

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2301T001 Dopravní a manipulační technika

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Konstrukce manipulačního zařízení  
pro ultrazvukové zkoušení malých potrubí

Autor: **Bc. Jiří MERTA**

Vedoucí práce: **Ing. Roman Čermák, Ph.D.**

Akademický rok 2018/2019

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří MERTA**

Osobní číslo: **S16N0013P**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**

Název tématu: **Konstrukce manipulačního zařízení pro ultrazvukové zkoušení malých potrubí**

Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

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

#### Základní požadavky:

Navrhnete manipulátor vhodný pro NDT kontrolu tloušťky stěny odvodušňovacího nátrubku studeného kolektoru PG VVER 1000 pomocí UT sondy. Manipulátor by měl umožňovat pohyb podél osy trubky ve dvou směrech. Pohon manipulátoru bude ruční se snímáním polohy enkodérem. Manipulátor by měl být schopen pohybu po ohýbané trubce o rádiusu 100 mm a minimálním průměru 16 mm, měl by umožňovat snadnou montáž a dekontaminaci. Vazebním médiem pro UT sondy je voda, která by měla být do prostoru držáku sond kontinuálně čerpána a znovu odčerpávána. Cílem práce je vypracovat technickou dokumentaci umožňující výrobu funkčního prototypu manipulátoru.

#### Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

#### Osnova diplomové práce:

1. Rešerše, specifikace požadavků.
2. Konstrukční návrh.
3. Vypracování technické dokumentace.
4. Zhodnocení práce, závěr.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah kvalifikační práce: **50-70 stran A4**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

**HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J. Příručka strojního inženýra 1. Praha: Computer Press, 1999**

**HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J. Příručka strojního inženýra 2. Praha: Computer Press, 2000**

**REGAZZOVÁ, M., REGAZZO, R. Ultrazvuk - základy ultrazvukové defektoskopie. Praha: BEN - technická literatura, 2013**

*Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.*

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Roman Čermák, Ph.D.**  
Katedra konstruování strojů  
Konzultant diplomové práce: **Bc. Vlastimil Habrcetl**  
Centrum výzkumu Řež s.r.o., Plzeň

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2018**  
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2019**

  
Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 16. října 2018

## Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Merta	Jméno Jiří	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301T001 „Dopravní a manipulační technika“		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Čermák, Ph.D.	Jméno Roman	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Konstrukce manipulačního zařízení pro ultrazvukové zkoušení malých potrubí		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	67	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	61	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	6
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Diplomová práce obsahuje návrh manipulátoru pro ultrazvukové zkoušení potrubí průměru 16 mm. K vypracování modelů a technické dokumentace byl použit software Siemens NX.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	manipulátor, trubka, ultrazvuk, NDT, NX

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Merta	Name Jiří	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301T001 “Transport and handling machinery“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Čermák, Ph.D.	Name Roman	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Design of ultrasonic scanner for small diameter tubes testing		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machine Design	<b>SUBMITTED IN</b>	2019
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	67	<b>TEXT PART</b>	61	<b>GRAPHICAL PART</b>	6
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The main focus of this diploma thesis is design of ultrasonic manipulator of tube of diameter D=16 mm. Siemens NX software is used for modelling and drafting.
<b>KEY WORDS</b>	manipulator, tube, ultrasound, NDT, NX

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce, Ing. Romanu Čermákovi, Ph.D., za odborné vedení práce a konzultantovi, Bc. Vlastimilu Habrcetlovi, za cenné rady a vstřícný přístup v rámci praktické části práce.

# Obsah

1. Zadavatel .....	1
2. Úvod a specifikace zadání .....	2
2.1. Požadavky na konstrukční řešení .....	2
3. Měření tloušťky materiálu ultrazvukem .....	3
3.1. Piezoelektrický jev .....	4
3.2. Ultrazvukové sondy .....	4
3.2.1. Konstrukce ultrazvukové sondy .....	5
3.2.2. Rozdělení sond podle typu vln .....	6
3.3. Akustická vazba .....	8
3.4. Výběr sondy k měření trubky .....	10
4. Koncepční návrh manipulátoru .....	11
4.1. Manipulátory pro pohyb po trubce .....	11
4.1.1. Obvodový pohyb .....	11
4.1.2. Axiální pohyb .....	12
4.1.3. Kombinace obvodového a axiálního pohybu .....	13
4.1.4. Automatizované měření větších oblastí .....	15
5. Hodnocení a výběr koncepční varianty .....	16
6. Rozpracování koncepční varianty .....	18
6.1. Vedení manipulátoru a pozice sond .....	18
6.2. Snímání pozice manipulátoru .....	19
6.3. Výsledný koncept rozložení jednotlivých prvků .....	21
7. Jednotlivé konstrukční prvky .....	22
7.1. Rám .....	22
7.2. Kolečka a jejich uložení v rámu .....	25
7.3. Přítlak sond .....	28
7.4. Víko sondy a jeho těsnění .....	30
7.5. Dělicí rovina .....	31
7.6. Vazba mezi sondou a zkoušeným materiálem .....	32
7.7. Systém přívodu kontaktní kapaliny .....	34
7.8. Těsnění mezi manipulátorem a trubkou .....	35
7.9. Těsnění obou polovin manipulátoru .....	39
7.10. Sestava enkodéru .....	40
7.11. Spojení všech částí manipulátoru .....	40
8. Montáž manipulátoru .....	45
8.2. Polovina rámu .....	45
8.3. Spojení polovin a montáž sond .....	47
8.4. Připojení systému pro přívod kontaktní kapaliny .....	49
8.5. Montáž sestavy enkodéru .....	49
8.6. Montáž spojovacích kusů na jednotlivé části manipulátoru .....	51
8.7. Nasazení částí manipulátoru na trubku a spojení .....	53
9. Zhodnocení a závěr .....	56
10. Seznam obrázků .....	57
11. Seznam tabulek .....	59
12. Zdroje .....	59



## Seznam použitých zkratk a symbolů

NDT	Nedestruktivní testování
PA	Phased Array
T	Tloušťka materiálu
V	Rychlost zvuku v materiálu
t	Čas

## 1. Zadavatel

Zadavatelem práce je Laboratoř nedestruktivního testování (NDT) s mechanickou (HW/SW) podporou se sídlem v Plzni, jedna z laboratořích Centra výzkumu Řež s.r.o.

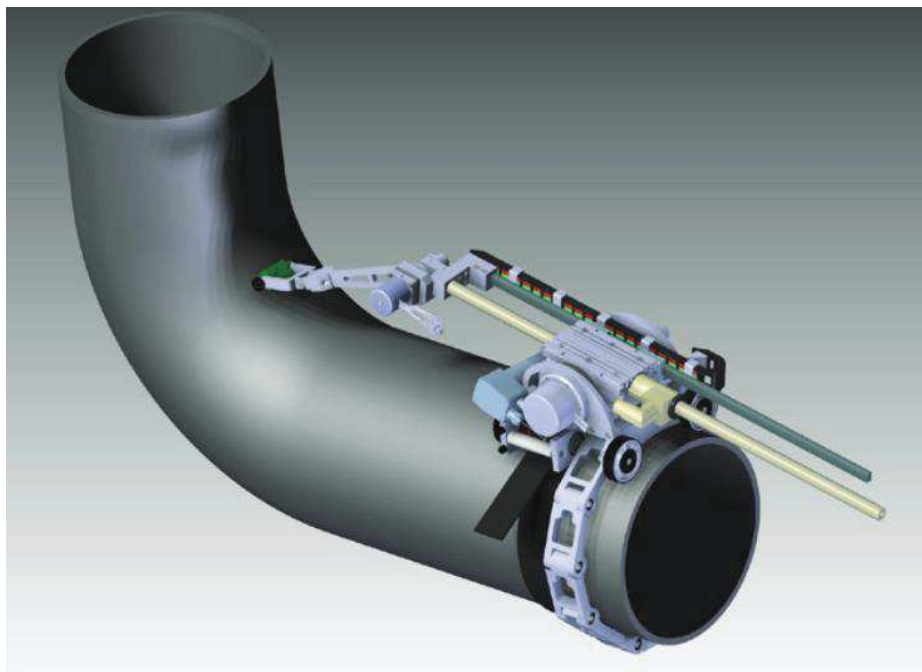
Laboratoř nabízí komplexní řešení technických problémů provozů a struktur využívajících kovové materiály a betony. Mezi služby v oblasti NDT patří kontroly kovových materiálů, betonových konstrukcí a jaderného paliva s možností mechanizace měření a zavádění systému řízení a sběru dat. Jako doplňkové služby poskytuje NDT laboratoř tvorbu modelů pomocí 3D profilometrie a rapid prototypingu.

NDT laboratoř Plzeň poskytuje komplexní služby, od NDT kovů a betonů a jejich elektromechanické podpory přes vývoj a výrobu trhlín po laserovou profilometrii a rapid prototyping. V rámci NDT provádí zkoušky celého objemu tělesa pomocí ultrazvukového skenování, vířivých proudů a kapilární zkoušky. Pro zefektivňování procesu testování je NDT laboratoř Plzeň schopna návrhu a výroby vlastních robotických manipulátorů.[18]



Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Research Centre Řež





Obr. 1: Logo CVŘ a příklady zde vyvinutých manipulátorů [18]

## 2. Úvod a specifikace zadání

Cílem této diplomové práce je navrhnout ručně ovládaný manipulátor, který bude sloužit ke kontrole tloušťky stěny ocelové trubky. Samotné měření tloušťky bude provedeno pomocí ultrazvukové sondy, případně většího množství sond. Na trhu je v současné době více manipulátorů tohoto druhu, ať už více nebo méně automatizovaných, ale většinu z nich není možné použít. Je to kvůli jejich rozměrům. Trubka, kterou je potřeba ultrazvukově měřit, má vnější průměr pouhých 16 mm. Většina průmyslově používaných manipulátorů pro kontrolu trubek je určena pro trubky výrazně větších průměrů.

### 2.1. Požadavky na konstrukční řešení

Funkčnost - nejdůležitější požadavek. Pro správnou funkci manipulátoru je podstatná správná funkce ultrazvukových sond. Mezi hlavní podmínky jejich funkce patří dodržení správné vzdálenosti sondy od povrchu trubky a přívod dostatečného množství kontaktního média - vody.

Rychlost měření - Měření probíhá v prostředí, které není vhodné pro delší pobyt operátora manipulátoru. Mělo by tudíž být co nejrychlejší.

Malý únik kontaktního média - I u komerčně dostupných manipulátorů je běžné, že při měření kontaktní médium (voda) odkapává mimo prostor sond. Množství vody by ale mělo být minimalizováno pomocí vhodně zvoleného těsnění.

Vyrobitelnost - Manipulátory vyvíjené v NDT laboratoři CV Řež, s.r.o., jsou často realizovány jako kusové zakázky. To platí i pro prototyp manipulátoru navrženého v této

práci. Pro výrobu hlavních dílů prototypu manipulátoru bude použit 3D tisk. Materiál by měl být zvolen takový, aby dokázal odolat styku s vodou.

Korozivzdornost - všechny části manipulátoru mohou přijít do styku s vodou. Kovové části by tedy měly být vyrobeny z korozivzdorných materiálů.

Ekonomičnost - Komerčně dostupné manipulátory používané pro ultrazvukové měření jsou často velmi drahé. Cílem je tedy navrhnout cenově dostupné řešení.

### 3. Měření tloušťky materiálu ultrazvukem

Ultrazvukové měření tloušťky je velmi rozšířenou technikou zajišťující získávání údajů potřebných ke kvalitnímu posouzení stavu mnohých zařízení vystavených korozi. První komerční ultrazvukové měřiče založené na principu sonaru byly představeny už ve 40. letech 19. století. Měření je rychlé, spolehlivé a všestranné. Na rozdíl od posuvného měřítka nebo mikrometru vyžaduje přístup pouze k jedné straně zkoušeného kusu. Ultrazvukové měření se neomezuje jen na kovové materiály. Měřáky dokážou měřit tloušťku kovů, plastů, kompozitních materiálů, laminátů, keramiky nebo skla. Ultrazvukové měření je navíc možné použít jako součást technologického výrobního procesu, například při extrudování plastů nebo válcování kovů. Při některých aplikacích je přitom možné dosáhnout přesnosti až 0.002 mm. Měření je přitom vždy nedestruktivní, nevyžaduje řezání ani jiné zásahy do zkoušeného kusu. Mezi materiály nevhodné ke konvenčnímu ultrazvukovému zkoušení kvůli špatnému průchodu vysokofrekvenčních zvukových vln patří dřevo, papír, beton nebo pěnové produkty.

V současnosti vyráběné ultrazvukové měřiče tloušťky jsou lehké, přesné, spolehlivé a jednoduše ovladatelné. Obvykle využívají sondy s piezoelektrickými měniči pracujícími na frekvencích od 0.5 do 20 MHz, ačkoli některé speciální přístroje používají frekvence o frekvenci jen 50 kHz nebo naopak až 100 MHz. Nižší frekvence se používají k dosáhnutí potřebného rozsahu při měření tlustostěnných objektů nebo materiálů vyznačujících se velkým útlumem ultrazvuku. Vyšší frekvence naopak k dosáhnutí vysoké rozlišovací schopnosti a přesnosti při měření tenkostěnných výrobků a materiálů se zanedbatelným útlumem. [1,4]

Ultrazvukové měřiče tloušťky fungují na principu přesného měření doby, za kterou zvukový impuls vygenerovaný ultrazvukovou sondou projde materiálem a odrazí se zpět od vnitřního povrchu nebo stěny. To je možné díky tomu, že zvukové vlny se odráží při přechodu z jednoho prostředí do jiného. Měřič tedy v nejjednodušším případě funguje na principu "puls-echo". Čas mezi vysláním pulsu a měřením echa je přitom obvykle jen několik miliontin sekundy. Měřič má v sobě uloženou rychlost šíření zvuku v konkrétním materiálu, z které dokáže vypočítat tloušťku pomocí jednoduchého vztahu

$$T = V \cdot \frac{t}{2}$$

kde  $T$  je zjišťovaná tloušťka,  $V$  je rychlost zvuku v materiálu a  $t$  je změřený čas. Rychlost zvuku je přitom podstatnou částí výpočtu. Zvuk se šíří různou rychlostí v různých

materiálech, obecně rychleji v tvrdých materiálech a pomaleji v měkkých materiálech. Rychlost šíření zvuku se navíc může výrazně měnit s teplotou. Je tedy vždy nutné správně zkalibrovat měřicí přístroj na rychlost šíření zvuku v konkrétním materiálu.

### 3.1. Piezoelektrický jev

Piezoelektrický jev (z řeckého piezein πιέζειν – tlačit) je schopnost krystalu, případně z něj vhodně vyřezané destičky, generovat při jeho deformování na stlačených plochách elektrické napětí. Toto napětí bývá v řádu  $10^{-7}$  V/Pa. Jev se přitom projevuje i opačně – krystal se deformuje v elektrickém poli. Nejznámější piezoelektrickou látkou je monokrystalický křemen, křišťál –  $\text{SiO}_2$ . [2,3]

V defektoskopii kovových materiálů se jako piezoelektrický element používá destička vyrobená nejčastěji z piezokeramiky, například bariumtitanátu ( $\text{BaTiO}_3$ ). Ta na elektrický impuls reaguje zpravidla tloušťkovými kmity, čímž generuje podélnou vlnu. Existují ale i speciální sondy, ve kterých měnič vysílá příčnou vlnu. [1,2]

### 3.2. Ultrazvukové sondy

Součástí každého ultrazvukového defektoskopického zařízení je prvek, kterým se vysílá vlnění do materiálu a přijímají echa od chyb. Tento prvek se nazývá ultrazvuková sonda. Pro většinu aplikací v defektoskopii jsou důležité dvě vlastnosti sond.

V první řadě musí sonda generovat impulzy velké amplitudy, aby bylo možné prozvučit značné tloušťky zkoušeného materiálu při dobrém poměru signálu k šumu. Tato vlastnost je obzvlášť důležitá u materiálů s velkým útlumem jako je austenitická ocel, litina, ale i plasty a kompozitní materiály. Za druhé, je nutné, aby sonda vysílala co nejkratší impulz, aby se dosáhlo dobré hloubkové rozlišovací schopnosti a bylo možné rozlišit blízko od sebe ležící chyby. Dále musí být sonda dostatečně mechanicky odolná a její konstrukce řešená tak, aby nevznikaly parazitní odrazy uvnitř sondy. Neexistuje univerzální řešení pro všechny úlohy ultrazvukové defektoskopie, ale všechny sondy mají některé znaky společné. [1]

Podle způsobu generování ultrazvuku je možné sondy rozdělit na

- sondy s piezoelektrickým měničem
- sondy s magnetostrikčním měničem
- sondy s elektrodynamickým měničem

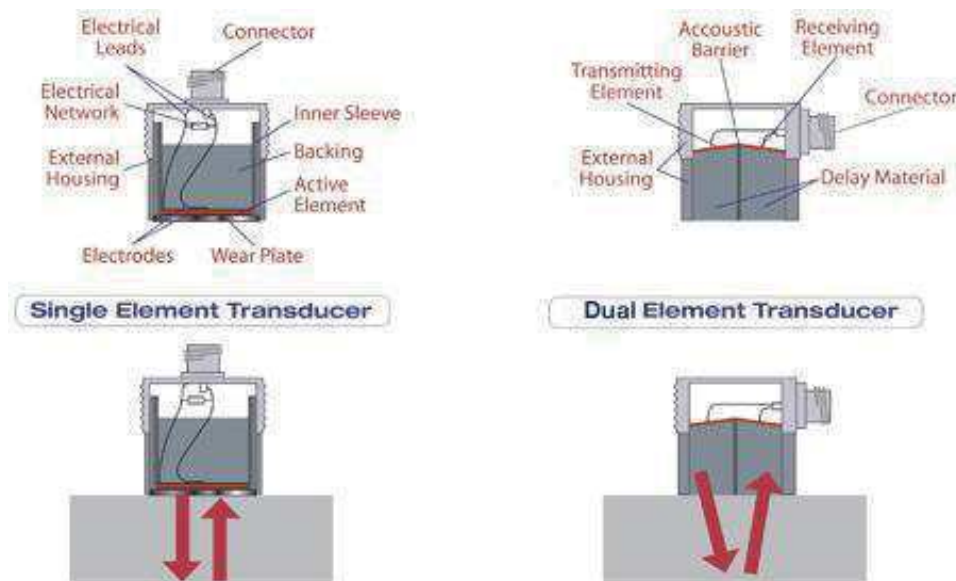
Pro účely běžné defektoskopie se nejčastěji využívají sondy s piezoelektrickým měničem.

### 3.2.1. Konstrukce ultrazvukové sondy

#### Jednoměničové a dvouměničové sondy

Aktivní element ultrazvukové sondy je typicky tenký disk, čtverec nebo obdélník vyrobený z piezoelektrické keramiky nebo piezokompozitu, který provádí přeměnu elektrické energie na mechanickou (ultrazvukové vibrace) a naopak. Když je tento element vybuzen elektrickým pulzem, generuje zvukové vlny, a při jejich odrazu zpět se rozvibruje a generuje napětí. Tento aktivní element je chráněn před poškozením destičkou, která je v přímém kontaktu se zkoušeným materiálem, případně akustickou čočkou. Kvůli utlumení elementu po vygenerování potřebného akustického impulsu je uložen v bloku tlumícího materiálu. Celá sestava je uložena v pouzdře s příslušným elektrickým připojením (konektorem). Všechny běžné kontaktní, úhlové, imerzní sondy i sondy s profilovým klínem jsou založené na této základní konstrukci.

Speciální konstrukci využívají sondy se dvěma elementy, často využívané při měření koroze. Ty mají samostatné elementy pro vysílání a přijímání zvukové vlny. Elementy jsou odděleny zvukovou bariérou a nejsou uloženy v bloku tlumícího materiálu. V sondě je ale už integrován kontaktní profilový klín pro usměrnění akustické energie. [14]



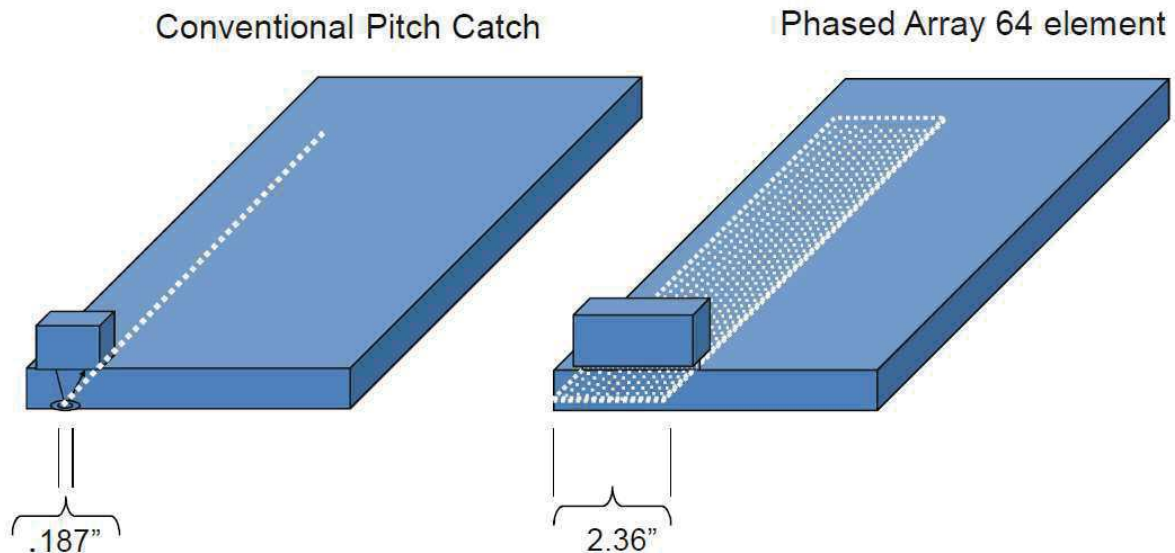
Obr. 2: Konstrukce sondy s jedním elementem a dvojitě sondy [14]

#### Víceměničové Phased array sondy

Víceměničová sonda typu Phased Array je sonda, která obsahuje více (typicky 16 až 256) ultrazvukových elementů v jednom pouzdře. Každý z elementů může být pulzně buzen nezávisle na ostatních. Tyto sondy se vyrábějí pro použití s mnoha typy profilových klínů, pro kontaktní i imerzní měření. [19] Výhodou při použití Phased Array sondy je skenování větší plochy při jednom skenování, viz obr. 4.



Obr. 3: Konstrukce víceprvkového elementu a typické Phased Array sondy [21]



Obr. 4: Skenování sondou s jedním elementem ve srovnání se skenováním sondou typu Phased Array

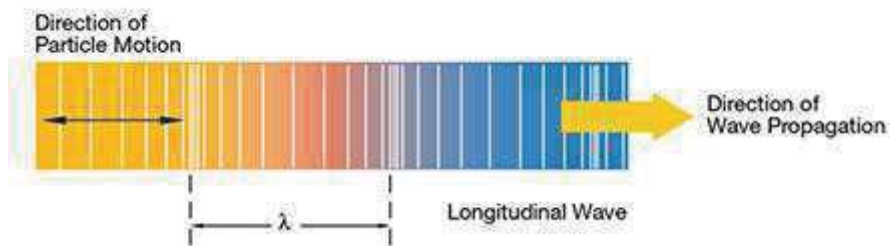
### 3.2.2. Rozdělení sond podle typu vln

Zvuková energie používaná v akustické defektoskopii se pohybuje materiálem v různých vlnových módech v závislosti na směru vlny a odpovídajícím směru pohybu molekul v testované součásti. Nejčastěji používané módy jsou podélné vlny, příčné vlny a povrchové vlny. [15]

#### Podélné vlny

Při podélném vlnění je pohyb částic v médiu rovnoběžný se směrem vlnoplochy. Pomocí podélných vln se šíří slyšitelný zvuk. Podélné vlny se pohybují nejrychleji ze všech módů používaných v ultrazvukové defektoskopii, přibližně 5900 m/s v oceli. Podélné vlny se mohou transformovat na příčné vlny prostřednictvím lomu nebo odrazu na rozhraní. [15]



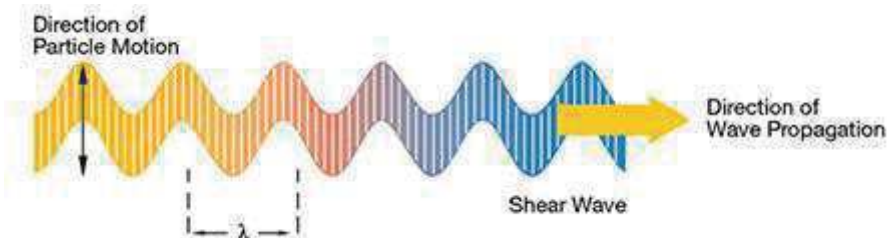


Obr. 5: Směr pohybu částic materiálu při podélném vlnění. [15]

Podélného vlnění často využívají nejvýkonnější a nejčastěji používané ultrazvukové sondy - přímé sondy. Měnič vysílá podélné vlny, které se po průchodu rozhraním šíří do zkoušeného předmětu. Pro materiály obtížně prozvučitelné (šedá litina, austenit, kompozity, plasty aj.) se používají i úhlové sondy podélných vln. Tyto sondy pracují pouze v určitém rozsahu úhlů dopadu. Například pro zkoušení oceli s kontaktní vazbou do úhlu dopadu  $27,1^\circ$ . [2]

### Příčné vlny

Při příčném vlnění je pohyb částic kolmý ke směru šíření vlny. Příčné vlny mají menší rychlost a menší vlnovou délku než podélné vlny stejné frekvence a používají se pro většinu úhlových sond v ultrazvukové defektoskopii. Typická rychlost příčné vlny v oceli je přibližně 3250 m/s. Příčné vlny se mohou šířit pouze v pevném skupenství materiálu, nikoli v kapalinách nebo plynech. Mohou se transformovat na podélné vlny pomocí lomu nebo odrazu na rozhraní. [15]



Obr. 6: Směr pohybu částic materiálu při příčném vlnění. [15]

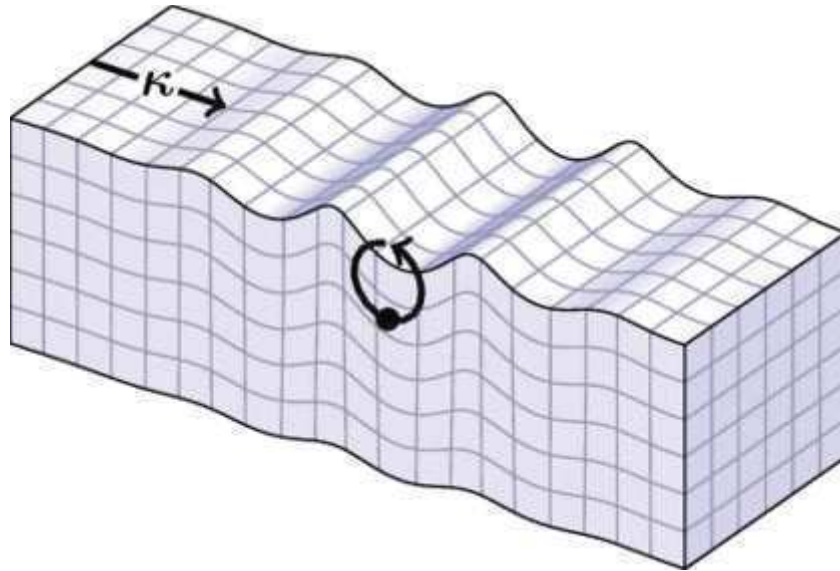
Přímého vlnění často využívají úhlové sondy. Ty vysílají ultrazvuk do materiálu pod určitým úhlem, tzn. používají se pro zkoušení materiálu šikmým svazkem. Měnič vysílá podélné vlny, které se po průchodu rozhraním transformují na příčné, jenž se šíří do zkoušeného předmětu. Tyto klasické úhlové sondy pracují pouze v určitém rozsahu úhlů dopadu, například pro zkoušení oceli s kontaktní vazbou mezi  $27,5^\circ$  až  $57,1^\circ$ .

Výjimečně přímého vlnění využívají také přímé sondy. Tyto sondy se používají pouze pro měření rychlostí nebo útlumu příčných vln v materiálu. Z rychlostí šíření příčných a podélných vln a měrné hmotnosti lze vypočítat pružnostní konstanty materiálu (modul pružnosti ve smyku a v tahu, Poissonovo číslo, úhly lomu aj). [2]



## Povrchové vlny

Povrchové vlny, též někdy nazývané Rayleighovy vlny, reprezentují kmitavý pohyb podél povrchu testovaného materiálu do hloubky jedné vlnové délky. Rychlost šíření a vlnová délka jsou podobné jako u příčného vlnění. Příkladem povrchových vln jsou mořské vlny. Povrchové vlny je možné použít k detekci povrchových prasklin zkoušeného vzorku. [15]



Obr. 7: Příčné vlnění [16]

Sondy Rayleigha povrchových vln správně patří do skupiny úhlových sond, ale pro úhel lomu  $90^\circ$  je nazýváme sondy povrchových vln. Jak vyplývá z části týkající se vlnění lze po povrchu vysílat povrchové vlny podélné, příčné a Rayleigho. Tyto vlny se vybudí při vysílání ultrazvukových podélných vln do rozhraní pod mezními úhly.

Klasické sondy povrchových vln (W90K2K, MWB90-2, SWB90-2, WB90-2, W90K5K a další) jsou sondy Rayleigha povrchových vln. Tyto vlny mají maximální akustický tlak  $P=100\%$  na povrchu a s hloubkou rychle klesá. V hloubce rovné vlnové délce je přibližně  $P=10\%$  maxima na povrchu. Proto tyto vlny mají hloubkový dosah přibližně roven vlnové délce  $\lambda$  a vyžadují hladký povrch bez nerovností a zbytků vazebního prostředku při zkoušení s kontaktní vazbou. Každá hrana, rýha, vrub nebo mastnota je pro ně odrazovou plochou a výrazně se tím zmenšuje jejich dosah. [2]

Existuje několik dalších vlnových módů, ale ty jsou pro ultrazvukové měření používány jen zřídka. Patří mezi ně například Lambovy vlny a různé další formy deskového a řízeného vlnění. [15]

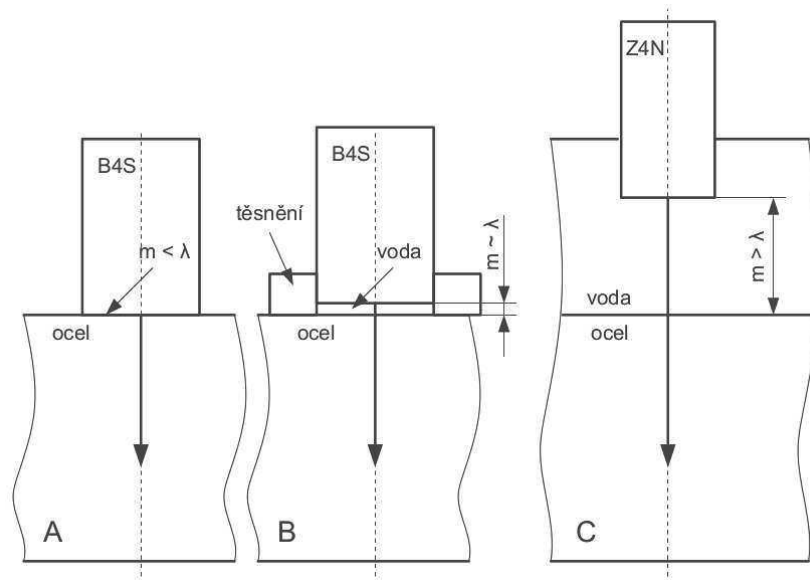
### 3.3. Akustická vazba

Pro přenos ultrazvuku ze sondy do zkoušeného materiálu nepostačuje přiložit sondu na suchý zkušební povrch. Na rozhraní by byl přítomný vzduch. Protože koeficient odrazu na rozhraní tuhého a plynného média je blízký číslu 1, do zkoušeného materiálu by pronikla jen nepatrná

část akustického tlaku vytvořeného měničem sondy. Jiná situace nastává v případě, kdy se na zkušební povrch nanese vrstva kapaliny. Koefficient přechodu ultrazvuku na rozhraní například vody a oceli je přibližně 0,12, takže asi 12% akustického tlaku přejde v tomto případě do materiálu. To je asi 1000x víc než při suché vazbě. Jako vazební médium se používá voda, olej, speciální gel a u drsnějších povrchů např. voda nebo glycerin. [1]

Podle tloušťky vrstvy vazebního média rozlišujeme:

- A. **kontaktní vazbu** – tloušťka vazební vrstvy  $d_v$  je o mnoho menší než vlnová délka  $\lambda_v$ ;
- B. **mezerovou vazbu** – tloušťka vazební vrstvy  $d_v$  se přibližně rovná vlnové délce  $\lambda_v$ ;
- C. **imerzní vazbu** – tloušťka vazební vrstvy  $d_v$  je o mnoho větší než vlnová délka  $\lambda_v$ .



Obr. 8: Typy vazeb mezi sondou a zkoušeným materiálem [2]

Kontaktní vazba se nejčastěji používá při ručním zkoušení. Tyto sondy mají pod měničem ochrannou folii nebo destičku z materiálu, který odolává opotřeбенí. Její nevýhodou je to, že přenos ultrazvuku do materiálu závisí na přítlaku sondy. Na rovném broušeném povrchu se navíc sonda přisává. Kontakt mezi sondou a zkoušeným povrchem není dokonalý, proto je nutné použít vazební prostředek jako je voda, olej, vazelína aj.

Při mezerové vazbě způsobuje i malá změna tloušťky mezery velké změny přenášeného akustického tlaku. Mezerovou vazbu je proto vhodné využít pouze tam, kde je zaručená stálá geometrie povrchu. Výhodou je malá spotřeba vazební kapaliny.

O imerzní vazbě mluvíme v případě, kdy se součást zkouší přes velký sloupec vody. Příkladem může být výrobek ponořený do nádrže s vodou nebo měření přes stříkající proud vody. Je zřejmé, že tento druh vazby je určený zejména pro mechanizované nebo

automatizované zkoušení. Voda musí být při imerzním zkoušení bez bublinek a navíc nesmí žádné bublinky být usazeny na povrchu zkoušené části. [1,2]

### 3.4. Výběr sondy k měření trubky

V inventáři CV Řež je více sond, které jsou vhodné k ultrazvukovému měření trubky. Zejména se jedná o typ A574S a 10CCEV35.

Sonda 10CCEV35 se běžně používá v kombinaci s manipulátorem Olympus Cobra, popsáným níže. Jedná se o sondu typu phased array, která se obvykle používá pro kontrolu svarů na trubkách o průměru 0,8 - 4,5 in (20,32 - 114,3 mm).

Nedílnou součástí této sondy je kontaktní profilový klín, který je možné zvolit podle průměru trubky. Bohužel nejmenší klín dodávaný k tomuto typu sondy je pro trubku o průměru 0,8 in, tedy 20,32 mm. Pro trubku o průměru 16 mm tedy není vhodný.



Obr. 9: Sonda 10CCEV35 [27]

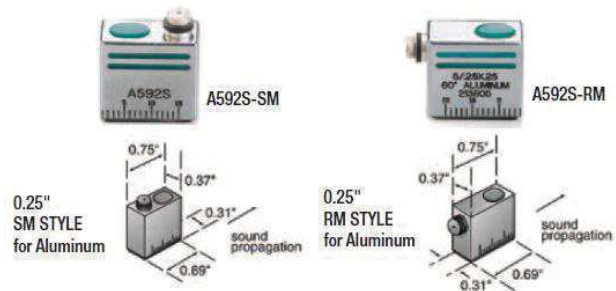
Sonda A574S je kontaktní sonda poměrně malých rozměrů - přibližně 16,6×8×10,2 mm. Jedná se o sondu povrchových vln. Mezi sondu a povrch se nevkládá žádný kontaktní klín. Vzhledem k malým rozměrům sondy a tím pádem malému snímanému průřezu bude nutné povrch trubky měřit více sondami. Tento problém je popsán v kap. 5.



Obr. 10: Sonda povrchových vln A574S [22]

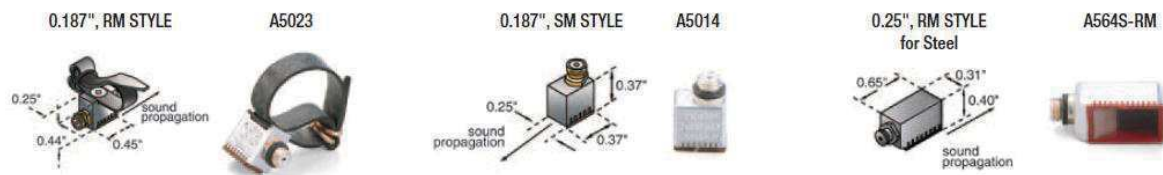
## Integral Angle Beam Transducers

- Durable plastic wear surface extends transducer life and avoids scratching of critical components.
- Small approach distance and overall transducer height provides an excellent choice for limited access applications.
- Superior signal-to-noise characteristics for such small integral transducers
- Finger ring included with Micro-Miniature-RM case style transducers



Transducer Case	Nominal Element Size		Frequency MHz	Material	Connector Style	Transducer Part Numbers			
	inches	mm				45°	60°	70°	90°
Miniature	0.25	6	2.25	Steel	RM	A561S-RM	A562S-RM	A563S-RM	A564S-RM*
	x	x	5.0	Steel	RM	A571S-RM	A572S-RM	A573S-RM	A574S-RM*
	0.25	6	5.0	Aluminum	RM or SM	A591S	A592S	A593S	see note*
Micro-Miniature	0.187	5	2.25	Steel	RM	A5050	—	—	A5053*
			5.0	Steel	RM	A5020	A5023	A5021	—
			5.0	Steel	SM	A5015	A5014	A5013	—
			5.0	Aluminum	SM	A5067	A5068	A5069	see note*
			10	Steel	SM	—	—	A5054	—

\*A564S-RM, A574S-RM, and A5053 create surface waves in steel and aluminum.



Obr. 11: Zařazení a popis sondy A574S [13]

## 4. Koncepční návrh manipulátoru

### 4.1. Manipulátory pro pohyb po trubce

Manipulátor slouží k vedení sondy, případně sond, po zkoušeném povrchu. Jednodušší systémy jsou ovládané manuálně. Operátor takového zařízení při měření nepohybuje samotnou sondou, ale manipulátorem, který zajišťuje její vedení po povrchu. Součástí zařízení je navíc enkodér (v případě víceosého manipulátoru enkodéry) ke snímání polohy sondy. Díky tomu je možné provádět skenování velkých částí zkoušených těles s přesným zaznamenáním polohy sondy v krátkém čase.

#### 4.1.1. Obvodový pohyb

Jedním z nejjednodušších je manipulátor, který má na trubce pevně zajištěnou polohu v axiálním směru (ve směru osy trubky) a může se otáčet okolo jejího obvodu. Tyto manipulátory se často využívají pro kontrolu svaru dvou trubek. Zařízení na tomto principu je na trhu více, například Olympus Cobra, AUT Revolver nebo Phoenix ISL Bracelet. Poslední zmíněný manipulátor je na obrázku 12.



Obr. 12: Phoenix ISL Bracelet [25]

Tento scanner je konstruován jako řetěz, který se obtočí kolem měřené trubky a zajistí páskem suchého zipu. Počet článků řetězu se liší podle průměru trubky, články jsou snadno demontovatelné. Na jednom konci řetězu je připevněna ultrazvuková sonda a profilový klín.

Sonda je přitisknuta k trubce a pohybuje se obvodově v úhlu 360° okolo její osy. Gumová kolečka zajišťují zařízení proti posuvu v axiálním směru. Naproti ultrazvukové sondě na druhém konci řetězu se nachází enkodér ke snímání polohy. Tento manipulátor je určen pro kontrolu trubek o průměru 0,5" až 4" (12,7 - 101,6 mm). Jeho výška je 13 mm. Bracelet je kompatibilní se standardními miniaturními sondami typu phased array.

Kompletní scan celé trubky pomocí manipulátoru na tomto principu je ale poměrně náročný - je potřeba upnout manipulátor na trubku, provést měření otáčením sondy kolem trubky, sejmut manipulátor, posunout ho axiálně po trubce a měřit znovu další část trubky. Pro delší úseky trubky je tedy vhodné využít manipulátor, který umožňuje větší efektivitu měření.

#### 4.1.2. Axiální pohyb

Dalším způsobem, jak lze docílit pohybu sondy, je axiální posuv, tedy posuv ve směru osy trubky. Na tomto principu pracuje například Sp-Arc firmy Phoenix ISL. Sp-Arc je k trubce upevněn pomocí magnetických koleček a umožňuje scan trubek poměrně malých rozměrů (1" - 4"). Nevýhodou je poměrně malý úhel, který sonda dokáže pokrýt. Pro scan celé trubky je tedy nutné po ní projet víckrát.



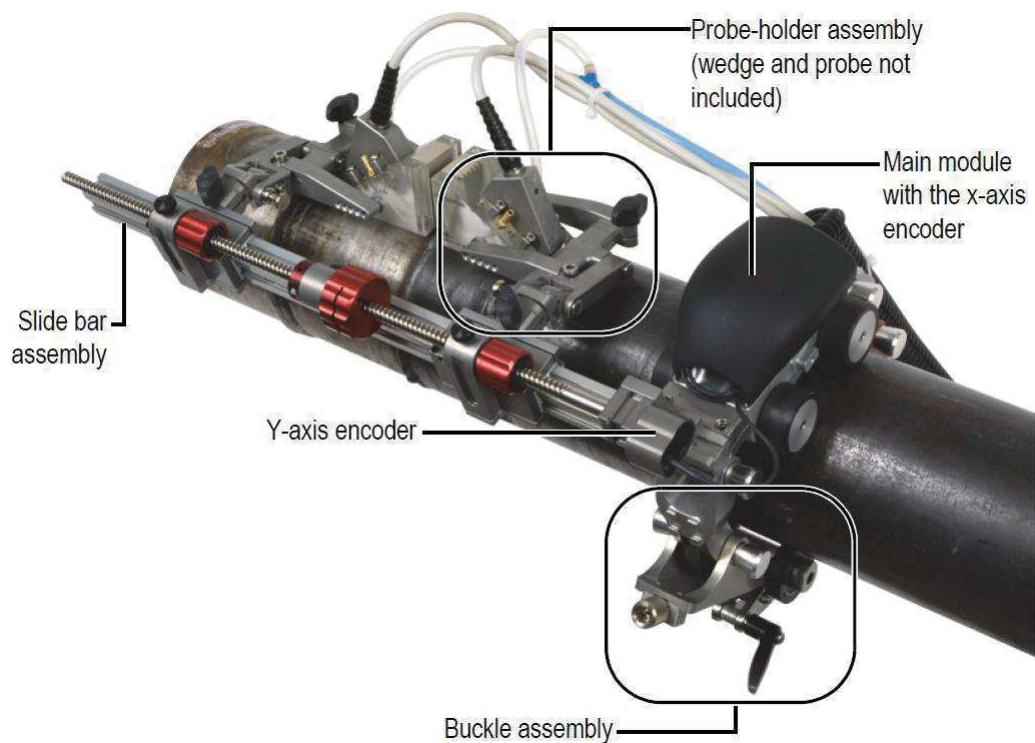


Obr. 13: Phoenix ISL SpArc [24]

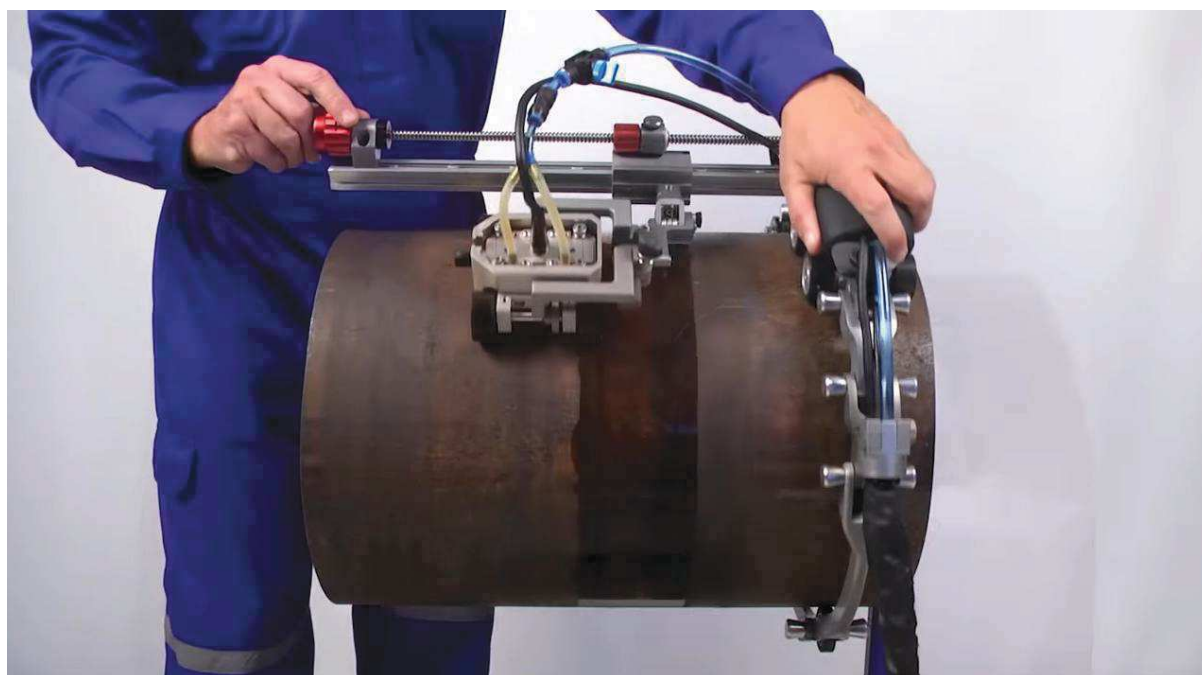
#### 4.1.3. Kombinace obvodového a axiálního pohybu

Některé manipulátory pro pohyb po trubce kombinují obvodový a axiální pohyb. Příkladem takového manipulátoru může být ChainScanner firmy Olympus. Je to manipulátor pro trubky vnějšího průměru 45 až 965 mm. Umožňuje nastavení a snímání polohy sond ve dvou směrech - ve směru osy trubky (na obr. 14 osa Y) a po jejím obvodu (na obrázku 14 osa X). Skener je určen zejména pro kontrolu svarů metodou phased array, TOFD, nebo konvenčním UT, a pro mapování koroze menších oblastí pomocí phased array nebo konvenčního UT. [17]

Měření větších oblastí je pomocí tohoto manipulátoru snazší. Po upnutí na trubku se provede první scan okolo trubky. Potom se sonda axiálně posune po vodící liště a provádí se další obvodový scan. Toto řešení je bohužel vhodné pouze pro rovné trubky.



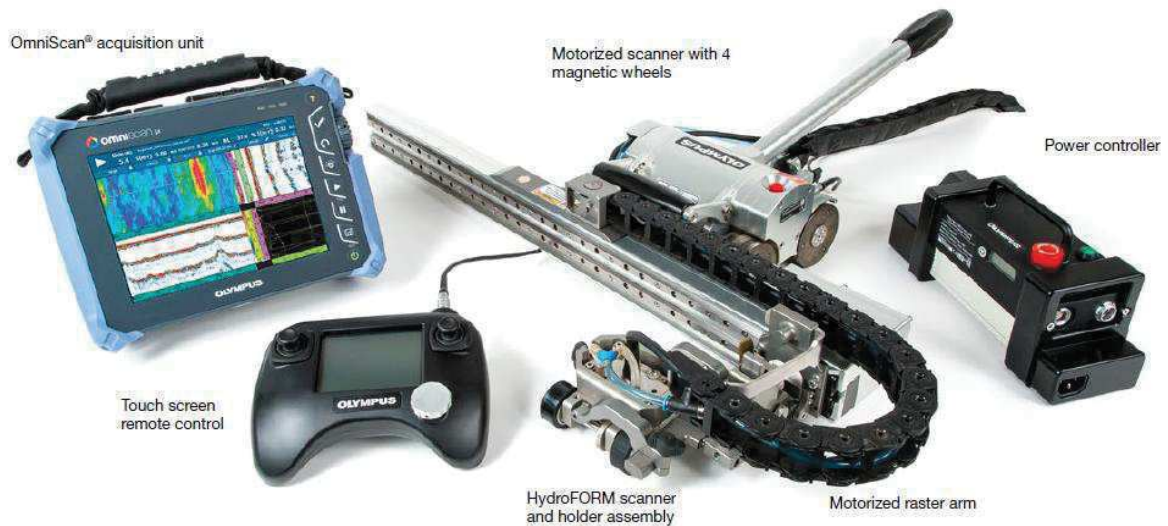
Obr. 14: ChainScanner [17] (zde v konfiguraci pro kontrolu svaru)



Obr. 15: Použití ChainScanneru [17]

Kromě manuálních manipulátorů existují i manipulátory s různou úrovní automatizace. Takový manipulátor už musí obsahovat aktuátor, obvykle elektrický motor, pomocí kterého dokáže pohybovat sondou tak, aby docházelo k měření potřebných veličin.

Na podobném principu jako výše zmíněný ChainScanner pracuje MapROVER stejné firmy. Skenování povrchu však není manuální, nýbrž automatické. Tento skener je k povrchu trubky přichycen pomocí magnetických koleček. Samotná sonda je připevněna k liště, po které se pohybuje ve směru osy trubky. Tělo skeneru s magnetickými kolečky zajišťuje obvodový pohyb. Stejně jako ChainScanner ani tento manipulátor nedokáže měřit na zahnuté trubce.



Obr. 16: MapROVER [28]

#### 4.1.4. Automatizované měření větších oblastí

Manipulátor, který dokáže zároveň kontrolovat celý obvod trubky a pohybovat se po ní v axiálním směru, je PET Scanner od firmy Phoenix ISL. Ultrazvuková sonda je upevněna na profilu tvaru C, který slouží pro její posuv v obvodovém směru. V konstrukci manipulátoru je motor, který tímto profilem a na něm upevněnou sondou pohybuje kolem osy trubky.








Obr. 17: Phoenix ISL PET Scanner [26]



Tento scanner je založen na univerzální platformě MagBug stejnojmenné firmy. Ta zajišťuje jednak upevnění skenovacího zařízení k trubce za pomoci magnetických koleček, jednak pohon zařízení v ose trubky spolu s přesným snímáním polohy. Toto řešení je tedy plně automatické.

## 5. Hodnocení a výběr koncepční varianty

Jak je vidět v předchozích odstavcích, existuje celá řada přístupů k řešení pohybu po trubce. Ne všechny jsou ale vhodné pro kombinaci s ultrazvukovými sondami a nedestruktivní měření. Ačkoli většinu z výše uvedených manipulátorů z rozměrových důvodů vůbec není možné použít pro měření na trubce průměru 16 mm, jsou zajímavé z pohledu různorodých koncepcí pohybu po trubce. Různé koncepce pohybu sumarizuje Tab.1.

Manipulátor	Obrázek	Měřicí pohyb	Přísuv	Použitelnost pro zahnutou trubku	Rozměry trubky
Phoenix Bracelet		Obvodový	-	<input checked="" type="checkbox"/>	0.5" – 4"
Phoenix ISL Sp-Arc		Axiální	-	<input checked="" type="checkbox"/>	1 – 4"
Olympus ChainSCANNER		Obvodový	Axiální (omezený)	<input checked="" type="checkbox"/>	1,75 - 38"
Olympus MapROVER		Obvodový, automatický	Axiální (omezený), automatický	<input checked="" type="checkbox"/>	2,5" - neomezeně
Phoenix ISL PET Scanner		Obvodový (automatický)	Axiální (automatický)	<input checked="" type="checkbox"/>	nezjištěno

Tab. 1: Koncepce pohybu po trubce u průmyslových manipulátorů

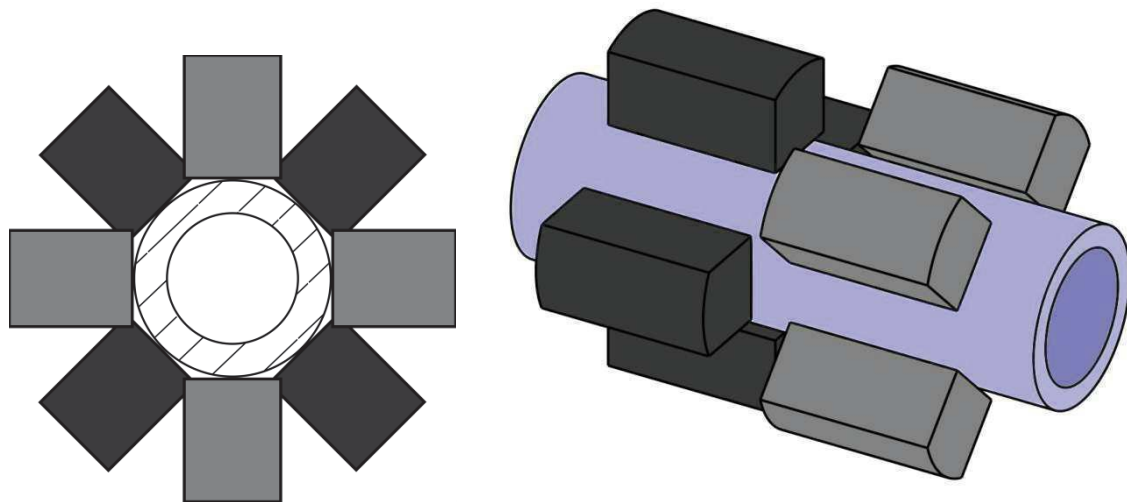
## Hodnocení variant a výsledná koncepce

Pro pohyb manipulátoru po trubce se v praxi využívá několik koncepčních variant. Základní jsou manipulátory, které zajišťují jeden pohyb po trubce, a ten je zároveň měřicím pohybem. Tyto manipulátory se po trubce pohybují buď obvodově (Phoenix Bracelet) nebo axiálně (Phoenix ISL Sp-Arc).

Další manipulátory kombinují obvodový a axiální pohyb. Mezi ty se řadí například Olympus ChainSCANNER a MapROVER. Jejich koncepce, kdy dochází k pohybu sondy v axiálním směru po rovném rameni, je ale předurčuje pro použití pouze na rovných trubkách a pro účely této práce tedy není vhodná.

Posledním hodnoceným typem je manipulátor Phoenix ISL PET Scanner. Tento manipulátor je zajímavý tím, že jako jediný dokáže snímat celý povrch trubky po celé její délce - neplatí pro něj omezení délky ramene jako v případě předchozích dvou manipulátorů. Navíc je určený pro automatizované použití. Cílem této práce je konstrukce manuálně ovládaného manipulátoru. Aplikace pro manuální použití by nicméně nejspíš byla možná.

Většinu zmíněných manipulátorů, jak už bylo popsáno výše, není možné použít kvůli malému průměru měřené trubky. Tato zdánlivá nevýhoda dává prostor k inovativnímu řešení. V případě malého obvodu trubky je možné celý její obvod osázet sondami a měření provést axiálně. V případě vybrané sondy A574S se jedná o 8 kusů sondy, umístěných okolo trubky ve dvou řadách pootočených o  $45^\circ$  a s mírným překryvem, viz obr. 18.



Obr. 18: Rozmístění sond okolo trubky

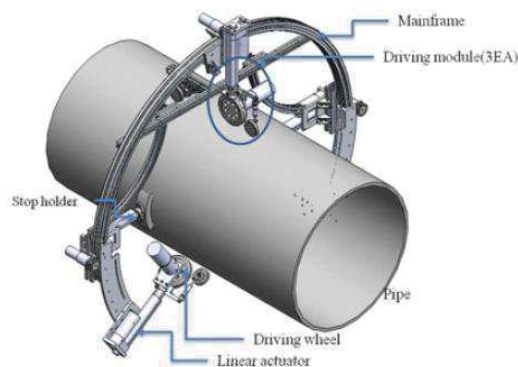
NDT laboratoř Plzeň disponuje zařízením, pro které snímání osmi sond není problém. Tato koncepce zároveň povede k zásadnímu zrychlení samotného měření oproti předchozí zvažované variantě - mělo by stačit manipulátor nasadit na trubku a jednou po ní axiálně přejet z jednoho konce na druhý.

## 6. Rozpracování koncepční varianty

### 6.1. Vedení manipulátoru a pozice sond

Vedení manipulátoru po trubce lze zajistit více způsoby. Některé manipulátory využívají jednoduchá pryžová kolečka. V tom případě je nutné mechanicky zajistit přichycení manipulátoru k trubce. Tyto manipulátory jsou často konstruovány tak, že jsou obtočené kolem celého obvodu trubky. To vede k rovnoměrnému přitlaku všech koleček po obvodu. Na tomto principu pracuje například výše zmíněný Olympus Cobra. Osa koleček je ale obvykle rovnoběžná s osou trubky a manipulátor tedy slouží pouze k obvodovému pohybu.

Pro konstrukci manipulátoru, který bude schopen pohybu ve směru osy trubky, musí být kolečka otočena o 90°. Příkladem může být robotický manipulátor vyvinutý na Andong National University v Jižní Koreji, viz obrázek 19.



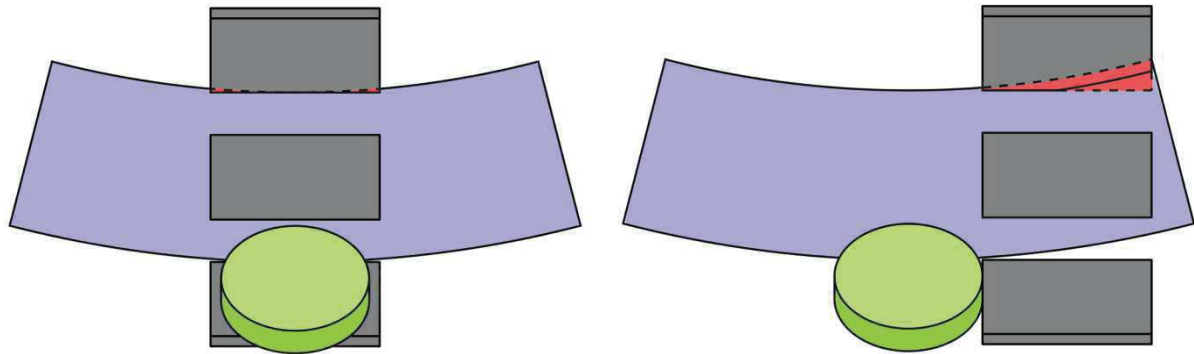
Obr. 19: Prototyp manipulátoru pro axiální pohyb po trubce [11]

Manipulátory, které se dokážou pohybovat i ve směru osy trubky, často využívají magnetická kolečka. Takový manipulátor nemusí být konstruován kolem celého obvodu trubky, dokáže se k ní přichytit z jedné strany. Příkladem může být výše zmíněný PET Scanner nebo Sp-Arc firmy Phoenix ISL.

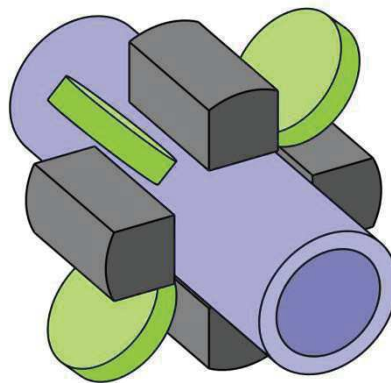
Při použití více sond, jak je ukázáno výše, je z principu nutné použít rám manipulátoru, který bude okolo celého obvodu trubky. Použití magnetických koleček tím pádem postrádá smysl, postačí kolečka pryžová. Pro vedení manipulátoru by v principu měla stačit tři kolečka, rozmístěná po obvodu trubky, pootočená o 120°. Takový manipulátor je například [11]. Vzhledem k počtu sond potřebných ke skenování celého povrchu (viz výše), je ale vhodné volit i stejný počet koleček, tedy čtyři.

Kolečka by měla být ideálně v takové poloze, aby jejich stykový bod s povrchem trubky byl ve stejné rovině jako podélný střed sondy, viz obr. 20. Je to kvůli rovnoměrnému přitlaku sond k trubce při průjezdu manipulátoru zahnutou částí trubky. Pokud jsou sondy vůči kolečkům axiálně posunuty, na jedné straně se zvětšuje mezera mezi sondou a trubkou, a na druhé je trubka se sondou v kolizi, viz obr. 20 vpravo.

K mírné kolizi v zahnuté části trubky dochází i v případě, že kolečka a sondy posunuty nejsou. Tato kolize je řešena pomocí přitlaku sondy, viz kap. 7.3. Nejvhodnější uspořádání jedné (přední/zadní) části manipulátoru se tedy jeví jako čtveřice sond + čtveřice koleček, střídavě umístěné kolem obvodu trubky.



Obr. 20: Porovnání vzájemné polohy koleček a sondy



Obr. 21: Výsledné rozložení sond a koleček na jedné polovině manipulátoru

## 6.2. Snímání pozice manipulátoru

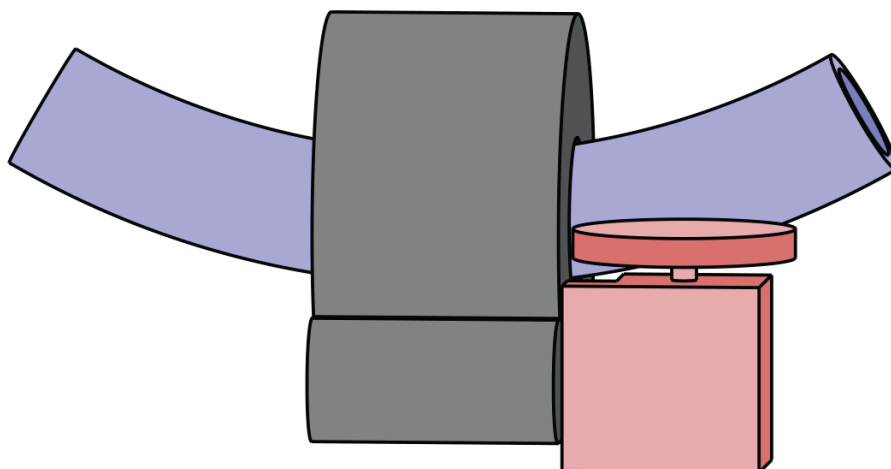
Aby bylo pomocí manipulátoru možné zajistit přesné a opakovatelné měření, je potřeba snímat jeho pozici na trubce. Pro tento účel bude použit ekodér z inventáře Laboratoře nedestruktivního testování CV Řež - Olympus Mini-Wheel Encoder.



Obr. 22: Olympus Mini Wheel Encoder [30]

Enkodér je možné upevnit dvěma způsoby. První z nich je upevnění za dvě M3 závitové díry v jeho horní části, tedy pevné uložení. Druhým je využití kolíčku s pružinou, na obr. 22 (nahore) v pravé části. Při upevnění kolíčku do těla manipulátoru je kolečko enkodéru přitlačováno k povrchu zkoušené součásti.

Kolečko musí být v neustálém kontaktu s trubkou. Není ale možné ho připevnit na konec rámu manipulátoru, kolečko by v zahnutí trubky nesnímalo správně, viz obr. 23.

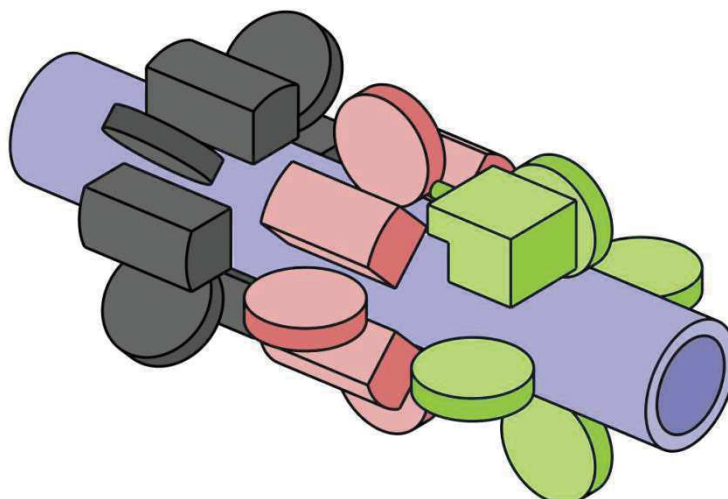


Obr. 23: Při upevnění enkodéru k tělu manipulátoru se jeho kolečko v zahnutí trubky nachází mimo osu

Kolečko enkodéru je tedy potřeba umístit stejným způsobem jako ostatní kolečka, sloužící k vedení manipulátoru. Ideální by bylo jedno z těchto koleček nahradit kolečkem enkodéru, to ale bohužel z prostorových důvodů není možné - z obou stran jsou umístěny ultrazvukové sondy. Pro enkodér je tedy potřeba vytvořit další speciální díl jako další část manipulátoru, viz obr. 24.

### 6.3. Výsledný koncept rozložení jednotlivých prvků

Manipulátor se bude skládat ze tří hlavních částí, z nichž každá bude v principu schopna fungovat samostatně. Funkce první části (na obrázku 24 zeleně) je snímání polohy. Funkce druhé (červené) a třetí (šedé) části je měření pomocí ultrazvukových sond. Sondy v druhé a třetí části jsou vůči sobě pootočený o 45°.

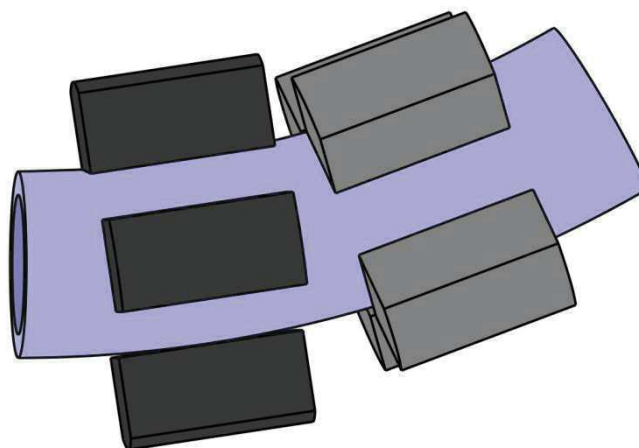


Obr. 24: Výsledné rozložení sond, koleček a enkodéru na trubce

## 7. Jednotlivé konstrukční prvky

### 7.1. Rám

Rám manipulátoru představuje hlavní nosnou část, ke které jsou připevněny ultrazvukové sondy. Pro zajištění správného přitlaku sond jsou tyto části dvě, každá nese čtveřici sond. Rozdělení je nutné kvůli průjezdu manipulátoru obloukem trubky, který může být až o minimálním poloměru  $R\ 100$ .

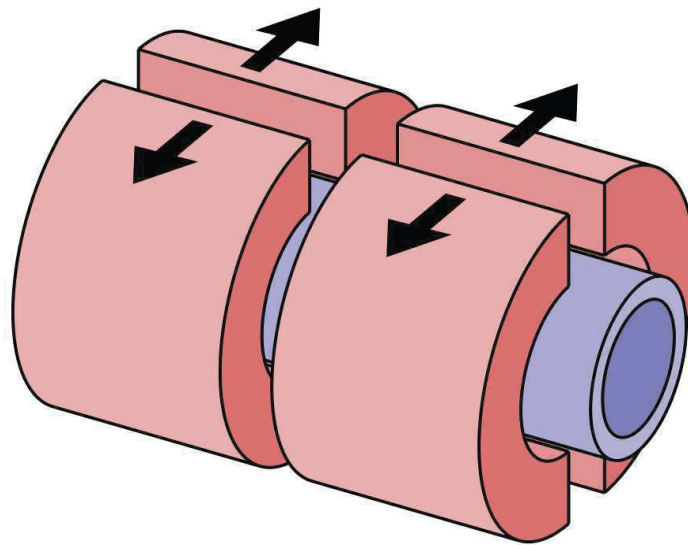


Obr. 25 Vzájemné natočení sond v zahnuté části trubky

Důležitým prvkem rámu, který výrazně ovlivní jeho konstrukci, je potřeba jeho rozdělitelnosti na části v podélném směru. Na měřené části trubky není žádné zakončení, přes které by šel manipulátor “navléknout”. Je tedy potřeba mít možnost ho rozpojit, nasadit na trubku v její

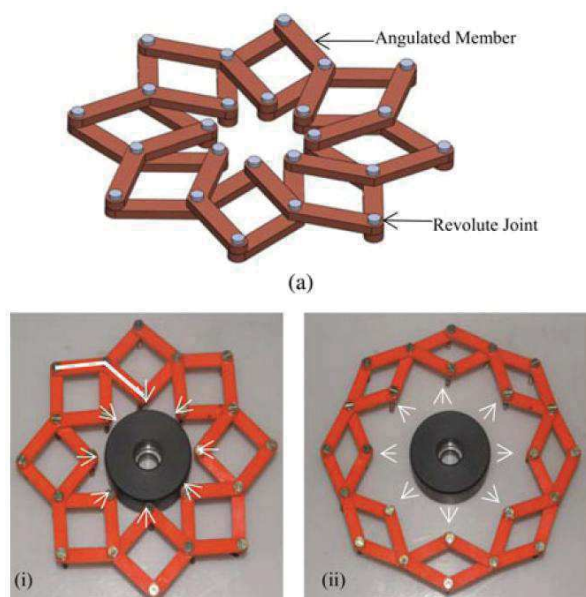


střední části a spojit. Rozpojitelné musí být přední i zadní část manipulátoru, stejně jako spoj mezi oběma polovinami.



Obr. 26: Rozpojování přední a zadní poloviny manipulátoru

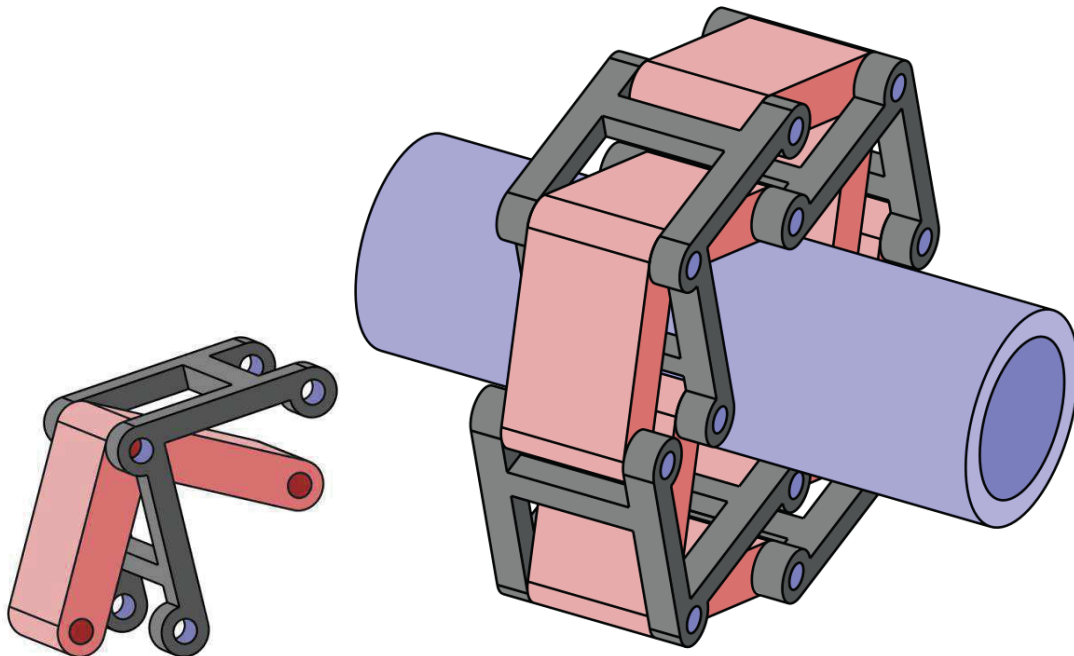
Poměrně zajímavý způsob realizace rámu, který by umožňoval i použití manipulátoru na trubkách jiného průřezu, je za využití Hobermanova mechanismu. Tato varianta je diskutována pro konstrukci jiného manipulátoru na trubku v [22]. Jedná se o mechanismus, který má záporný počet stupňů volnosti, ale jeho speciální geometrie mu umožňuje radiálně se stahovat a roztahovat. [22] Toho by se dalo využít k přitlaku sond k trubce.



Obr. 27: Hobermanův mechanismus a jeho využití k sevření trubky. Na obrázku (i) je bíle vyznačen jeden samostatný element mechanismu [22]



Na obr. 28 je dvojice elementů použitých pro základ konstrukce manipulátoru a celý mechanismus na trubce. Oproti základnímu Hobermanovu mechanismu na předchozím obrázku byly podélně rozšířeny elementy a čepy zdvojeny tak, aby vznikl prostor pro ultrazvukovou sondu. Jejich počet je přizpůsoben požadovanému počtu sond. Na obr. 28 je jedna polovina manipulátoru.

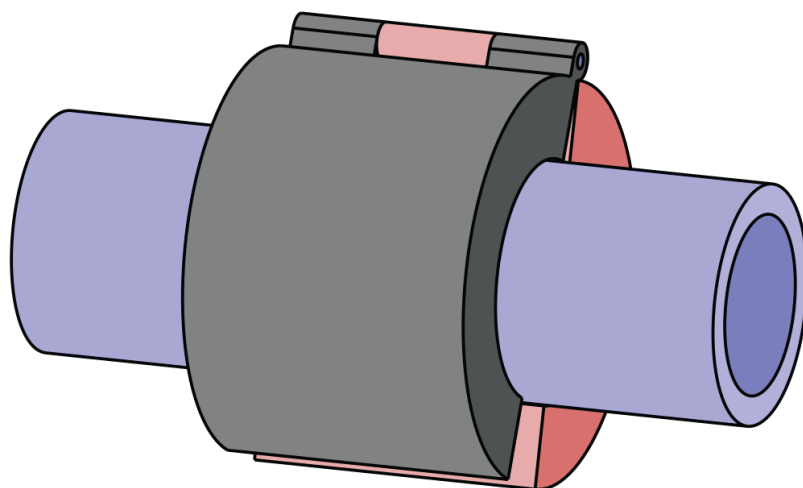


Obr. 28: Podélně rozšířený Hobermanův mechanismus pro nesení ultrazvukových sond

Tento koncept rámu je zajímavý i z pohledu jeho snadné rozpojitelnosti. Mohl by být v jednom místě rozdělený a nasazení na trubku by probíhalo podobně jako u manipulátoru Phoenix ISL Bracelet - jako řetěz.

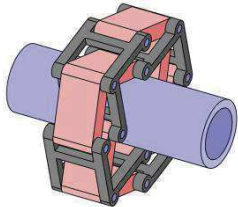
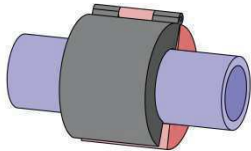
Nevýhodou Hobermanova mechanismu je složitost realizace pohybu v radiálním směru. Ten je potřeba pro řešení přítlaku sond, které je podrobněji popsáno v kap. 7.3. Žádný element se při stahování a roztahování tohoto mechanismu v přímém radiálním směru nepohybuje. Radiálně se pohybují pouze čepy mezi elementy.

Další možností konstrukce rámu je složení ze dvou polovin, z nichž každá ponese dvě sondy, viz obr. 29. Tyto poloviny by měly být spojeny tak, aby bylo nasazení manipulátoru pokud možno co nejrychlejší, například pomocí pantu a pružného zajištění na druhé straně. Po zajištění vznikne okolo trubky poměrně pevný a tuhý rám. To významně zjednoduší i přítlak sondy k trubce. Tato možnost je konstrukčně jednodušší a obsahuje výrazně méně pohyblivých částí.



Obr. 29: Varianta rámu mechanismu z dvou polovin spojených pantem

Výhody a nevýhody obou variant konstrukce rámu sumarizuje tabulka 2.

	 Hobermanův mechanismus	 Pevný rám spojený pantem
Zajištění pozice a přítlaku sond	složitě	jednodušší
Zástavbový prostor pro sondy, kolečka a další vybavení	menší, omezený samotnou konstrukcí mechanismu	větší
Složitost konstrukce	vysoká	menší
Počet pohyblivých částí	vysoký	malý

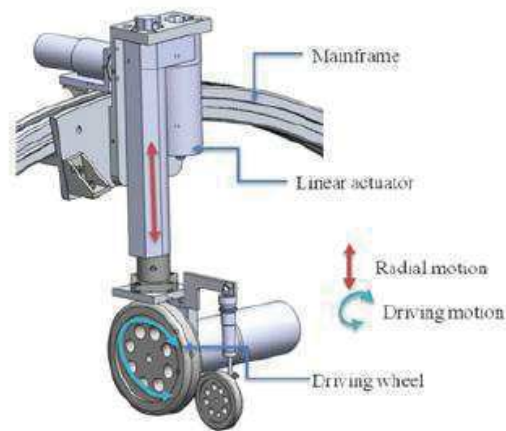
Tab. 2: Výhody a nevýhody obou variant konstrukce rámu

Z důvodů shrnutých v tabulce bude prototyp manipulátoru založen na rámu spojeném ze dvou polovin.

## 7.2. Kolečka a jejich uložení v rámu

Kolečka je nutné přitlačovat k povrchu trubky, a to dostatečnou silou, aby nemohlo dojít k jinému pohybu než pohybu v ose trubky. Způsobem zajištění přítlaku u manipulátoru [11] je

použití lineárního motoru. Princip je naznačen na obrázku 30. Tento způsob může být vhodný pro manipulátory mohutnějších konstrukcí. Tento způsob přitlačování navíc umožňuje určitou variabilitu průměru trubky.

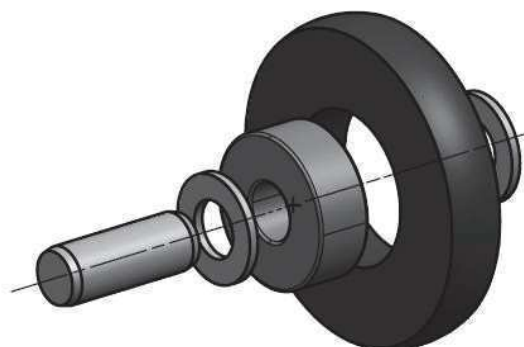


Obr. 30: Zajištění přitlaku koleček pomocí lineárního motoru [11]

Jinou možností zajištění přitlaku je použití vinuté ocelové pružiny, vložené mezi rám manipulátoru a kolečko. Pro manipulátor určený pro trubku o průměru 16 mm ale pravděpodobně postačí pružnost pneumatik.

V prototypu manipulátoru je pojezd každé části zajištěn pomocí čtveřice koleček. Každé kolečko se skládá z hřídele, kuličkového ložiska, dvou vymezovacích podložek a pneumatiky. Hřídel kolečka je nalisována do vnitřního kroužku ložiska a pevně uložena v rámu manipulátoru. Po stranách ložiska jsou umístěny vymezovací podložky, které zabraňují dotyku těla manipulátoru a rotující části kolečka.

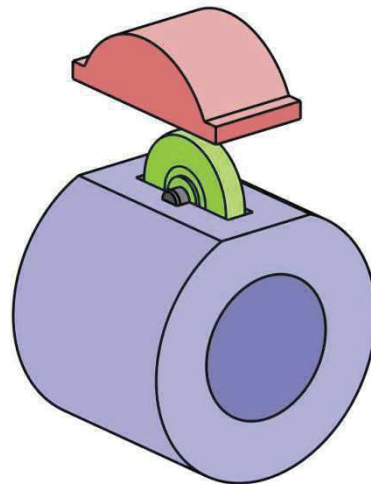
Ložiska jsou stejně jako hřídele v přímém styku s kontaktním médiem sond. Obojí je proto vyrobeno z korozi-vzdorné oceli. Aby nedocházelo ke kontaktu mezi ložiskem a tělem manipulátoru, jsou mezi nimi použity podložky z materiálu s nízkým koeficientem tření - z polyamidu (PA). Pneumatiky jsou pro účely prototypu manipulátoru vytvořeny pomocí 3D tisku z pružného materiálu - termoplastického polyuretanu (TPU). Na ložiska jsou pneumatiky nalisovány.



Obr. 31: Kolečko manipulátoru.

## Uložení koleček

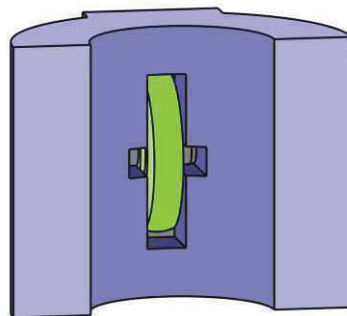
Uložení kolečka do rámu manipulátoru je možné v principu konstruovat dvěma způsoby. První z nich je rozdělit v ose kolečka manipulátor na dvě části a v dělicí rovině vytvořit uložení pro hřídel, viz obr. 32. To je přístup běžně používaný například v konstrukci převodovek. Hřídel je tedy upevněna mezi tělo manipulátoru a víko, které je přišroubováno nebo jinak připevněno.



Obr. 32: Konstrukce uložení hřídele s víkem

Druhou možností, která v tomto případě připadá v úvahu, je vložení sestavy kolečka s hřídelí  *zevnitř*  manipulátoru. Hřídel je vtlačena do pro ni vytvořené drážky. Ačkoli je tento způsob uložení méně přesný než uložení s víkem, jeho výhodou je jednoduchost a menší počet dílů. Oproti uložení s víkem odpadá těsnění, šrouby nebo jiný zajišťovací mechanismus a samotné víko. Pro manipulátor se čtyřmi kolečky kolem trubky bude tento způsob uložení pravděpodobně dostatečný.

Vytvořená drážka pro hřídel má na vstupu rozšíření pro snadnější vkládání hřídele.



Obr. 33: Konstrukce uložení hřídele zevnitř manipulátoru

### 7.3. Přítlak sond

Při vykonávání měřícího pohybu musí být sonda neustále v kontaktu s měřenou trubkou. U velkého množství manipulátorů to není problém, stačí zajistit pevnou vazbu mezi povrchem a sondou a tím jejich konstantní vzdálenost. Jsou to manipulátory jak pro rovné povrchy, tak manipulátory pro rovné trubky. Vzdálenost sondy od povrchu může být regulována stavitelným šroubem, jako u manipulátoru Sp-Arc [24].

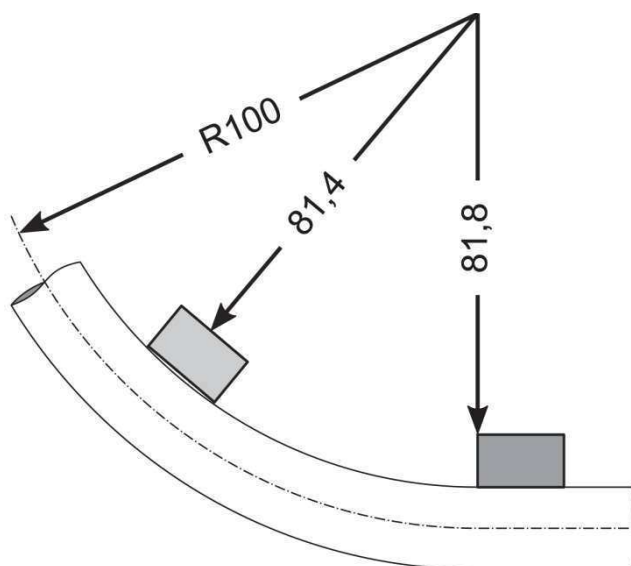
V případě, že se sonda má pohybovat po zahnuté trubce, vzdálenost mezi sondou a povrchem není konstantní. Není tedy možné sondu umístit napevno do rámu manipulátoru. Sonda A574S, použitá v této práci, je kontaktní sonda (viz kap. 3.3), je tedy potřeba zajistit její stálý kontakt s povrchem.

Pro zajištění tohoto kontaktu se často využívá pružná vazba mezi rámem a samotnou sondou nebo držákem sondy. Příkladem může být již zmíněný PET Scanner firmy Phoenix ISL. Pomocí klasické vinuté pružiny je sonda přitlačována od rámu k povrchu zkoušené trubky, viz obrázek 34.



Obr. 34: Přítlak sondy pomocí vinuté pružiny - PET Scanner [12]

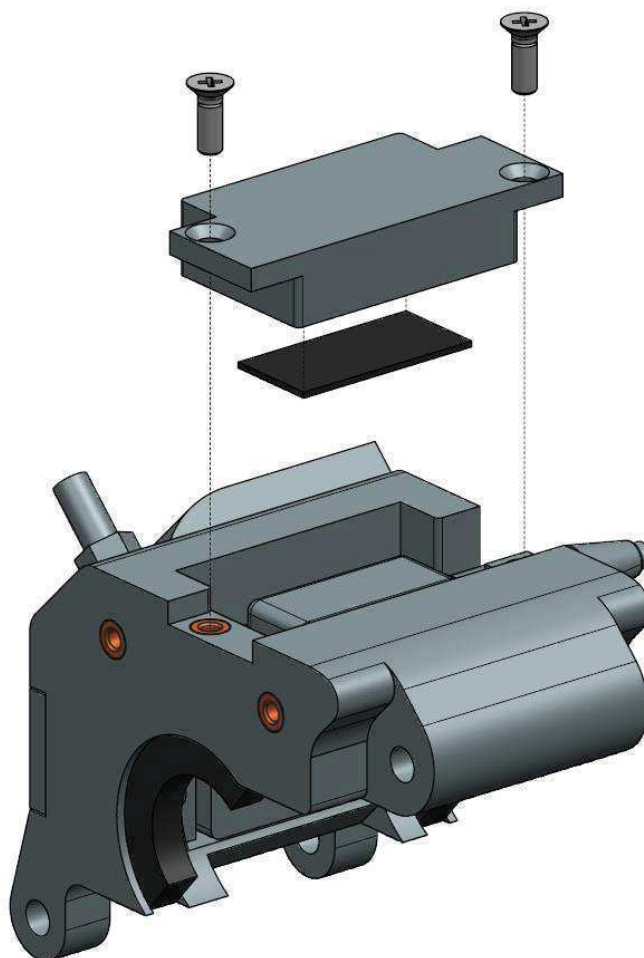
Pro určení potřebného přítlaku pružiny je vhodné zjistit její potřebný zdvih. Tento zdvih je dán mezerou mezi sondou a povrchem trubky, která vznikne při průjezdu manipulátoru částí trubky s maximálním zakřivením (100 mm). Tento zdvih je popsán na obrázku 35.



Obr. 35: Rozdíl pozice sondy v rovné části trubky (znázorněno tmavě) a v zahnuté části (světle)

Jak je vidět z obrázku, při použití sondy A574S je rozdíl její polohy v radiálním směru v rovné a zakřivené části trubky asi 0,4 mm. To se může zdát jako poměrně málo, ale i tak to znamená, že sondy nemohou být v rámu uloženy pevně, ale musí mít určitou možnost pohybu v radiálním směru.

V konstrukci prototypu manipulátoru bude pro zajištění tohoto zdvihu použita jednoduchá pryžová pružina, která bude sondu k trubce přitlačovat. Bude vyrobena z jednostranně samolepícího materiálu a vlepna do víka sondy.

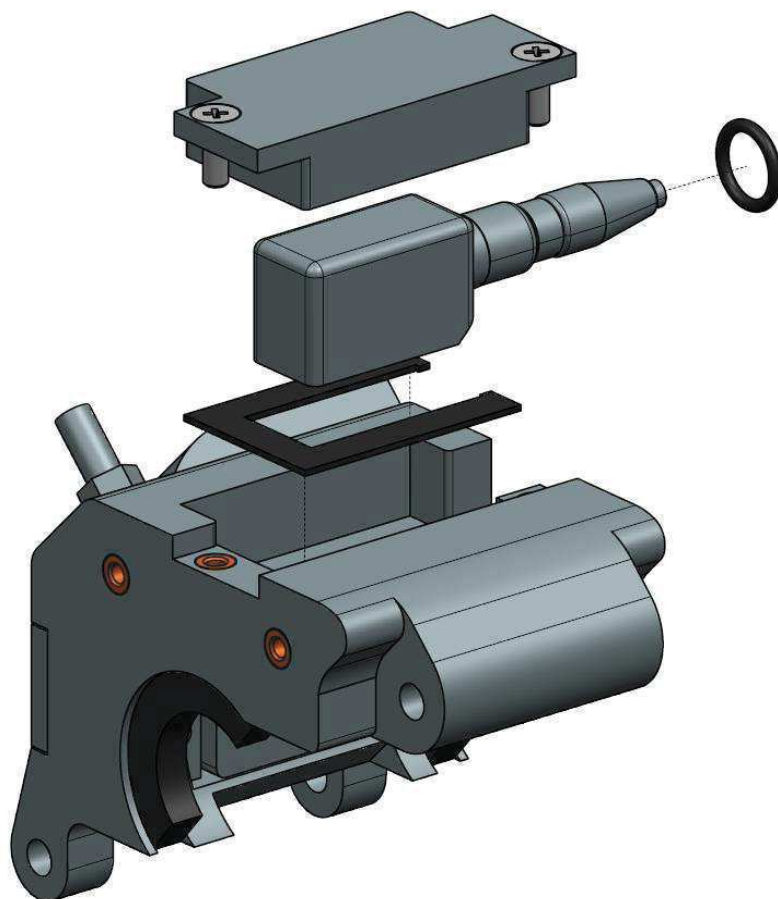


Obr. 36: Pružný element umístěný ve víku sondy

#### 7.4. Víko sondy a jeho těsnění

Víko sondy je místem, kudy potenciálně může unikat kontaktní médium. Je ho proto potřeba utěsnit. Těsnost zajišťuje ploché těsnění z EPDM vložené mezi víko sondy a tělo manipulátoru. Na konektoru sondy bude nasazený o-kroužek, který bude bránit průsakům kolem kabelu sondy.





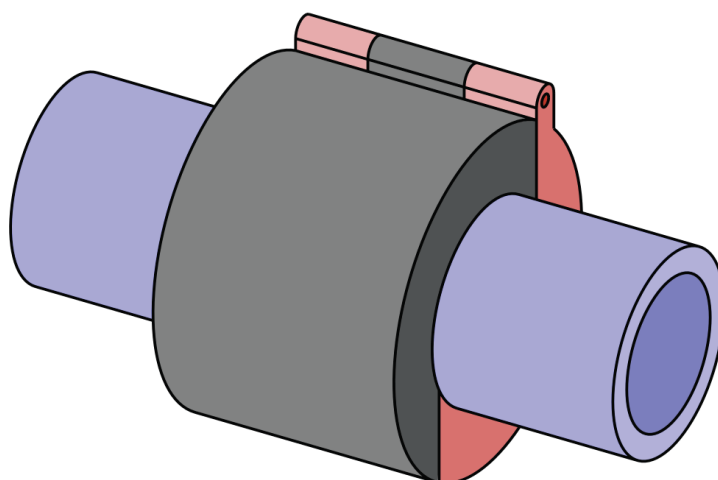
Obr. 37: Těsnění víka sondy a konektoru sondy

## 7.5. Dělicí rovina

Rám každé části manipulátoru bude spojen ze dvou polovin spojených pantem a zajištěných dohromady po nasazení na trubku. S tím souvisí volba dělicí roviny obou částí. Dělicí rovina představuje prostor, kudy může potenciálně unikat kontaktní kapalina mimo prostor manipulátoru, a je nutné ji utěsnit. V ideálním případě by rovina vedla přímo skrz osu trubky, jako na obr. 29. Toto řešení je nejjednodušší z hlediska konstrukce pantů, těsnění a dalších konstrukčních prvků.

V tomto případě ale vzhledem k poměrně malým vzdálenostem mezi jednotlivými funkčními částmi, jako jsou hřídele koleček a těsnící prostor sond, není vedení dělicí roviny skrz osu trubky možné. Zbývající variantou je konstrukce dělicí roviny s “přesazením”, viz obr. 38.





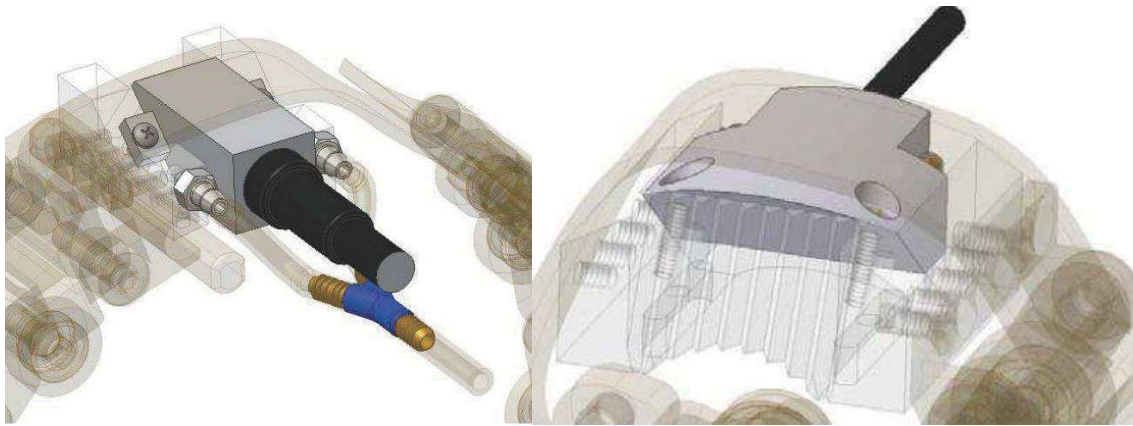
Obr. 38: Rozdělení částí manipulátoru s přesazenou dělicí rovinou



Obr. 39: Realizace dělicí roviny

## 7.6. Vazba mezi sondou a zkoušeným materiálem

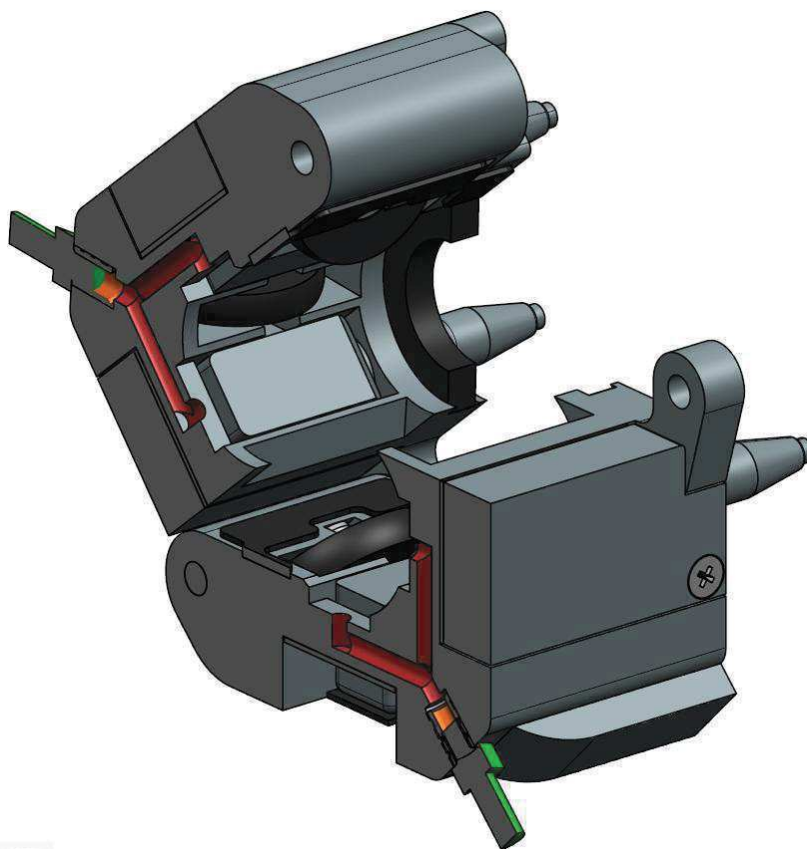
Mezi sondou a trubkou je nutné konstantně dodávat kontaktní médium, v případě sond A574S vodu. Ta je obvykle přiváděna pod sondu z přední části pomocí kanálků v jejím držáku. Na obrázku 40 je sonda použita ve skeneru Phoenix Bracelet. Sonda je přitisknuta ke zkoušené trubce pomocí klínu, který se vybírá podle velikosti trubky. V tomto případě vazební médium proudí skrz samotnou sondu do kontaktního klínu, ve kterém jsou vytvořeny kanálky pro přívod média mezi tento klín a trubku.



Obr. 40: Přívod kontaktního média v manipulátoru Phoenix Bracelet

V prototypu manipulátoru je sonda přitisknuta přímo k povrchu trubky, tedy bez použití kontaktního klínu. Kontaktní médium bude přivedeno pomocí kanálků vedoucích skrz tělo manipulátoru. Kanálky pak ústí před jednotlivé sondy ve směru pohybu manipulátoru.

Pro lepší kontakt s měřeným povrchem průmyslové manipulatory často mívají dva kanálky na sondu, vzhledem k počtu sond by to v tomto případě nebylo vhodné. Místo toho má každá sonda jeden kanálek pro přívod média, který ústí přímo před ni. V tomto místě je rozšířen tak, aby se médium dostalo pod celou plochu sondy.

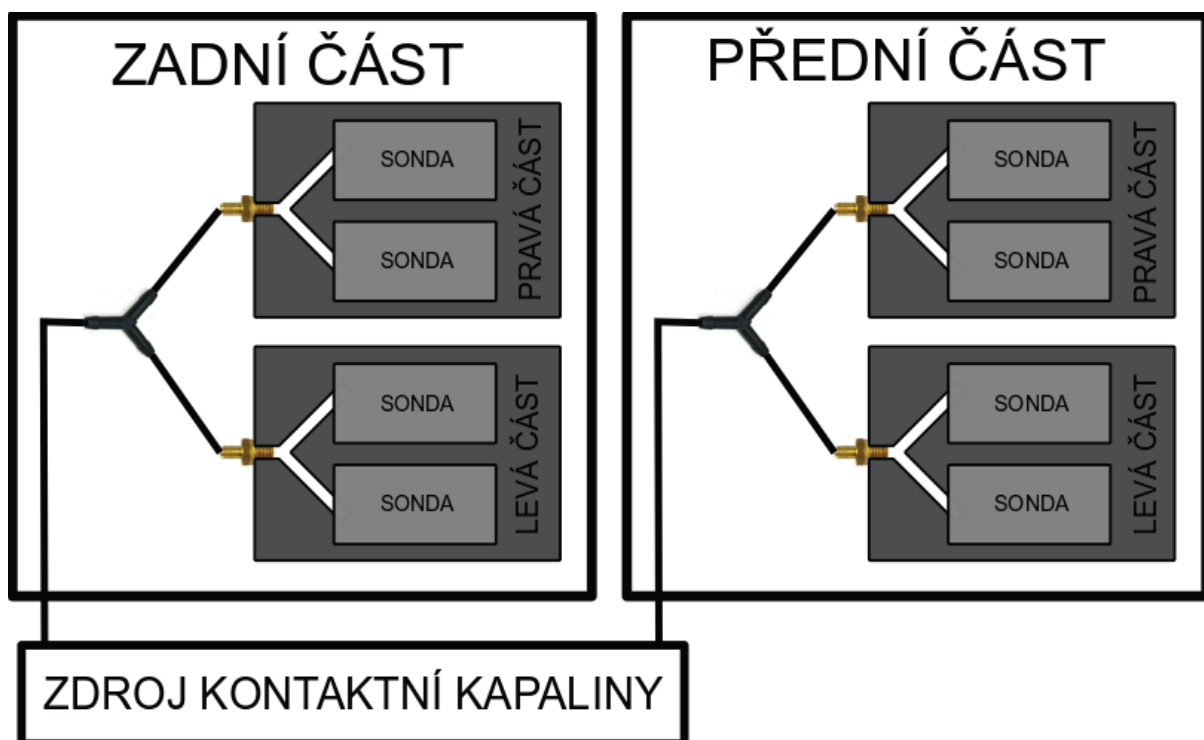


Obr. 41: Kanálky pro přívod kontaktního média (červeně). Oranžově je vyznačena závitová vložka a zeleně přípojka pro hadičku

Každá část manipulátoru obsahuje dvě sondy. Kanálky, které k nim vedou, se v těle sondy spojují do jednoho. Délka obou kanálků je přitom stejná, aby obě sondy byly zásobeny médiem rovnoměrně. Na povrchu sondy kanálek ústí do mosazné závitové vložky s vnitřním závitem M3. Do něj je našroubována standardní přípojka pro přívodní hadičku s vnitřním průměrem 3 mm.

### 7.7. Systém přívodu kontaktní kapaliny

Hadičky v každé (přední a zadní) části manipulátoru jsou svedeny do spojovacího dílu tvaru Y. Z těchto dílů vedou další dvě hadičky, které buď mohou být svedeny do spojky a napájeny z jednoho zdroje, nebo mohou být napájena každá zvlášť. Schéma přívodu kontaktní kapaliny je na obr. 42.



Obr. 42: Schéma přívodu kontaktní kapaliny k sondám



Obr. 43: Realizace přívodu kontaktní kapaliny

## 7.8. Těsnění mezi manipulátorem a trubicí

Některé výše zmíněné manipulátory, přestože mezi sondu a trubku přivádějí kontaktní médium, neobsahují ve své konstrukci těsnění tohoto prostoru. To znamená, že při kontinuálním přivádění vazebního média mezi styčné plochy dochází k odkapávání tohoto média mimo prostor manipulátoru.

Tento přístup je vhodný pro rovné plochy, případně rovné trubky, u kterých je kontakt mezi sondou a povrchem natolik těsný, že odkapávání není tak výrazné. V případě manipulátoru pro zahnutou trubku ale mezi sondou a povrchem vzniká určitá mezera a množství média nutného ke správné vazbě je větší. Tím pádem by docházelo i k větším únikům média.

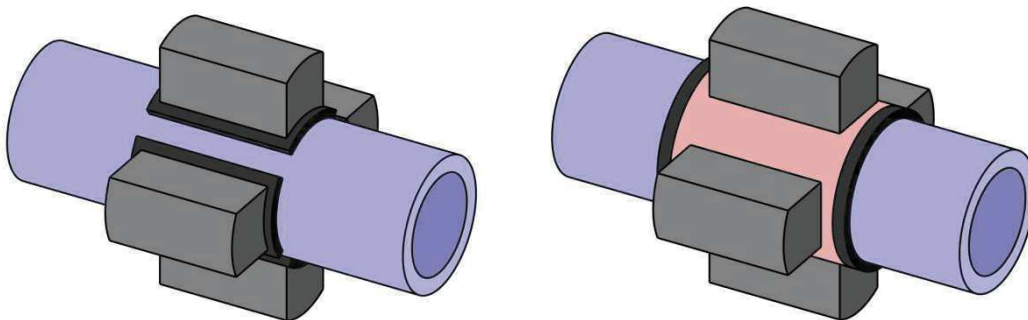
Kontaktní médium dodávané mezi sondu a trubky by ideálně mělo zůstat jen v tomto místě a nemělo by se dostat nikam jinam. Je tedy potřeba ohraničit vnitřní prostor, kde dochází ke styku sondy a trubky. Příkladem, jak toho lze v praxi dosáhnout, jsou pěnová těsnění používaná v systému Sp-Arc firmy Phoenix. Tato těsnění jsou tvarována tak, aby přesně kopírovala tvar zkoušené trubky, viz obr. 44.



Obr. 44: Těsnění mezi sondou a trubkou v systému Sp-Arc [24]

Samotné těsnění se skládá ze tří částí. První z nich je plastový držák, který slouží k zajištění tvaru těsnění a jeho upnutí k dalším částem systému. K němu je připevněna měkká, pěnová část těsnění, která slouží k samotnému těsnění a vyrovnávání nerovností při pohybu zařízení po zkoušené trubce. Poslední částí je tenká vrstva, která je v přímém kontaktu s trubkou. Má nízký koeficient tření a je odolná proti opotřebení.

Phoenix Sp-Arc, stejně jako řada dalších konkurenčních produktů, těsní prostor okolo sondy ve všech směrech. Tento přístup je vhodný v případě použití jedné sondy. V případě použití více sond umístěných těsně u sebe okolo trubky malého průměru, jako je to v případě této práce, by byl tento přístup komplikovaný. Při zvýšení počtu sond narůstá celková délka těsněného obvodu a tím i pravděpodobnost průsaků. Vhodnější přístup může být umístění všech sond do společné, „mokrě“ části systému a tuto část samotnou vůči okolí utěsnit. Tento přístup je zobrazen na obr. 45.



Obr. 45: Těsnění každé sondy zvlášť × těsnění všech sond najednou

Tento způsob těsnění systému komplikuje potřeba rozdělitelnosti celého zařízení na více částí. Funkce těsnění bude zajištěna jen za předpokladu vhodné konstrukce těsnícího prostoru a volby těsnícího materiálu. Ideální by bylo použití podobného těsnění jako používají výše zmíněné průmyslové produkty, tedy vícevrstvého těsnění se speciální třecí vrstvou. Takové těsnění ale není standardní díl a muselo by se speciálně navrhnout a vyrobit.

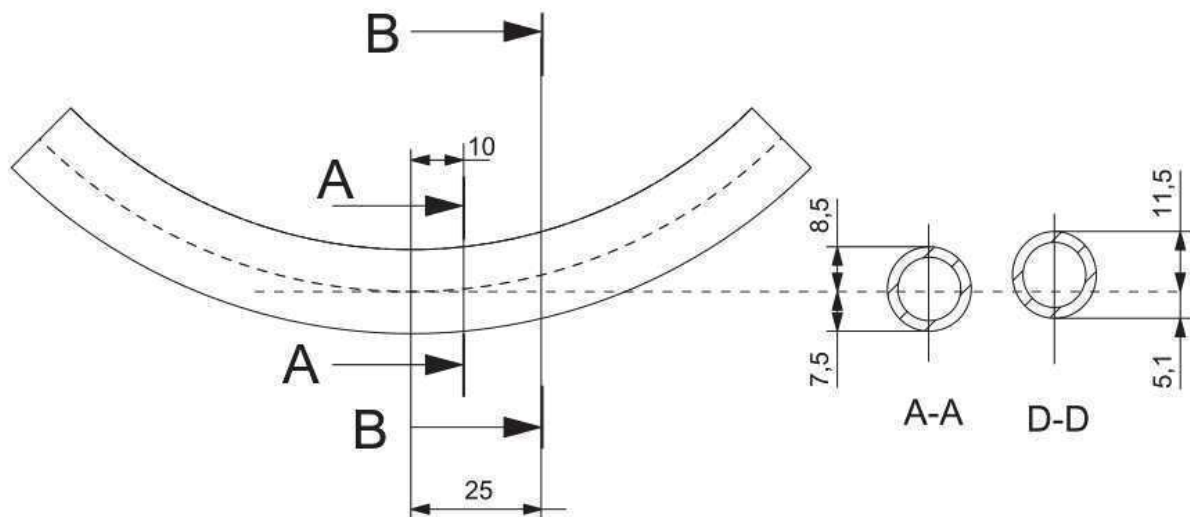


Kvůli potřebě rozdělit těsnění na části není možné použít klasické o nebo x-kroužky, gufera a podobně. V úvahu přichází například použití děleného těsnění jako je na obrázku 46, ale z materiálu s dobrým koeficientem tření - těsnění se pohybuje po trubce. Jinou možností by mohlo být použití těsnící šňůry, vícekrát omotané kolem trubky a zajištěné v těsnícím prostoru pomocí dalšího dílu.



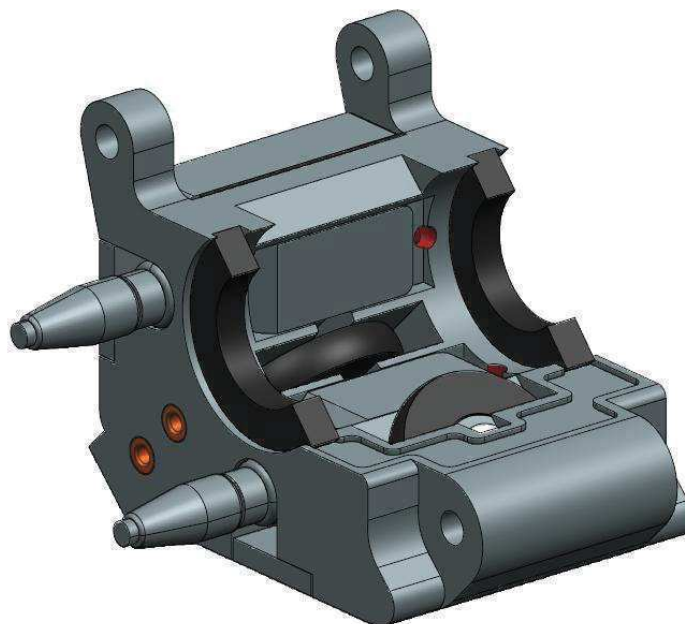
Obr. 46: Dělené těsnění [29]

Důležitým parametrem těsnění je jeho požadovaná stlačitelnost. Ta v tomto případě úzce souvisí s jeho výškou, a také s umístěním těsnění vůči středu dané části manipulátoru (stykového bodu koleček). Při průjezdu manipulátoru nejmenším obloukem trubky (definovaným jako  $R\ 100\text{ mm}$ ) stále musí docházet ke kontaktu mezi těsněním a trubkou. Z geometrie zahnuté trubky vychází, že čím je těsnění vyšší, tím musí mít větší stlačitelnost, viz. obrázek 47. Těsnění totiž musí těsnit z obou stran trubky, přitom je z každé strany stlačováno jinak. Například ve vzdálenosti 10 mm od stykového bodu koleček a trubky bude těsnění muset těsnit ve vzdálenosti 7,5 mm (na obrázku zespoda) a zároveň 8,5 mm (shora). Při vzdálenosti 25 mm od osy už je to ale 5,1, respektive 11,5 mm.



Obr. 47: Průřez trubky v různých vzdálenostech od stykového bodu koleček a trubky

Je tedy žádoucí umístit těsnění co možná nejbližší stykovému bodu. V konstrukci prototypu je těsnění umístěno ve vzdálenosti 13 mm a je vysoké 3 mm. Bude vyrobeno z pěnového EPDM s jednou samolepící stranou. Každá polovina manipulátoru bude obsahovat i polovinu kruhového těsnění.

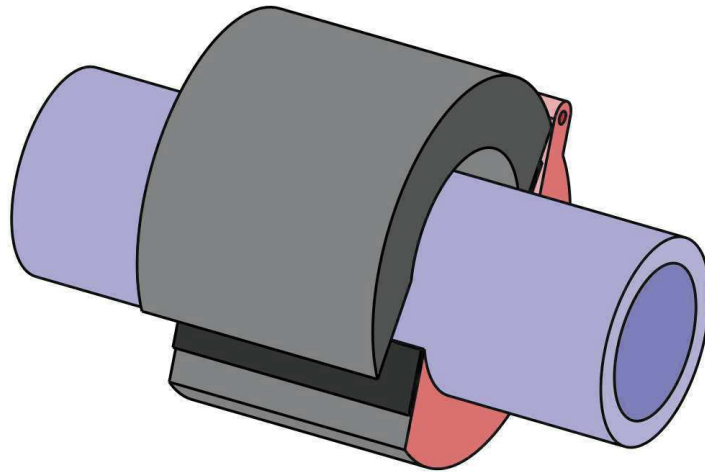


Obr. 48: Těsnění mezi manipulátorem a trubkou. Na obrázku je jedna polovina přední části manipulátoru.

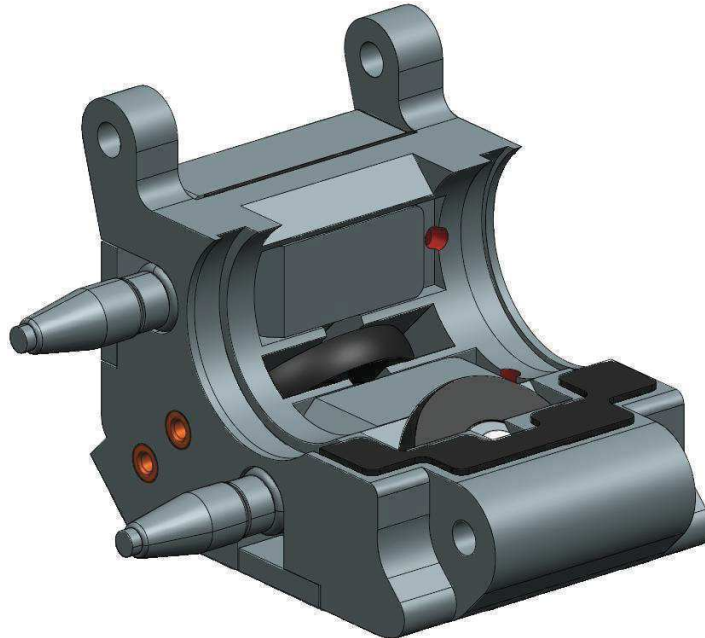


## 7.9. Těsnění obou polovin manipulátoru

Dalším místem, kudy může unikat kontaktní médium mimo prostor sond, je dělicí rovina. Mezi oběma polovinami je proto umístěno ploché těsnění. V prototypu manipulátoru je toto těsnění vyrobeno z pěnového EPDM a nalepeno do drážky v jedné ze styčných ploch.



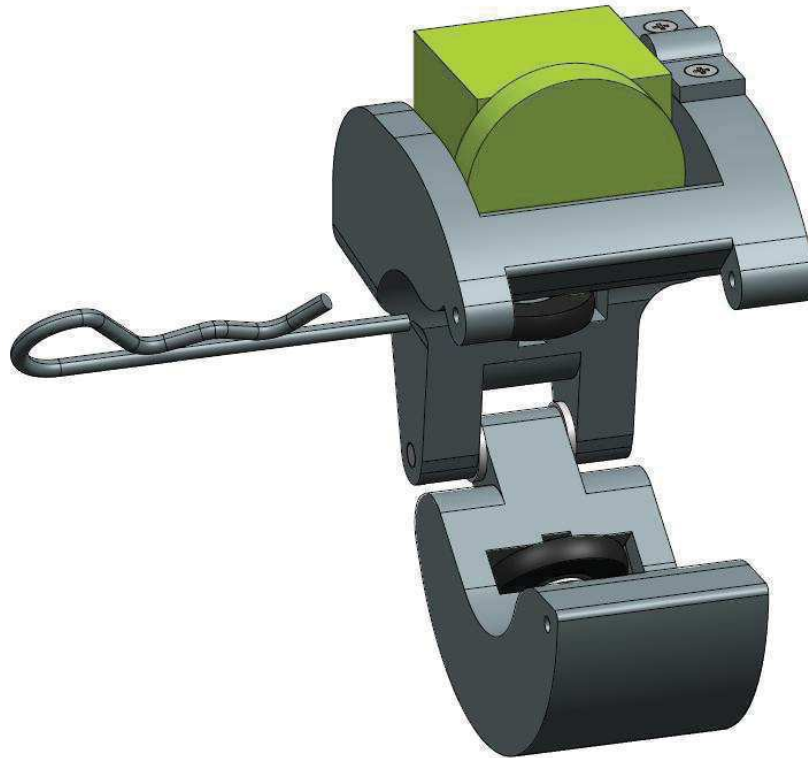
Obr. 49: Těsnění plochy mezi oběma polovinami manipulátoru



Obr. 50: Realizace těsnění

## 7.10. Sestava enkodéru

Sestava přední části, ve které se nachází enkodér, se v mnohém podobá sestavě se sondami. Je stejně tak rozdělitelná napůl, s pantem na jedné straně a závlačkou na straně druhé. Obsahuje čtyři kolečka (resp. 3+kolečko enkodéru). Enkodér je k rámu připevněn pomocí napruženého kolíčku, který je zajištěn víčkem proti vypadnutí. Není zde potřeba žádné těsnění, uložení sond ani přívod kontaktního média, proto je konstrukce mnohem jednodušší.

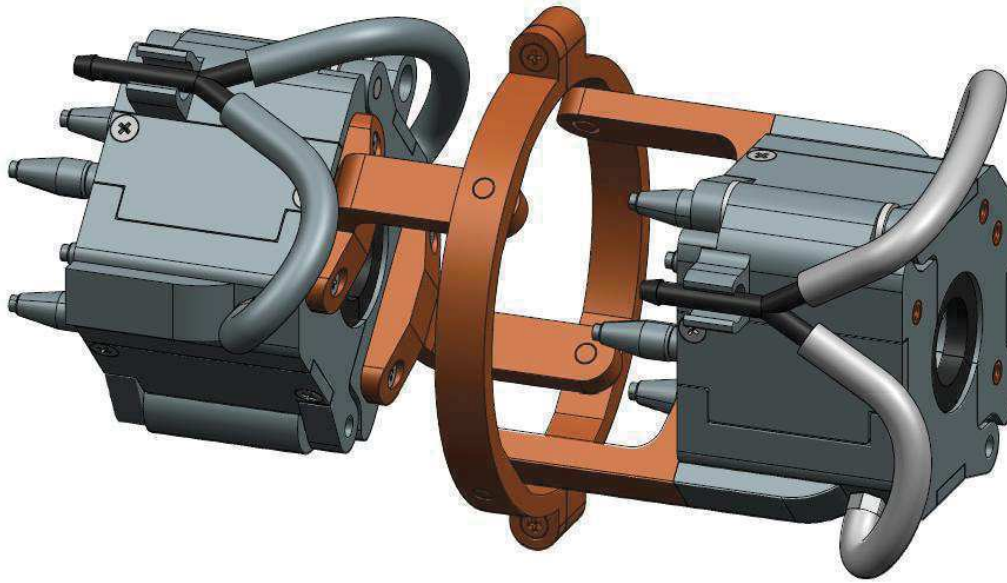


Obr. 51: Sestava enkodéru

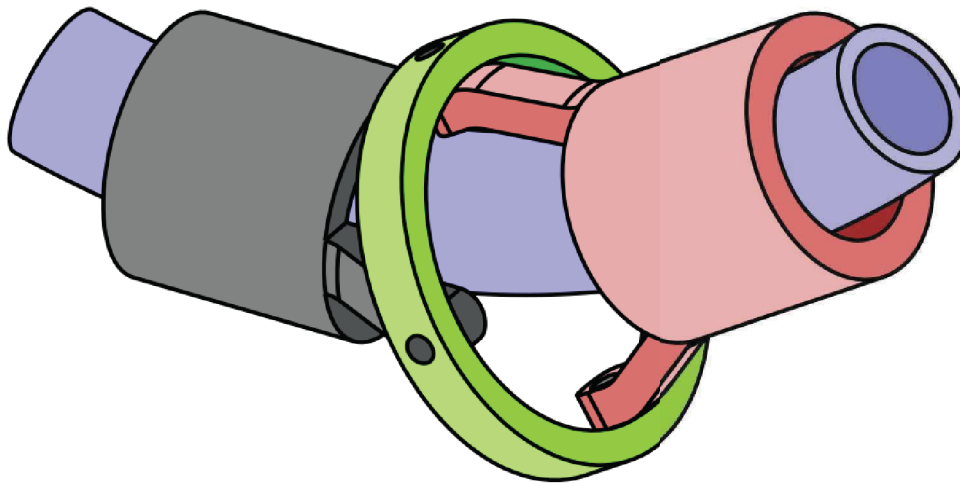
## 7.11. Spojení všech částí manipulátoru

Manipulátor se skládá ze tří částí. Dvě z těchto částí obsahují po čtyřech sondách, poslední obsahuje enkodér. Každá část má přitom vlastní sadu koleček a je schopna samostatného pohybu po trubce. Tyto části je nutné spojit tak, aby bylo možné manipulátorem pohybovat jako jedním celkem. Zároveň je nutné zajistit konstantní natočení mezi částmi se sondami tak, aby docházelo k ideálnímu překryvu drah sond.

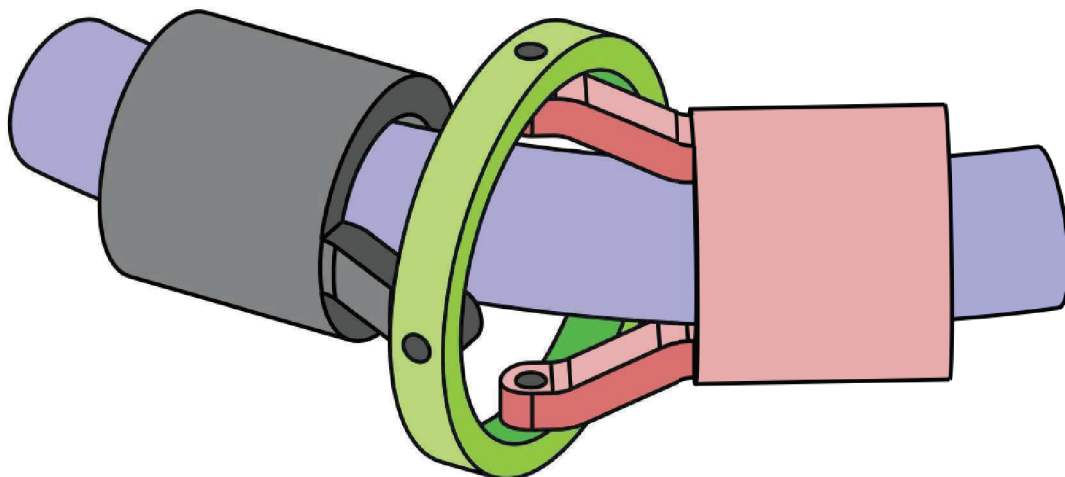
První možností, jak tyto funkce zajistit, je pomocí spoje na principu kardanového kloubu. Mezi přední a zadní část je vložena objímka, která je k oběma částem připevněna pomocí čepů. Ty umožňují natočení obou částí manipulátoru vůči sobě.



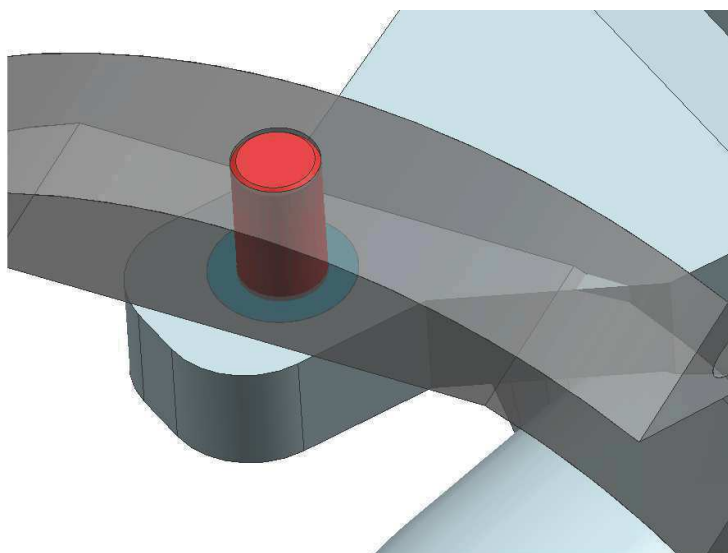
Obr. 52: Objímka spojující přední a zadní část manipulátoru.



Obr. 53: Natočení přední části manipulátoru vůči zadní části ve vertikálním směru



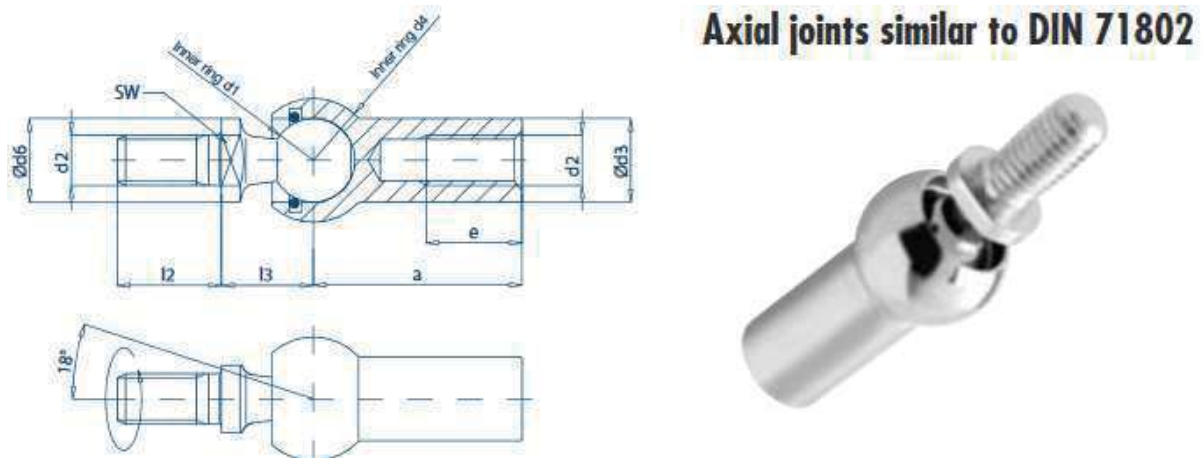
Obr. 54: Natočení přední části manipulátoru vůči zadní části v horizontálním směru



Obr. 55: Detail spojení objímky a přední části manipulátoru. Červeně je vyznačen čep, nalisovaný do objímky, modře je vyznačené kluzné pouzdro, nalisované do přední části manipulátoru.

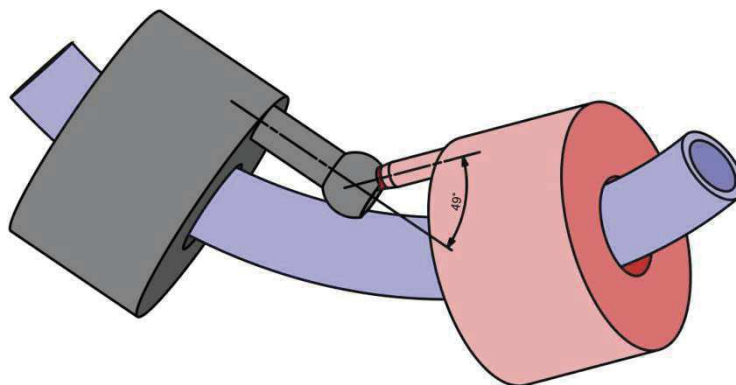
Tento způsob je ale poměrně složitý. Vložená objímka musí být stejně jako všechny ostatní části manipulátoru spojena ze dvou částí, je tedy nutné řešit jejich spojení. Při rozdělení objímky na dvě poloviny, tak jako je to na obr. 52, je problém při montáži - pokud by byla absolutně tuhá, nebude možné ji vůbec nasadit. Při testovacím vytištění objímky na 3D tiskárně z materiálu PLA, který má určitou pružnost, sice montáž není problém, ale přesto je jasné, že tento způsob spojení není ideální. Dělení objímky na více částí by dále přispívalo k složitosti zařízení a možná i montáže, což není žádoucí.

Další, možná jednodušší možností by bylo využití spoje na principu kulového kloubu. Ten by zajistil spojení mezi jednotlivými částmi i konstantní natočení.



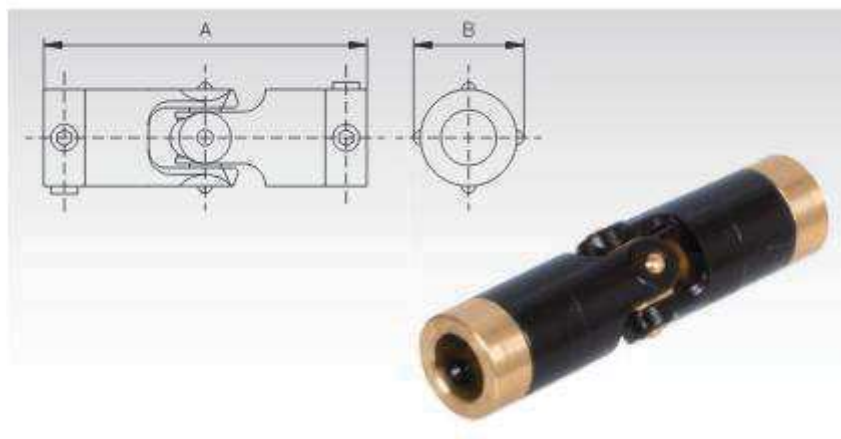
Obr. 56: Kulový kloub AXA 8 M5 [31]

Při návrhu je potřeba počítat s určitým volným prostorem mezi částmi manipulátoru nesoucími sondy (kvůli kabeláži). Čím je tento prostor větší, tím roste i úhel, o který jsou části vůči sobě natočeny v zahnutí trubky. V tomto případě je bohužel tak velký, že kulový kloub není možné použít - viz obr. 57. Na obrázku je úhel  $49^\circ$ , běžně se tyto klouby používají pro úhly  $\pm$  cca  $18^\circ$ , viz obr. 56.



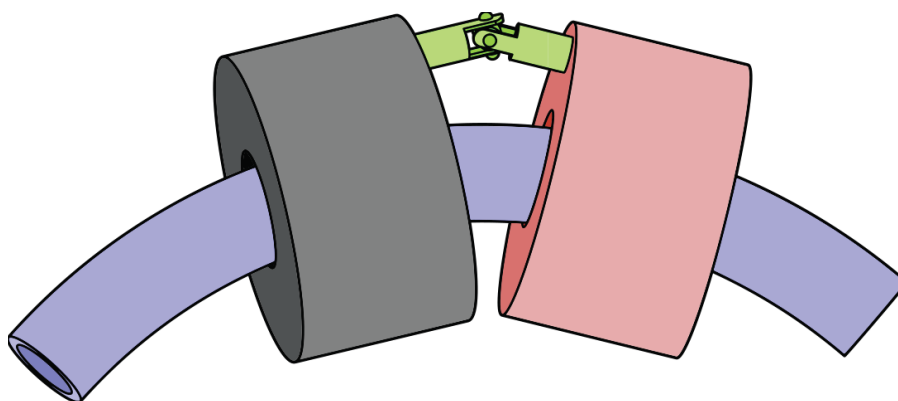
Obr. 57 Úhel mezi částmi kulového kloubu

Tento úhel tedy znemožňuje použití kulového kloubu. Stejnou funkci jako kulový kloub by ale dokázal zastat i kardanový kloub. Některé kardanové klouby vyrobené z plastu dokážou pracovat až pod úhlem  $45^\circ$ , například kloub na obrázku 58. To je sice stále méně než  $49^\circ$  zmiňovaných na obrázku 57, ale toto číslo vychází pouze z odhadu velikosti prostoru pro kabeláž mezi přední a zadní částí. Ve skutečnosti tento prostor může být menší. Tato informace bude dostupná až po testování prototypu.



Obr. 58: Kardan [32]

Pro návrh délky kardanu je důležitá minimální vzdálenost mezi přední a zadní částí. Ta musí být taková, aby se i při nejméně příznivém natočení manipulátoru (obr. 58) mezi obě části vešla kabeláž.



Obr. 59 Spojení manipulátoru pomocí kardanu

Výhodou tohoto typu kardanového kloubu je to, že je určený k nasazení na hřídel. Ta tedy musí být mezi ním a částmi manipulátoru. Změnou délky této hřídele dojde ke změně vzdálenosti mezi přední a zadní částí. Potřebná délka spojovací hřídele se tedy určí při testování. Důležité je jen pamatovat na to, že hřídele na obou stranách musí být stejně dlouhé.

Všechny hlavní tři části manipulátoru - dvě části se sondami a část s enkodérem - jsou navrženy tak, aby na ně bylo možné připojit jakýkoli z výše zmíněných spojů. Konstrukce je v tomto ohledu modulární - pokud se jeden způsob spojení neosvědčí, je možné ho nahradit jiným. Připojení je zajištěno pomocí závitových vložek, lisovaných do součástí pomocí tepla.



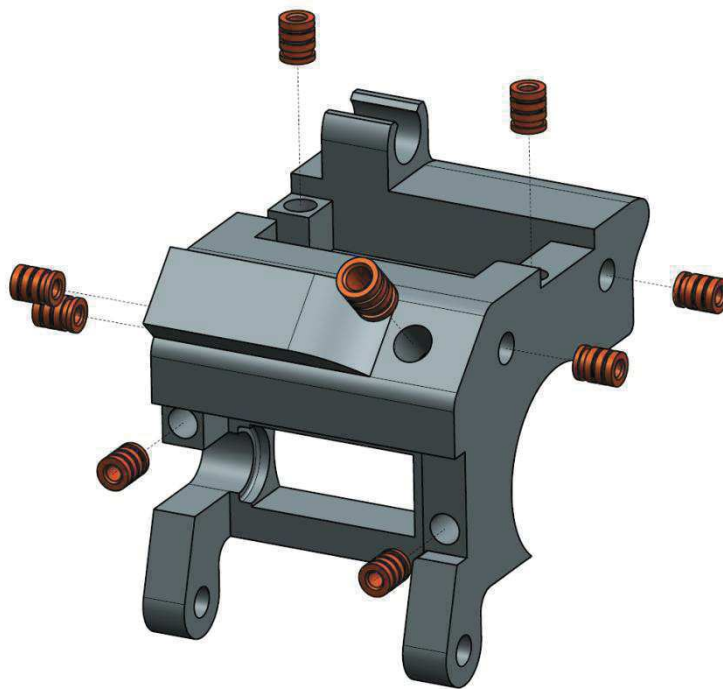


Obr. 60: Příklad závitové vložky zalisované do plastu [33]

## 8. Montáž manipulátoru

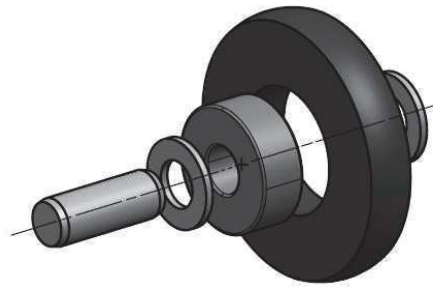
V této části je na obrázcích zobrazen postup montáže manipulátoru.

### 8.2. Polovina rámu

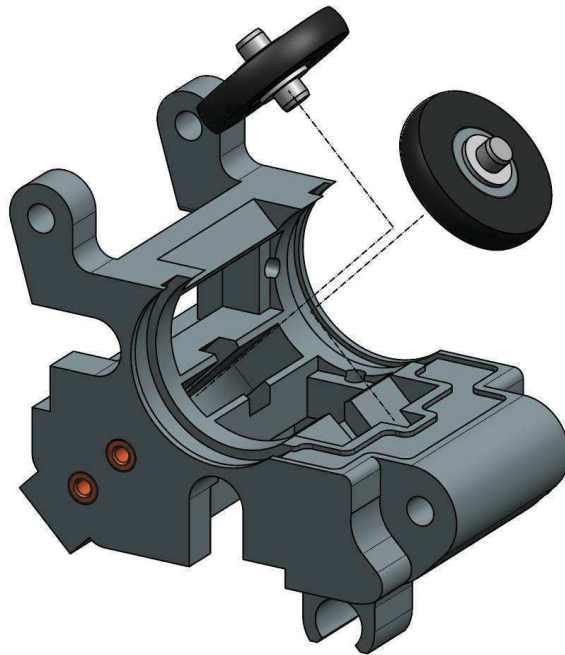


Obr. 61: Lisování závitových vložek do těla manipulátoru

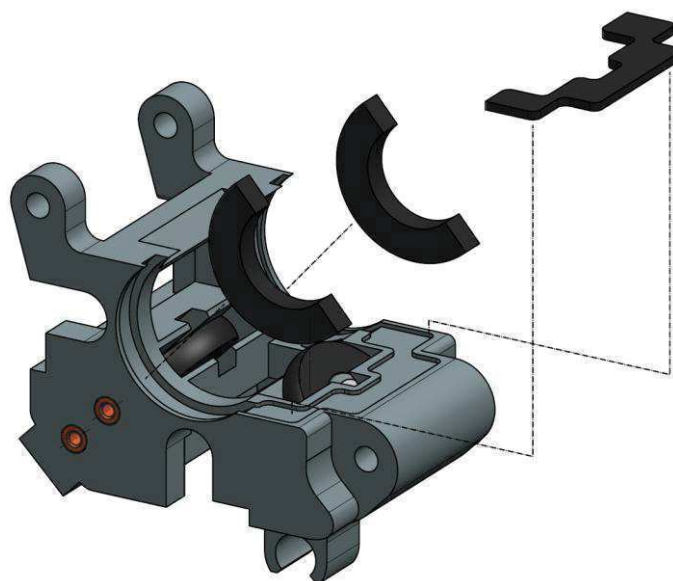




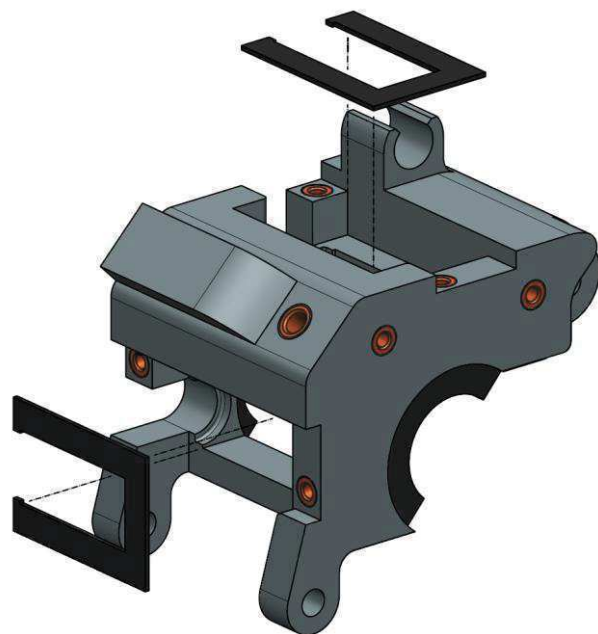
Obr. 62: Podsestava kolečka



Obr. 63: Vložení koleček do drážek



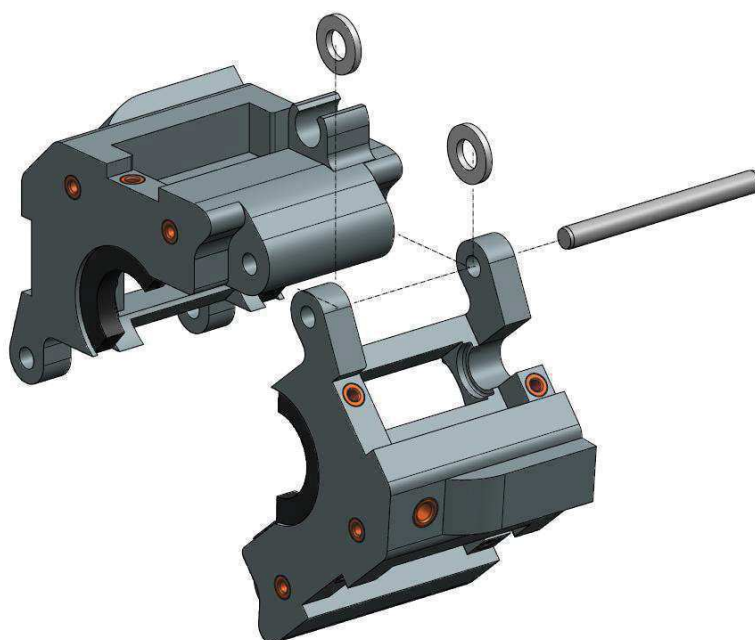
Obr. 64: Nalepení těsnění



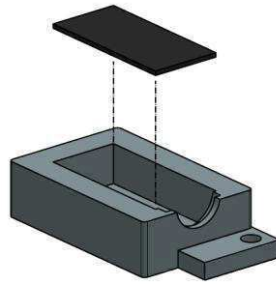
Obr. 65: Nalepení těsnění víka

Druhá polovina rámu není úplně tvarově totožná, ale montují se na ni stejné díly, proto je její smontování vynecháno.

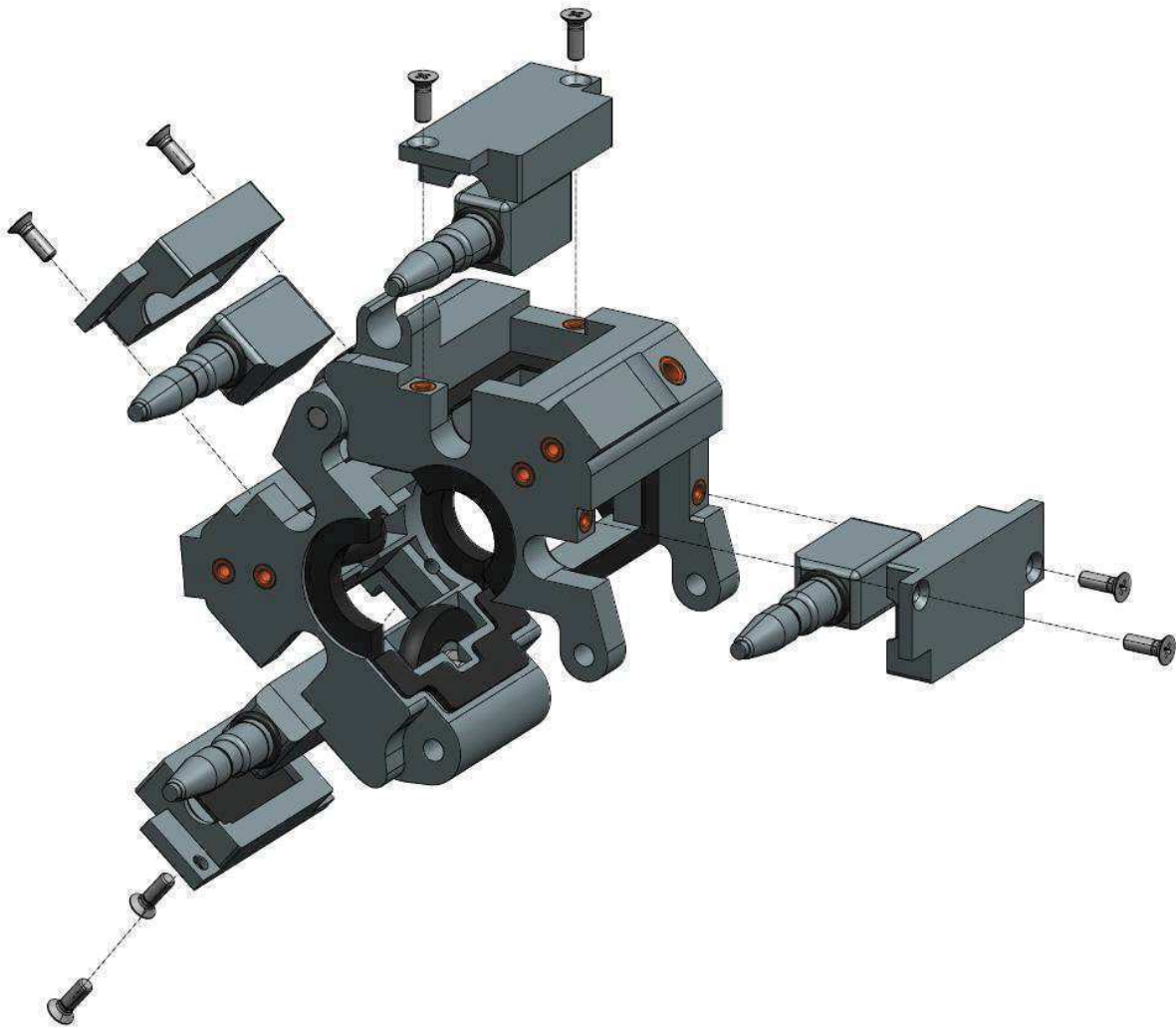
### 8.3. Spojení polovin a montáž sond



Obr. 66: Spojení polovin v pantu pomocí kolíku a podložek

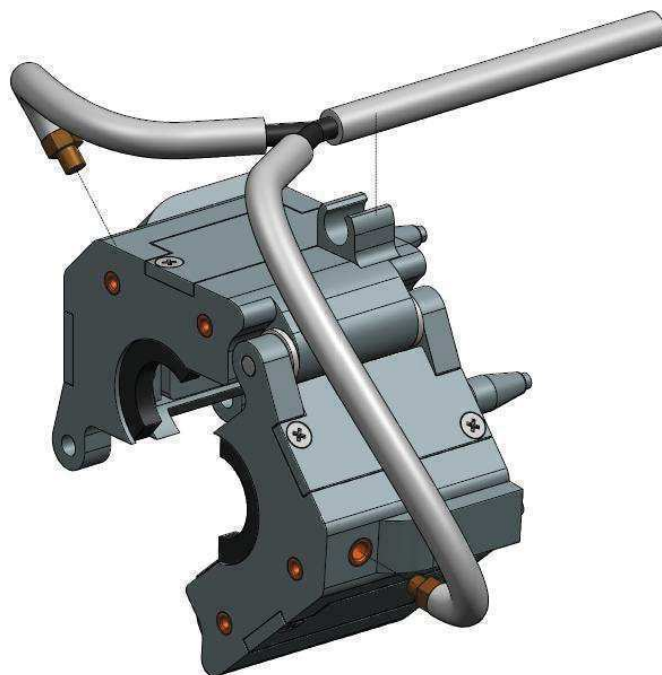


Obr. 67: Vložení pryžové pružiny do víka sondy



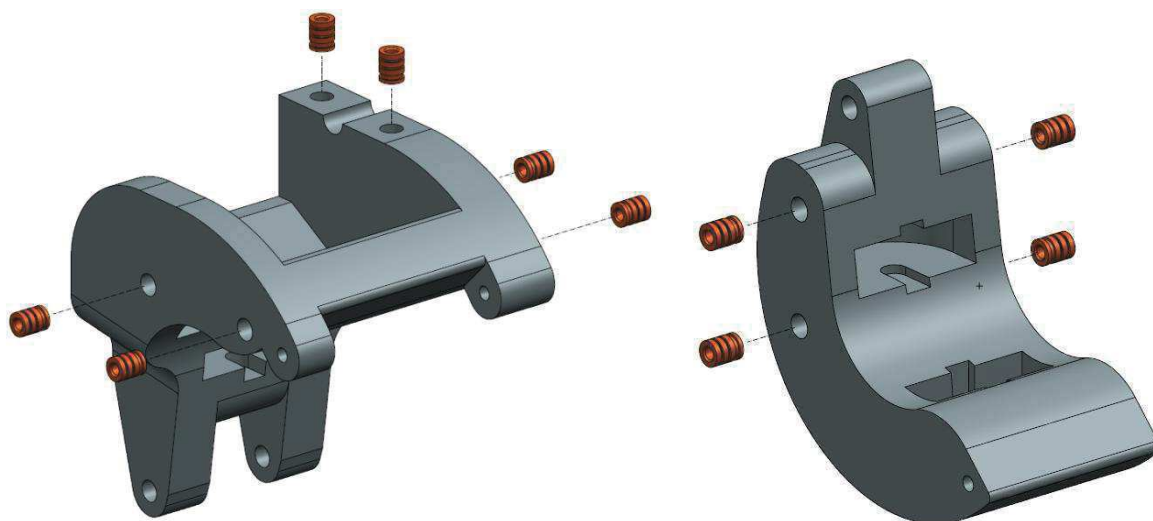
Obr. 68: Vložení ultrazvukových sond a zajištění víky se šrouby

## 8.4. Připojení systému pro přívod kontaktní kapaliny

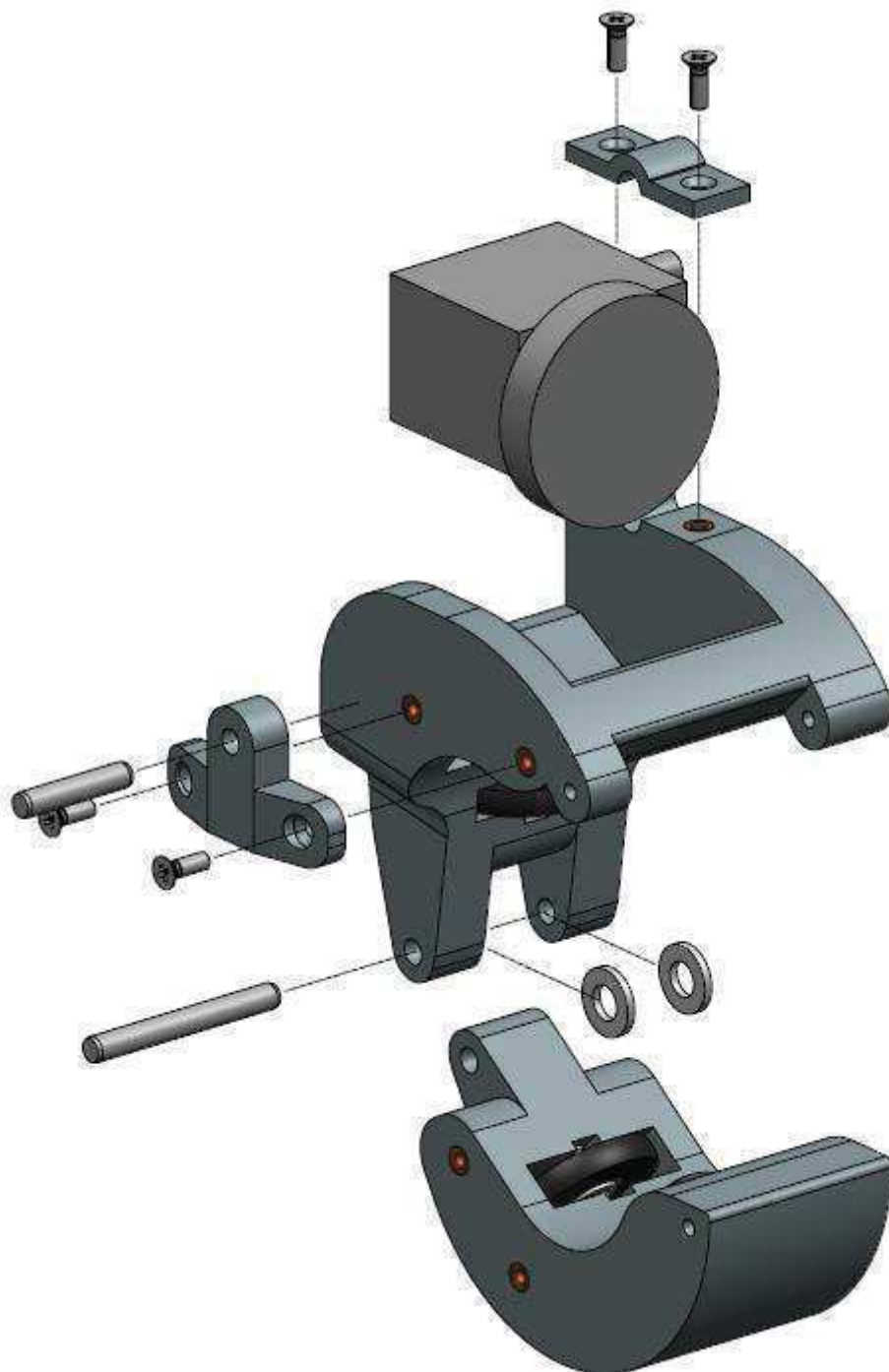


Obr. 69: 8.4. Připojení systému pro přívod kontaktní kapaliny

## 8.5. Montáž sestavy enkodéru



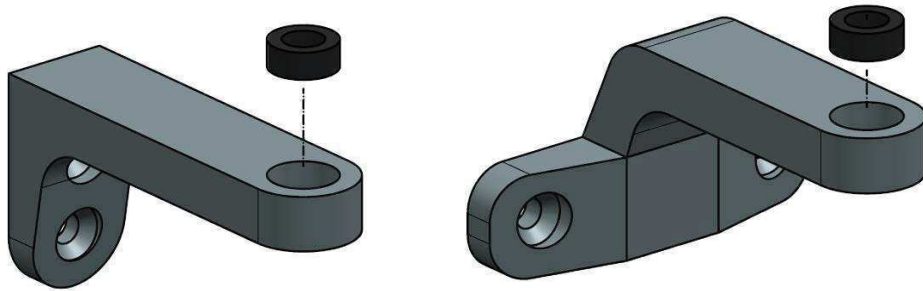
Obr. 70: Vložení závitových vložek



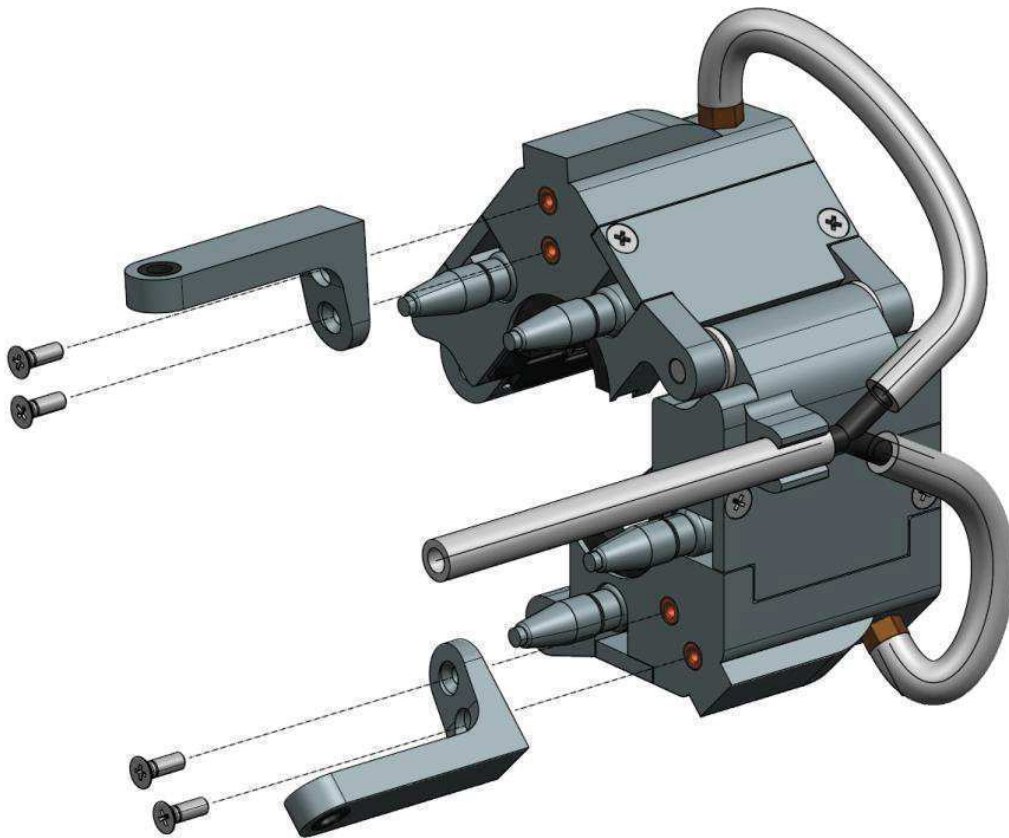
Obr. 71: Montáž zbylých dílů sestavy. Montáž koleček je totožná jako u části manipulátoru nesoucího sondy.

## 8.6. Montáž spojovacích kusů na jednotlivé části manipulátoru

Pro názornost bude použito pokaždé jiné spojení. Mezi měřicími částmi manipulátoru to bude "velký" kardanový spoj s objímkou okolo trubky; mezi přední částí a enkodérem bude "malý" kardanový spoj.

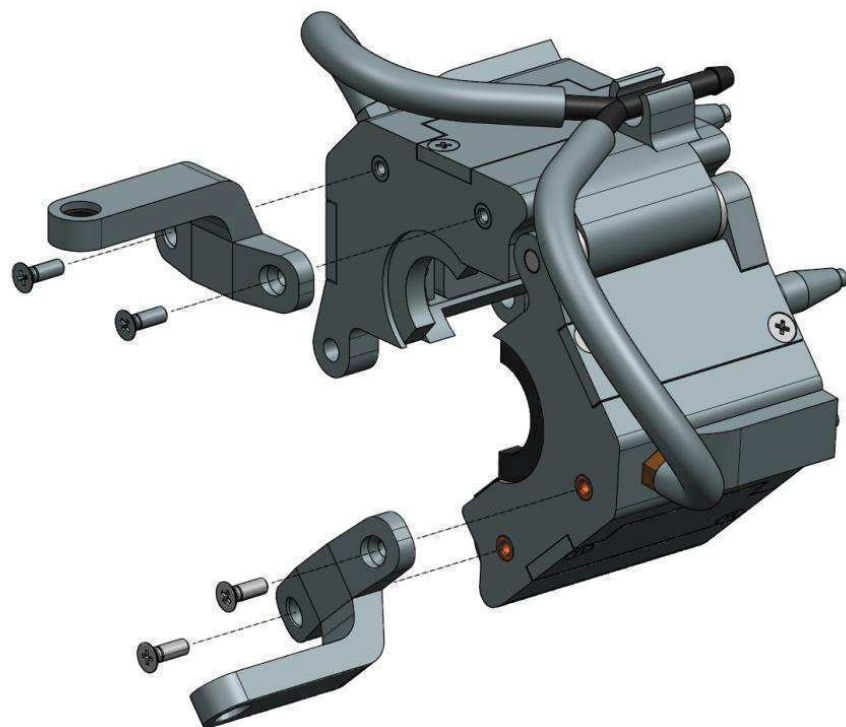


Obr. 72: Nalisování kluzných pouzder do ramen kardanového spoje

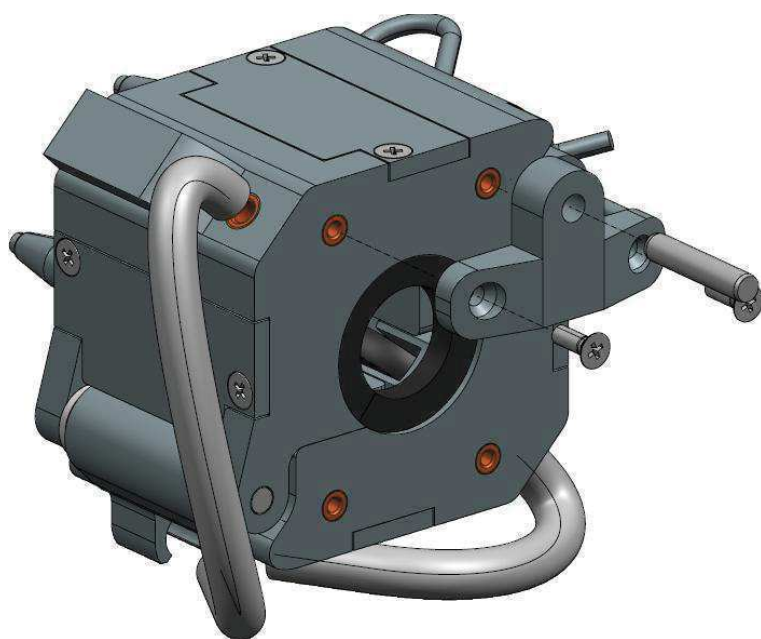


Obr. 73: Montáž ramen na přední část manipulátoru





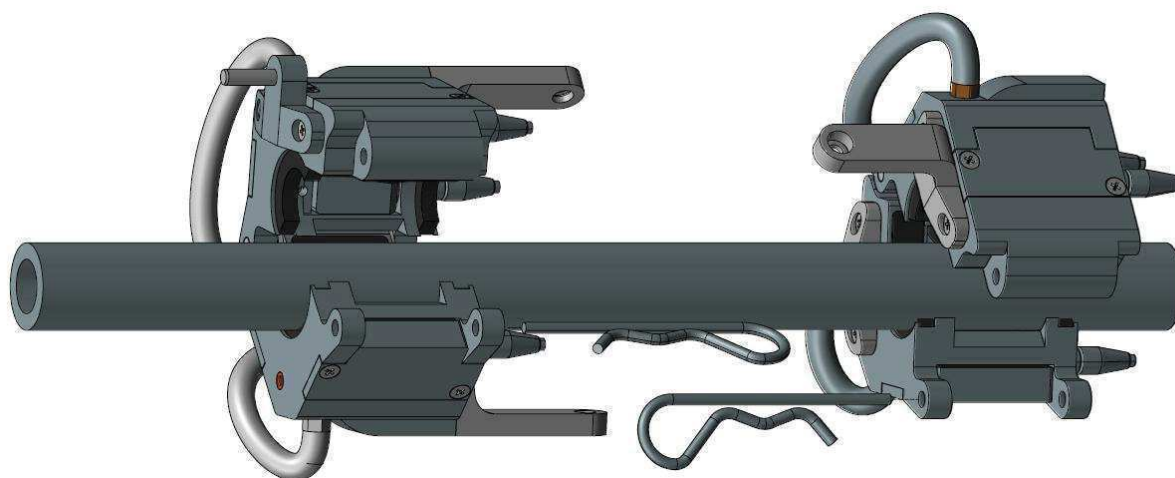
Obr. 74: Montáž ramen na zadní část manipulátoru



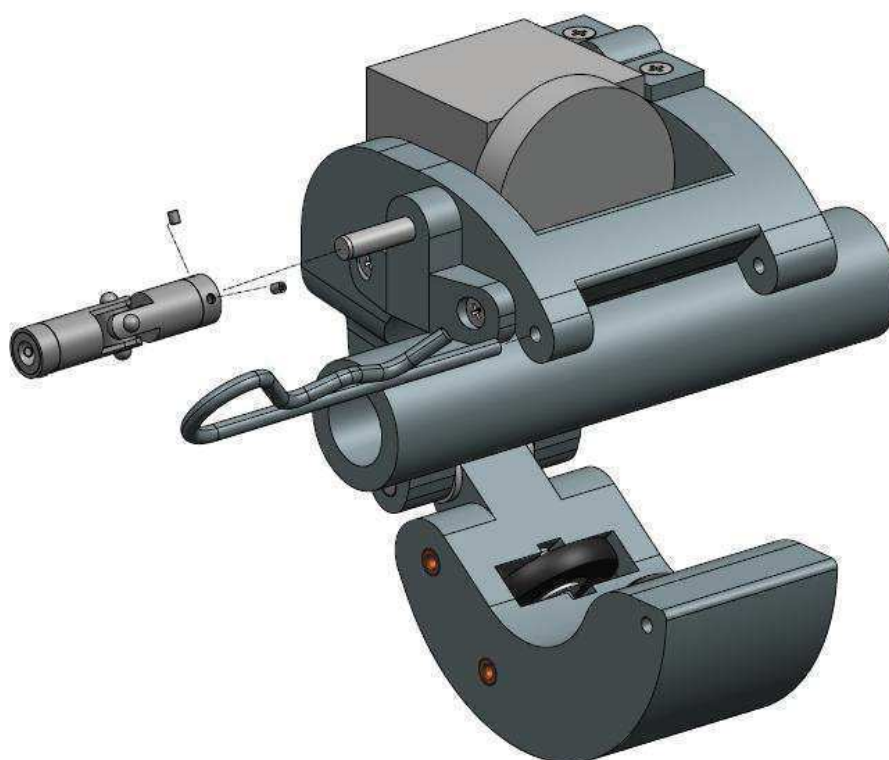
Obr. 75: Montáž připojení pro část s enkodérem na přední část manipulátoru



## 8.7. Nasazení částí manipulátoru na trubku a spojení



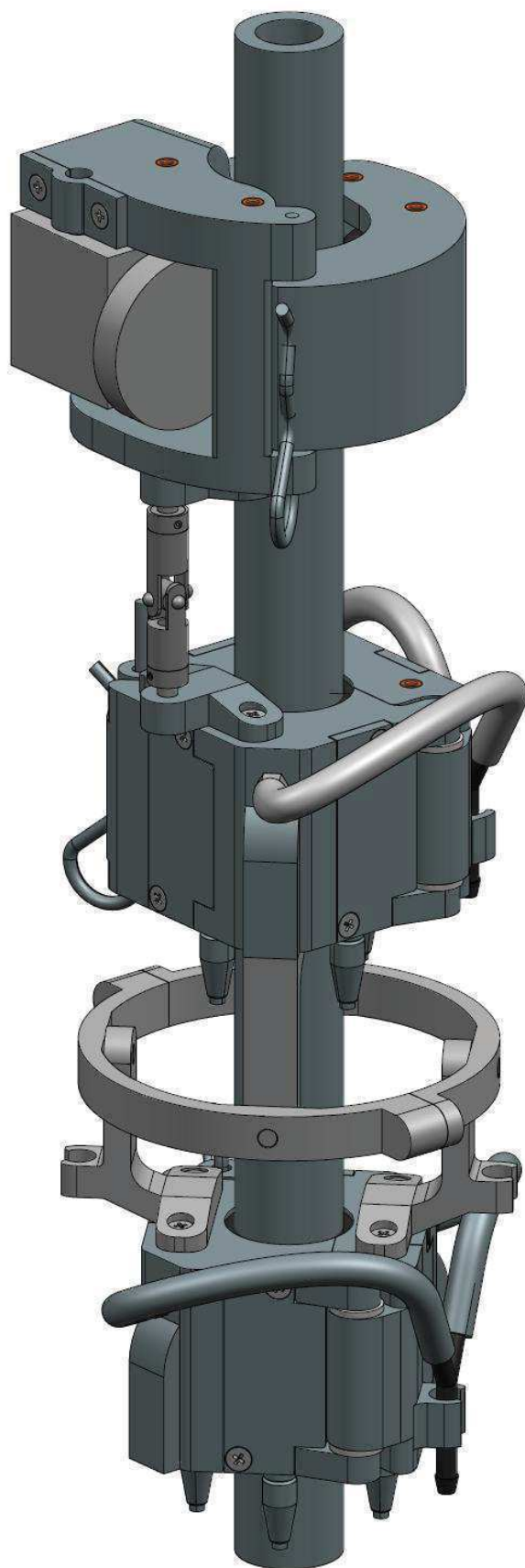
Obr. 76: Nasazení částí manipulátoru na trubku a zajištění pomocí závlačky



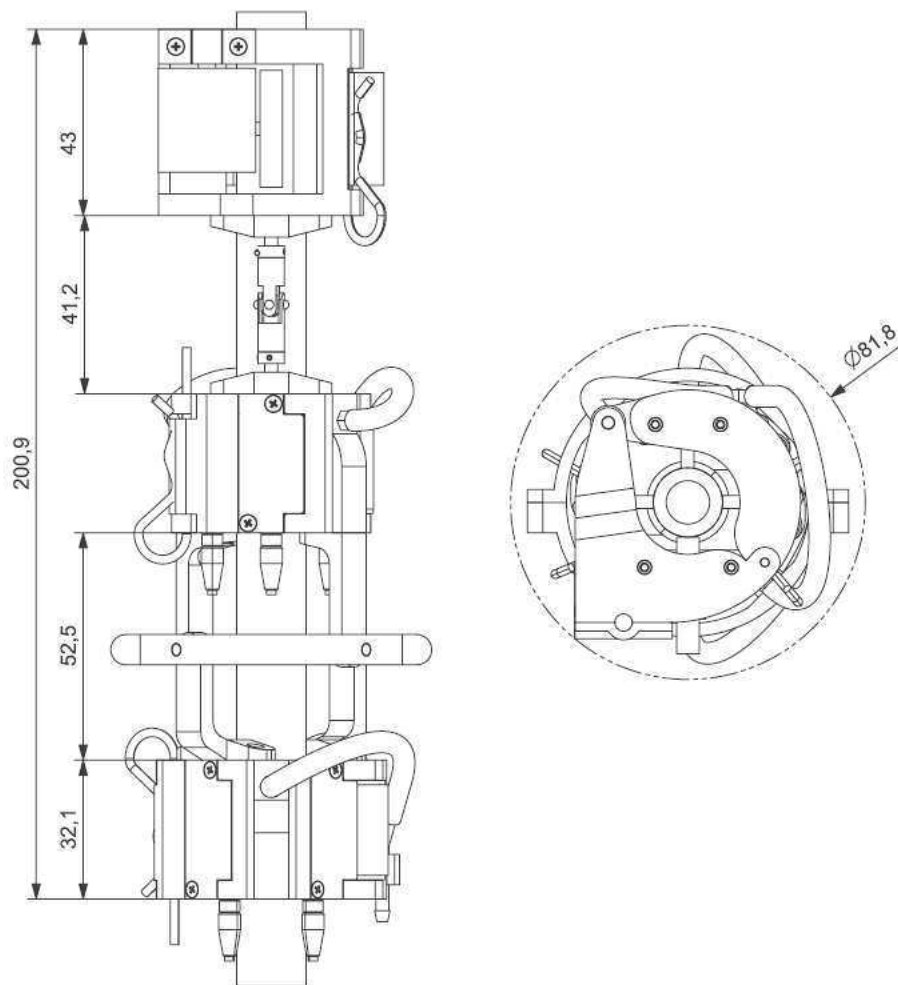
Obr. 77: Nasazení části s enkodérem na trubku a zajištění pomocí závlačky



Obr. 78: Spojení objímky kardanu



Obr. 79: Kompletní manipulátor nasazený na trubce



Obr. 80: Celkové výsledné rozměry manipulátoru

## 9. Zhodnocení a závěr

Tato práce je zaměřena na vývoj manipulátoru pro ultrazukové měření tloušťky stěny trubky. V první části obsahuje teoretický úvod do ultrazukového měření, do typů sond a výběr vhodné sondy. Následuje seznámení se základními typy komerčně dostupných manipulátorů pro podobné účely a rozbor jejich konstrukce.

Samotné konstrukční řešení vychází z inovativní koncepce použití většího množství sond, které by mělo vést k zásadnímu zrychlení celého měření. Výsledný manipulátor je složen ze tří částí, z nichž dvě nesou po čtyřech sondách a poslední slouží ke snímání polohy enkodérem.

Manipulátor má řadu parametrů, které je nutné vyladit při testování prototypu. Mezi hlavní úskalí patří těsnění vnitřního prostoru manipulátoru, ze kterého by v ideálním případě neměla

unikat kontaktní kapalina sond. Navržení vhodného materiálu a tvaru těsnění bude vyžadovat další pozornost a především reálné testování na prototypu.

Dalším obtížným místem je spojení jednotlivých částí manipulátoru. Mezi částmi se sondami je nezbytné udržet konstantní úhel, aby docházelo k ideálnímu překryvu jejich drah při posuvu manipulátoru po trubce. Navržené řešení obsahuje dvě možnosti, obě na principu kardanového kloubu, pokaždé však jinak implementovaného. Obě možnosti je potřeba reálně otestovat na prototypu.

Přílohou práce jsou 3D modely všech dílů, které budou sloužit k výrobě jednotlivých částí manipulátoru pomocí 3D tisku, výkresy všech těsnění a výkres hlavní sestavy.

## 10. Seznam obrázků

Obr. 1: Logo CVŘ a příklady zde vyvinutých manipulátorů [18] .....	2
Obr. 2: Konstrukce sondy s jedním elementem a dvojité sondy [14] .....	5
Obr. 3: Konstrukce víceprvkového elementu a typické Phased Array sondy [21] .....	6
Obr. 4: Skenování sondou s jedním elementem ve srovnání se skenováním sondou typu Phased Array .....	6
Obr. 5: Směr pohybu částic materiálu při podélném vlnění. [15] .....	7
Obr. 6: Směr pohybu částic materiálu při příčném vlnění. [15].....	7
Obr. 7: Příčné vlnění [16].....	8
Obr. 8: Typy vazeb mezi sondou a zkoušeným materiálem [2].....	9
Obr. 9: Sonda 10CCEV35 [27] .....	10
Obr. 10: Sonda povrchových vln A574S [22].....	10
Obr. 11: Zařazení a popis sondy A574S [13].....	11
Obr. 12: Phoenix ISL Bracelet [25] .....	12
Obr. 13: Phoenix ISL SpArc [24].....	13
Obr. 14: ChainScanner [17] (zde v konfiguraci pro kontrolu svaru) .....	14
Obr. 15: Použití ChainScanneru [17] .....	14
Obr. 16: MapROVER [28] .....	15
Obr. 17: Phoenix ISL PET Scanner [26].....	15
Obr. 18: Rozmístění sond okolo trubky .....	17
Obr. 19: Prototyp manipulátoru pro axiální pohyb po trubce [11].....	18
Obr. 20: Porovnání vzájemné polohy koleček a sondy .....	19
Obr. 21: Výsledné rozložení sond a koleček na jedné polovině manipulátoru .....	19
Obr. 22: Olympus Mini Wheel Encoder [30].....	20
Obr. 23: Při upevnění enkodéru k tělu manipulátoru se jeho kolečko v zahnutí trubky nachází mimo osu .....	21
Obr. 24: Výsledné rozložení sond, koleček a enkodéru na trubce .....	22

Obr. 25	Vzájemné natočení sond v zahnuté části trubky .....	22
Obr. 26:	Rozpojování přední a zadní poloviny manipulátoru .....	23
Obr. 27:	Hobermanův mechanismus a jeho využití k sevření trubky. Na obrázku (i) je bíle vyznačen jeden samostatný element mechanismu [22].....	23
Obr. 28:	Podélně rozšířený Hobermanův mechanismus pro nesení ultrazvukových sond .....	24
Obr. 29:	Varianta rámu mechanismu z dvou polovin spojených pantem .....	25
Obr. 30:	Zajištění přitlaku koleček pomocí lineárního motoru [11] .....	26
Obr. 31:	Kolečko manipulátoru.....	26
Obr. 32:	Konstrukce uložení hřídele s víkem.....	27
Obr. 33:	Konstrukce uložení hřídele zevnitř manipulátoru.....	27
Obr. 34:	Přítlak sondy pomocí vinuté pružiny - PET Scanner [12] .....	28
Obr. 35:	Rozdíl pozice sondy v rovné části trubky (znázorněno tmavě) a v zahnuté části (světle).....	29
Obr. 36:	Pružný element umístěný ve víku sondy .....	30
Obr. 37:	Těsnění víka sondy a konektoru .....	31
Obr. 38:	Rozdělení částí manipulátoru s přesazenou dělicí rovinou .....	32
Obr. 39:	Realizace dělicí roviny.....	32
Obr. 40:	Přívod kontaktního média v manipulátoru Phoenix Bracelet .....	33
Obr. 41:	Kanálky pro přívod kontaktního média (červeně). Oranžově je vyznačena závitová vložka a zeleně přípojka pro hadičku.....	33
Obr. 42:	Schéma přívodu kontaktní kapaliny k sondám .....	34
Obr. 43:	Realizace přívodu kontaktní kapaliny.....	35
Obr. 44:	Těsnění mezi sondou a trubkou v systému Sp-Arc [24] .....	36
Obr. 45:	Těsnění každé sondy zvlášť × těsnění všech sond najednou .....	36
Obr. 46:	Dělené těsnění [29] .....	37
Obr. 47:	Průřez trubky v různých vzdálenostech od stykového bodu koleček a trubky .....	38
Obr. 48:	Těsnění mezi manipulátorem a trubkou. Na obrázku je jedna polovina přední části manipulátoru.....	38
Obr. 49:	Těsnění plochy mezi oběma polovinami manipulátoru .....	39
Obr. 50:	Realizace těsnění.....	39
Obr. 51:	Sestava enkodéru .....	40
Obr. 52:	Objímka spojující přední a zadní část manipulátoru.....	41
Obr. 53:	Natočení přední části manipulátoru vůči zadní části ve vertikálním směru .....	41
Obr. 54:	Natočení přední části manipulátoru vůči zadní části v horizontálním směru .....	42
Obr. 55:	Detail spojení objímky a přední části manipulátoru. Červeně je vyznačen čep, nalisovaný do objímky, modře je vyznačené kluzné pouzdro, nalisované do přední části manipulátoru.....	42



Obr. 56: Kulový kloub AXA 8 M5 [31].....	43
Obr. 57 Úhel mezi částmi kulového kloubu.....	43
Obr. 58: Kardan [32].....	44
Obr. 59: Příklad závitové vložky zalisované do plastu [33] .....	45

## 11. Seznam tabulek

Tab. 1: Koncepce pohybu po trubce u průmyslových manipulátorů .....	16
Tab. 2: Výhody a nevýhody obou variant konstrukce rámu .....	25

## 12. Zdroje

- [1] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-807-2045-914.
- [2] REGAZZO, Richard a Marcela REGAZZOVÁ. *Ultrazvuk: základy ultrazvukové defektoskopie*. Praha: BEN - technická literatura, 2013. Senzory neelektrických veličin. ISBN 9788073004668.
- [3] SEDLÁK, Bedřich a Ivan ŠTOLL. *Elektřina a magnetismus*. Vyd. 3., V nakl. Karolinum 2. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2198-2.
- [4] NELLIGAN, Tom. Ultrasonic Thickness Gaging. *Olympus Scientific Solutions Americas Corp* [online]. Waltham, USA [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/en/applications-and-solutions/introductory-ultrasonics/introduction-thickness-gaging/>
- [5] FOWLER, Kenneth A., Gerry M. ELFBAUM a Thomas J. NELLIGAN. Theory and Application of Precision Ultrasonic Thickness Gaging. *Olympus Scientific Solutions Americas Corp* [online]. Waltham, USA [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/cs/resources/white-papers/theory-and-application-of-precious-ultrasonic-thickness-gaging/>
- [6] Single Element Transducer Modes. *Olympus Scientific Solutions Americas Corp* [online]. Waltham, USA [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: [https://www.olympus-ims.com/cs/ndt-tutorials/thickness-gage/measurement\\_modes/](https://www.olympus-ims.com/cs/ndt-tutorials/thickness-gage/measurement_modes/)
- [8] NELLIGAN, Tom. An Introduction to Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing. *Olympus Scientific Solutions Americas Corp* [online]. Waltham, USA [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/en/resources/white-papers/intro-ultrasonic-transducers-ndt-testing/>
- [9] ChainSCANNER: Chain-Link Mounted Scanner: User's Manual. *Olympus Scientific Solutions Americas Corp* [online]. Waltham, USA: Olympus, ©2009, 2014, 2017 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/cs/scanners/chain/>
- [10] A-Scan Data. *Olympus Scientific Solutions Americas Corp* [online]. Waltham, USA [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/cs/ndt-tutorials/instrumentation/ascan/>
- [11] LEE, Sang Heon. Design of the out-pipe type pipe climbing robot. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2013, 14(9), 1559-1563. DOI: 10.1007/s12541-013-0210-z. ISSN 2234-7593. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s12541-013-0210-z>



- [12] BREWIS, Andrew. Phoenix ISL - PET Scanner: Pipe Elbow Inspection on pipes from 4" up to 24"OD. In: *Youtube* [online]. 7. 11. 2018 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=wqQqfwaOHIE>
- [13] *Panametrics Ultrasonic Transducers: Wedges, Cables, Test blocks*. Waltham, USA: Olympus NDT, ©2010. Generating Ultrasound (Transducers). Olympus Scientific Solutions Americas Corp [online]. Waltham, USA [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/es/ndt-tutorials/flaw-detection/generating-ultrasound/>
- [14] Generating Ultrasound (Transducers). *Olympus Scientific Solutions Americas Corp* [online]. Waltham, USA [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/es/ndt-tutorials/flaw-detection/generating-ultrasound/>
- [15] Wave Propagation. *Olympus Scientific Solutions Americas Corp* [online]. Waltham, USA [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/es/ndt-tutorials/flaw-detection/wave-propagation/>
- [16] MARANÒ, Stefano. Rayleigh wave: Graphical representation of the displacement induced by a single Rayleigh wave. In: *WaveDec: a tool for wavefield decomposition* [online]. ©2017 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <http://mercalli.ethz.ch/~marra/WaveDec/scientific.html>
- [17] OLYMPUS IMS. HydroFORM Phased Array Corrosion System. In: *YouTube.com* [online]. 8. 7. 2015 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=XyWx3OpOdVY>
- [18] NDT laboratoř Plzeň. *Centrum výzkumu Řež, s.r.o.* [online]. Husinec-Řež, ČR: Centrum výzkumu Řež, ©2019 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <http://cvrez.cz/komerčni-sluzby/ndt-laborator-plzen/>
- [19] What is a Phased Array?. *Olympus Scientific Solutions Americas Corp* [online]. Waltham, USA [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/cs/ndt-tutorials/intro/whatispa/>
- [20] CARTE, Mark. Semi Automated Corrosion Mapping using Phased Array Ultrasonics [přednáška]. 5th Pan American NDT Conference, Cancun Mexico, October 2011. Dostupné z: [https://www.ndt.net/article/panndt2011/presentations/55\\_Carte.pdf](https://www.ndt.net/article/panndt2011/presentations/55_Carte.pdf)
- [21] NELLIGAN, Tom, KASS, Dan. Intro to Ultrasonic Phased Array. *Olympus Scientific Solutions Americas Corp* [online]. Waltham, USA [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/en/ultrasonics/intro-to-pa/>
- [22] A574S-RM. In: *Olympus Scientific Solutions Americas Corp* [online]. Waltham, USA [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: [https://www.olympus-ims.com/pt/shop/item/269-productId.570439330\\_269-catId.562036853.html](https://www.olympus-ims.com/pt/shop/item/269-productId.570439330_269-catId.562036853.html)
- [23] SINGH, Puneet a G. K. ANANTHASURESH. A Compact and Compliant External Pipe-Crawling Robot. *IEEE Transactions on Robotics* [online]. 2013, 29(1), 251-260 [cit. 2019-05-04]. DOI: 10.1109/TRO.2012.2214560. ISSN 1552-3098. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6297480/>
- [24] Sp-Arc. In: *Phoenix Inspection Systems Ltd* [online]. Warrington, UK, ©2019 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.phoenixisl.com/sp-arc>
- [25] Bracelet. In: *Phoenix Inspection Systems Ltd* [online]. Warrington, UK, ©2019 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.phoenixisl.com/bracelet>

- [26] BREWIS, Andrew. Phoenix ISL - PET Scanner. In: *YouTube.com* [online]. 7. 11. 2018 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=wqQqfwaOHIE>
- [27] NDT Instruments COBRA. *Olympus Scientific Solutions Americas Corp* [online]. Waltham, USA [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/en/scanners/cobra/>
- [28] MapROVER: Motorised Two-Axis Scanner. *Olympus Scientific Solutions Americas Corp* [online]. Waltham, USA [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/en/scanners/maprover/>
- [29] Arrow-hook, the next generation of uniquely-cut split rotary. *AIGI ENVIRONMENTAL INCORPORATED* [online]. ©2009-2019 [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://www.aigienvironmental.com/News&Events/2015/0323/90.html>
- [30] Mini-Wheel. *Olympus Scientific Solutions Americas Corp* [online]. Waltham, USA [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/en/scanners/mini-wheel/>
- [31] General Catalogue 2010. *Chiavette Unificate* [online]. Bologna, Italy, 2010 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://b2b.partcommunity.com/3d-cad-models/form-axa-din-71802-chiavette-unificate>
- [32] Kardanové kĺby UKM vyrobené z plastu. *COMPONENTS s.r.o.* [online]. 2015 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.components.sk/catalogue/SK406.pdf>
- [33] Threaded insert / press-in / metal / round. *Http://www.directindustry.com* [online]. 2019 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/kerb-konus/product-5001-439208.html>

4

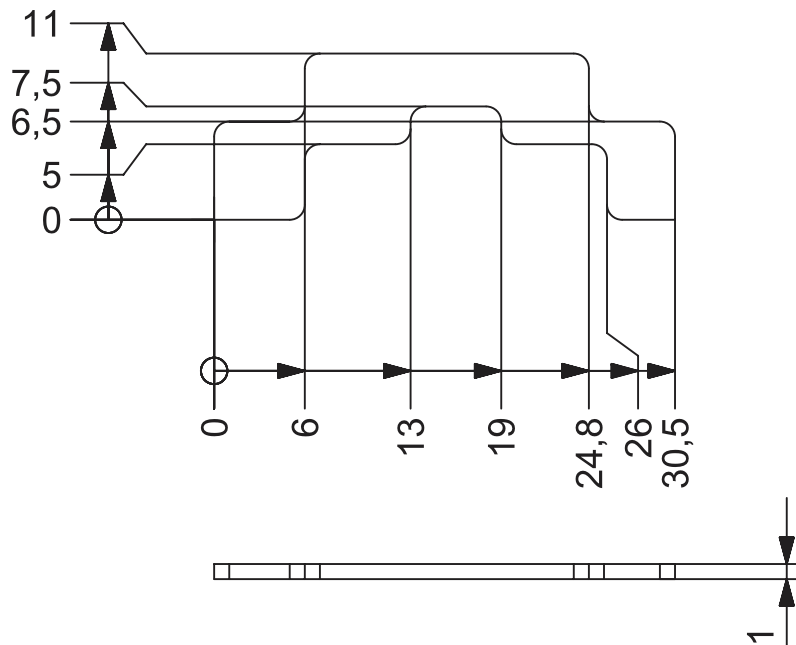
3

2

1

D

D

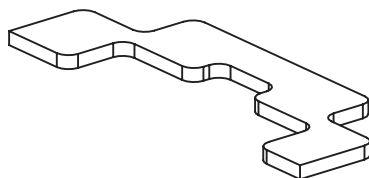


C


C

B

B




			/						-
Poz.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material konecny/vychozi	T.O.	C.hmot.	H.hmot	Cislo vykresu sestavy	Pocet ks.	
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R.weig.	Assembly drawing no.	Quant.	

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name			 FAKULTA STROJNI ZAPADOCESKE UNIVERZITY V PLZNI <small>Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved</small>
Kreslil / Drawn by	21.5.2019	JÍŘÍ MERTA			
Prezkousel / Checked by					
Schvalil / Approved by					
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	Poznamka / Note:

A

A

 ISO 128	Tolerance / Tolerovani	Soubor-model / ASM-file	Projekt / Project:	DP 2019	Meritko / Scale
	ISO 8015 ISO 2768mK	Soubor-vykres / DRW-file		C.sestavy / Assembly No.	
800-16 Left Right Sealing			Rev.	Cislo vykresu / Drawing No.	Format
TĚSNĚNÍ			A	800-16 Left Right Sealing	A4
---			List / sheet no.	1	Pocet listu / sheets
				1	1

4

3

2

1

4

3

2

1

D

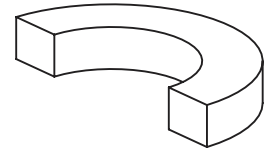
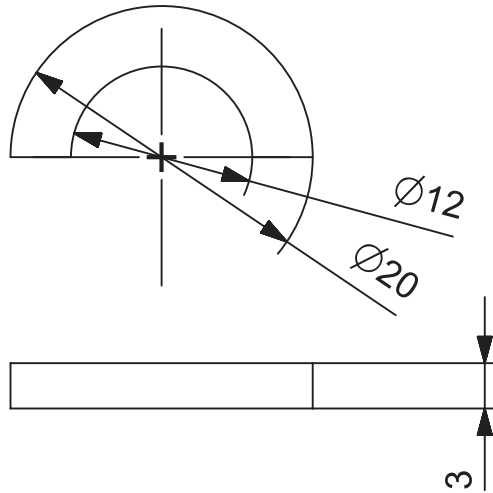
D

C


C

B

B




			/						-
Poz.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material konecny/vychozi	T.O.	C.hmot.	H.hmot	Cislo vykresu sestavy	Pocet ks.	
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R.weig.	Assembly drawing no.	Quant.	

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name			 <p>FAKULTA STROJNI ZAPADOCESKE UNIVERZITY V PLZNI</p> <p><small>Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved</small></p>
Kreslil / Drawn by	21.5.2019	JÍŘÍ MERTA			
Prezkousel / Checked by					
Schvalil / Approved by					
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	Poznamka / Note:

A

A

 <p>ISO 128</p>	<p>Tolerance / Tolerovani</p> <p>ISO 8015 ISO 2768mK</p>	Soubor-model / ASM-file	Projekt / Project:	DP 2019	Meritko / Scale
		900-04 Pipe Sealing			
		Soubor-vykres / DRW-file	C.sestavy / Assembly No.		2:1
		900-04 Pipe Sealing			
Nazev / Title			Rev.	Cislo vykresu / Drawing No.	Format
TĚSNĚNÍ			A	900-04 Pipe Sealing	A4
---			List / sheet no.	1	Pocet listu / sheets
				1	

4

3

2

1

4

3

2

1

D

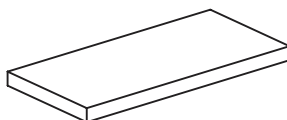
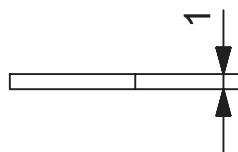
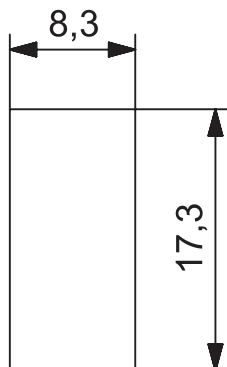
D

C


C

B

B




			/						-
Poz.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material konecny/vychozi	T.O.	C.hmot.	H.hmot	Cislo vykresu sestavy	Pocet ks.	
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R.weig.	Assembly drawing no.	Quant.	

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name			 <p>FAKULTA STROJNÍ ZAPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI</p> <p><small>Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved</small></p>
Kreslil / Drawn by	21.5.2019	JÍŘÍ MERTA			
Prezkoušel / Checked by					
Schválil / Approved by					
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	Poznamka / Note:

A

A

 <p>ISO 128</p>	Tolerance / Tolerovani ISO 8015 ISO 2768mK	Soubor-model / ASM-file	900-06 Probe Cover Spring	Projekt / Project:	DP 2019	Meritko / Scale	2:1		
		Soubor-vykres / DRW-file	900-06 Probe Cover Spring	C.sestavy / Assembly No.					
Nazev / Title <b>PRYŽOVÁ PRUŽINA</b>				Rev.	A	Cislo vykresu / Drawing No.	900-06 Probe Cover Spring	Format	A4
				List / sheet no.	1	Pocet listu / sheets	1		

4

3

2

1

4

3

2

1

D

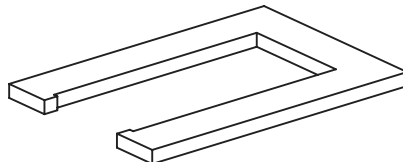
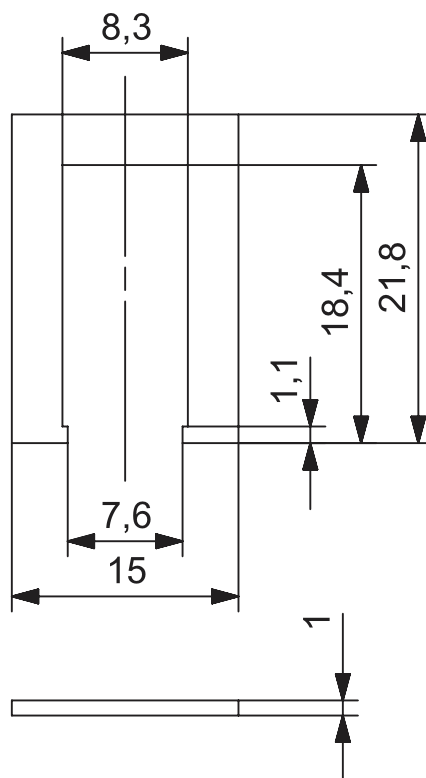
D

C


C

B

B




			/						-
Poz.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material konecny/vychozi	T.O.	C.hmot.	H.hmot	Cislo vykresu sestavy	Pocet ks.	
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R.weig.	Assembly drawing no.	Quant.	

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name			 <b>FAKULTA STROJNI ZAPADOCESKE UNIVERZITY V PLZNI</b> <small>Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved</small>
Kreslil / Drawn by	21.5.2019	JIRÍ MERTA			
Prezkousel / Checked by					
Schvalil / Approved by					
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	Poznamka / Note:

A

A

 Tolerance / Tolerovani ISO 8015 ISO 2768mK	Soubor-model / ASM-file	Projekt / Project:	DP 2019	Meritko / Scale <b>2:1</b>
	Soubor-vykres / DRW-file	900-07 Probe Cover Sealing	C.sestavy / Assembly No.	
Nazev / Title <b>TĚSNĚNÍ</b>		Rev.	Cislo vykresu / Drawing No.	Format
		<b>A</b>	<b>900-07 Probe Cover Sealing</b>	<b>A4</b>
		List / sheet no.	1	Pocet listu / sheets
			1	

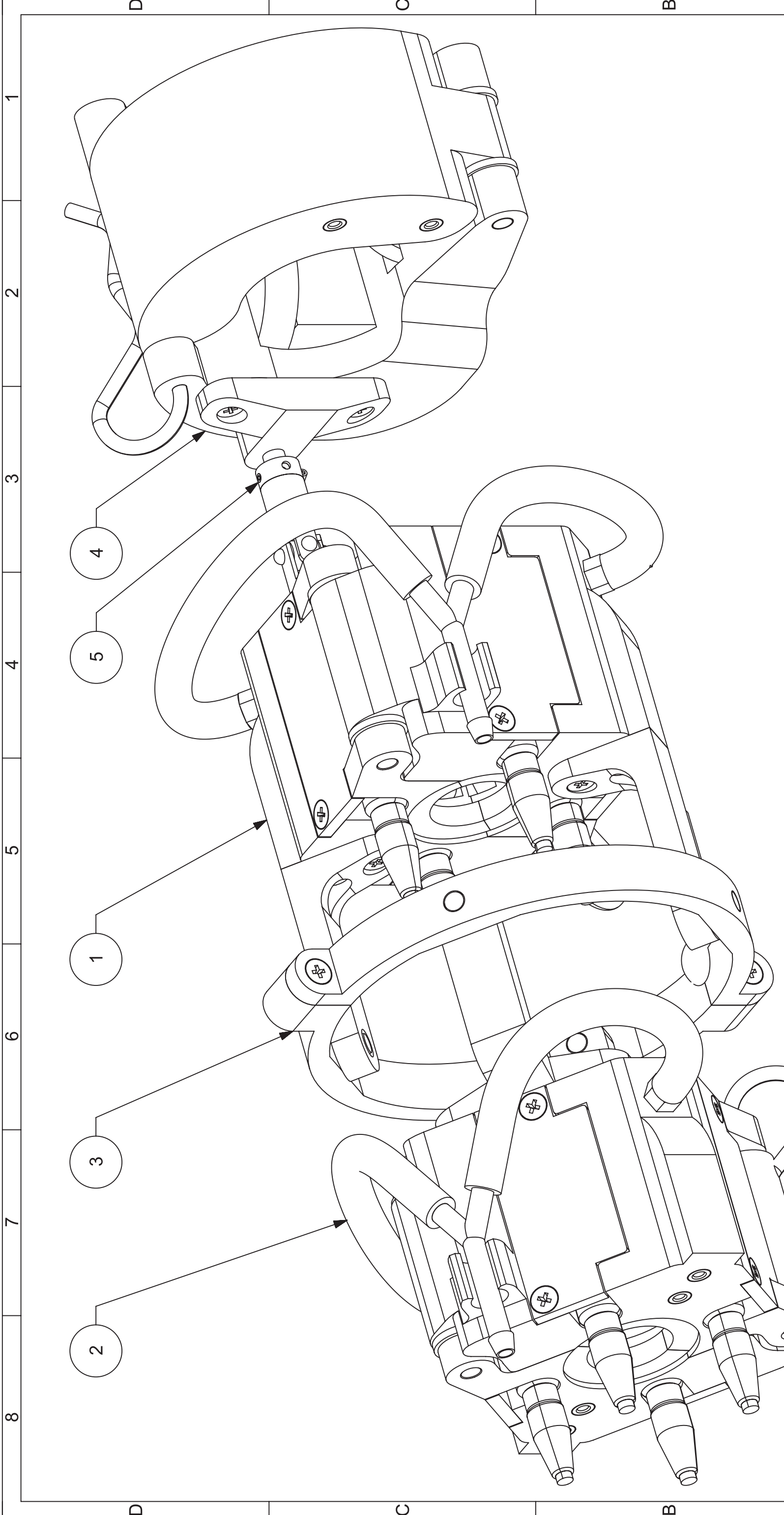
4


3

2

1





 FAKULTA STROJNÍ ZAPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI <small>Všechna práva vyhrazena / All rights reserved</small>		Jméno / Name <b>JÍŘÍ MERTA</b>		Datum / Date <b>21.5.2019</b>	
Kreslí / Drawn by Prezkoušel / Checked by Schválil / Approved by		Datum / Date --- --- ---		Schval. / APP --- --- ---	
Index změny --- ---		Popis změny / change description --- ---		Podpis / Signature --- --- ---	
Tolerance / Tolerovani ISO 8015 ISO 2768mK		Soubor-model / ASM-file 000-00 Main Assy		Projekt / Project: <b>DP 2019</b>	
ISO 128		Soubor-vykres / DRW-file 000-00 Main Assy		C. sestavy / Assembly No. ---	
C. hmot.sestavy ---		000-00 Main Assy		C. hmot.sestavy ---	
Rev. ---		000-00 Main Assy		Císlo vykresu / Drawing No. <b>000-00 Main Assy</b>	
Nazev / Title <b>UT MANIPULÁTOR</b>		Rev. <b>A</b>		Meritko / Scale <b>2:1</b>	
PC NO <b>PART NAME</b>		QTY <b>1</b>		Format <b>A3</b>	
5 <b>800-12 CARDAN ASSY UKM 30 231 00</b>		1		List / sheet no. 1	
4 <b>500-00 ENCODER ASSEMBLY</b>		1		Pocat listu / sheets 1	
3 <b>300-00 CARDAN JOINT ASSY</b>		1		1	
2 <b>200-00 BACK ASSY</b>		1		1	
1 <b>100-00 FRONT ASSY</b>		1		1	
8 <b>7</b>		5 <b>6</b>		2 <b>3</b>	
7 <b>8</b>		6 <b>1</b>		1 <b>1</b>	