


Řízení pohybu robota typu SCARA jako nelineární soustavy

Bc. Karol Majcin

Diplomová práce
2019

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Karol Majcin**

Osobní číslo: **A18695**

Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**

Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Řízení pohybu robota typu SCARA jako nelineární soustavy**

Téma anglicky: **SCARA Type Robot Motion Control as a Nonlinear System**

Zásady pro vypracování:

1. Odvodte pomocí DH konvence homogenní kinematické transformační matice pro existujícího robota typu SCARA.
2. Pomocí 3D modelu vytvořeného v systému SolidWorks určete matice setrvačnosti jednotlivých členů manipulátoru tohoto robota.
3. Použitím předchozího odvodte soustavu pohybových rovnic.
4. Provedte analýzu stacionárních bodů této soustavy a vyšetřete jejich stabilitu.
5. Navrhněte zákon řízení pomocí nelineárních pohybových rovnic při uvážení jen prvních dvou kloubů jako soustavy s dvěma vstupy – dvěma výstupy.
6. Porovnejte simulačními experimenty výsledné chování při pohybu řízeném Vámi navrženým zákonem řízení a řízení pomocí autonomních servopohonů v kloubech při rychlých typových pohybech.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **ÚŘEDNÍČEK, Z.:** Robotika, Univerzita T. Bati ve Zlíně, Zlín 2012, ISBN 978 807454 223 7
2. **BRANŠTETTER, P.:** Technické prostředky pro řízení elektrických pohonů, FEI VŠB TU Ostrava 2005
3. **ŽALMAN, M.:** Akčné členy, Fakulta elektrotechniky a informatiky STU Bratislava, Bratislava 2002
4. **SKALICKÝ, J.:** Elektrické servopohony, skripta Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií, Brno
5. **SLOTINE, J.J., E, LI, W:** Applied nonlinear control, Prentice Hall, Inc., A Division of Simon Schuster, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, ISBN 0130408905
6. **CRAIG, J. J.** Introduction to Robotics, Mechanics and Control. Reading, Mas. : Addison Wessley, 1989. ISBN 0201103265
7. **BRADLEY D.A and KOL.:** Machatronics, Chapman, Hall 1991, ISBN 04412582902

Vedoucí diplomové práce:

doc. RNDr. Ing. Zdeněk Úředníček, CSc.
Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání diplomové práce:

21. prosince 2018

Termín odevzdání diplomové práce:

15. května 2019

Ve Zlíně dne 21. prosince 2018

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

Jméno, příjmení: Karol Majcin

Název diplomové práce: Řízení pohybu robota typu SCARA jako nelineární soustavy


Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 15. 05. 2019


.....
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá analýzou a riadením robota typu SCARA ako nelineárnej sústavy. Obsahuje analytické odvodenie pohybových rovníc a zostrojenie modelu reálneho robota typu SCARA v softvéri SolidWorks a následné importovanie do programu Matlab simmechanics, kde je realizované riadenie. Model prezentuje porovnanie nelineárneho riadenia založeného na výpočte zovšeobecnených síl, ktoré kompenzuje nelinearity Coriolisovej sily a dostredivej sily vzájomným pôsobením rýchlostí ramien. Toto riadenie je porovnané s autonómnym riadením s PID regulátorom v jednotlivých kľboch.

Klíčová slova: SCARA robot, Nelineárne riadenie, Dynamika robota, Riadenie založené na výpočte zovšeobecnených síl

ABSTRACT

This thesis deals with the analysis and control of a SCARA robot as a nonlinear system. It includes the analytical calculation of motion equations and the construction of a model of a real SCARA robot in SolidWorks software and importing into Matlab simmechanics where control is implemented. The model is presented with a comparison of autonomous PID control with nonlinear computed torque control, which compensates for the nonlinearities of the Coriolis force and the centripetal force caused by the interaction between arms velocities.

Keywords: SCARA robot, Nonlinear control, Robot dynamics, Computed torque control

Týmto by som sa chcel poďakovať môjmu vedúcemu diplomovej práce, ktorým bol pán doc. RNDr. Ing. Zdeňek Úředníček, CSc., za jeho odbornú pomoc, cenné rady a drahocenný čas, ktorý mi venoval pri vedení tejto práce.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 DYNAMIKA	11
1.1 KINETICKÁ ENERGIA	12
1.2 POTENCIÁLNA ENERGIA	12
1.3 LAGRANGEOVE ROVNICE II. DRUHU	12
2 RIADENIE ZALOŽENÉ NA VÝPOČTE ZOVŠEOBECNENÝCH SÍL .	14
II ANALYTICKÁ ČÁST	16
3 ODVODENIE HOMOGENÝCH KINEMATICKÝCH TRANSFORMAČNÝCH MATÍC PRE EXISTUJÚCEHO ROBOTA TYPU SCARA POMOCOU DH KONVENCIE A VÝPOČET POHYBOVÝCH ROVNÍC	18
3.1 ODVODENIE TRANSFORMAČNÝCH MATÍC A POHYBOVÝCH ROVNÍC POMOCOU ENERGIÍ	18
3.2 ANALÝZA STACIONÁRNYCH BODOV SÚSTAVY	25
3.3 VÝPOČET POHYBOVÝCH ROVNÍC POMOCOU MATÍC ZOTRVAČNOSTI ZÍSKANÝCH Z PROGRAMU SOLIDWORKS	28
III PROJEKTOVÁ ČÁST	31
4 TVORBA 3D MODELU ROBOTA TYPU SCARA V SYSTÉME SOLIDWORKS	33
5 EXPORTOVANIE MODELU ROBOTA TYPU SCARA Z PROGRAMU SOLIDWORKS DO PROGRAMU SIMSCAPE MULTIBODY(MATLAB)	38
6 NÁVRH ZÁKONA RIADENIA POMOCOU NELINEÁRNYCH POHYBOVÝCH ROVNÍC PRI UVÁŽENÍ LEN PRVÝCH DVOCH KLBOV AKO SÚSTAVU S DVOMA VSTUPMI A DVOMA VÝSTUPMI	40
6.1 NÁVRH ZÁKONA RIADENIA ZALOŽENOM NA VÝPOČTE ZOVŠEOBECNENÝCH SÍL	40
7 POROVNANIE RIADENIA ZALOŽENÉHO NA VÝPOČTE ZOVŠEOBECNENÝCH SÍL S AUTONOMNÝM RIADENÍM PID REGULÁTOROM V JEDNOTLIVÝCH KLBOCH	51
ZÁVĚR	71
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	72

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	73
SEZNAM OBRÁZKŮ	74
SEZNAM TABULEK	77

ÚVOD

V diplomovej práci sa jedná o problematiku riadenia robota typu SCARA ako nelineárnej sústavy v porovnaní s autonómnym riadením v každom kĺbe robota zvlášť.

Náplňou tejto práce je podľa reálneho robota typu SCARA zostrojiť 3D model v programe SolidWorks a popísať tohoto robota kinematickými transformačnými maticami pomocou DH konvencie a získať z nich popis dynamických pohybových rovníc. Pomocou týchto pohybových rovníc bude navrhnutý zákon riadenia, ktorý zahŕňa nelinearity systému vzniknuté vzájomnou interakciou ramien. Tento navrhnutý zákon riadenia bude následne porovnaný s autonómnym riadením, ktoré vzniknuté vzájomné nelineárne interakcie ramien berie v každom kĺbe oddelene zvlášť ako poruchy.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 Dynamika

Dynamika je část mechaniky, která se zabývá vplyvom pôsobenia síl na pohyb telies. Pri zameraní hlavne na mechanické systémy ako sú priemyselné roboty sa riadime hlavne Newtonovými pohybovými zákonmi. Hlavnou úlohou dynamickej analýzy je odvodenie pohybových rovníc, ktoré sú jednou z najdôležitejších častí pre návrh riadenia alebo simuláciu popisovaného systému.[1]

Newtonove pohybové zákony : [5]

1. Zákon zotrvačnosti

- Každé teleso zotrva v pokoji alebo v rovnomernom priamočiariom pohybe, pokiaľ nie je nútené vonkajšími silami tento stav zmeniť.

2. Zákon sily

- Sila \vec{F} pôsobiaca na teleso je úmerná súčinu jeho hmotnosti a zrýchlenia \vec{a} , ktoré mu udeľuje

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

3. Zákon akcie a reakcie

- Každá akcia vyvoláva rovnakú reakciu opačného smeru, alebo vzájomné silové pôsobenie dvoch telies je rovnako veľké a opačne orientované.

Rozdelenie dynamického problému:

1. Priamy dynamický problém

- Riešením priameho dynamického problému je výsledná trajektória pohybu (ramien robota, alebo koncového efektora) pri znalosti momentov v aktívnych kĺboch.

2. Inverzný dynamický problém

- Riešením inverzného dynamického problému sú výsledne momenty potrebné pre dosiahnutie požadovaného pohybu (ramien robota, alebo koncového efektora).

1.1 Kinetická energia

Kinetickú energiu majú všetky telesá, ktoré sa vzhľadom na danú vzťažnú sústavu pohybujú. Aby sa teleso dalo do pohybu, je nutné vykonať určitú prácu W . Práca vykonaná silou \mathbf{F} je mierou zmeny kinetickej energie :[6]

$$W = \Delta E_k.$$

Keď je na počiatku hmotný bod v kľude (teda jeho kinetická energia je nulová), je práca vykonaná silou \mathbf{F} na dráhe s rovná kinetickej energii :[6]

$$W = E_k = \frac{1}{2}mv^2 [J].$$

1.2 Potenciálna energia

Potenciálnu energiu majú telesá, ktoré sa nachádzajú v silových poliach iných telies. V gravitačnom poli Zeme sa jedná o gravitačnú potenciálnu energiu. Pre učenie veľkosti tejto energie je nutné určiť hladinu, kde je hladina s potenciálnou energiou rovná nule a to zavedením globálnej súradnicovej sústavy. Pri uvážení homogénneho gravitačného pola potom platí vzťah.[6]

$$E_p = mgh.$$

Kde m je hmotnosť hmotného bodu, g je gravitačné zrýchlenie a h je výška telesa v globálnej súradnicovej sústave. V Diplomovej práci je táto energia nulová, keďže gravitačná sila zeme nepôsobí v smere pohybu robota.

1.3 Lagrangeove rovnice II. druhu

Maticová forma pohybových rovníc sériového manipulátoru majú všeobecne tvar :

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\mathbf{q}'' + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \mathbf{q}') + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{Q}. \quad (1.1)$$

Kinetická energia robota W_k , ktorý má n článkov je súčtom kinetických energií jednotlivých článkov

$$W_k = \sum_{i=1}^n W_{k_i} = \frac{1}{2}tr \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial {}^0\mathbf{T}_i}{\partial q_j} \mathbf{i}\mathbf{I}_i \left(\frac{\partial {}^0\mathbf{T}_i}{\partial q_k} \right)^T q'_j q'_k \right].$$

Kde \mathbf{T} je transformačná matica a \mathbf{I} matica pseudo-zotrvačnosti.[1]

Potenciální energia celého robota je rovná

$$W_p = \sum_{i=1}^n W_{p_i} = - \sum_{i=1}^n m_i ({}^0\mathbf{g})^T {}^0\mathbf{T}_i {}^i\mathbf{r}_i.$$

Kde \mathbf{g} je gravitačný vektor a ${}^i\mathbf{r}_i$ je polohový vektor ťažiska článku (i). [1]

Lagrangian ma potom tvar :

$$L = W_k - W_p = \frac{1}{2} tr \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial {}^0\mathbf{T}_i}{{\partial q_j}} {}^i\mathbf{I}_i \left(\frac{\partial {}^0\mathbf{T}_i}{{\partial q_k}} \right)^T q'_j q'_k \right] + \sum_{i=1}^n m_i ({}^0\mathbf{g})^T {}^0\mathbf{T}_i {}^i\mathbf{r}_i. \quad [1]$$

Po úprave pohybových rovníc 1.1 a rozpísaní na jednotlivé riadky

$$\sum_{j=1}^n (\mathbf{D}_{ij} q''_j + \mathbf{H}_{ijk} q'_j q'_k) + \mathbf{G}_i = \mathbf{Q}_i. \quad (1.2)$$

Aplikáciou

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial q'_r} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_r} = \mathbf{Q}_r \quad r = 1, 2, \dots, n \quad (1.3)$$

Majú matice z rovnice 1.2 tvar [1]

$$\mathbf{D}_{ij} = \sum_{r=\max\{i,j\}}^n tr \left[\frac{\partial {}^0\mathbf{T}_r}{{\partial q_j}} {}^r\mathbf{I}_r \left(\frac{\partial {}^0\mathbf{T}_r}{{\partial q_i}} \right)^T \right],$$

$$\mathbf{H}_i = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n \mathbf{H}_{ikm} q'_k q'_m, \quad \mathbf{H}_{ikm} = \sum_{r=\max\{i,k,m\}}^n tr \left[\frac{\partial^2 {}^0\mathbf{T}_r}{{\partial q_k \partial q_m}} {}^r\mathbf{I}_r \left(\frac{\partial {}^0\mathbf{T}_r}{{\partial q_i}} \right)^T \right],$$

$$\mathbf{G}_i = - \sum_{r=i}^n m_r ({}^0\mathbf{g})^T \frac{\partial {}^0\mathbf{T}_r}{{\partial q_i}} {}^i\mathbf{r}_i.$$

2 Riadenie založené na výpočte zovšeobecnených síl

Pri spôsobe riadenia založenom na výpočte zovšeobecnených síl definujeme zákon riadenia tak, aby sme získali lineárne diferenciálne rovnice pre chybu riadenia a potom je možné na tieto rovnice použiť techniku návrhu lineárneho riadenia.[1]

Spôsob návrhu riadenia založeného na výpočte zovšeobecnených síl môže byť na robotov úspešne aplikovaný, ale to negarantuje robustnosť pre neurčitost' parametrov systému alebo poruchy. [1]

Dynamika robota SCARA je popísaná rovnicou

$$\mathbf{D}(\mathbf{q}) \mathbf{q}'' + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \mathbf{q}') = \mathbf{Q}$$

kde \mathbf{q} je vektor kĺbových premenných a \mathbf{Q} je vektor zovšeobecnených síl aplikovaných v kĺboch.

Predpokladáme, že požadovaná trajektória je v priestore kĺbových súradníc daná vektorom aspoň dva krát derivovateľných funkcií $\mathbf{q} = \mathbf{q}_w \in \mathbb{C}$. Teda je známy požadovaný priebeh kĺbovej polohy, rýchlosti a zrýchlenia.[1]

Pohyb robota po požadovanej trajektórii môžeme riadiť zavedením zákona riadenia

$$\mathbf{Q}(\mathbf{t}) = \mathbf{D}(\mathbf{q}) [\mathbf{q}_w'' + \mathbf{K}_D \mathbf{e}'(\mathbf{t}) + \mathbf{K}_P \mathbf{e}(\mathbf{t})] + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \mathbf{q}') \quad (2.1)$$

Kde chybový vektor je

$$\mathbf{e}(\mathbf{t}) = [\mathbf{x}_w(\mathbf{t}) - \mathbf{x}(\mathbf{t})]$$

a $\mathbf{K}_D, \mathbf{K}_P$ sú diagonálne matice konštantných zosilnení.

Zákon riadenia je stabilný a aplikovaný tak dlho, pokiaľ vlastné hodnoty matice

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{K}_P & -\mathbf{K}_D \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

majú záporne reálne časti. [1]

Dôkaz:

Požadované zovšeobecnené sily potrebné na trajektórii $\mathbf{q} = \mathbf{q}_w$ sa dá nájsť dosadením rovníc trajektórii a ich derivácií do pohybových rovníc

$$\mathbf{Q}_C = \mathbf{D}(\mathbf{q}_w) \mathbf{q}_w'' + \mathbf{H}(\mathbf{q}_w, \mathbf{q}_w')$$

Takto vypočítané sily sa nazývajú riadiace vstupy a riadenie je založené na zákone riadenia v otvorenej slučke. Riadenie v otvorenej slučke je "slepé riadenie", pretože pre určenie budenia nieje použitý aktuálny stav robota.[1]

Z týchto dôvodov, kvôli poruchám a nepresnostiam nastavení, vždy existuje rozdiel medzi požadovanou a skutočnou trajektóriou. Aby sme tento rozdiel odstánili, musíme zaviesť spätnoväzobné riadenie. Použijeme ako spätnoväzobný signál vypočítané sily podľa rovnice (2.1).[1]

Po dosadení týchto zovšeobecnených síl do pohybových rovníc.

$$\mathbf{D}(\mathbf{q}) \mathbf{q}'' + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \mathbf{q}') = \mathbf{Q}$$

Dostaneme

$$\mathbf{D}(\mathbf{q}) \mathbf{q}'' + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \mathbf{q}') = \mathbf{D}(\mathbf{q}) [\mathbf{q}_w'' + \mathbf{K}_D \mathbf{e}'(t) + \mathbf{K}_P \mathbf{e}(t)] + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \mathbf{q}')$$

po úprave

$$\mathbf{D}(\mathbf{q}) \overbrace{(\mathbf{q}_w'' - \mathbf{q}'')}^{\mathbf{e}''(t)} + \mathbf{D}(\mathbf{q}) [\mathbf{K}_D \mathbf{e}'(t) + \mathbf{K}_P \mathbf{e}(t)] = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{q}) [\mathbf{e}''(t) + \mathbf{K}_D \mathbf{e}'(t) + \mathbf{K}_P \mathbf{e}(t)] = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{e}''(t) + \mathbf{K}_D \mathbf{e}'(t) + \mathbf{K}_P \mathbf{e}(t) = \mathbf{0} \quad (2.3)$$

A to je sústava lineárnych diferenciálnych rovníc pre rozdiel medzi žiadanou a skutočnou hodnotou kľbových trajektórií. Ak predpokladáme, že \mathbf{K}_D , \mathbf{K}_P sú diagonálne matice konštantných zosilnení typu $\mathbf{n} \times \mathbf{n}$, potom môžeme prepísať rovnicu (2.3) do maticovej podoby.[1]

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{e}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{K}_P & \mathbf{K}_D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{e}' \end{pmatrix}$$

Táto sústava je asymptoticky stabilná vtedy a len vtedy, keď všetky vlastné čísla

matice (2.4) mají zápornú reálnu časť.[1]

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{K}_P & \mathbf{K}_D \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Matica \mathbf{K}_P má význam vlastných frekvencií a matica \mathbf{K}_D má význam tlmenia.[1]

$$\mathbf{K}_P = \begin{pmatrix} \omega_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_n^2 \end{pmatrix}, \mathbf{K}_D = \begin{pmatrix} 2D_1\omega_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2D_2\omega_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2D_n\omega_n^2 \end{pmatrix}$$

Pretože \mathbf{K}_P a \mathbf{K}_D sú diagonálne matice konštantných zosilnení, môžeme je nastaviť na riadenie rýchlosti pohybu robota v každom kĺbe nezávislo. Jednoduchý spôsob je nastaviť $D_i = 1, i = 1, 2, \dots, n$ a nastaviť tak chovanie každého kĺbu ako kriticky tlmenú sústavu druhého rádu s vlastnou frekvenciou ω_n . [1]

Vypočítaný zákon momentu má dve zložky

$$\mathbf{Q}(t) = \mathbf{D}(\mathbf{q}) [\mathbf{q}_w'' + \mathbf{K}_D \mathbf{e}'(t) + \mathbf{K}_P \mathbf{e}(t)] + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \mathbf{q}') = \dots$$

$$\dots = \overbrace{\mathbf{D}(\mathbf{q}) \mathbf{q}_w'' + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \mathbf{q}')}^{\mathbf{Q}_{ff}(t)} + \overbrace{\mathbf{D}(\mathbf{q}) [\mathbf{K}_D \mathbf{e}'(t) + \mathbf{K}_P \mathbf{e}(t)]}^{\mathbf{Q}_{fb}(t)}$$

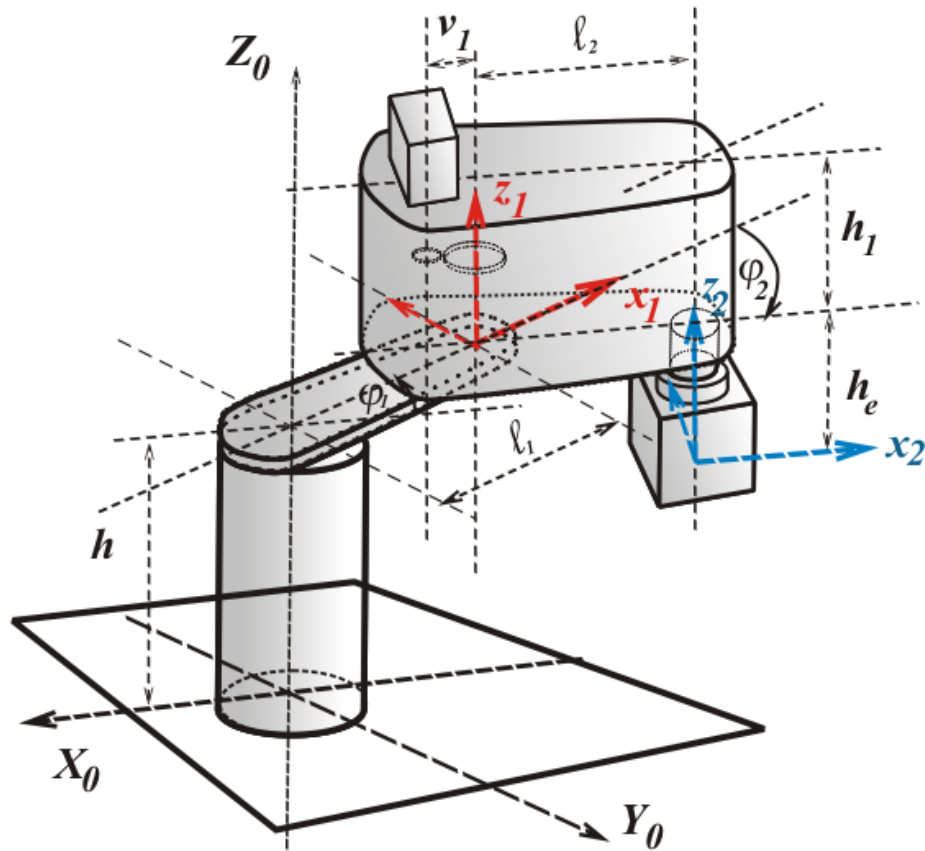
Prvá časť $\mathbf{Q}_{ff}(t)$ je riadenie s priamou väzbou (feedforward), čo sú požadované zovšeobecnené sily založené na otvorenej slučke. Ak nieje žiadna odchýlka, táto zložka $\mathbf{Q}_{ff}(t)$ pohybuje robotom po žiadanej trajektórii $\mathbf{q}_w(t)$. Druhý výraz $\mathbf{Q}_{fb}(t)$ je riadenie so spätnou väzbou (feedback), čo sú korekčné sily ktoré redukovujú chyby trajektórie.[1]

Riadenie s vypočítaním zovšeobecnených sil je taktiež nazývané **Linearizácia odchýlok** je metóda pre nelineárne riadenie robota. Pomocou nej vytvárame zákon riadenia pre elimináciu nelineárnosti a redukovujeme problém na lineárne rovnice druhého rádu chybového signálu.[1]

II. ANALYTICKÁ ČÁST

3 Odvození homogenných kinematických transformačních matic pro existujícího robota typu SCARA pomocí DH konvence a výpočet pohybových rovnic

3.1 Odvození transformačních matic a pohybových rovnic pomocí energií



Obr. 3.1 Usporiadanie kinematického reťazca

Tab. 3.1 Tabuľka DH parametrov

	a_i	α_i	d_i	Θ_i
1	l_1	0°	h	$\pi + \varphi_1$
2	l_2	0°	$-h_e$	$-\varphi_2$

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i)\sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i)\sin(\theta_i) & a_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i)\cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i)\cos(\theta_i) & a_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

po dosadení do 3.1 dostaneme,

$${}^0\mathbf{T}_1 = \begin{pmatrix} \cos(\pi + \varphi_1) & -\cos(0)\sin(\pi + \varphi_1) & \sin(0)\sin(\pi + \varphi_1) & l_1\cos(\pi + \varphi_1) \\ \sin(\pi + \varphi_1) & \cos(0)\cos(\pi + \varphi_1) & -\sin(0)\cos(\pi + \varphi_1) & l_1\sin(\pi + \varphi_1) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

po úpravě,

$${}^0\mathbf{T}_1 = \begin{pmatrix} -\cos(\varphi_1) & \sin(\varphi_1) & 0 & -l_1\cos(\varphi_1) \\ -\sin(\varphi_1) & -\cos(\varphi_1) & 0 & -l_1\sin(\varphi_1) \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.1)$$

Pre druhú transformačnú maticu potom,

$${}^1\mathbf{T}_2 = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_2) & \cos(0)\sin(\varphi_2) & -\sin(0)\sin(\varphi_2) & l_2\cos(\varphi_2) \\ -\sin(\varphi_2) & \cos(0)\cos(\varphi_2) & -\sin(0)\cos(\varphi_2) & -l_2\sin(\varphi_2) \\ 0 & 0 & \cos(0) & h_e \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \cos(\varphi_2) & \sin(\varphi_2) & 0 & l_2\cos(\varphi_2) \\ -\sin(\varphi_2) & \cos(\varphi_2) & 0 & -l_2\sin(\varphi_2) \\ 0 & 0 & 1 & h_e \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

$${}^0\mathbf{T}_2 = {}^0\mathbf{T}_1 \cdot {}^1\mathbf{T}_2 =$$

$$= \begin{pmatrix} -\cos(\varphi_1) & \sin(\varphi_1) & 0 & -l_1\cos(\varphi_1) \\ -\sin(\varphi_1) & -\cos(\varphi_1) & 0 & -l_1\sin(\varphi_1) \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\varphi_2) & \sin(\varphi_2) & 0 & l_2\cos(\varphi_2) \\ -\sin(\varphi_2) & \cos(\varphi_2) & 0 & -l_2\sin(\varphi_2) \\ 0 & 0 & 1 & h_e \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} -\cos(\varphi_2 - \varphi_1) & -\sin(\varphi_2 - \varphi_1) & 0 & -l_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) - l_1 \cos(\varphi_1) \\ \sin(\varphi_2 - \varphi_1) & -\cos(\varphi_2 - \varphi_1) & 0 & l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) - l_1 \sin(\varphi_1) \\ 0 & 0 & 1 & h - h_e \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Bod efektoru o lokálních súradniciach

$${}^B\mathbf{O}_{x_2y_2z_2} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Jeho globálne súradnice sú

$$\begin{aligned} {}^G\mathbf{O}_{x_2y_2z_2} &= {}^0\mathbf{T}_1 \cdot {}^1\mathbf{T}_2 \cdot {}^B\mathbf{O}_{x_2y_2z_2} = \\ &= \begin{pmatrix} -\cos(\varphi_2 - \varphi_1) & -\sin(\varphi_2 - \varphi_1) & 0 & -l_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) - l_1 \cos(\varphi_1) \\ \sin(\varphi_2 - \varphi_1) & -\cos(\varphi_2 - \varphi_1) & 0 & l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) - l_1 \sin(\varphi_1) \\ 0 & 0 & 1 & h - h_e \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} -l_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) - l_1 \cos(\varphi_1) \\ l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) - l_1 \sin(\varphi_1) \\ h - h_e \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Ľubovoľný bod prvého ramena s lokálnymi súradnicami

$${}^B\mathbf{X}_{x_1y_1z_1} = \begin{pmatrix} x \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

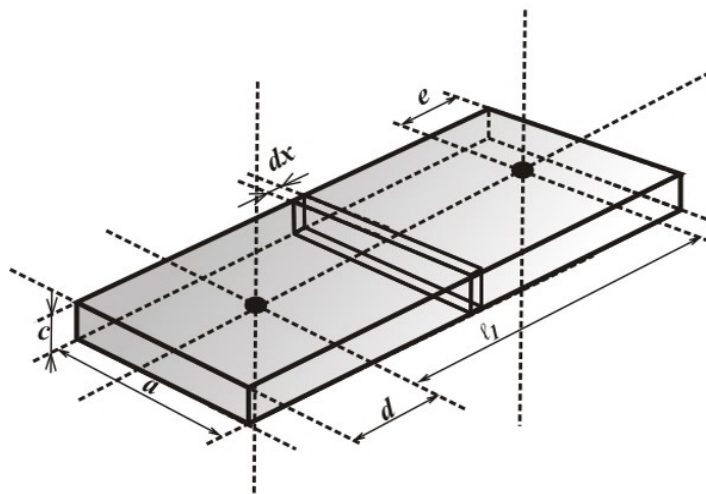
Má globálne súradnice

$${}^G\mathbf{X}_{x_1y_1z_1} = {}^0\mathbf{T}_1 \cdot {}^B\mathbf{X}_{x_1y_1z_1} =$$

$$= \begin{pmatrix} -\cos(\varphi_1) & \sin(\varphi_1) & 0 & -l_1 \cos(\varphi_1) \\ -\sin(\varphi_1) & -\cos(\varphi_1) & 0 & -l_1 \sin(\varphi_1) \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} -(l_1 + x) \cos(\varphi_1) \\ -(l_1 + x) \sin(\varphi_1) \\ h \\ 1 \end{pmatrix}$$

Prvé rameno (Obr. 3.2) v zjednodušené forme ako homogénne teleso s hmotou m_1 .



Obr. 3.2 Zjednodušené prvé homogénne rameno

Hmota hmotného elementu prvního ramena je

$$dm = \rho_1 \cdot a \cdot c \cdot dx$$

Keďže je rameno homogénne, potom pre celkovú hmotu prvního ramena m_1 platí

$$\rho_1 = \frac{m_1}{a \cdot c \cdot (l_1 + d + e)}$$

Potom pre hmotný element prvního ramena platí

$$dm = \frac{m_1}{a \cdot c \cdot (l_1 + d + e)} \cdot a \cdot c \cdot dx = \frac{m_1}{(l_1 + d + e)} \cdot dx$$

Absolútna rýchlosť tohto elementu je

$${}^G\mathbf{V}_X = \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} -(l_1 + x) \cos(\varphi_1) \\ -(l_1 + x) \sin(\varphi_1) \\ h \\ 1 \end{pmatrix} = \varphi_1' \cdot \begin{pmatrix} (l_1 + x) \sin(\varphi_1) \\ -(l_1 + x) \cos(\varphi_1) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Kvadrát jej rýchlosti

$$|{}^G\mathbf{V}_X|^2 = (l_1 + x)^2 \cdot \varphi_1'^2$$

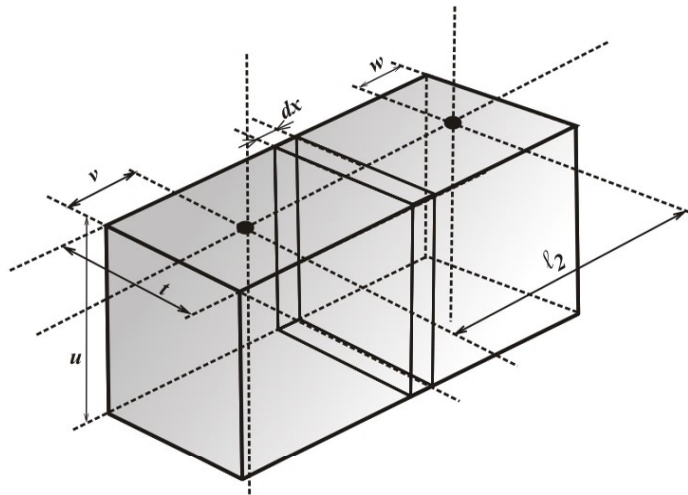
Kinetická energia tohto elementu je

$$dW_{k_1} = \frac{1}{2} \cdot |{}^G\mathbf{V}_X|^2 \cdot dm = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1}{(l_1 + d + e)} \cdot \varphi_1'^2 \cdot (l_1^2 + 2l_1x + x^2)$$

Celková kinetická energia prvního ramena je

$$\begin{aligned}
 W_{k_1} &= \int_{-(d+l_1)}^e dW_{k_1} = \int_{-(d+l_1)}^e \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1}{(l_1 + d + e)} \cdot \varphi_1'^2 \cdot (l_1^2 + 2l_1 + x + x^2) dx = \\
 &= \frac{1}{6} \cdot m_1 \cdot \varphi_1'^2 \cdot [(l_1 + e)^2 - d \cdot (l_1 + e - d)]
 \end{aligned}$$

Druhé rameno (Obr.3.3) v zjednodušené formě ako homogénne teleso s hmotou m_2 .



Obr. 3.3 Zjednodušené druhé homogénne rameno

Celková kinetická energia druhého ramena je

$$\begin{aligned}
 W_{k_2} &= \int_{-(v+l_2)}^w dW_{k_2} = \\
 &= \frac{1}{6} \cdot m_2 \cdot \left\{ \begin{aligned} &(\varphi_2' - \varphi_1')^2 \cdot [3l_2 \cdot (w - v) + (l_2 + v)^2 + w \cdot (w - l_2 - v)] + 3 \cdot \varphi_1'^2 \cdot l_2 \dots \\ &\dots - 3 \cdot l_1 \cdot (l_2 + w - v) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \varphi_1' \cdot (\varphi_2' - \varphi_1') + 6 \cdot l_2 \cdot (\varphi_2' - \varphi_1') \end{aligned} \right\}
 \end{aligned}$$

Kinetická energia pre efektor

$$W_{ke} = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot \left[l_2^2 \cdot (\varphi_2' - \varphi_1')^2 + l_2^2 \cdot \varphi_1'^2 - 2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \varphi_1' \cdot (\varphi_2' - \varphi_1') \right]$$

Celková kinetická energia

$$W_k = W_{k_1} + W_{k_2} + W_{ke}$$

Pre prvú pohybovú rovnicu

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \varphi_1'} (W_k) \right] = Q_1(t)$$

Pre druhú pohybovú rovnicu

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \varphi_2'} (W_k) \right] = Q_2(t)$$

Po nahradení všetkých konštánt konštantami C_1, C_2, C_3 dostaneme pohybové rovnice

$$\begin{aligned} & \varphi_1'' \cdot (C_1 + C_1 \cdot \cos(\varphi_2)) + \varphi_2'' \cdot \left(-C_3 - \frac{1}{2} C_2 \cdot \cos(\varphi_2) \right) + \varphi_2'^2 \cdot \frac{1}{2} C_2 \cdot \sin(\varphi_2) \dots \\ & \dots - \varphi_1' \cdot \varphi_2' \cdot C_2 \cdot \sin(\varphi_2) = Q_1(t) \end{aligned}$$

$$\varphi_1'' \cdot \left(-C_3 - \frac{1}{2} C_2 \cdot \cos(\varphi_2) \right) + \varphi_2'' \cdot C_3 + \varphi_1' \cdot \varphi_2' \cdot \frac{1}{2} C_2 \cdot \sin(\varphi_2) = Q_2(t)$$

A v maticovom tvare

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} C_1 + C_2 \cdot \cos(\varphi_2) & -C_3 - \frac{1}{2} C_2 \cdot \cos(\varphi_2) \\ -C_3 - \frac{1}{2} C_2 \cdot \cos(\varphi_2) & C_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varphi_1'' \\ \varphi_2'' \end{pmatrix} = \dots \\ & \dots \begin{pmatrix} Q_1(t) - \left(\frac{1}{2} \varphi_2'^2 - \varphi_1' \cdot \varphi_2' \right) \cdot C_2 \cdot \sin(\varphi_2) \\ Q_2(t) - \frac{1}{2} \varphi_1'^2 \cdot C_2 \cdot \sin(\varphi_2) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.2 Analýza stacionárných bodov sústavy

Zo vzťahu (3.2) označíme matice,

$$\varphi'' = \begin{pmatrix} \varphi_1'' \\ \varphi_2'' \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} C_1 + C_2 \cos(\varphi_2) & -C_3 - \frac{1}{2}C_2 \cos(\varphi_2) \\ -C_3 - \frac{1}{2}C_2 \cos(\varphi_2) & C_3 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} Q_1(t) \\ Q_2(t) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} (\frac{1}{2}\varphi_2'^2 - \varphi_1'\varphi_2') C_2 \sin(\varphi_2) \\ \frac{1}{2}\varphi_1'^2 C_2 \sin(\varphi_2) \end{pmatrix}$$

Dostaneme maticovú rovnicu v tvare

$$\mathbf{A}\varphi'' = \mathbf{Q} - \mathbf{E}$$

Po úprave

$$\varphi'' = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{Q} - \mathbf{A}^{-1}\mathbf{E}$$

$$\det(\mathbf{A}) = -C_3^2 + C_1C_3 - \frac{1}{4}C_2^2 \cos^2(\varphi_2)$$

$$\varphi'' = \frac{1}{\det(\mathbf{A})} \begin{pmatrix} Q_2 (C_3 + \frac{1}{2} (C_3 \cos(\varphi_2))) + C_3 Q_1 \dots \\ \dots - \frac{1}{2} [(C_2 \varphi_1'^2 \sin(\varphi_2)) (C_3 + \frac{1}{2} (C_2 \cos(\varphi_2)))] \dots \\ \dots + [(C_2 C_3 \varphi_2' \sin(\varphi_2)) (2\varphi_1' - \varphi_2')] \\ Q_2 (C_1 + C_2 \cos(\varphi_2)) + Q_1 (C_3 + \frac{1}{2} \cos(\varphi_2)) \dots \\ \dots - \frac{1}{2} (C_2 \varphi_1'^2 \sin(\varphi_2) (C_1 + C_2 \cos(\varphi_2))) \dots \\ \dots + \frac{1}{2} (C_2 \varphi_2' \sin(\varphi_2) (2\varphi_1' - \varphi_2') (C_3 + \frac{1}{2} C_2 \cos(\varphi_2))) \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Zavedieme substitúciu

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_1' \\ \varphi_2 \\ \varphi_2' \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \\ x'_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi'_1 \\ \varphi''_1 \\ \varphi'_2 \\ \varphi''_2 \end{pmatrix}$$

Po úpravě a dosazení do (3.3)

$$\begin{pmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \\ x'_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi'_1 \\ \varphi''_1 \\ \varphi'_2 \\ \varphi''_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{matrix} x_2 \\ \left\{ \begin{array}{l} Q_2 (C_3 + \frac{1}{2} (C_3 \cos (x_3))) + C_3 Q_1 \dots \\ \dots - \frac{1}{2} [(C_2 x_2^2 \sin (x_3)) (C_3 + \frac{1}{2} (C_2 \cos (x_3)))] \dots \\ \dots + [(C_2 C_3 x_4 \sin (x_3)) (2x_2 - x_4)] \end{array} \right\} \\ \hline \det(\mathbf{A}) \end{matrix} \\ \begin{matrix} x_4 \\ \left\{ \begin{array}{l} Q_2 (C_1 + C_2 \cos (x_3)) + Q_1 (C_3 + \frac{1}{2} \cos (x_3)) \dots \\ \dots - \frac{1}{2} (C_2 x_2^2 \sin (x_3) (C_1 + C_2 \cos (x_3))) \dots \\ \dots + \frac{1}{2} (C_2 x_4 \sin (x_3) (2x_2 - x_4) (C_3 + \frac{1}{2} C_2 \cos (x_3))) \end{array} \right\} \\ \hline \det(\mathbf{A}) \end{matrix} \end{matrix} \right) \quad (3.4)$$

Touto úpravou sme previedli dve rovnice druhého rádu na štyri rovnice prvého rádu a získali tak stavový popis (3.4)

Stacionárne body systému sú

$$\begin{pmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \\ x'_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ \left\{ \begin{array}{l} Q_2 (C_3 + \frac{1}{2} (C_3 \cos (x_3))) + C_3 Q_1 \dots \\ \dots - \frac{1}{2} [(C_2 x_2^2 \sin (x_3)) (C_3 + \frac{1}{2} (C_2 \cos (x_3)))] \dots \\ \dots + [(C_2 C_3 x_4 \sin (x_3)) (2x_2 - x_4)] \end{array} \right\} \\ \det(\mathbf{A}) \\ x_4 \\ \left\{ \begin{array}{l} Q_2 (C_1 + C_2 \cos (x_3)) + Q_1 (C_3 + \frac{1}{2} \cos (x_3)) \dots \\ \dots - \frac{1}{2} (C_2 x_2^2 \sin (x_3) (C_1 + C_2 \cos (x_3))) \dots \\ \dots + \frac{1}{2} (C_2 x_4 \sin (x_3) (2x_2 - x_4) (C_3 + \frac{1}{2} C_2 \cos (x_3))) \end{array} \right\} \\ \det(\mathbf{A}) \end{pmatrix}$$

$$x_2 = 0$$

$$\begin{aligned} & Q_2 (C_3 + \frac{1}{2} (C_3 \cos (x_3))) + C_3 Q_1 \dots \\ & \dots - \frac{1}{2} [(C_2 x_2^2 \sin (x_3)) (C_3 + \frac{1}{2} (C_2 \cos (x_3)))] \dots \\ & \dots + [(C_2 C_3 x_4 \sin (x_3)) (2x_2 - x_4)] = 0 \end{aligned}$$

$$x_4 = 0$$

$$\begin{aligned} & Q_2 (C_1 + C_2 \cos (x_3)) + Q_1 (C_3 + \frac{1}{2} \cos (x_3)) \dots \\ & \dots - \frac{1}{2} (C_2 x_2^2 \sin (x_3) (C_1 + C_2 \cos (x_3))) \dots \\ & \dots + \frac{1}{2} (C_2 x_4 \sin (x_3) (2x_2 - x_4) (C_3 + \frac{1}{2} C_2 \cos (x_3))) = 0 \end{aligned}$$

Ak $Q_1, Q_2 = 0$, potom pre ľubovoľné $x_1, x_3 (\varphi_1, \varphi_2) \in \mathbb{R}$ sa systém nachádza v stabilnom stacionárnom stave.

3.3 Výpočet pohybových rovnic pomocou matíc zotrvačnosti získaných z programu SolidWorks

Pohybové rovnice v tvare

$$\mathbf{D}(\mathbf{q}) \mathbf{q}'' + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \mathbf{q}') + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{Q} \quad (3.5)$$

sa dajú odvodiť a algoritmizovať pre popis robota typu SCARA pomocou Lagrangeových rovníc II. druhu.[1]

Matica $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ je v prípade robota typu SCARA nulová keďže vektor gravitačného zrýchlenia nepôsobí v smere pohybu robota.

$$\sum_{j=1}^n (\mathbf{D}_{ij} \mathbf{q}_j'' + \mathbf{H}_{ijk} \mathbf{q}_j' \mathbf{q}_k') = \mathbf{Q}_i \quad (3.6)$$

Matice majú potom tvar

$$\mathbf{D}_{ij} = \sum_{r=\max\{i,j\}}^n \text{tr} \left[\frac{\partial {}^0\mathbf{T}_r}{\partial \mathbf{q}_j} {}^r\bar{\mathbf{I}}_r \left(\frac{\partial {}^0\mathbf{T}_r}{\partial \mathbf{q}_i} \right)^T \right] \quad (3.7)$$

$$\mathbf{H}_i = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n \mathbf{H}_{ikm} \mathbf{q}_k' \mathbf{q}_m' \quad (3.8)$$

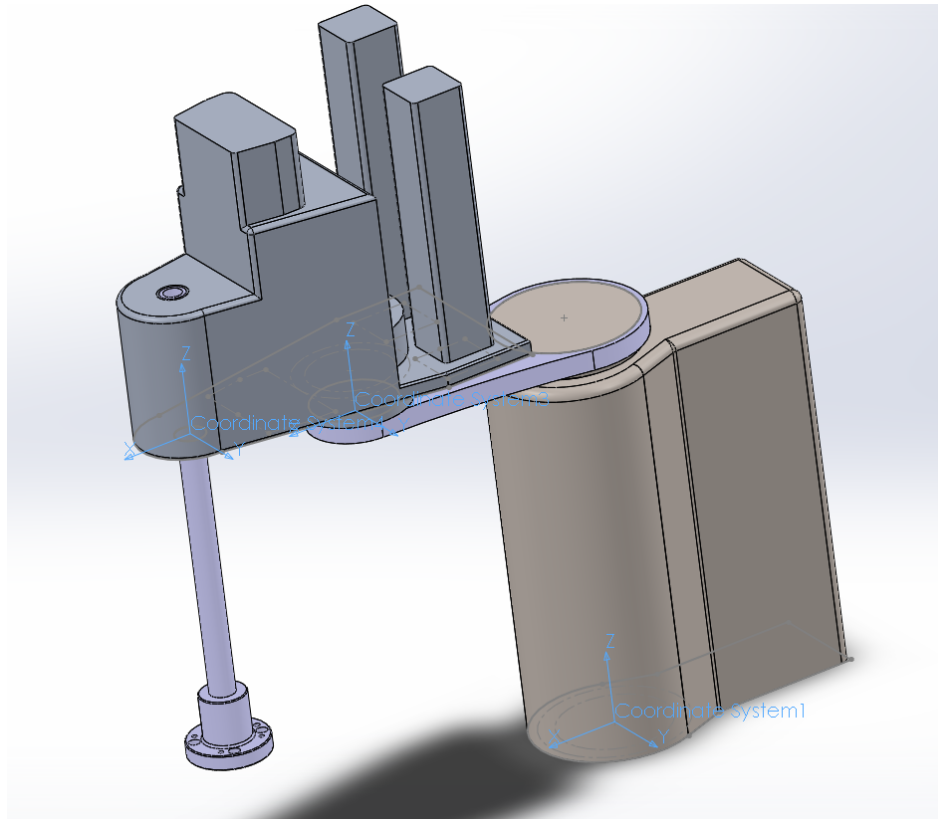
$$\mathbf{H}_{ikm} = \sum_{r=\max\{i,j,m\}}^n \text{tr} \left[\frac{\partial^2 {}^0\mathbf{T}_r}{\partial \mathbf{q}_k \partial \mathbf{q}_m} {}^r\bar{\mathbf{I}}_r \left(\frac{\partial {}^0\mathbf{T}_r}{\partial \mathbf{q}_i} \right)^T \right]$$

Matice \mathbf{T} sú transformačné matice odvodené podľa DH konvencie a $\bar{\mathbf{I}}$ sú matice pseudo-zotrvačnosti, ktoré je možné vytvoriť pomocou matíc zotrvačnosti získaných napr. z modelu v programe SolidWorks. [1]

Transformačné matice sú odvodené podľa DH konvencie (3.1) a matice zotrvačnosti \mathbf{I} , vektory ťažísk \mathbf{v} boli získané z modelu v programe SolidWorks (Obr.3.4).

$$\mathbf{I}_1 = \begin{pmatrix} 0.00414799 & 0 & -0.00000015 \\ 0 & 0.04766826 & 0.00000000 \\ -0.00000015 & 0 & 0.05164075 \end{pmatrix}, \mathbf{v}_1 = \begin{pmatrix} -0.11363778 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{I}_2 = \begin{pmatrix} 0.57526167 & 0.00278813 & -0.35916207 \\ 0.00278813 & 1.14383180 & -0.00318877 \\ -0.35916207 & -0.00318877 & 0.65661587 \end{pmatrix}, \mathbf{v}_2 = \begin{pmatrix} -0.12631455 \\ -0.00042673 \\ 0.08796779 \end{pmatrix}$$

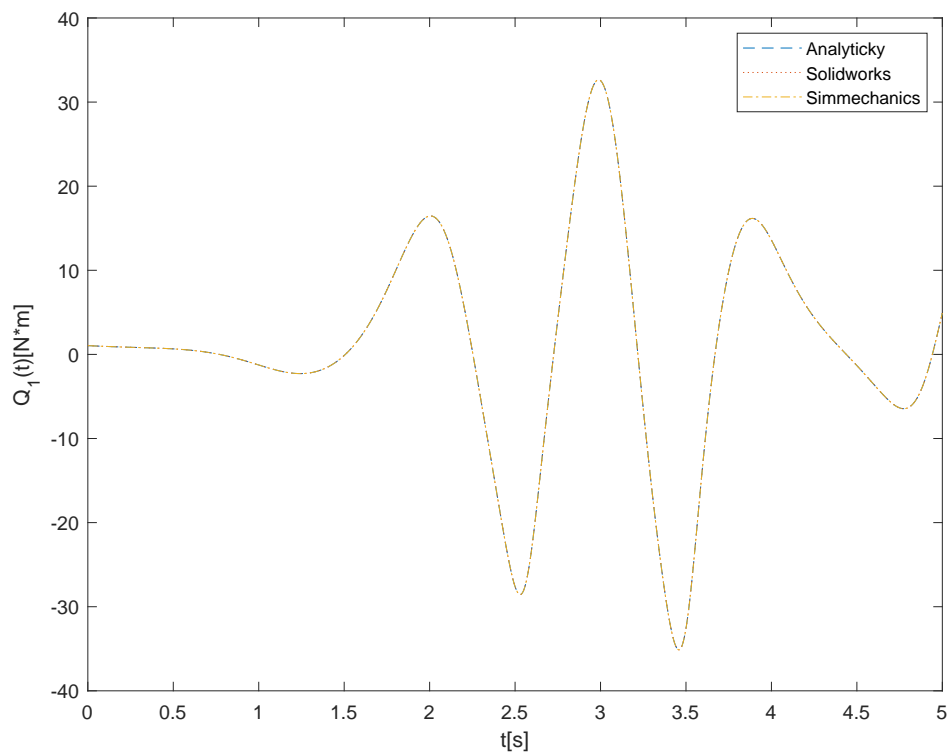


Obr. 3.4 Sústavný systém robota typu SCARA v programe SolidWorks

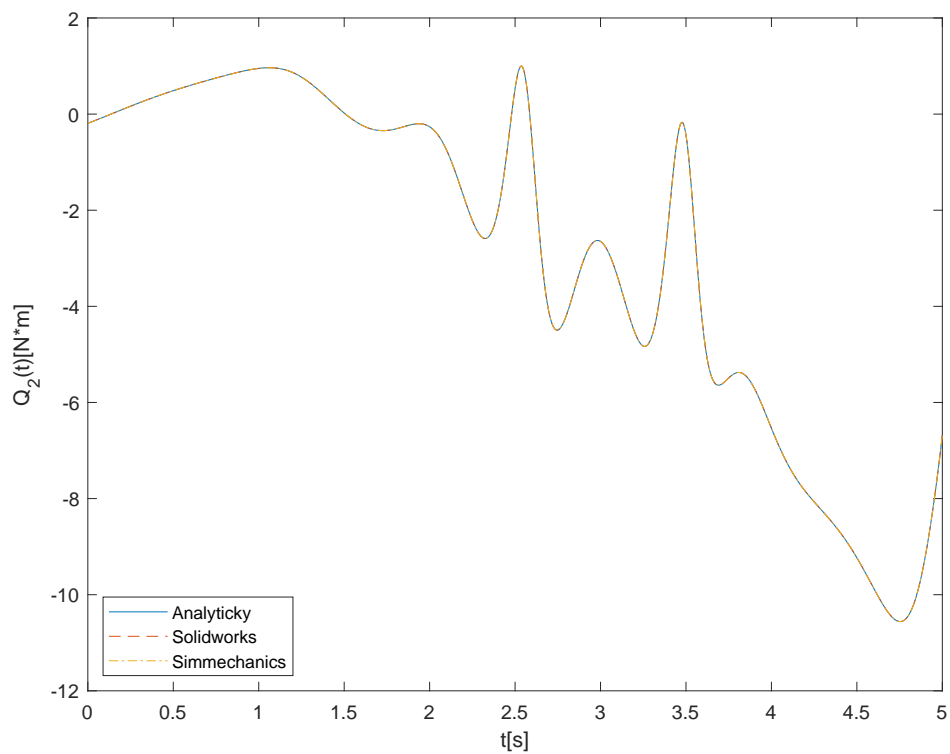
Algoritmizáciou vzťahov (3.6), (3.7), (3.8) v prostredí Matlab získame pohybové rovnice, ktoré majú tvar

$$\mathbf{Q}_1 = C_1 \varphi_1'' + C_2 \cos(\varphi_2) \varphi_1'' - C_3 \varphi_2'' - \frac{C_2}{2} \cos(\varphi_2) \varphi_2'' + \left(\frac{1}{2} \varphi_2'^2 + \varphi_1' \varphi_2' \right) C_2 \sin(\varphi_2) \quad (3.9)$$

$$\mathbf{Q}_2 = -C_3 \varphi_1'' - \frac{1}{2} C_2 \cos(\varphi_2) \varphi_1'' + C_3 \varphi_2'' + \frac{C_2}{2} \varphi_1'^2 \sin(\varphi_2) \quad (3.10)$$



Obr. 3.5 Porovnanie momentu prvého ramena z analyticky odvodených pohybových rovníc, výpočtu pohybových rovníc pomocou matíc zotrvačnosti z programu SolidWorks, simulácia modelu Matlab simmechanics



Obr. 3.6 Porovnanie momentu druhého ramena z analyticky odvodených pohybových rovníc, výpočtu pohybových rovníc pomocou matíc zotrvačnosti z programu SolidWorks, simulácia modelu Matlab simmechanics

Na obrázku (Obr.3.5),(Obr.3.6) sú znázornené momenty vypočítané z pohybu modelu robota v prostredí Matlab simmechanics.

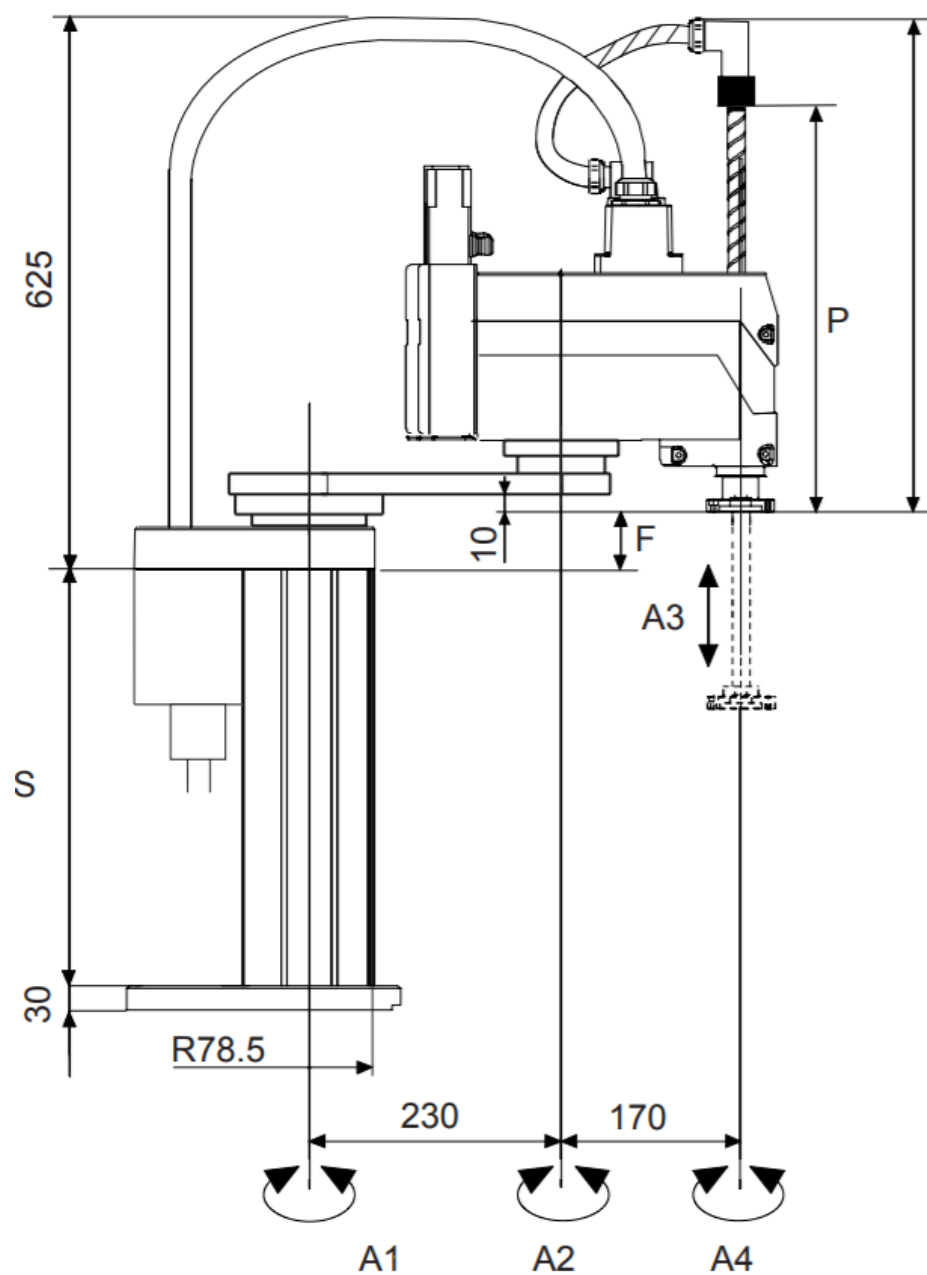
III. PROJEKTOVÁ ČÁST

4 Tvorba 3D modelu robota typu SCARA v systéme SolidWorks

Pre vytvorenie modelu v programe SolidWorks bol použitý reálny robot typu SCARA od firmy Stäubli, ktorého základné parametre sú na obrázku (Obr.4.1),(Obr.4.2). Na obrázkoch (Obr.4.3),(Obr.4.4) je znázornené porovnanie vytvoreného modelu s reálnym robotom.

Délka podstavce	S	Standardní : 300 mm Na výběr : 250, 350, 400, 500, 600 a 700 mm
Pohyb osy 3 (mm)	H	200
Průměr ložisko (mm)		20
Délka ložiska (mm)	P	471
Výška (mm)	F	74
Délka ložiska (mm)	P	555
Výška (mm)	F	35
Výška instalace uživatele (mm)	I	550
Zahrazení instalace uživatele (mm)	B	150
Výška instalace uživatele (mm)	I	589

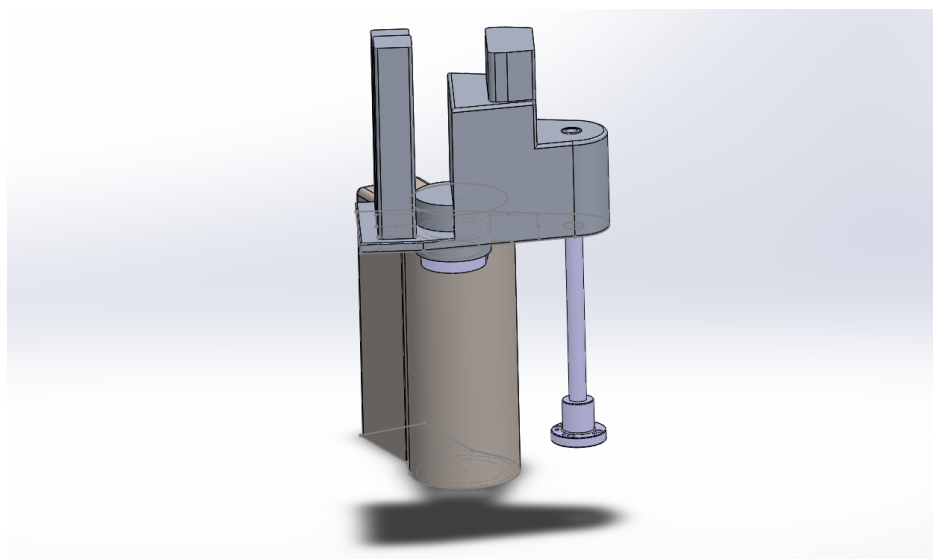
Obr. 4.1 Tabuľka základných parametrov robota SCARA Stäubli RS-40



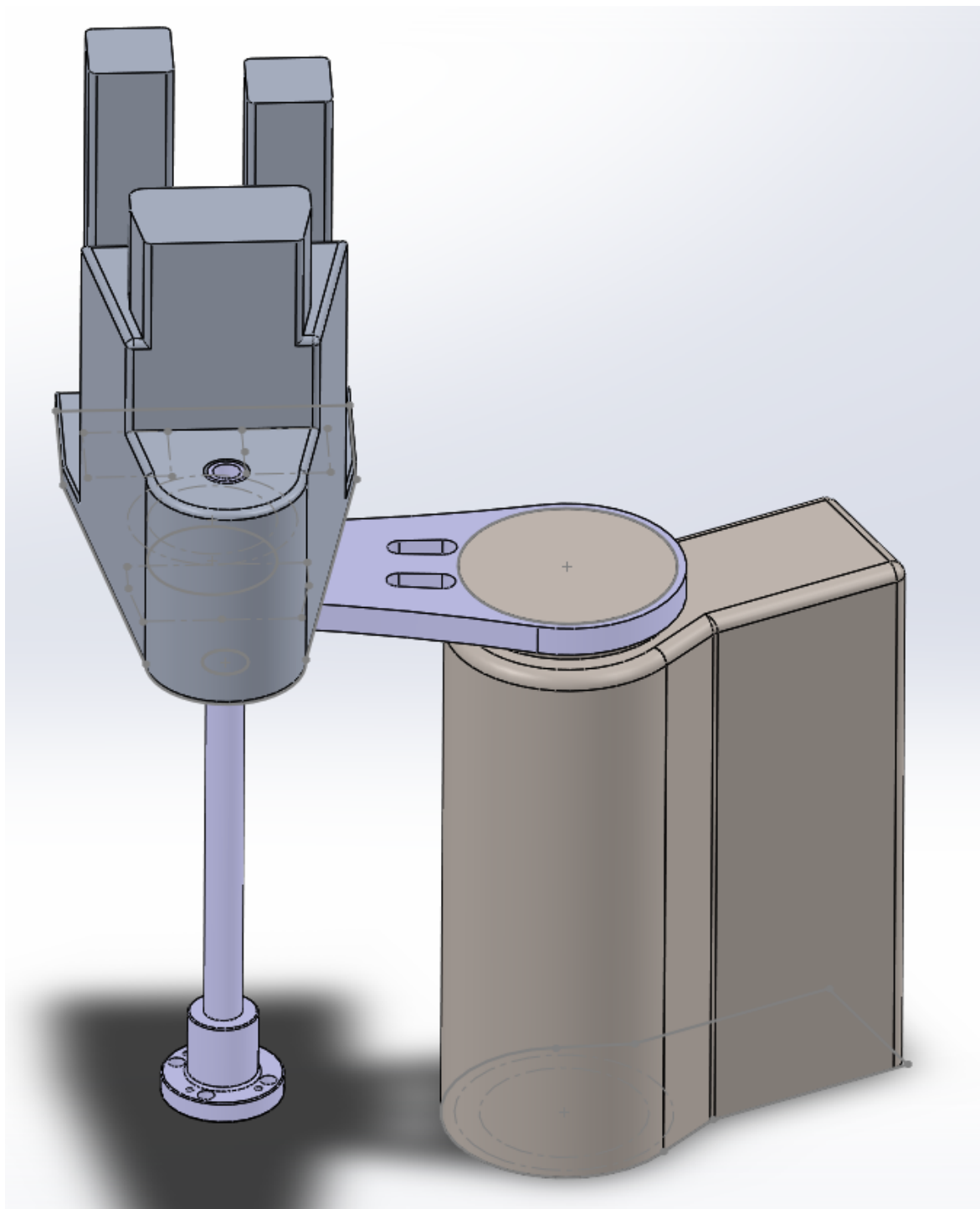
Obr. 4.2 Schéma základných parametrov robota SCARA Stäubli RS-40



Obr. 4.3 Reálný model robota typu SCARA



Obr. 4.4 Model robota typu SCARA SolidWorks



Obr. 4.5 Model robota typu SCARA SolidWorks



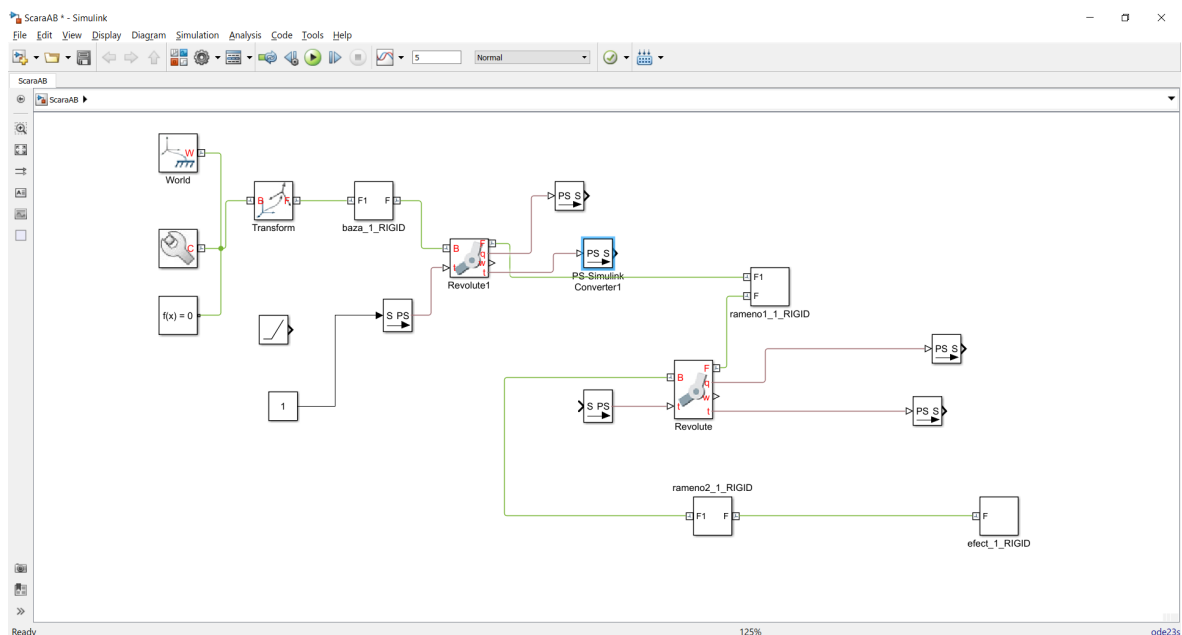
Obr. 4.6 Reálný model robota typu SCARA

5 Exportovanie modelu robota typu SCARA z programu SolidWorks do programu Simscape Multibody(Matlab)

Pre simuláciu zákona riadenia bol použitý program Simscape Multibody(Matlab), ktorý umožní simulovať prechodové dynamické deje modelu robota z programu SolidWorks. Po exportovaní modelu je dostupný systém, ktorý odpovedá odvodeným rovniciam.

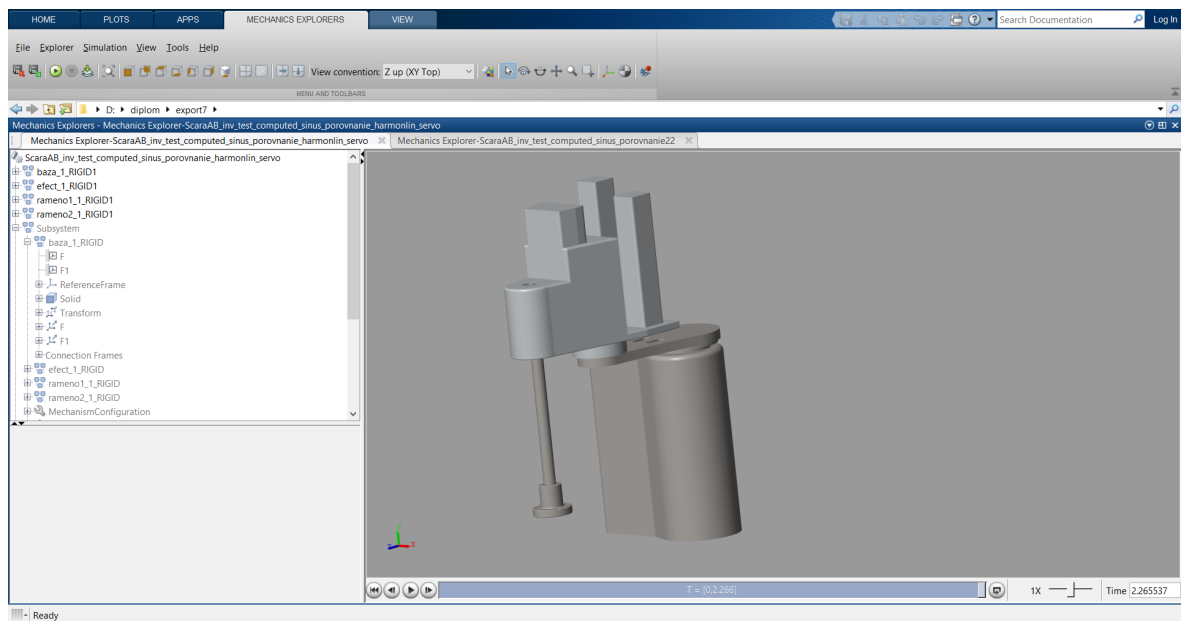
Jedná sa o systém s dvoma vstupmi a dvomi výstupmi, kde prvý vstup je riadiaci moment v kľbe prvého ramena a druhý vstup je riadiaci moment v kľbe druhého ramena na výstupe je k dispozícii meranie polohy(uhol φ_1, φ_2 jednotlivých ramien aj ich rýchlosť, zrýchlenie a moment.

Blokové schéma tohto vyexportovaného modelu je znázornené v prostredí simulink(Matlab) na (Obr.5.1), kde bloky Simscape Multibody(Matlab) sú prepojené cez konvertor ktorý mení fyzikálny signál na simulinkový signál bez jednotiek a naopak.



Obr. 5.1 Blokové schéma vyexportovaného robota typu SCARA zo SolidWorksu do prostredia simulink(Matlab)

Zobrazenie tohoto modelu a jeho pohybu v 3D animácií je možné sledovať za pomoci Mechanics Explorer(Matlab)



Obr. 5.2 Zobrazenie prostredia Mechanics Explorer(Matlab) pre animáciu pohybu modelu

6 Návrh zákona riadenia pomocou nelineárnych pohybových rovníc pri uvážení len prvých dvoch kĺbov ako sústavu s dvoma vstupmi a dvoma výstupmi

6.1 Návrh zákona riadenia založenom na výpočte zovšeobecnených síl

Návrh riadenia založený na výpočte zovšeobecnených síl bol navrhnutý, tak aby zahŕňal kompenzáciu nelineárnosti oboch ramien. To však neznamená, že garantuje robustnosť pre neurčitost' parametrov systému alebo poruchy. Návrh riadenia je rozdelený na riadenie s priamou väzbou $\mathbf{Q}_{ff}(\mathbf{t})$ (feedforward) do ktorej vstupuje žiadaná hodnota a pomocou nej sa dopočítajú potrebné akčné zásahy v tomto prípade to sú momenty.

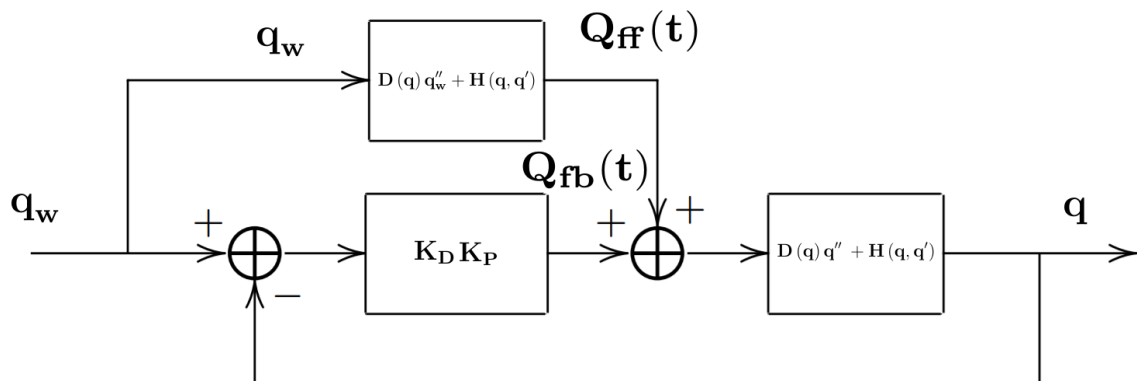
Táto priama väzba je v otvorenej slučke (slepé riadenie) a preto treba dávať pozor na akčný zásah, keďže táto väzba posiela stále dopredu akčný zásah bez ohľadu na stav systému. Taktiež je dôležité aj to, že žiadaná hodnota trajektórií musí byť aspoň dva krát derivovateľná.

Pri žiadanej hodnote napríklad jednotkového skoku je pomocou bloku pre vypočítanie zovšeobecnených síl vygenerovaný takmer nekonečný impulz po dobu takmer nekonečne krátkeho času, prakticky Diracov impulz. Takýto impulz je samozrejme nežiadúci v riadení je možné ho odfiltrovať, ale potom táto časť riadenia nielenže neeliminuje nelineárnosti systému, ale prakticky je zbytočná, keďže ďalšia zmena na vstupe nieje. Taktiež sú nevhodné iné funkcie, ktoré sa menia v čase skokom. Preto som volil ako vstup "hladké" funkcie.

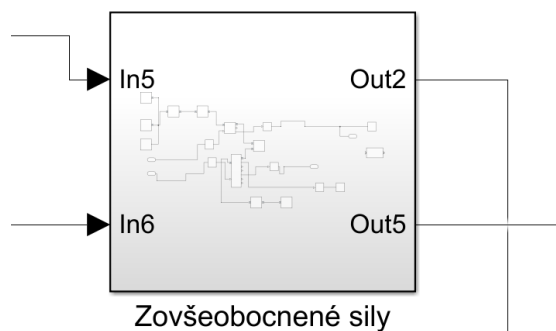
Ďalšia časť riadenia je riadenie so spätnou väzbou $\mathbf{Q}_{fb}(\mathbf{t})$, ktorá slúži nato aby zabezpečila korekciu prípadnej chyby trajektórie. Táto odchýlka je lineárna a je na ňu možné aplikovať lineárne metódy návrhu zákona riadenia.[1]

Ako akčný člen v jednotlivých kĺboch bolo predpokladané, že dokáže poskytnúť obmedzený žiadaný moment v takom časovom rozmedzí, aby bolo možné túto dynamiku vzhľadom na dynamiku telies zanedbať.

$$\mathbf{Q} = \mathbf{D}(\mathbf{q}) \mathbf{q}'' + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \mathbf{q}') + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \quad (6.1)$$



Obr. 6.1 Bloková schéma riadenia založeného na výpočte zovšeobecnených síl

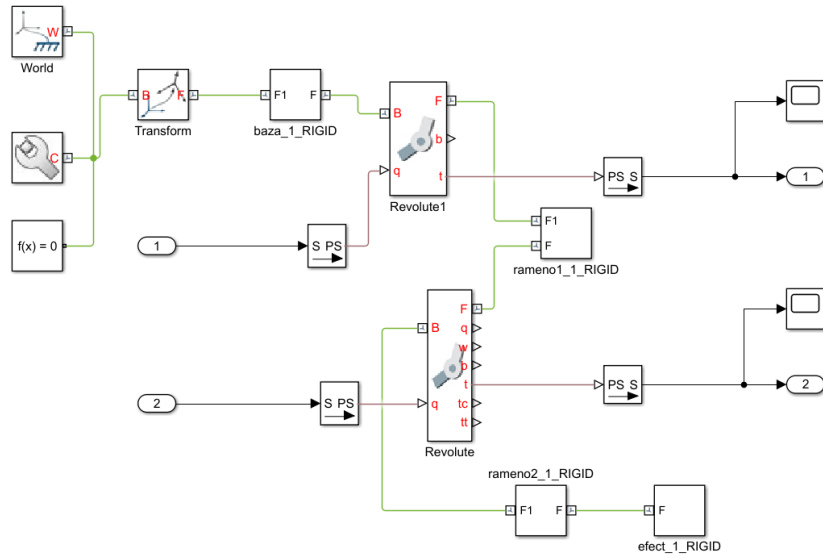


Obr. 6.2 Blok výpočtu zovšeobecnených síl

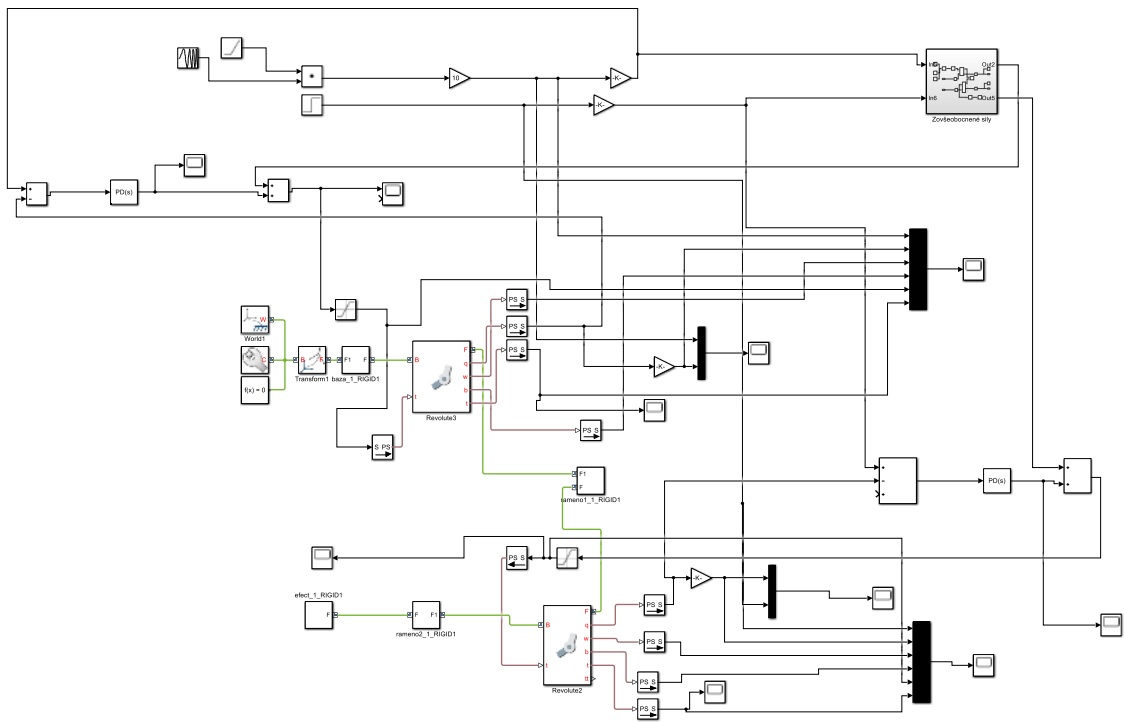
$$\mathbf{Q} = \mathbf{D}(\mathbf{q}) [\mathbf{q}_w'' + \mathbf{K}_D \mathbf{e}'(t) + \mathbf{K}_P \mathbf{e}(t)] + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \mathbf{q}') + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \quad (6.2)$$

$$= \underbrace{\mathbf{D}(\mathbf{q}) \mathbf{q}_w'' + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \mathbf{q}') + \mathbf{G}(\mathbf{q})}_{\mathbf{Q}_{ff}(t)} + \underbrace{\mathbf{D}(\mathbf{q}) [\mathbf{K}_D \mathbf{e}'(t) + \mathbf{K}_P \mathbf{e}(t)]}_{\mathbf{Q}_{fb}(t)} \quad (6.3)$$

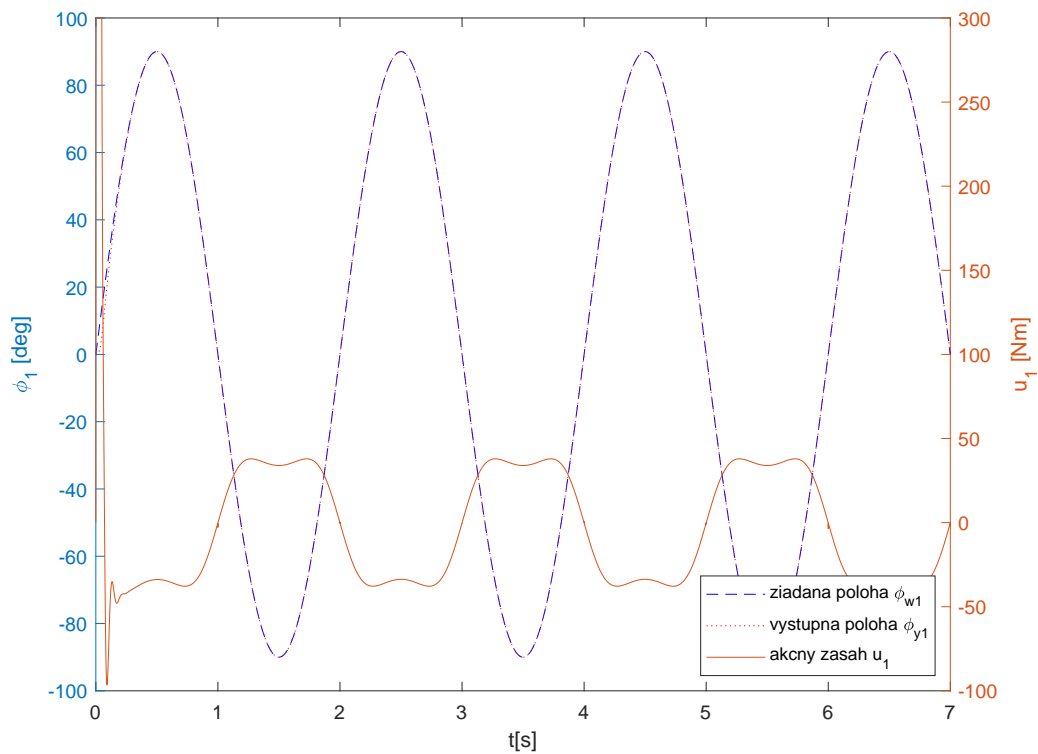
Pre návrh riadenia $\mathbf{Q}_{ff}(t)$ s priamou väzbou bol vytvorený blok (6.2), ktorý ma rovnaké vlastnosti ako vytvorený model (6.3). Akurát na vstup tohto modelu je privedený žiadaný signál, teda trajektória uhlu (φ_1, φ_2) . Výstupom z tohto bloku, sú momenty pre tento konkrétny žiadaný pohyb. Tento blok je možné použiť realtime, ale aj dopredu vypočítať potrebné momenty na určitý pohyb. Realizácia regulácie je na (Obr.6.4), obrázok je vo formáte PDF a je možné priblížiť jeho obsah bez veľkej straty rozlíšenia. Toto blokové schéma zodpovedá navrhovanej blokovej schéme (Obr.6.1).



Obr. 6.3 Vnútorná časť bloku výpočtu zovšeobecnených síl



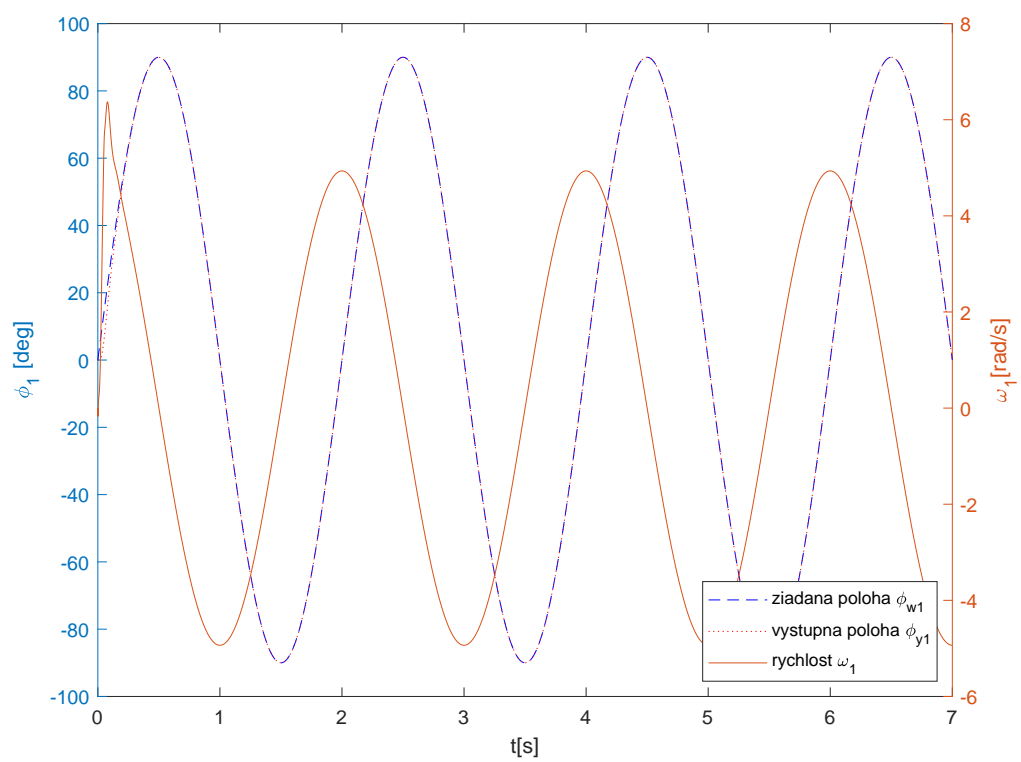
Obr. 6.4 Realizácia riadenia založeného na výpočte zovšeobecnených síl v Matlabe



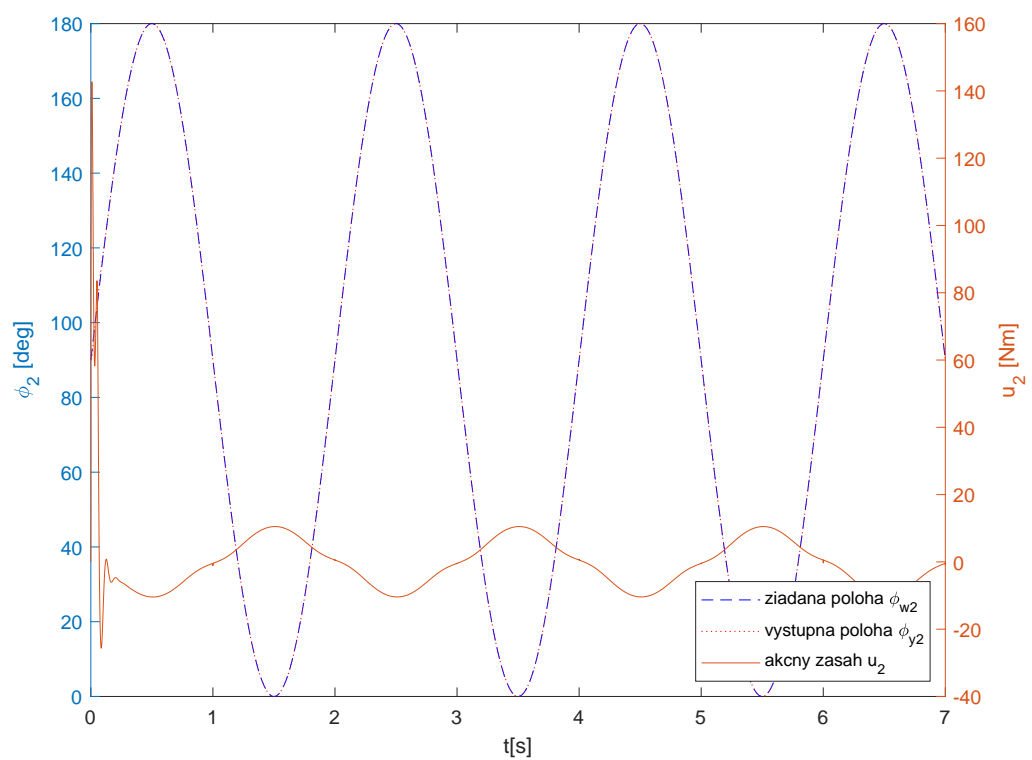
Obr. 6.5 Žiadaná hodnota polohy a výstupná hodnota polohy, akčný zásah (moment $Q_{1ff}(t) + Q_{1fb}(t)$) pre prvé rameno

Na Grafe (6.5) je regulačný pochod prvého ramena ako odozva na vstupný signál, kde žiadaná hodnota (poloha ramena) $\phi_{w1,w2}$ bola zvolená sinusoida s amplitúdou 90 [deg] stupňov a frekvenciou π [Hz] pre oba ramená.

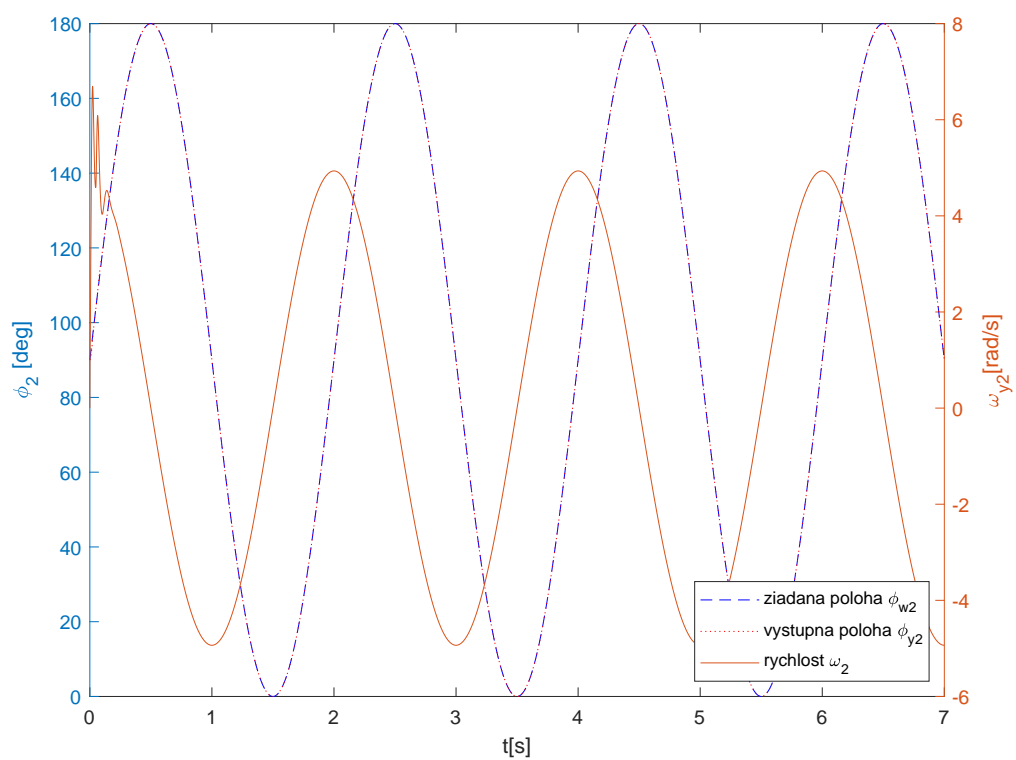
Na začiatku regulačného pochodu je možné vidieť silný akčný zásah, ktorý trvá krátku dobu a je saturovaný a to z dôvodu privedenia vstupného signálu skokom. Tento akčný zásah bol vypočítaný z feed forward ($Q_{1ff}(t)$) väzby a to preto, že nábeh na tento signál mal bod nespojivosti. Tento problém však kompenzuje spätná väzba ($Q_{1fb}(t)$) a regulačný pochod je stabilný s nulovou regulačnou odchýlkou po nábehu na vstupný signál. Rýchlosť prvého ramena je zobrazená na grafe (6.6) a pre druhé rameno moment (6.7) a rýchlosť (6.8).



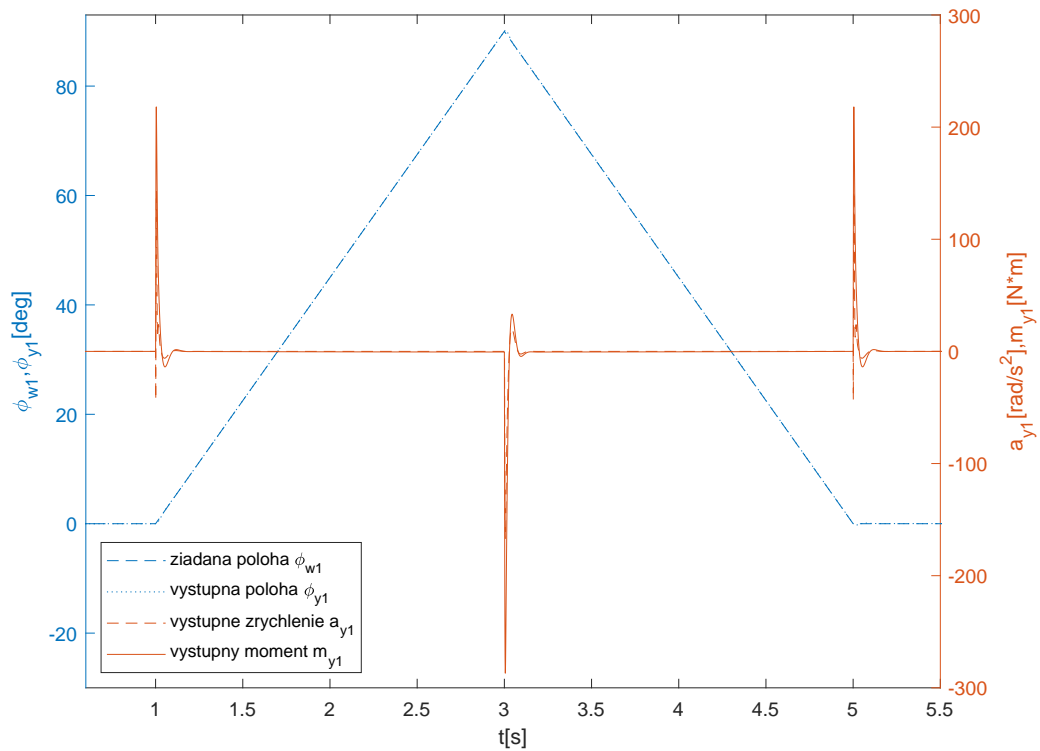
Obr. 6.6 Žiadaná hodnota polohy a výstupná hodnota polohy, rychlost pre prvé rameno



Obr. 6.7 Žiadaná hodnota polohy a výstupná hodnota polohy, akčný zásah (moment $Q_{2ff}(t) + Q_{2fb}(t)$) pre druhé rameno



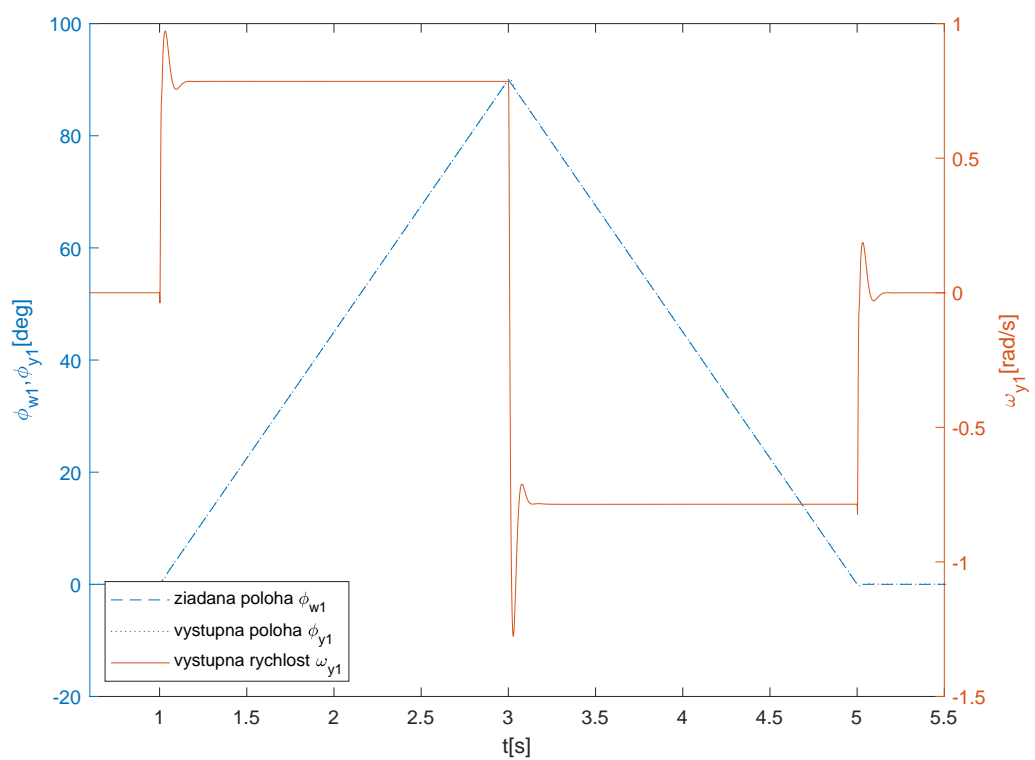
Obr. 6.8 Žiadaná hodnota polohy a výstupná hodnota polohy, rýchlosť pre druhé rameno



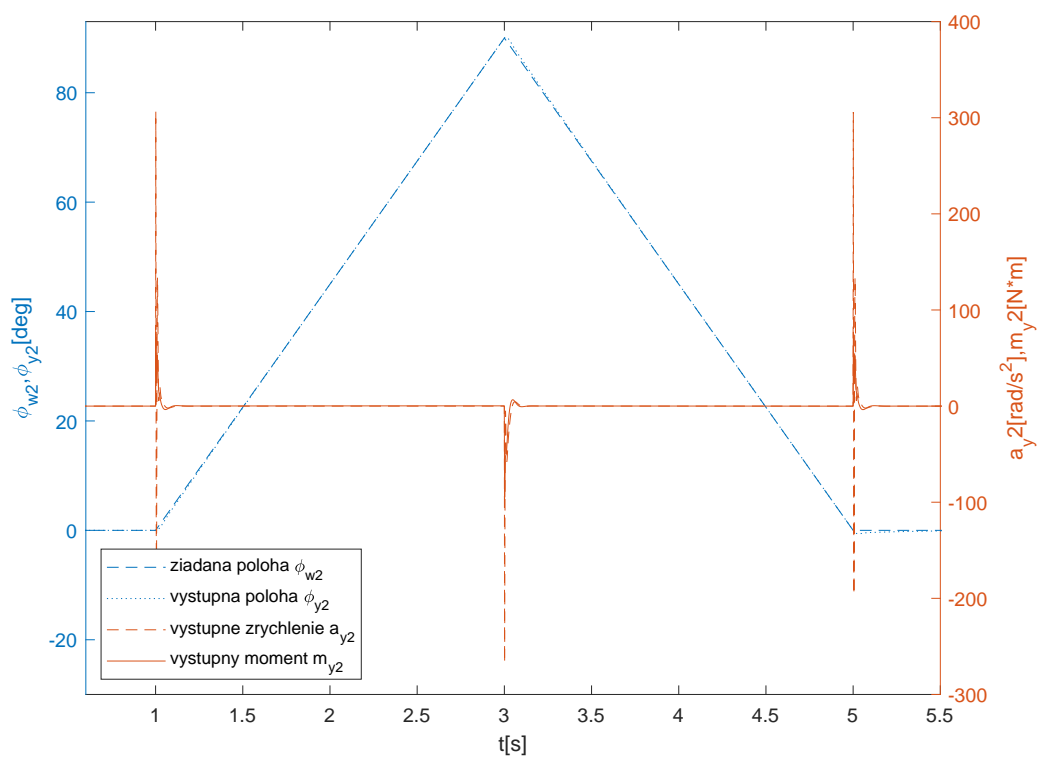
Obr. 6.9 Žiadaná hodnota polohy a výstupná hodnota polohy, momentu a zrýchlenia pre prvé rameno

Na Grafe (6.9) je regulačný pochod prvého ramena ako odozva na vstupný signál, kde žiadaná hodnota (poloha ramena) bola zvolená lineárna rampa tak, aby rameno dosiahlo z polohy 0 [deg] stupňov polohu 90 [deg] stupňov za 2 sekundy s konštantnou rýchlosťou a naspäť do 0 [deg] stupňov. Vstupný signál nespĺňa podmienky pre feed forward ($Q_{1ff}(t)$) obsahuje body nespojistoti v čase 1s, 3s, 5s, ale spätná väzba ($Q_{1fb}(t)$) zabezpečila stabilitu regulačného obvodu. Pri voľbe takéhoto vstupného signálu je feed forward ($Q_{1ff}(t)$) väzba neúčinná a okrem krátkych impulzov negeneruje žiadny akčný zásah. Preto je dôležité správne voliť vstupný signál pri tomto type riadenia.

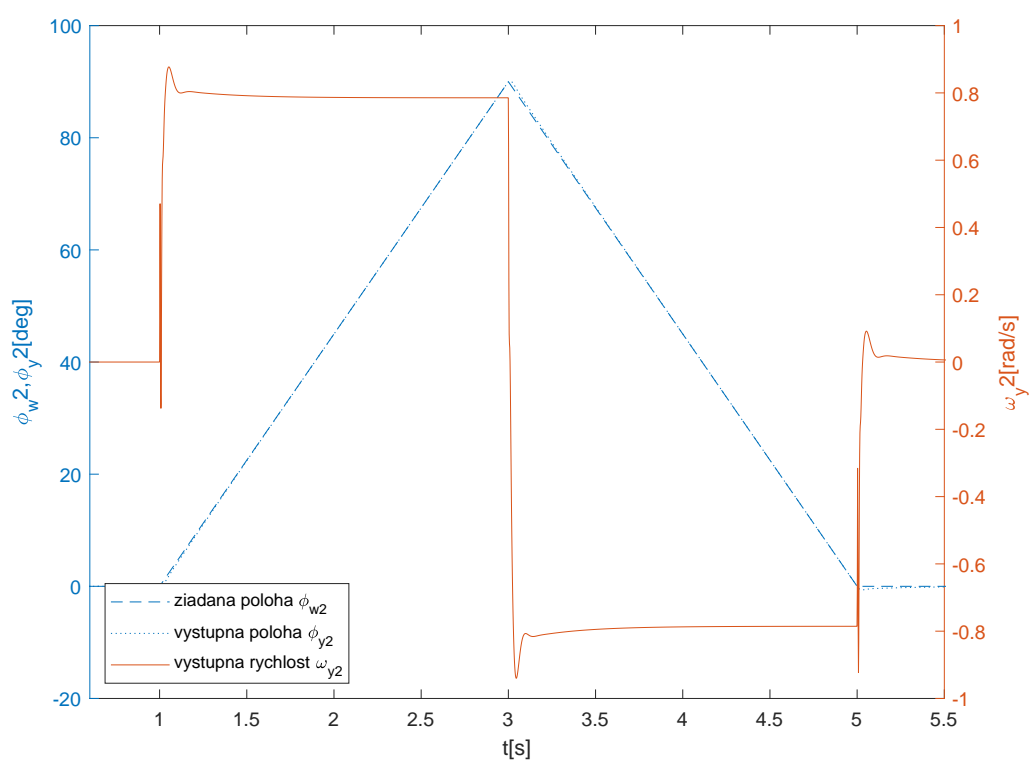
V tomto prípade na rozdiel od vstupného signálu sinusoidy na grafe (6.5)



Obr. 6.10 Žiadaná hodnota polohy a výstupná hodnota polohy, rýchlosti pre prvé rameno



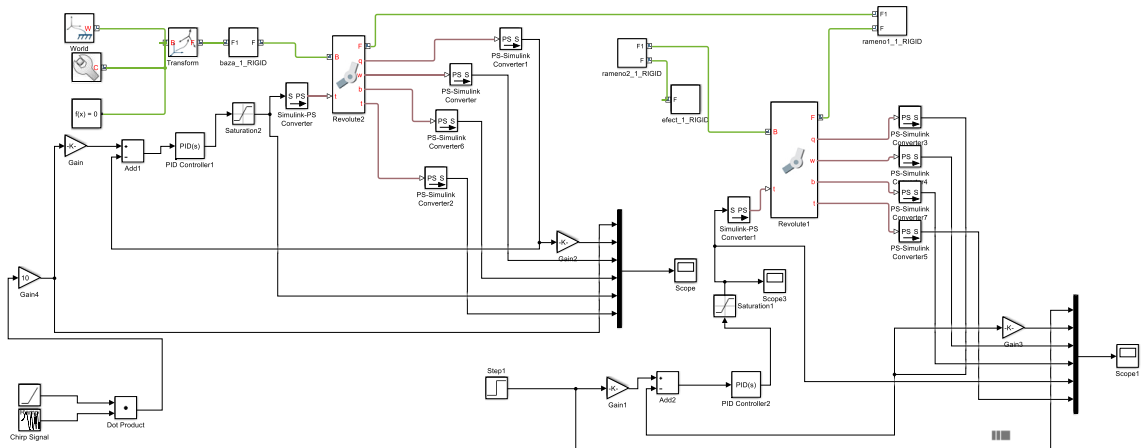
Obr. 6.11 Žiadaná hodnota polohy a výstupná hodnota polohy, momentu a zrýchlenia pre druhé rameno



Obr. 6.12 Žiadaná hodnota polohy a výstupná hodnota polohy, rýchlosti pre druhé rameno

7 Porovnanie riadenia založeného na výpočte zovšeobecnených síl s autonómnym riadením PID regulátorom v jednotlivých kĺboch

Pre porovnanie navrhnutého riadenie výpočtu zovšeobecnených síl s autonómnym riadením s PID regulátorom v jednotlivých kĺboch bola zvolená žiadaná hodnota polohy tak, aby sa prejavili nelineárnosti systému spôsobené Coriolisovou a dostredivou silou ktoré sú spôsobené vzájomnými zmenami rýchlostí oboch ramien.



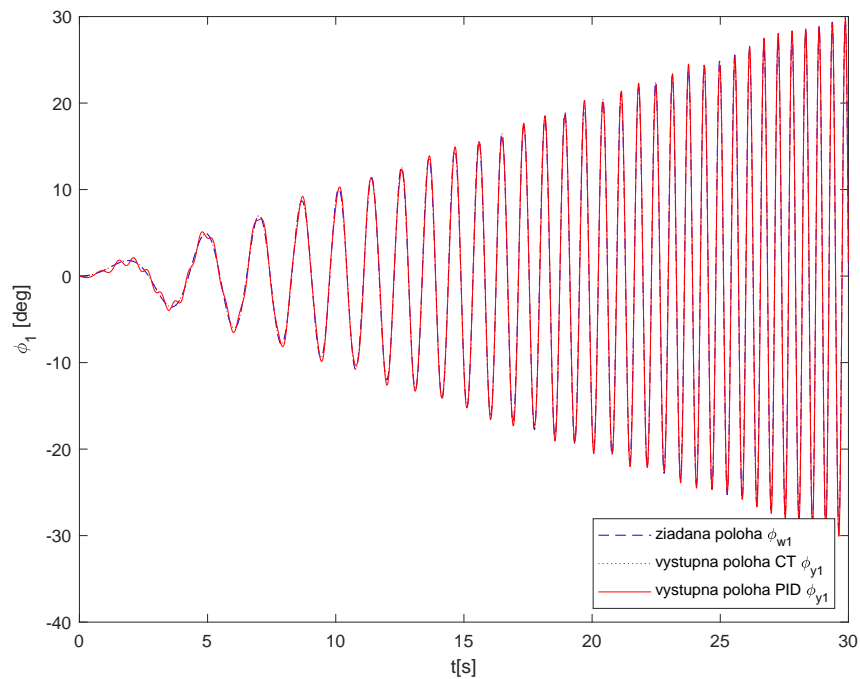
Obr. 7.1 Bloková schéma riadenia s PID regulátorom v kĺboch

Na grafe 7.2 je zobrazené porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch na polohe prvého ramena ϕ_1 .

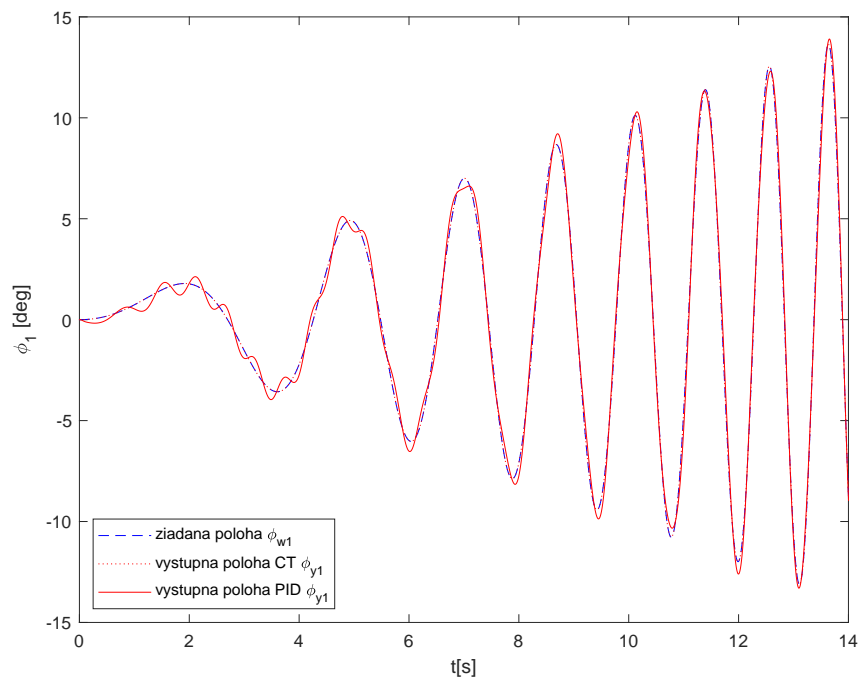
Vstupný signál pre prvé rameno ϕ_{w1} ako žiadaná hodnota polohy bola zvolená sinusoida s lineárne rastúcou amplitúdou a frekvenciou a na druhé rameno ϕ_{w2} bola zvolená lineárna rampa s pomalým náběhom a konštantnou rýchlosťou rotácie v ustálenom stave graf 7.7.

Žiadané hodnoty pre jednotlivé ramená boli zvolené tak aby sa prejavili nelinearity systému Coriolisova sila a dostredivá sila tvorené kvadrátmi rýchlostí.

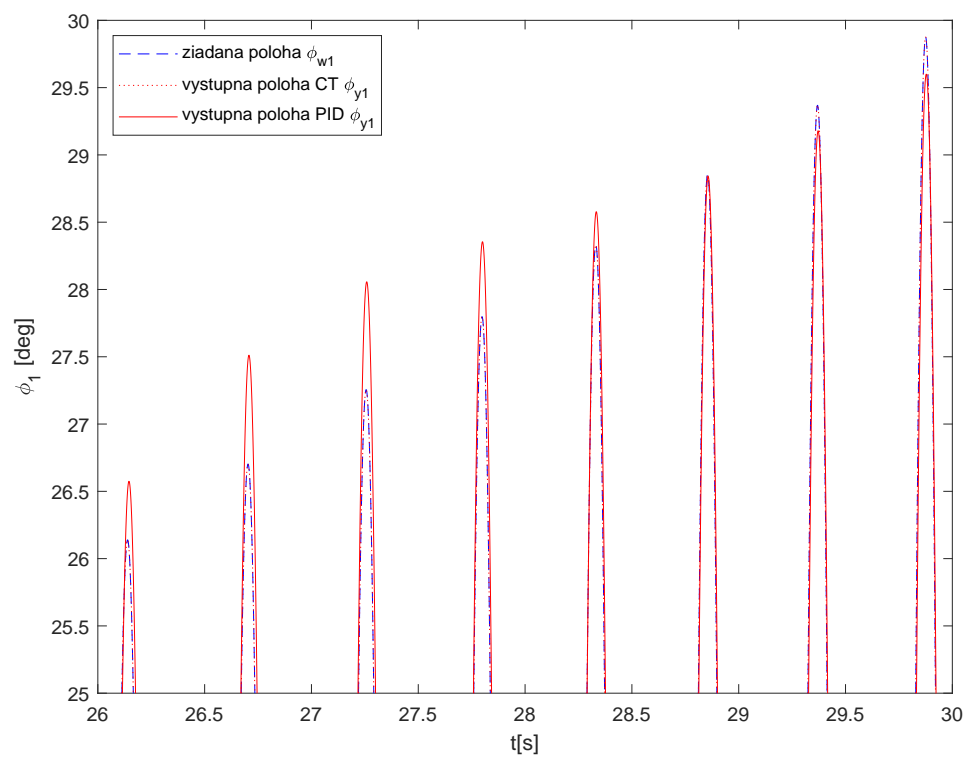
Pre porovnanie autonómne riadenie s PID regulátormi v jednotlivých kĺboch boli nastavené na čo najkratšiu dobu ustálenia v rámci obmedzeného akčného zásahu pre každé rameno zvlášť pomocou Matlabu a to tak že, pri nastavení regulátoru prvého ramena sa zablokoval pohyb druhého ramena a naopak. V takomto druhu riadenia sa nelinearity prejavajú ako regulačná odchýlka pretože, sa jedná o MIMO systém a vnútorné väzby medzi ramenami v tomto type regulácie nie sú zohľadnené ako pri regulácii založenej na výpočte zovšeobecnených síl C.T.(computed torque). Regulačné odchýlky pre prvé rameno sú zobrazené na grafe 7.10 a pre druhé rameno na grafe 7.11 výsledné sumy regulačných odchýlok sú znázornené pod týmito grafmi.



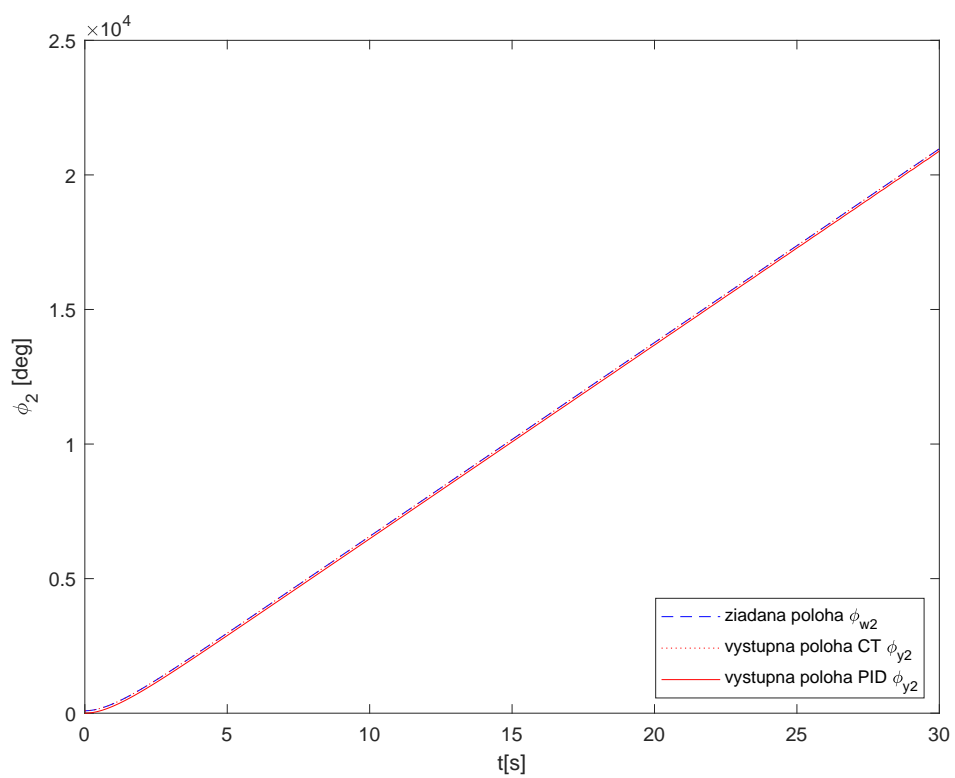
Obr. 7.2 Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch na polohe prvého ramena ϕ_1 .



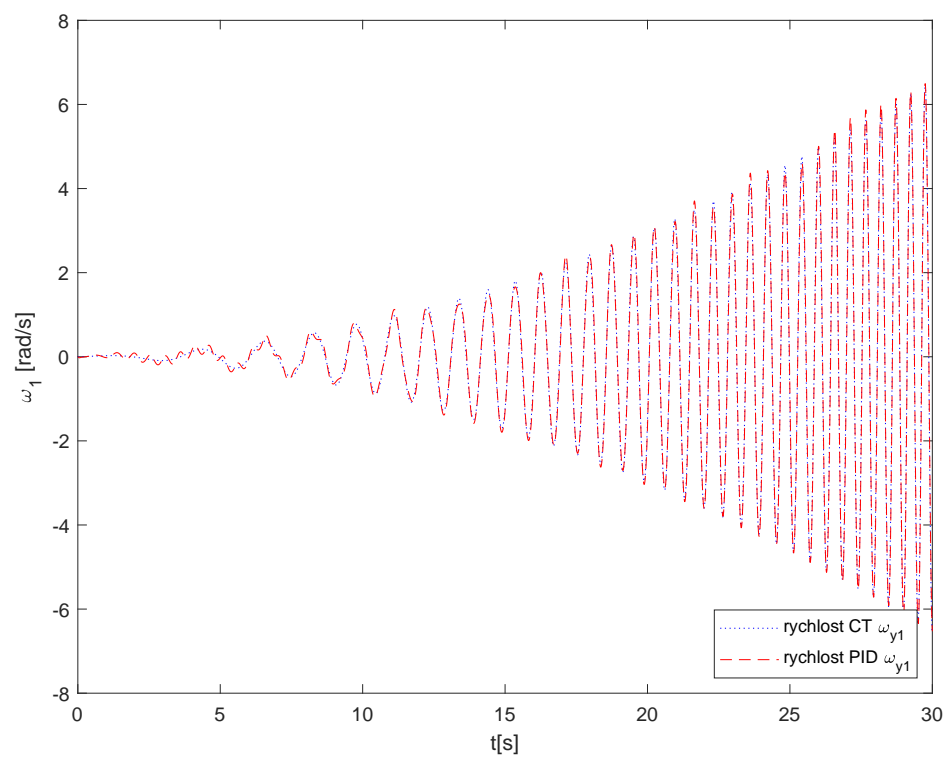
Obr. 7.3 Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch na polohe prvého ramena ϕ_1 v čase 0 až 14s.



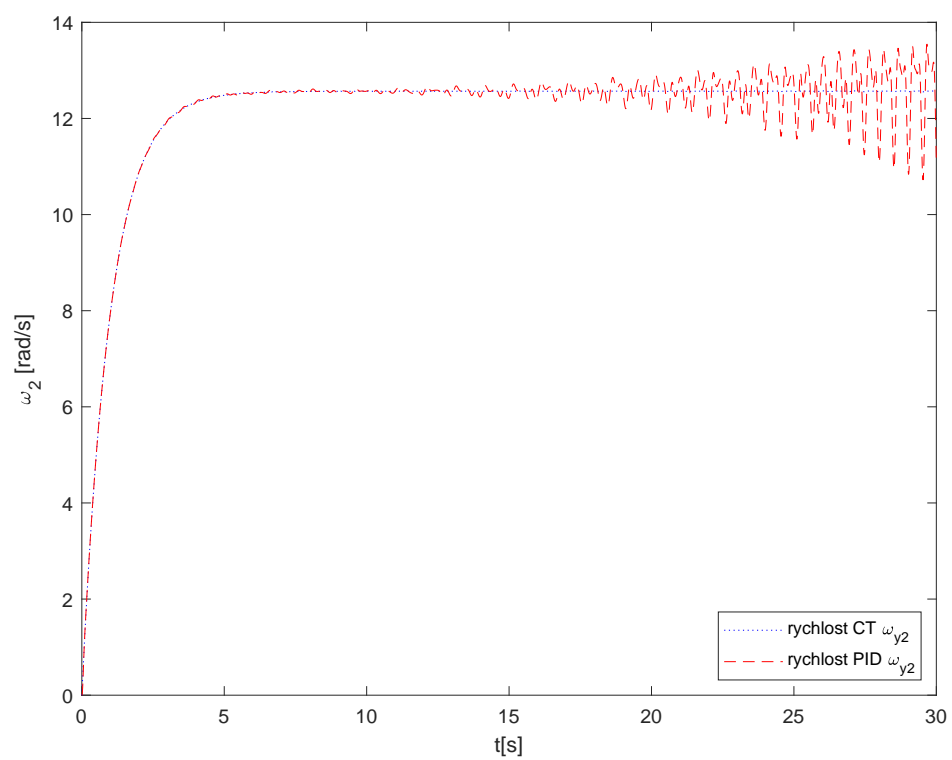
Obr. 7.4 Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch na polohe prvého ramena ϕ_1 v čase 26 až 30s.



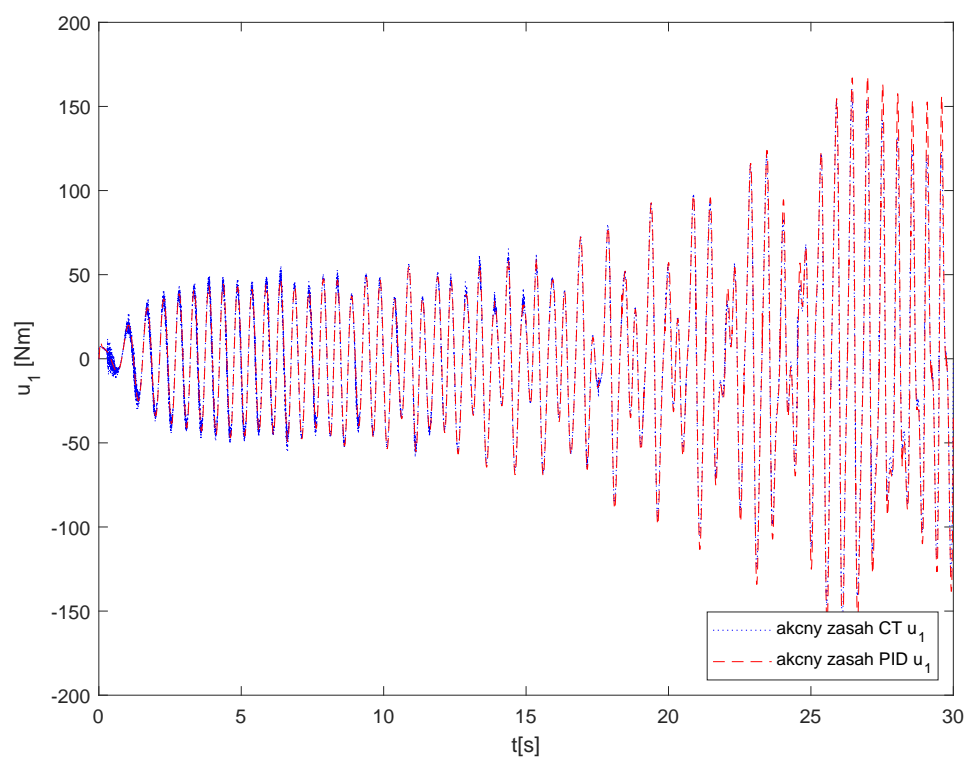
Obr. 7.5 Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch na polohe druhého ramena ϕ_2 .



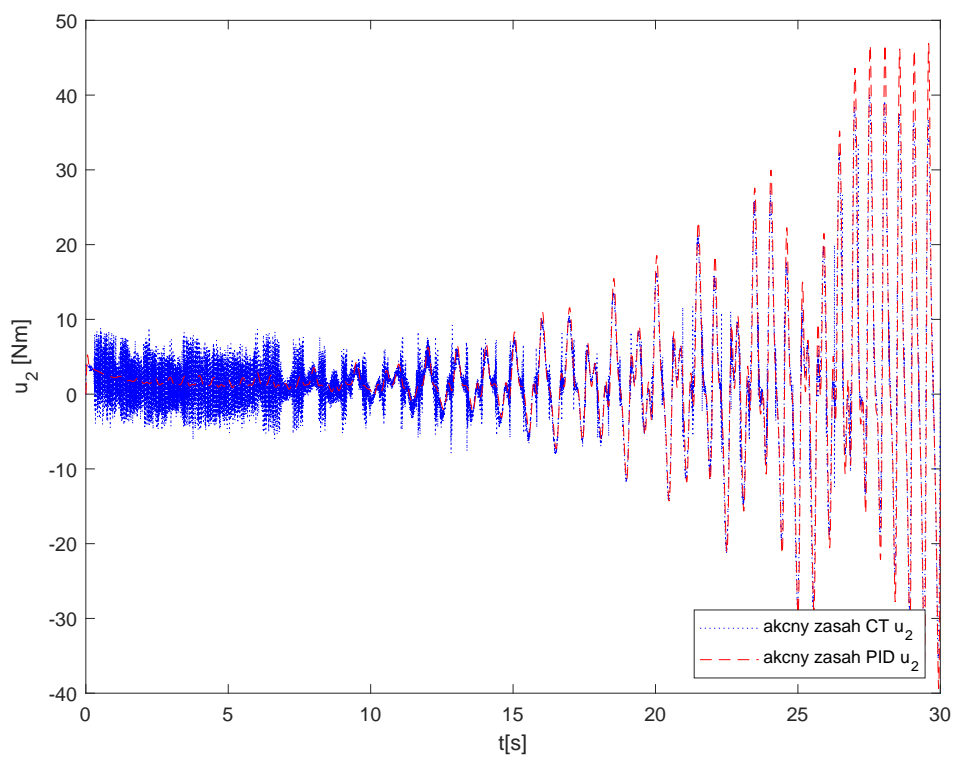
Obr. 7.6 Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kľboch rýchlostí prvého ramena ω_1 .



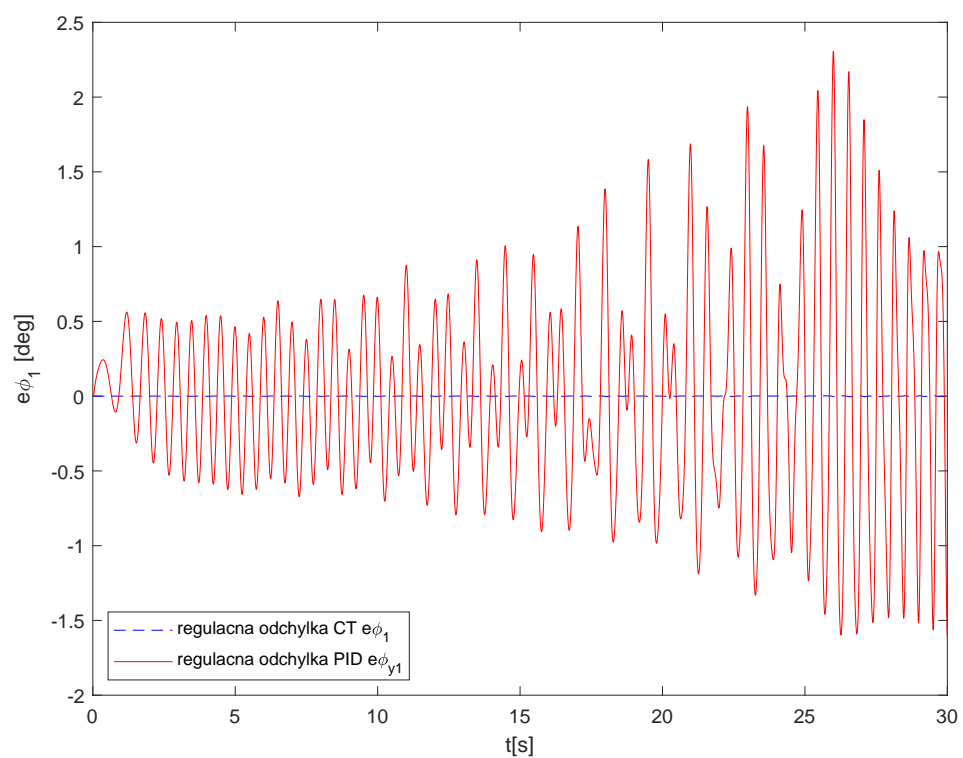
Obr. 7.7 Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch rýchlostí druhého ramena ω_2 .



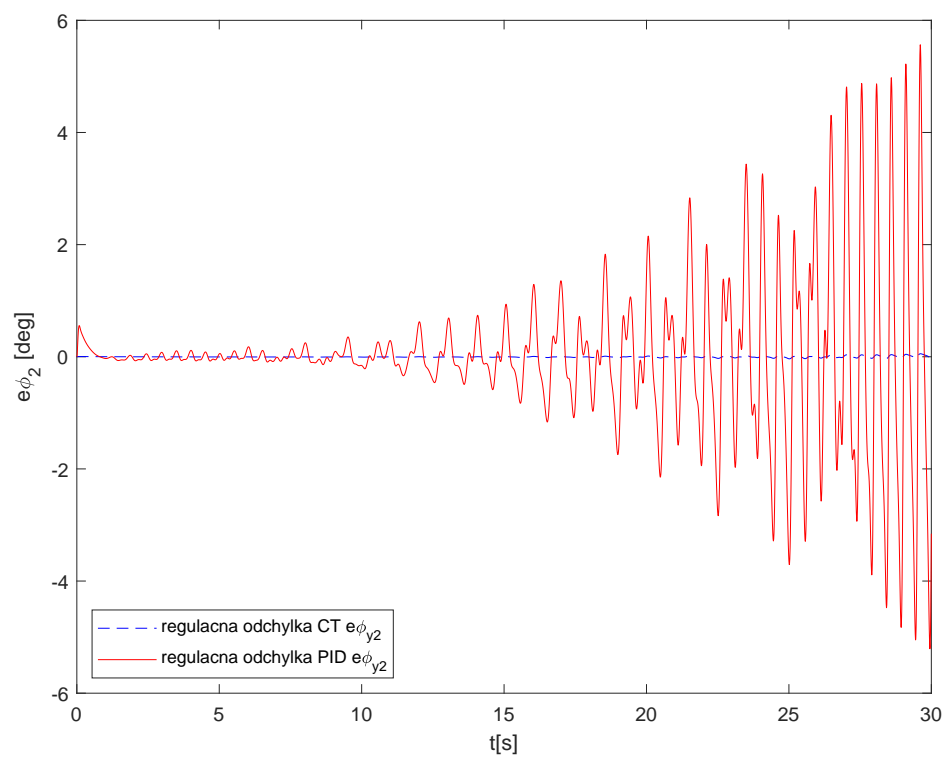
Obr. 7.8 Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (**CT**) s PID regulátorom v kľboch akčný zásah (moment) na prvom ramene Qu_1 .



Obr. 7.9 Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kľboch akčný zásah (moment) na druhom ramene Qu_2 .



Obr. 7.10 Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch reg. odchýlnka polohy prvého ramena e_1 .



Obr. 7.11 Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch reg. odchýlka polohy druhého ramena e_2 .

Analýzou regulačného pochodu boli vyhodnotené sumy kvadrátov odchýlok a akčného zásahu pre každé riadenie.

$$\sum e_{1CT}(t)^2 = 0.0613, \quad \sum e_{1PID}(t)^2 = 1.3592 \times 10^3$$

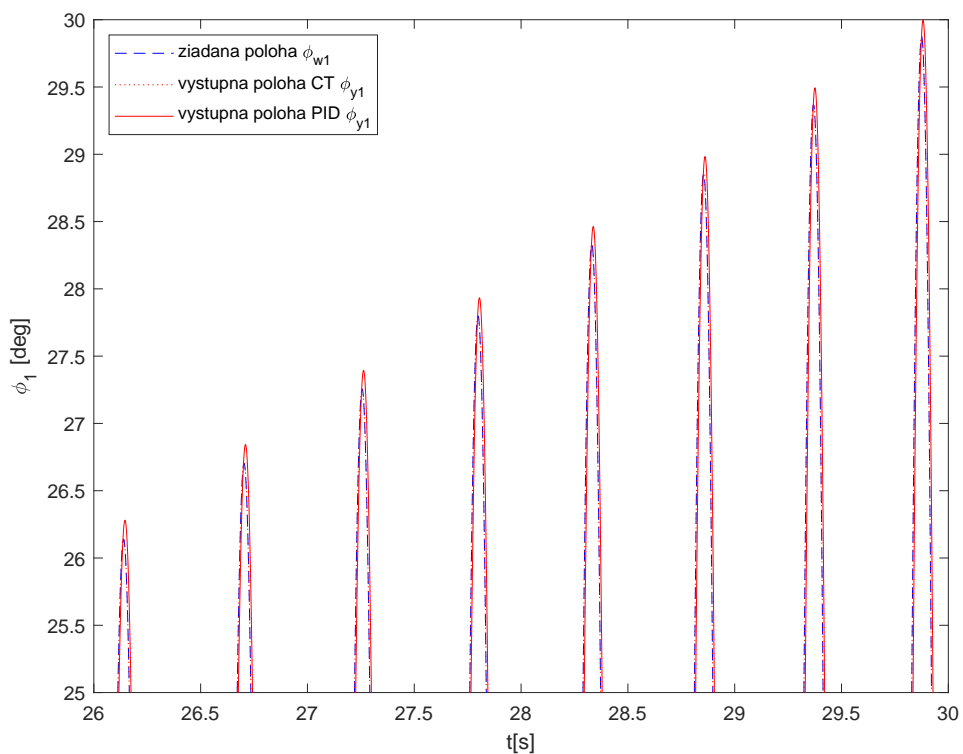
$$\sum u_{1CT}(t)^2 = 14.575 \times 10^7, \quad \sum u_{1PID}(t)^2 = 8.2652 \times 10^7$$

$$\sum e_{2CT}(t)^2 = 6.7995, \quad \sum e_{2PID}(t)^2 = 5.0989 \times 10^4$$

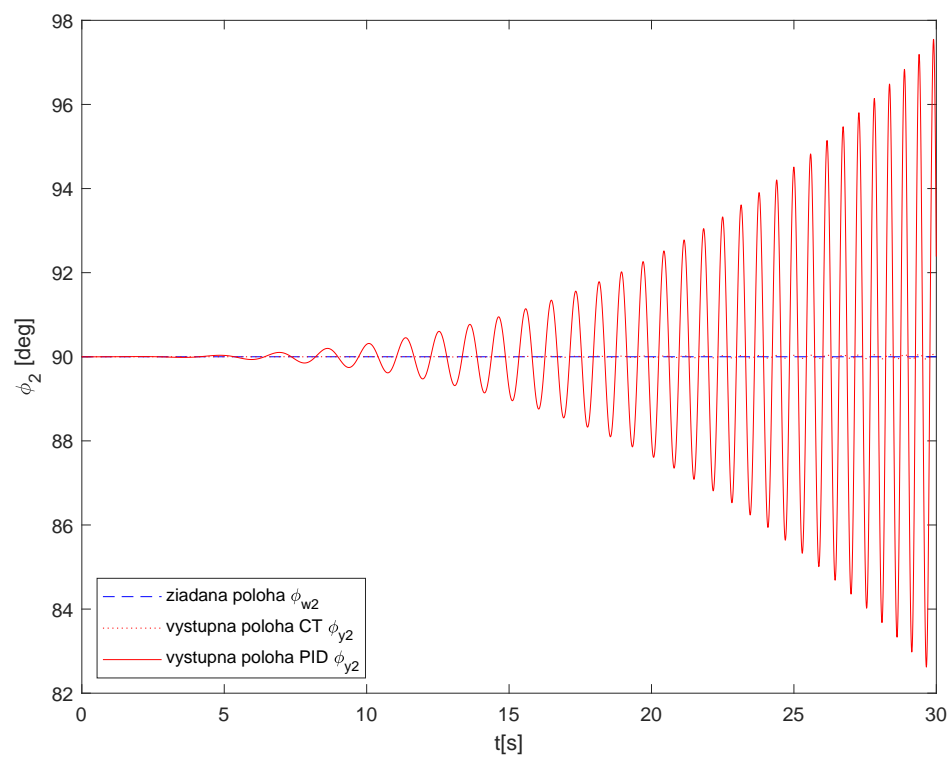
$$\sum u_{2CT}(t)^2 = 5.0257 \times 10^6, \quad \sum u_{2PID}(t)^2 = 3.0617 \times 10^6$$

Vstupný signál v tejto časti bol volený tak aby sa prejavila nelineárnosť len odstredivej sily pretože rýchlosť uhlu druhého ramena je nulová. Pre prvé rameno ϕ_{w1} ako žiadaná hodnota polohy bola zvolená sinusoida s lineárne rastúcou amplitúdou a frekvenciou ako v predchádzajúcom prípade. A na druhé rameno ϕ_{w2} bola zvolená žiadaná hodnota polohy tak aby regulátor na druhom ramene držal počiatočnú polohu na 0 [deg].

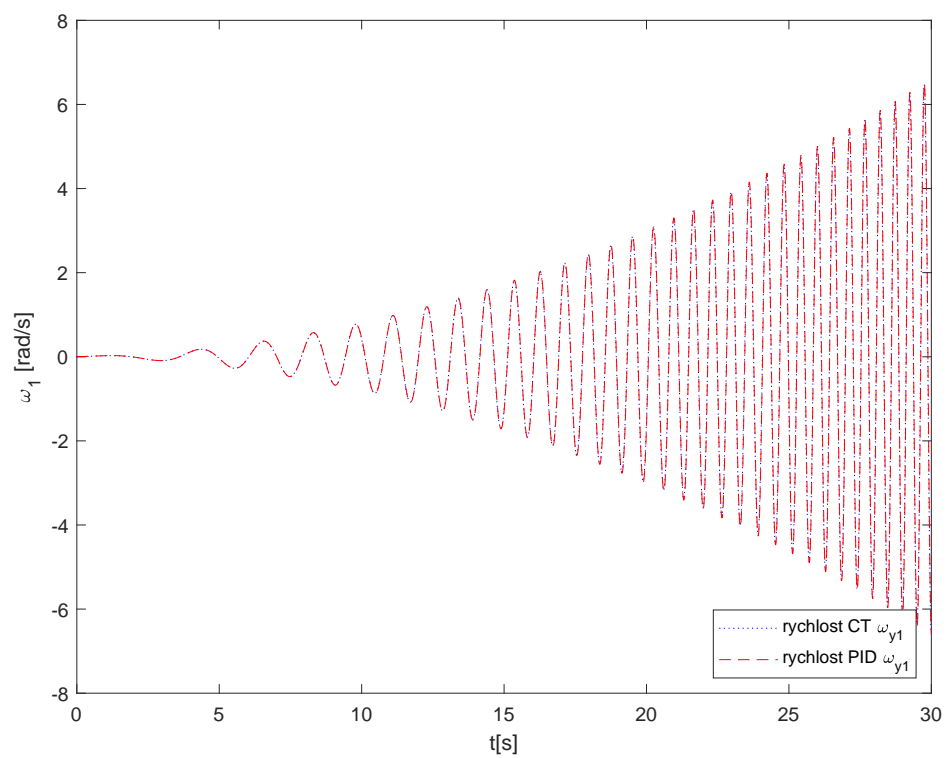
Tak ako v predchádzajúcom prípade boli vyhodnotené regulačné odchýlky pre prvé rameno na grafe 7.18 a pre druhé rameno na grafe 7.19. Na grafoch je vidieť, že pri autonómnom riadení sa nelinearity v podobe odstredivej sily sa prejavili ako regulačná odchýlka. Pod grafmi je výsledne vyhodnotenie regulácie.



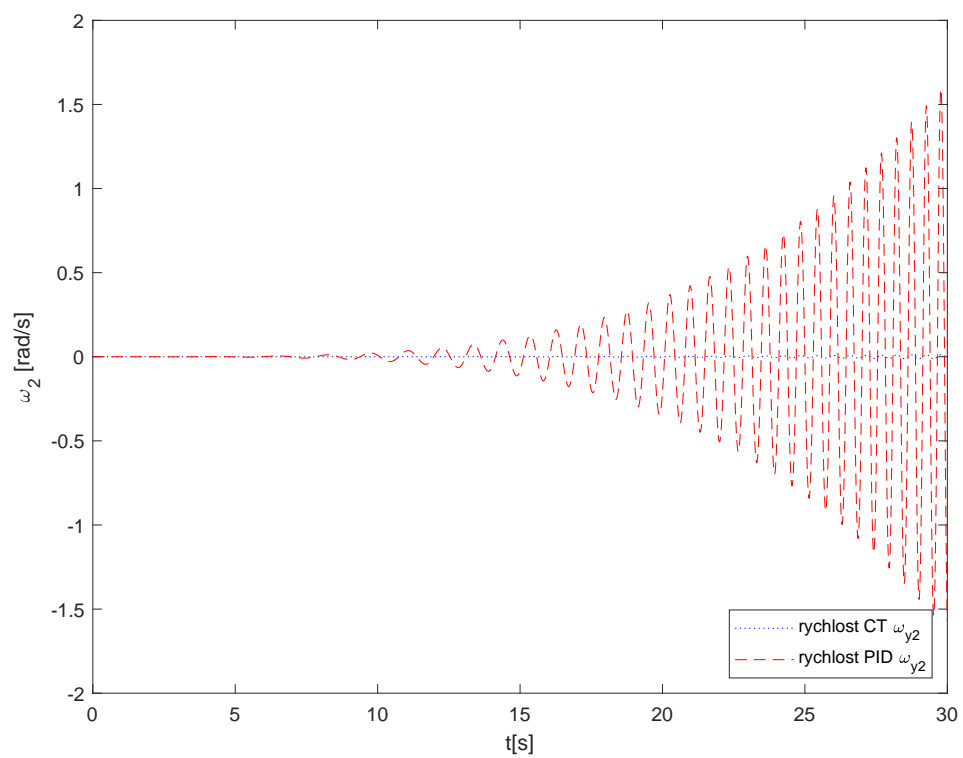
Obr. 7.12 Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch na polohe prvého ramena ϕ_1 v čase 26 až 30s.



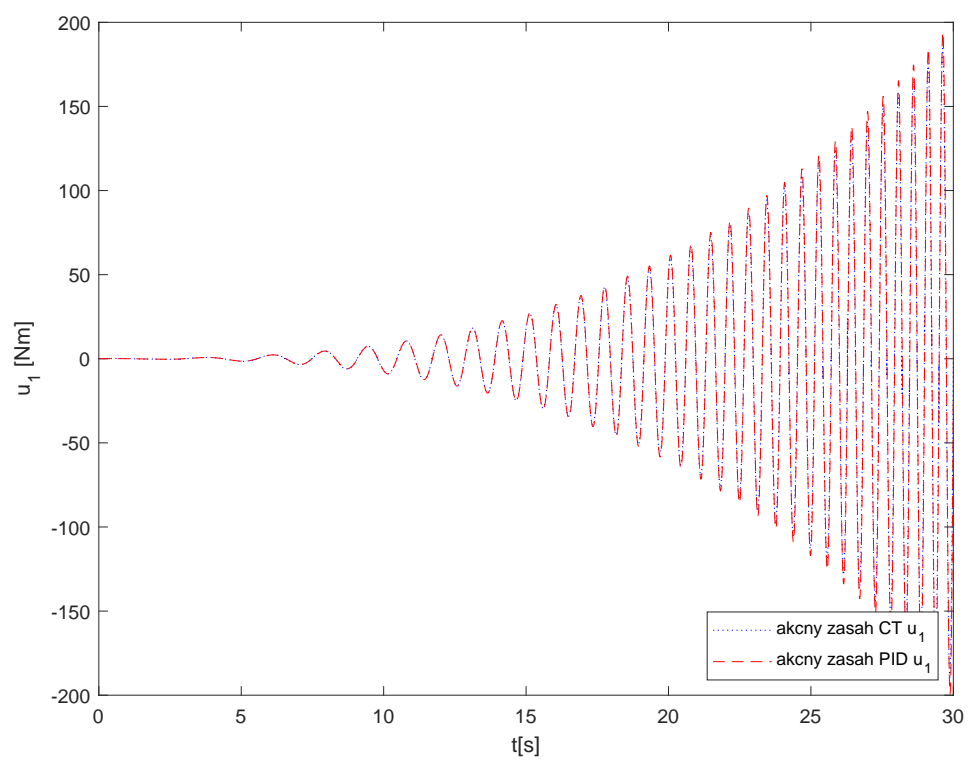
Obr. 7.13 Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch na polohe druhého ramena ϕ_2 .



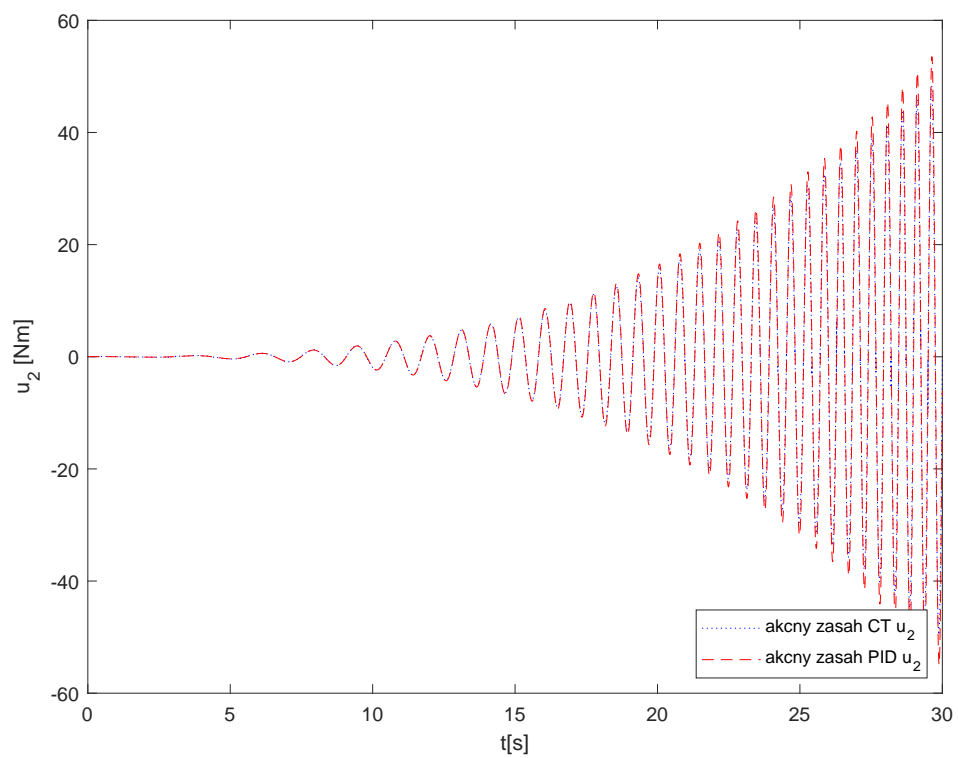
Obr. 7.14 Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kľúčoch rýchlostí prvého ramena ω_1 .



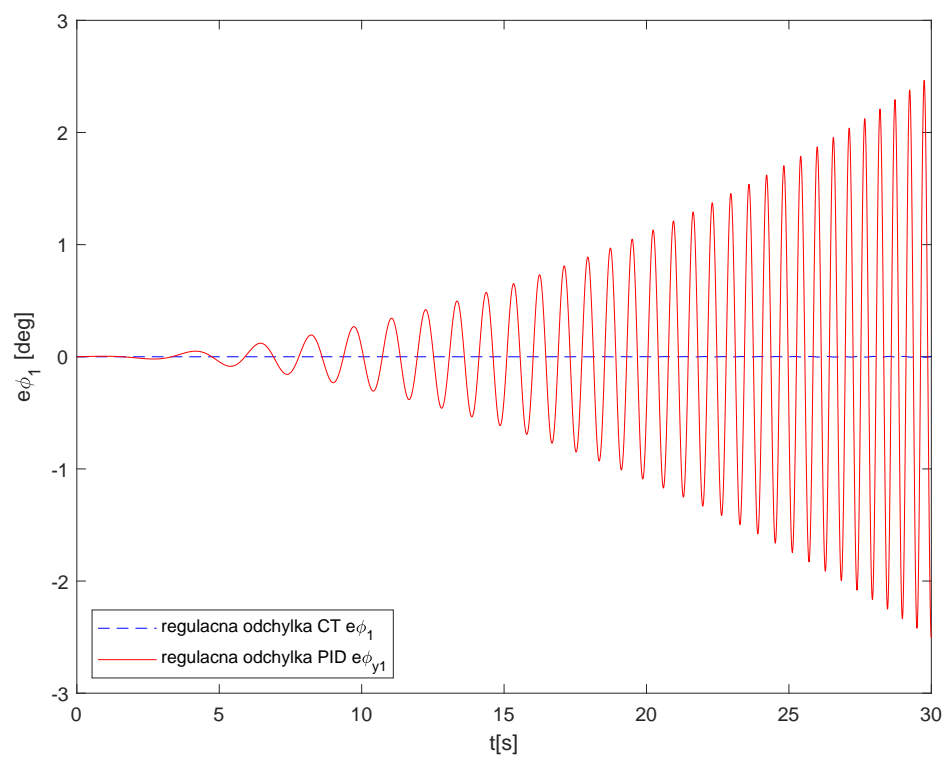
Obr. 7.15 Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch rýchlostí druhého ramena ω_2 .



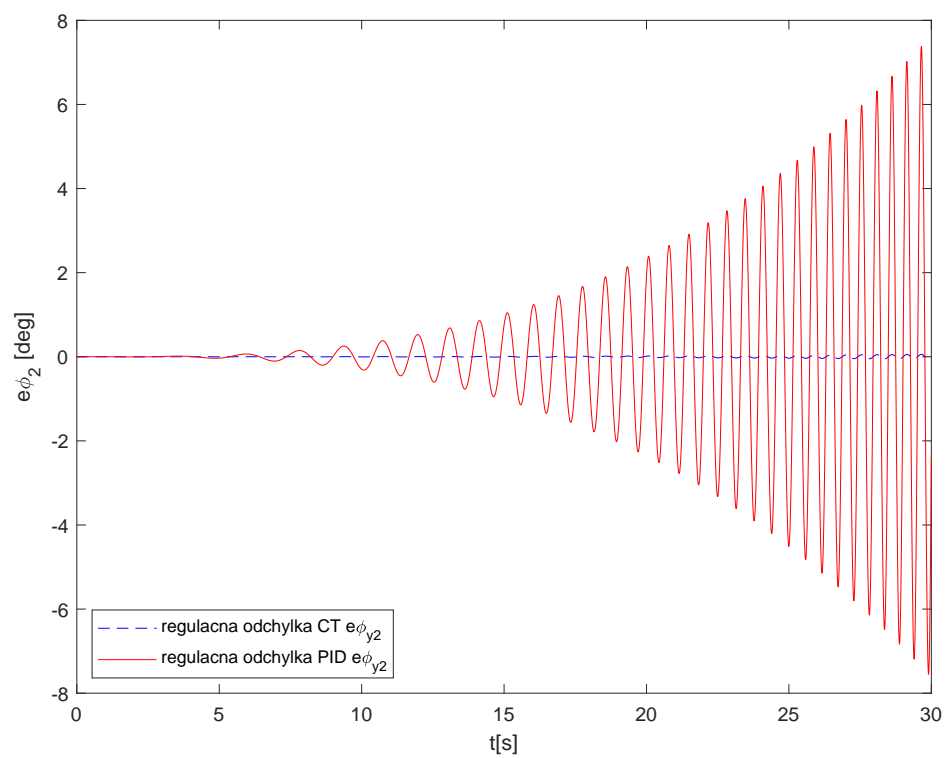
Obr. 7.16 Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch akčný zásah (moment) na prvom ramene Qu_1 .



Obr. 7.17 Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kľboch akčný zásah (moment) na druhom ramene Qu_2 .



Obr. 7.18 Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch reg. odchýlna polohy prvého ramena e_1 .



Obr. 7.19 Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch reg. odchýlka polohy druhého ramena e_2 .

Analýzou regulačného pochodu boli vyhodnotené sumy kvadrátov odchýlok a akčného zásahu pre každé riadenie.

$$\sum e_{1CT}(t)^2 = 0.0543, \quad \sum e_{1PID}(t)^2 = 3.7332 \times 10^4$$

$$\sum u_{1CT}(t)^2 = 1.6347 \times 10^8, \quad \sum u_{1PID}(t)^2 = 8.2652 \times 10^7$$

$$\sum e_{2CT}(t)^2 = 15.6145, \quad \sum e_{2PID}(t)^2 = 2.5780 \times 10^5$$

$$\sum u_{2CT}(t)^2 = 1.6347 \times 10^8, \quad \sum u_{2PID}(t)^2 = 1.7706 \times 10^8$$

ZÁVĚR

V diplomovej práci boli analyticky odvodené pohybové rovnice robota typu SCARA a zostrojený model reálneho robota. Taktiež bolo navrhnuté nelineárne riadenie založené na výpočte zovšeobecnených síl, ktoré úspešne kompenzuje nelinearity tohoto MIMO systému typu Coriolisova sila a dostredivá sila spôsobené vzájomnými interakciami ramien robota. Toto riadenie bolo porovnané s autonómnym riadením typu SISO s PID regulátorom v každom kĺbe zvlášť. V takomto type riadenia menované nelinearity pôsobia navzájom ako porucha do systému na grafoch (7.10), (7.10), (7.18), (7.19). Tým že tieto nelinearity tento typ riadenia zanedbá vo svojom návrhu tak znižuje kvalitu regulácie a pri zvýšení rýchlosti postupne degraduje.

Je nutné poznamenať, že riadenie a realizácia akčného členu a jeho momentu bola okamžitá za použitia actulátora a nebol použitý motor s prevodovkou, ktorý má dynamické vlastnosti a ovplyvňuje kvalitu regulácie. Taktiež v reálnom svete sa pri riadení robota vyskytujú iné nelinearity typu trenie, hysterézia, backlash, dead zone tieto ťažké nelinearity spôsobujú nechcené oscilácie(nestabilitu) a trvalú regulačnú odchýlku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *ÚŘEDNÍČEK, Z.: Robotika, Univerzita T. Bati ve Zlíně, Zlín 2012, ISBN 978 80 7454 223 7*
- [2] *SLOTINE, J-J., E, LI, W: Applied nonlinear control, Prentice-Hall, Inc., A Division of Simon & Schuster, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, ISBN 0-13-040890-5*
- [3] *CRAIG, J. J. Introduction to Robotics, Mechanics and Control. Reading, Mas. : Addison-Wesley, 1989. ISBN 0201103265*
- [4] *BRADLEY D.A & KOL.: Mechatronics, Chapman & Hall 1991, ISBN 0-412-58290-2*
- [5] *TRKAL, Viktor. Mechanika hmotných bodů a tuhého tělesa. 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1956.*
- [6] *Encyklopedie fyziky: MECHANICKÁ PRÁCE A MECHANICKÁ ENERGIE. Encyklopedie fyziky [online]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/45-mechanicka-prace-a-mechanicka-energie>*
- [7] *Fyzika: MECHANICKÁ. Univerzita Karlova [online]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/mechanika/2_1*
- [8] *ŽALMAN, M.: Akčné členy, Fakulta elektrotechniky a informatiky STU Bratislava, Bratislava 2002*
- [9] *BRANŠTETTER, P.: Technické prostředky pro řízení elektrických pohonů, FEI VŠB-TU Ostrava 2005*
- [10] *SKALICKÝ, J.: Elektrické servopohony, skripta Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií, Brno*

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CT - Computed torque (zovšeobecnené sily)

DH - Denavit-Hartenberg

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3.1	Usporiadanie kinematického reťazca	18
Obr. 3.2	Zjednodušené prvé homogénne rameno	21
Obr. 3.3	Zjednodušené druhé homogénne rameno	23
Obr. 3.4	Súradnicový systém robota typu SCARA v programe SolidWorks	29
Obr. 3.5	Porovnanie momentu prvého ramena z analyticky odvodených pohybových rovníc, výpočtu pohybových rovníc pomocou matíc zotrvačnosti z programu SolidWorks, simulácia modelu Matlab simmechanics	30
Obr. 3.6	Porovnanie momentu druhého ramena z analyticky odvodených pohybových rovníc, výpočtu pohybových rovníc pomocou matíc zotrvačnosti z programu SolidWorks, simulácia modelu Matlab simmechanics	31
Obr. 4.1	Tabuľka základných parametrov robota SCARA Stäubli RS-40	33
Obr. 4.2	Schéma základných parametrov robota SCARA Stäubli RS-40	34
Obr. 4.3	Reálny model robota typu SCARA	35
Obr. 4.4	Model robota typu SCARA SolidWorks	35
Obr. 4.5	Model robota typu SCARA SolidWorks	36
Obr. 4.6	Reálny model robota typu SCARA	37
Obr. 5.1	Blokové schéma vyexportovaného robota typu SCARA zo SolidWorksu do prostredia simulink(Matlab)	38
Obr. 5.2	Zobrazenie prostredia Mechanics Explorer(Matlab) pre animáciu pohybu modelu	39
Obr. 6.1	Blokové schéma riadenia založeného na výpočte zovšeobecnených síl	41
Obr. 6.2	Blok výpočtu zovšeobecnených síl	41
Obr. 6.3	Vnútná časť bloku výpočtu zovšeobecnených síl	42
Obr. 6.4	Realizácia riadenia založeného na výpočte zovšeobecnených síl v Matlabe	42
Obr. 6.5	Žiadaná hodnota polohy a výstupná hodnota polohy, akčný zásah (moment $Q_{1ff}(t) + Q_{1fb}(t)$) pre prvé rameno	43
Obr. 6.6	Žiadaná hodnota polohy a výstupná hodnota polohy, rýchlosť pre prvé rameno	44
Obr. 6.7	Žiadaná hodnota polohy a výstupná hodnota polohy, akčný zásah (moment $Q_{2ff}(t) + Q_{2fb}(t)$) pre druhé rameno	45
Obr. 6.8	Žiadaná hodnota polohy a výstupná hodnota polohy, rýchlosť pre druhé rameno	46
Obr. 6.9	Žiadaná hodnota polohy a výstupná hodnota polohy, momentu a zrýchlenia pre prvé rameno	47

Obr. 6.10	Žiadaná hodnota polohy a výstupná hodnota polohy, rýchlosti pre prvé rameno	48
Obr. 6.11	Žiadaná hodnota polohy a výstupná hodnota polohy, momentu a zrýchlenia pre druhé rameno	49
Obr. 6.12	Žiadaná hodnota polohy a výstupná hodnota polohy, rýchlosti pre druhé rameno	50
Obr. 7.1	Bloková schéma riadenia s PID regulátorom v kĺboch	51
Obr. 7.2	Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch na polohe prvého ramena ϕ_1	52
Obr. 7.3	Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch na polohe prvého ramena ϕ_1 v čase 0 až 14s.	52
Obr. 7.4	Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch na polohe prvého ramena ϕ_1 v čase 26 až 30s.	53
Obr. 7.5	Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch na polohe druhého ramena ϕ_2	54
Obr. 7.6	Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch rýchlostí prvého ramena ω_1	55
Obr. 7.7	Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch rýchlostí druhého ramena ω_2	56
Obr. 7.8	Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch akčný zásah (moment) na prvom ramene Qu_1	57
Obr. 7.9	Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch akčný zásah (moment) na druhom ramene Qu_2	58
Obr. 7.10	Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch reg. odchýlka polohy prvého ramena e_1	59
Obr. 7.11	Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch reg. odchýlka polohy druhého ramena e_2	60
Obr. 7.12	Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch na polohe prvého ramena ϕ_1 v čase 26 až 30s.	62
Obr. 7.13	Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch na polohe druhého ramena ϕ_2	63
Obr. 7.14	Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch rýchlostí prvého ramena ω_1	64

Obr. 7.15	Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch rýchlosť druhého ramena ω_2	65
Obr. 7.16	Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch akčný zásah (moment) na prvom ramene Qu_1	66
Obr. 7.17	Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch akčný zásah (moment) na druhom ramene Qu_2	67
Obr. 7.18	Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch reg. odchýlka polohy prvého ramena e_1	68
Obr. 7.19	Porovnanie riadenia s výpočtom riadenia zovšeobecnených síl (CT) s PID regulátorom v kĺboch reg. odchýlka polohy druhého ramena e_2	69

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1 Tabuľka DH parametrov 18