

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

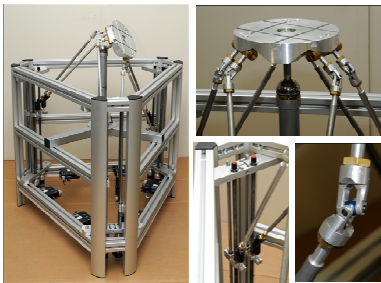


Lanový HexeSphere

2014

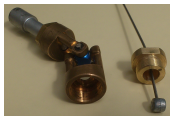
Vojtěch Rada

- 1 Popis mechanismu
- 2 Konstrukční úpravy
- 3 Matematický model
 - Kinematický model
 - Dynamický model
 - Simulace
- 4 Protivůlové řízení
 - Simulace
- 5 Návrh regulátoru
- 6 Návrh regulátoru
 - Simulace
- 7 Implementace řízení
- 8 Experimenty
- 9 Závěr



- rám s centrálním kloubem
- platforma
- 6x vozíků
- platforma s vozíky spojena tyčemi
- pohyb vozíků pomocí pohybových šroubů

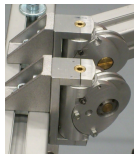
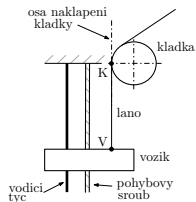
- Uchycení lan



- Uchycení lan

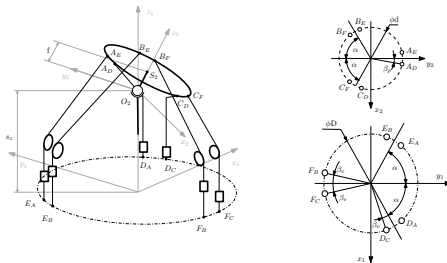


- Kladky

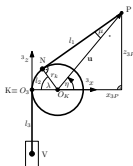


Kinematický model

- Závislost polohy vozíků na poloze platformy
- Poloha platformy popsána Eulerovými úhly ψ , ϑ a φ
- Podmínka odvalování platformy $\rightarrow \varphi = -\psi$
- Schéma mechanismu



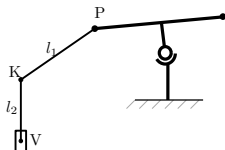
- Schéma kladky



Dynamický model

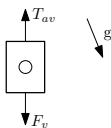
Předpoklady:

- Všechny části jsou dokonale tuhé
- Lana → přenášejí tahové i tlakové síly
- Zanedbání kladek



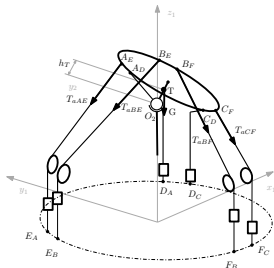
- Moment setrvačnosti motoru a šroubu → redukovaný moment vozíků

Uvolnění vozíku:



$$T_{aV} = F_V - m_{red} \cdot \ddot{z}_V + m_{voz} \cdot g_z$$

- Zrychlení vozíku: $\ddot{z}_V = f(\dot{\omega}_{12}) \rightarrow \ddot{z}_V = \mathbf{b}_V \cdot \dot{\omega}_{12} + c_V$
- Dynamika platformy \rightarrow Eulerova dynamická rovnice:
$${}^2\mathbf{I}_{O_2} \cdot \dot{\omega}_{12} + \omega_{12} \times ({}^2\mathbf{I}_{O_2} \cdot \omega_{12}) = \sum_i {}^2\mathbf{M}_i$$



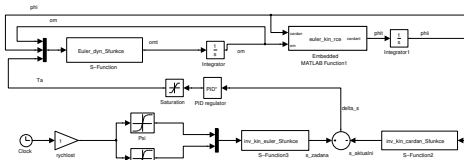
- Výsledný vektor úhlového zrychlení

$$\dot{\omega}_{12} = ({}^2\mathbf{I}_{O_2} + m_{red} \cdot \mathbf{A}_S \cdot \mathbf{B}_C)^{-1} \cdot \mathbf{A}_S \cdot (\mathbf{F}_C + m_{voz} \cdot \mathbf{g}_C - m_{red} \cdot \mathbf{C}_C) + {}^2\mathbf{R}_{2T} \cdot {}^2\mathbf{G} - \omega_{12} \times ({}^2\mathbf{I}_{O_2} \cdot \omega_{12})$$

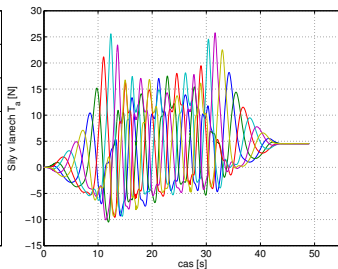
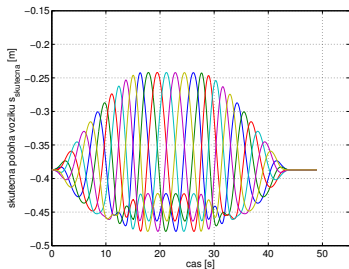
- kde $\mathbf{F}_C \rightarrow$ síly ze všech pohonů
- $\mathbf{A}_S, \mathbf{B}_C, \mathbf{C}_C \rightarrow$ pomocné matice

Simulace modelu s tuhými lany

Model mechanismu:



Výsledek simulace:



- Pro vektor kladných sil:

$$\mathbf{M}_x = -\mathbf{J}^{+T} \cdot \mathbf{T}_{as}, \quad \mathbf{T}_{as} > \mathbf{0}$$

- Řešení musí být nezávislé na vektoru \mathbf{M}_x :

$$\mathbf{0} = -\mathbf{J}^{+T} \cdot \mathbf{T}_{as}, \quad \mathbf{T}_{as} > \mathbf{0}$$

- Tato podmínka slouží k testování pracovního prostoru
- Vede na soustavu m rovnic pro n neznámých \rightarrow nekonečně mnoho řešení
- Hledáme minimální řešení
- Převedení soustavy na kvadratické programování:

$$\begin{aligned} \min (\mathbf{T}_{as}^T \cdot \mathbf{T}_{as}) \\ \mathbf{0} = -\mathbf{J}^{+T} \cdot \mathbf{T}_{as} \\ \mathbf{T}_{as} > \mathbf{T}_{a \min} \end{aligned}$$

- Nalezení vektoru sil v lanech pro zatížení platformy \mathbf{M}_x :

$$\begin{aligned} & \min (\mathbf{T}_{as}^T \cdot \mathbf{T}_{as}) \\ \mathbf{M}_x &= -\mathbf{J}^{+T} \cdot \mathbf{T}_{as} \\ \mathbf{T}_{a \min} &< \mathbf{T}_{as} < \mathbf{T}_{a \max} \end{aligned}$$

Změna předepnutí lan:

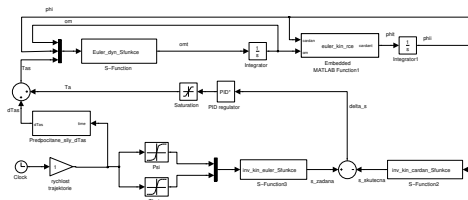
- Vektor \mathbf{T}_{as} zapíšeme jako součet vektorů

$$\mathbf{T}_{as} = \mathbf{T}_{as0} + \lambda \cdot \Delta \mathbf{T}_{as},$$

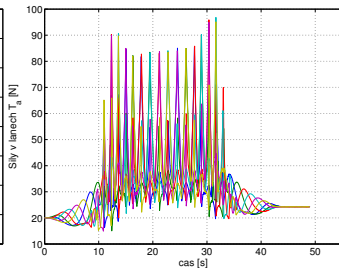
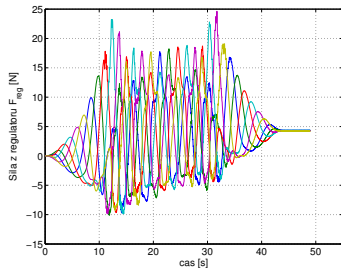
- $\mathbf{T}_{as0} \rightarrow$ výpočet pro $\mathbf{T}_{a \min} = \mathbf{0}$
- $\Delta \mathbf{T}_{as} \rightarrow$ výpočet pro $\mathbf{T}_{a \min} > \mathbf{0}$, $\mathbf{M}_x = \mathbf{0}$

Simulace s protivůlovým řízením

Model mechanismu:



Výsledky simulace:



- Nastavení regulátorů v kaskádní regulaci
- V kaskádě 2 regulátory \rightarrow polohový, rychlostní
- K řízení použijeme stavovou zpětnou vazbu
- Stavový popis ve formě: $\dot{\mathbf{x}}_{ss} = \mathbf{A}_{ss} \cdot \mathbf{x}_{ss} + \mathbf{B}_{ss} \cdot \mathbf{u}_{ss}$
- Stavový popis nalezneme linearizací mechanismu
- Rovnice popisující dynamiku rozseparujeme do tvaru

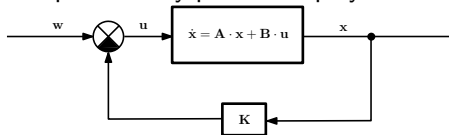
$$\mathbf{M}_I \cdot (\ddot{\varphi}) + \mathbf{L}_I \cdot (\dot{\varphi}) + \mathbf{K}_I \cdot (\varphi) = \mathbf{J}^{+T} \cdot \mathbf{T}_{as}$$

- Budeme hledat matice \mathbf{M}_I , \mathbf{L}_I , \mathbf{K}_I

Stavová zpětná vazba

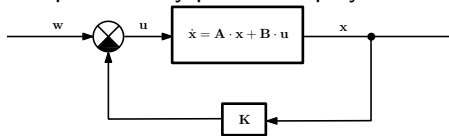
- Pomocí stavové zpětné vazby posuneme póly soustavy na libovolně

zvolené póly



Stavová zpětná vazba

- Pomocí stavové zpětné vazby posuneme póly soustavy na libovolně

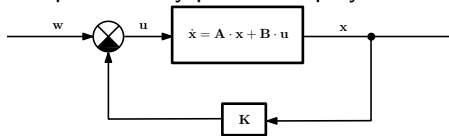


zvolené póly

- Řídicí vektor u_{ss} dán jako $u_{ss} = -K \cdot x_{ss} + w \rightarrow$
 $u_{ss} = -K_1 \cdot x_1 - K_2 \cdot x_2 + K_2 \cdot x_{2z}$

Stavová zpětná vazba

- Pomocí stavové zpětné vazby posuneme póly soustavy na libovolně

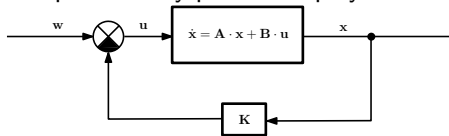


zvolené póly

- Řídící vektor \mathbf{u}_{ss} dán jako $\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K} \cdot \mathbf{x}_{ss} + \mathbf{w} \rightarrow$
 $\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{x}_1 - \mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{x}_2 + \mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{x}_{2z}$
- Dosažením za stavy dostaneme: $\mathbf{u}_{ss} = \mathbf{K}_1 \cdot (-\dot{\varphi}) + \mathbf{K}_2 \cdot (\varphi_z - \varphi)$

Stavová zpětná vazba

- Pomocí stavové zpětné vazby posuneme póly soustavy na libovolně

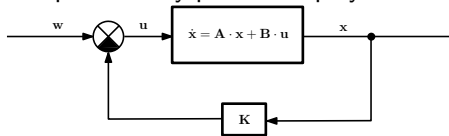


zvolené póly

- Řídící vektor \mathbf{u}_{ss} dán jako $\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K} \cdot \mathbf{x}_{ss} + \mathbf{w} \rightarrow$
 $\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{x}_1 - \mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{x}_2 + \mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{x}_{2z}$
- Dosažením za stavy dostaneme: $\mathbf{u}_{ss} = \mathbf{K}_1 \cdot (-\dot{\varphi}) + \mathbf{K}_2 \cdot (\varphi_z - \varphi)$
- Převedení na polohy vozíků: $\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K}_1 \cdot \frac{\partial Q}{\partial \dot{\mathbf{s}}} \cdot \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{K}_2 \cdot \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{s}_z} \cdot \Delta \mathbf{s}$

Stavová zpětná vazba

- Pomocí stavové zpětné vazby posuneme póly soustavy na libovolně

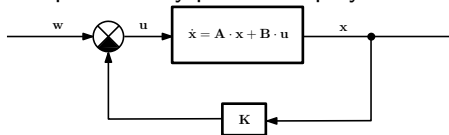


zvolené póly

- Řídící vektor \mathbf{u}_{ss} dán jako $\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K} \cdot \mathbf{x}_{ss} + \mathbf{w} \rightarrow$
 $\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{x}_1 - \mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{x}_2 + \mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{x}_{2z}$
- Dosažením za stavy dostaneme: $\mathbf{u}_{ss} = \mathbf{K}_1 \cdot (-\dot{\varphi}) + \mathbf{K}_2 \cdot (\varphi_z - \varphi)$
- Převedení na polohy vozíků: $\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K}_1 \cdot \frac{\partial Q}{\partial \dot{\mathbf{s}}} \cdot \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{K}_2 \cdot \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{s}_z} \cdot \Delta \mathbf{s}$
- Nové matice zesílení $\mathbf{K}_{1s} = \mathbf{K}_1 \cdot \frac{\partial Q}{\partial \dot{\mathbf{s}}}$ a $\mathbf{K}_{2s} = \mathbf{K}_2 \cdot \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{s}}$ \rightarrow
 $\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K}_{1s} \cdot \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{K}_{2s} \cdot \Delta \mathbf{s}$

Stavová zpětná vazba

- Pomocí stavové zpětné vazby posuneme póly soustavy na libovolně

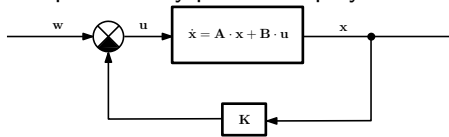


zvolené póly

- Řídící vektor \mathbf{u}_{ss} dán jako $\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K} \cdot \mathbf{x}_{ss} + \mathbf{w} \rightarrow$
 $\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{x}_1 - \mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{x}_2 + \mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{x}_{2z}$
- Dosažením za stavy dostaneme: $\mathbf{u}_{ss} = \mathbf{K}_1 \cdot (-\dot{\varphi}) + \mathbf{K}_2 \cdot (\varphi_z - \varphi)$
- Převedení na polohy vozíků: $\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K}_1 \cdot \frac{\partial Q}{\partial \dot{\mathbf{s}}} \cdot \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{K}_2 \cdot \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{s}_z} \cdot \Delta \mathbf{s}$
- Nové matice zesílení $\mathbf{K}_{1s} = \mathbf{K}_1 \cdot \frac{\partial Q}{\partial \dot{\mathbf{s}}}$ a $\mathbf{K}_{2s} = \mathbf{K}_2 \cdot \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{s}}$ \rightarrow
 $\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K}_{1s} \cdot \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{K}_{2s} \cdot \Delta \mathbf{s}$
- Řídící vektor \mathbf{u}_{ss} v kaskádní regulaci dán jako:
 $\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K}_{1s}^K \cdot \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{K}_{1s}^K \cdot \mathbf{K}_{2s}^K \cdot \Delta \mathbf{s},$
porovnáním získáme matice: $\mathbf{K}_{1s}^K = \mathbf{K}_{1s}, \mathbf{K}_{2s}^K = -\mathbf{K}_{1s}^{-1} \cdot \mathbf{K}_{2s}$

Stavová zpětná vazba

- Pomocí stavové zpětné vazby posuneme póly soustavy na libovolně

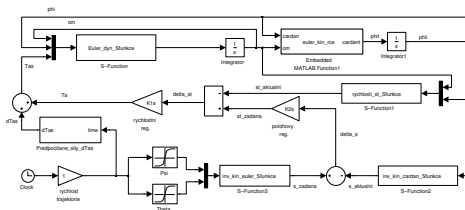


zvolené póly

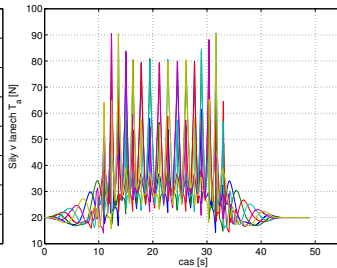
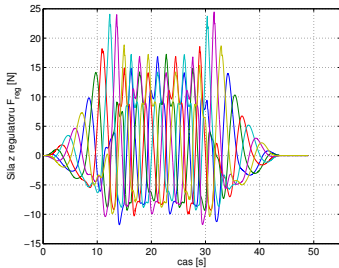
- Řídicí vektor \mathbf{u}_{ss} dán jako $\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K} \cdot \mathbf{x}_{ss} + \mathbf{w} \rightarrow$
 $\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{x}_1 - \mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{x}_2 + \mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{x}_{2z}$
- Dosažením za stavy dostaneme: $\mathbf{u}_{ss} = \mathbf{K}_1 \cdot (-\dot{\varphi}) + \mathbf{K}_2 \cdot (\varphi_z - \varphi)$
- Převedení na polohy vozíků: $\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K}_1 \cdot \frac{\partial Q}{\partial \dot{\mathbf{s}}} \cdot \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{K}_2 \cdot \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{s}_z} \cdot \Delta \mathbf{s}$
- Nové matice zesílení $\mathbf{K}_{1s} = \mathbf{K}_1 \cdot \frac{\partial Q}{\partial \dot{\mathbf{s}}}$ a $\mathbf{K}_{2s} = \mathbf{K}_2 \cdot \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{s}}$ \rightarrow
 $\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K}_{1s} \cdot \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{K}_{2s} \cdot \Delta \mathbf{s}$
- Řídicí vektor \mathbf{u}_{ss} v kaskádní regulaci dán jako:
 $\mathbf{u}_{ss} = -\mathbf{K}_{1s}^K \cdot \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{K}_{1s}^K \cdot \mathbf{K}_{2s}^K \cdot \Delta \mathbf{s},$
porovnáním získáme matice: $\mathbf{K}_{1s}^K = \mathbf{K}_{1s}, \mathbf{K}_{2s}^K = -\mathbf{K}_{1s}^{-1} \cdot \mathbf{K}_{2s}$
- Z matic \mathbf{K}_{1s}^K a \mathbf{K}_{2s}^K vybereme pouze diagonální prvky \rightarrow představují
proporcionální zesílení polohových a rychlostních regulátorů

Simulace modelu s navrženými regulátory

Model mechanismu:

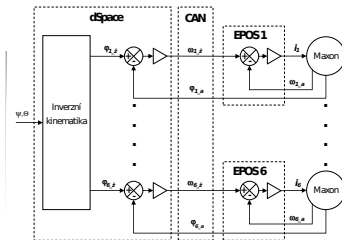
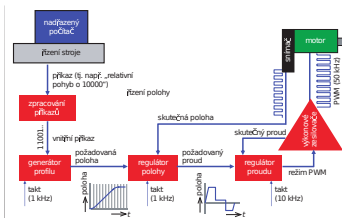


Výsledky simulace:

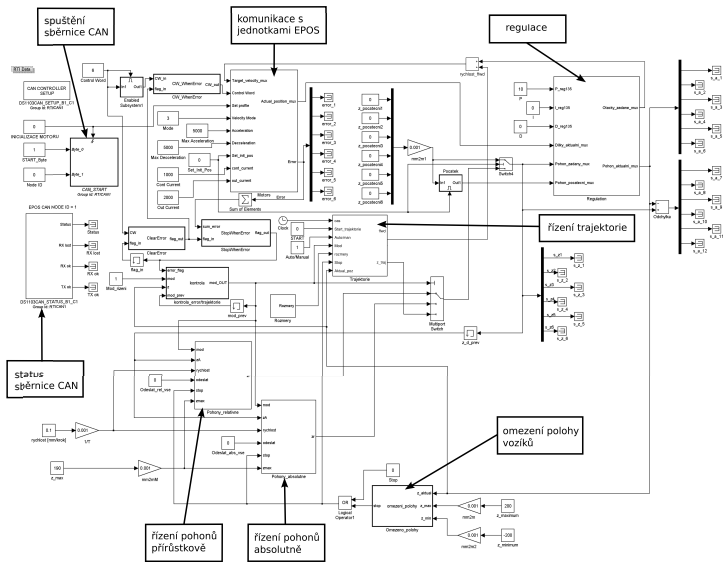


Řízení mechanismu

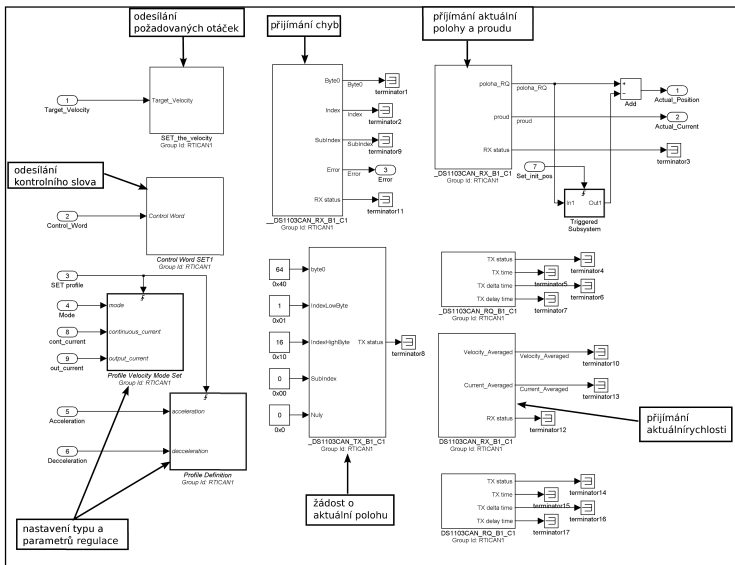
- stejnosměrné motory MAXON
- řídicí jednotky EPOS 24/5
- real-time procesor dSpace DC-1103

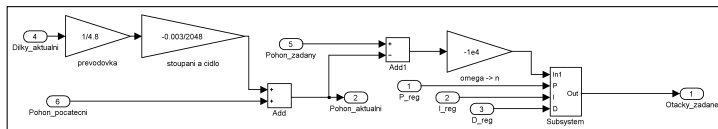


Řídicí program

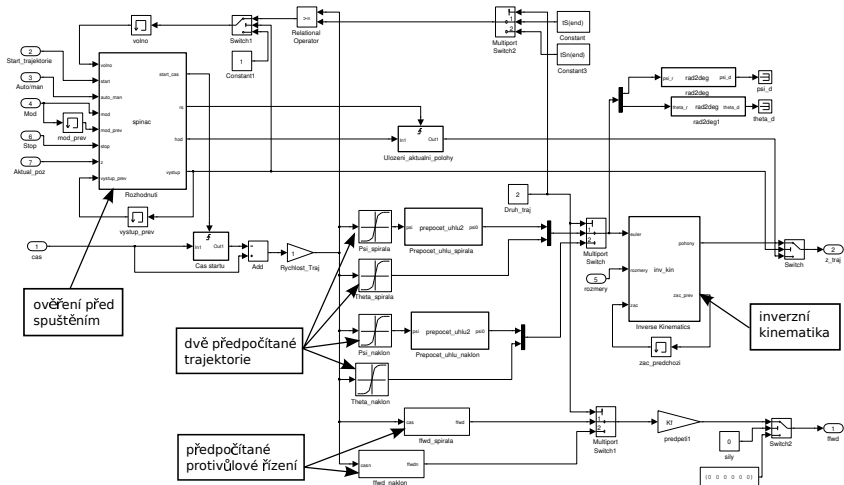


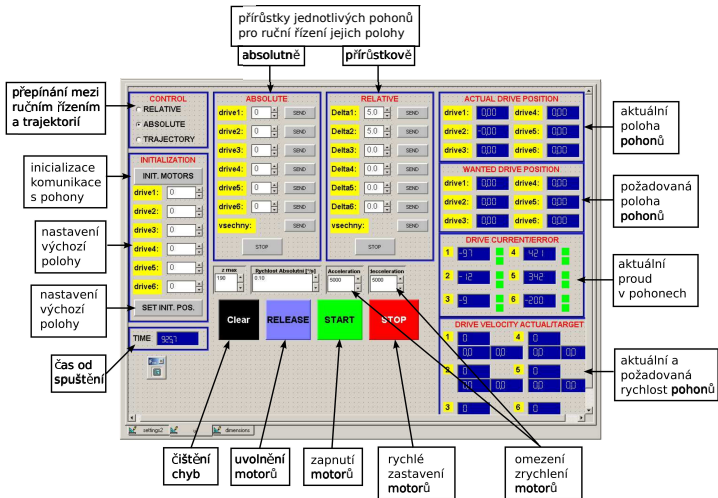
Komunikace s jednotkami EPOS





Trajektorie





The screenshot shows a control interface for a motor system. It includes several data panels and control elements:

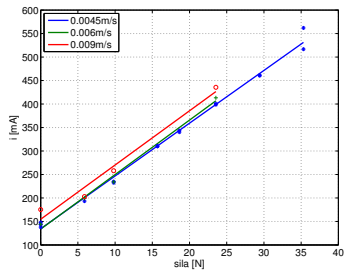
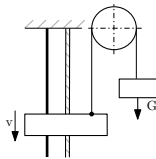
- INITIALIZATION:** Contains fields for 'INIT. MOTORS' (drive1-6) and 'SET INIT. POS.' (Sily, Bez sd).
- ACTUAL DRIVE POSITION:** Shows current positions for drive1 through drive6.
- CURRENT ERROR:** Shows error values for drive1 through drive6.
- DELTA DRIVE POSITION:** Shows target positions for drive1 through drive6.
- WANTED:** Shows target speed (pal) and angle (theta).
- DRIVE VELOCITY ACTUAL/TARGET:** Shows velocity for drive1 through drive6.
- Control Buttons:** RELEASE (blue), START (green), STOP (red), and a STOP button.
- Time Display:** Shows 'TIME 296'.
- Graphs:** Multiple plots showing 'delta_of_out' vs time for various drives.
- Settings Panel:** Includes 'PPC: lanovy_hexaSphere', 'Start', 'Settings', 'Encoder', 'Axis Encoder', 'Trigger Signal', and 'PPC: Encoder variables from 10'.

Annotations in Czech describe the functions of these elements:

- konstanty polohového PID regulátoru
- omezení maximálního proudu
- zapnutí trajektorie s protivůlovým řízením
- přepínání mezi předpočítanými trajektoriami
- aktuální poloha pohonů
- spuštění trajektorie
- aktuální proud v motorech
- regulační odchylka
- čištění chyb
- rychlost projetí trajektorie
- velikost předeptnutí lan
- požadovaná poloha platformy
- aktuální a požadovaná rychlost pohonů
- nastavení a spuštění zaznamenávání
- inicializace komunikace s pohony
- nastavení výchozí polohy
- zadání výchozí polohy
- uvolnění motorů
- zapnutí motorů
- rychlé zastavení motorů
- zastavení trajektorie
- průběhy zaznamenaných hodnot

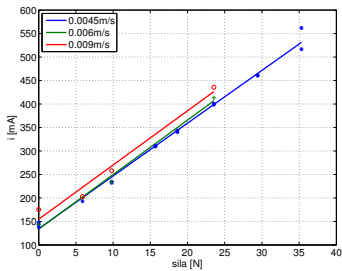
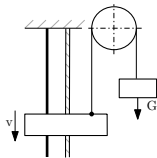
Určení proudové konstanty

• Experiment

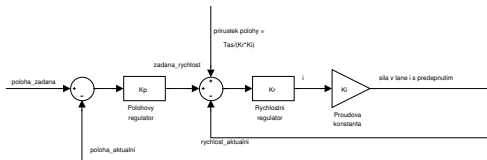


Určení proudové konstanty

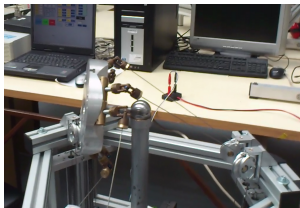
Experiment



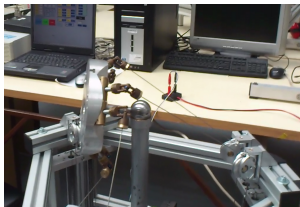
Realizace protivůlového řízení



- bez předeptnutí



- s předeputím



Splněné úkoly:

- Vytvoření simulačního modelu
- Doplnění simulačního modelu o protivůlové řízení
- Návrh nastavení regulátorů v kaskádní regulaci
- Vytvoření řídicího programu a uživatelského prostředí
- Dokončení montáže
- Provedení experimentů