

Technická zpráva

Název projektu:

Výukový model pro robotiku

(Číslo projektu: VS-14-019)

Název zprávy:

Kinematika a dynamika manipulátoru pro výukové účely

Zapsáno (místo, datum):

KKY, 30. ledna 2015

Autor:

Martin Švejda

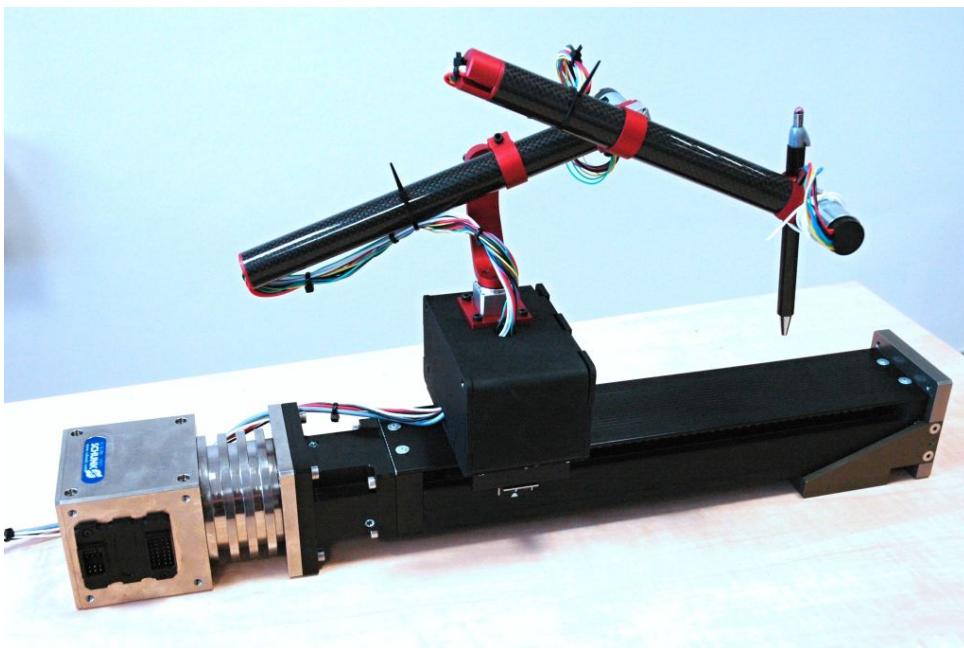
Obsah

1	Úvod	3
2	Kinematika výukového modelu manipulátoru	4
2.1	Přímý geometrický model	7
2.2	Inverzní geometrický model	7
2.3	Okamžitá kinematická úloha	9
3	Dynamika výukového modelu manipulátoru	9
3.1	Přístup s využitím Euler-Lagrangeových rovnic	9
3.2	Newton-Eulerův přístup	10
4	Virtuální model manipulátoru pro výukové účely	10
5	Příklad aplikace „Pick and Place“	13
5.1	Generátor požadované trajektorie koncového efektoru	13
5.2	Ověření dynamického modelu	16
5.3	Realizace virtuálního dynamického modelu manipulátoru (implementační poznámky)	17
6	Závěr	19

1 Úvod

Výzkumná zpráva se zabývá vytvořením matematického modelu vyvíjeného manipulátoru pro výukové účely v robotice a mechatronice. S ohledem na cíle projektu je nezbytně nutné vytvořit korektní matematický model manipulátoru, na kterém budou prezentovány veškerá základní principy modelování kinematiky a dynamiky manipulátorů. Znalost matematického modelu manipulátoru hraje klíčovou roli pro pochopení dalších nadřazených problémů v řízení, optimalizaci atd.

Vyvíjený manipulátor, viz Obrázek 1, je tvořen sériovou architekturou se 3 stupni volnosti (DoF), které umožňují pohyb koncového efektoru manipulátoru ve třech nezávislých translačních osách v prostoru. Manipulátor je poháněn 3 nezávislými rotačními aktuátory a je vybaven systémem modulárně uzpůsobitelných ramen z uhlíkových vláken. Konstrukce manipulátoru je originálním výsledkem projektu podrobně popsáným v technické zprávě [2]. Řídicí systém manipulátoru implementovaný v systému REX je podrobně popsán v technické zprávě [8].



Obrázek 1: Vyvinutý manipulátor se 3 DoF pro výukové účely

Technická zpráva sleduje cíle projektu a věnuje se především následujícím oblastem:

- **Model kinematiky manipulátoru**

Matematický model kinematiky manipulátoru byl vytvořen na základě obecných principů používaných v robotice. Důraz byl kladen nejen na vlastní vytvoření kinematického modelu, ale zejména na možnost ověření takto vzniklého modelu v SW nástroji Matlab/Simulink/SimMechanics umožňující vizualizaci pohybu manipulátoru.

- **Dynamický model manipulátoru**

Za účelem vytvoření kompletního matematického modelu je nezbytně nutné doplnit kinematický model manipulátoru modelem dynamickým. Tak dostáváme kompletní virtuální model robotu, na kterém lze demonstrovat přístupy *Model Based Design* a *Hardware In the Loop*.

- **Virtuální model robotu k implementaci do HW platformy**

Řešením diferenciálních rovnic získaného dynamického modelu lze vypočítat pohyb manipulátoru na základě momentů působících na jednotlivé aktuátory a externí síly působící na

koncový efektor. Implementací dynamického modelu do HW platformy společně se systémem řešení diferenciálních rovnic dynamického modelu získáváme fyzické zařízení modelující chování manipulátoru. Takové zařízení lze pak používat pro návrh řídicích systémů.

- **Generátory pohybu**

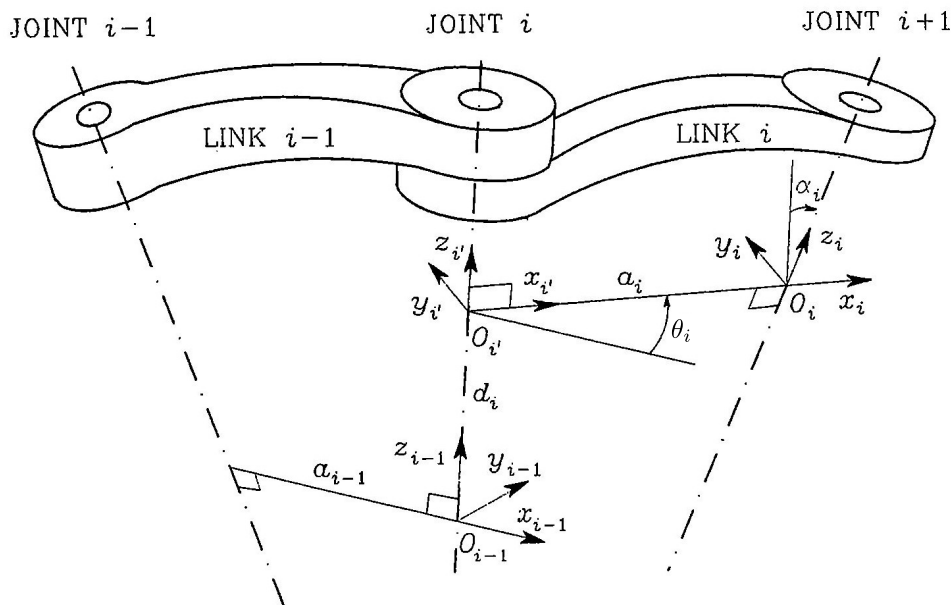
Za účelem demonstrace výukového modelu pro robotiku a systému řízení je nezbytně nutné implementovat vhodné algoritmy plánování pohybu koncového efektoru manipulátoru. Předpokládá se plánování pohybu manipulátoru pro jednoduché pick and place aplikace, tzn. přesun manipulátoru z počáteční do cílové pozice se současným tvarováním trajektorie mezi okrajovými body (např. za účelem vyhnutí se překážkám). Algoritmy plánování pohybu jsou pouze nastíněny a nejsou hlavním předmětem řešeného projektu.

2 Kinematika výukového modelu manipulátoru

Kinematický model manipulátoru byl založen na základě standardních popisů ramen manipulátoru prostřednictvím přiřazených souřadných systémů (s.s.) dle Denavit-Hartenbergovy (D-H) úmluvy. Podrobné informace k systému popisu kinematiky manipulátoru prostřednictvím D-H úmluvy lze nalézt např. v [9], [10]. Poznámka 1 předkládá stručný popis postupu aplikace D-H úmluvy na kinematiku manipulátoru. Přiřazené s.s. ramenům manipulátoru jsou znázorněny na Obrázku 3, D-H parametry jsou shrnuty v Tabulce 1.

■ **Poznámka 1 (Denavit-Hartenbergova úmluva)**

Definice s.s. $F_i = \{O_i - x_i y_i z_i\}$ za předpokladu znalosti s.s. $F_{i-1} = \{O_{i-1} - x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}\}$ dle D-H úmluvy je vyjádřena následovně:



Obrázek 2: D-H úmluva

- Zvol osu z_i podél osy rotace, resp. translace kloubu *Joint* $i + 1$ a osu z'_i podél osy rotace, resp. translace kloubu *Joint* i
- Umístí počátek O_i s.s. F_i do průsečíku osy z_i a normály¹ os z_{i-1} a z_i . Umístí počátek O'_i s.s. $F'_i = \{O'_i - x'_i y'_i z'_i\}$ do průsečíku osy z_{i-1} a téže normály.

¹normála os x a y je spojnice těchto os s minimální vzdáleností svírající s osami pravý úhel

- Zvol osu \mathbf{x}_i a \mathbf{x}'_i podél normály ve směru od kloubu *Joint i* do kloubu *Joint i + 1*.
- Zvol osu \mathbf{y}_i a \mathbf{y}'_i tak, aby výsledné s.s. byly pravotočivé.

Lze snadno ukázat, že D-H úmluva nedefinuje jednoznačně umístění s.s. v následujících případech.

- Pro s.s. $F_0 = \{\mathbf{O}_0 - \mathbf{x}_0\mathbf{y}_0\mathbf{z}_0\}$ je určena jednoznačně pouze osa \mathbf{z}_0 (podle osy rotace, resp. translace prvního kloubu manipulátoru *Joint 1*). Osu \mathbf{x}_0 a počátek \mathbf{O}_0 lze proto volit libovolně. Osa \mathbf{y}_0 je pak určena tak, aby výsledný systém byl opět pravotočivým.
- Pro s.s. $F_n = \{\mathbf{O}_n - \mathbf{x}_n\mathbf{y}_n\mathbf{z}_n\}$, kde n je počet kloubů s jedním stupněm volnosti uvažovaného manipulátoru není jednoznačně určena osa \mathbf{z}_n , neboť kloub *Joint n + 1* již neexistuje. Osa \mathbf{x}_n však musí zůstat kolmá k ose \mathbf{z}_{n-1} .
- Pokud jsou dvě po sobě jdoucí osy kloubů (\mathbf{z}_{i-1} a \mathbf{z}_i) paralelní, jejich normála není jednoznačně definována (může být libovolně posunuta ve směru os kloubů).
- Pokud se dvě po sobě jdoucí osy kloubů (\mathbf{z}_{i-1} a \mathbf{z}_i) protínají (normála je nulové délky), osa \mathbf{x}_i bude volena tak, aby byla kolmá k rovině definované osami \mathbf{z}_{i-1} a \mathbf{z}_i . Její *kladný směr* však může být volen libovolně.

Nyní může být vzájemná poloha s.s. F_{i-1} a F_i popsána pouze pomocí čtyř D-H parametrů:

$a_i \dots$ vzdálenost mezi počátky \mathbf{O}_i a \mathbf{O}'_i

$d_i \dots$ vzdálenost mezi počátky \mathbf{O}_{i-1} a \mathbf{O}'_i

$\alpha_i \dots$ úhel mezi osami \mathbf{z}_{i-1} a \mathbf{z}_i daný pootočením s.s. F'_i podél osy \mathbf{x}'_i

$\theta_i \dots$ úhel mezi osami \mathbf{x}_{i-1} a \mathbf{x}_i daný pootočením s.s. F_{i-1} podél osy \mathbf{z}_{i-1}

Je zřejmé, že pro základní typy kloubů s jedním stupněm volnosti platí:

kloub *Joint i* je typu P proměnná definující pohyb kloubu je d_i , proměnné a_i , α_i , θ_i jsou konstanty definující geometrické uspořádání ramene *Link i*

kloub *Joint i* je typu R proměnná definující pohyb kloubu je θ_i , proměnné a_i , d_i , α_i jsou konstanty definující geometrické uspořádání ramene *Link i*

Transformační vztah mezi s.s. F_{i-1} a F_i je dán následujícím způsobem.

- Vyber s.s. F_{i-1}
- Posuň tento systém podél osy \mathbf{z}_{i-1} o vzdálenost d_i a otoč jej okolo osy \mathbf{z}_{i-1} o úhel $\theta_i \Rightarrow$ dostáváme s.s. F'_i . Matice přechodu²:

$$\mathbf{T}_{i'}^{i-1} = \text{Trans}(\mathbf{z}, d_i) \cdot \text{Rot}(\mathbf{z}, \theta_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} & 0 & 0 \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} & 0 & 0 \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

²zkratka c_{θ_i} , resp. s_{θ_i} označuje $\cos \theta_i$, resp. $\sin \theta_i$. Podobně $s_{(\theta_1+\theta_2)}$ označuje $\sin(\theta_1 + \theta_2)$

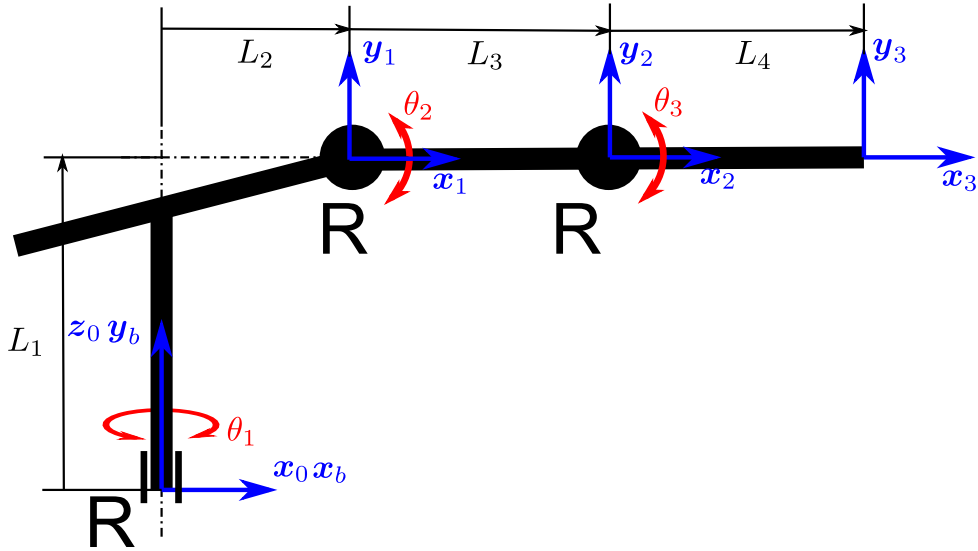
- Posuň s.s. F_i' podél osy \mathbf{x}'_i o vzdálenost a_i a otoč jej okolo osy \mathbf{x}'_i o úhel $\alpha_i \Rightarrow$ dostáváme s.s. F_i . Matice přechodu:

$$\mathbf{T}_i^{i'} = \text{Trans}(\mathbf{x}, a_i) \cdot \text{Rot}(\mathbf{x}, \alpha_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\alpha_i} & -s_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & c_{\alpha_i} & -s_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

- Výsledná matice přechodu ze s.s. F_{i-1} do s.s. F_i je dána:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_i^{i-1} &= \mathbf{T}_{i'}^{i-1} \cdot \mathbf{T}_i^{i'} = \text{Trans}(\mathbf{z}, d_i) \cdot \text{Rot}(\mathbf{z}, \theta_i) \cdot \text{Trans}(\mathbf{x}, a_i) \cdot \text{Rot}(\mathbf{x}, \alpha_i) = \\ &= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

Připomeňme, že matice přechodu matice (3) je funkcí pouze kloubových souřadnic θ_i (pro rotační klouby R) a d_i (pro translační klouby P). ■



Obrázek 3: Zavedené s.s. manipulátoru

i	d_i	θ_i	a_i	α_i	$q_{i_{HOME}}$
1	L_1	θ_1	L_2	$\frac{\pi}{2}$	0
2	0	θ_2	L_3	0	0
3	0	θ_3	L_4	0	0

Tabulka 1: D-H parametry základního kinematického modelu, $q_{i_{HOME}}$ je domovská poloha kloubových souřadnic, která odpovídá konfiguraci na Obrázku 3, tučně jsou vyznačeny aktivní kloubové souřadnice

Kloubové a zobecněné souřadnice manipulátoru a geometrické parametry jsou dány jako³

$$\mathbf{X} = \mathbf{O}_3^b = [x \ y \ z]^T \quad (\text{zobecněné souřadnice}) \quad (4)$$

$$\mathbf{Q} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T \quad (\text{kloubové souřadnice}) \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\xi} = [L_1 \ L_2 \ L_3 \ L_4]^T \quad (\text{geometrické parametry}) \quad (6)$$

2.1 Přímý geometrický model

Jedná se o nalezení zobecněných souřadnic \mathbf{X} za předpokladu znalosti souřadnic kloubových \mathbf{Q} . Problém přímého geometrického modelu (DGM) je pro sériové manipulátory vždy řešitelný v analytickém tvaru a existuje pro něj vždy právě jedno řešení. Řešení DGM je dáno přímo násobením homogenních transformačních matic transformující s.s. jednotlivých ramen manipulátoru (včetně kompenzace orientace základny \mathbf{T}_0^b):

$$\mathbf{T}_4^b = \mathbf{T}_0^b \cdot \mathbf{T}_1^0 \cdot \mathbf{T}_2^1 \cdot \mathbf{T}_3^2, \quad \mathbf{X} = \mathbf{O}_3^b = \mathbf{T}_3^b[1 : 3, 4] \quad (7)$$

kde \mathbf{T}_i^{i-1} jsou homogenní transformační matice vzniklé dosazením D-H parametrů z Tabulky 1 do obecných předpisů (3) a

$$\mathbf{T}_0^b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

je kompenzace orientace základny manipulátoru (vzájemné natočení s.s. F_b a F_0)⁴.

Výsledný vztah pro DGM je následující:

$$\mathbf{X} = \mathbf{O}_3^b = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) (\cos(\theta_2) \cos(\theta_3) L_4 - \sin(\theta_2) \sin(\theta_3) L_4 + \cos(\theta_2) L_3 + L_2) \\ \sin(\theta_2) \cos(\theta_3) L_4 + \cos(\theta_2) \sin(\theta_3) L_4 + \sin(\theta_2) L_3 + L_1 \\ -\sin(\theta_1) (\cos(\theta_2) \cos(\theta_3) L_4 - \sin(\theta_2) \sin(\theta_3) L_4 + \cos(\theta_2) L_3 + L_2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.2 Inverzní geometrický model

Inverzní geometrický model (IGM) pro sériové manipulátory obecně není triviální záležitostí, nelze řešit analyticky a může existovat více izolovaných řešení. V případě manipulátoru pro výukové účely je však z důvodu jednoduchosti kinematické architektury možné problém IGM řešit Algoritmem 2.2, který vede na více izolovaných řešení, avšak tato řešení lze nalézt v analytické podobě.

◆ Algoritmus 1 (IGM pro výukový model manipulátoru)

Vstup:

Polohy zobecněných souřadnic $\mathbf{X} = \mathbf{O}_3^b = [x \ y \ z]^T$ (poloha konc. efektoru manipulátoru vzhledem k s.s. F_b)

Výstup:

Polohy kloubových souřadnic $\mathbf{Q} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$

³ \mathbf{O}_i^j označuje souřadnice bodu/vektoru \mathbf{O}_i vyjádřené vzhledem k s.s. F_j

⁴ $\mathbf{O}_3^b[1]$ označuje 1. složku vektoru \mathbf{O}_3^b , $\mathbf{T}_3^b[1 : 3, 4]$ vyjadřuje 1. až 3. řádek, 4. sloupec matice, tedy $= \mathbf{O}_3^b$

Vlastní algoritmus:

1. Vypočti souřadnice bodu \mathbf{O}_3 (poloha koncového efektoru) v s.s. F_0

$$\begin{bmatrix} \mathbf{O}_3^0 \\ 1 \end{bmatrix} = (\mathbf{T}_0^b)^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{O}_3^b \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Z pozorování symbolického vyjádření x a y složky bodu \mathbf{O}_3^0

$$\mathbf{O}_3^0 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) (\cos(\theta_2) \cos(\theta_3) L_4 - \sin(\theta_2) \sin(\theta_3) L_4 + \cos(\theta_2) L_3 + L_2) \\ \sin(\theta_1) (\cos(\theta_2) \cos(\theta_3) L_4 - \sin(\theta_2) \sin(\theta_3) L_4 + \cos(\theta_2) L_3 + L_2) \\ \sin(\theta_2) \cos(\theta_3) L_4 + \cos(\theta_2) \sin(\theta_3) L_4 + \sin(\theta_2) L_3 + L_1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

lze nalézt vztah pro výpočet první kloubové souřadnice θ_1 :

$$\theta_1 = \text{atan2}(\mathbf{O}_3^0[2], \mathbf{O}_3^0[1]) + k\pi, \quad k = \{0, 1\} \quad (11)$$

tedy existují dvě řešení pro kloubovou souřadnici θ_1 .

2. Se znalostí θ_1 , tedy i transformací $\mathbf{T}_1^0(\theta_1)$, lze vypočítat souřadnice bodu \mathbf{O}_3 v s.s. F_1 :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{O}_3^1 \\ 1 \end{bmatrix} = (\mathbf{T}_1^0)^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{O}_3^0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Opět využitím symbolického vyjádření bodu \mathbf{O}_3^1

$$\mathbf{O}_3^1 = \begin{bmatrix} L_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) + \cos(\theta_2) L_3 \\ L_4 \sin(\theta_2 + \theta_3) + \sin(\theta_2) L_3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

lze umocněním a sečtením x a y souřadnice tohoto bodu získat vztah pro výpočet kloubové souřadnice θ_3 :

$$\begin{aligned} \mathbf{O}_3^1[1]^2 + \mathbf{O}_3^1[2]^2 &= L_4^2 + 2 L_4 L_3 \cos(\theta_3) + L_3^2 \\ \cos(\theta_3) &= \frac{\mathbf{O}_3^1[1]^2 + \mathbf{O}_3^1[2]^2 - L_3^2 - L_4^2}{2 L_4 L_3} \\ \sin(\theta_3) &= \pm \sqrt{1 - \sin^2 \theta_3} \\ \theta_3 &= \text{atan2}(\sin(\theta_3), \cos(\theta_3)) \end{aligned} \quad (14)$$

tedy existují dvě řešení pro kloubovou souřadnici θ_3

3. S využitím součtových vzorců pro funkce \sin a \cos lze symbolické vyjádření bodu \mathbf{O}_3^1 z rovnice (13) přeformulovat na soustavu dvou lineárních rovnic pro dvě neznámé $\sin(\theta_2)$, $\cos(\theta_2)$ a nalézt tak řešení pro kloubovou souřadnici θ_2 :

$$\begin{aligned} \sin(\theta_2) &= \frac{\cos(\theta_3) L_4 \mathbf{O}_3^1[2] + L_3 \mathbf{O}_3^1[2] - \mathbf{O}_3^1[1] \sin(\theta_3) L_4}{L_4^2 + 2 L_4 L_3 \cos(\theta_3) + L_3^2} \\ \cos(\theta_2) &= \frac{\mathbf{O}_3^1[2] \sin(\theta_3) L_4 + \mathbf{O}_3^1[1] \cos(\theta_3) L_4 + \mathbf{O}_3^1[1] L_3}{L_4^2 + 2 L_4 L_3 \cos(\theta_3) + L_3^2} \\ \theta_2 &= \text{atan2}(\sin(\theta_2), \cos(\theta_2)) \end{aligned} \quad (15)$$

Je zřejmé, že IGM pro model manipulátoru pro výukové účely má tak celkem 4 izolovaná řešení daná rovnicemi (11), (14). \blacklozenge

2.3 Okamžitá kinematická úloha

Vzhledem k potřebě nalézt dynamický model manipulátor, je nezbytné znát nejen závislosti mezi polohami zobecněných a kloubových souřadnic (DGM, IGM), ale také závislosti rychlostí a zrychlení mezi těmito souřadnicemi, které lze obecně psát jako:

Přímý okamžitá kinematická úloha:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{J}(\mathbf{Q}) \cdot \dot{\mathbf{Q}} \\ \ddot{\mathbf{X}} &= \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{Q}) \cdot \dot{\mathbf{Q}} + \mathbf{J}(\mathbf{Q}) \cdot \ddot{\mathbf{Q}}\end{aligned}\quad (16)$$

Inverzní okamžitá kinematická úloha:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{Q}} &= \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{X}) \cdot \dot{\mathbf{X}} \\ \ddot{\mathbf{Q}} &= \dot{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{X}) \cdot \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{X}) \cdot \ddot{\mathbf{X}}\end{aligned}\quad (17)$$

kde $\mathbf{J}(\mathbf{Q})$ respektive $\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{X})$ nazýváme *kinematickým* respektive *inverzním kinematickým jakobiánem*. Lze ukázat [9], [7], že prvky kinematického jakobiánu a jeho časové derivace není nutné odvozovat přímým derivováním polohových vztahů (DGM, IGM) podle času, ale lze je odvodit přímo prostřednictvím prvků homogenních transformačních matic \mathbf{T}_0^b , \mathbf{T}_i^{i-1} , $i = 1, 2, 3$. Konkrétní obecné vztahy pro výpočet kinematického jakobiánu a jeho časové derivace zde neuvádíme, jejich podrobné odvození lze nalézt v [9].

3 Dynamika výukového modelu manipulátoru

Existují dva základní přístupy k vytváření dynamických modelů manipulátoru. Poznamenejme, že oba přístupy formulují dynamické rovnice manipulátoru v prostoru kloubových souřadnic.

3.1 Přístup s využitím Euler-Lagrangeových rovnic

Metoda založena na vyjádření Lagrangiánu ve tvaru:

$$L = T(\mathbf{Q}, \dot{\mathbf{Q}}) - U(\mathbf{Q}) \quad (18)$$

kde T resp. U je kinetická resp. potenciální energie všech ramen manipulátoru.

Pohybové rovnice pro manipulátor s n rameny lze poté získat ve tvaru:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i, \quad i = 1 \dots n \quad (19)$$

kde $q_i = \mathbf{Q}[i]$ jsou kloubové souřadnice manipulátoru a τ_i je síla/moment působící na i -tý kloub manipulátoru (síla aktuátorů).

Rovnici (19) lze přepsat do známého tvaru pohybové rovnice:

$$\sum_{j=1}^n b_{ij}(\mathbf{Q}) \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n h_{ijk}(\mathbf{Q}) \dot{q}_k \dot{q}_j + g_i(\mathbf{Q}) = \tau_i \quad (20)$$

kde $b_{ij}(\mathbf{Q})$, $h_{ijk}(\mathbf{Q})$, $g_i(\mathbf{Q})$ jsou koeficienty závislé na poloze manipulátoru. Opět lze ukázat, [7], [3], že tyto koeficienty lze odvodit přímo z prvků homogenních transformačních matic a hmotnostních parametrů (umístění a hmotnosti těžišť ramen a momenty setrvačnosti ramen vzhledem k těžišti).

Přesto, že přístup prostřednictvím Euler-Lagrangeových rovnic je často používán především pro možnosti jednoduše modelovat různé externí silové projevy (třecí síly, síly pružin, tlumící síly, atd.), není příliš vhodný pro vytváření dynamických modelů manipulátorů za účelem jejich využití v aplikacích v reálném čase (zejména kvůli velkým výpočetním nárokům při vyčíslování koeficientů pohybové rovnice).

3.2 Newton-Eulerův přístup

Lze ukázat, že výpočet translačních a rotačních rychlostí a zrychlení jednotlivých souřadných systémů (ramen) manipulátoru lze zapsat rekurzivním algoritmem, jehož parametry jsou (podobně jako v případě výpočtu kinematického jakobiánu) prvky homogenních transformačních matic. Takový rekurzivní algoritmus lze modifikovat i na výpočet rotačních a translačních rychlostí a zrychlení jednotlivých těžišť ramen. Dostáváme tak **dopředný rekurzivní předpis**, který nám vypočítává rychlosti a zrychlení těžišť jednotlivých ramen od prvního ramene (nepohybující se základny) k poslednímu a jehož vstupními daty jsou požadované rychlosti a zrychlení jednotlivých kloubů (aktuátorů) manipulátoru.

Uvažujeme-li dále, že jednotlivá ramena spolu silově/momentově interagují, tzn. poslední rameno působí silou/momentem na rameno předposlední atd. (zákon akce a reakce). Lze odvodit **zpětný rekurzivní algoritmus**, s uvažováním externích sil/momentů působících na poslední rameno manipulátoru (externí síly působící na koncový efektor, např. vliv prostředí, atd.), který postupně, směrem od posledního k prvnímu ramenu, vypočítává síly momenty působící v jednotlivých s.s. ramen. Tyto síly resp. momenty pak mohou být promítnuty do sil resp. momentů prizmatických resp. rotačních kloubů. Získáváme tak síly/momenty jednotlivých aktuátorů manipulátor. Principiálně tak Newton-Eulerův přístup řeší prioritně tzv. **inverzní dynamickou úlohu**, tedy nalezení požadovaných sil/momentů aktuátorů takových, aby manipulátor realizoval požadovaný pohyb zadaný polohou, rychlostí a zrychlením jeho kloubových souřadnic.

Vzhledem k rekurzivní podstatě metody je Newton-Eulerův přístup vhodný k implementaci dynamických modelů manipulátoru. V případě, že požadujeme realizovat tzv. **přímou dynamickou úlohu**, tedy nalezení požadovaného pohybu manipulátoru ve smyslu poloh, rychlostí a zrychlení jeho kloubových souřadnic ze znalosti sil/momentů působících na jednotlivé klouby a síly/momentu působící na koncový efektor, je možné využít rekurzivní formulaci inverzní dynamické úlohy a vypočítat přímo hodnoty zrychlení \ddot{q}_i kloubových souřadnic manipulátoru. Dostáváme tak předpis:

$$\ddot{\mathbf{Q}} = \mathbb{F}(\mathbf{Q}, \dot{\mathbf{Q}}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{F}, \boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\mu}) \quad (21)$$

kde \mathbf{Q} jsou kloubové souřadnice manipulátoru, $\boldsymbol{\tau}$ jsou síly/momenty působící v kloubech manipulátoru (vlivem řízených aktuátorů), \mathbf{F} jsou externí síly a momenty působící na koncový efektor, $\boldsymbol{\xi}$ jsou geometrické parametry manipulátoru a $\boldsymbol{\mu}$ jsou dynamické (hmotnostní) parametry manipulátoru (hmotnosti a umístění těžišť ramen, momenty setrvačnosti ramen k těžišti).

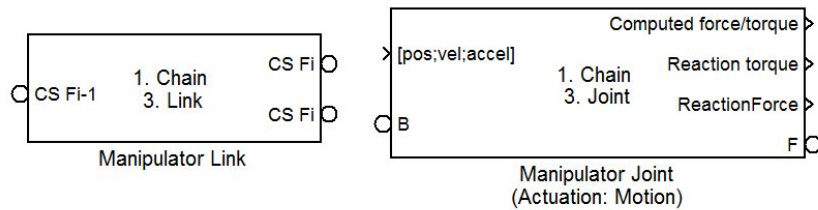
Podrobné informace k uvedeným rekurzivním algoritmům lze nalézt v [7], [3], [4].

4 Virtuální model manipulátoru pro výukové účely

Za účelem vytvoření manipulátoru pro výukové účely byla implementována knihovna bloků v prostředí Matlab/Simulink/SiMechanics a některé obecné funkce, které umožňují modelovat libovolné sériové kinematické řetězce manipulátorů. Poznamenejme, že vyvinuté bloky jsou stále ve fázi vývoje. Celý systém bloků a funkcí tvoří modulární nástroj k modelování manipulátorů. Vzhledem k podstatě projektu je takový přístup vhodný, neboť demonstruje možnosti využití obecných přístupů v robotice a umožňuje tak studentům pochopit princip vytváření virtuálních modelů rychlou a zejména systematickou cestou.

Byly implementovány následující funkce a bloky:

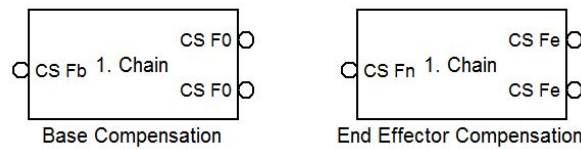
- **Bloky realizující kinematickou dvojici kloub + rameno v SimMechanicsu**



Obrázek 4: Blok realizující rameno a kloub manipulátoru

Lze obecně implementovat pro sériové manipulátory.

- **Bloky realizující kompenzaci polohy základny a koncového efektoru manipulátoru v SimMechanicsu**

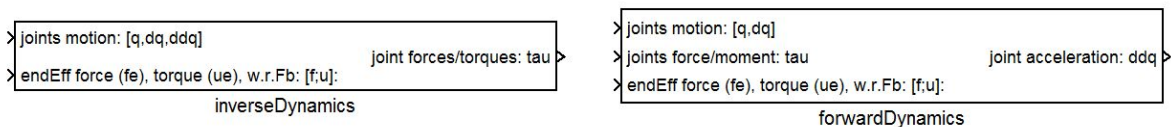


Obrázek 5: Blok realizující kompenzaci polohy základny a koncového efektoru

Lze obecně implementovat pro sériové manipulátory.

- **Bloky realizující přímou a inverzní dynamickou úlohu**

Založeny na výpočetně vhodnějším rekurzivním algoritmu Newtonova-Eulerova přístupu, viz Kapitola 3.2.



Obrázek 6: Blok realizující přímou a inverzní dynamickou úlohu

Lze obecně implementovat pro sériové manipulátory.

- **Funkce v Matlabu pro výpočet kinematického jakobiánu a jeho časové derivace**

jacobian.m

Lze obecně implementovat pro sériové manipulátory.

- **Funkce v Matlabu pro výpočet dopředných úloh (DGM, přímá okamžitá kinematická úloha)**

forwardKinematics.m

Lze obecně implementovat pro sériové manipulátory.

- **Funkce vytvářející datovou strukturu manipulátoru ze zadaných kinematických (geometrických) a dynamických (hmotnostních) parametrů**

robotSetup.m

Lze obecně implementovat pro manipulátory. Funkce vypočítává parametry a uloží je do datové struktury v Matlabu, která je vyžadována implementovanými bloky v SimMechanicsu.

Model manipulátoru je pak sestaven prostřednictvím výše uvedených funkcí a bloků pouze ze zadaných kinematických a dynamických parametrů. V případě uvažovaného manipulátoru pro výukové účely se jedná o následující parametry:

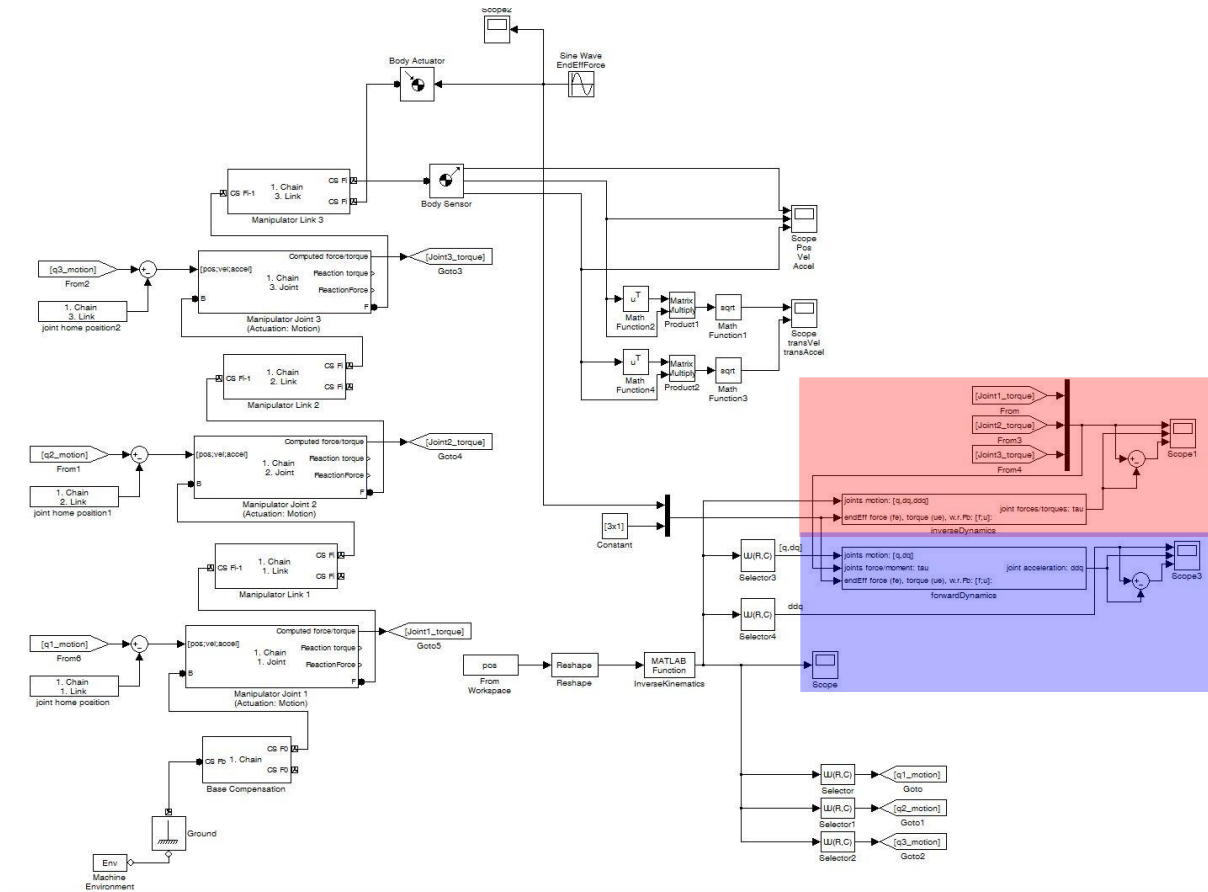
- **Kinematické parametry:**

DHpar	DH parametry, viz Tabulka 1
jointType	typy kloubů: RRR (R - rotační, P - translační kloub)
Qhome	domovské polohy kloubů, viz Tabulka 1
baseComp	kompence polohy základny, viz T_0^b
endEffComp	kompence polohy konc. efektoru, nepoužita

- **Dynamické parametry:**

mass	hmotnosti těžišť ramen, $m_1 \dots m_3$
inertiaTensor	matice v $\mathbb{R}^{3,3}$, tensor setrvačností těžišť ramen v s.s. daného ramene, $I_1 \dots I_3$
gravityCenter	vektor v \mathbb{R}^3 , poloha těžiště ramen v s.s. daného ramene, $T_1 \dots T_3$
gravityVector	vektor v \mathbb{R}^3 , směr gravitačního zrychlení v s.s. F_b

Výsledný model manipulátoru v SimMechanicsu je znázorněn na Obrázku 7.



Obrázek 7: Výukový model pro robotiku sestavený pomocí vytvořených bloků

5 Příklad aplikace „Pick and Place“

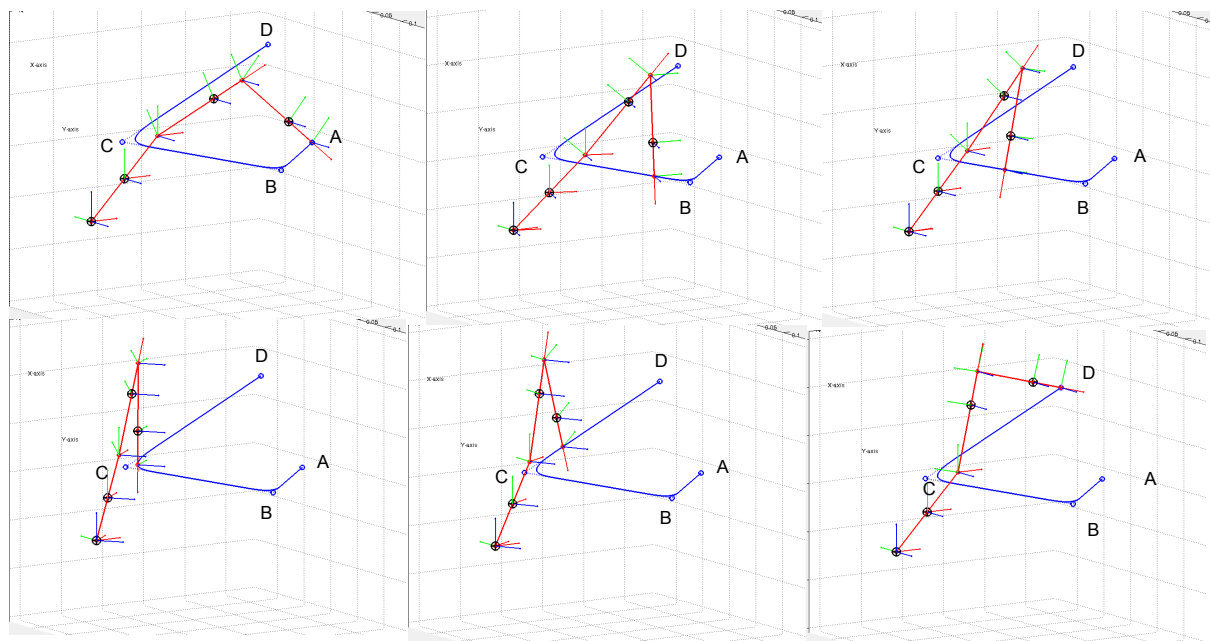
Pro demonstraci funkčnosti virtuálního modelu manipulátoru byla připravena jednoduchá aplikace pick and place (přemísťování předmětů manipulátorem). Zadání úlohy bylo následující:

Využijte virtuální model manipulátoru pro simulaci pohybu v případě, kdy potřebujeme přemístit daný předmět z bodu A do bodu D a zároveň požadujeme, aby se manipulátor vyhnul překážce a volil trajektorii takovým způsobem, že projede v blízkosti bodů B a D . Po celou dobu trajektorie klademe omezení na maximální rychlost v_{max} a maximální zrychlení a_{max} translačního pohybu koncového efektoru. Porovnejte výsledky získaných dynamických modelů manipulátoru (dopředná a inverzní dynamická úloha) s výsledky získanými z modelu v SimMechanicsu.

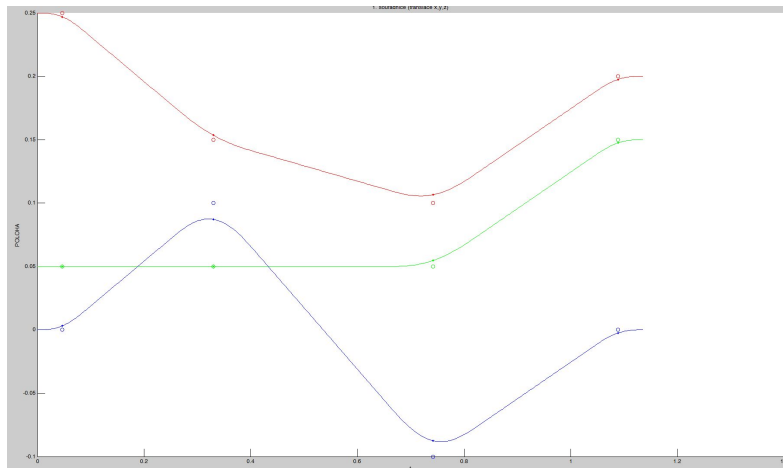
5.1 Generátor požadované trajektorie koncového efektoru

Trajektorie koncového efektoru manipulátoru, tedy souřadnice $\mathbf{X} = \mathbf{O}_3^b = [x \ y \ z]^T$, je v takovém případě volena často jako lineární segmenty mezi jednotlivými body trajektorie s polynomiálním napojením v blízkosti vnitřních bodů (B , C), pohyb po lineárních částech trajektorie je realizován s rychlostí v_{max} , pohyb v blízkosti vnitřních bodů trajektorie je interpolován polynomiální funkcí takovým způsobem, aby nedošlo k překročení maximálního povoleného zrychlení a_{max} (toto omezení odpovídá například požadavku, kdy manipulátorem nesená součást nesmí být vystavena většímu přetížení než je a_{max}). Ponechme stranou implementační detaily takového generátoru trajektorie, neboť v tomto případě nejsou náplní problematiky samotného virtuálního modelu manipulátoru. Obrázek 8 ukazuje generovanou trajektorii se současným rozfázovaným

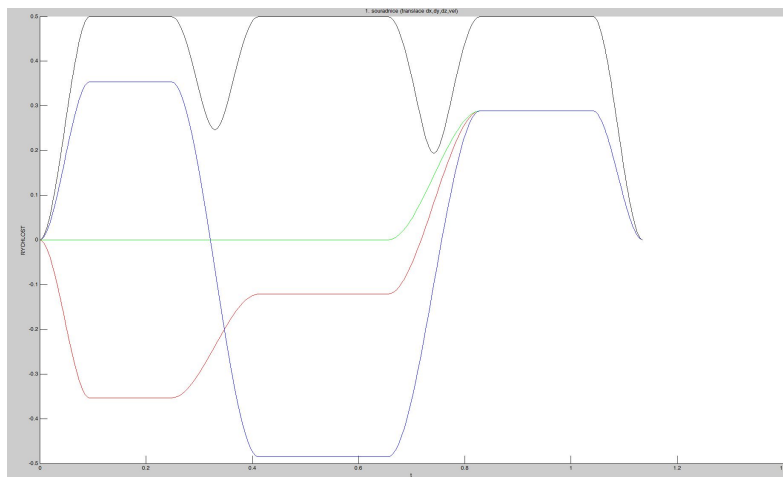
pohybem manipulátoru. Obrázek 9-11 znázorňuje polohy \mathbf{X} , rychlosti $\dot{\mathbf{X}}$ a zrychlení $\ddot{\mathbf{X}}$ zobecněných souřadnic z generátoru trajektorie. Poznamenejme, že prostřednictvím známé IGM a inverzní okamžité kinematické úlohy je možné zobecněné souřadnice a jejich časové derivace přepočítat do poloh \mathbf{Q} , rychlostí $\dot{\mathbf{Q}}$ a zrychlení $\ddot{\mathbf{Q}}$ souřadnic kloubových.



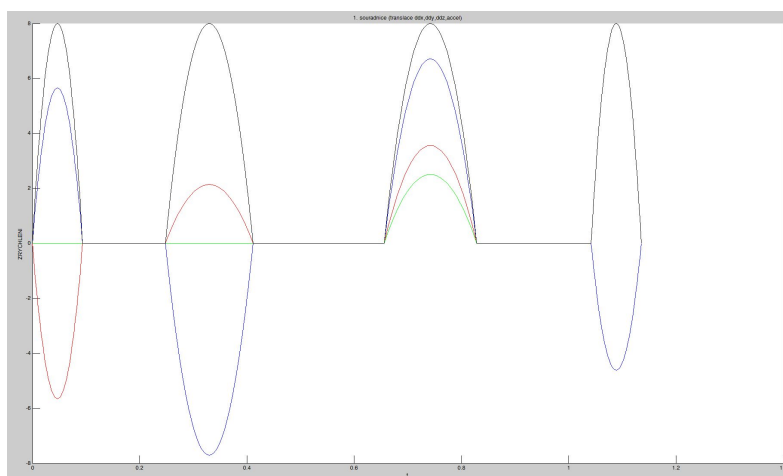
Obrázek 8: Virtuální model v SimMechanicsu + generovaná trajektorie



Obrázek 9: Polohy zobecněných souřadnic podél trajektorie manipulátoru



Obrázek 10: Rychlosti zobecněných souřadnic podél trajektorie manipulátoru, černě znázorněna celková rychlost $\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}$ (patrné jsou limity pro $v_{max} = 0.5m/s$ na lineárních úsecích)



Obrázek 11: Zrychlení zobecněných souřadnic podél trajektorie manipulátoru, černě znázorněna celkové zrychlení $\sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2 + \ddot{z}^2}$ (patrné jsou limity pro $a_{max} = 8m/s$ na úsecích polynomiálního napojení)

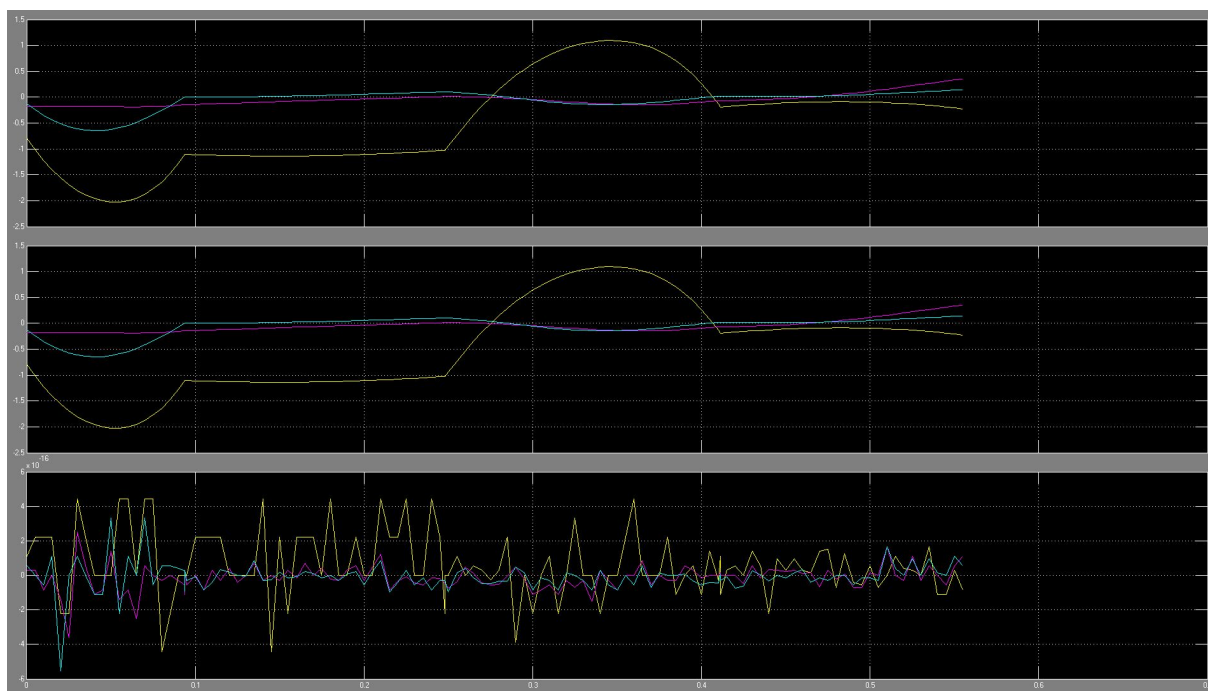
5.2 Ověření dynamického modelu

Vzhledem k faktu, že nyní známe požadované kloubové souřadnice, jejich rychlosti i zrychlení, můžeme využít režim inverzní dynamiky v SimMechanicsu a ověřit s jeho pomocí implementovaný algoritmus inverzní dynamické úlohy (blok `inverseDynamics`), viz Obrázek 7 (červená oblast), tedy relaci

$$\{Q, \dot{Q}, \ddot{Q}, F\} \Rightarrow \{\tau\}$$

kde F je sinusový signál generující síly působící na koncový efektor (variující zátěž koncového efektoru).

Obrázek 12 znázorňuje průběhy signálů na bloku `Scope1`, tedy vypočtené momenty v aktuátorech SimMechanicsem (nahore) a implementovaným blokem `inverseDynamics` (uprostřed) a jejich rozdíl (dole).



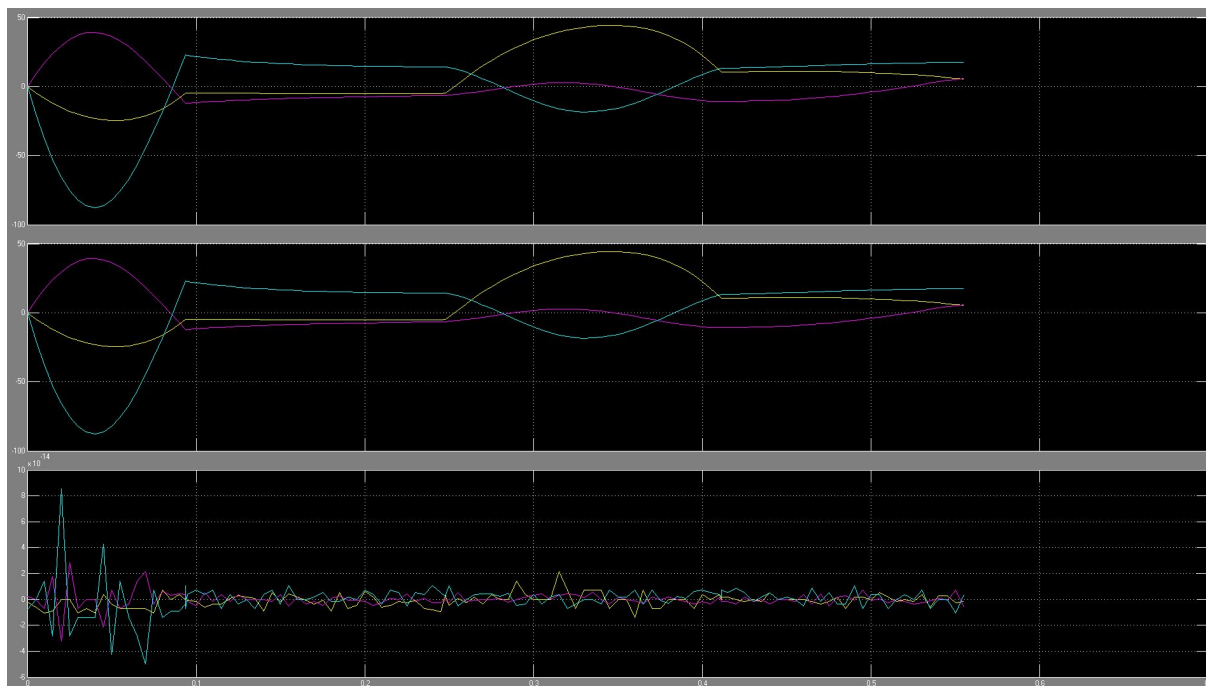
Obrázek 12: Ověření implementovaného bloku pro výpočet inverzní dynamické úlohy pro generovaný pohyb manipulátoru

Obdobným způsobem lze provést ověření implementovaného algoritmu přímé dynamické úlohy (blok `forwardDynamics`), viz Obrázek 7 (modrá oblast), tedy relaci danou funkcí (21)

$$\{Q, \dot{Q}, \tau, F\} \Rightarrow \{\ddot{Q}\}$$

kde F je sinusový signál generující síly působící na koncový efektor (variující zátěž koncového efektoru).

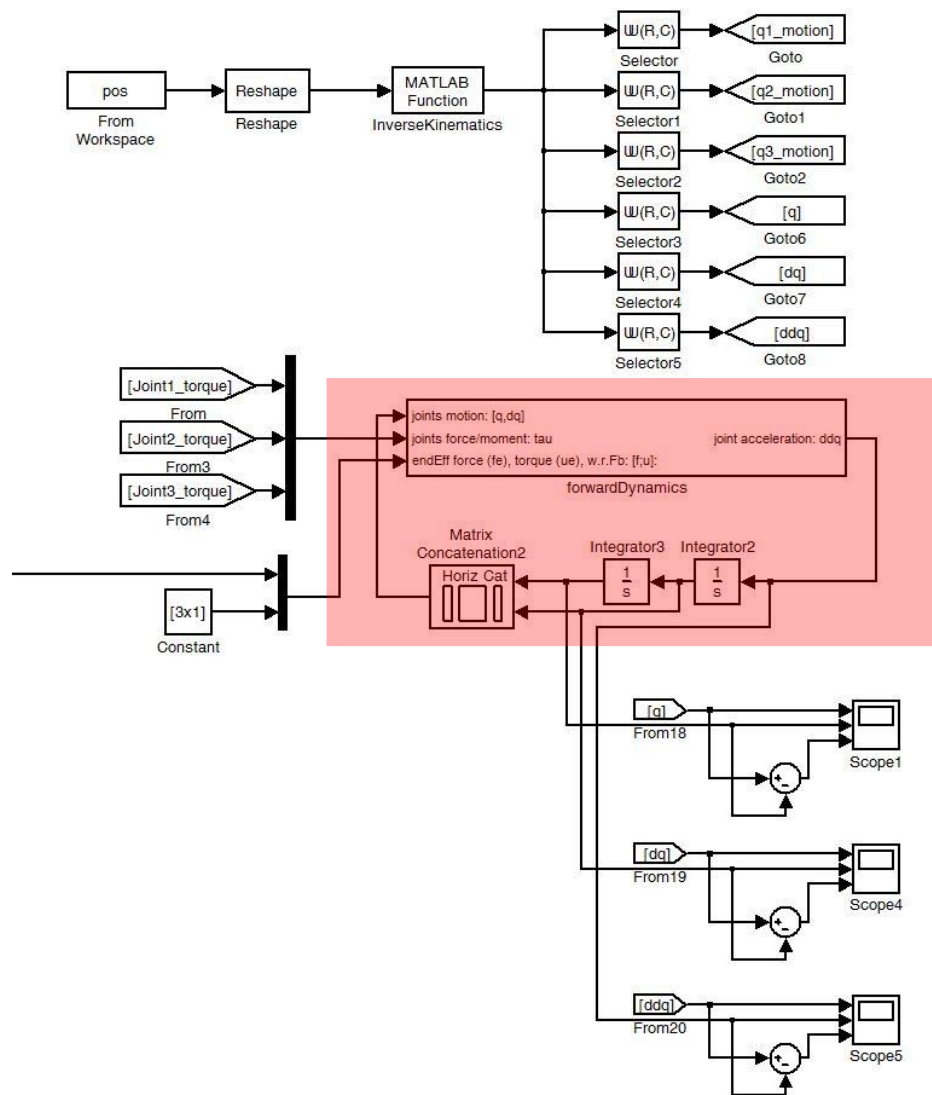
Obrázek 13 znázorňuje průběhy signálů na bloku `Scope3`, tedy vypočtená zrychlení kloubových souřadnic (na základě znalosti jejich rychlostí a poloh, momentů působících v kloubech manipulátoru a externích sil působících na koncový efektor) (uprostřed), skutečné průběhy zrychlení kloubových souřadnic (které generují momenty v aktuátorech) (nahore) a jejich rozdíl (dole).



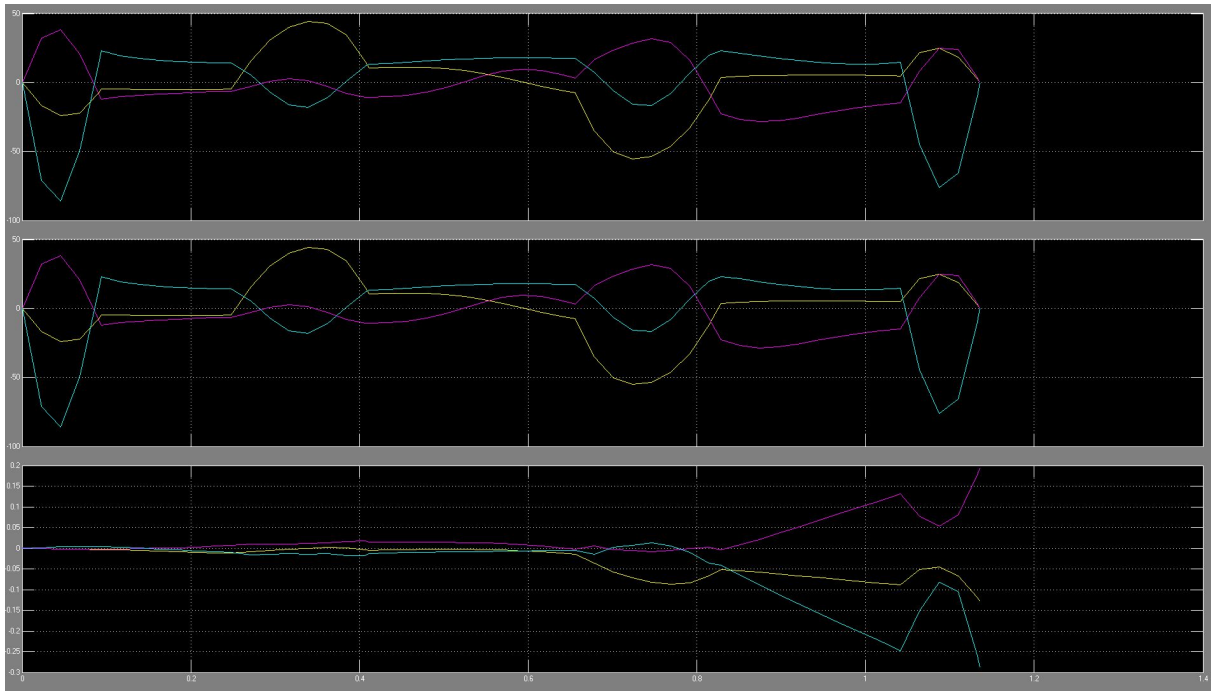
Obrázek 13: Ověření implementovaného bloku pro výpočet dopředné dynamické úlohy pro generovaný pohyb manipulátoru

5.3 Realizace virtuálního dynamického modelu manipulátoru (implementační poznámky)

V plánovaných cílech projektu bylo vytvoření kompletního dynamického modelu manipulátoru, který bude realizován na samostatné HW platformě. Za tímto účelem je možné využít blok `forwardKinematics`. Simulační schéma v Simulinku realizující dynamický model manipulátoru v prostoru kloubových souřadnic je na Obrázku 14. Obrázek 15 ukazuje průběhy signálů na bloku `Scope5`, tedy skutečné zrychlení kloubových souřadnic (generující požadované momenty v aktuátorech) (nahore), zrychlení získané řešením diferenciálních rovnic popisující dynamický model manipulátoru (červeně zvýrazněné zpětnovazební schéma s dvojicí integrátorů na Obrázku 14) (uprostřed) a jejich rozdíl (dole). Vzniklé chyby jsou bezesporu způsobeny akumulující se chybou integrace (jsou závislé na zvolené metodě v solveru Simulinku).



Obrázek 14: Realizace dynamického modelu manipulátoru v Simulinku



Obrázek 15: Ověření kompletního dynamického modelu manipulátoru

Poznamenejme, že implementovaný blok `forwardKinematics` (stejně jako i blok `inverseKinematics`) využívá pouze zápis algoritmu ve funkcích Matlabu (m-filech), tzn. je možné jej přeimplementovat do libovolného jazyku (C, C++, atd.). Klíčovým problémem je však řešení soustavy diferenciálních rovnic $\ddot{\mathbf{Q}} = \mathbb{F}(\mathbf{Q}, \dot{\mathbf{Q}}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{F}, \boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\mu})$ v reálném čase na samostatné HW platformě (v Simulinku realizované dvojicí integrátorů a vnitřním výpočetním jádrem - použita metoda *ODE45*). Vzhledem k faktu, že dynamický model manipulátoru bude implementován v řídicím systému REX, který je vyvíjen na katedře kybernetiky a využíván ve výuce předmětů, odvozený dynamický model by měl být implementován právě v REXu. Implementací vhodných solverů dynamických rovnic v systému REX běžícím na daných HW platformách v reálném čase se zabývají některé publikované výsledky [6], [5], [1].

6 Závěr

Uvedená technická zpráva se zabývá popisem kinematiky a dynamiky výukového modelu pro robotiku. Jedná se o 3 DoF sériový manipulátor unikátní mechanické konstrukce. V technické zprávě jsou řešeny polohové závislosti mezi kloubovými a zobecněnými souřadnicemi daného manipulátoru a nastíněny postupy pro řešení závislostí rychlostí a zrychlení. Dále jsou popsány způsoby řešení přímé a inverzní dynamické úlohy. Stručně jsou představeny modulární bloky a implementované funkce pro rychlou a systematickou tvorbu virtuálních simulačních modelů sériových manipulátorů v prostředí Matlab/Simulink/SimMechanics. V poslední části zprávy je diskutován problém implementace virtuálního dynamického modelu manipulátoru na HW platformách běžících v reálném čase (pro účely Hardware In the Loop). Jako demonstrativní příklad je volena jednoduchá aplikace typu pick and place, na které jsou ověřeny odvozené algoritmy.

Reference

- [1] Bláha, L.; Schlegel, M.; Königsmarková, J.: Design and Control of Underwater Vehicle for NDT Inspections. In *Oceanic Engineering Society - IEEE AUV 2014, Autonomous Underwater Vehicles 2014*, 2014.
- [2] Jáger, A.: Konstrukce modelu pro výukové účely. Technická zpráva, 2015.
- [3] Khalil, W.; Dombre, E.: *Modeling, Identification and Control of Robots*. Kogan Page Science paper edition, Elsevier Science, 2004, ISBN 9780080536613.
URL <http://books.google.cz/books?id=nyrY0Pu5kl0C>
- [4] Mark W. Spong, M. V., Seth Hutchinson: *Robot Modeling and Control*. Wiley, 2005.
- [5] Schlegel, M.; Königsmarková, J.: Numerické řešení a analýza bodového modelu jaderného reaktoru nulového výkonu. Technická zpráva, ZČU v Plzni, NTIS, 2013.
- [6] Schlegel, M.; Königsmarková, J.; Sobota, J.; aj.: Číslicového RT modelu jaderného reaktoru s fyzickými vstupy a výstupy. Technická zpráva, ZČU v Plzni, NTIS, 2014.
- [7] Sciavicco, L.; Siciliano, B.: *Modelling and Control of Robot Manipulators*. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing, Springer London, 2000, ISBN 9781852332211.
URL <http://books.google.fr/books?id=v9PLbcYd9aUC>
- [8] Čechura, T.: Řídicí systém manipulátoru a jeho implementace. Technická zpráva, ZČU v Plzni, 2015.
- [9] Švejda, M.: Kinematika robotických architektur. Katedra Kybernetiky, ZČU v Plzni (online: http://home.zcu.cz/~msvejda/_publications/2011/rigo.pdf), 2011.
- [10] Švejda, M.: Úvod do robotiky a mechatroniky. Přednášky k předmětu, 2012.
URL <http://home.zcu.cz/~msvejda/URM/>

Průběžná zpráva

Název projektu:

Výukový modev pro robotiku

(Číslo projektu: VS-14-019)

Název zprávy:

Řídicí systém manipulátoru a jeho implementace

Zapsáno (místo, datum):

KKY, 29. ledna 2015

Autor:

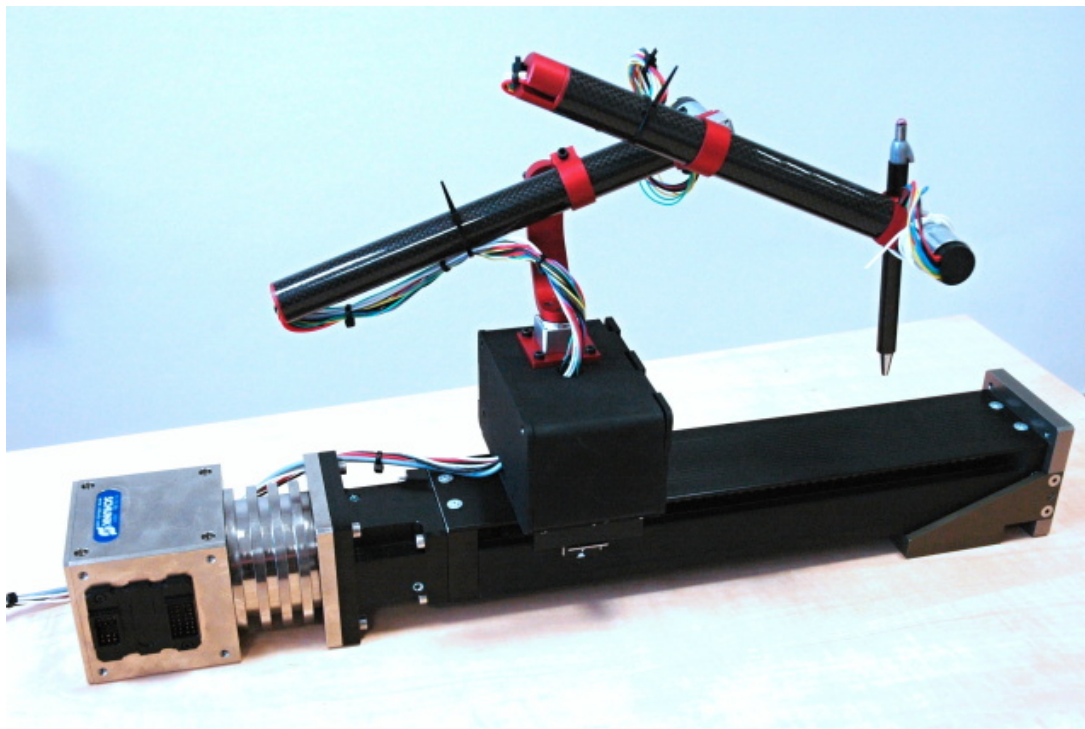
Tomáš Čechura

Obsah

1 Manipulátor pro výukové účely	3
2 Řídicí systém manipulátoru	3
2.1 Realizace řídicího systému	3
2.2 Struktura řídicího systému	4
2.3 Reálná implementace	4
2.3.1 Task_axes	5
2.3.2 Task_reg	7
3 Možnosti ovládání řídicího systému REX	7
3.1 Nástroje RexHMI	7

1 Manipulátor pro výukové účely

Rameno manipulátor je opatřeno třemi aktivními rotačními klouby a třemi pasivními posuvnými vazbami. Jedná se tedy o sériový manipulátor typu RRR s třemi stupni volnosti. Upevnění jednotlivých ramen v objímkách není fixní - umožňuje vysunout a zasunout ramena podle nároků na pracovní prostor manipulátoru kladených aktuální aplikací.



Obrázek 1: Manipulátor pro výukové účely

Při konstrukci manipulátoru byl kladen důraz na minimální možné rozměry a hmotnosti použitých pohonů. Zároveň byla snaha co nejvíce odlehčit samotná ramena manipulátoru, aby byly výsledné dynamické vlastnosti robotu co možná nejlepší ve smyslu dosažitelných rychlostí a zrychlení koncového efektoru.

Řídicí jednotky EPOS 24/2 byly umístěny do kompaktní podstavy robotického ramene. K samotnému rameni pak vedou dva kabely - napájení řídicích jednotek a komunikace s řídicím počítačem Alix přes protokol CANopen.

Bližší informace o konstrukci robotu jsou uvedeny ve zprávě [2].

2 Řídicí systém manipulátoru

2.1 Realizace řídicího systému

Řídicí systém manipulátoru byl kompletně vyvinut za použití řídicího systému reálného času REX [4]. Vývoj byl proveden převážně programem RexDraw, který je standardní součástí instalačního balíku systému REX. Balík obsahuje celou řadu pokročilých nástrojů pro editaci a správu řídicího systému reálného času.

Řídicí systém REX umožňuje využití na různých cílových platformách a hardwarových zařízeních. V našem případě byl zvolen průmyslový počítač Alix PC Engines se systémem OpenWRT / Linux.

V řídicím systému REX byla v posledních letech implementována kompletní podpora pro ovládání pohybu. Všechny vyvinuté bloky a algoritmy se řídí platnou normou PLCopen Motion Control [3]. Knihovna bloků obsahuje bloky pro ovládání pohybu jedné osy a zároveň obsahuje i bloky umožňující koordinovaný pohyb více os, který byl v našem případě robotického manipulátoru s více stupni volnosti nezbytnou součástí návrhu řídicího algoritmu.

Široká podpora komunikačních protokolů v systému REX umožňuje připojení téměř libovolného hardwaru. Podporovány jsou průmyslové komunikační protokoly jako např. CAN / CANopen, EtherCAT, Ethernet Powerlink, Modbus, Profinet, RS 485, atd. Řídicí systém REX umožňuje současné použití různých komunikačních protokolů, což je velmi výhodné zvláště pro prototypové aplikace, kde se spojen hardware různých výrobců. Pro komunikaci s řídicími jednotkami všech motorů robotu byl použit protokol CANopen.

2.2 Struktura řídicího systému

Každý řídicí systém implementovaný v systému REX je rozdělen do tzv. úloh (task), které se vykonávají periodicky se zvolenou periodou. Každé úloze je navíc přiřazena priorita, kterou zohledňuje interní plánovač událostí při přidělování procesorového času jednotlivým úlohám. Toto rozdělení je velmi výhodné pro kombinaci algoritmů, které jsou výpočetně náročné, s algoritmy, které je nutné provozovat s velmi krátkou periodou (řádově jednotky milisekund). Obvykle je krátká perioda přiřazena algoritmům zajišťujícím řízení motorů a pohonů, zatímco plánování pohybu a trajektorií může být spouštěno s delší periodou.

2.3 Reálná implementace

Reálná implementace řídicího systému manipulátoru je komplexní aplikace, která si vyžádala iterační přístup k vývoji a testování jednotlivých dílčích součástí řídicího systému. Vývoj probíhal od správy komunikačních protokolů, přes konfiguraci a nastavení jednotlivých pohonů až po implementaci pokročilých algoritmů řízení koordinovaného pohybu.

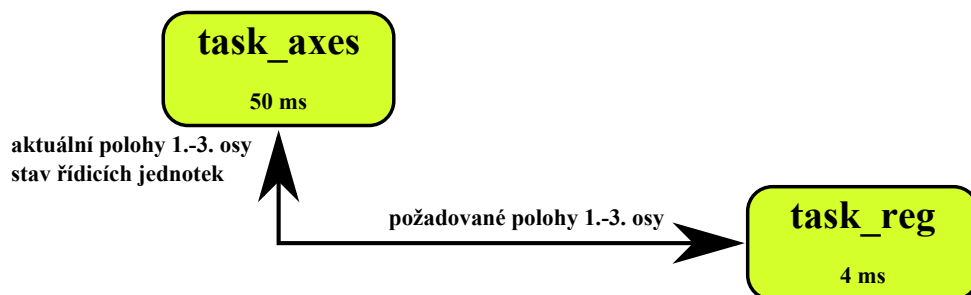
V současné době je v řídicím systému implementována veškerá základní funkčnost plně připravená pro potřeby výuky a vzdělávání studentů v oblasti robotiky, mechatroniky a pokročilých algoritmů řízení.

Finální verze řídicího systému manipulátoru je tvořena dvěma tasky, které spolu spolupracují. Funkční závislosti a předávané informace mezi tasky jsou naznačeny na Obrázku 2.

Úloha *task_reg* běží s kratší periodou a je použita ke komunikaci s řídicími jednotkami motorů. Komplexní úloha *task_axes* kinematické transformace, základní i pokročilé možnosti řízení pohybu a další viz níže.

■ Poznámka 1

Screenshots jednotlivých úloh jsou uvedeny v sekci Přílohy na konci tohoto dokumentu. ■



Obrázek 2: Závislost úloh

2.3.1 Task_axes

Task_axes je hlavní úloha spravující velkou část řídicího systému. Definuje samotný manipulátor, spravuje všechny aktivní osy a diktuje odpovídající akční zásahy všem motorovým řídicím jednotkám.

Dílejší části tasku:

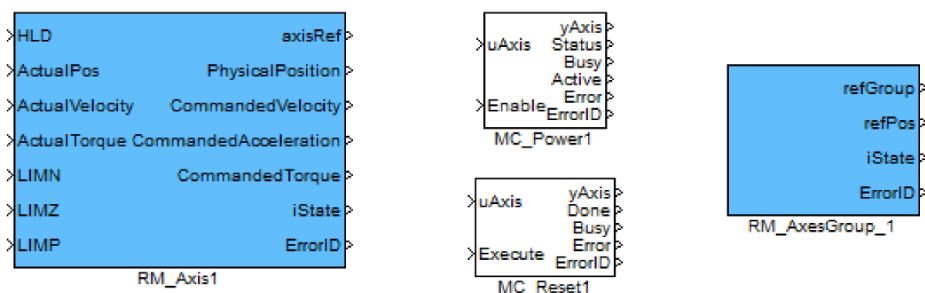
- Definice sériového robotu
- Pomocné bloky os a jejich grupa
- Homing
- Ruční ovládání robotu
- Vyhodnocování chyb

■ Poznámka 2

Účelem následujícího textu není poskytnout kompletní dokumentaci použitých bloků, ale poukázat na vzájemné propojení funkčních bloků a vysvětlit hlavní závislosti a součinnosti vybraných funkčních bloků zajišťujících celkovou požadovanou funkčnost řídicího systému manipulátoru. Dokumentace ke všem funkčním blokům vyvinutých pro řídicí systém REX je volně ke stažení na [5]. ■

Definice sériového manipulátoru V řídicím systému manipulátoru musí být kompletně definována struktura sériového robotu - konkrétně se jedná o zapojení bloků *RM_Axis*. Každá aktivní osa má právě jeden takový blok, ve kterém se definuje typ osy (rotační / prizmatická), její rozsah a veškeré dynamické veličiny limitující její pohyb (rychlosti, zrychlení, atd.). Manipulátor pro výukové účely je tříosý sériový robot, proto je nutné nadefinovat tři bloky *RM_Axis*. Jeden z výstupů daného bloku je i symbolická reference na konkrétní osu *axisRef*. Pomocí tohoto výstupu se v ostatních blocích Motion Control implementovaných v řídicím systému REX odkazujeme na požadovanou osu. Dalším důležitým diagnostickým výstupem je výstup *iState* obsahující aktuální stav osy.

Pomocné bloky os a jejich grupa Každá osa potřebuje také další pomocné funkční bloky. Jedná se zejména o bloky *MC_Power* pro zapnutí osy a *MC_Reset* pro resetování případných chyb na ose. Grupa os je definována v bloku *RM_AxisGroup*. Po zapnutí os se definuje pořadí sériového kinematického řetězce robotu pomocí bloků *MC_AddAxisToGroup*. Při správném sestavení sériového řetězce se výslednému robotu přiřadí přímé a inverzní kinematické transformace blokem *MC_SetKinTransform_Arm*. Tento blok není univerzální narozdíl od ostatní bloků a jeho implementace je přímo závislá na dané konstrukci manipulátoru. Grupa představující poskládaný kinematický řetězec robotu je následně aktivována pomocí bloku *MC_GroupEnable* a připravena ke koordinovanému pohybu.



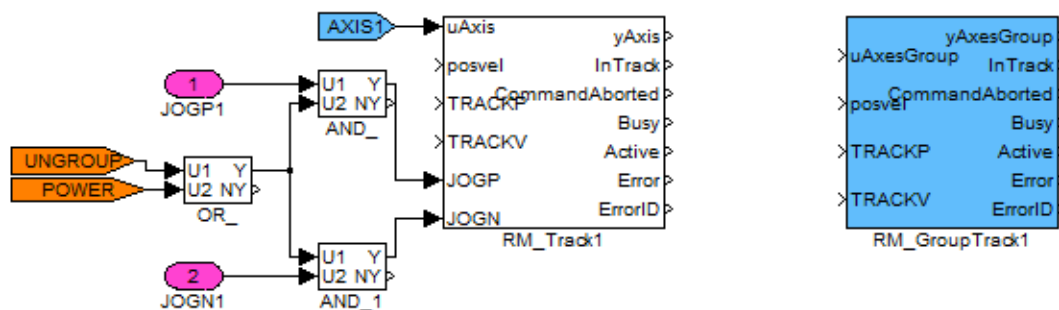
Obrázek 3: Ukázka bloků pro definici a správu osy a grupy os

Homing V robotice je velmi důležité, aby se robot choval naprosto stejně po každém zapnutí. Například je důležité znát absolutní kloubové souřadnice všech kloubů manipulátoru. Pokud bychom je neznali, robot by se po zapnutí z různých poloh choval odlišně. Motory v kloubech tohoto manipulátoru jsou osazeny pouze inkrementálními enkodéry. Pokud budeme chtít manipulátor používat pokaždé ve stejné absolutní poloze, musíme přesně nadefinovat kalibrační místo v pracovním prostoru robotu, kam dojedeme koncovým efektem manipulátoru určitou konfigurací ramen a provedeme homing pomocí bloků *MC_Home*. Při následném pohybu se již používají signály z inkrementální enkodérů umístěných na hřídeli motorů.

Ruční ovládání robotu Manipulátor je možné navádět ručně přes on-line monitoring ve vývojovém prostředí RexDraw nebo přes diagnostiku řídicího systému RexView. Řídicí systém manipulátoru umožňuje dva režimy pohybu - v kloubových souřadnicích (nekoordinovaný) a v kartézských souřadnicích (koordinovaný). Přepínání mezi těmito dvěma režimy zajišťuje logická konstanta *CNB_COORD*.

Bloky *RM_Track* zajišťují pohyb jedné konkrétní osy podle připojené reference. Okolní logika testuje, zda je možné aktuálně použít blok *RM_Track*, případně zakáže jeho vykonání. Kontraindikací pro vykonání bloku *RM_Track* může být jiný pohyb (koordinovaný i nekoordinovaný), vypnutá osa, chybový stav, atd.

Uživatelsky mnohem přívětivější je ovládání manipulátoru v kartézském souřadném systému. Pohyb koncového efektoru manipulátoru je tak pevně spojen se zavedeným souřadným systémem. Pro tento pohyb je používán blok *RM_GroupTrack* (Obrázek 4).

Obrázek 4: Ukázka zapojení ručního pohybu jedné osy a blok *RM_GroupTrack*

Vyhodnocování chyb Důležitou zpětnou vazbou informující o stavu manipulátoru jsou i chybové hlášky. V úloze *task_axes* jsou soustředěny všechny důležité chybové hlášky. Zejména se jedná o chyby z řídicích jednotek motorů, z jednotlivých os nebo z celé grupy.

řídícího systému mohou tyto informace využívat při ladění konkrétní implementace, případně libovolně přidávat a spravovat další důležité diagnostické signály.

2.3.2 Task_reg

Nejčastěji vykonávanou úlohou je úloha *task_reg* přidružená k driveru sběrnice CAN s periodou 4 ms. Úkolem tohoto tasku je komunikace s řídicími jednotkami EPOS k motorům MAXON. Pro každý pohon je implementován jeden subsystém. Každý subsystém obsahuje stavový automat který při aktivaci osy projde předem danou sekvencí stavů řídicí jednotky. Z řídicích jednotek motorů jsou pravidelně vyčítány důležité informace pro regulaci i pro správu motorů. Přenášeny jsou informace o poloze a rychlosti z enkodéru motoru, o aktuálním proudu ve vinutí a stavu řídicí jednotky, případně i chybová hlášení.

Motory s řídicími jednotkami EPOS jsou provozovány v režimu Interpolated Position Mode (IPM). Řídicí systém REX posílá každou desátou periodu úlohy *task_reg* dva packety s požadovanou polohou a rychlostí daného motoru a časovou značkou, kdy má být požadovaná poloha a rychlost dosažena. Řídicí jednotka interpoluje přijatá data kubickým splinem a tuto interpolaci používá jako setpointy do polohového regulátoru, který běží s frekvencí 1 kHz. Před vlastním pohybem motoru se musí dostatečně naplnit vnitřní buffer pro IPM, což zavádí umělé zpoždění do vykonávání požadovaných akčních zásahů. Toto zpoždění v rádech desítek milisekund ale nijak nevadí, pokud je na všech motorech totožné.

Řídicí jednotky umožňují řídit motory také v polohovém, rychlostním a proudovém režimu. To poskytuje prostor pro alternativní implementace řídicích algoritmů, kdy může být klasická kaskádní regulace realizována v řídicím systému. Studenti tak mohou v různém rozsahu implementovat regulační smyčku a vyvíjet a testovat pokročilé algoritmy řízení.

3 Možnosti ovládání řídicího systému REX

Manipulátor je možné plnohodnotně ovládat pomocí editačních a diagnostických nástrojů obsažených v instalaci systému REX. Zejména se jedná o využití programu *RexView*, který umožňuje sledovat činnosti v jádře systému REX při jeho běhu. Tento program poskytuje detailní informace o všech blocích běžící exekutivy. Ke komunikaci s cílovým zařízením se využívá protokol TCP/IP a je tak možné provádět vzdálenou diagnostiku přes internet.

Dalším nástrojem pro ovládání běžícího řídicího systému je program *RexDraw*. Jeho hlavním účelem je funkce grafického vývojového prostředí pro návrh řídicích algoritmů složených z funkčních bloků. Po překladu výsledného modelu a jeho uploadu do cílového zařízení je možné se přímo v editačním grafickém prostředí připojit k běžícímu jádru systému REX a online monitorovat a měnit vybrané parametry řídicího systému.

Oběma přístupy je možné plnohodnotně spravovat a ovládat vyvinutý řídicí systém. Komplexní řídicí systémy mohou působit značně nepřehledně, proto jsou součástí instalace systému REX i nástroje pro vývoj grafické operátorské vizualizace. Další možností realizace studentů je využití nástrojů pro vytvoření a správu grafického uživatelského rozhraní.

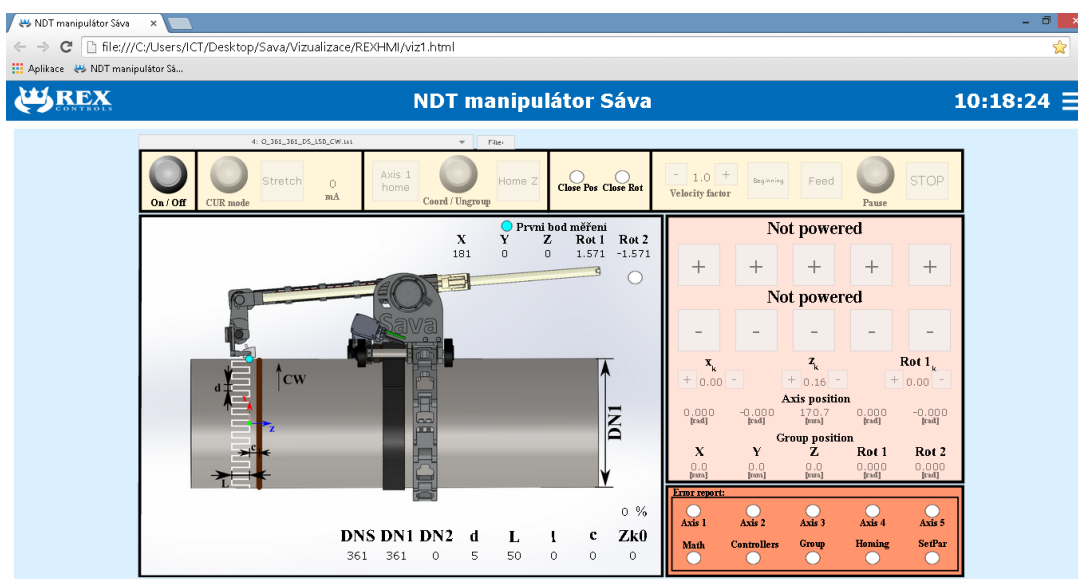
3.1 Nástroje RexHMI

K tvorbě uživatelských webových rozhraní pro systém REX slouží sada programů a knihoven. Základem RexHMI (Rex Human Machine Interface) jsou webové stránky verze HTML5, které jsou dnes již standardně podporovány všemi moderními webovými prohlížeči. Stránky jsou posílány webovým serverem Lighttpd za použití protokolu HTTP. Po načtení stránky v prohlížeči

se vytvoří websocketové spojení mezi stránkou a jádrem řídicího systému REX. Webový server Lighttpd a websocketový server RexWSTcp jsou prostředníky mezi řídicím algoritmem a uživatelem.

Vytvoření webového uživatelského rozhraní je možné díky rozšíření RexHMI pro Inkscape [1]. Inkscape je profesionální vektorový grafický open-source editor. Grafickému návrhu můžeme přidávat různé jednoduché animace. Ty jsou pak napojeny pomocí uživatelsky nadefinovaných aliasů na konkrétní signály v běžícím řídicím systému. V konfiguraci uživatelského rozhraní se zadá IP adresa RexWSTcp websocketového serveru.

Vizualizace může být nahrána v řídicím počítači cílového zařízení a přes webový server zobrazena ve webovém prohlížeči po zadání IP adresy cílového zařízení. Pro správný chod vizualizace je dostačující webový prohlížeč.



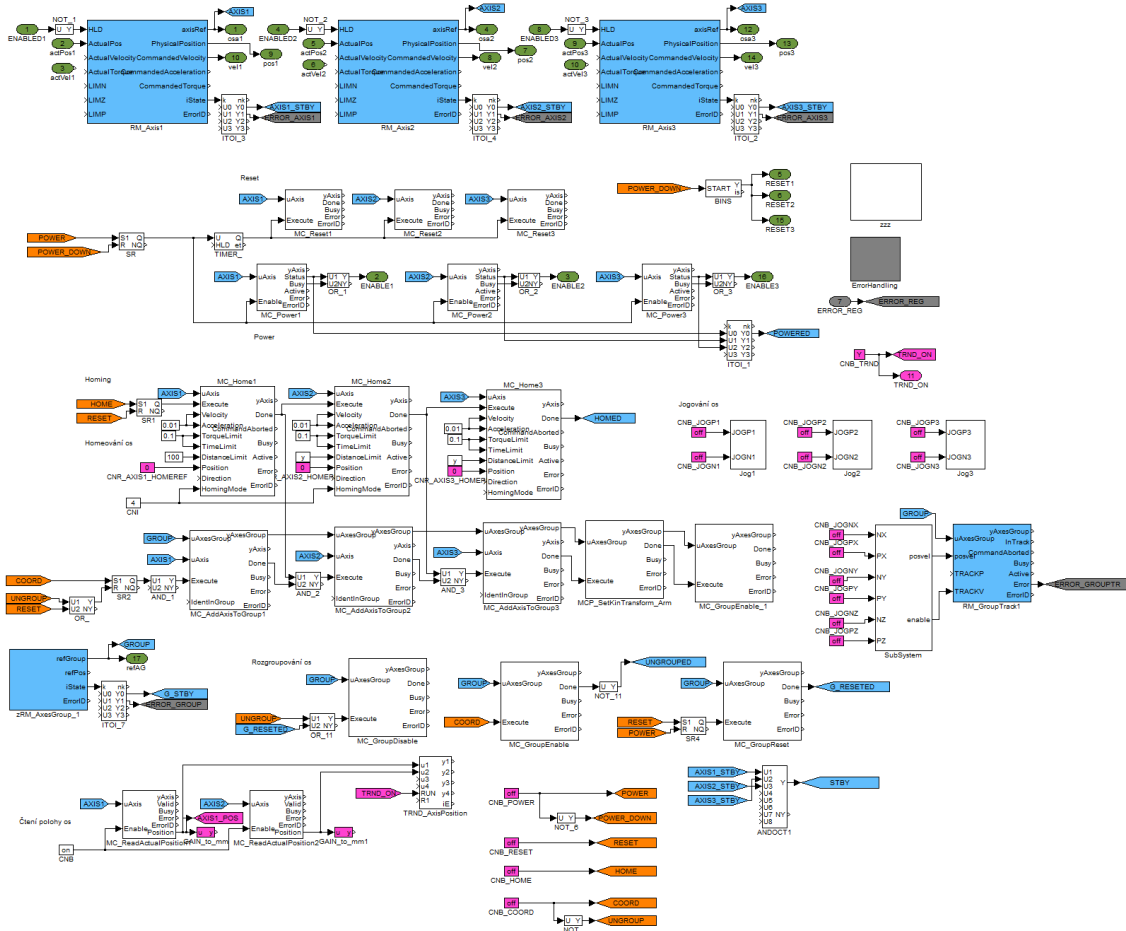
Obrázek 5: Ukázka uživatelského rozhraní vytvořeného pomocí RexHMI

Závěr

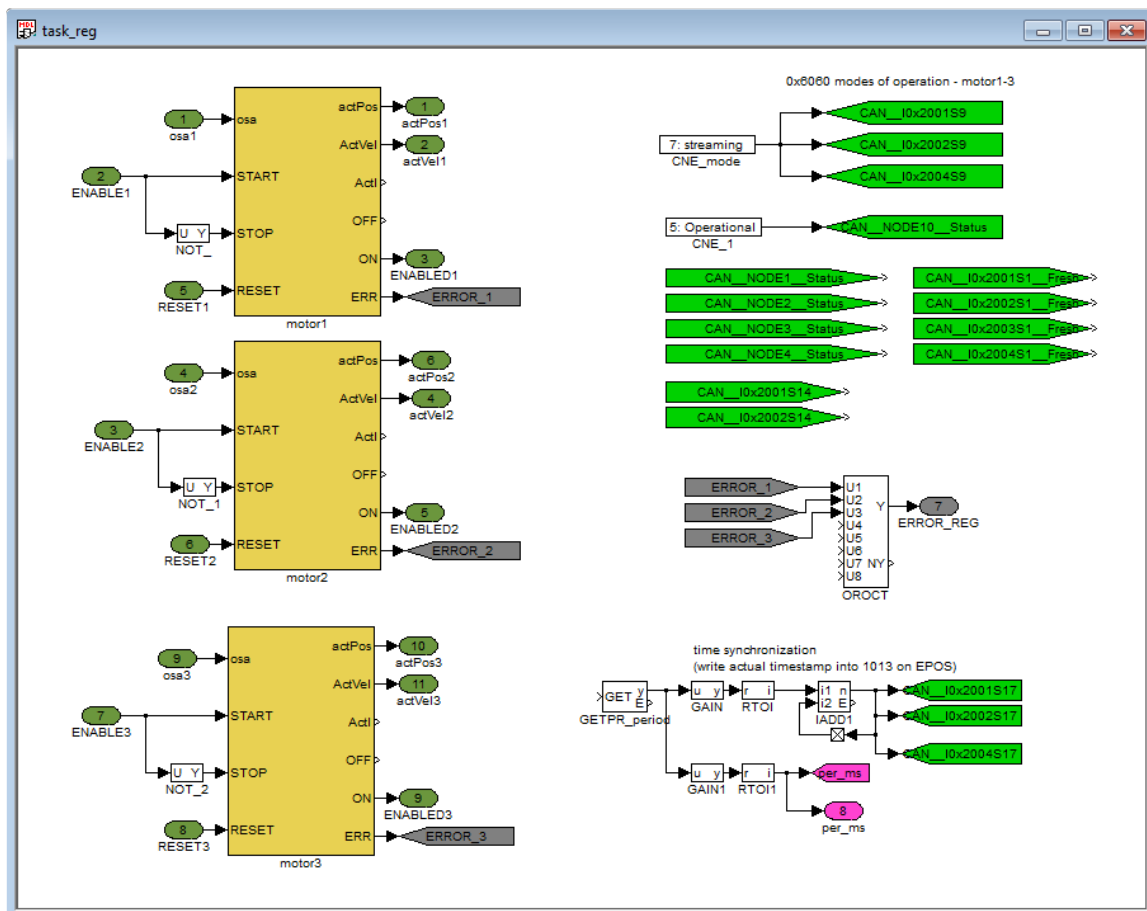
Uvedená technická zpráva shrnuje použití softwarových prostředků potřebných pro implementaci řídicího systému. Především se jedná o skupinu programů a nástrojů, které jsou součástí instalačního balíku systému reálného času REX.

Pro studenty je připravena kompletní platforma pro výukové a vývojové účely v oblasti robotiky a automatického řízení. Model je schopen poskytnout ucelené vývojové prostředí pro nejrůznější robotické aplikace od vlastní implementace řídicího systému po interaktivní grafická uživatelská rozhraní. Vyvinutý model je možné dále rozšířit např. v oblasti strojového vidění a zavedení vizuální zpětné vazby pro asistované navádění koncového efektoru manipulátoru.

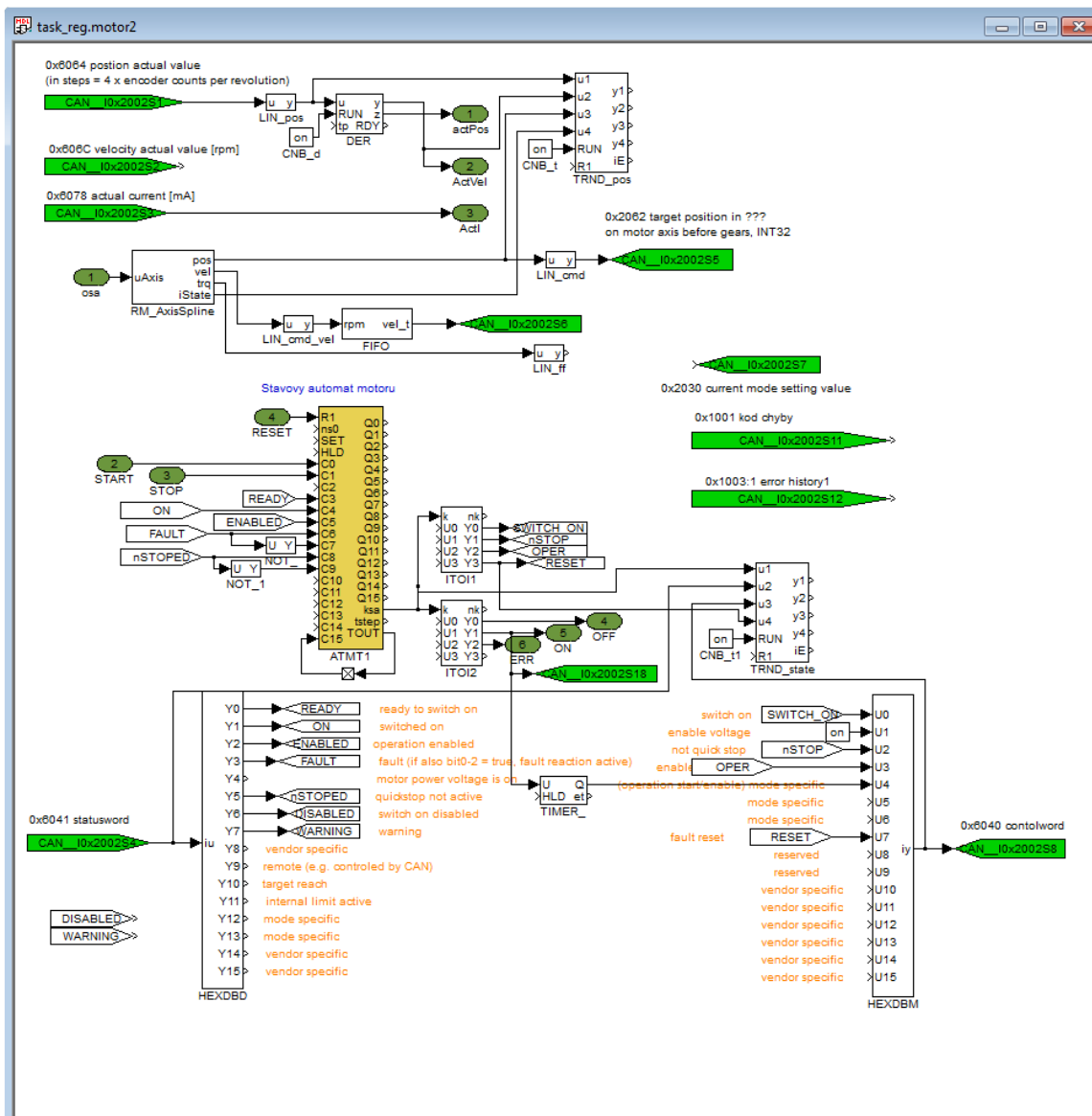
Přílohy



Obrázek 6: Task_axes



Obrázek 7: Task_reg



Obrázek 8: Subsystém motor2 v úloze task_reg

Reference

- [1] Inkscape: Vektorový grafický editor. 2014, [Online], [cit. 2014-12-20].
URL <https://inkscape.org>
- [2] Jáger, A.: Konstrukce modelu pro výukové účely. Technická zpráva, KKY ZČU, 2015.
- [3] Plcopen.org: PLCopen Motion Control. [Online], [cit. 2014-12-20].
URL http://www.plcopen.org/pages/tc2_motion_control/index.htm
- [4] REXControls: Řídicí systém REX. [Online], [cit. 2014-12-20].
URL <http://www.rexcontrols.cz>
- [5] REXControls: Funkční bloky systém REX - Referenční příručka. [Online], [cit. 2014-12-20].
URL http://www.rexcontrols.cz/media/DOC/CZECH/BRef_CZ.pdf

Technická zpráva

Název projektu:

Výukový model pro robotiku

(Číslo projektu: VS-14-019)

Název zprávy:

Konstrukce modelu pro výukové účely

Zapsáno (místo, datum):

KKY, 30. ledna 2015

Autor:

Arnold Jáger

Obsah

1 Úvod	3
2 Výběr architektury	3
3 Komponenty pro konstrukci	3
3.1 Motory	4
3.2 Převodovky	5
3.3 Řídicí počítač	5
3.4 Součásti pro ramena robotu	6
4 Konstrukce robotu	6
4.1 Spojení výstupu motoru se vstupem převodovky	6
4.2 Příruby pro spojení statoru motoru a převodovky	7
4.3 Objímky pro připevnění volného konce ramena	7
4.4 Unašeč prvního ramena	8
4.5 Základna robotu	9
4.6 Protizávaží	9
5 Sestavení robotu	10
6 Závěr	10
A Odůvodnění nákupu	11
B Analýza a konstrukční návrh	29

1 Úvod

Cílem této zprávy je popsat návrh a řešení konstrukce výukového modelu robotu. Jsou zde popsány požadavky na výběr architektury, výsledná architektura, výběr komponent pro model i popis konstrukčních součástí.

2 Výběr architektury

Při zohlednění potřeb předmětů, které se na katedře kybernetiky vyučují a na které je tento projekt cílen, vypsaly tři zásadní požadavky na architekturu výukového modelu robotu:

- Názornost
- Variabilita
- Jednoduchost

Požadavek na názornost vyplynul z potřeby vytvořit dostatečně komplexní model robotu, na kterém bude možné během výuky vysvětlit všechny základní principy, se kterými se studenti během výuky setkají a které lze názornou ukázkou na modelu dostatečně objasnit.

Variabilita modelu je žádaná především z hlediska možnosti vytvořit různé modelové situace k řešení během cvičení vybraných předmětů, či vyzkoušet si různé konfigurace při návrhu řídicích algoritmů.

Výukový model by celkově měl tvořit konstrukčně i typem architektury jednoduchý aparát, aby pro studenty nebyl problém samostatně implementovat na výuce nabyté znalosti.

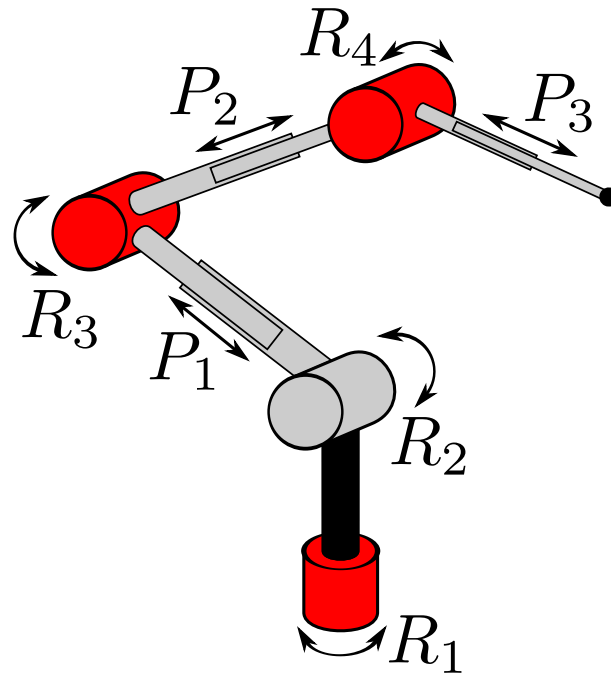
Spojením výše zmíněných požadavků vznikl návrh architektury, jehož schéma je zobrazeno na obr. (1). Výsledný návrh počítá se třemi aktivními rotačními klouby (R_1 , R_3 , R_4), jedním pasivním rotačním kloubem (R_2) a třemi pasivními prizmatickými klouby (P_1 , P_2 , P_3). Předpokládá se, že pasivní prizmatické klouby budou realizovány formou ramen manipulátoru s nastavitelnou délkou. Zatímco pasivní klouby jsou použity především z důvodu variability modelu, použití a umístění aktivních kloubů v navrženém uspořádání má dvě zásadní výhody.

Při použití kloubů R_3 , R_4 tvoří model robotu tzv. sériový planární 2DoF manipulátor, na kterém lze velmi snadno demonstrovat základní principy a pojmy z robotiky a mechatroniky, jako jsou například transformace souřadných systémů nebo koordinovaný a nekoordinovaný pohyb.

Použitím všech tří aktivních kloubů tvoří model robotu tzv. sériový antropomorfní 3DoF manipulátor, který má všechny tři prostorové translační stupně volnosti, tj. x , y , z a umožňuje tedy demonstrovat i problematiku týkající se 3D prostoru.

3 Komponenty pro konstrukci

Jelikož se v rámci projektu uvažuje o vytvoření modelu, který bude svými rozměry umožňovat provoz na desce pracovního stolu, musí být komponenty vybrané pro konstrukci



Obrázek 1: Návrh architektury

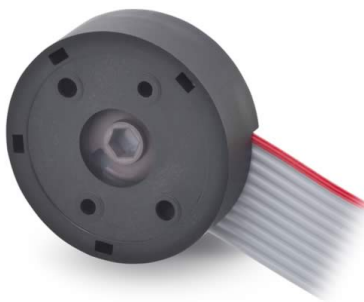
modelu robotu pokud možno co nejlehčí a kompaktních rozměrů.

3.1 Motory

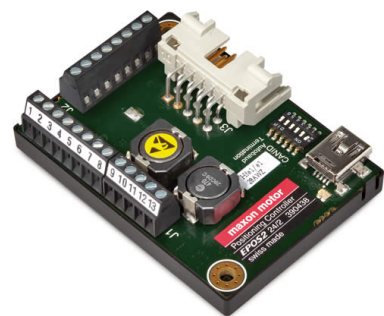
Mimo požadavek na malé rozměry a nízkou hmotnost pohonů bylo jako další kritérium pro výběr motorů stanoveno i možnost tyto motory řídit v proudové zpětné vazbě. Tyto požadavky splnily motory *RE-max 21 Ø21 mm, Graphite Brushes, 6 Watt, with terminals* (Obr. 2(a)) od firmy *Maxon Motor*. Tyto motory lze doplnit o enkodér (*Encoder MR, Type ML, 512 CPT, 3 Channels, with Line Driver*, Obr. 2(b)), jsou kompaktních rozměrů (Ø21 mm, výška cca 35 mm včetně enkodéru), lehké (53 g včetně enkodéru) a lze je pomocí kompatibilních řídicích jednotek (*EPOS2 24/2, digital positioning controller, 2 A, 9 - 24 VDC*, Obr. 2(c)) řídit ve všech potřebných režimech (polohová, rychlostní i proudová zpětná vazba). Odůvodnění výběru firmy *Maxon motor* viz příloha A, str. 3.



(a) Motor



(b) Enkodér

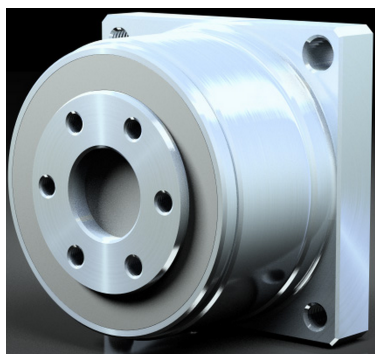


(c) Řídicí jednotka

Obrázek 2: Sestava Motor-Enkodér-Řídicí jednotka od firmy Maxon motor

3.2 Převodovky

Výběr převodovek hraje klíčovou roli, neboť právě na převodovky v robotických systémech musí být kladeny vysoké nároky s ohledem na jejich přesnost, především vůli v zubech. Vůle v zubech u převodovek, které jsou součástí sériových kinematických řetězců manipulátoru, vykazují vysoké nepřesnosti v polohování koncového efektoru manipulátoru vlivem nasčítáváním chyb na koncích jednotlivých ramen. Tento fakt významným způsobem zužuje možnost výběru převodovek. Firma *Maxon motor* k motorům vybraným v části 3.1 dodává několik typů převodovek, nicméně všechny tyto typy vykazují značnou vůli v zubech a jsou tedy nevhodné pro použití na manipulátoru. Další možností je vybrat převodku od jiného výrobce. Opět bylo nutné zvolit převodovku menších rozměrů a hmotnosti, které jsou schopny přenést dostatek silového momentu a současně zachovávají přesnost (zejména vůli v zubech). V tomto ohledu jsou velice vhodným typem harmonické převodovky. Po průzkumu trhu (viz příloha A, str. 1) byly vybrány převodovky od firmy *Harmonic Drive* (Obr. 3).

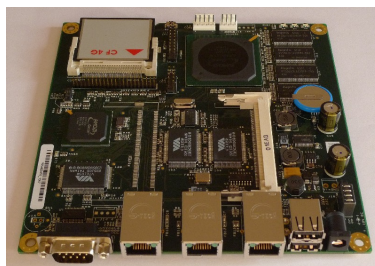


Obrázek 3: Harmonická převodovka od firmy Harmonic drive

Z důvodu dodatečného smontování motoru a převodovky (každá z nich od jiného výrobce) byla vybrána převodovka typu *CSF-5-100-1U-CC-F*, která umožňuje přímé připojení převodovky na motor díky zapuštěné duté vstupní hřídeli. Výstupní příruba je naopak vhodná pro připevnění úchyty dalšího ramena.

3.3 Řídicí počítač

Jako řídicí počítač byl zvolen *PC Engines ALIX* (Obr. 4), který je kompatibilní se stávajícím vybavením laboratoří katedry kybernetiky.



Obrázek 4: Řídicí počítač PC Engines ALIX

3.4 Součásti pro ramena robotu

Zásadními konstrukčními prvky z ohledu tuhosti konstrukce robotu jsou ramena, která spojují jednotlivé klouby (aktivní, pasivní). Tyto ramena musí být tuhá a pevná a zároveň lehká. Těmto požadavkům nejlépe vyhovují kompozitní materiály a to především z uhlíkových vláken. Proto byly jako komponenty pro výrobu ramen zvoleny trubky z uhlíkových vláken. Kromě tuhosti, pevnosti a nízké hmotnosti také poskytují možnost vést potřebná kabelová vedení uvnitř trubek.



Obrázek 5: Příklad trubek z uhlíkových vláken

V návrhu architektury robotu se počítá třemi pasivními prizmatickými klouby, které budou realizovány právě pomocí ramen robotu uložených tak, aby posunem ramen bylo docíleno změny délky ramen.

4 Konstrukce robotu

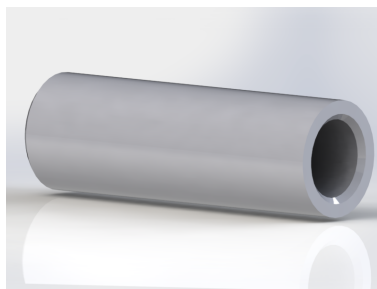
Výrobou specifických konstrukčních součástí robotu byla pověřena firma *SmartMotion s.r.o.* Bylo především nutné navrhnout upevnění pohonů na ramena robotu, spojení převodovky a motoru, pasivní rotační a prizmatické klouby a základnu, do které se umístí také řídicí jednotky.

Všechny součásti jsou navrženy i s ohledem na požadavek, aby do roviny, ve které se pohybuje osa posledního (třetího) ramena robotu, náležela i osa prvního rotačního kloubu. Dalším návrhovým parametrem pro konstrukci je co největší rozsah pohybu v jednotlivých kloubech robotu.

V příloze B se nachází dokument dodaný firmou *SmartMotion s.r.o.*, ve které jsou zpracovány návrhy a analýzy jednotlivých navržených součástí. Všechny vyrobené komponenty jsou konstrukčně navrženy s ohledem na maximální možná zatížení, motorů a převodovek nebo provozní podmínky robota.

4.1 Spojení výstupu motoru se vstupem převodovky

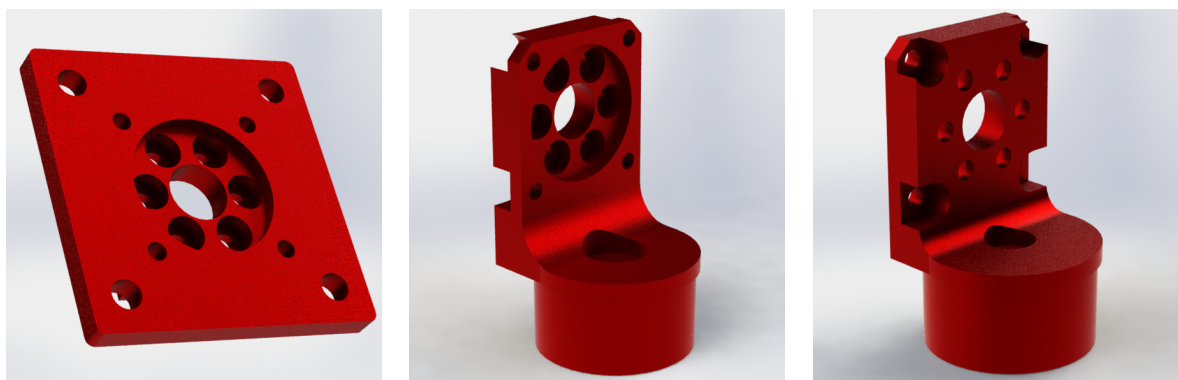
Zásadním překážkou při konstrukci byl různý poloměr výstupní hřídele motoru (2 mm) a vstupní duté hřídele převodovky (3 mm). Z tohoto důvodu byl navržen prvek, který se nalepil speciálním lepidlem na hřídel motoru a následně se vysoustružila na požadovaný průměr při roztočeném motoru. Tento postup byl zvolen z důvodu potřeby vysoké přesnosti uložení hřídele do převodovky, protože jakékoliv vyosení nasazeného prvku by způsobilo nefunkčnost celého pohonu. Pevnostní analýzy navrženého prvku viz. příloha B, str. 2.



Obrázek 6: Prvek pro spojení hřídele motoru s převodovkou

4.2 Příruby pro spojení statoru motoru a převodovky

Pro pevné spojení motoru a převodovky bylo nutné navrhnout přírubu. Tato potřeba opět vyplynula ze skutečnosti, že motory a převodovky jsou od dvou různých výrobců. Tyto příruby byly zároveň využity k jednostrannému upevnění pohonu.



(a) Příruba pro pohon prvního kloubu

(b) Příruba pro pohon druhého kloubu

(c) Příruba pro pohon druhého kloubu

Obrázek 7: Příruby pro spojení statoru motoru s převodovkou pro jednotlivé pohony

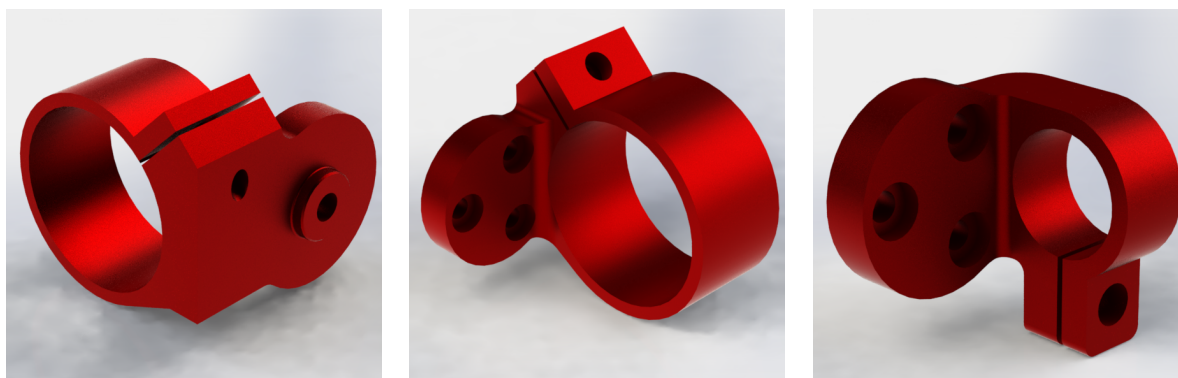
První rotační kloub je navržený jako vertikální a tudíž je nutné první pohon upevnit do svislé polohy. Toto reflektuje první příruba (Obr. 7(a)), která je upevněna na vodorovnou plochu základny robotu.

Druhý a třetí pohon je připevněn k ramenu robotu. Toto upevnění je vyřešeno návrhem příruby v takovém tvaru, který umožňuje tyto příruby upevnit do vnitřku trubek (Obr. 7(b), 7(c)). Zatímco příruba pro druhý pohon je navržena tak, aby mimo trubku směřovala převodovka, příruba pro třetí pohon je naopak navržena tak, aby mimo trubku směřovalo tělo motoru. Toto řešení umožní velký rozsah pohybu příslušných ramen. Obě příruby disponují průchodem pro zavedení potřebné kabeláže dovnitř trubky.

4.3 Objímky pro připevnění volného konce ramena

Trubky z uhlíkových vláken tvořící ramena robotu, jsou na jednom konci pevně spojeny s přírubami motoru (viz. kapitola 4.2). Pro upevnění volných konců ramen, které zároveň slouží jako pasivní prizmatické klouby P_1 , P_2 , P_3 (Obr. 1), jsou navrženy utahovatelné

objímky (Obr. 8). Ty umožňují rychlou změnu délky ramena změnou polohy uchycení trubky.



(a) Objímka pro první rameno (b) Objímka pro druhé rameno (c) Objímka pro třetí rameno

Obrázek 8: Objímky pro upevnění jednotlivých ramen k výstupní přírubě převodovky

Objímka pro první rameno (Obr. 8(a)) je upevněna k unašeci prvního ramena (viz. kapitola 4.4). Toto upevnění zároveň slouží jako pasivní rotační kloub R_2 (Obr. 1).

Objímky pro druhé (Obr. 8(b)) a třetí rameno (Obr. 8(c)) jsou připevněny k výstupní přírubě převodovek na konci ramen. Koncové (třetí) rameno je menšího průměru, proto i objímka pro uchycení je menší.

4.4 Unašeč prvního ramena

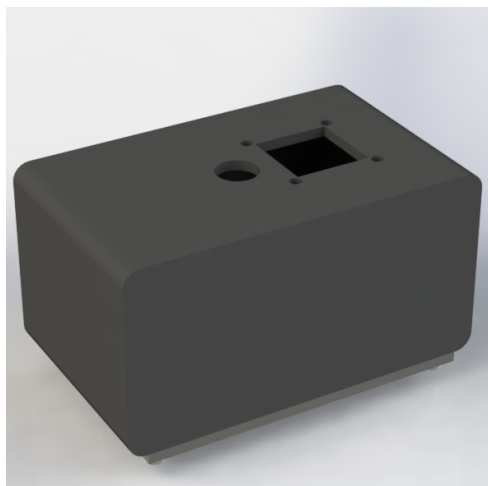
Tato součást spojuje výstupní přírubu převodovky prvního rotačního kloubu R_1 (Obr. 1) s objímkou pro první rameno (Obr. 8(a)). Z hlediska dimenzování se jedná o velice kritickou komponentu, neboť vytváří spojení mezi vertikální osou pohybu rotačního kloubu R_1 a horizontální osou pohybu pasivního rotačního kloubu R_2 , nese veškerou hmotnost všech tří ramen a navíc umožňuje realizovat požadavky na maximální rozsah pohybu ramen a umístění roviny pohybu posledního ramena.



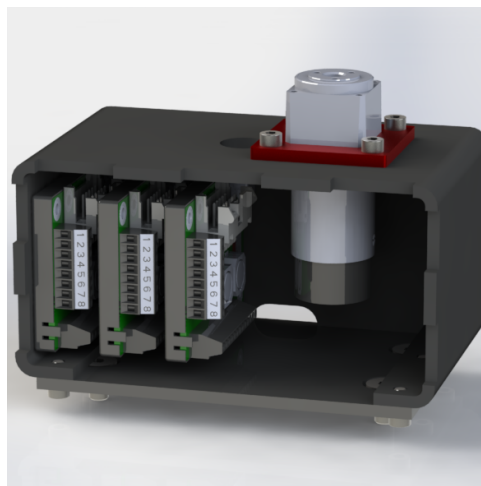
Obrázek 9: Unašeč prvního ramena

4.5 Základna robotu

Základna robotu (Obr. 10) je navržena s ohledem na několik skutečností. Na vodorovnou plochu základny je připevněn první pohon, uvnitř jsou umístěny řídicí jednotky jednotlivých pohonů a umožňuje připevnění robotu k podkladové desce. Protože jsou řídicí jednotky umístěny uvnitř základny, je na horní ploše vytvořen otvor pro vstup potřebné kabeláže k motorů a na zadní straně ploše průchod pro přivedení napájení a komunikace. Celková tuhost konstrukce základny je zajištěna stažením bočnic k sobě pomocí čtyř předpnutých šroubů.



(a) Základna v zakrytovaném stavu



(b) Detailní pohled na uspořádání uvnitř základny

Obrázek 10: Základna robotu

4.6 Protizávaží

Pro vyvážení hmotnosti pohonu na jedné straně ramena je navržena sestava protizávaží (Obr. 11). Závitová vložka je vlepena dovnitř trubky na opačném konci, než je připevněn motor a umožňuje zašroubování libovolného protizávaží. Tímto způsobem je možné kompenzovat zatížení motoru.



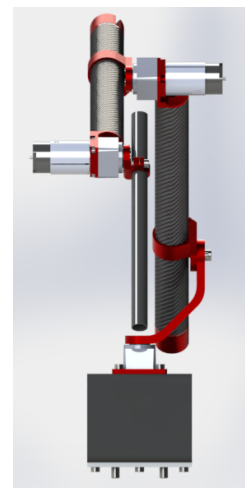
Obrázek 11: Protizávaží

5 Sestavení robotu

Kompletní sestavení robotu je zobrazeno na obr. 12(a). Sestava splňuje všechny požadavky na architekturu zmíněné v kapitole 2, tj. je jednoduchý, názorný a variabilní. Architekturu odpovídá návrhu se třemi aktivními rotačními klouby, jedním pasivním rotačním kloubem a třemi pasivními prizmatickými klouby.



(a) Kompletní sestavení robotu



(b) Pohled na soustavu robotu

Obrázek 12: Celkový pohled na robot

Na obr. 12(b) je názorně vidět splnění požadavku na umístění osy rotace prvního kloubu do roviny pohybu posledního ramena. Také je dobře patrná možnost maximálního rozsahu pohybu, kdy druhé a třetí rameno je možné otočit v plném rozsahu 360° .

6 Závěr

V této technické zprávě jsou popsány faktory, které ovlivnily výslednou architekturu modelu robotu pro výukové účely a které následně ovlivnili jak výběr komponent pro pohonnou soustavu, tak konstrukční návrh vyráběných součástí. Výsledná vytvořená konstrukce je lehká a zároveň díky využití moderních slitin hliníku a trubek z uhlíkových vláken a je variabilní díky přítomnosti pasivních kloubů (tří prizmatických a jednoho rotačního). Celkově tak umožňuje využití tohoto modelu robotu podpořit během výuky probíranou teorii názornými ukázkami na reálném prototypu.

A Odůvodnění nákupu

Odůvodnění:

Nákup materiálu pro projekt

(k 24. 4. 2014)

VS-14-019 (Výukový model pro robotiku)

Výběr možných dodavatelů komponent

V rámci projektu musí být v krátké době (do konce roku 2014) navrhnout a zrealizován výukový model manipulátoru pro robotiku. Tento proces zahrnuje celou řadu činností od návrhu matematického modelu manipulátoru, simulačního modelu, návrhu řízení manipulátoru, mechanickou konstrukci manipulátoru a závěrečné testování. V tomto případě je nezbytně nutné velmi rychle nakoupit všechny potřebné komponenty a zajistit, aby tyto komponenty byly kompatibilní se současným HW a SW vybavením v laboratořích. Z toho důvodu budou při nákupech preferovány výhradně tuzemští dodavatelé, případně zahraniční firmy s tuzemským obchodním zastoupením. Z toho plynou i další podstatné výhody během řešení projektu jako možnost získání snadné technické podpory, řešení případných reklamací, oprav či doplnění k nakoupeným komponentám.

Převodovky

Nákup převodovek pro výukový model pro robotiku hraje klíčovou roli k úspěšnému vyřešení projektu, neboť právě na převodovky v robotických systémech musí být kladeny vysoké nároky s ohledem na jejich přesnost, především vůli v zubech. Vůle v zubech u převodovek, které jsou součástí sériových kinematických řetězců manipulátoru, vykazují vysoké nepřesnosti v polohování koncového efektoru manipulátoru vlivem nasčítávání chyb na koncích jednotlivých ramen. Tento fakt významným způsobem zužuje možnost výběru převodovek.

V nabídce výrobců převodovek lze nalézt široké spektrum typů, nicméně většina nevyhovuje uvedeným požadavkům, zejména standardní planetové převodovky vykazují vůli v zubech, která je pro konstrukci robotů v podstatě nepoužitelná. Průzkumem trhu v ČR byly vybrány dvě firmy pro dodání převodovek: **SPINEA, s.r.o.** a **Harmonic Drive AG**. Obě firmy nabízí převodovky vhodné ke konstrukci robotů, nicméně firma **SPINEA, s.r.o.** v současné době nabízí převodovky pouze větších rozměrů, které nevyhovují pro účely vývoje výukového modelu umístěného v laboratoři, viz katalog (1). Vhodné převodovky pro vývoj výukového modelu jsou k nalezení v nabídce firmy **Harmonic Drive AG**, viz katalog (2). Převodovky vykazují mnohem menší rozměry i hmotnosti při současném zachování přesnosti (zejména vůli v zubech) a přenášeného silového momentu.

Z uvedeného vyplývá, že jediný možný dodavatel převodovek pro uvedený účel je firma **Harmonic Drive AG**. Požaduje se nákup následujících komponent od firmy **Harmonic Drive AG**, viz Tab. 1.

Zboží:	Počet kusů:	Identifikace:
<p>CSF - Unit CSF-5-100-1U-CC-F Harmonic Drive Unit, $i=100$, Lost Motion < 1,5 arcmin, with output flange, input hub, broad mounting flange and technical parameters as follows: Gearbox:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $T_R= 1,4$ Nm, Limit for repeated peak torque • $T_A= 0,94$ Nm, Limit for average torque • $T_N= 0,6$ Nm, Rated torque at 2000 rpm • $T_M= 2,7$ Nm, Limit for momentary peak torque • $n_{max}= 10000$ min⁻¹, maximum input speed • $n_{amax}= 6500$ min⁻¹, Limit for average input speed <p>Output Bearing :</p> <ul style="list-style-type: none"> • $C_o= 7630$ N, Static load rating • $C= 914$ N, Dynamic load rating • $M = 0,89$ Nm, Permissible dyn. tilting moment • $F_A= 270$ N, Permissible axial load • $F_R= 90$ N, Permissible radial load <p>HD-Material number : 606173</p>	3	Gear

Tab. 1: Požadované typy převodovek

Cenová nabídka je umístěna v příloze dokumentu.

Motory

Pro výukový model manipulátoru jsou preferovány výhradně motory firmy **Maxon Motor** z důvodu kompatibility se stávajícím HW vybavením laboratoře na katedře kybernetiky ZČU v Plzni. Jedná se především o využití stávajících znalostí technologií firmy **Maxon Motor** zahrnující komunikaci s řídicími jednotkami motorů, znalost konfigurace řídicích jednotek pro požadované režimy provozu atd.

Požaduje se nákup 3 DC motorů s enkodéry a řídicími jednotkami, viz Tab. 2. Objednací čísla odpovídají označení na oficiálních www stránkách firmy **Maxon Motor**, viz (2).

Zboží:	Počet kusů:	Identifikace:
RE-max 21 Ø21 mm, Graphite Brushes, 6 Watt, with terminals Part number 250026	3	Motor_motor
Encoder MR, Type ML, 512 CPT, 3 Channels, with Line Driver Part number 201940	3	Motor_encoder
EPOS2 24/2, digital positioning controller, 2 A, 9 - 24 VDC Part number 390438	3	Motor_controller

Tab. 2: Požadované motory včetně enkodérů a řídicích jednotek

Cenová nabídka je umístěna v příloze dokumentu.

Řídicí počítač:

S ohledem na kompatibilitu se stávajícím HW vybavením laboratoře na katedře kybernetiky ZČU v Plzni a se stávajícími znalostmi a zkušenostmi s návrhem řídicích systémů se požaduje nákup řídicího počítače **PC Engines ALIX**, viz Tab. 3.

Zboží:	Počet kusů:	Identifikace:
PC Engines ALIX.2D13 LX800 , 256 MB , 3 LAN , 1 miniPCI , USB , RTC battery	3	ALIX

Tab. 3: Požadovaný řídicí počítač

Cenová nabídka je umístěna v příloze dokumentu.

Přílohy (cenové nabídky):

Převodovky:

Nabídka 1: celkem cca 61 881,- s DPH 21%

Západočeská univerzita
Mr. Martin Švejda
 Univerzitní 8, P.O.BOX 314
 CZ – 306 14 Plzeň

It writes you:
 Ing. Vladimír Trhoň
 Svatá 202
 CZ – 267 51 Zdice
 Tel./Fax: 00420 311 686142
 Mob.: 00420 603 844 994
 E-Mail: trhon@centrum.cz

Telefon: 604 338 626
 Fax:

Svatá, February 26th, 2014

Quotation-No.: HD/CI/2014/021/T

Dear Mr. Švejda,

thank you very much for your inquiry on which we allow to submit a quotation as follows:

Position	Description	Quantity	EUR Unit pricing
1	CSF - Unit CSF-5-100-1U-CC	1-2 pcs 3-9 pcs	768,00 552,00
	Harmonic Drive Unit, $i=100$, Lost Motion < 1,5 arcmin, with output shaft, input hub, broad mounting flange and technical parameters as follows: Gearbox: <ul style="list-style-type: none"> • $T_R= 1,4$ Nm, Limit for repeated peak torque • $T_A= 0,94$ Nm, Limit for average torque • $T_N= 0,6$ Nm, Rated torque at 2000 rpm • $T_M= 2,7$ Nm, Limit for momentary peak torque • $n_{max}= 10000$ min⁻¹, maximum input speed • $n_{amax}= 6500$ min⁻¹, Limit for average input speed Output Bearing : <ul style="list-style-type: none"> • $C_o= 7630$ N, Static load rating • $C= 914$ N, Dynamic load rating • $M = 0,89$ Nm, Permissible dyn. tilting moment • $F_A= 270$ N, Permissible axial load • $F_R= 90$ N, Permissible radial load HD-Material number : 606185		
2	YEN/EUR – fee Currency conversion surcharge, max 12,5%	1-2 pcs 3-9 pcs	96,00 69,00
3	CSF - Unit CSF-8-100-1U-CC	1-2 pcs 3-9 pcs	967,00 751,00
	Harmonic Drive Unit, $i=100$, Lost Motion < 1 arcmin, with output shaft, input hub, broad mounting flange and technical parameters as follows: Gearbox: <ul style="list-style-type: none"> • $T_R= 4,8$ Nm, Limit for repeated peak torque 		

Harmonic Drive AG
 Hoenbergstraße 14
 D-65555 Limburg a. d. Lehn
 ☎ +49-6431-5008-0
 📠 +49-6431-5008-119
 www.harmonicdrive.de
 info@harmonicdrive.de

Vorstand
 Dipl.-Ing. Ekrem R. Sirman (Vorsitzender)
 Dipl.-Ing. Masaneo Kobayashi
 AR-Vorsitzender
 Reinhard Ernst

Bank
 Commerzbank Limburg IBAN DE90
 Kreissparkasse Limburg IBAN DE26
 Postbank Frankfurt a. M. IBAN DE85
 Handelsregister Limburg
 HRB 775

BLZ
 511 400 29
 511 500 18
 500 100 60
 Kto.-Nr.
 03 722 022 00
 00 000 037 80
 00 565 996 06
 BIC
 SWIFT COBADEFFXXX
 SWIFT HELADEF1LIM
 SWIFT PBNKDEFF
 Ust.-Id. Nr.
 DE113850379

Position	Description	Quantity	Unit pricing
----------	-------------	----------	--------------

- $T_A = 3,3$ Nm, Limit for average torque
- $T_N = 2,4$ Nm, Rated torque at 2000 rpm
- $T_M = 9$ Nm, Limit for momentary peak torque
- $n_{max} = 10000$ min⁻¹, maximum input speed
- $n_{amax} = 6500$ min⁻¹, Limit for average input speed

Output Bearing :

- $C_0 = 1900$ N, Static load rating
- $C = 2160$ N, Dynamic load rating
- $M = 3,46$ Nm, Permissible dyn. tilting moment
- $F_A = 630$ N, Permissible axial load
- $F_R = 200$ N, Permissible radial load

HD-Material number : 606188

4	YENEUR – fee		
	Currency conversion surcharge, max 12,5%	1-2 pcs	145,00
		3-9 pcs	105,75

5	CSF - Unit		
	CSF-5-100-1U-CC-F	1-2 pcs	768,00
		3-9 pcs	552,00

Harmonic Drive Unit, i=100, Lost Motion < 1,5 arcmin, with output flange, input hub, broad mounting flange and technical parameters as follows:

Gearbox:

- $T_R = 1,4$ Nm, Limit for repeated peak torque
- $T_A = 0,94$ Nm, Limit for average torque
- $T_N = 0,6$ Nm, Rated torque at 2000 rpm
- $T_M = 2,7$ Nm, Limit for momentary peak torque
- $n_{max} = 10000$ min⁻¹, maximum input speed
- $n_{amax} = 6500$ min⁻¹, Limit for average input speed

Output Bearing :

- $C_0 = 7630$ N, Static load rating
- $C = 914$ N, Dynamic load rating
- $M = 0,89$ Nm, Permissible dyn. tilting moment
- $F_A = 270$ N, Permissible axial load
- $F_R = 90$ N, Permissible radial load

HD-Material number : 606173

6	YENEUR – fee		
	Currency conversion surcharge, max 12,5%	1-2 pcs	96,00
		3-9 pcs	69,00

7	CSF - Unit		
	CSF-8-100-1U-CC-F	1-2 pcs	967,00
		3-9 pcs	751,00

Harmonic Drive Unit, i=100, Lost Motion < 1,5 arcmin, with output flange, input hub, broad mounting flange

Harmonic Drive AG
 Hoenbergstraße 14
 D-65555 Limburg a. d. Lahn
 ☎ +49-6431-5008-0
 📠 +49-6431-5008-119
 www.harmonicdrive.de
 info@harmonicdrive.de

Vorstand
 Dipl.-Ing. Ekrem R. Sirman (Vorsitzender)
 Dipl.-Ing. Masanao Kobayashi

AR-Vorsitzender
 Reinhard Ernst

Bank
 Commerzbank Limburg IBAN DE90 511 400 29
 Kreissparkasse Limburg IBAN DE26 511 500 18
 Postbank Frankfurt a. M. IBAN DE85 500 100 60

Handelsregister Limburg
 HRB 775

BLZ	Kto.-Nr.	BIC
511 400 29	03 722 022 00	SWIFT COBADEFFXXX
511 500 18	00 000 037 80	SWIFT HELADEF1LIM
500 100 60	00 565 996 06	SWIFT PBKDEFF
Ust.-Id. Nr.		DE113850379

Position	Description	Quantity	Unit pricing
----------	-------------	----------	--------------

and technical parameters as follows:

Gearbox:

- $T_R = 4,8$ Nm, Limit for repeated peak torque
- $T_A = 3,3$ Nm, Limit for average torque
- $T_N = 2,4$ Nm, Rated torque at 2000 rpm
- $T_M = 9$ Nm, Limit for momentary peak torque
- $n_{max} = 10000$ min⁻¹, maximum input speed
- $n_{amax} = 6500$ min⁻¹, Limit for average input speed

Output Bearing :

- $C_0 = 1900$ N, Static load rating
- $C = 2160$ N, Dynamic load rating
- $M = 3,46$ Nm, Permissible dyn. tilting moment
- $F_A = 630$ N, Permissible axial load
- $F_R = 200$ N, Permissible radial load

HD-Material number : 606176

8	YEN/EUR – fee		
	Currency conversion surcharge, max 12,5%	1-2 pcs 3-9 pcs	145,00 105,75

9	Direktdrive – Components set for torque motor		
	TorkDrive-290A-30-AA-C	1-2 pcs 3-9 pcs	3.774,00 3.361,00

Harmonic Drive frameless, individual components for stator and rotor, with cooling jacket, voltage peak 5kV, power supply 400-480 VAC, DC bus voltage 560-680 VDC, impuls voltage 4000 V, isolation voltage 2500 V/10s, bus voltage max. 720 VDC, protection class IP21 (EN60034-5), maximum current 56 A, rated current 30 A, with technical parameters as follows:

- $T_{max} = 177$ Nm, Maximum output torque
- $T_c = 85$ Nm, Continuous stall torque
- $T_N = 0,6$ Nm, Rated torque at 2000 rpm
- $n_{max} = 800$ min⁻¹, maximum speed
- $n_n = 800$ min⁻¹, rated speed

HD-Material number : 6066986

**Delivery time on receipt of order
and technical clarification:**

EXW Limburg

cca. 10 weeks

Delivery times depends on the actual state of production capacities und availability of materials. For these reasons they can out ensue changes.

Payment: advance payment

Harmonic Drive AG
Hoenbergstraße 14
D-65555 Limburg a. d. Lahn
☎ +49-6431-5008-0
☎ +49-6431-5008-119
www.harmonicdrive.de
info@harmonicdrive.de

Vorstand
Dipl.-Ing. Ekrem R. Sirman (Vorsitzender)
Dipl.-Ing. Masaneo Kobayashi

AR-Vorsitzender
Reinhard Ernst

Bank
Commerzbank Limburg IBAN DE90
Kreissparkasse Limburg IBAN DE26
Postbank Frankfurt a. M. IBAN DE85

Handelsregister Limburg
HRG 775

BLZ	Kto.-Nr.	BIC
511 400 29	03 722 022 00	SWIFT COBADEFFXXX
511 500 18	00 000 037 80	SWIFT HELADEF1LIM
500 100 60	00 565 996 06	SWIFT PBNKDEFF
Ust.-Id. Nr.		DE113850379

Delivery terms: from plant in Limburg, non insurance

Valid date: 3 months from date of issuance

Note: If the current average rate of the Japanese Yen should be less than 135 YEN for 1 EUR on the day of order receipt, a surcharge will be applied depending on the currency ratio as follows EUR Conversation Factor $F_e = 135 / \text{Current Rate}$. The YEN-surcharge is limited to 12,5%, which is corresponding to exchange rate of 120 YEN/EUR.

Give your attention please to our General Terms and Conditions, which are ushered in websides www.harmonicdrive.de

With friendly regards

HARMONIC DRIVE AG

Dipl.-Ing. Vladimír Trhoň
Sales Representative for Czech and Slovak Republic
Tel./Fax: +420 311 686142
Mob.: +420 603 844994
E-mail: trhon@centrum.cz
Web: www.harmonicdrive.de

P.S.: On the order indicate please the address of foreign producer and supplier :

Harmonic Drive AG
Hoenbergstrasse 14
D- 65555 Limburg/Lahn
Germany

and send her please in English or German language to my e-mail: trhon@centrum.cz.

Cc.: T. Champaert

Harmonic Drive AG
Hoenbergstraße 14
D-65555 Limburg a. d. Lahn
☎ +49-6431-5008-0
☎ +49-6431-5008-119
www.harmonicdrive.de
info@harmonicdrive.de

Vorstand
Dipl.-Ing. Ekrem R. Sirman (Vorsitzender)
Dipl.-Ing. Masaneo Kobayashi
AR-Vorsitzender
Reinhard Ernst

Bank
Commerzbank Limburg IBAN DE90
Kreisbank Limburg IBAN DE26
Postbank Frankfurt a. M. IBAN DE85
Handelsregister Limburg
HRB 775

BLZ	Kto.-Nr.	BIC
511 400 29	03 722 022 00	SWIFT COBADEFFXXX
511 500 18	00 000 037 80	SWIFT HELADEF1LIM
500 100 60	00 565 996 06	SWIFT PBKDEFF
Ust.-Id. Nr.		
DE113850379		

Nabídka 2: ----

Routech s.r.o., www.routech.cz, www.uzimex.cz

V současnosti již nenabízí motory Maxon. Dodávané motory nejsou kompatibilní se stávajícím SW a HW vybavení laboratoří a s plánovaným využití modelu ve výuce.

Nabídka 3: celkem cca 54 739,- s DPH 21%

Maxon Motor, <http://www.maxonmotor.com/>

Your maxon drive

maxon motor

driven by precision

consists of:

RE-max 21 Ø21 mm, Graphite Brushes, 6 Watt, with terminals
Part number 250026

Encoder MR, Type ML, 512 CPT, 3 Channels, with Line Driver
Part number 201940

EPOS2 24/2, digital positioning controller, 2 A, 9 - 24 VDC
Part number 390438

Your Contact

maxon motor worldwide
http://www.maxonmotor.com:80/maxon/view/content/contact_page
E-Mail: info@maxonmotor.com
Internet: <http://www.maxonmotor.com:80>

retail price:

1-4 Pieces	CHF 549.60
5-19 Pieces	CHF 487.10
20-49 Pieces	CHF 421.80
from 50 Pieces	On Request

Terms and conditions

Nabídka 4: celkem cca 54 410,- s DPH 21%

Kwapil & Co Gesellschaft mbH, www.kwapil.com



**NABÍDKA
ČÍSLO**

1441257

Strana: 1
Datum: 22.04.2014
Způsob poptávky: per E-Mail / 22.04.2014
Poptávku vystavil: Mr. Ing. Martin Švejda
Telefon: +420 377 632 517
Zákazník-telefon: +420/ 377 632 501
Zodpovědná osoba: Gabriela Lásková/+420 541 211 538
Technický pracovník/linka: Gabriela Lásková/-

Západočeská univerzita v Plzni,
Fakulta aplikovaných věd,
Katedra kybernetiky
pro Mr. Ing. Martin Švejda
Univerzitní 8
CZ-306 14 Plzeň

Pol.	Položka	Množství	Jednotka	Cena	%	Cena/kus	Datum dodání	Celkem
1	316922 maxon Kombination 226806 RE-max Motor Ø29, GB, 22W, KL, 2We 225780 Encoder tachy MR ENC Typ ML, 1000Imp 3K LD	1,00	STK	6.813,00		6.813,00		6.813,00
2	311605 maxon Kombination 250026 RE-max Motor Ø21, GB, 6W, SL, 2We 201940 MR Encoder tachy MR ENC Typ M, 512Imp 3K LD	1,00	STK	4.664,00		4.664,00		4.664,00
3	390438 maxon EPOS2 24/2 für DC-Motoren digitale Positioniersteuerung 2 A, 9 - 24 VDC	1,00	STK	10.325,00		10.325,00		10.325,00

Platba: 21 dní
Dodávka: Zásilková služba zahraničí
Dodací podmínky: EXW Vídeň

Celkem	CZK	21.802,00
---------------	------------	------------------

Řídící počítač

Nabídka 1: celkem cca 8 754,- s DPH 21%

BScom s.r.o., http://www.bscom.cz/pc-engines-alix-2d13-lx800-256-mb-3-lan-1-minipci-usb-rtc-battery_d209184?ref=heureka.cz

PC Engines ALIX.2D13 LX800 , 256 MB , 3 LAN , 1 miniPCI , USB , RTC battery



Bežná cena vč. DPH: 3 023 Kč
Sleva: 105 Kč/3,5%
Vaše cena vč. DPH: **2 918 Kč**
Vaše cena bez DPH: 2 411 Kč
Spočítat splátky

Dostupnost: **Skladem ext.**

Kdy zboží obdržím, pokud nyní objednáám?

Osobně v Trutnově: úterý 22.4

Přepravní společností: středa 23.4

1 koupit

Kód produktu: 0209184
Kód výrobce (PN): ALIX2D13
Výrobce: PC Engines
Záruka: 24 měsíců ?

Porovnat

Sdílet s přáteli

Tisknout

0

To se mi líbí 0

Hlídací pes

Popis **Diskuse**

Specifikace:

- CPU: 500 MHz AMD Geode LX800
- DRAM: 256 MB DDR DRAM
- Storage: CompactFlash socket, 44 pin IDE header
- Power: DC jack or passive POE, min. 7V to max. 20V
- Three front panel LEDs, pushbutton
- Expansion: 1 miniPCI slot, LPC bus
- Connectivity: 3 Ethernet channels (Via VT6105M 10/100)
- I/O: DB9 serial port, dual USB port
- Board size: 6 x 6" (152.4 x 152.4 mm) - same as WRAP.1E
- Firmware: tinyBIOS

Změny oproti ALIX.2C:

- Increase USB current limit.
- USB headers as build option.
- USB ports 3 and 4 on header (not tested).
- Change optional serial header J12 to COM2.
- Add LED and switch pins to I2C header.
- Populate buzzer driver circuit, add pins for use as GPIO.
- Add option for power in header J18.
- Some enhancements to reduce EMI.
- Add second POSCAP to ruggedize 3.3V rail for high power radio cards.

Nabídka 2: celkem cca 9 165,- s DPH 21%

vmSHOP s.r.o. , <http://www.vmshop.cz/ALIX-2D13/zakladni-deska-pc-engines-2d13>

Základní deska PC Engines 2D13 (LX800 / 256 MB / 3 LAN / 1 miniPCI / USB / RTC battery)



Přidat do košíku + 1 ks

cena: **3 055 Kč**
v ceně zahrnutý poplatky včetně DPH

cena bez DPH: **2 525 Kč**

ESOX
nákup na splátky: **306 Kč**

jak nakoupit na splátky? + 10x 306 Kč

BONUS 198 bodů [více zde](#)

+1

To se mi líbí

KÓD: **291779**

Obchodní parametry	Množstevní slevy	Dostupnost zboží
Výrobce:	cena od 2 ks: 2 466 Kč +2	Externí sklad: nedostupné - vyprodáno
Kód zboží(ID): 291779	cena od 5 ks: 2 446 Kč +5	Prodejna: nedostupné - vyprodáno
PN: ALIX-2D13	cena od 10 ks: 2 426 Kč +10	Dodání po ČR: termín neznámý
Záruka: 24 měs.	(ceny za 1ks bez DPH)	

Nabídka 3: celkem cca 8 460,- s DPH 21%

Discomp s.r.o., <https://www.discomp.cz/?cls=stoitem&stiid=20104>

PC Engines ALIX.2D13 LX800 , 256 MB , 3 LAN , 1 miniPCI , USB , RTC battery



Výrobce:	PC Engines
Kód:	10700009
Part No.:	ALIX2D13
Záruka:	24 Měsíce
Dostupnost:	PLZ OVA ✓
Vaše cena bez DPH:	2 329 Kč
Recyklační poplatek:	2 Kč
Autorský poplatek:	0 Kč
DPH:	21%
Cena bez DPH vč. popl.:	2 331 Kč
Cena s DPH vč. popl.:	2 820 Kč

ks

[Popis](#) [Ke stažení](#) [Diskuse](#) [Dotaz k produktu](#)

Podrobnosti o produktu

Popis produktu:

Specifikace:

- CPU: 500 MHz AMD Geode LX800
- DRAM: 256 MB DDR DRAM
- Storage: CompactFlash socket, 44 pin IDE header
- Power: DC jack or passive POE, min. 7V to max. 20V
- Three front panel LEDs, pushbutton
- Expansion: 1 miniPCI slot, LPC bus
- Connectivity: 3 Ethernet channels (Via VT6105M 10/100)
- I/O: DB9 serial port, dual USB port
- Board size: 6 x 6" (152.4 x 152.4 mm) - same as WRAP. 1E
- Firmware: tinyBIOS

Změny oproti ALIX.2C:

- Increase USB current limit.
- USB headers as build option.
- USB ports 3 and 4 on header (not tested).
- Change optional serial header J12 to COM2.
- Add LED and switch pins to I2C header.
- Populate buzzer driver circuit, add pins for use as GPIO.
- Add option for power in header J18.
- Some enhancements to reduce EMI.
- Add second POSCAP to ruggedize 3.3V rail for high power radio cards.

Produkt manažer:

Luděk Merta, +420 722 926 224, ludek.merta@discomp.cz

Odůvodnění neinvestičních nákladů

V rámci projektu budou vyhotoveny tři modely robotického ramena manipulátoru, každý sestává z jednoho motoru včetně enkodéru a řídicí jednotky a jedné převodovky. Řídicí počítače budou nakoupeny odděleně za účelem možnosti připojení jak k robotickým ramenům tak k sobě navzájem (pro testování technologie HIL).

Model robotického ramena 1:

Součásti modelu:	Předpokládaná cena s DPH 21 % (CZK)
Motor(6W): Motor_motor + Motor_encoder + Motor_controller	18 137,-
Převodovka (CSF- 5): Gear	20 627,-
Celkem s DPH 21 %	38 764,-

Model robotického ramena 2:

Součásti modelu:	Předpokládaná cena s DPH 21 % (CZK)
Motor(6W): Motor_motor + Motor_encoder + Motor_controller	18 137,-
Převodovka (CSF- 5): Gear	20 627,-
Celkem s DPH 21 %	38 764,-

Model robotického ramena 3:

Součásti modelu:	Předpokládaná cena s DPH 21 % (CZK)
Motor(6W): Motor_motor + Motor_encoder + Motor_controller	18 137,-
Převodovka (CSF- 5): Gear	20 627,-
Celkem s DPH 21 %	38 764,-

Řídicí počítače pro modely robotických ramen:

Součásti modelu:	Předpokládaná cena s DPH 21 % (CZK)
Řídicí počítač: ALIX	2 820,-
Řídicí počítač: ALIX	2 820,-
Řídicí počítač: ALIX	2 820,-
Celkem s DPH 21 %	8 460,-

Celkové předpokládané neinvestiční náklady činí 124 752,- Kč s DPH 21% což je v souladu s finančním plánem projektu (plán: 126 000,-).

Vybrané firmy k nákupům:

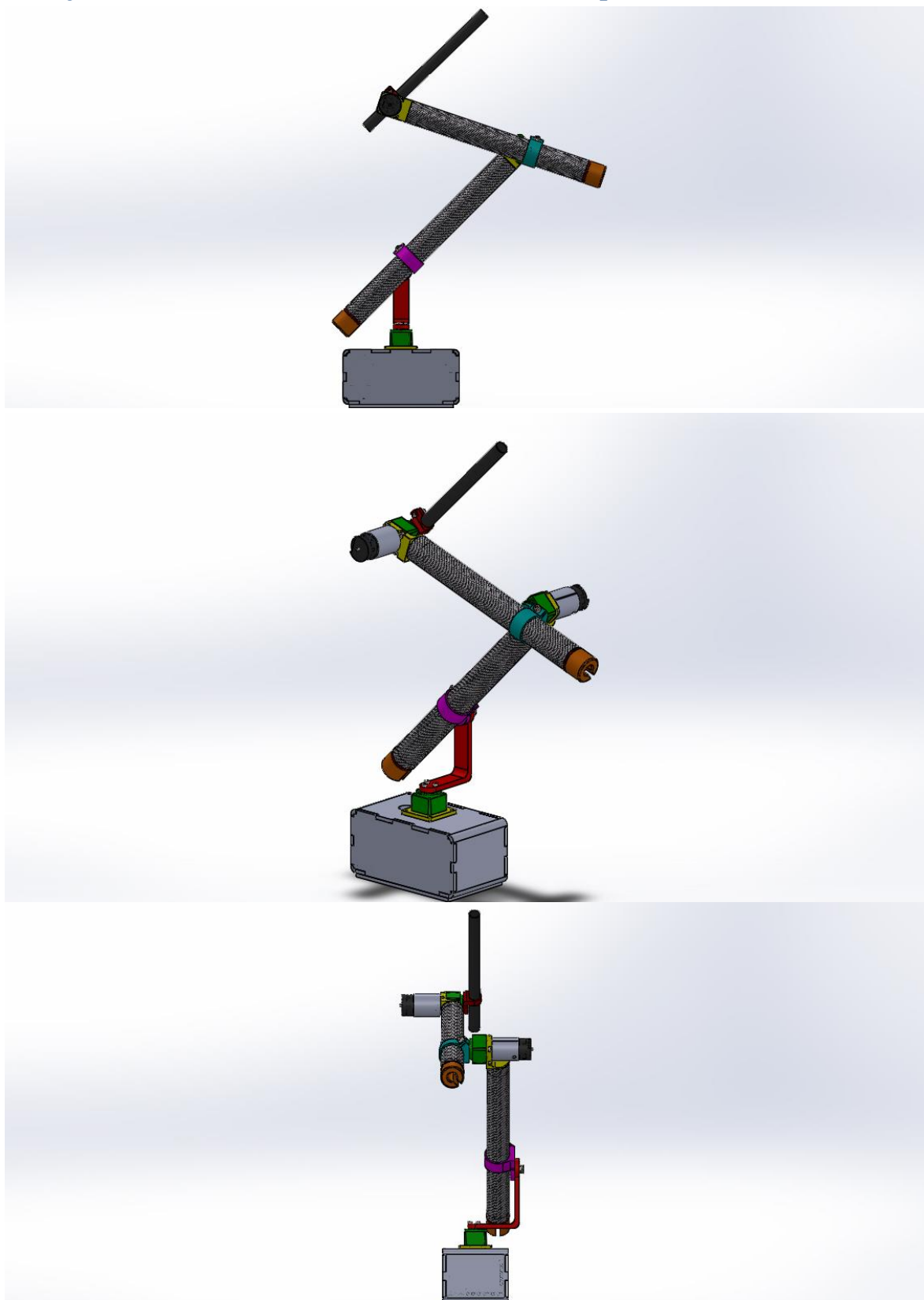
Firma:	Položka:	Cena/ks s DPH 21% (CZK)	Počet ks:
Harmonic Drive – AG (jediný vhodný dodavatel)	Převodovka: CSF-5-100-1U-CC-F HD-Material number : 606173	20 627,-	3
Discomp s.r.o. (nejlevnější dodavatel)	Řídící počítač: PC Engines ALIX.2D13 LX800 , 256 MB , 3 LAN , 1 miniPCI , USB , RTC battery	2 820,-	3
Kwapil & Co Gesellschaft mbH (nejlevnější dodavatel)	Motor_motor + Motor_encoder + Motor_controller: Maxon part number: 250026 + 201940 + 390438	18 137,-	3

Bibliografie

1. **SPINEA, s.r.o.** http://www.spinea.sk/public/media/0037/Twinspace_Catalogue_Spinea.pdf. [Online] 2014.
2. **Motors, Maxon.** <http://www.maxonmotor.com/>. [Online]
3. **AG, Harmonic Drive.** http://harmonicdrive.de/produkte/media/catalog/category/04_14_CSF-Mini_1.pdf. [Online] 2014.

B Analýza a konstrukční návrh

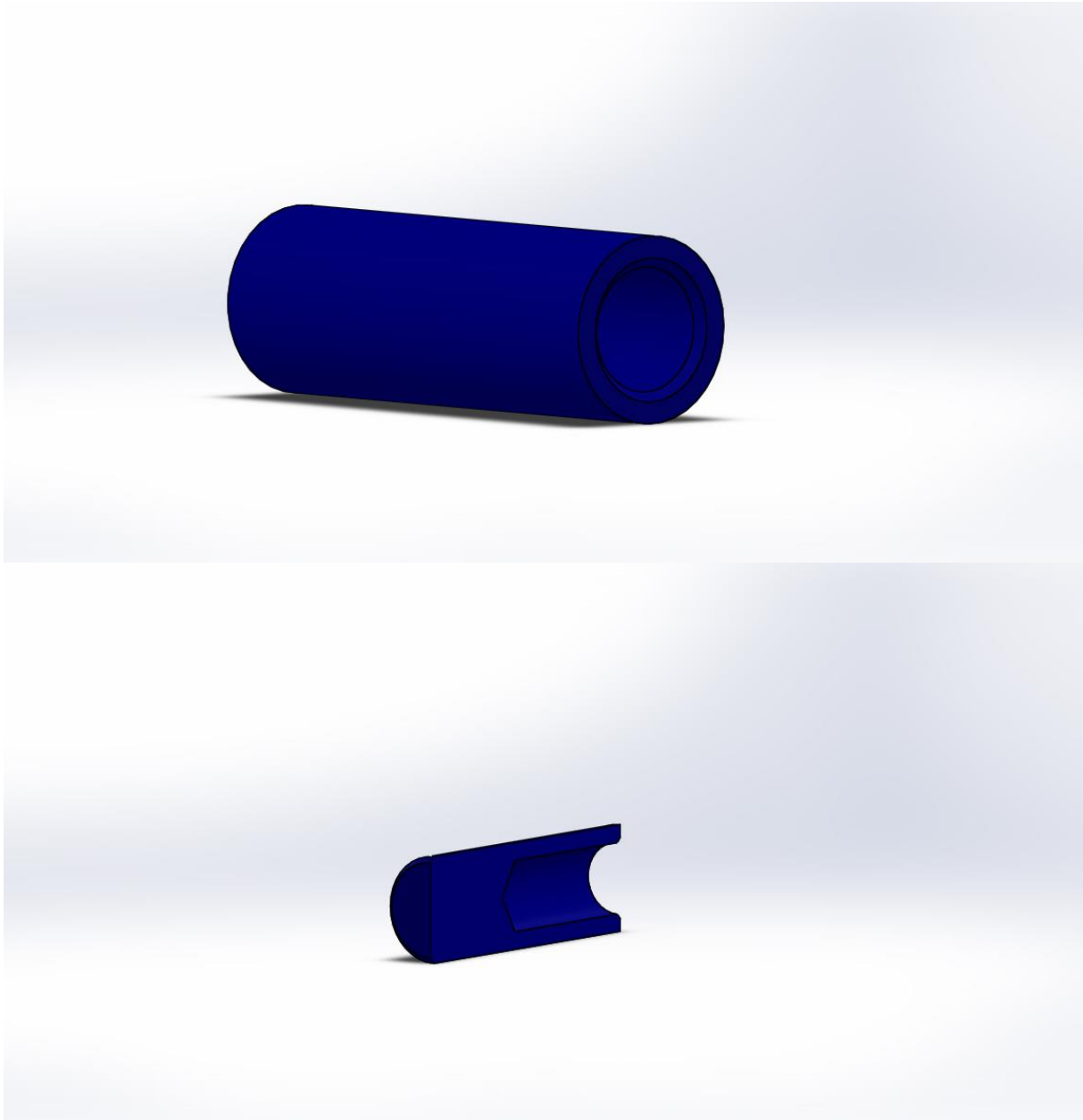
Analýza a konstrukční návrh robota se 3 stupni volnosti



Spojení motor převodovka:

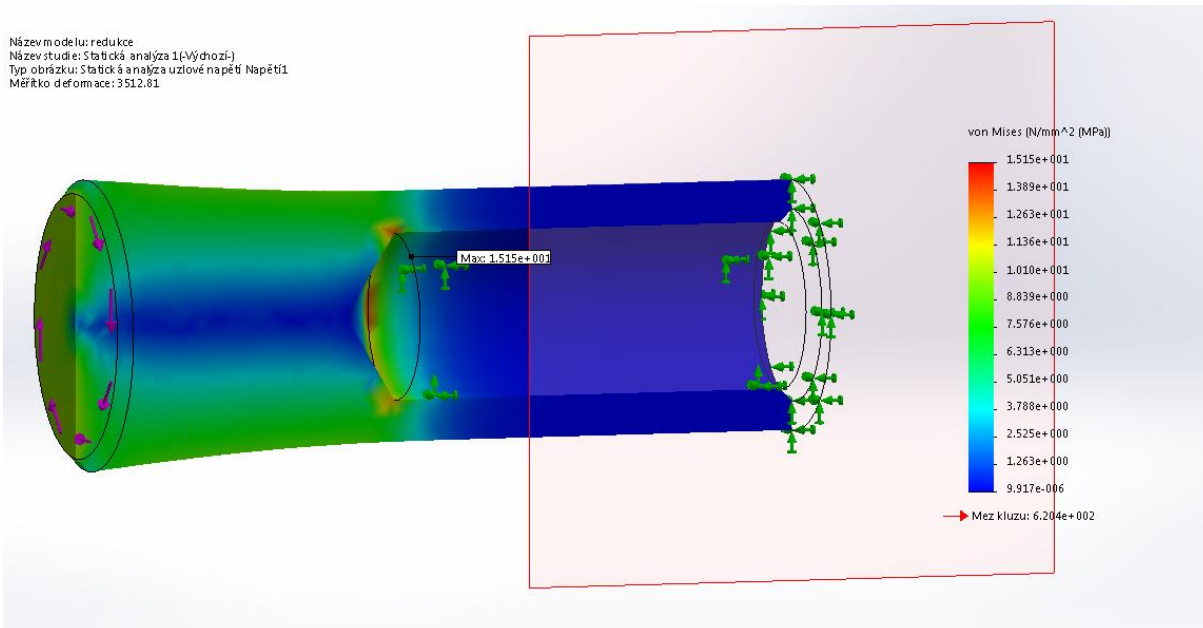
Přechodová hřídel z ocele:

Na hřídelku motoru bude tento prvek nalepen speciálním lepidlem a na wave generátor převodovky bude připevněn standardním způsobem pomocí 2 šroubů, dle specifikace převodovky.



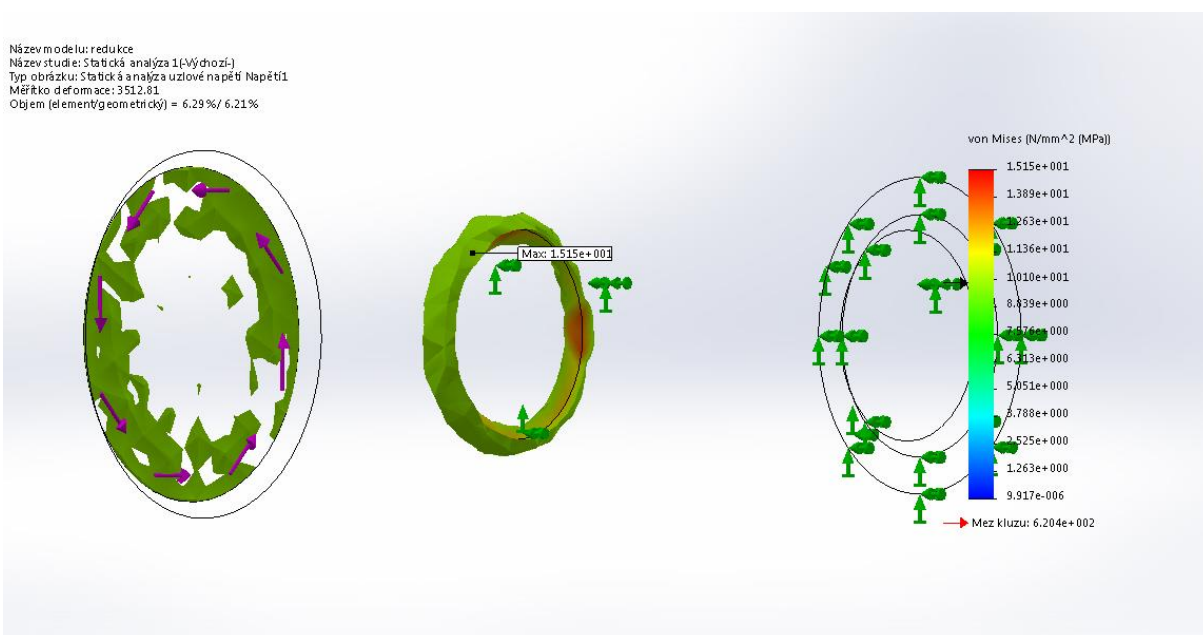
Pevnostní výpočet je proveden při zatížení 0,03 Nm, což je maximální vstupní hodnota momentu přenositelná použitou převodovkou. Okrajové podmínky jsou zjednodušené, ale výsledky pro daný účel vyhovující.

Název modelu: redukce
Název studie: Statická analýza 1(-Výchozí-)
Typ obrázku: Statická analýza uzlové napětí Napětí1
Měřítko deformace: 3512.81



Na tomto obrázku je zobrazené rozložení napětí v osovému řezu součásti. Maximum napětí dosahuje 15 MPa v přechodové oblasti. Lze předpokládat, že je při reálných okrajových podmínkách dojde ještě ke snížení toho napětí.

Název modelu: redukce
Název studie: Statická analýza 1(-Výchozí-)
Typ obrázku: Statická analýza uzlové napětí Napětí1
Měřítko deformace: 3512.81
Objem (elementů/geomrický) = 6.29% / 6.21%



Zde jsou zobrazeny napětí nad 10MPa.

Z provedené analýzy lze usuzovat, že navržené řešení je bezpečné a realizovatelné. Výsledná bezpečnost tohoto uzlu je větší než 15. Hmotnost méně než 0,5g.

Návrh ostatních komponent robota

Pro dimenzování ostatní komponent bylo zvoleno jako referenční zatížení maximální dovolené napětí předního ložiska převodovky, tam kde je předpoklad dosažení těchto hodnot.

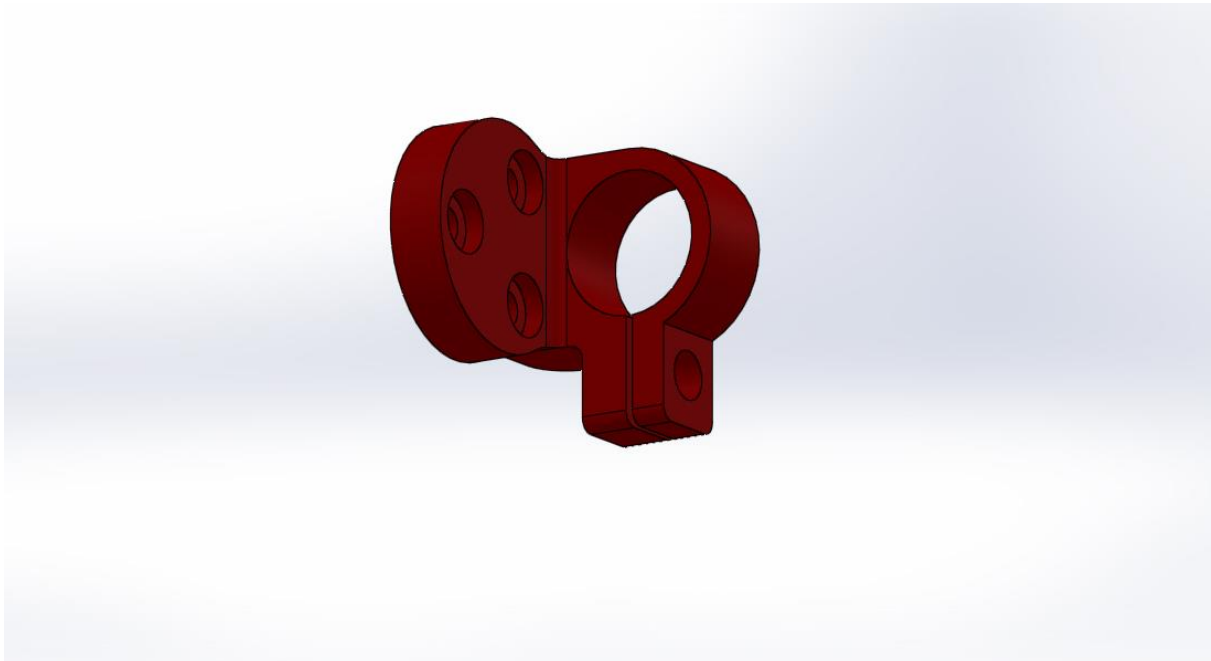
Maximální zatížení předního ložiska převodovky:

Dynamic radial load	FR dyn (max) [N]	90
Dynamic axial load	FA dyn (max) [N]	270
Dynamic tilting moment	Mdyn (max) [Nm]	0.89

Z předchozí tabulky vyplývá, že nejméně limitující hodnotou pro tuto koncepci robota je dovolené axiální zatížení. V axiálním směru bude nejvíce zatížená převodovka s vertikální osou rotace. Ostatní převodovky budou zatíženy s převládajícím vlivem klopného momentu. Vertikálně umístěná převodovka, ta co je uložena v základně robota, bude zatížena nejvíce ze všech použitých převodovek. Vertikální, tedy axiální zatížení bude dáno hmotností zavěšených ramen, která je přibližně 350g. Dynamické zatížení je v ose Z minimální. Proto axiální zatížení je pro převodovku celkem zanedbatelné. Vyosení těžiště pohyblivé části robota vůči ložisku spodní převodovky je cca 200mm v závislosti na konfiguraci robota. Proto limitní moment převodovky bude dosažen v případě zrychlení lineární osy kolem 13g. Což je dostatečná hodnota pro předpokládanou funkci robota. Ostatní převodovky budou zatíženy výrazně méně, než tato vertikální převodovka.

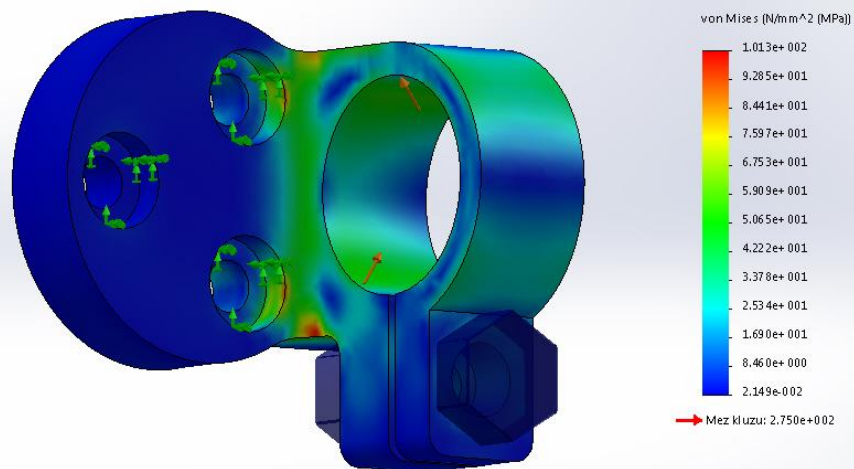
Nasledu přehled jednotlivých komponent od posledního ramena postupně k základně.

Objímka pro poslední rameno



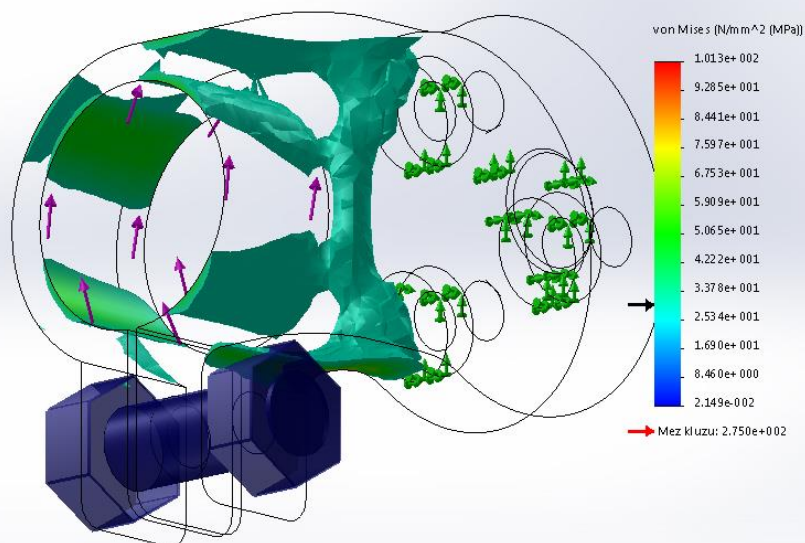
Pohled na objímku posledního ramene o průměru 10mm.

Název modelu: objímka3
Název studie: Statická analýza 1f-Výchozí
Typ obrázku: Statická analýza uzlové napětí Napětí



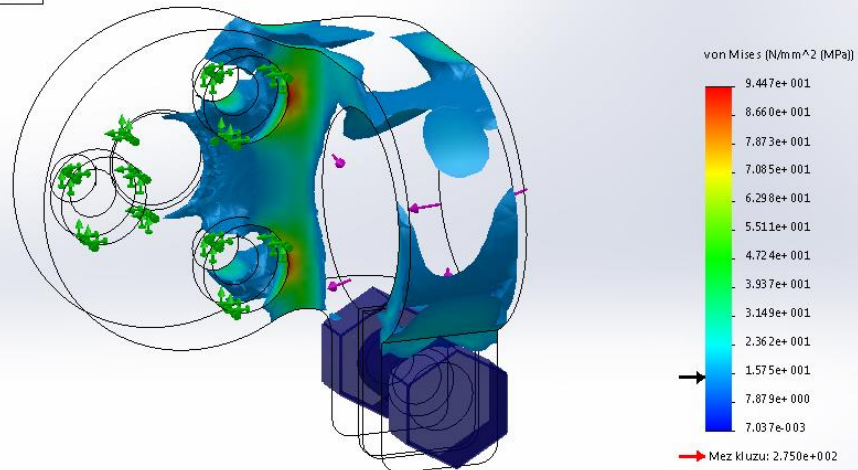
Zatížení maximálním kroučícím momentem převodovky 2,7Nm

Název modelu: objímka3
Název studie: Statická analýza 1f-Výchozí
Typ obrázku: Statická analýza uzlové napětí Napětí
Objem (element/geometrický) = 11.58 %/ 14.52 %



Zatížení maximálním kroučícím momentem převodovky 2,7Nm, oblasti s napětím nad 30 MPa

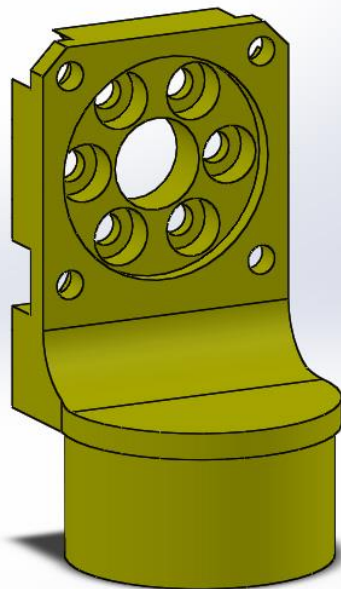
Název modelu: objímka3
Název studie: Statická analýza 2(-Východ-)
Typ obrázku: Statická analýza uzlové napětí Napětí
Objem (element/geometrický) = 19.37 %/ 19.35 %

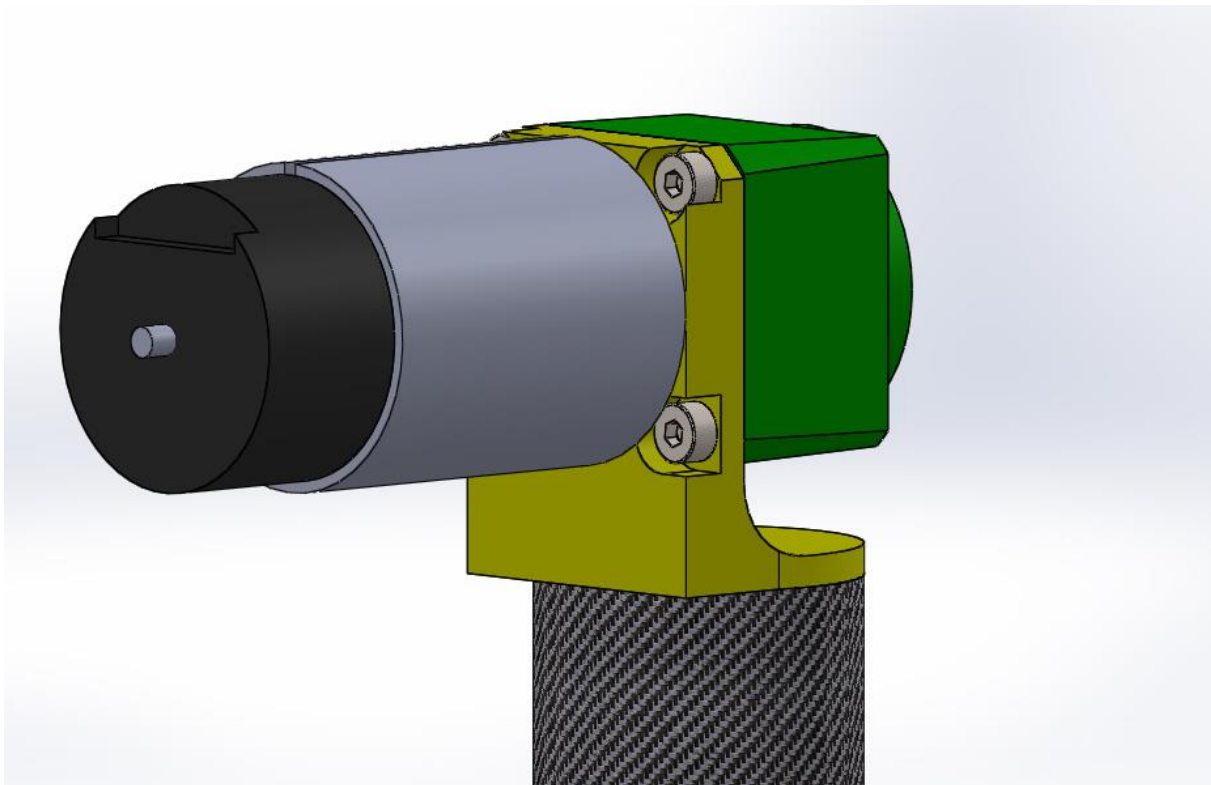


Zatížení maximálním klopným momentem převodovky 0,89Nm, oblasti s napětím nad 15 MPa

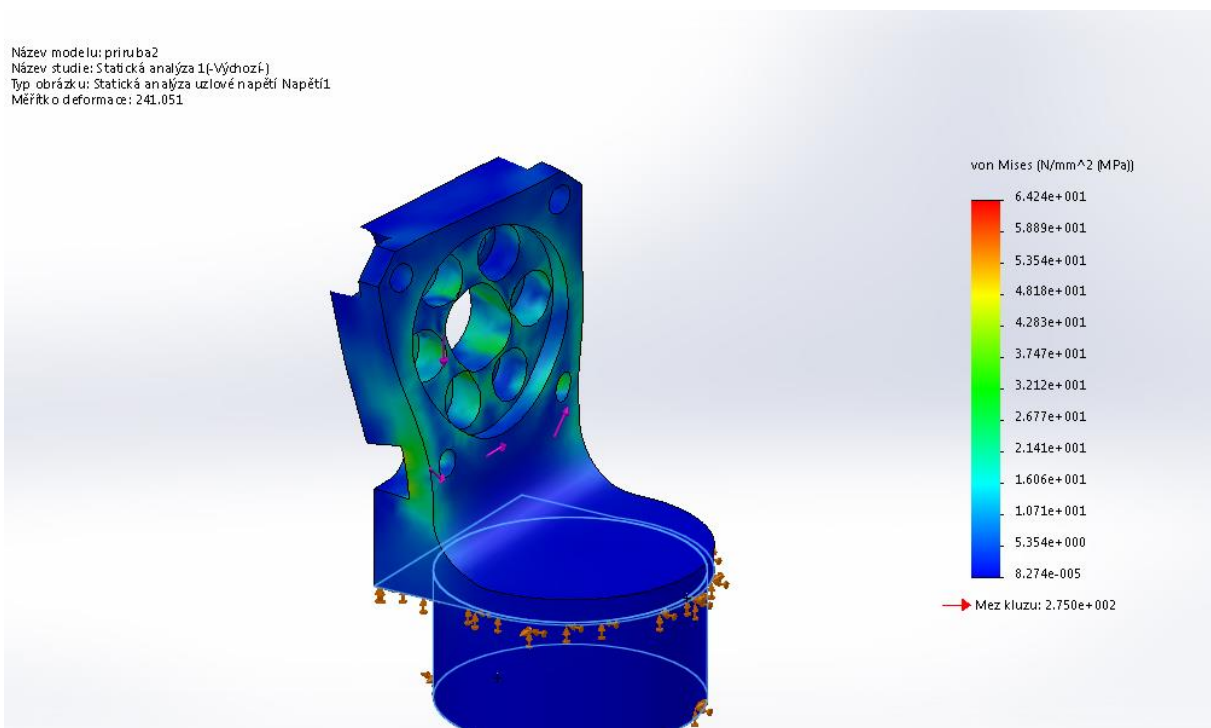
Tato objímka pevnostně plně vyhovuje, hmotnost objímky je 4,2g.

Příruba motoru 2



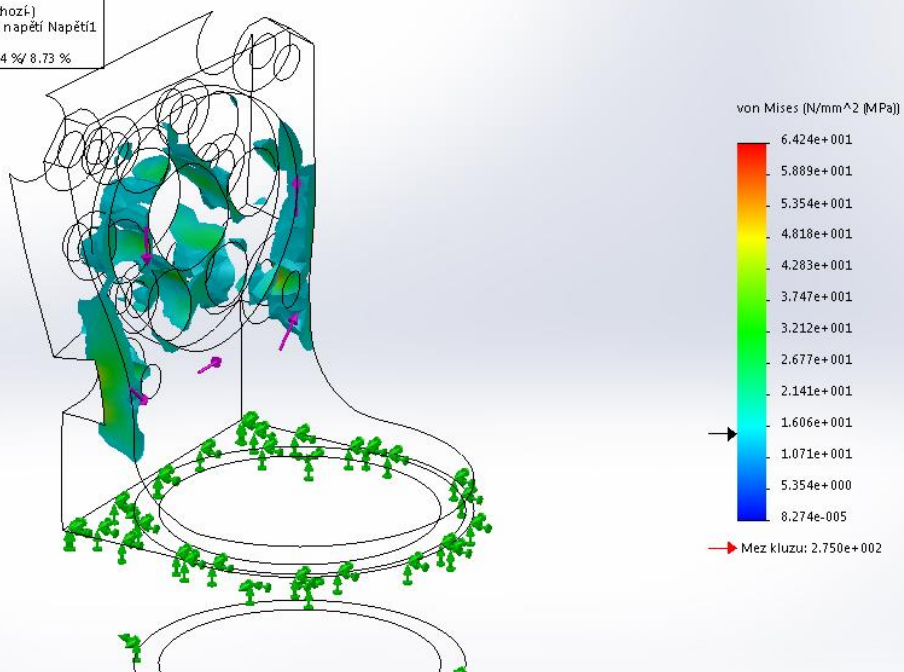


Název modelu: pri_ruba2
Název studie: Statická analýza 1(-Výchozí)
Typ obrázku: Statická analýza uzlové napětí Napětí1
Měřítko deformace: 241,051



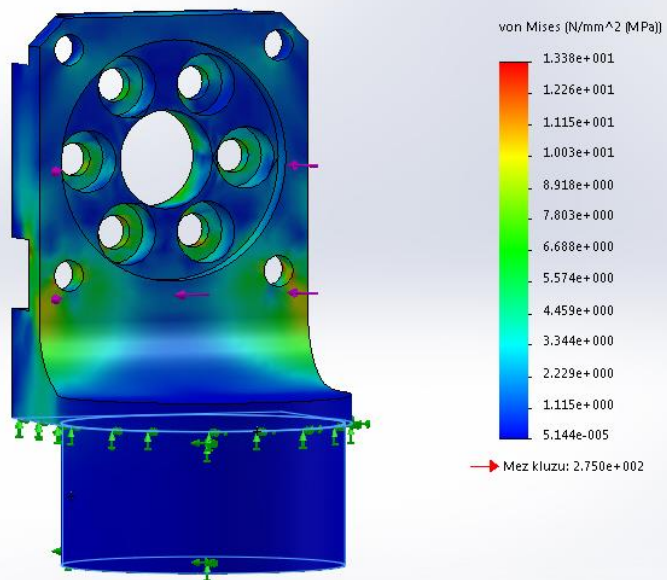
Zatížení maximálním kroučicím momentem převodovky 2,7Nm

Název modelu: priiruba2
Název studie: Statická analýza 1(-Výchozí)
Typ obrázku: Statická analýza uzlové napětí Napětí1
Měřítko deformace: 241,051
Objem (element/geomtrický) = 11,04 %/ 8,73 %



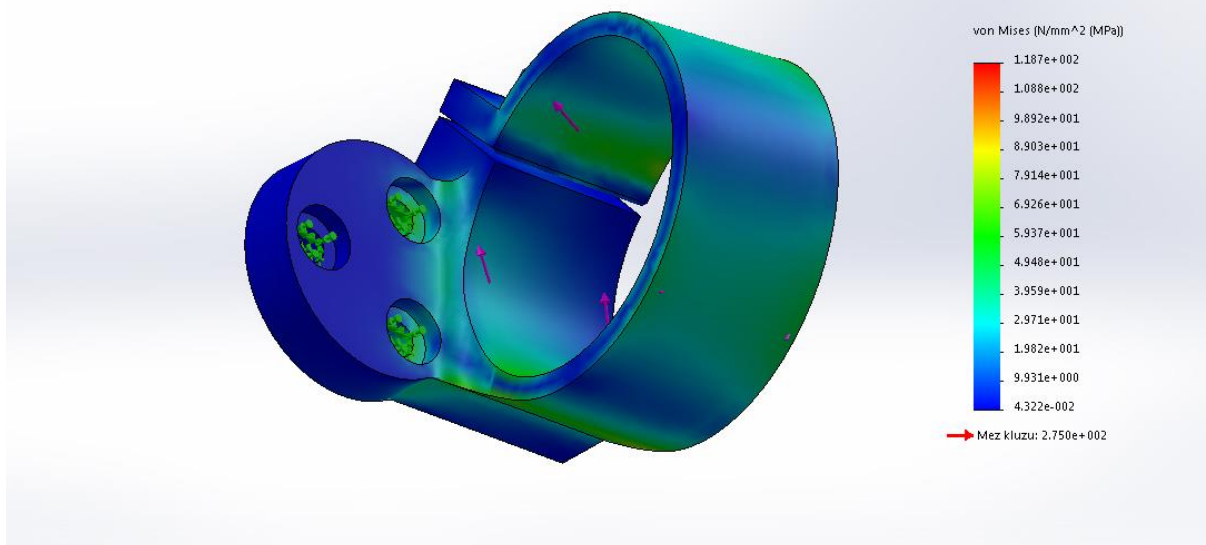
Zatížení maximálním kroučícím momentem převodovky 2,7Nm, oblasti s napětím nad 15 MPa

Název modelu: priiruba2
Název studie: Statická analýza 2(-Výchozí)
Typ obrázku: Statická analýza uzlové napětí Napětí1



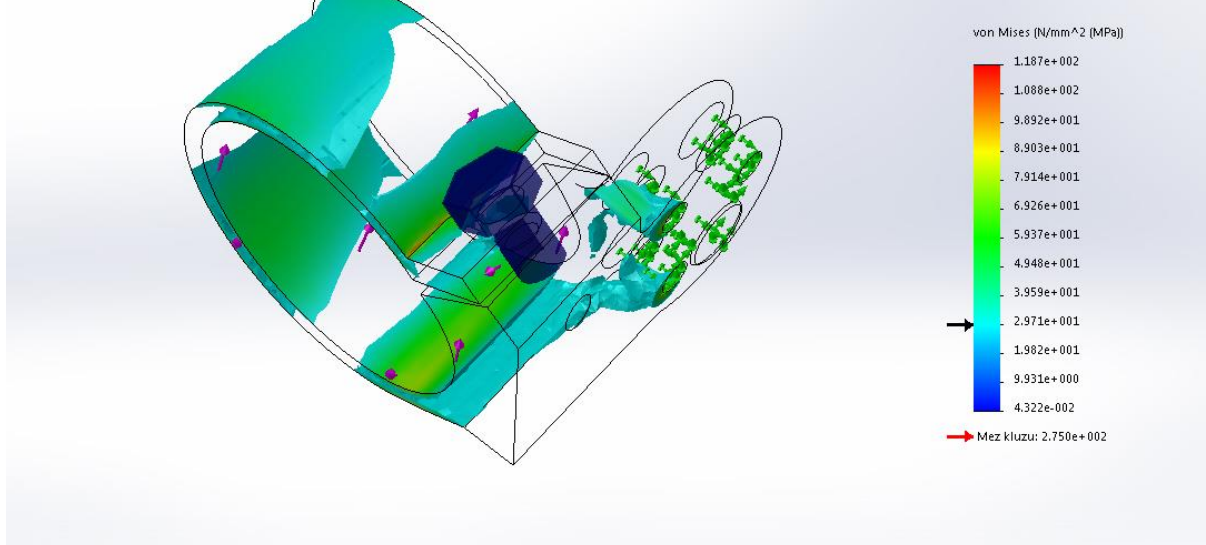
Zatížení maximálním klopným momentem převodovky 0,89Nm s osou rotace v ose trubky. Maximální napětí do 15 MPa

Název modelu: objímk-a2
Název studie: Statická analýza 1[-Východí-]
Typ obrázku: Statická analýza uzlové napětí Napětí1
Měřítko deformace: 19.1345
Objem (element/geomrický) = 22.42 %/ 26.48 %



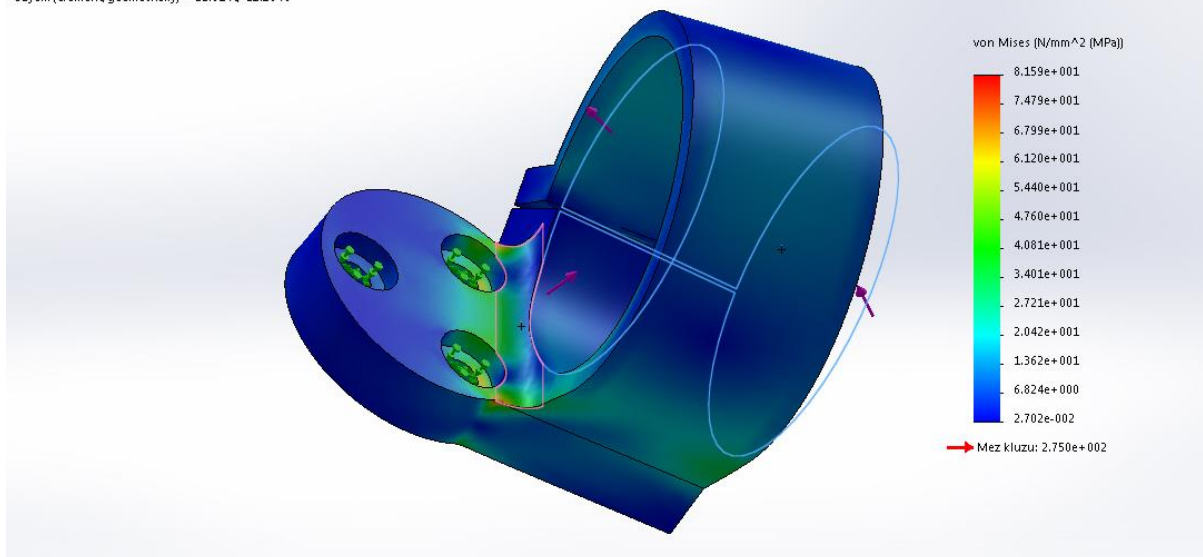
Zatížení maximálním krouticím momentem převodovky 2,7Nm.

Název modelu: objímk-a2
Název studie: Statická analýza 1[-Východí-]
Typ obrázku: Statická analýza uzlové napětí Napětí1
Měřítko deformace: 19.1345
Objem (element/geomrický) = 22.42 %/ 26.48 %



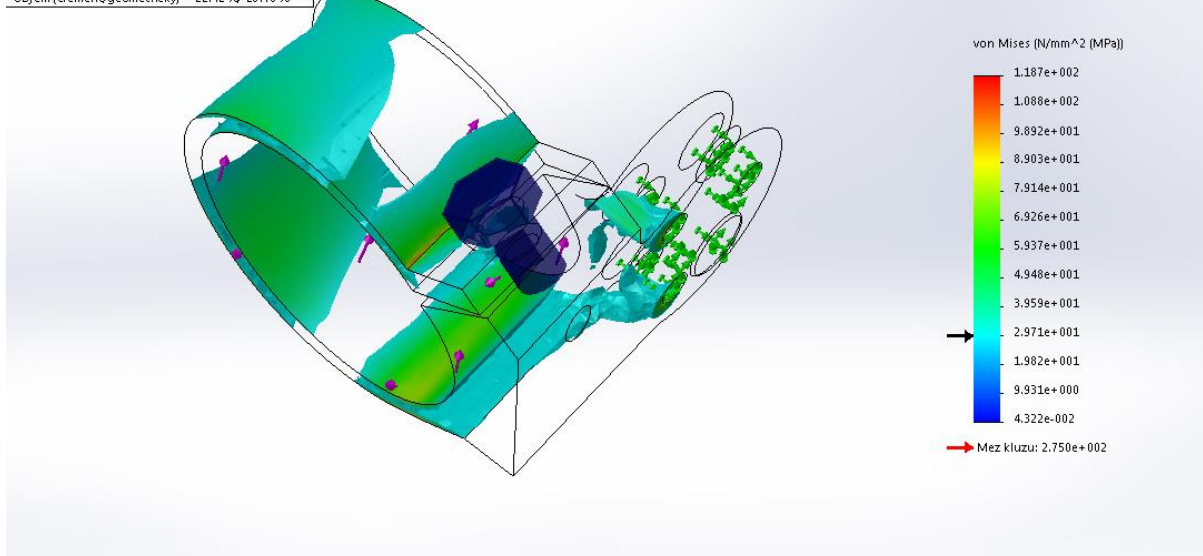
Zatížení maximálním krouticím momentem převodovky 2,7Nm, oblasti s napětím nad 30 MPa

Název modelu: objímk a2
 Název studie: Statická analýza 2(-Výchozí)
 Typ obrázku: Statická analýza uzlové napětí Napětí1
 Měřítko deformace: 30.44
 Objem (element/geometrický) = 22.81% / 21.16 %



Zatížení maximálním klopným momentem převodovky 0,89Nm s osou rotace kolmou k ose trubky.

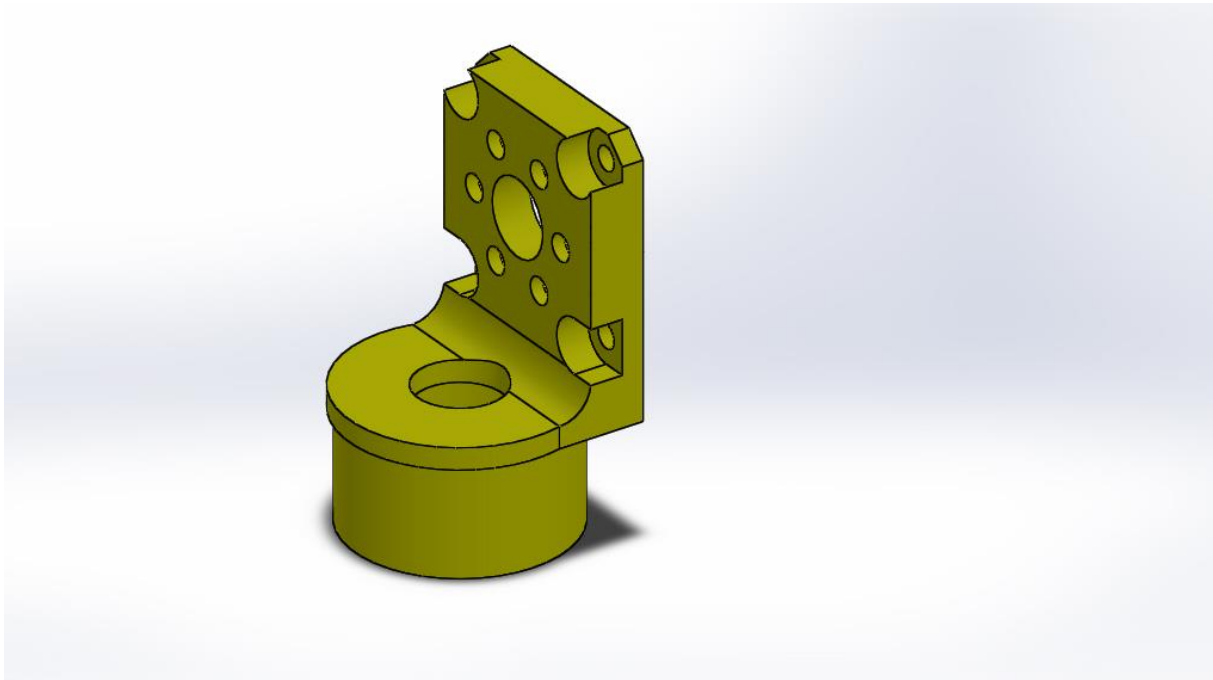
Název modelu: objímk a2
 Název studie: Statická analýza 1(-Výchozí)
 Typ obrázku: Statická analýza uzlové napětí Napětí1
 Měřítko deformace: 19.1345
 Objem (element/geometrický) = 22.42% / 26.48 %



Zatížení maximálním klopným momentem převodovky 0,89Nm s osou rotace kolmou k ose trubky.

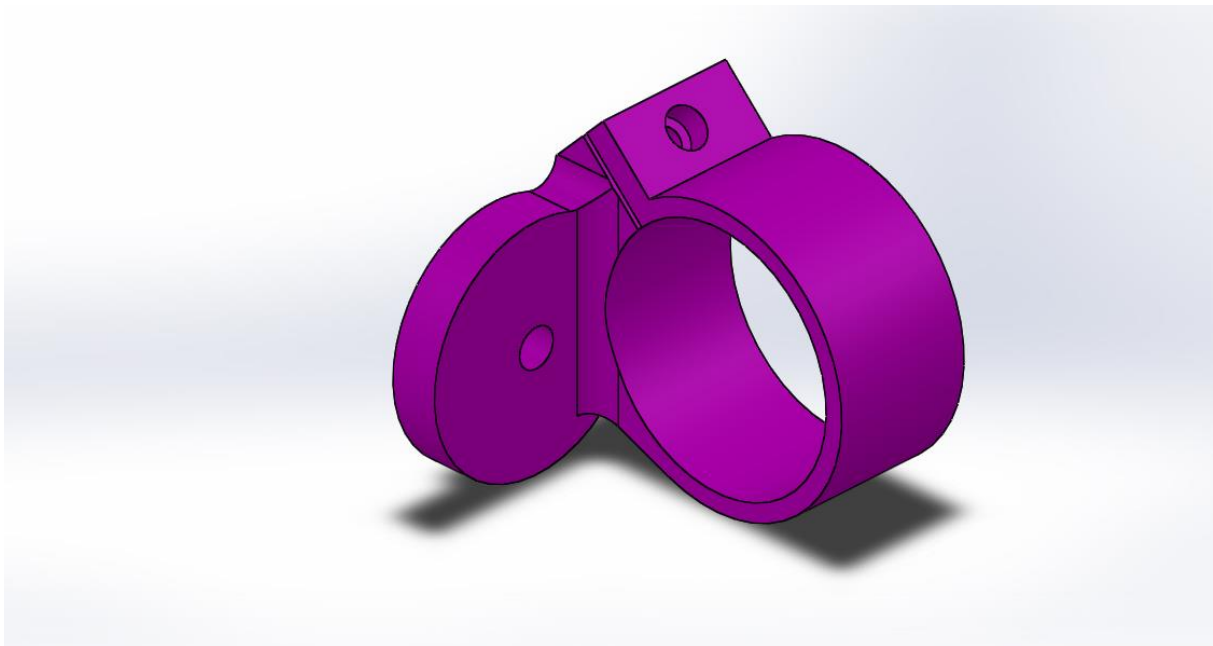
Oblast s napětím nad 15MPa

Příruba motoru 1



Tato příruba je téměř totožná jako předchozí příruba, zatížení příruby lze uvažovat také stejné. Výsledky pevnostních výpočtů jsou také velmi podobné.

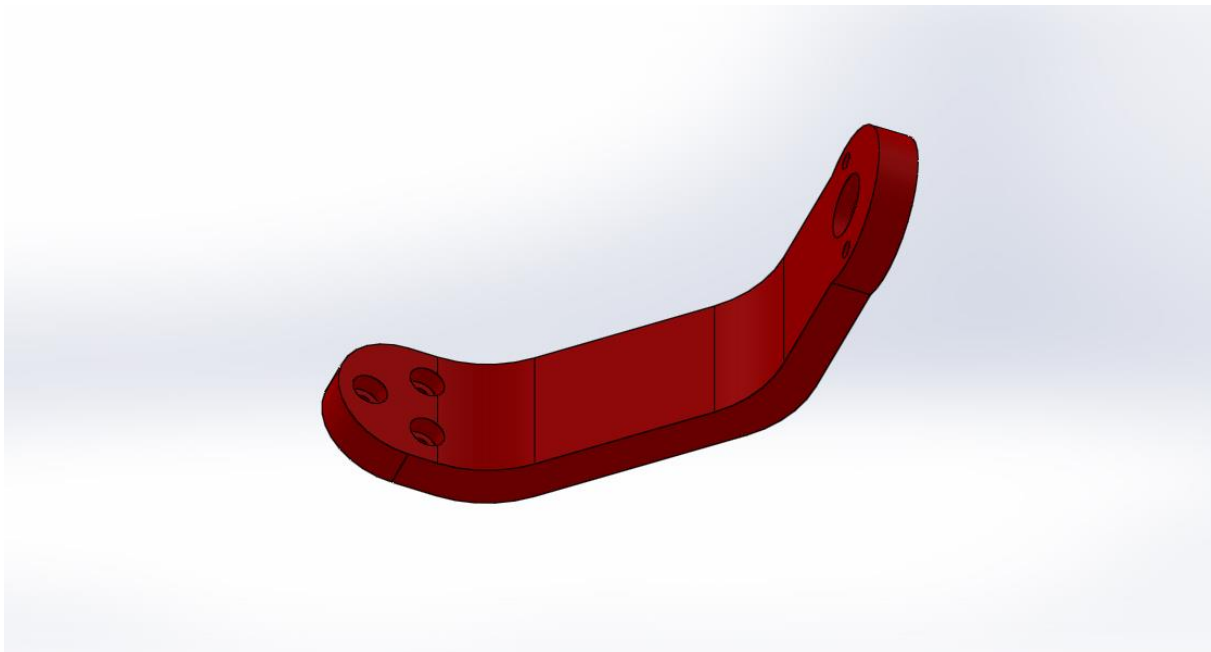
Objímka pro velký průměr trubky 2



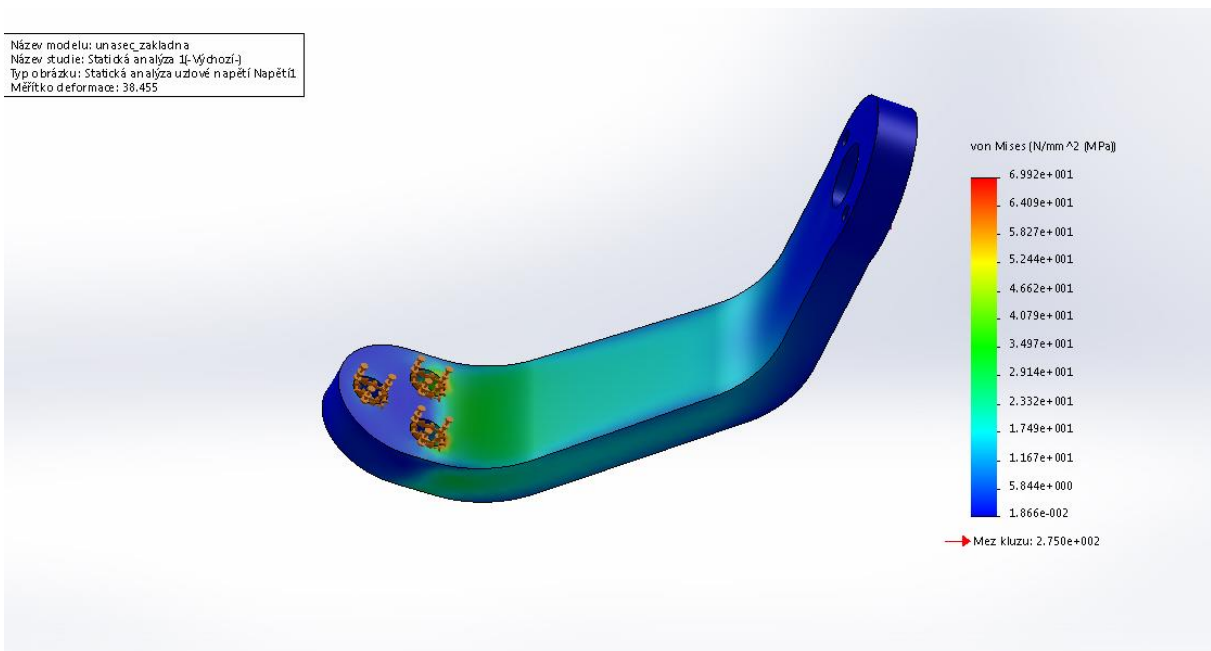
Tato objímka je také podobná jako předchozí objímka. Pouze uložení v protikusu je řešeno jiným způsobem. Pevnostně vychází obdobně.

Unášeč prvního ramena

Z hlediska dimenzování se jedná o nekritičtější komponentu.

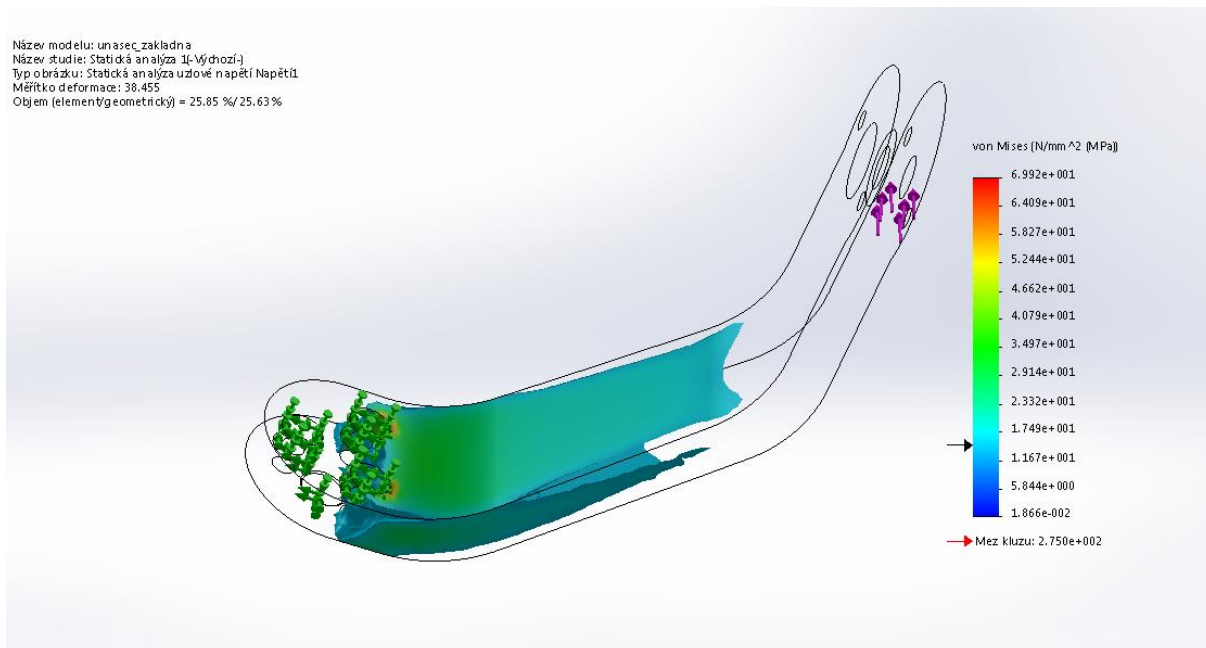


Název modelu: unasec_zakladna
Název studie: Statická analýza (Výchozí)
Typ obrázku: Statická analýza uzlové napětí Napětí
Měřítko deformace: 38,455



Zatížení maximálním krouticím momentem převodovky 2,7Nm.

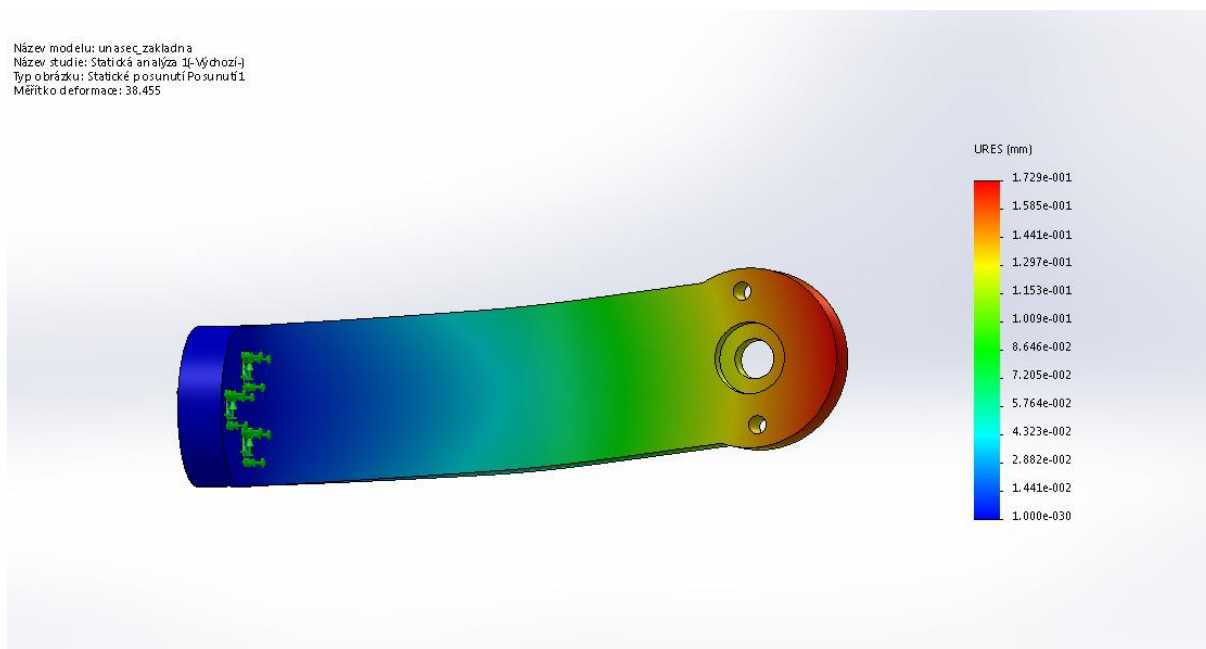
Název modelu: unasec_zakladna
Název studie: Statická analýza 1(-Výchozí)-
Typ obrázku: Statická analýza uzlové napětí Napětí1
Měřítko deformace: 38,455
Objem (element/geometrický) = 25,85 %/ 25,63 %



Zatížení maximálním krouticím momentem převodovky 2,7Nm. Oblasti nad 15 MPa.

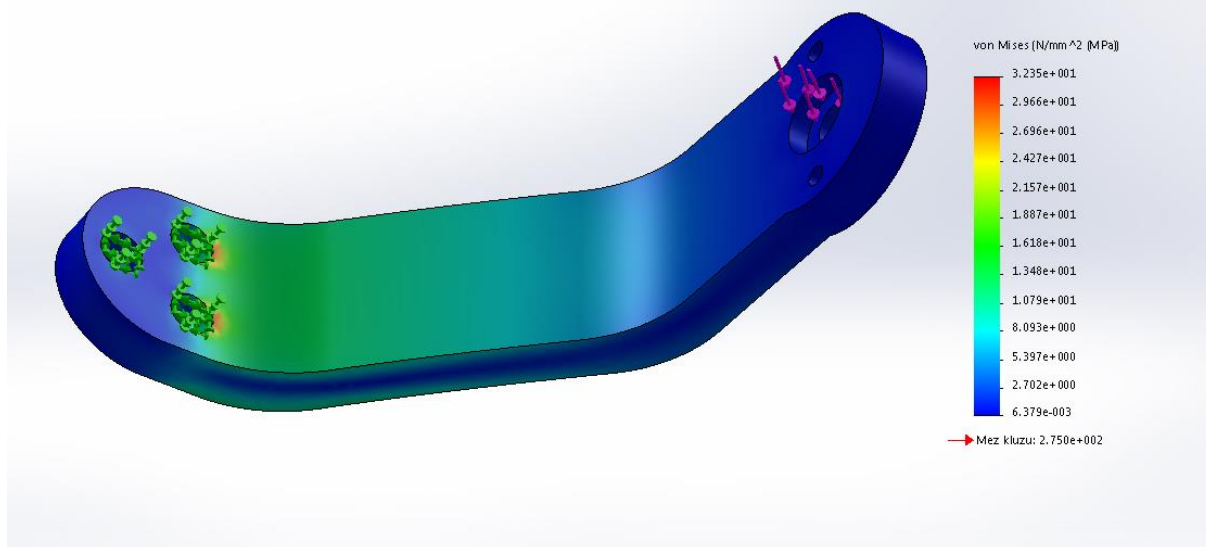
rmace

Název modelu: unasec_zakladna
Název studie: Statická analýza 1(-Výchozí)-
Typ obrázku: Statické posunutí Posunutí1
Měřítko deformace: 38,455



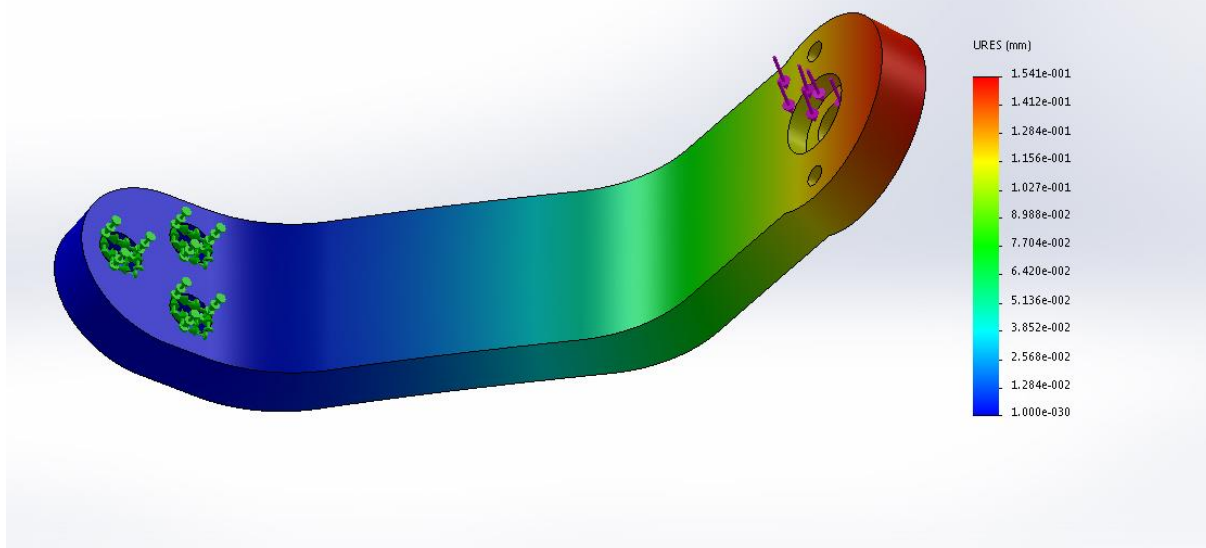
Zatížení maximálním krouticím momentem převodovky 2,7Nm. Maximální deformace 0,17mm.

Název modelu: unasec_zakladna
Název studie: Statická analýza 2l-Výdvozí-
Typ obrázku: Statická analýza uzlové napětí Napětí
Měřítko deformace: 46,2538



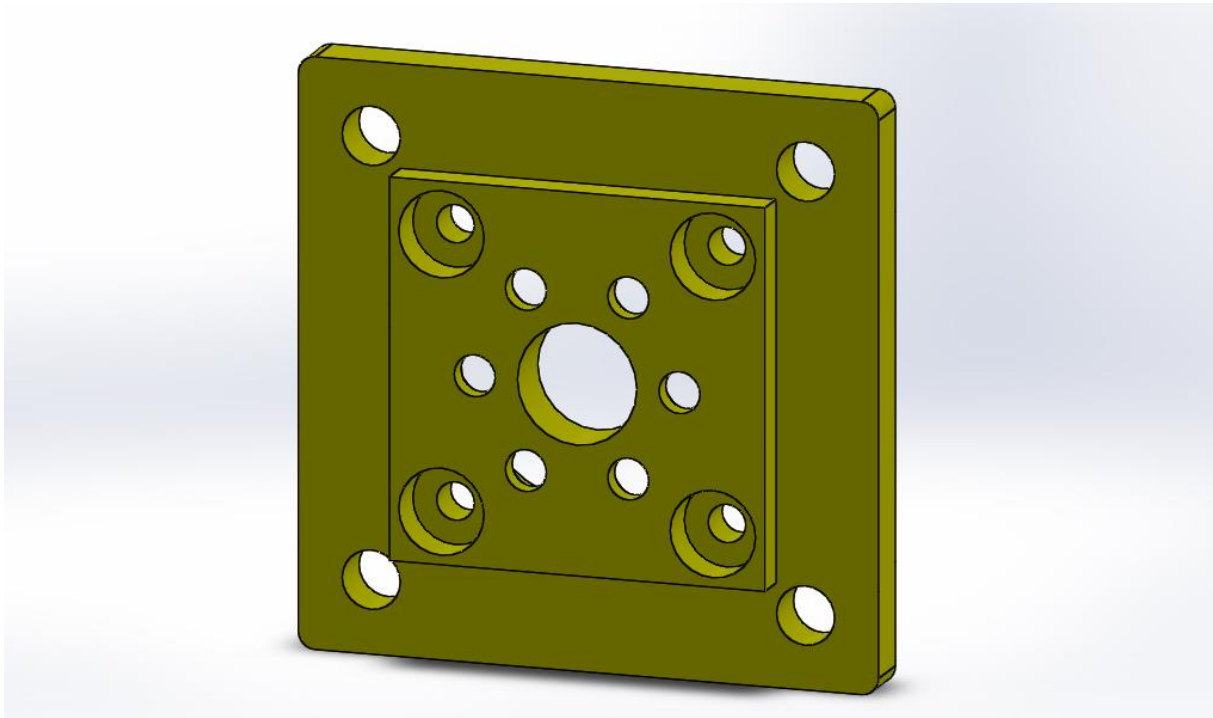
Zatížení maximálním klopným momentem převodovky 0,89Nm s osou rotace kolmou k ose rotace převodovky.

Název modelu: unasec_zakladna
Název studie: Statická analýza 2l-Výdvozí-
Typ obrázku: Statické posunutí Posunutí1
Měřítko deformace: 46,2538

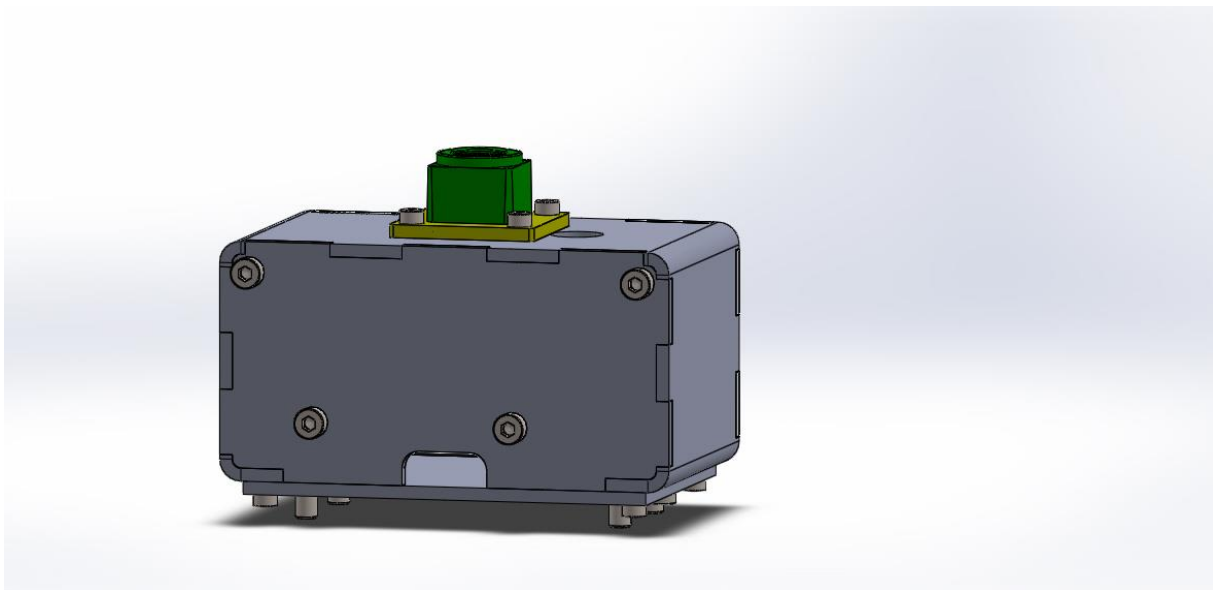


Zatížení maximálním klopným momentem převodovky 0,89Nm s osou rotace kolmou k ose rotace převodovky. Maximální deformace 0,15mm.

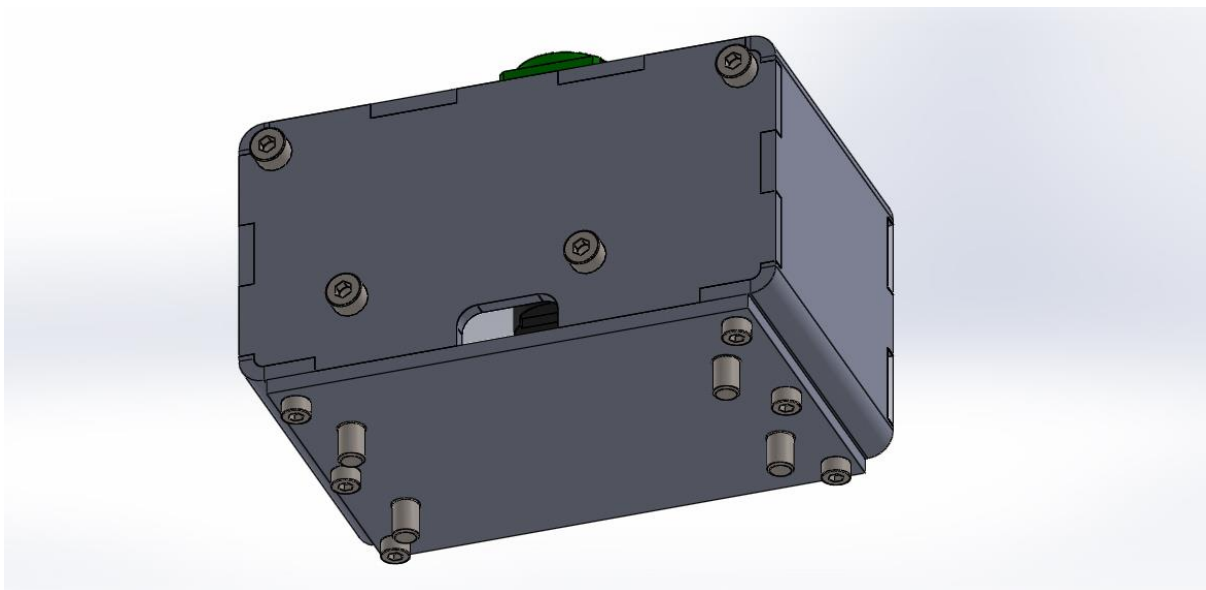
Základna robota



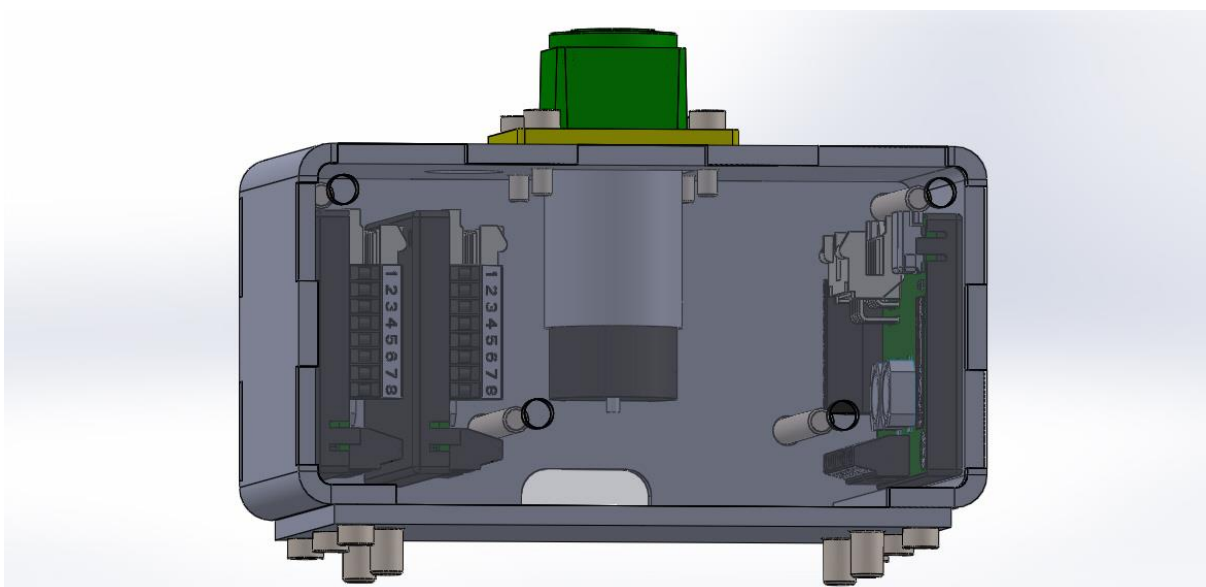
Příruba vertikálně uložené převodovky



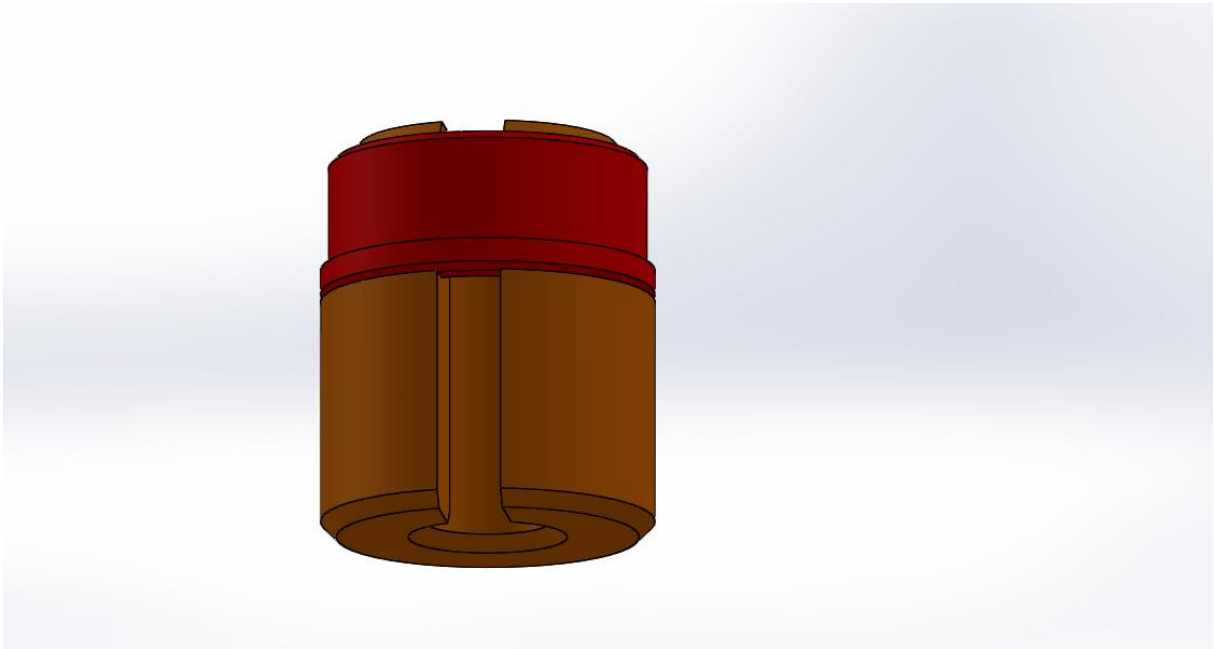
Základna se skládá ze 4 plechových dílů. Dále je opatřena otvory pro přívod, odvod potřebných kabelů. Hmotnost plechových dílů je 90g.



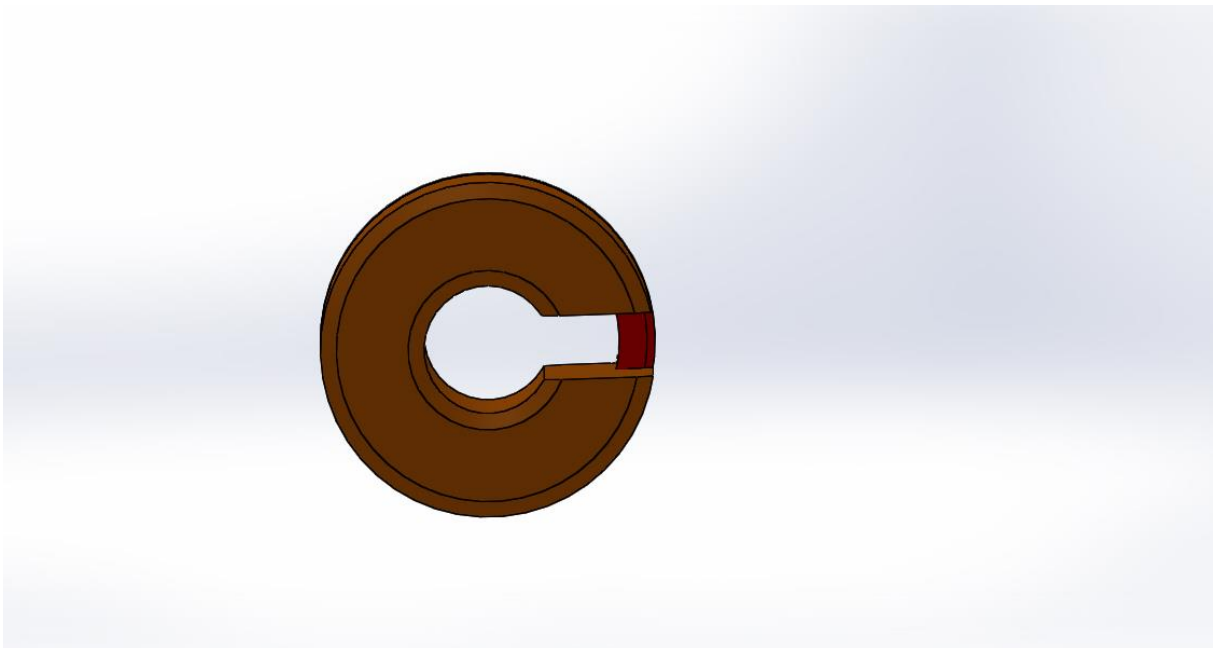
Sestava základny bude přidělána k lineární ose pomocí 4 šroubů, tak jak je lineární osa připravena.



Bočnice jsou k sobě staženy předepnutými šrouby. To by mělo zajistit dostatečnou tuhost sestavy základny.

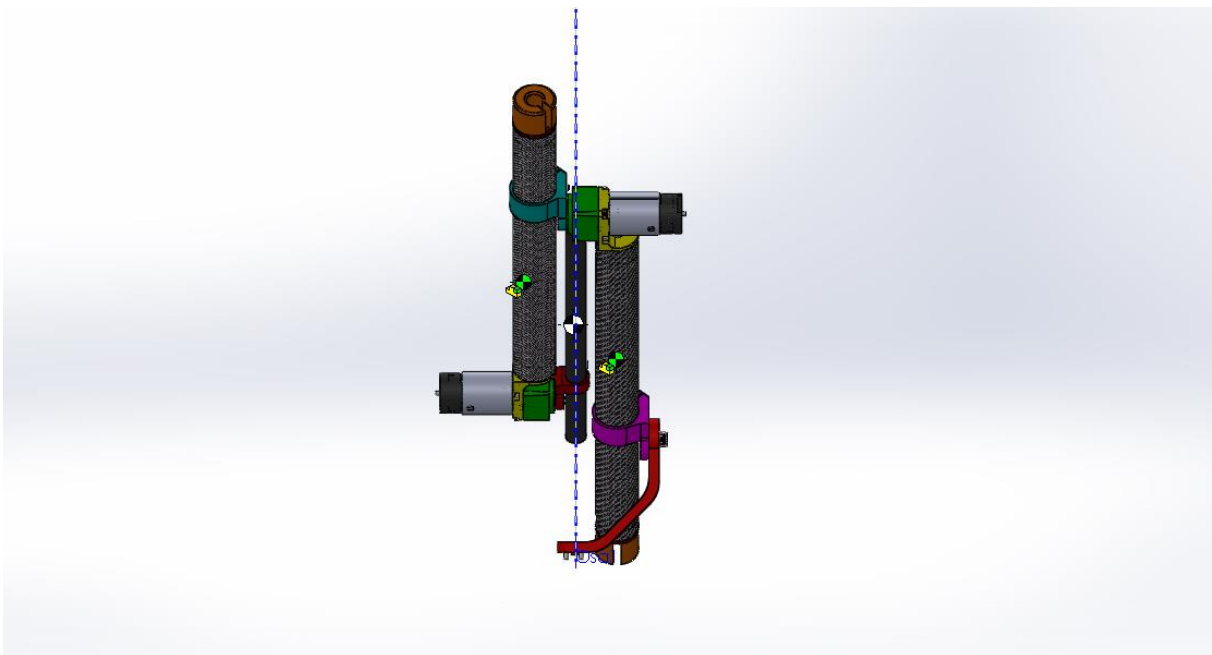


Sestava protizávaží. Závrtová vložka je z hliníkových slitin a závaží z oceli. Hmotnost závaží je cca 45g.

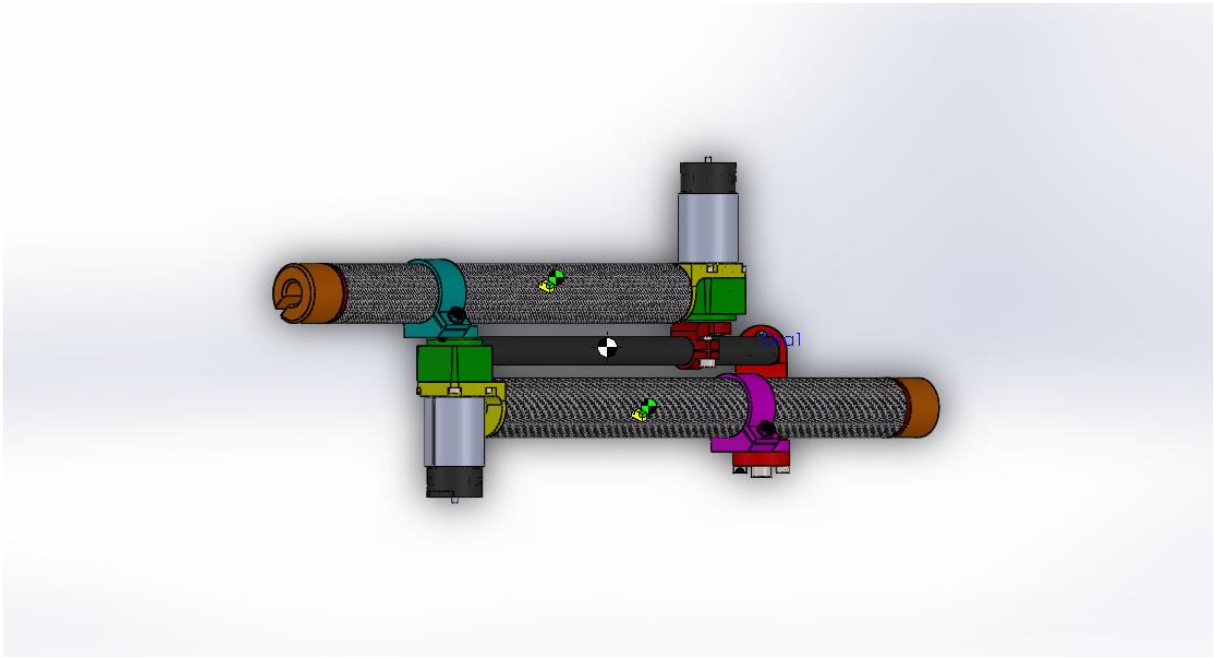


Shrnutí

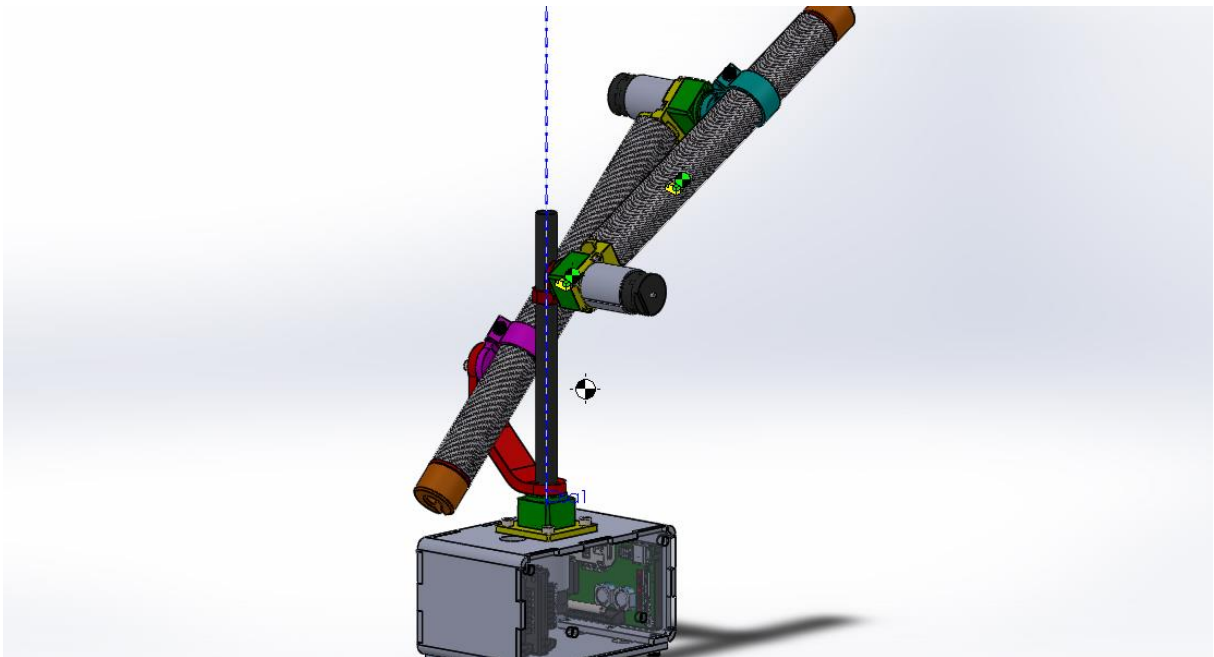
- Celková hmotnost sestavy bez lineárního pohonu a kabeláže je 600g.
- Hmotnost všech částí nad první, vertikální, převodovkou je 330g.
- Poloha těžiště nad ložiskem vertikální převodovky se pohybuje v rozsahu 110-200mm.
- Hmotnost vyráběných dílů nad první, vertikální, převodovkou je 66g bez závaží. Závaží má po 45g.
- Osa rotace vertikální osy může být totožná s osou posledního ramene
- Poloha těžiště rotující části se nachází cca 1mm od normálové roviny horizontálních os procházejících osou rotace vertikální osy.



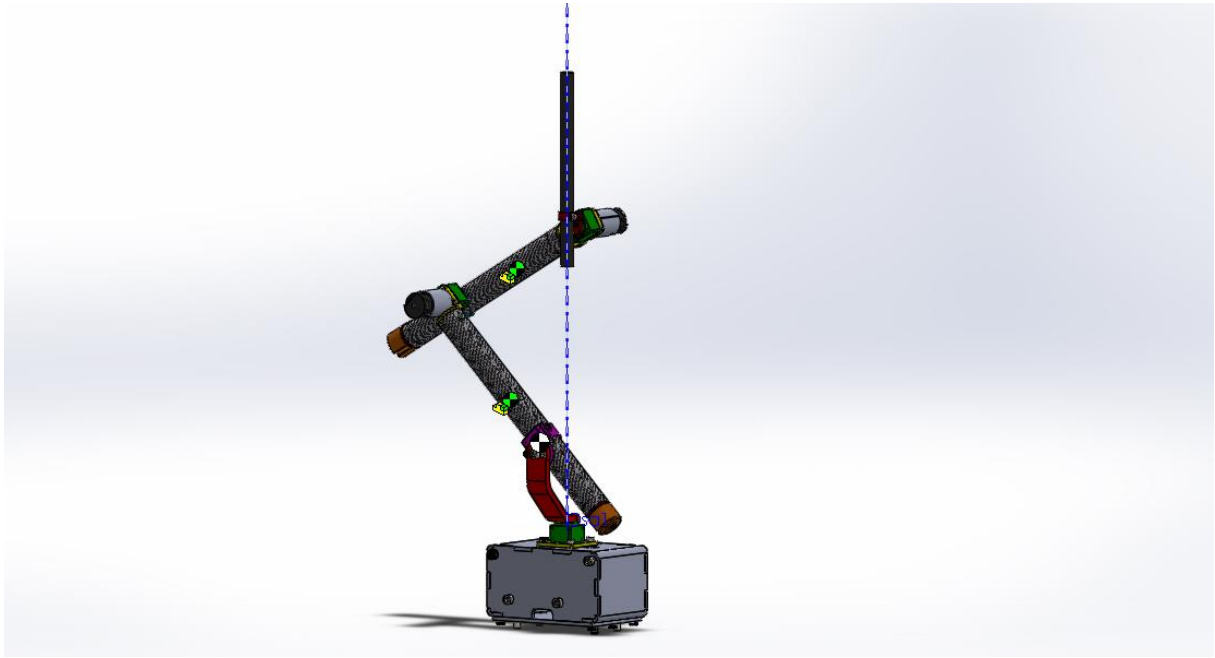
Poloha těžiště



Poloha těžiště



Souosost, první případ



Souosost, druhý případ