



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

NÁVRH PRŮTOKOVÉHO MĚŘIČE PALIVA

DESIGN OF FUEL FLOW METER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN KREJČÍ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ DVOŘÁČEK

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Krejčí

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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 bakalářské práce:

Návrh průtokového měřiče paliva

v anglickém jazyce:

Design of fuel flow meter

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je konstrukční návrh průtokového měřiče paliva s těmito parametry: měření průtoku paliva v čerpací stanici, měřicí rozsah 0 až 80 l/min.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci):

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Formulaci řešeného problému a jeho technickou a vývojovou analýzu
4. Vymezení cílů práce
5. Návrh metodického přístupu k řešení
6. Návrh variant řešení a výběr optimální varianty
7. Konstrukční řešení
8. Závěr (Konstrukční, technologický a ekonomický rozbor řešení)

Forma práce: Průvodní zpráva, technická dokumentace

Typ BP: konstrukční

Účel zadání: pro potřeby průmyslu

Seznam odborné literatury:

SHIGLEY, J. E., MISCHKE, Ch. R., BUDYNAS, R. G. Konstruování strojních součástí. Překlad
7. vydání, VUTIUM, Brno 2010, 1186 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Dvořáček

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 22.11.2011

L.S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem průtokového měřiče paliva pro použití na čerpacích stanicích.

V úvodu práce je řešena problematika měření průtoku. Obsahuje stručný přehled průtokoměrů různých typů. Podrobněji je popsán princip Coriolisova průtokoměru. V konstrukční části je navrhována varianta uspořádání tohoto průtokoměru. U vybrané varianty je zpracována konstrukční dokumentace.

KLÍČOVÁ SLOVA

Průtok, hmotnostní průtokoměr, Coriolis, měřicí trubice, návrh

ABSTRACT

This thesis deals with the structural design of flow meter for fuel at petrol stations. Begin of work deals with the theory of flow measurement. The brief overview of different types of flow meters is shown here. Coriolis flow meter is described in more detail. Another part includes the design options of the flow meter. One of them is selected for further processing.

KEY WORDS

Flow, mass flow meter, Coriolis, measuring tube, design

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KREJČÍ, M. Návrh průtokového měřiče paliva. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Dvořáček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, za použití uvedených zdrojů a pod odborným vedením Ing. Jiřího Dvořáčka.

V Brně, dne 24. 5. 2012

.....
Martin Krejčí

PODĚKOVÁNÍ

Tímto chci poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Jiřímu Dvořáčkovi za odborné vedení, cenné rady a připomínky při psaní této práce. Také chci poděkovat všem blízkým, kteří mě po celou dobu studia podporovali.

OBSAH

Obsah	11
Úvod	12
1 Přehled současného stavu poznání	13
1.1 Metody měření.....	13
1.1.1 Objemové měření průtoku	13
1.1.2 Rychlostní měření průtoku	13
1.1.3 Hmotnostní měření průtoku.....	13
1.2 Rozdělení a přehled průtokoměrů	14
1.3 Coriolisův průtokoměr.....	15
1.3.1 Princip Coriolisova průtokoměru	15
1.3.2 Měřicí trubice Coriolisových průtokoměrů	17
1.3.3 Snímače a budící členy	18
1.3.4 Řídící a vyhodnocovací jednotky	18
1.3.5 Aplikace Coriolisových průtokoměrů	19
1.3.6 Výrobci Coriolisových průtokoměrů.....	19
2 Formulace řešeného problému a jeho technická a vývojová analýza	20
3 Vymezení cílů práce	21
4 Návrh metodického přístupu k řešení	22
5 Návrh variant řešení a výběr optimální varianty	23
5.1 Měřicí trubice a jejich upevnění	24
5.2 Vnější kryt	25
5.2.1 Varianta 1	25
5.2.2 Varianta 2	26
5.2.3 Varianta 3	27
5.3 Výběr optimální varianty.....	27
6 Konstrukční řešení	28
6.1 Výpočet zatížení trubice od Coriolisovy síly	28
6.2 Počítačová simulace	30
6.3 Výpočet bezpečnosti.....	31
6.4 Pořadí spojování součástí	33
7 Závěr – konstrukční, technologický a ekonomický rozbor řešení	34
8 Seznam použitých zdrojů	35
9 Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin	36
10 Seznam obrázků a grafů	37
11 Seznam tabulek	38
12 Seznam příloh	39

ÚVOD

Přesné měření průtoku je v dnešní době velmi důležité. Průtokoměry jsou zařízení, kterých je využíváno v široké řadě různých odvětví. Měření průtoku a protečeného množství se stalo nezbytnou součástí obchodu s tekutými produkty. Jsou příslušenstvím téměř každého potrubí.

Existuje velké množství typů průtokoměrů. Pracují na různých principech. Jedním z nejzajímavějších je průtokoměr Coriolisův, který při měření využívá Coriolisovu sílu. Tato síla je známá tím, že působí na tělesa, která se pohybují v rotující neinerciální vztažné soustavě. Ovlivňuje např. stáčení proudů vzduchu v zemské atmosféře. Coriolisův průtokoměr je poměrně novým zařízením. Tyto průtokoměry se teprve začínají uplatňovat. Problematika konstrukce není zatím v České republice tolik známá.

Bakalářská práce má dvě části. V první části je teorie o měření průtoku. Dále je vysvětlen princip Coriolisových průtokoměrů a jsou popsány jeho části. Druhá část práce je zaměřena na konstrukci průtokoměru. Jsou zde navrženy tři varianty řešení. Vypracován je výkres svařovací sestavy a výrobní výkres měřící trubice. Zjednodušeným způsobem je potom zjištěna bezpečnost vůči únavovému poškození.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1

Průtokoměr je zařízení, které měří průtok tekutin. Průtok je definován jako množství tekutiny (objemové, nebo hmotnostní), které proteče daným průřezem za jednotku času. Průtok patří mezi nejčastěji měřené veličiny. Rozsah použití průtokoměrů je velmi široký. Vyrábí se průtokoměry nejrůznějších rozměrů, rozsahů a konstrukcí, využívající mnoho fyzikálních principů. Pracovní podmínky průtokoměrů se mohou také velice lišit. Jde především o vlastnosti a stav měřeného média, jako jsou např. tlak, teplota, hustota, viskozita, elektrická vodivost, výbušnost, chemická agresivita nebo znečištění. Lze měřit např. průtok krve (od 0,1g.h⁻¹) nebo i průtoky říčních toků a mořských proudů (do 5000t.s⁻¹). Pro určení průtoku existuje v současné době mnoho přístrojů. Se zvyšující úrovní vyhodnocovacích zařízení a jejich senzorů se upouští od výroby průtokoměrů založených na klasických mechanických principech. Výrobci se dnes přiklánějí spíše k průtokoměrům, jež mají elektrickou výstupní veličinu a neobsahují pohyblivé části.

1.1 Metody měření

1.1

Metody měření průtoku můžeme rozdělit do tří základních skupin. Jsou to metody objemové, hmotnostní a rychlostní. Výsledek měření je pak udáván jako objemový průtok Q_v [m³.s⁻¹] nebo hmotnostní průtok Q_m [kg.s⁻¹]. Pro určení protečeného množství hmotnostního nebo objemového bývají snímače často vybaveny integračním zařízením (vodoměr, plynoměr).

1.1.1 Objemové měření průtoku

1.1.1

Objemový průtok Q_v je určen jako objem tekutiny ΔV , který proteče daným průřezem za časový interval Δt . Je dán vztahem:

$$Q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1-1)$$

Používá se k přesnému měření. Řadí se mezi metody absolutní. Funguje na principu naplňování a vyprazdňování odměrných nádob.

1.1.2 Rychlostní měření průtoku

1.1.2

Měří se rychlost proudícího média v , naměřená v místě o průřezu S . Průtok je pak vypočten podle vztahu:

$$Q_v = v \cdot S \quad (1-2)$$

1.1.3 Hmotnostní měření průtoku

1.1.3

Hmotnostní průtok Q_m je určen jako hmotnost tekutiny Δm , která proteče daným průřezem za časový interval Δt . Je dán vztahem:

$$Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (1-3)$$

1.2 Rozdělení a přehled průtokoměrů

Průtokoměry je možné klasifikovat podle metody měření a dále potom podle jednotlivých typů. Základní typy průtokoměrů a jejich stručnou charakteristiku nalezneme v upravené Tab. 1-1. Každý typ snímače má své přednosti a nedostatky vyplývající z jeho funkčního principu.

Tab. 1-1 Přehled základních vlastností [4]

Metoda	Typ průtokoměru	Bližší specifikace snímače	Charakteristika principu měření	Přesnost (%)	Rozsah (m ³ /h)	Použití
objemová	objemová měřidla	s nespojitou funkcí (zvonový rychloměr)	průtok je určen přírůstkem objemu za určitou dobu	lepší než 0,1	10 ⁻³ až 10 ²	vhodné pro plyny a čisté a neviskózní kapaliny, zejména jako etalon
		se spojitou funkcí (membránový a bubnový plynoměr, pístové měřidlo, oválový průtokoměr)	cyklické plnění a vyprazdňování několika odměrných prostorů	0,1 až 2	10 ⁻³ až 10 ³	především jako měřidla protékého množství, bilanční měřidla
rychlostní	průtokoměry s měřením rozdílu tlaků	rychlostní sondy (trubice Pitotova, Prandtlůva; několikaotvorové sondy)	závislost dynamického tlaku proudícího média na rychlosti proudění	2 až 5	1 až 10 ³	rychlostní sondy jsou vhodné k jednorázovému měření; několikaotvorové sondy jsou vhodné i pro velmi rozměrná potrubí
		průřezová měřidla (clona, dýza, Venturiho dýza)	měření rozdílu statických tlaků před a za zúžením průtočného průřezu	0,5 až 2	10 ⁻⁴ až 10 ³	dříve nejrozšířenější v průmyslu; nyní na ústupu ve prospěch průtokoměrů vírových, ultrazvukových atd.
		kapilární průtokoměry (laminární)	měření tlakového spádu na kapiláře	0,5 až 5	10 ⁻⁵ až 10	zejména pro laboratorní měření
		kolenové průtokoměry	měření rozdílu tlaků tekutiny na vnitřní a vnější stěně kolena	5 až 10	10 až 10 ³	jednoduché měřidlo, ale s velkou nejistotou
rotametry (plováčkové průtokoměry)	-	se změnou průtoku se mění průtočný průřez při téměř stále tlakové ztrátě	0,5 až 5	10 ⁻⁴ až 10 ³	vhodné pro laboratorní i provozní použití; měřicí trubice musí být svislá	
náporové (deformační) průtokoměry	terčíkové průtokoměry	kinetická energie proudící tekutiny deformuje pružný prvek	5	1 až 10 ⁴	vhodné k měření znečištěných, korozivních a viskózních tekutin	
turbínové a lopatkové průtokoměry	axiální průtokoměry (šroubový, turbínový)	silovým účinkem proudící tekutiny je uváděn do pohybu rotační prvek s otáčkami úměrnými rychlosti proudění	0,1 až 2	10 ⁻⁴ až 10 ³	vhodné k měření i za vysokých tlaků a teplot; neměří od nulového průtoku	
	radiální průtokoměry (jedno- či několikaotvorový lopatkový průtokoměr)		0,1 až 2	10 ⁻⁴ až 10 ³	měření množství užitkové i pitné vody; neměří od nulového průtoku	
elektromagnetické indukční průtokoměry	-	elektromagnetická indukce při pohybu vodiče v magnetickém poli	0,5 až 2	10 ⁻³ až 10 ⁵	pouze k měření elektricky vodivých kapalin; vliv teploty je zanedbatelný; necitlivé na změny hustoty, viskozity a tlaku; lze měřit obousměrně	
ultrazvukové průtokoměry	založené na Dopplerově jevu	měření změny frekvence ultrazvuku při odrazu od pohybující se nehomogenity v proudícím médiu	1 až 3	10 ⁻³ až 10 ⁴	měřené médium musí obsahovat částice odrážející zvuk; vhodné k měření kalů a znečištěných tekutin	
	vyhodnocující dobu šíření ultrazvukového signálu	měření doby šíření ultrazvuku ve směru a proti směru proudění	0,1 až 1	10 ⁻³ až 10 ⁴	náročné na technické provedení; obtížná kalibrace; nezasahuje do proudu média; lze dodatečně instalovat na povrch potrubí i měřit obousměrně	
vírové průtokoměry	-	měří se frekvence vírů vznikajících při obtékání tělesa nepravidelného tvaru	0,5 až 1	10 ⁻¹ až 10 ⁴	frekvenční výstup se snadno zpracovává číslicově; nevhodné pro malé průtoky; typická náhrada klasických průřezových měřidel	
značkovací průtokoměry	průtokoměry s uměle vytvořenou značkou	měří se doba, za níž se značka unášená tekutinou přemístí z místa svého vzniku ke snímači	0,1 až 1	-	vhodné pro kalibraci instalovaných průtokoměrů; lze měřit průtok i v potrubí složitých tvarů; nevhodné pro průběžné měření	
	korelační průtokoměry	značkou je zvolená náhodná proměnná proudící tekutiny a koreluje se signály ze dvou za sebou umístěných detektorů	1	-	použitelné tam, kde ostatní metody selhávají; nevhodou je složitá zařízení i zpracování signálu	
přepady, žlaby	měřicí přepad	měření polohy hladiny před přepadem	2 až 5	10 ⁻¹ až 10 ⁴	měření průtoku kapalin v otevřených kanálech	
	Parshallův žlab	modifikace Venturiho koncepce	2 až 5	10 ⁻¹ až 10 ⁵		
hmotnostní	Coriolisovy průtokoměry	se zakřivenou trubici	využití Coriolisovy síly vznikající při pohybu tekutiny v rotující soustavě	0,1 až 0,5	1 až 10 ³	nezávislé na změnách tlaku, teploty, viskozity, hustoty a vodivosti média
		s přímou trubicí		0,5 až 2		
tepelné průtokoměry	termoanemometry	měří se chladičí účinek nucené konvekce na vyhřívané čidlo	0,5 až 2	10 ⁻⁴ až 1	vhodné i k měření velmi malých průtoků v laboratorní i provozní praxi	
	kalorimetrické hmotnostní průtokoměry	měří se míra oteplení způsobená prouděním hmoty	0,5 až 2	10 ⁻⁵ až 1		

Tuto tabulku lze také použít, k volbě vhodného typu průtokoměru pro dané použití. Pro měření paliva na čerpacích stanicích byl vybrán průtokoměr hmotnostní Coriolisův. Tento typ průtokoměru vyhovuje svým rozsahem i vlastnostmi.

1.3 Coriolisův průtokoměr

Jde o hmotnostní průtokoměr, který využívá Coriolisovu sílu. Tato síla vzniká ve vibrující trubici. Výhodou těchto přístrojů je, že výsledek měření není ovlivněn tlakem, teplotou ani viskozitou měřené tekutiny. První komerční Coriolisův průtokoměr byl sestaven v druhé polovině dvacátého století J. Smithem ze společnosti Micro Motion.

1.3

1.3.1 Princip Coriolisova průtokoměru

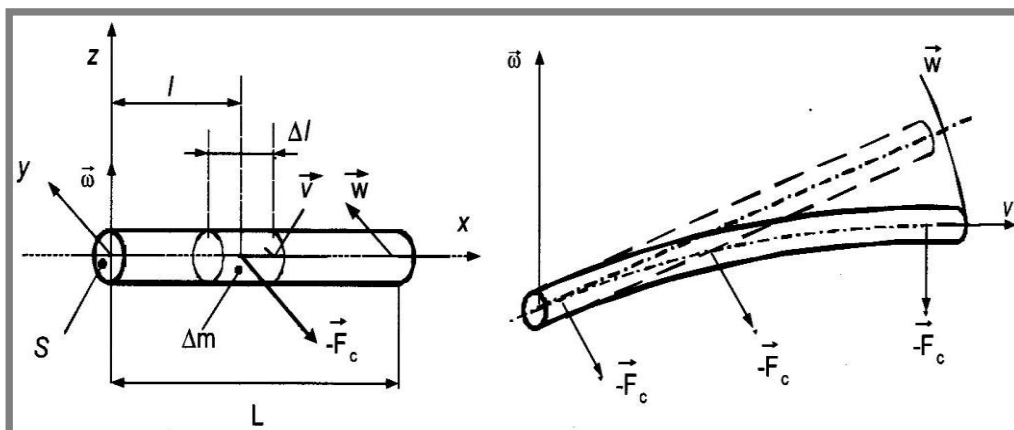
Na element tělesa o hmotnosti Δm , který se pohybuje přímočaře rychlostí \vec{v} v rotující neinerciální vztažné soustavě, působí Coriolisova síla $\Delta \vec{F}_c$ daná vztahem:

$$\Delta \vec{F}_c = 2\Delta m(\vec{\omega} \times \vec{v}) = \Delta m \vec{a}_c \quad (1-4)$$

kde:

$\vec{\omega}$ rads^{-1} je úhlová rychlost
 \vec{a}_c ms^{-2} - Coriolisovo zrychlení

1.3.1



Obr. 1-1 Vznik Coriolisovy síly

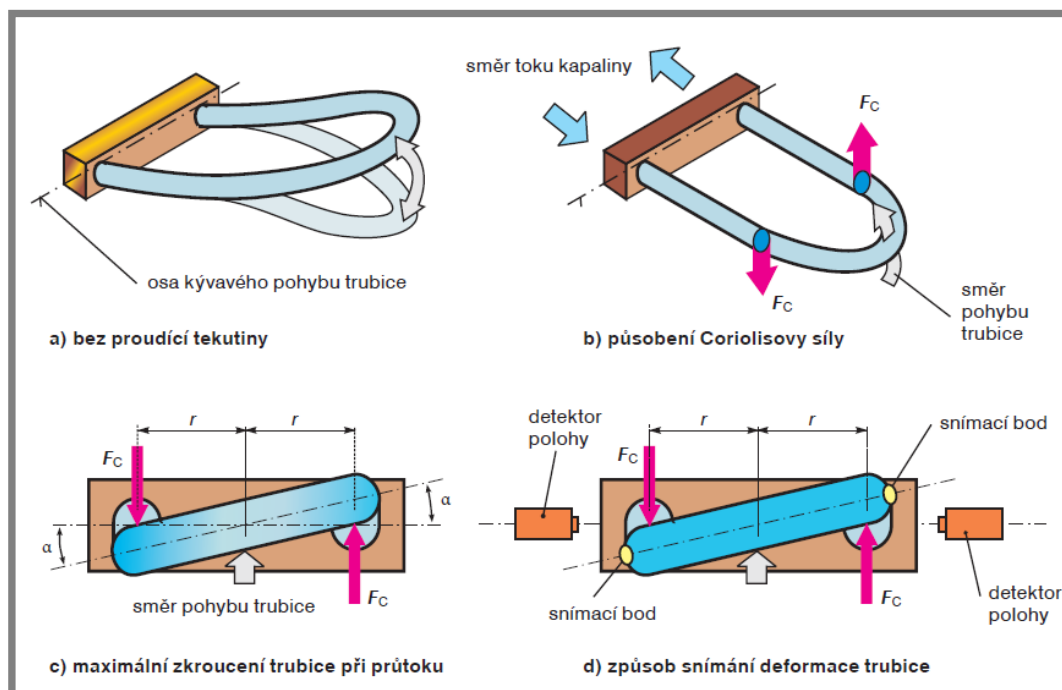
Protéká-li tekutina rychlostí \vec{v} potrubím rotujícím úhlovou rychlostí $\vec{\omega}$, pak podle vztahu (1-4) na každý její element o hmotnosti Δm působí síla $\Delta \vec{F}_c$. Na potrubí pak působí síla opačná. Pro velikost síly ΔF , která působí na potrubí o délce Δl platí:

$$\Delta F = 2\Delta m\omega v \cdot \sin(\varphi) = 2 \frac{\Delta m}{\Delta t} \omega \Delta l \cdot \sin(\varphi) = 2Q_m \omega \Delta l \cdot \sin(\varphi) \quad (1-5)$$

kde:

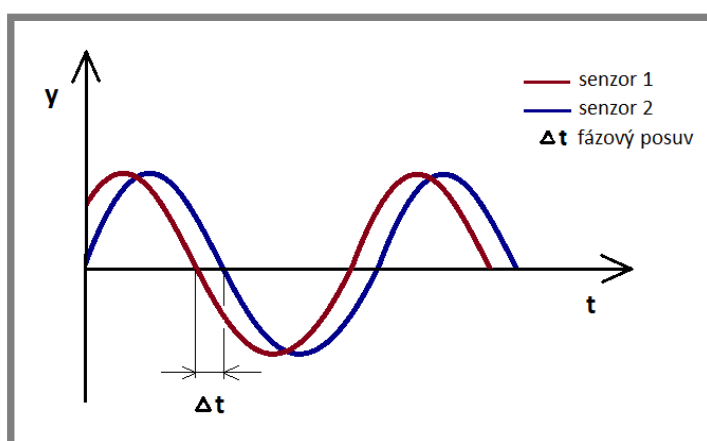
φ rad je úhel, který svírají vektory $\vec{\omega}$ a \vec{v}
 Q_m kgs^{-1} - hmotnostní průtok

Ze vztahu (1-5) plyne, že síla působící na potrubí je přímo úměrná hmotnostnímu průtoku. Tato síla způsobuje průhyb trubice (viz Obr. 1-2). Na pravé straně trubice působí opačným směrem než na levé. Orientace síly je určena podle pravidla vektorového součinu.



Obr. 1-2 Coriolisův průtokoměr s U trubicí [5]

Průhyb trubice je na každé straně zaznamenáván vhodnými pohybovými senzory. Vyhodnocen je potom fázový posuv obou signálů (viz Obr. 1-3), který odpovídá hmotnostnímu průtoku. Při nulovém průtoku je fázový posuv roven nule a oba signály splývají.



Obr. 1-3 Signály senzorů při nenulovém průtoku

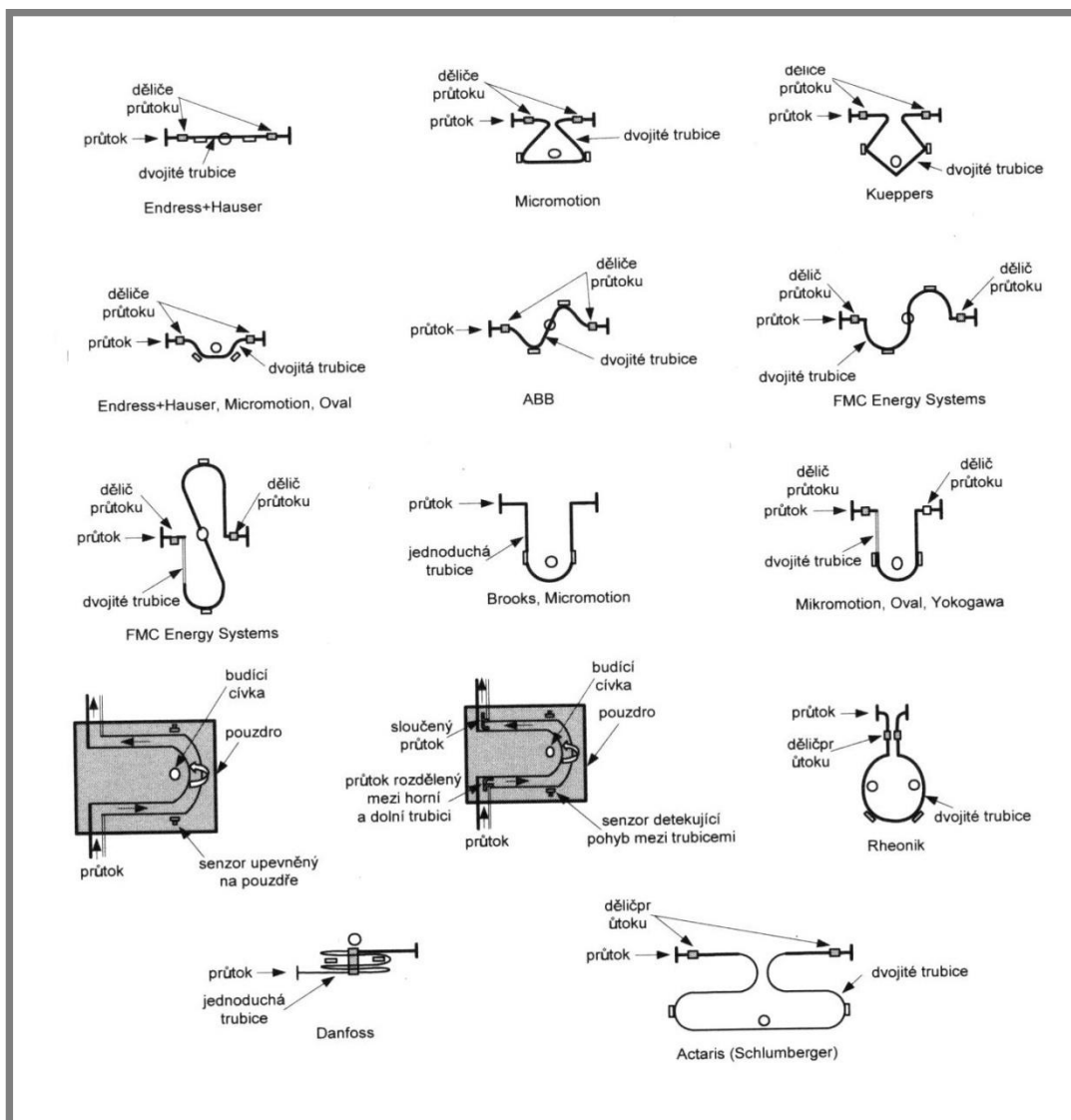
1.3.2 Měřicí trubice Coriolisových průtokoměrů

Tvar a materiál měřicí trubice výrazně ovlivňuje vlastnosti průtokoměru a způsob rozkmitávání trubice (viz Tab. 1-2). Trubice Coriolisových průtokoměrů kmitají na rezonanční frekvenci. Ta je závislá na geometrii, tuhosti materiálu a hustotě tekutiny.

Tab. 1-2 Vlastnosti měřicích trubic [5]

Tvar měřicí trubice	Amplituda kmitání (mm)	Frekvence kmitání (Hz)	Fázový posun kmitů ($\mu\text{s}/(\text{g}\cdot\text{s}^{-1})$)
měřicí trubice zakřivených tvarů	asi 0,8	100 až 250	120 až 160
přímé měřicí trubice	asi 0,1	500 až 700	asi 5

Tvary trubic jsou různé, z nichž každý má výhody a nevýhody. Měřicí trubice se mohou dělit na přímé a zakřivené. Trubice také mohou být jednoduché, nebo dvojité. Přehled schematicky znázorněných tvarů, které jsou v praxi nejčastěji používány, nalezneme v Obr. 1-4.



Obr. 1-4 Tvary měřicích trubic [1]

Zakřivené trubice mají větší citlivost (větší fázový posun senzorů) a poskytují silnější signál. Nevýhodou je, že potřebují větší instalační prostor a hůře se čistí. U složitých tvarů je také výrazná tlaková ztráta. V praxi je nejpoužívanější tvar písmene U a Ω . Tyto trubice jsou namáhány krutem nebo ohybem. Přímé trubice jsou snadno čistitelné a nemají téměř žádnou tlakovou ztrátu. Síla signálu pohybových senzorů je však slabá. Přímé trubice jsou citlivé na přenos rušivých vibrací z potrubí.

Pro zesílení signálu a snížení rušení se používají trubice dvojité. Tok kapaliny je rozdělen do dvou paralelních trubic. Trubice jsou rozkmitávány budícím členem umístěným mezi nimi, takže každá trubice kmitá s opačnou fází. Měří se zde posunutí trubic vůči sobě. Rušivé vibrace jsou přenášeny na obě trubice stejně a v rozdílu signálu se tedy neprojeví. Důležité pro funkčnost je, aby byl průtok v obou trubicích stejný. Nerovnoměrný průtok může nastat zanesením nebo ucpáním jedné z trubic. Při různém průtoku by trubice vibrovaly s odlišnou amplitudou, což by mohlo vést k poruše. Rozdělení do dvou proudů také způsobuje vyšší tlakovou ztrátu.

Trubice musí být korozivzdorná a mít dostatečnou tloušťku stěny, aby odolala agresivnímu i abrazivnímu působení média. Nejčastěji se používá nerezová ocel, titanové nebo zirkonové slitiny, tantal aj.

1.3.3 Snímače a budící členy

Snímače polohy určují deformaci měřicí trubice. Účinky Coriolisovy síly na deformaci mohou být velmi malé. Snímače musí být schopny rozlišovat výchylku řádově od desetin μm až po jednotky mm a pracovat v obtížných podmínkách. Nejčastěji se používají elektromagnetické snímače složené z cívky a magnetu. U dvojitých trubic je magnet připevněn na jedné trubici a cívka na druhé. Pro přímé trubice jsou vhodné optické snímače. Budící členy slouží k rozkmitání trubice. Používají se především členy elektromagnetické. Kmitají většinou na rezonanční frekvenci. Ta je výhodná pro dosažení vysoké amplitudy při použití malé síly. Rezananční frekvence je závislá na hustotě tekutiny, lze tedy pomocí této frekvence určit hustotu a vypočítat průtok objemový.

1.3.4 Řídící a vyhodnocovací jednotky



Obr. 1-5 Řídící jednotka Micro Motion 9739 MVD [7]

Úkolem řídicí a vyhodnocovací jednotky je poskytovat budící signál o rezonanční frekvenci a zpracovat a vyhodnotit signály senzorů. K dosažení rezonanční frekvence, kterou ovlivňuje nejen hustota tekutiny uvnitř trubice ale i teplota a tlak, je oscilační obvod řízen proporcionalně-integračním (PI) regulátorem.

Pro zpracování signálů senzorů se u inteligentních přístrojů užívá metoda MVD (Multi Variable Digital). Surový analogový signál je hned pomocí A/D převodníku převeden na digitální a další operace jako je čištění a korekce probíhají v mikroprocesoru nebo v DSP (digitální signální procesor). Vyloučení vlivu teploty je umožněno pomocí odporových teploměrů, umístěných v kritických místech trubice. Před teplotní korekcí jsou signály teploměrů také digitalizovány pomocí A/D převodníku.

Inteligentní průtokoměry mají oproti analogovým postupům lepší dynamické vlastnosti. Těch je dosaženo především díky vyšší rychlosti zpracování digitálního signálu.

1.3.5 Aplikace Coriolisových průtokoměrů

1.3.5

Coriolisův průtokoměr lze použít pro měření průtoku všech kapalin i newtonovských, zkapalněných plynů, vysoce viskózních kapalin i pastovitých hmot. Uplatnění nachází v potravinovém, chemickém, petrochemickém i farmaceutickém průmyslu. Na hmotnostní průtok nemá vliv tlak ani teplota. Hmotnostní měření je proto důležité ke zjištění množství přepravovaných produktů, které také bývají fakturovány v hmotnostních jednotkách. Používají se všude tam, kde je kladen důraz na přesnost, nebo tam kde je zapotřebí měřit více veličin najednou. Součástí některých průtokoměrů jsou i obvody měřící tlak, teplotu, hustotu, viskozitu a také i některé charakteristické vlastnosti konkrétních tekutin jako je např. podíl sušiny v mléce. Vyrábějí se průtokoměry s trubicí o průměru až 100mm. Mohou pracovat v teplotách od -240 do 400°C a v tlaku až 30MPa. Přesnosti měření průtoku dosahuje $\pm 0,1\%$ a přesnost měření hustoty $\pm 2\text{kg/m}^3$.

1.3.6 Výrobci Coriolisových průtokoměrů

1.3.6

Seznam nejvýznamnějších výrobců Coriolisových průtokoměrů [6]:

ABB	Honeywell
Actaris Metering Systems	Invensys/Foxboro
Brabender Technologie	Kobold Messring
Bronkhorst	Krohne
Brooks Instrument	Oval Corporation
Danfoss	Rheonik
Emerson Micromotion	Schenck Process
Emerson Brooks	Siemens
Endress+Hauser	Yokogawa
FMC Measurement Solutions	

2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA

Ve většině současných výdejních stojanů čerpacích stanic je použit čtyř pístový objemový měřič průtoku s integrovaným magnetickým převodníkem na pulzní signál (viz Obr. 2-6). Tyto měřiče pracují na principu naplňování a vyprazdňování nádob, ve kterých se vlivem tlaku pohybují písty. Mají tedy velkou tlakovou ztrátu a opotřebovávají se.



Obr. 2-6 Pístový průtočný měřič M 403.25P od společnosti ADAST-SYSTEMS [8]

Současným trendem je nahrazování průtokoměrů, které v sobě mají mechanicky pohyblivé části. Snahou je tedy nahradit objemový pístový průtokoměr průtokoměrem hmotnostním Coriolisovým. Coriolisovy průtokoměry jsou zatím ještě poměrně drahé, ale vývoj pokračuje, nacházejí čím dál větší uplatnění. Díky univerzálnosti a dobrým vlastnostem se oblast jejich použití rozrůstá. Vysoká přesnost a dlouhá životnost musí zaručit, aby se použití těchto průtokoměrů vyplatilo.

3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cílem práce je konstrukční návrh Coriolisova průtokoměru, tvorba 3D modelu a zpracování vybraných výkresů. Práce v sobě zahrnuje pouze konstrukční návrh průtokoměru, elektronické řídicí a vyhodnocovací obvody zde řešeny nejsou.

Průtokoměr má být určen pro měření průtoku pohonných hmot ve výdejních stojanech čerpacích stanic. Při návrhu je třeba dbát na to, aby průtokoměr po svém kompletním dokončení mohl splňovat následující kritéria:

- *Rozsah* – Měřicí trubice musí mít vhodný tvar a velikost, aby bylo možné měřit průtok 0 až 80 l/min.
- *Celkové rozměry* – Rozměry musí být zvoleny tak, aby výrazně nepřevyšovaly stávající průtokoměry ve výdejních stojanech a aby nevyžadoval příliš velký instalační prostor.
- *Dlouhá životnost* – Zvolit vhodný materiál a tloušťku stěny trubice, aby odolávala účinkům pohonných hmot. Trubicí navrhnout tak, aby nedošlo vlivem kmitání k únavovému poškození.
- *Citlivost a přesnost* – Aby snímače polohy poskytovaly dostatečně silný a čistý signál, musí být vhodně umístěny. Potřebují také správnou délku měřicího úseku, na který působí Coriolisova síla. Důležitá je i tuhost trubice, která má vliv na její rezonanční frekvenci.
- *Napojení na potrubí* – Zvolit velikost příruby na vstupu a výstupu tak, aby měly příruby vhodnou světlost a přístroj pak mohl být připojen na potrubí.
- *Pevnost* – Navrhnout opláštění, které ochrání měřicí trubicí před poškozením. Musí být i dostatečně tuhé, aby jeho deformace neměla vliv na měření.
- *Snadné sestavení* – Je třeba navrhnout opláštění tak, aby na něj mohly být připevněny všechny součásti.
- *Vzhled* – Při návrhu postupovat tak, aby celkový vzhled výrobku odpovídal průmyslovému designu.

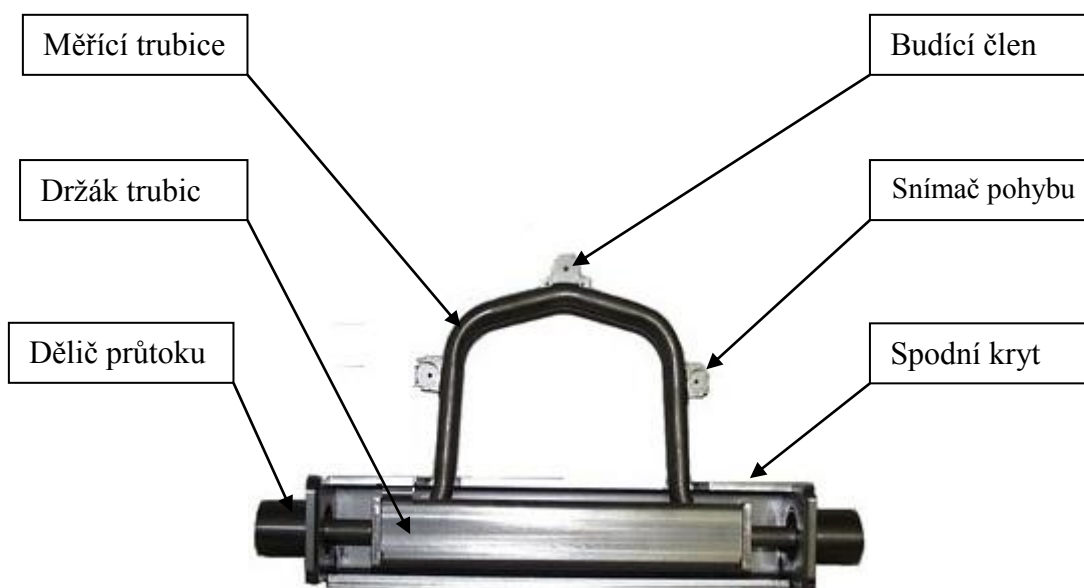
4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

Při návrhu Coriolisova průtokoměru bude postupováno podle následujícího metodického přístupu:

- Vymezení parametrů, které musí průtokoměr a jeho jednotlivé součásti splňovat.
- Návrh variant řešení a výběr optimální varianty. Tvorba 3D modelu.
- Výpočtová část, která zahrnuje zjednodušený výpočet maximálního napětí v kritickém místě trubice a určení bezpečnosti vůči únavovému porušování v tomto místě.
- Úprava rozměrů měřicí trubice a modifikace 3D modelu v případě, že výsledky výpočtu nebudou splňovat pevnostní požadavky.
- Zpracování vybrané výkresové dokumentace.
- Rozbor daného řešení.

5 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY

Konstrukční řešení v sobě zahrnuje návrh měřících trubic a návrh vnitřního a vnějšího krytu. Návrhy jsou zpracovány v podobě 3D modelů v počítačovém softwaru Autodesk Inventor 2011.



Obr. 5-7 Uspořádání box-in-box Yokogawa [9]

Při navrhování součástí bylo snahou docílit toho, aby mohly být vyrobeny z běžně dostupných polotovarů z nerezové oceli. Jako předloha pro návrh bylo použito uspořádání, které společnost Yokogawa označuje jako ‚box-in-box‘ (viz Obr. 5-7). Jde o to, že ve spodním krytu je ještě jeden kryt (na obrázku *držák trubic*), proto název ‚box-in-box‘. Výhody toho uspořádání s držákem trubic jsou popsány v dalším bodě. Na obrázku jsou také názvy důležitých částí průtokoměru, které jsou použity k popsání jednotlivých variant.

5.1 Měřicí trubice a jejich upevnění

Při navrhování měřících trubec byla z různých možností (viz Obr. 1-4) vybrána varianta dvojitých zakřivených trubec do tvaru písmene U s děličem průtoku. Tato varianta byla vybrána hlavně kvůli tomu, že průtokoměr bude používán v soustavě, kde se předpokládá výskyt nežádoucích vibrací v potrubí od čerpadla. Díky dvojitému uspořádání trubec jsou snímače polohy schopny poskytovat čistější signál. Pro tuto variantu je také důležitý stejný průtok v obou trubicích. Běžné pohonné hmoty mají takové vlastnosti, že by zde nemělo docházet k zanášení trubec a tím i k nestejnému průtoku.



Obr. 5-8 Návrh měřících trubec a jejich upevnění

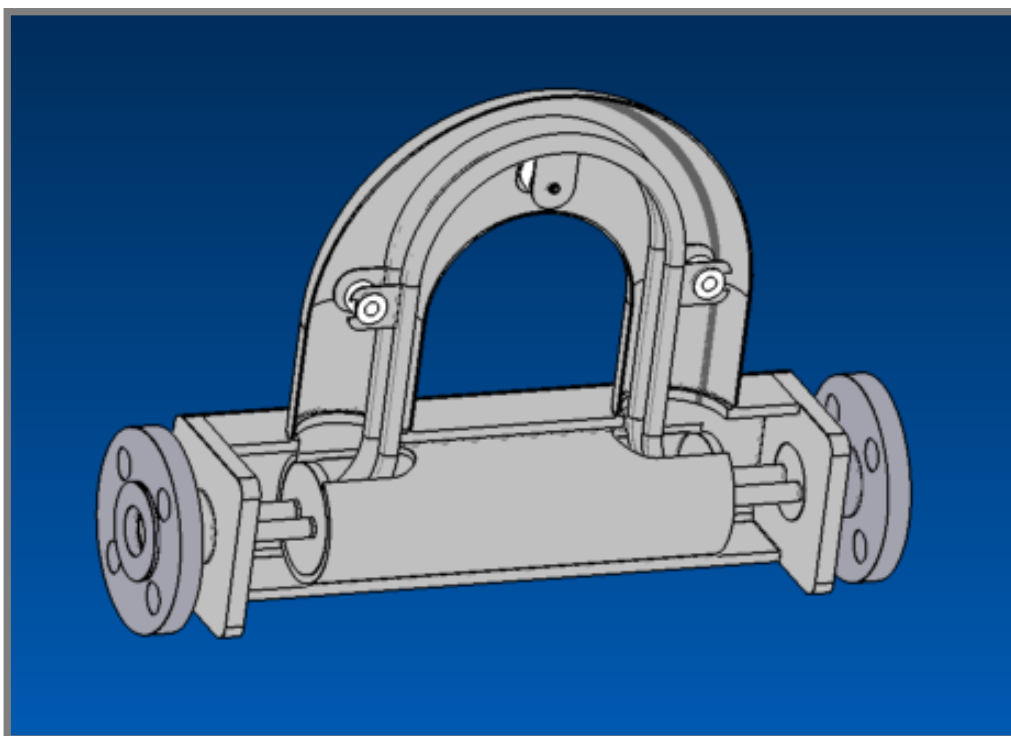
Trubice jsou na přírubu připojeny pomocí děliče průtoku (viz Obr. 5-8). Na obou trubicích jsou po stranách připevněné snímače a na prostředku budící člen. Pro potlačení přenosu rušivých vibrací a pro zabránění deformace trubec vlivem mechanického napětí v potrubí je ještě přidán vnitřní držák trubec. Držák je připevněn v místě začátku a konce měřícího úseku, a jeho účelem je pevně držet tato místa ve stejné poloze vůči sobě. Skládá se z trubky, ve které jsou vyříznuty otvory pro trubice, a dvou bočnic, vyrobených z plechu.

5.2 Vnější kryt

Byly vytvořeny tři varianty vnějšího krytu, které vycházejí z návrhu měřících trubic (viz Obr. 5-8). Kryt se skládá ze spodní a vrchní části. Úkolem spodní části je ochránit vstupní a výstupní části trubic a hlavně zajistit dostatečnou tuhost celého průtokoměru. Proto je ve spodní části použit silnější materiál. Vrchní kryt má pouze ochrannou funkci. Vnější kryt je v každém z případů připevněn k vnitřní části měřiče pouze v místech děliče průtoku. Jinde se tyto části nedotýkají. Jednotlivé varianty se od sebe liší tvarem a způsobem sestavení spodní a vrchní části krytu. Připevnění řídicí a vyhodnocovací jednotky zde řešeno není. Pro lepší představu byly 3D modely rendrovány jako ilustrace a některé části byly zobrazeny v řezu.

5.2.1 Varianta 1

U této varianty se spodní a vrchní část krytu skládají ze dvou stejných dílů (zobrazen je vždy jen jeden). Spodní část je čtvercového profilu a na dělič průtoku je napojen pomocí bočnic, vyrobených z plechu. Jsou v něm otvory pro vyvedení měřícího úseku trubic. V místech otvorů se na spodní část napojuje vrchní, která je vyrobena z ohnuté trubky. Spodní i vrchní část jsou rozříznuty na dva stejné díly a po umístění opět spojeny.



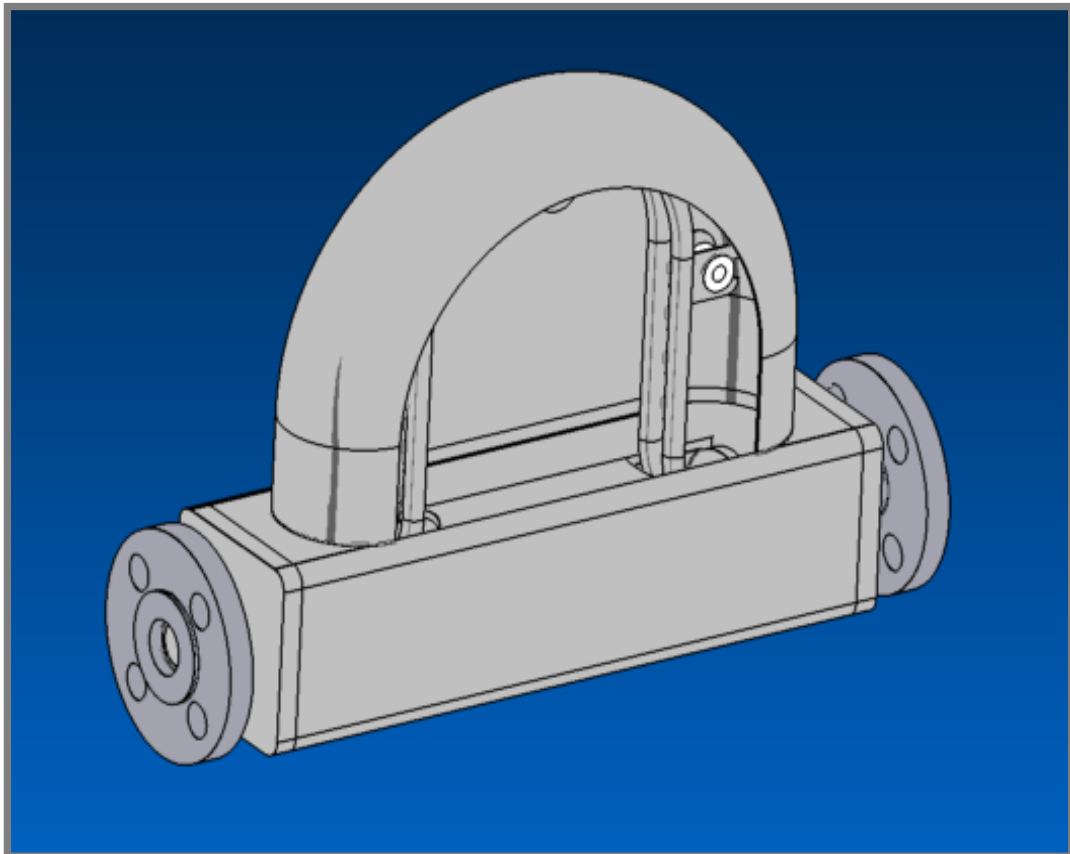
Obr. 5-9 Varianta 1

V tomto případě by sestavení probíhalo takto:

1. Sestavení vnitřní části, tak jak je zobrazeno na Obr. 5-8 krom připevnění přírub a děličů průtoku.
2. Připevnění bočnic a přírub na dělič průtoku.
3. Upevnění vnitřní části do děličů průtoku.
4. Umístění obou částí spodního i vrchního krytu

5.2.2 Varianta 2

Zde je opět spodní část vyrobena z polotovaru o čtvercovém profilu. Otvor pro vyvedení trubic je zde jeden a podstatně větší. To z toho důvodu aby se tímto otvorem daly provléci měřicí trubice. Vrchní část je vyrobena z ohnuté a rozříznuté trubky a dvou plechů. Přednost této varianty spočívá v tom, že spodní i vrchní část nemusejí být rozpuleny, aby se dal průtokoměr sestavit.



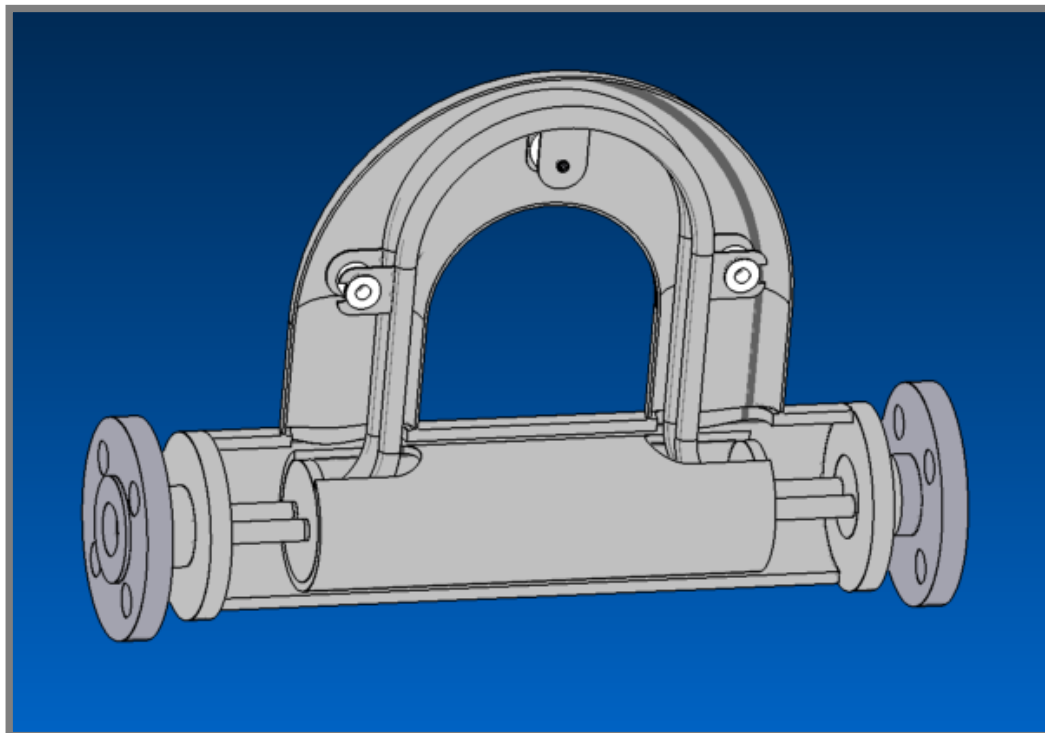
Obr. 5-10 Varianta 2

Sestavení by probíhalo následovně:

1. Sestavení vnitřní části, tak jak je zobrazeno na Obr. 5-8 mimo připevnění přírub a děličů průtoků.
2. Navlečení vnitřní části (trubice s držákem) do spodního krytu.
3. Nasazení děličů průtoků.
4. Připevnění bočnic spodního krytu.
5. Připevnění přírub a celé vrchní části krytu.

5.2.3 Varianta 3

Návrh třetí varianty je na Obr. 5-11. Tento návrh je v podstatě stejný jako varianta 1. Od sebe se liší pouze tvarem spodní části krytu. Zde má spodní část kruhový profil. Postup sestavení je shodný s postupem v prvním návrhu. Je tedy nutné obě části krytu před sestavením nejprve rozříznout a poté na průtokoměru spojit.



Obr. 5-11 Varianta 3

5.3 Výběr optimální varianty

Při vybírání optimální varianty byla jako první vyloučena varianta 2. Tato varianta má sice značnou výhodu oproti variantě 1 a 3 v tom, že se nemusí vrchní a spodní kryt před sestavením púlit. Bohužel vzhledově nesplňuje požadavky průmyslového designu. Zbyly tedy varianty 1 a 3, které se od sebe liší tvarem spodního krytu. Kvůli snazší dostupnosti trubek kruhového profilu v nerezovém provedení byla nakonec vybrána varianta 3.

6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Kompletní konstrukční řešení Coriolisova průtokoměru je hodně rozsáhlé a svojí náročností by převyšovalo bakalářskou práci. Ke kompletnímu řešení by bylo třeba znát parametry řídicích a vyhodnocovacích elektronických obvodů, provést rozsáhlé simulace a také měření. Zde jsou uvedeny pouze některé výpočty, které jsou k řešení nutné. Uveden je zjednodušený výpočet zatížení od Coriolisovy síly F_c a od budící síly F_b , které působí na model trubice. V programu Autodesk Inventor 2011 je provedena pevnostní analýza měřicí trubice. Z výsledku pevnostní analýzy je vypočtena bezpečnost vůči únavovému poškození. Vytvořen je potom výkres svařovací sestavy průtokoměru a výrobní výkres jedné měřicí trubice.

6.1 Výpočet zatížení trubice od Coriolisovy síly

Trubice je zatěžována Coriolisovou silou a silou od budícího členu.

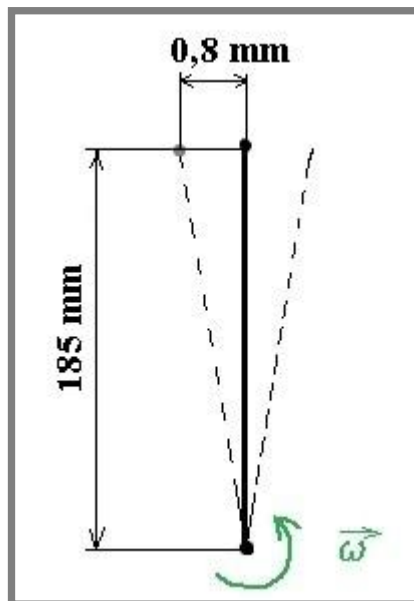
Zatížení od síly Coriolisovy lze spočítat ze vztahu (6-5). Výpočet je pouze orientační, ke zjištění celkového zatížení od Coriolisovy síly je nutné znát úhlovou rychlost měřicí trubice.

$$\Delta F = 2Q_m \omega \Delta l \cdot \sin(\varphi) \quad (6-5)$$

kde:

Q_m	kg s^{-1}	je	hmotnostní průtok
ω	rads^{-1}	-	úhlová rychlost, se kterou trubice kmitá
Δl	m	-	délka úseku, kde síla působí
φ	rad	-	úhel, který svírají vektory $\vec{\omega}$ a \vec{v}

Jelikož je síla použita k určení bezpečnosti, budou ve výpočtu použity maximální možné hodnoty.



Obr. 6-12 Poloha budícího členu na trubici

Úhlová rychlost ω není známa, ale její maximální hodnota lze orientačně určit podle vztahu (6-6). Budící člen je umístěn 185 mm nad osou rotace (viz Obr. 6-12). Podle Tab. 1-2 jsou běžné hodnoty u zakřivených trubíc následující: amplituda $Y_m = 0,8$ mm a frekvence kmitání 100 – 250 Hz.

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot Y_m}{R} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 250 \cdot 0,0008}{0,185} = 6,7926 \text{ rads}^{-1} \quad (6-6)$$

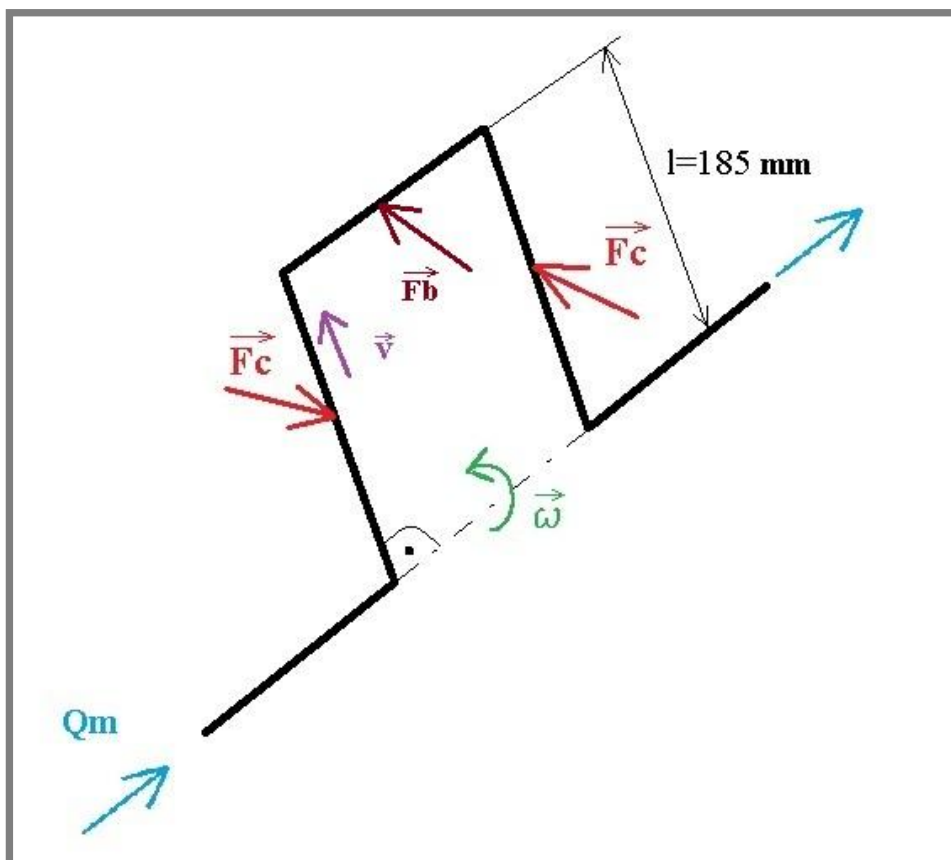
kde:

f	Hz	je	maximální frekvence
Y_m	m	-	amplituda kmitání
R	m	-	poloměr, na kterém je snímač umístěn

Hmotnostní průtok Q_m je vypočítán podle vztahu (6-7) z maximálního objemového průtoku Q_V (ze zadání 0 – 80 l/min). Pro výpočet je nutné znát hustotu proudící kapaliny. Dosazena je hustota vody $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$.

$$Q_m = Q_V \cdot \rho = \frac{80}{1000 \cdot 60} \cdot 1000 = 1,3333 \text{ kgs}^{-1} \quad (6-7)$$

Délka úseku l byla zjištěna ze zjednodušeného tvaru trubíc na Obr. 6-13. Délka jedné strany, kde působí síla F_c má velikost $l = 0,185$ m. Hodnota $\sin(\varphi)$ je po celém úseku rovna jedné, protože zde vektory $\vec{\omega}$ a \vec{v} spolu svírají pravý úhel.



Obr. 6-13 Zjednodušený tvar měřicí trubice

Síla F_c , která působí na stranu trubice je vypočtena dosazením do vztahu (6-5).

$$F_c = 2Q_m \omega l \cdot \sin(\varphi) = 2 \cdot 1,3333 \cdot 6,7926 \cdot 0,185 \cdot 1 = 3,3509 \text{ N}$$

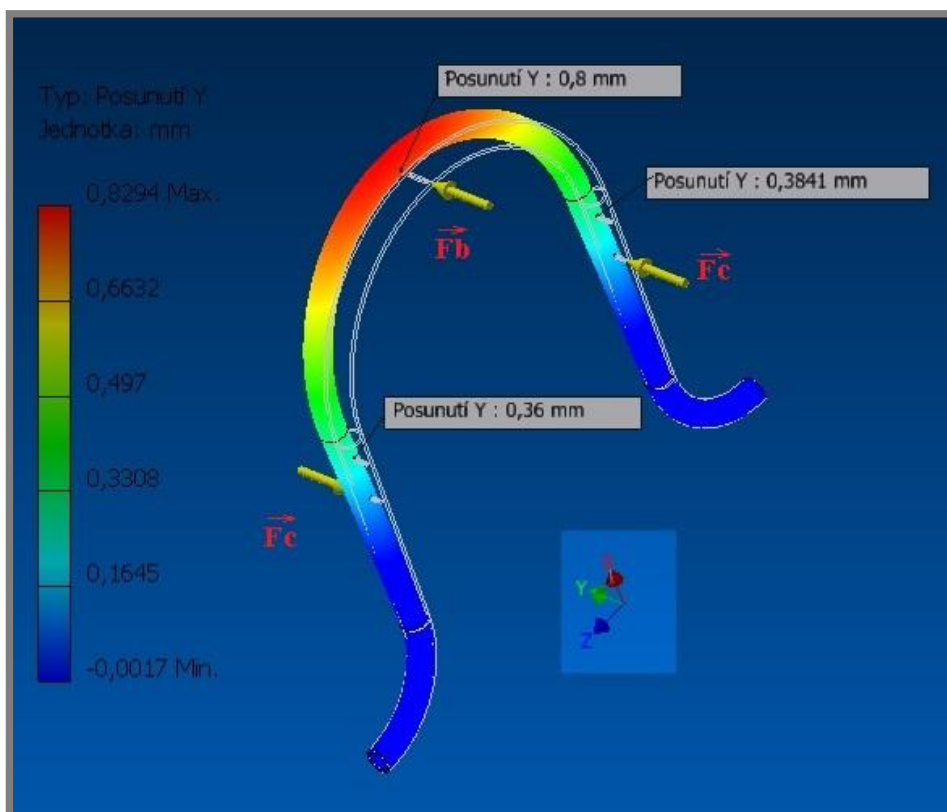
Jedná se pouze o orientační hodnotu maximální síly, která by vznikla působením Coriolisova zrychlení na proudící kapalinu ve kmitající trubici. Pro přesnější určení je třeba znát maximální úhlovou rychlost při kmitání trubice konkrétního průtokoměru. Ta závisí na rezonanční frekvenci trubice.

Síla F_b je virtuální síla, která má v simulaci nahradit zatížení vyvolané budícím členem. Víme, že působí na vrcholu trubice a že posunutí v tomto místě je 0,8 mm. Provedena bude tedy simulace, kde bude síla F_b postupně zvětšována tak, aby posun v tomto místě dosáhl hodnoty 0,8 mm.

6.2 Počítačová simulace

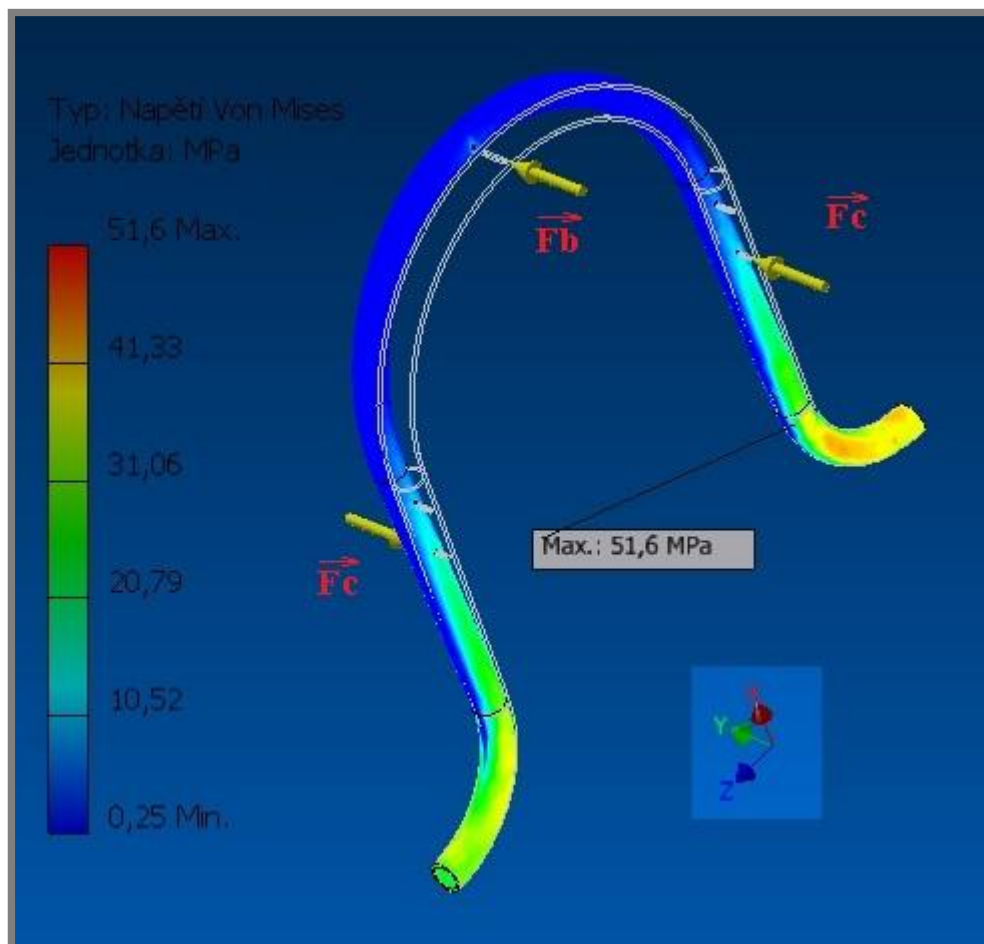
Simulace byla provedena v programu Autodesk Inventor 2011. V místech, kde je trubice připevněna do držáku trubic, je zadána pevná vazba. Působí síla F_c je zvoleno podle zjednodušeného tvaru (viz Obr. 6-13) do poloviny délky úseku, tedy 92,5 mm od osy rotace. Působí síla F_b je uprostřed trubice 185 mm od osy rotace. Materiál je zadán s parametry, které odpovídají oceli 1.4404 dle ČSN 10088-1:

Yongův modul:	193 GPa
Poissonova konstanta:	0,3
Mez kluzu v tahu:	220 MPa
Mez pevnosti v tahu:	520 MPa



Obr. 6-14 Posunutí ve směru y

Nejprve je třeba zjistit velikost síly F_b . Aby se posunutí v místě budícího členu rovnalo 0,8 mm, musí mít síla F_b velikost 27,674 N. Na Obr. 6-14 je také vidět jakých hodnot může nabývat posunutí v místech snímačů pohybu a jaký je jejich rozdíl. Tato informace se může hodit při volbě nebo konstrukci snímačů pohybu.



Obr. 6-15 Redukované napětí von Mises

Po zjištění síly F_b bylo možné provést pevnostní analýzu (viz Obr. 6-15). Z výsledku simulace je vidět, že redukované napětí von Mises (Huber, Mises, Hencky) HMH dosahuje v kritickém místě maximální hodnoty $\sigma_{red} = 51,6 \text{ MPa}$.

6.3 Výpočet bezpečnosti

Jelikož mají síly F_b a F_c střídavý charakter, jedná se o cyklické zatěžování. Je vhodné spočítat bezpečnost pro únavové namáhání. Dosazením meze pevnosti daného materiálu do Mischkeho vztahu (6-8) zjistíme nekorigovanou mez únavy σ_{Co} .

$$\sigma_{Co} = 0,504 \cdot Rm = 0,504 \cdot 520 = 261,04 \text{ MPa} \quad (6-8)$$

kde:

σ_{Co}	MPa	je	mez únavy stanovená na vzorcích v ohybu za rotace
Rm	MPa	-	mez pevnosti v tahu

Korigovanou mez únavy v kritickém místě σ_{Co}^* odhadneme použitím Marinovy rovnice (6-9).

$$\sigma_{Co}^* = k_a k_b k_c k_d k_e k_f \sigma_{Co} \quad (6-9)$$

kde:

σ_{Co}	MPa	je	mez únavy stanovená na vzorcích v ohybu za rotace
k_a	-		součinitel vlivu jakosti povrchu
k_b	-		součinitel vlivu velikosti tělesa
k_c	-		součinitel vlivu způsobu zatěžování
k_d	-		součinitel vlivu teploty
k_e	-		součinitel spolehlivosti
k_f	-		součinitel zahrnující další vlivy

Pro obrábění nebo tažení za studena je součinitel $a = 4,51$ a exponent $b = -0,265$.
Součinitel vlivu jakosti povrchu k_a je

$$k_a = aR_m^b = 4,51 \cdot 520^{-0,265} = 0,8599$$

K určení *součinitele vlivu velikosti tělesa k_b* je potřeba nejprve vypočítat efektivní rozměr d_e pro kruhové a mezidruhé průřezy. Ten dostaneme vynásobením vnějšího průměru trubice číslem 0,37. Součinitel vlivu velikosti tělesa s efektivním rozměrem je

$$k_b = \left(\frac{d \cdot 0,37}{7,62}\right)^{-0,107} = \left(\frac{10 \cdot 0,37}{7,62}\right)^{-0,107} = 1,0804$$

V tomto případě jde o kombinované zatěžování, proto *součinitel vlivu způsobu zatěžování je*

$$k_c = 1.$$

Součinitel vlivu teploty k_d a součinitel zahrnující další vlivy k_f lze v tomto případě zanedbat. Jejich hodnota je tedy rovna jedné.

$$k_d = 1$$

$$k_f = 1$$

Součinitel spolehlivosti k_e pro 99% spolehlivost je

$$k_e = 0,814$$

Dosažením do rovnice (6-9) dostáváme korigovanou mez únavy.

$$\sigma_{Co}^* = k_a k_b k_c k_d k_e k_f \sigma_{Co} = 0,8599 \cdot 1,0804 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,814 \cdot 1 \cdot 261,04 = 197,68 \text{ MPa}$$

Součinitel bezpečnosti je

$$k_u = \frac{\sigma_{Co}^*}{\sigma_{red}} = \frac{197,68}{51,6} = 3,83$$

Podle hodnoty součinitele bezpečnosti lze říct, že trubici vlivem kmitání nehrozí nebezpečí únavového poškození ani při maximálním zatížení. Je ale třeba pamatovat na to, že při výpočtu bylo použito několika zjednodušení a některé hodnoty byly vzaty pouze z obecných poznatků o Coriolisových průtokoměrech. Skutečná hodnota součinitele bezpečnosti může být jiná.

6.4 Pořadí spojování součástí

Na měřicí trubici nesmí při montáži vzniknout velká napětí, proto ji nelze s ostatními součástmi svařovat. Trubice a vnitřní držák jsou se všemi součástmi spojeny tvrdým pájením pomocí plamene. U některých svařovaných spojů, které nejsou přímo na trubici, může ale dojít vlivem vzniklého tepla k jejímu poškození. V příloze je výkres svařovací sestavy, u kterého je nutné dodržet následující pořadí spojování:

1. Svaření příruby (poz. 12), děliče průtoku (poz. 3) a bočnice spodního krytu (poz. 2).
2. Spájení měřících trubic (poz. 1) s držáky snímačů (poz. 11 a 4) a s držáky budícího členu (poz. 9 a 10).
3. Spájení měřících trubic (poz. 1) k držáku a jeho bočnicím (poz. 6 a 7).
4. Spájení měřících trubic (poz. 1) s děličem průtoku (poz. 3).
5. Svaření obou polovin spodního krytu (poz. 5) k sobě a k bočnicím (poz. 2).
6. Svaření obou polovin vrchního krytu (poz. 8) k sobě a ke spodnímu krytu (poz. 5).

7 ZÁVĚR – KONSTRUKČNÍ, TECHNOLOGICKÝ A EKONOMICKÝ ROZBOR ŘEŠENÍ

V České republice není problematika Coriolisových průtokoměrů příliš rozpracována. Je zde jen několik firem, které se výrobou těchto průtokoměrů teprve začínají zabývat. V této práci byl popsán princip, jakým Coriolisův průtokoměr funguje. Navrhnuty byly tři varianty, jak by průtokoměr mohl vypadat. Vybraná varianta byla dále rozpracována. Byl vytvořen výkres svařovací sestavy a výrobní výkres měřicí trubice. Výpočtem bylo zjištěno, že u navrhovaného průtokoměru nedojde podle zjednodušeného modelu k únavovému porušení. Z hodnoty součinitele bezpečnosti je ale patrné, že při navrhování tvaru měřících trubíc je s únavovým porušením nutné počítat. Práce tedy může sloužit jako seznámení s konstrukční problematikou Coriolisových průtokoměrů nebo jako zdroj informací k jeho budoucí realizaci.

Z technologicko-ekonomického hlediska by nejspíše náklady na výrobu průtokoměru bez elektroniky nebyly příliš vysoké. Většina součástí by byla vyrobena z běžně dostupných polotovarů. Technologické operace při výrobě také nebudou tak náročné. To, co by bylo při výrobě kompletního průtokoměru nejnákladnější, jsou elektronické řídicí a vyhodnocovací systémy a také kalibrace. Teoretické výpočty je třeba prakticky ověřit. Musí se ještě provést velké množství měření.

Tato práce řeší pouze část problematiky. Pokračováním práce by mohl být návrh elektronických obvodů, sestavení prototypu a provedení praktických zkoušek a měření.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. *Měření průtoku a výšky hladiny*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 447 s. ISBN 80-7300-156-x.
- [2] *Měření průtoku '99: sborník příspěvků z konference, Praha 1999*. Praha: Tech-market, 1999, 130 s. ISBN 80-861-1426-0.
- [3] KADLEC, K. Coriolisovy průtokoměry. *AUTOMA: odborný časopis pro automatizační techniku*, listopad 2010, roč. 16, č. 11, s. 40-45. Dostupné také z WWW: < <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42308.pdf> > ISSN 1210-9592.
- [4] KADLEC, K. Snímače průtoku - principy, vlastnosti a použití (část 1). *AUTOMA: odborný časopis pro automatizační techniku*, prosinec 2006, roč. 12, č. 10, s. 5-9. Dostupné také z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/au100605.pdf>> ISSN 1210-9592.
- [5] KADLEC, K. Snímače průtoku - principy, vlastnosti a použití (část 3). *AUTOMA: odborný časopis pro automatizační techniku*, prosinec 2006, roč. 12, č. 12, s. 30-34. Dostupné také z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/au120630.pdf>> ISSN 1210-9592.
- [6] KOUTNÝ, P. *Hmotnostní průtokoměr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 61 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.
- [7] Flow transmitter for Coriolis flow-meter - 9739 MVD - Micro Motion. [online]. [cit. 5.5. 2012]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/micro-motion/flow-transmitters-for-coriolis-flow-meters-14564-32080.html>
- [8] Pístový průtočný měřič M 403.25P. [online]. [cit. 5.5. 2012]. Dostupné z: <http://www.adastsystems.cz/cs/detaily/meridla/Pistovy-prutocny-meric---M-403-25P--M-403-25EP--M-.html>
- [9] Key Benefits of ROTAMASS Coriolis Mass Flowmeters. [online]. [cit. 6.5.2012]. Dostupné z: <http://www.yokogawa.com/fld/keybenefits/flow/fld-rotamass-keybenefits-01en.htm#02>
- [10] FINKL, Milan, ŘEZNÍČEK, Ladislav. *FEM/MKP - Základy použití metody konečných prvků pro technické výpočty v programu Autodesk Inventor Professional*. [online PDF dokument]. [cit. 5.5.2012]. Dostupné z: <http://www.spstrutnov.cz/o-skole/projekty/technicke-vypocty/skripta-fem-mkp.pdf>
- [11] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí* 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [12] SVOBODA, Pavel; BRANDEJS, Jan; PROKEŠ, František. *Výběr z norem pro konstrukční cvičení*. Vydání druhé. Brno : CERN, 2007. 223 s. ISBN 978-80-7204-534-1.
- [13] SVOBODA, Pavel; BRANDEJS, Jan; DVOŘÁČEK, Jiří; PROKEŠ, František. *Základy konstruování*. Vydání třetí. Brno : CERN, 2009. 234 s. ISBN 978-80-7204-633-1.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

PI	- proporcionálně-integrační (regulátor)
MVD	- Multi Variable Digital
A/D	- analogově digitální (převodník)
DSP	- digitální signální procesor
3D	- 3-dimensional
ČSN	- Česká soustava norem
poz.	- Pozice na výkresu
Q_v [m ³ s ⁻¹]	- objemový průtok
Q_m [kgs ⁻¹]	- hmotnostní průtok
Δt [s]	- časový interval
ΔV [m ³]	- objem proteklé tekutiny
v [ms ⁻¹]	- rychlost proudícího média
S [m ²]	- průřez trubice
Δm [kg]	- hmotnost proteklé tekutiny
F_c [N]	- Coriolisova síla
ω [rads ⁻¹]	- úhlová rychlost
a_c [ms ⁻²]	- Coriolisovo zrychlení
Δl [m]	- délka potrubí
φ [rad]	- je úhel, který svírají vektory $\vec{\omega}$ a \vec{v}
f [Hz]	- frekvence kmitající trubice
Y_m [m]	- amplituda kmitání budícího členu
R [m]	- poloměr, na kterém je umístěn snímač
ρ [kg/m ³]	- hustota
F_b [N]	- Virtuální síla, která působí v místě budícího členu a vyvolá v tomto místě posunutí o velikosti Y_m
σ_{Co} [MPa]	- nekorigovaná mez únavy podle Mischkeho
Rm [MPa]	- mez pevnosti v tahu
k_a [-]	- součinitel vlivu jakosti povrchu
k_b [-]	- součinitel vlivu velikosti tělesa
k_c [-]	- součinitel vlivu způsobu zatěžování
k_d [-]	- součinitel vlivu teploty
k_e [-]	- součinitel spolehlivosti
k_f [-]	- součinitel zahrnující další vlivy
a [-]	- součinitel pro určení součinitele vlivu jakosti povrchu
b [-]	- exponent pro určení součinitele vlivu jakosti povrchu
d_e [mm]	- efektivní rozměr pro určení součinitele vlivu velikosti tělesa
k_u [-]	- součinitel bezpečnosti vůči únavovému poškození

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 Vznik Coriolisovy síly	15
Obr. 1-2 Coriolisův průtokoměr s U trubicí [5].....	16
Obr. 1-3 Signály senzorů při nenulovém průtoku	16
Obr. 1-4 Tvary měřících trubic [1]	17
Obr. 1-5 Řídící jednotka Micro Motion 9739 MVD [7].....	18
Obr. 2-6 Pístový průtočný měřič M 403.25P	20
od společnosti ADAST-SYSTEMS [8].....	20
Obr. 5-7 Uspořádání box-in-box Yokogawa [9].....	23
Obr. 5-8 Návrh měřících trubic a jejich upevnění	24
Obr. 5-9 Varianta 1	25
Obr. 5-10 Varianta 2	26
Obr. 5-11 Varianta 3	27
Obr. 6-12 Poloha budícího členu na trubicí.....	28
Obr. 6-13 Zjednodušený tvar měřící trubice	29
Obr. 6-14 Posunutí ve směru y	30
Obr. 6-15 Redukované napětí von Mises	31

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1-1 Přehled základních vlastností [4].....	14
Tab. 1-2 Vlastnosti měřících trubic [5].....	17

12 SEZNAM PŘÍLOH

12

Výkresová dokumentace:

Výkres svařovací sestavy	A1	BP-12-01/00
Výrobní výkres trubice	A3	BP-12-01/01
Seznam položek	A4	BP-12-01/00

Přiložené CD:

Bakalářská práce: Návrh průtokového měřiče paliva (PDF)
Výkresová dokumentace