

Řízení modelu 3D jeřábu pomocí PID regulátorů

Řízení mechatronické soustavy

Pokyny pro laboratorní práci, zpracování výsledků
a tvorbu technické zprávy

Ing. Libor Kupka, Ph.D.



Řízení modelu 3D jeřábu pomocí PID regulátorů

Řízení mechatronické soustavy

Hlavní úkol

Základní ovládání modelu 3D jeřábu od spol. INTECO s využitím Matlabu a Simulinku, řízení s využitím PID regulátorů, sledování trajektorií ve tvaru Lissajousových obrazců – Blackburnovo kyvadlo.

Doba nutná k vyřešení

4 hodiny práce v laboratoři, 2 hodiny na zpracování výsledků a vytvoření protokolu

1 Zadání

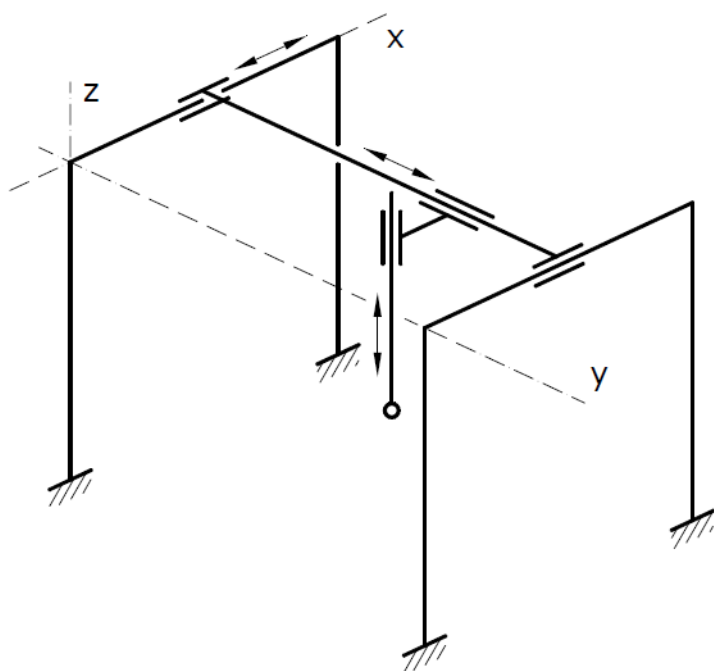
Úkoly:

1. Seznamte se se laboratorním zařízením 3D Crane od spol. INTECO. Prostudujte popis v kapitole 2.1 a dokumentaci k zařízení.
2. Provedte konfiguraci zařízení dle pokynů v kapitole 2.2 a s využitím testovací aplikace USB_Crane3D_BasicTest otestujte postupně funkci limitních spínačů a poté vyzkoušejte přesun suportu do výchozí a středové polohy a funkci sledování úhlu závěsu.
3. S využitím aplikace USB_Crane3D_first otestujte funkci PID regulátoru polohy ve směru osy X s následnou regulací úhlu břemene. Dle pokynů v kapitole 3 realizujte postupně několik experimentů a provedte seřízení obou regulátorů. Sledujte vliv nastavení na regulační odchylku.
4. Zaznamenejte minimálně dva experimenty – v souladu s pokyny v kapitole 3.2 uložte průběhy s využitím bloků Scope a zároveň provedte zpracování uložených dat.
5. S využitím aplikace USB_Crane3D_impres realizujte experimenty zaměřené na seřízení PID regulátorů polohy vozíku ve směru os X a Y a polohy břemene ve směru osy Z. Provedte záznam experimentu a zpracujte naměřená data v souladu s pokyny v kapitole 4.
6. Změňte buzení modelu: v osách X a Y na harmonické s vhodnou amplitudou a frekvencí, osa Z zůstane bez změny polohy. Frekvence harmonického buzení v osách X a Y měňte vhodným způsobem tak, aby břemeno opisovalo Lissajousovy křivky.
7. Poměr frekvencí volte nejprve 1 ku 2. Vyzkoušejte různá nastavení PID regulátorů polohy v osách X a Y, regulátory úhlu břemene ponechte vyřazené.

8. Zznamenejte a vykreslete:
 - a) stavovou trajektorii polohy vozíku (žádanou i skutečnou polohu v jednom grafu),
 - b) diagram akčních veličin (dle pokynů v kapitole 5.1),
 - c) diagram úhlů břemene ve stejném grafu s diagramem akčních veličin,
 - d) průběhy nestabilizované a stabilizované výchylky břemene v rovině XY.
9. Vyřadte z funkce regulátory úhlu břemene a postupně měňte frekvence buzení tak, aby byly zajištěny jejich poměry: 3 ku 2, 4 ku 5, 3 ku 4, 5 ku 3 a 1 ku 1. Zznamenejte a poté zpracujte a vykreslete průběhy odpovídajících Lissajousových obrazců.
10. O provedeném řešení vypracujte přehlednou technickou zprávu, jejíž součástí budou zejména hodnoty parametrů regulátorů a záznamy experimentů ve formě tabulek a grafů.

2 Popis laboratorního zařízení a základní testy

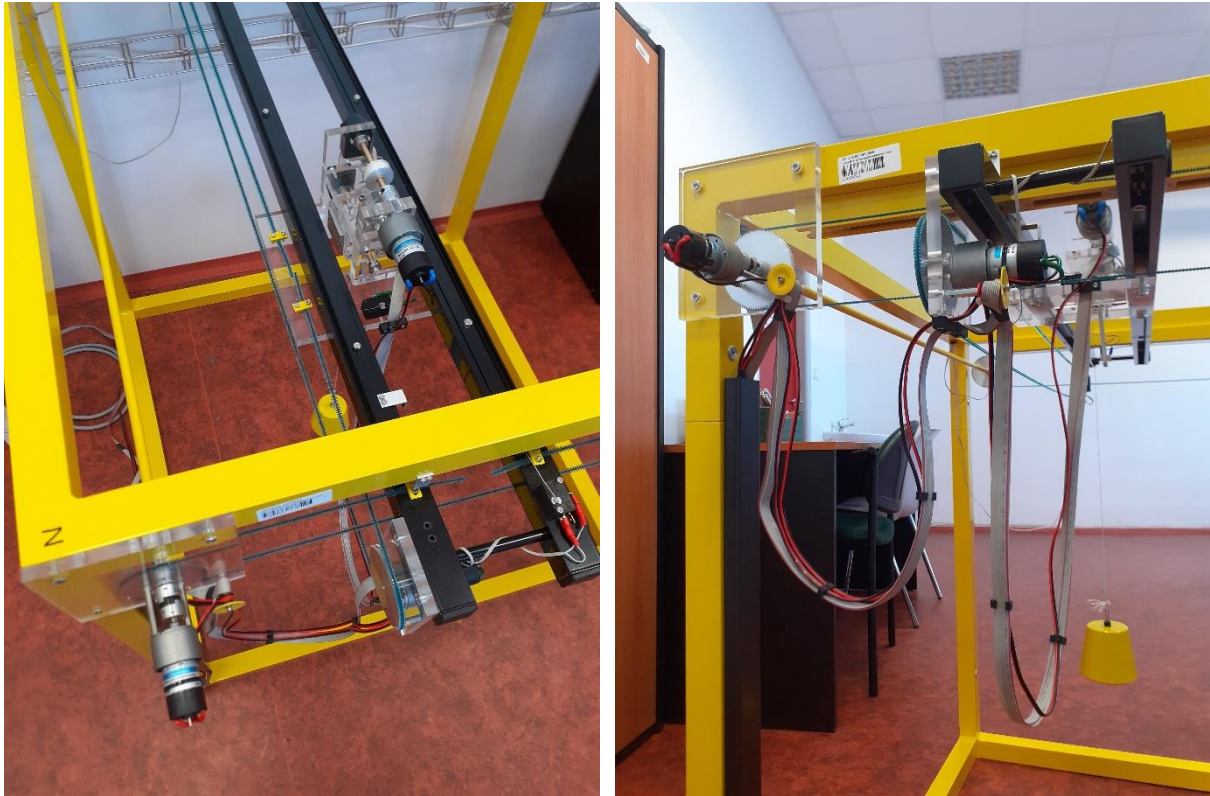
Soustava 3D Crane (Inteco, 2024a) představuje kartézskou kinematickou portálovou (tzv. gantry) strukturu, jejíž základní schéma je na obr. 1. Oproti uvedené základní struktuře je ale u této soustavy břemeno zavěšené na vlákně a není tedy ve svislém směru vedeno.



Obr. 1 – Schéma portálové kinematické struktury typu gantry (Skařupa, 2007)

Soustava 3D Crane se skládá z jeřábového mostu s pojezdovými příčníky a vozíku se zdvihacím mechanismem. Břemeno je zavěšené na lanku navinované pomocí motoru umístěném na vozíku a může být zvedáno či spouštěno ve směru osy Z. Most i vozík jeřábu se pohybují ve směru osy X. Vozík se pohybuje horizontálně po mostě ve směru osy Y. K pohonu v uvedených osách slouží 3 stejnosměrné motory. Soustava je osazena 5 inkrementálními enkodéry, které měří s rozlišením 4096 pulsů na otáčku polohu v osách X, Y a Z a úhly natočení břemene. Řídící

počítač je vybaven RT-DAC/USB/PCI/PCIe víceúčelovou digitální I/O deskou, která komunikuje s výkonovou jednotkou. Celá logika aktivace a čtení signálů z enkodérů a generování odpovídajících sekvencí pulzů PWM řídících DC motory je nakonfigurovaná v čipu Xilinx na desce RT-DAC. Všechny funkce desky jsou přístupné pomocí sady nástrojů 3DCrane, které se spouští přímo v prostředí MATLAB & Simulink. (Inteco, 2024c)

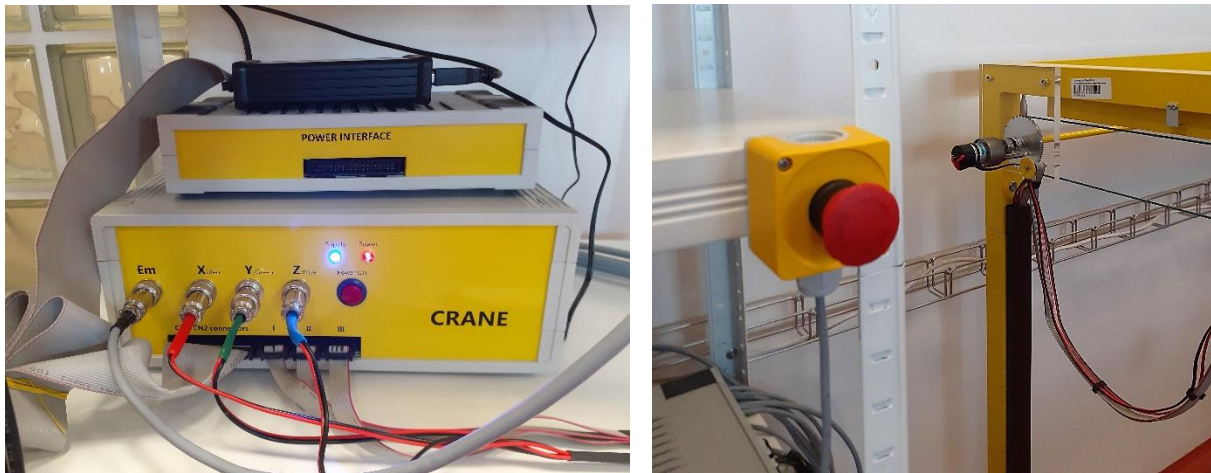


Obr. 2 – Fotografie soustavy 3D Crane v Laboratoři průmyslové automatizace, zdroj autor

Soustavu 3D Crane umístěnou v nově vybudované Laboratoři průmyslové automatizace (viz fotografie na obr. 2) lze ovládat, měřit a řídit prostřednictvím PLC, průmyslového PC a HMI a také z prostředí MATLAB & Simulink. Pro vyřešení této laboratorní úlohy jsou v laboratoři připraveny k použití potřebné knihovní bloky, nástroje určené pro měření, ovládání a řízení soustavy a ukázkové příklady.

2.1 Připojení zařízení k PC

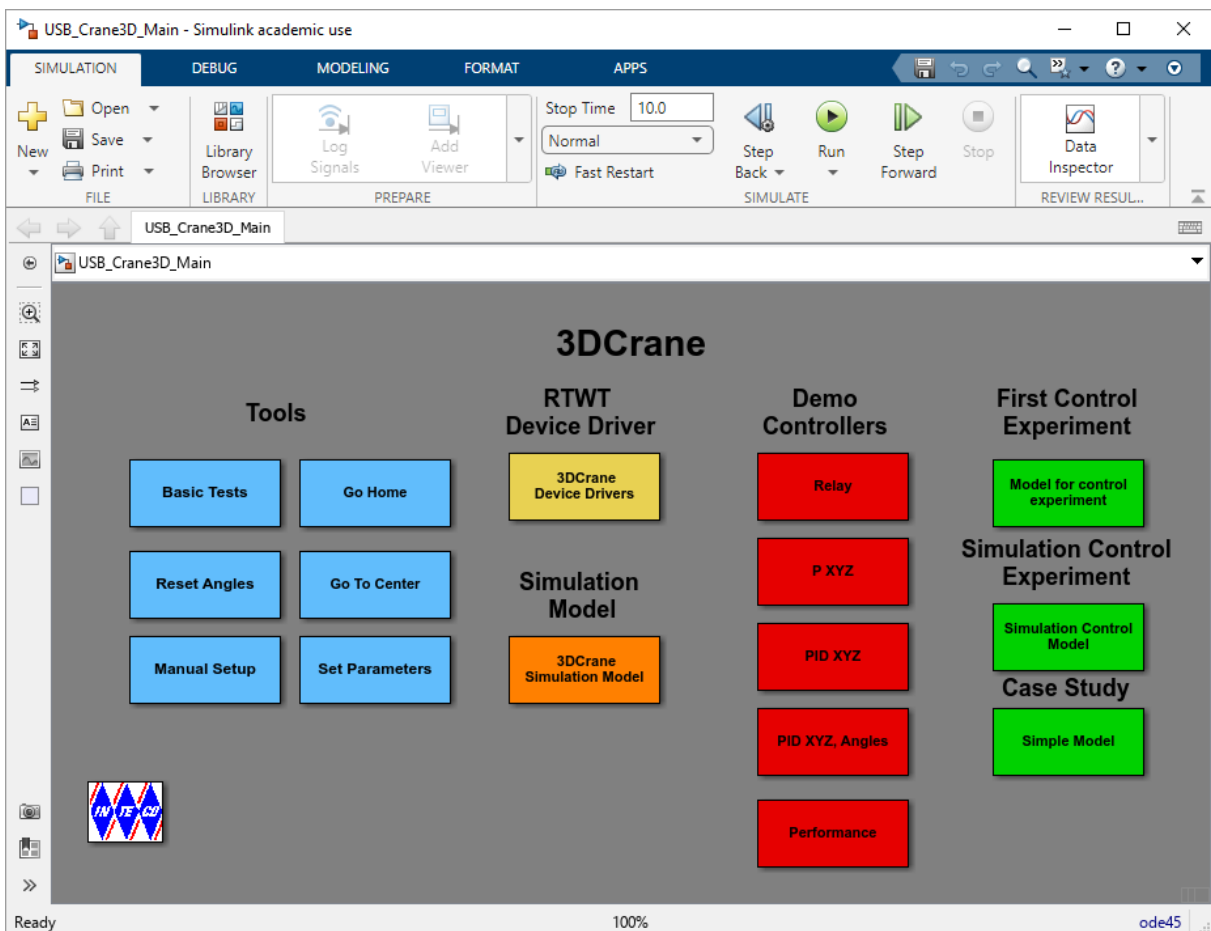
Budeme předpokládat, že veškeré experimenty budou probíhat pouze v prostředí MATLAB & Simulink, resp. s využitím výrobcem dodaných nástrojů pro práci se zařízením. Před zahájením práce je nezbytně nutné zkontrolovat propojení soustavy 3D Crane a výkonového modulu, který je k řídicímu PC připojen prostřednictvím RT-DAC/USB desky (v této laboratorní úloze, pro případ připojení k PC s využitím MATLABu, viz obr. 3), příp. pomocí modulu označeného jako POWER INTERFACE, má-li být soustava připojena k PLC. Z bezpečnostních důvodů je vlevo od soustavy umístěno tlačítko TOTAL STOP, jehož připojení k výkonovému modulu (konektor označený Em, viz obr. 3) je taktéž nutné před zahájením práce zkontrolovat.



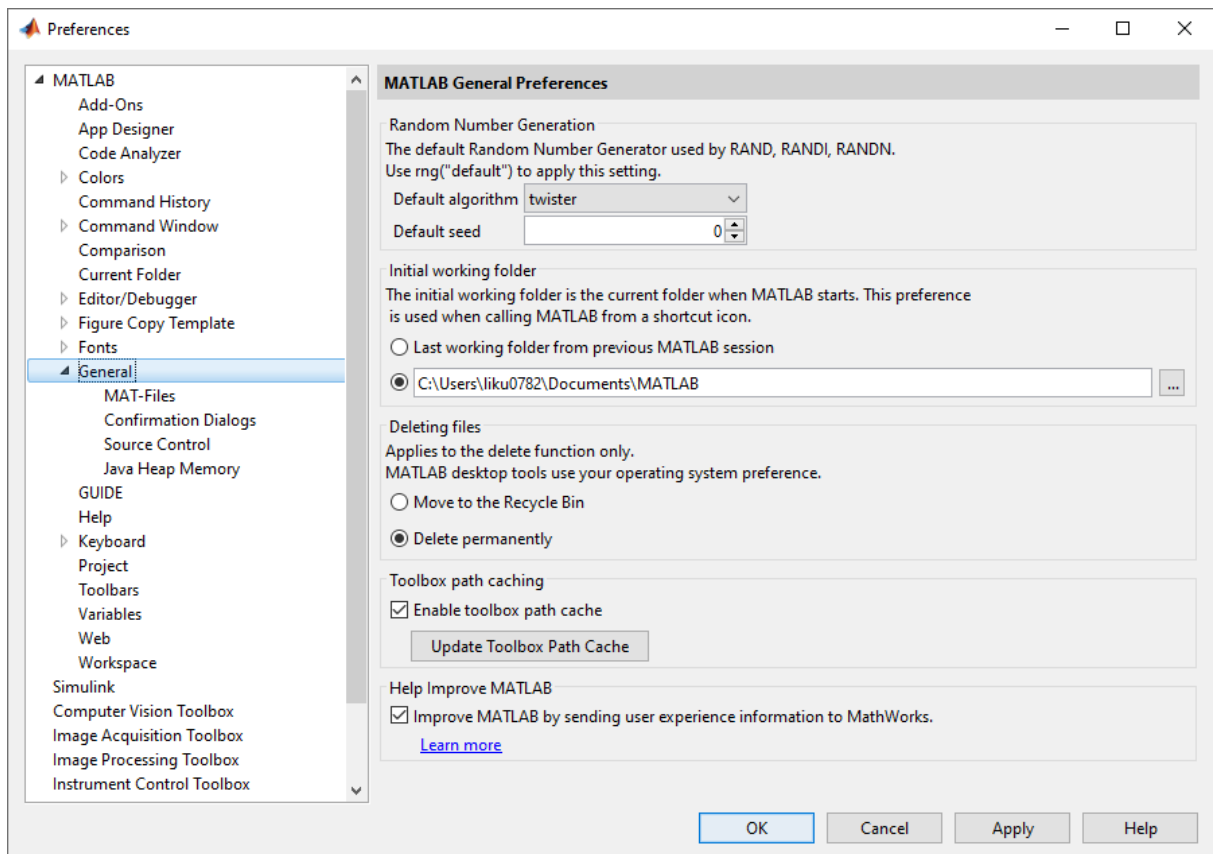
Obr. 3 – Výkonový modul a ovládací deska soustavy 3D Crane (fotografie vlevo) a umístění tlačítka TOTAL STOP (fotografie vpravo), zdroj autor

2.2 Použití nástrojů pro měření, ovládání a řízení

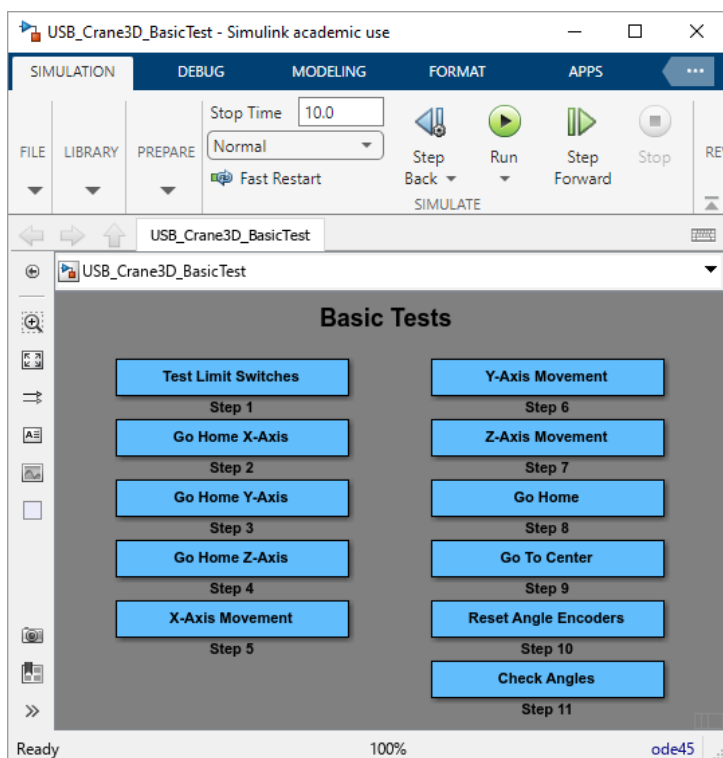
K měření a experimentování se soustavou 3D Crane lze s výhodou využít předpřipravené nástroje. Pro základní kontrolu funkčnosti soustavy, nastavování výchozích parametrů, ale i k využití předpřipravených ukázkových úloh lze využít **USB_Crane3D_Main**, viz obr. 4.



Obr. 4 – Prostředí pro práci s soustavou 3D Crane v Simulinku (printscreens) (MathWorks, 2024)



Obr. 5 – Nastavení cesty do pracovní složky v Preferences MATLABu (printscreens) (MathWorks, 2024)

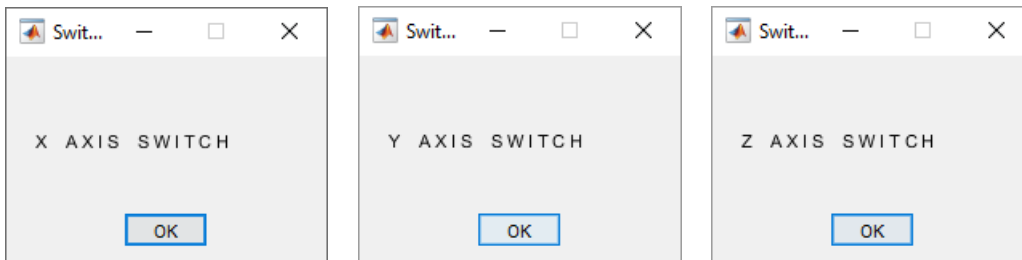


Obr. 6 – Aplikace pro základní testování soustavy 3D Crane v Simulinku (printscreens) (MathWorks, 2024)

Pro spuštění nástroje a bezproblémovou práci je nejdříve nutné provést několik základních nastavení. Předně je ihned po spuštění MATLABu vhodné nastavit ve vlastnostech dostupných v menu Preferences cestu do pracovní složky v rámci svého profilu, obdobně jako na obr. 5. Spuštění prostředí pro práci se soustavou (obr. 4) se provede příkazem **Cr**.

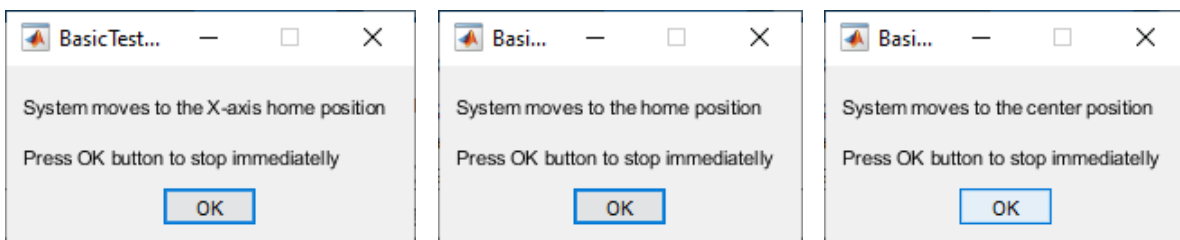
Nyní lze již přikročit k provedení základních testů zařízení a vyzkoušení manipulace s vozíkem a břemenem. K tomu je vhodné spustit připravený nástroj **USB_Crane3D_BasicTest** volbou modrého tlačítka **Basic Tests** dostupného v části **Tools** vlevo. Vzhled testovací aplikace je na obr. 6.

Na úvod lze otestovat např. funkci limitních (koncových) spínačů v osách X, Y a Z, k čemuž se využije tlačítka **Test Limit Switches**. Jsou-li spínače funkční, zobrazí se po aktivaci příslušného spínače odpovídající indikační zprávy a ozve se zvukový signál, příp. je-li vozík v poloze Home, zobrazí se všechna tři indikační okna, viz obr. 7.



Obr. 7 – Indikace sepnutí koncových spínačů (printscreen) (MathWorks, 2024)

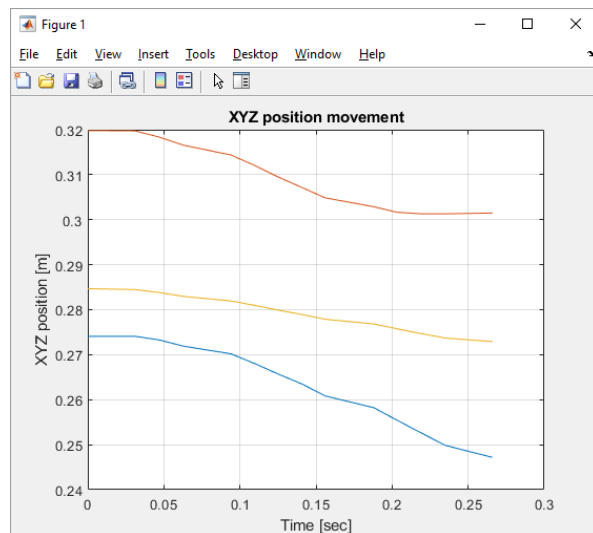
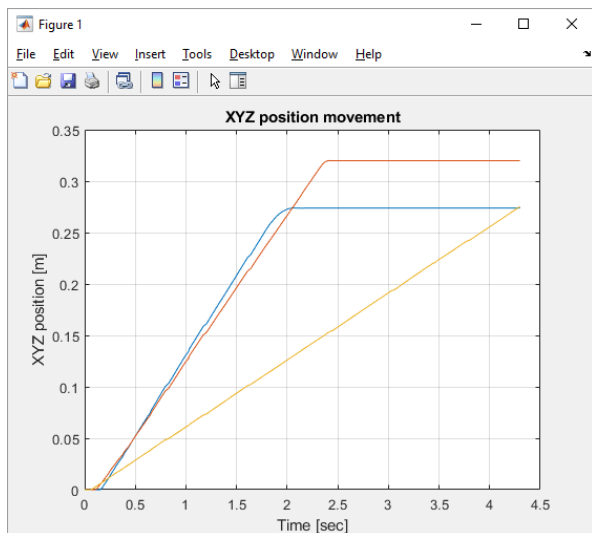
V souladu s bodem zadání č. 2 nyní vyzkoušejte přesun vozíku do výchozí **Home** pozice postupně ve všech třech osách (**Go Home X/Y/Z-Axis**) a následně také ve všech osách současně (**Go Home**) a nakonec i přesun do středové pozice (**Go Center**). Měly by být zobrazeny zprávy jako na obr. 8, přičemž pohyb lze vždy okamžitě přerušit stiskem tlačítka **OK**.



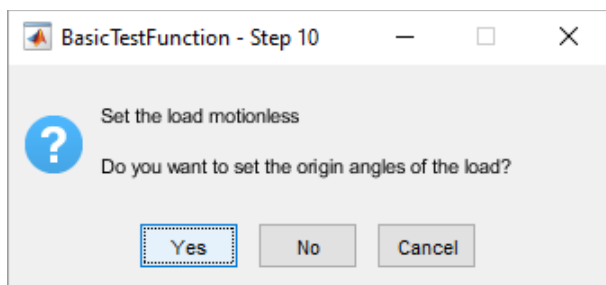
Obr. 8 – Signalizace přesunu do pozic Home a Center (printscreen) (MathWorks, 2024)

Po dosažení požadované pozice se zobrazí okno na obr. 9 se záznamem trajektorií pohybu, variantně buď při přesunu z **Home** do **Center** pozice jako v grafu vlevo, nebo při přesunu z nějaké jiné pozice obdobně jako např. v grafu vpravo.

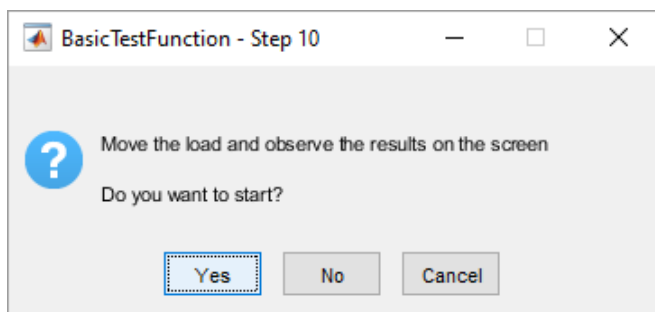
Poslední zajímavou funkcí představuje vizualizace kyvů břemene po stisku Check Angles. Ještě před tím je ale vhodné uklidnit břemeno a stisknout tlačítka Reset Angle Encoders – zobrazí se okno na obr. 10. Následně lze již vizualizovat pohyb koncového bodu břemene po ručním vychýlení z ustálené polohy. Po potvrzení dialogu na obr. 11 se zobrazí odpovídající trajektorie, viz např. grafy na obr. 12.



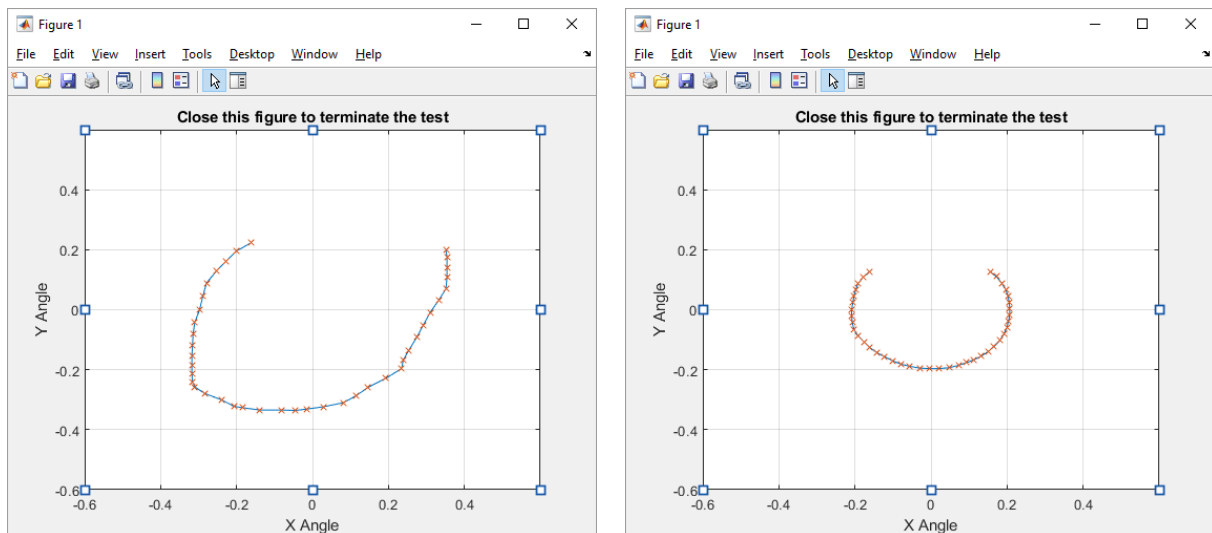
Obr. 9 – Grafy se záznamy trajektorií při přesunu z pozice Home do pozice Center (vlevo), nebo příklad průběhu při přesunu z jiné pozice (vpravo) (vytvořeno v Matlab R2024a)



Obr. 10 – Okno pro potvrzení nastavení výchozích hodnot úhlů (printscren) (MathWorks, 2024)



Obr. 11 – Okno pro zahájení sledování výchylky břemene (printscren) (MathWorks, 2024)



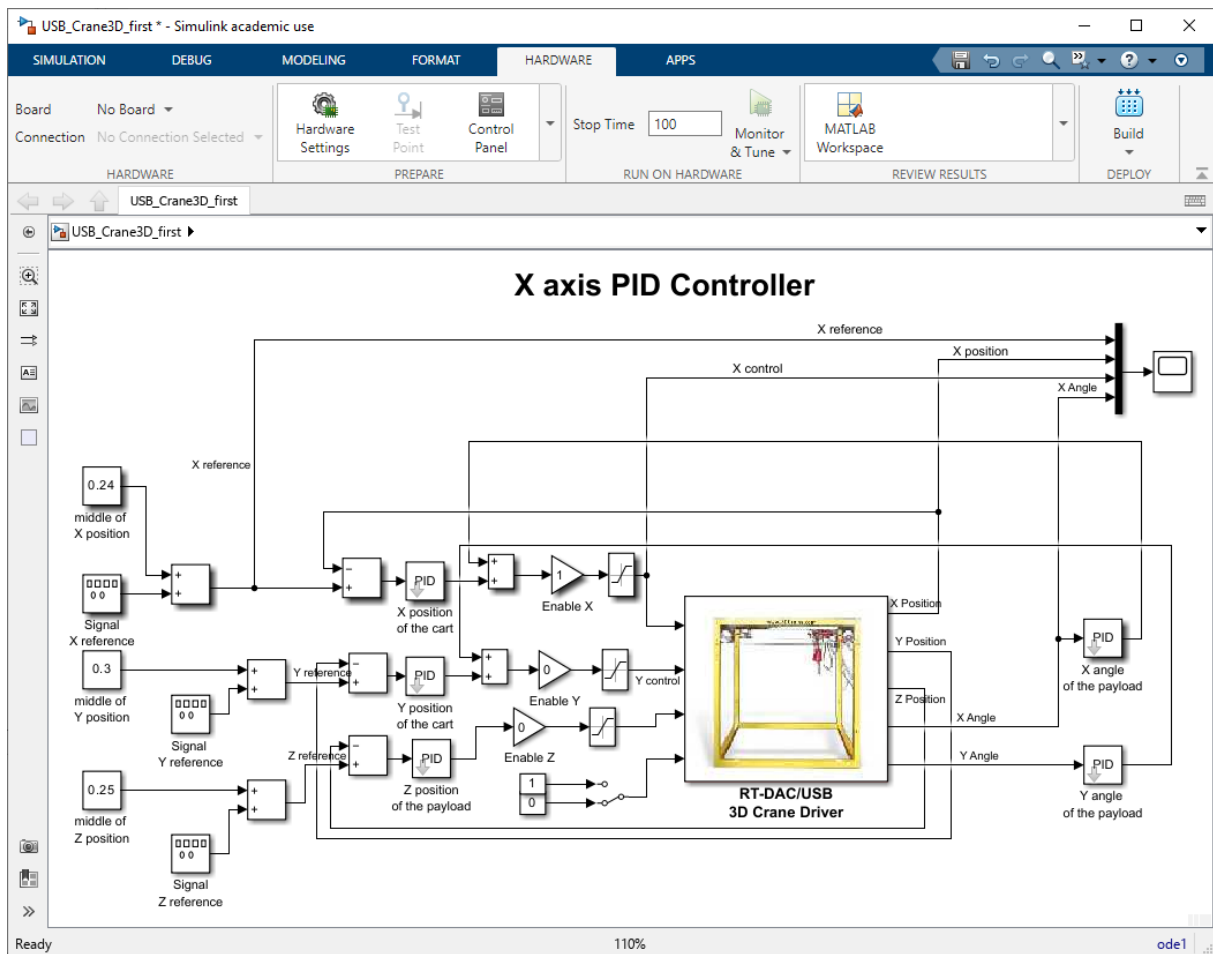
Obr. 12 – Grafy se záznamy trajektorií koncového bodu břemene po jeho vychýlení (vlevo) a po určité době (vpravo) (vytvořeno v Matlab R2024a)

3 Řízení polohy vozíku ve směru osy X

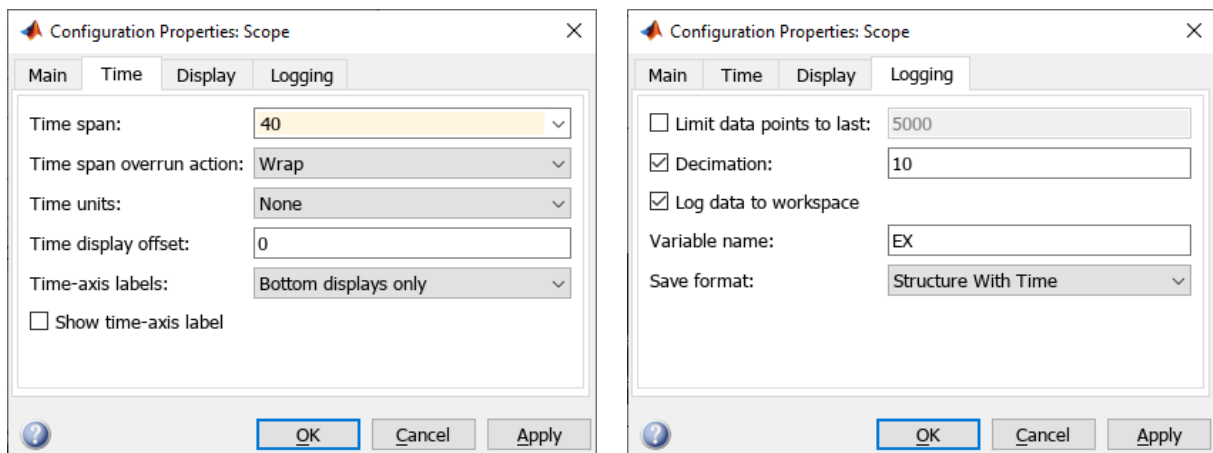
S využitím **USB_Crane3D_first** budou postupně realizovány dva experimenty. Nejprve bude v souladu s bodem 3 otestována funkce PID regulátoru polohy ve směru osy X. Následně se využije možnost stabilizace úhlu břemene pomocí dalšího regulátoru. Úkolem bude provést seřízení obou regulátorů, sledovat vliv použitého typu regulátoru a jeho nastavení na regulační pochod a na regulační odchylku. Modul **USB_Crane3D_first** lze spustit v **USB_Crane3D_Main** (obr. 4) volbou **Model for control experiment** (horní zelené tlačítko) v části **First Control Experiment**. Příslušný model realizovaný v Simulinku je na obr. 13.

Pro řízení polohy příčnicku (pohyb vozíku v ose X) se využije pouze jeden z PID regulátorů označený jako **X position of the cart** a navíc se vyřadí I a D složky regulátoru. Jako testovací signál lze v bloku signálového generátoru s označením **Signal X reference** zvolit obdélníkový signál s bezpečnou amplitudou a vhodnou frekvencí, např. 0.15 m a 0.075 Hz. Experimenty je vždy nejvhodnější zahajovat z bezpečné střední polohy, ideálně po provedení **Go Home** a poté **Go To Center** v okně **USB_Crane3D_Main**.

Vizualizace i ukládání naměřených dat jsou realizovány v bloku Scope. Sledovány jsou veličiny označené jako **X reference** (žádaná hodnota), **X position** (regulovaná veličina), **X control** (akční veličina) a **X Angle** (regulovaná veličina). Blok Scope je nutné správně nakonfigurovat, resp. správnou konfiguraci zkontrolovat v okně parametrů (obr. 14), v záložkách **Time** a **Logging**. Nastaveno by mělo být: **Time span** 40 s, zrušena volba **Limit data points to last**, zaškrtnuta položka **Decimation** a nastaveno 10 s, zaškrtnuta položka **Log data to workspace** a zadán název proměnné **Variable name** EX a zvolen formát pro ukládání **Save format** jako **Structure with Time**. Pokud to nebylo již provedeno, je vhodné invertovat zobrazení (implicitně černá plocha) Scope v menu **Style** (lze jej vyvolat pravým tlačítkem myši, nebo výběrem z menu **View / Style...**).



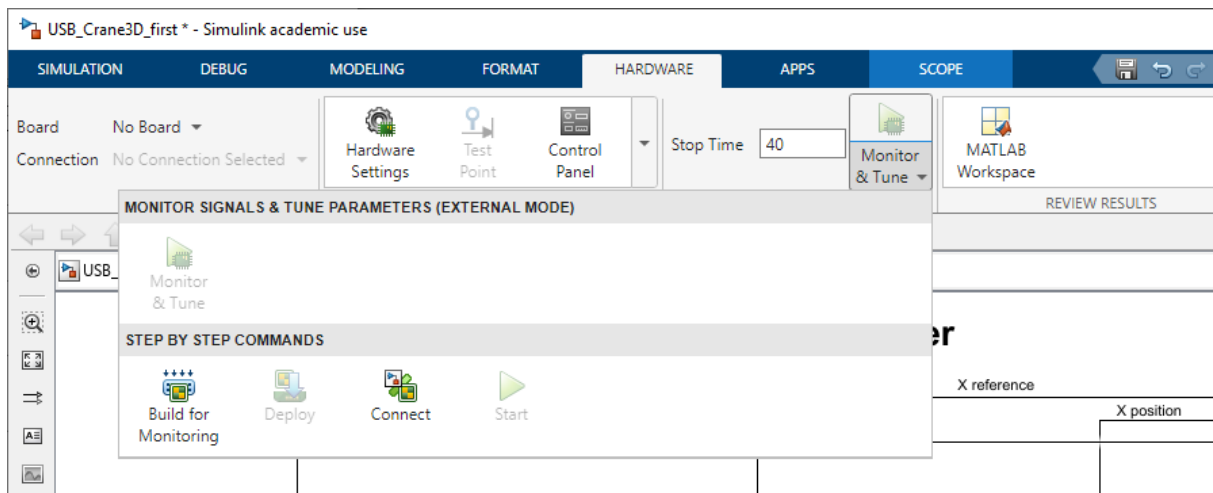
Obr. 13 – Řízení polohy vozíku a břemene soustavy 3D Crane pomocí PID (printsreen) (MathWorks, 2024)



Obr. 14 – Nastavení parametrů bloku Scope (printsreen) (MathWorks, 2024)

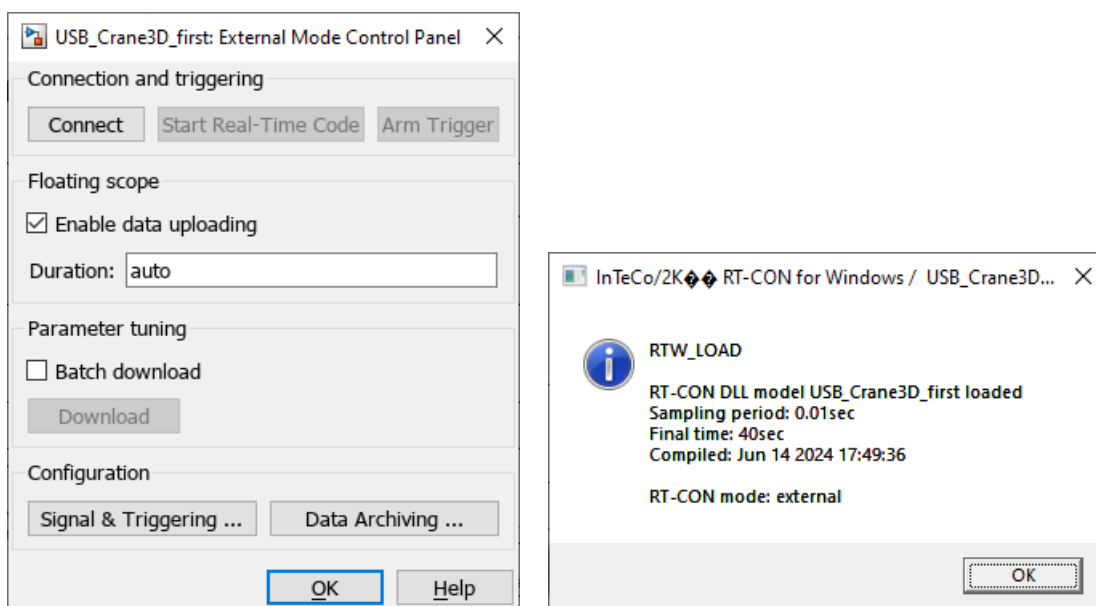
3.1 Experiment v reálném čase

Před zahájením experimentu, resp. před spuštěním měření, je nutné stiskem Ctrl + B provést překlad simulačního schématu na obr. 13 a měření spustit výběrem (kliknutím) na **Control Panel** na kartě **HARDWARE** (obr. 15) a stisknutím tlačítka **Connect** ve vyvolaném dialogovém okně (obr. 16).



Obr. 15 – Překlad a spuštění měření (printscreen) (MathWorks, 2024)

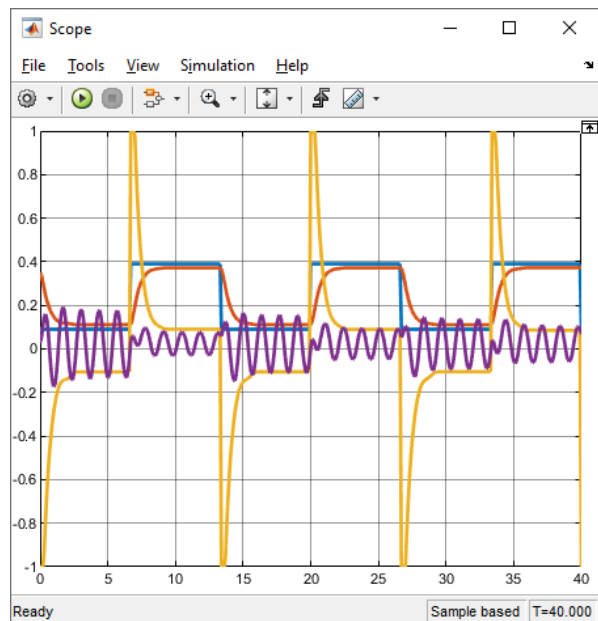
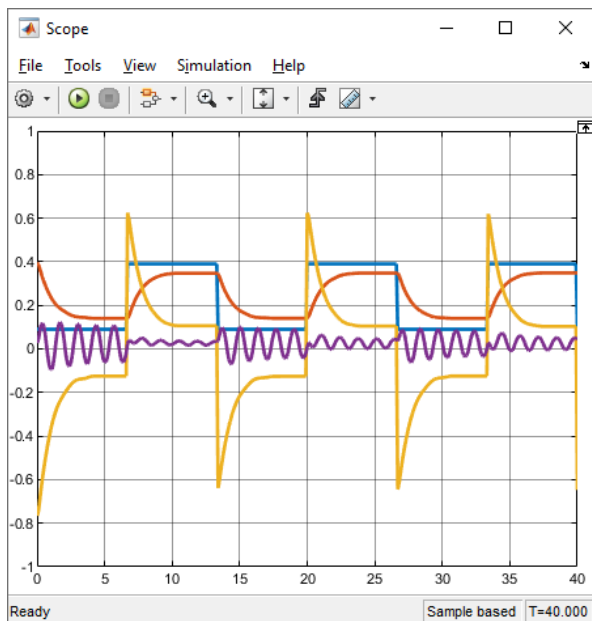
Další možností, jak provést překlad modelu a spustit měření, je postupnou volbou **Build for Monitoring** a následně **Connect** z nabídky **Monitor & Tune** na kartě **HARDWARE**, viz obr. 15 vlevo.



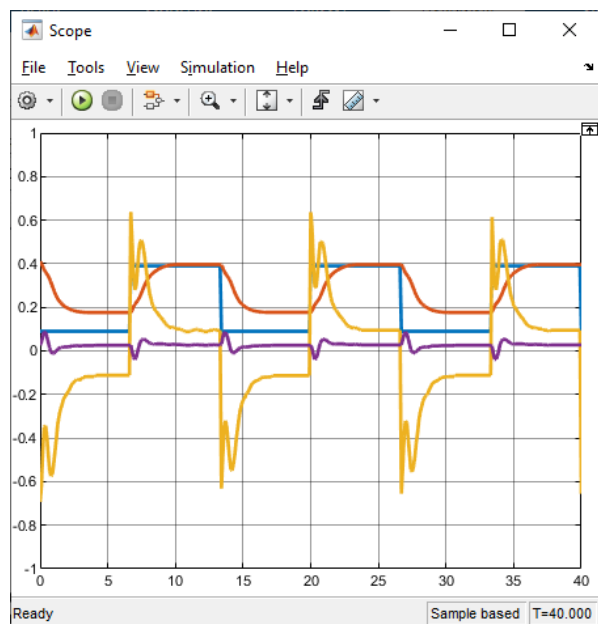
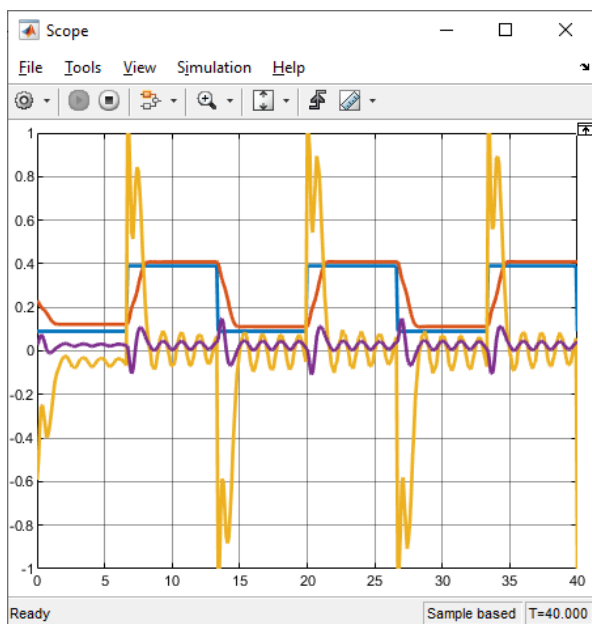
Obr. 16 – Dialog Control Panel (vlevo) a okno pro zahájení experimentu (printscreen) (MathWorks, 2024)

Bezprostředně po stisknutí **Connect** dojde k vyvolání okna na obr. 16 vpravo a po stisknutí tlačítka **OK** se zahájí experiment, jehož průběh lze sledovat přímo v okně **Scope**. Několik možných průběhů pro různá nastavení PID regulátorů je na obr. 17 a obr. 18.

V souladu se zadáním proveďte nejprve nastavení a seřízení regulátoru polohy vozíku ve směru osy **X** označeného jako **X position of the cart**, tj. se současně vyřazeným regulátorem úhlu břemene. Následně se pokuste vhodně nastavit také regulátor úhlu břemene označený jako **X angle of the payload**.



Obr. 17 – Průběh regulace polohy vozíku ve směru osy X bez regulace úhlu břemene pro různá nastavení PID regulátoru (vytvoreno v Matlab R2024a)



Obr. 18 – Průběh regulace polohy vozíku ve směru osy X včetně regulace úhlu břemene pro různá nastavení obou PID regulátorů (vytvoreno v Matlab R2024a)

3.2 Zpracování uložených dat

Naměřena data lze také s výhodou uložit pro pozdější zpracování. Jak již bylo uvedeno výše, tak data se ukládají v bloku Scope do struktury s názvem EX a v MATLABu jsou pak k dispozici ve **Workspace**. Výpis základních údajů o struktuře s daty lze získat po zadání jejího názvu v **Command Window** MATLABu, viz obr. 20. **Workspace** lze jednoduše uložit do souboru s příponou *.mat volbou **Save Workspace** na kartě **HOME**, nebo příp. v plovoucím menu přístupným přes pravé tlačítko myši v okně **Workspace** – Save Ctrl+S.

```

Command Window

EX =

    struct with fields:

        time: [401x1 double]
        signals: [1x1 struct]
        blockName: 'USB_Crane3D_first/Scope'

fx >> |

```

Obr. 19 – Výpis proměnné EX (struktury s daty) v okně MATLABu (printscreen) (MathWorks, 2024)

Strukturu si lze také podrobněji prohlédnout v okně **Variables** (obr. 20), které lze zobrazit po dvojitém kliknutí na strukturu EX v okně **Workspace**, nebo volbou Open Selection Ctrl+D z plovoucího menu.

The screenshot shows the MATLAB Variables window for the variable EX.signals.values. The window has tabs for PLOTS, VARIABLE, and VIEW. The VIEW tab is active, showing a table with 11 columns and 13 rows of data. The table is titled 'EX.signals.values' and has columns numbered 1 through 11. The data is as follows:

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|----|--------|--------|---------|---------|---|---|---|---|---|----|----|
| 1 | 0.0900 | 0.2304 | -0.6960 | 0.0031 | | | | | | | |
| 2 | 0.0900 | 0.2222 | -0.6117 | 0.0245 | | | | | | | |
| 3 | 0.0900 | 0.2059 | -0.4754 | 0.0522 | | | | | | | |
| 4 | 0.0900 | 0.1921 | -0.3693 | 0.0706 | | | | | | | |
| 5 | 0.0900 | 0.1817 | -0.3268 | 0.0660 | | | | | | | |
| 6 | 0.0900 | 0.1733 | -0.3245 | 0.0460 | | | | | | | |
| 7 | 0.0900 | 0.1650 | -0.3446 | 0.0153 | | | | | | | |
| 8 | 0.0900 | 0.1564 | -0.3752 | -0.0215 | | | | | | | |
| 9 | 0.0900 | 0.1467 | -0.3726 | -0.0445 | | | | | | | |
| 10 | 0.0900 | 0.1369 | -0.3511 | -0.0583 | | | | | | | |
| 11 | 0.0900 | 0.1274 | -0.3095 | -0.0614 | | | | | | | |
| 12 | 0.0900 | 0.1193 | -0.2538 | -0.0537 | | | | | | | |
| 13 | 0.0900 | 0.1129 | -0.1911 | -0.0383 | | | | | | | |

Obr. 20 – Výpis proměnné EX (struktury s daty) v okně Variables (printscreen) (MathWorks, 2024)

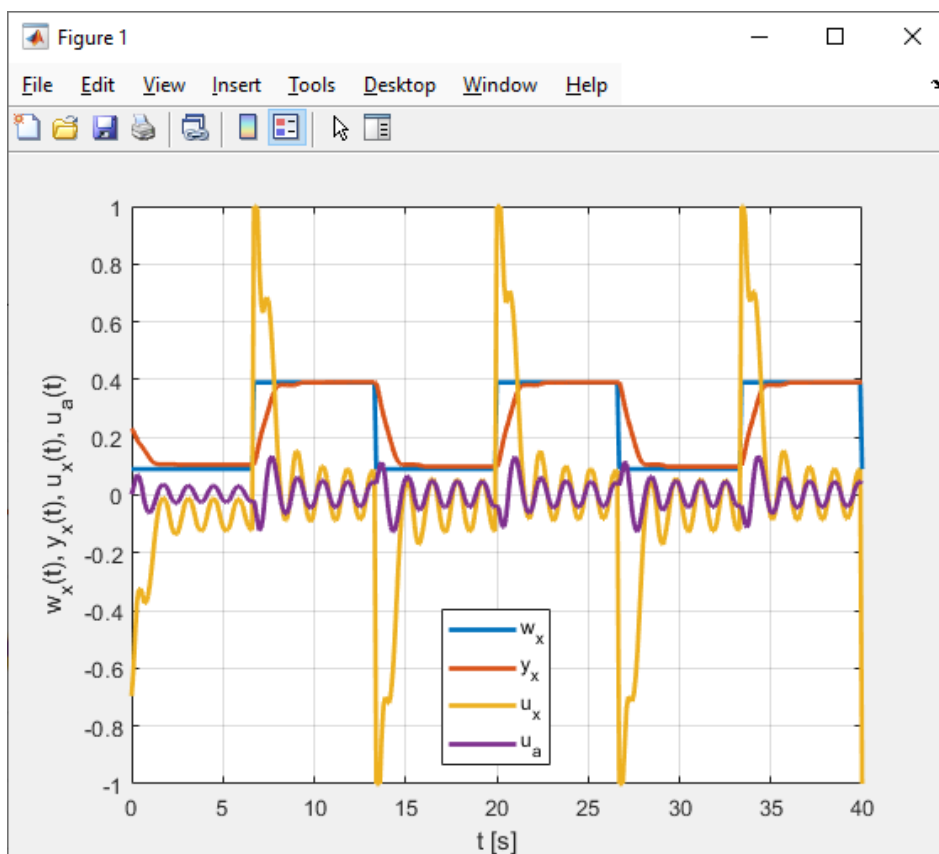
S daty uloženými v souboru pro pozdější zpracování lze velmi jednoduše a zároveň efektivně pracovat po zapsání uživatelského skriptu v editoru MATLABu. Nový skript lze vytvořit pomocí tlačítka New Script na kartě HOME, příp. pomocí tlačítka New a vybráním Script Ctrl+N. V okně editoru pak můžeme načíst data ze souboru, vykreslit je do grafu a graf doplnit o popisky os, legendu a příp. zobrazit mřížku. Příklad skriptu je na obr. 21. Na obr. 22 je printscreen okna Figure 1 s naměřenými průběhy. V menu Edit tohoto okna lze navíc výběrem Copy Figure obdrženy graf vyexportovat do podoby vhodné pro vložení do protokolu (viz obr. 23), podle potřeby různě editovat a příp. v menu File uložit, buď jako MATLAB Figure (*.fig) nebo v jiném požadovaném formátu (vhodný je např. bezztrátový formát png, či formát pdf).

```

Editor - D:\Výuka\ Inovace Automatizace (SPAUT)\Laboratorní úlohy\K odevzdání\Kupka\Data\vykresli_exp00.m
EDITOR PUBLISH VIEW
New Open Save Compare Print Go To Find Refactor Analyze Profiler Run Section Run and Advance Run Step Stop
FILE NAVIGATE CODE ANALYZE SECTION RUN
vykresli_exp00.m
1 % vykreslení naměřených dat
2 clc, close all, clear all
3
4 load exp00.mat
5 EX
6 plot(EX.time, EX.signals.values(:,1:4), 'LineWidth', 2)
7 grid
8 xlabel('t [s]'), ylabel('w_x(t), y_x(t), u_x(t), u_a(t)')
9 legend('w_x', 'y_x', 'u_x', 'u_a', 'Location', 'best')
Zoom: 100% UTF-8 CRLF script Ln 10 Col 1

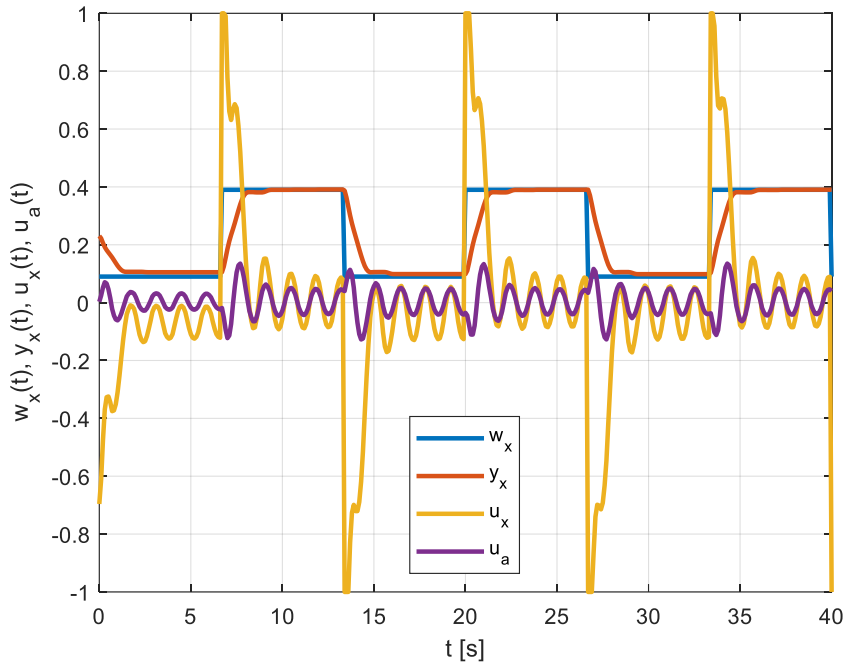
```

Obr. 21 – Jednoduchý skript pro vykreslení naměřených dat (printscreen) (MathWorks, 2024)



Obr. 22 – Okno s naměřenými průběhy (vytvořeno v Matlab R2024a)

Doporučení: V grafech vždy popisujte všechny osy, uvádějte jejich jednotky a je-li to vhodné, uvádějte také legendu. Při více průbězích v jednom grafu je velmi vhodné nastavit mimo šířky čar také jejich barvu a styl. Více informací pro vytváření přehledných grafů v MATLABu je možné se dozvědět po zadání příkazu `help plot`.



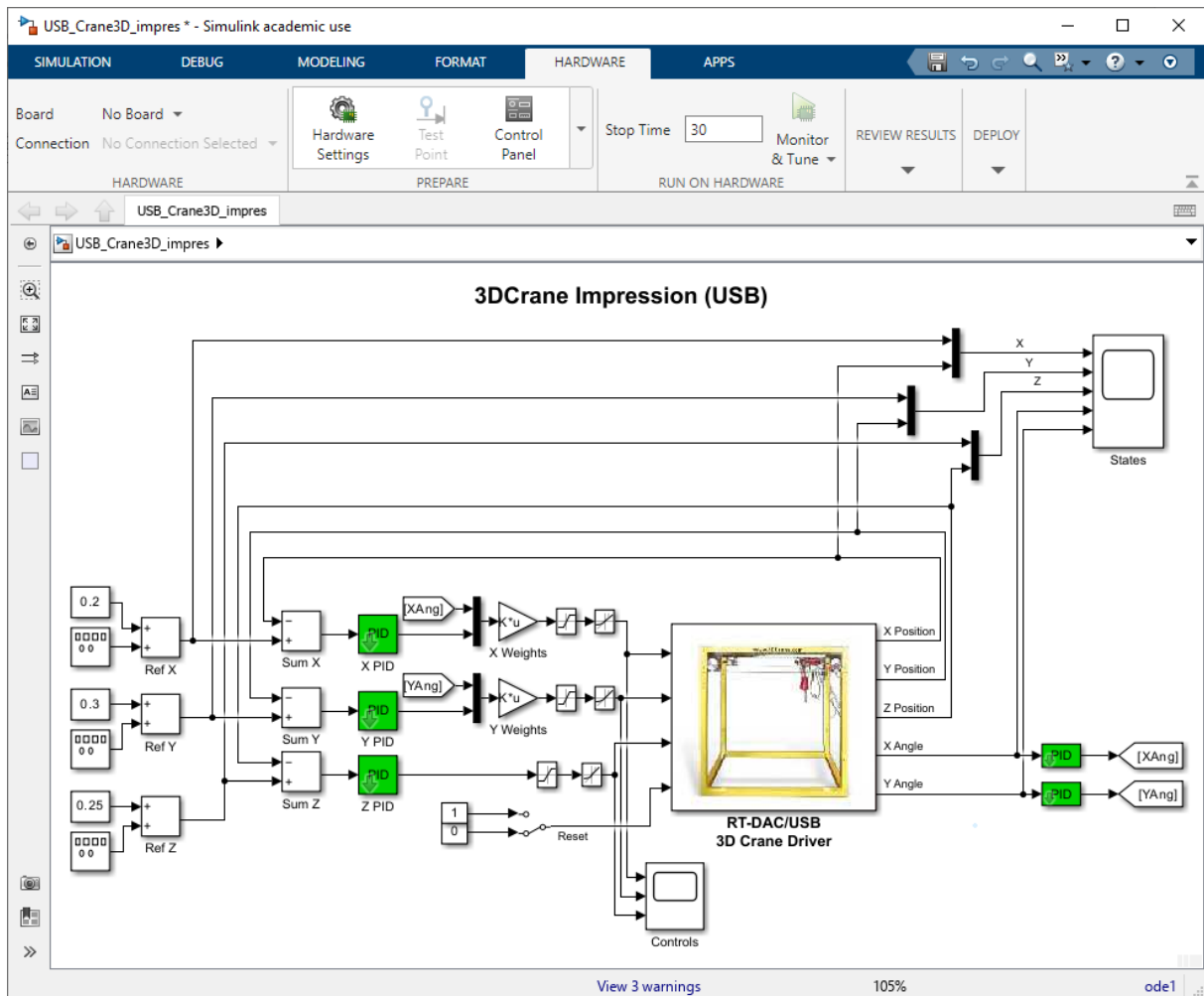
Obr. 23 – Export grafu s naměřenými průběhy (vytvoreno v Matlab R2024a)

4 Seřízení PID regulátorů pro řízení pohybu v osách X, Y a Z

S využitím **USB_Crane3D_impres** bude postupně realizováno několik experimentů. Modul lze spustit zadáním jeho názvu v okně MATLABu (stav po otevření je na obr. 24). Nejprve bude v souladu s bodem 5 otestována funkce PID regulátorů polohy ve směru os X a Y. Záznamy experimentů mohou být podobné těm na obr. 26. Úkolem bude opět provést seřízení obou regulátorů označených jako **X PID** a **Z PID** a sledovat vliv použitých typů regulátorů a jejich nastavení na regulační pochod a na regulační odchylku. Buzení ve směru os X a Y je nastaveno v blocích **Ref X** a **Ref Y** a je obdélníkové s posunem vzájemné fáze. V rámci tohoto experimentu je buzení polohy břemene v bloku **Ref Z** zvoleno jako harmonické. Řízení polohy břemene pak zajišťuje regulátor označený jako **Z PID**. I v tomto případě je experimenty vždy nejvhodnější zahajovat z bezpečné střední polohy, ideálně po provedení **Go Home** a poté **Go To Center** v okně **USB_Crane3D_Main**.

Vizualizace i ukládání naměřených dat jsou realizovány opět v bloku Scope – States. Sledovány jsou veličiny označené jako **X**, **Y** a **Z** (žádané hodnoty), **X Position**, **Y Position** a **Z Position** (regulované veličiny) a **X Angle** a **Y Angle** (regulované veličiny) a řídicí veličiny regulátorů polohy (bez označení, blok Scope – Controls). Blok Scope je nutné správně nakonfigurovat, resp. správnou konfiguraci zkontrolovat v okně parametrů (obr. 14), v záložkách **Time** a **Logging**. Nastaveno by mělo být: **Time span** 50, resp. 30 s, zrušena volba **Limit data points to last**, zaškrtnuta položka **Decimation** a nastaveno 10 s, zaškrtnuta položka **Log data to workspace** a zadán název proměnné **Variable name** EX (blok Scope – Controls), resp. EX1 (blok Scope – States) a zvolen formát pro ukládání **Save format** jako **Structure with Time**. Pokud to

nebylo již provedeno, je vhodné invertovat zobrazení (implicitně černá plocha) Scope v menu **Style** (lze jej vyvolat pravým tlačítkem myši, nebo výběrem z menu View / Style...).



Obr. 24 – Řízení polohy vozíku v osách X a Y a břemene v ose Z pomocí PID (printscreen) (MathWorks, 2024)

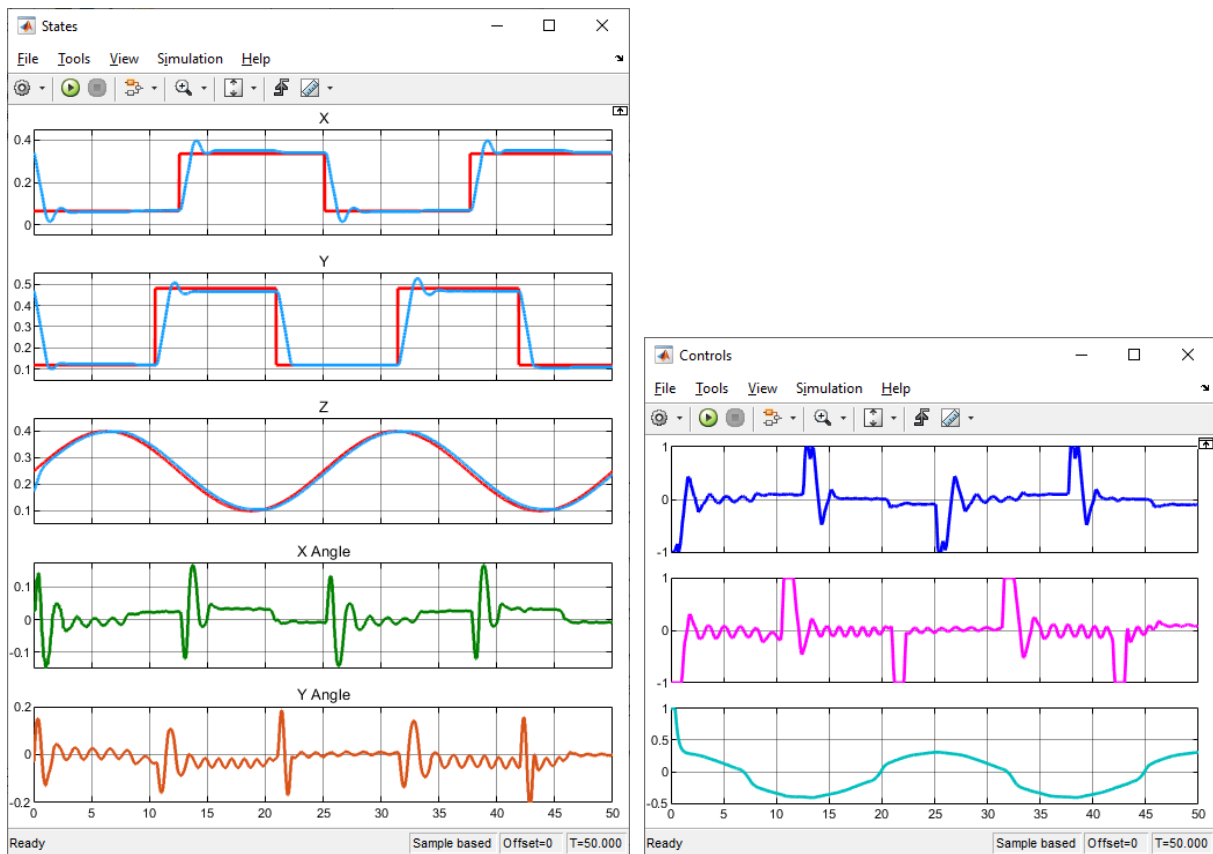
```
figure, plot(EX1.time, EX1.signals(1).values(:,1:2))
figure, plot(EX1.time, EX1.signals(2).values(:,1:2))
figure, plot(EX1.time, EX1.signals(3).values(:,1:2))

figure, plot(EX1.time, EX1.signals(4).values(:,1))
figure, plot(EX1.time, EX1.signals(5).values(:,1))

figure, plot(EX.time, EX.signals(1).values(:,1))
figure, plot(EX.time, EX.signals(2).values(:,1))
figure, plot(EX.time, EX.signals(3).values(:,1))
```

Obr. 25 – Ukázka možných skriptů pro vykreslení všech naměřených dat (printscreen) (MathWorks, 2024)

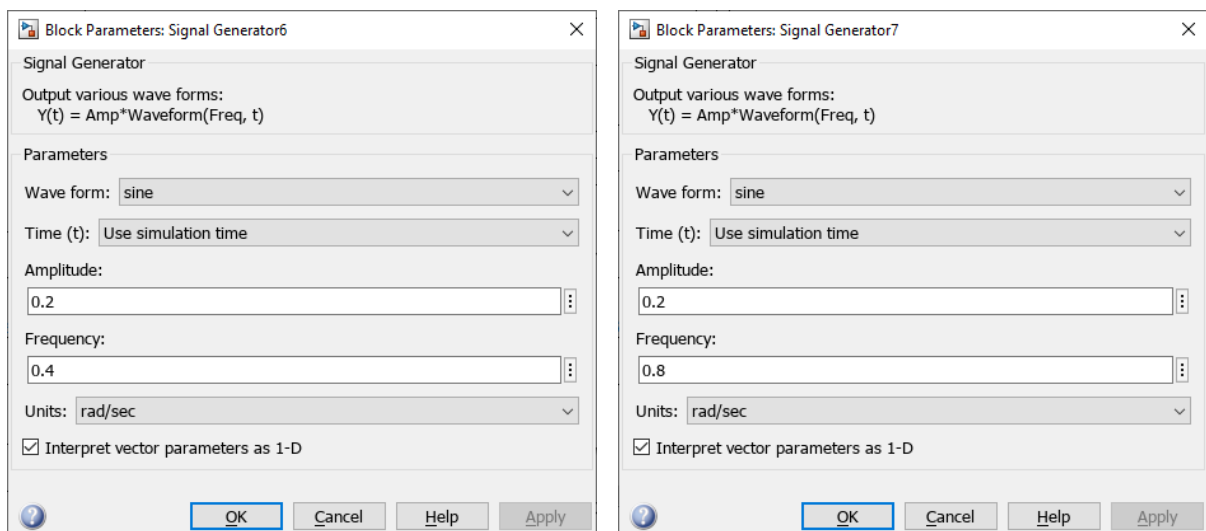
Záznamy provedených experimentů (data uložena ve strukturách EX a EX1) je velmi vhodné zpracovat způsobem uvedeným v odstavci 3.2.



Obr. 26 – Možné průběhy regulace polohy vozíku ve směru os X a Y a břemene ve směru osy Z pro různá nastavení PID regulátorů při obdélníkovém buzení (vytvoreno v Matlab R2024a)

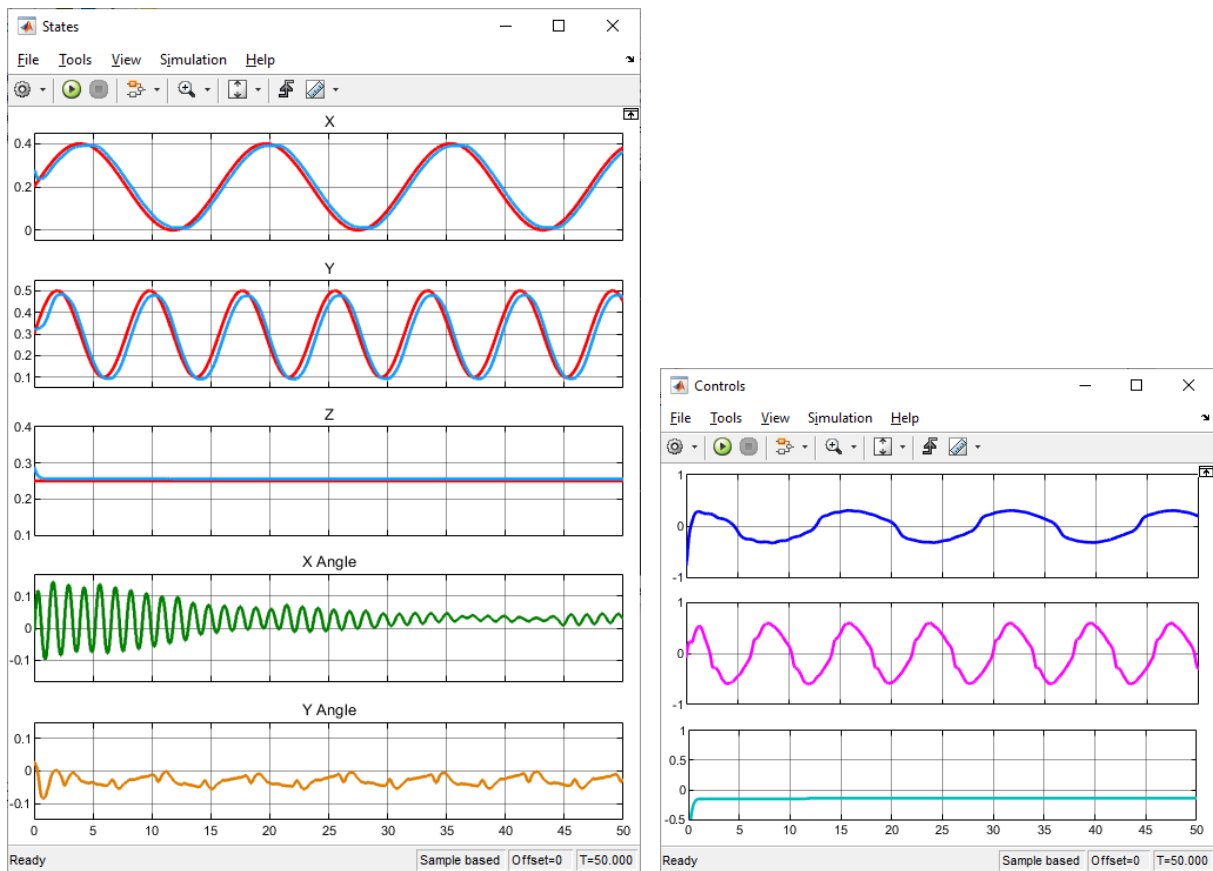
5 Blackburnovo kyvadlo

V dalším experimentu změníme buzení modelu tak, že v osách X a Y bude harmonické s vhodnou amplitudou a frekvencí, v ose Z se poloha nebude měnit (bude tedy bez buzení).

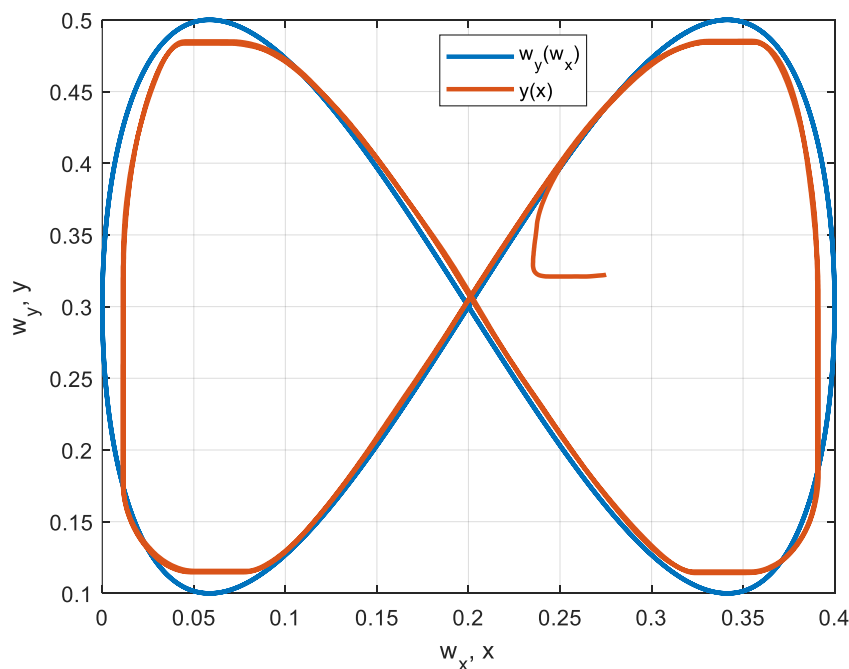


Obr. 27 – Příklad nastavení harmonického buzení pro osy X a Y (printscreen) (MathWorks, 2024)

Možné nastavení generátorů je na obr. 27. Frekvence harmonického buzení v osách X a Y měňte vhodným způsobem tak, aby břemeno opisovalo Lissajousovy křivky. Možné průběhy jsou na obr. 28 a této situaci odpovídající trajektorie břemene je na obr. 29.



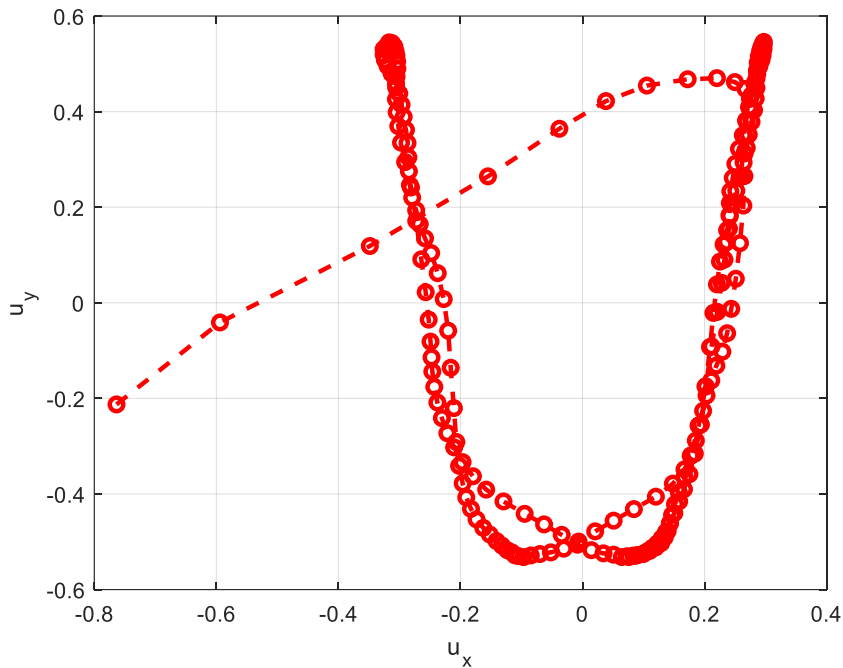
Obr. 28 – Možné průběhy regulace polohy vozíku ve směru os X a Y a břemene ve směru osy Z pro různá nastavení PID regulátorů při harmonickém buzení (vytvoreno v Matlab R2024a)



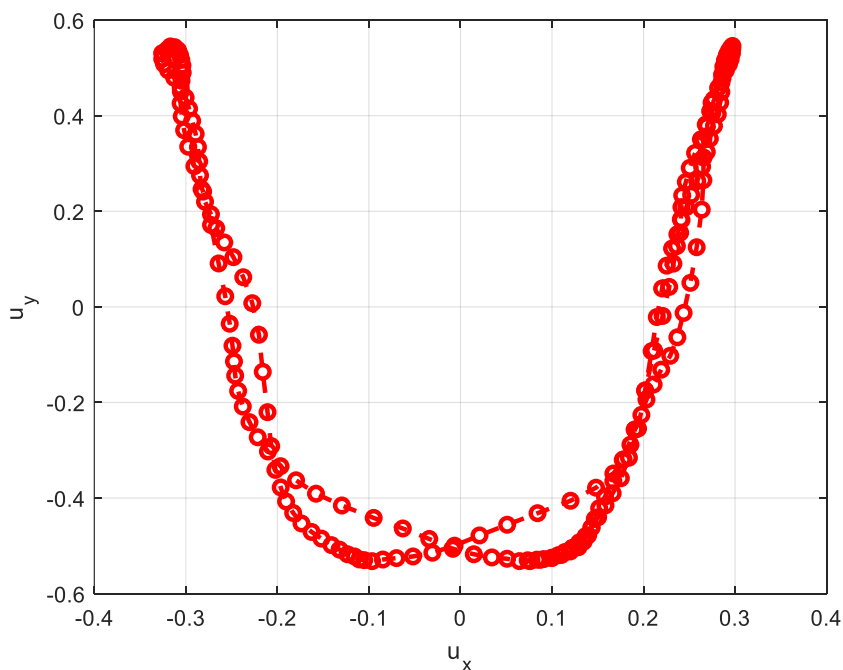
Obr. 29 – Trajektorie břemene při poměru frekvencí buzení 1 ku 2 (vytvoreno v Matlab R2024a)

5.1 Nastavení PID

Poměr frekvencí budících signálů v osách X a Y volte nejprve 1 ku 2. Vyzkoušejte několik různých nastavení PID regulátorů polohy v osách X a Y, regulátory úhlu břemene ponechte vyřazené. Pro nastavení generátorů dle obr. 27 může mít stavová trajektorie polohy vozíku průběh podobný tomu na obr. 29.

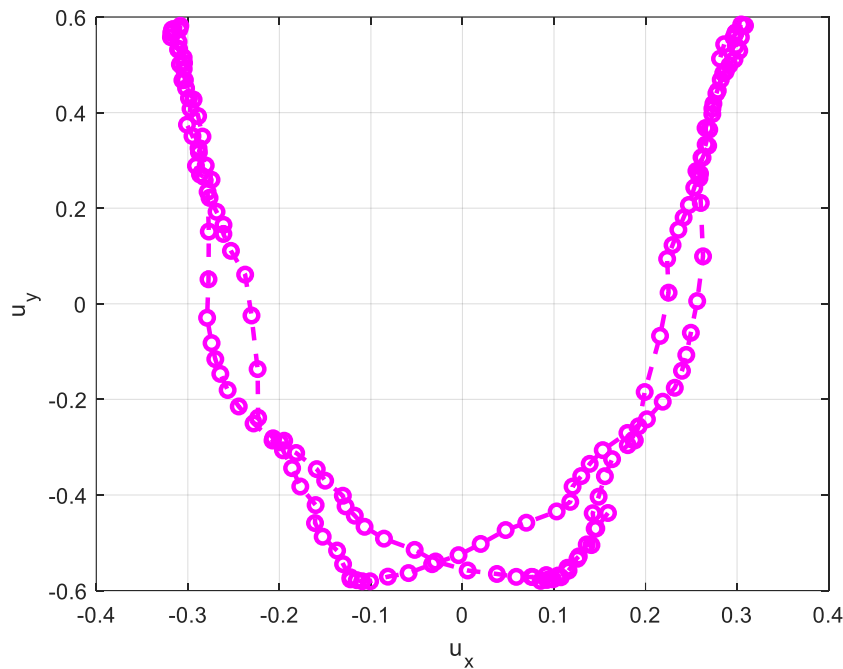


Obr. 30 – Diagram akčních veličin bez regulace úhlu břemene se záznamem z výchozího stavu (vytvoreno v Matlab R2024a)

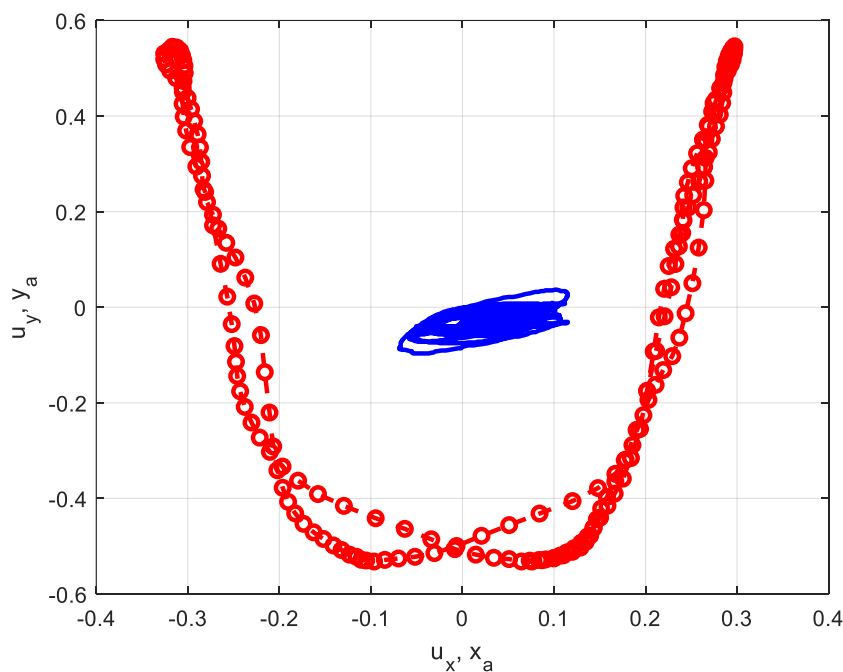


Obr. 31 – Upravený diagram akčních veličin bez regulace úhlu břemene (vytvoreno v Matlab R2024a)

Na obr. 30 a obr. 31 jsou možné diagramy akčních veličin regulátorů pohybu v osách X a Y bez současného řízení úhlu výchylky břemene. V druhém případě byla data navíc očištěna o část tzv. prvotní trajektorie (tj. než se břemeno dostane do cyklického pohybu) a v této podobě jsou pak uváděny i následující diagramy. Na obr. 32 je diagram odpovídající variantě při současném řízení úhlu výchylky břemene.

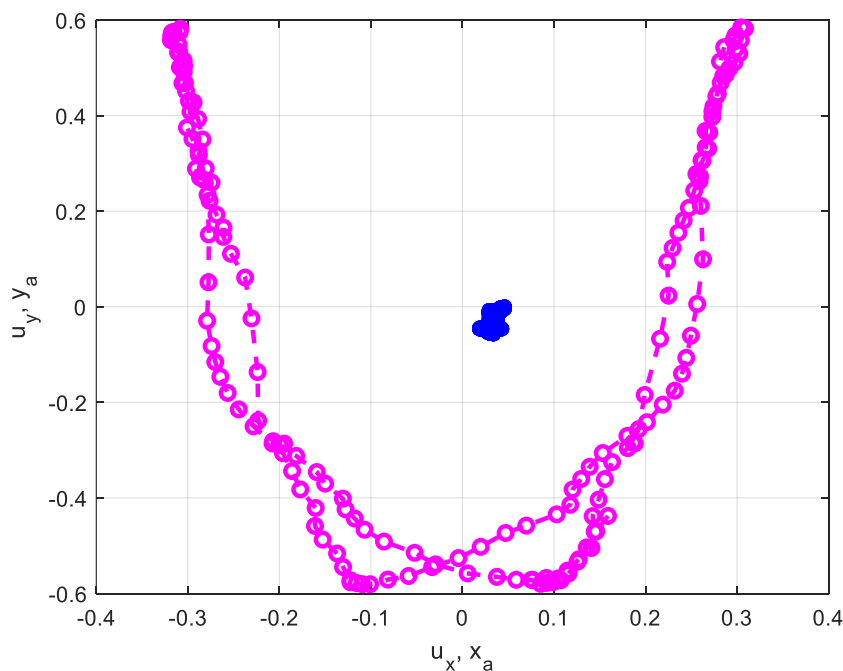


Obr. 32 – Upravený diagram akčních veličin s regulací úhlu břemene (vytvořeno v Matlab R2024a)

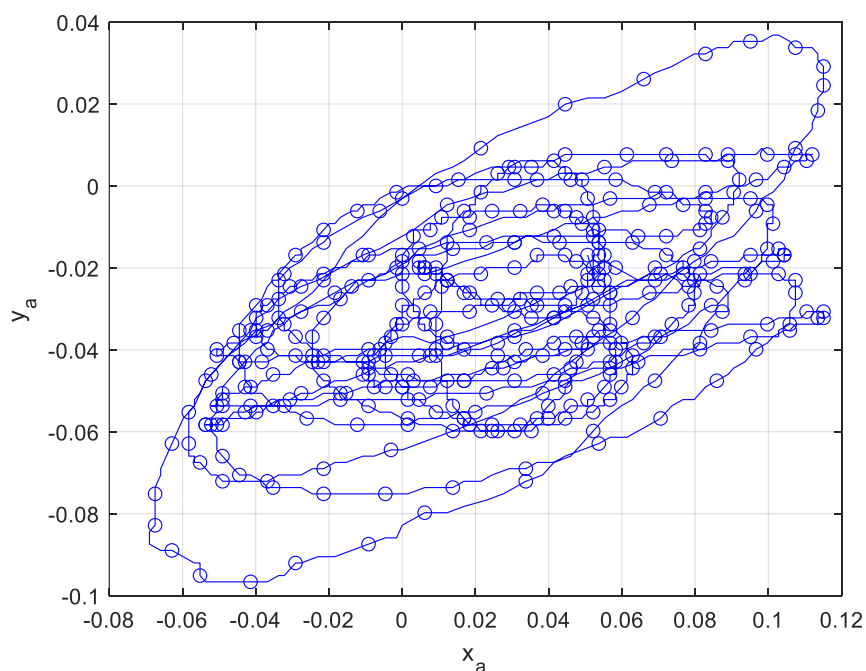


Obr. 33 – Upravený diagram akčních veličin a diagram úhlů břemene bez regulace úhlu břemene (vytvořeno v Matlab R2024a)

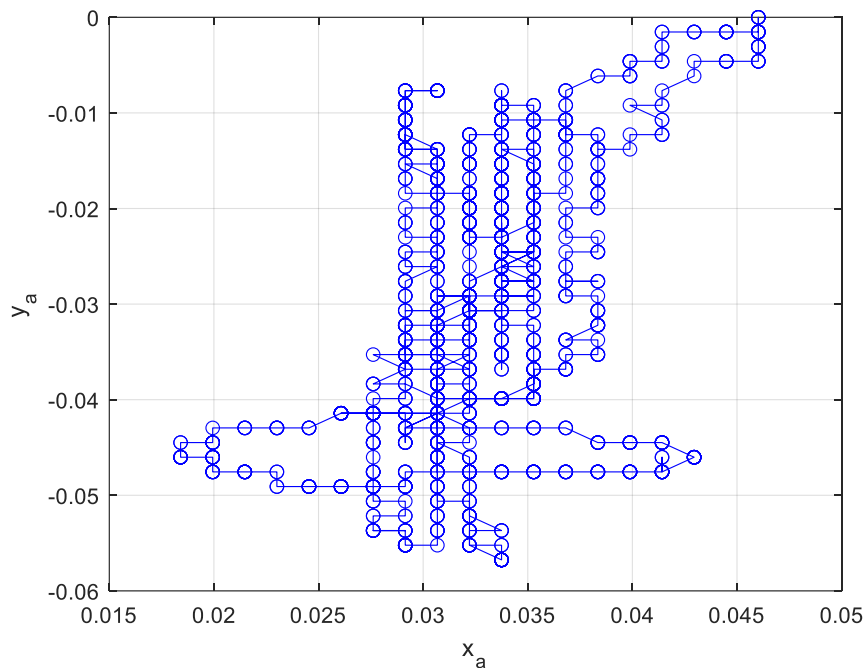
Obr. 33 i obr. 34 jsou navíc doplněny o diagramy úhlů břemene. Je zřejmé, že ačkoli diagram akčních veličiny je v prvním případě hladší, dojde vlivem regulace úhlu výchylky břemene ke zmenšení rozsahu kmitů a břemeno se tím stabilizuje. Tomu odpovídají samozřejmě i grafy na obr. 35 a obr. 36. Rozsah kmitů břemene je v tomto případě více jak 5krát nižší. Pokuste se vhodným nastavením regulátorů dosáhnout co nejnižšího rozkmitu břemene. Provedte a zaznamenejte několik různých experimentů, které budou ilustrovat možnosti stabilizace.



Obr. 34 – Upravený diagram akčních veličin a diagram úhlů břemene s regulací úhlu břemene (vytvořeno v Matlab R2024a)



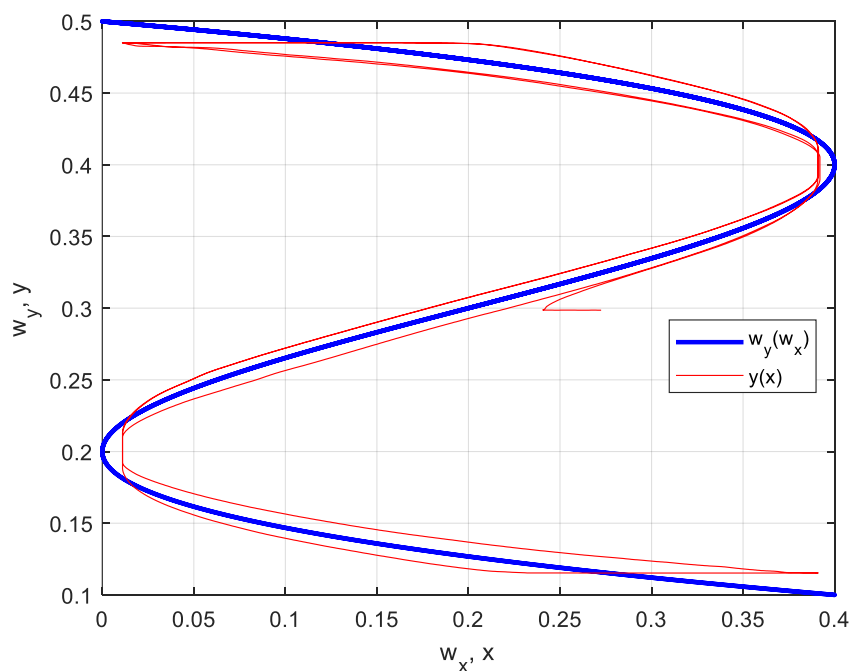
Obr. 35 – Upravený diagram úhlů břemene bez regulace (resp. průběh nestabilizované výchylky břemene v rovině XY) (vytvořeno v Matlab R2024a)



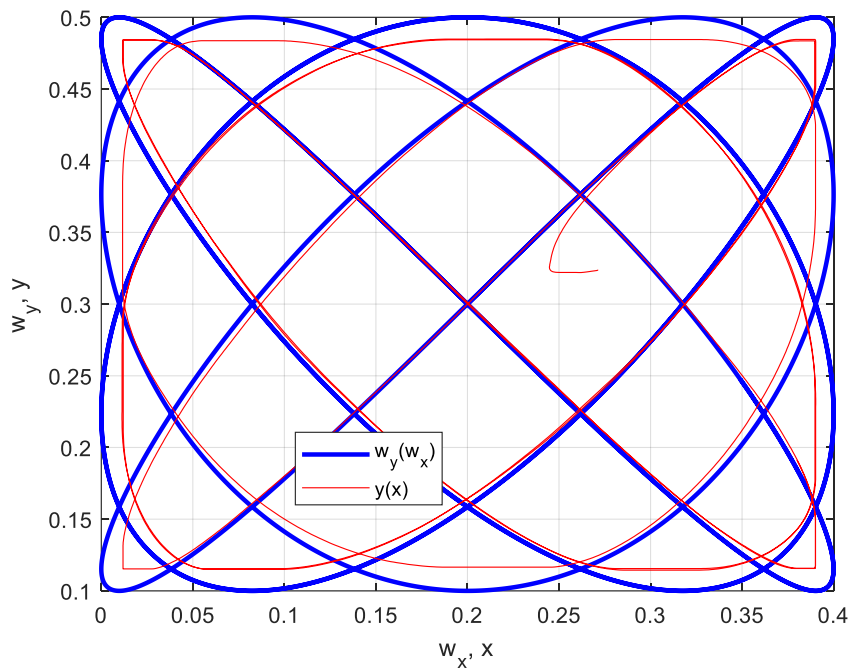
Obr. 36 – Upravený diagram úhlů břemene s regulací (resp. průběh stabilizované výchylky břemene v rovině XY) (vytvořeno v Matlab R2024a)

5.2 Lissajousovy obrazce

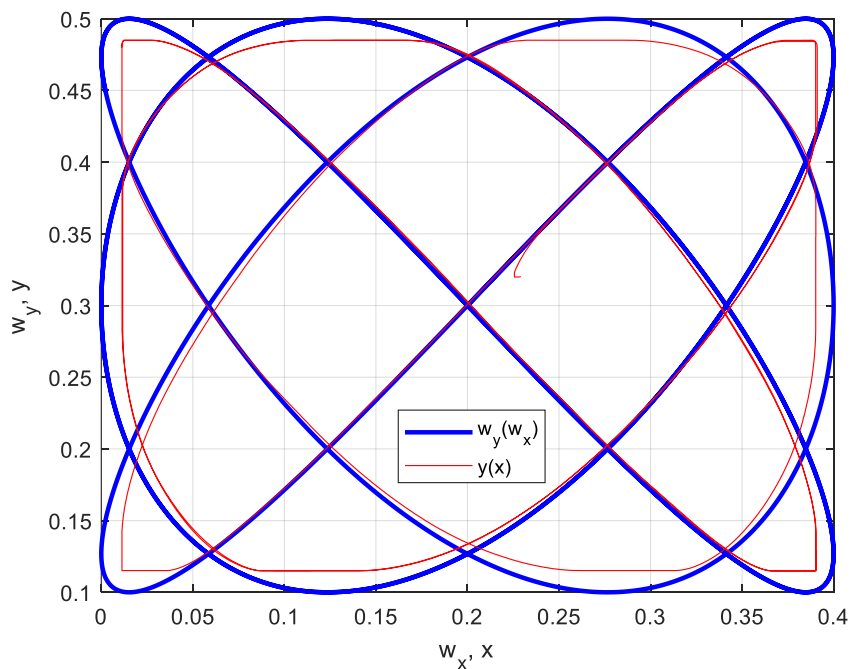
Vyřadte z funkce regulátory úhlu břemene a postupně měňte frekvence buzení tak, aby byly zajištěny jejich poměry: 3 ku 2, 4 ku 5, 3 ku 4, 5 ku 3 a 1 ku 1. Znamenejte a poté zpracujte a vykreslete průběhy odpovídajících Lissajousových obrazců. Možné průběhy jsou uvedeny na obr. 37 až obr. 41.



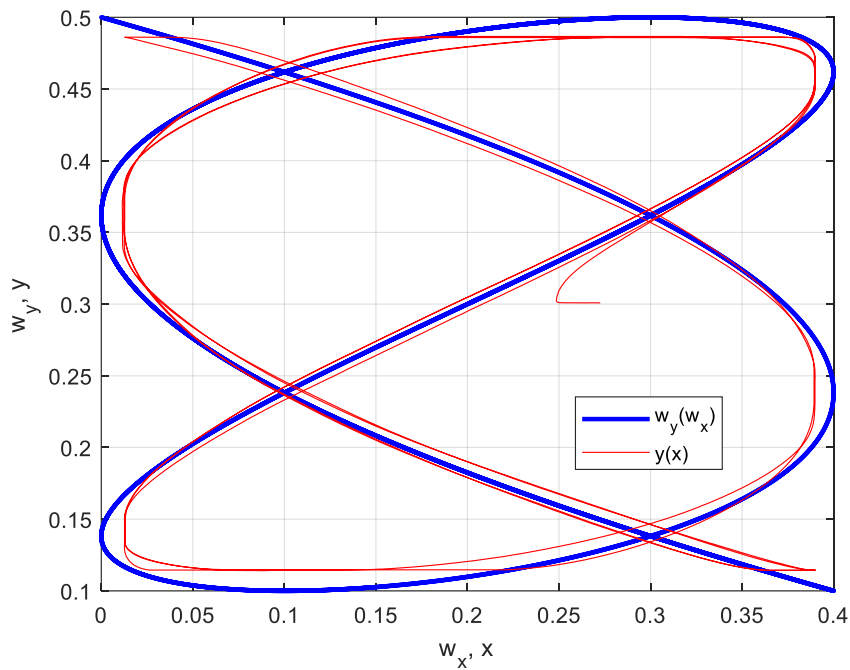
Obr. 37 – Trajektorie břemene při poměru frekvencí buzení 3 ku 2 (vytvořeno v Matlab R2024a)



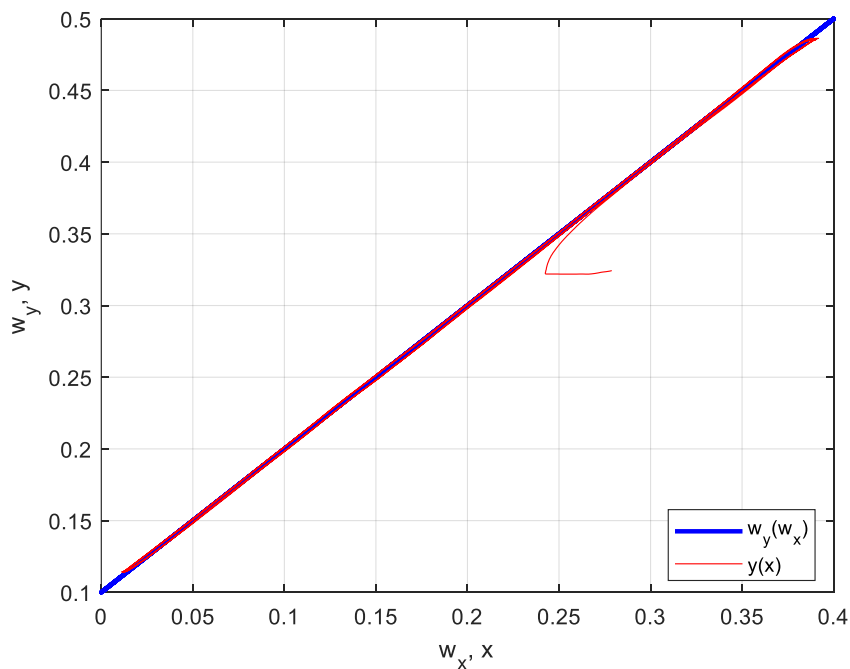
Obr. 38 – Trajektorie břemene při poměru frekvencí buzení 4 ku 5 (vytvořeno v Matlab R2024a)



Obr. 39 – Trajektorie břemene při poměru frekvencí buzení 3 ku 4 (vytvořeno v Matlab R2024a)



Obr. 40 – Trajektorie břemene při poměru frekvencí buzení 5 ku 3 (vytvořeno v Matlab R2024a)



Obr. 41 – Trajektorie břemene při poměru frekvencí buzení 1 ku 1 (vytvořeno v Matlab R2024a)

5.3 Vykreslování stavových trajektorií

Během experimentů se data ukládají do proměnných označených jako EX (blok Scope – Controls) a EX1 (blok Scope – States) a pokud to nebylo změněno, data se ukládají ve formátu **Structure with Time**. S uloženými daty je možné velmi jednoduše a přitom efektivně pracovat s využitím vhodného uživatelského skriptu, viz také odstavec 3.2. U všech grafů je vhodné vždy doplnit popisky os, legendu a příp. zobrazit mřížku. Pokud chceme vykreslit stavové trajektorie, tedy nikoli jen časové průběhy podobně jako na obr. 21 a obr. 25, skripty za tímto účelem upravíme, viz např. ukázka na obr. 42.

```
clc, close all, clear all

load exp01.mat
figure, plot(EX1.signals(1).values(:,1:2),EX1.signals(2).values(:,1:2), 'LineWidth', 2)
grid, xlabel('w_x, x'), ylabel('w_y, y')
legend('w_y(w_x)', 'y(x)', 'Location', 'best')

load ex03_20s.mat
figure, plot(EX.signals(1).values(:,1),EX.signals(2).values(:,1), '--ro', 'LineWidth', 2)
grid, xlabel('u_x'), ylabel('u_y')
figure, plot(EX.signals(1).values(12:end,1),EX.signals(2).values(12:end,1), '--ro', 'LineWidth', 2)
grid, xlabel('u_x'), ylabel('u_y')
figure, plot(EX.signals(1).values(12:end,1),EX.signals(2).values(12:end,1), '--ro', 'LineWidth', 2)
hold on, plot(EX1.signals(4).values(12:end,1),EX1.signals(5).values(12:end,1), 'b', 'LineWidth', 2)
grid, xlabel('u_x, x_a'), ylabel('u_y, y_a'), axis([-0.4 0.4 -0.6 0.6])

figure, plot(EX1.signals(4).values(12:end,1),EX1.signals(5).values(12:end,1), 'b', ...
EX1.signals(4).values(12:5:end,1),EX1.signals(5).values(12:5:end,1), 'bo')
grid, xlabel('x_a'), ylabel('y_a')

load ex04_20s.mat
figure, plot(EX.signals(1).values(35:end,1),EX.signals(2).values(35:end,1), '--mo', 'LineWidth', 2)
hold on, plot(EX1.signals(4).values(150:end,1),EX1.signals(5).values(150:end,1), 'bo')
grid, xlabel('u_x, x_a'), ylabel('u_y, y_a')

figure, plot(EX1.signals(4).values(150:end,1),EX1.signals(5).values(150:end,1), '-bo')
grid, xlabel('x_a'), ylabel('y_a')
```

Obr. 42 – Ukázka skriptů pro vykreslení stavových trajektorií a diagramů (printscreen) (MathWorks, 2024)

6 Pokyny pro vypracování

Technická zpráva (laboratorní protokol) bude obsahovat:

1. Stručnou zprávu o provedení všech úvodních testů podle kapitoly 2.2 s uvedením všech problémů, které nastaly a jejich případných řešení. Zejména je nutné, aby bylo vždy možné soustavu uvést do výchozí HOME pozice a do středové CENTER pozice.
2. Zaznamenané průběhy regulačních pochodů při řízení polohy ve směru osy X dle pokynů uvedených v kapitole 3 (minimálně 4 grafy). Hodnoty parametrů PID regulátoru polohy a výchylky úhlu břemene budou uvedeny v přehledné podobě v tabulkách. Dále bude připojena diskuze a hodnocení týkající vlivu nastavení regulátorů na (trvalou) regulační odchylku.

3. Zaznamenané průběhy regulačních pochodů při řízení polohy ve směru os X a Y a polohy břemene ve směru osy Z dle pokynů uvedených v kapitole 4. Hodnoty parametrů PID regulátorů polohy a výchylky úhlu břemene budou uvedeny v tabulkách. Protokol bude obsahovat nejméně 4 grafy se záznamy provedených experimentů.
4. Zaznamenané průběhy regulačních pochodů při řízení polohy ve směru os X a Y a polohy břemene ve směru osy Z při harmonickém buzení dle pokynů uvedených v kapitole 5.1 (minimálně 3 nastavení a 12 grafů). Pro každé z nastavení vykreslete, zaznamenejte a k protokolu přiložte: a) stavovou trajektorii polohy vozíku (žádanou i skutečnou polohu v jednom grafu), b) diagram akčních veličin, c) diagram úhlů břemene v jednom grafu s diagramem akčních veličin, d) průběhy nestabilizované, resp. stabilizované výchylky břemene v rovině XY.
5. Zaznamenané průběhy stavových (fázových) trajektorií odpovídající různým poměrům frekvencí buzení v osách X a Y dle pokynů v kapitole 5.2 (minimálně celkem 5 grafů).
6. Podrobný závěr s vlastním hodnocením. Hodnocení by mělo být věcné, týkající se všech provedených experimentů a jejich výsledků. Vyvarujte se zejména obecným frázím typu „měření se nám líbilo“, „vše se podařilo“ apod., které nemají z hlediska hodnocení žádný smysl. Vhodné je též uvést, jaké nastaly při práci v laboratoři problémy a jak jste se s nimi vypořádali.

7 Použitá literatura

INTECO, Sp. z o. o., 2024a. *3D Crane: Laboratory Model of Industrial Gantry Crane Controlled from PC* [online]. [cit. 10. 6. 2024]. Dostupné z: <http://www.inteco.com.pl/products/3d-crane/>

INTECO, Sp. z o. o., 2024b. *3D Crane System (USB/PCI version): User's Manual*.

INTECO, Sp. z o. o., 2024c. *3D Crane System (USB/PCI version): uživatelský manuál*. Překlad Václav HORČIC.

MATHWORKS Inc., 2024. *Matlab R2024a. Verze 24.1.0.2603908* [software]. [cit. 17. 6. 2024]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/products/matlab.html>

SKAŘUPA, Jiří, 2007. *Průmyslové roboty a manipulátory*. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TU Ostrava. ISBN 978-80-248-1522-0.

Seznam zkratk

3D třídimenzionální

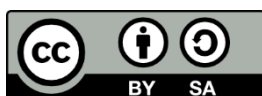
DAC Digital/Analog Converter (digitálně analogový převodník)

HMI Human Machine Interface (rozhraní člověk – stroj)

| | |
|-----|--|
| PC | Personal Computer (osobní počítač) |
| PCI | Peripheral Component Interconnect (sběrnice přídavných karet k základní desce) |
| PID | Proporcionálně Integračně Derivační |
| PLC | Programmable Logic Controller (programovatelný logický automat) |
| RT | Real-Time (reálný čas) |
| USB | Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice) |

Vytvořeno v rámci projektu **Studijní program Automatizace (SPAUT)**
na **Univerzitě Pardubice**, reg. č. NPO_UPCE_MSMT-16591/2022.

Toto dílo podléhá licenci Creative Commons BY 4.0. Pro zobrazení licenčních podmínek navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



Národní
plán
obnovy

MS
MIT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY