

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**ULTRAZVUKOVÝ PRŮTOKOMĚR**

**2019**

**ŠTĚPÁN DLOUHÝ**



### *Prohlášení*

*Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího bakalářské práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků bakalářské práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.*

*Dne.....*

### *Poděkování*

*Tímto bych chtěl poděkovat panu ing. Petru Bočkovi ze společnosti Amtek, s.r.o. za vstřícný přístup a zapůjčení ultrazvukového průtokoměru Time Delta-C s veškerým potřebným vybavením.*

*Dále bych chtěl poděkovat panu ing. Jaroslavu Buškovi za konzultace a vedení bakalářské práce.*

*V neposlední řadě bych chtěl poděkovat celé své rodině za podporu v průběhu celého studia.*

## ABSTRAKT

Jméno autora: Ing. Štěpán Dlouhý  
Studijní obor: Teoretický základ strojního inženýrství  
Název bakalářské práce: Ultrazvukový průtokoměr  
Rozsah bakalářské práce: 31  
Školní rok vyhotovení: 2018-2019  
Ústav: 12110 Ústav přístrojové a řídicí techniky, FS ČVUT v Praze  
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jaroslav Bušek

Cílem práce je návrh a realizace ultrazvukového průtokoměru. Průtokoměr bude sloužit pro měření průtoku vody s teplotou v rozsahu 10-95°C, v měděné trubce nebo vícevrstvé trubce typu PEX/Al/PEX. Průtokoměr musí být příložný, tj. montovaný z vnější strany potrubí bez jeho přerušování.

## ABSTRACT

Author: Ing. Štěpán Dlouhý  
Study program: Theoretical fundamentals of mechanical engineering  
Title: Ultrasonic flowmeter  
Range: 31  
Academic Year: 2018-2019  
Department: 12110 Department of Instrumentation and Control Engineering  
Tutor: Ing. Jaroslav Bušek  
Keywords: Ultrasonic Flowmeter

The aim of this Bachelor thesis is design and realization of ultrasonic flowmeter. The flowmeter will be used for measurement of water flow rate in temperature range 10-95 °C in copper pipe or in multilayer pipe of type PEX/Al/PEX. The flowmeter must be clamp-on, i.e. mounted from the outside of the pipe without pipe cut off.

# OBSAH

Úvod.....	1
1 Teoretická část.....	2
1.1 Způsoby měření průtoku kapaliny .....	2
1.1.1 Ultrazvukový průtokoměr .....	2
1.1.2 Jiné typy průtokoměrů .....	8
2 Praktická část .....	13
2.1 Výběr průtokoměru a snímačů .....	14
2.2 Testované potrubí.....	16
2.2.1 Výpočet a experimentální ověření rychlosti zvuku u vícevrstvé trubky PEX-b/Al/PEX-b .....	17
2.3 Měřená soustava a technické vybavení experimentu .....	18
2.3.1 Měření závislosti doby přenosu ultrazvukového signálu na rychlosti toku kapaliny .....	23
2.3.2 Měření průtoku na potrubí s izolací.....	29
2.3.3 Ověření přesnosti měření průtokoměru.....	29
Závěr .....	30
Seznam použité literatury .....	32
Klíčová slova.....	33
Seznam obrázků, tabulek a grafů.....	34
Seznam použitých symbolů.....	36
Seznam příloh .....	37

# ÚVOD

V současné době probíhá výstavba nových rodinných domů a to přináší i nový modernější způsob vytápění. V nových, ale i v rekonstruovaných domech je často instalováno teplovodní podlahové topení. Podlahové topení přináší velmi dobré rozložení teploty vzduchu v místnosti. Sálavé teplo, které je vyzařováno podlahovým vytápěním, je příjemnější než teplo vyzařované topnými tělesy. V neposlední řadě je třeba říci, že podlahové topení je úspornější než konvenční otopná tělesa. Instalace a provoz teplovodního topení však přináší mnoha úskalí, která jsou předmětem mnoha diskusí. Teplovodní potrubí je pokládáno na podlahu ve značných délkách, přičemž potrubí je možné jakoliv ohýbat a tvořit tak různé obrazce a zajistit tak maximálně hustou síť podlahového potrubí. Toto potrubí je také možné připojit na konvenční topení nebo například koupelnové otopné žebříky. Nevýhodou podlahového topení je nemožnost provádět dodatečné úpravy, případně opravy pokud je podlahové topení následně zabetonováno. Při rozbíjení betonu by došlo k poškození trubek i samotných nosných rohoží a konstrukce podlahového topení by tak byla definitivně zničena. Je proto nutné věnovat velkou pozornost způsobu instalace a kvalitě provedené práce. Po dokončení pokládky musí instalatér provést několik kontrol. Zásadním krokem je kontrola dostatečného průtoku vody ve všech větvích podlahového topení, aby byla zachována dostatečná distribuce teplé vody a tím samozřejmě i funkčnost celé soustavy topení v rodinném domu. Zde však narážíme na problematiku, jakým způsobem měřit průtok vody v potrubí. Existuje mnoho technik měření průtoku kapaliny jako například magneticko-indukční, hmotnostní, plováčkové, vírové atd. Ty ale vyžadují zásah do měřeného potrubí. Ultrazvukové průtokoměry nabízí možnost měřit průtok kapaliny v potrubí aniž by bylo nutné potrubí nějak rozebírat. Snímače ultrazvukového průtokoměru se přikládají na povrch trubky, kde proudí měřená kapalina a vyhodnocovací jednotka ultrazvukového průtokoměru měří dobu průchodu ultrazvukového signálu. Na základě předchozí kalibrace pak vyhodnotí rychlost prodělení média v potrubí. Ultrazvukové průtokoměry jsou hojně používány v různých průmyslových oborech. Jedná se však o instalace, kde světlost potrubí je větší jak 50 mm. V podlahovém teplovodním potrubí je většinou používána vícevrstvá trubka PEX/Al/PEX. Výrobce těchto trubek nabízí několik rozměrů, přičemž nejmenší potrubí má vnější průměr 16 mm a vnitřní průměr 12 mm.

Bakalářská práce je zaměřena na měření průtoku kapaliny ultrazvukovým průtokoměrem na potrubí PEX/Al/PEX o průměru 16/12 mm a zhodnocení možnosti měření průtoku teplé vody v podlahovém topení neinvazivním způsobem.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

V teoretické části jsou představeny obecné principy měření průtoku kapalin a typy průtokoměrů. U jednotlivých průtokoměrů jsou uvedeny jejich výhody a nevýhody a vhodné oblasti použití.

## 1.1 Způsoby měření průtoku kapaliny

Průtoky kapalin lze měřit mnoha způsoby lišícími se fyzikální podstatou nebo je lze odvodit výpočtem z jiných naměřených veličin. V následujících kapitolách bych se zaměřil pouze na průtokoměry, které se běžně využívají v průmyslové praxi.

### 1.1.1 ULTRAZVUKOVÝ PRŮTOKOMĚR

Ultrazvukové průtokoměry patří do skupiny rychlostních průtokoměrů, které vyhodnocují objemový průtok na základě měření rychlosti proudícího média a znalosti průtočného průřezu [1]. K měření rychlosti se využívá ultrazvukový signál šířící se v proudícím médiu.

#### *Rozdělení ultrazvukových průtokoměrů*

Podle vyhodnocení ultrazvukového signálu se ultrazvukové průtokoměry rozdělují nejčastěji do dvou hlavních skupin:

- průtokoměry s vyhodnocováním doby průchodu signálu (transit-time)
- průtokoměry využívající Dopplerův jev

U každé z těchto skupin lze nalézt další podrobnější způsoby členění. Z hlediska montáže průtokoměru do potrubního systému jsou rozeznávána:

- provedení se smáčenými (zásuvnými) snímači (in-line), které jsou pevnou součástí měřící trubice
- provedení s příložitými snímači (clamp-on), kdy snímače jsou přikládány na stěnu potrubí; v tomto případě jde o bezdotykové měření

#### *Transit-time průtokoměry*

Typický transit-time průtokoměr využívá dva ultrazvukové snímače [1], které fungují jako ultrazvukový vysílač i přijímač. Průtokoměry pracují střídavým vysíláním a přijímáním impulzů zvukové energie mezi dvěma snímači a měřením doby průchodu, kterou potřebuje pro přenos zvuku mezi oběma snímači. Rozdíl měřené doby průchodu je přímo a přesně závislý na rychlosti kapaliny v potrubí.

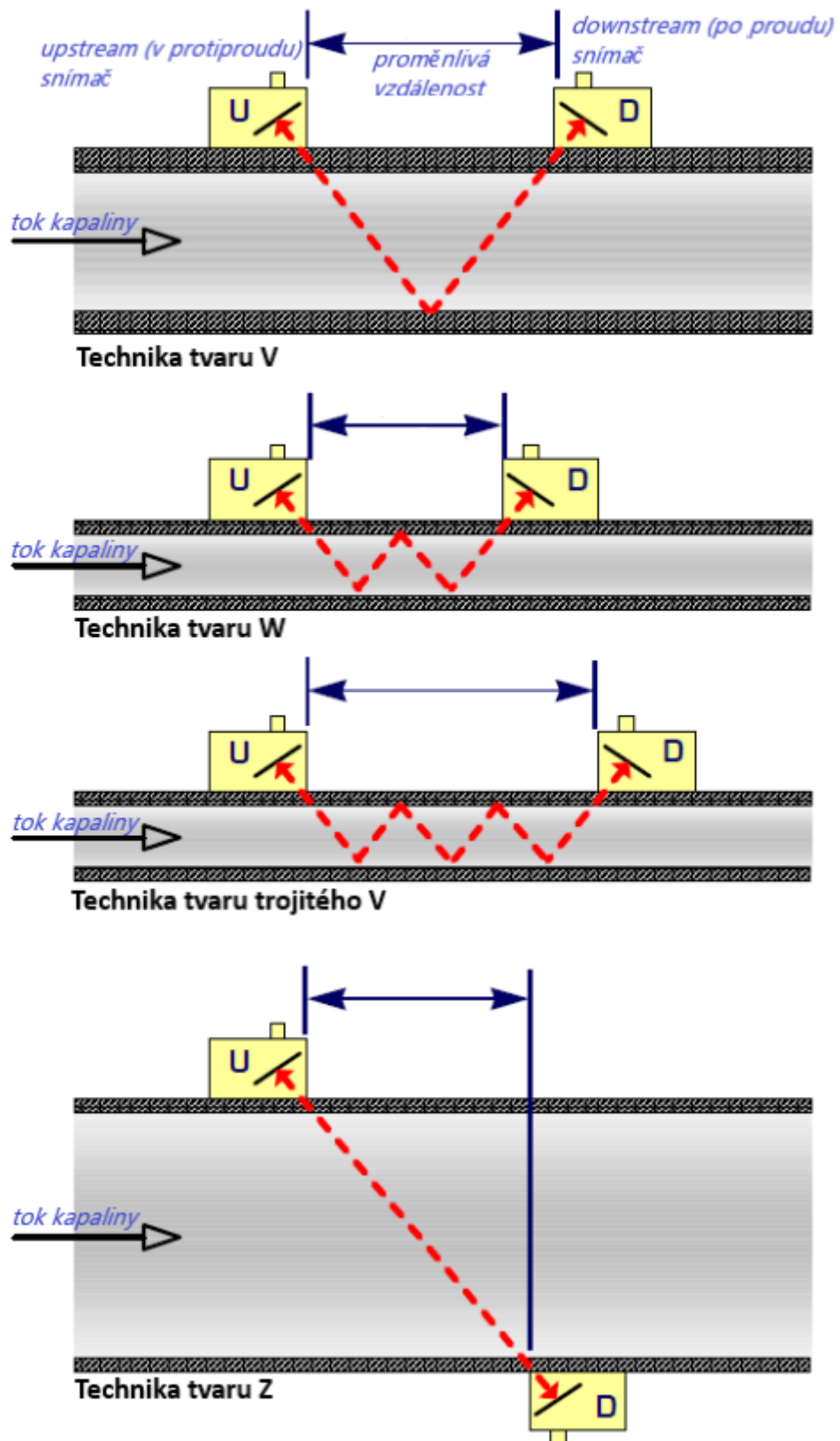
Ultrazvukové snímače jsou mohou být umístěny třemi možnými způsoby, které jsou pojmenovány podle tvaru písmena jimž prochází ultrazvukový paprsek, tj. tvar Z, V, W.



U techniky ve tvaru Z jsou snímače umístěny na protější stranách měřeného potrubí a ultrazvukový paprsek prochází pouze skrz trubku přímo mezi oběma snímači. Tento způsob se používá u trubek většího průměru větší než 300 mm. Existují aplikace, kde průměr měřené trubky dosahuje až 4 m [11].

U techniky ve tvaru V jsou snímače umístěny na stejné straně potrubí a ultrazvukový paprsek prochází dvakrát. Toto uspořádání se obvykle používá u trubek velikosti 25 až 300 mm.

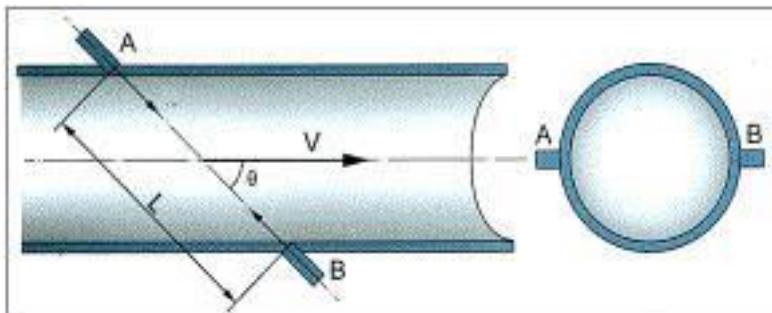
A u nejmenších průměrů trubek, tj. 25 mm a méně se také někdy používá technika ve tvaru W, kde jsou snímače opět umístěné na stejné straně trubky, avšak ve dvojnásobně větší vzdálenosti než by odpovídalo technice tvaru V. Tato technika se používá pro zlepšení přesnosti měření. V extrémních případech je možné metodu tzv. trojitého V, viz. obr. 1.



Obr. 1 Přehled možných uspořádání snímačů na měřeném potrubí

Princip měření:

Pro snadnější pochopení uvažujme trubku s uspořádáním snímačů ve tvaru Z, viz. obr. 2



Obr. 2 Schéma při uspořádání snímačů ve tvaru Z

Předpokládejme, že  $T_1$  je doba přenosu zvukového pulsu, který putuje ze snímače A po proudu do snímače B, a  $T_2$  je doba průchodu od v opačném směru z B do A proti proudu kapaliny. Potom platí následující:

$$T_1 = \frac{\frac{D}{\sin \theta}}{c + V \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

$$T_2 = \frac{\frac{D}{\sin \theta}}{c - V \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

kde  $c$  je rychlost zvuku v kapalině,  $D$  je průměr trubky a  $V$  je rychlost proudění zprůměrovaná na dráze zvuku. Řešením výše uvedených rovnic potom vyjádříme rychlost proudění:

$$V = \frac{\frac{D}{\sin 2\theta} \cdot \Delta T}{T_1 \cdot T_2} \quad (3)$$

kde  $\Delta T = T_1 - T_2$ . Proto, přesným měřením tranzitního času nahoru a dolů,  $T_1$  a  $T_2$  jsme schopni zjistit rychlost proudění  $V$ . Rychlost toku se vypočte následovně:

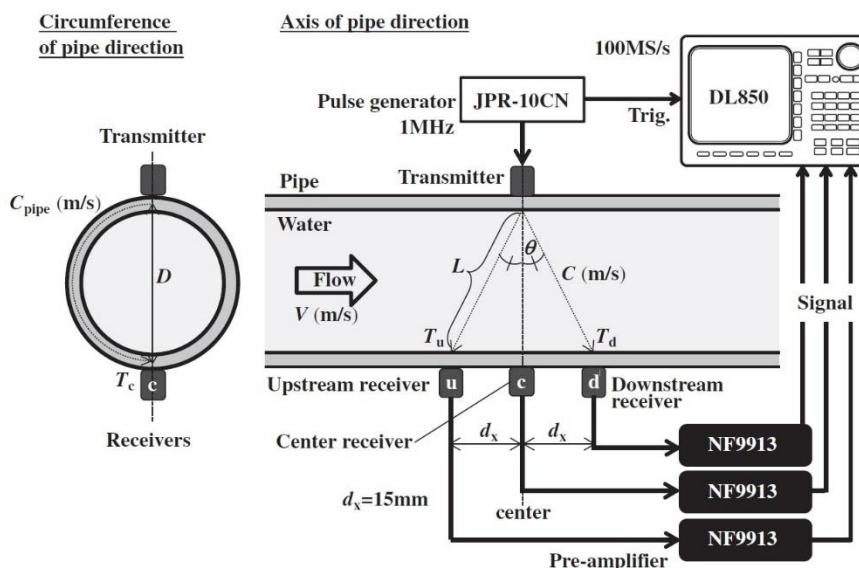
$$Q = K \cdot A \cdot V \quad (4)$$

kde  $A$  je vnitřní plocha průřezu trubky a  $K$  je součinitel nástroje.  $K$  se obvykle určuje pomocí kalibrace.

Z rovnic (3) a (4) vidíme, že výsledky měření,  $V$  a  $Q$ , jsou nezávislé na vlastnostech kapaliny, tlaku, teplotě, materiálech potrubí atd. Veličina rychlosti zvuku se v závěrečných rovnicích neobjevuje. Díky tomuto a dalším vlastnostem jako žádný pokles tlaku, žádné pohyblivé části nebo žádné rušení toku činí z ultrazvukového průtokoměru velmi atraktivní měřicí zařízení.

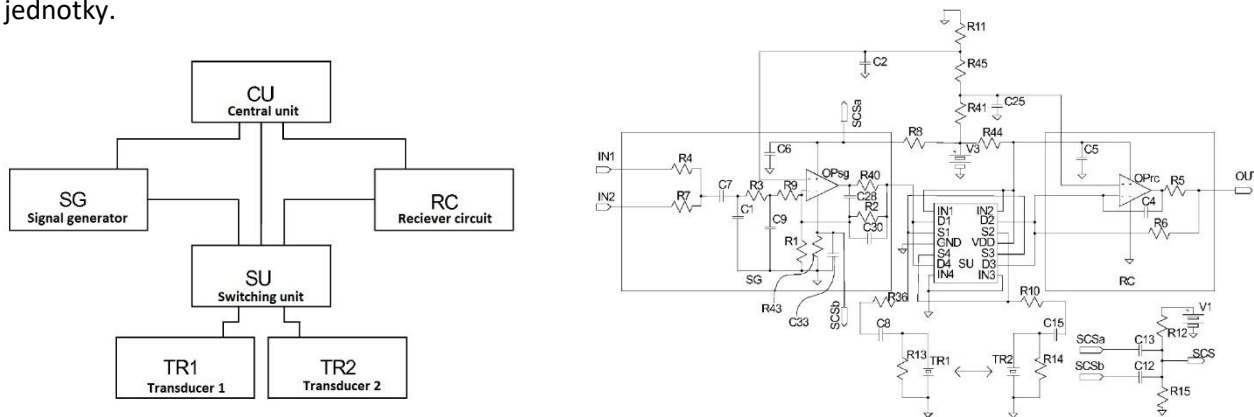
## Konstrukce transit time průtokoměru

Princip transit time průtokoměrů je znám již několik let a na základě této metody také proběhla řada výzkumů jako například ten uvedený v článku „Easy-setup clamp-on ultrasonic flowmeter“ publikovaný Japanese Journal of Applied Physics [5]. Schéma uspořádání tohoto experimentu je uvedeno na obr. 3.



Obr.3 Schéma zapojení ultrazvukového průtokoměru dle experimentu [5]

Experiment byl proveden na PVC trubce o vnějším průměru 60 mm a tloušťce 1,8 mm a ocelové trubce o průměru 114,3 mm a tloušťce 5,7 mm. Na tuto trubku byly připevněny ultrazvukové snímače o vlastní frekvenci 1 MHz. Přenos ultrazvukového signálu byl zajištěn vazebním prostředkem. Ultrazvukový signál byl do snímačů přiváděn z pulzního generátoru. Přijatý signál na druhé straně trubky byl ze snímačů přiveden do nízkošumového předzesilovače a měřen na záznamníku dat (data logger). Další podobný experiment byl patentován a publikován v United States Patent Application Publication [6], kde autor popisuje uspořádání ultrazvukového přístroje. Opět se zařízení skládá z pulzního generátoru, který přes přepínací jednotku posílá signál do ultrazvukových snímačů a zároveň do vyhodnocovací jednotky. Přijatý ultrazvukový signál ze snímačů je potom přiveden přes zesilovač do vyhodnocovací jednotky.



Obr. 4 Schématické a reálné uspořádání experimentu dle [6]

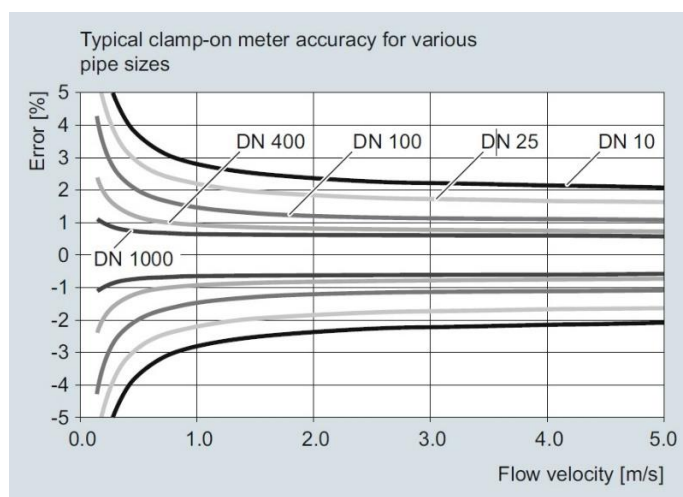
## Průtokoměry využívající Dopplerův jev

Průtokoměr založený na Dopplerově jevu lze použít v případě, že proudící médium obsahuje částice odrážející zvuk, tj. např. pevné částice či bubliny plynu v kapalině jak je popsáno v [1]. Bez přítomnosti těchto částic nemůže průtokoměr tohoto typu pracovat. Průtokoměr se skládá z vysílače a přijímače ultrazvuku, které mohou být připevněny na jedné nebo obou stranách potrubí. Ultrazvukový signál o známé frekvenci přibližně 1,2 MHz je vysílačem vyslán do proudící kapaliny. Vysílaný signál se odráží od pohybující se částice či bubliny a při zachycení odraženého signálu přijímačem je vyhodnocována změna frekvence přijatého signálu. Rozdíl mezi oběma frekvencemi je úměrný rychlosti proudícího média.

## Vlastnosti ultrazvukových průtokoměrů

Ultrazvukové průtokoměry patří do skupiny moderních průtokoměrů, spolu s průtokoměry Coriolisovými, indukčními a vírovými; vykazují však některé významné přednosti. Oproti Coriolisovým průtokoměrům lze využívat i u potrubí s velkým průměrem. Ve srovnání s indukčními průtokoměry mají tu výhodu, že jimi lze měřit nevodivé kapaliny, plyny a páry. Ultrazvukové průtokoměry jsou schopny měřit i malé průtoky, kde již není vhodné použít vírový průtokoměr.

Oproti ostatním typům průtokoměrů, jako jsou např. průřezová měřidla a turbínové průtokoměry, mají ultrazvukové průtokoměry přesvědčivé výhody v tom, že neobsahují pohyblivé součásti, tlaková ztráta je téměř nulová a vyžadují jen minimální údržbu. Vykazují velké měřicí rozpětí (přestavitelnost, poměr maximální a minimální měřitelné hodnoty průtoku). Pro zvýšení přesnosti je vhodné, aby u přístroje byla zabezpečena korekce na tvar rychlostního profilu.



Obr.5 Přesnost příložného průtokoměru SITRANS FS220 pro různé velikosti potrubí [4]

Podmínky provozu:

- Pro přesné měření průtoku musí potrubí být zcela zaplněno kapalinou v měřeném úseku průtokoměru
- Typické minimální požadavky na přímou trubku jsou: 10 průměrů proti proudu / 5 průměrů po proudu. V případě, že v měřeném úseku se také nachází ohyby, ventily, atd. jsou vyžadovány další zatopené úseky
- Snímače by měly být instalovány ve vodorovné poloze nejméně 20° od svislé polohy potrubí. To snižuje možnost rušení paprsku z nahromadění plynu v horní části potrubí
- Měření kapalin pohybující se uvnitř přechodové Reynoldsovy oblasti  $1000 < Re < 5000$  je třeba se pro lepší přesnost vyhnout
- Vazební prostředek musí stále udržovat vazbu mezi snímačem a povrchem trubky a to i při dlouhodobém sběru měřených dat

### 1.1.2 JINÉ TYPY PRŮTOKOMĚŘŮ

V následujících podkapitolách budou představeny další typy běžných průtokoměrů, které však vyžadují zásah do měřeného potrubí. Je proto nutné předem zvážit a vybrat vhodnou metodu měření průtoku kapalin.

#### *Magneticko – indukční průtokoměry*

Princip měření magneticko-indukčních průtokoměrů je založen na Faradayově zákonu elektromagnetické indukce [2]. Mohou měřit objemový průtok všech elektricky vodivých kapalných médií, dokonce i kapalin s nízkou vodivostí.

Charakteristika:

- Minimální nebo žádné uklidňovací délky
- Všechny průtokoměry jsou kalibrovány metodou přímého srovnávání objemů
- Různé materiály výstelky, vhodné pro pitnou vodu, odpadní vodu, chemikálie, čisticí roztoky
- Měření nezávisí na rychlostním profilu
- Schválení pro měření v obchodním styku
- Funkčnost zajištěna i pro částečně zaplněná potrubí
- Měření elektrické vodivosti lze použít pro detekci změny média
- Funkčnost zajištěna i pro vysoký obsah bublin plynu nebo pevných částic a pulzující průtoky
- Spolehlivé měření i při rychlých změnách vlastností média a pH
- Stabilita nuly bez ohledu na změny vlastností měřeného média
- Běžně dostupné jmenovité světlosti DN 2,5 až 3000

#### Typické aplikace:

- Vodní hospodářství: fakturační měření, distribuční sítě, jímání vody, detekce netěsností
- Odpadní vody: odvádění a čištění odpadních vod, měření kalů
- Potravinářský průmysl: míchání, dávkování a plnění nápojů v hygienických aplikacích, plnicí stroje
- Chemický průmysl: měření kyselin a hydroxidů, dávkování, měření abrazivních a žíravých médií
- Výroba papíru a celulózy: měření celulózy, kaší, kalů, žíravín, mořidel, přísad, bělidel a barviv
- Těžební a kovo zpracující průmysl: kapaliny s vysokým obsahem pevných částic (např. rudy)

#### *Hmotnostní průtokoměry*

Funkce hmotnostního průtokoměru je založena na Coriolisově principu. Umožňuje přímé měření hmotnostního průtoku, hustoty a teploty kapalin a plynů, a rovněž výpočet objemového průtoku a hmotnostní nebo objemové koncentrace, to vše jediným přístrojem.

#### Charakteristika:

- Měření kapalin s obsahem plynu, měření se nepřerušuje ani při obsahu plynu 100%
- Indikace nebo programovatelná výstraha, zlepšení procesu měření u aplikací s občasným výskytem bublin plynu
- Výsledky měření nejsou ovlivněny způsobem montáže (mohou být namontovány téměř v libovolné poloze, nevyžadují žádné uklidňovací délky) ani okolním prostředím, např. vibracemi
- Měření průtoků od 0,0003 do 4600 t/h
- Minimální tlaková ztráta u přístrojů s přímou měřicí trubicí: snížení příkonu čerpadel
- Velmi přesné měření hustoty, není ovlivněno změnami média ani teploty
- Vhodné i pro velmi viskózní média, nehomogenní směsi, média s obsahem pevných částic nebo bublin plynu
- Vhodný i pro nelineárně viskózní kapaliny a média vyžadující malé rychlosti proudění

#### Typické aplikace:

- Chemie: měření koncentrace nebo hustoty, plnění tankerů, dávkování do reaktorů, krakování uhlovodíků, měření agresivních, abrazivních i viskózních médií nebo médií s neznámým složením
- Potravinářství: plnicí stroje, měření ve stupních Brix, měření průtoku, hustoty a měrné hustoty, dávkování aditiv

- Farmacie: výroba směsí, dávkování a plnění, extrakce rozpouštědly, měření ultračisté vody
- Voda a odpadní voda: dávkování flokulantů, průtok kalu a měření hustoty
- Papír a celulóza: papírovina, buničina, aditiva, bělicí činidla, barviva
- Ropa a plyn: měřicí sestavy, měření hustoty v obtoku, výdejní stojany CNG/LPG, detekce netěsností, měření v obchodním styku (nakládka tankerů, zásobníky paliva a doprava produktovody)

### *Plováčkové průtokoměry*

Plováčkové průtokoměry jsou vhodné pro měření čistých plynů a kapalin. Mají svislou kónickou měřicí trubici vyrobenou z kovu, skla nebo plastu, v níž se plováček volně pohybuje nahoru a dolů. Proudící měřené médium zvedá plováček, dokud nejsou všechny působící síly v rovnováze.

Charakteristika:

- Místní ukazování bez nutnosti napájení
- Použití v prostředí s nebezpečím výbuchu
- Přesné měření i velmi malých průtoků (<0,5 l/h)
- Vhodné pro měření za nízkých provozních tlaků
- Lze použít v aplikacích s malými nebo nulovými uklidňovacími délkami
- Modulární koncepce ukazatele a převodníku: snadná výměna modulů
- Hygienická konstrukce z korozivzdorné oceli bez mrtvých prostorů
- Průtokoměry pro jaderné elektrárny
- Montáž průtokoměru ve vodorovných, stoupajících i klesajících potrubích

Typické aplikace:

- Měření aditiv jako katalyzátory, detergenty, inhibitory koroze a tvorby pěny, měření hydroxidu sodného, chlóru nebo sloučenin síry apod.
- Inertizace nádrží a reaktorů
- Měření a dávkování médií pro proplachování
- Měření při odběru vzorků pro analyzátory
- Dávkování a kontrola množství maziv a chladicích médií pro ložiska a ucpávky čerpadel a točivých strojů
- Hygienické aplikace v potravinářství a farmacii
- Měření plynů a kapalných chemikálií v laboratořích a zkušebnách
- Měření spotřeby plynu/oleje do hořáků



## *Měření průtoku pomocí tlakové difference*

Princip měření tlakové difference (DP) se používá pro měření objemového a hmotnostního průtoku kapalin, plynů nebo páry. Tlak se měří ve dvou bodech na překážce v potrubí (např. na primárním prvku). Použitím Bernoulliho rovnice je tlaková difference mezi těmito dvěma body mírou rychlosti proudění a v případě, že známe rozměr potrubí, je možno ji přepočítat na objemový průtok.

Charakteristika měření průtoku pomocí tlakové difference:

- Celosvětově normalizovaný princip měření průtoku podle ISO 5167
- Všechny nejistoty měření jsou za provozních podmínek známé a mohou být vypočítány
- Měření objemového nebo hmotnostního průtoku kapalin, plynů nebo páry
- Teploty měřeného média -200...+1000°C
- Provozní tlak až 400 bar
- Pro světlosti potrubí DN25...12000
- Pro běžná i agresivní média

## *Vírové průtokoměry*

Vírové průtokoměry pracují na principu Kármánovy vírové stezky a používají se v celé řadě průmyslových aplikací. Vírové průtokoměry měří objemový průtok jak vodivých, tak nevodivých kapalin, technických plynů a páry, jsou schopny pracovat s kompenzací na tlak a teplotu.

Charakteristika vírových průtokoměrů:

- Integrovaná tlaková a teplotní kompenzace pro kolísající provozní teploty a tlaky
- Teplotní kompenzace pro sytou páru součástí standardního provedení
- Výpočet celkového a čistého množství tepla pro management hospodaření s energií
- Odolná celosvařovaná konstrukce z korozivzdorné oceli s velkou odolností vůči korozi, tlaku a teplotě
- Použití v prostorech s nebezpečím výbuchu

Aplikace zahrnují následující měření:

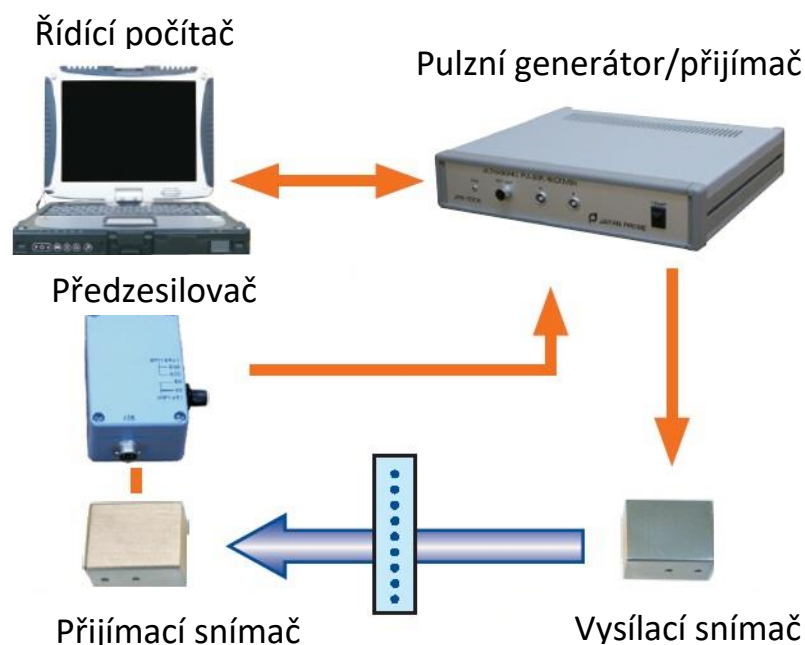
- Přehřátá a sytá pára
- Celkové a čisté množství tepla pro systémy managementu hospodaření s energií
- Pára pro otápění

- Zkapalněné plyny, vlhké plyny a spaliny
- Demineralizovaná a napájecí voda do kotlů
- Rozpouštědla a teplotonosná média
- Sledování parních kotlů
- Výstup z kompresoru
- Spotřeba stlačeného vzduchu
- Množství nasávaného vzduchu
- Spotřeba hořáků

## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

Původní představa vyplývající ze zadání bakalářské práce, tj. navrhnout a realizovat příložený ultrazvukový průtokoměr byla taková, že měřící zařízení bude realizováno jak je uvedeno na obr. 6. Měřící zařízení bude vybaveno ultrazvukovým pulzním generátorem a přijímačem s vysílací a přijímací frekvencí v rozsahu min. 1 až 10 MHz, např. přístrojem JPR-50P od společnosti JP-PROBE [9]. Dále pak bude aparatura vybavena sadou úhlových ultrazvukových snímačů s pracovní frekvencí v rozsahu pulzního generátoru jako např. snímače od společnosti Micronics, Part Number 810-1001-022 [10] a výstupní ultrazvukový signál bude přes předzesilovač PR-60 přiveden k digitálnímu osciloskopu nebo případně pulznímu záznamníku dat např. Pulse 101 Data Logger od společnosti Micronics. Později se však ukázalo, že projekt by byl příliš finančně náročný. Poptávány byly nejdříve samostatně ultrazvukové snímače u několika zahraničních společností působících v České Republice. Pořizovací cena se pohybovala mezi 20-30 tisíci Kč za sadu snímačů bez kabeláže. Odhadované náklady na celý projekt by tak pravděpodobně přesáhly částku 90 tisíc Kč. Tento záměr byl tak přehodnocen a jednotlivé výše zmíněné komponenty měřící aparatury byly využity z konvenčního ultrazvukového průtokoměru, kde tvoří integrální součást tohoto zařízení. Měření tak probíhalo přímo na elektronických součástech ultrazvukového průtokoměru přičemž byl využit pulzní generátor a přijímač v kombinaci s ultrazvukovými snímači a vyhodnocovací jednotkou.

A proto předmětem této experimentální části bylo prověřit způsob měření průtoku vhodným neinvazivním ultrazvukovým průtokoměrem, viz. kapitola 2.1.1. Průtok kapaliny, v tomto případě vody o teplotě 10-95°C, byl ověřován na dvou typech potrubí, měděná trubka 28x1 mm a vícevrstvá trubka PEX/Al/PEX (R999 16x2 mm), která je dále popsána v kapitole 2.1.2. Na základě těchto parametrů byl proveden výběr vhodného průtokoměru a snímačů, o kterém detailněji pojednává následující kapitola.



Obr.6 Blokové schéma zapojení původně uvažovaného ultrazvukového průtokoměru [9]

## 2.1 Výběr průtokoměru a snímačů

Výrobou a prodejem ultrazvukových průtokoměrů se zabývá několik předních světových firem. Ultrazvukové průtokoměry se běžně používají pro nejrůznější aplikace, avšak převážně na potrubích o vyšší světlosti. Za účelem řešení zadání bakalářské práce byl proveden průzkum trhu a byly tak vytipovány příložné průtokoměry a snímače, které by byly vhodné pro kriticky malé průměry měřených trubek. Níže jsou uvedeny zástupci ultrazvukových průtokoměrů, které by mohly být použity pro další zkoumání a ověření vhodnosti pro uvažované aplikace.

### Kritéria výběru:

- příložný typ průtokoměru
- použití pro potrubí s DN>13 mm
- provozní teplota 10 – 95 °C
- měření i při nízkých rychlostech kapaliny (min. 0,3 m/s)
- nízká chyba měření
- cena

Výrobce/ Dodavatel	Typové označení	Snímače	Omezení	Cena
KROHNE / Krohne CZ, spol. s r.o.	Optisonic 6300 W	sada pro potrubí DN15 až DN100	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vnější průměr měřeného potrubí musí být minimálně 20 mm</li> <li>- chyba měření <math>\pm 3\%</math> z měřené hodnoty pro DN&lt;50 mm a <math>v &gt; 0,5</math> m/s</li> </ul>	2851,- Euro
SIEMENS / Siemens, s.r.o.	SITRANS FS220	snímače typ A2 pro potrubí o vnějším průměru 12,7 ... 50,8 mm	<ul style="list-style-type: none"> <li>- provozní teplota měřených kapalin -40 až 120°C</li> <li>- citlivý pro průtoky kapalin menších než 0.1 m/s</li> <li>- chyba měření <math>\pm 3\%</math>,</li> </ul>	3452.- Euro
MICRONICS / JSP, s.r.o.	Portaflow 220	snímače typu A	<ul style="list-style-type: none"> <li>- přesnost měření <math>\pm 3 \%</math> pro potrubí o vnějším průměru 13 až 75 mm při průtoku <math>&gt; 0,2</math> m/s</li> <li>- provozní teplota měřených kapalin -20 až 135°C,</li> </ul>	2770,- Euro

FUJI ELECTRIC / Amtek, s.r.o.	Time Delta-C	snímače FSSD určené pro potrubí o vnitřním průměru 13 až 100 mm	<ul style="list-style-type: none"> <li>- provozní teplota měřených kapalin -40 až 100 °C</li> <li>- chyba měření <math>\pm 3</math> až 5 % pro rychlost toku 0-2 m/s a <math>\pm 1,5</math> až 2,5 % pro rychlost toku 2-32 m/s</li> <li>- rychlost odezvy měření 0,2 s</li> </ul>	2070,- Euro
--	--------------	--	--	----------------

Tab.1 Přehled vybraných příložných průtokoměrů

Za účelem provedení experimentu byl použit ultrazvukový průtokoměr Time Delta-C se snímači FSSD vyrobený společností Fuji Electric. Společnost Amtek, s.r.o., která je výhradním distributorem pro tuzemský trh, bezplatně poskytla FS ČVUT toto zařízení k odzkoušení.

## 2.2 Testované potrubí

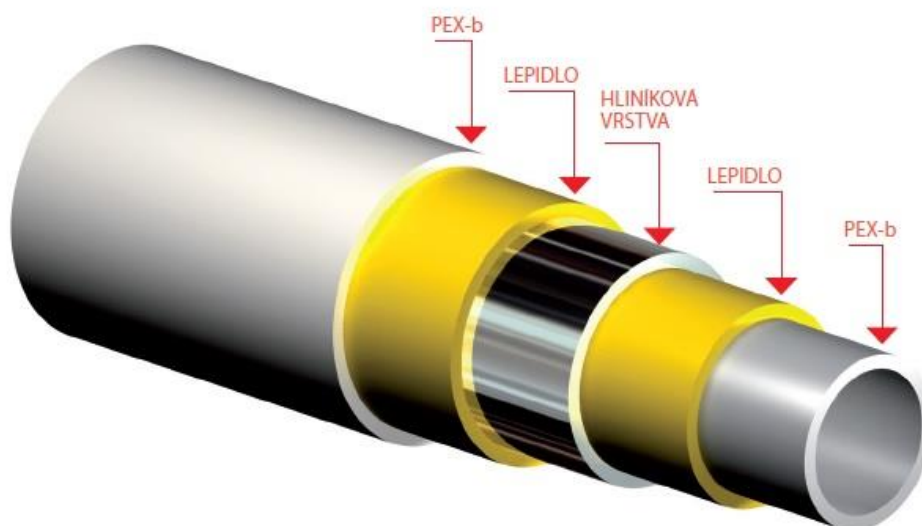
### Technický popis vícevrstvé trubky PEX/Al/PEX (R999 16x2 mm):

Vícevrstvé potrubí R999 je tvořeno vnitřní vrstvou z PEX-b (síťovaný polyethylen), hliníkovou mezivrstvou podélně svařovanou (na tupo) laserovou technologií, a vnější vrstvou PEX-b bílé barvy. Mezivrstvy lepidla spojují homogenním způsobem hliníkovou vrstvu s vrstvami PEX-b. Přítomnost hliníkové vrstvy, svařené laserovou technologií na tupo, zaručuje bezpečnou kyslíkovou bariéru a výrobku dodává výbornou odolnost proti deformaci.

### Použití

Vícevrstvé potrubí z PEX-b/Al/PEX-b může být použito na:

- rozvody teplé a studené vody pro sanitární účely;
- realizaci podlahových/stěnových/stropních systémů vytápění ochlazení;
- realizaci tradičních systémů vytápění;
- systémy s topnými tělesy z litiny, hliníku nebo oceli



Obr.7 Struktura vícevrstvého potrubí z PEX-b/Al/PEX-b [A2]

## 2.2.1 VÝPOČET A EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ RYCHLOSTI ZVUKU U VÍCEVRSTVÉ TRUBKY PEX-B/AL/PEX-B

Při průchodu ultrazvukového paprsku rozhraním dvou různých materiálů, příp. prostředí dochází ke změně úhlu šíření ultrazvukového paprsku. Tato změna úhlu ovlivní při V-technice měření průtoku také vzdálenost obou ultrazvukových snímačů. Je nutné proto před započítáním nastavování snímačů znát typ použitého materiálu trubky, případně jednotlivých vrstev stejně jako u PEX-b/Al/PEX-b trubek a také jejich tloušťky. Níže je uveden teoretický výpočet rychlosti zvuku u vícevrstvé trubky PEX-b/Al/PEX-b.

Rychlost zvuku	m/s
Hliník	6320
Polyethylén	2460

Tab. 2 Rychlost zvuku ve vybraných materiálech [7]

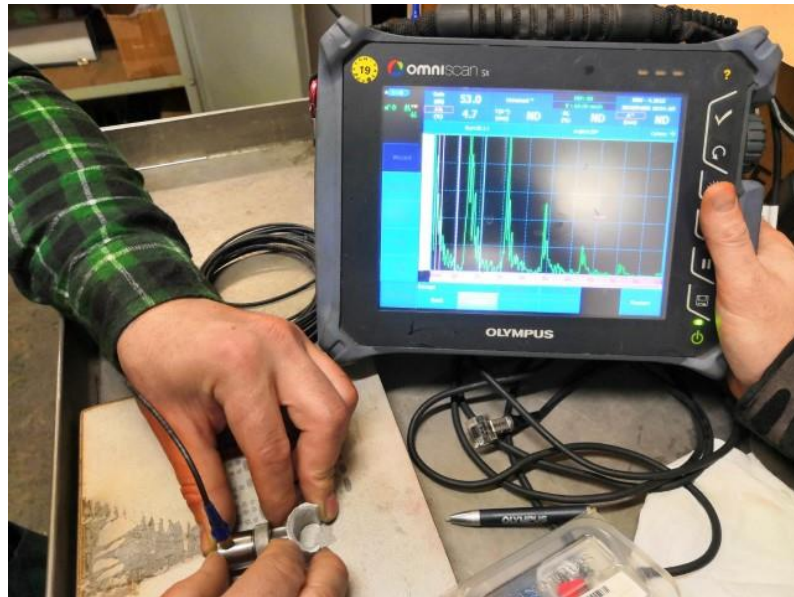
Tloušťka hliníkové vrstvy 0,2 mm ( $x_1=0,2/2=0,1$ ). Celková tloušťka PE vrstvy 1,8 mm ( $x_2=1,8/2=0,9$ ).

$$v = x_1 \cdot 6320 + x_2 \cdot 2460 = 0,1 \cdot 6320 + 0,9 \cdot 2460 = 2846 \text{ m/s} \quad (5)$$

Tabulkové hodnoty rychlostí šíření ultrazvukové vlny v jednotlivých materiálech jsou pouze orientační, protože použité materiály u vícevrstvé trubky nemusí být zcela totožné s tabelovaným materiálem.

Ke stanovení rychlosti ultrazvukového vlnění je možné vedle matematicko-teoretického odhadu provést také experimentální měření a zjistit tak reálné hodnoty šíření zvuku v neznámém materiálu. K tomuto měření jsem využil ultrazvukový přístroj Olympus Omniscan SX společně s přímou ultrazvukovou sondou Olympus s přímou předsádkou o frekvenci 5 MHz. Na základě známé tloušťky materiálu a správného definování koncového echa na obrazovce ultrazvukového zařízení, mmj. určeného pro defektoskopii, je možné stanovit rychlost šíření ultrazvukového paprsku.

Naměřené hodnoty rychlostí šíření ultrazvukové vlny v předložené PEX-b/Al/PEX-b trubce o tloušťce stěny 2 mm se pohybovaly v rozmezí 3030 až 3070 m/s. Pro další měření byla tudíž uvažována střední hodnota tohoto intervalu, tj. 3050 m/s.



Obr.8 Experimentální ověření rychlosti šíření ultrazvukové vlny na předložené PEX-b/Al/PEX trubce

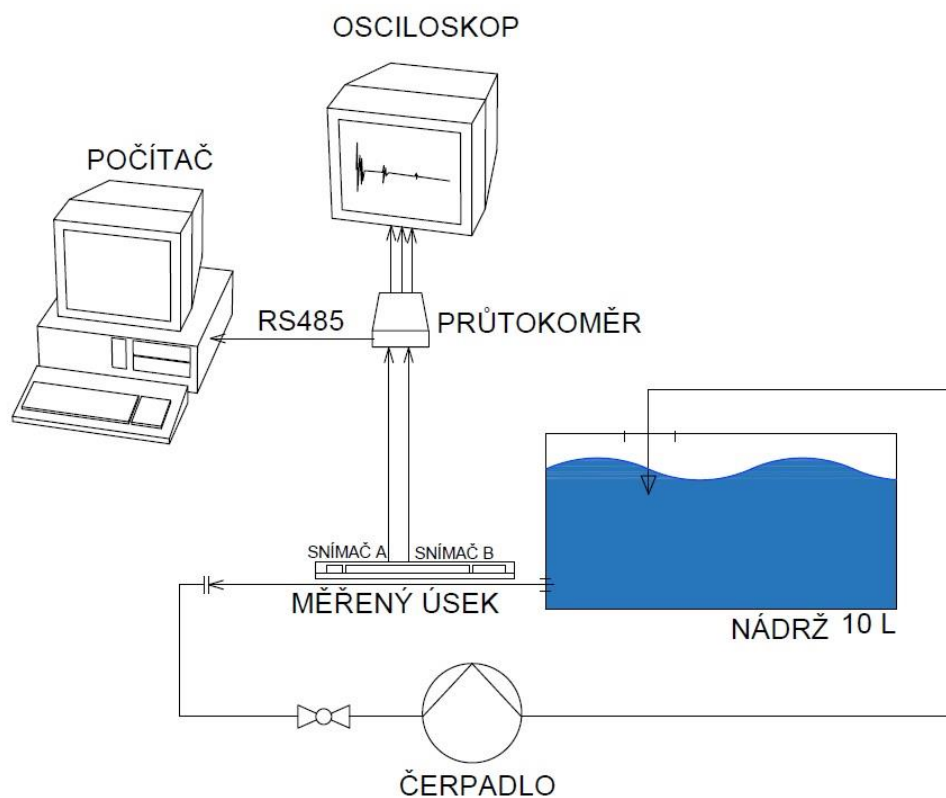
## 2.3 Měřená soustava a technické vybavení experimentu

Použité měřicí přístroje a technické vybavení:

- Průtokoměr Time Delta-C (1)\*
- snímače FSSD o frekvenci 2 MHz s úhlovou předsádkou 42° (2)
- Digitální osciloskop Tektronix TBS 1072B (3)
- Stabilizovaný zdroj napětí MW9115GS 3-12V/1,5A (4)
- Oběhové čerpadlo Wilo-Yonos PICO (5)
- Digitální multimetr Escort 97 + termočlánek (6)
- Nádrž 10 L (7)
- Cu trubka 28x1 mm, délka 0,5 m (8)
- PEX-b/Al/PEX-b trubka, R999Y122, 16x2,0 mm, délka 0,9 m (9)
- PVC hadice ¾", maximální provozní tlak 1 MPa, celková délka 1,5 m (10)
- Kulový kohout s pákou 3/4" FF s ucpávkou PN 25 (11)
- Vazební prostředek TOPVET (12)
- Nerezové stahovací pásky
- Plastové a mosazné spojky
- Odměrná nádoba 10 L
- PC s USB vstupem (13)
- Převodník USB/RS485 (14)

\* čísla uvedená za jednotlivými položkami indikují přístroje na obr. 11





Obr.9 Schéma zapojení experimentu

#### Popis soustavy:

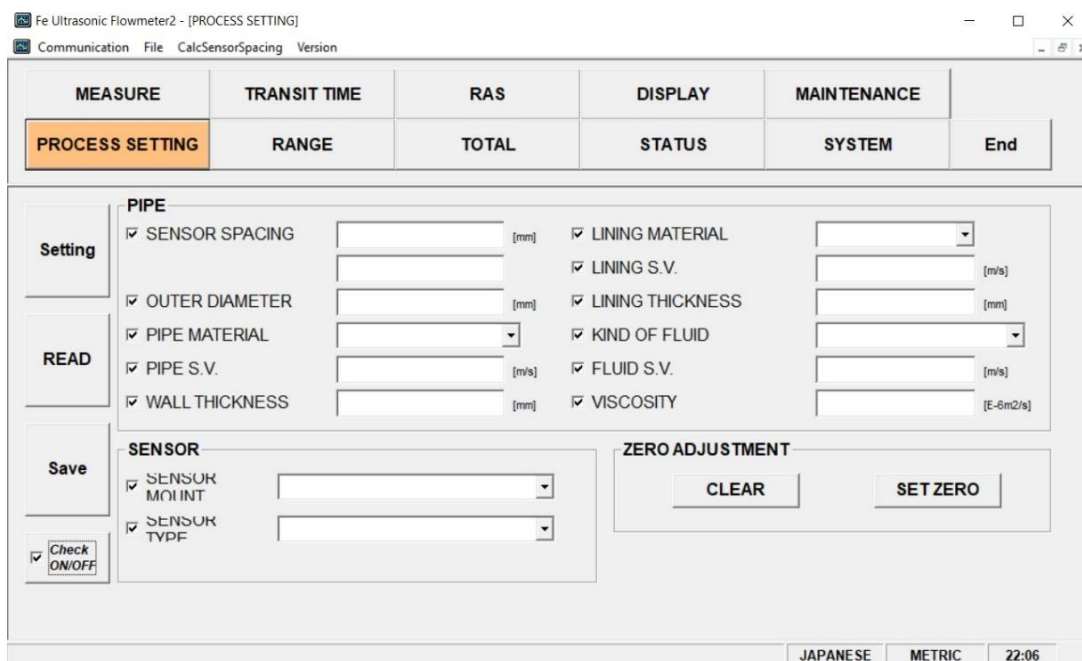
Měřená soustava se skládá ze zásobníku vody o maximálním objemu 10 l. U dna je uložena mosazná vsuvka, ke které je přes PVC hadici přimontová měřená vícevrstvá PEX-b/Al/PEX-b trubka. Vstup kapaliny do Cu trubky je rovněž umístěn u dna avšak přímo přes původní hrdlo. Výstup z měřeného potrubí je pak veden do PVC hadice a dále přes regulační člen, v tomto případně kulový kohout do čerpadla a dále zpět do nádrže. Původní použité čerpadlo, které bylo vymontováno z vyřazené myčky na nádobí, bylo příliš výkonově slabé. Rychlost toku kapaliny s tímto čerpadlem u PEX-b/Al/PEX-b potrubí dosahovala maximálně 0,4 m/s. Později bylo proto nahrazeno výkonějším oběhovým čerpadlem Wilo-Yonos PICO. Ohřev vody byl zajištěn externě. Měření teploty probíhalo uprostřed výšky hladiny v zásobníku vody. Vodící lišta, na které jsou umístěny ultrazvukové snímače, byla pevně pomocí hadicových spojek v sousém uspořádání uchycena k měřené trubce. Výrobce průtokoměrů obvykle doporučuje vhodné umístění snímačů a stanovuje tak minimální vzdálenosti od kolen, rozboček, difusérů, ventilů či redukcí. Před usazením byl kontaktní povrch snímačů namazán silnou vrstvou vazebního prostředku, aby byl zajištěn přenos ultrazvukového paprsku do trubky a měřené kapaliny. Měřené trubky nebyly žádným způsobem mechanicky či chemicky ošetřeny a snímače tak byly přiloženy přímo na běžný povrch trubky. Vzdálenost snímačů byl stanoven na základě materiálu trubky, průměru trubky, tloušťky stěny trubky, způsobu měření průtoku kapaliny, v tomto případě byla zvolena metoda V. Dále pak je vzdálenost snímačů závislá na typu kapaliny a v neposlední řadě na typu snímačů. Vzdálenost snímačů lze vypočítat přímo pokud je známý úhel uložení snímačů na

předsádkách. Z důvodu časové efektivity byl však k výpočtu použit program „Ultrasonic Flowmeter – Sensor Spacing Calculation Tool“, který poskytuje výrobce na svých webových stránkách [8]. Oba snímače A a B jsou propojeny signálními koaxiálními kabely s řídicí jednotkou Time Delta-C, kde jsou informace ze snímačů zpracovány a vizualizovány na dvouřádkovém displeji tohoto zařízení. Tato řídicí jednotka má několik výstupů. Jedním z nich je sériová komunikace RS-485. RS-485 je typická dvou vodičovým propojením jednotek, v tomto případě PC a jednotky Time Delta-C. Tyto vodiče jsou označeny písmeny A a B. V klidovém stavu by na vodiči A (neboli „-“) mělo být menší napětí než na vodiči B (neboli „+“). Maximální délka sběrnice je až 1200 m, maximální počet uzlů (tj. zařízení vysílajících a přijímajících po lince data) je 32. Původně byla zkoušena z důvodu dostupnosti sada dvou převodníků USB/RS232 - RS232/RS485 avšak nebyl nalezen vhodný komunikační signál. A proto byl k propojení s počítačem použit pouze jeden převodník RS-485(Modbus)/USB. Ten byl napájen zdrojem napětí 5V. RS-485 komunikace byla nastavena na obou stranách v těchto parametrech, viz. tab. 3:

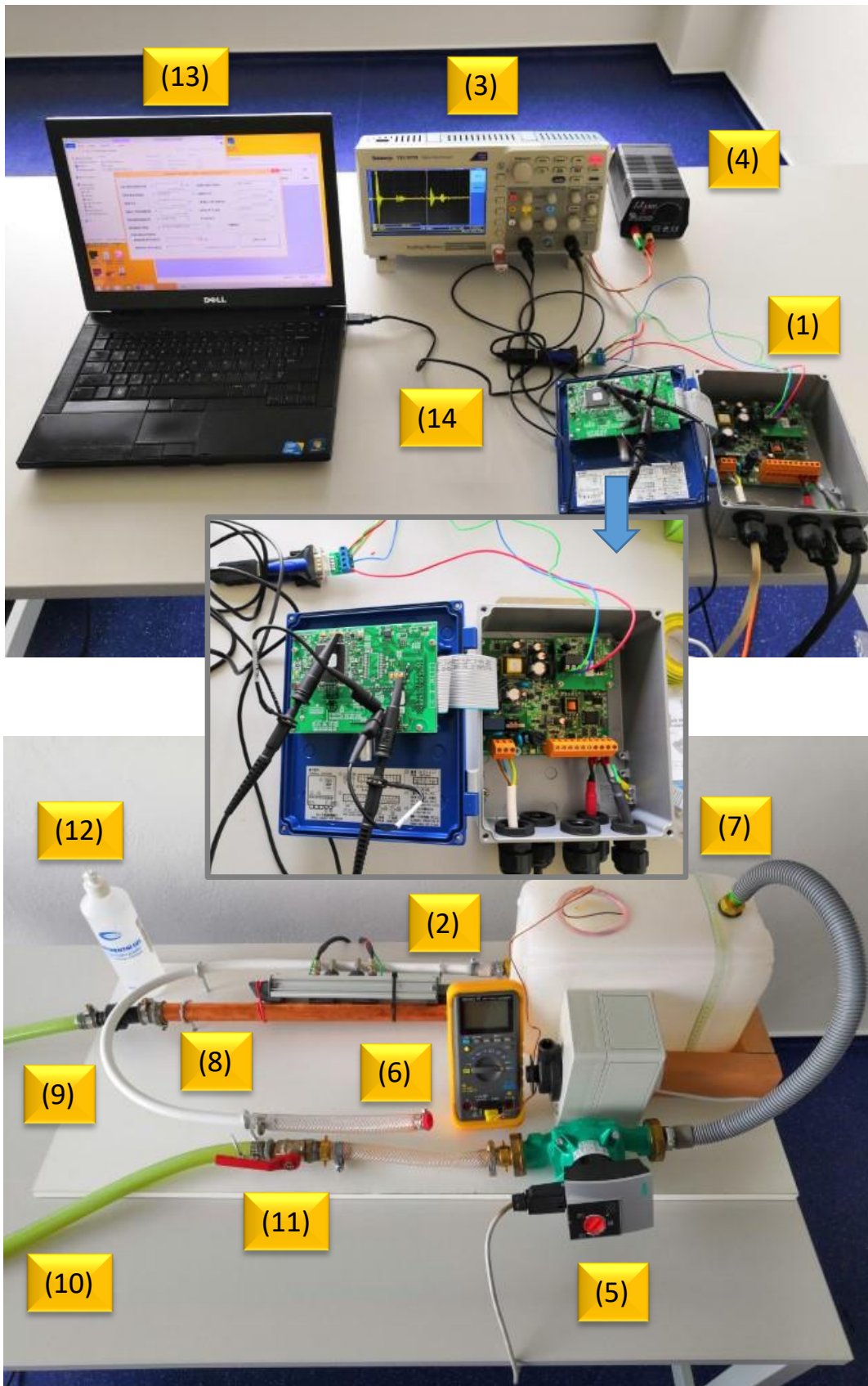
Parametr	Hodnota
Přenosová rychlost	9600 bit/s
Počet databitů	8
Parita	Lichá
Počet stop bitů	1

Tab. 3 Nastavení komunikace RS-485

Nastavení a zpracování dat v počítači probíhalo přes program Ultrasonic Flowmeter2, Version 3.0.0E, který je dodáván společně s průtokoměrem, viz. obr. 9. Informace, jako vysílací či odražené signály, byly z řídicí jednotky Time Delta-C také zpracovávány na digitálním osciloskopu. Připojení bylo realizováno sadou dvou kabelů přes kanál číslo 1 a trigger přímo z pinů desky plošného spoje řídicí jednotky Time Delta-C. Data byla zpracovávána a vyhodnocena na obrazovce osciloskopu a poté ukládána na USB disk ve formátu JPG.



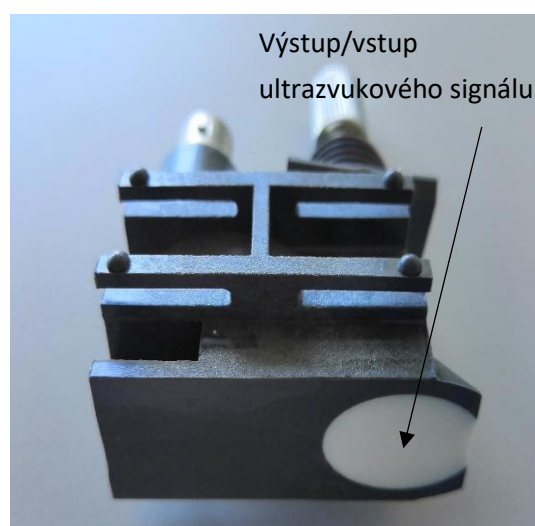
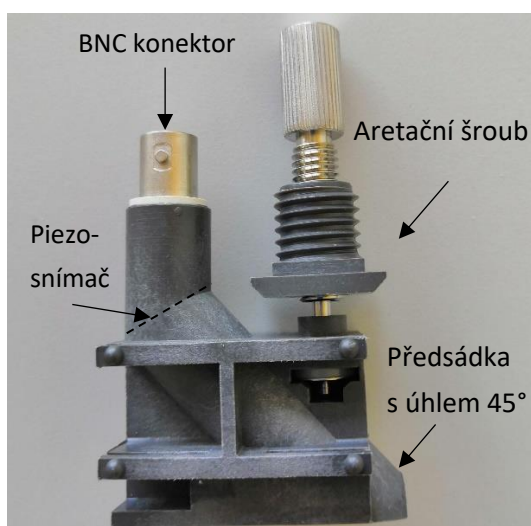
Obr. 10 Náhled do nastavení průtokoměru Time Delta-C v programu Ultrasonic Flowmeter2



Obr. 11 Zapojení měřícího zařízení a měřené soustavy

### Konstrukce a uložení použitých ultrazvukových snímačů:

Ultrazvukové snímače jsou vyráběny v široké škále velikostí, frekvencí a různého uspořádání. Aktivní prvek snímače je obvykle tenký disk, čtverec nebo obdélník piezoelektrické keramiky, která převádí elektrickou energii do mechanické energie (ultrazvukové vibrace) a naopak. Když je elektrický puls přiveden na piezoelektrickou destičku, generují se zvukové vlny a naopak zpětnou vibrací vracející se ho zpětného signálu je generováno napětí. Piezoelektrická snímač je uložen na nosnou destičku a z druhé strany zajištěn tlumícím materiálem, který fixuje aktivní člen, když je vybuzen elektrickým pulzem. Celý piezoelektrický snímač je uložen v kovové či plastové schránce, aby byl chráněn před poškozením. Úhlové snímače jsou pak vybaveny předsádkou o definovaném úhlu. Nejběžnější úhel předsádky je 45°, 60°, 70° a v některých speciálních případech se používá předsádka s úhlem 80°. V případě ultrazvukového průtokoměru se snímače používají v páru přičemž snímače jsou při technice snímání ve tvaru V a W vůči sobě zrcadlově polohovány. Snímače jsou uloženy na distanční vodící liště, která má na svrchní části měřítko pro nastavení vzájemné vzdálenosti snímačů.

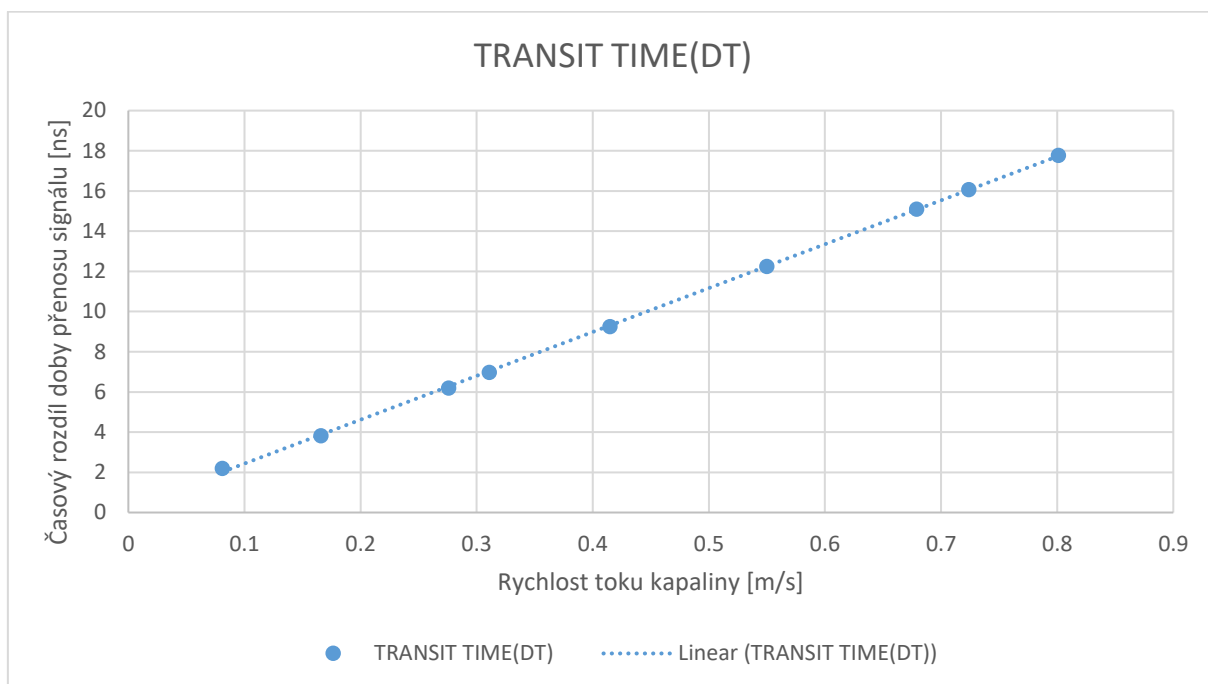


Obr. 12 Konstrukce a uložení použitých snímačů

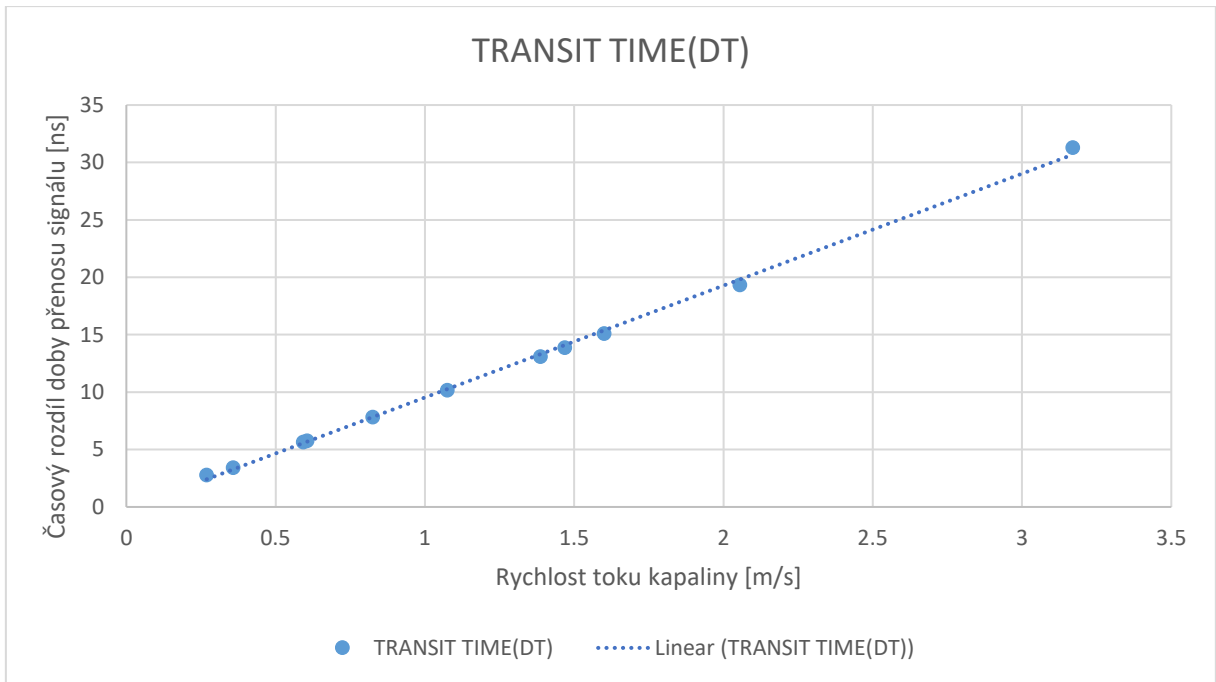
### 2.3.1 MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI DOBY PŘENOSU ULTRAZVUKOVÉHO SIGNÁLU NA RYCHLOSTI TOKU KAPALINY

Transit time neboli doba přenosu je hlavní indikátor a měřící veličina u příločných průtokoměrů, které jsou popsány v kapitole 1.1.1. Ultrazvukový průtokoměr měří rozdíl mezi tranzitním časem ultrazvukového pulzu po směru a proti směru toku měřené kapaliny.

Bylo provedeno měření změny doby přenosu ultrazvukového signálu v závislosti na rychlosti toku kapaliny při běžné a zvýšené teplotě.

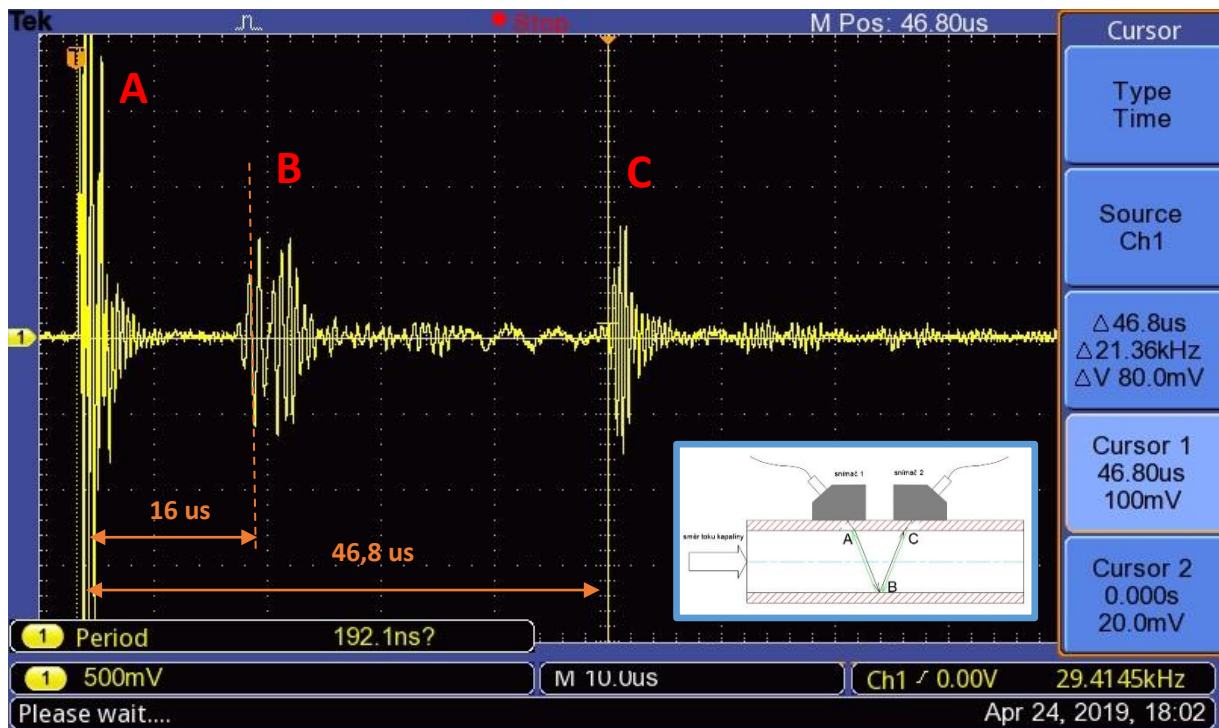


Graf č.1 – Závislost změny doby přenosu ultrazvukového signálu na rychlosti toku kapaliny při běžné teplotě v Cu trubce 28x1 mm



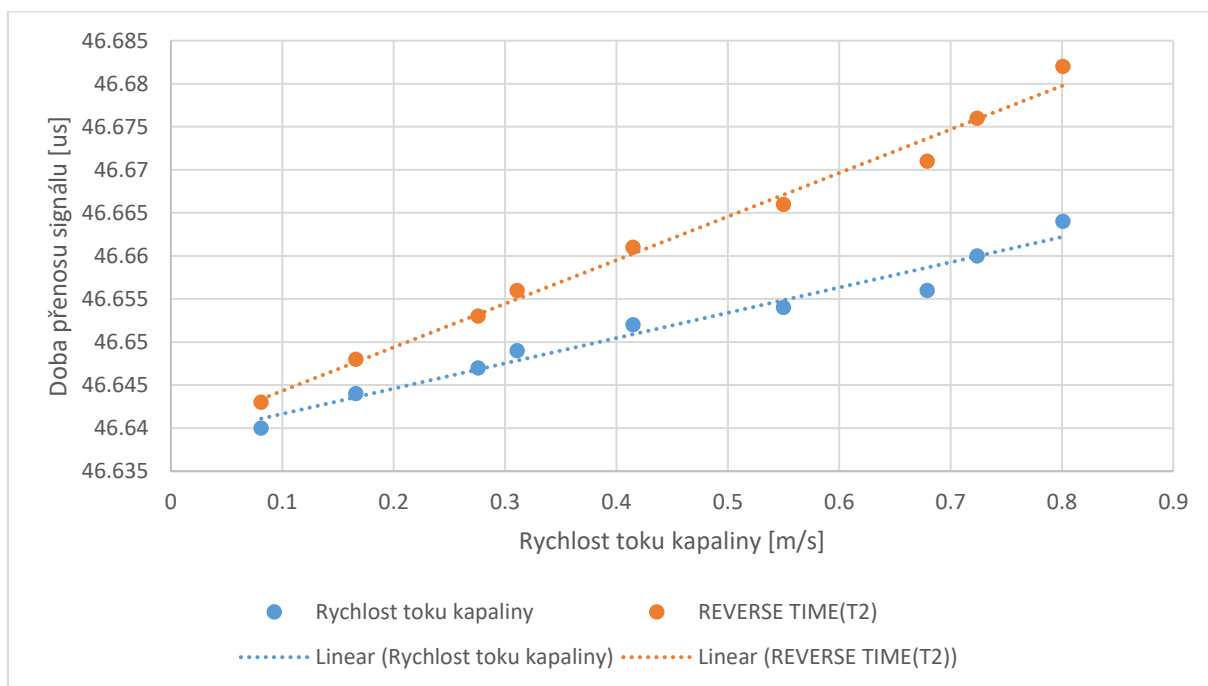
Graf č.2 – Závislost změny doby přenosu ultrazvukového signálu na rychlosti toku kapaliny při běžné teplotě v PEX-b/Al/PEX-b trubce, R999Y122, 16x2,0 mm

Z obou grafů je patrné, že časový rozdíl doby přenosu ultrazvukového signálu je při stejné rychlosti kapaliny rozdílný. U trubky s menším průměrem je časový rozdíl vyhodnocen na kratším časovém úseku, protože i vzdálenost snímačů je menší než u trubek s větším průměrem. Toto je nejlépe viditelné na obrazovce osciloskopu, viz. obr. č.13.



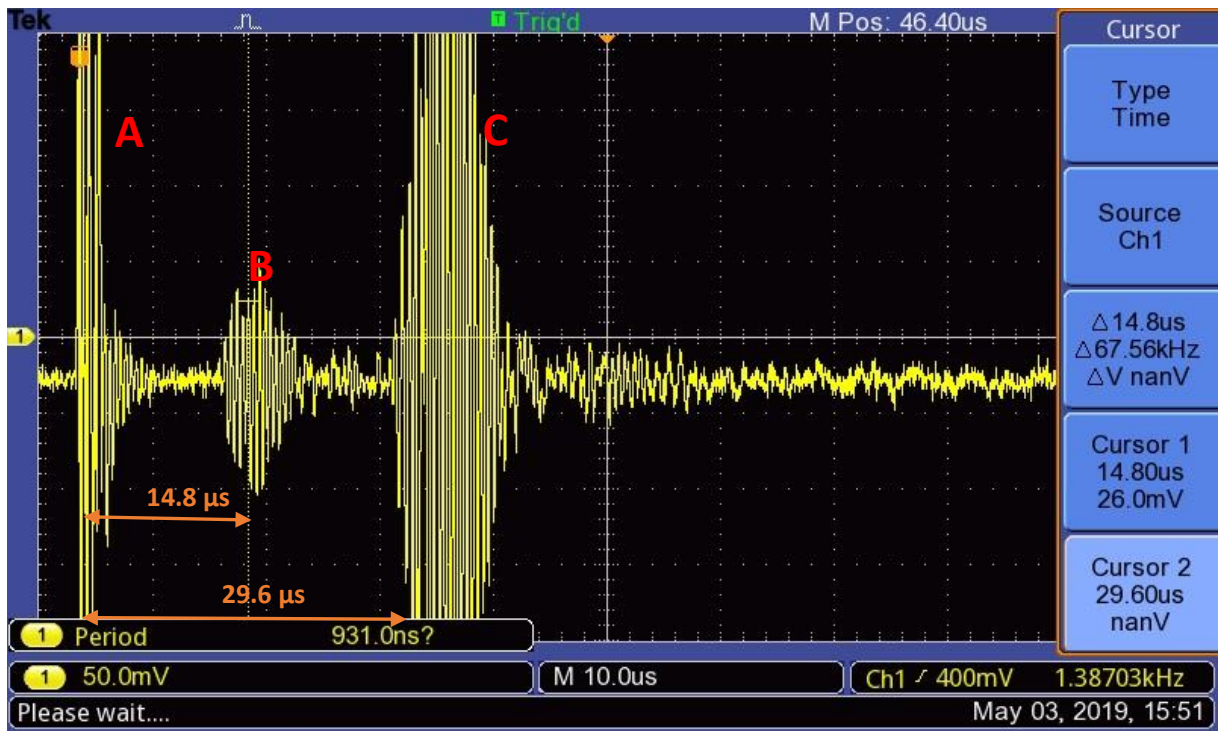
Obr.13 Snímek obrazovky osciloskopu při měření průtoku v Cu trubce 28x1 mm technikou V

Bod A na obrázku naznačuje vysílanou vlnu ultrazvukového paprsku z prvního snímače, bod B pak odrazovou vlnu od protějšího vnitřního povrchu stěny trubky a bod C odpovídá přijmuté vlně v místě druhého snímače. Odrazová vlna při metodice snímání Z není, neboť vysílaný ultrazvukový paprsek je přímo přijímán protějším snímačem. Rychlost toku kapaliny je pak vyhodnocována na základě rozdílu časů vyslaného po proudu kapaliny (forward time) a naopak proti proudu kapaliny (reverse time). U Cu trubky 28x1 mm se tento čas pohybuje okolo hodnoty 46  $\mu$ s, přičemž časový rozdíl obou signálů je o řád nižší, jak je patrné z grafu č.1 a 3.



Graf č.3 – Závislost doby přenosu ultrazvukového signálu na rychlosti toku kapaliny

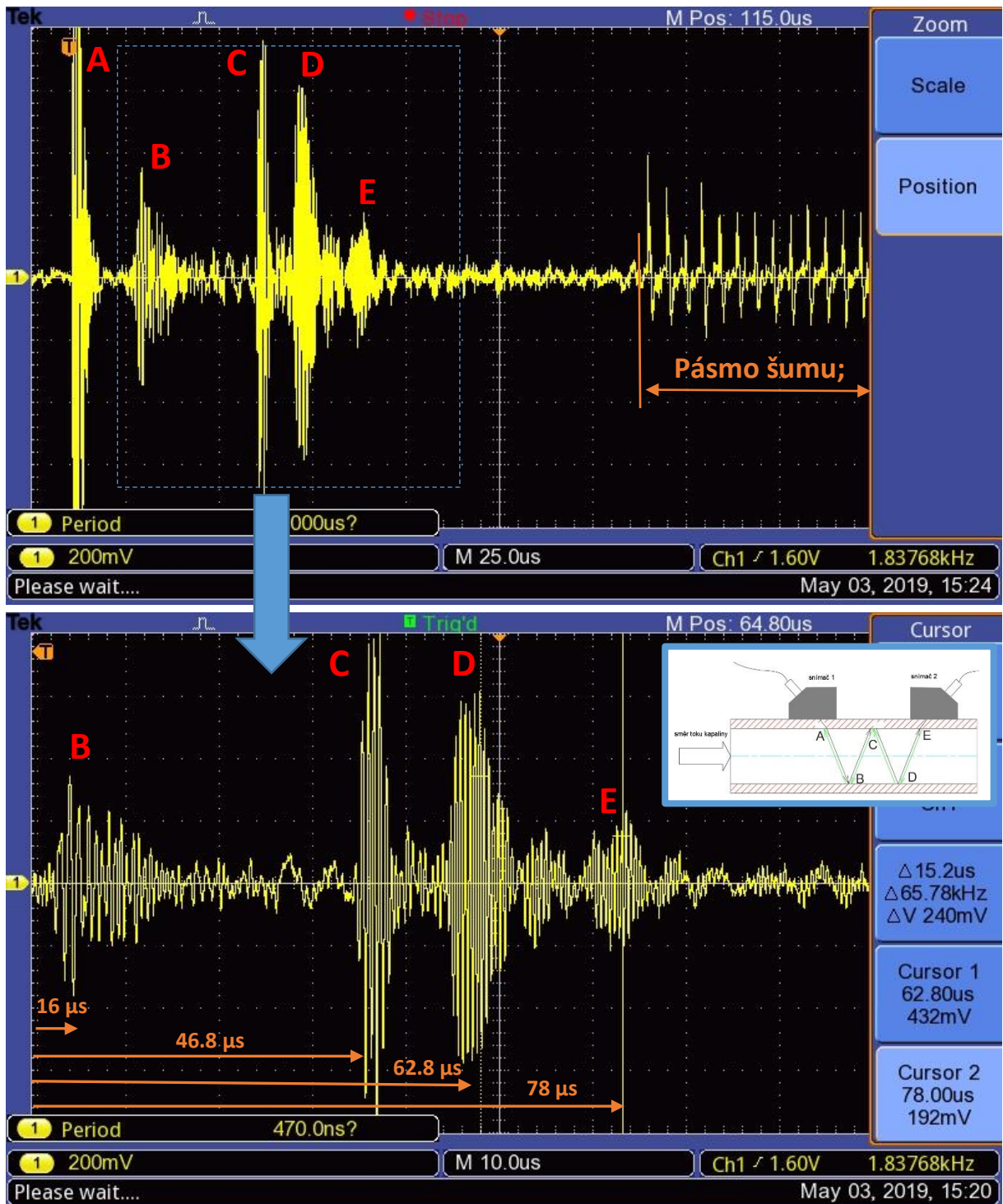
U trubky PEX/AL/PEX 16x2 mm je situace zřejmá z obr. 14. První odrazové echo od protější vnitřní stěny trubky je možné pozorovat ve vzdálenosti 14,80  $\mu$ s časové základny. Další odrazové echo se nachází ve vzdálenosti 29,60  $\mu$ s časové základny. Jedná se odraz z místa, kde je uložen druhý snímač průtokoměru. Toto místo je ve dvojnásobné časové vzdálenosti prvního odrazového echa.



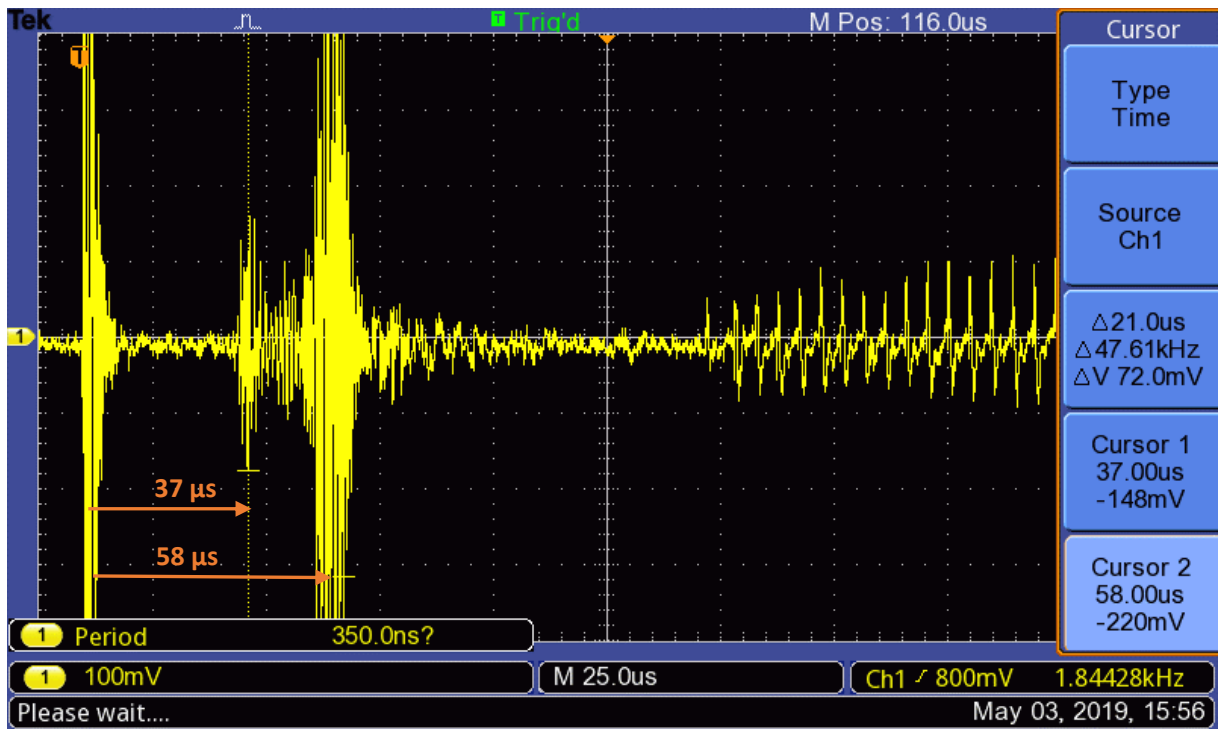
Obr. 14 Snímek obrazovky osciloskopu při měření průtoku v PEX/AL/PEX trubce 16x2 mm technikou V

Dále byla vyzkoušena snímací technika W, kdy byly ultrazvukové snímače umístěny ve dvojnásobné vzdálenosti než při snímací technice V. Toto pozorování proběhlo na obou zkušebních trubkách. Při této technice jsou pozorovatelné mnohačetné odrazové signály jak vidět na obrázku č.15.



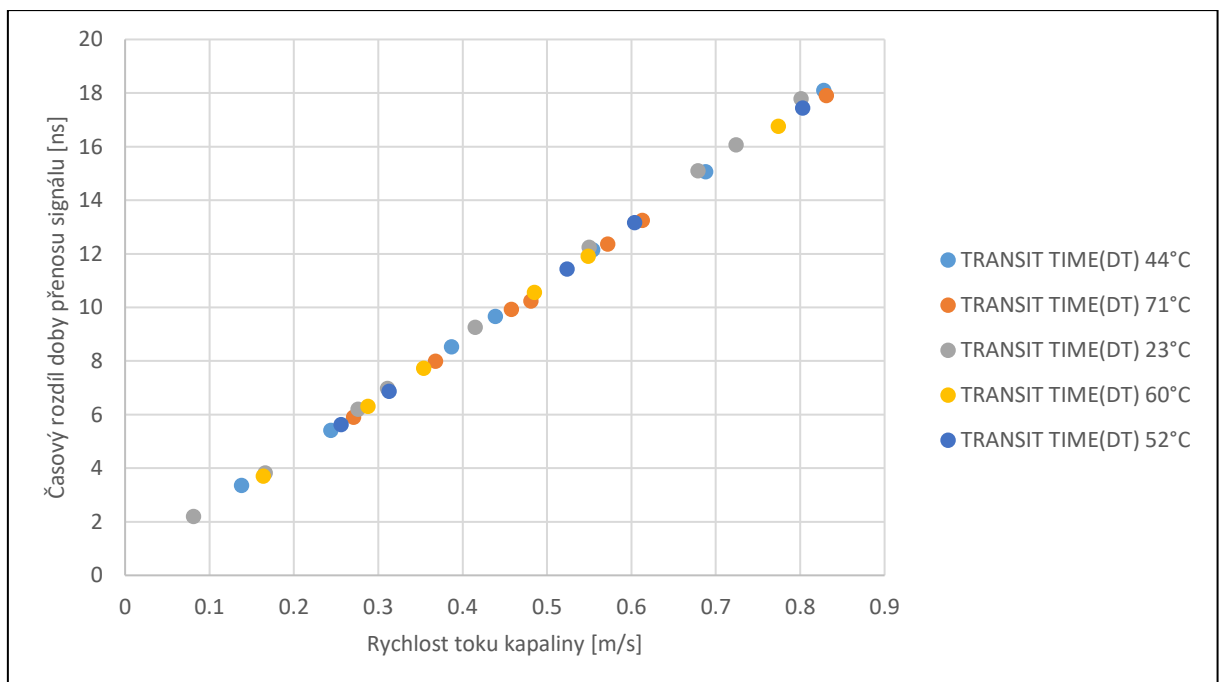


Obr.15 Snímek obrazovky osciloskopu při měření průtoku v Cu trubce 28x1 mm technikou W



Obr.16 Snímek obrazovky osciloskopu při měření průtoku v PEX/AL/PEX trubce 16x2mm technikou W

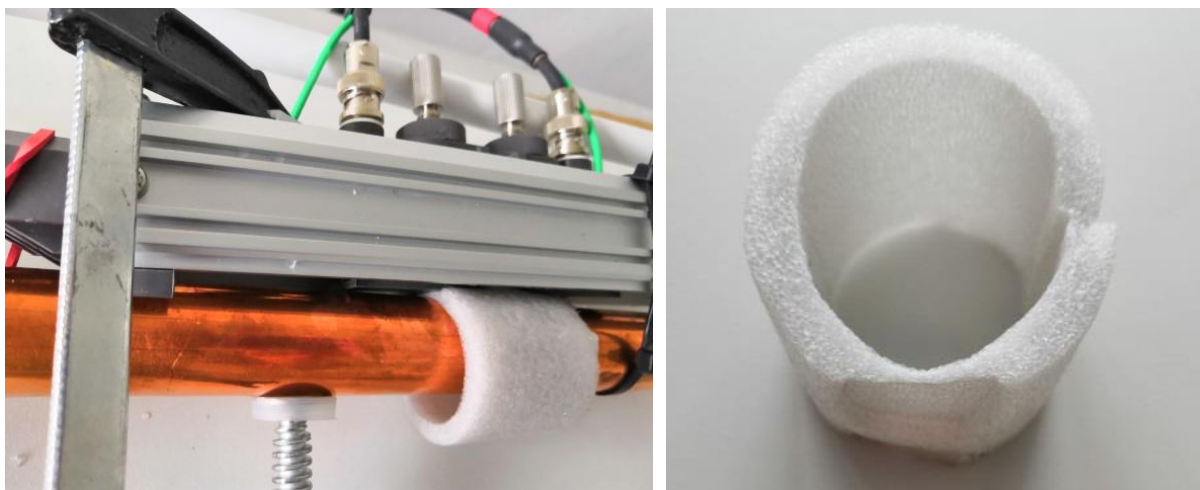
Dále bylo provedeno měření závislosti doby přenosu ultrazvukového signálu na rychlosti toku kapaliny při stoupající teplotě. Měření proběhlo při teplotách od 23°C do 71°C. Z bezpečnostních důvodů další měření při vyšších teplotách průtočné kapaliny neprobíhala. Jak je ale patrné z grafu č.4, teplota nemá v tomto teplotním pásmu žádný vliv na měření průtoků transit time průtokoměry.



Graf č.4 – Závislost rozdílu doby přenosu ultrazvukového signálu na rychlosti toku kapaliny (23-71°C)

### 2.3.2 MĚŘENÍ PRŮTOKU NA POTRUBÍ S IZOLACÍ

Rozvody potrubí teplé vody a topení, zařízení na ohřev vody, zásobníky a zásobní nádrže jsou obvykle izolovány, aby byly eliminovány tepelné ztráty. K izolaci potrubí kruhového průřezu se často používá návleková izolace Mirelon, což je termoizolační trubice z pěnového polyetylenu s uzavřenou buněčnou strukturou. Vzduchové kapsy v tomto izolačním materiálu působí jako bariéry šíření ultrazvukového paprsku. Byl však proveden experiment na Cu trubce 28x1 mm obalené izolací Mirelon o tloušťce stěny 6 mm. Izolační vrstva byla pomocí svěrek stlačena na tloušťku stěny < 1 mm, tak aby byly eliminovány právě tyto vzduchové kapsy. Svrchní část povrchu izolace byla namázána vazebním prostředkem a v tomto místě byly přiloženy snímače ultrazvukového průtokoměru. Ani po pečlivém usazení a utažení měřící soustavy se bohužel nepodařilo najít odrazové echo ultrazvukového signálu na obrazovce osciloskopu a nebylo tak možné měřit průtok kapaliny v izolované trubce.



Obr.17 Experiment s izolovanou Cu trubkou

### 2.3.3 OVĚŘENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ PRŮTOKOMĚRU

Přesnost měření průtoku kapaliny hraje významnou roli při výběru vhodného průtokoměru. Výrobce uvádí přesnost měření  $\pm 3$  až 5 % pro rychlost toku 0-2 m/s a  $\pm 1,5$  až 2,5 % pro rychlost toku 2-32 m/s. Průtok kapaliny byl také ověřen na měřené soustavě. Kapalina byla během čerpání jímána do odměrné nádoby. Během časového úseku byla průběžně zaznamenávána rychlost toku kapaliny, resp. průtok kapaliny. Ze zadrženého objemu kapaliny, času měření, vnitřního průřezu trubky byl vyhodnocen skutečný průtok a porovnán s naměřeným. Při průtoku 20,32 l/min, což odpovídá rychlosti toku 2,55 m/s v potrubí PEX/AL/PEX, byla naměřena odchylka 1,5%. Při průtoku 1,99 l/min (rychlost toku 0,25 m/s v potrubí PEX/AL/PEX) byla naměřena už odchylka 6,2 %.

## ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provést rešerši vybraných průtokoměrů a ověřit možnost měření průtoku kapaliny v měděné trubce o rozměru 28x1 mm a vícevrstevném potrubí PEX/AL/PEX 16x2mm neinvazivním ultrazvukovým průtokoměrem. Limitujícími faktory při výběru vhodného průtokoměru byly zejména nemožnost demontáže potrubí, malá světlost potrubí, provozní teplota měřené kapaliny 10–95 °C, nízké rychlosti kapaliny, nízká chyba měření a v neposlední řadě také potrubí o více vrstvách. S ohledem na tato omezení byl jako nejvhodnější typ průtokoměru vybrán příložený ultrazvukový průtokoměr (clamp-on ultrasonic flowmeter). Původně bylo uvažována realizace vlastního měřicího zařízení sestavené z jednotlivých komponent popsaných v úvodu kapitoly 2. Z finančních důvodů nebyl realizován nákup součástí a bylo rozhodnuto, provést potřebná měření s maximálním využitím integrovaných součástí z komerčně nabízeného ultrazvukového průtokoměru. Byl tak proveden průzkum trhu a zjištěno, kteří výrobci se zabývají tímto segmentem měřících zařízení. Potom byly od těchto výrobců vybrány vhodné přístroje, které by splňovaly požadavky na měření. Z důvodu úspory finančních prostředků přidělené této práci, byly tyto výrobci a distributoři ultrazvukových průtokoměrů osloveni ke spolupráci. Proběhlo několik jednání, ale jednoznačně nejvstřícnější postoj zaujala společnost Amtek, s.r.o., která nám poskytla bezplatnou zapůjčku ultrazvukového průtokoměru FUJI ELECTRIC Time Delta-C se snímači FSSD. Velmi si toho ceníme. Celý projekt byl uvažován jako nízkonákladový a tak i ostatní součásti měřené soupravy byly poskládány ze zbytkových součástí, obalových materiálů či rozebráním z jiných aplikací. Po složení a odzkoušení měřicí a měřené soustavy, byl připojen a oživen ultrazvukový průtokoměr se svými snímači. Nemalý čas byl věnován nastavení přístroje a zejména pak zprovoznění sériové komunikace RS485 mezi ultrazvukovým průtokoměrem a počítačem. Původně zamýšlená elektronická komunikace přes dvojitý převod RS485/RS232 a RS232/USB byla nefunkční a bylo nutné zakoupit převodník převodník RS485/USB. Po zprovoznění měřicí aparatury a nastavení parametrů měřené trubky a kapaliny v průtokoměru byly pozorovány naměřené hodnoty jako průtok kapaliny, rychlost toku kapaliny a na osciloskopu pak síla odrazového echa a zejména pak čas přenosu ultrazvukového signálu po proudu a proti proudu. Závislost změny rychlosti přenosu ultrazvukového signálu po proudu a proti proudu na rychlosti toku kapaliny byly změřeny a z naměřených hodnot vyneseny charakteristiky pro obě typy potrubí. Rozdíl časů přenosu ultrazvukového signálu po proudu a proti proudu má v závislosti na zvyšující se rychlosti toku kapaliny rozevírající charakter a potvrzuje tak princip transit time průtokoměrů. Hodnoty těchto časů se pohybují v řádech desítek mikrosekund. Rozdíl mezi těmito časy je ještě o řád nižší a není tak pozorovatelný na obrazovce osciloskopu. Byl odečítán z výstupních hodnot průtokoměru. Dále bylo provedeno měření změny rychlosti přenosu ultrazvukového signálu po proudu a proti proudu toku kapaliny při různých teplotách až do 71°C. Z vynesené charakteristiky je patrné že, teplota nemá v teplotním pásmu aplikací podlahových topení žádný vliv na měření průtoku transit time průtokoměry. Většina teplovodních potrubí je tepelně izolována různými pěnovými materiály. Byl proto proveden také experiment, aby byla ověřena funkčnost a možnost použití ultrazvukového průtokoměru přes izolační vrstvu. Přes veškeré snahy se nepovedlo nalézt odrazové echo ultrazvukového signálu a měřit

hodnoty průtoku. Na závěr práce byly ověřena přesnost měření samotného průtokoměru. Z naměřených hodnot je zřejmé, že ultrazvukový průtokoměr je spíše vhodnější pro měření vyšších rychlostí kapaliny. Na základě výsledků této práce je možné potvrdit vhodnost použití ultrazvukového průtokoměru FUJI ELECTRIC Time Delta-C pro měření otopných systémů s pracovní teplotou 10 až 95°C. Ačkoliv nebyl sestaven průtokoměr z navržených vlastních samostatných komponent, byly využity veškeré dostupné prostředky a podařilo se měřením ověřit použitelnost ultrazvukového průtokoměru pro měření průtoku v měděné trubce o rozměru 28x1 mm a vícevrstevném potrubí PEX/AL/PEX 16x2mm.

Téma práce bylo velmi zajímavé a nabízí se ještě některá měření, které nebyla z časových důvodů uskutečněna. Například vyrobit předsádky ultrazvukových snímačů s vyšším úhlem náklonu snímačů a napřímit tak ultrazvukový paprsek, resp. prodloužit dráhu ultrazvukového paprsku v měřeném potrubí. Dále by bylo zajímavé vyzkoušet chování průtokoměru s i dalšími typy ultrazvukových sond o frekvenci 0,5 až 10 MHz. Z pohledu aplikace v topenářství by se také nabízelo vyzkoušet různé typy vícevrstevných potrubí a hledat tak hranice možností použití ultrazvukového průtokoměru.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Kadlec Karel: *Ultrazvukové průtokoměry – princip, vlastnosti a použití*, Automa, FCC Public, 07/2013
- [2] *Měřicí přístroje, Měřicí systémy a Služby*, propagační materiál společnosti KROHNE, dostupné z [https://cdn.krohne.com/dlc/CA\\_KROHNE-Product-overview\\_czechrepublic\\_cs\\_181213.pdf](https://cdn.krohne.com/dlc/CA_KROHNE-Product-overview_czechrepublic_cs_181213.pdf) (04/2019)
- [3] *Průtokoměry SITRANS F – síla v průtoku*, propagační materiál společnosti SIEMENS, dostupné z [http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data\\_files/procesni\\_instrumentace/mereni\\_prutoku/brochure\\_sitrans\\_f\\_2006\\_cz.pdf](http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data_files/procesni_instrumentace/mereni_prutoku/brochure_sitrans_f_2006_cz.pdf) (04/2019)
- [4] *Flow Measurement SITRANS F S Clamp-on– Ultrasonic flowmeter SITRANS FS220*, propagační materiál společnosti SIEMENS, dostupné z <https://w3.siemens.com/mcms/sensor-systems/en/process-instrumentation/flow-measurement/ultrasonic-flow-meter/clamp-on-flow/pages/sitrans-fs220.aspx> (04/2019)
- [5] Minako Terao: *Easy-setup clamp-on ultrasonic flowmeter*, Japanese Journal of Applied Physics, 53 07KC08, The Japan Society of Applied Physics, (06/2014)
- [6] Drachman Jens: *Ultrasonic flow meter*, United States Patent Application Publication, Pub. No. US 2013/0047695 A1, (02/2013)
- [7] *Material Sound Velocities*, webové stránky společnosti OLYMPUS, dostupné z <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/> (04/2019)
- [8] *Ultrasonic Flowmeter – Sensor Spacing Calculation Tool*, webové stránky společnosti Fuji Electric, dostupné z <http://www.fujielectric.com/products/instruments/products/flowmeter/top.html> (04/2019)
- [9] *Ultra High Power Ultrasonic Pulsar Receiver*, webové stránky společnosti JP-PROBE, dostupné z [http://www.jp-probe.com/en/product/up\\_img/1407308393-816971\\_f2.pdf](http://www.jp-probe.com/en/product/up_img/1407308393-816971_f2.pdf) (06/2019)
- [10] *Ultrazvukové snímače* společnosti Micronics, webové stránky společnosti JSP Industrial Controls, dostupné z <http://www.jsp.cz/cz/sortiment/micronics/> (06/2019)
- [11] *Princip měření průtoku ultrazvukem*, video publikované společností Endress+Hauser, dostupné z <https://www.youtube.com/watch?v=Bx2RnrfLkQg> (06/2019)

## KLÍČOVÁ SLOVA

- Příložný ultrazvukový průtokoměr
- FUJI ELECTRIC
- Time Delta-C
- PEX/AL/PEX

## KEYWORDS

- Clamp-on ultrasonic flowmeter
- FUJI ELECTRIC
- Time Delta-C
- PEX/AL/PEX

# SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

## Seznam obrázků:

Číslo obr.	Název	Strana
1	Přehled možných uspořádání snímačů na měřeném potrubí	4
2	Schéma při uspořádání snímačů ve tvaru Z	5
3	Schéma zapojení ultrazvukového průtokoměru dle experimentu dle [5]	6
4	Schématické a reálné uspořádání experimentu dle [6]	6
5	Přesnost příložného průtokoměru SITRANS FS220 pro různé velikosti potrubí	7
6	Blokové schéma zapojení původně uvažovaného ultrazvukového průtokoměru	13
7	Struktura vícevrstvého potrubí z PEX-b/Al/PEX-b	16
8	Experimentální ověření rychlosti šíření ultrazvukové vlny na předložené PEX-b/Al/PEX trubce	18
9	Schéma zapojení experimentu	19
10	Náhled do nastavení průtokoměru Time Delta-C v programu Ultrasonic Flowmeter2	20
11	Zapojení měřícího zařízení a měřené soustavy	21
12	Konstrukce a uložení použitých snímačů	22
13	Snímek obrazovky osciloskopu při měření průtoku v Cu trubce 28x1 mm technikou V	24
14	Snímek obrazovky osciloskopu při měření průtoku v PEX/AL/PEX trubce 16x2 mm technikou V	26
15	Snímek obrazovky osciloskopu při měření průtoku v Cu trubce 28x1 mm technikou W	27
16	Snímek obrazovky osciloskopu při měření průtoku v PEX/AL/PEX trubce 16x2 mm technikou W.	28
17	Experiment s izolovanou Cu trubkou	29



#### Seznam tabulek:

Číslo tab.	Název	Strana
1	Přehled vybraných příložných průtokoměrů	14-15
2	Rychlost zvuku ve vybraných materiálech	17
3	Nastavení komunikace RS-485	20

#### Seznam grafů:

Číslo grafu	Název	Strana
1	Závislost změny doby přenosu ultrazvukového signálu na rychlosti toku kapaliny při běžné teplotě v Cu trubce 28x1 mm	23
2	Závislost změny doby přenosu ultrazvukového signálu na rychlosti toku kapaliny při běžné teplotě v PEX-b/Al/PEX-b trubce, R999Y122, 16x2,0 mm	24
3	Závislost doby přenosu ultrazvukového signálu na rychlosti toku kapaliny	25
4	Závislost rozdílu doby přenosu ultrazvukového signálu na rychlosti toku kapaliny (23-71°C)	28

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Popis
$f$	[Hz] – Hertz	Frekvence
$c$	[m/s] – Metr za sekundu	Rychlost zvuku
$t$	[°C] – stupeň Celsia	Teplota
$DN$	[mm] – milimetr	Jmenovitá světlost potrubí
$T$	[s] – sekunda	Čas

## SEZNAM PŘÍLOH

- A1. Technická specifikace: ultrazvukový průtokoměr FUJI ELECTRIC Time Delta-C, dostupné z [https://www.amtek.cz/images/stories/FUJI\\_Electric/France/Flowmeter/Time-Delta-C\\_EDSX6-142d.pdf](https://www.amtek.cz/images/stories/FUJI_Electric/France/Flowmeter/Time-Delta-C_EDSX6-142d.pdf) (05/2019)
- A2. Katalogový list: vícevrstvá trubka PEX/Al/PEX, GIACOMINI, dostupné z <https://www.giacomini.cz> (04/2019)
- A3. Technický list: termoizolační trubice MIRELON, Mirel Vratimov dostupné z <http://www.mirelon.com/> (04/2019)