



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV
ENERGY INSTITUTE

DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY BĚŽNĚ
POUŽÍVANÝCH SNÍMAČŮ TLAKU
DYNAMICAL CHARACTERISTICS OF THE COMMONLY USED PRESSURE
TRANSDUCERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Ondřej Slavíček

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Ondřej Slaviček**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Fluidní inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Dynamické charakteristiky běžně používaných snímačů tlaku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při měření tlakových pulzací se běžně používají tlakové snímače, jejichž vlastní frekvence, nebo časová konstanta uváděná výrobcem je na hranici použitelnosti pro měření rychlých dějů. Úkolem studenta bude provedení literární rešerše dané problematiky, návrh kalibračního stendu a jeho ověření při kalibraci vybraných tlakových snímačů.

Cíle diplomové práce:

Provedení literární rešerše.
Návrh experimentálního stendu.
Kalibrace vybraných tlakových snímačů.

Seznam literatury:

Bude úkolem diplomanta provést literární rešerši problematiky.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá dynamickými vlastnostmi elektrických převodníků tlaku. Jedná se o vlastnosti, které se projevují při měření rychlých, časově závislých dějích. Je možné je popsat dvojím způsobem. Buď pomocí amplitudových a fázových frekvenční charakteristiky, nebo pouze jednou konkrétní hodnotou. Vlastní frekvenci, mezní frekvenci nebo časovou konstantou. Tyto parametry udávají krajní hodnoty pro použití měřicích přístrojů při měření časově závislých dějů. V práci budou popsány postupy určování těchto parametrů.

ABSTRACT

This thesis deals with the dynamic properties of electric pressure transducers. These are properties that are reflected in the measurement of rapid, time-dependent processes. They could be described in two ways. Either by using amplitude and phase frequency response characteristics, or just one particular value. Natural frequency, cutoff frequency or time constant. These parameters indicate the extreme values for the use of measuring devices in the measurement of time-dependent processes. In this work will be described procedures for determining these parameters.

KLÍČOVÁ SLOVA

snímače tlaku, elektrické převodníky tlaku, frekvenční charakteristiky, amplitudové a fázové charakteristiky, dynamická kalibrace tlakových snímačů, měření nestacionárního tlaku

KEY WORDS

pressure transducers, electrical pressure transducers, frequency response characteristic, amplitude phase characteristics, dynamic calibration of pressure transducers, unsteady pressure measurement

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SLAVÍČEK, O. *Dynamické charakteristiky běžně používaných snímačů tlaku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 80 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Dynamické charakteristiky běžně používaných snímačů tlaku* vypracoval samostatně. Vycházel jsem ze zdrojů uvedených v seznamu použité literatury a také z konzultací s vedoucím diplomové práce doc. Ing. Vladimírem Habánem, Ph.D..

V Brně dne.....

.....
Ondřej Slaviček

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval především doc. Ing. Vladimíru Habánovi, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, cenné rady a připomínky během konzultací a za nadšení pro danou věc. Dále bych rád poděkoval Ing. Martinu Hudcovi, který připravoval měřicí trať a byl mi oporou při samotném měření. V neposlední řadě bych rád poděkoval také své rodině, která mě po celou dobu podporovala a vytvářela mi ideální podmínky pro studium.

OBSAH

ÚVOD	15
1 MĚŘENÍ TLAKU	16
1.1 DEFINICE A JEDNOTKY	16
1.2 MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE	18
1.2.1 Tlakové snímače s elektrickým výstupem	19
1.2.1.1 Tenzometrické snímače tlaku	19
1.2.1.2 Kapacitní snímače tlaku	20
1.2.1.3 Piezoelektrické snímače tlaku	20
2 DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY SNÍMAČŮ	21
2.1 ÚPLNÉ DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY	22
2.1.1 Lineární diferenciální rovnice	22
2.1.2 Obrazový přenos	23
2.1.3 Frekvenční přenos	23
2.1.4 Amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky	24
2.1.4.1 Amplitudově-fázová frekvenční charakteristika v komplexní rovině.....	24
2.1.4.2 Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika.....	25
2.1.4.3 Logaritmické frekvenční charakteristiky.....	26
2.1.5 Přejímová charakteristika	27
2.1.6 Impulsní charakteristika	28
2.1.7 Rychlostní charakteristika	28
2.2 DÍLČÍ DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY	29
2.2.1 Časová konstanta.....	29
2.2.2 Dopravní zpoždění	30
2.2.3 Doba odezvy	30
2.2.4 Doba ustálení.....	30
2.2.5 Doba náběhu	30
2.2.6 Tlumení snímače	31
2.2.7 Rezonanční frekvence	31
2.2.8 Mezní frekvence.....	31
3 MODELOVÁNÍ DYNAMICKÝCH SOUSTAV	33
3.1 CHARAKTERISTIKY RC ČLÁNKU	35
3.1.1 Postup měření a vyhodnocení	35
3.1.1.1 Statická charakteristika RC článku.....	36
3.1.1.2 Dynamická charakteristika RC článku	37
3.1.2 Matematický model RC článku.....	39

4	METODY MĚŘENÍ DYNAMICKÝCH CHARAKTERISTIK TLAKOVÝCH SNÍMAČŮ	42
4.1	ODEZVA NA SKOKOVOU ZMĚNU SIGNÁLU.....	42
4.2	ODEZVA NA HARMONICKÝ SIGNÁL.....	43
5	EXPERIMENTÁLNÍ TRATĚ	45
5.1	POPIS TRATĚ	47
5.2	VLNOVOD	48
5.2.1	Výpočet vlnovodu	48
5.2.1.1	Uživatелеm definované funkce	52
6	KALIBRACE VYBRANÝCH SNÍMAČŮ TLAKU	53
6.1	NEPOVEDENÉ MĚŘENÍ	53
6.2	POPIS SNÍMAČŮ.....	54
6.3	POSTUP MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ	55
6.3.1	Výběr referenčního snímače.....	55
6.4	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	56
6.4.1	Snímač 10	56
6.4.2	Snímač 11	58
6.4.3	Snímač 12	59
6.4.4	Snímač 13	59
6.5	MODELY SNÍMAČŮ.....	62
6.5.1	Dvouhmotový model	62
6.5.2	Snímač 10	63
6.5.3	Snímač 11	64
6.5.4	Snímač 12	65
6.5.5	Snímač 13	65
6.6	KOMPLETNÍ VÝSLEDKY.....	67
	ZÁVĚR.....	68
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	70
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	73
	SEZNAM POUŽITÝCH PROGRAMŮ	74
	SEZNAM PŘÍLOH	75

ÚVOD

S měřením nestacionárních průběhů tlaků se technická praxe potýká v mnoha odvětvích. Aby byla zajištěna správnost výsledků, je vhodné volit takovou měřicí techniku, u které jsou udávány některé parametry charakterizující její chování při rychlých dějích. V ideálním případě jsou pro tyto přístroje jasně určeny meze, za kterými už je jejich použití přinejmenším diskutabilní. V některých případech je měřicí technika používána i přesto, že o jejich dynamických vlastnostech nejsou osobě provádějící měření dostupné žádné informace. V takovém případě je nejdříve vhodné provést dynamickou kalibraci daného přístroje. S tím souvisí poměrně komplexní problematika, která bude v této práci podrobena rešerši a pak také experimentu.

V rámci literární rešerše budou nejprve definovány základní pojmy týkající se měření tlaku a vybraných tlakových senzorů. Stěžejní částí však bude popis dynamických charakteristik měřicích přístrojů, s důrazem na amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky. Amplitudové charakteristiky podávají informaci o velikostech naměřených amplitud časově závislé veličiny v závislosti na frekvenci, vzhledem ke skutečným hodnotám. Fázové charakteristiky jsou pak důležité pro porovnávání, například tlakových pulzací v potrubí, měřených v různých místech.

Dalším cílem práce bude navrhnout experimentální trať, která bude sloužit k dynamické kalibraci běžně používaných snímačů tlaku.

V experimentální části pak budou tyto senzory podrobeny testovacím měřením, na základě kterých budou vyhodnoceny některé jejich dynamické charakteristiky.

Touto problematikou se zabývají mnohé zahraniční, ale i tuzemské studie. Nicméně ne všechny jsou volně dostupné a ve většině případů se zabývají jedním, nebo jen několika konkrétními tématy. A to často na odborné úrovni. Tedy hlavním cílem je vytvořit takové dílo, které bude vhodné pro prvotní seznámení se s problematikou, ale i s určitou vědeckou hodnotou.

1 MĚŘENÍ TLAKU [1] [2] [3] [4]

1.1 DEFINICE A JEDNOTKY

Tlak je jedna ze základních fyzikálních veličin a jedná se o veličinu odvozenou. Závisí na něm vlastnosti většiny kapalných a plynných látek.

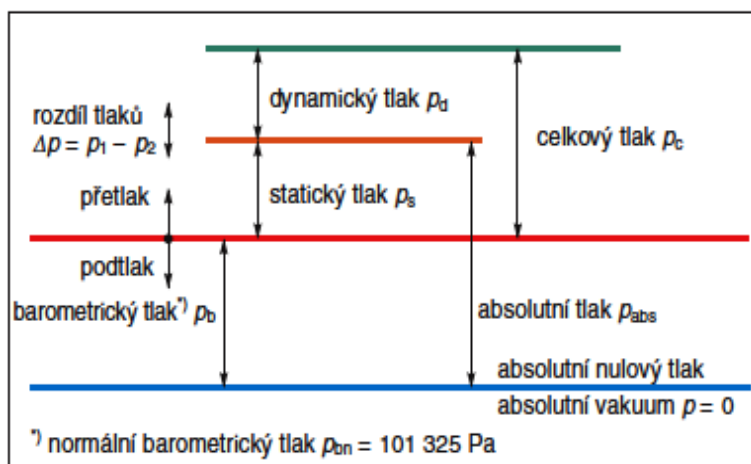
Tlak p je možno definovat hned dvěma různými způsoby. V běžné technické praxi se nejčastěji jedná o podíl elementární síly dF , která působí ve směru normály na element plochy dS :

$$p = \frac{dF}{dS} \quad 1.1$$

Dále může být popsán jako hydrostatický tlak sloupce kapaliny o výšce h a hustotě ρ :

$$p = \rho * g * h \quad 1.2$$

Hodnota tlaku se nejčastěji udává oproti dvěma základním vztažným hodnotám, a to k absolutnímu nulovému tlaku (takto naměřený tlak se nazývá absolutním), nebo k barometrickému tlaku (označovaný pojmem relativní tlak). Relativní tlak se dále dělí na přetlak, nebo podtlak, podle toho jakým směrem se od referenční hodnoty pohybuje. Další často měřenou formou je rozdíl dvou tlaků (tlaková difference), kde ani jeden z měřených tlaků se neshoduje s tlakem barometrickým. Základní rozdělení tlaků je znázorněno na obr. 1.1.



Obr. 1.1 Rozdělení tlaků [2]

- **Absolutní nulový tlak** – také absolutní vakuum, jedná se o teoretický nulový tlak v prostoru dokonale zbaveném jakýchkoli hmotných částic
- **Absolutní tlak** – je naměřený tlak vztažený k absolutní tlakové nule
- **Barometrický tlak** – často nazývaný jako atmosférický nebo okolní tlak, je to absolutní tlak v daném místě a za skutečných podmínek
- **Přetlak** – rozdíl barometrického a absolutního tlaku, který je vyšší než barometrický
- **Podtlak** – rozdíl barometrického a absolutního tlaku, který je nižší než barometrický
- **Vakuum** – je velký podtlak, téměř nulový absolutní tlak

V proudících tekutinách se celkový tlak počítá jako součet tlaku statického a dynamického, popřípadě kinetického.

- **Statický tlak** – pokud je tekutina v klidu, působí zde pouze statický tlak definovaný vztahem (1.1), který je v celém průtočném průřezu stejný, je označen symbolem p_s
- **Kinetický tlak** – je funkcí rychlosti proudění v a hustoty ρ proudící tekutiny a vypočítá se podle následujícího vztahu:

$$p_k = \frac{1}{2} * \rho * v^2 \quad 1.3$$

- **Dynamický tlak** – oproti kinetickému tlaku navíc zahrnuje vliv stlačitelnosti tekutiny c , pro nestlačitelnou tekutinu platí $c = 1$

$$p_d = p_k * c \quad 1.4$$

- **Celkový tlak** – u proudícího média působí v určitém místě a směru, je získán jako součet statického a dynamického tlaku:

$$p_c = p_s + p_d \quad 1.5$$

Základní jednotkou tlaku v soustavě SI je pascal ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$). Tlak $p = 1 \text{ Pa}$ je tedy silový účinek jednoho *newtonu* rovnoměrně rozloženého na ploše 1 m^2 , síla přitom působí kolmo na tuto plochu. Vzhledem k tomu, že pascal je jednotka velmi malá, používají se v praxi její násobky hPa, kPa, MPa a GPa.

V zahraniční literatuře je možné se setkat s mnoha dalšími jednotkami. Některé z nich jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 1. 1 Převody tlakových jednotek na pascal

jednotka	značka	hodnota v pascalech
standardní atmosféra	atm	101 325
technická atmosféra	at	98 066,5
bar	bar	100 000
barye	Ba	0,1
kilogram na metr čtvereční	kg/m^2	9,807
libra na čtvereční palec	psi	6894,7573
libra na čtvereční stopu	psf	47,881
metr vodního sloupce (4°C)	mAq	9806,38
palce vodního sloupce (4°C)	inAq	294,082
mm rtuťového sloupce (0°C)	torr	133,322
palce rtuťového sloupce (0°C)	inHg	3 386,38

1.2 MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE

Přístroje pro měření tlaku se nazývají tlakoměry. Běžné tlakoměry v zásadě využívají dvou principů pro určení neznámého tlaku. Buď vycházejí ze základních vztahů (1.1), (1.2), nebo snímají deformaci citlivého prvku tlakoměru, ze které je dále určen tlak působící na tento prvek.

Tlakoměry mohou být rozděleny hned z několika hledisek. Tím prvním je rozdělení podle velikosti měřeného tlaku a použití na:

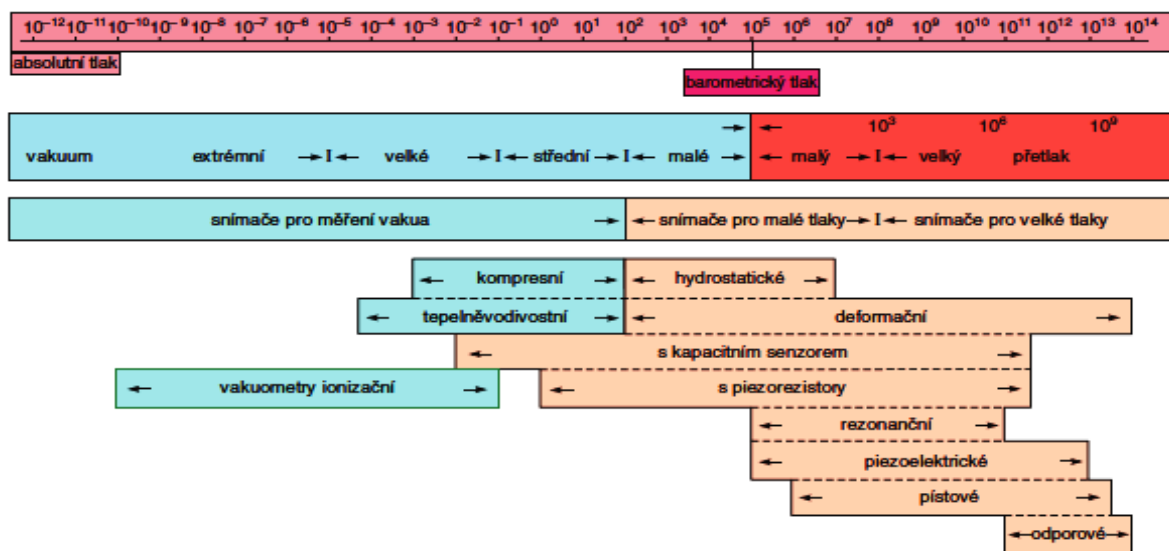
- **Manometry** – k měření přetlaků
- **Vakuometry** – k měření velkých podtlaků
- **Manovakuometry** – k měření přetlaků a podtlaků
- **Tahoměry** – k měření malých podtlaků
- **Diferenční tlakoměry** – k měření tlakových rozdílů
- **Barometry** – k měření tlaku ovzduší

Dále pak dělení podle výstupu:

- **Tlakoměry s mechanickým výstupem**
- **Tlakoměry s digitálním výstupem**
- **Tlakoměry s elektrickým výstupem**

Nakonec rozdělení podle funkčního principu:

- **Kapalinové tlakoměry** – především etalonové a laboratorní přístroje. Měřený tlak je vyrovnáván hydrostatickým tlakem sloupce kapaliny, tento princip vychází ze vztahu (1.2).
- **Pístové a zvonové tlakoměry** – etalonové přístroje, měřítkem tlaku je zdvih zvonu (zvonové), nebo hmotnost závaží umístěného na pístu známého průřezu (pístové). Funkční princip podle vztahu (1.1).
- **Deformační tlakoměry** – měřítkem tlaku je velikost deformace pružného prvku (membránové, trubicové, vlnocové)
- **Elektrické tlakoměry** – využívají tlakové závislosti některých elektrických veličin. Podle principu funkce slouží buď k měření velmi malých absolutních tlaků (ionizační), nebo naopak velmi vysokých tlaků (odporové).



Obr. 1. 2 Orientační rozdělení tlakoměrů podle měřicího rozsahu [2]

Z pohledu technické praxe se nejčastěji používají tlakoměry s elektrickým výstupem. Důvodem je možnost zpracování výsledků měření pomocí výpočetní techniky, což je například při měření na vodním díle, nebo v řízení automatizovaných procesů, v dnešní době zcela nezbytné. Tlakoměry s elektrickým výstupem jsou označovány jako *tlakové senzory*, *tlakové snímače*, *elektrické převodníky tlaku*, nebo *tlakové snímače s elektrickým výstupem*.

Vzhledem k tomu, že praktická část této diplomové práce bude zaměřena na vyhodnocení dynamických charakteristik tlakových snímačů s elektrickým výstupem, budou na vybraných typech senzorů popsány základní principy právě této skupiny.

1.2.1 Tlakové snímače s elektrickým výstupem

Elektrické převodníky tlaku jsou vybaveny tlakoměrným prvkem, jehož deformace se vlivem působení tlaku převádí na změnu elektrické veličiny jako je odpor, kapacita, náboj atd. Měřený tlak může působit na citlivý prvek snímače přímo, nebo přes deformační člen. Takto se snímače tlaku s elektrickým výstupem dále dělí na:

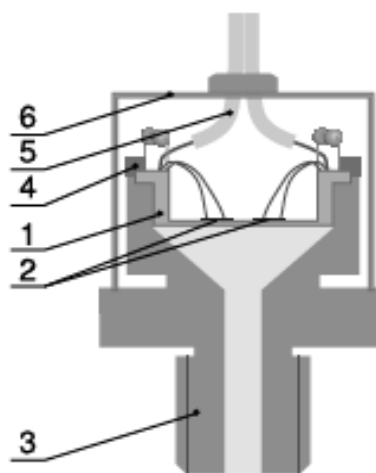
- ***Snímače s deformačním členem*** – vycházející z principu deformačních tlakoměrů. Velikost tlaku měří nepřímo. Relativní nebo absolutní deformace použitého deformačního prvku (většinou membrány) je snímána elektrickým senzorem a dále je transformována na výstupní napěťový nebo proudový signál. Jedná se o senzory tenzometrické, kapacitní, indukční, některé piezoelektrické a další.
- ***Snímače s elektricky aktivním tělesem*** – elektrické tlakoměry (viz výše). Citlivý prvek reaguje na tlakovou zátěž změnou svých elektrických vlastností. Tlak působí přímo na citlivý prvek bez deformačního mezičlenu. Jedná se o senzory piezoelektrické, odporové, některé kapacitní a další.

1.2.1.1 Tenzometrické snímače tlaku

Tenzometrické tlakoměry patří mezi nejčastěji používané snímače tlaku. Při své činnosti měří relativní deformaci deformačního prvku a tu převádí na výstupní signál, nejčastěji napěťový. Tento princip vychází z *piezorezistivního jevu*, kdy vlivem mechanického namáhání (pouze v oblasti pružných deformací) dochází u kovových vodičů a polovodičů ke změnám geometrických rozměrů a krystalografické orientace, které vedou ke změně odporu. Tenzometry se upevňují přímo na deformační člen a to do míst s největší relativní deformací.

Na obr. 1.3 je znázorněno zjednodušené schéma tenzometrického snímače tlaku s membránou jako deformačním členem. Pod pozicí (1) je označena kovová membrána z nerezové oceli. Na ní jsou nalepeny kovové nebo polovodičové tenzometry (2). Membrána je uložena v tělese (3) pomocí kroužku (4). Na obrubě membrány jsou umístěny přípojovací místa pro vodiče (5). Kryt (6) chrání celý senzor před poškozením.

Použitím různých geometrických rozměrů u deformačních členů, nebo různých typů tenzometrů, je možné docílit poměrně širokého rozmezí měřených tlaků, případně měřených médií.



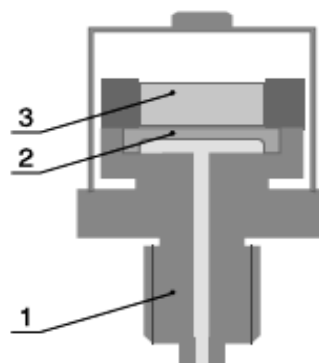
Obr. 1.3 Tenzometrický snímač tlaku [1]

1.2.1.2 Kapacitní snímače tlaku

Jedná se převážně o senzory s deformačním členem, kterým je opět nejčastěji membrána. Princip kapacitních snímačů tlaku je velice jednoduchý, jedná se o převod měřeného tlaku na kapacitu měřicího kondenzátoru. Stejně tak je poměrně jednoduché jejich konstrukční provedení a z těchto důvodů se jedná o nejpoužívanější tlakové senzory.

Hlavní část snímače tvoří kondenzátor. Jednou z desek (elektrod) kondenzátoru je právě deformační člen, jehož poloha se vlivem působení měřeného tlaku mění. Druhá deska je pevně usazena v základním tělese senzoru. Změnou vzdálenosti desek kondenzátoru dochází ke změně jeho kapacity, která je zabudovanou elektronikou zpracována na výstupní signál.

Zjednodušené schéma kapacitního snímače je na obr. 1.4. Měřicí prvek, tedy pohyblivou desku kondenzátoru tvoří membrána (2), pevně uložená v základním tělese (1). Na pozici (3) je pevná deska kondenzátoru, vyráběná ze skla.



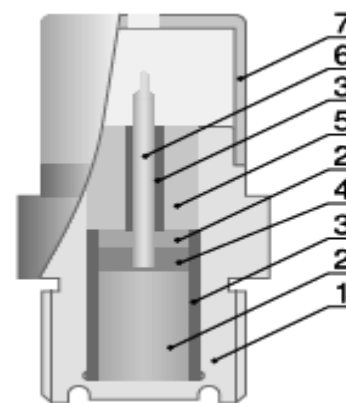
Obr. 1. 4 Kapacitní snímač tlaku [1]

1.2.1.3 Piezoelektrické snímače tlaku

Piezoelektrické snímače tlaku patří mezi snímače s elektricky aktivním tělesem. Jejich funkce je založena na principu přímého piezoelektrického jevu. Jedná se o schopnost některých krystalů generovat elektrické napětí při jejich deformaci. Měřený tlak se přivádí přes oddělovací membránu na piezoelektrický krystal, vyráběný převážně z křemíku nebo z turmalínu. Membrána může působit na krystal přímo, nebo je od něj oddělena médiem zajišťujícím přenos tlaku. Díky této konfiguraci nedochází k poškození piezoelektrického krystalu působením vnějšího prostředí.

Piezoelektrické tlakové senzory jsou vhodné pro měření časově závislých průběhů tlaků a rychlých dějů a to díky své vysoké vlastní frekvenci. Měřit statický tlak s nimi v podstatě nelze, jelikož náboj vzniklý po přiložení tlaku se vlivem nedokonalé izolace vybíjí a napětí na elektrodách tak klesá.

Zjednodušené schéma je znázorněno na obr. 1.5. Základem je těleso (1), které je ve spodní vytváří membránu pro oddělení citlivého prvku (2) od měřeného prostředí. Citlivý prvek (piezoelektrický blok) je od tělesa (1) oddělen izolací (3). V horní části piezoelektrického bloku se nachází kovová elektroda (4), ze které je odváděn náboj přes kovovou tyč (6). Tyč je opět izolována (3) od mezikus (5). V horní části je snímač chráněn krytem (7). Náboj generovaný krystalem je vodiči odváděn od tyče (6).



Obr. 1. 5 Piezoelektrický snímač tlaku [1]

Jako *běžně používané snímače tlaku*, které budou v experimentální části této práce podrobeny stanovení jejich dynamických charakteristik, lze považovat snímače tenzometrické a kapacitní. Piezoelektrické tlakové senzory jsou naopak špičkovými přístroji (i jejich cena tomu odpovídá) a díky vysoké hodnotě vlastní frekvence, jsou při měření dynamických charakteristik ostatních tlakových senzorů často používány pro získání referenčních hodnot.

2 DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY SNÍMAČŮ [1] [6] [7] [11]

Statické a dynamické vlastnosti systému, který může reprezentovat měřicí přístroje, automatizované soustavy a další, patří k jeho základním vlastnostem. Zatímco statické vlastnosti se projevují v ustálených stavech, dynamické vlastnosti se projevují při přechodu mezi ustálenými stavy nebo v případech, kdy je měřená veličina trvale časově proměnná a kdy je potřeba zjišťovat její okamžité hodnoty. Za systém jako takový budou nadále považovány pouze měřicí přístroje, respektive snímače tlaku.

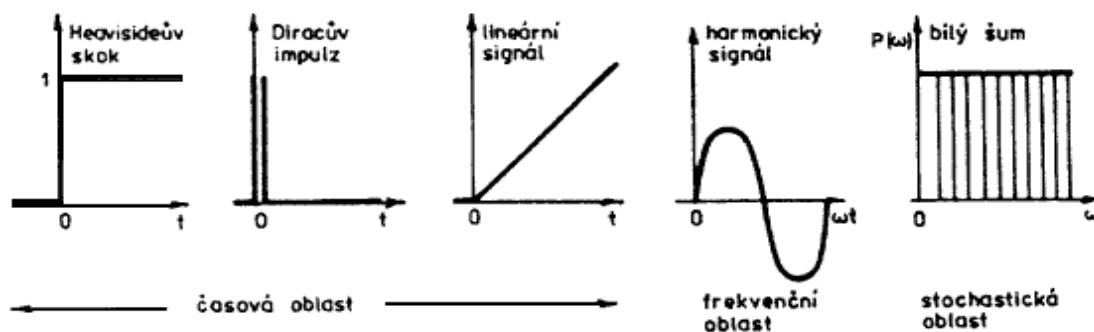
Měřicí přístroje obecně mohou být více, či méně setrvačné. Tato setrvačnost určuje jejich dynamické chování. Dynamické vlastnosti měřicích přístrojů se projevují při měřeních, kdy se hodnoty vstupních (měřených) veličin mění s časem. V takovém případě údaj naměřený přístrojem, tedy hodnota výstupní veličiny (hodnota výstupního signálu měřicího přístroje), nemusí odpovídat hodnotě vstupní veličiny (vstupního signálu). Důvodem tohoto chování jsou nevhodné dynamické vlastnosti měřicího přístroje. Rozdíl mezi výstupním signálem snímače a měřeným signálem, způsobený dynamickými vlastnostmi snímače, se nazývá dynamická chyba.

Dynamické charakteristiky měřicích přístrojů se dělí do dvou základních skupin:

- **Úplné dynamické charakteristiky** – poskytují úplný popis matematického modelu dynamických vlastností přístroje. Tento popis může být algebraický, grafický apod.
- **Dílčí dynamické charakteristiky** – jednotlivé parametry úplných dynamických charakteristik

Pro popis dynamických charakteristik měřicích přístrojů se s výhodou používají výsledky odezvy přístrojů na charakteristické vstupní signály, tzv. testovací signály. Obvykle jsou vyšetřovány odezvy na testovací signály znázorněné na obr. 2.1. Těmito signály jsou:

- **Jednotkový skok, tzv. Heavisideův skok** – odezvou je tzv. přechodová charakteristika
- **Jednotkový impuls, tzv. Diracův impuls** – odezvou je impulsní (váhová) charakteristika
- **Signál s konstantní rychlostí změny** – odezvou je rychlostní charakteristika
- **Harmonický signál** – odezvou je harmonický přenos
- **Bílý šum**



Obr. 2. 1 Příklady testovacích signálů [6]

Dynamické charakteristiky měřicích přístrojů jsou nejčastěji definovány v časové oblasti, ve frekvenční oblasti a komplexní frekvenční oblasti.

2.1 ÚPLNÉ DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY

Úplné dynamické charakteristiky vychází z vhodných lineárních modelů, doplněných o experimentálně naměřené hodnoty. Úplné dynamické charakteristiky jsou nejčastěji popisovány s užitím: *lineárních diferenciálních rovnic, obrazových a frekvenčních přenosů, amplitudových a fázových frekvenčních charakteristik, přechodových charakteristik a impulsní a rychlostních charakteristik.*

Tyto charakteristiky se používají k určení výstupního signálu měřicího přístroje z časového průběhu vstupního signálu a opačně. Dále pak pro výpočet dynamických charakteristik měřicích řetězců, k výběru a porovnání přístrojů pro konkrétní experiment, pro stanovení a simulaci dynamických chyb a k výpočtu korekcí a vyloučení dynamických chyb z výsledků měření.

2.1.1 Lineární diferenciální rovnice

Lineární diferenciální rovnice s konstantními koeficienty tvoří základní a nejstarší formu matematického popisu dynamických vlastností přístrojů. Rovnice jsou zapisovány tak, že na levé straně se nacházejí derivace výstupních veličin a na pravé straně derivace vstupních veličin. Podle nejvyššího řádu derivace výstupní veličiny pak rozlišujeme přístroje prvního, druhého nebo vyšších řádů. Obecný tvar lineární diferenciální rovnice popisující dynamický systém je následující:

$$\begin{aligned} a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 y^{(1)}(t) + a_0 y(t) \\ = b_m x^{(m)}(t) + b_{m-1} x^{(m-1)}(t) + \dots + b_1 x^{(1)}(t) + b_0 x(t) \end{aligned} \quad 2.1$$

Kde

- $x(t)$ je vstupní veličina
- $y(t)$ je výstupní veličina
- t je nezávislá proměnná (čas)
- a, b jsou konstantní koeficienty
- m, n vyjadřují řády derivací

Určit dynamickou charakteristiku přístroje znamená řešit diferenciální rovnici pro daný tvar vstupní veličiny $x(t)$ a dané okrajové podmínky. Diferenciální rovnice se získává výpočtem z přímo měřitelných úplných dynamických charakteristik, nebo analyticky spolu s experimentálním stanovením parametrů, případně použitím dílčích dynamických charakteristik. Pro další popis diferenciálních rovnic budou indexy m a n nahrazeny apostrofem. Typický tvar diferenciální rovnice měřicího přístroje prvního řádu je:

$$a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad 2.2$$

Po podělení celé rovnice koeficientem a_0 a zavedení nových konstant $T=(a_1/a_0)$ a $K=(b_0/a_0)$ bude mít diferenciální rovnice měřicího přístroje prvního řádu tvar:

$$T y'(t) + y(t) = K x(t) \quad 2.3$$

Kde

- T je časová konstanta
- K je převodová konstanta, zesílení (směrnice sklonu statické charakteristiky)

Typický tvar diferenciální rovnice měřicího přístroje druhého řádu je:

$$y''(t) + 2\xi\omega_0 y'(t) + \omega_0^2 y(t) = \omega_0^2 Kx(t) \quad 2.4$$

Kde

ω_0 je vlastní úhlová frekvence

ξ je poměrný útlum

2.1.2 Obrazový přenos

Přenos obecně je definován jako poměr výstupní veličiny $y(t)$ k veličině vstupní $x(t)$. Obrazový přenos $G(s)$ je pak poměr Laplaceovy transformace výstupního signálu $Y(s)$ k Laplaceově transformaci odpovídajícího vstupního signálu $X(s)$ při nulových počátečních podmínkách. Laplaceova transformace je zaváděna kvůli zjednodušení řešení diferenciálních rovnic, jejich převodem na rovnice algebraické (z originálu na tzv. obraz). Takto získané řešení je zpětnou Laplaceovou transformací převedeno zpět z obrazu na originál.

Obrazový přenos se podobně jako diferenciální rovnice nedá stanovit přímo experimentálně. Získává se z diferenciální rovnice, nebo z ostatních úplných dynamických charakteristik příslušným přepočtem.

Obecný tvar obrazového přenosu vycházející z rovnice (2.1) vypadá následovně:

$$G(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad 2.5$$

Kde

s je parametr Laplaceovy transformace

Obrazový přenos měřicího přístroje prvního řádu popsaného diferenciální rovnicí (2.3) je dán vztahem:

$$G(s) = \frac{K}{1 + Ts} \quad 2.6$$

Obrazový přenos měřicího přístroje druhého řádu popsaného diferenciální rovnicí (2.4) je dán vztahem:

$$G(s) = \frac{K\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad 2.7$$

Zavedením různých konstant lze dosáhnout různých zápisů přenosu.

2.1.3 Frekvenční přenos

Frekvenční přenos $G(i\omega)$ je definován stejně jako obrazový přenos. Pouze s tím rozdílem, že se jedná o komplexní funkci s hodnotou argumentu $s = i\omega$, kde i je imaginární jednotka pro kterou platí $i^2 = -1$ a ω je úhlová frekvence. Jedná se tedy o poměr výstupních harmonických kmitů $Y(i\omega)$ naměřených přístrojem ke vstupním harmonickým kmitům $X(i\omega)$. Pokud jsou vlastnosti přístroje popsány lineární diferenciální rovnicí, jako např. (2.3) a na vstupu je harmonický signál, pak i na výstupu je harmonický signál. Výstupní signál má stejnou

úhlovou frekvenci jako vstupní signál, jeho amplituda je zesílena v poměru $|G(i\omega)|$ a oproti vstupnímu signálu je fázově posunut o úhel φ .

Frekvenční přenos měřicího přístroje prvního řádu popsaného diferenciální rovnicí (2.3) vyjádřený ve složkovém tvaru je:

$$G(i\omega) = \frac{K}{1 + i\omega T} = \frac{K}{1 + \omega^2 T^2} - i \frac{\omega T K}{1 + \omega^2 T^2} \quad 2.8$$

Frekvenční přenos měřicího přístroje druhého řádu popsaného diferenciální rovnicí (2.4) vyjádřený ve složkovém tvaru je:

$$G(i\omega) = \frac{K\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\xi\omega_0\omega} \quad 2.9$$

$$G(i\omega) = \frac{K\omega_0^2(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2\omega_0^2\omega^2} - i \frac{2K\omega_0^3\xi\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2\omega_0^2\omega^2}$$

2.1.4 Amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky

Amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky popisují závislosti poměrů amplitud výstupního a vstupního signálu, respektive jejich fázové posuny, na frekvenci, případně úhlové frekvenci budícího harmonického signálu. Tyto charakteristiky lze stanovit jednak experimentálně, kdy je k měřicímu přístroji přiveden budící harmonický signál známé amplitudy o různých frekvencích, nebo se dají vyjádřit z frekvenčního přenosu.

Amplitudová charakteristika $A(\omega)$ vyjádřená ze složkového tvaru frekvenčního přenosu je dána vztahem:

$$A(\omega) = |G(i\omega)| = \sqrt{[ReG(i\omega)]^2 + [ImG(i\omega)]^2} \quad 2.10$$

Kde

$ReG(i\omega)$ je reálná část přenosu

$ImG(i\omega)$ je imaginární část přenosu

Fázová charakteristika $\varphi(\omega)$ vyjádřená ze složkového tvaru frekvenčního přenosu je dána vztahem:

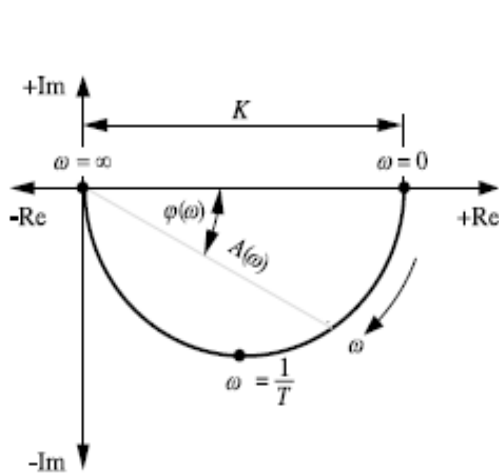
$$\varphi(\omega) = \arctg G(i\omega) = \arctg \frac{ImG(i\omega)}{ReG(i\omega)} \quad 2.11$$

2.1.4.1 Amplitudově-fázová frekvenční charakteristika v komplexní rovině

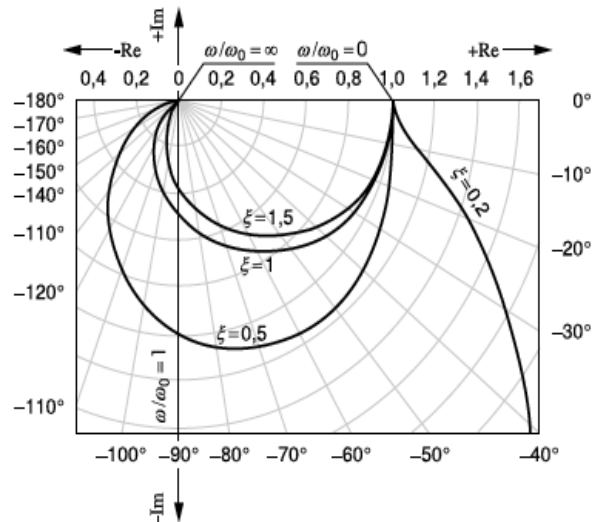
Jedná se o geometrické místo bodů v komplexní rovině, jejichž vzdálenost od počátku je dána poměrem amplitud výstupního a vstupního harmonického signálu a úhel mezi průvodičem a kladnou reálnou osou je daný hodnotou fázového posunu mezi výstupním a vstupním signálem. Tato forma grafického zpracování je výhodná v tom, že zahrnuje amplitudovou i fázovou charakteristiku do jednoho diagramu. Nevýhoda však spočívá v pracnosti konstrukce

diagramu a v určité nepřehlednosti pro určování některých parametrů dynamických vlastností měřicího přístroje.

Pro měřicí přístroj prvního řádu, popsaného diferenciální rovnicí (2.3) je charakteristika znázorněna na obr. 2.2 a pro přístroj druhého řádu, popsaného diferenciální rovnicí (2.4) na obr. 2.3. Ve druhém případě je navíc zřetelná závislost pro různé hodnoty poměrného útlumu.



Obr. 2.2 Amplitudově-fázová frekvenční charakteristika měřicího přístroje prvního řádu [1]

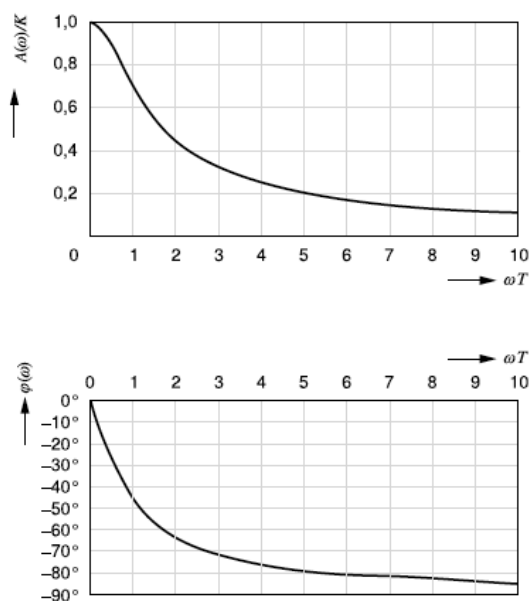


Obr. 2.3 Amplitudově-fázová frekvenční charakteristika měřicího přístroje druhého řádu [1]

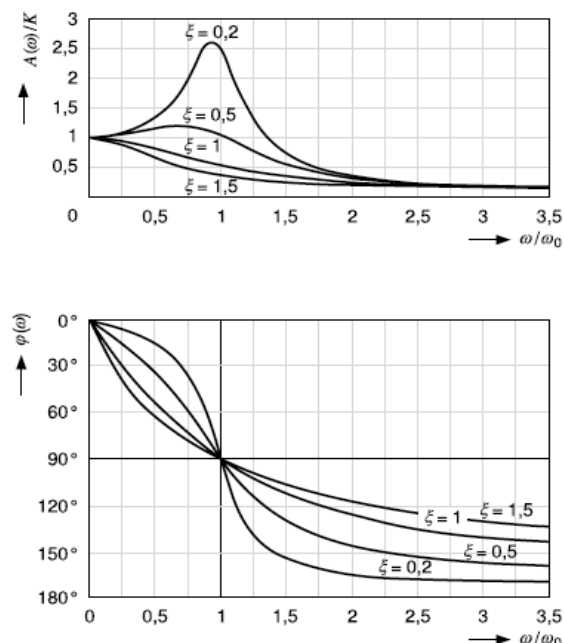
2.1.4.2 Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika

Amplitudová charakteristika $A(\omega)$ je definována závislostí poměru amplitud výstupního a vstupního harmonického signálu na jejich frekvenci. Fázová charakteristika $\varphi(\omega)$ je pak závislost fázového posunu mezi těmito signály na jejich frekvenci. Na vodorovnou osu se tedy vynášejí poměr amplitud signálů, nebo poměr poměru amplitud signálů k převodové konstantě. Takto v případě amplitudové charakteristiky, nebo fázový posun ve stupních či radiánech pro znázornění charakteristiky fázové. Na vodorovné ose může být vynesena frekvence, poměr úhlové frekvence k vlastní úhlové frekvenci, nebo součin úhlové frekvence a časové konstanty, z čehož dvě poslední možnosti jsou identické. Variabilita grafického vyjádření charakteristik je výhodná pro přehledný popis různých dynamických systémů. Obě charakteristiky jsou do grafů vynášeny v lineárních souřadnicích. Kvůli lepší názornosti mohou být charakteristiky vkládány do jednoho grafu, kde fázová charakteristika je vynesena na vedlejší vodorovné ose.

Pro měřicí přístroj prvního řádu popsaného diferenciální rovnicí (2.3) jsou charakteristiky znázorněny na obr. 2.4 a pro měřicí přístroj druhého řádu popsaného diferenciální rovnicí (2.4) na obr. 2.5.



Obr. 2. 4 Shora: Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika měřicího přístroje prvního řádu [1]



Obr. 2. 5 Shora: Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika měřicího přístroje druhého řádu [1]

2.1.4.3 Logaritmické frekvenční charakteristiky

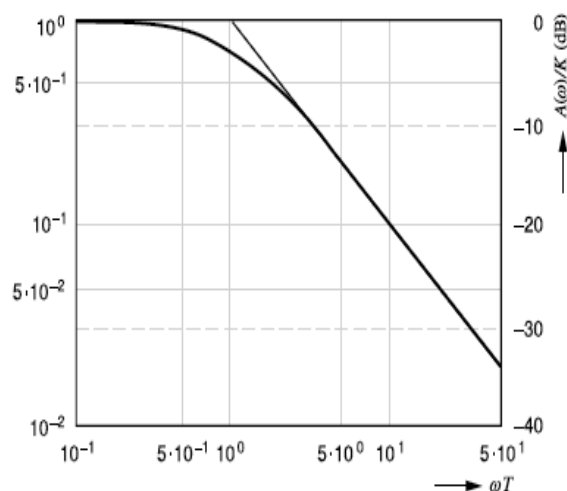
U zobrazení v komplexní rovině mohla být frekvenční charakteristika nazvána jako amplitudově-fázová a to z toho důvodu, že každému bodu charakteristiky náleží jak hodnota poměrné amplitudy, tak hodnota fázového posunu. U těchto charakteristik však není na první pohled zřetelná závislost na měřené frekvenci. Tento fakt řeší amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky, ale pouze do určitého rozmezí frekvencí. Pro větší rozmezí frekvencí se mohou závislosti jevit jako náhodné, respektive bez výrazného trendu a to kvůli velkému rozptylu naměřených hodnot. V takový okamžik je vhodné použít logaritmické frekvenční charakteristiky.

Logaritmické frekvenční charakteristiky jsou nejčastěji používaným grafickým zpracováním amplitudových a fázových frekvenčních charakteristik a to jak kvůli jednoduché konstrukci, tak pro svoji přehlednost zobrazení.

Existují dva možné způsoby zpracování, přičemž základem obou dvou je vynesení frekvence na vodorovné ose v logaritmických souřadnicích.

První možností a zřejmě tou jednodušší, je vynesení poměrné amplitudy na svislé ose také v logaritmických souřadnicích.

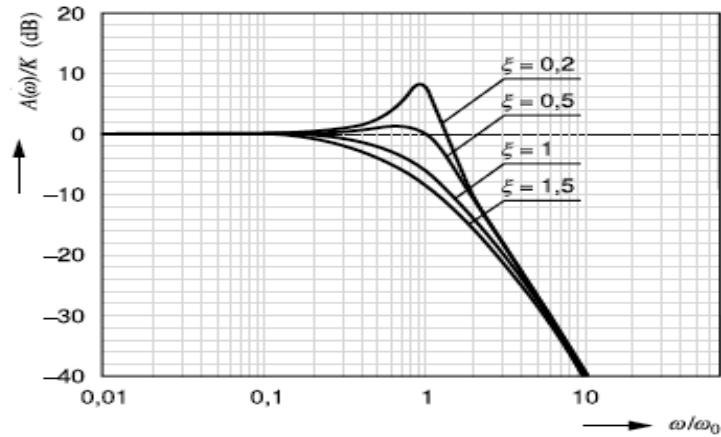
Druhá možnost spočívá v přepočtu frekvenčního přenosu do decibelů podle vztahu $20 \cdot \log G(i\omega)$, výsledná hodnota poměrné amplitudy v decibelech je pak



Obr. 2. 6 Logaritmická amplitudová frekvenční charakteristika měřicího přístroje prvního řádu [1]

vynášena na svislou osu již v lineárních souřadnicích. V obou případech je fázový posun v lineárních souřadnicích a je vhodné jej vynést do společného grafu na vedlejší osu.

Pro měřicí přístroj prvního řádu popsaného diferenciální rovnicí (2.3) je amplitudová charakteristika uvedena na obr. 2.6 a pro měřicí přístroj druhého řádu popsaného diferenciální rovnicí (2.4) na obr. 2.7.

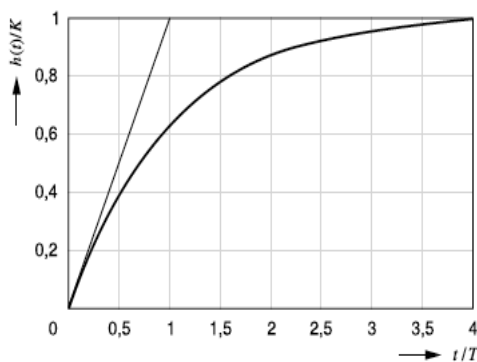


Obr. 2.7 Logaritmická amplitudová frekvenční charakteristika měřicího přístroje druhého řádu [1]

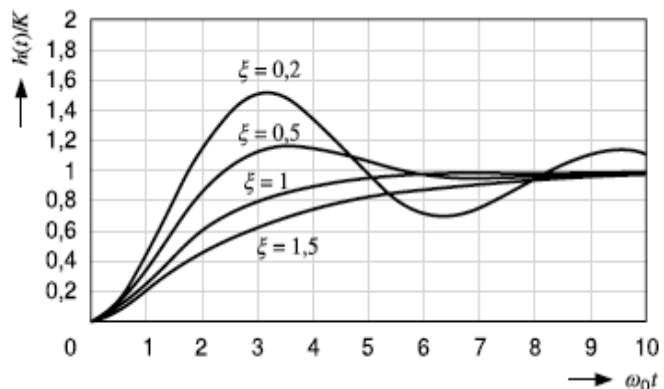
2.1.5 Přechodová charakteristika

Přechodová charakteristika $h(t)$ je odezva na skokovou změnu vstupního signálu. Lze ji získat experimentálně náhlou změnou hodnoty vstupního signálu o vhodné velikosti. Nejčastěji se využívá jednotkového tzv. *Heavisideova skoku*, který tedy reprezentuje funkci $x(t)$, pro níž platí $x(t)=0$ pro $t < 0$ a $x(t)=1$ pro $t \geq 0$ viz obr. 2.1. Pokud má skok jinou velikost než 1, je nutné jeho hodnotu uvést, nebo přepočítat na jednotkový skok.

Pro měřicí přístroj prvního řádu popsaného diferenciální rovnicí (2.3) je přechodová charakteristika uvedena na obr. 2.8 a pro měřicí přístroj druhého řádu popsaného diferenciální rovnicí (2.4) na obr. 2.9.



Obr. 2.8 Přechodová charakteristika měřicího přístroje prvního řádu [1]



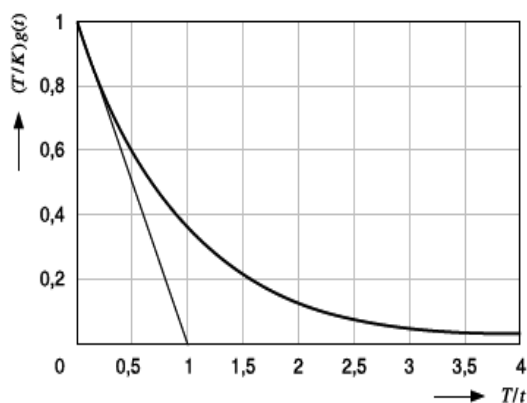
Obr. 2.9 Přechodová charakteristika měřicího přístroje druhého řádu [1]

2.1.6 Impulsní charakteristika

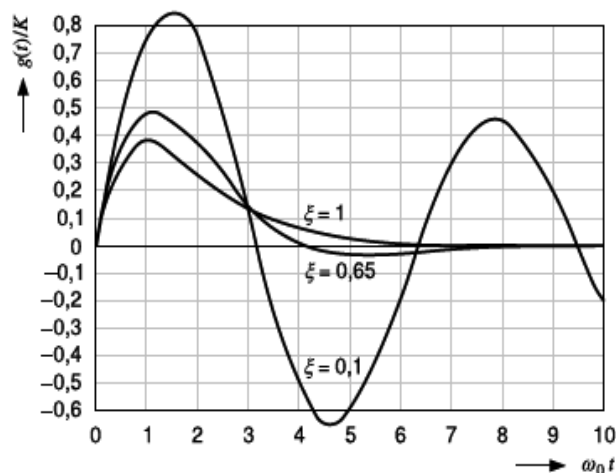
Někdy také *váhová charakteristika* $\delta(t)$ je odezva systému na jednotkový tzv. Diracův impuls reprezentující vstupní funkci $x(t)$ pro kterou platí $x(t)=0$ pro $t \neq 0$, a pro $t = 0$ není definovaná viz obr. 2.1. Z definice je zřejmé, že Diracův impuls nelze fyzikálně realizovat.

Při experimentálním zjišťování impulsní charakteristiky je snaha se Diracovu impulsu alespoň přiblížit. Amplituda jednotkového impulsu by měla působit co nejkratší dobu a s co největší intenzitou. Dále je možné stanovit impulsní charakteristiku jako derivaci přechodové charakteristiky a naopak, přechodová charakteristika je integrálem charakteristiky impulsní.

Pro měřicí přístroj prvního řádu popsaného diferenciální rovnicí (2.3) je amplitudová charakteristika uvedena na obr. 2.10 a pro měřicí přístroj druhého řádu popsaného diferenciální rovnicí (2.4) na obr. 2.11.



Obr. 2.10 Impulsní charakteristika měřicího přístroje prvního řádu [1]

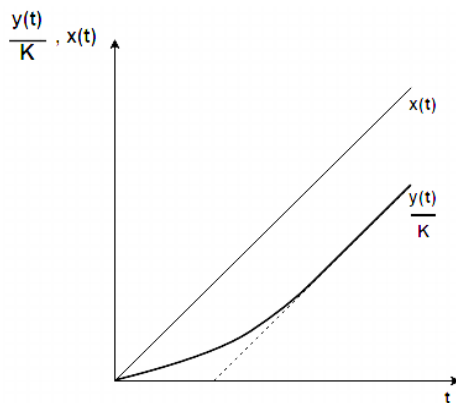


Obr. 2.11 Impulsní charakteristika měřicího přístroje druhého řádu [1]

2.1.7 Rychlostní charakteristika

Vyjadřuje odezvu přístroje na změnu vstupního signálu s konstantní rychlostí této změny viz obr. 2.1. Závislost vstupního signálu $x(t)$ na čase je lineární a dá se předepsat vztahem $x=w*t$, kde w je rychlost změny vstupní veličiny a t je čas.

Na obr. 2.12 je znázorněna rychlostní charakteristika měřicího přístroje prvního řádu, popsaného diferenciální rovnicí (2.3).



Obr. 2.12 Rychlostní charakteristika měřicího přístroje prvního řádu

2.2 DÍLČÍ DYNAMICKÉ CHRAKTERISTIKY

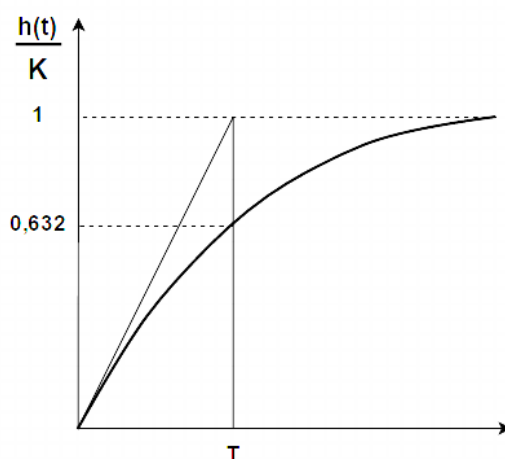
Jedná se o poněkud jednodušší charakteristiky vystihující jen některou typickou nebo výraznou stránku dynamických vlastností. Jednoduchost nespočívá jen v jejich definici a vyjádření, ale také v postupu jejich stanovení a použití. Díky těmto aspektům jsou upřednostňovány oproti charakteristikám úplným.

Dílčí charakteristiky bývají udávány výrobcem pro jednotlivé typy měřicích přístrojů a převodníků, případně jsou stanovovány experimentálně pro individuální přístroje. Slouží k výběru přístrojů z hlediska konkrétního účelu použití, dále pro porovnání měřicích přístrojů z hlediska použitelnosti v daných podmínkách.

K dílčím dynamickým charakteristikám patří: *časová konstanta, dopravní zpoždění, doba průtahu, doba náběhu, doba odezvy, doba ustálení, tlumení snímače a rezonanční a mezní frekvence.*

2.2.1 Časová konstanta

Časová konstanta T je parametr měřicího přístroje s rozměrem času. Vyskytuje se na levé straně diferenciální rovnice přístroje. Je definována jako doba, za kterou výstupní signál přístroje dosáhne úrovně 63,2% konečné hodnoty odezvy na jednotkový skok a to od okamžiku první změny na výstupním signálu. Realizace jednotkového skoku tlaku pro zjišťování časové konstanty tlakového snímače se realizuje obvykle z maximálního tlaku na minimální, ale i naopak. Časovou konstantu lze určit z přechodové charakteristiky a to buď graficky, nebo numericky. Grafické vyjádření časové konstanty je uvedeno na obr. 2.13.



Obr. 2.13 Určení časové konstanty z přechodové charakteristiky

Tato definice však ve většině případů platí pouze pro měřicí přístroj, nebo systém prvního řádu. Pro popis složitějších systémů lze zavést další časové konstanty a to za následujících předpokladů pro obecný tvar obrazového přenosu ze vztahu (2.5).

Jestliže jsou polynomy v čitateli a ve jmenovateli vyjádřeny ve tvaru kořenových činitelů, bude mít přenosová funkce tvar, kde kořeny s_i polynomu jmenovatele jsou tzv. póly systému a kořeny n_i polynomu čitatele jsou tzv. nuly systému. Jestliže póly i nuly jsou reálná čísla, lze zavést časové konstanty systému a to T jako časovou konstantu jmenovatele a τ jako časovou konstantu čitatele přenosu. Časové konstanty jsou dány převrácenými hodnotami pólů a nul, $T = -1/s_i$ a $\tau = -1/n_i$. Přenos je pak dán vztahem:

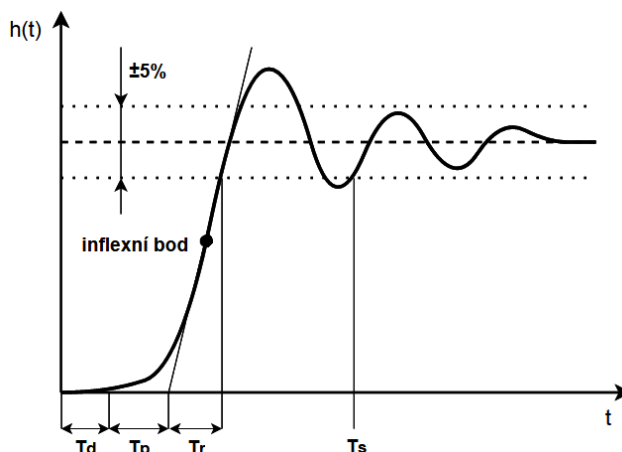
$$G(s) = \frac{b_0 (1 + s\tau_1)(1 + s\tau_2) \dots (1 + s\tau_m)}{a_0 (1 + sT_1)(1 + sT_2) \dots (1 + sT_n)} \quad 2.12$$

Stanovení těchto konstant je poněkud ošemetné. Jejich definice se liší autor od autora, respektive mezi různými vědními obory. V teorii automatického řízení, která s touto

problematikou úzce souvisí, jsou časové konstanty aproximovány vhodnými metodami, např. Strejcovou metodou. Dále se některé časové konstanty stanovují jako časové úseky, které uplynou mezi dosažením dvou procentuálních hodnot z celkové hodnoty ustáleného výstupního signálu. Druhý přístup je používanější v případě tlakových snímačů.

2.2.2 Dopravní zpoždění

Dopravní zpoždění T_d (*dead time*) je časový interval vymezený okamžikem počátku jednotkové změny na vstupu měřicího přístroje a okamžikem první pozorovatelné změny na výstupu z přístroje. Při harmonickém buzení je příčinou přírůstku fázového posunu, který je úměrný frekvenci. Dopravní zpoždění lze stanovit z přechodové charakteristiky, jak je znázorněno na obr. 2.14. Tentokrát se jedná o přechodovou charakteristiku pro měřicí přístroj druhého řádu s poměrným tlumením menším než 1.



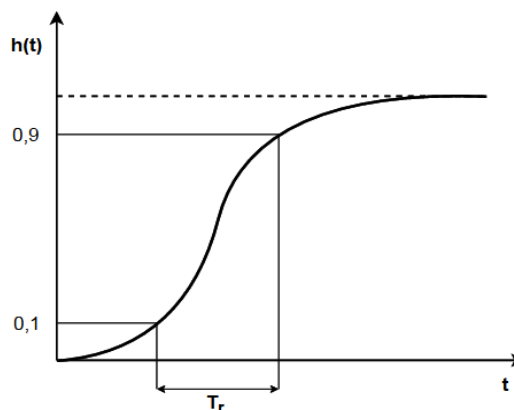
Obr. 2.14 Dopravní zpoždění, doba průtahu, doba náběhu a doba ustálení

2.2.3 Doba odezvy

Doba odezvy T_o (*response time*) je doba, která uplyne od okamžiku zavedení jednotkového skoku na vstup přístroje do dosažení 63,2% konečné hodnoty signálu na výstupu měřicího přístroje. Doba odezvy pak vyjadřuje součet dopravního zpoždění a časové konstanty. Tento parametr je definován pouze Bejčkem [7].

2.2.4 Doba ustálení

Doba ustálení T_s (*settling time*) je definována jako časový interval mezi začátkem náhlé změny vstupního signálu a okamžikem, kdy výstupní signál nabude hodnotu ležící ve stanovených mezích okolo konečné ustálené hodnoty. Po uplynutí této doby by funkce $h(t)$ neměla překročit odchylku větší než 5% od ustálené hodnoty. Některé literatury uvádí maximální odchylku 2% [7]. V praxi se používají hodnoty dané součtem dopravního zpoždění a čtyř až sedminásobku časové konstanty. Doba ustálení je graficky vyjádřena na obr. 2.14.



Obr. 2.15 Doba náběhu 10-90%

2.2.5 Doba náběhu

Doba náběhu T_r (*rise time*), jedná se o nejčastěji uváděný parametr měřicího přístroje.

Aproximace této hodnoty pomocí tečny v inflexním bodě je patrná z obr. 2.14. U tlakových snímačů je doba náběhu velmi často uváděna jako čas, za který se hodnota výstupního signálu změní z 10% na 90% své ustálené hodnoty, viz obr. 2.15. Na obr. 2.14. je dále znázorněna doba průtahu T_p , její součet s dopravním zpožděním vyjadřuje výsledné zpoždění. Posledním parametrem s rozměrem času je doba přechodu, definovaná jako součet doby průtahu a doby náběhu.

2.2.6 Tlumení snímače

Také *útlum* λ je poměr dvou po sobě následujících amplitud kmitů výstupní veličiny na jedné straně (s časovým odstupem rovným jedné periodě kmitů) při neměnicích se hodnotách vstupních veličin. Přirozený logaritmus útlumu se nazývá *logaritmický dekrement útlumu* δ . Z něj lze pro měřicí přístroj druhého řádu vypočítat *poměrný útlum* ξ podle vztahu (2.12), který je parametrem diferenciální rovnice.

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad 2.13$$

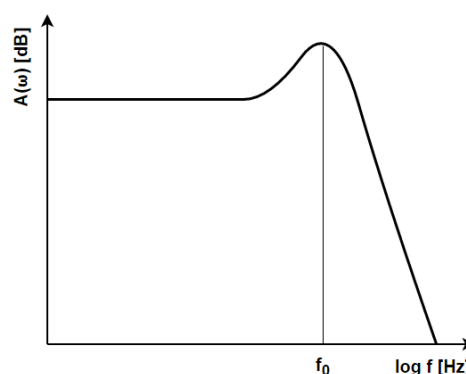
2.2.7 Rezonanční frekvence

Rezonanční frekvence f_0 je frekvence volného netlumeného kmitání systému, také nazývaná *vlastní frekvence*, kterou systém kmitá sám o sobě (bez působení vnějších vlivů). Pro výpočet *vlastní úhlové frekvence* pak platí následující vztah:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad 2.14$$

Převrácená hodnota vlastní frekvence se pak rovná hodnotě T_0 , což je *perioda vlastních kmitů*. Vlastní frekvenci lze stanovit z amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky. Grafické vyjádření je na obr. 2.15, pro měřicí přístroje druhého řádu.

Oproti diagramům na obr. 2.7 je na vodorovné ose vynesena samotná frekvence f v logaritmických souřadnicích a na svislé ose amplitudová charakteristika $A(\omega)$ také v logaritmických souřadnicích a v decibelech. Takto budou zpracovány i výsledky samotného měření, jelikož bude hledána závislost přenosu snímačů právě na frekvenci vstupního signálu.



Obr. 2.15 Vlastní frekvence měřicího přístroje druhého řádu

2.2.8 Mezní frekvence

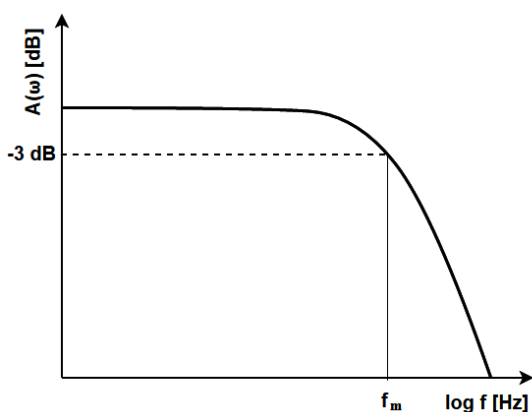
Mezní frekvence f_m není vždy jasně daným parametrem a její stanovení se liší pro konkrétní aplikace (měření, regulace atd.). Mezní frekvence může být definována jako hodnota, při které amplitudová charakteristika překročí určitou hranici, např. 0,9; 0,85; nebo na druhou stranu 1,1; 1,15. V elektrotechnice je mezní frekvence definována jako pokles logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky o -3dB. Mezní frekvence může být nalezena také

pomocí *Bodeho asymptot*. Většinou se jedná o hodnotu menší, než je hodnota vlastní frekvence viz obr. 2.18. K výpočtu mezní frekvence pro měřicí přístroj prvního řádu složí následující rovnice:

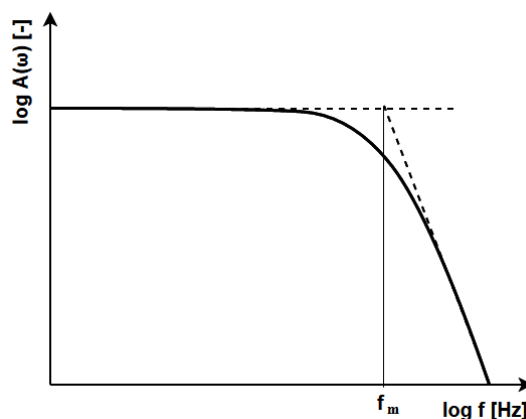
$$f_m = \frac{1}{2\pi T} \quad 2.15$$

Pro výpočet *mezní úhlové frekvence* platí vztah:

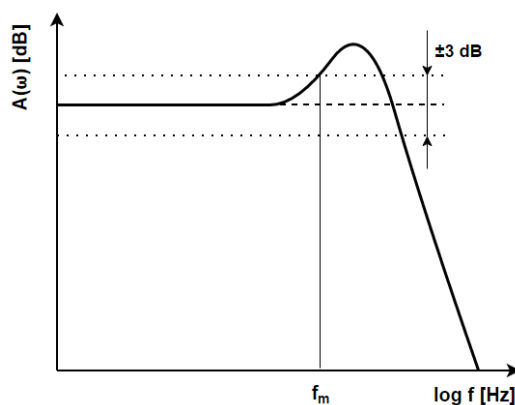
$$\omega_m = 2\pi f_m \quad 2.16$$



Obr. 2. 16 Mezní frekvence měřicího přístroje prvního řádu



Obr. 2. 17 Mezní frekvence měřicího přístroje prvního řádu určená pomocí Bodeho asymptot



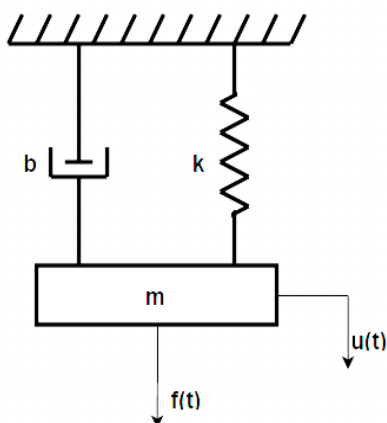
Obr. 2. 16 Mezní frekvence měřicího přístroje druhého řádu

Dílejší dynamické charakteristiky jsou z hlediska popisu dynamického chování měřicího přístroje poměrně důležitými parametry. Přesné definice některých by měli být uvedeny v normě ČSN IEC 60050-351. Dále by za správné mohli být považovány definice Bejčkem [7], který se zabýval přímo problematikou týkající se elektrických převodníků tlaku. Nedostatkem je zde fakt, že mezi některými parametry neexistují exaktní přepočty.

3 MODELOVÁNÍ DYNAMICKÝCH SOUSTAV [5] [8] [9] [10]

V úvodní části předešlé kapitoly bylo nastíněno, že tlakový senzor může být považován za dynamickou soustavu. Dynamické soustavy je možné modelovat pomocí lineárních diferenciálních rovnic, viz rovnice (2.1). Pro sestavení modelu je potřeba vybrat vhodný matematický popis zákonitostí, které budou daný systém popisovat. Dynamické vlastnosti lze modelovat pomocí mechanických obr. 3.1 či elektrotechnických dynamických modelů obr 3.2 a dalších. Druhý případ se dá i poměrně jednoduše experimentálně ověřit, respektive pro vytvoření konkrétního matematického modelu je experiment vždy nezbytný. V praxi se lze častěji setkat s modely mechanickými. Jejich konstanty hmotnosti, tuhosti, tlumení a další odvozené konstanty, lépe vystihují vlastnosti tlakových snímačů. Tyto modely lze najít např. pod názvy *proporcionální členy* (teorie automatického řízení, regulace), *pasivní lineární obvody* (elektrotechnika), nebo *teorie kmitání* (mechanika těles). V mechanice se jedná o jedno, dvou a vícehmotové systémy (mohou být i bez hmoty) a v elektrotechnice o RC, RL a RLC členy.

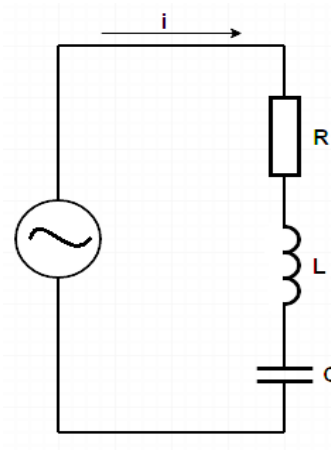
Součástí experimentální části této práce, bude nalezení vhodného matematického modelu pro popis dynamického chování běžně používaných snímačů tlaku. Pro seznámení se s danou problematikou bude v rámci této kapitoly vyhotovena dynamická charakteristika RC článku, jenž může být považován za modelový příklad měřicího přístroje prvního řádu.



Obr. 3. 1 Jednohmotový systém

Kde

b je tlumení
 k je tuhost
 m je hmotnost
 $f(t)$ je budící síla
 $u(t)$ je posunutí



Obr. 3. 1 RLC obvod

Kde

R je odpor
 L je indukčnost cívky
 C je kapacita kondenzátoru
 I je proud

Pro porovnání mezi mechanickými a elektrotechnickými soustavami existuje elektro-mechanická analogie viz tabulka 3.1.

Obě znázorněné soustavy odpovídají nejjednodušším modelům měřicích přístrojů druhého řádu. Aby bylo možné matematickým modelem popsat i složitější přenosy je nutné tyto soustavy rozšířit, případně omezit o vhodně zvolené prvky (tuhost, tlumení, odpor atd.).

Jednotlivé prvky lze do soustavy řadit buď sériově anebo paralelně k ostatním a to na základě znalostí chování dynamických soustav.

Tab. 3. 1 Elektro-mechanická analogie

Mechanika		Elektrotechnika	
Hmotnost	m	Indukčnost	L
Tuhost	k	Elektrická elastance	1/C
Tlumení	b	Ohmický odpor	R
Buzení	f(t)	Časová změna napájecího napětí	dU/dt
Výchylka	u(t)	Proud	I(t)
Rychlost	v(t)	Časová změna proudu	I'(t)
Zrychlení	a(t)	Druhá derivace proudu	I''(t)

Základem mechanického modelu je lineární diferenciální rovnice (pohybová rovnice) následujícího tvaru:

$$mu''(t) + bu'(t) + ku(t) = f(t) \quad 3.1$$

Zavedením harmonické budící funkce ve tvaru:

$$f(t) = F_0 \sin(\omega t) \quad 3.2$$

Kde

F_0 je amplituda budící síly.

A vyřešením homogenního a partikulárního řešení lineární diferenciální rovnice podle Kratochvíla [8], je výsledný tvar amplitudové charakteristiky následující:

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + b^2\omega^2}} \quad 3.3$$

Ve zmíněné literatuře figuruje $A(\omega)$, jako velikost amplitudy. Zde se jedná o poměr amplitud. Tedy amplitudovou charakteristiku. Fázová charakteristika poté nabývá tvaru:

$$\varphi(\omega) = \arctg\left(\frac{b\omega}{k - m\omega^2}\right) \quad 3.4$$

K těmto rovnicím je možné dospět z frekvenčního přenosu $G(i\omega)$ podle (2.9) dosazením za konstanty poměrného útlumu ξ , převodové konstanty K a vlastní úhlové frekvence ω_0 :

$$\xi = \frac{b}{2\sqrt{mk}} \quad 3.5$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad 3.6$$

$$K = \frac{1}{k} \quad 3.7$$

Analogicky lze postupovat v případě elektrotechnického modelu. Diferenciální rovnice vychází z řešení obvodu užitím Kirchhoffových zákonů a z příslušných vztahů mezi jednotlivými prvky obvodu v závislosti na proudu, respektive napětí.

Vynecháním hmoty tělíska u mechanického modelu, případně cívky u elektrotechnického modelu, přechází diferenciální rovnice z druhého řádu na první.

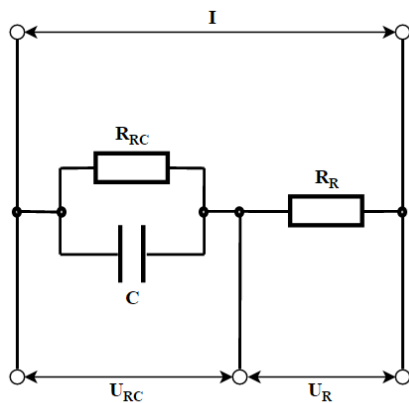
3.1 CHARAKTERISTIKY RC ČLÁNKU [13]

RC článek je jednou ze základních elektrotechnických součástek. V obvodu se střídavým proudem realizuje matematickou funkci integrál. To znamená, že průběh výstupního napětí odpovídá primitivní funkci (integrálu) vstupního napětí v závislosti na čase. Méně časté je paralelní zapojení, u kterého odpovídá průběh výstupního napětí integrálu vstupního proudu. Druhý případ bude realizován v rámci zpracování dynamické charakteristiky RC členu. Důvod je ten, že tlakové senzory používané v hydraulické laboratoři na Odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana, kde byl celý experiment uskutečněn, mají proudový výstup. Proudový výstup snímače je oproti napěťovému méně náchylný na rušení.

RC článek je v různých vědních oborech označován různými názvy, jako např.: *integrační článek, pasivní filtr, dolní propust, proporcionální člen se setrvačností prvního řádu* a další. V této diplomové práci složí RC článek jako modelový příklad měřicího přístroje prvního řádu se zpožděním. Budou experimentálně stanoveny jeho dynamické charakteristiky. Dále pak budou ověřeny některé způsoby měření a vyhodnocení charakteristik a to vše jako příprava před kalibrací samotných snímačů tlaku.

3.1.1 Postup měření a vyhodnocení

Schéma zapojení RC článku v měřícím obvodu je znázorněno na obr. 3.3. Samotný RC článek je pouze levá část obvodu. Celé měřicí stanoviště je pak na přiložené fotografii.



Obr. 3. 3 RC článek v měřícím obvodu

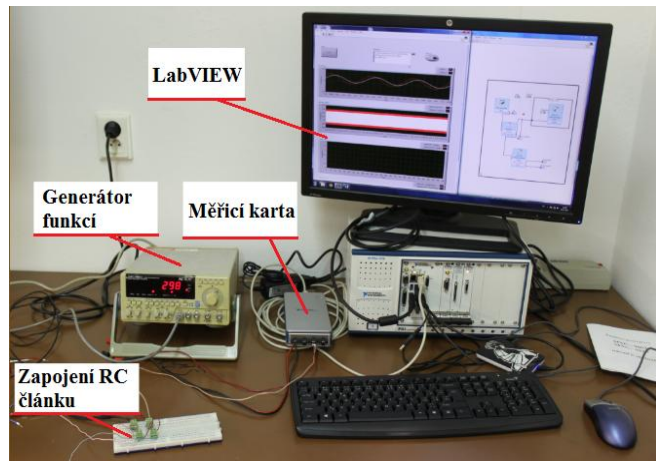


Foto 3. 1 Experimentální stanoviště měření RC článku

Kde

U_{RC} je měřené napětí na RC článku

U_R je referenční (vstupní) napětí

C je kapacita kondenzátoru, $C = 1 \mu F$

R_R je referenční odpor, $R_R = 480 \Omega$

R_{RC} je odpor RC článku, $R_{RC} = 480 \Omega$

I je vstupní proudový signál

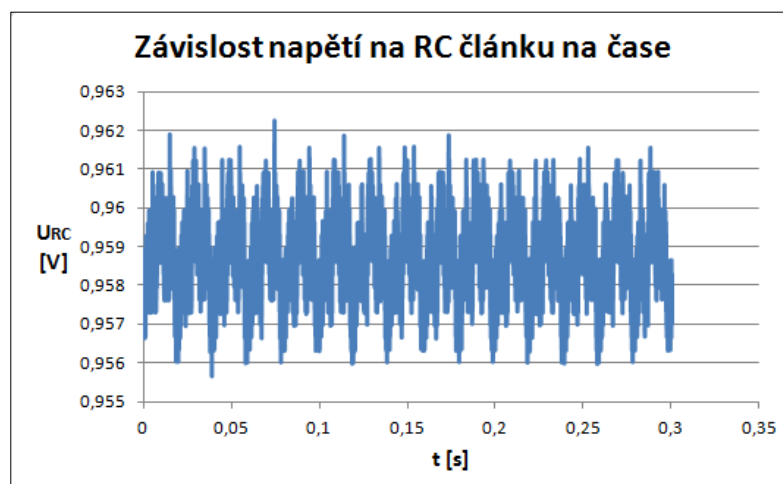
Všechna měření byla prováděna s využitím programového prostředí *LabVIEW* [16] a *SignalExpress* [17] s nastavenou vzorkovací frekvencí $f_v = 20$ kHz. Při měření časově závislých signálů byly naměřené hodnoty dále podrobeny analýze v programu *parametr* [18]. Program parametr vyhodnocuje *Fourierovu transformaci* z naměřených dat a jeho výstupem jsou konkrétní velikosti amplitud a fází zpracovaného záznamu. Tyto hodnoty byly nakonec graficky zpracovány a vhodně upraveny v programu *Microsoft excel* [19].

Seznam použité techniky

1. Měřicí 4 kanálová karta NI 9222, simultánně vzorkovaná s max. frekvencí 500 kS/s, 16bit převodník, měřicí rozsah ± 10 V
2. Měřicí ústředna NI 9181, 1-port, Ethernet komunikace 1 Gb
3. Generátor funkcí MXG – 9802A, kmitočtový rozsah 0,1 Hz – 2 MHz v 7 dekadách, napájení 220, 240 V, sériové číslo: MB00023244

3.1.1.1 Statická charakteristika RC článku

Jedná se o závislost výstupního napětí na změně velikosti vstupního proudu. Pro jednu hodnotu frekvence střídavého proudu na vstupu, která v tuto chvíli nehraje žádnou roli, bylo nastaveno šest hodnot velikostí amplitud proudu. Pro každou byl naměřen desetisekundový záznam napětí na RC článku a referenčního napětí. Ukázka části záznamu je na přiloženém grafu.



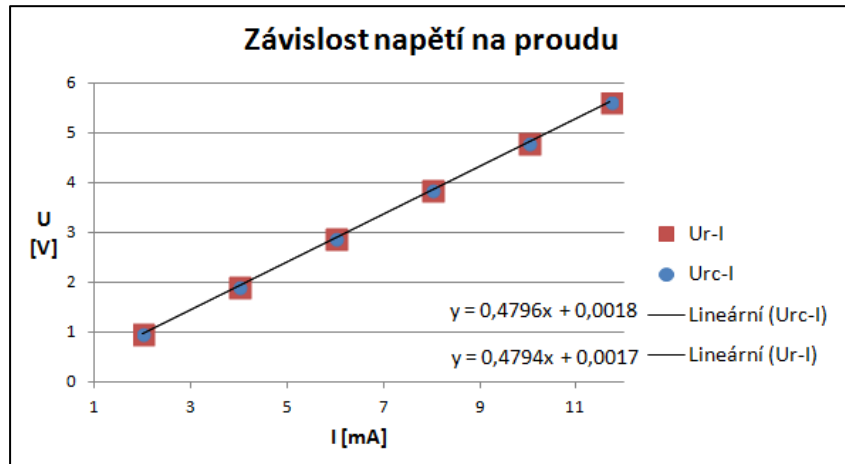
Graf 3. 1 Ukázka záznamu naměřených hodnot

Dále byla určena průměrná hodnota obou měřených napětí a z *Ohmova zákona* vypočteny velikosti odporů.

$$U = RI \quad 3.8$$

Tab. 3. 2 Výsledky měření

I [mA]	2	4	6	8	10	11,7
U_{RC} [V]	0,9586	1,9238	2,8758	3,8426	4,7958	5,6120
R_{RC} [Ω]	479,31	480,96	479,30	480,32	479,58	479,66
U_R [V]	0,9582	1,9232	2,8749	3,8413	4,7943	5,6103
R_R [Ω]	479,12	480,79	479,15	480,17	479,43	479,51



Graf 3. 2 Lineární regrese závislosti obou napětí na proudu

Lineární regresí pak byly nalezeny skutečné hodnoty odporů a RC článek tak byl kalibrován. Tyto hodnoty dále slouží pro stanovení dynamické charakteristiky RC článek. Na grafu 3.2 je znázorněna lineární regrese závislosti obou napětí na proudu. Protože koeficient q z regresní funkce ve tvaru (3.8) je o dva řády menší než koeficient k , byla tzv. *chyba nuly* zanedbána. Hodnoty odporů byly následně stanoveny zvlášť, funkcí *LINREGRESE* implementovanou v programu Microsoft excel, s podmínkou nulového koeficientu q .

$$I = kU + q \quad 3.9$$

Konečné hodnoty obou odporů jsou tedy $R_{RC} = 479,77\Omega$ a $R_R = 479,65\Omega$. Statická charakteristika samotného RC článek pak může být zapsána následovně:

$$I = 479,77 U_{RC} \quad 3.10$$

3.1.1.2 Dynamická charakteristika RC článek

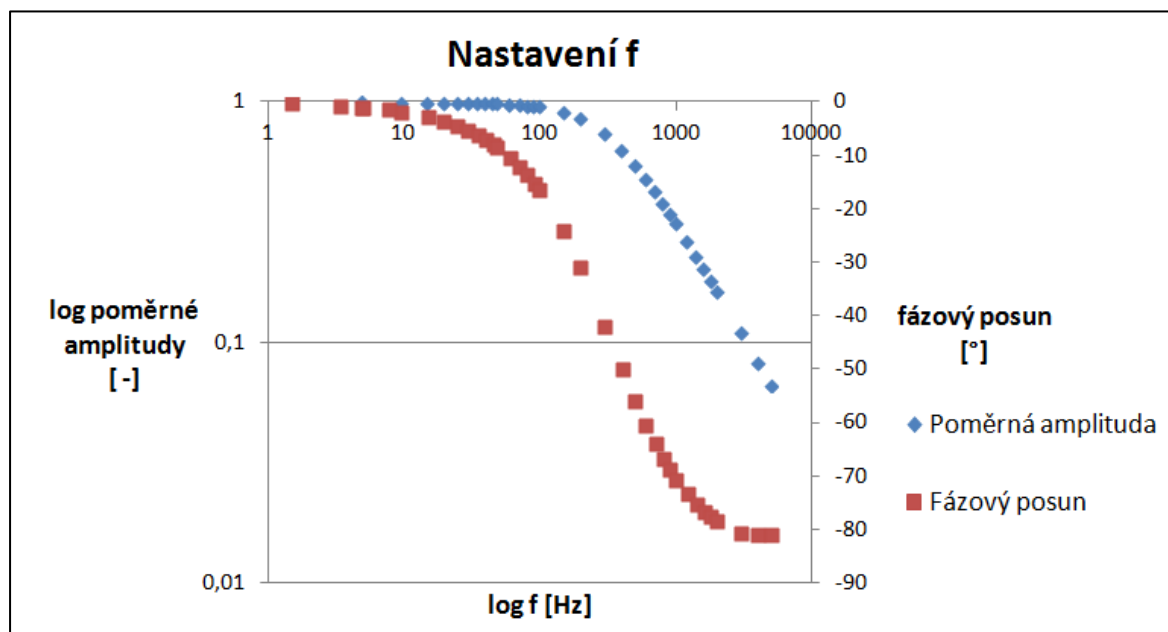
Z dynamických charakteristik uvedených ve druhé kapitole, byla experimentálně ověřována pouze amplitudová a fázová frekvenční charakteristika RC článek. Výsledky jsou pak zpracovány v logaritmických souřadnicích.

Byly zvoleny dva způsoby měření, oba s konstantní hodnotou amplitudy vstupního signálu. Zaprvé se jednalo o pevné nastavení frekvence pomocí generátoru funkcí a uložení desetisekundového záznamu (závislosti obou napětí na čase), stejně jako v předchozí části. Rozsah měřených frekvencí byl $(2 - 4990)Hz$ s vhodně zvolenými kroky pro dostatečný popis charakteristiky. Frekvence byly nastavovány tak, aby se nejednalo o celočíselné násobky $50Hz$, tedy frekvence sítě. První varianta postupu měření je poměrně časově náročná.

Fourierova analýza v programu parametr probíhala následovně. Z jednoho záznamu byla pro referenční (vstupní) napětí U_R nalezena hodnota frekvence s maximální amplitudou. Pro tuto frekvenci pak byla nalezena velikost amplitudy napětí na RC článku, tedy U_{RC} .

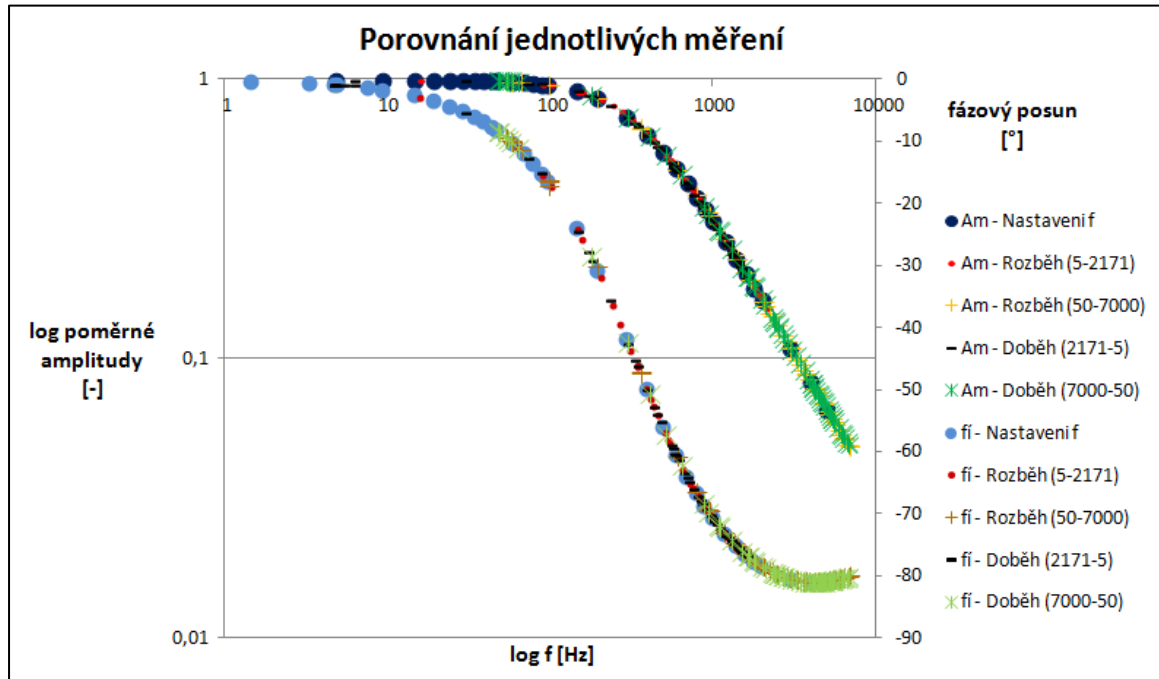
Druhý přístup měl za cíl zkrátit dobu měření, při dosažení identických výsledků. Jednalo se o plynulé přejíždění frekvenčních pásem na generátoru funkcí s dobou záznamu $60s$. Přejezdy byly realizovány od nízkých frekvencí k vysokým a naopak, a označeny jako *rozběhy* a *doběhy* v analogii s rozběhy a doběhy např. elektromotorů. Pro tento případ byl postup vyhodnocení v programu parametr zpočátku odlišný. Záznam byl rozdělen na šedesát částí, tedy s krokem $1s$. Z každé sekundy záznamu, odpovídající příslušnému počtu vzorků, pak byla vyhodnocena Fourierova transformace výše zmíněným způsobem. Tímto vzniklo šedesát bodů pro popis charakteristik jednoho přejezdu.

Na grafu 3.3 je amplitudová a fázová frekvenční charakteristika naměřená podle prvního postupu, tedy pevně nastavené a proměřené frekvence. Na hlavní svislé ose je v logaritmickém měřítku vynesena hodnota poměrné amplitudy (tedy amplitudové charakteristiky), což je poměr výstupního signálu RC článku (U_{RC}) a signálu na vstupu (U_R). Vodorovná osa představuje logaritmus frekvence získané Fourierovou analýzou naměřených dat v programu parametr. Na vedlejší svislé ose jsou vyneseny hodnoty fázového posunu (tedy fázové charakteristiky) mezi signály ve stupních a to tak, že je odečítána fáze vstupního signálu od fáze výstupního signálu.



Graf 3.3 Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika RC článku

Na dalším grafu 3.4 jsou porovnání jednotlivých měření. Označení A_m v legendě jsou pro amplitudové charakteristiky a f_i pro fázové. Dále pak *Rozběh* (50-7000) značí přejezd frekvenčního pásma od 50 Hz do 7k Hz. Ostatní analogicky. Bohužel pro velké množství porovnávaných charakteristik je graf poměrně nepřehledný. Nicméně důležitý je fakt, že všechny postupy měření se shodují (charakteristiky leží na sobě).



Graf 3. 4 Porovnání jednotlivých měření RC článku

3.1.2 Matematický model RC článku

Vhodný matematický popis vychází z 1. Kirchhoffova zákona, který říká: *algebraický součet proudů v uzlu je roven nule*. Tímto způsobem je RC článek popsán následující rovnicí:

$$I = I_C + I_{RC} \quad 3.11$$

Kde

I_C je proud na kondenzátoru

I_{RC} je proud na odporu RC článku

I je proud na vstupu do obvodu

Proudy na kondenzátoru a odporu RC článku jsou následujícího tvaru:

$$I_C = C \frac{dU_{RC}}{dt} ; I_{RC} = \frac{U_{RC}}{R_{RC}} \quad 3.12$$

Rovnice (3.11) po dosazení vypadá následovně:

$$I = C \frac{dU_{RC}}{dt} + \frac{U_{RC}}{R_{RC}} \quad 3.13$$

Jedná se o lineární diferenciální rovnici prvního řádu, kde I a U_{RC} jsou fázory proudu, respektive napětí. Za proud je možné dosadit $I = U_R/R_R$. Dále formálním zápisem derivace, roznásobením celé rovnice členem R_{RC} a vhodnou úpravou přejde rovnice do následujícího tvaru:

$$CR_{RC}U'_{RC} + U_{RC} = \frac{R_{RC}}{R_R}U_R \quad 3.14$$

Tento zápis už je velice podobný vztahu (2.3). Zavedením časové konstanty $T = C \cdot R_{RC}$ a zesílení $K = R_{RC}/R_R$ je obdržén tvar:

$$TU'_{RC} + U_{RC} = KU_R \quad 3.15$$

Po Laplaceově transformaci a vhodných úpravách lze získat obrazový přenos RC článku. Frekvenční přenos pak ze substituce $s = i\omega$:

$$G(i\omega) = \frac{U_{RC}}{U_R} = \frac{R_{RC}}{R_R} \frac{1}{1 + i\omega R_{RC}C} \quad 3.16$$

U_{RC} a U_R značí formální zápis Laplaceovy transformace. Dále je potřeba roznásobit rovnici komplexně sdruženým číslem a po úpravách přejde výraz do složkového tvaru:

$$G(i\omega) = \frac{R_{RC}}{R_R} \frac{1}{1 + (\omega R_{RC}C)^2} - i \frac{R_{RC}}{R_R} \frac{R_{RC}\omega}{1 + (\omega R_{RC}C)^2} \quad 3.17$$

Z tohoto výrazu již lze vypočítat amplitudovou a fázovou frekvenční charakteristiku podle vztahu (2.10), respektive (2.11). Model byl porovnán s naměřenou charakteristikou postupem pevně nastavené frekvence. Pomocí *metody nejmenších čtverců* a funkce *Řešitel* implementované v programu Microsoft excel. Byly minimalizovány čtverce odchylek po zlogaritmování mezi modelem a experimentálně naměřenými daty, podle následujícího vztahu:

$$\min = \left[\ln \frac{A(\omega)}{Am} \right]^2 \quad 3.18$$

Kde

$A(\omega)$ je amplitudová charakteristika modelu podle (2.10)

Am je amplitudová charakteristika RC článku viz graf 3.4

Přirozený logaritmus je ve vzorci přítomen kvůli zpracování amplitudové charakteristiky v logaritmických souřadnicích.

Jelikož skutečné hodnoty odporů byly určeny ve statické charakteristice RC článku, jediným měněným (hledaným) parametrem byla kapacita kondenzátoru. Na grafu 3.5 je znázorněno porovnání modelu s naměřenými daty. Kvůli přehlednosti byly z grafu vynechány přejezdy. Model poměrně úspěšně proložil jak amplitudovou, tak fázovou charakteristiku a tak může být prohlášen za správný. Pouze v pravé části fázové charakteristiky dochází k odklonu modelu od experimentálně naměřených dat. Toto může být způsobeno některými parazitními jevy během měření, např. parazitní indukčnosti.

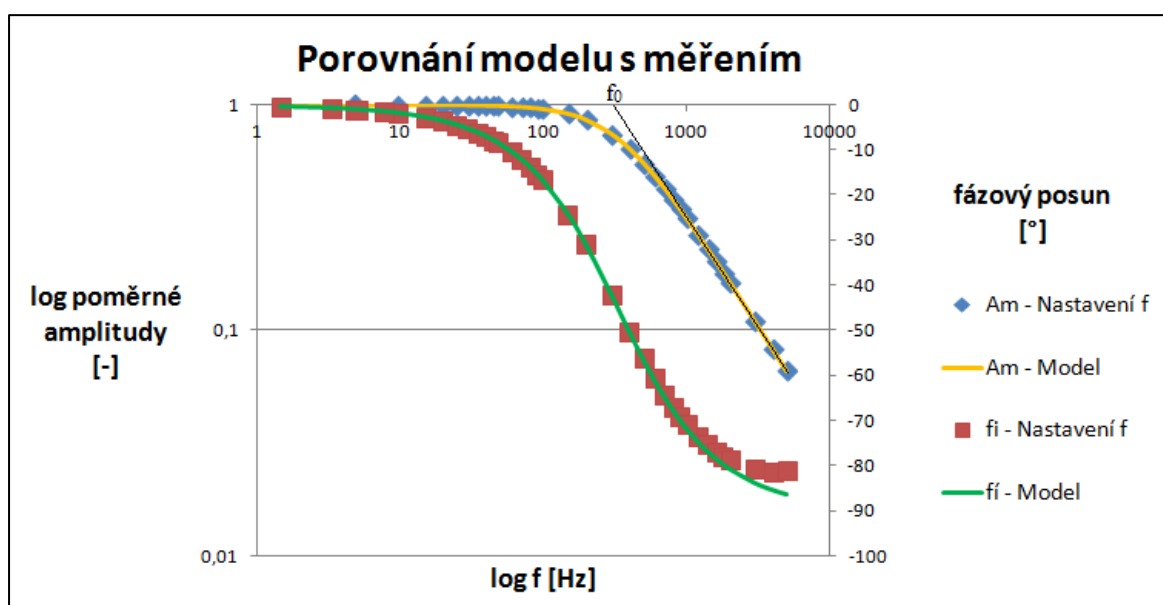
Výsledky jsou uvedeny v tab. 3.3. Nalezená velikost kapacity odpovídá hodnotě udané výrobcem kondenzátoru. Z časové konstanty, která se v případě RC článku vypočítá jako součin kapacity a odporu na RC článku, lze podle (2.14) vypočítat vlastní frekvence (pro tento případ i mezní frekvenci).

Tab. 3. 3 Kompletní výsledky

R_{RC}	479,77 Ω
R_R	479,65 Ω
C	0,000001 F
K	1,00025
T	0,47977 ms
f_0	331,73 Hz

Dynamická charakteristika RC článku v podobě diferenciální rovnice předepsané vztahem (2.3) vypadá následovně:

$$0,47977 y'(t) + y(t) = 1,00025 x(t) \quad 3.19$$

**Graf 3. 5** Model RC článku

4 METODY MĚŘENÍ DYNAMICKÝCH CHARAKTERISTIK TLAKOVÝCH SNÍMAČŮ [12]

K určení rozsahu přesnosti měřicího přístroje pro měření rychlých, časově závislých dějů, je nezbytné jej podrobit experimentálnímu testování. V úvodu druhé kapitoly jsou na obr. 2.1 znázorněny testovací signály. Odezva měřicího přístroje na tyto signály popisuje jeho dynamické vlastnosti. V praxi jsou často řešeny odezvy na skokovou změnu budícího signálu a na harmonický signál. Z časových konstant lze přibližně určit hraniční hodnoty pro použití daného měřicího přístroje při měření rychlých dějů. Důsledkem je častější realizace experimentu v podobě odezvy na skokovou změnu vstupního signálu, tedy přechodové charakteristiky. Zjištěné hodnoty jsou pak většinou udávány výrobcem v katalogovém listu konkrétního snímače.

Dále budou popsány experimentální metody pro stanovení dynamických charakteristik podle Doebelina [12].

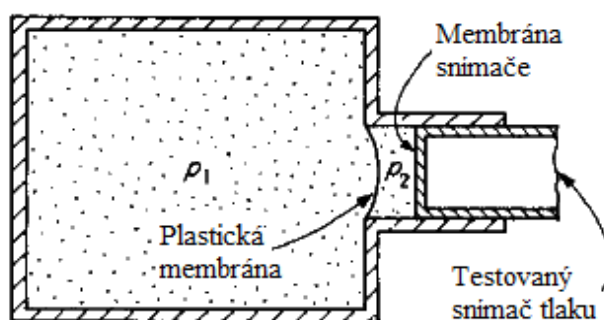
4.1 ODEZVA NA SKOKOVOU ZMĚNU SIGNÁLU

Testování odezvy na skokovou změnu vstupní veličiny je, pro systémy s vlastní frekvencí menší než 1000Hz, řešeno řízeným protržením membrány, oddělující od sebe dvě komory s rozdílnými tlaky. Obecné pravidlo pro testování odezvy na skokovou změnu je takové, že doba náběhu skokové změny musí být menší než jedna čtvrtina vlastní periody snímače (systému). V ideálním případě by doba náběhu měla být nekonečně krátká. Takto by např. pro systém s vlastní frekvencí 1000Hz měla být doba náběhu 0,25ms a méně. Schematický náčrt zařízení sloužícího k testování odezvy na skokovou změnu tlaku je znázorněno na obr. 4.1.

Hodnoty tlaků p_1 a p_2 je možné individuálně nastavovat podle potřeby. Komora s tlakem p_2 je menšího objemu než komora s tlakem p_1 , a proto po protržení membrány dojde k nárůstu tlaku p_2 na tlak p_1 velice rychle. Skoková změna může mít i klesající charakter, pak je p_1 menší než p_2 a objem s tlakem p_2 je větší, než s tlakem p_1 . Konstrukce a obsluha takového zařízení je poměrně jednoduchá a v praxi tak často využívána.

Pro snímače s vlastní frekvencí vyšší než 1000Hz je tento postup nedostačující z toho důvodu, že u snímače nedojde k vybuzení vlastních kmitů. Dosažení dostatečně krátké skokové změny tlaku je možné pomocí tzv. rázového potrubí (*shock tube*). Zjednodušené schéma je uvedeno na obr. 4.2.

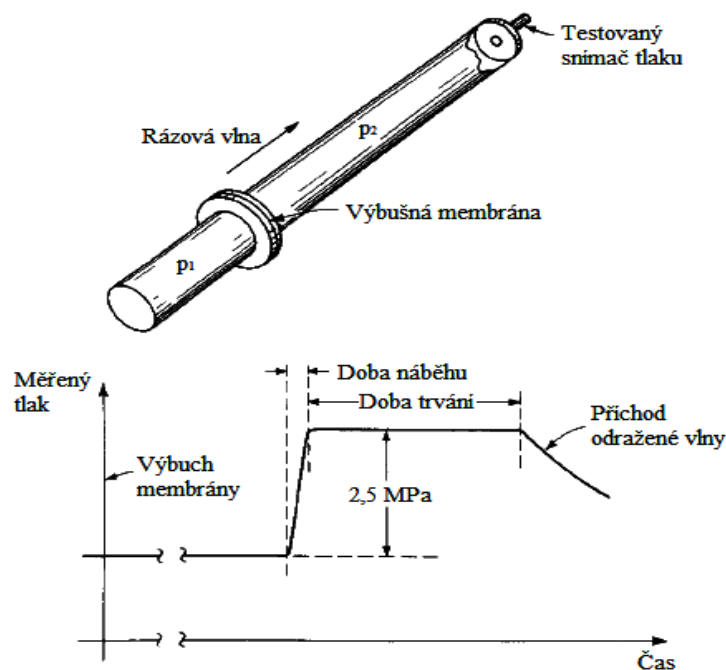
Membrána opět odděluje komory s vysokým tlakem p_1 a s nízkým tlakem p_2 . Testovaný snímač tlaku je umístěn na konci komory s nižším tlakem a jeho ústí je zarovnáno s čelem potrubí. Poté co dojde k výbuchu membrány, vytvoří se rázová vlna, která putuje nízkotlakou komorou směrem ke snímači. Rychlost šíření rázové vlny běžně dosahuje 1500m/s. Tlakový senzor je vystaven velmi příkrému nárůstu tlaku s dobou náběhu menší než 10^{-6} s a s dobou trvání okolo 10^{-2} s. Dobu trvání nárůstu tlaku



Obr. 4. 1 Příklad zařízení pro testování skokové změny [12]

lze do určité míry ovlivnit volbou vhodných rozměrů a obsluhy rázového potrubí. Typické rozměry jsou uvedeny v Doebelinovi [12].

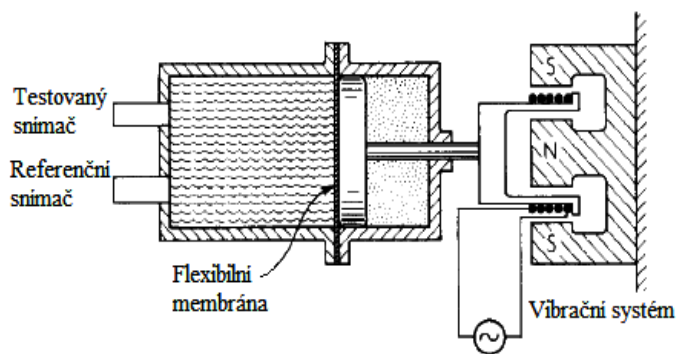
V neposlední řadě může být skoková změna tlaku vyvolána výbuchem nálože v médiu. Zde je vhodné zaznamenat reálné hodnoty tlaku pomocí referenčního snímače, jehož dynamické charakteristiky jsou známé a vyhovující pro daný experiment.



Obr. 4. 2 Shora: Schéma rázového potrubí, závislost tlaku na čase v místě testovaného snímače [12]

4.2 ODEZVA NA HARMONICKÝ SIGNÁL

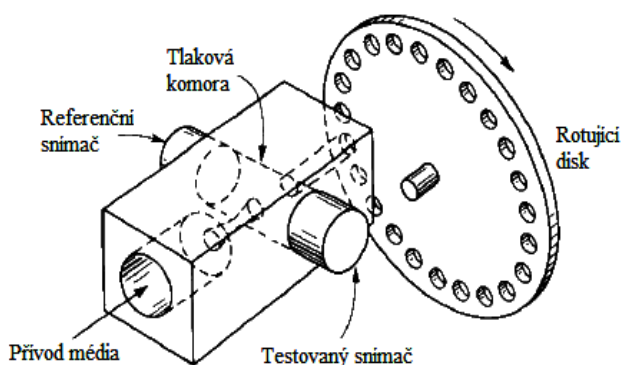
Dalším často testovaným budícím signálem je harmonický signál. Jedno z mnoha experimentálních zařízení sloužících ke stanovení frekvenčních charakteristik je znázorněno na obr. 4.3. Vibrační systém slouží jako zdroj harmonického budícího signálu o nastavitelné frekvenci a amplitudě. Vibrace jsou přenášeny přes vhodný nosič (píst nebo tyč) na membránu, která vnáší sinusový průběh tlaku do médiem naplněné komory. Vibrační systémy jsou dostupné v široké škále rozměrů, provedení a výstupních parametrů (frekvence, amplituda, síla). U tohoto druhu měření v podstatě není možné ze vstupních parametrů určit reálné hodnoty amplitudy a frekvence tlakových změn uvnitř komory. Z tohoto důvodu bývá měřicí trať běžně vybavena referenčním snímačem tlaku, situovaného do pozice, kde se předpokládá identický průběh tlaku jako u



Obr. 4. 3 Příklad zařízení na měření odezvy harmonického vstupního signálu [12]

testovaného snímače. Dále musí být referenční snímač schopen měřit reálné hodnoty pro celý rozsah proměřovaných frekvencí. Toto může být ověřeno nezávislým testem, např. odezvou na skokovou změnu tlaku v rázovém potrubí. Data naměřená referenčním snímačem slouží při vyhodnocování jako hodnoty vstupní veličiny frekvenčního přenosu a data z testovaného snímače jako hodnoty výstupní veličiny. Jako referenční tlakové snímače se používají piezoelektrické snímače tlaku.

Jiný a poměrně zajímavý přístup jak experimentálně testovat frekvenční odezvu je znázorněn na obr. 4.4. Již na první pohled je zřejmé, že toto zařízení je vhodnější především pro měření s plynnými médii, avšak jeho použití pro kapaliny se tím nevylučuje. Tlaková komora je během měření neustále zásobována médiem o konstantním tlaku, úzkým zásobovacím kanálem. Médium pak opouští tlakovou komoru odvodním kanálem na opačné straně, a dále přes otvory v rotujícím disku přímo do atmosféry. Výtok je tedy střídavě přerušován a to s frekvencí, kterou lze nastavit vhodným počtem děr v disku a rychlostí jeho otáčení. Tímto způsobem lze v tlakové komoře dosáhnout přibližně sinusového průběhu tlakových změn v závislosti na čase. Nedostatkem tohoto postupu je snižování amplitud tlakových pulzací s rostoucí frekvencí. Testovaný snímač se opět porovnává oproti snímači referenčnímu.

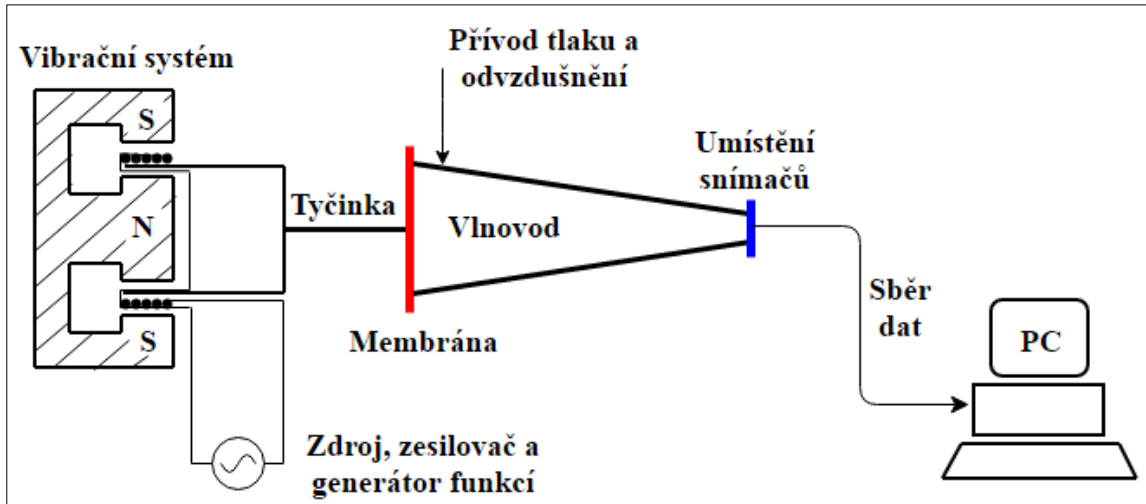


Obr. 4.3 Příklad dalšího zařízení na měření odezvy harmonického vstupního signálu [12]

Je dobré zmínit, že experimenty sloužící ke stanovení dynamických charakteristik tlakových snímačů s sebou nesou některé komplikace, se kterými je třeba počítat. Jak již bylo nastíněno, u měření frekvenční odezvy je poměrně obtížné zajistit dostatečnou velikost amplitudy tlakových pulzů při vyšších frekvencích. Dalším problémem jsou vlastní frekvence a to nejen komor naplněných médii, ale také celé konstrukce měřicí tratě. Dynamické vlastnosti konstrukce se pak mohou projevit ve výsledcích měření. V neposlední řadě figurují i rozdílné konstrukce referenčního a vyhodnocovaného snímače. Tlakoměrné prvky mohou být umístěny na čele snímače nebo v jeho těle (velmi častá konstrukce). Ve druhém případě vede k tlakoměrnému prvku přívodní kanálek. Jestliže mají referenční a vyhodnocovaný snímač rozdílné geometrie těchto kanálků, je vhodné vyšetřit přenos každého z nich a podle toho pak přistupovat k naměřeným hodnotám. V praxi bývá tento fakt v některých případech zanedbáván.

5 EXPERIMENTÁLNÍ TRATĚ

Experimentální trať se sestává z několika klíčových prvků a jejich příslušenství. Protože sloužila k proměření amplitudových a fázových frekvenčních charakteristik tlakových snímačů, klíčové prvky jsou obdobné jak u zařízení na obr. 4.3 v předchozí kapitole. Jedná se zejména o vibrační systém a komoru sloužící k přenosu tlakových pulzací (dále vlnovod). Zjednodušené schéma měřicí tratě je na obr. 5.1, na přiložené fotografii je celkový pohled na experimentální stanoviště.



Obr. 5.1 Schéma měřicí tratě

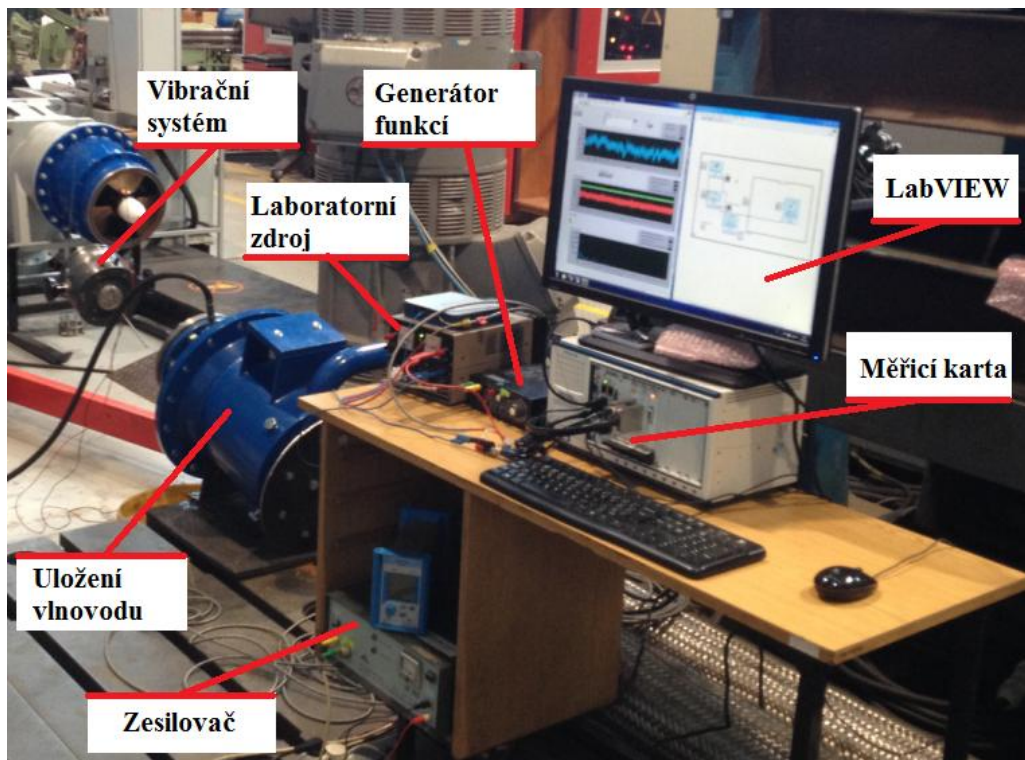


Foto 5.2 Experimentální stanoviště – celkový pohled

Seznam použité techniky

1. Měřicí ústředna se systémem reálného času NI PXIe-1078, controler NI PXIe-8135, měřicí 8 kanálová karta NI PXIe-4492, simultánně vzorkovaná s max. frekvencí 204,8 kS/s, 24bit převodník, měřicí rozsah $\pm 5V$; měřicí 16 kanálová karta NI PXIe 6361, vzorkovací frekvence 2 MS/s, 16bit převodník, měřicí rozsah $\pm 10V$
2. Karta unifikace měřených signálů, typ NI SCB-68A, 16 oddělených napět'ových vstupů, osazených přesnými odpory $240 \Omega \pm 0,1\%$
3. NI 9234 čtyř-kanálový převodník pro akcelerometry, 24-bit, simultánně vzorkovaný s max. frekvencí 51,2 kS/s, měřicí rozsah $\pm 5V$, IEPE, přesnost 0,006% z rozsahu
4. Napět'ová měřicí karta NI 9239, 24-bit převodník, simultánně vzorkovaný s max. frekvencí 50 kS/s, měřicí rozsah $\pm 10V$, přesnost 0,008% z rozsahu
5. Měřicí ústředna NI 9188, 8-portů, Ethernet komunikace 1 Gb
6. Napájecí zdroj BK 123, rozsah výstupního napětí (0 – 20) V_{ss} / 1 A, výrobce TESLA Brno, výrobní číslo 921871
7. Školní generátor RC typ BK 124, kmitočtový rozsah 10 Hz – 1 MHz v 5 dekadách, výstupní napětí $> 1 V_{ef} / 600 \Omega$, napájecí napětí 220 V $\pm 10\%$, příkon max. 10 VA, výrobce TESLA Brno, výrobní číslo 417474
8. Vibrační systém typ 11077, výrobce VEB RFT MESSELEKTRONIK „Otto Schon“ Drážďany, výrobní číslo 01029
9. Výkonový zesilovač LV 102.1, frekvence 3 Hz – 40 kHz, napájecí napětí 220 V, výrobce VEB Metra Mess – und Frequenztechnik Radebeul, výrobní číslo 2482/8
10. Snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENSORS s. r. o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0 – 10 bar abs., přesnost $\pm 0,25 \%$, proudový výstup (varianta 3vodič) 0 – 20 mA, výrobní číslo 1830088
11. Snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENSORS s. r. o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0 – 10 bar abs., přesnost $\pm 0,25 \%$, proudový výstup (varianta 3vodič) 0 – 20 mA, výrobní číslo *nečitelné*
12. Snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENSORS s. r. o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0 – 16 bar abs., přesnost $\pm 0,25 \%$, proudový výstup (varianta 2vodič) 0 – 20 mA, výrobní číslo 1633895
13. Snímač tlaku DMP 333, výrobce BD SENSORS s. r. o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0 – 100 bar abs., přesnost $\pm 0,25 \%$, proudový výstup (varianta 3vodič) 0 – 20 mA, výrobní číslo 0168487
14. Snímač tlaku 701A, výrobce KISTLER, měřicí rozsah 0 – 250 bar, linearita $\pm 0,5 \%$ FSO, citlivost $\approx -80,69 \text{ pC/bar}$, citlivost na zrychlení $< 0,001 \text{ bar/g}$ rezonanční frekvence $\approx 70 \text{ kHz}$, výrobní číslo 1807105

15. Snímač tlaku 211B4, výrobce KISTLER, měřicí rozsah 0 – 200 psi, linearita $\pm 0,1$ %FSO, citlivost $\approx 29,29$ mV/psi, citlivost na zrychlení $< 0,002$ psi/g, frekvenční rozsah 0,033 Hz - 100 kHz s přesností $\pm 5\%$, rezonanční frekvence ≈ 500 kHz, výrobní číslo 2136703
16. Akcelerometr, PCB, typ 352C33, citlivost 101,1 mV/g, měřicí rozsah ± 50 g, frekvenční rozsah 0,5-100000 Hz s přesností $\pm 5\%$, rezonanční frekvence ≥ 50 kHz, výrobní číslo LW159006

5.1 POPIS TRATĚ

Jedním ze základních prvků zkušební tratě je vibrační systém (8) viz výše. Zdroj vibrací byl volně zavěšen na ocelových lankách. Toto uložení mělo za cíl nevnašet, do již tak složitého systému měřicí tratě, další rušivé dynamické vlivy (vlastní frekvence apod.), jak by tomu mohlo být v případě tuhého uložení. K ovládání vibračního systému sloužil napájecí zdroj (6), dále výkonový zesilovač (9) a v neposlední řadě generátor funkcí (7). Zesilovačem byla nastavována velikost amplitudy střídavého napětí pro vibrační systém a generátor funkcí sloužil k nastavení frekvence. Kmitání bylo následně přenášeno ocelovou tyčinkou na membránu vlnovodu. Uchycení tyčinky na membráně bylo realizováno stavěcím šroubem, tzv. červíkem. Ocelová membrána byla sepnuta mezi dvě příruby a gumové těsnění. Úkolem membrány bylo rozkmitávat kapalinu uvnitř vlnovodu. Jednalo se o obyčejnou vodu. Těsně za přírubou patřící k vlnovodu byl umístěn přívod tlakové vody a odvodu. Nastavení tlaku ve vlnovodu probíhalo pomocí ruční tlakové pumpy. Celý vlnovod byl uložen v tělese (pracovní název), viz foto 5.2. Druhá strana vlnovodu byla rovněž opatřena přírubou, se kterou byl pomocí šroubů spojen tlustostěnný plech. Tento prvek sloužil k montáži snímačů, viz foto 5.3 a také k upevnění vlnovodu na těleso. Těleso plnilo pouze funkci závaží. Celá soustava byla volně položena na gumové podložce. Kvůli odvodu vlnovodu byla na těleso navařena podnož, zajišťující šikmou polohu experimentální tratě.

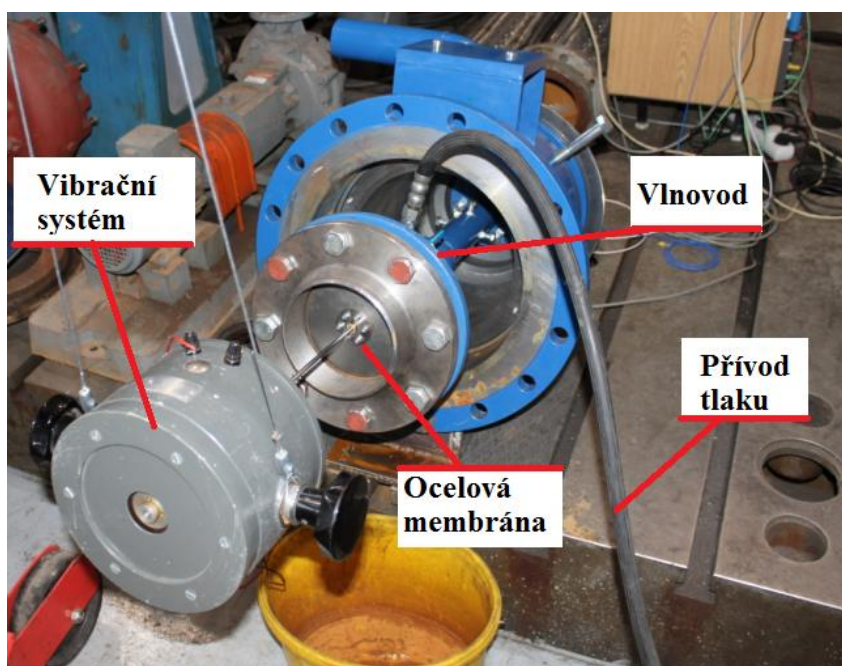


Foto 5. 2 Měřicí trať 1

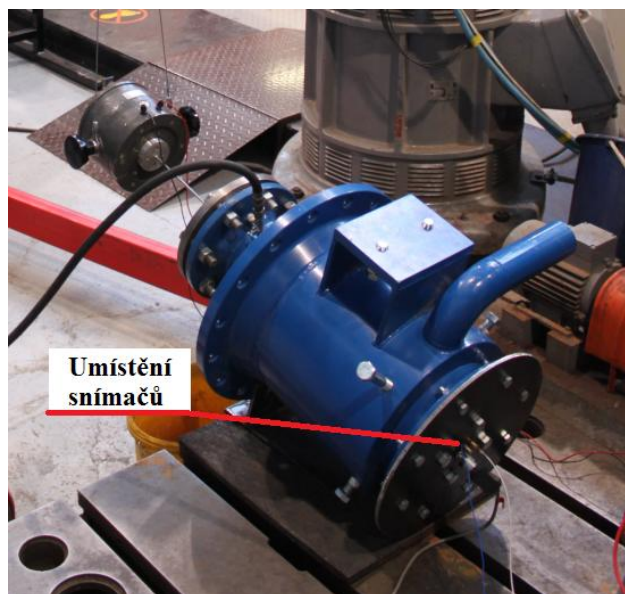


Foto 5. 3 Měřicí trať 2

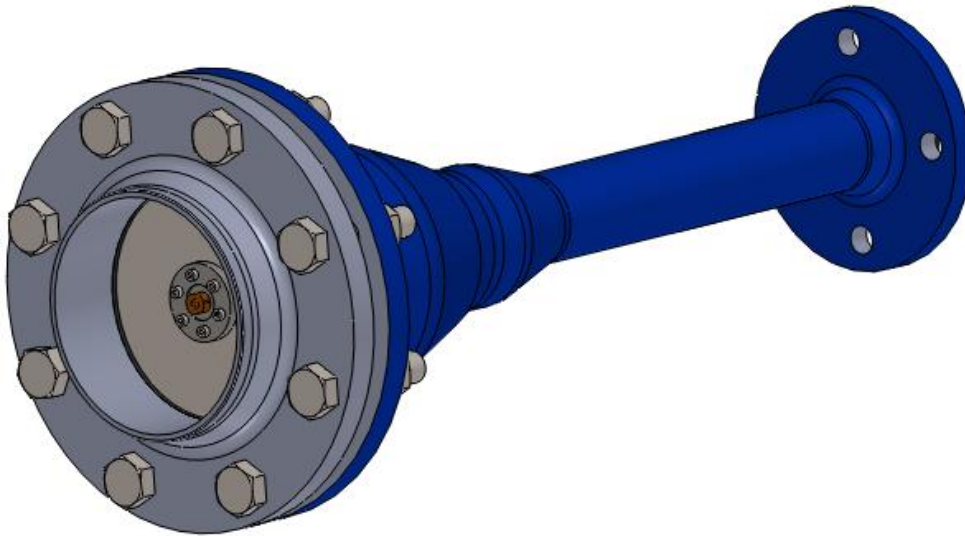
5.2 VLNOVOD

V závěru čtvrté kapitoly byly zmíněny některé nedostatky experimentálních zařízení sloužících k měření dynamických charakteristik tlakových snímačů. Jedním z nedostatků bylo zajištění dostatečně velké amplitudy generovaných tlakových pulzů při vysokých frekvencích. Tento problém by měl vyřešit vhodný tvar přenosové komory. V ideálním případě je hledaný tvar takový, u kterého bude docházet k nárůstu velikosti amplitudy směrem k testovaným snímačům. Obdobná problematika je řešena v rámci přenosu tlakových pulzů u vysokotlakých systémů, určených k řezání pulzujícím vodním paprskem, např. Foldyna [14]. Základním tvarem kapalinového vlnovodu, který může být dále optimalizován, je v každém případě konfuzor.

Vlnovod použitý pro tento experiment byl volen s přihlédnutím k vybavení hydraulické laboratoře. Byly naměřeny jeho rozměry a vytvořen 3D model v programu *SolidWorks 2011* [20]. Z takto získané geometrie byla následně vytvořena výpočetní doména pro program *Fluent* [21]. Cílem výpočtu bylo potvrzení přenosu tlakových pulzů vlnovodem se zvětšením amplitudy těchto pulzů. Výpočet byl realizován pro frekvence od 10 Hz do 900 Hz s vhodně zvoleným krokem.

5.2.1 Výpočet vlnovodu

Jelikož se jedná o rotačně symetrickou součást, mohl být celý výpočet zjednodušen a realizován pouze ve 2D. Výpočetní doména s okrajovými podmínkami je uvedena na obr. 5.3. Membrána byla nahrazena nestacionární okrajovou podmínkou *velocity-inlet* ve tvaru (5.1). Respektive pouze částečně, kvůli jejímu upnutí mezi přírubami. Byly zvoleny dvě třetiny průměru. Nestacionární okrajová podmínka byla zajištěna užitím *UDF (user defined function)* viz níže. Na ose rotační symetrie byla zvolena podmínka *axis*. Ostatní hranice domény byly označeny podmínkou *wall*. V doméně byly vhodně zvoleny dvě roviny, v rámci kterých byl zapisován průběh statického tlaku v závislosti na čase. Z takto získaných dat pak byl stanoven tlakový přenos vlnovodu.

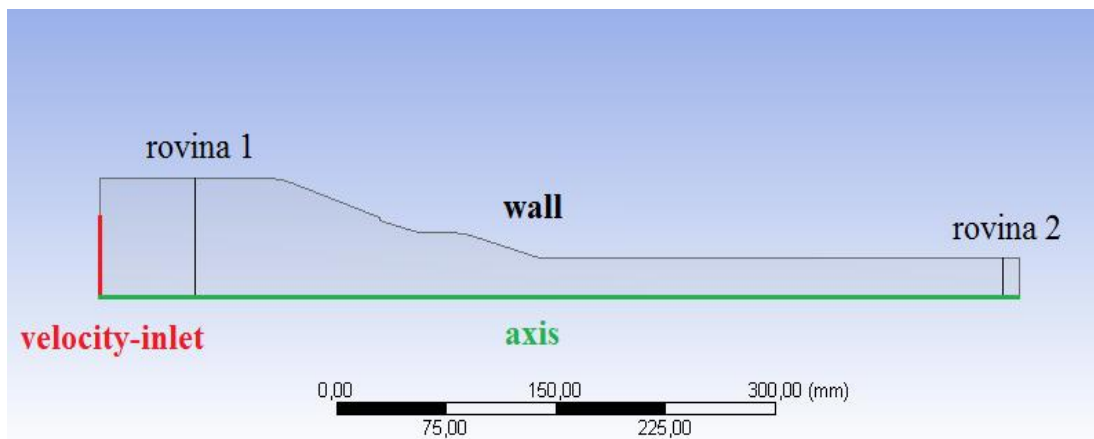


Obr 5. 2 Vlnovod

$$v(t) = x_0 \omega \cos(\omega t)$$

5.1

Kde

 $v(t)$ je rychlost x_0 je amplituda výchylky, $x_0 = 0,1 \text{ mm}$ ω je úhlová frekvence t je čas

Obr 5. 3 Výpočetní doména

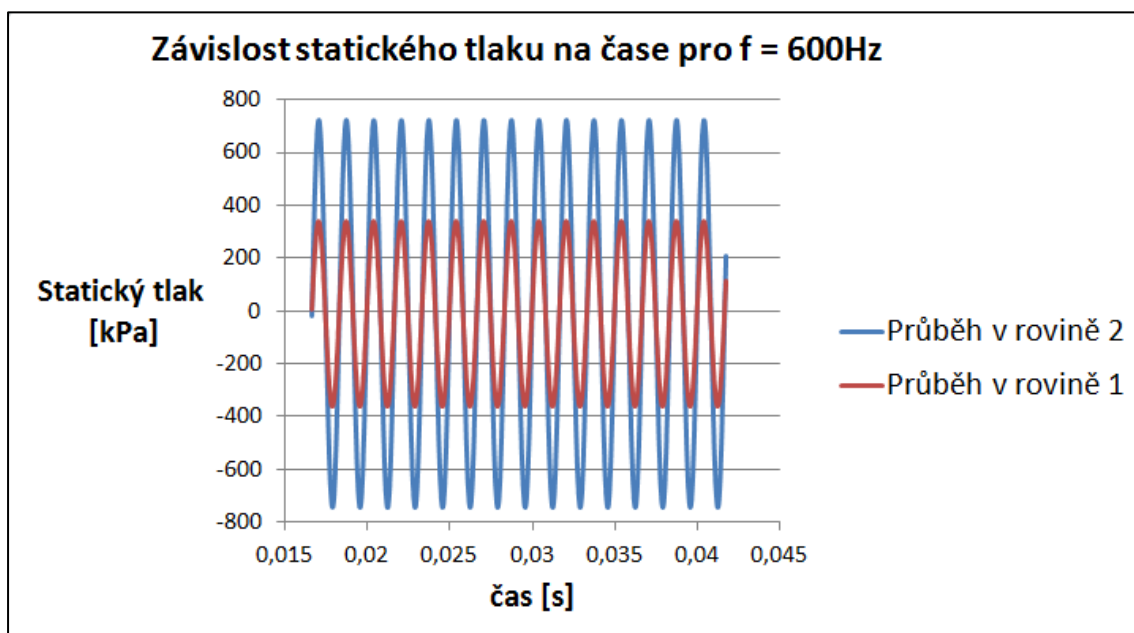
Dále bylo zapotřebí realizovat výpočet pro stlačitelnou kapalinu. Tohoto lze v programu Fluent s výhodou dosáhnout užitím dalšího UDF. Celá uživatelem definovaná funkce je uvedena níže. UDF bylo čerpáno z manuálu od firmy ANSYS [15], kde jsou uvedeny i jednotlivé konstanty a proměnné. Velikost takto definované rychlosti zvuku ve vodě je přibližně $a = 1483 \text{ m/s}$.

Nastavení výpočtu

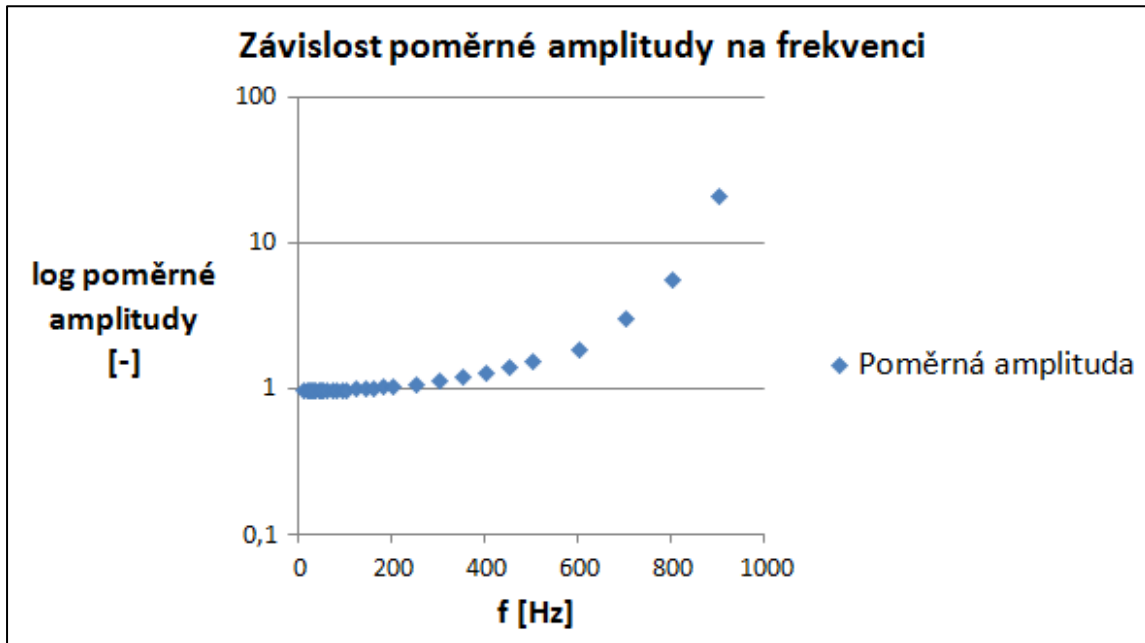
- Úloha byla počítána jako nestacionární
- Časový krok byl volen s ohledem na počítanou frekvenci, jednalo se o setinu příslušné periody
- Pro výpočet byl použit model turbulence k- ϵ Realizable, kvůli dobré konvergenci a dostačující přesnosti
- Model pro oblasti v blízkosti stěn byl zvolen Non-Equilibrium Wall Functions
- Celá úloha byla napočítána pouze pro první řády přesnosti, kvůli dostačujícím výsledkům

Vyhodnocení

Výstupem z programu Fluent byly průběhy amplitudy statického tlaku v závislosti na čase, ve dvou zvolených rovinách viz graf 5.1. Pro stanovení přesných hodnot velikostí amplitud byla data dále zpracována v programu parametr. Nalezené velikosti amplitud mezi sebou byly porovnány ve směru výstup (rovina 2), ke vstupu (rovina 1). Stejně jako v případě přenosu RC článku. Zesílení amplitudy vlnovodem je znázorněn na grafu 5.2. Ze závislosti je zřejmé, že k nárůstu amplitudy statického tlaku skutečně dochází a to se zvyšující se frekvencí.



Graf 5. 1 Průběhy statického tlaku v obou rovinách



Graf 5. 2 Zesílení tlakových pulzací ve vlnovodu

Výsledky modelování vlnovodu v programu Fluent prokazují nárůst velikosti amplitudy tlakových pulzací. Nicméně po seznámení se s danou problematikou je nutno podotknout, že by bylo vhodné vyzkoušet i jiné přístupy k výpočtu. Například zvolená okrajová podmínka velocity-inlet a její definice pomocí (5.1), přesně nevystihuje pohyb membrány. Dále pak zvolená velikost posunutí x_0 je pro všechny frekvence konstantní, což vibrační systém nezajišťuje. Protože výpočet vlnovodu není náplní této práce, byla problematika zanechána v tomto stavu. Tento přístup může dále sloužit jako jeden z možných (prvotních) přístupů pro řešení daného problému.

5.2.1.1 Uživatelem definované funkce

```
#include "udf.h"
#define BMODULUS 2.2e9
#define rho_ref 1000.0
#define p_ref 101325

DEFINE_PROPERTY(superfluid_density, c, t)
{
    real rho;
    real p, dp;
    p = C_P(c,t) + op_pres;
    dp = p-p_ref;
    rho = rho_ref/(1.0-dp/BMODULUS);
    return rho;
}
DEFINE_PROPERTY(sound_speed, c,t)
{
    real a;
    real p, dp;
    p = C_P(c,t) + op_pres;
    dp = p-p_ref;
    a = (1.-dp/BMODULUS)*sqrt(BMODULUS/rho_ref);
    return a;
}
DEFINE_PROFILE(unsteady_velocity, thread, position)
{
    face_t f;
    real t = CURRENT_TIME;

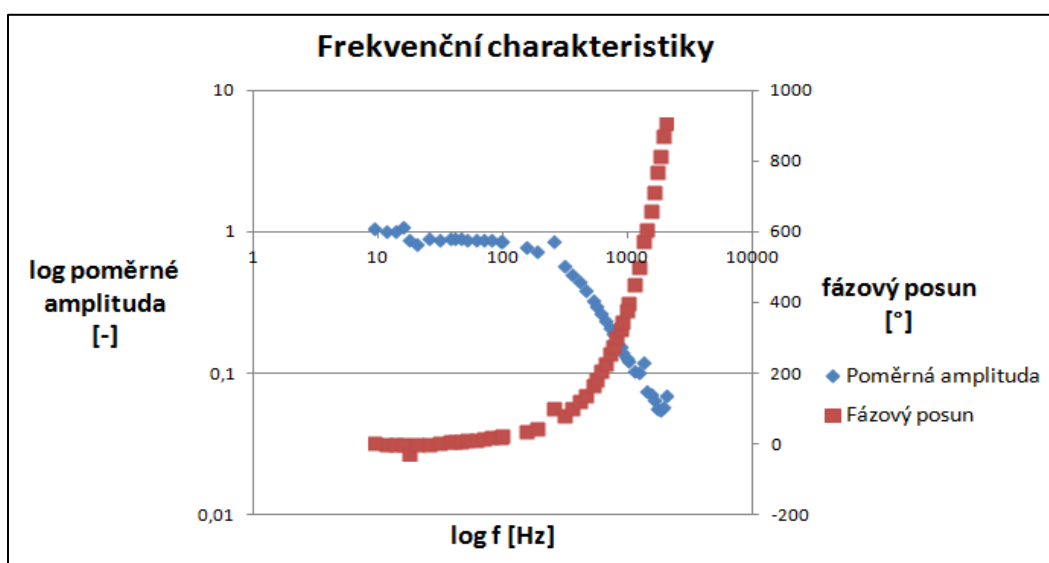
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) =x_0* ω*cos(ω*t);
    }
    end_f_loop(f, thread)
}
```

6 KALIBRACE VYBRANÝCH SNÍMAČŮ TLAKU

V rámci této kapitoly budou vyhodnoceny amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky běžně používaných tlakových snímačů. Pro vybrané snímače bude zvolen vhodný model, popisující jejich dynamické chování. V neposlední řadě budou stanoveny měřicí rozsahy pro konkrétní snímače při měření rychlých, respektive časově závislých dějů.

6.1 NEPOVEDENÉ MĚŘENÍ

Na úvod je vhodné uvést, že proběhly celkem dvě série měření. Výsledky z první série však neodpovídaly předpokládaným výsledkům. Jednalo se zejména o průběhy fázových posunů mezi testovaným a referenčním snímačem. Fázová frekvenční charakteristika by podle předpokladů měla s rostoucí frekvencí klesat. To znamená, že fáze výstupního signálu testovaného snímače se za fází referenčního snímače (vstupního signálu) opoždí. Na grafu 6.1 je uvedena amplitudová a fázová frekvenční charakteristika pro tlakový snímač 10 (viz str. 46), vyhodnocená z první série měření. Z fázové charakteristiky je patrné, že předpokládaného průběhu nebylo dosaženo. Výstupní signál testovaného snímače fázově předbíhá vstupní signál, naměřený na referenčním snímači.



Graf 6. 1 Frekvenční charakteristiky sniemače 10 z prvej série merení

V první sérii měření byl sběr dat realizován pomocí dvou měřicích karet 3, 4 a měřicí ústředny 5. Při hledání chyby bylo zjištěno, že měřicí karta 3, která zpracovávala výstupní signál z referenčního sniemače tlaku 15, **nezajistila sniemači potřebné napájení**. Rozdíl byl však poměrně malý. Druhou, méně pravděpodobnou příčinou chybného zpracování záznamu, byl fakt, že signály testovaného a referenčního sniemače byly měřeny každý na jiné kartě. Při kompletaci dat ze dvou měřicích karet pomocí měřicí ústředny 5, pak mohlo dojít k časovému posunu mezi vzorky signálů.

Druhá konfigurace měřicího řetězce eliminovala obě dvě tyto možnosti. Všechna měření pak probíhala s využitím měřicí ústředny 1 a karty unifikace měřených signálů 2.

Podrobnou dokumentaci měřicích prostředků i s parametry, jenž nejsou uvedeny v seznamu použité techniky, je možno dohledat online na stránkách výrobců.

6.2 POPIS SNÍMAČŮ

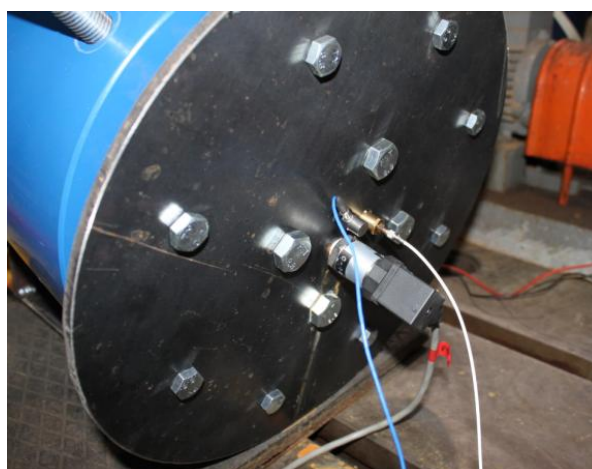
Při experimentu bylo použito celkem šest snímačů. Snímače pod číselným označením 10, 11, 12 a 13 mohou být považovány za *běžně používané snímače tlaku* a byly hlavním předmětem zájmu této práce. Jedná se o tenzometrické snímače (minimálně v případě 10 a 12, kde se jedná o relativně nové snímače oproti dvěma dalším, viz foto 6.1). V katalogových listech je možné najít hodnotu časové odezvy snímačů. Pro 2vodičové zapojení je $\leq 10\text{ ms}$ a v případě 3vodičového zapojení $\leq 3\text{ ms}$. U 3vodičového zapojení je výstupní signál odváděn vlastním kanálem. Po e-mailové korespondenci se zástupci výrobce snímačů, bylo zjištěno, že časová odezva představuje *dobu náběhu*. V tomto případě definovanou jako časový úsek mezi dosažením 10 a 90 procent z konečné ustálené hodnoty výstupního signálu. Lepší dynamické vlastnosti by tedy měly mít snímače s 3vodičovým zapojením.

Jako referenční snímače během experimentu vystupovaly piezoelektrické snímače 14 a 15. V obou případech se jedná o špičkové snímače určené pro měření rychlých dějů. Pro snímač 15 lze v katalogovém listu nalézt frekvenční rozsah $0,033\text{ Hz} - 100\text{ kHz}$, tedy o jeho dynamických vlastnostech není pochyb.

V poslední řadě bylo pomocí akcelerometru 16 měřeno i zrychlení tlustostěnného plechu, na kterém byly upevněny snímače. Naměřená data byla čistě informativního charakteru a nebylo s nimi dále pracováno.



Obr 6. 1 Testované snímače



Obr 6. 2 Detail umístění snímačů

6.3 POSTUP MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ

Po seznámení se s danou problematikou v rámci stanovení dynamické charakteristiky RC článku, byl k měření i vyhodnocení dynamických charakteristik vybraných snímačů tlaku zvolen stejný přístup. Při postupu vyhodnocování však musely být zavedeny některé úpravy.

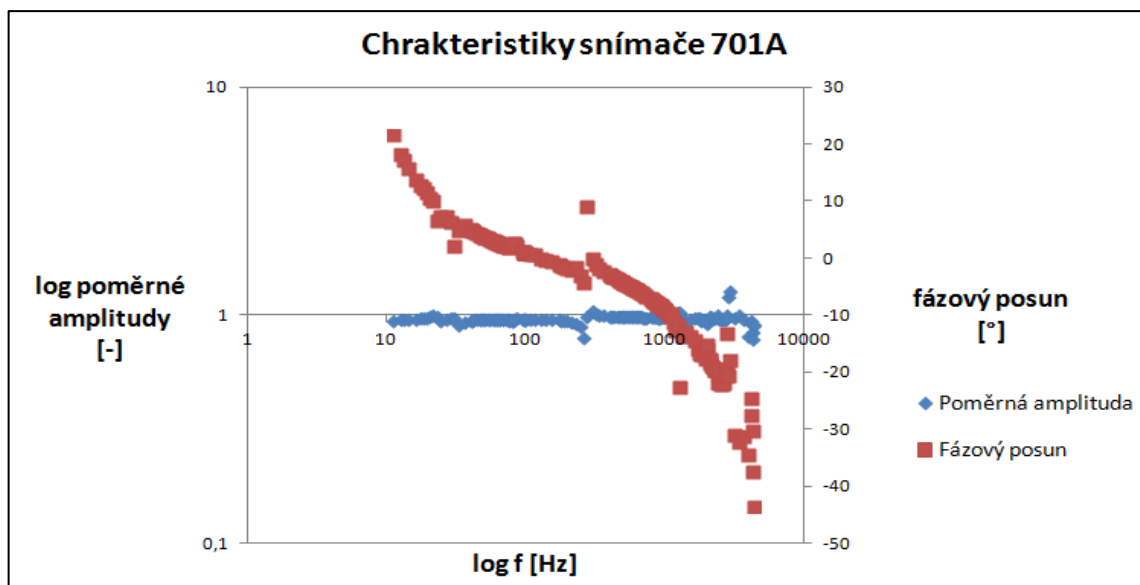
Pro každé měření byly zaznamenávány výstupní signály testovaného snímače, dvou referenčních senzorů a akcelerometru. Frekvenční charakteristiky testovaných snímačů byly stanoveny na základě dat naměřených jedním z referenčních senzorů. Výběr bude proveden níže. Záznam signálů byl opět realizován v programu LabVIEW, tentokrát s vzorkovací frekvencí $f_v = 10 \text{ kHz}$. Vzorkovací frekvence byla oproti měření RC článku snížena z kapacitních důvodů, kvůli záznamu více kanálů. Doba záznamu byla prodloužena na 65s. Testovacím měřením bylo potvrzeno dosažení identických výsledků pro oba výše zmíněné způsoby měření (nastavení frekvence a přejezdy). Dále byly realizovány pouze rozběhy a doběhy. Přejížděná frekvenční pásma byla $10 - 100 \text{ Hz}$, $100 - 1000 \text{ Hz}$ a $1000 - 4500 \text{ Hz}$. Vzhledem k výsledkům měření nebyly vyšší frekvence proměřovány. Dále byly všechny přejezdy uskutečněny pro tři hodnoty absolutního tlaku. Zvolené tlaky byly 3, 5 a 7 bar. Pro snímač 13, jehož měřicí rozsah je podstatně větší než u ostatních snímačů, byly proměřovány statické tlaky nastavovány až do 25 bar. Zde už došlo k poměrně značné deformaci membrány a měření tak bylo ukončeno. Hodnoty tlaků jsou pouze orientační a nebyly nastavovány přesně. V průběhu měření také docházelo k mírnému (zanedbatelnému) poklesu tlaku ve vlnovodu. Z tohoto důvodu bylo vhodné občas dotáhnout šrouby na přírubách, neboť docházelo k jejich povolování.

Jak již bylo zmíněno, vyhodnocení probíhalo v podstatné míře stejným způsobem, jak v případě RC článku. Jedinou významnější komplikací bylo přejíždění vlastních frekvencí celé měřicí tratě. Tato skutečnost se projevila ve vyhodnocených datech, nárůstem frekvencí na dvojnásobné a trojnásobné hodnoty v takových částech přejezdů, kde nebyly vzhledem k průběhu záznamu předpokládány. Z tohoto důvodu musely být vstupní parametry pro program parametr upraveny. Pro danou dobu záznamu a tedy příslušný počet vzorků, bylo přednastaveno pásmo frekvencí, ve kterých se hledaná frekvence nacházela. To znamená, že horní hranice zvoleného pásma nesmí být větší nebo rovna dvojnásobku hledané hodnoty frekvence. Zároveň by však mělo být pásmo dostatečně široké, aby nedocházelo k vyhodnocení nekorektních dat.

6.3.1 Výběr referenčního snímače

Z údajů uvedených v seznamu použité techniky vyplývá, že lepší dynamické vlastnosti by měl mít snímač 15. Pro tento snímač udává výrobce nejen přibližnou hodnotu vlastní frekvence, ale také frekvenční rozsah. Bylo tedy logické jej zvolit jako zdroj referenčních dat. Pro potvrzení správnosti této volby, bylo uskutečněno zkušební měření. Jednalo se tedy o porovnání mezi snímači 14 a 15. Na grafu 6.2 je znázorněna amplitudová a fázová frekvenční charakteristika snímače 14. Zde tedy snímač 15 figuroval jako referenční. Ze závislosti fázového posunu na frekvenci je patrné, že snímač 14 se fázově opožďuje za snímačem 15. Průběh poměrné amplitudy je možné považovat konstantní. Bez výrazných odchylek se pohybuje okolo hodnoty 1, nicméně v rámci celého průběhu pod hodnotou 1. Z charakteristik lze tedy usoudit, že volba referenčního snímače byla správná.

Snímač 14 zůstal i nadále součástí měření, ale pouze jako informační kanál. V tom smyslu, zda nedochází u zvoleného referenčního snímače k nějakým nepředvídatelným změnám. Pro kontrolu byly u každé měření vyhotoveny přenosy mezi oběma snímači.



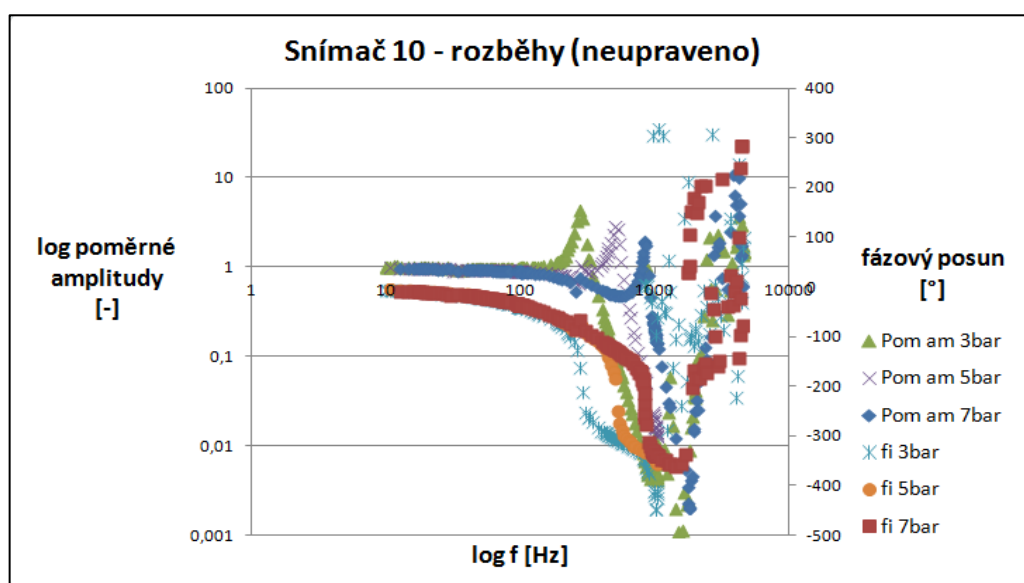
Graf 6. 2 Volba referenčního snímače

Na průbězích charakteristik dochází v některých místech k rozptylu dat. Jedná se o důsledek výše zmíněných vlastních frekvencí celé soustavy experimentální aparatury. Na celkový trend charakteristik však nebyl pozorován žádný vliv těchto projevů.

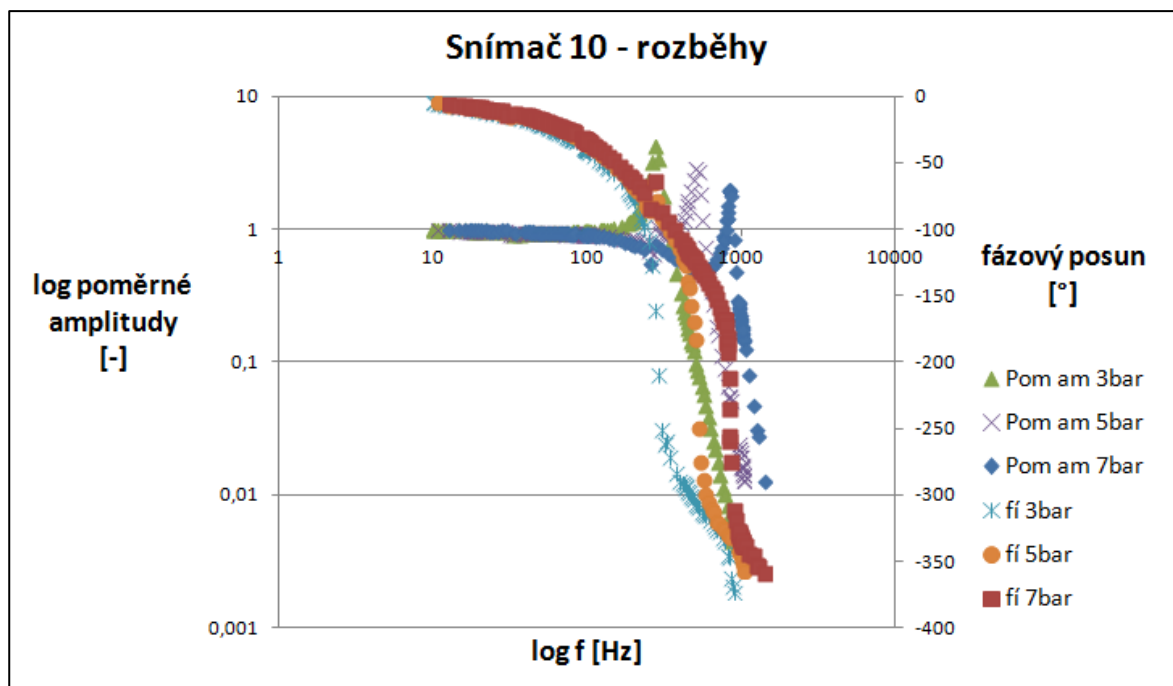
6.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Na prvním grafu jsou znázorněny charakteristiky snímače 10. Ze závislosti je patrné, že naměřená a vyhodnocená použitá data bude vhodné ořezat, protože u vyšších frekvencí již není zřejmý žádný trend.

6.4.1 Snímač 10



Graf 6. 3 Frekvenční charakteristiky snímače 10 (neupraveno)



Graf 6. 4 Frekvenční charakteristiky snímače 10 - rozběhy

Grafické zpracování 6.4 je již ve své finální podobě a tímto způsobem upravená data budou sloužit jako podklady pro model.

Výsledné průběhy charakteristik jsou poměrně zajímavé. U tohoto snímače je zřejmá závislost fázových i amplitudových charakteristik na velikosti měřeného tlaku. Dá se tedy říci, že vyšší tlak zvětšuje tuhost snímače (membrány), což má za následek posun amplitudové charakteristiky směrem doprava. Podobně je ovlivněna i fázová charakteristika. Druhou zajímavou vlastností je pokles amplitudové charakteristiky před jejím zesílením na rezonanční frekvenci. Tento jev je pozorován až pro tlaky 5 a 7 bar. První fakt se dá do určité míry předpokládat. Zmíněný pokles charakteristiky je však v rozporu se všemi modelovými příklady, uvedenými v rešeršní části této práce. Při hledání příčiny se dospělo ke dvěma závěrům.

Může se jednat o vliv konstrukce snímače. Při oddělení deformačního prvku (membrány) od pracovního prostředí další membránou. Meziprostor bývá vyplněn silikonovým olejem. Každá z membrán pak má svou vlastní dynamickou charakteristiku. Jejich součtem je pak možné obdržet takový průběh. Z pohledu modelu to znamená přidat k základnímu jednohmotovému ještě jeden další.

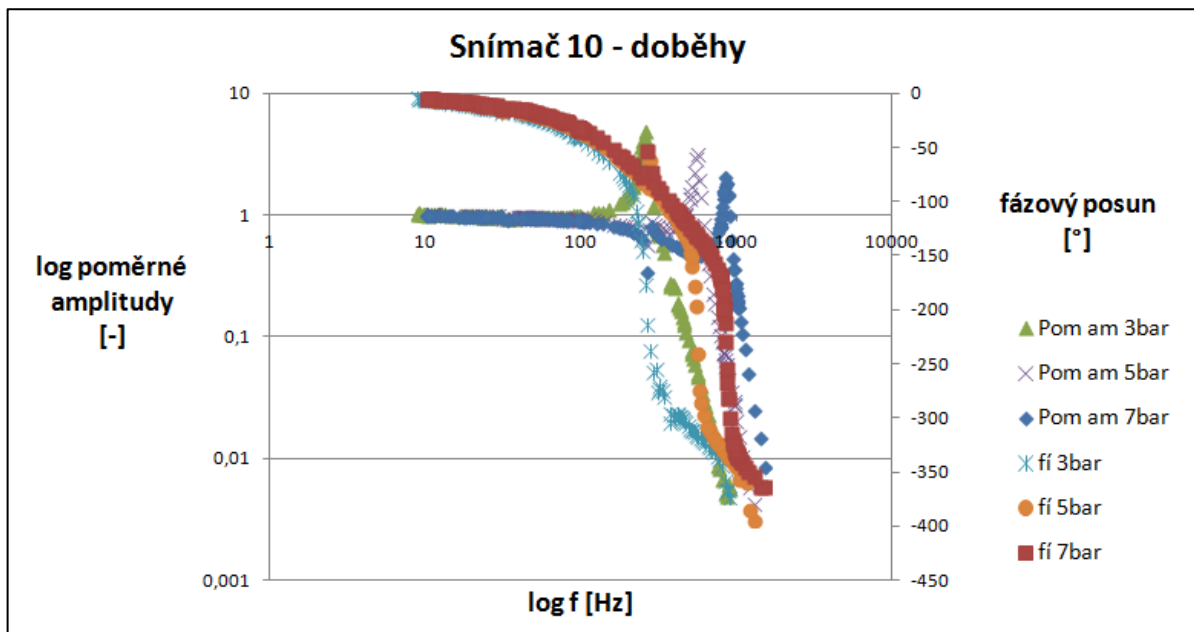
Také může jít o vliv elektroniky použité ve snímači. Ta se může chovat např. jako *dolnoproustný filtr*, tedy RC článek a vnášet tak k charakteristice membrány snímače, navíc charakteristiku svoji. Z elektromechanické analogie vyplývá přidání konstanty tuhosti a tlumení k jednohmotovému systému.

Z e-mailové korespondence se zástupci výrobce senzorů vyšlo najevo, že citlivý prvek, na němž jsou umístěny tenzometry, je od pracovního média oddělen právě silikonovým olejem a membránou. To vedlo k volbě výše zmíněného matematického popisu.

Mezi rozběhy a doběhy nebyly pozorovány žádné rozdíly, viz graf 6.4 a 6.5. Dále budou přiloženy pouze výsledky rozběhů. Možná zde byl opomenut fakt, že přejezdy frekvenčních pásem byly realizovány ručně. Pro vstupní hodnoty modelu byly vždy vybrány lepší záznamy.

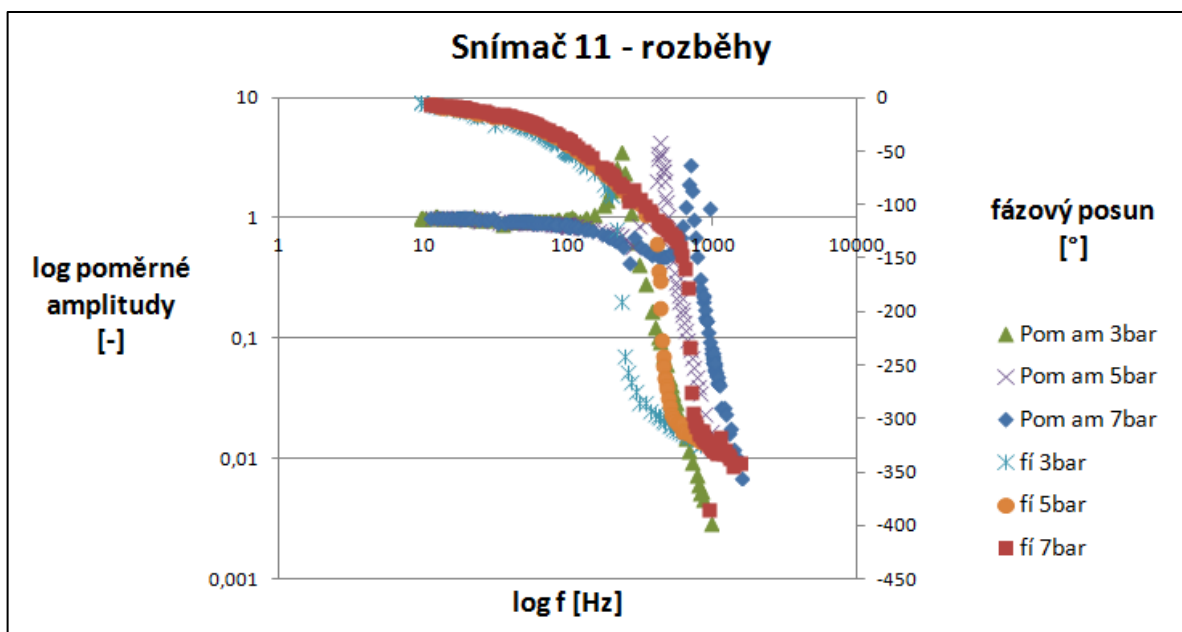
Rezanční frekvence (odečtené z amplitudové charakteristiky) se pohybují přibližně od 230 Hz do 700 Hz v závislosti na velikosti statického tlaku. Přesněji budou určeny z matematického modelu. Co však s přesností stanovit nelze, jsou mezní frekvence ohraničující

použitelnost snímače pro měření rychlých dějů. Tyto hodnoty záleží na volbě měřiče. Přestože průběhy amplitudových charakteristik se pro různé tlaky liší, mezní frekvence, vycházející z definice v podkapitole 2.2.8, budou mít přibližně stejné velikosti.



Graf 6. 5 Frekvenční charakteristiky snímače 10 - doběhy

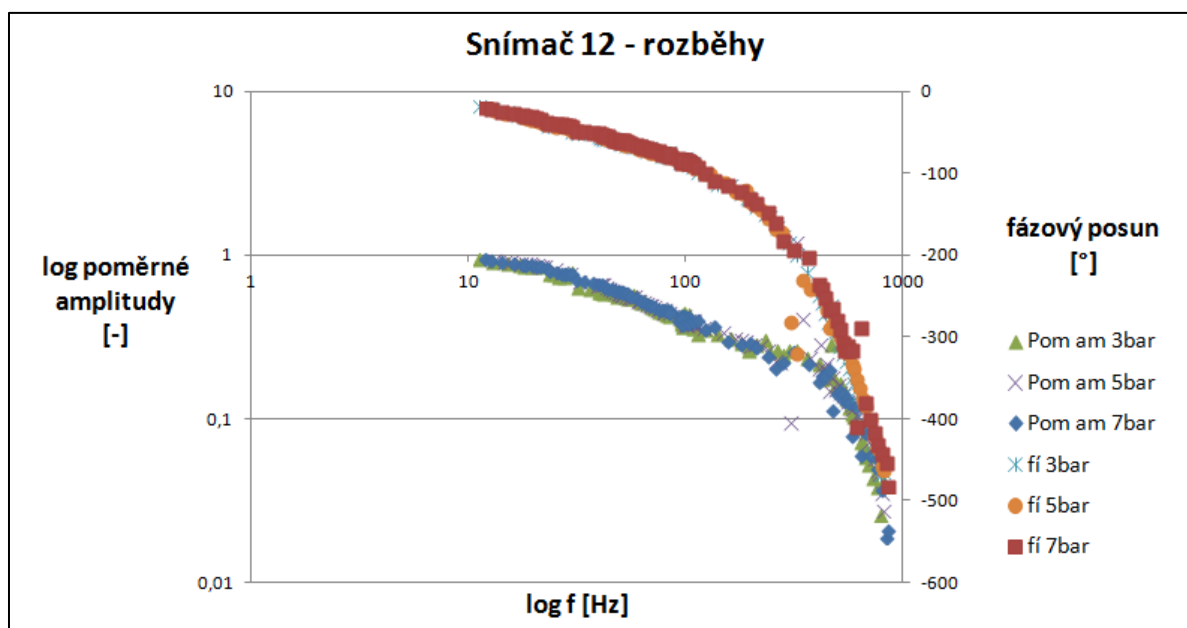
6.4.2 Snímač 11



Graf 6. 6 Frekvenční charakteristiky snímače 11 – rozběhy

U snímače 11, který je 3vodič (stejně jako snímač 10), avšak starší konstrukce, byly naměřeny velmi podobné průběhy charakteristik jak u snímače 10. Proto byl zvolen stejný model, viz dále.

6.4.3 Snímač 12



Graf 6. 7 Frekvenční charakteristiky snímače 12 – rozběhy

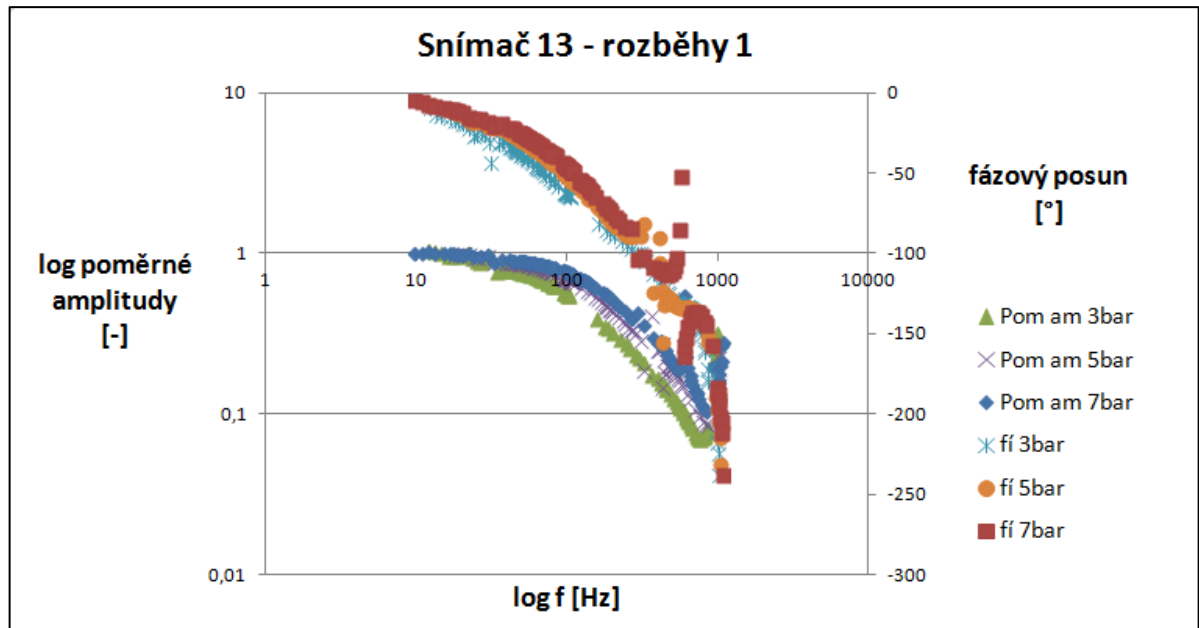
U snímače 12 dochází ke změnám charakteristik oproti předchozím dvěma snímačům. Jedná se o 2vodič s větší dobou náběhu. Jak bylo předpokládáno, jeho dynamické charakteristiky jsou podstatně horší. Další patrnou změnou je nezávislost frekvenčních charakteristik na velikosti statického tlaku. Po příčině tohoto chování nebylo intenzivně pátráno a také nebyla nalezena.

6.4.4 Snímač 13

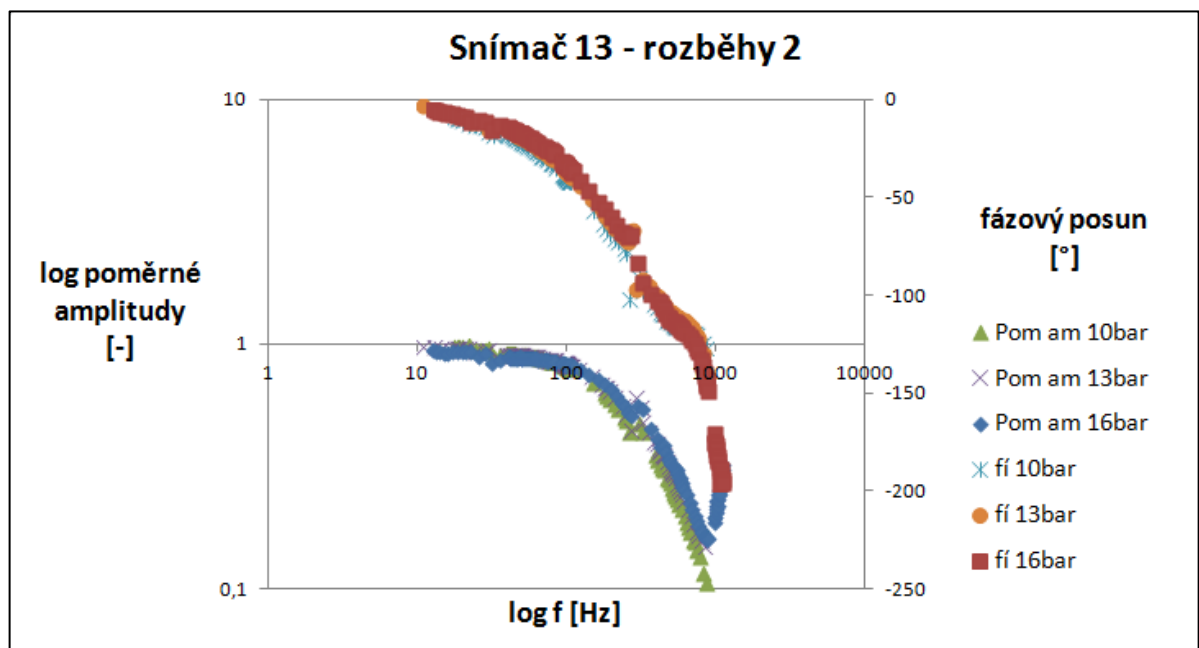
Pro tento snímač bylo pásmo měřených tlaků rozšířeno. Oproti standardu se jednalo o 10, 13, 16, 19, 23 a 25 bar. Nestejný krok mezi 19 a 23 bar není záměrný. Kvůli větší přehlednosti jsou rozběhy rozděleny do tří zpracování.

Průběh charakteristik se nyní podobá kombinaci všech předchozích snímačů. U amplitudové charakteristiky dochází k zatlumení podobně jak u snímače 12. Na 100 Hz má charakteristika hodnotu přibližně 0,5 (3bar) a 0,85 (25bar), z čehož také plyne určitá závislost na velikosti statického tlaku. V pravé části charakteristiky pak dochází k zesílení, jak v případě snímačů 10 a 11. Pro názornost je uveden graf 6.11, na kterém jsou pouze amplitudové charakteristiky. Lze tedy předpokládat podobnou konstrukci či vliv elektroniky, jak u těchto snímačů. Nicméně zesílení amplitudy na „vlastní frekvenci“ jedné z komponent snímače, se již nachází v oblasti poměrně výrazného zatlumení. Z tohoto důvodu není třeba hledat složitější model.

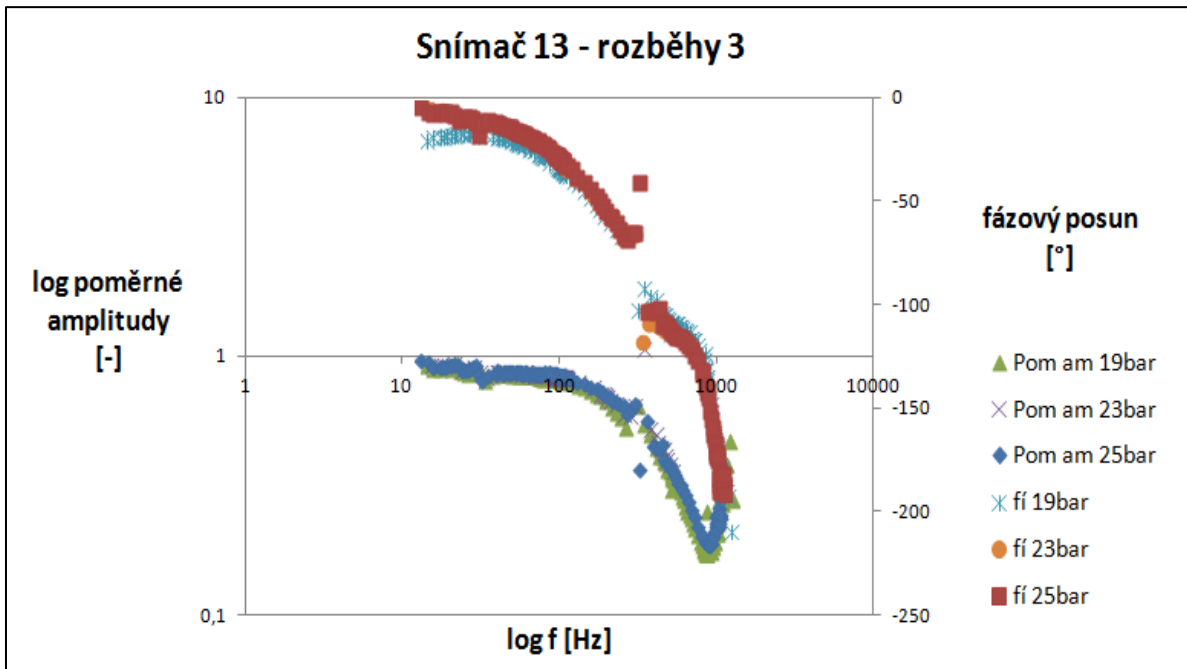
Závislost charakteristik na tlaku zde je, avšak velice malá. Z pohledu šířky frekvenčního pásma pro daný snímač je zanedbatelná. Malá závislost na tlaku může být dána tím, že všechny měřené tlaky se pohybují v první čtvrtině měřicího rozsahu snímače.



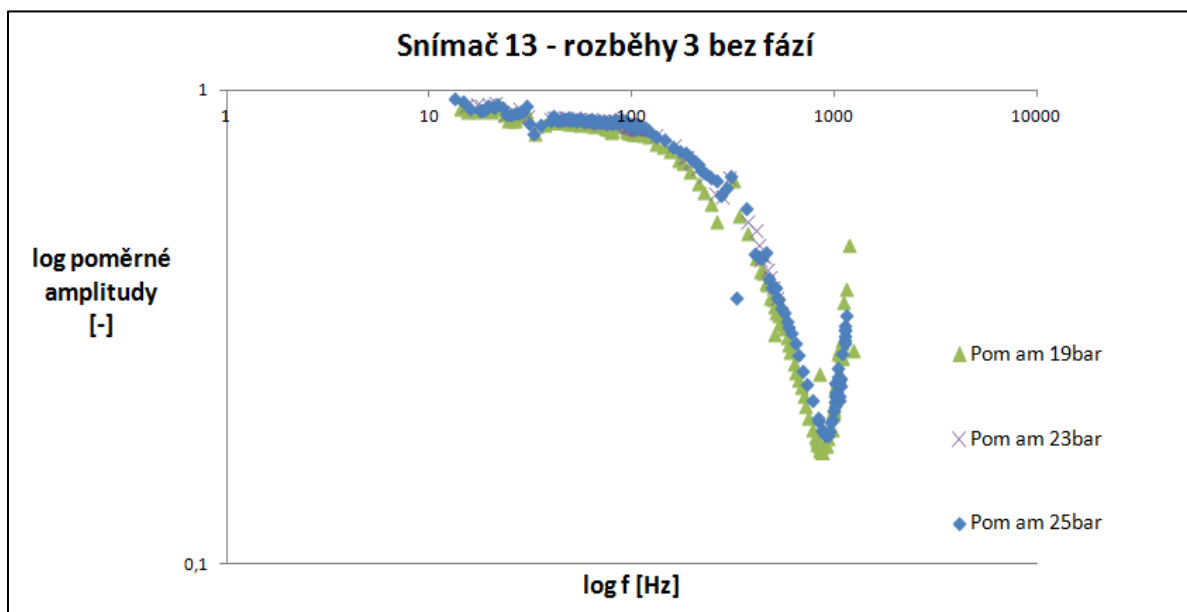
Graf 6. 8 Frekvenční charakteristiky snímače 13 – rozběhy 1



Graf 6. 9 Frekvenční charakteristiky snímače 13 – rozběhy 2



Graf 6. 10 Frekvenční charakteristiky snímače 13 – rozběhy 3



Graf 6. 11 Frekvenční charakteristiky snímače 13 – rozběhy 3 bez fází

6.5 MODELY SNÍMAČŮ

Matematické modelování tlakových snímačů vycházelo z porovnání s amplitudovou charakteristikou, stejně jako v případě RC článku. Model zahrnující i fázovou charakteristiku by byl o něco složitější a v rámci této diplomové práce nebyl uskutečněn. Výstupní hodnoty z modelů pak budou konkrétní hodnoty rezonančních frekvencí, nebo časových konstant pro konkrétní snímače a příslušné statické tlaky.

Kvůli značné různorodosti průběhů frekvenčních charakteristik, byly použity celkem tři možné popisy. Prvním je model pro měřicí přístroj prvního řádu, jehož frekvenční přenos je popsán vztahem (2.8). Zde je důležitým údajem především časová konstanta přístroje. K tomuto popisu je možné dospět z mechanického modelu viz obr. 3.1, vynecháním tělíska hmoty m . Tuhost a tlumení se dají vyjádřit následovně:

$$k = \frac{1}{K} ; b = kT \quad 6.1$$

Ve druhém případě se jednalo o model vycházející frekvenčního přenosu (2.9), z něhož vyplývá rezonanční frekvence. Ze vztahů (3.5), (3.6) a (3.7) je možné dopočítat hmotnost, tuhost a tlumení. Tyto dva matematické popisy bohužel dostatečně nevystihovaly důležité části charakteristik snímačů 10 a 11. Problematický byl právě útlum před samotnou rezonanční frekvencí. Z tohoto důvodu byl odvozen model, vycházející z kmitání dvouhmotového systému (kmitání se dvěma stupni volnosti).

6.5.1 Dvouhmotový model

Přenos tohoto systému byl odvozen na základě Malenovského [10]. Pohybové rovnice pro obě hmoty vypadají následovně:

$$m_1 x''_1 + b_1 x'_1 - b_2 (x'_2 - x'_1) + k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1) = 0 \quad 6.2$$

$$m_2 x''_2 + b_2 (x'_2 - x'_1) + b_2 (x'_2 - x'_1) + k_2 (x_2 - x_1) = F_0 e^{i\omega t} \quad 6.3$$

Harmonické buzení je realizováno silou o jednotkové velikosti amplitudy na druhé hmotě. Po úpravách a Laplaceově transformaci mohou být rovnice zapsány do maticového tvaru:

$$s^2 \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + s \begin{pmatrix} b_1 + b_2 & -b_1 \\ -b_2 & b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_1 \\ -k_2 & k_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ F_0 \\ s - i\omega \end{pmatrix} \quad 6.4$$

Po roznásobení:

$$\begin{pmatrix} (s^2 m_1 + s(b_1 + b_2) + k_1 + k_2) & -s b_2 - k_2 \\ -s b_2 - k_2 & s^2 m_2 + s b_2 + k_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ F_0 \\ s - i\omega \end{pmatrix} \quad 6.5$$

Zavedením matice A :

$$A = \begin{pmatrix} s^2 m_1 + s(b_1 + b_2) + k_1 + k_2 & -s b_2 - k_2 \\ -s b_2 - k_2 & s^2 m_2 + s b_2 + k_2 \end{pmatrix} \quad 6.6$$

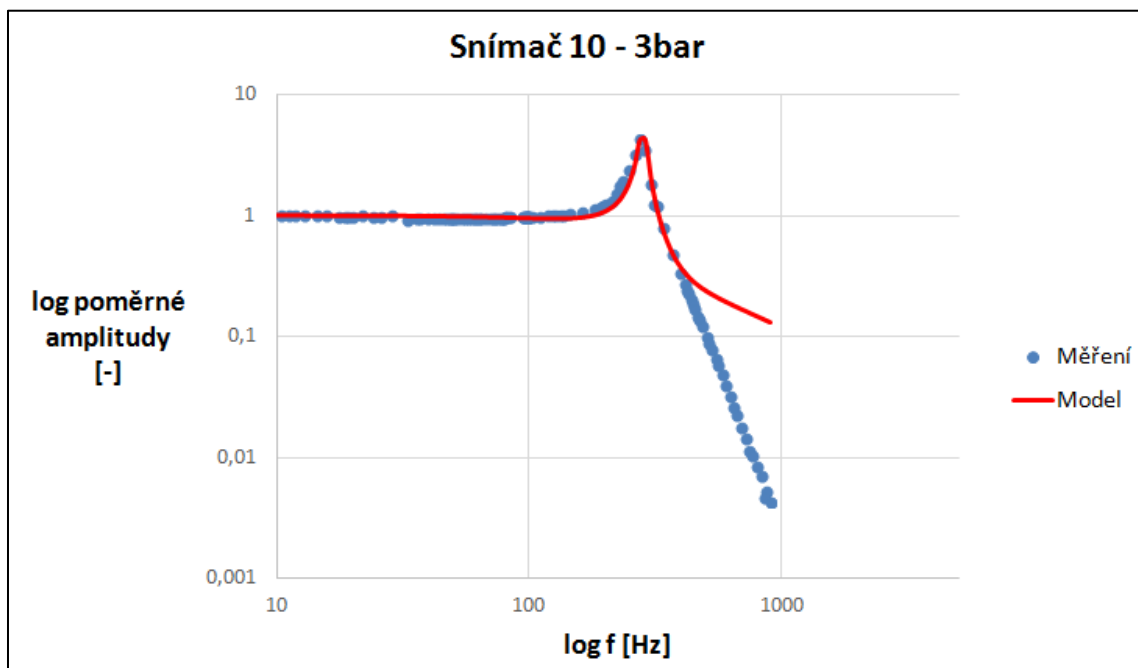
Přechází maticový zápis do finální podoby:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\det|A|} \begin{pmatrix} s^2 m_2 + s b_2 + k_2 & s b_2 + k_2 \\ s b_2 + k_2 & s^2 m_1 + s(b_1 + b_2) + k_1 + k_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \mathbf{F}_0 \\ s - i\omega \end{pmatrix} \quad 6.7$$

Tento matematický model dynamického systému bude aplikován na vybrané snímače.

6.5.2 Snímač 10

Po prvotním nedostatečném popisu senzoru pomocí jednohmotového systému, byl zvolen model se dvěma hmotami.

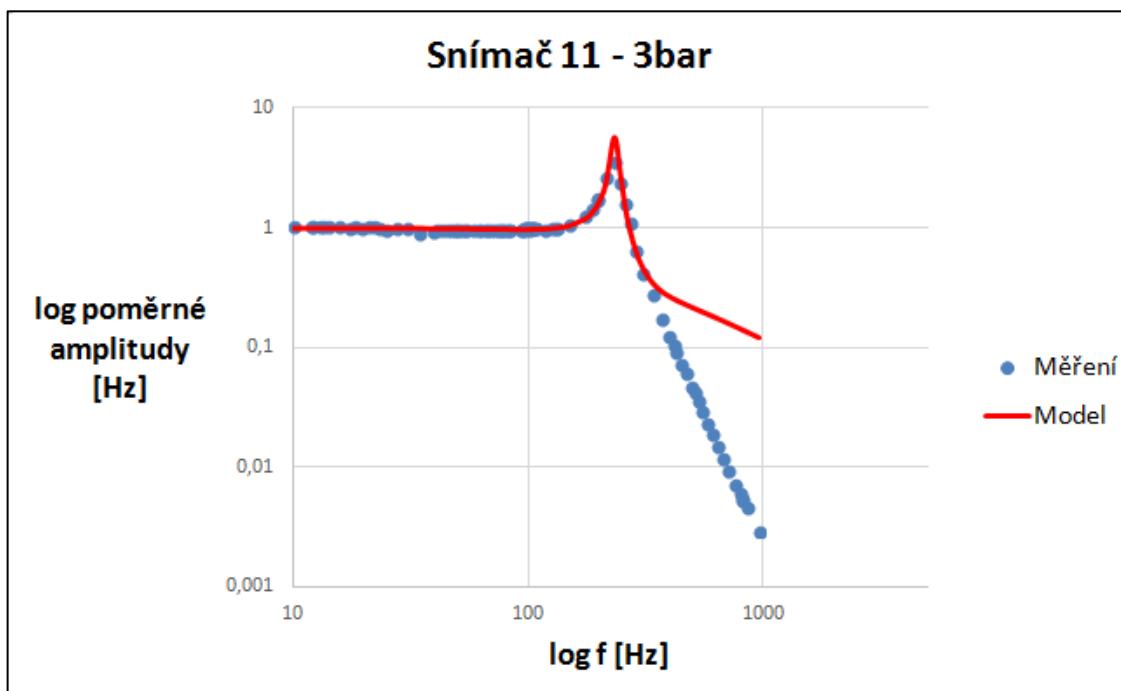


Graf 6. 12 Matematický model pro snímač 10

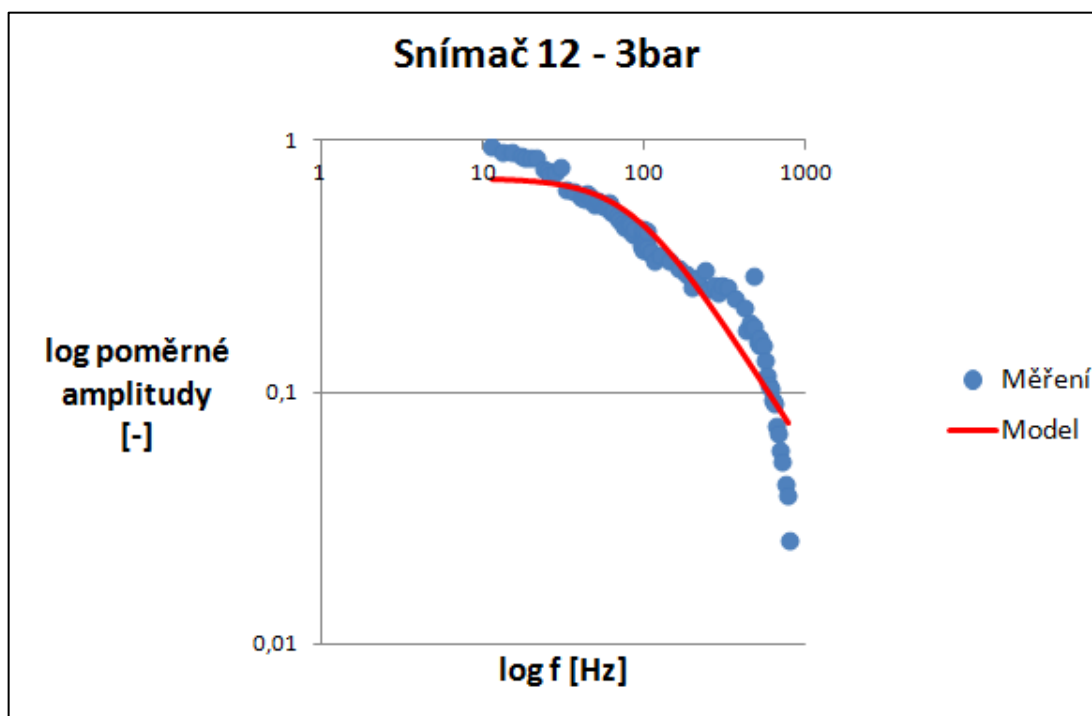
Matematický modelem je víceméně dobře popsána charakteristika, až do okolí rezonanční frekvence. Poté dochází odklonu od naměřených dat. Zde už zvolený model není schopný charakteristiku popsat a to ani po důkladné optimalizace. Každopádně k této skutečnosti dochází až za rezonanční frekvencí snímače, tedy v oblastech kde už by senzor neměl být používán. Všechny grafické výsledky pro tento převodník tlaku jsou uvedeny v přílohách.

6.5.3 Snímač 11

Z frekvenčních charakteristik tohoto senzoru jsou zřejmé obdobné dynamické vlastnosti jako v případě senzoru 10. Z toho důvodu byl zvolen stejný matematický model.



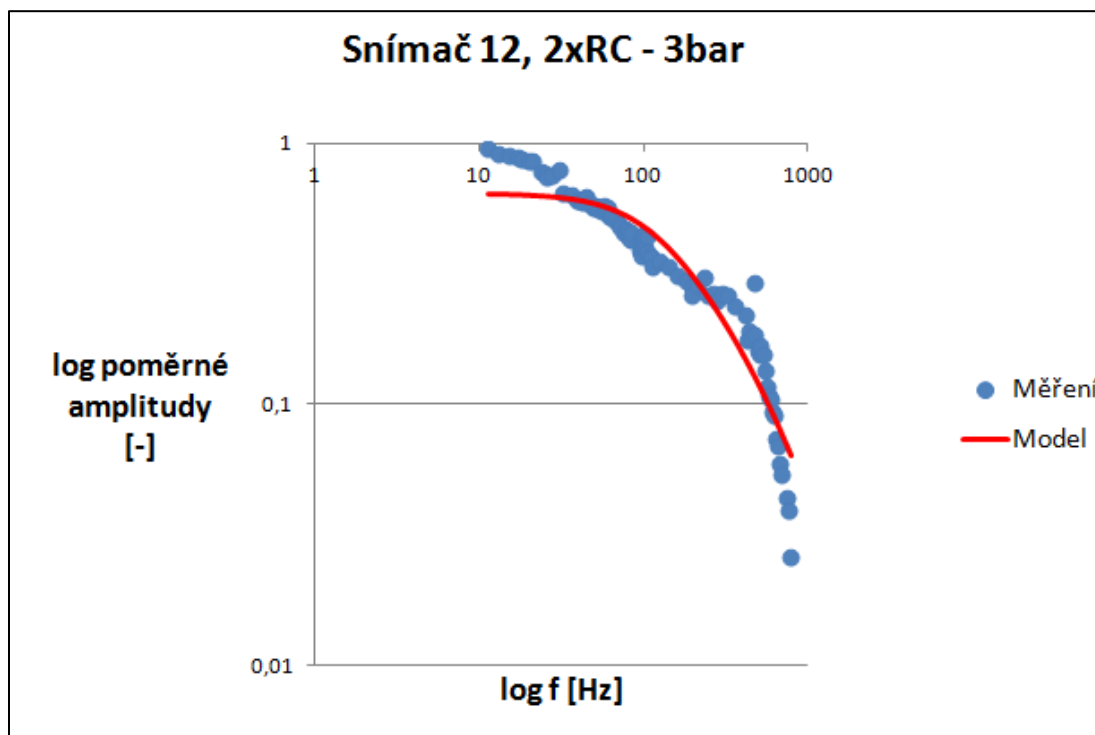
Graf 6. 13 Matematický model pro snímač 11



Graf 6. 14 Nehmotný model pro snímač 12

6.5.4 Snímač 12

Tento převodník tlaku bylo poměrně obtížné popsat matematickým modelem. Charakteristiky vedou na bezhmotný systém, pouze s časovou a převodovou konstantou. Nicméně z časové konstanty vyjádřená mezní frekvence podle (2.15), vycházela v každém případě větší, než po odečtu z grafu naměřených a zpracovaných dat. Z proložení na grafech 6.14 a 6.15 je patrné, jakých výsledků bylo dosaženo. Po dalších pokusech se dvěma v sérii řazenými nehmotnými systémy a obdržení takřka identických výsledků, bylo od matematického modelování tohoto senzoru upuštěno.

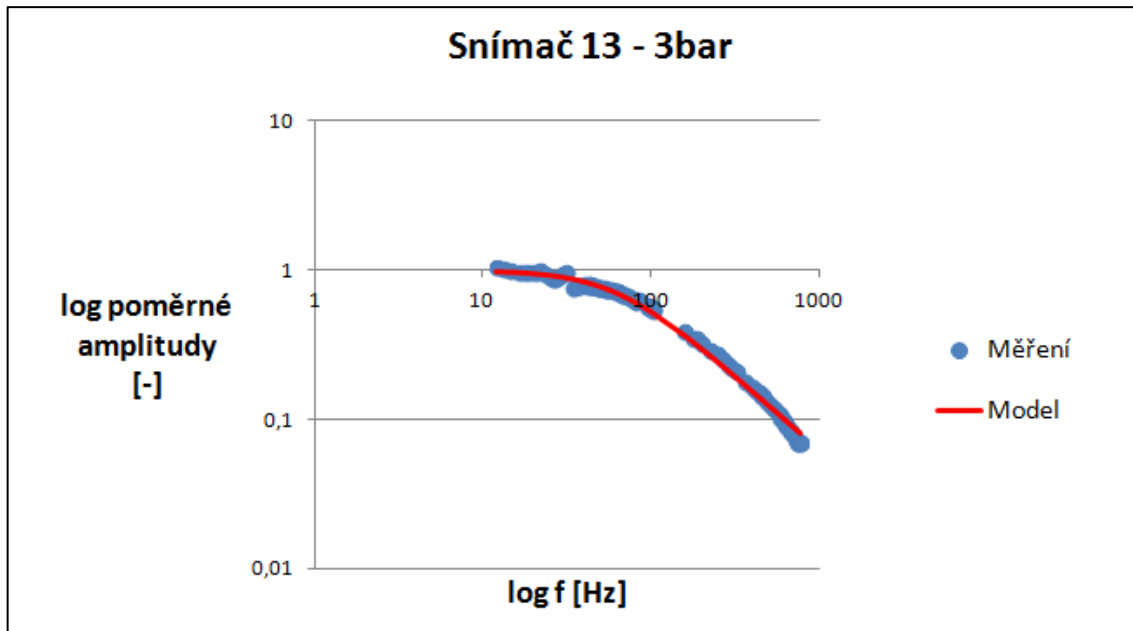


Graf 6. 15 Dva nehmotné modely v sérii pro snímač 12

6.5.5 Snímač 13

Z grafu 6.11 lze vyčíst, že v první fázi amplitudových charakteristik by bylo možné zvolit pro matematický popis nehmotnou mechanickou soustavu. Dále však dochází k zesílení charakteristiky, které bylo s výhodou modelováno dvouhmotovou soustavou. Protože k tomuto nárůstu dochází nejvýše (u vyšších statických tlaků) na dvaceti procentech poměrné amplitudy, budou tyto hodnoty z hlediska modelu zanedbány. Na dalším grafu jsou znázorněny již upravená vstupní data z měření i s modelem prvního řádu.

V tomto případě se zvolený popis jeví jako správný. Nalezená časová konstanta a z ní dále přepočtená mezní frekvence podle (2.15), odpovídá poklesu amplitudové charakteristiky o 30%, viz kapitola 2.2.8.



Graf 6. 16 Frekvenční charakteristiky snímače 13 – rozběhy 3 bez fází

Ostatní grafické výstupy jsou uvedeny v přílohách.

6.6 KOMPLETNÍ VÝSLEDKY

Tab. 6. 1 Tabulka výsledků matematického modelování

Snímač	Statický tlak [bar]	Rezonanční frekvence [Hz]	Časová konstanta [ms]
10 (3vodič, $T_r \leq 3ms$, <i>nový</i>)	3	280	-
	5	541	-
	7	882	-
11 (3vodič, $T_r = ?$, <i>starý</i>)	3	234	-
	5	431	-
	7	690	-
12 (2vodič, $T_r \leq 10ms$, <i>nový</i>)	3	-	-
	5	-	-
	7	-	-
13 (3vodič, $T_r = ?$, <i>starý</i>)	3	-	2,554
	5	-	1,675
	7	-	1,356
	10	-	1,224
	13	-	0,930
	16	-	0,891
	19	-	0,796
	23	-	0,768
	25	-	0,717

ZÁVĚR

Zadané cíle byly splněny. Přidanou hodnotou a zároveň logickým vyvrcholením celé této diplomové práce jsou vypracované matematické modely, popisující chování elektrických převodníků tlaku při měření rychlých dějů.

Poměrně rozsáhlá část je zde věnována sumaci teoretických poznatků, sloužících k pochopení dané problematiky. Ta se ukázala být složitější, než se zpočátku zdálo. V kapitole věnované dílčím dynamickým charakteristikám, je na závěr tento problém zmiňován. Přestože definice těchto charakteristik říká, že slouží jednak k výběru měřicího zařízení pro konkrétní použití, nebo pro porovnání s ostatními přístroji, zde zpracovaná data naznačují něco jiného. O tom však níže. Navíc neexistence jasných, přesně daných přepočtů mezi některými parametry je poněkud svízelná.

Docela zajímavou a přínosnou pasáží, z pohledu možností provedení dynamické kalibrace tlakových snímačů, je čtvrtá kapitola. Popisuje některé zažité a ozkoušené přístupy k realizaci experimentů a dále přikládá informace o jejich nedostacích.

Dále byla, jako mezistupeň mezi rešeršní a praktickou částí, provedena kalibrace RC článku. Ten lze považovat za modelový příklad dynamického systému prvního řádu se zpožděním. Vynaložené úsilí sloužilo pro seznámení se s měřením a vyhodnocením experimentálně získaných dat, k potvrzení správnosti odvozeného matematického modelu a v neposlední řadě k vytyčení možných postupů při měření dynamických charakteristik tlakových senzorů.

U návrhu experimentální tratě hrálo roli vybavení laboratoře. Nicméně svému účelu posloužila a takto naměřená data mohou být považována za správná. Respektive přehlédnutím přejezdů vlastních frekvencí celé tratě, kterým se lze jen těžko vyhnout, byl zdaleka jediným neduhem tratě akustický projev, při nastavování vyšších frekvencí.

V rámci této kapitoly byla také snaha vymodelovat přenos tlakových pulzací vlnovodem v programu Fluent. Tvar vlnovodu byl volen takový, aby docházelo k nárůstu amplitudy statického tlaku, směrem od budící membrány k místu montáže snímačů. Předpokládaných výsledků bylo dosaženo, avšak za velmi zjednodušených podmínek samotný pro výpočet. Je tedy otázka, zda jsou správné. S tímto závěrem také končí další pokusy o vyřešení této problematiky, jelikož nebyla součástí zadání a z hlediska tématu této práce se jednalo o okrajovou záležitost. Pomocí výpočetního modelování proudění by také mohly být simulovány přenosy tlakových pulzací v přívodních kanálcích tlakových senzorů, což by byla další informace o jejich dynamických vlastnostech. To už je ale možné téma závěrečné práce pro někoho dalšího.

Měření samotné proběhlo, až na jednu výraznější komplikaci bez problémů. Celá záležitost je popsána v úvodu poslední kapitoly.

Výsledky dynamické kalibrace *běžně používaných snímačů tlaku*, lze považovat za poměrně zajímavé. Celkem byly proměřeny čtyři senzory, z nichž dva jsou relativně nové modely (10 a 12) a zbylé dva jsou starší (11 a 13). K dalším rozdílům patří různé zapojení elektroniky snímačů. V případě nových typů je výrobcem udávána časová odezva pro obě zapojení. Rozdíl mezi těmito dvěma hodnotami je pouhých *7ms*. Z pohledu informací získaných z měření, se však tato hodnota jeví jako zcela nerelevantní. Frekvenční charakteristiky obou snímačů jsou totiž odlišné a to výrazným způsobem. U starších typů nebyla nalezena žádná informace o dynamických vlastnostech. Další popisy k charakteristikám jednotlivých převodníků tlaku jsou uvedeny v příslušných kapitolách.

V závěru práce byla snaha popsat amplitudové frekvenční charakteristiky snímačů, užitím vhodných matematických modelů a z nich pak určit konkrétní parametry. Pro popis komplikovanějších průběhů charakteristik, byl odvozen matematický model dvouhmotového

mechanického systému. Kýženého výsledku bylo dosaženo ve třech případech. O snímači 12, pro který nebyl nalezen ani jeden vhodný model, lze v souvislosti s jeho frekvenčními charakteristikami tvrdit, že je pro měření dynamických jevů nevhodný.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Označení	Legenda	Rozměr
a	Rychlost zvuku (kapitola 5)	[m/s]
a(t)	Zrychlení	[m/s ²]
a,b	Koeficienty diferenciální rovnice (pouze kapitola 2)	[-]
A(ω)	Amplitudová charakteristika	[-]
arctg	Arkus tangens	[-]
b	Tlumení	[kg/s]
c	Stlačitelnost tekutiny	[-]
C	Kapacita kondenzátoru	[F]
cos	Cosinus	[-]
dF	Element síly	[N]
dS	Element plochy	[m ²]
dt	Element času	[s]
dU	Element napětí	[V]
F ₀	Amplituda budící síly	[N]
f	Frekvence	[Hz]
f ₀	Vlastní frekvence	[Hz]
f _m	Mezní frekvence	[Hz]
f _v	Vzorkovací frekvence	[Hz]
f(t)	Budící síla	[N]
g	Tíhové zrychlení	[m/s ²]
G(s)	Obrazový přenos	[-]
G(iω)	Frekvenční přenos	[-]
h	Výška kapalinového sloupce	[m]
h(t)	Přechodová charakteristika	[-]
i	Imaginární jednotka	[-]
I	Proud	[A]
I _C	Proud na kondenzátoru	[A]
I _{RRC}	Proud na odporu RC článku	[A]
ImG(iω)	Imaginární část frekvenčního přenosu	[-]
K	Převodová konstanta	[-]
k	Tuhost pružiny	[N/m]
k,q	Koeficienty regresní funkce (pouze kapitola 3)	[-]
L	Indukčnost	[H]

\ln	Přirozený logaritmus	[-]
\log	Dekadický logaritmus	[-]
m	Hmotnost tělíska	[kg]
m,n	Indexy označující řády derivací (pouze kapitola 2)	[-]
p	Tlak	[Pa]
p_c	Celkový tlak	[Pa]
p_d	Dynamický tlak	[Pa]
p_k	Kinetický tlak	[Pa]
p_s	Statický tlak	[Pa]
R	Ohmický odpor	[Ω]
R_R	Referenční odpor	[Ω]
R_{RC}	Odpor u RC článku	[Ω]
$\text{Re}G(i\omega)$	Reálná část frekvenčního přenosu	[-]
s	Argument Laplaceovy transformace	[-]
t	Čas	[s]
T	Časová konstanta	[s]
T_0	Perioda vlastních kmitů	[s]
T_d	Dopravní zpoždění	[s]
T_o	Doba odezvy	[s]
T_p	Doba průtahu	[s]
T_r	Doba náběhu	[s]
T_s	Doba ustálení	[s]
$u(t)$	Posunutí	[m]
$U(t)$	Napětí	[V]
U_R	Referenční napětí	[V]
U_{RC}	Napětí na RC článku	[V]
$v(t)$	Rychlost	[m/s]
w	Rychlost změny vstupní veličiny	[-]
x_0	Velikost výchylky	[m]
$x(t)$	Vstupní signál	[-]
$X(s)$	Laplaceův obraz vstupního signálu	[-]
$X(i\omega)$	Laplaceův obraz vstupního signálu s argumentem $s=i\omega$	[-]
$y(t)$	Výstupní signál	[-]
$Y(s)$	Laplaceův obraz výstupního signálu	[-]
$Y(i\omega)$	Laplaceův obraz výstupního signálu s argumentem $s=i\omega$	[-]

ρ	Hustota	[kg/m ³]
π	Pí	[-]
ξ	Poměrný útlum	[-]
λ	Tlumení snímače	[-]
δ	Logaritmický dekrement útlumu	[-]
$\delta(t)$	Impulsní charakteristika	[-]
ω	Úhlová frekvence	[rad/s]
ω_0	Vlastní úhlová frekvence	[rad/s]
ω_m	Mezní úhlová frekvence	[rad/s]
$\varphi(\omega)$	Fázová charakteristika	[rad]

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CHUDÝ, Vladimír, PALEŇČÁR, Rudolf, KUREKOVÁ, Eva, HALAJ, Martin. *Meranie technických veličín*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1999. 1. vyd. 688 s. ISBN 80-227-1275-2.
- [2] KADLEC, Karel. *Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití (část 1)*. AUTOMA [online]. 2007, č. 2 [cit. 2016-04-09], s. 28-31. Dostupné z: <<http://automa.cz/download/au020728.pdf>>. ISSN 1210-9592.
- [3] KADLEC, Karel. *Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití (část 2)*. AUTOMA [online], 2007, č. 7 [cit. 2016-04-09], s. 25-29. Dostupné z: <<http://automa.cz/download/au070725.pdf>>. ISSN 1210-9592.
- [4] KADLEC, Karel. *Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití (část 3)*. AUTOMA [online], 2007, č. 10 [cit. 2016-04-09], s. 23-26. Dostupné z: <<http://automa.cz/download/automa/2007/au100723.pdf>>. ISSN 1210-9592.
- [5] Schweppe, J. L.; Eichberger, L. C.; Muster, D. F.; Michaels, E. L. & Paskusz, G. F. *Methods for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers, Monograph 67*, 1963 [online]. Washington D.C.. UNT Digital Library. [cit. 2016-03-27]. Dostupné z: <<http://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc13252/>>
- [6] ŠTĚTINA, Josef, JAROŠ, Michal, RAMÍK, Pavel. *Experimentální metody – Virtuální laboratoř*. [online]. V Brně: Vysoké učení technické v Brně, 2003 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <<http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/odkazy/index.htm>>
- [7] BEJČEK, L., PREČAN, J. *Poznatky z dynamických měření snímačů tlaku*. AUTOMA [online], 2002, č. 11 [cit. 2016-04-09], s. 26. Dostupné z: <<http://automa.cz/poznatky-z-dynamickyh-mereni-snimacu-tlaku-28610.html>> ISSN: 1210- 9592.
- [8] KRATOCHVÍL, Ctirad, HOUFÉK, Lubomír, HOUFÉK, Martin, KREJČÍ, Petr. *Simulace dynamických soustav*. [online]. V Brně: Vysoké učení technické v Brně, 2006 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <<http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/~pkrejci/opory/SimDSoust/>>
- [9] MALENOVSKÝ, Eduard. *Počítačové metody mechaniky v dynamice*. [online]. V Brně: Vysoké učení technické v Brně, 2007 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/~pkrejci/opory/pmm_dyn/>
- [10] ŠVANCARA, Pavel, HOUFÉK, Lubomír, MALENOVSKÝ, Eduard. *Mechanika těles – Dynamika: Studijní opory z dynamiky*. [online]. V Brně: Vysoké učení technické v Brně, 2005 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <<http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/~pkrejci/opory/dynamika/index.html>>
- [11] SLOVÁK, Tomáš, RIEDL, Zdeňek. *Identifikace a syntéza řízení technologických procesů*. [online]. V Ostravě: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Vedoucí projektu: Ing. Renata Wagnerová. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.352.vsb.cz/uc_texty/Identifikace/index.htm>

- [12] DOEBELIN, Ernest, O. *Measurement systems, Application and Design*. [online]. USA: The Ohio State University, 1990. 4. vyd. 960 s. [cit. 2016-05-05]. ISBN 0-07-0173389. Dostupné z: <https://physicsinstrumentation.files.wordpress.com/2015/03/measurement_systems_application_design.pdf>
- [13] REICHL, Jaroslav, VŠETIČKA, Martin. *Encyklopedie fyziky, integrační článek*. [online]. c2006-2016, poslední revize 8.1.2012 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/315-slozeny-obvod>>
- [14] FOLDYNA, Josef. ŘÍHA, Zdeněk. SITEK, Libor. *Studium šíření tlakových pulsací vysokotlakým systémem*. [online]. V Ostravě: Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Ostrava. 2009, [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.ansys.stuba.sk/ansys2009/prednasky/PRISPEVKY/UG_AVCR_Foldyna.pdf>
- [15] ANSYS, Inc. *ANSYS Fleunt UDF Manual*. [online]. 2013, verze 15.0 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <<http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20UDF%20Manual.pdf>>

SEZNAM POUŽITÝCH PROGRAMŮ

- [16] NATIONAL INSTRUMENTS. *LabVIEW* [software]. 2015. licence č. M64X79671. Dostupný z: <<http://czech.ni.com/labview>>
- [17] NATIONAL INSTRUMENTS. *SignalExpress* [software]. 2015. licence č. M64X79671. Dostupný z: <<https://www.ni.com/labview/signalexpress/>>
- [18] HABÁN, Vladimír. *parametr* [software].
- [19] MICROSOFT. *Microsoft excel* [software]. 2007. Dostupný z: <<https://products.office.com/cs-cz/excel>>
- [20] SOLIDWORKS. *SolidWorks 2011 x64 Edition* [software]. 2011. Dostupný z: <<http://www.solidworks.com/>>
- [21] ANSYS. *Fluent 15.0* [software]. 2013. Dostupný z: <<http://www.ansys.com/>>

SEZNAM PŘÍLOH

1. MODEL Y TLAKOVÝCH SENZORŮ

1.1 Snímač 10.....	76
Model – 3 bar.....	76
Model – 5 bar.....	76
Model – 7 bar.....	76
1.2 Snímač 11.....	77
Model – 3 bar.....	77
Model – 5 bar.....	77
Model – 7 bar.....	77
1.3 Snímač 13.....	78
Model – 3 bar.....	78
Model – 5 bar.....	78
Model – 7 bar.....	78
Model – 10 bar.....	79
Model – 13 bar.....	79
Model – 16 bar.....	79
Model – 19 bar.....	80
Model – 23 bar.....	80
Model – 25 bar.....	80

