

# Řízení kinematické struktury Sliding Delta

Autor DP: Bc. Tomáš Kozák  
Vedoucí práce: Ing. Jan Zavřel, Ph.D.

# Cíle bakalářské práce

- Vypracovat přehled způsobů řízení paralelních kinematických struktur s nadbytečnými pohony
- Vytvořit model jednoduchého redundantního mechanismu a odsimulovat na něm vybrané způsoby řízení
- Vytvořit simulační model mechanismu Sliding Delta a aplikovat na něj vyzkoušené regulátory
- Oživit laboratorní model mechanismu Sliding Delta

# Obsah prezentace

- Úvod
- Řízení redundantních kinematických struktur
- Matematický model mechanismu 2Delta
- Návrh regulátorů a simulace
- Matematický model mechanismu Sliding Delta
- Úprava regulátorů a simulace
- Oživení laboratorního modelu Sliding Delta
- Závěr

# Úvod

- Tato diplomová práce navazuje na mou bakalářskou práci
  - PKS obecně
  - neredundantní vezrze Sliding Delta
  - simulace řízení
- Hlavním cílem je tedy seznámení se s metodami řízení redundantních struktur a dokončení již započatého projektu

# Metody řízení redundantních PKS

- **Decentralizované řízení**
- **Centralizované řízení**
- **Modelově orientované řízení**
  - inverzní dynamika
  - klouzavé řízení
  - kvadraticky optimální řízení (LQR)
  - prediktivní řízení (MPC)
  - momentové řízení (CTC)
  - ...

# Modelově orientované řízení

## ■ Výhody

- robustní
- využití nadbytečného pohonu
- vyšší dynamika
- vyšší tuhost

## ■ Zvolené přístupy řízení

- LQR, MPC a CTC

# Zvolené metody řízení

## ■ LQR

- optimální řízení (kritérium)
- stavová zpětná vazba

## ■ MPC

- lokální optimalizace kritéria
- linearizace, diskretizace, stavový pozorovatel
- komplikované -> zjednodušená varianta

## ■ CTC

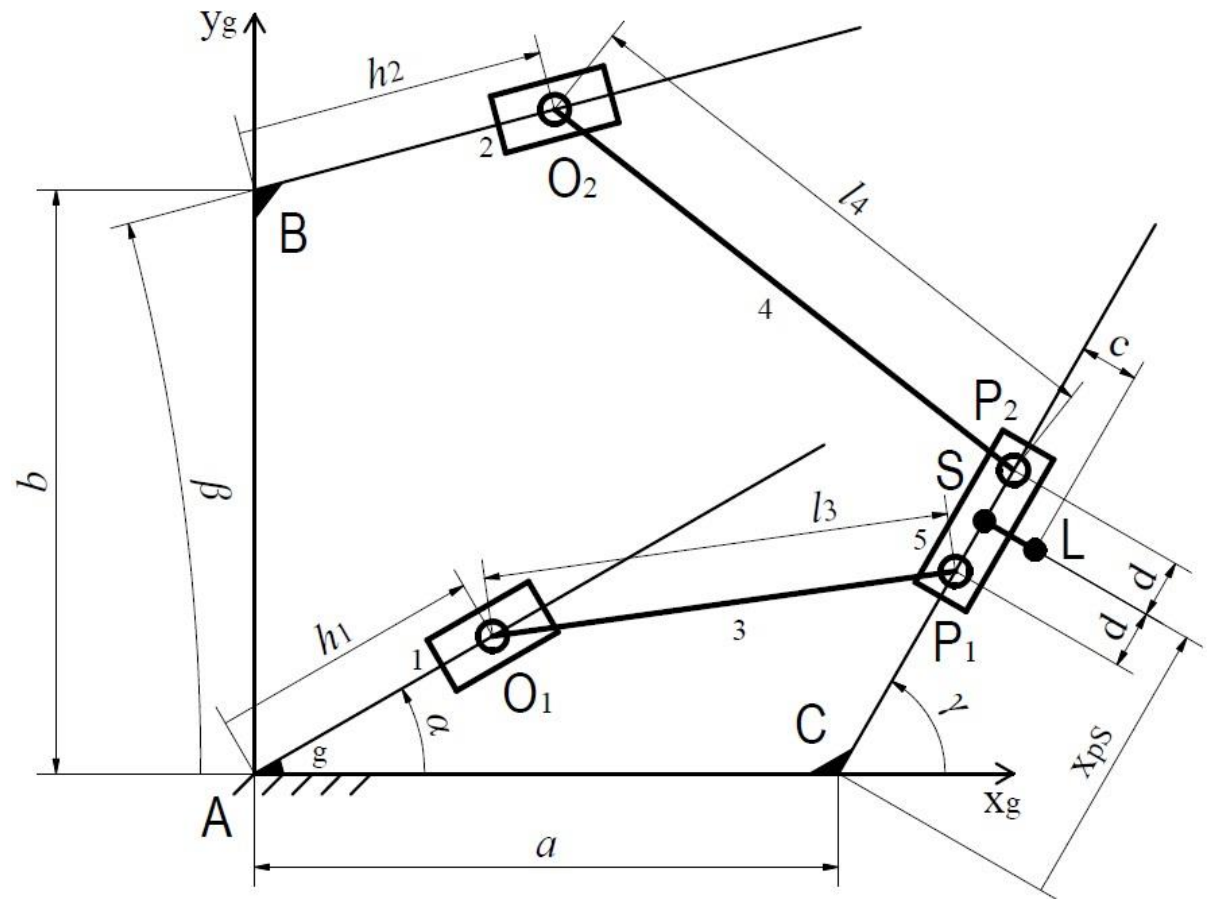
- speciální případ zpětnovazební linearizace
- vnitřní smyčka – inverzní dynamika
- vnější smyčka – PID regulátor

## ■ Pozn.: stavový pozorovatel

# Matematický model mechanismu

## 2Delta

- 1 stupeň volnosti
- 2 pohony
- obecnější 2D varianta Sliding Delt
- LRST převedené do nezávislých souřadnic

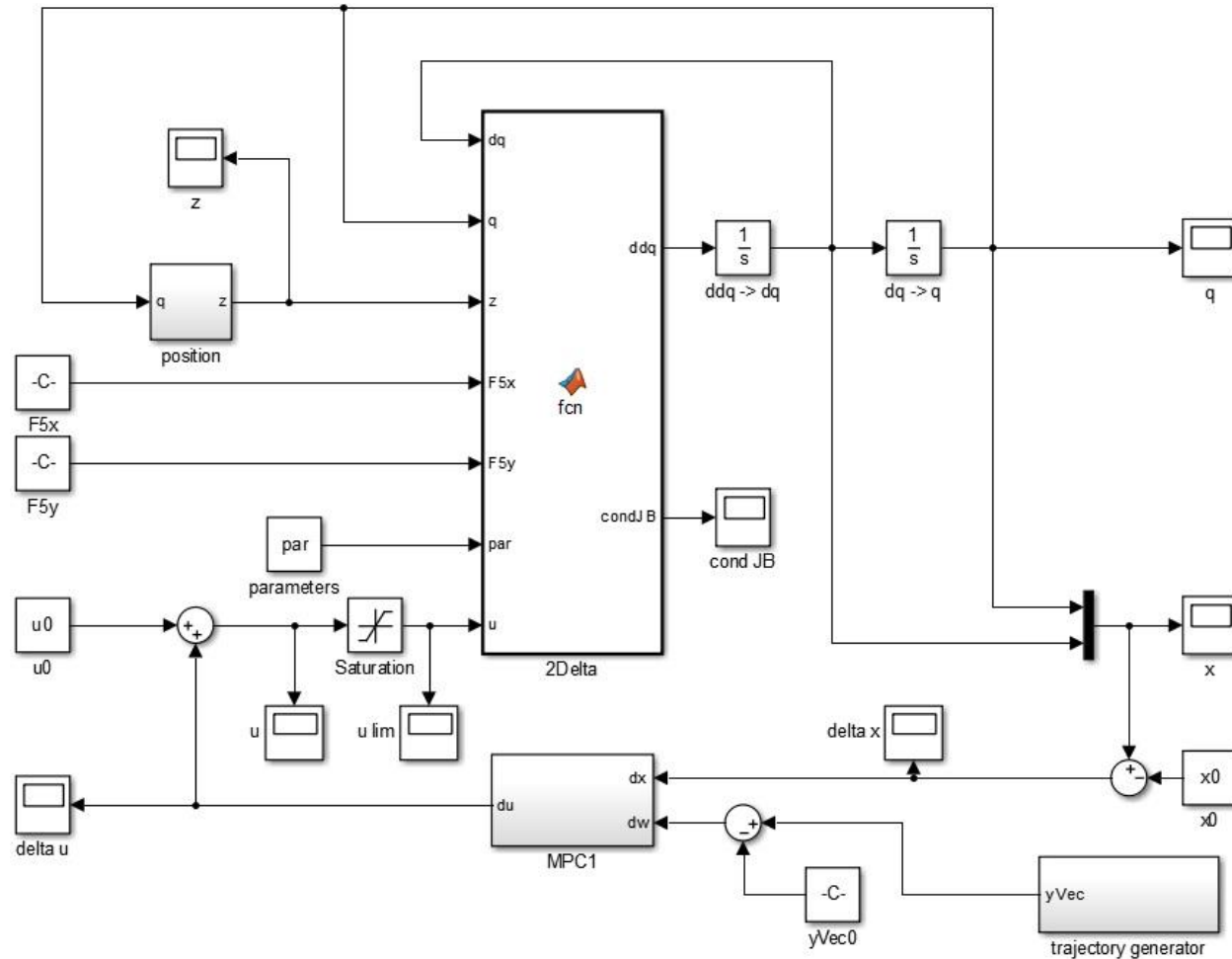




# Návrh regulátorů a simulace

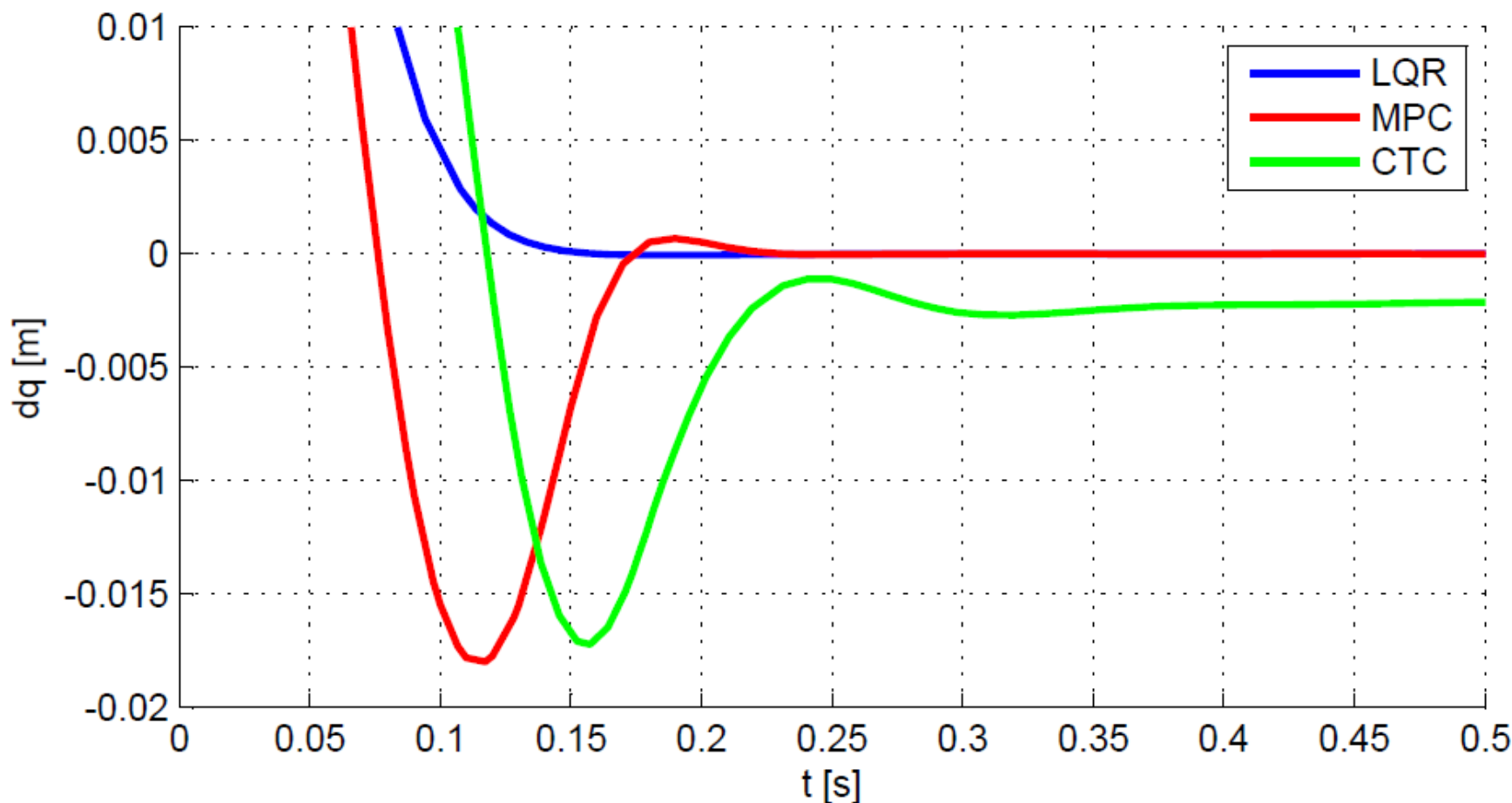
- **Provedení linearizace modelu ve zvoleném bodě**
- **Analýza vlastností lineárního modelu**
  - stabilita, říditelnost a pozorovatelnost
- **Diskterizace lineárního systému pro MPC**
- **Návrh konstant regulátorů (experimentálně)**
- **Simulace stabilizace v rovnovážné poloze**
  - počáteční odchylka polohy platformy
- **Simulace sledování referenční trajektorie**
  - sinusový průběh souřadnice platformy

# Simulace stabilizace 2Delta



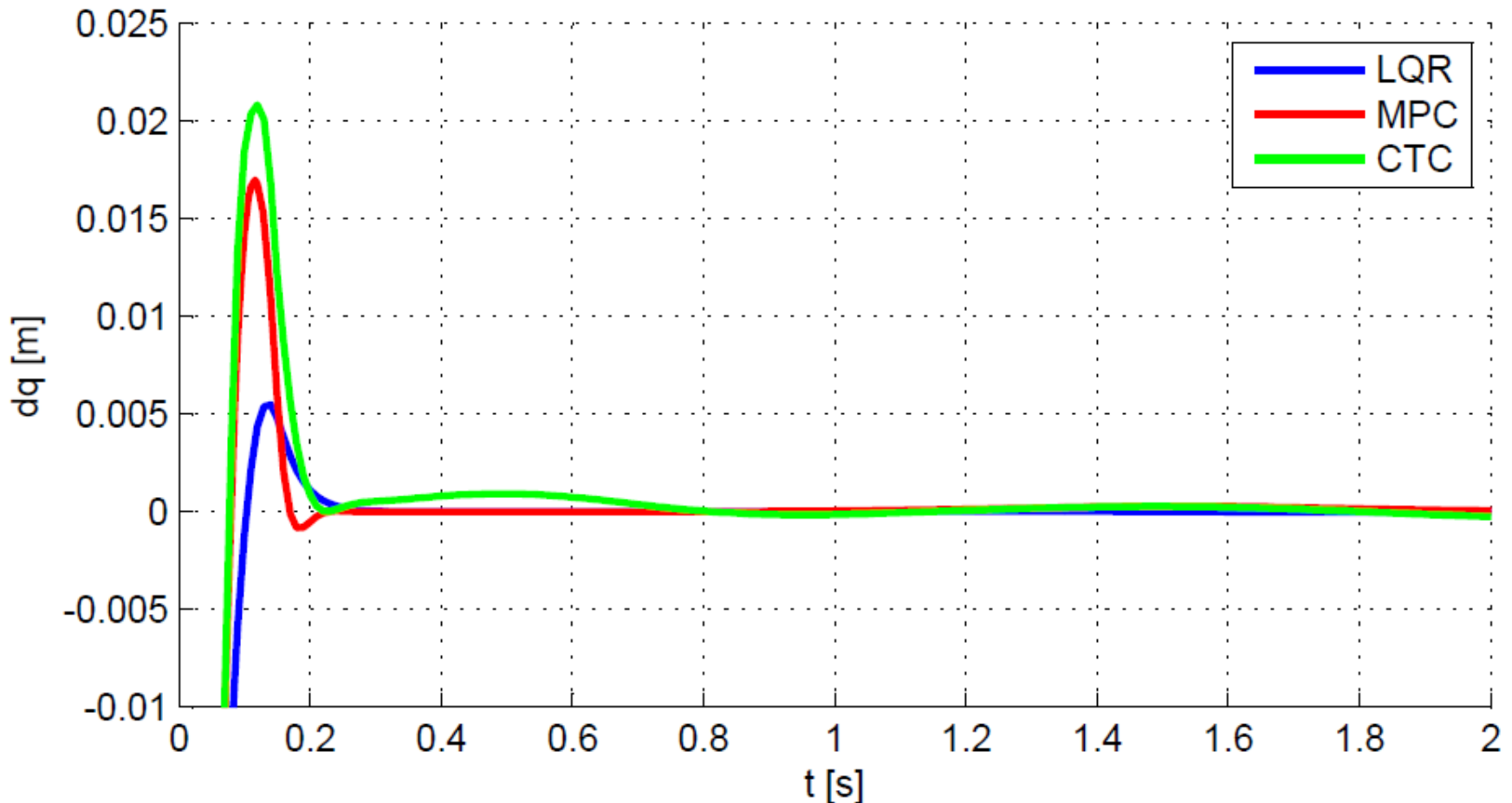
# Simulace stabilizace 2Delta – srovnání regulátorů

Průběh odchylek polohy platformy při stabilizaci ve zvolené poloze



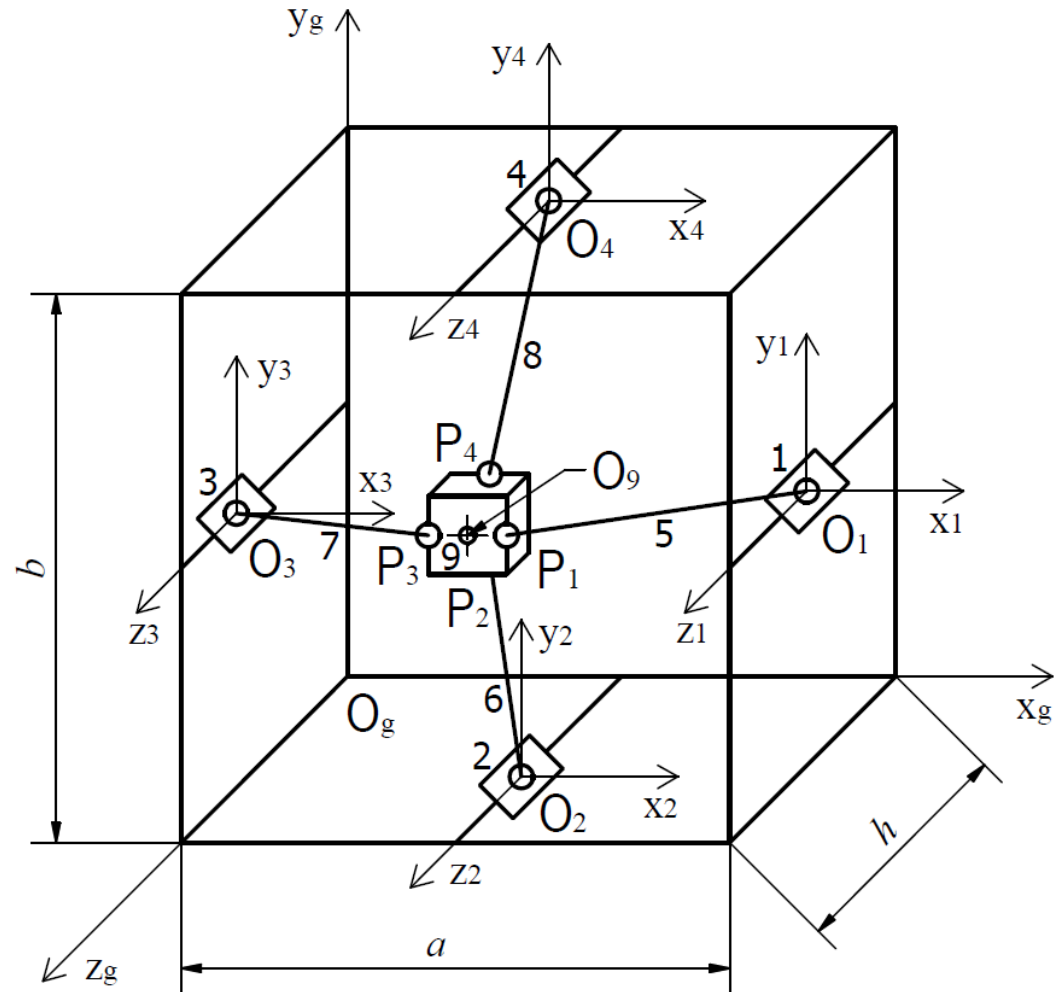
# Simulace sledování trajektorie 2Delta – srovnání regulátorů

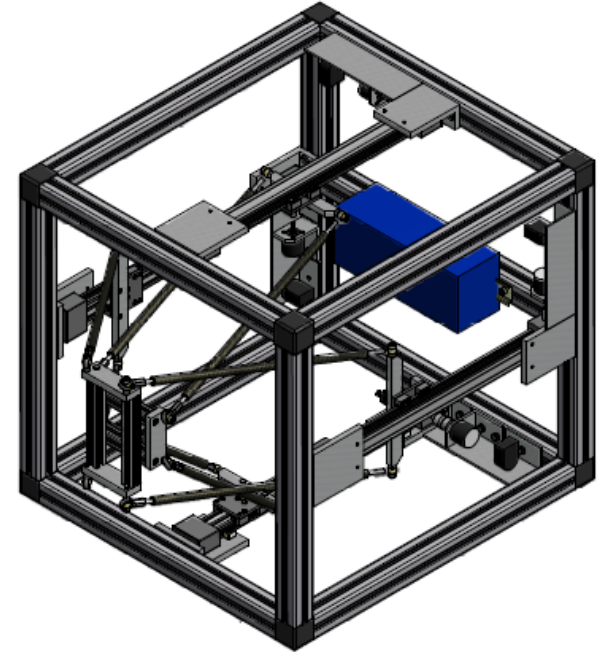
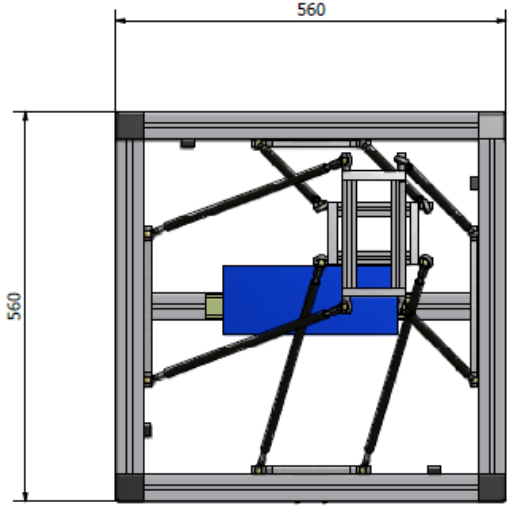
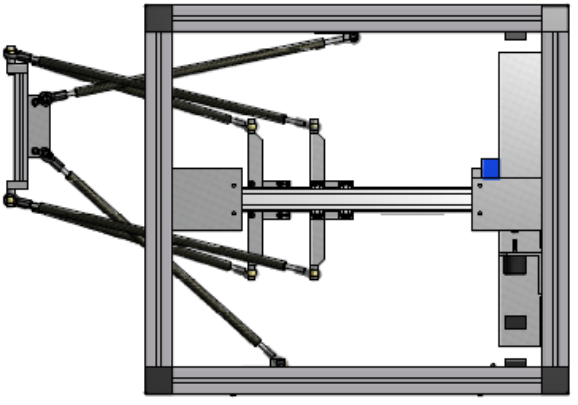
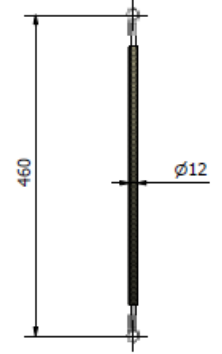
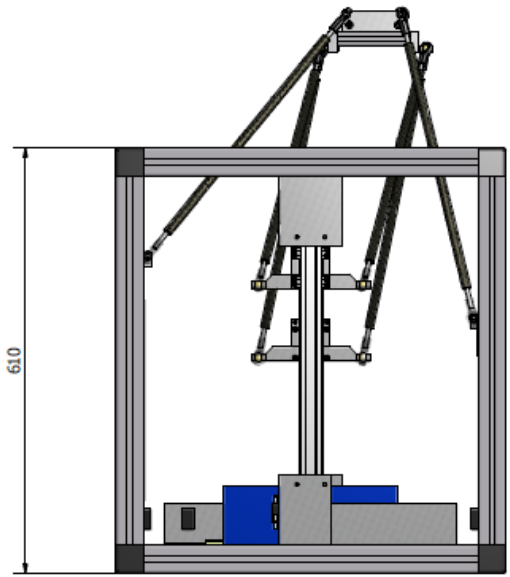
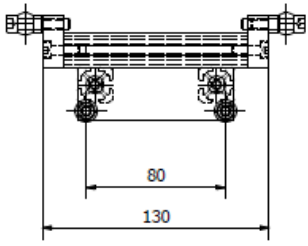
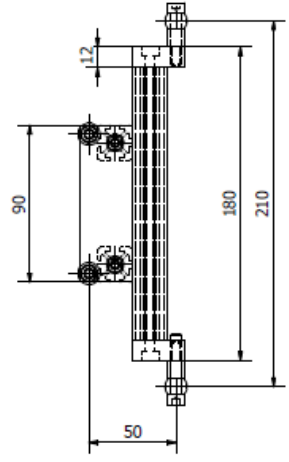
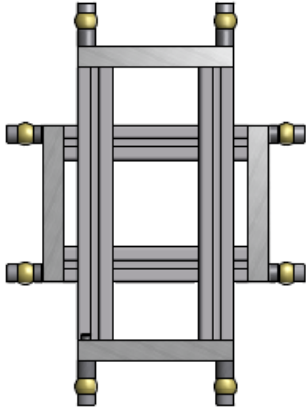
Průběh odchylek polohy platformy při sledování trajektorie



# Matematický model mechanismu Sliding Delta

- 3 stupně volnosti
- 4 pohony
- kinematicky optimalizované rozměry (BP)
- LRST převedené do nezávislých souřadnic

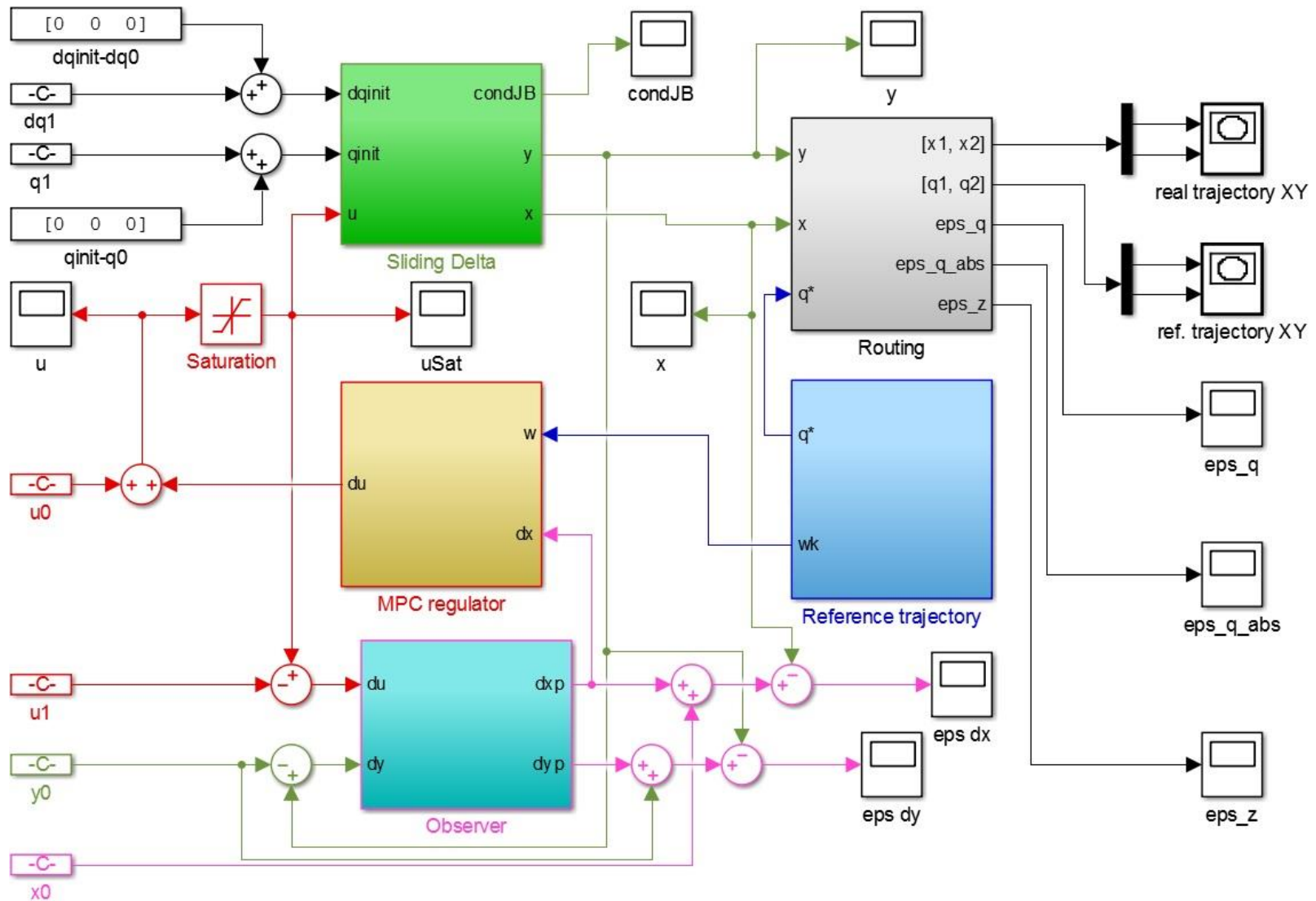




# Úprava regulátorů a simulace

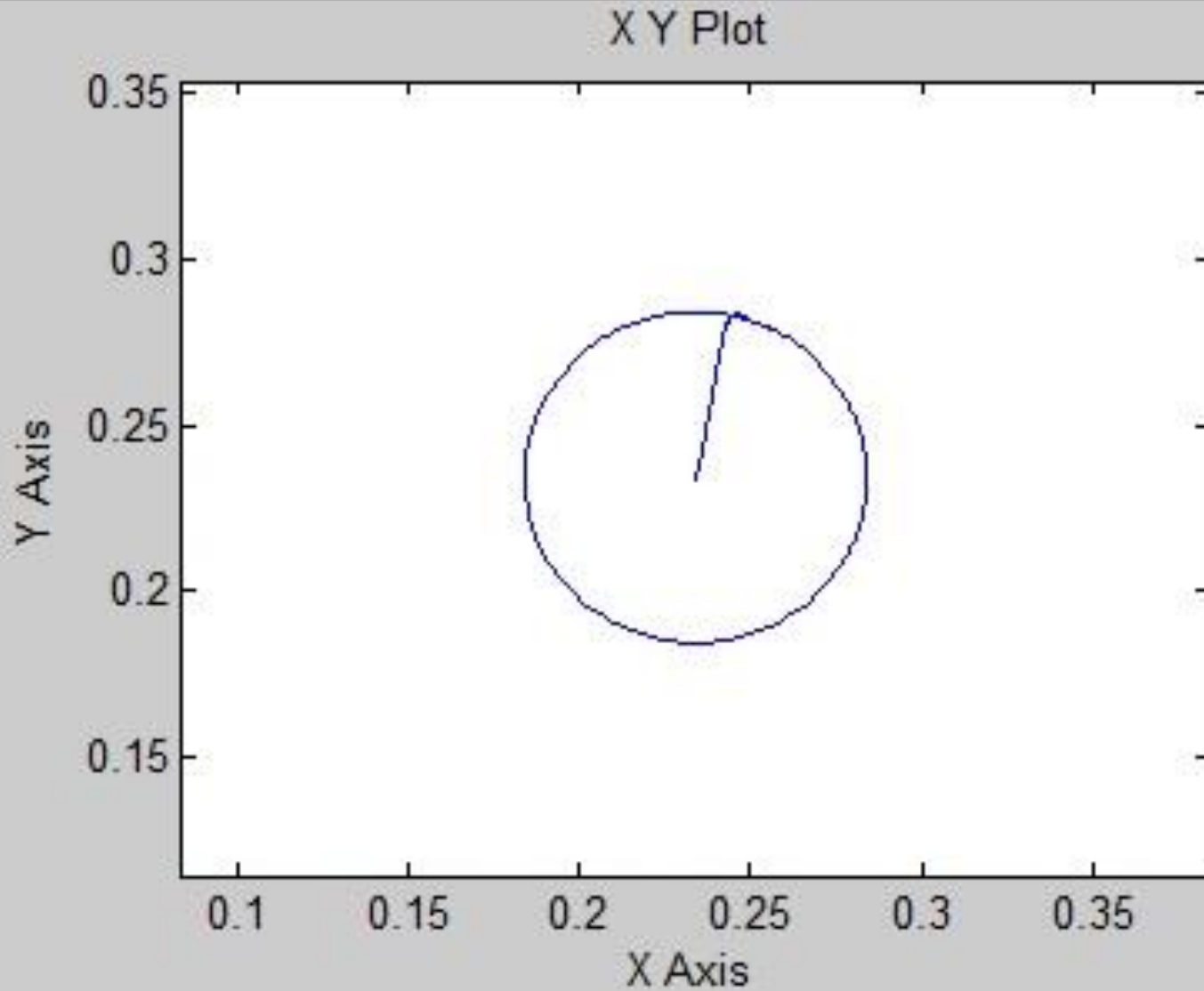
- **Model Sliding Delta převzat z bakalářské práce**
  - rozšířen o původně neuvažovaný vstup
- **Stejný postup úpravy modelu jako v případě 2Delty**
- **Rozšíření regulátorů pro více vstupů a výstupů**
  - Správné skládání matic
- **Návrh stavového pozorovatele**
- **Simulace a ladění regulátorů a pozorovatele**
  - pouze simulace sledování trajektorie
  - kruhová trajektorie v rovině platformy

# Simulac Sliding Delta



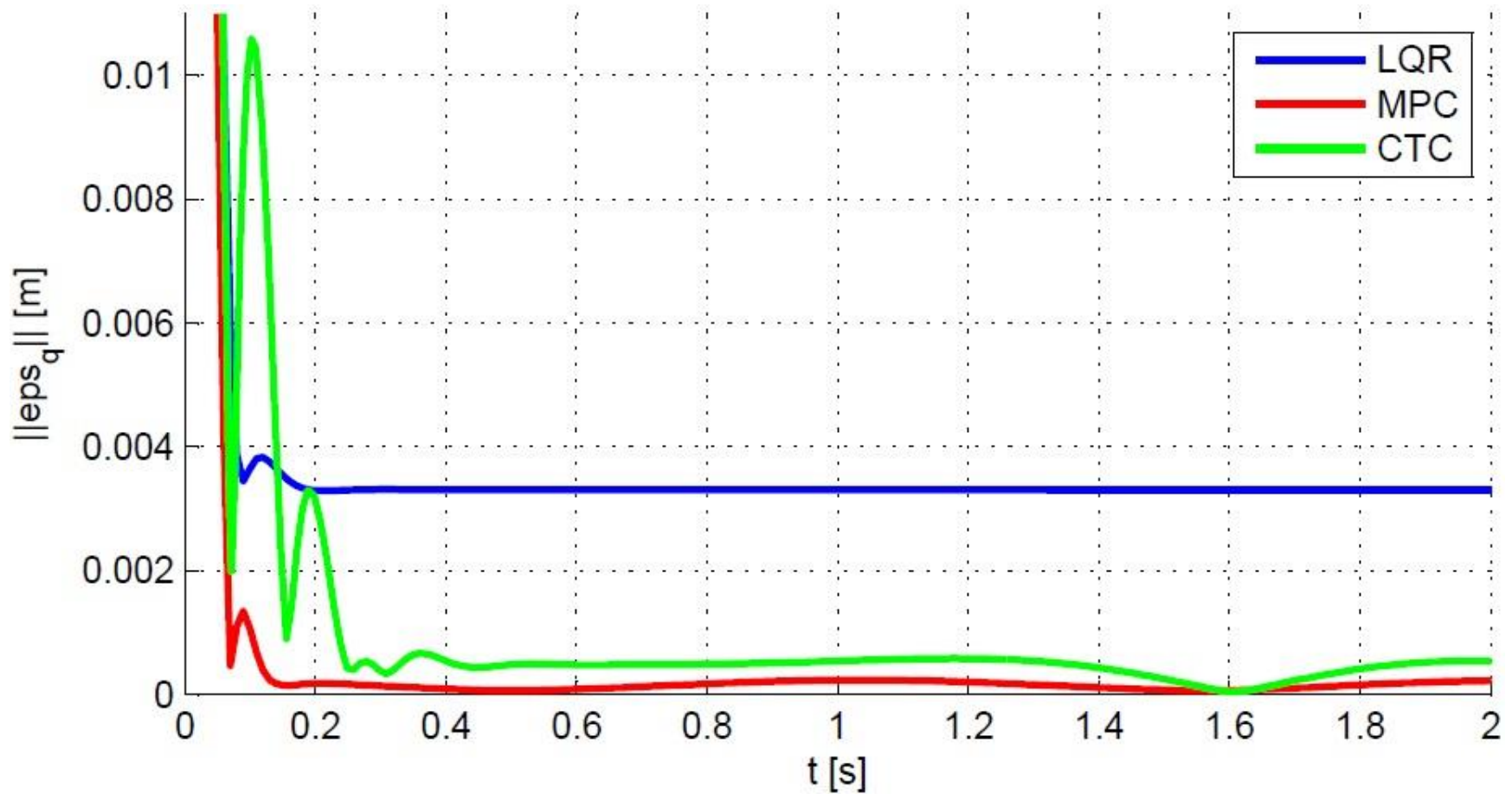


# Simulace Sliding Delta – MPC

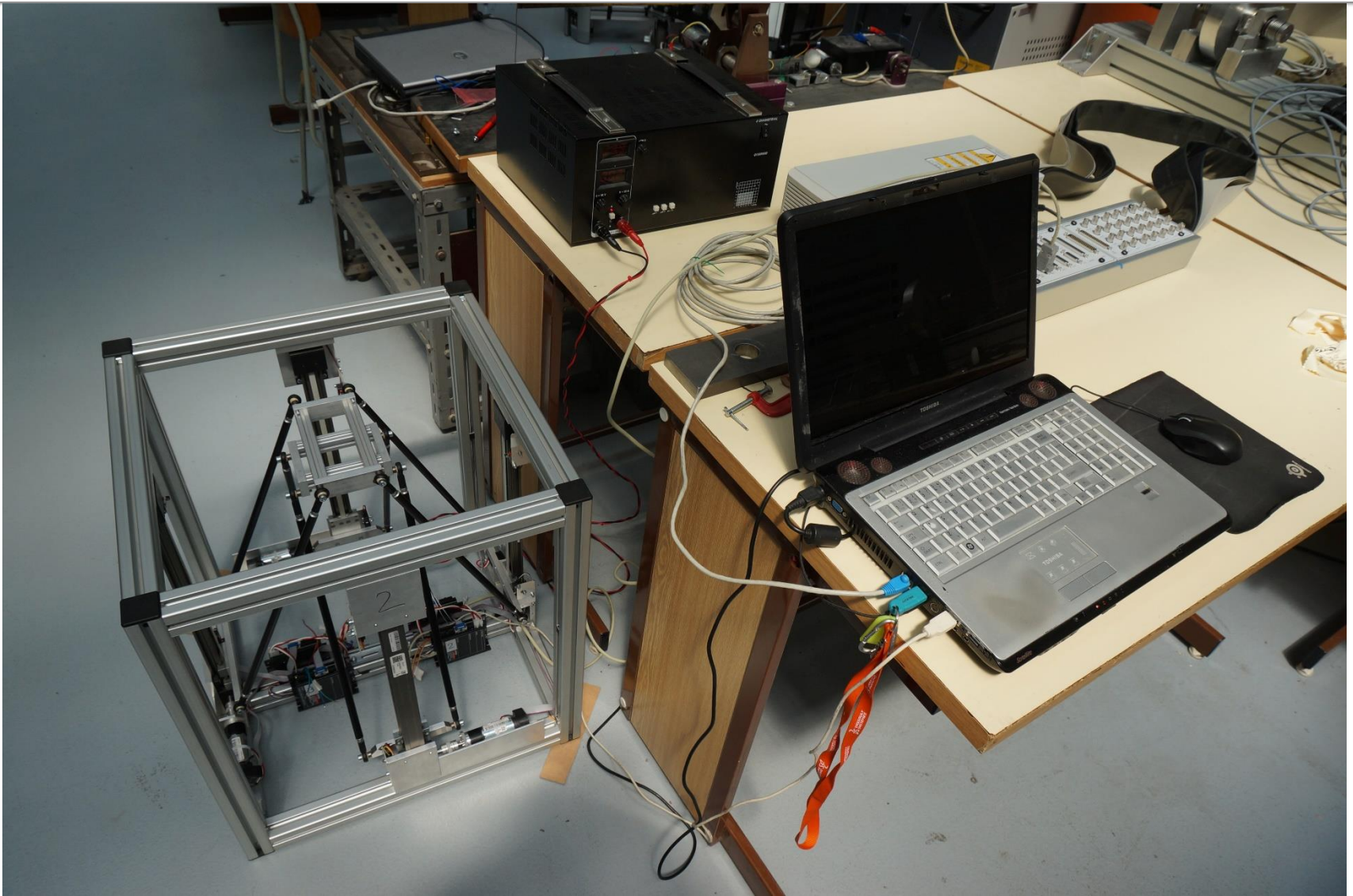


# Simulace Sliding Delta – srovnání regulátorů

Průběh odchylek polohy platformy při sledování trajektorie



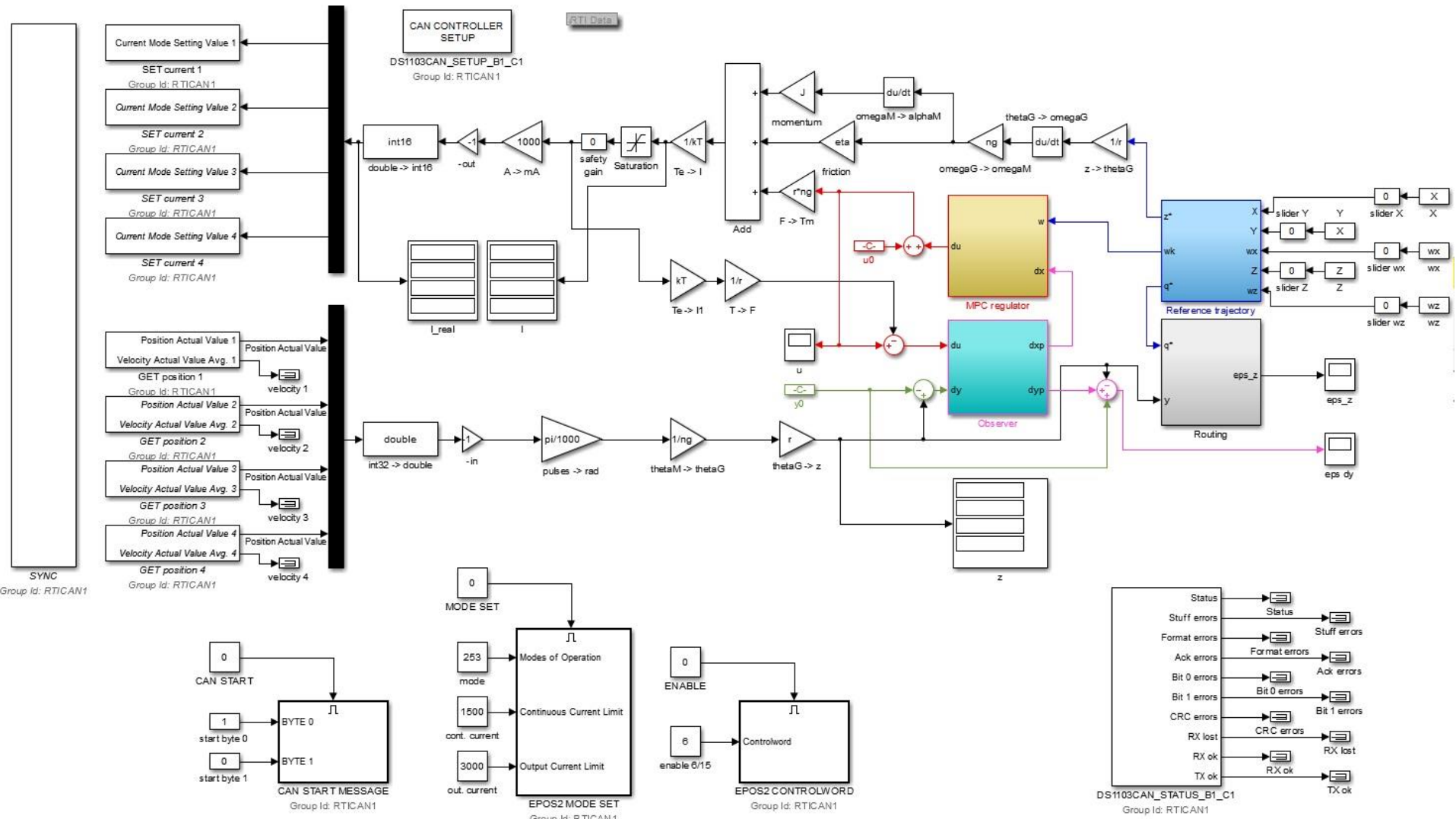
# Oživení laboratorního modelu Sliding Delta



# Oživení laboratorního modelu Sliding Delta

- **Simulace provedeny v prostředí Matlab**
  - změna orientace mechanismu
  - navíc vytvořen jednoduchý model DC motoru
- **Řízení DC motorů Maxon – jednotky Epos**
  - proudové (momentové) řízení
  - komunikace prostřednictvím sběrnice CAN
- **Pro oživení zvolen real-time procesor dSpace**
  - úprava modelu regulátoru MPC v Matlabu pro generování spustitelného kódu
  - perioda regulátoru 4ms
- **Ovládací rozhraní vytvořeno v Control Desku**

# Oživení laboratorního modelu Sliding Delta



# Oživení laboratorního modelu Sliding Delta

1 Layout1MPC 2 Layout1MPC\_measurement

## Polohy vozíků lineárních vedení

z/ln1[0]]	0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320 340	E-3	←	eps_z/ln1[0]	+0.0009517934
z/ln1[1]]	0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320 340	E-3	←	eps_z/ln1[1]	+0.0009124184
z/ln1[2]]	0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320 340	E-3	←	eps_z/ln1[2]	+0.0010080434
z/ln1[3]]	0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320 340	E-3	←	eps_z/ln1[3]	+0.0008955434

Timer Task 1/sampleTime: 0.004  
Timer Task 1/taskCallCount: 94836

## Nastavení parametrů kruhové trajektorie

friction/Gain: 1E-05

Slider\Gain/Gain[]	X	Slider\Gain/Gain[]	Z
Slider\Gain/Gain[]	Y	Slider\Gain/Gain[]	wZ
Slider\Gain/Gain[]	wX	Slider\Gain/Gain[]	

## Požadované hodnoty proudů

I/ln1[0]	I/ln1[1]
+0.557	+0.419
I/ln1[2]	I/ln1[3]
+0.523	+0.430

## Bezpečnostní omezení proudů

Slider\Gain/Gain[]: 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0

enable 6//15/Value:  DISABLE  ENABLE

## Skutečné proudy

L_real/ln1[0]	L_real/ln1[1]
-557	-420
L_real/ln1[2]	L_real/ln1[3]
-523	-430

## CAN START/Value

CAN START

## MODE SET/Value

MODE SET

mode/Value	cont. current/Value	cont. current/Value
253	1500	1500
	out. current/Value	out. current/Value
	3000	3000

## ENABLE/Value

CONTROLWORD: +15

## DB1103CAN\_STATUS\_B1\_C1/Status

0

## DB1103CAN\_STATUS\_B1\_C1/Status error

0

## DB1103CAN\_STATUS\_B1\_C1/Format error

0

## DB1103CAN\_STATUS\_B1\_C1/Idk error

35080

## DB1103CAN\_STATUS\_B1\_C1/Idl error

0

## DB1103CAN\_STATUS\_B1\_C1/Idr error

0

## DB1103CAN\_STATUS\_B1\_C1/Idc error

0

## DB1103CAN\_STATUS\_B1\_C1/RX lost

0

## DB1103CAN\_STATUS\_B1\_C1/RX ok

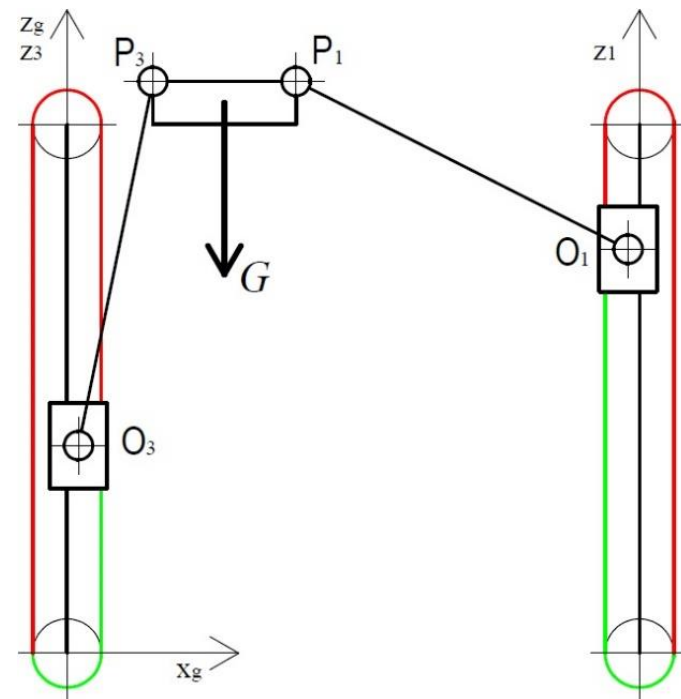
1000 19

## DB1103CAN\_STATUS\_B1\_C1/TX ok

470434

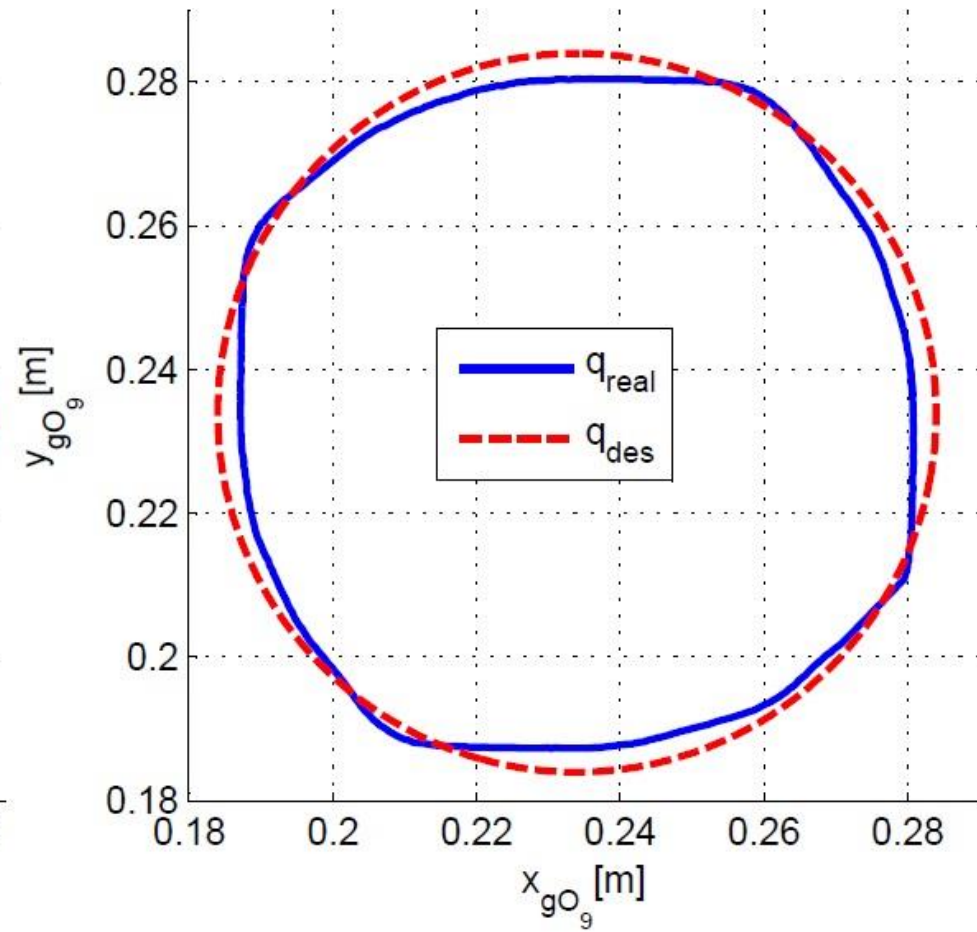
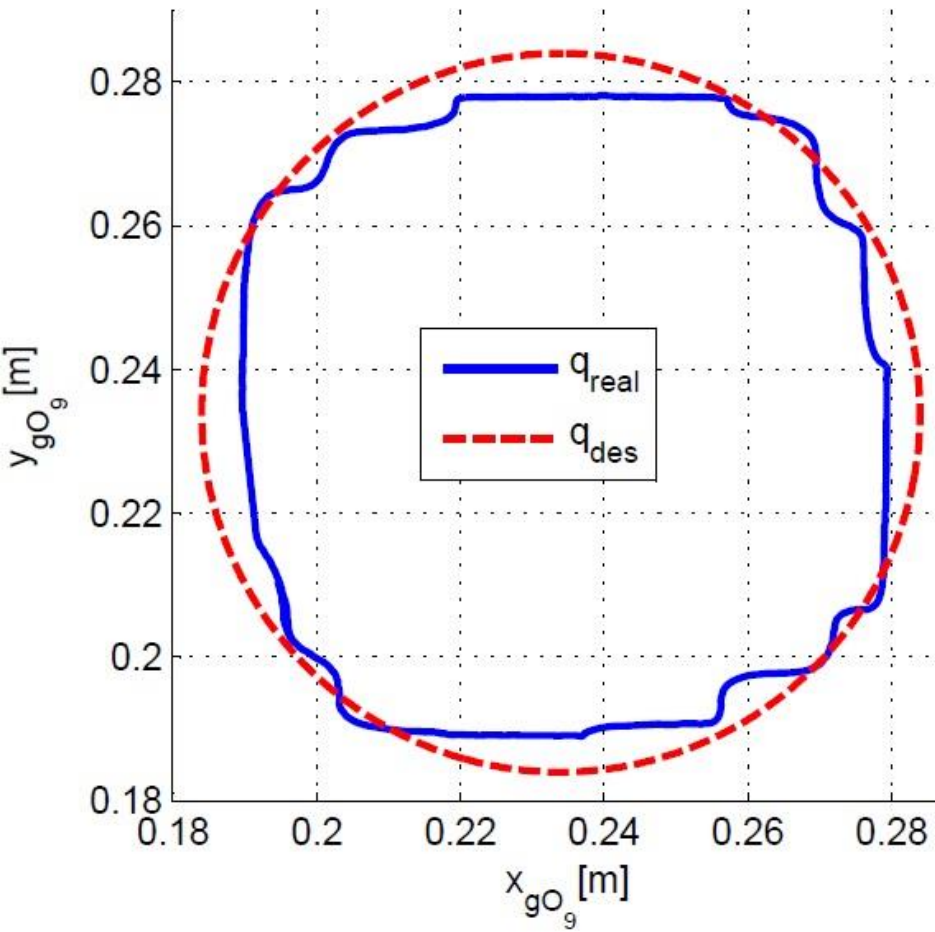
# Oživení laboratorního modelu Sliding Delta

- **Experimenty ukázaly značné kmitání mechanismu**
  - zanedbání poddajností
  - konstrukční nedostatky
- **Nebylo možné pracovat s předepětím**
  - zanedbání pasivních odporů
  - nedostatečný moment pohonů
- **Po zatížení platformy**
  - došlo k přeladění systému
  - přetěžování pohonů



# Oživení laboratorního modelu Sliding Delta

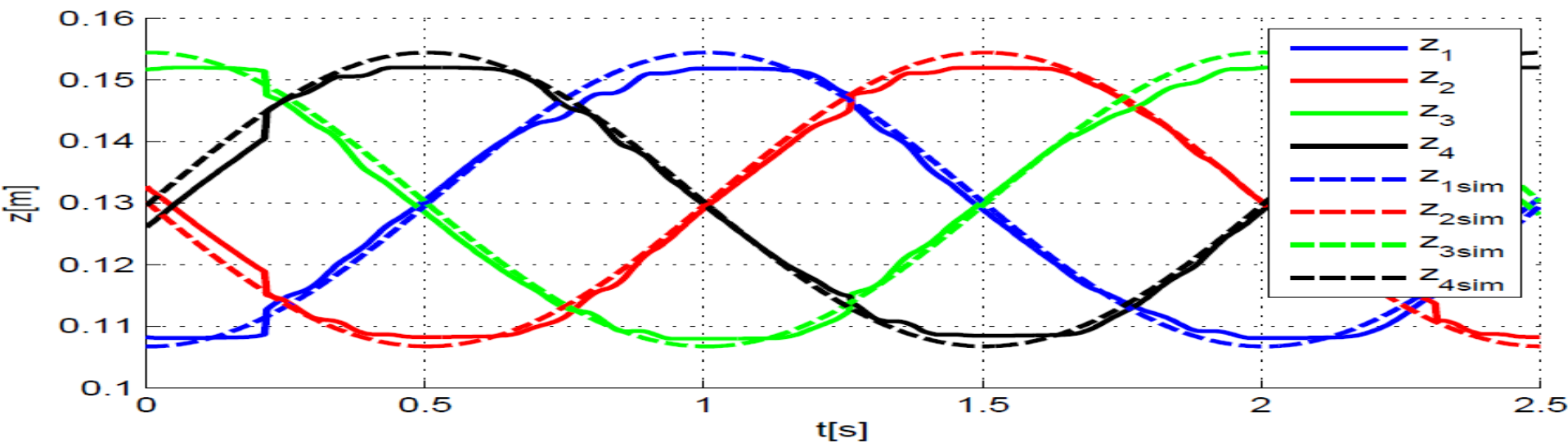
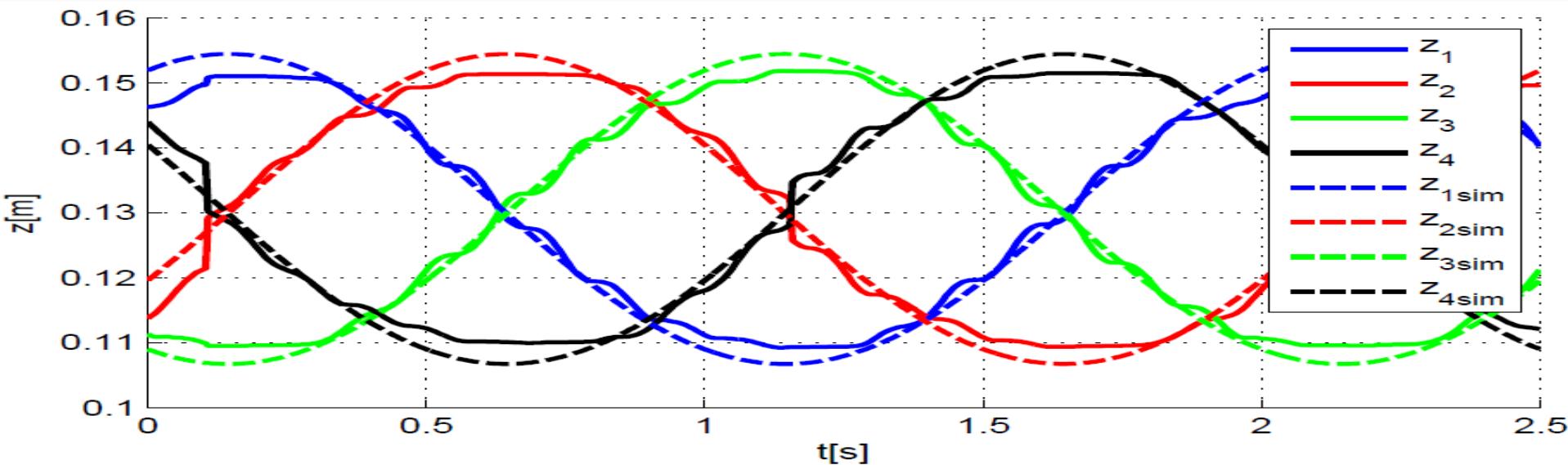
Sledování trajektorie, v pravo po zatížení platformy



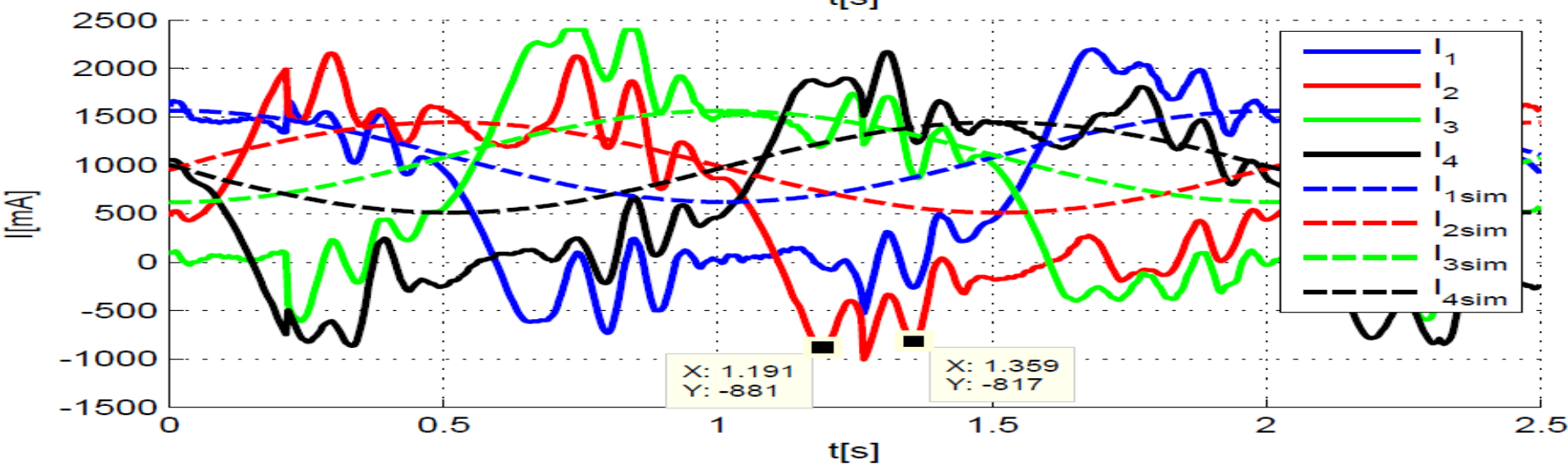
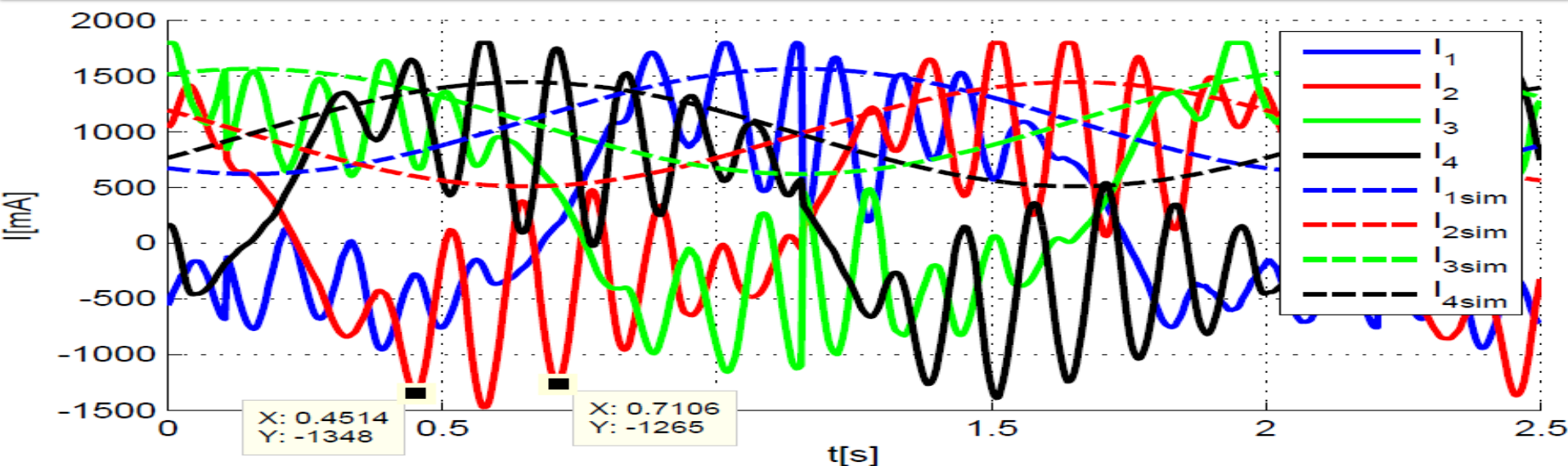


# Oživení laboratorního modelu

## Sliding Delta – souřadnice pohonů



# Oživení laboratorního modelu Sliding Delta – proudy v pohonech



# Závěr

- **Postupně byly splněny všechny cíle BP**
  - vypracován přehled různých způsobů řízení
  - vytvořen model 2Delta a provedena simulace řízení
  - vytvořen model Sliding Delta a provedena simulace
  - oživen laboratorní model Sliding Delta
- **Další možný postup**
  - použití tužších pohonů (kuličkový šroub, ...), nebo alespoň výměna převodovek
  - zahrnutí poddajností do matematického modelu a provedení jejich identifikace
  - provedení kalibrace mechanismu
  - rozšíření MPC o linearizaci v každém kroku a o omezení akční veličiny

**Děkuji za pozornost**

# **Vyjádření k připomínkám oponenta**

# Jak byla provedena kalibrace - identifikace parametrů řízené struktury?

- Parametry vychází z návrhu mechanismu v rámci bakalářského projektu, kalibrace provedena nebyla
- Kalibrace byla v plánu při dostatku času pro zlepšení přesnosti řízení, ale zhodnotili jsme, že v současném stavu nemá smysl
- S ohledem k závěrům práce by bylo vhodné provést identifikaci tuhostí při použití poddajného modelu

# Proč testovací trajektorie začíná skokovým požadavkem (počáteční poloha ve středu kruhové trajektorie)?

- Otestování skokové odezvy systému s ohledem na experimenty s laboratorním modelem
  - nebyla implementována inicializační sekvence pro najetí robota do určité polohy
  - bylo nepravděpodobné, že se podaří robota umístit do konkrétní polohy – nevyhnutelný skok na počátku pohybu

**Proč je pro MPC potřeba použít jinou metodu „linearizace“? Je tento rozklad bezpečný pro dosažení stabilního řízení? Viz. str. 9**

---



**Na straně 44 je zmíněna dynamická  
kompenzace LQR – co se tím přesně míní?**

---