



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY**

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**Pohyb robotického hada**

Movements of snake-like robot

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Duc Viet Tran**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Tomáš Hůlka**

**BRNO 2020**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky  
Student: **Duc Viet Tran**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Hůlka**  
Akademický rok: 2019/20

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:

## Pohyb robotického hada

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem studenta bude nejprve analyzovat a stručně popsat dynamiku čtyř základních způsobů hadího pohybu. Dále student navrhne a vytvoří simulační model existující koncepce n-článekového hada, který poté otestuje na definované demonstrační úloze.

### Cíle bakalářské práce:

Stručná rešerše problematiky pohybu robotického hada.  
Vytvoření simulačního modelu robotického hada.  
Otestování funkčnosti vytvořeného modelu na definované úloze.

### Seznam doporučené literatury:

HIROSE, S., Biologically Inspired Robots: Serpentine Locomotors and Manipulators. Oxford University Press, 1993.  
WRIGHT, C., et al. Design of a modular snake robot, in Intelligent Robots and Systems, 2007.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

Práce je zaměřena vytvoření simulačního modelu robotického hada, který je dále testován na demonstrační úloze. První část práce je věnována stručné analýze základních pohybů živých hadů a aplikaci získaných poznatků v bionice. Následuje praktická část, v níž je vypracován koncept robotického hada, jehož modely jsou dále podrobeny jednoduchým testům v simulačním softwaru. Konec práce se zabývá zpracováním poznatků a naměřených hodnot, z nichž jsou následně vyvozeny závěry.

## **ABSTRACT**

The thesis is focused on creation of a simulation model of a snake-like robot, which is then tested on a demonstration task. First part of the thesis is dedicated to a brief analysis of basic snake locomotion and application of acquired knowledge in bionics. After that follows practical part, in which a snake-like robot concept is developed and the models are then subjected to simple tests in simulation software. Final part of the thesis deals with processing of knowledge and acquired values, from which conclusions are then made.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

robotický had, analýza hadích pohybů, simulace pohybů, V-REP

## **KEYWORDS**

snake-like robot, snake locomotion analysis, movements simulation, V-REP

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

TRAN, Duc Viet. *Pohyb robotického hada* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125399>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Tomáš Hůlka.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji Ti Míšo. Dlužím Ti další oběd se salátem a pitím.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Tomáše Hůlky a s použitím literatury uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne 26. 6. 2020

.....

Duc Viet Tran





## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA HADŮ .....</b>	<b>2</b>
2.1	Biologičtí hadi .....	2
2.2	Robotičtí hadi .....	4
2.3	Aplikace robotických hadů v praxi .....	9
<b>3</b>	<b>VYBRANÝ KONCEPT ROBOTICKÉHO HADA .....</b>	<b>11</b>
3.1	Vytvoření modelu robotického hada v modelačním softwaru .....	11
3.2	Simulační software .....	14
3.3	Programování pohybů robotického hada .....	17
<b>4</b>	<b>VYHODNOCENÍ A DISKUZE .....</b>	<b>20</b>
4.1	Výchozí nastavení, vstupní parametry, obecná stabilita .....	20
4.2	Vyhodnocení naměřených dat .....	23
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>26</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>28</b>

# 1 ÚVOD

Robotika je vědní obor, který v současné době zaznamenává obrovský rozvoj. Jedním z důvodů je stále rostoucí poptávka po robotech, kteří by usnadnili lidskou práci, či dokonce úplně nahradili člověka v dané činnosti. Dnes existuje široká škála robotů a na spoustě nových konceptech se dále pracuje.

Od dob, kdy začaly vznikat první roboty, byla to jejich pohyblivost, se kterou byly potíže. Robot se velmi často potřebuje dostat z jednoho místa na druhé, a to ve více či méně příznivém prostředí. Konvenční metoda přepravy může být například za pomoci koleček, nicméně jejich funkčnost je prakticky zcela závislá na podloží, po němž by se robot měl pohybovat. Chceme-li však aby byl robot schopen překonávat vzdálenosti například ve vodě, potřebujeme jiný, vhodnější způsob. Zatímco vymyslet zcela nový koncept může být dost náročné, inspirovat se tvorem, který se evolucí přizpůsobil životu v daném prostředí, a následně využít poznatky k sestrojení stroje, může být mnohem snazší.

Had je z hlediska morfologie na jednu stranu jakožto živočich bez končetin velmi jednoduchý, na stranu druhou je pro výzkumníky z hlediska mobility velice atraktivní. Může žít ve stromech, lovit na písčinych pouštích nebo i proplouvat vodami. Schopnost hada pohybovat se v rozličných prostředích je očividná, a právě proto patří had k jedněm z nejlepších vzorů, jimiž se lidé inspiroují v bionice.

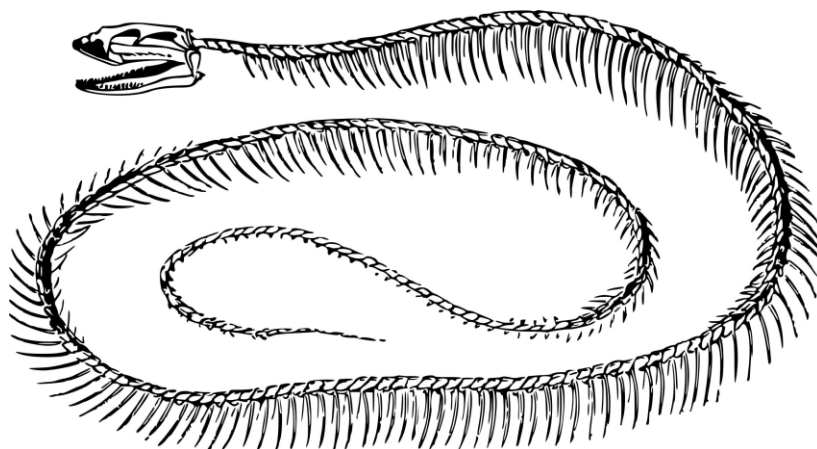
## 2 STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA HADŮ

Jak již název kapitoly napovídá, v následující části práce je pozornost věnována hadům jak z biologického hlediska, tak i z pohledu bioniky. Obecně se snaha napodobit může rozdělit na observaci fenoménu a na exekuci fenoménu. Kapitola popisuje, v čem spočívá toto pozorování jevu, tedy co je předmětem pozorování, a také jakými způsoby se lidé snaží vypořádat s pozorovaným fenoménem.

### 2.1 Biologičtí hadi

Mluvíme-li o přírodou inspirovaných robotech, je vhodné nejprve stručně shrnout poznatky o jejich biologických protějšcích, především o jejich morfologii, jež jim umožňuje pohyby, které se snažíme v bionice replikovat.

Hadi jsou jakožto živočišný druh svou anatomií výjimeční. Jejich typicky protáhlé tělo je tvořeno hlavou, krkem, který plynule přechází v trup a ten následně v ocas. Kostra je v podstatě tvořena pouze lebkou, dlouhou páteří a mnoha žebry. Svalová soustava hadů je rozvinutá a komplexní, nejvyvinutější a nejdůležitější svaly jsou přímo napojené na žebra – mezižební svaly. Ty spolu s dalšími umožňují hadům vykonávat jejich charakteristické pohyby. [1] [2]



*Obr. 1 Kostra hada [4]*

#### 2.1.1 Pohyby hadů

Lidé se od biologických hadů snaží naučit a následně replikovat především jejich pohyby ve víře, že jejich mechanické výtvořiny nabydou stejné výhody, jež jednotlivé pohyby poskytují. Rozlišujeme čtyři základní typy pohybů.

### 1.) Příímý pohyb (*rectilinear locomotion*)

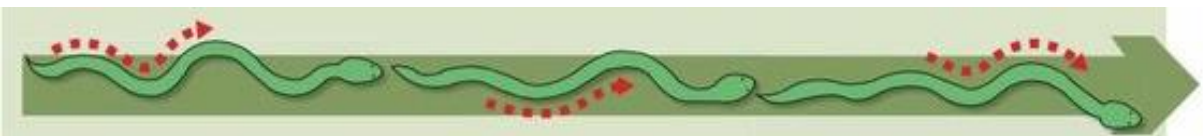
Velcí těžcí hadi využívají tzv. příímého pohybu neboli lineárního posunu vpřed. Tento způsob pohybu spočívá v opírání se břišními štítky o nerovnosti za současného stahování podkožních a mezižeberních svalů. Pohyb lze přirovnat k pohybu na housenkovém pásu, jako jediný umožňuje pohyb po přímce, tudíž je ze všech nejméně nápadný. Nevýhodou této metody je nízká rychlost ve srovnání s dalšími metodami. [2]



Obr. 2 Příímý pohyb hada [5]

### 2.) Vlnění do stran (*lateral undulation*)

Nejčastější je vlnivý pohyb do stran, jímž se pohybuje většina hadů. Tento způsob je velice efektivní v podrostu, či skalnatém prostředí, kde je dostatek výčnělků, výrůstků a jiných nerovností, o které by se had mohl opřít. Pohyb probíhá tak, že had zakříví své tělo do tvaru písmene S a dále postupuje v jeho obrysu. Trajektorie tohoto pohybu je esovitá, a je nutné se zapřít o pevné body, tudíž se nejedná o třecí sílu, jež umožňuje pohyb vpřed, ale o sílu normálovou působícího od pevného bodu na tělo hada. [2]



Obr. 3 Vlnění do stran [5]

### 3.) Harmonikový pohyb (*concertina locomotion*)

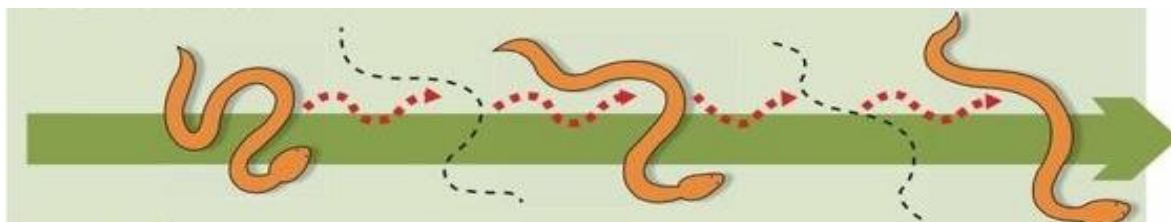
Další způsob pohybu je tzv. harmonikový pohyb. Had napřímí své tělo, zapře se hlavou o záchytný bod, a nakonec přitáhne zbytek svého těla na novou pozici. Tento pohyb je pomalý, ale často nutný. Je vhodný například na šplhání po stromech, či pohyb ve stísněných prostorech, např. v norách. [2]



Obr. 4 Harmonikový pohyb [5]

#### 4.) Sidewinding

Speciální metodou pohybu je tzv. *sidewinding*. Jedná se o metodu, která umožňuje hadům pohybovat se v písčném prostředí, kde je pevných bodů, o které by se had zapřel, nedostatek. Had zdvihne hlavu a přední část těla a vymrští je do strany pod úhlem  $45^\circ$  ke směru, kterým se chce pohybovat. V momentu, kdy se hlava dotkne země, zdvihne had zadní část těla a provede totožný manévr, ale tentokrát se zadní částí těla. Cyklus těchto pohybů probíhá tak, že se v jednom okamžiku dotýká had země jen ve dvou místech. [2]



Obr. 5 Sidewinding [5]

## 2.2 Robotičtí hadi

V současné době existuje mnoho robotických hadů, kteří se od sebe liší svou konstrukcí v závislosti na tom, jaký způsob pohybu se snaží robot napodobit. V této podkapitole je zmíněno několik vybraných příkladů vyvinutých na japonské univerzitě Tokyo Institute of Technology, která je jednou z předních výzkumných skupin zabývajících se touto problematikou. Ta své návrhy dělí do pěti základních kategorií dle tab.1:

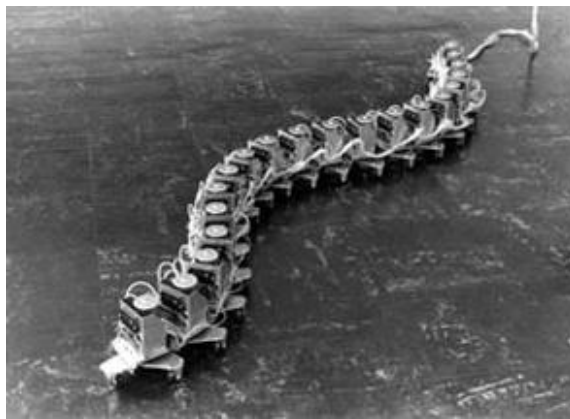
Tabulka 1 Pět základních kategorií robotů dle Tokyo Institute of Technology

KATEGORIE	NÁZEV ROBOTA
Roboti s aktivními kloubovými spoji	ACM-III ACM-R3 ACM-R5
Roboti s aktivními kloubovými spoji s možností natažení	Slim Slime Robot ACM-S1
Roboti s aktivními kloubovými spoji a aktivními koly	ACM-R4
Roboti s pasivními kloubovými spoji a aktivními koly	Genbu
Roboti s aktivními kloubovými spoji a aktivními pásy	Souryu

## 1.) Roboti s aktivními kloubovými spoji

### ACM-III (Active Cord Mechanism-III)

Jako první matematicky popsal pohyby živých hadů J. Gray ve svých pracích v roce 1946. V nich matematicky popsal silová působení na tělo hada, která hadovi umožňovala pohyb vpřed. Dále se analýzou biologických hadů zabýval japonský profesor Hirose Shigeo, který se v roce 1972 ve světě robotiky proslavil svým výtvozem ACM-III. Jedná se o prvního robotického hada známého na světové úrovni, který úspěšně demonstroval pohyb hadů, konkrétně vlnivý pohyb do stran. Zatímco biologický had docílí esovitého zakřivení těla stahováním mezižeberních svalů, ACM III je složen z dvaceti propojených článků, přičemž každý je schopen vyvolat moment kolem svislé osy pomocí servomotorů. [6] [12]



*Obr. 6 ACM-III [8]*

### ACM-R3 (Active Cord Mechanism-R3)

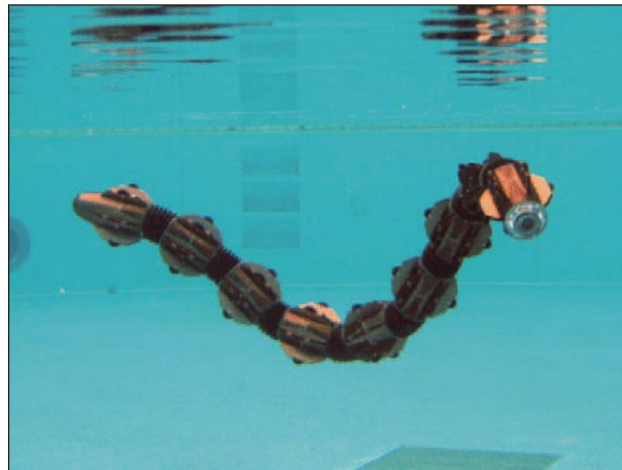
ACM-R3 byl vyvinut roku 2001 jakožto robotický had schopný vykonávat trojrozměrný pohyb. Robot se skládá z dvaceti kloubových spojů, přičemž každý kloub umožňuje pohyb v jednom směru tedy poskytuje  $1^\circ$  volnosti. Kloubová spojení jsou napojena tak, že osy dvou sousedních kloubů jsou vždy otočené o  $90^\circ$ . Tímto bylo dosaženo relativně jednoduchého mechanismu, který je však schopen vykonávat zmíněný 3D pohyb. [14]



*Obr. 7 ACM-R3 [12]*

### **ACM-R5 (Active Cord Mechanism-R5)**

ACM-R5 je obojživelný robot charakteristický svou vodě odolnou konstrukcí. Jedná se o modifikaci modelu HELIX, který byl vyvinut již v roce 2001. Aby bylo dosaženo schopnosti odolávat vodě, byl materiál pláště jednotlivých článků volen hliník a kloubové spoje jsou nepropustně kryté vlnovcovými spojkami. Klouby jsou na rozdíl od dvou předchozích modelů univerzální a jsou poháněné motory umístěnými na obou stranách spoje. [14]



*Obr. 8 ACM-R5 [12]*

## **2.) Roboti s aktivními kloubovými spoji s možností natažení**

### **Slim Slime Robot**

Robot je tvořen z několika sériově propojených modulů, poháněných pneumatickými aktuátory, které robotu umožňují natažení či ohyb. Jednotlivé moduly se skládají ze tří měchů a trubice, pomocí které se odsává nebo dodává vzduch. Samotné měchy mají své vlastní vstupní a výstupní ventily, které umožňují měchu expandovat či stahovat se nezávisle na ostatních měších. Řízením dodávky či vypouštění vzduchu z vhodných



měchů můžeme dosáhnout velice specifických pohybů, včetně takových, které jsou vhodné pro přemísťování dlouhým a úzkým potrubím. [14]



*Obr. 9 Slim Slime Robot [12]*

### 3.) Roboti s aktivními kloubovými spoji a aktivními koly

#### ACM-R4 (Active Cord Mechanism-R4)

V případě ACM-R4 se jedná v podstatě pouze o modifikaci modelu ACM-R3. Pasivní kola byla nahrazená aktivními, tvar článků byl upraven, aby nedocházelo k dorazu kol se sousedními články při ohybu. Výhoda ACM-R4 oproti modelu ACM-R3 je mimo jiné schopnost pohybu po přímce, což je velice žádoucí pro transport potrubím. [14]

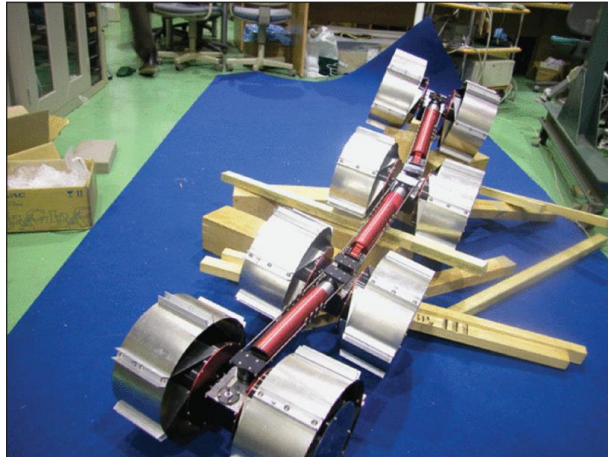


*Obr. 10 ACM-R4 [12]*

#### 4.) Roboti s pasivními kloubovými spoji a aktivními koly

##### Genbu

Robotičtí hadi jsou charakterističtí především svou výjimečnou schopností se pohybovat v nepříznivém terénu. V některých prostředích se vyplatí, aby aktivní pohyb zajišťovala poháněná kola a schopnost ohybu zajišťovala pouze pasivní přizpůsobení se okolí pro lepší dosed kol. Na základě tohoto konceptu byl navržen model Genbu. Robot je charakteristický svými rozměrnými koly. Kontrola robota je zajištěna řízením jednotlivých kol, která fungují nezávisle na sobě. [14]

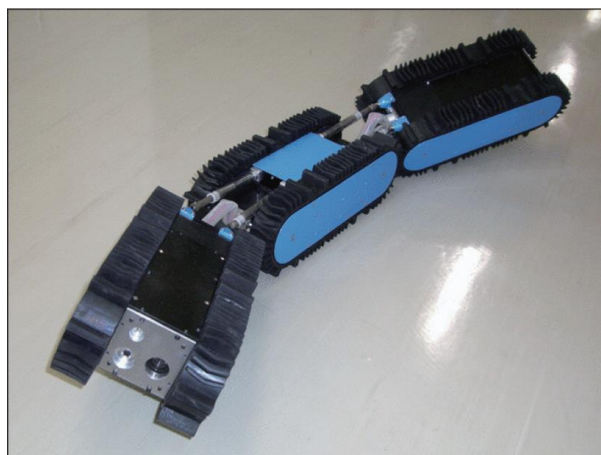


*Obr. 11 Genbu [12]*

#### 5.) Roboti s aktivními kloubovými spoji a aktivními pásy

##### Souryu

Souryu byl navržen s cílem umožnit robotu pohybovat se v extrémních prostředích vzniklých živelními katastrofami, příkladem mohou být sutiny po zemětřesení. Doposud bylo vyvinuto 6 modelů Souryu, na obr. 12 je zobrazen Souryu-IV. Souryu-IV je složen ze tří článků, přičemž je každý článek vybaven aktivními pásy. Spoj je realizován dvěma pruty umožňujícími lehké natočení. [14]



*Obr. 12 Souryu-IV [12]*

### 2.3 Aplikace robotických hadů v praxi

Výzkumné skupiny napříč světem se zdají být motivované vždy stejnou myšlenkou – aplikovat své výtvořky v záchranných a průzkumných misích, ve kterých jiná technika selhává. V naprosté většině se jedná o živelní katastrofy, po kterých bývá zasažená oblast zredukována na hromadu sutin, v nichž se záchranné týmy snaží vyprostit potenciální přeživší. Využití těžké techniky bývá v těchto situacích logicky omezená a možnosti záchranných zredukovány.

V září roku 2017 byla zasažena jižní oblast Mexika zemětřesením o síle 7,1 momentové škály trvající 20 s. Zemětřesení si vyžádalo téměř 400 smrtelných obětí a 6000 raněných, jedná se tak o druhé nejsmrtelnější zemětřesení roku. [15] Na pomoc obětem přispěchali záchranné útvary z celého světa, mezi nimi byla i pittsburská univerzita Carnegie Mellon s jejím týmem výzkumníků a robotickým hadem. Robot byl nasazen v hlavním městě Ciudad de México při vyhledávání přeživších uvězněných pod troskami obytného domu. Podle slov jednoho z výzkumníků Matta Traverse poskytl snakebot kamerový přenos ze dvou jinak nepřístupných šachet, bohužel bezvýsledně. Přesto si robot a jeho vývojáři odnesli kladnou odezvu od tamějších záchranných složek a Červeného kříže, který dokonce vyjádřil zájem vlastnit podobný prostředek v budoucích záchranných misích. [11]



*Obr. 13 CMU – Mexico mission 2017 [11]*

V obdobné situaci se na ocitli i japonští kolegové z Tohoku University v Sendai. Profesor Satoshi Tadokoro a jeho tým vyvinuli 8 metrů dlouhého a 3 kg těžkého robotického hada, charakteristického svými štětínami, které pokrývají celý jeho povrch. Profesor se nechal slyšet, že se při vývoji stroje měl on a jeho tým na mysli znepokojující počet přírodních katastrof, jež zasáhli jeho domovinu v nedávných letech. Robot byl již testován během průzkumu prvního fukushimského jaderného reaktoru – elektrárny

zasažené následky zemětřesením v roce 2011. Výsledky prokázali obtíže hada překonat určité překážky a také problémy s kamerovým systémem, kterému trosky bránily v čistém záběru. Do budoucna hodlá tým upravit model hada tak, aby byl schopen průzkumu i hlavní jednotky v jaderném reaktoru č. 3. [16]



*Obr. 14 Testování hada na japonské univerzitě [16]*



## 3 VYBRANÝ KONCEPT ROBOTICKÉHO HADA

Naším úkolem je vytvořit model a otestovat jeho pohyby pomocí simulace. I když je úloha na první pohled definována poměrně jednoduše, je nutné postupovat po jednotlivých krocích, které nemusí být vždy přímočaré. První problém nastává při samotném vytvoření modelu – zde se nabízí otázka, jak by náš model měl vlastně vypadat a jaké pohyby vykonávat. Z předchozí kapitoly máme alespoň hrubou představu, jak robotičtí hadi vypadají, tedy že se vždy jedná o konstrukce tvořené z odlišitelných sekcí. Tyto rysy jsou převzaty a použity i v našem konceptu.

### 3.1 Vytvoření modelu robotického hada v modelačním softwaru

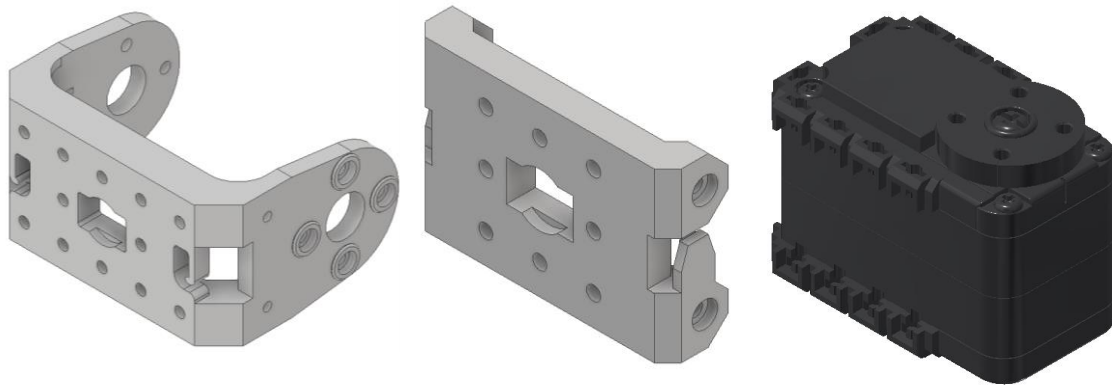
Přestože vytvoření modelu robotického hada v modelačním softwaru není bezpodmínečně nezbytné, je vhodné mít alespoň hrubou představu o tvarech a rozměrech robota, jehož pohyby se chystáme simulovat. Jsou-li tvary a rozměry jasné, můžeme v simulačním softwaru vytvořit velice zjednodušený model, který lze dále programovat.

Struktura robotického hada se skládá z jednotlivých článků, přičemž každý článek by měl být tvořen z pohonné jednotky, spojovacích dílů, pláště a dodatečných komponent jako jsou například kolečka. S ohledem na fyzickou realizovatelnost je žádoucí, aby se robot skládal z co nejvíce komponent, které jsou nejdostupnější. Současný trh nabízí relativně mnoho různých stavebnic s díly, ze kterých bychom robota mohli sestavit, pro naše účely však byla vybrána stavebnice od korejské firmy ROBOTIS, a to zejména protože mnoho dílů včetně servomotorů, které zaplní pozici pohonných jednotek, jsou nám již k dispozici na fakultě.

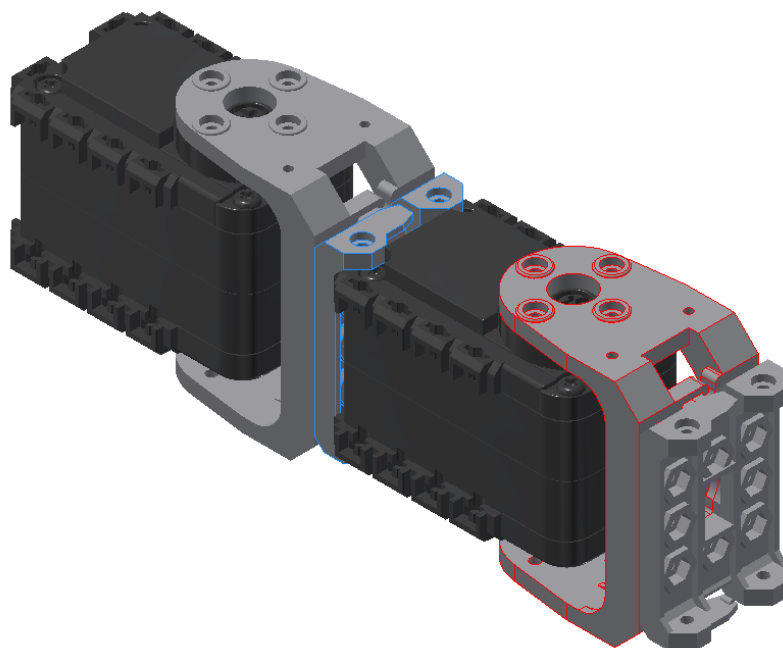
Pro našeho robotického hada jsou ze sady součástí využity díly FP04-F2, FP04-F3 a servomotor model AX-18 A. Plášť hada není možné z dostupných dílů sestavit, pro fyzickou realizaci se ale nabízí možnosti 3D tisku. S touto možností však také přichází problém, který spočívá v nutnosti vlastního návrhu součástí. Funkce pláště je především estetická, nicméně je důležité, aby tento plášť nijak neomezoval pohyby výsledného robota. Dále je žádoucí, aby byl díl skutečně vyrobitelný a aby byl kompatibilní s reálnými díly. S těmito požadavky na mysli byl navržen plášť, na který jsou navíc napojena pasivní kolečka, taktéž navržená pro 3D tisk. Tyto návrhy a modely byly vypracovány v modelačním softwaru Inventor, konkrétně ve verzi se studentskou licenci Autodesk Inventor Professional 2019, a budeme o nich dále mluvit jako o I-modelech.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Robotika a počítačové modelování spolu úzce souvisí, tudíž není překvapující, že výrobci robotických stavebnic mají k dispozici 3D modely svých produktů. Vybrané součástky ze sady dílů mají 3D modely volně ke stažení z webových stránek firmy.



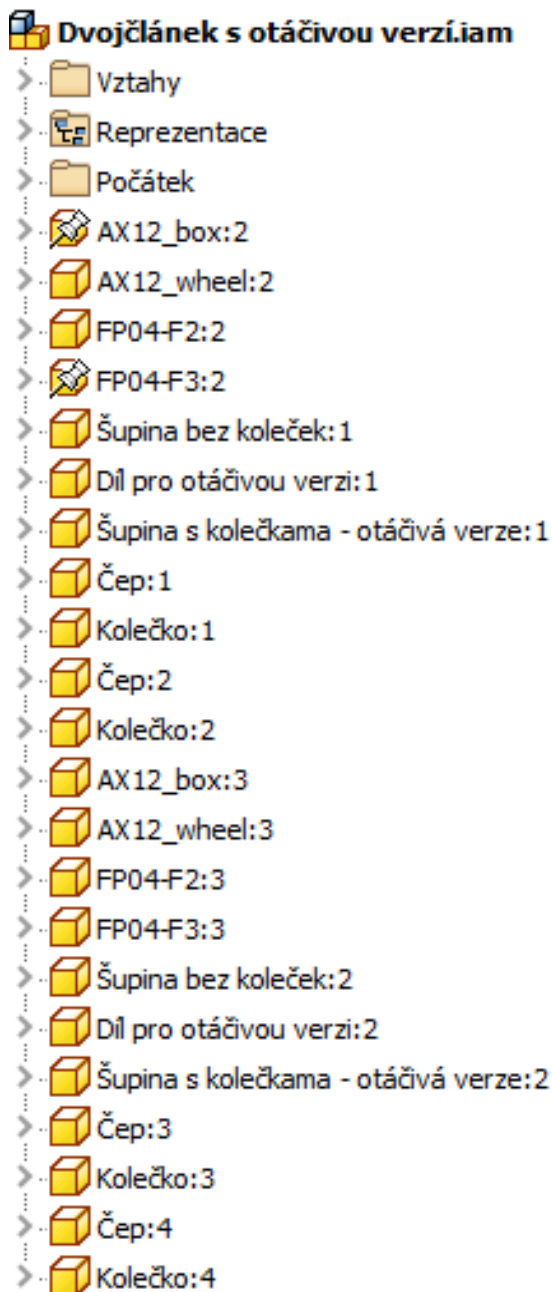
**Obr. 15** Vybrané díly ze sady součástí  
zleva FP04-F2, FP04-F3, AX-18 A



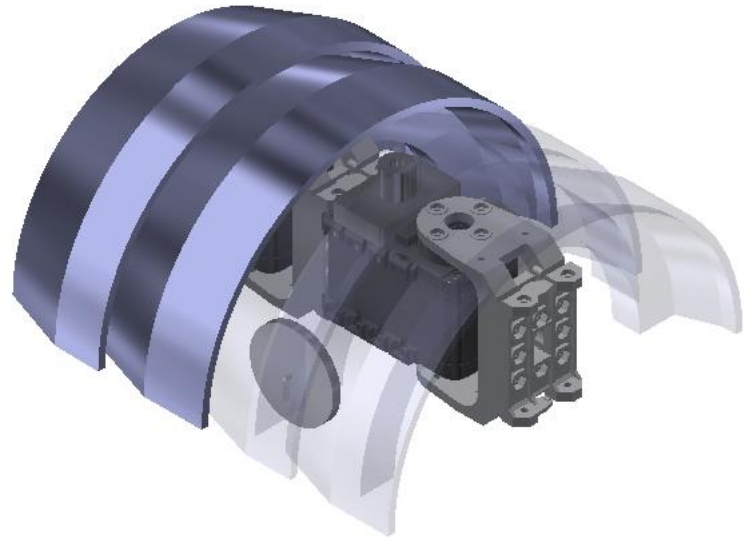
**Obr. 16** Dvojčlánek bez pláště

Na obr. 16 lze vidět spojení dvou servomotorů pomocí součástek ze sady dílů. Protože rozměry modelů servomotorů i součástek odpovídají jejich reálným protějškům, můžeme tento dvojčlen považovat za pevný základ, od něhož se můžeme dále odvíjet. Jak je již zmíněno dříve, požadavky na plášť nejsou náročné a jejich design nezávazný, přesto je jeho geometrie a další hodnoty jsou brány v potaz v pozdějších fázích práce.<sup>2</sup>

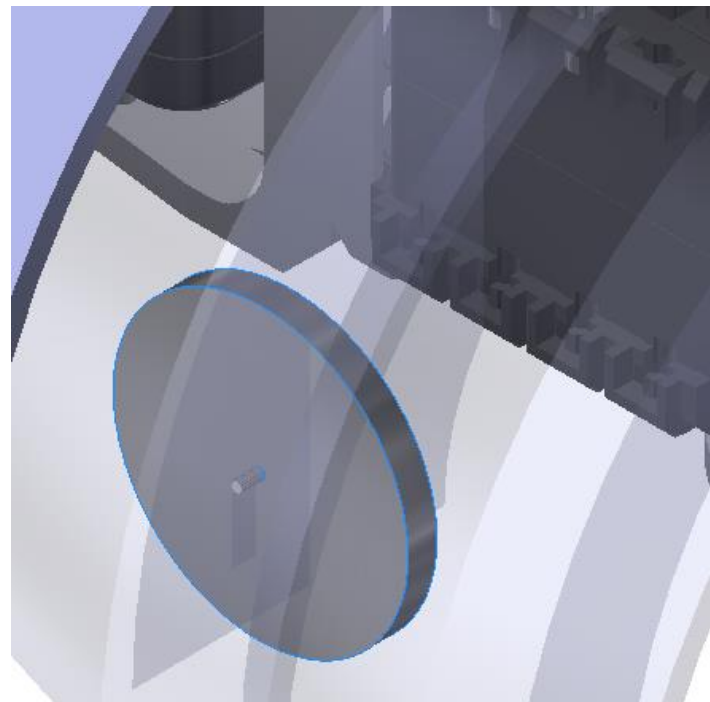
<sup>2</sup> Modely jednotlivých částí i celé sestavy I-modelu jsou k dispozici k nahlédnutí v sekci příloh



*Obr. 17 Hierarchický strom sestavy*



*Obr. 18 Dvojčlánek s pláštěm*



*Obr. 19 Detail kolečka*

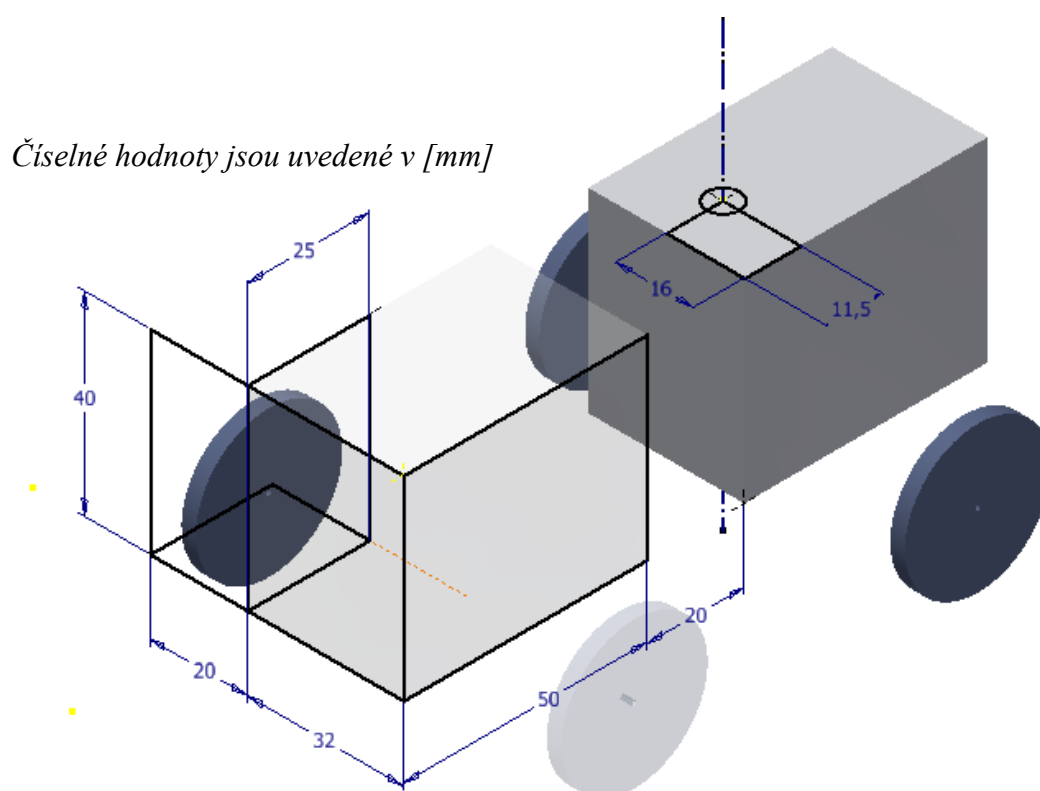
I-modely slouží spíše jakožto podpůrný prvek, nicméně díky němu jsme schopni jasně stanovit geometrii modelu, jenž má být vytvořen v simulačním softwaru (dále o něm budeme mluvit jako o S-modelu), a parametry potřebné pro samotnou simulaci. Je nutné zdůraznit, že kvůli ilustrativnímu charakteru I-modelů jsou některé hodnoty

stanovené s určitou rezervou. To platí především pro vypočítané hmotnosti a geometrické uspořádání. Následující tab. 2 shrnuje tyto stanovené hodnoty.

**Tabulka 2** Parametry potřebné pro simulaci<sup>3</sup>

Název	Hodnota [jednotka]	Způsob stanovení
Hmotnost AX – 18 A	55,9 [g]	uvedeno výrobcem
Hmotnost FP04 – F2	9,1 [g]	uvedeno výrobcem
Hmotnost FP04 – F3	9,1 [g]	uvedeno výrobcem
Hmotnost pláště	60,0 [g]	vypočteno
Hmotnost kolečka	11,0 [g]	vypočteno

Geometrické rozměry a rozpořádání lze lépe zpozorovat na následujícím obr. 20



**Obr. 20** Geometrické rozpořádání modelu

### 3.2 Simulační software

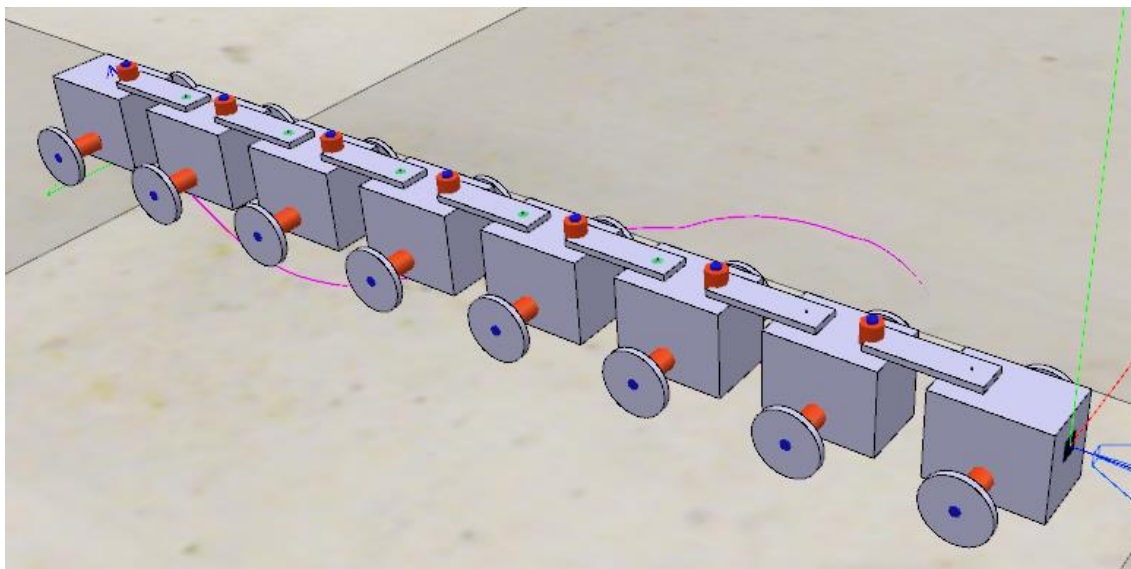
V dnešní době existuje široká škála simulačních programů, některé jsou i volně k dispozici ke stažení z internetu. Pro naše účely byl vybrán právě takovýto software, přesněji neplacená verze V-REP PRO EDU, nyní známý také jako CoppeliaSim.

<sup>3</sup> Hmotnosti navržených součástek byly vypočítány jednoduchým vztahem  $m = V \cdot \rho$ , kde objem  $V$  je dán díky známým rozměrům součástek a hustota  $\rho$  je převzata za tabulkových hodnot hustot materiálů používaných při 3D tisku. Předpokládá se využití materiálu ABS o hustotě  $1050 \text{ kg/m}^3$



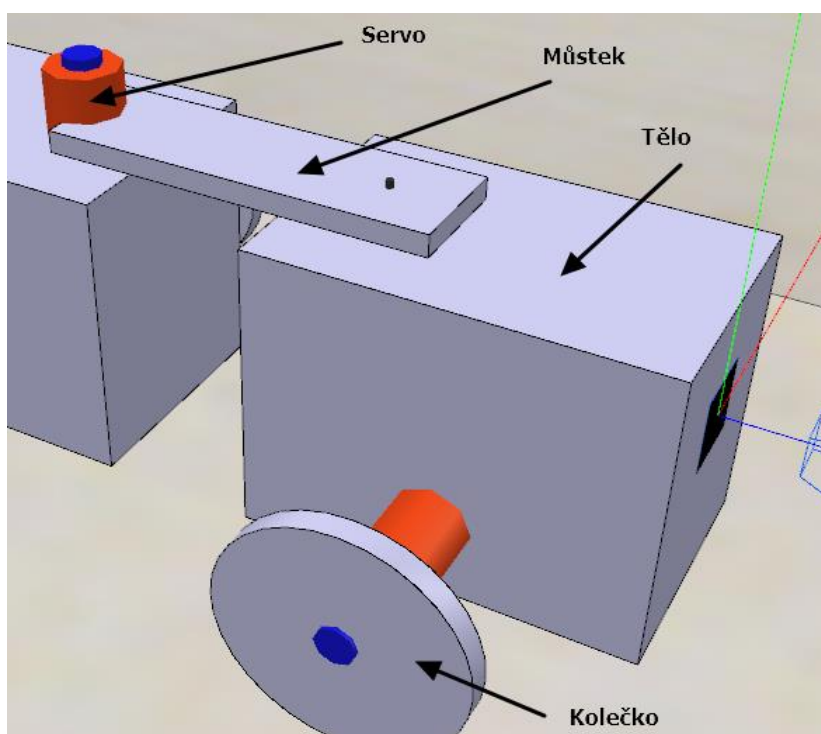
Uživatelské rozhraní softwaru je velice intuitivní a na oficiálních stránkách jsou k dispozici podrobné tutoriály, pomocí nichž se může uživatel naučit alespoň základní dovednosti. Přestože je V-REP ve srovnání s Inventorem či jiným modelačním programem v oblasti modelování poněkud zaostávající, jednoduché tvary nepředstavují žádný problém. Aplikační rámec CoppeliaSim API framework, podporující 6 různých způsobů programování, poskytuje uživateli značnou míru svobody. Díky němu lze zasahovat do mnoha aspektů samotné simulace a tím zajistit požadovaný průběh.

Vytvoření S-modelu v této fázi není vůbec obtížné, pro jednoduchost se zanedbá geometrie pláště a přenese se pouze jeho hmotnost. Článek se vytvoří jednoduchým kvádrem, spoj tvořený součástmi ze sady dílů se nahradí jednoduchým „můstkem“ s hmotností zmíněných součástí a i kola jsou jednoduchá tělesa s určitou hmotností. Definování vztahů a vazeb mezi jednotlivými útvary je umožněno nástroji softwaru.



*Obr. 21 S-model robotického hada*

Jak lze zpozorovat na obr. 21, S-model je tvořen z osmi článků, které se dále dělí na tělo, v němž je zahrnuta i hmotnost pláště, servo, které je zde nahrazeno otáčivým spojem, můstek a kolečka. Jednotlivé části článku popisuje obr. 22



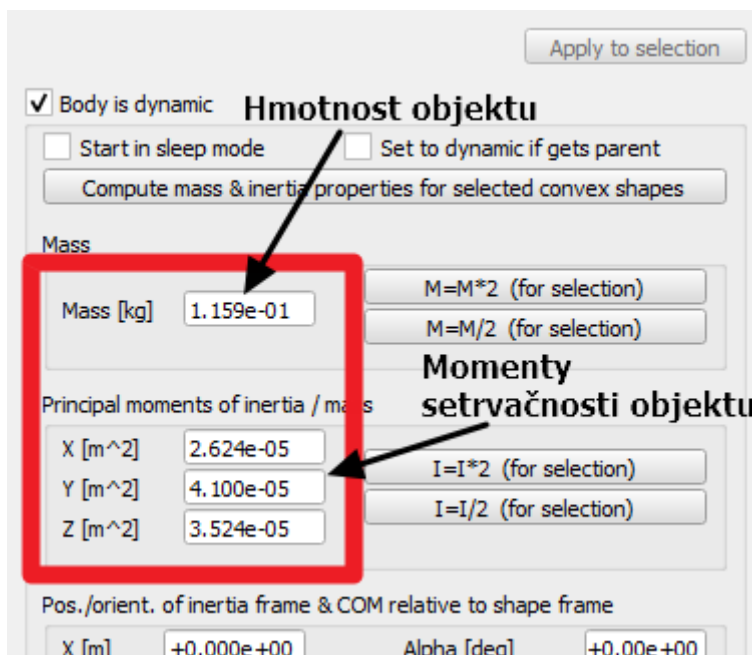
**Obr. 22** Popis částí S-modelu

Následující tab. 3 uvádí hodnoty, které jsou potřeba zadat do vlastností jednotlivých částí S-modelu, aby byla simulace co možná nejpřesnější. Nutno podotknout, že některé hodnoty bylo potřeba vypočítat z hodnot uvedených v tab. 2, tudíž i zde je potřeba brát jejich hodnoty s určitou numerickou chybou.

**Tabulka 3** Vstupní hodnoty těles

Název	Hodnota [jednotka]	Způsob stanovení
Hmotnost těla	115,9 [g]	vypočteno
Moment setrvačnosti těla v ose x	$2,624 \cdot 10^{-5}$ [kg · m <sup>2</sup> ]	vypočteno
Moment setrvačnosti těla v ose y	$4,100 \cdot 10^{-5}$ [kg · m <sup>2</sup> ]	vypočteno
Moment setrvačnosti těla v ose z	$3,524 \cdot 10^{-5}$ [kg · m <sup>2</sup> ]	vypočteno
Maximální kroutivý moment serva	1,8 [N · m]	uvedeno výrobcem
Maximální úhlová rychlost serva	29 [°/sec]	uvedeno výrobcem
Hmotnost můstku	18,2 [g]	vypočteno
Hmotnost kolečka	11,0 [g]	vypočteno
Moment setrvačnosti kolečka v ose y	$2,000 \cdot 10^{-5}$ [kg · m <sup>2</sup> ]	vypočteno

Po zadání těchto vstupních hodnot do odpovídajících nastavení nabude S-model o trochu reálnějších vlastností, tudíž se důvěryhodnost simulace poněkud zvýší.



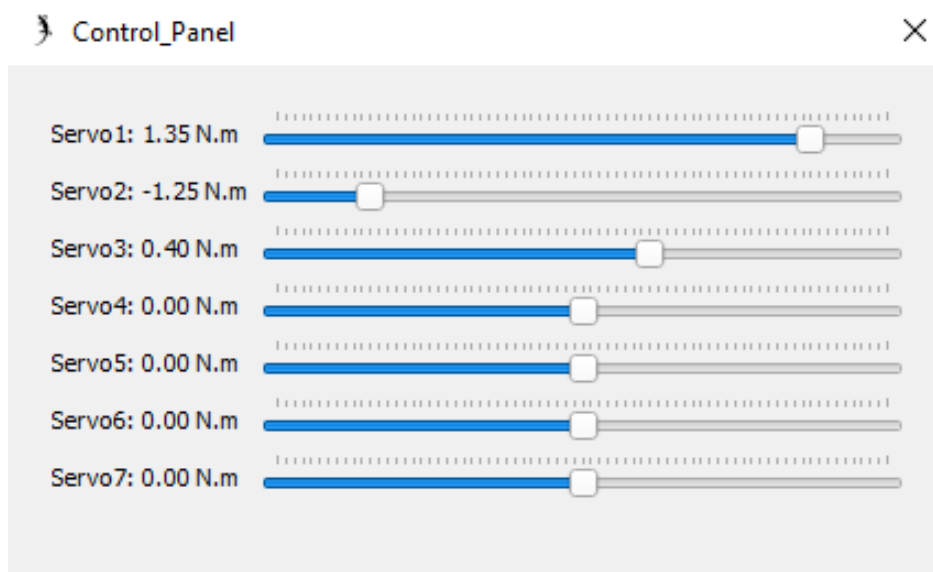
Obr.23 Okno nastavení vlastností objektu

### 3.3 Programování pohybů robotického hada

Před samotnou simulací je nutné si ujasnit, čeho přesně chceme dosáhnout. Celá pointa biologicky inspirovaných robotů je touha replikovat nekonvenční způsoby pohybu jejich živých vzorů, nejlépe aby tyto napodobené pohyby stejně efektivní. Cíl je tedy jasně dán – otestovat, zda je navržený koncept schopen pohybu vpřed, nejprve v ideálním, poté modifikovaném terénu. Pro jednoduchost byl zaveden test pohybu po nakloněné rovině.

Model hada byl naprogramován pomocí tzv. *regular API*, jedná se o základní způsob programování ve V-REPU, který se skládá z vestavěných CoppeliaSim funkcí a několika stovek C/C++ funkcí, které mohou být volány ze sdílené knihovny funkcí. Samotné programování spočívá v psaní skriptu, který zmíněné funkce volá.

Nejprve byl napsán skript, který umožňuje manuálně nastavovat kroutící moment servomotorů mezi články. Účelem tohoto skriptu je především otestování obecné funkčnosti S-modelu. Skript vyvolá jednoduchý ovládací panel, ve kterém lze tažením posuvníku po liště nastavovat momenty servomotorů v rozpětí od  $-1,8 [N \cdot m]$  do  $1,8 [N \cdot m]$ .



Obr. 24 Ovládací panel servomotorů

Po kontrole obecné funkčnosti je dalším krokem skript, který by S-model rozpochoval. Z předchozích kapitol víme, že u živých hadů rozeznáváme 4 základní typy pohybů. Pro simulaci je vhodné zvolit takový pohyb, který se jeví jako nejjednodušší pro exekuci, po úvahách byl zvolen způsob *lateral undulation*, tedy pohyb vlněním do stran. Následující skript spustí simulaci tohoto pohybu. Hlavní myšlenka skriptu spočívá v „diktování“ úhlových natočení servomotorů v závislosti na čase, samozřejmě tak, aby natočení sousedních servomotorů byla posunuta o určitou fázi.

```

Servo3=sim.getObjectHandle('Servo_3')
Servo4=sim.getObjectHandle('Servo_4')
Servo5=sim.getObjectHandle('Servo_5')
Servo6=sim.getObjectHandle('Servo_6')
Servo7=sim.getObjectHandle('Servo_7')
MaxAngle=math.pi*(60/180)
MOD=1.5
a=math.pi*(1/5)*MOD
p=math.pi*(1/4)
end
function sysCall_actuation()
sim.setJointTargetPosition(Servo1,MaxAngle*math.sin((sim.getSimulationTime()*a)+1.0*p)*1)
sim.setJointTargetPosition(Servo2,MaxAngle*math.sin((sim.getSimulationTime()*a)+2.0*p)*1)
sim.setJointTargetPosition(Servo3,MaxAngle*math.sin((sim.getSimulationTime()*a)+3.0*p)*1)
sim.setJointTargetPosition(Servo4,MaxAngle*math.sin((sim.getSimulationTime()*a)+4.0*p)*1)
sim.setJointTargetPosition(Servo5,MaxAngle*math.sin((sim.getSimulationTime()*a)+5.0*p)*1)
sim.setJointTargetPosition(Servo6,MaxAngle*math.sin((sim.getSimulationTime()*a)+6.0*p)*1)
sim.setJointTargetPosition(Servo7,MaxAngle*math.sin((sim.getSimulationTime()*a)+7.0*p)*1)
end

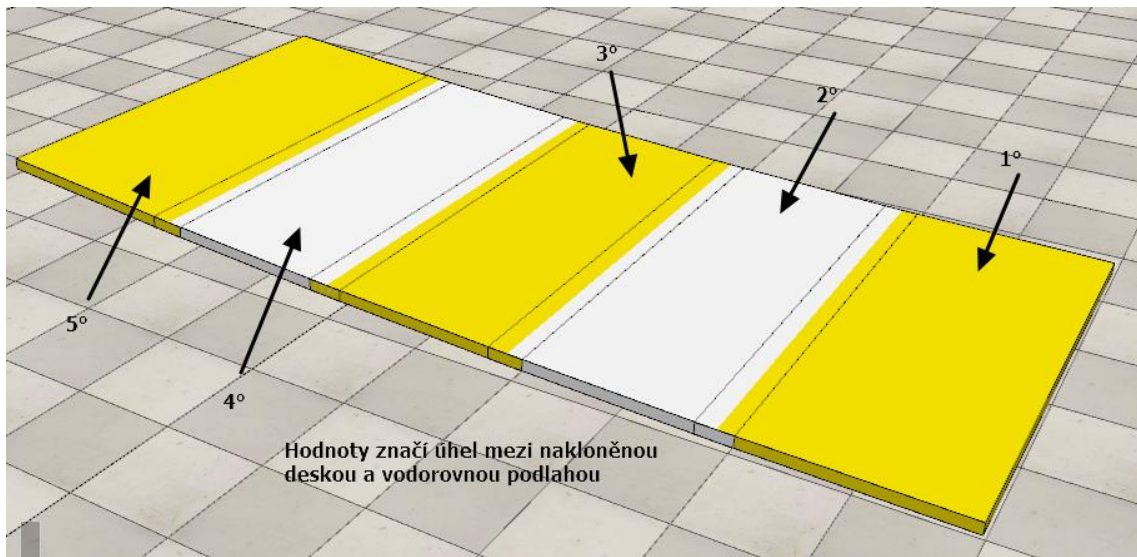
```

Obr. 25 Skript – úhlová natočení

V první části skriptu se zavolá funkce definující entity, s nimiž se bude pracovat, a určí se vstupní hodnoty, jako jsou maximální úhel natočení, a fáze. Pro snadnější upravování vstupů byl zaveden koeficient MOD, jehož funkce bude popsána v dalších částech práce. Druhá část skriptu obsahuje vlastní funkci, jež definuje charakter vlnění modelu.

V tomto okamžiku snažíme definovat testovací fázi. Nejprve je naším zájmem vyřešit otázku, zda vlnivý pohyb vyvolaný skriptem vůbec umožní S-modelu pohyb vpřed, tudíž není třeba klást hadovi žádné překážky. Dalším cílem je zjistit, zda je S-model schopen konat pohyb vpřed po nakloněné rovině, v tomto případě pouze stačí vymodelovat jednoduchou rampu a umístit do trajektorie modelu.

Následující obr. 26 zobrazuje jednoduchou testovací rampu složenou z pěti desek o různých úhlech naklonění. Účelem je otestovat případný limit S-modelu při stoupání.



*Obr. 26 Testovací rampa*

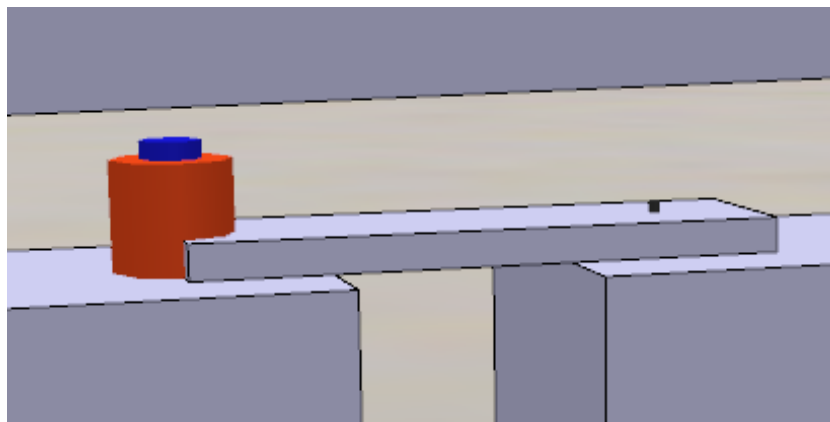
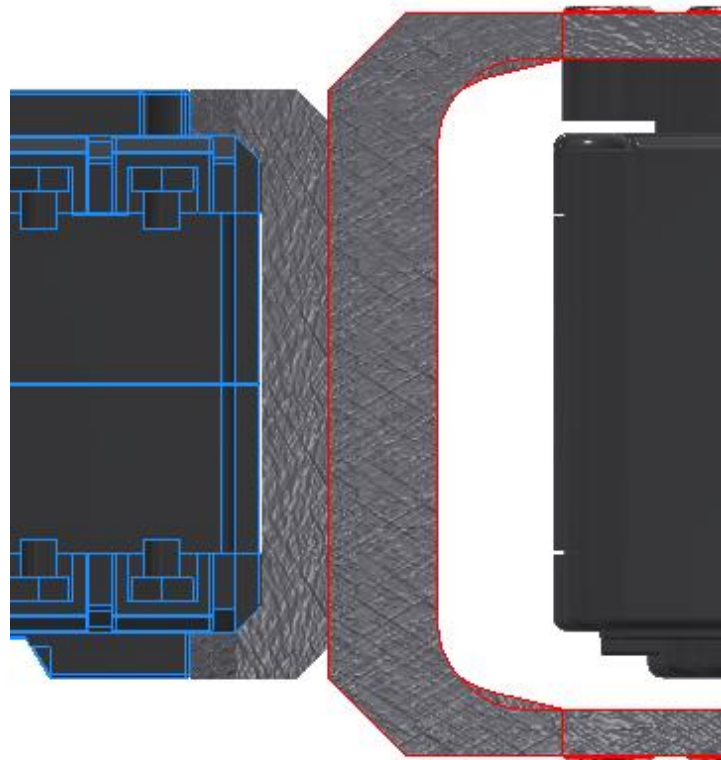
## 4 VYHODNOCENÍ A DISKUZE

Je obecně platné, že pointa simulací je nashromáždit informace a ty porovnat se vzorem. Někdy lze také simulovat čistě aby se z naměřených dat vyvodily závěry. To platí zejména při experimentování, kdy vzor je pouze teoretický koncept, tudíž není možné porovnat model s předlohou. V našem případě se jedná spíše o druhý případ. Ačkoliv by spousta dat šla získat měřením skutečného n-článekového robota, kterého by z dostupných dílů bylo možné sestavit, naše úloha byla uměle modifikovaná.

### 4.1 Výchozí nastavení, vstupní parametry, obecná stabilita

V prvé řadě je nutné zmínit, že simulační software nabízí několik enginů (řešičů), pomocí kterých simulace pracuje. Již během testování obecné funkčnosti prvním skriptem byly vyzkoušeny všechny dostupné enginy a rozdíly mezi jednotlivými simulacemi byly razantní. Z více či méně stabilních enginů byl vybrán jeden optimální, specificky engine Newton, a to především protože v simulacích s ostatními enginy se S-model pohyboval velice nepřírozně.

Při spuštění druhého skriptu se model začal úspěšně vlnit, avšak jeho pohyby působily velice tuze, nemotorně. To se dalo ovlivnit změnou vstupních hodnot ve skriptu, zde jsme ale byli omezeni limity skutečných součástí, například maximální úhlová rychlost a krouticí moment servomotoru byly jasně definovány. Stejně tak maximální natočení mezi články by ve skutečnosti byla omezena pláštěm, který by sice mohl být upraven, ale pouze v určitých mezích. Důvodů pro tento nemotorný a celkově nepřesný pohyb by mohlo být hned několik. Největší podezření spadá na samotný model, tedy na jeho geometrii. Zatímco se v I-modelu spojovací součástky napojují na boční stěnu kvádrů, spoj v S-modelu byl pro jednoduchost zprostředkován jednoduchým mostem, který byl napojen na horní stěnu kvádrů. Ve výsledku se prodloužilo rameno a celá konstrukce se stala celkově „tužší“ na rozhybání.



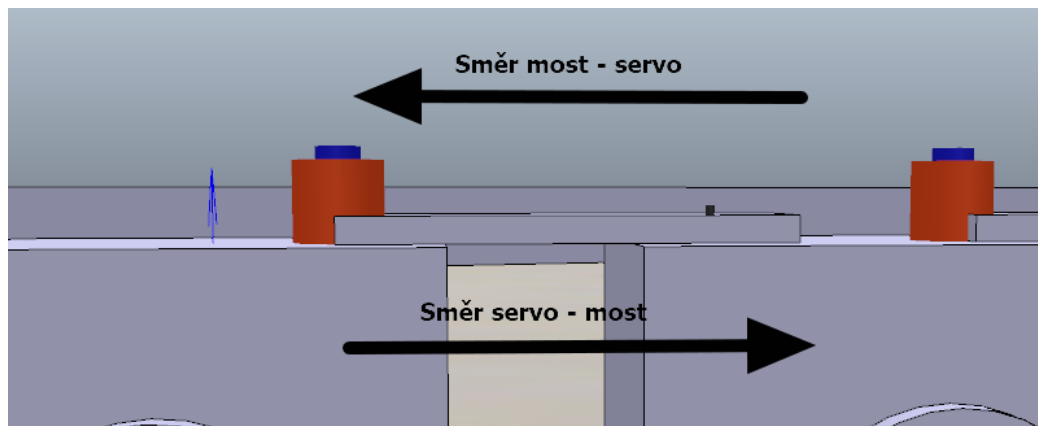
**Obr. 27** Detaily spojů  
shora I-model, S-model

Dalším z důvodů neuspokojivého pohybu by mohly být chybně zadané vstupní parametry do vlastností objektů, či dokonce nedostačující výkon pohonné jednotky. Například příliš vysoký moment setrvačnosti logicky zpomalí rozpohybování hada a tím způsobí těžkopádnost pohybů. Nedostačující výkon je nepravděpodobný, už v rešeršní části práce byl v rámci shromažďování informací vyhledán totožný servomotor a jeho využití v reálných robotech. Na základě získaných poznatků lze i bez výpočtů prohlásit, že by výkon vybraného servomotoru měl být dostačující.



Dále je možné, že byla příčina obsažená v neefektivním skriptu, nebo že vstupní hodnoty zadané do první části skriptu nebyly vyvážené, tudíž není vyloučeno, že optimalizací vstupních hodnot či celého skriptu se zvýší plynulost pohybů při simulaci.

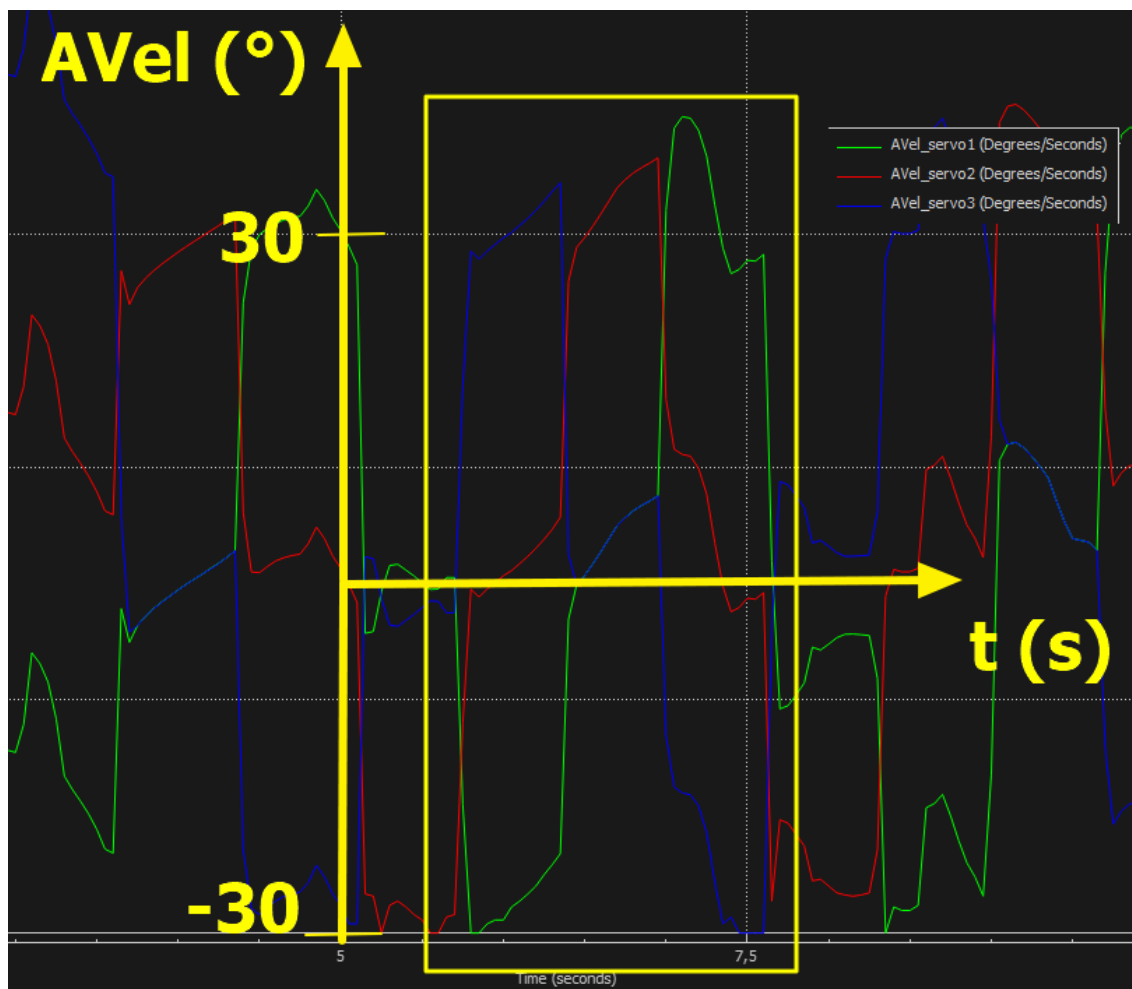
Poněkud překvapující je fakt, že se S-model po spuštění druhého skriptu vydal směrem opačným, než jsem já jakožto tvůrce modelu zamýšlel. V omezené míře bylo možné směr robota změnit jinými vstupními hodnotami skriptu, v naprosté většině se však S-model vydal směrem servo – most (viz obr. 28). Tato skutečnost má za následek matoucího pojmenování částí S-modelu, dopad na samotou simulaci však nemá žádný.



*Obr. 28 Orientace pohybu*

V rámci kontroly byly sledovány úhlové rychlosti servomotorů. Na následujícím obr. 29 jsou hodnoty tří posledních servomotorů vyneseny na graf v závislosti na čase. Mimo jiné lze zpozorovat i fázový posun mezi sousedními servomotory. Úsek vyznačený žlutým obdélníkem odpovídá zhruba 2 sekundám. V grafu můžeme vidět, že se úhlové rychlosti se nemění plynule, ba naopak nepravidelně a skokově. To je pouze další důkaz o nemotorném pohybu S-modelu. Dále si můžeme povšimnout, že hodnoty v grafu značně překračují horní limit reálného servomotoru a i tato skutečnost dále snižuje důvěryhodnost simulací.





Obr. 29 Graf úhlových rychlostí

## 4.2 Vyhodnocení naměřených dat

Protože v závislosti na vstupních hodnotách se výsledky velice lišily, stanovme si na úvod výchozí inputy, k nimž se výsledky vztahují. Po experimentování s různými kombinacemi byly hodnoty ve skriptu optimalizovány na následující výchozí vstupy:

- maximální úhel natočení  $90^\circ$
- modifikátor  $1.5$
- konstanta  $a$   $\frac{\pi}{4}$
- fáze  $\frac{\pi}{4}$

Maximální úhel natočení je dvojnásobný úhel, o jaký se článek může pootočit z nulové hladiny, přičemž nulová hladina je stav, kdy sousední články svírají právě  $0^\circ$ . Maximální úhel o  $90^\circ$  tedy znamená, že se článek může vychýlit až o  $45^\circ$  na jednu stranu či druhou. Součin modifikátoru s konstantou  $a$  určuje rychlost kmitání funkce sinus. Vyšší modifikátor vyústí v rychlejší vlnění S-modelu. Fáze posune natočení sousedních servomotorů a tím umožňuje vlnivý pohyb.

```

MaxAngle=math.pi*(90/180)
MOD=1.5
a=math.pi*(1/4)*MOD
p=math.pi*(1/4)

```

Maximální úhel natočení  
 Modifikátor  
 Konstanta a  
 Fáze

*Obr. 30 Detail inputu*

Z předchozích poznatků je již jasné, že druhý skript S-model úspěšně rozhýbal. Poté byl had ještě podroben zkoušce pohybu po nakloněné rovině. I zde dosáhl model částečného úspěchu – robot byl vždy schopen překonat alespoň první rovinu rampy nakloněnou o  $1^\circ$ . Simulace s výchozím inputem umožnila modelu překonat až třetí rovinu s nakloněním o úhel  $3^\circ$ , rovinu č. 4 se však nepodařilo překonat v žádné ze simulací.



*Obr. 31 Trajektorie pohybu*

Pro lepší přehled nad trajektorií S-modelu byl využit nástroj softwaru, který za sebou při pohybu zanechává viditelnou stopu. Všimněme si oblasti vyznačené červeným obdélníkem, v níž můžeme zaznamenat očividnou anomálii v jinak relativně pravidelné křivce. Tato odchylka je způsobena snahou robota překonat přelom mezi druhou a třetí rovinou. Tento konkrétní zlom se robotu nepodařilo překonat na první pokus v žádné z provedených simulací.

## 5 ZÁVĚR

Práce shrnuje základní poznatky o hadích pohybech a poskytuje čtenáři obecný přehled o problematice robotických hadů. V rešeršní části je uvedeno několik vybraných zástupců ze světa robotických hadů za účelem nastínit, jaké pohyby se lidé snaží replikovat, jakými způsoby a také z jakých důvodů tak činí.

Praktická část popisuje práci se softwarem jak modelačním, tak i simulačním, a snaží se zachytit problematické okamžiky při modelování i samotných simulacích. Při vyvozování závěrů bylo snahou zachovat si co nejvyšší míru objektivity pohlédnout na výsledky měření kritickým pohledem.

Při vytváření konceptu robotického hada byl kladen důraz především na fyzickou realizovatelnost s cílem co nejvíce zvýšit důvěryhodnost simulací. Tato důvěryhodnost se ale nakonec stává největším otazníkem této práce, jelikož data získaná ze simulací jsou až znepokojivě odlišná od očekávaných hodnot. Jak moc se získané hodnoty liší od skutečnosti by mohlo být tématem další bakalářské práce, ve které by tato práce mohla posloužit jako teoretický podklad pro skutečný, sestrojený model a s ním spojené experimenty.

## 6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

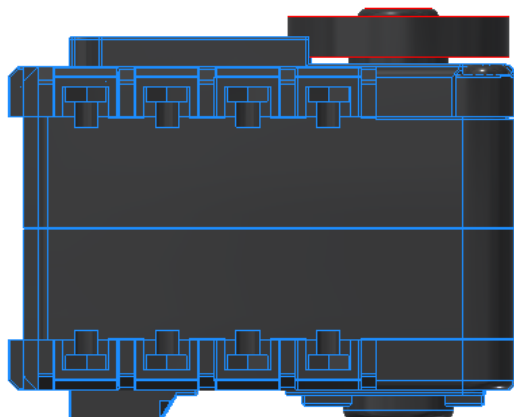
- [1] MARAIS, Johan. *Fascinující svět hadů*. Praha: Rebo Productions, 1995.  
ISBN 80-85815-42-7
- [2] WEIDENSAUL, Scott. *Hadi světa*. Praha: Svojtka a Vašut, 1997. ISBN 80-7180-241-7
- [3] *Encyclopædia Britannica* [online], [cit. 1. 3. 2020], Encyclopædia Britannica Inc., 1985.  
ISBN 1-59339-292-3  
Dostupné z: <https://www.britannica.com/topic/locomotion/Saltation#ref496995>
- [4] Snake skeleton, Iconspng [online], [cit. 1. 3. 2020],  
Dostupné z: <https://www.iconspng.com/image/87799/snake-skeleton>
- [5] Snake movement, ZMEScience [online], [cit. 1. 3. 2020],  
Dostupné z: <https://1url.cz/eMQG9>
- [6] CICCONOFRI Giancarlo, DESIMONE Antonio, *A study of snake-like locomotion through the analysis of a flexible robot model* [online], 2015 [cit. 2. 3. 2020]  
Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2015.0054>
- [7] GRAY J., *The mechanism of locomotion in snakes* [online], University of Cambridge, 1946 [cit. 2. 3. 2020]  
Dostupné z:  
<https://pdfs.semanticscholar.org/647c/7448db92ed5858b2fa008b996ba15b226be9.pdf>
- [8] Active Cord Mechanism No.3 "ACM III" [online], [cit. 2. 3. 2020]  
Dostupné z:  
[https://www.expo21xx.com/automation21xx/18224\\_st3\\_university/default.htm](https://www.expo21xx.com/automation21xx/18224_st3_university/default.htm)
- [9] HARVARD John A. Paulson, 2018 [online], [cit. 4. 3. 2020],  
Dostupné z:  
<https://www.seas.harvard.edu/news/2018/02/snake-inspired-robot-uses-kirigami-to-move>
- [10] Snakeskin, HARVARD John A. Paulson [online], [cit. 4. 3. 2020]  
Dostupné z:  
<https://www.seas.harvard.edu/news/2018/02/snake-inspired-robot-uses-kirigami-to-move>
- [11] Carnegie Mellon University, 2017, [online], [cit. 4. 3. 2020]  
Dostupné z:  
<https://www.cmu.edu/news/stories/archives/2017/september/snakebot-mexico.html>

- [12] HIROSE Shigeo, *Snake-like robots*, IEEE Robotics & Automation Magazine [online], strana 91-92, [cit. 5. 3. 2020]  
Dostupné z:  
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4799450>
- [13] KOTAY K. and RUS D. The Inchworm Robot: A Multi-Functional System, *Autonomous Robots* 8 [online]. 2000, s. 53–69 [cit. 5. 3. 2020]. Dostupné také z:  
<https://groups.csail.mit.edu/drl/wiki/images/c/cd/fulltext.pdf>
- [14] HIROSE Shigeo. a YAMADA Hiroya. *Snake-like robots*. IEEE Robotics & Automation Magazine [online]. 2009, strana 88-98 [cit. 9. 3. 2020].  
Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4799450>
- [15] M 7.1 - 5km ENE of Raboso, Mexico. earthquake.usgs.gov [online]. [cit. 23.06.2020].  
Dostupné z:  
[https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000ar20/executive#shake\\_map](https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000ar20/executive#shake_map)
- [16] *Daily mail*, 2017, [online], [cit. 23.06.2020]  
Dostupné z:  
<https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-4608210/Furry-snake-like-camera-robot-built-disaster-relief.html>

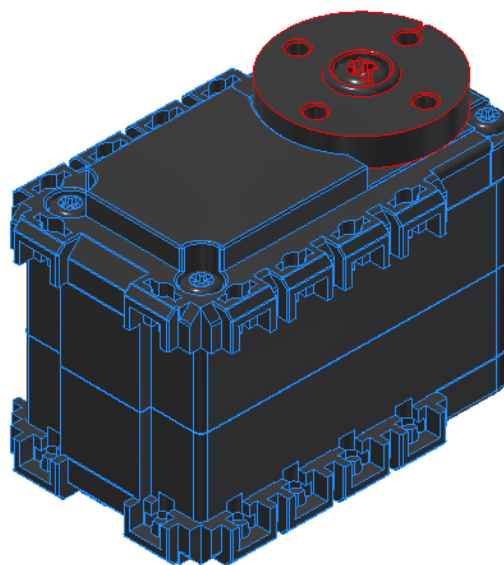
## 7 SEZNAM PŘÍLOH

<b>P1</b>	Servomotor – pohled z boku
<b>P2</b>	Servomotor
<b>P3</b>	FP04-F2 – pohled z boku
<b>P4</b>	FP04-F2
<b>P5</b>	FP04-F3 – pohled z boku
<b>P6</b>	FP04-F3
<b>P7</b>	Kolečko – pohled z boku
<b>P8</b>	Kolečko
<b>P9</b>	Pomocný díl – pohled z boku
<b>P10</b>	Pomocný díl
<b>P11</b>	Čep – pohled z boku
<b>P12</b>	Čep
<b>P13</b>	Šupina 1 – pohled z boku
<b>P14</b>	Šupina 1
<b>P15</b>	Šupina 2 – pohled z boku
<b>P16</b>	Šupina 2
<b>P17</b>	Nasunutí kolečka na šupinu 2
<b>P18</b>	Nasunutí šupiny 2 na pomocný díl
<b>P19</b>	Detail spojení pomocného dílu s šupinou 2
<b>P20</b>	Sestavený I-model – pohled z boku
<b>P21</b>	Sestavený I-model – pohled zespodu
<b>P22</b>	Sestavený I-model – pohled z dolního rohu
<b>P23</b>	Sestavený I-model – pohled z horního rohu

## PŘÍLOHY



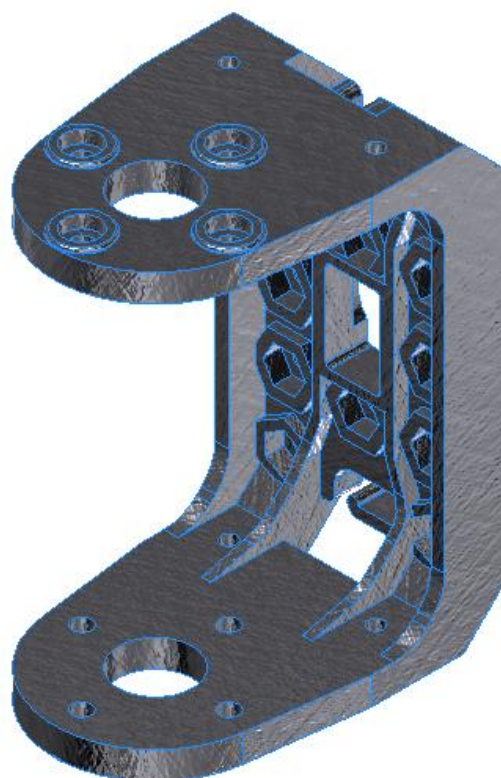
*P1 Servomotor – pohled z boku*



*P2 Servomotor*



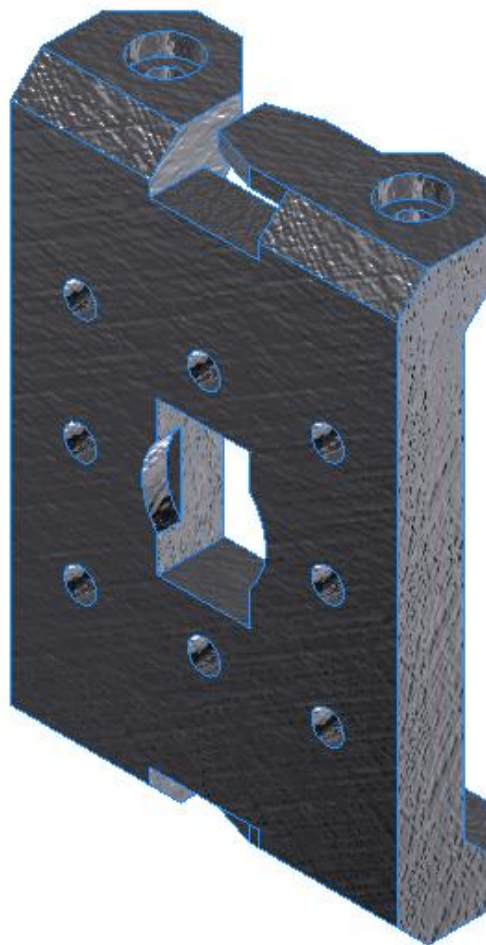
*P3 FP04-F2 – pohled z boku*



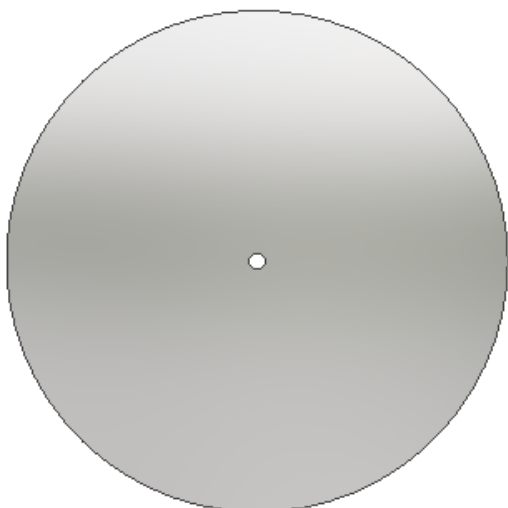
*P4 FP04-F4*



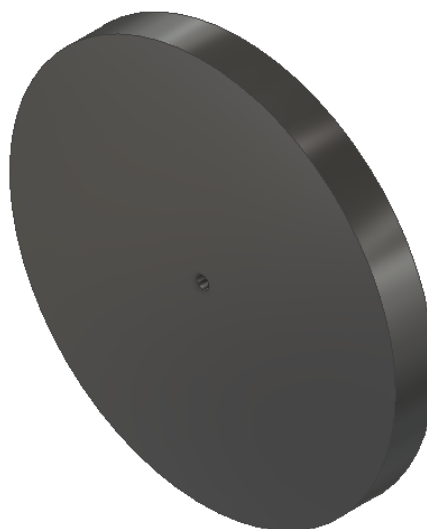
**P5** FP04-F3 – pohled z boku



**P6** FP04-F3

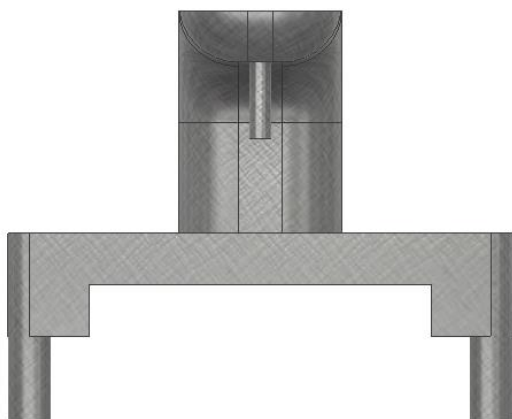


**P7** Kolečko – pohled z boku

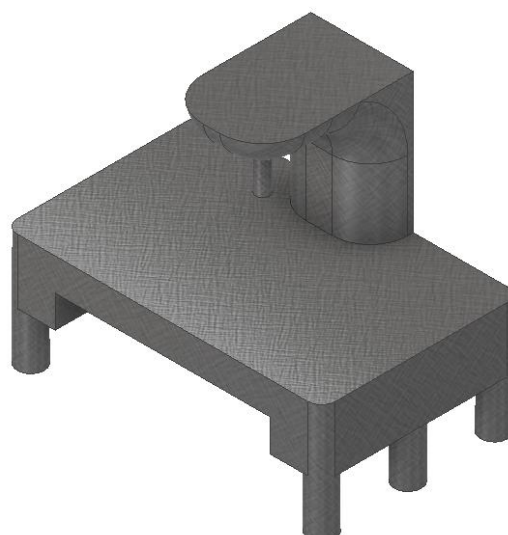


**P8** Kolečko





*P9 Pomocný díl – pohled z boku*



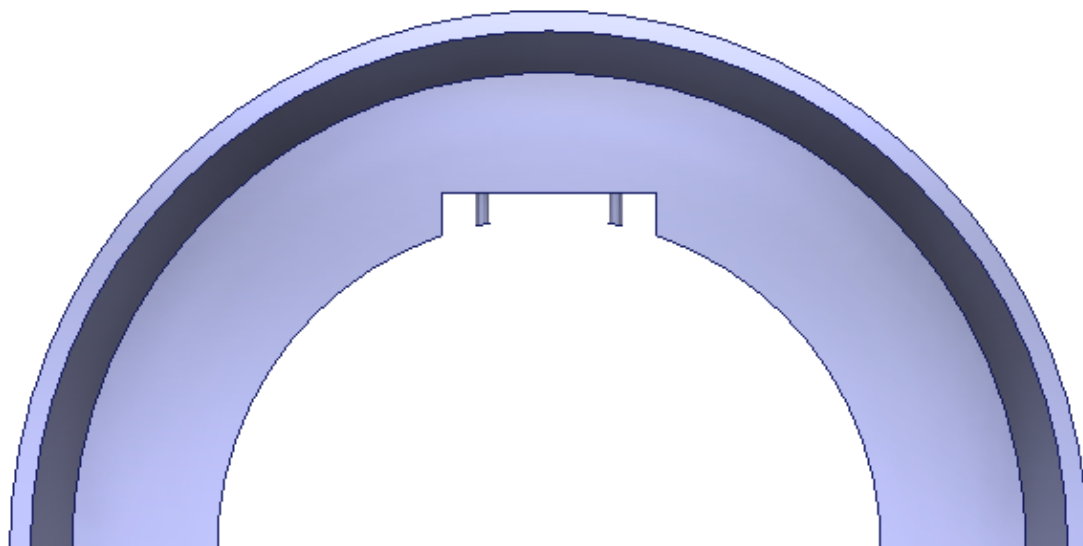
*P10 Pomocný díl*



*P11 Čep – pohled z boku*



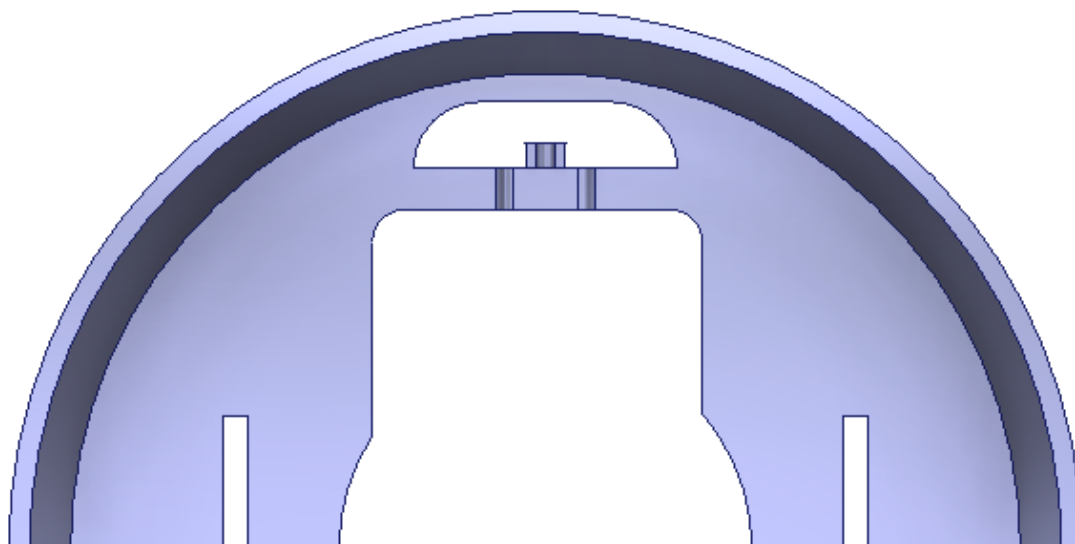
*P12 Čep*



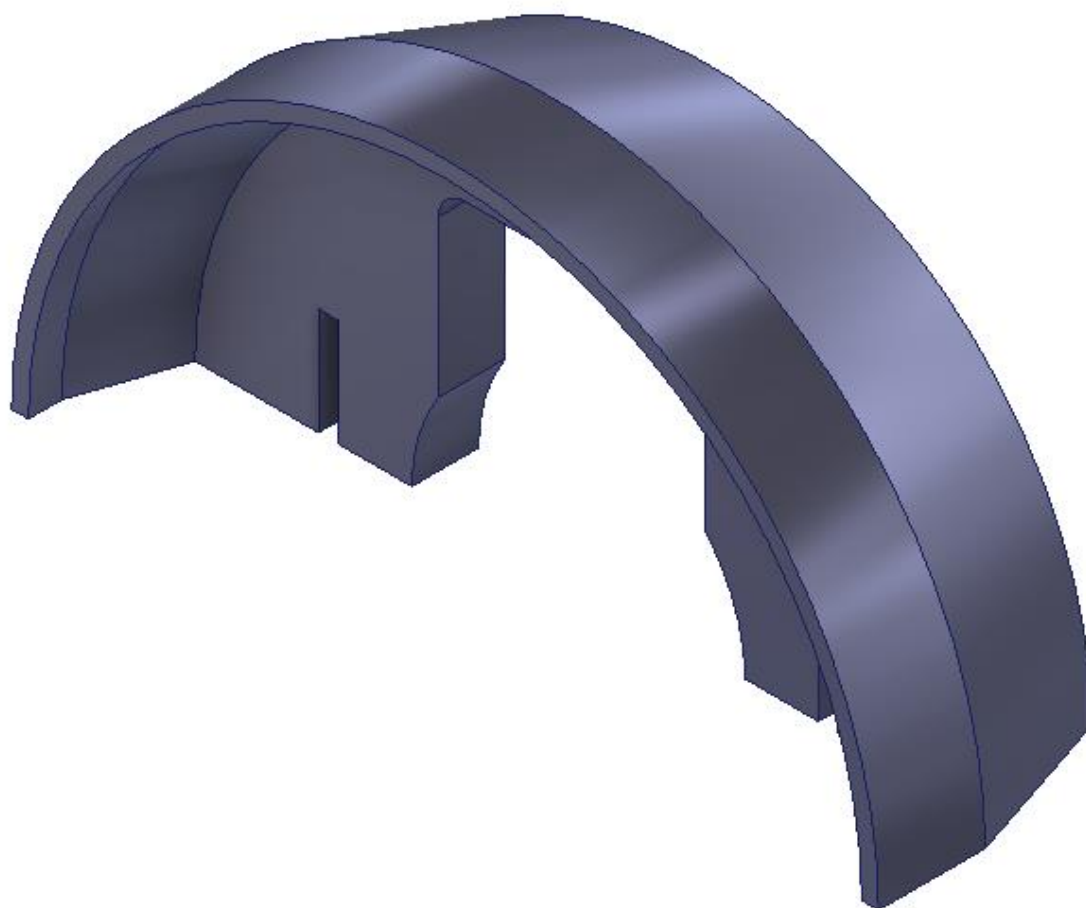
*P13 Šupina 1 – pohled z boku*



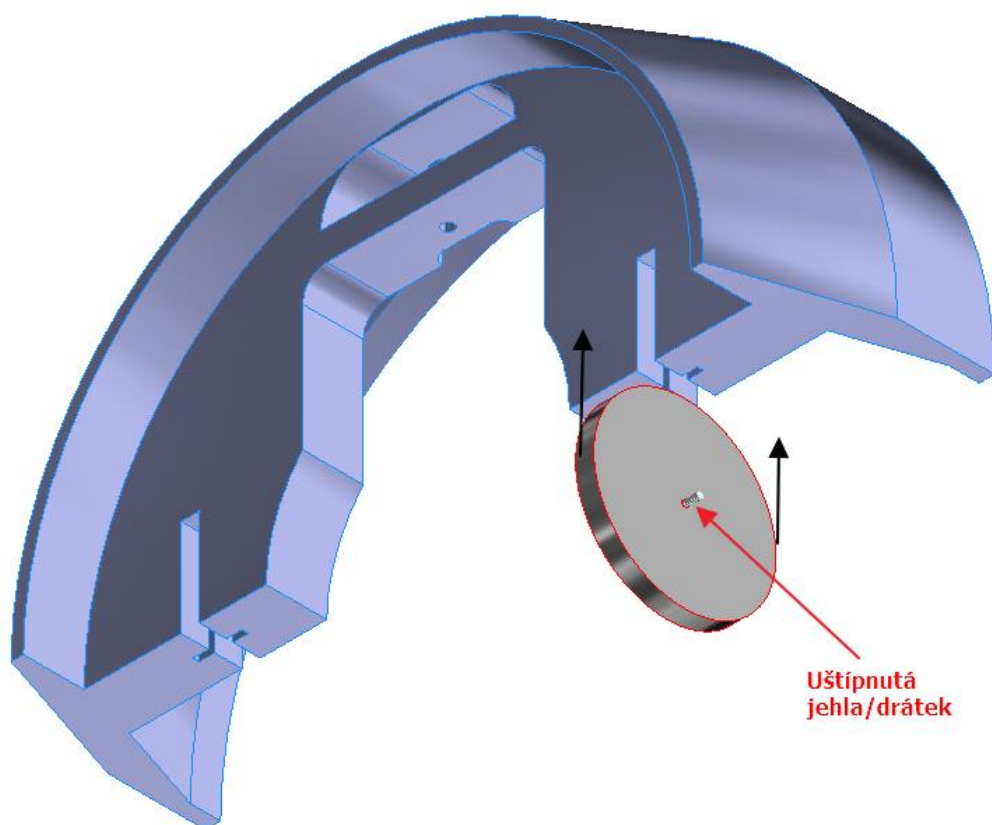
*P14 Šupina 1*



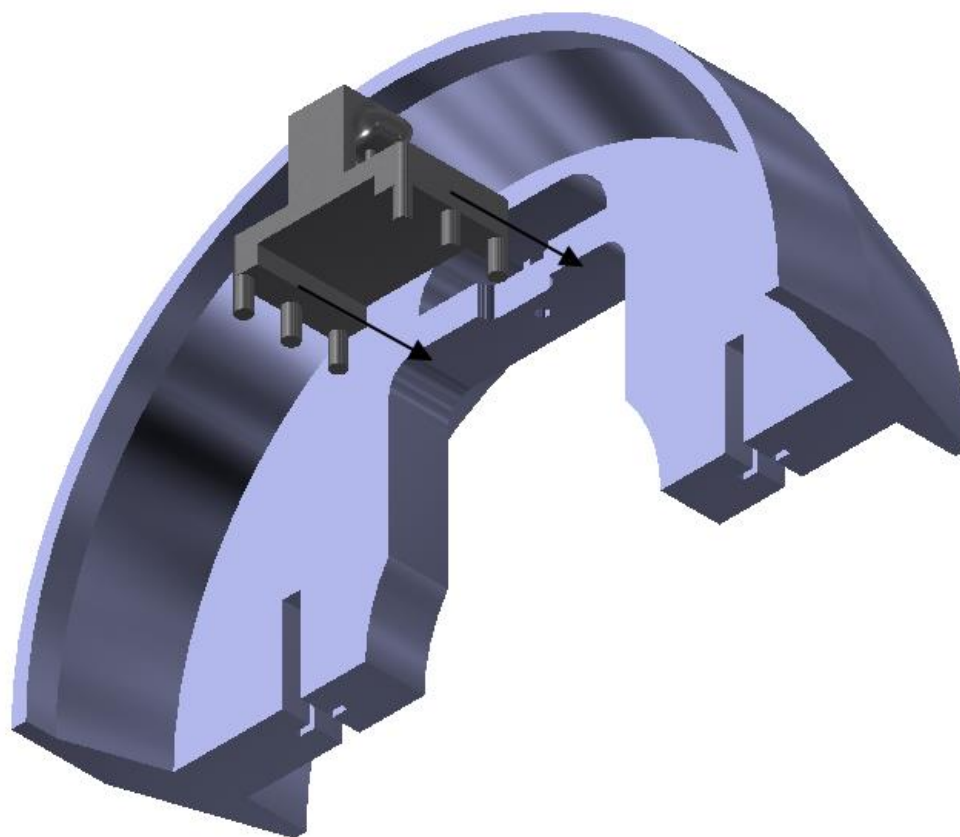
*P15 Šupina 2 – pohled z boku*



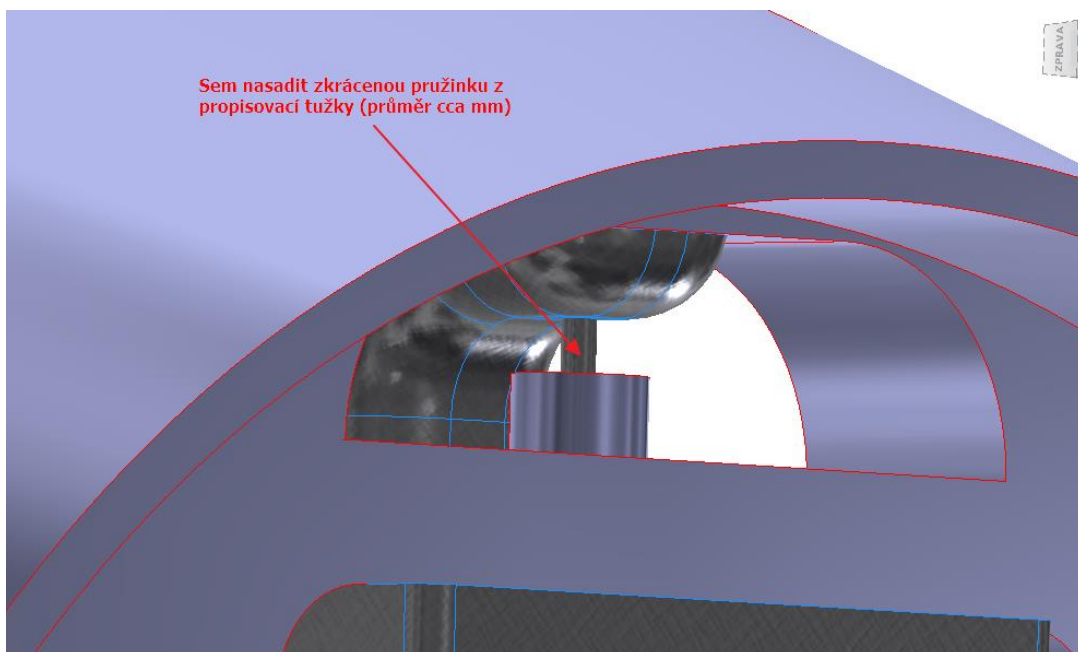
*P16 Šupina 2*



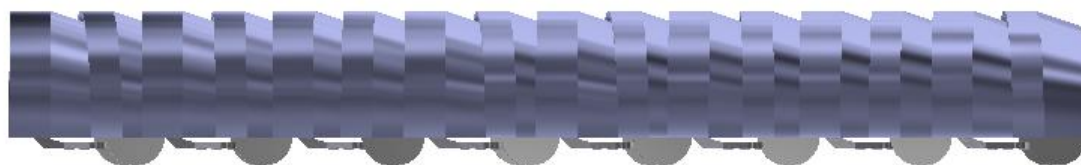
*P17 Nasunutí kolečka na šupinu 2*



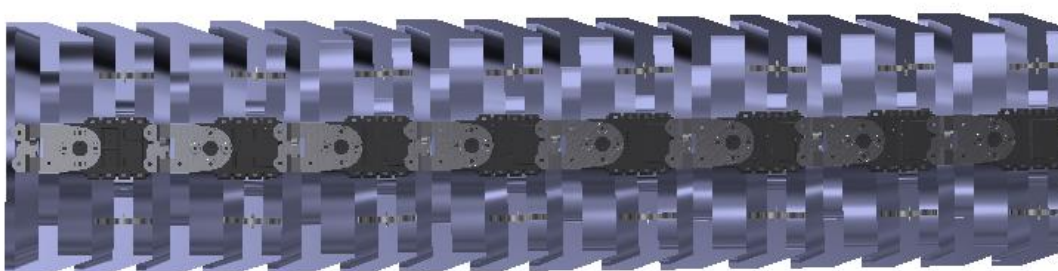
*P18 Nasunutí šupiny 2 na pomocný díl*



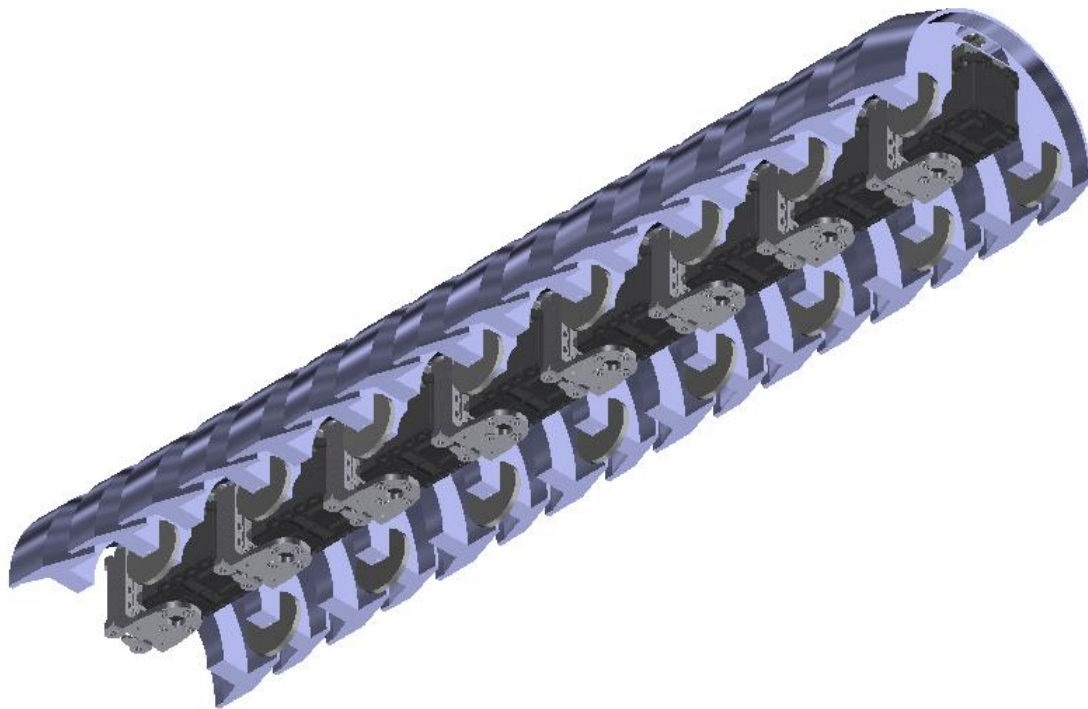
*P19 Detail spojení pomocného dílu s šupinou 2*



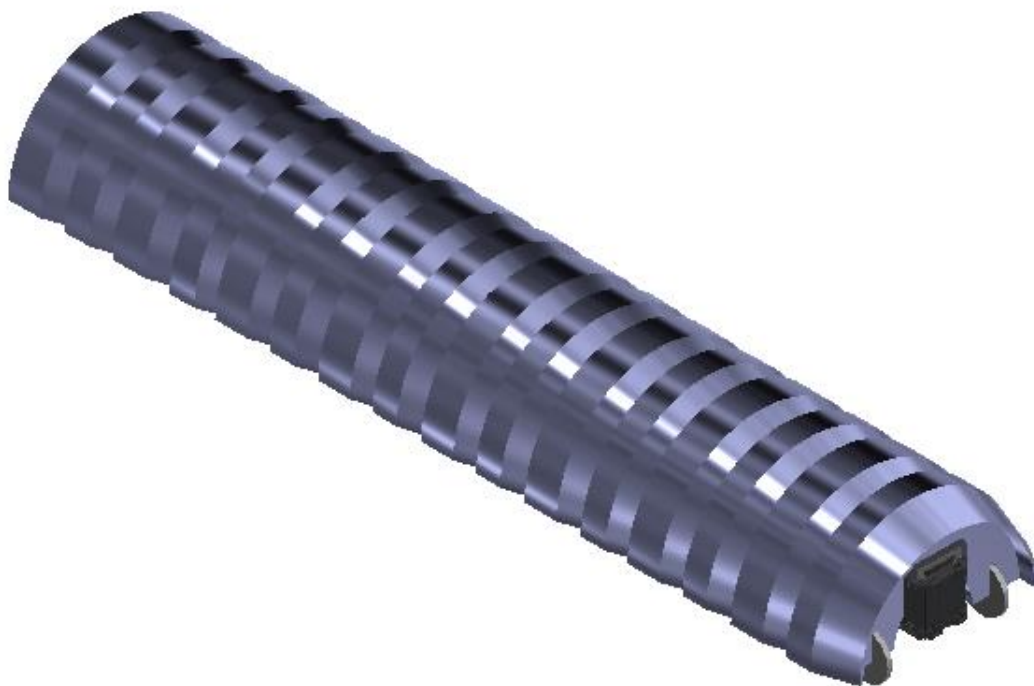
*P20 Sestavený I-model – pohled z boku*



*P21 Sestavený I-model – pohled zespodu*



*P22 Sestavený I-model – pohled ze spodního rohu*



*P23 Sestavený I-model – pohled z horního rohu*