{i\mu}$ , piezoelektrickými koeficienty  $e_{i\mu}$  a elastickými moduly  $c_{\lambda\mu}$ , elastickými konstantami  $s_{\lambda\mu}$  jsou [1] :

$$d_{i\mu} = \sum_{\lambda} e_{i\lambda} \cdot s_{\lambda\mu} , \quad e_{i\mu} = \sum_{\lambda} d_{i\lambda} \cdot c_{\lambda\mu} \quad (2.7), (2.8)$$

kde  $\lambda, \mu = 1, 2, 3 \dots 6$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

Číselné hodnoty konstant jsou závislé na složení piezoelektrika a jsou obvykle tabelovány výrobcem.

## 2.2 Termoakustický senzor

Ultrazvukové vlny se mohou šířit v pevném, kapalném nebo plynném prostředí, kde vždy ztrácí energii vlivem absorpce a rozptylu. Zatímco rozptýlená energie pokračuje v průchodu prostředím jako ultrazvuková vlna, absorbovaná energie se změní na teplo. Tepelný nárůst  $\Delta T$ , který vzniká v prostředí, kde se ultrazvuková vlna šíří, závisí na akustických a tepelných vlastnostech tohoto prostředí a na výkonu ultrazvukové vlny. Proto může být termoakustický jev využit pro měření výkonu ultrazvuku. Ve stavu tepelné rovnováhy je tepelný nárůst, vznikající v absorpčním materiálu, přímo úměrný výkonu ultrazvukové vlny. Z toho důvodu můžeme měřit absolutní hodnotu ultrazvukového výkonu pokud známe hodnotu tepelné vodivosti a činitel akustické absorpce použitého absorpčního materiálu. Stavem tepelné rovnováhy rozumíme stav, ve kterém se teplota uvnitř absorbéru v čase nemění [3].

## 2.2.1 Dvouvrstvý senzor

Zatímco teplota produkovaná ultrazvukovou absorpcí uvnitř termoakustického senzoru, je velmi složitou funkcí času, počáteční rychlost změny teploty v čase a maximální tepelný nárůst, dosažený ve stavu tepelné rovnováhy, jsou relativně jednoduché pro výpočet [3].

Dvouvrstvý termoakustický senzor se skládá ze dvou plochých paralelních vrstev, tedy z tzv. čelní vrstvy a absorbéru. Boční strany senzoru a zadní strana absorbéru jsou tepelně izolovány. Zvukově propustná čelní vrstva je tvořena materiálem s malou tepelnou vodivostí. Tato vrstva izoluje tepelnou sondu od vody v měřicí vaně. Funkce absorbéru je měnit energii ultrazvukové vlny na teplo. Teplotní změna, způsobená přeměnou energie uzv vlny na teplo, je měřena termočlánkem umístěným na zadní straně čelní vrstvy. Přední strana senzoru není tepelně izolovaná, je v kontaktu s vodou v měřicí vaně a umožňuje uzv vlně vstoupit do senzoru. Zároveň však přední strana senzoru dovoluje teplo unikat z absorbéru přes čelní vrstvu do měřicí vany [3].

Pro zjednodušení výpočtu tepelného nárůstu (rozdílu teplot)  $\Delta T$  na rozhraní dvouvrstvého senzoru se předpokládá, že se čelní vrstva skládá z neabsorpčního materiálu. Potom můžeme tento dvouvrstvý senzor nazvat ideální. Když nedochází v čelní vrstvě k absorpci, nevzniká zde žádné teplo. Proto je ve stavu tepelné rovnováhy vyzařované teplo  $\dot{Q}$  (radiation flow rate) nezávislé na vzdálenosti ve směru osy  $x$  a – podle rovnice tepelného proudění – je teplota  $T(x)$  v čelní vrstvě lineární funkcí  $x$  [3] :

$$\dot{Q} = \lambda_s \cdot A \cdot \frac{T_i - T_f}{l_s} = \lambda_s \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{l_s} , \quad [\text{W}] \quad (2.9)$$

kde  $\lambda_s$  značí tepelnou vodivost [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $A$  plochu průřezu [ $\text{m}^2$ ] a  $l_s$  délku čelní vrstvy [ $\text{m}$ ].  $T_i$  a  $T_f$  jsou teploty rozhraní a čelní strany senzoru ve stavu tepelné rovnováhy [ $\text{K}$ ]. Délka vrstvy absorpčního materiálu  $l_a$  musí být zvolena dostatečně velká, aby se veškerá energie uzv vlny mohla přeměnit v teplo a byl zanedbán účinek mnohonásobně odraženého uzv signálu. Teplo  $dQ/dt$  vytvořené v absorpčním materiálu za jednotku času je dáno vztahem [3]:

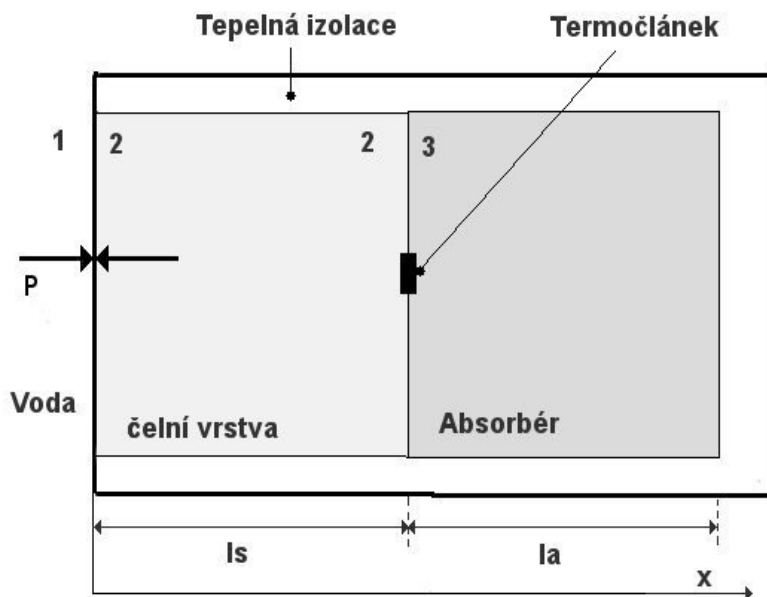
$$\frac{dQ}{dt} = D_{12} \cdot D_{23} \cdot N_0 , \quad (2.10)$$

kde  $D_{1,2}$  a  $D_{2,3}$  jsou činitelé přenosu akustické intenzity čelní strany a rozhraní senzoru [-].  $N_0$  [ $\text{W}$ ] je výkon ultrazvukového signálu v měřicí vaně v  $x = 0$ . Při tepelné rovnováze jsou teplo  $dQ/dt$  produkované absorbérem a vyzařované teplo  $\dot{Q}$  v čelní vrstvě stejné. Potom je výkon uzv vlnění dán vztahem [3]:

$$N_0 = \frac{\lambda_s A \Delta T}{D_{1,2} D_{1,3} l_s} . \quad [\text{W}] \quad (2.11)$$

Proto, aby měl ideální dvouvrstvý senzor dostatečně velkou citlivost, je důležité, aby čelní vrstva byla tvořena materiálem s velmi malou tepelnou vodivostí  $\lambda_s$ , a aby se akustická impedance čelní vrstvy  $Z_2$  a akustická impedanci  $Z_1$  vody v měřicí vaně co nejvíce shodovaly. Pouze pokud je splněna druhá podmínka je  $D_{1,2} \approx 1$  a tedy většina uzv energie vchází do čelní vrstvy. Vzhledem k tomu, že nemáme materiál s přibližně stejnou akustickou impedancí jakou má voda, a že v uzv

polích je absorpční činitel nezanedbatelný, nemůžeme realizovat ideální dvouvrstvý senzor. Pak tedy musíme brát v úvahu absorpci v čelní vrstvě a absolutní uzw výkon budeme měřit reálným dvouvrstvým senzorem [3].



Obr. 2.2: Dvouvrstvý termoakustický senzor.

## 2.2.2 Jednovrstvý senzor

Rozdíl mezi dvouvrstvým a jednovrstvým senzorem je v tom, že jednovrstvý senzor nemá čelní vrstvu a termistor je upevněn na zadní straně absorbérů.

Budeme uvažovat, že uzw vlna, vstupující na jednovrstvý senzor, se úplně změní v teplo než dosáhne zadní strany absorbérů. Protože absorpční koeficient není roven nule, je výkon [3]:

$$N_1(x) = D_{1,3} \cdot N_0 e^{-\alpha_a x}, \quad (2.12)$$

uzv vlny šířící se absorpčním plátem funkcí souřadnice  $x$ , kde  $D_{1,3}$  je činitel přenosu intenzity čelní strany senzoru. Teplo  $\dot{q}(x)$  vytvořené za jednotku času a na jednotce délky se rovná uzw výkonu  $\alpha_a P_1(x)$  absorbovanému na jednotce délky v ose  $x$  [3]:

$$\dot{q}(x) = \alpha_a N_1(x). \quad (2.13)$$

Ve stavu teplotní rovnováhy může teplo vytvořené uvnitř absorbérů proudit pouze na čelní povrch senzoru. Vyzařované teplo  $\dot{Q}_1(x)$  na souřadnici  $x$  je shodné s teplem produkovaným za jednotku času uvnitř absorbérů na vzdálenosti  $x - l_a$  [3]:

$$\dot{Q}_1(x) = \int_x^{l_a} \dot{q}_1(\zeta) d(\zeta) = D_{1,3} N_0 (e^{-\alpha_a x} - e^{-\alpha_a l_a}) = \lambda_a A \frac{dT_1(x)}{dx}. \quad (2.14)$$

Poslední část vzorce vyplývá z rovnice tepelného vlnění.  $\lambda_a$  je tepelná vodivost absorpčního

materiálu. Předchozí rovnice udává tepelný nárůst  $\Delta T_1(x) = T_1(x) - T_f$  v absorbéru na bodě na ose x [3]:

$$\Delta T_1(x) = \frac{1}{\lambda_a A} \int_0^x \dot{Q}_1(\zeta) d\zeta = \frac{D_{1.3} N_0}{\alpha_a \lambda_a A} (1 - e^{-\alpha_a x} - \alpha_a x e^{-\alpha_a l_a}) . \quad [K] \quad (2.15)$$

Pokud není délka absorbéru  $l_a$  dostatečně velká, uzv vlna se transformuje v teplo pouze z části a zbylé vlnění se může šířit dál, respektive se odráží na zadní straně absorbéru. Výkon odražené vlny je pak definován [3]:

$$N_2(x) = D_{1.3} \cdot N_0 e^{-\alpha_a (2l_a - x)} . \quad (2.16)$$

Pak

$$\dot{q}_2(x) = \alpha_a N_2(x) , \quad (2.17)$$

a

$$\Delta T_2(x) = \frac{1}{\lambda_a A} \int_0^x \left( \int_{\xi}^{l_a} \dot{q}_2(\zeta) d\zeta \right) d\xi = \frac{N_2(l_a)}{\alpha_a \lambda_a A} (\alpha_a x + e^{-\alpha_a l_a} - e^{-\alpha_a (l_a - x)}) , \quad (2.18)$$

kde  $N_2(l_a)$  je výkon odražené uzv vlny v  $x = l_a$ .

Energie odražené vlny se také nemusí přeměnit v teplo a vlna se může odrazit zpět na rozhraní čelní strany senzoru a absorbéru. Potom tepelný nárůst vzniklý ve směru osy x je dán vztahem [3]:

$$\Delta T(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \Delta T_n(x) = \sum_{k=1}^{\infty} N_k \frac{1 - e^{-\alpha_a x} - \alpha_a x e^{-\alpha_a l_a}}{\alpha_a \lambda_a A} + \sum_{m=1}^{\infty} N_m \frac{\alpha_a x + e^{-\alpha_a l_a} - e^{-\alpha_a (l_a - x)}}{\alpha_a \lambda_a A} ,$$

$$N_k = D_{1.3} R_{1.3}^{k-1} N_0 e^{-2\alpha_a l_a (k-1)} ,$$

$$N_m = D_{1.3} R_{1.3}^{m-1} N_0 e^{-\alpha_a l_a (2m-1)} , \quad (2.19)$$

kde  $N_k$  je výkon uzv vlny šířící se v kladném směru osy x z  $x = 0$ ,  $N_m$  je výkon uzv vlny šířící se v záporném směru osy x z  $x = l_a$  a  $n, k$  a  $m$  jsou kladná celá čísla.

Pro absorbéry ze silně absorpčních materiálů, které mají dostatečně velkou délku  $l_a$  proto, aby se v nich vlna kompletně přeměnila v teplo než dosáhne zadní strany absorbéru, se dá tepelný nárůst  $\Delta T_1(l_a)$  na zadní straně absorbéru vyjádřit vztahem [3]:

$$\Delta T_1(l_a) = \frac{D_{1.3} N_0}{\alpha_a \lambda_a A} . \quad (2.20)$$

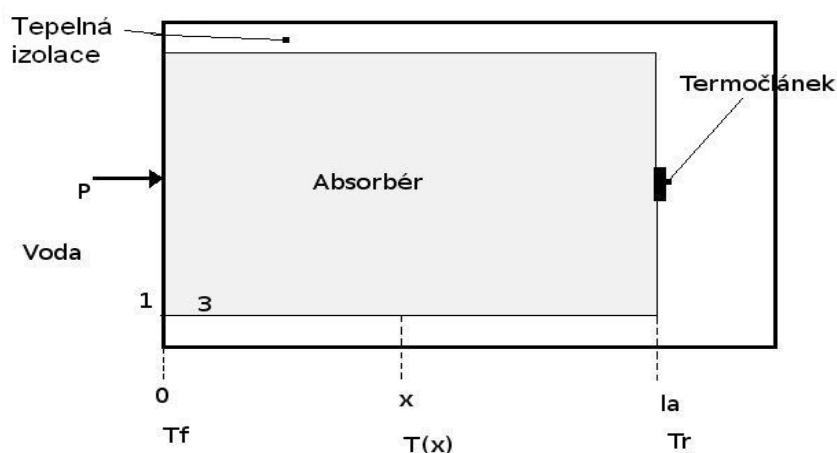
V této rovnici je  $\alpha_a$  jedinou frekvenčně závislou hodnotou. Určit výkon  $P_0$  z této rovnice je velmi jednoduché, ale můžeme z ní výkon určit jen tehdy, když se uzv vlna plně transformuje v teplo než dosáhne zadní strany absorbéru. Tedy délka absorbéru [3]:

$$l_a \geq -\ln(0,001)/\alpha_a , \quad (2.21)$$

kde  $\alpha_a$  koeficient absorpce [ $\text{cm}^{-1}$ ] a  $l_a$  je délka absorbéru [cm].

Například absorpční koeficient  $\alpha_a$  pro plexisklo se rovná  $(0,236 \cdot f/f_0 + 0,2) \text{ cm}^{-1}$  když  $f_0$  je rovna 1 MHz. Z toho vyplývá, že pro nižší kmitočty je nutná velká délka  $l_a$ . Takže absorbér ze zmíněného plexiskla by musel být dlouhý 10cm, aby se v něm vlnění o frekvenci 2 MHz plně transformovalo v teplo. Nevýhoda takto dlouhých absorbérů je v tom, že trvá delší dobu než je dosažen stav tepelné rovnováhy. Z toho důvodu jsou používány kratší absorbéry z vysoce absorpčního materiálu a frekvenční závislost  $\Delta T(l_a)$  je počítána ze vztahu (2.20) zpravidla pro  $k = 1$ ,  $m = 1$ ,  $k = 2$ . Tento vztah s dostatečnou přesností popisuje tepelný nárůst  $\Delta T(l_a)$  přes celý frekvenční rozsah 1 – 20 MHz [3].

Senzor je tedy tvořen válcovým kontejnerem, který obsahuje absorbér. Absorbér je tepelně izolován od vnějšího prostředí a pouze čelní strana absorbéru je v kontaktu s vodou v měřicí vaně.  $\Delta T(l_a)$  je dána rozdílem teplot  $T_r$  a  $T_f$ , které jsou měřeny pomocí termistorů. Teplota  $T_r$  je měřena termistorem umístěným uprostřed zadní strany absorbéru.  $T_f$  je teplota vody v měřicí vaně [3].



Obr 2.3: Jednovrstvý termoakustický senzor

### 2.2.3 Jednovrstvý senzor s kmitočtově nezávislou detekcí výkonu

Tento typ senzoru řeší nevýhody obou předchozích typů. Tedy rozdíl akustických impedancí u dvouvrstvého senzoru a výpočet frekvenční závislosti u jednovrstvého senzoru.

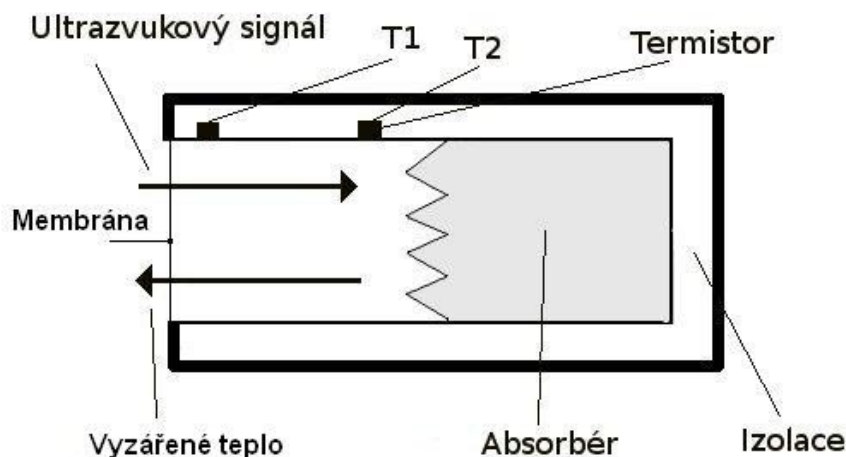
Když umístíme tento senzor do uzavřené pole, signál nejprve projde krátkou vzdáleností v tepelně izolovaném válci, který obsahuje stejné medium jako je v okolí senzoru. Potom signál vstoupí do absorbéru, kde je kompletně transformován v teplo. Předpokládáme, že činitel přenosu akustické intenzity  $D$  na rozhraní, tvořeném prostředími uvnitř izolovaného válce a absorpčním materiálem, je roven jedné ( $D = 1$ ), pak teplo  $dQ/dt$  produkované absorbérem za jednotku času je rovno uzavřenému výkonu  $N_0$ . Pokud je tepelná izolace válce dokonalá a činitel absorpce prostředí uvnitř válce zanedbatelně malý, je teplo  $dQ/dt$ , ve stavu tepelné rovnováhy shodné s vyzařovaným teplem  $\dot{Q}$  procházejícím tepelně izolovaným médiem [4]:

$$N_0 = \frac{dQ}{dt} = \dot{Q} = \lambda_p A \frac{T_1 - T_2}{\Delta x}, \quad (2.22)$$

kde  $(T_1 - T_2)/\Delta x$  je tepelný gradient,  $\lambda_p$  je tepelná vodivost prostředí vnitřního válce [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] a  $A$

je příčný průřez tepelně izolovaného media [ $\text{m}^2$ ], ve kterém se šíří uzv vlna směrem k absorbéru.  $T_1$  a  $T_2$  jsou teploty měřené termistory [K] a  $\Delta x$  je rozdíl vzdáleností mezi termistory [m] [4].

Mediem bývá voda a povrch přední strany absorbéru, který je tvořen vysoce absorpčním materiálem, má pyramidovou strukturu. To vše je uloženo ve válcovém kontejneru. Velmi slabá, akusticky propustná membrána zabraňuje tomu, aby voda z vnějšku senzoru (měřící vany) pronikla dovnitř senzoru (tepelně izolovaného válce). Výsledky měření uzv výkonu pomocí termoakustických senzorů se liší od výsledků získaných metodou využívající tlaku záření asi o 3% [4].



Obr 2.4: Jednovrstvý termoakustický senzor s kmitočtově nezávislou detekcí výkonu

#### 2.2.4 Tepelná čidla pro termoakustický senzor

V následující části se pokusíme popsat čidla pro termoakustický senzor, jejich konstrukci a vlastnosti.

##### Termoelektrické články

Jednou z velmi používaných metod měření teplot s velmi širokými teplotními intervaly je měření pomocí termočlánků. K převodu teploty na elektrické napětí se využívá termoelektrického (Seebeckova) jevu. Termočlánek tvoří vodivé spojení dvou různých vodivých nebo polovodičových materiálů, u kterých stejná změna teploty vyvolá různou změnu odporu a tím vznikne termoelektrické napětí [5]:

$$U_E = A + B \Delta t + C \Delta t^2, \quad (2.23)$$

|              |                                                |
|--------------|------------------------------------------------|
| kde je $U_E$ | termoelektrické napětí [V],                    |
| $A, B, C$    | konstanty závislé na použité dvojici kovů [-], |
| $\Delta t$   | rozdíl teplot mezi dvěma kovy [°C].            |

Ve velmi malém rozsahu se dá termoelektrické napětí linearizovat a vyjádřit vztahem[7] :

$$U_E = \alpha \cdot \Delta t, \quad (2.24)$$

kde je  $\alpha$  koeficient úměrnosti (Seebeckův koeficient) [ $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ] .

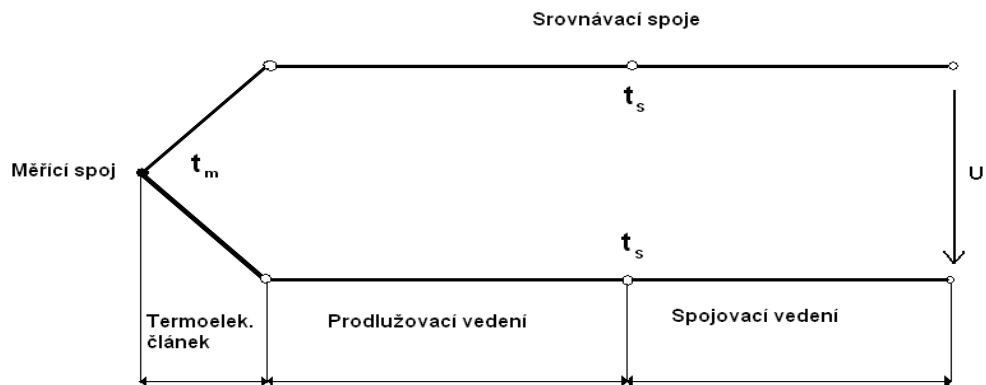
Aktivní konec termočlánku se nazývá horký (měřicí), druhý konec se nazývá studený, a je nutné jej udržovat při konstantní teplotě. Výsledné termoelektrické napětí je dáno rozdílem napětí na horkém a studeném konci, a pakliže dodržíme dostatečnou stabilitu studeného konce, bude výsledné termoelektrické napětí úměrné pouze teplotě na měřicím konci. Teplota studeného konce termočlánku bývá obvykle udržována na 0 °C, 20° C, 25 °C, případně 50 °C a to vhodným termostatem nebo elektronicky. Závislost termoelektrického napětí termočlánku však není lineární, a proto se jako termočlánky vybírají ty dvojice materiálů, které mají závislost termoelektrického napětí na teplotě v daném intervalu teplot co možná nejlineárnější, mají vysokou citlivost termoelektrického napětí, jsou fyzikálně stabilní a odolné v daném pracovním prostředí a dají se zpracovat na vodič (drát) potřebných rozměrů .[5]

Výhodou termočlánků je, že nepotřebují napájecí zdroj, tedy nevzniká na nich ohřev měřicím proudem, dále jejich jednoduchost, rychlá odezva a velký teplotní rozsah (-200 °C až 3000 °C), který je ale pro náš termoakustický senzor zbytečný. Nevýhodou je nižší přesnost, nižší reprodukovatelnost a velmi často i nutnost kompenzace termoelektrického napětí „studeného“ konce. Příklady některých termočlánků jsou v tab. 1. [5]

*Tabulka 1: Přehled termočlánků.*

| Označení | Vodič                 |                    | Přibližný teplotní koeficient |       |        | Rozsah použitelnosti |              |
|----------|-----------------------|--------------------|-------------------------------|-------|--------|----------------------|--------------|
|          | Kladný                | Záporný            | 100°C                         | 500°C | 1000°C | Trvale               | Krátkodobě   |
| K        | Chromel Ni – Cr       | Alumel Ni – Al     | 42                            | 43    | 39     | 0 až 1100            | -185 až 1300 |
| T        | Měď Cu                | Konstantan Cu – Ni | 46                            | /     | /      | -185 až 300          | -250 až 400  |
| J        | Železo Fe             | Konstantan Cu – Ni | 54                            | 56    | /      | 20 až 700            | -180 až 750  |
| N        | Nicrosil Ni – Cr – Si | Nisil Ni – Si      | 30                            | 38    | 38     | 0 až 1150            | -270 až 1300 |
| E        | Chromel Ni – Cr       | Konstantan Cu – Ni | 68                            | 81    | /      | 0 až 800             | -40 až 900   |
| R        | Slitina Pt – 13%Rh    | Platina Pt         | 8                             | 10    | 11     | 0 až 1600            | 0 až 1700    |
| S        | Slitina Pt – 10%Rh    | Platina Pt         | 7                             | 10    | 11     | 0 až 1700            | 0 až 1700    |
| B        | Slitina Pt – 30%Rh    | Platina Pt         | 1                             | 5     | 9      | 0 až 1800            | 0 až 1800    |

Schématické znázornění termočlánku je na obr. (2.5):

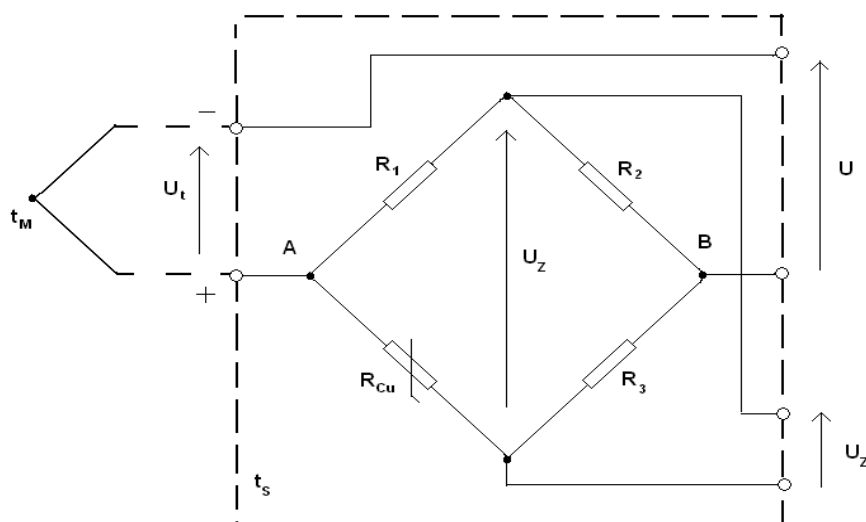


Obr. 2.5 : Termočlánek;  $t_m$  měřená teplota,  $t_s$  srovnávací teplota.

Zapojení termočlátku v obvodu - kompenzační krabice [6]:

$$\frac{dU}{dt_s} = -U_z \frac{R_1}{(R_1 + R_{Cu})^2} \frac{dR_{Cu}}{dt_s} \quad (2.25)$$

Jedná se o sériové zapojení termoelektrického článu a odporového můstku. V jedné větvi můstku je teplotně závislý odpor  $R_{Cu}$ . Výstupní napětí můstku se superponuje k napětí termočlánu.  $U_z$  je kompenzační napětí, které je úměrné odchylce teploty srovnávacího spoje. [6]



Obr. 2.6: Kompenzační krabice;  $R_{cu}$  - kompenzační odpor,  $t_m$  - měřená teplota,  $t_s$  - srovnávací teplota,  $U_z$  - kompenzační napětí.

## Termistor

Termistory patří mezi odporové teplotní snímače a lze je realizovat ve velmi malých rozměrech. Měřicí rozsah se obvykle pohybuje od  $-60$  do  $+200$  °C. Podle provedení je rozdělujeme na tyčinkové, destičkové a perličkové, a podle závislosti napětí na teplotě na PTC (Positive Temperature Coefficient) - hodnota elektrického odporu roste se vzrůstající teplotou, NTC (Negative Temperature Coefficient) - hodnota elektrického odporu klesá s rostoucí teplotou. Závislost odporu na teplotě lze pro více užívaný NTC termistor popsat exponenciální funkcí (2.26) [5]:

$$R = R_0 \exp\left(-B\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right), \quad (2.26)$$

kde  $B = W_a/k$ . Veličina  $R_0$  [Ω] je odpor termistoru při referenční teplotě  $T_0$  [°C],  $W_a$  představuje aktivační energii a  $k$  Boltzmannovu konstantu.

Výhodou termistoru ve srovnání s odporovými teploměry je vysoká závislost odporu na teplotě, malé až nepatrné rozměry a tím i rychlá odezva. Nevýhodou je nelineární závislost odporu na teplotě, nižší stabilita a reprodukovatelnost a menší rozsah použitelnosti [7].

## Odporové snímače teploty

Odporové teploměry využívají změny elektrického odporu s teplotou. Závislost odporu na teplotě je pro malé rozsahy teplot téměř lineární [7]:

$$R_t = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta t), \quad (2.27)$$

kde

$$\alpha = \frac{(R_{100} - R_0)}{100 \cdot R_0} \quad [\text{K}^{-1}] \quad (2.28)$$

V oblasti záporných teplot Celsiovy stupnice, platí vztah [5] :

$$R_t = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta t + \beta \cdot \Delta t^2 + \gamma (\Delta t - 100)) \quad , \quad (2.29)$$

kde je  $R_t$  odpor při teplotě  $\Delta t$  [ $\Omega$ ],  
 $R_0$  odpor při teplotě  $0^\circ\text{C}$  [ $\Omega$ ]  
 $\alpha$  lineární teplotní koeficient odporu [ $\text{K}^{-1}$ ],  
 $\beta$  kvadratický teplotní koeficient odporu [ $\text{K}^{-2}$ ],  
 $\gamma$  mocninný teplotní koeficient 3.řádu [ $\text{K}^{-3}$ ],  
(který se uvažuje pro teploty do  $0^\circ\text{C}$ ).

Pro větší rozsahy, pro odhady, anebo běžná technická měření vystačíme s rovnicí [7]:

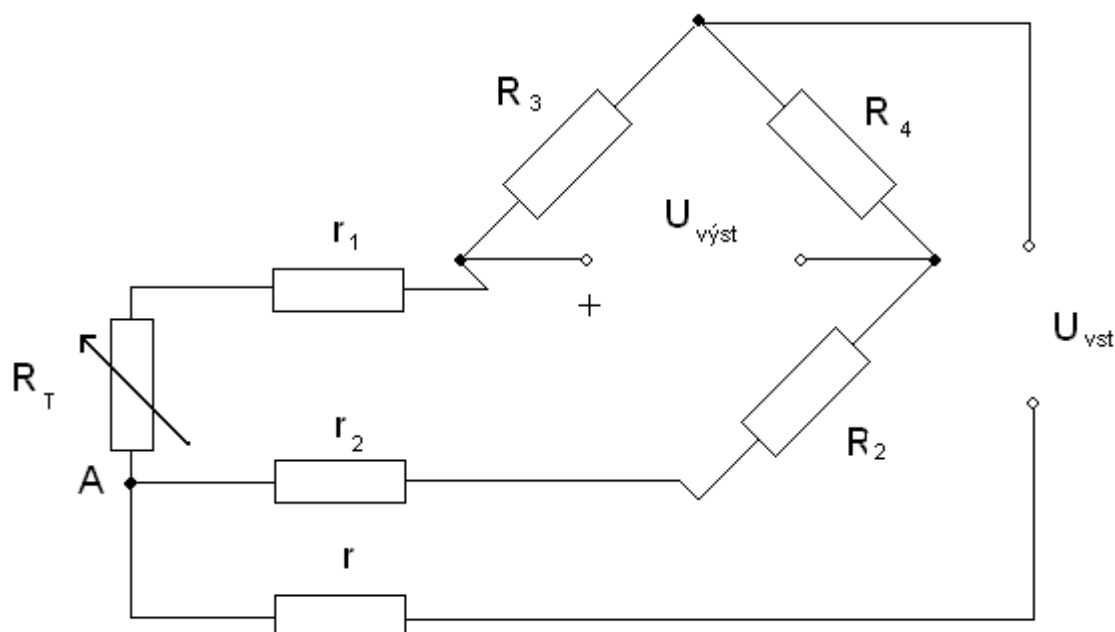
$$R_t = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta t + \beta \cdot \Delta t^2) \quad . \quad (2.30)$$

Jedním ze základních parametrů odporových snímačů je poměr odporu  $R_{100}$  při teplotě  $100^\circ\text{C}$  a  $R_0$ :

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \quad [-]. \quad (2.31)$$

Tento parametr charakterizuje kvalitu odporového teploměru. Materiály, vhodné pro odporové měření teploty, mohou být kovy, ale i oxidové polovodiče. Nejpoužívanějším materiálem pro velmi přesná i laboratorní a technická měření je platina. Platina se vyznačuje chemickou netečností, časovou stálostí a vysokou teplotou tání. Pro čistotu platiny u provozních snímačů teploty (Pt 100) je normou IEC-751 (IECČSN751) předepsán poměr elektrického odporu  $W_{100} = 1,385$ . Senzory se vyrábí pro teploty od  $-200^\circ\text{C}$  do  $1000^\circ\text{C}$ . Vyznačují se velkou teplotní a časovou stabilitou a zejména přesností [5] [7].

Typické zapojení odporových snímačů teploty:



Obr. 2.7 : Wheatstonův můstek s třívodičovým zapojením měřeného odporu.

V současné době se Wheatstonův můstek pro měření změny odporu odporových snímačů teploty používá nejčastěji. Zapojení se třemi vodiči kompenzuje vliv odporů přívodních vodičů. Měřený odpor spočítáme z rovnice pro rovnováhu můstku [7]:

$$(R_1 + r_1) \cdot R_4 = (R_2 + r_2) \cdot R_3, \quad (2.32)$$

takže

$$R_1 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_4} + \frac{r_2 \cdot R_3}{R_4} - r_1. \quad (2.33)$$

K úplné kompenzaci vlivu přívodních vodičů musí být splněna podmínka :

$$\frac{r_2 \cdot R_3}{R_4} - r_1 = 0. \quad (2.34)$$

## Diodové senzory teploty a integrované senzory teploty

Tyto senzory teploty využívají změny vlastností PN přechodu s teplotou. Pro jejich výrobu se používá germaniových diod, křemíkových diod nebo tranzistoru. Jsou časově stálé, mají velmi dobré dynamické vlastnosti a lineární charakteristiku. Germaniové diody se používají převážně k měření nízkých teplot. Pro teploty v rozmezí  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$  se používají křemíkové diody [6].

## Výběr čidla

Pro termoakustický senzor se jeví jako nejvýhodnější tepelné čidlo buď termočlánek, nebo odporový teplotní senzor např. Pt100. Na termočlánek nevzniká chyba měření vlivem ohřevu procházejícím proudem, tak jako u odporového čidla. Výstupem termočláneku je napětí a vyznačuje se velkou citlivostí. Odporový senzor, na nízkých teplotách, převádí teplo na změnu odporu téměř lineárně a jeho předností je velká přesnost.

### 3 Experimentální ověření

#### 3.1 Návrh termoakustického senzoru

Pro návrh senzoru vycházíme s teorie k jednovrstvému senzoru s kmitočtově nezávislou detekcí výkonu, která je uvedena výše. Při návrhu technického výkresu (viz. příloha) jsme vycházeli z šířky absorbéru, jako základního rozměru, který je daný a je roven 10 mm. Dále byl dán průměr měřících čidel. Jako měřící čidla byly určeny dva termočlánky Omega s průměrem cca 1 mm. Jeden z termočlánků by měl být umístěn co nejbližší k absorbéru, druhý co nejbližší u vstupu do snímače. Tak bude zajištěn co největší měřený rozdíl teplot  $\Delta T$ . Vzdálenost mezi vstupem senzoru a absorbérem by měla být co nejkratší, abychom co možná nejvíce znemožnili vstupujícímu uzvlnění se odrážet na vnitřních stěnách vnitřního válce senzoru. Odrazy by způsobily nežádoucí útlum vlnění ještě před dopadem uzvlnění na absorbér. Tato vzdálenost (vstup - absorbér) je tedy přibližně rovna vzdálenosti mezi oběma termočlánky. Dále je nutná tepelná izolace vnitřního válce. Ta je zajištěna vzduchem vyplněným prostorem mezi vnitřním a vnějším válcem. Vstup do senzoru je od okolního prostředí izolován membránou z akusticky propustného materiálu (např. slabá vrstva latexu). Materiál absorbéru je běžně používaná absorpční guma. Materiál, ze kterého je senzor vyroben, by měl mít co nejmenší tepelnou vodivost, v našem případě je použit delrin (chemickým označením polyoximethylen, nebo POM). Termoakustický senzor je na obrázku (3.1).



Obr. 3.1 :Termoakustický senzor

### 3.2 Měření hydrofonem

Jedná se o nepřímou metodu měření akustické intenzity. Základním parametrem uzv pole měřeným pomocí hydrofonu je akustický tlak. Je to veličina závislá na poloze v uzv poli a na čase. Pohybem hydrofonu v měřeném poli hledáme poslední maximum tohoto tlaku (ohnisko), resp. maximální hodnotu napětí, které zobrazujeme osciloskopem, a toto napětí přepočítáváme na tlak z následujícího vzorce [2]:

$$p = \frac{U}{M} , \quad (3.1)$$

kde je  $p$  hledaný tlak [Pa],  $U$  je amplituda napětí měřená osciloskopem [V] a  $M$  je citlivost hydrofonu [V/Pa].

Vzdálenost posledního maxima v ose ultrazvukového měniče je dána vztahem [1] :

$$L = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad (3.2)$$

kde  $L$  je vzdálenost posledního maxima tlaku [m],  $D$  je průměr ultrazvukového měniče [m] a  $\lambda$  je vlnová délka [m].

Intenzita a výkon ultrazvuku jsou úměrné druhé mocnině akustického tlaku. U kontinuálního ultrazvuku se setkáváme hlavně s  $I_{SA}$  a  $I_{SP}$ , tj. s intenzitou prostorově průměrnou a špičkovou. U pulzně vysílaného ultrazvuku se zajímáme o hodnoty intenzit  $I_{SPPA}$  (prostorově špičková - pulzně průměrná),  $I_{SPTA}$  (prostorově špičková – časově průměrná) a  $I_{SATA}$  (prostorově průměrná – časově průměrná).  $I_{SPPA}$  je maximální (špičková) pulzní intenzita vztažená k průměrné době pulzů,  $I_{SPTA}$  je špičková pulzní intenzita vztažená k době opakovací periody pulzů a  $I_{SATA}$  je střední (průměrná) intenzita vztažená k době opakovací periody pulzů [2] [8] :

$$I_{SPTA} = \frac{I_{TA}}{S} \cdot \frac{I_{SP}}{I_{SA}} , \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.3)$$

kde je  $I_{TA}$  akustická intenzita na výstupu sondy [ $\text{W/m}^2$ ] ,  $S$  je plocha sondy [ $\text{m}^2$ ] a  $I_{SP}/I_{SA}$  je stupeň fokusace (poměr intenzity v ohnisku k intenzitě na povrchu sondy)  $I_{SP}$  špičková intenzita kontinuálního ultrazvuku [ $\text{W/m}^2$ ],  $I_{SA}$  průměrná intenzita kontiniálního ultrazvuku [ $\text{W/m}^2$ ].

Pro  $I_{SPPA}$  platí [2]:

$$I_{SPPA} = \frac{\int_{t_i} p^2 dt}{Z_0 \cdot t_i} = \frac{\int_{t_i} U^2 dt}{Z_0 \cdot t_i \cdot M^2} , \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.4)$$

kde  $t_i$  je doba trvání impulzů [s] a  $Z_0$  je akustická impedance vody [ $\text{Pa.s/m}$ ].

Pro  $I_{SPTA}$  platí [2]:

$$I_{SPTA} = \frac{\int_T p^2 dt}{Z_0 \cdot T_r} = \frac{\int_T U^2 dt}{Z_0 \cdot T_r \cdot M^2} = \frac{I_{SPPA} \cdot t}{T_r} , \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.5)$$

kde  $T_r$  je opakovací perioda pulzů [s].

Pro  $I_{SATA}$  platí [2]:

$$I_{SATA} = \frac{\int_A I_{SPTA} dA}{A} \quad , \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.6)$$

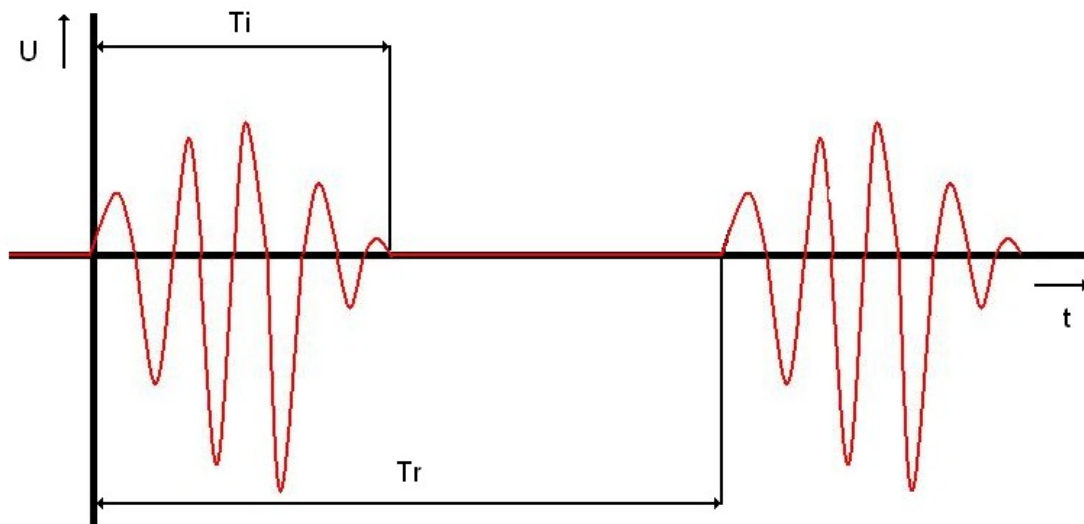
kde  $A$  [ $\text{m}^2$ ] je plocha na kterou dopadá (prochází) ultrazvukové vlnění.

Akustický výkon pak můžeme vyjádřit pomocí vzorce [2]:

$$N = I_{SATA} \cdot A \quad . \quad [\text{W}] \quad (3.7)$$

Pokud je  $I_{SPTA}$  na ploše na kterou vlnění dopadá konstantní a pokud je šířka fokusační oblasti rovna této ploše, můžeme výpočet akustického výkonu  $N$  zjednodušit a říct, že intenzita  $I_{SPTA}$  se rovná intenzitě  $I_{SATA}$ . Akustický výkon je pak dán vztahem:

$$N = I_{SPTA} \cdot A \quad . \quad [\text{W}] \quad (3.8)$$



Obr. 3.2 : Příklad průběhu napětí.

### 3.2.1 Postup měření hydrofonem

Měření probíhá ve vaně naplněné vodou, která je po vnitřních stranách obložená absorpčním materiálem. Absorpční materiál tlumí případné odrazy ultrazvuku na stěnách vany a tím brání dopadům odražených uzv vln na hydrofon a zkreslení měření. Uvnitř této vany je naproti sobě ve vzdálenosti 9 cm umístěn hydrofon a zdroj ultrazvuku - ultrazvukový zobrazovací systém VINGMED Sound . Kmitočet vyzařovaného ultrazvuku, tedy pracovní frekvence, je 2,2 MHz a jeho intenzita je nastavená na maximum, tedy cca 900  $\text{mW/cm}^2$ . Teplota vody v měřící vaně je přibližně 20 °C. Pohybem hydrofonu se snažíme najít maximum vyzařované intenzity. Výsledky měření pak zpracovává osciloskop a zaznamenává počítač. Sestava pro měření je na obr (3.3).



*Obr. 3.3: Sestava pro měření hydrofonem - výstup hydrofonu, USBscope 50, USB kabel, PC s průběhem měřeného napětí.*

### **Použité přístroje**

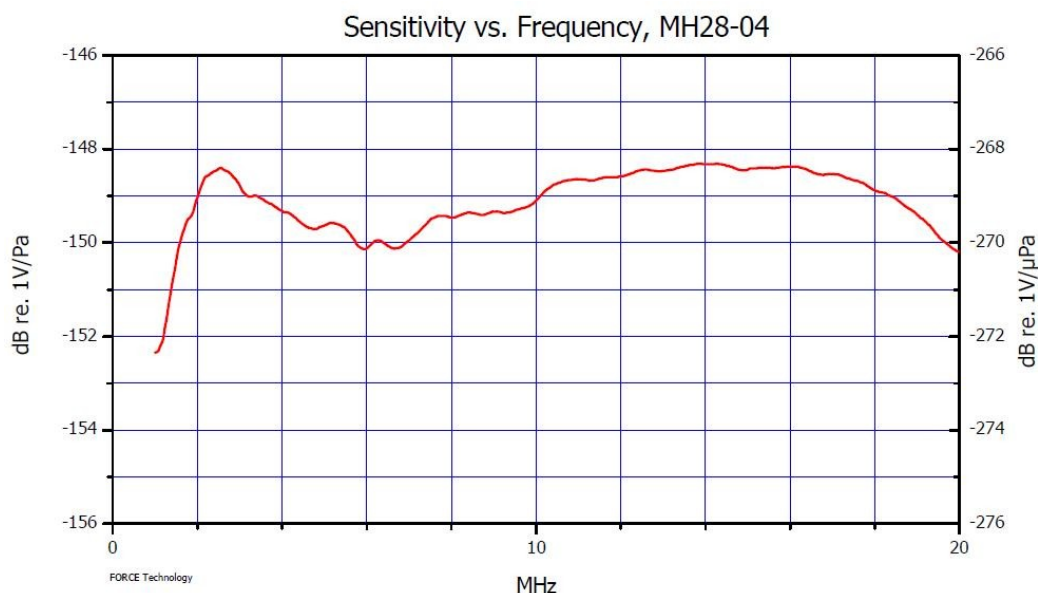
- Ultrazvukový zobrazovací systém VINGMED Sound se sondou FPA 3,5MHz
- Hydrofon MH-28 s předzesilovačem
- Měřicí vana
- USBscope50 od firmy Elan Digital Systems
- Počítač

### **3.2.2 Měření**

Hydrofon byl umístěn v měřicí vaně ve vzdálenosti 9 cm od zdroje ultrazvuku ( mimo ohnisko). Sestava pro měření (viz obr. (3.3)) je složená z hydrofonu, předzesilovače, osciloskopu a PC. Odečteme od změřeného napětíového průběhu zisk předzesilovače:

$$U = \frac{U_{ZES}[V]}{G_U[V]} \quad [V] \quad (3.9)$$

Napětí převedeme na tlak pomocí vztahu (3.1) a křivky závislosti citlivosti  $M$  [V/Pa] na kmitočtu, která je dána výrobcem hydrofonu. Hodnotu citlivosti odečítáme pro kmitočet 2,2 MHz, na kterém vysílá ultrazvukový měnič. Tato hodnota je 148,6 dB vztažených na 1V/Pa.



Obr. 3.4: Graf závislosti citlivosti na frekvenci hydrofonu.

Přepočteme citlivost  $M$  z decibelové míry a dosadíme do vzorce (3.1):

$$p = \frac{U}{M} \quad [\text{Pa}]$$

Špičková pulzní intenzita vztažená k průměrné době pulzů je dána vtahem (3.4):

$$I_{SPPA} = \frac{\int_0^{t_i} p^2 dt}{Z_0 \cdot t_i} \approx \frac{\sum_0^{t_i} (p^2 \cdot \frac{1}{f_s})}{Z_0 \cdot t_i} = 14027 \text{ mW/cm}^2$$

kde je  $Z_0$  akustická impedance vody  $1,48 \cdot 10^6 \text{ Pa.s/m}$ ,  $f_s$  je vzorkovací kmitočet  $50 \cdot 10^6 \text{ Hz}$  a  $t_i$  [s] je doba trvání impulzu odhadnutá na 150 vzorků. Tedy :

$$t_i = \frac{150}{f_s} \quad [\text{s}]$$

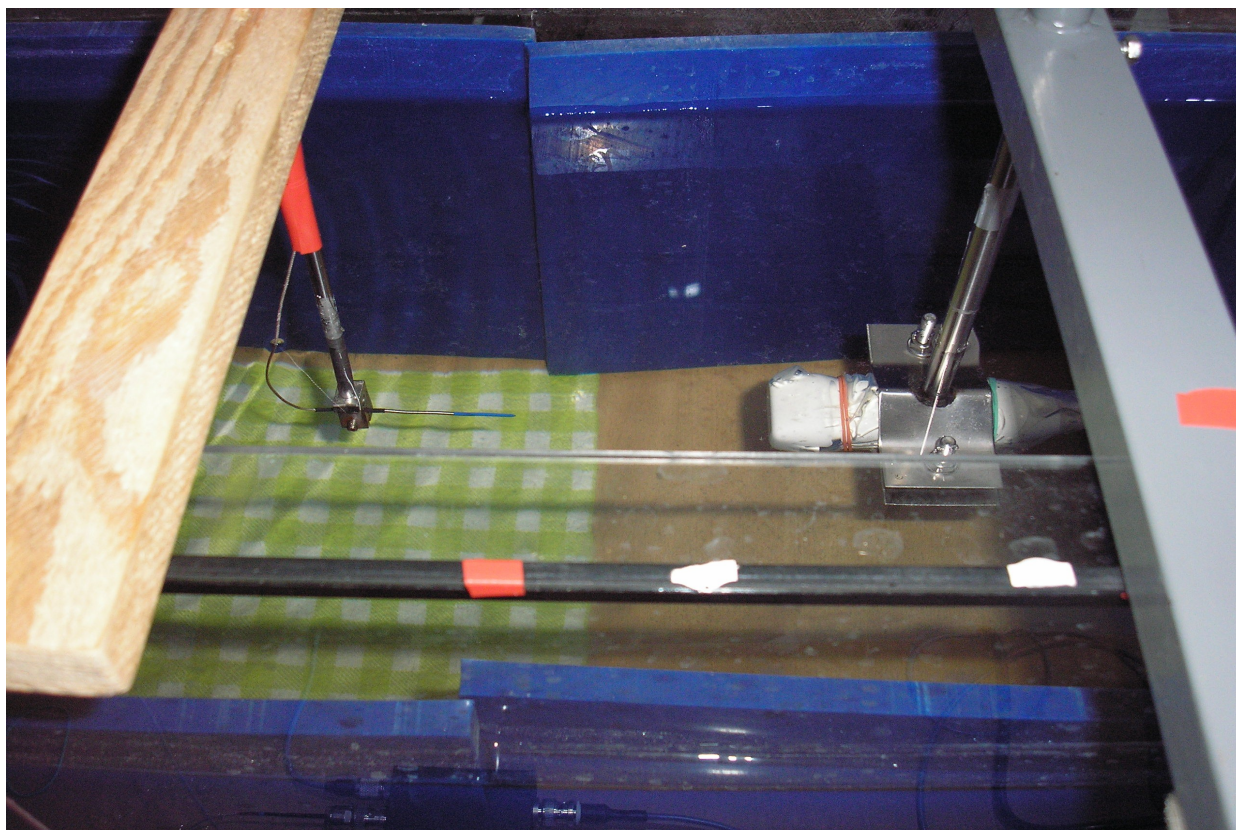
Špičková pulzní intenzita vztažená k době opakovací periody pulzů je dána vztahem (3.5):

$$I_{SPTA} = \frac{\int_0^{T_r} p^2 dt}{Z_0 \cdot T_r} \approx \frac{\sum_0^{T_r} (p^2 \cdot \frac{1}{f_s})}{Z_0 \cdot T_r} = 191 \text{ mW/cm}^2$$

kde je  $T_r$  [s] opakovací perioda.

V našem případě považujeme rozložení  $I_{SPTA}$  na ploše příčného průřezu absorbéru za konstantní. Šířka fokusační oblasti je 5 mm. Průměr absorbéru je 11 mm a pro tyto podmínky zjednodušíme výpočet akustického výkonu podle vztahu (3.8):

$$N = I_{SPTA} \cdot A = 191 \cdot 0,95 = 182 \text{ mW}$$



Obr. 3.5: Měření hydrofonem.

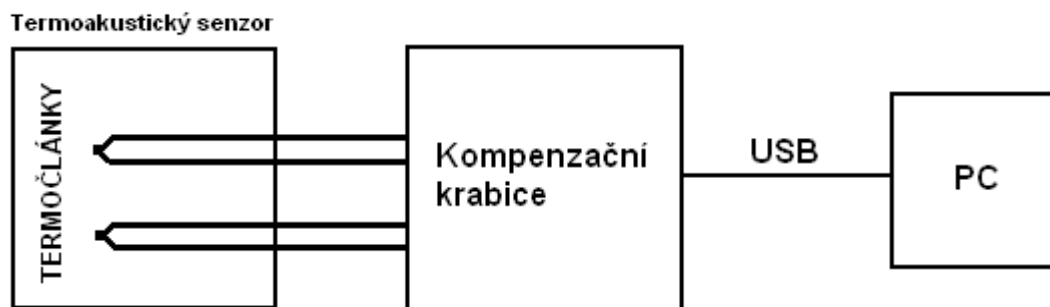
### 3.3 Měření termoakustickým senzorem

Jedná se o přímou metodu měření akustického výkonu. Stejně jako při měření pomocí hydrofonu, musí být senzor umístěn v ohnisku vysílaného ultrazvuku uvnitř měřicí vany naplněné vodou. Jak bylo uvedeno v teoretické části pro termoakustický senzor (2.2.3), tento snímač měří rozdíl teplot, který pak dosazujeme do vztahu (2.22) pro výpočet akustického výkonu. Tyto hodnoty výkonu poté vydělíme plochou snímače, na kterou uzv vlnění dopadá, a obdržíme tak i hodnoty intenzity ultrazvuku. Měření provádíme po dobu, kdy je  $\Delta T$  přibližně konstantní. Z průběhů závislosti měřeného akustického výkonu a intenzity na čase, získáváme maximální hodnoty tohoto výkonu a intenzity.

#### 3.3.1 Postup měření termoakustickým senzorem

Měření probíhá ve stejných podmínkách a uzv má stejné parametry jako při měření s hydrofonem. Stejně tak i poloha senzoru uvnitř měřicí vany je stejná jako byla poloha hydrofonu. Rozdíl teplot  $\Delta T$  je měřen pomocí termočlánků Omega. Výsledky jsou zpracovány počítačem.

Sestava pro měření je na obr (3.5).



Obr. 3.5: Blokové schéma sestavy pro měření s termoakustickým senzorem.

### Použité přístroje

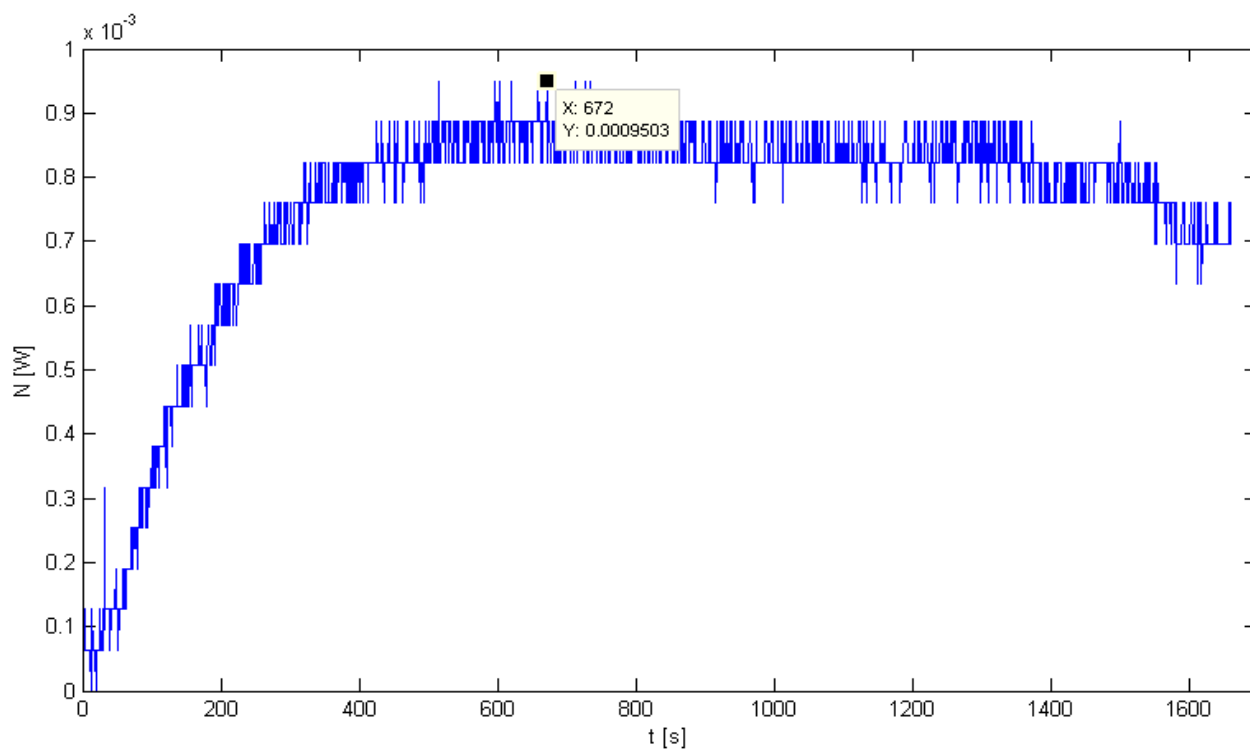
- Ultrazvukový zobrazovací systém VINGMED Sound se sondou FPA 3,5MHz
- Termočláanky Omega s kompenzační krabicí a softwarem
- Termoakustický senzor
- Měřící vana
- Počítač

#### 3.3.2 Měření

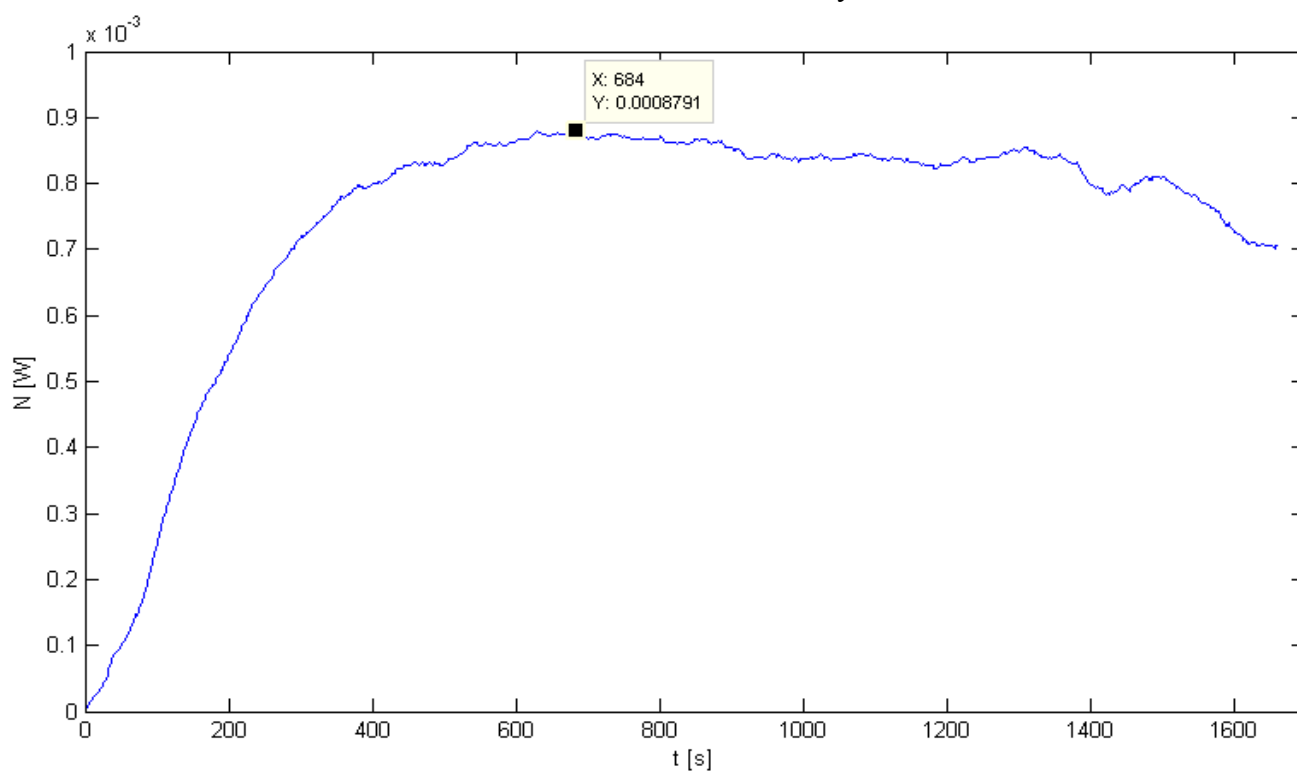
Sestava pro měření termoakustickým senzorem se skládá z termočláanky Omega a z PC. Senzor je ve stejné vzdálenosti od zdroje uzv jako hydrofon. Pomocí termočláanky byl změřen rozdíl teplot, který vznikl absorpcí ultrazvuku v absorbéru. Výkon uzv zjistíme po dosazení tohoto tepelného rozdílu do vzorce (2.22):

$$N = A \cdot \lambda_p \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad [\text{W}]$$

kde  $A$  je plocha příčného průřezu absorbéru (vstupu senzoru)  $9,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ ,  $\lambda_p$  je tepelná vodivost vody  $0,6 \text{ W/K.m}$ ,  $\Delta x$  je vzdálenost mezi termočláanky  $0,009 \text{ m}$ .



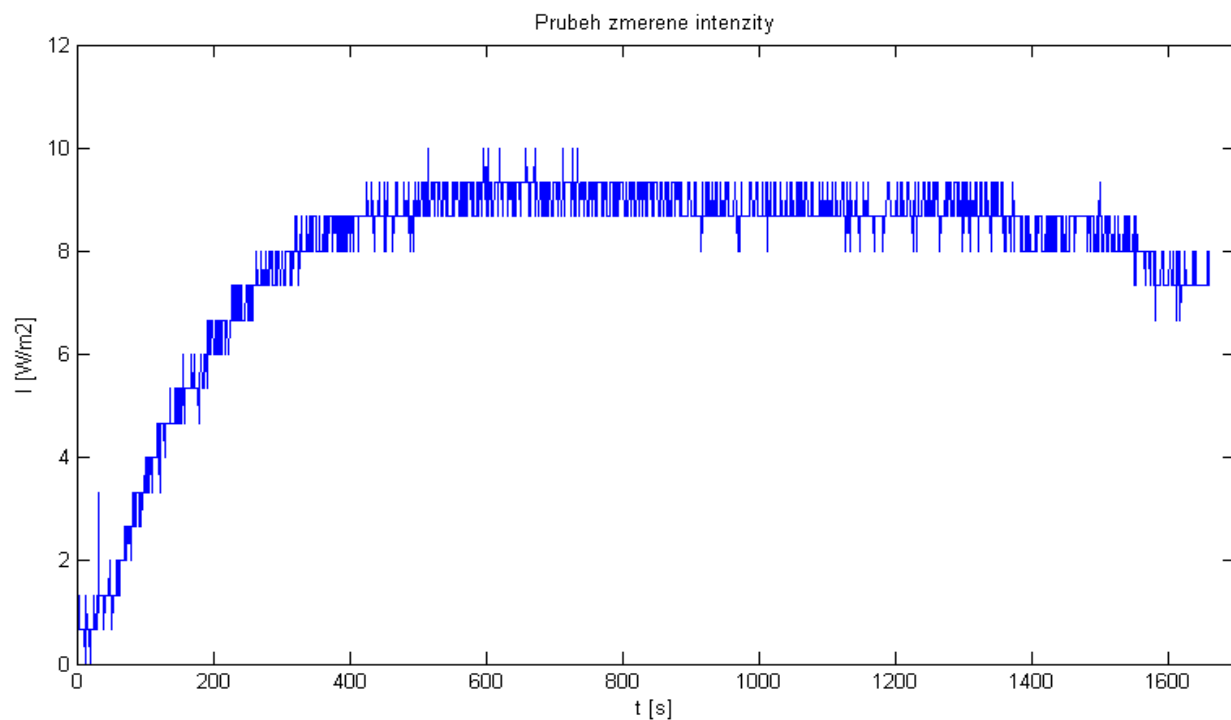
Obr. 3.6: Průběh změřeného výkonu



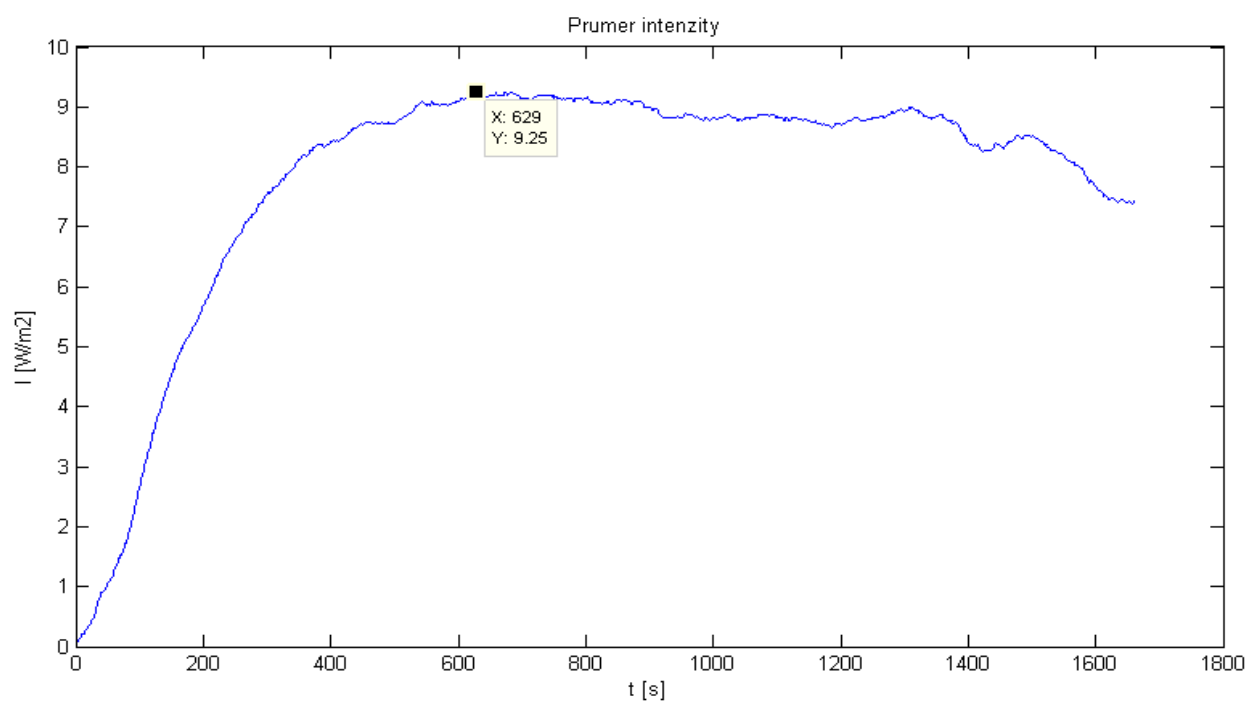
Obr. 3.7: Průměrný (vyhlazený) průběh výkonu.

Intenzitu jako výkon vztahený k ploše (příčného průřezu absorbéru) obdržíme ze vzorce:

$$I = \frac{N}{A} \cdot \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.10)$$



Obr. 3.8 : Průběh změřené intenzity.



Obr. 3.9 : Průměrný průběh intenzity.

### 3.4 Výsledky

Hydrofon :  $I_{SPPA} = 14027 \text{ mW/cm}^2$   
 $I_{SPTA} = 191 \text{ mW/cm}^2$   
 $N = 182 \text{ mW}$

Termoakustický senzor :

- při maximální vysílané intenzitě -  $I_{\max} = 0,925 \text{ mW/cm}^2$   
-  $N_{\max} = 0,878 \text{ mW}$
- pro pokles vysílané intenzity o 3dB -  $I_{\max} = 0,876 \text{ mW/cm}^2$   
-  $N_{\max} = 0,833 \text{ mW}$
- pro pokles vysílané intenzity o 6dB -  $I_{\max} = 0,688 \text{ mW/cm}^2$   
-  $N_{\max} = 0,649 \text{ mW}$

## 4 Dosažené výsledky

Z výsledků měření je na první pohled patrné, že neodpovídají vysílané intenzitě zdroje, tedy intenzitě  $900 \text{ mW/cm}^2$ . Při poklesu intenzity vysílaného uzv vlnění o 3dB měla poklesnout měřená hodnota na polovinu, při poklesu o 6dB na jednu čtvrtinu hodnoty měřené při maximální vysílané intenzitě. Tomuto předpokladu naměřené hodnoty neodpovídají a klesají pouze mírně, což vypovídá o nízké citlivosti a malé přesnosti navrhovaného řešení termoakustického senzoru.

Přesnost měření zvětšíme kalibrací. Pomocí rezistoru, který by byl vně absorbéru, můžeme absorbér zahřívát stejně velkým elektrickým výkonem, jako je výkon, který vysílá zdroj uzv vlnění. Teplo, které absorbér vyzáří, měříme pomocí termočlánků a přepočteme na výkon. Poměr elektrického a změřeného výkonu nám pak udává kalibrační konstantu. Touto konstantou pak můžeme násobit měřený akustický výkon a získat tak přesnější hodnoty[4].

Další způsob zpřesnění měření spočívá ve změření kalibrační křivky, kdy provedeme řadu měření akustického výkonu, nějakou přesnou metodou, a z výsledků měření vytvoříme graf, který bude zobrazovat různé velikosti změřeného akustického výkon v závislosti na různých pracovních frekvencích sondy. Pomocí této křivky můžeme upravovat výsledky měření termoakustickým senzorem.

Jak hydrofon, tak i termoakustický snímač nebyly umístěny v ohnisku vyzařované intenzity, protože samotná metoda měření senzorem neumožňuje získávat okamžité výsledky měření a tím komplikuje hledání správného umístění senzoru. Jak jsme uvedli výše měření má probíhat v posledním maximu tlaku na ose vyzařovaného svazku ve vzdálenosti dané vztahem (3.2).

Celé měření termoakustickým senzorem je závislé na dokonalé absorpci absorbéru, respektive na tom, aby se energie uzv vlny plně přeměnila v teplo a na rozhraní voda – absorbér nedocházelo k odrazu. Odraz vlnění je dán vzorcem :

$$R = \left( \frac{1-m}{1+m} \right)^2 \quad \text{kde} \quad m = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (4.1), (4.2)$$

kde  $R$  je koeficient reflexe,  $Z_1$  je akustická impedance prostředí, ve kterém se vlna šíří a  $Z_2$  je akustická impedance prostředí, na které vlnění dopadá [ $\text{Pa.s.m}^{-1}$ ]. Tento vztah platí pro kolmo dopadající vlnu na rozhraní obou prostředí. Vzhledem k tomu, že akustická impedance vody se nerovná impedanci absorbéru, musí na tomto rozhraní docházet k odrazu. Tento odraz lze potlačit vytvarováním jehlanové struktury na přední straně absorbéru, kdy vzdálenost mezi jehlany by měla být menší než vlnová délka vlnění a výška jehlanů by měla být větší než čtvrtina nejdelší vlny dopadající na absorbér. Tato úprava je ale konstrukčně náročná a v našich podmínkách nelze realizovat. Vlna, která projde do absorbéru, jím postupuje tak dlouho, dokud se její energie netransformuje v teplo. Pokud je ale absorbér příliš krátký, vlna se na jeho konci může odrazit zpět (na akusticky nepropustné ploše za absorbérem) a měnit svou energii na teplo postupem v opačném směru, ale tím také vlna může absorbér na rozhraní voda – absorbér opustit. Délka absorbéru je daná vztahem (2.21):

$$l_a \geq \frac{-\ln(0,001)}{\alpha_a},$$

kde  $\alpha_a$  koeficient absorpce a  $l_a$  je délka absorbéru. Tento koeficient je kmitočtově závislý, s klesajícím kmitočtem uzv vlnění je zapotřebí delší absorbér. Použitý absorbér má délku 10 mm, pak z uvedeného vzorce vyplývá, že materiál absorbéru musí mít koeficient absorpce alespoň  $6,9 \text{ cm}^{-1}$ , aby se v něm vlnění plně transformovalo.

Nežádoucí útlum vznikl na oddělovací membráně. Ta by měla být dokonale akusticky a tepelně propustná. V našem případě jsme jako membránu využili běžný potravinářský sáček, jehož vlastnosti se požadovaným vlastnostem membrány pouze vzdáleně blíží. Teplo vyzařované absorbérem nemůže zcela opustit vnitřní prostor senzoru a zahřívá termočlánek  $T_1$ , tím se zmenšuje rozdíl teplot  $\Delta T$  a hodnota změřeného akustického výkonu je menší, jak vyplývá ze vztahu (2.22).

Měření termoakustickým senzorem lze zefektivnit a zrychlit zmenšením plochy jeho příčného průřezu, protože zdroj ultrazvuku vysílá v úzké fokusační oblasti a tedy zbytečně zahřívá velký objem absorbéru a tím prodlužuje měření. Šířka fokusační oblasti ve směru kolmém na tomografickou rovinu je cca 5 mm pro pokles intenzity o 6 dB, tzn. že na okrajích tohoto pásma má intenzita čtvrtinu hodnoty maxima. Průměr absorbéru je 11 mm. Výhodnější by byl tedy průměr 5 mm. Pak by i zjednodušení pro výpočet akustického výkonu měřeného hydrofonem  $N = I_{\text{SPTA}} \cdot A$  bylo přesnější, protože by se příčný průřez absorbéru rovnal šířce fokusační oblasti.

## 5 Závěr

Pomocí termoakustického snímače ultrazvukového výkonu se nám podařilo přímým způsobem změřit hodnoty akustického výkonu. Jednalo se o první experimentální měření a tomu také odpovídají jeho nepřesné výsledky. Změřené hodnoty termoakustickým snímačem a hydrofonem se liší až o dva řády. Pokusili jsme se popsat důvody, proč k tak velké odchylce došlo a navrhnout úpravy. Nízká přesnost měření termoakustického senzoru je kompenzována jeho výraznou konstrukční jednoduchostí oproti hydrofonu. Zásadní pro zvětšení přesnosti senzoru je jeho kalibrace a upřesnění výsledku měření pomocí kalibrační konstanty. Pro přesnější obraz o přesnosti termoakustického senzoru by bylo zapotřebí uskutečnit ještě řadu dalších měření, ve kterých by se testoval snímač při různých úrovních vyzařovaného akustického výkonu a různých pracovních frekvencích ultrazvukového měniče.

## Literatura

- [1] ROZMAN, J. *Ultrazvuková technika v lékařství*. Skriptum. Brno: FE VUT v Brně, 1979.
- [2] ZISKIN M.C.; LEWIN P.A. *Ultrasonic exposimetry*. CRC Press, Boca Raton, 1993
- [3] FAY, B. ;RINKER, M. *Determination of the Absolute Value of Ultrasonic Power by means of Thermoacoustic Sensor*. *Acustica united with Acta Acustica* 82, pp 274-279 (1996).
- [4] FAY, B.; REIMANN, H.-P. *Thermoacoustic sensors*. In: *Proceeding of the Joint ASA / EAA / DAGA Meeting*. Berlin, 1999.
- [5] SNOPEK, P. *Přesný termostat*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006. 59 s., 12 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce doc. Dr. Ing. Zdeněk Kolka.
- [6] HORELICA, J. *Přístroje pro měření teplot*: bakalářská práce. České Budějovice. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta – Katedra fyziky, 48 s., 1 s. Příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Šerý.
- [7] CIBULKA, I.; HNĚDKOVSKÝ, L.; HYNEK, V. *Zakladni fyzikalně-chemicke veličiny a jejich měření*: učební text. Praha: Ustav fyzikalni chemie Vysoka škola chemicko-technologicka v Praze, 2006. Dostupné z URL: <http://www.vscht.cz/fch>
- [8] UltraContour Science: věda & technologie v pozadí - pohled do laboratoří MedixSysteme, dostupné z URL: <http://www.beneficium.cz/katalog/aestetické-aplikace/ultracontour-medixsysteme/veda--technologie.htm>

## Seznam symbolů, veličin a zkratk

| <b>uzv</b><br><b>POM</b> | <b>ultrazvuk</b><br><b>polyoximethylen</b>  |    |
|--------------------------|---------------------------------------------|----|
| $T\lambda$               | složka napětí                               | 2  |
| $S\mu$                   | složka deformace                            | 2  |
| $c\lambda\mu$            | elastický modul                             | 2  |
| $s\lambda\mu$            | elastická konstanta                         | 2  |
| $E_i$                    | vektor intenzity elektrického pole          | 2  |
| $D_i$                    | vektor indukce elektrického pole            | 2  |
| $d$                      | piezoelektrický modul (vysílací)            | 3  |
| $g$                      | piezoelektrická konstanta (přijímací)       | 3  |
| $e$                      | piezoelektrický koeficient                  | 3  |
| $c$                      | elastický modul                             | 3  |
| $s$                      | elastická konstanta                         | 3  |
| $f$                      | kmitočet vlnění                             | 3  |
| $\Gamma$                 | relativní prodloužení                       | 3  |
| $n$                      | řád kmitu                                   | 3  |
| $Q$                      | vyzařované teplo (radiation flow rate)      | 4  |
| $N$                      | akustický výkon                             | 4  |
| $\Delta T$               | rozdíl teplot                               | 4  |
| $\lambda$                | tepelná vodivost                            | 4  |
| $l$                      | délka vrstvy                                | 4  |
| $A$                      | plochu průřezu                              | 4  |
| $D_{1,2}$ a $D_{2,3}$    | jsou činitelé přenosu akustické intenzity   | 4  |
| $dQ/dt$                  | teplo                                       | 4  |
| $\Delta x$               | rozdíl vzdáleností mezi termočlánky         | 4  |
| $\alpha_a$               | koeficient absorpce                         | 6  |
| $l_a$                    | je délka absorberu                          | 6  |
| $U_E$                    | termoelektrické napětí                      | 8  |
| $A, B, C$                | konstanty závislé na použité dvojici kovů   | 8  |
| $\Delta t$               | rozdíl teplot mezi dvěma kovy               | 8  |
| $\alpha$                 | koeficient úměrnosti (Seebeckuv koeficient) | 9  |
| $R$                      | elektrický odpor                            | 11 |
| $W_a$                    | aktivační energie                           | 11 |
| $k$                      | Boltzmannovu konstanta                      | 11 |
| $B$                      | konstata                                    | 11 |
| $R_t$                    | odpor při teplotě $\Delta t$                | 11 |
| $R_0$                    | odpor při teplotě $0^\circ\text{C}$         | 12 |
| $\beta$                  | kvadratický teplotní koeficient odporu      | 12 |
| $\gamma$                 | mocninný teplotní koeficient 3. řádu        | 12 |
| $R_{100}$                | odpor při teplotě $100^\circ\text{C}$       | 12 |
| $W_{100}$                | odporový poměr                              | 12 |
| $p$                      | akustický tlak                              | 15 |

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| $U$ amplituda napětí .....                                          | 15 |
| $M$ citlivost hydrofonu $L$ vzdálenost posledního maxima tlaku..... | 15 |
| $L$ vzdálenost posledního maxima tlaku.....                         | 15 |
| $D$ průměr ultrazvukového měniče.....                               | 15 |
| $\lambda$ vlnová délka.....                                         | 15 |
| $I_{SP}$ špičková intenzita kontinuálního ultrazvuku.....           | 15 |
| $I_{SA}$ průměrná intenzita kontiniálního ultrazvuku.....           | 15 |
| $I_{SPPA}$ prostorově špičková - pulzně průměrná intenzita.....     | 15 |
| $I_{SPTA}$ prostorově špičková - časově průměrná intenzita.....     | 15 |
| $I_{TA}$ akustická intenzita na výstupu sondy.....                  | 15 |
| $S$ je plocha sondy.....                                            | 15 |
| $I_{SP}/I_{SA}$ stupeň fokusace.....                                | 15 |
| $t_i$ je doba trvání impulzů.....                                   | 15 |
| $Z_0$ akustická impedance vody.....                                 | 15 |
| $T_r$ opakovací perioda pulzů.....                                  | 15 |
| $I_{SATA}$ prostorově průměrná – časově průměrná intenzita.....     | 16 |
| $R$ koeficient reflexe.....                                         | 24 |
| $Z_1$ je akustická impedance prostředí ve kterém se vlna šíří.....  | 24 |
| $Z_2$ je akustická impedance prostředí na které vlnění dopadá.....  | 24 |

## Seznam příloh

Příloha 1. Příklad zdrojového kódu v programu Matlab.

1.1 Termoakustický senzor

1.2 Hydrofon

Příloha 2. Technické výkresy.

2.1 Kusovník

2.2 Sestava

2.3 Pouzdro

2.4 Trubka

2.5 Víko 1

2.6 Víko 2