

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PREZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Diplomová práce

Návrh výukového pracoviště pro řízení elektrických pohonů



*Vysoká škola:* ČVUT v Praze  
*Fakulta:* strojní  
*Ústav:* Výrobní stroje a zařízení  
*Akademický rok:* 2015/2016

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

*pro* **Bc. Michal Drhlík**  
*Program:* Strojní inženýrství  
*Obor:* Výrobní stroje a zařízení

*Téma práce:* **Návrh výukového pracoviště pro řízení elektrických pohonů**  
**Design of the training station for electric drives control**

### **Stručná osnova zadání:**

Navrhněte pracoviště pro výuku cvičení předmětu Pohony výrobních strojů - servomechanismy III (PSS3); Zařízení musí sestávat ze 2 rotačních servomotorů, vybavených vlastním odměřováním. Pracoviště navrhněte jako rekonfigurovatelné tak, aby umožnilo cvičení na 1 a 2hmotovém systému i s vloženým převodem.

- 1) Vytipujte vhodné laboratorní úlohy v současné výuce předmětu PSS3.
- 2) Proveďte rozbor požadavků na zařízení (mechanická část, elektro, řízení, bezpečnost).
- 3) Navrhněte mechanickou konstrukci.
- 4) Navrhněte elektrickou část zařízení (měniče, jejich zapojení, popis konfigurace, atd.).
- 5) Navrhněte řízení standu s aparaturou myRIO od National Instruments a SW LabVIEW.
- 6) Navrhněte detailně minimálně 3 laboratorní úlohy, pro které připravíte kompletní podklady.

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 8. 7. 2016

.....

podpis

# Poděkování

Úvodem bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, Ing. Lukášovi Novotnému, Ph.D., za odborné vedení této diplomové práce, jeho podnětné rady a připomínky a pomoc při jejím vypracování.

Chtěl bych také poděkovat své manželce a rodině za podporu a trpělivost, se kterou mě podporovali při studiu a tvorbě této diplomové práce.

## Anotace

Autor:	Bc. Michal Drhlík
Název diplomové práce:	Návrh výukového pracoviště pro řízení elektrických pohonů
Rozsah práce:	74 str., 55 obr., 8 tab.
Rok vyhotovení:	2016
Universita:	České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Lukáš Novotný, PhD.
Konzultant diplomové práce:	Ing. Jiří Švéda, Ph.D.
Zadavatel:	České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní
Využití:	Výuka v rámci předmětu Pohony výrobních strojů – Servomechanismy III
Klíčová slova:	Elektrické pohony, kaskádní regulace, regulace rychlosti, regulace polohy, řízení mechanických soustav

### **Anotace:**

Diplomová práce se zabývá návrhem výukového zařízení pro řízení elektrických pohonů. Práce obsahuje rešerši současné koncepce výuku předmětu Pohony výrobních strojů – Servomechanismy III a praktickou část, která se zabývá návrhem mechanické konstrukce zařízení a návrhem jeho řízení.

## Annotation

Author:	Bc. Michal Drhlík
Title of thesis:	Design of the training station for electric devices control
Extent:	74 pg., 55 fig., 8 tab.
Academic year:	2016
University:	Czech Technical University in Prague Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Lukáš Novotný, PhD.
Consultant:	Ing. Jiří Švéda, Ph.D.
Submitter of the Theme:	Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Application:	Students' education in subject Drives of Production Machines – Servomechanisms III
Key words:	

### **Annotation:**

This thesis deals with the design of the training station for electric devices control. The thesis includes a research of the current conception of teaching Drives of Production Machines – Servomechanisms III subject and a practical part dealing with the design and construction of the training station and control design.

# Obsah

Přehled použitých zkratk	9
Přehled použitých veličin a jednotek	10
Úvod	11
Cíle práce	12
1 Využití standu ve výuce	13
1.1 Současná koncepce výuky PSS III.	13
1.2 Vytipování úloh pro cvičení PSS III	16
1.3 Požadavky na funkcionalitu výukového zařízení	16
2 Rozbor požadavků na zařízení	19
2.1 Mechanická část	19
2.2 Elektrokomponenty	20
2.3 Řízení	21
2.4 Bezpečnost	21
2.5 Ergonomie	21
3 Návrh mechanické konstrukce	23
3.1 Výpočet modálních vlastností mechanické struktury	26
3.2 Výčet mechanických komponent	30
4 Návrh elektrické části	31
4.1 Elektrické zapojení	34
4.2 Výčet elektrických komponent; bez řídicího počítače	39
5 Návrh laboratorních úloh	40
5.1 Řízení polohy a rychlosti jednohmotové mechanické soustavy	40
5.2 Řízení rychlosti dvouhmotové mechanické soustavy s poddajným členem	43
5.3 Řízení polohy a rychlosti dvouhmotové mechanické soustavy s vloženým převodem	45
5.4 Podklady k laboratorním úlohám	46
6 Návrh řízení	47
6.1 Řídicí aparatura NI myRIO	47
6.2 Část FPGA - obsluha vstupů a výstupů	48
6.3 RT řízení	51
6.3.1 Iniclace proměnných	51
6.3.2 Vazba na obsluhu I/O v FPGA	52
6.3.3 Kaskádní regulace	54

6.3.4	Generování vstupních signálů .....	55
6.3.5	Vizualizace měřených signálů.....	63
6.3.6	Ovládací panel.....	63
6.4	Vyhodnocení přenosových charakteristik.....	65
6.5	Ošetření proměnných .....	65
Závěr .....		67
Seznamy.....		69
Seznam použitých pramenů .....		69
Seznam obrázků.....		71
Seznam tabulek.....		72
Seznam použitých programů .....		73
Seznam příloh .....		73
Úkoly pro měření .....		3
Postup měření.....		4
Závěr .....		8
Úkoly pro měření .....		9
Postup měření.....		10
Závěr .....		12
Úkoly pro měření .....		13
Postup měření.....		14
Závěr .....		19



## Přehled použitých zkratek

CW .....	označení směru otáčení – po směru hodinových ručiček (clockwise)
CCW.....	označení směru otáčení – proti směru hodinových ručiček (counterclockwise)
FE.....	sestupná hrana signálu (Falling Edge)
FP.....	ovládací panel programu vytvořeného v LabVIEW (Front Panel)
FPGA.....	programovatelné hradlové pole (Field Programmable Gate Arrays)
I/O .....	zkratka označení typu signálů (Input/Output)
LP.....	označení filtru typu „dolní propust“ (Lowpass)
myRIO.....	obchodní označení produktu společnosti NI (Reconfigurable Input Output)
MSP .....	označení I/O konektoru počítače myRIO (Minisystem Port)
MXP .....	označení I/O konektoru počítače myRIO (myRIO Expansion Port)
NI .....	název společnosti - National Instruments
PSS III.....	Pohony výrobních strojů – Servomechanismy III.
PI .....	označení pro Proporcionálně-Integrační regulátor (obdobně P-regulátor)
PWM .....	pulsní šířková modulace (Pulse Width Modulation)
RE .....	náběžná hrana signálu (Rising Edge)
RT .....	Real Time
LVTTL.....	Low Voltage Transistor-Transistor Logic – standard pro digitální a logické obvody
Ú 12135.....	Ústav výrobních strojů a zařízení
VCSVTT .....	Výzkumné centrum strojírenské výrobní techniky a technologie
VI .....	označení pro program vytvořený v LabVIEW (Virtual Instrument)

## Přehled použitých veličin a jednotek

a	[m·s <sup>-2</sup> ]	zrychlení
C	[F]	kapacitance
I	[A]	elektrický proud
J	[kg/m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti
K <sub>p</sub>	[V·s/rad]	zesílení rychlostního regulátoru
K <sub>v</sub>	[s <sup>-1</sup> ]	zesílení polohového regulátoru
k <sub>tah</sub>	[N/m]	tahová tuhost
k <sub>tor</sub>	[N/rad]	torzní tuhost
m	[kg]	hmotnost
M <sub>k</sub>	[N·m]	krouticí moment
n	[ot/min]	otáčky
p	[-]	převodový poměr
R	[Ω]	elektrický odpor
T	[s]	čas
T <sub>N</sub>	[s]	integrační časová konstanta PI regulátoru
U	[V]	elektrické napětí
v	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost
x	[rad]	poloha
Ω	[rad/s]	vlastní frekvence

## Úvod

Pohony jsou nedílnou součástí nejen výrobních strojů a zařízení, ale všech zařízení, které mají vykonávat nějakou činnost. Zajišťují transformaci příslušného druhu energie na energii mechanickou, což je nezbytné pro zajištění požadované funkčnosti daného zařízení.

Absolvent strojního oboru, inženýr, by měl být schopen chápat jakýkoliv stroj v širších souvislostech. Návrh stroje s požadovanou funkčností, není pouze otázkou správné mechanické konstrukce. Jedná se o komplexní problém napříč technickými odvětvími. Konstruktor, strojař, se při konstrukčním návrhu stroje musí potýkat mimo jiné s návrhem pohonů. Při tomto návrhu je nutné uvažovat, že pohony musí mít přívody energií a také nějakou formu řízení. Tím se strojař dostává na pole elektrotechniky a programování.

Motivací této práce je přiblížení výuky předmětu Pohony výrobních strojů – Servomechanismy III na Ústavu výrobních strojů a zařízení studentům a umožnit jim, aby se mohli do cvičení aktivně zapojit. Požadavek je tedy vytvořit více výukových pracovišť, a to takových, aby studenti mohli být rozdělení do menších skupin a mohli samostatně pracovat na těchto výukových standech<sup>1</sup>. Studenti tak získají možnost se aktivně zapojit do cvičení, budou si moci mechanickou strukturu a vlastní regulaci bezpečně vyzkoušet naladit, rozladit, dostat k mezi nestability atd.

---

<sup>1</sup> Stand – převzatý výraz z německého jazyka „der Stand“ – stanoviště. V technických oborech používán pro označování technických zařízení, které mají speciální funkci, např. testovací stand, výukový stand.

## Cíle práce

Cílem práce je navrhnout kompaktní stand pro výuku cvičení zejména v rámci předmětu Pohony výrobních strojů – Servomechanismy III (PSS III). Tento komplexní úkol je rozdělen do několika dílčích cílů, aby jejich spojením v závěru práce vyústila v konečné řešení. Dílčí cíle práce jsou následující:

- 1) Seznámit se se současnou koncepcí výuku předmětu PSS III a na základě sylabu a obsahu cvičení výtípotvat vhodné laboratorní úlohy pro navrhované výukové zařízení
- 2) Provést rozbor požadavků na hlavní funkční celky zařízení na základě náplně výtípotvaných laboratorních cvičení
- 3) Navrhnout rekonfigurovatelnou mechanickou konstrukci výukového zařízení
- 4) Vybrat vhodné servopohony, navrhnout jejich elektrické zapojení a popsat jejich nastavení.
- 5) Navrhnout výtípotvané laboratorní úlohy a připravit kompletní podklady pro tato cvičení
- 6) Navrhnout řízení pomocí aparatury NI myRIO a vytvořit řídicí software v prostředí NI LabVIEW

# 1 Využití standu ve výuce

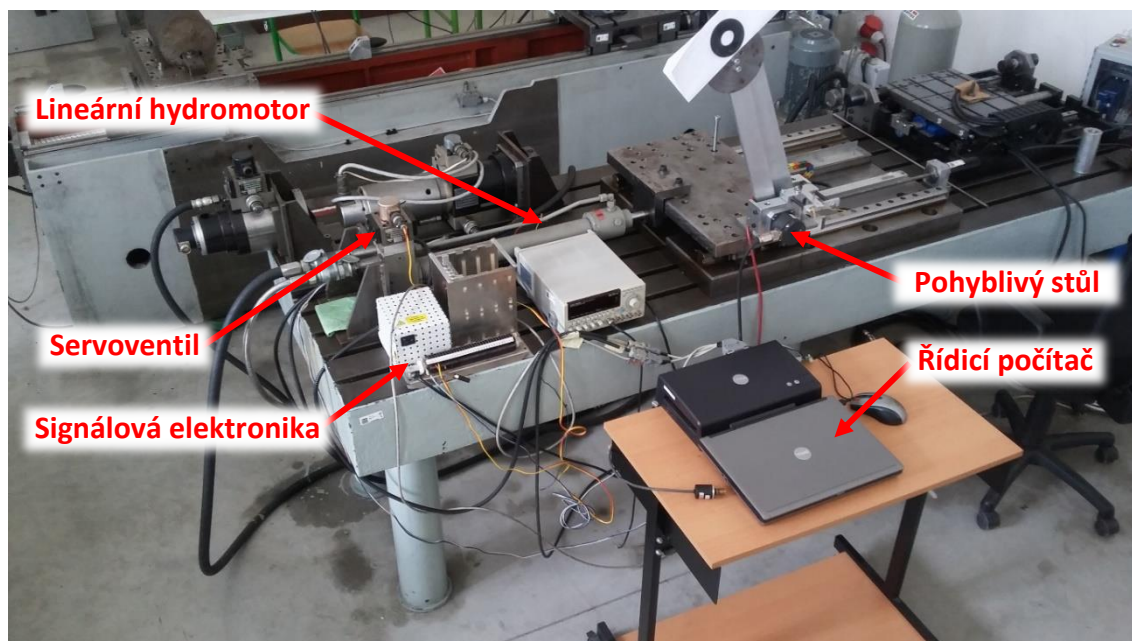
Tato kapitola je věnována seznámení se současnou koncepcí výuky předmětu Pohony výrobních strojů – servomechanismy III (PPS III). Je zde uveden obsah a forma jednotlivých cvičení. Jsou zde představena jednotlivá výuková zařízení, na kterých probíhá současná výuka předmětu PSS III. Jsou zde stanoveny požadavky na navrhované zařízení a vytipovány vhodné laboratorní úlohy pro podrobnější zpracování.

## 1.1 Současná koncepce výuky PSS III.

Laboratorní cvičení z předmětu PPS III probíhají v laboratořích Ústavu výrobních strojů a zařízení (Ú 12135). Během semestru probíhá šest laboratorních cvičení, viz Příloha č. 1 - Osnova výuky předmětu PSS III. Náplň jednotlivých cvičení a popis výukových standů, na kterých výuka probíhá je obsahem následujících odstavců této kapitoly.

### 1. cvičení – Řízení polohy lineárního hydromotoru

Náplň prvního cvičení je měření na standu s hydraulickým lineárním servomotorem, viz Obrázek 1, a vysvětlení pojmů: kaskádní regulace, zpětnovazebné řízení, zesílení polohové regulační smyčky a mez stability systému.



Obrázek 1: Stand s lineárním hydraulickým servomotorem

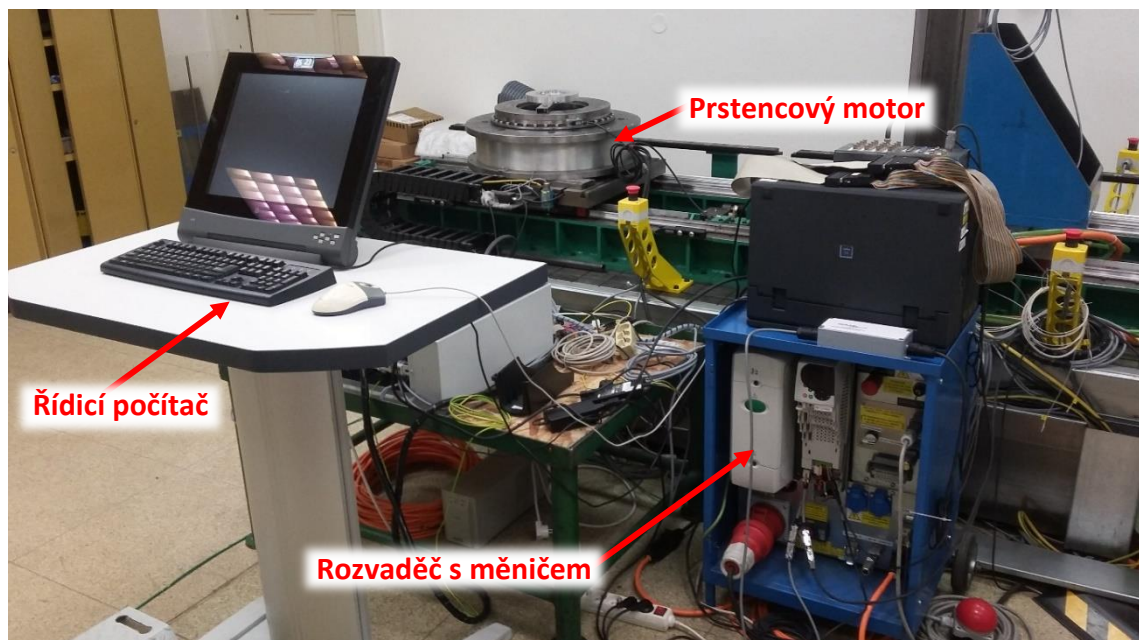
Nejprve je vysvětlena teorie zpětnovazební kaskádní regulace s uvažováním dynamiky systému servoventil - lineární hydromotor a odvození kritické budící frekvence a kritického zesílení polohové regulace.

Následně je na systému měřen přenos otevřené regulační smyčky pomocí měření odezvy na vstupní signál rychlosti ve formě bílého šumu. Z grafu amplitudové frekvenční charakteristiky je odečtena vlastní frekvence systému hydromotor – servoventil. Hodnota vlastní frekvence systému je zpětně dosazena do odvozeného vztahu pro výpočet kritického zesílení rychlostního regulátoru.

V závěru cvičení je ukázán vliv změny velikosti zesílení polohové regulační smyčky  $K_V$  na nájezd na požadovanou polohu hydromotoru. Nejprve je nastaveno nízké zesílení polohové regulace  $K_V$  a je sledováno zpoždění dosažení požadované polohy v grafu závislosti polohy na čase. Poté je zesílení  $K_V$  zvýšeno a je pozorováno menší zpoždění dosažení požadované polohy. Následně je zesílení polohového regulátoru zvýšeno až k mezi stability a je pozorováno překmitnutí požadované polohy, což je nepříjemné například u polohovací osy obráběcího stroje.

## 2. cvičení – Proudová regulace prstencového motoru

Na 2. cvičení je vysvětlena proudová regulace pohonu. Toto cvičení probíhá na standu ETB-1 v laboratořích Výzkumného centra pro strojírenskou výrobní techniku a technologii (VCSVTT). Zde je studentům předvedeno ladění konstant PI regulátoru v proudové vazbě a následné měření frekvenční charakteristiky prstencového motoru pomocí bílého šumu. Prstencový motor zde představuje jednohmotovou soustavu.



Obrázek 2: Stand ETB-1 s prstencovým motorem

## 3. cvičení – Řízení polohy a rychlosti prstencového motoru

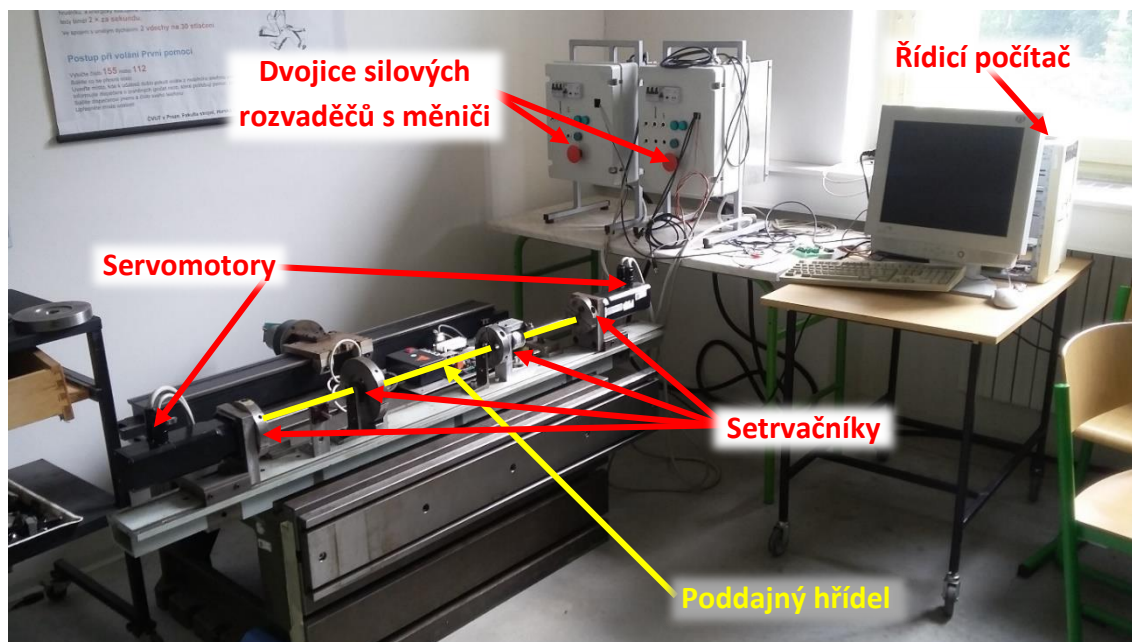
Toto cvičení navazuje na předcházející cvičení. Studentům je vysvětlena nastavba proudové regulace o rychlostní a polohovou. Náplní tohoto cvičení je ladění rychlostní a polohové regulační smyčky prstencového motoru na standu ETB-1 viz Obrázek 2. Dále se na standu měří dynamická poddajnost a frekvenční charakteristika rychlostní a polohové regulace pomocí bílého šumu. Opět je zde demonstrováno nestabilní chování motoru při nevhodně nastavených parametrech regulátoru.

## 4. cvičení – Řízení poddajné vícehmotové soustavy

Náplní 4. cvičení je vysvětlení dynamického chování mechanických soustav a jak se toto chování změní po zavedení proudové a rychlostní regulace a jak se chování mění v závislosti na změně parametrů regulátoru. Nejprve je studentům problematika vysvětlena na matematických modelech mechanických popř. elektrických soustav. Následně je na standu s čtyřhmotovou



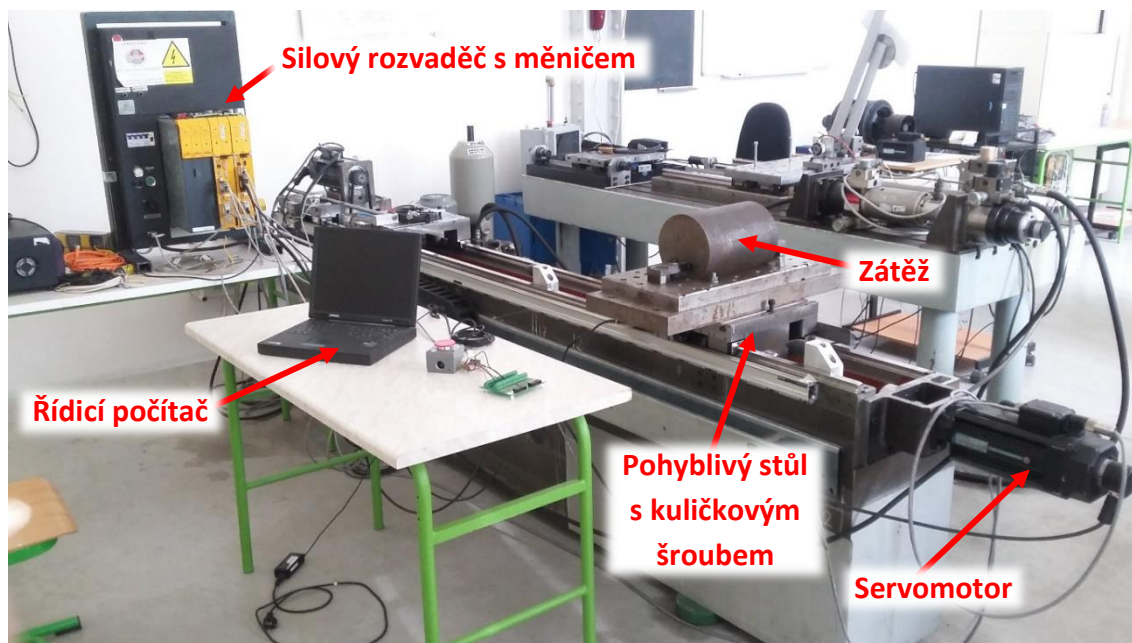
mechanikou ukázáno, že chování reálné mechaniky standu odpovídá chování matematických modelů. Obrázek 3 zobrazuje vícehmotový stand, na kterém probíhá 4. laboratorní cvičení.



Obrázek 3: Stand s čtyřhmotovou mechanickou soustavou

#### 5. cvičení – Řízení polohy a rychlosti pohonu s kuličkovým šroubem

Toto cvičení probíhá na standu s kuličkovým šroubem. Zde je studentům předvedeno, že i když se jedná o mechanicky jinak uspořádanou soustavu, z pohledu rychlostní regulace se chová jako předcházející vícehmotová mechanická soustava viz Obrázek 3 nahoře. Výrazný rozdíl nastává při uzavření polohové smyčky regulátoru, neboť soustava s kuličkovým šroubem má vložený převod, se kterým je nutno počítat. Studentům je zde vysvětleno, jaký vliv má přímé a nepřímé odměřování při polohové regulaci. Na Obrázek 4 jsou popsány hlavní části standu s kuličkovým šroubem.



Obrázek 4: Stand s kuličkovým šroubem

### **6. cvičení – Souběh dvou pohonů**

6. cvičení je věnováno problematice souběžného řízení dvou pohonů v „gantry“ regulaci, master – slave regulaci a regulaci paralelně zapojených pohonů. Následně je na výukovém standu s vícehmotovou mechanickou strukturou (viz Obrázek 3; str.:15) demonstrováno zapojení pohonů v souběžné regulaci. V závěru cvičení je věnován prostor k dotazům a diskuzi o látce probrané za celý uplynulý semestr. Účelem tohoto opakování je příprava na zkoušku, případně doplnění souvislostí nebo objasnění nejasností v probrané látce.

## **1.2 Vytipování úloh pro cvičení PSS III**

Z výše uvedeného popisu náplně jednotlivých cvičení z předmětu PSS III je patrné, že se každé cvičení věnuje konkrétnímu problému, ovlivňujícím regulaci pohonů a její naladění. Nosná témata cvičení jsou:

- Teorie kaskádní regulace a typy regulátorů v jednotlivých smyčkách, sledování jejich limitních stavů stability, řízení jednohmotové mechanické soustavy
- Řízení vícehmotové mechanické soustavy s poddajným členem, stabilita regulace (limitní a optimální naladění regulátorů)
- Řízení mechanické soustavy s vloženým převodem, vliv přímého a nepřímého odměřování, stabilita regulace (limitní a optimální naladění regulátorů)

Na základě těchto třech hlavních témat byly vytipovány následující laboratorní úlohy pro návrh výukového zařízení a podrobné zpracování podkladů pro cvičení:

### ***Řízení polohy a rychlosti jednohmotové mechanické soustavy***

Náplní této úlohy je vysvětlení teorie kaskádní regulace samotného pohonu se zátěží bez uvažování poddajnosti mezi pohonem a zátěží, což odpovídá obsahu třetího cvičení.

### ***Řízení rychlosti dvouhmotové mechanické soustavy s poddajným členem***

Náplní této úlohy je ukázka dynamického chování dvouhmotové mechanické soustavy s vloženým poddajným členem a jeho vliv na regulaci takové soustavy.

### ***Řízení polohy a rychlosti dvouhmotové mechanické soustavy s vloženým převodem***

Tato úloha je věnována problematice řízení dvouhmotové mechaniky s vloženým převodem a vlivu přímého a nepřímého odměřování.

## **1.3 Požadavky na funkcionalitu výukového zařízení**

Hlavními požadavky na navrhované výukové zařízení jsou bezpečnost, kompaktnost, modularita a spolehlivost. Navržené výukové zařízení by mělo zastupovat všechna zařízení, na kterých probíhají současná cvičení z předmětu PSS III. Konkrétně stand s prstencovým motorem (Obrázek 2; str.:14), stand s poddajnou čtyřhmotovou soustavou (Obrázek 3; str.:15) a stand s kuličkovým šroubem (Obrázek 4; str.:15). Z těchto předpokladů vychází požadavek na modularitu. Dále je zde požadavek na kompaktnost a snadnou přenositelnost. Stand by se měl dát přenést v jednom, maximálně dvou lidech a měl by se dát převézt osobním automobilem,



což umožní úklid standu v období zimního semestru, kdy výuka předmětu PSS III neprobíhá a prezentování standu a výuky Ú 12135 na oborových dnech, dnech otevřených dveří, veletrzích, apod.

Z výše uvedeného obsahu jednotlivých cvičení vyplývají následující požadavky na funkcionalitu výukového pracoviště:

### **Úloha 1: Řízení polohy a rychlosti jednohmotové mechanické soustavy**

Pro cvičení, na kterém je vysvětlena problematika kaskádní regulace pohonu, je nezbytný servomotor s příslušným servoměničem, jež umožňuje řízení motoru zadáváním požadovaného proudu. Pro snadné naladění regulačních smyček je žádoucí vytvořit řídicí software mimo měnič servopohonu, uzavřít rychlostní a polohovou regulační smyčku v řídicím počítači a zadávat parametry regulátorů v řídicím softwaru na tomto počítači. Pro zavedení rychlostní regulace je nutné snímat úhlové natočení rotoru motoru a tuto informaci přenést do řídicí aparatury, kde je následně zderivována a zavedena do rychlostního regulátoru jako zpětná vazba. Z řídicí soustavy je naopak nutné zadávat hodnotu žádaného krouticího momentu do měniče a signály logického řízení, proto musí být vybavena dostatečným množstvím vstupů a výstupů..

Požadavky na navrhované výukové zařízení pro naplnění obsahu první úlohy jsou následující:

- Servomotor s měničem umožňující řízení v proudové vazbě.
- Řízení v rychlostní a polohové zpětné vazbě s možností nastavení konstant rychlostního PI regulátoru a polohového zesílení  $K_V$
- Zadávání vstupních signálů jako žádané hodnoty do regulace (skok rychlosti, rampa polohy, bílý šum)
- Měření odezvy na skok žádané rychlosti pro nastavení regulátoru dle Ziegler-Nicholsovy metody
- Měření odezvy na rampu žádané polohy a polohové regulační odchylky
- Zadávání poruchové veličiny do kaskádní regulace ve formě skoku síly (proudu) a bílého šumu
- Měření frekvenčních přenosových charakteristik:

$$\frac{v_{skutečná}}{v_{žádaná}}; \frac{v_{skutečná}}{M_K \text{ poruchy}}; \frac{x_{skutečná}}{x_{žádaná}}; \frac{x_{skutečná}}{M_K \text{ poruchy}}$$

### **Úloha 2: Řízení rychlosti dvouhmotové mechanické soustavy s poddaným členem**

Z obsahu druhé navrhované laboratorní úlohy, ve které je vysvětlena problematika rychlostní regulace poddajné mechanické struktury, vyplývá požadavek na řídicí aparaturu se softwarem, ve kterém bude uzavřena rychlostní regulační smyčka.

Navrhované zařízení musí tedy pro naplnění obsahu druhé laboratorní úlohy splňovat následující požadavky:

- Minimálně dvoumotová mechanická soustava s vloženým poddajným členem
- Řízení soustavy v rychlostní zpětné vazbě s možností nastavení konstant rychlostního PI regulátoru
- Zadávání vstupních signálů jako žádané hodnoty do regulace (skok rychlosti, bílý šum)
- Měření odezvy na skok žádané rychlosti pro nastavení regulátoru dle Ziegler - Nicholsovy metody
- Zadávání poruchové veličiny do kaskádní regulace ve formě skoku síly a bílého šumu
- Měření frekvenčních přenosových charakteristik:

$$\frac{v_{skutečná}}{v_{žádaná}}; \frac{v_{skutečná}}{M_K \text{ poruchy}}$$

### **Úloha 3: Řízení polohy a rychlosti dvoumotové mechanické soustavy s vloženým převodem**

Obsahem třetí navrhované laboratorní úlohy je polohová a rychlostní regulace vícehmotové mechaniky s vloženým převodem.

Navrhované zařízení je tedy náhradou za stand s kuličkovým šroubem. Pro naplnění obsahu třetí laboratorní úlohy byly stanoveny následující požadavky na zařízení:

- Dvoumotová mechanická soustava s vloženým poddajným členem s dvěma odměřovacími systémy pro přímé a nepřímé odměřování
- Řízení soustavy v rychlostní a polohové zpětné vazbě s možností nastavení konstant rychlostního PI regulátoru a polohového zesílení  $K_V$
- Možnost přepínání uzavření zpětné vazby regulace mezi přímým a nepřímým odměřováním
- Zadávání vstupních signálů jako žádané hodnoty do regulace (skok rychlosti, rampa polohy, bílý šum)
- Měření odezvy systému na vstupní signál žádané veličiny pro naladění konstant regulátorů
- Zadávání poruchové veličiny do kaskádní regulace ve formě skoku síly a bílého šumu
- Měření frekvenčních přenosových charakteristik pro přímé i nepřímé odměřování:

$$\frac{v_{skutečná}}{v_{žádaná}}; \frac{v_{skutečná}}{M_K \text{ poruchy}}; \frac{x_{skutečná}}{x_{žádaná}}; \frac{x_{skutečná}}{M_K \text{ poruchy}}$$

### **Bezpečnost**

Provoz navrhovaného výukového zařízení musí být bezpečný. Již z rozboru požadavků je patrné, že se navrhovaný stand bude sestávat z rotujících setrvačníků, proto je nutné zamezit kontaktu obsluhy s pohybujícími se částmi zařízení.

## 2 Rozbor požadavků na zařízení

V kapitole 1.3 byly stanoveny obecné požadavky na funkcionalitu navrhovaného výukového pracoviště. V této kapitole budou tyto požadavky upřesněny, aby následně mohly být vytypovány konkrétní komponenty pro výběr a nákup.

Z výše uvedeného vyplývá, že se výukový stand bude skládat z následujících komponent:

- upínací deska, zajišťující variabilitu upínání
- servomotor s měničem
- poddajný člen
- vložený převod
- řídicí počítač s řídicím softwarem
- bezpečnostní kryt

### 2.1 Mechanická část

#### *Upínací deska*

Upínací deska výukového zařízení musí zajišťovat možnost variabilního upnutí pohonů a mechanické struktury. Měla by být velmi tuhá, aby bylo docíleno pokud možno co největšího přiblížení se modelovým příkladům, ve kterých je uvažován dokonale tuhý základ, zároveň by však měla mít poměrně nízkou hmotnost, aby se dal výukový stand snadno přenášet bez nutnosti použití manipulační techniky.

Byly stanoveny následující požadavky na upínací desku:

- Vysoký poměr tuhost/hmotnost
- Zajištění variabilního upínání mechanické struktury
- Zajištění dostatečně přesného a opakovatelného upnutí mechanické soustavy

#### *Konzole motoru*

Konzole musí zajišťovat pevné a tuhé upnutí servomotoru na upínací desku výukového zařízení. Připojovací rozměry a systém upnutí musí zaručovat dostatečnou variabilitu upnutí servomotorů na upínací desku.

Požadavky na konzoli motoru byly stanoveny následovně:

- Tuhé a pevné uchycení servomotoru na upínací desku
- Kompatibilita připojovacích rozměrů s upínací deskou
- Zajištění variabilního upínání mechanické konstrukce

### ***Vložená mechanická struktura***

Pro naplnění obsahu 2. a 3. výtípané úlohy musí navrhované výukové zařízení obsahovat vloženou mechanickou strukturu s vlastnostmi, dle nároků jednotlivých úloh.

Pro nároky 2. výtípané laboratorní úlohy musí navrhovaná vložená mechanická struktura splňovat následující požadavky:

- Poddajné spojení dvou servomotorů
- Simulace setrvačných účinků soustavy s vhodnými modálními vlastnostmi - snadno vybuditelné vlastní frekvence pod 100 Hz
- Tuhá a kompatibilní připojitelnost mechanické struktury k servopohonům, případně upínací desce

Pro nároky 3. výtípané laboratorní úlohy musí mechanická struktura splňovat následující požadavky:

- Spojení dvou servopohonů v převodovém poměru
- Vhodné modální vlastnosti – vlastní frekvence pod 100 Hz
- Kompatibilní a tuhé připojení k servopohonům, případně k upínací desce

## **2.2 Elektrokomponenty**

### ***Servopohon***

Výtípané laboratorní úlohy mohou být bezesporu provedeny na lineárním, prstencovém nebo „klasickém“ rotačním servomotoru. Lineární a prstencové servomotory jsou v průmyslové praxi užívány převážně v speciálních aplikacích. S ohledem na cenu byl už od počátku uvažován již zmíněný, v průmyslu nejběžněji používaný, „klasický“ rotační servomotor s příslušným měničem. Požadavky na pohony výukového standu byly stanoveny následovně:

#### ***Rotační servomotor:***

Nominální krouticí moment:	cca 0,5 Nm
Nominální otáčky:	3-5 tis. ot.·min <sup>-1</sup>
Výkon:	do 300 W
Odměřování:	enkodér s výstupem TTL

#### ***Servoměnič:***

Možnost řízení v proudové smyčce

Takt proudové smyčky a aktualizace proudu 250 μs nebo rychlejší

Možnost zadávání požadované hodnoty proudu digitálním vstupem PWM nebo analogovým signálem +/-10V

Napájecí napětí 230 VAC

#### ***Elektroinstalační materiál***

Nedílnou součástí navrhovaného zařízení je elektrický rozvaděč, ve kterém jsou umístěny servoměniče a zdroj napětí. Požadavky na tento rozvaděč jsou kompaktnost a samozřejmě shoda s bezpečnostními předpisy. Z tohoto důvodu bude realizace zadána patřičně kvalifikovanému elektrotechnikovi.

## 2.3 Řízení

Hardware řídicí aparatury výukového zařízení obstarává vlastní regulaci pohonů v rychlostní a polohové vazbě. Pro to je nezbytné snímat signál z odměřování polohy pohonů, tuto informaci, pro potřeby regulace rychlosti zderivovat na rychlost, vypočítat regulační odchylku ve zpětnovazebním regulátoru a vyslat řídicí signál do měničů pohonů. To vše v reálném čase.

Požadavky na řídicí aparaturu jsou tedy následující:

- Dostatečný počet digitálních a analogových vstupů a výstupů
- Dostatečný výpočetní výkon
- Schopnost řízení v reálném čase (takt regulačních smyček v rozsahu 250  $\mu$ s – 1ms)

## 2.4 Bezpečnost

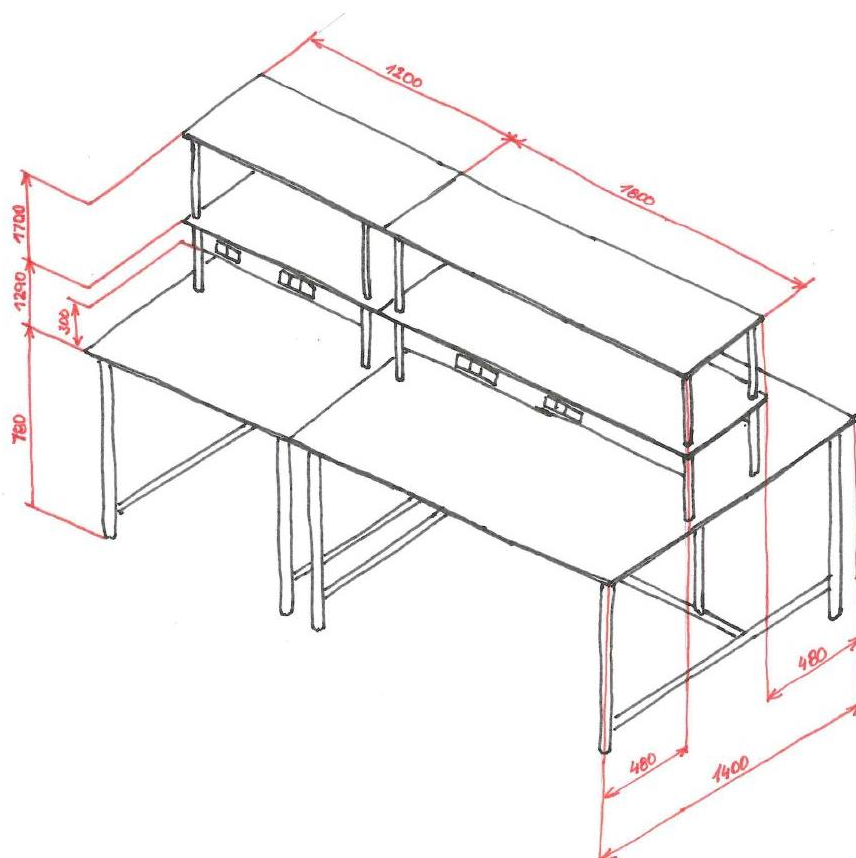
Důležitým požadavkem na výukové zařízení je jeho bezpečnost. Součástí navrhovaného zařízení jsou rotující setrvačníky, případně rotující řemenový převod. Je tedy nezbytné zakrytování veškerých rotujících součástí za účelem zamezení jakýkoliv škod na zdraví popřípadě majetku a to jak studentů, tak vyučujících. Zároveň je žádoucí, aby bylo krytování vyrobeno z průhledného materiálu, aby bylo možné sledovat chování mechanické struktury během provozu.

Požadavky na bezpečnostní krytování jsou následující:

- Zamezení vědomého či letmého kontaktu obsluhy s rotujícími částmi zařízení
- Odnímatelnost
- Průhlednost
- Zajištění průchodu kabeláže z elektrického rozvaděče k motorům

## 2.5 Ergonomie

Navrhované výukové zařízení bude umístěno v laboratoři A-131c na Ú12135. Schéma pracoviště, na které je zamýšleno primárně umístit výukové zařízení, znázorňuje Obrázek 5 na následující straně. Z rozměrů je patrné zamýšlené rozdělení pracoviště na čtyři pracovní místa. Rozměry navrhovaného zařízení tedy musí být takové, aby bylo zajištěno dostatek pracovního místa pro ergonomické užívání výukového zařízení, a to i při plném obsazení pracoviště čtyřmi výukovými zařízeními.



Obrázek 5: Pracoviště v laboratoři A-131c

Dle rozměrů laboratorního pracoviště byly stanoveny následující požadavky na rozměry výukového zařízení:

Maximální rozměry výukového zařízení s mechanickou strukturou:

Výška: 300 mm

Šířka: 300 mm

Délka: 1300 mm

Výukové zařízení je plánováno umístit na pracovní desku pracoviště. Rozměry byly zvoleny s ohledem na možnost plného obsazení pracoviště čtyřmi výukovými zařízeními. Výška zařízení je limitovaná výškou umístění panelu se zásuvkami a hlavním vypínačem přívodu elektrické energie pracoviště.

Maximální rozměry rozvaděče:

Výška: 400 mm

Šířka: 200 mm

Délka: 600 mm

Elektrický rozvaděč je plánováno umístit do první police pracoviště. Maximální rozměry rozvaděče jsou limitovány rozměry prostoru mezi policemi.

### 3 Návrh mechanické konstrukce

V následující kapitole bude proveden návrh mechanické konstrukce jednotlivých dílů, dle požadavků stanovených v kapitole 2.1.

#### **Upínací deska**

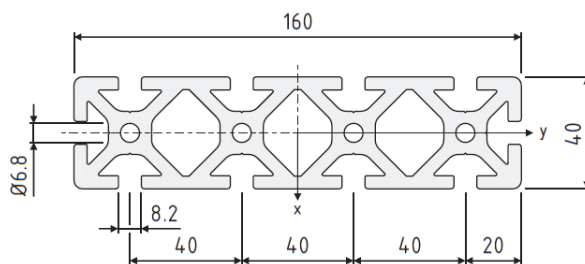
Vhodným prvkem pro variabilní upínání je systém T-drážek s vhodně zvolenou roztečí. Nabízejí se tedy dvě konstrukční varianty upínací desky: obráběná upínací deska z oceli, nebo hliníkový profil s T-drážkami.

Ocelový obrobek by měl jistě větší tuhost než hliníkový profil srovnatelných rozměrů, nicméně konečná cena výroby této desky by byla nesrovnatelně vyšší než nákup hliníkového profilu. Co se týče hmotnosti, je ocelová konstrukce nevýhodnou.

Hliníkový profil je oproti ocelovému obrobku výrazně levnější a také lehčí. Nevýhodou této konstrukce je její nižší tuhost. Dalším nedostatkem je, že při častém přeupínání komponent mechanické struktury na hliníkovém profilu může dojít k omačkání dotykových ploch v T-drážkách profilu.

S ohledem na výše uvedené výhody a nevýhody navrhovaných řešení byla pro první kus zvolena varianta s hliníkovým profilem kvůli nižší ceně a kratšímu termínu dodání. Nízkou tuhost hliníkového profilu bude možné částečně kompenzovat přimontováním upínací desky k desce stolu, na kterém bude výukové pracoviště umístěno. Nežádoucí omačkání T-drážek v hliníkovém profilu není v současnosti možné zohlednit, protože není známa četnost přeupínání mechanické struktury standu. Je žádoucí, aby byl tento jev sledován a zohledněn při realizování dalších kusů výukových pracovišť.

Konkrétně byl vybrán hliníkový profil od prodejce MAREK Industrial, a.s. s roztečí T-drážek 40 mm o rozměrech 160x40 mm. Průřez zvoleného profilu je uveden na Obrázek 6. Typové označení vybraného profilu je: 40x160 S8, kde S označuje nejpevnější řadu nabízených profilů, 8 značí velikost T-drážek pro spojovací materiál M8 (1). Technická dokumentace hliníkových profilů a příslušného speciálního spojovacího materiálu je na CD, které je přílohou této práce

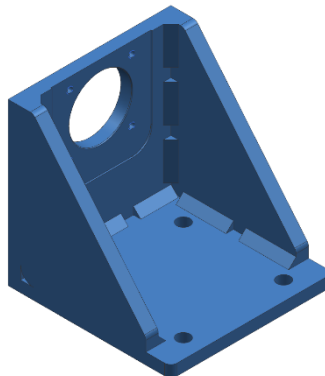


Obrázek 6: Průřez hliníkového profilu 40x160 S8; zdroj: (1)

#### **Konzole motoru**

Pro uchycení motoru je uvažována ocelová svařovaná konzole. Protože tato konzole musí zajišťovat dostatečně pevné a tuhé uchycení motorů na upínací desku, bylo zvoleno vyrobít konzoli z plechů o tloušťce 10mm. Způsob uchycení a připojovací rozměry servomotoru byly zvoleny dle technické dokumentace výrobce motoru (2). Rozteč děr pro připojení konzole k upínací desce byla zvolena s ohledem na vybraný upevňovací profil. Pro výrobu konzole motoru

byla vypracována výrobní výkresová dokumentace, která je přílohou této práce. Na Obrázek 7 je uvedena navržená konzole pro uchycení servomotorů k upínací desce.



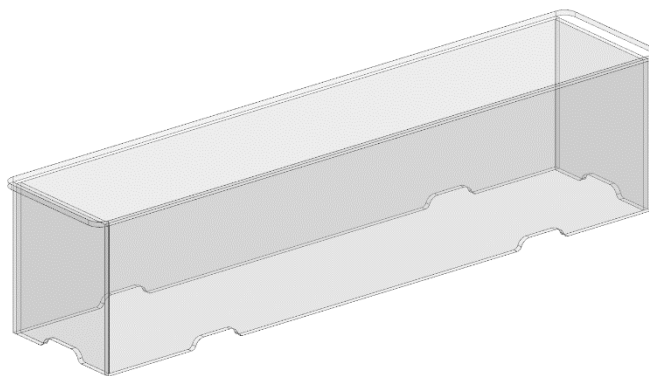
Obrázek 7: Konzole motoru

Servomotor je ke konzoli uchycen pomocí čtyř šroubů M5, pozice je definována pomocí středícího průměru na přírubě motoru.

Konzole je uchycena na upevňovací profil pomocí čtyř šroubů s T-hlavou M8 s maticemi.

### **Krytování**

Při provozu výukového zařízení nebudou na servomotory, případně vloženou mechanickou strukturu, působit žádné vnější zatěžující síly, kromě setrvačných účinků vlastní mechaniky zařízení. Z tohoto důvodu není předpokládáno samovolné uvolnění rotujících dílů. Funkce krytování je tedy omezena pouze na zamezení namotání rukou, vlasů nebo šatstva. Vhodným řešením je odnímatelný kryt z průhledného plexiskla, který zajistí bezpečnost obsluhy při provozování zařízení a zároveň umožní studentům sledovat chování mechanické soustavy. Na spodní hraně krytu jsou vybrány pro přívod kabeláže. Navržený ochranný kryt ne uveden na Obrázek 8. Pro výrobu bezpečnostního krytu byla vypracována výrobní výkresová dokumentace, která je přílohou této práce.

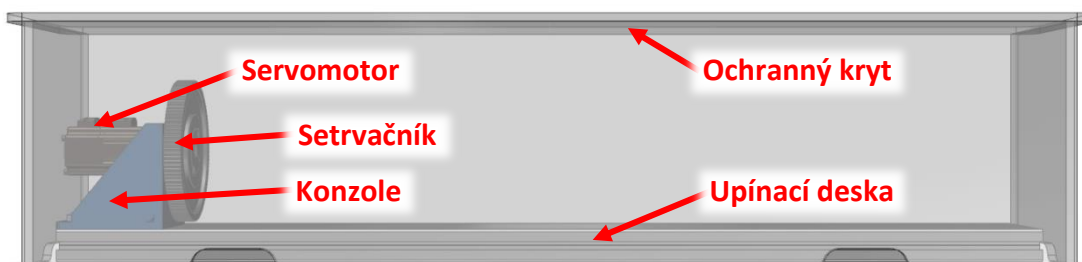


Obrázek 8: Krytování výukového zařízení



### **Konfigurace s jednohmotovou mechanickou soustavu**

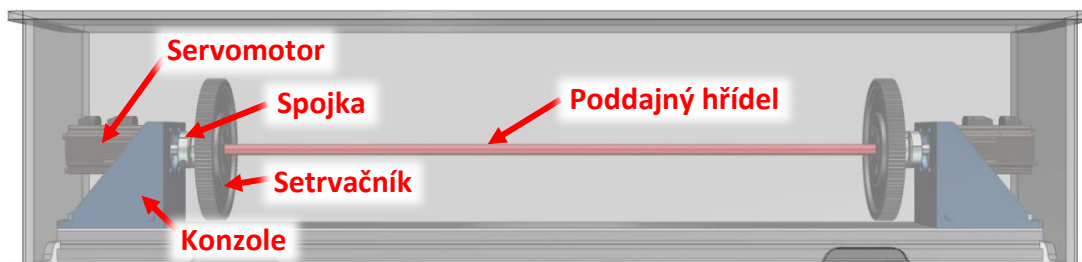
Následující Obrázek 9 zobrazuje návrh výukového zařízení v konfiguraci pro výuku 1. laboratorní úlohy – Řízení polohy a rychlosti jednohmotové mechanické soustavy. Jak je z obrázku patrné, tato konfigurace se sestává z upínací desky, konzole, servomotoru, setrvačnicku a krytu. Vybrání ve spodní hraně krytu slouží jako otvory pro přívod kabelů k motoru. Jako setrvačnick je použita ozubená řemenice uchycená pomocí svěrného Taper-Lock pouzdra na hřídel servomotoru.



Obrázek 9: Návrh výukového zařízení - konfigurace pro 1. laboratorní úlohu

### **Konfigurace pro dvouhmotovou mechanickou soustavu s vloženým poddajným členem**

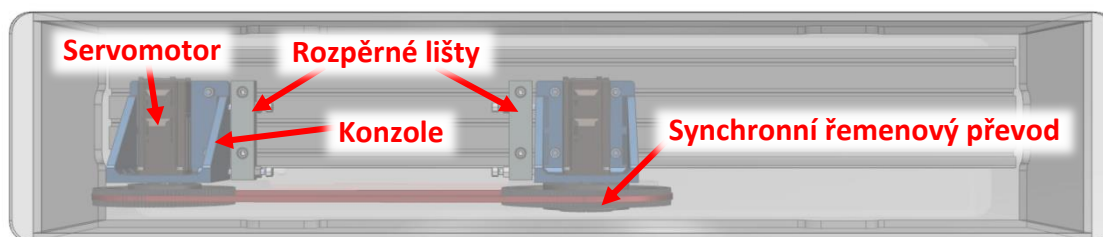
Jako poddajný člen v mechanické struktuře pro konfiguraci pro druhou laboratorní úlohu byl použit dlouhý štíhlý hřídel, jako je tomu na současném výukovém standu s vícehmotovou mechanikou viz Obrázek 3; str.: 15. Pro simulaci hmotných konstrukčních celků pomyslného stroje byly použity setrvačnick ve formě ocelových ozubených řemenic upnutých na koncích poddajného hřídele pomocí svěrných Taper-Lock pouzder. Konfiguraci navrhovaného výukového zařízení pro 2. laboratorní úlohu znázorňuje Obrázek 10.



Obrázek 10: Návrh výukového zařízení - konfigurace pro 2. laboratorní úlohu

### **Konfigurace pro dvouhmotovou mechanickou soustavu s vloženým převodem**

Vložený převod v mechanické struktuře pro konfiguraci třetí laboratorní úlohy byl uvažován jako řemenový převod se synchronním řemenem. V této konfiguraci představují ozubené řemenice setrvačné účinky konstrukčních celků pomyslného stroje. Řemenice jsou opět uchyceny pomocí svěrných Taper-Lock pouzder. Konfiguraci výukového zařízení s dvouhmotovou mechanickou strukturou pro 3. laboratorní úlohu zobrazuje Obrázek 11, str.: 26.



Obrázek 11: Návrh výukového zařízení - konfigurace pro 3. laboratorní úlohu

V této konfiguraci navrhovaného zařízení je nutné nastavit správné předpětí řemene a zajistit rovnoběžnost os obou servomotorů, aby nedocházelo ke sbíhání ozubeného řemene z řemenic. Za tímto účelem byly navrženy rozpěrné lišty, které pomocí dvojice stavěcích šroubů umožní nastavit, jak správné předpětí řemene, tak správnou polohu konzolí tak, aby nedocházelo ke sbíhání řemene z řemenic.

V této konfiguraci mechanické struktury je vždy jeden motor hnací a druhý je použit pro odměřování polohy koncového bodu hřídele. Výhodou je, že druhý motor s odměřováním může být využit pro simulaci zátěže na koncovém bodu kinematického řetězce. Simulována může být například řezná síla na jednotlivých zubech frézy, nerovnoměrnost chodu nebo tribologické účinky v koncovém členu kinematického řetězce.

### 3.1 Výpočet modálních vlastností mechanické struktury

Navrhované zařízení bude užíváno jako výuková pomůcka, je tedy vhodné, aby frekvenční projevy mechanické struktury byly názorné. Z tohoto důvodu je žádoucí, aby vlastní frekvence mechanické struktury byly v řádech desítek Hz v pásmu do 100 Hz, výrazné a snadno vybuditelné.

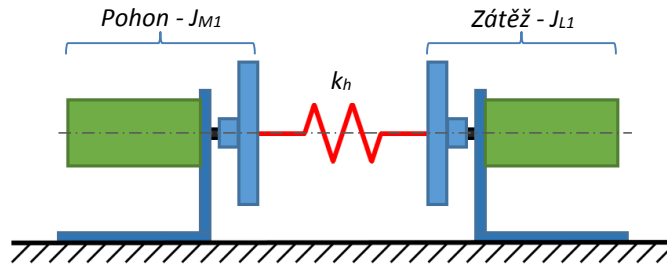
Nejprve byl proveden orientačně návrhový výpočet modálních vlastností navrhované mechanické struktury, uvedené postupy a vztahy byly převzaty z (3). Schémata mechanických modelů pro výpočet jsou patrná z obrázků, které jsou uvedeny u výpočtu.

Na základě tohoto výpočtu byly zvoleny velikosti ozubených řemenic, coby setrvačníky v mechanické struktuře, průměr poddajného hřídele a velikost ozubeného řemenu. Pro tento výpočet byl použit software Matlab. Zdrojový kód zmiňovaného skriptu včetně hodnot vstupních parametrů výpočtu obsahuje Příloha č. 2. Následující odstavce popisují postup a vzorce použité v orientačně návrhovém výpočtu.

Jak již bylo zmíněno výše, bude u obou dvoumotorových soustav jeden motor používán jako pohon a druhý pro odměřování polohy koncového bodu kinematického řetězce mechanické struktury. V následujících výpočtech je užíváno pro označení parametrů určujících vlastnosti pohonu indexu M (jako MOTOR) a vlastností koncového členu kinematického řetězce, zátěže, indexu L (jako LOAD)

### Výpočet pro soustavu s poddajným hřídelem

Schéma mechanické struktury druhé laboratorní úlohy je patrné z Obrázek 12.



Obrázek 12: Schéma mechanické struktury 2. laboratorní úlohy

Výpočet vlastní frekvence pohonu při zablokované zátěži:

$$\Omega_{M1} = \sqrt{\frac{k_h}{J_{M1}}} \quad (3.1)$$

Kde:  $J_{M1}$  je moment setrvačnosti zátěže (setrvačnick, spojka a rotor pohonu)  
 $k_h$  je torzní tuhost hřídele spojující setrvačnicky

Výpočet vlastní frekvence zátěže při zablokovaném pohonu:

$$\Omega_{L1} = \sqrt{\frac{k_h}{J_{L1}}} \quad (3.2)$$

Kde:  $J_{L1}$  je moment setrvačnosti zátěže (setrvačnick, spojka a rotor pohonu)  
 $k_h$  je torzní tuhost hřídele spojující setrvačnicky

Vlastní frekvence zátěže při zablokovaném motoru je antirezonanční frekvencí soustavy z pohledu pohonu.

Výpočet vlastní frekvence volně kmitající soustavy:

$$\Omega_{V1} = \sqrt{\frac{k_h \cdot (J_{M1} + J_{L1})}{(J_{M1} \cdot J_{L1})}} \quad (3.3)$$

Výpočet maximálních otáček dle (4):

$$n_{max} = 0,8 \cdot 10^4 \cdot \frac{D_h}{l_h^2} \cdot f_n \quad (3.4)$$

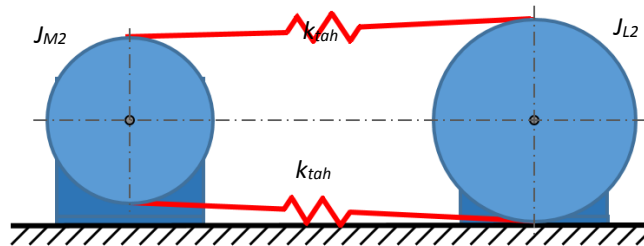
Kde: 0,8 je koeficient bezpečnosti  
 $D_h$  je průměr hřídele  
 $f_n$  je koeficient určující typ uložení ( $f_n=10$ )  
 $l_h$  je délka hřídele

Výsledky výpočtu modálních vlastností mechanické soustavy pro 2. laboratorní úlohu:

$$\begin{aligned}\Omega_{M1} &= 29,1 \text{ Hz} \\ \Omega_{L1} &= 29,1 \text{ Hz} \\ \Omega_{V1} &= 41,2 \text{ Hz} \\ n_{\max} &= 1382 \text{ ot/min}\end{aligned}$$

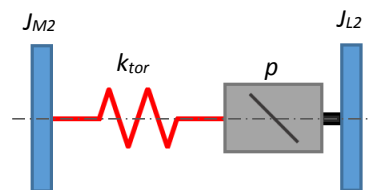
### Výpočet pro soustavu s vloženým převodem

Obrázek 13 znázorňuje schéma mechanické struktury třetí navrhované laboratorní úlohy.



Obrázek 13: Schéma mechanické struktury 3. laboratorní úlohy

Tato mechanická soustava se dá převést na náhradní model dvoumotové mechanické soustavy s vloženým poddajným členem a převodem. Schéma mechanické struktury tohoto náhradního modelu je patrné z Obrázek 14.



Obrázek 14: Schéma mechanické struktury náhradního modelu mechaniky 3. úlohy

Výpočet torzní tuhosti řemenového převodu redukováného na souřadnici pohonu:

$$k_{tor} = 2 \cdot k_{tah} \cdot r_M^2 \quad (3.5)$$

Kde:  $k_{tah}$  je tahová tuhost jedné větve řemene  
 $r_M$  je poloměr řemenice pohonu

Výpočet vlastní frekvence pohonu při zablokované zátěži:

$$\Omega_{M2} = \sqrt{\frac{k_{tor}}{J_{M2}}} \quad (3.6)$$

Kde:  $J_{L2}$  je moment setrvačnosti zátěže (řemenice a rotor pohonu)  
 $k_{tor}$  je torzní tuhost řemenového převodu redukována na souřadnici pohonu

Výpočet vlastní frekvence zátěže při zablokovaném pohonu:

$$\Omega_{L2} = \sqrt{\frac{k_{tor}}{J_{L2} \cdot p^2}} \quad (3.7)$$

Kde:  $J_{L2}$  je moment setrvačnosti zátěže (řemenice a rotor pohonu)  
 $k_{tor}$  je torzní tuhost řemenového převodu redukována na souřadnici pohonu  
 $p$  je převodový poměr

Výpočet vlastní frekvence volně kmitající soustavy:

$$\Omega_{V2} = \sqrt{\frac{k_{tor}}{J_{M2} \cdot p^2} + \frac{k_{tor}}{J_{L2}}} \quad (3.8)$$

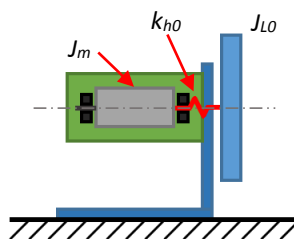
Výsledky výpočtu modálních vlastností mechanické soustavy pro 3. laboratorní úlohu:

$\Omega_{M2}$  = 80,1 Hz  
 $\Omega_{L2}$  = 44,7 Hz  
 $\Omega_{V2}$  = 85,4 Hz

### Verifikační výpočet jednohmotové soustavy

Při výpočtu modálních vlastností mechanických struktur druhé a třetí úlohy byl zaveden předpoklad dokonale tuhého hřídele servomotoru. Na základě tohoto předpokladu byla použita náhrada mechanické soustavy ROTOR – HŘÍDEL ROTORU – SETRVAČNÍK jednou hmotou.

Pro potvrzení tohoto předpokladu byl proveden verifikační výpočet modálních vlastností mechanické struktury ROTOR – HŘÍDEL ROTORU - SETRVAČNÍK. Schéma této mechanické struktury znázorňuje Obrázek 15. Tento výpočet byl proveden až na závěr návrhového výpočtu jelikož vstupním parametrem tohoto výpočtu je moment setrvačnosti setrvačnicku, který musel být nejprve definován.



Obrázek 15: Schéma mechanické struktury ROTOR - HŘÍDEL ROTORU - SETRVAČNÍK

Pro verifikaci výše stanoveného předpokladu byl proveden výpočet antirezonance setrvačnicku. Vlastní frekvence této soustavy se ve frekvenční charakteristice nachází výše. Pokud je antirezonanční frekvence setrvačnicku výrazně vyšší než vlastní frekvence mechanických soustav 2. a 3. navrhované úlohy nedochází k výraznému ovlivňování frekvenčního chování těchto mechanických soustav a tudíž může být použito náhradní jednohmotové struktury pohonu.

Výpočet vlastní frekvence setrvačnicku při zablokovaném motoru:

$$\Omega_{L0} = \sqrt{\frac{k_{h0}}{J_{L0}}} \quad (3.9)$$

Kde:  $J_{L0}$  je moment setrvačnosti setrvačnicku

$k_{h0}$  je tuhost hřídele mezi rotorem a setrvačnickem

Výsledky verifikačního výpočtu modálních vlastností jednohmotové mechanické soustavy:

$$\Omega_{L0} = 363,8 \text{ Hz}$$

Antirezonanční frekvence setrvačnicku mechanické struktury pohonu je výrazně vyšší, než je maximální vlastní frekvence navrhovaných mechanických struktur, jak je patrné z výsledků vypočítaných vlastních frekvencí mechanických soustav pro druhou a třetí laboratorní úlohu. Navíc se tato frekvence nachází i výše, než je měřené frekvenční pásmo, které je omezeno filtrem typu dolní propust na frekvenci 150Hz (viz kapitola 6. Návrh řízení). Jelikož se rezonanční frekvence setrvačnicku jednohmotové mechanické soustavy nachází ještě výše ve frekvenční charakteristice, nemělo by docházet k výraznému ovlivnění modálních vlastností navrhovaných mechanických struktur.

## 3.2 Výčet mechanických komponent

V následující tabulce je uveden výčet jednotlivých komponent souvisejících s návrhem mechanické konstrukce. V tabulce je vždy uveden název komponenty, výrobce, typové označení, počet kusů a cena. Kompletní technická dokumentace jednotlivých komponent navrhovaného zařízení i s cenovými nabídkami je na CD, které je přílohou této práce.

Tabulka 1: Výčet komponent mechanické konstrukce

Komponent	Výrobce	Označení	Počet ks	Jednotková cena	Celkem
Upínací deska 40x160S	MAREK INDUSTRIAL	05.01814.00	1 m	2 288,16 Kč	2 288,16 Kč
Výpalky pro konzole	Plehaso	dle výkresu	2	454,00 Kč	908,00 Kč
Kryt	OBZOR Praha	dle výkresu	1	5 445,00 Kč	5 445,00 Kč
Ozubená řemenice	TYMA	112-05M-15 7A 1610	1	620,75 Kč	620,75 Kč
Ozubená řemenice	TYMA	136-05M-15 7A 2012	1	671,14 Kč	671,14 Kč
Taper-Lock pouzdro	TYMA	TB 1610	1	98,34 Kč	98,34 Kč
Taper-Lock pouzdro	TYMA	TB 2012	1	122,88 Kč	122,88 Kč
Ozubený řemen	TYMA	05M-1690-06	1	154,94 Kč	154,94 Kč
Hřídel	Ferona	KR14h9 - S235	0,9 m	26,68 Kč	24,01 Kč
Krytka upínacího profilu	MAREK INDUSTRIAL	Krytka 40x160	2	65,60 Kč	131,20 Kč
Šroub s T-hlavou	MAREK INDUSTRIAL	096HK0815M0825	20	14,04 Kč	280,80 Kč
Rozpěrná lišta	interní výroba	dle výkresu	2	0,00 Kč	0,00 Kč
<b>Celkem:</b>					<b>10 745,22 Kč</b>
<b>Celkem s DPH:</b>					<b>12 894,27 Kč</b>

## 4 Návrh elektrické části

Tato kapitola je věnována výběru jednotlivých elektrických komponent. Jsou zde popsány vlastnosti servopohonů, které byly vytipovány jako vhodné pro navrhované výukové zařízení a finální volba servopohonů, které byly nakonec zakoupeny. Dále je zde popsán návrh zapojení elektrického rozvaděče.

Pro předběžnou orientaci na trhu mezi výrobci servopohonů byl použit průzkum trhu v článku „Moduly pro řízení pohonů“, zveřejněném v časopise AUTOMA (5). Jelikož se jedná o poměrně starý pramen a vývoj v pohonářské technice probíhá velmi rychle, byl proveden výběr i mezi jinými výrobci, kteří působí na trhu. S požadavky, které byly stanoveny výše, v kapitole 2.2 Elektrokomponenty, byli osloveni následující výrobci pohonů s dotazem na cenovou nabídku pro nákup servopohonů:

### **Autocont Control Systems s.r.o.**

Poptávanými komponenty byly: servoměnič MR-J4-A a servomotor HG-KR23 od výrobce Mitsubishi Electric viz Obrázek 16. V Tabulka 2 jsou vedeny vybrané parametry pohonu z technické dokumentace výrobce (6).



Obrázek 16: Servopohon Mitsubishi Electric;  
zdroj: (7)

Tabulka 2: Vybrané parametry pohonu  
Mitsubishi Electric

<i>Prodejce:</i>	AutoCont control systems s.r.o.
<i>Výrobce:</i>	Mitsubishi Electric
<b>Servomotor</b>	<b>HG-MR23</b>
Nominální krouticí moment	0,64 Nm
Nominální otáčky	3000 ot/min
Rozlišení enkoderu	22 bit
<b>Servodriver</b>	<b>MR-J4-20A</b>
Řízení POLOHA/Rychlost/MOMENT	✓ ✓ ✓
Vstupy	DI (PWM)
Takt regulační smyčky	400 μs
Napájení	230 VAC
Cena pohonů pro 1 pracoviště	<b>49 134,- Kč</b>

Servomotor je dodáván s 22 bitovým enkodérem, což je mezi poptávanými servomotory nejjemnější rozlišení. Servoměnič umožňuje zadávání požadovaného proudu pouze digitálním vstupem pomocí pulsní šířkové modulace. Zásadním nedostatkem je cyklus proudové smyčky 400 μs, což je nedostačující pro řízení pohonu v reálném čase.

### **ENIKA.CZ s.r.o.**

U firmy ENIKA.CZ byl poptán servoměnič s typovým označením RS2A01A0AL0 a servomotor R2AA06020FXH00M od výrobce SANYO DENKI viz Obrázek 17. Tabulka uvádí vybrané technické parametry z datasheetu výrobce (8).



Obrázek 17: Servopohon SANYO DENKI; zdroj: (8)

Tabulka 3: Vybrané parametry servopohonu SANYO DENKI

Prodejce:	ENIKA.CZ s.r.o.
Výrobce:	SANYO DENKI
<b>Servomotor</b>	<b>R2AA06020FXH00M</b>
Nominální krouticí moment	0,64 Nm
Nominální otáčky	3000 ot/min
Rozlišení enkoderu	17 bit
<b>Servodriver</b>	<b>RS2A01A0ALO</b>
Řízení POLOHA/Rychlost/Moment	✓ ✓ ✓
Vstupy	DI (PWM)
Takt regulační smyčky	N/A
Napájení	230 VAC
Cena pohonů pro 1 pracoviště	<b>56 023,- Kč</b>

Servoměnič od výrobce SANYO DENKI umožňuje zadávání požadovaného momentu pouze pomocí digitálního vstupu PWM. Z technické dokumentace výrobce se nepodařilo zjistit takt obnovování proudové regulační smyčky. Cena poptávaných pohonů pro jeden stand je nejvyšší. Díky vysoké ceně byl tento pohon již předběžně vyřazen a takt regulační smyčky nebyl dále dotazován.

#### OMRON Electronic s.r.o.

Společnost OMRON Electronic s.r.o. nabízí servopohon, jehož základní parametry jsou uvedeny v následující tabulce (9).



Obrázek 18: Servoměnič OMRON; zdroj: (9)

Tabulka 4: Vybrané parametry pohonu OMRON

Prodejce:	OMRON Electronic s.r.o.
Výrobce:	OMRON
<b>Servomotor</b>	<b>R88M-K20030H-S2</b>
Nominální krouticí moment	0,64 Nm
Nominální otáčky	3000 ot/min
Rozlišení enkoderu	20 bit
<b>Servodriver</b>	<b>R88D-KT02H</b>
Řízení POLOHA/Rychlost/Moment	✓ ✓ ✓
Vstupy	AI/DI (PWM)
Takt regulační smyčky	42 $\mu$ s
Napájení	230 VAC
Cena pohonů pro 1 pracoviště	<b>46 785,- Kč</b>



Servopohon od firmy OMRON splňuje všechny stanovené požadavky. Podporuje zadávání žádaného proudu jak analogovým, tak i digitálním vstupem. Takt regulační smyčky je 42  $\mu$ s.

### **Raveo s.r.o.**

Na Obrázek 19 je vyobrazen servopohon asijského výrobce ESTUN řady ProNet. Tabulka 5 uvádí vybrané parametry pohonu z datasheetu výrobce (2).



Obrázek 19: Servopohon ESTUN; zdroj: (10)

Tabulka 5: Vybrané parametry pohonu ESTUN

Prodejce:	Raveo s.r.o.
Výrobce:	ESTUN
<b>Servomotor</b>	<b>EMJ-02APA22-WR</b>
Nominální krouticí moment	0,64 Nm
Nominální otáčky	3000 ot/min
Rozlišení enkoderu	17 bit
<b>Servodriver</b>	<b>ProNet-E-02 A</b>
Řízení POLOHA/Rychlost/Moment	✓ ✓ ✓
Vstupy	AI (+/-10V)
Takt regulační smyčky	100 $\mu$ s
Napájení	230 VAC
Cena pohonů pro 1 pracoviště	<b>33 978,- Kč</b>

Servopohon ESTUN vyhovuje ve všech stanovených požadavcích. Zadávání požadovaného proudu je možné pouze analogovým vstupem +/-10V. Cena těchto pohonů je mezi porovnávanými nabídkami výrazně nejnižší.

### **Srovnání**

Shrnující Tabulka 6 uvádí vybrané parametry poptávaných pohonů od jednotlivých výrobců. Jak je z uvedených dat patrné, vesměs všechny poptávané pohony splňují stanovené požadavky. Mezi jednotlivými pohony jsou pouze minimální rozdíly a tak finálním parametrem rozhodujícím výběr pohonů pro nákup byla cena. Výrazně nejnižší cena byla nabídnuta společností Raveo s.r.o., prodávající servopohony asijského výrobce ESTUN.

*Tabulka 6: Vybrané parametry poptávaných servopohonů*

<i>Prodejce:</i>	AutoCont control systems s.r.o.	ENIKA.CZ s.r.o.	OMRON Electronic s.r.o.	Raveo s.r.o.
<i>Výrobce:</i>	Mitsubishi Electric	SANYO DENKI	OMRON	ESTUN
<b>Servomotor</b>	<b>HG-MR23</b>	<b>R2AA06020FXH00M</b>	<b>R88M-K20030H-S2</b>	<b>EMJ-02APA22-WR</b>
Nominální krouticí moment	0,64 Nm	0,64 Nm	0,64 Nm	0,64 Nm
Nominální otáčky	3000 ot/min	3000 ot/min	3000 ot/min	3000 ot/min
Rozlišení enkoderu	22 bit	17 bit	20 bit	17 bit
<b>Servodriver</b>	<b>MR-J4-20A</b>	<b>RS2A01A0A0LO</b>	<b>R88D-KT02H</b>	<b>ProNet-E-02 A</b>
Řízení POLOHA/Rychlost/MOMENT	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓
Vstupy	DI (PWM)	DI (PWM)	AI/DI (PWM)	AI (+-10V)
Cyklus proudové smyčky	400 μs	N/A	42 μs	10 μs
Napájení	230 VAC	230 VAC	230 VAC	230 VAC
Cena pohonů pro 1 pracoviště	<b>49 134,- Kč</b>	<b>56 023,-Kč</b>	<b>46 785,- Kč</b>	<b>32 958,- Kč</b>

Pro realizaci výukového standu byly nakoupeny pohony výrobce ESTUN od prodejce Raveo s. r. o.

## 4.1 Elektrické zapojení

S ohledem na kompaktnost konstrukce byla zakoupena malá rozvaděčová skříň z ocelového plechu s krytím IP65, do které byly umístěny servoměniče. Elektrické zapojení silového napájení servoměničů bylo provedeno dle technické dokumentace výrobce servopohonů (11). Pro zajištění ovládání chlazení a řízení je elektrické zapojení doplněno ještě o okruh s napájecím zdrojem 24 VDC. Do okruhu byly také přidány dvě zásuvky (230VAC/50Hz), z nichž jedna zůstává pod napětím i při vypnutí hlavního vypínači. Zásuvky slouží pro napájení notebooku a řídicího počítače myRIO.

Servoměniče a zásuvka, která zůstává pod napětím, jsou jištěny jističem, zbytek okruhu je jištěn trubičkovou pojistkou. Silový okruh servoměničů je ovládán reléovým spínačem, který je ovládán v 24V okruhu tlačítky s elektrickou přídrží. Ovládacímu okruhu je nadřazen bezpečnostní vypínač central stop, který v případě rozepnutí odpojí servoměniče od napájení.

Bylo vypracováno schéma elektrického zapojení, které je součástí příložené výkresové dokumentace. Na rozvaděči byla provedena revize elektrických spotřebičů.

### **Volba řídicích signálů**

Servopohony jsou řízeny pomocí kaskádní regulace s P-regulátorem v polohové vazbě a PI-regulátorem v rychlostní a proudové vazbě. Do proudové zpětné vazby, která je uzavřena v servoměniči pohonu ESTUN, není možné zasahovat ani ji žádným způsobem nastavovat. Výrobce neumožňuje nastavení proporcionálního zesílení ani integrační časové konstanty proudového PI-regulátoru. Návrh řízení laboratorních úloh je tedy omezen pouze na sestavení rychlostní a polohové regulace, která je uzavřena v řídicím počítači myRIO a do proudové regulace v servoměniči vstupuje pouze signál s požadavkem žádaného proudu.

Pro zajištění řízení pohonů v kaskádní regulaci pomocí řídicího počítače byly vybrány následující vstupní a výstupní signály (z pohledu servoměniče):

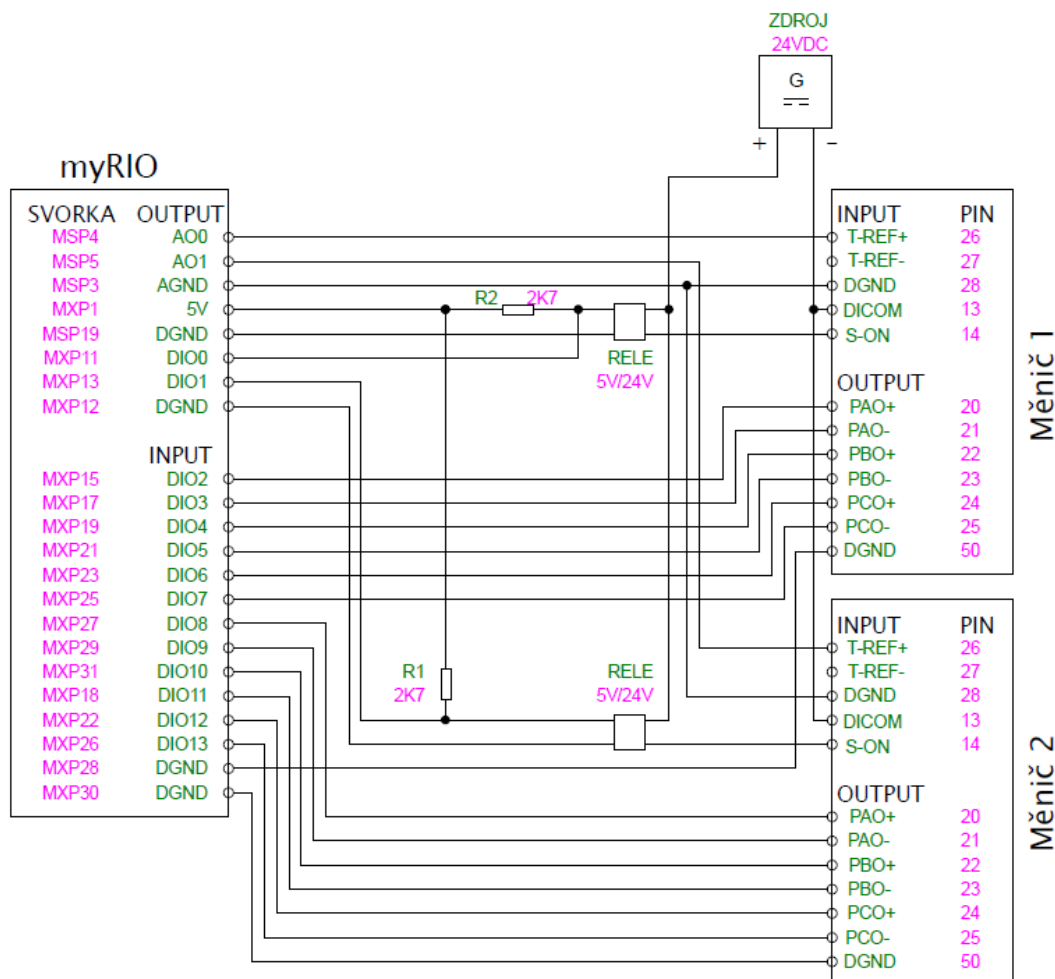
**Výstupy:**

- Signály inkrementálního enkodéru PAO+, PAO-, PBO+, PBO-, PCO+, PCO-, DGND

**Vstupy:**

- Softwarové zapnutí měniče ENABLE
- Signál žádaného proudu torque refernce (Tref+ a Tref-)

Obrázek 20 znázorňuje schéma elektrického zapojení vstupních a výstupních signálů mezi oběma měniči servomotorů a řídicím počítačem myRIO. Ze schématu je patrné, které signály jsou použity. Je zde také vidět ovládání signálu S-ON pomocí relé s Pull-up rezistorem. Významu signálu S-ON a důvodu zapojení přes relé s Pull-up rezistorem je popsán v textu níže.

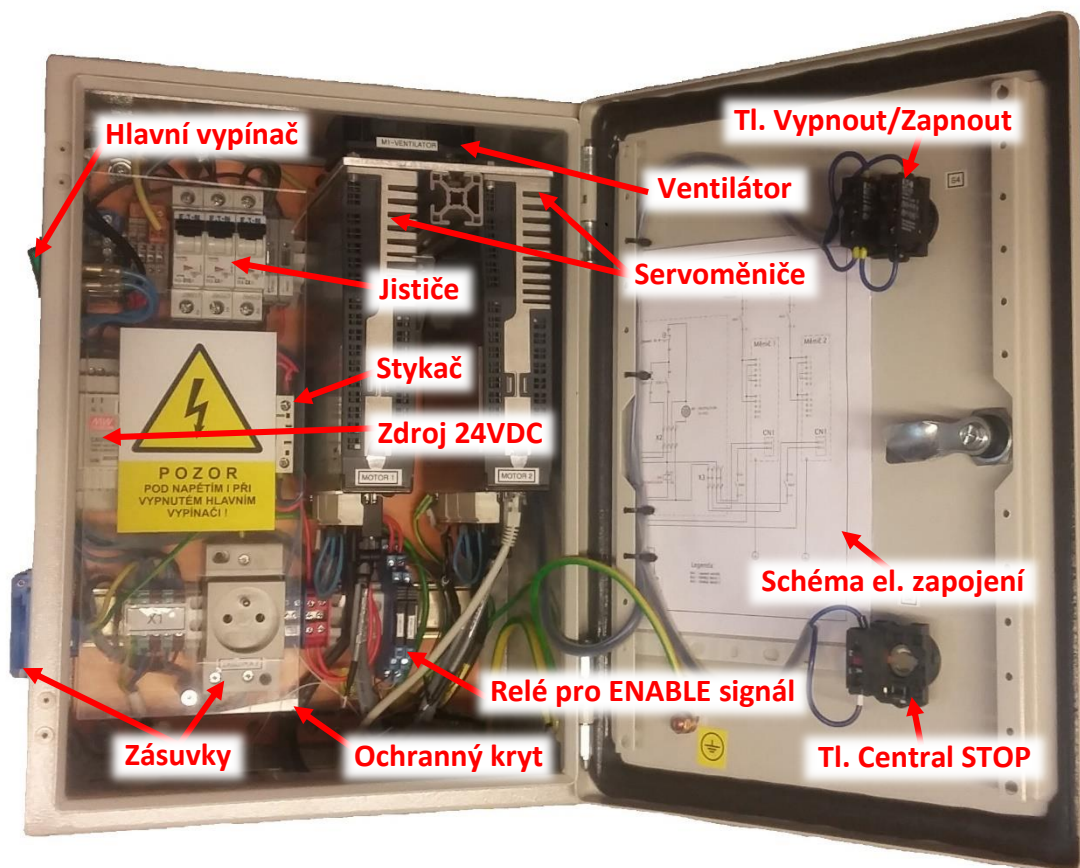


Obrázek 20: Schéma zapojení vstupů a výstupů měniče – myRIO

Signál polohy inkrementálního enkodéru je vyveden z měniče samostatným kabelem zakončeným konektorem CAN 9. Tento konektor je v laboratořích Ú12135 „standardem“ pro zapojení enkodérů a bylo požadavkem toto zapojení dodržet. Jednotlivé signály polohy jsou z enkodéru přivedeny stíněným kabelem na svorkovnici, odkud jsou dále vyvedeny plochým kabelem do konektoru řídicího počítače my RIO.

Napěťová úroveň digitálního signálu enkodéru je +3.3VDC což odpovídá LVTTL a je kompatibilní s napěťovou úrovní vstupů řídicího počítače myRIO.

Vstupní signál žádaného momentu do servoměniče je zadáván analogovým signálem  $\pm 10\text{VDC}$ . Řízením tohoto signálu se udává požadavek velikosti krouticího momentu v procentech jmenovitého momentu servomotoru. Poměr, jaké napětí odpovídá kolika procentům, je možné nastavit v parametrech měniče. Signál žádaného momentu je do měniče přiveden stíněným kabelem ze svorky analogového výstupu řídicího počítače myRIO, který má napěťovou úroveň  $\pm 10\text{VDC}$ .



Obrázek 21: Fotografie elektrického rozvaděče

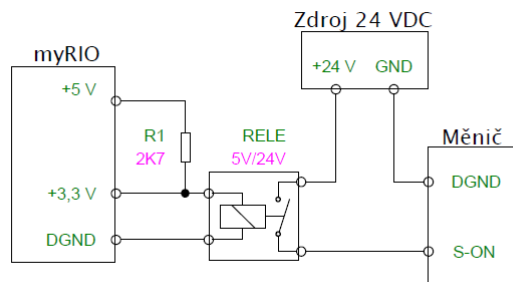
### **ENABLE signál**

Kromě elektrického zapnutí servoměničů byl pro potřeby řízení použit tzv. *ENABLE* signál, který zapíná měniče pomocí softwarové proměnné a tím zaručuje zapnutí měničů pouze v požadovaných a definovaných případech.

Jelikož servoměniče pracují s 24 V logikou a řídicí počítač myRIO s LVTTL logikou (3,3 V), bylo nutné doplnit elektrický obvod o dvojici polovodičových relé (pro každý měnič jedno), která zajišťují softwarové zapínání servoměničů pomocí proměnné enable.

Pro tento účel byla vybrána polovodičová relé od firmy *FINDER*, která mají kompaktní provedení a umožňují uchycení na DIN lištu pomocí patice. Jelikož je ovládací napětí těchto relé je 5 V a napěťová úroveň digitálních výstupů řídicího počítače je pouze 3,3 V, bylo nutné povýšit výstupní napětí digitálního výstupu řídicího počítače. Za tímto účelem bylo použito zapojení

s tzv. Pull-up rezistorem pro korektní definování výstupní logické proměnné. Elektrické schéma zapojení tohoto doplňujícího elektrického okruhu znázorňuje Obrázek 22.



Obrázek 22: Schéma zapojení Enable signálu s Pull-up rezistorem

### Výpočet Pull-up rezistoru

Aby bylo dosaženo požadované funkce navrženého okruhy, byl proveden výpočet velikosti Pull-up rezistoru. Pro výpočet byl použit postup dle doporučení výrobce řídicího počítače myRIO dle (12).

$$R_p = \frac{\Delta T}{C_{tot} \cdot \left[ \ln \left( 1 - \frac{3,3}{5} \right) - \ln \left( 1 - \frac{V_T}{5} \right) \right]} \quad (4.1)$$

Kde:  $\Delta T$  [ $\mu s$ ] je požadovaný čas, za který Pull-up rezistor zvýší výstupní napětí 3,3 V na prahové napětí  $V_T$

$C_{tot}$  [pF] je celková kapacitance výstupu

$V_T$  [V] je prahové napětí

Výrobce řídicího počítače dále uvádí, že kapacitance digitálního výstupu je 28pF mezi digitálním výstupem a digitální zemí a kabel přidává cca 60pF/m. Prahové napětí pro sepnutí relé je dle technické dokumentace výrobce 4,7V (13). Čas náběhu digitálního výstupu byl zvolen 1 $\mu s$ . Po dosazení do rovnice (4.1) byla vypočtena velikost Pull-up rezistoru:

$$R_p = \frac{1}{(28 + 3 \cdot 60) \cdot \left[ \ln \left( 1 - \frac{3,3}{5} \right) - \ln \left( 1 - \frac{4,7}{5} \right) \right]} = 2,771 \text{ k}\Omega \quad (4.2)$$

Na základě výpočtu (4.2) byl vybrán Pull-up rezistor 2,7 k $\Omega$ .

### Propojení měničů s počítačem

Pro nastavení parametrů měničů byl použit software ESview od výrobce zakoupených pohonů ESTUN. Tento software umožňuje propojení měničů s počítačem, nastavení parametrů a funkcí měniče, import a export tabulek parametru. Instalační soubor tohoto softwaru je zálohován na CD, které je přílohou této práce.

Aby bylo možné nastavovat parametry měničů pomocí softwaru ESview v počítači, bylo nutné tento počítač propojit s měniči. Za tímto účelem byl vytvořen propojovací kabel.

Měniče servomotorů podporují komunikaci protokolem RS485 přes konektor RJ45. Počítač tuto komunikaci implicitně nepodporuje, a proto byl použit převodník signálu z RS485 na Ethernet, Gnome485. Převodník byl připojen do počítače nekříženým síťovým kabelem přes USB síťovou kartu

Byl vypracován návod pro připojení měničů s počítačem výše uvedeným spletíým způsobem a je uložen na CD, které je přílohou této práce.

### ***Volba a nastavení parametrů měničů***

Pro zajištění správné funkce navrhovaného výukového zařízení bylo nutné se nejprve seznámit s technickou dokumentací k pohonům a následně vytipovat a správně nastavit parametry měničů. Tabulka 7 ukazuje, které parametry měničů byly změněny a jak. U každého parametru jsou uvedeny: označení parametru, nastavená hodnota a stručný popis významu. Podrobný význam a popis parametrů je veden v technické dokumentaci výrobce viz příložené CD.

*Tabulka 7: Přenastavené parametry měničů*

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>	<b>Jednotky</b>	<b>Význam</b>
Pn000.0	0	-	externí signál ENABLE
Pn000.1	1	-	zákaz externího zákazu otáčení CW
Pn000.2	1	-	zákaz externího zákazu otáčení CCW
Pn001.1	0	-	Pn406 = limit rychlosti při momentovém řízení
Pn005.1	2	-	momentové řízení
Pn005.3	0	-	model servomotoru
Pn400	100	0,1V/100%	zesílení signálu žádaného momentu
Pn406	1300	ot/min	limit rychlosti při momentovém řízení

## 4.2 Výčet elektrických komponent; bez řídicího počítače

V následující tabulce je uveden výčet jednotlivých komponent souvisejících s návrhem elektrického zapojení. V tabulce je vždy uveden název komponenty, výrobce, typové označení, počet kusů a cena. Kompletní technická dokumentace jednotlivých komponent navrhovaného zařízení i s cenovými nabídkami je na CD, které je přílohou této práce.

Tabulka 8: Výčet elektrokomponent

Komponent	Výrobce	Označení	Počet ks	Jednotková cena	Celkem
Servomotor	ESTUN	EMJ-02APA22-WR	2	16 989,00 Kč	33 978,00 Kč
Měnič	ESTUN	ProNet-E-02A	2		
Elektrický rozvaděč	OCRACK	OC1034.90 IP66	1	1 113,20 Kč	1 113,20 Kč
Spínaný zdroj	MEAN WELL	DR-60-24	1	565,00 Kč	565,00 Kč
Stykač	Schneider Electric	LP1 K1210BD	1	524,00 Kč	524,00 Kč
Jistič 10A	EATON	PL6-B10/1	1	51,10 Kč	51,10 Kč
Jistič 4A	EATON	PL6-C4/1	2	97,70 Kč	195,40 Kč
Relé	FINDER	34.81.7.005.9024	2	453,70 Kč	907,40 Kč
Patice pro relé	FINDER	93.01.7.024	2	195,20 Kč	390,40 Kč
Zásuvka na DIN lištu	ABB	VES-F	1	143,00 Kč	143,00 Kč
Zásuvka vestavná	ABL Sursum	146105	1	65,00 Kč	65,00 Kč
Ventilátor	SUNON	ME80252V3-A99	1	122,00 Kč	122,00 Kč
Mřížka pro ventilátor	SUNON	PB-08	1	28,00 Kč	28,00 Kč
Kolébkový spínač	ARCOLECTRIC	p-C6053ALB	1	67,00 Kč	67,00 Kč
Přepínač	EATON	M22-DDL-GR-X1/X0	1	274,80 Kč	274,80 Kč
Spínač	Schneider Electric	ZB5AT4	1	578,40 Kč	578,40 Kč
Kontaktní blok spínače	EATON	M22-K01	2	110,20 Kč	220,40 Kč
Kontaktní blok spínače	Schneider Electric	ZBE102	1	94,40 Kč	94,40 Kč
				<b>Celkem:</b>	<b>39 317,50 Kč</b>
				<b>Celkem s DPH:</b>	<b>47 181,00 Kč</b>



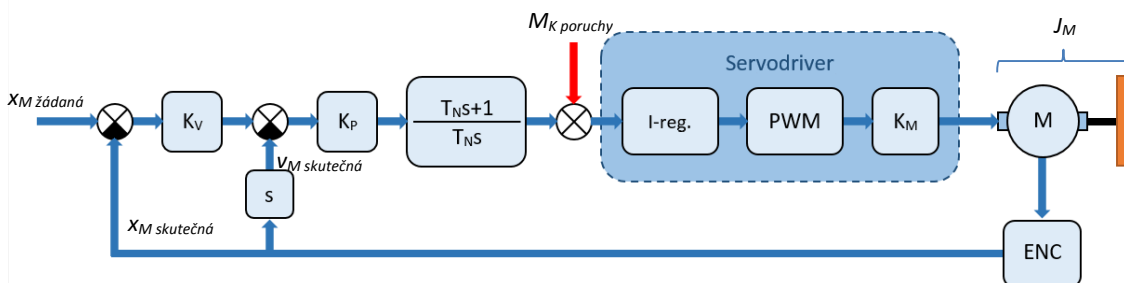
## 5 Návrh laboratorních úloh

Pro výuku cvičení z předmětu PSS III byly na základě stávajícího sylabu přednášek a cvičení vytipovány tři laboratorní úlohy pro výuku cvičení na navrhovaném zařízení viz kapitola 1.2. Výběr proběhl s ohledem na to, aby cvičení byla pokryta téměř celá odpřednášená látka napříč semestrem. V této kapitole budou navrhované laboratorní úlohy podrobně popsány, z čehož vyplynou konkrétní požadavky na funkcionalitu navrhovaného řídicího softwaru, který bude podrobně popsán v kapitole 6 Návrh řízení.

Byly vypracovány předtisky protokolů z měření jednotlivých navržených laboratorních úloh. V předtiscích protokolů jsou záměrně uvedeny grafy bez popisu souřadných os a jednotek, aby studenti museli tyto informace do protokolů doplnit. Podobně je tomu u vzorců a schémat. Pro tyto účely jsou v předtiscích vynechána prázdná místa, do kterých studenti doplní vzorce a schémata ručně.

### 5.1 Řízení polohy a rychlosti jednohmotové mechanické soustavy

Obsahem tohoto cvičení je měření na výukovém zařízení s jednohmotovou mechanickou soustavou. Je zde vysvětlen postup ladění konstant rychlostního a polohového regulátoru. Následně jsou měřeny frekvenční přenosové charakteristiky regulované mechanické soustavy. Schéma regulace je patrné z Obrázek 23.

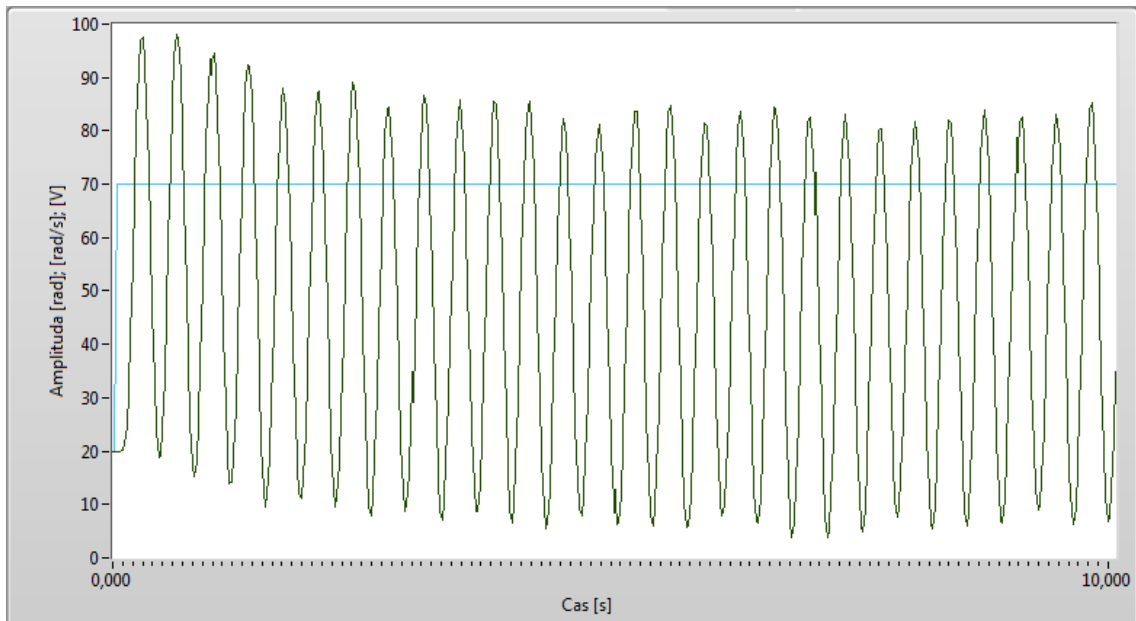


Obrázek 23: Schéma regulace pro 1. laboratorní úlohu

#### Postup měření 1. laboratorní úlohy:

1. Sestavení mechanické soustavy výukového zařízení do konfigurace pro 1. laboratorní úlohu dle technické dokumentace
2. Naladění parametrů rychlostního regulátoru soustavy Ziegler-Nicholsovou metodou
  - Odstranění vlivu integrační složky PI-regulátoru nastavením vysoké integrační časové konstanty  $T_N$ , např. 0,5 s
  - Nastavení nízkého proporcionálního zesílení rychlostního PI-regulátoru  $K_P$
  - Generování signálu skoku rychlosti na vstup rychlostní regulace a sledování odezvy rychlosti motoru na skok rychlosti
  - Postupné zvyšování hodnoty  $K_P$  až na hodnotu  $K_{P\text{ krit}}$ , kdy je dosaženo meze stability odezvy systému na skok rychlosti viz Obrázek 24.



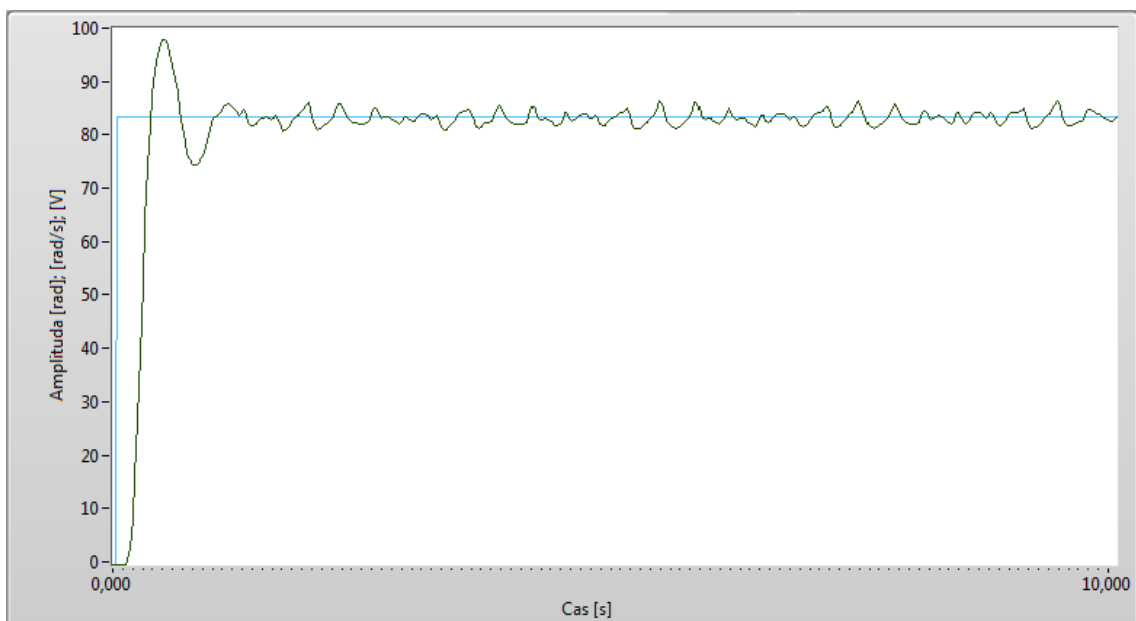


Obrázek 24: Odezva systému na skok rychlosti při  $K_{P\text{ krit}}$

- Výpočet  $K_P$  dle Ziegler-Nichols:

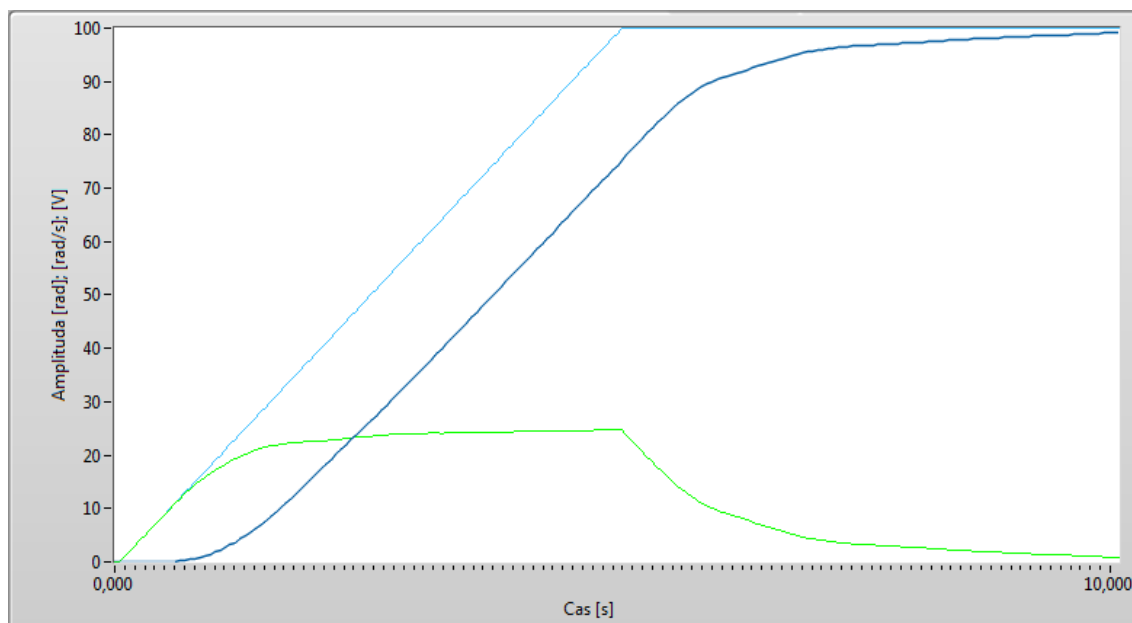
$$K_P = 0,45 \cdot K_{P\text{ krit}} \quad (5.1)$$

- Postupné snižování hodnoty časové integrační konstanty rychlostního regulátoru  $T_N$  až na hodnotu, kdy je dosaženo co nejrychlejšího ustálení na hodnotě žádané rychlosti, přičemž je povoleno překmitnutí žádané hodnoty o maximálně 25%. Obrázek 25 ukazuje, jak má vypadat odezva systému na skok rychlosti při nalažené rychlostní regulaci.



Obrázek 25: Odezva systému na skok rychlosti

3. Naladění zesílení polohové regulační smyčky  $K_v$  podle měřené odezvy polohy na signál žádané polohy ve formě rampové funkce.
  - Nastavení nízkého zesílení  $K_v$ , např.  $0,1 \text{ s}^{-1}$
  - Generování signálu rampy polohy na vstup polohového regulátoru a měření odezvy polohy motoru na rampový signál polohy a zobrazování průběhu polohové regulační odchylky
  - Postupné zvyšování hodnoty proporcionálního zesílení  $K_v$  až na hodnotu kdy je dosaženo co nejmenšího zpoždění skutečné polohy za žádanou, přičemž na signálu polohové regulační odchylky nesmí být patrné zakmitání



Obrázek 26: Odezva systému na rampu polohy

4. Měření následujících frekvenčních přenosových charakteristik zavedením signálu ve formě bílého šumu na příslušný vstup regulace. Signál bílého šumu je vždy modulován na signál konstantního offsetu rychlosti. Díky tomu je potlačen vliv dynamických účinků pasivních odporů při odtržení z nulové rychlosti. Pro potřeby vyhodnocení frekvenčních přenosových charakteristik je nezbytné měřit vstupní i výstupní signály pouze v ustáleném stavu po odeznění přechodových jevů nájezdu na požadovanou rychlost.
  - Měření frekvenční přenosové charakteristiky rychlostní odezvy systému na signál žádané rychlosti ve formě bílého šumu

$$\frac{v_{skutečná}}{v_{žádaná}}$$

- Měření frekvenční přenosové charakteristiky rychlostní odezvy systému na signál poruchového momentu ve formě bílého šumu zavedeného na vstup do měniče motoru jako žádané hodnoty krouticího momentu.

$$\frac{v_{skutečná}}{M_K \text{ poruchy}}$$

- Měření frekvenční přenosové charakteristiky polohové odezvy systému na signál žádané polohy ve formě bílého šumu

$$\frac{x_{skutečná}}{x_{žadaná}}$$

- Měření frekvenční přenosové charakteristiky polohové odezvy systému na signál poruchového momentu ve formě bílého šumu zavedeného na vstup do měniče motoru jako žádaná hodnota krouticího momentu

$$\frac{x_{skutečná}}{M_K \text{ poruchy}}$$

## 5. Vyhodnocení výsledků a zpracování protokolu

### **Požadavky na funkcionalitu řídicího softwaru**

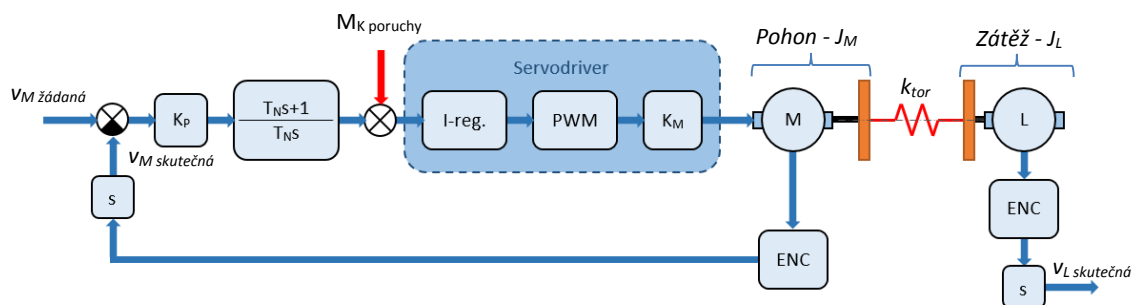
- Měření aktuální polohy rotoru servomotoru
- Derivace signálu polohy na rychlost pro potřeby regulace
- Rychlostní regulace servomotoru pomocí PI-regulátoru s možností nastavování parametrů regulátoru
- Polohová regulace pomocí P-regulátor s možností nastavování proporcionálního zesílení  $K_v$
- Přepínání mezi polohovou a rychlostní regulací
- Generátor signálu skoku žádané rychlosti na vstup rychlostní regulace s možností nastavení parametrů tohoto signálu
- Generátor signálu rampy žádané polohy na vstup polohové regulace s možností nastavení parametrů tohoto signálu
- Generátor signálu s bílým šumem na vstup regulace popřípadě na vstup žádaného momentu servomotoru. S možností nastavení parametrů signálu bílého šumu.
- Přepínání mezi generovanými signály žádaného vstupu
- Přepínání kam je generován signál s bílým šumem jako vstup a který signál je výstupní pro potřeby měření přenosů
- Vizualizace vstupních a výstupních signálů regulace pro potřeby ladění konstant regulátorů a kontroly amplitudy a tvaru generovaného vstupního signálu
- Zpracování a vykreslení amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky měřených přenosů

## **5.2 Řízení rychlosti dvoumotové mechanické soustavy s poddajným členem**

Pro toto cvičení je nutné přestavit mechanickou strukturu standu, tedy spojit servomotory poddajným hřídelem. Je zde ukázána regulace dvoumotového mechanického systému, kde jednotlivé hmoty, ve formě setrvačnicků, jsou spojeny poddajným hřídelem. Na závěr jsou měřeny frekvenční přenosové charakteristiky mechanické soustavy 2. laboratorní úlohy. Schéma regulace je patrné z Obrázek 27 na další straně.

Jelikož jsou některé body postupu měření na výukovém zařízení v konfiguraci pro 2. laboratorní úlohu podobné nebo stejné jako u 1. laboratorní úlohy, budou v následujícím

popisu pouze zmíněny. Pro podrobnější popis těchto bodů viz kapitola 5.1 Řízení polohy a rychlosti jednohmotové mechanické soustavy.



Obrázek 27: Schéma regulace pro 2. laboratorní úlohu

### Postup měření 2. laboratorní úlohy

1. Sestavení mechanické soustavy výukového zařízení do konfigurace pro 2. laboratorní úlohu
2. Naladění parametrů  $K_p$  a  $T_N$  rychlostního regulátoru soustavy
3. Měření následujících frekvenčních přenosových charakteristik zavedením signálu ve formě bílého šumu na příslušný vstup regulace. Signál bílého šumu je opět modulován na signál offsetu rychlosti za účelem odstranění účinků pasivních odporů při odtržení z nulové rychlosti.
  - Měření frekvenční přenosové charakteristiky rychlostní odezvy motoru na signál žádané rychlosti ve formě bílého šumu zadávaného na pohonu

$$\frac{v_M \text{ skutečná}}{v_M \text{ žádaná}}$$

- Měření frekvenční přenosové charakteristiky rychlostní odezvy zátěže na signál poruchového momentu ve formě bílého šumu zadávaného na vstup do měniče pohonu jako žádané hodnoty krouticího momentu.

$$\frac{v_M \text{ skutečná}}{M_{K M \text{ poruchy}}}$$

4. Vyhodnocení výsledků a zpracování protokolu

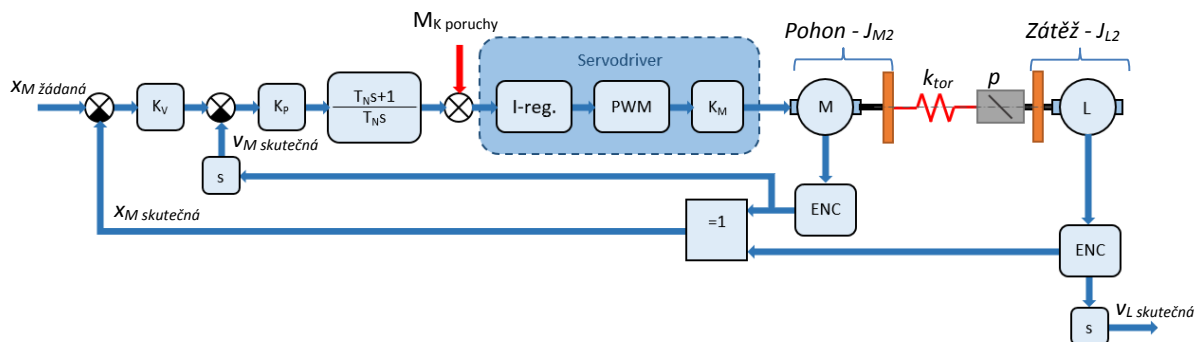
### Požadavky na funkcionalitu řídicího softwaru

Náplň 2. laboratorní úlohy nestanovuje žádné nové požadavky na funkcionalitu navrhovaného řídicího softwaru oproti požadavkům definovaným v kapitole 5.1 pro 1. laboratorní úlohu. Požadavky týkající se polohové regulace, jejího ladění a měření frekvenčních přenosových charakteristik v polohové regulaci nejsou pro tuto navrhovanou laboratorní úlohu platné.

### 5.3 Řízení polohy a rychlosti dvoumotové mechanické soustavy s vloženým převodem

Pro výuku řízení dvoumotového mechanického systému s vloženým převodem je nutné opět přestavit mechaniku standu. Konkrétně odmontovat poddajný hřídel a spojky, konzole se servomotory otočit o 90 stupňů a na jejich hřídele namontovat řemenice pomocí Taper-Lock pouzder a napnout mezi nimi ozubený řemen. Náplní této laboratorní úlohy je ukázka regulace dvoumotového mechanického systému v rychlostní a polohové vazbě a vysvětlení vlivu přímého a nepřímého odměřování při polohové regulaci takové soustavy. Schéma regulace znázorňuje Obrázek 28.

Jelikož jsou opět některé body postupu měření na výukovém zařízení v konfiguraci pro 3. laboratorní úlohu podobné nebo stejné jako u 1. popř. 2. laboratorní úlohy, budou v následujícím popisu pouze zmíněny. Pro podrobnější popis těchto bodů viz kapitola 5.1 Řízení polohy a rychlosti jedno-motové mechanické soustavy.



Obrázek 28: Schéma regulace pro 3. laboratorní úlohu

1. Sestavení mechanické soustavy výukového zařízení do konfigurace pro 3. laboratorní úlohu dle technické dokumentace
2. Naladění parametrů  $K_P$  a  $T_N$  rychlostního regulátoru soustavy
3. Naladění zesílení polohové regulační smyčky  $K_V$  s přímým odměřováním
4. Naladění zesílení polohové regulační smyčky  $K_V$  s nepřímým odměřováním
5. Porovnání sad parametrů regulace pro přímé a nepřímé odměřování
6. Měření následujících frekvenčních přenosových charakteristik zavedením signálu ve formě bílého šumu na příslušný vstup regulace. Signál bílého šumu je opět modulován na signál offsetu rychlosti za účelem odstranění účinků pasivních odporů při odtržení z nulové rychlosti. Všechny přenosové charakteristiky změřit nejprve pro regulaci s přímým odměřováním a následně s nepřímým odměřováním
  - Měření frekvenční přenosové charakteristiky rychlostní odezvy motoru na signál žádané rychlosti ve formě bílého šumu zadávaného na pohonu

$$\frac{v_M \text{ skutečná}}{v_M \text{ žádaná}}$$

- Měření frekvenční přenosové charakteristiky rychlostní odezvy motoru na signál poruchového momentu ve formě bílého šumu zadávaného na vstup do měniče pohonu jako žádané hodnoty krouticího momentu

$$\frac{v_M \text{ skutečná}}{M_{K M \text{ poruchy}}}$$

- Měření frekvenční přenosové charakteristiky polohové odezvy na signál žádané polohy ve formě bílého šumu zadávaného na pohonu pro přímé i nepřímé odměřování

$$\frac{x \text{ skutečná}}{x \text{ žádaná}}$$

- Měření frekvenční přenosové charakteristiky polohové odezvy na signál poruchového momentu ve formě bílého šumu zadávaného na vstup do měniče pohonu jako žádaná hodnota krouticího momentu pro přímé i nepřímé odměřování

$$\frac{x \text{ skutečná}}{M_{K \text{ poruchy}}}$$

### 7. Vyhodnocení výsledků a zpracování protokolu

#### **Požadavky na funkcionalitu řídicího softwaru**

Náplň 3. laboratorní úlohy stanovuje, oproti požadavkům definovaným v kapitole 5.1 řízení polohy a rychlosti jednohmotové mechanické soustavy, následující požadavky na funkcionalitu navrhovaného řídicího softwaru.

- Přepínání mezi přímým a nepřímým odměřováním

## 5.4 Podklady k laboratorním úlohám.

Pro výuku laboratorních cvičení byly vypracovány předtisky k jednotlivým laboratorním úlohám. Tyto předtisky slouží jako protokol z laboratorních měření na výukovém zařízení. V předtiscích je vždy uveden postup měření a podrobný popis jednotlivých kroků. Jsou zde záměrně uvedeny prázdné grafy bez popisu souřadných systémů a vynechaná schémata popřípadě vzorce, aby si je studenti museli doplnit sami. Vypracované předtisky pro jednotlivé laboratorní úlohy jsou uvedeny v Příloha č. 3, Příloha č. 4, Příloha č. 5, které jsou součástí této diplomové práce

## 6 Návrh řízení

V této kapitole je popsána zvolená řídicí aparatura, která zajišťuje řízení navrhovaného výukového zařízení. Nejprve je představen řídicí počítač NI myRIO a je popsána jeho funkcionality. Následuje popis navrženého řídicího softwaru pro jednotlivé laboratorní úlohy. Jsou zde popsány nejdůležitější části zdrojového kódu a bezpečnostní opatření, která bylo nutné v navrženém řídicím softwaru zohlednit a naprogramovat. V závěru této kapitoly je popsáno ovládání navrženého řídicího softwaru.

### 6.1 Řídicí aparatura NI myRIO

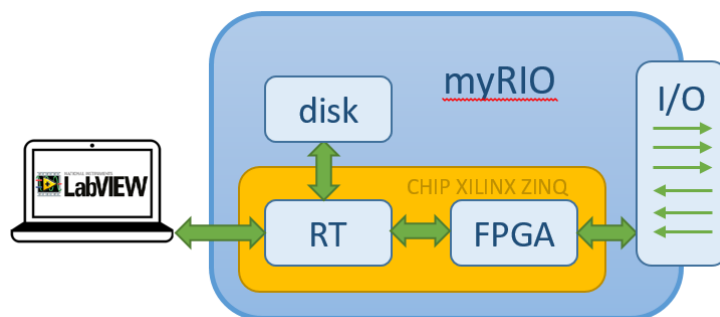
*Jedná se o systém, který je založen na stejné výkonné technologii, jako jeho průmyslová varianta NI CompactRIO nabízí však menší rozměry a je také cenově dostupnější. NI myRIO obsahuje dvoujádrový procesor a programovatelný obvod FPGA s 28 000 programovatelných logických bloků. ... Obvod FPGA se dá programovat prostřednictvím grafického vývojového prostředí NI LabVIEW. (14)*

Volba řídicí aparatury od National Instruments je určena již v zadání diplomové práce. Studenti navazujícího magisterského programu Výrobní stroje a zařízení se již s vývojovým prostředím LabVIEW mněli možnost setkat v předmětu Mikroelektronika, který je vyučován na Ústavu přístrojové a řídicí techniky v letním semestru 1. ročníku magisterského studia. Díky tomu by jim mělo být toto vývojové prostředí přinejmenším povědomé. Na Obrázek 29, níže, je fotografie řídicího počítače NI myRIO s popisem.



Obrázek 29: Řídicí počítač NI myRIO; zdroj: (15)

Jak již vyplývá z textu výše, architektura počítače NI myRIO se skládá ze dvou hlavních částí. Dvoujádrového procesoru, na kterém běží RT řízení, a programovatelného hradlového pole, které obsluhuje a zpracovává vstupní a výstupní signály. Obrázek 30 znázorňuje schéma vnitřní architektury počítače NI myRIO.



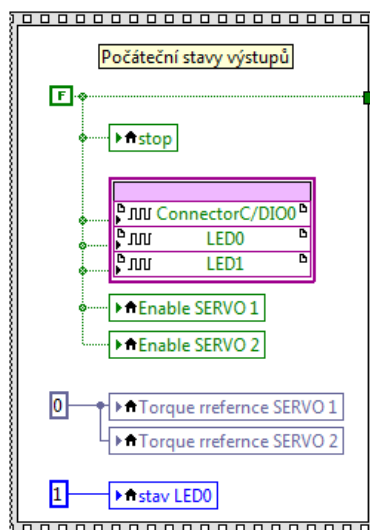
Obrázek 30: Schéma architektury počítače NI myRIO

## 6.2 Část FPGA - obsluha vstupů a výstupů

Jak již bylo zmíněno výše, obsluha vstupů a výstupů probíhá v části procesoru s programovatelnými hradlovými poli FPGA. V této kapitole je popsán program, který zajišťuje čtení a zápis signálů I/O. Hlavními částmi programu jsou snímání signálu polohy z enkodérů jednotlivých motorů a zadávání výstupních signálů žádaného momentu do měničů pohonů. Tato část zdrojového kódu byla převzata z řídicího softwaru pro výukový stand ETB-1. Autorem je Ing. Lukáš Novotný, Ph.D., který jej poskytl pro potřeby této diplomové práce. S jeho svolením byla tato část kódu částečně upravena a implementována do programu použitého pro obsluhu I/O v FPGA. Pro všechny tři laboratorní úlohy je použit jeden univerzální program „FPGA\_mainVI\_v01.vi“.

### Iniciace proměnných

Nejprve je nezbytné definovat iniciační hodnoty jednotlivých proměnných, aby nedošlo k neočekávanému chování zařízení z důvodů nedefinovaných počátečních stavů proměnných. Část zdrojového kódu, která zajišťuje zmíněnou iniciaci je patrná z Obrázek 31.



Obrázek 31: FPGA - iniciace proměnných



Při spuštění jsou nastaveny následující iniciační hodnoty proměnných:

Vypnutí stop tlačítka programu:

$stop = FALSE$

Vypnutí signalizačního blikání LED-diod na řídicím počítači NI myRIO:

$LEDO, LED1 = FALSE$

Oba měniče jsou softwarově vypnuty:

$Enable\ SERVO\ 1, Enable\ SERVO\ 2 = FALSE$

Nulový požadavek krouticího momentu pro oba měniče:

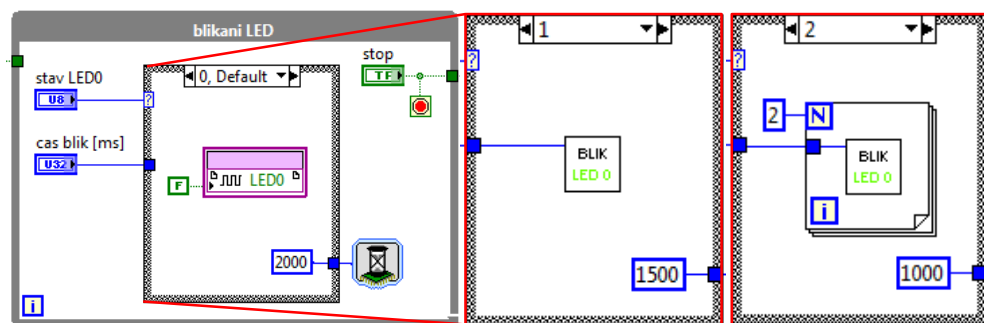
$Torque\ reference\ SERVO\ 1, Torque\ reference\ SERVO\ 2 = 0V$

Zapnutí signalizačního blikání LED-diody indikující běh FPGA na řídicím počítači NI myRIO:

$stav\ LED0 = 1$

### Signalizační blikání LED-diod

Pro signalizaci chodu FPGA je použito blikání LED-diod na řídicím počítači NI myRIO. Díky této indikaci je na pohled jasně patrné zda běží FPGA korektně. Část kódu zajišťující indikaci pomocí LED-diod je uvedena v Obrázek 32.



Obrázek 32: FPGA - pro Indikaci stavu FPGA

Indikace je závislá na hodnotě proměnné  $stav\ LED0$ :

$stav\ LED0 = 0$ : indikační LED-dioda nesvítí – indikuje, že FPGA program neběží

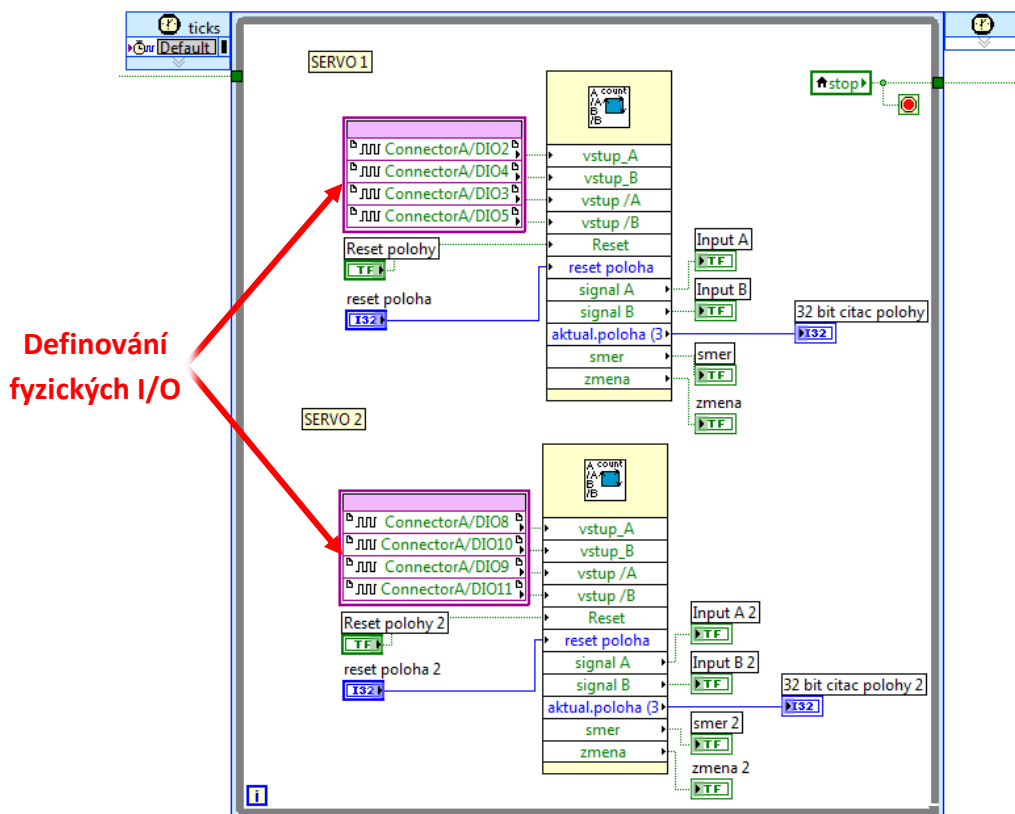
$stav\ LED0 = 1$ : LED-dioda blikne jednou za 1,5s – indikuje korektní chod FPGA

$stav\ LED0 = 2$ : LED-dioda blikne dvakrát za 1 s – indikuje korektní chod FPGA a RT řízení

Střída blikání LED-diody je definována proměnnou „ $cas\ blik\ [ms]$ “.

### Měření polohy motorů

Zakoupené servomotory jsou osazeny inkrementálními enkodéry s rozlišením 2500 pulzů na otáčku. Po čtyřhranném vyhodnocení signálu čítačem polohy je získána informace o poloze rotoru s rozlišením 10 000 pulzů na otáčku a směr otáčení pohonu. Čítač polohy také umožňuje softwarové resetování polohy pomocí proměnné „ $reset\ polohy$ “ a „ $reset\ polohy2$ “ na hodnotu definovanou proměnnými „ $reset\ poloha$ “ a „ $reset\ poloha2$ “. Informace o aktuální poloze je přenášena proměnnou „ $32bit\ citac\ polohy$ “ a „ $32bit\ citac\ polohy2$ “. Čítač polohy běží v časované while smyčce s taktem 20 kHz s nejvyšší prioritou. Část zdrojového kódu FPGA, která zajišťuje měření polohy servomotorů je uvedena na Obrázek 33, na následující straně.

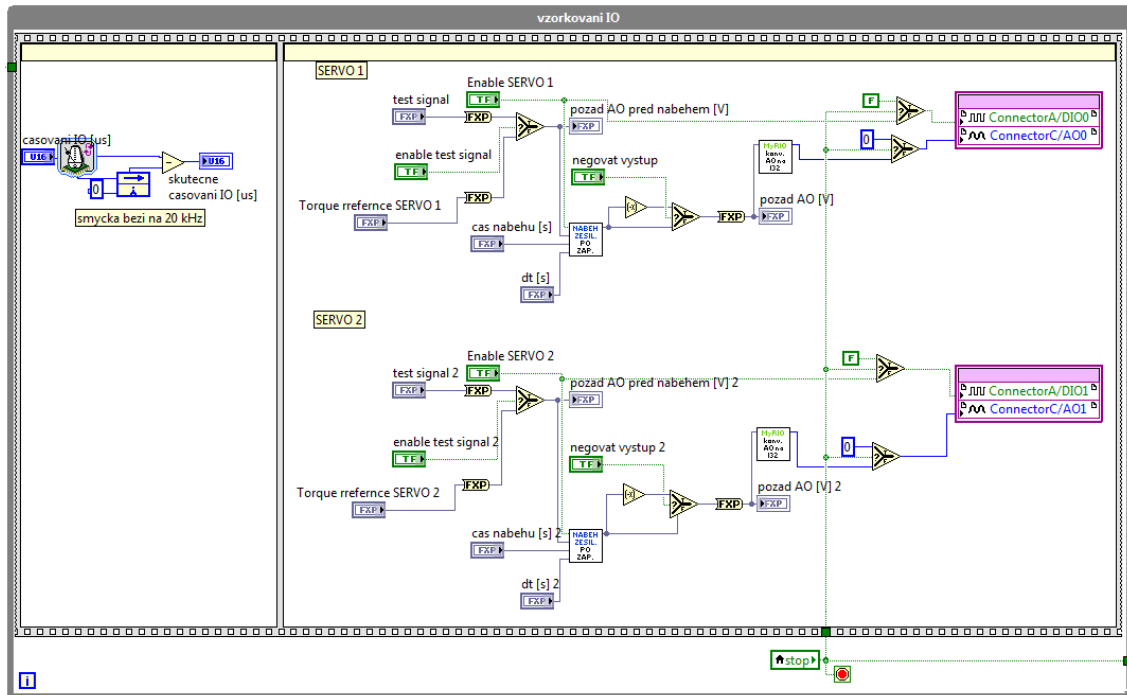


Obrázek 33: FPGA - čtení polohy z enkodérů servomotorů

U signálu polohy je naprosto nezbytné hlídat přetečení proměnných indikujících polohu servomotorů. Při přetečení proměnné indikující polohu v polohové regulaci by došlo ke skoku polohy, což by vyvolalo požadavek nekonečného zrychlení, který, kromě toho že je technicky nemožný, je také fyzikálně nepřijatelný. Způsob ošetření přetečení proměnných je popsán v kapitole 6.3

### Zadávání hodnot na fyzické výstupy

V této části kódu FPGA probíhá přiřazování požadovaných hodnot proměnných z RT řízení na fyzické výstupy řídicího počítače NI myRIO. Konkrétně hodnot proměnných „Enable SERVO 1“ a „Enable SERVO 2“, které jsou typu *boolean* a hodnot žádaného krouticího momentu pomocí proměnných „Torque reference SERVO 1“ a „Torque reference SERVO 2“. Tato část kódu běží v časované *while* smyčce s taktem 20 kHz, což je dostačující s ohledem na to, že vlastní regulace v RT část softwaru běží s taktem 1 kHz. Část zdrojového kódu obsluhující fyzické výstupy řídicího počítače NI myRIO je uvedena na Obrázek 34 na následující straně.



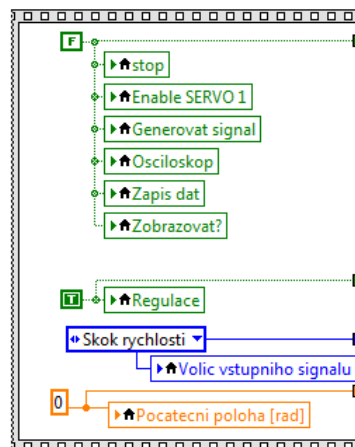
Obrázek 34: FPGA - obsluha fyzických výstupů NI myRIO

## 6.3 RT řízení

V této kapitole je popsána část navrženého softwaru, která zajišťuje regulaci pohonů navrženého výukového zařízení. Hlavními částmi tohoto softwaru jsou: vlastní zpětnovazební řízení servomotorů s rychlostním a polohovým regulátorem, generátor vstupních signálů, měření vstupních a výstupních signálů regulace a ovládací rozhraní, tzv. Front Panel (FP). V následujících odstavcích je podrobně popsána funkce jednotlivých částí řídicího softwaru.

### 6.3.1 Iniciační proměnných

Podobně jako u softwaru v FPGA je při spuštění řídicího softwaru nejprve provedena iniciace proměnných za účelem zamezení nedefinovaného stavu. Část kódu pro iniciaci proměnných je uvedena na Obrázek 35.



Obrázek 35: RT řízení - iniciace proměnných

Při spuštění softwaru RT řízení jsou nastaveny následující iniciační hodnoty proměnných:

Vypnutí stop tlačítka programu:

*Stop* = **FALSE**

Měnič je softwarově vypnut:

*Enable SERVO 1* = **FALSE**

Vypnutí tlačítek pro generování vstupních signálů a zobrazování a zápis měřených signálů vstupů a výstupů:

*Generovat signal* = **FALSE**

*Zobrazovat?* = **FALSE**

*Osciloskop* = **FALSE**

*Zapis dat* = **FALSE**

Je zvolena rychlostní regulace:

*Regulace* = **TRUE**

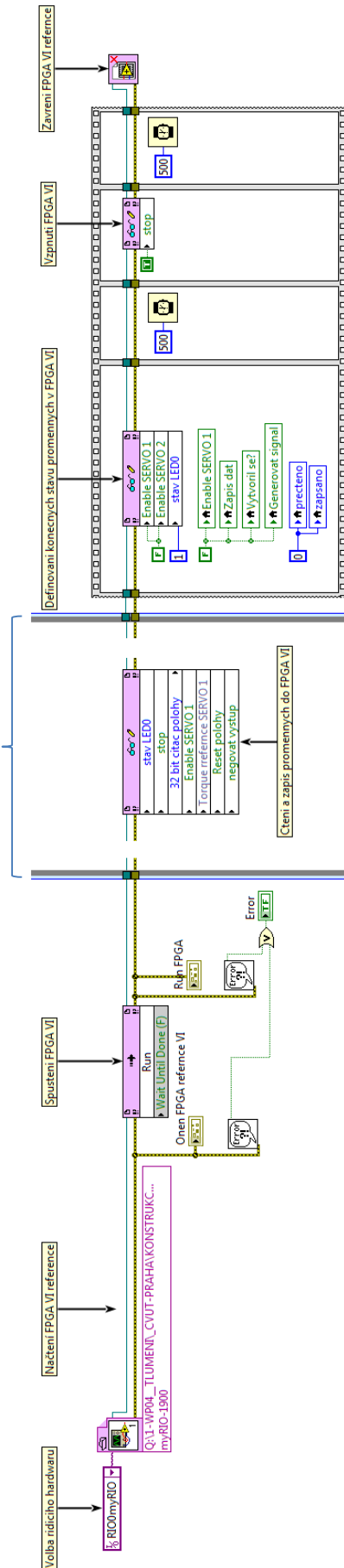
Nulová počáteční poloha servomotoru:

*Pocatecni poloha [rad]* = **0**

### 6.3.2 Vazba na obsluhu I/O v FPGA

Aby bylo možné odslužovat fyzické vstupy a výstupy, které jsou ovládány pomocí softwaru běžícím na FPGA z RT řídicího softwaru, je nutné vytvořit propojení RT řízení s obsluhou I/O v FPGA. Procedura zajišťující tuto vazbu je patrná z Obrázek 36 na další straně.

Čtení a zápis proměnných na fyzických I/O v FPGA běží v časované while smyčce s taktem 1kHz



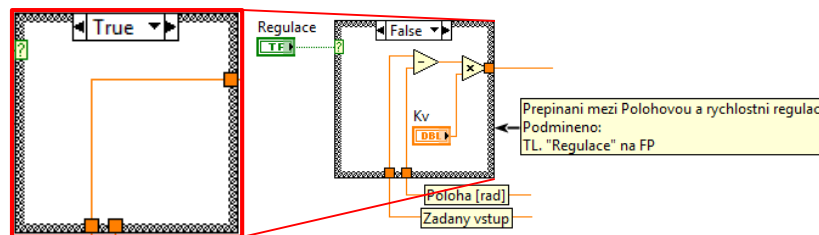
Obrázek 36: RT řízení - vazba mezi RT řízením a obsluhou I/O v FPGA

### 6.3.3 Kaskádní regulace

Vlastní polohová a rychlostní regulace běží v RT řízení v časované while smyčce s taktem 1 kHz. Mezi rychlostní a polohovou regulací je možné přepínat pomocí proměnné „Regulace“. Hlavními částmi kaskádní regulace jsou následující bloky: polohový a rychlostní regulátor, filtrace, omezení amplitudy signálu žádaného momentu, čtení a zápis I/O signálu, derivace signálu polohy. Každá z uvedených částí kaskádní regulace je podrobně popsána v textu níže.

#### Řízení polohy

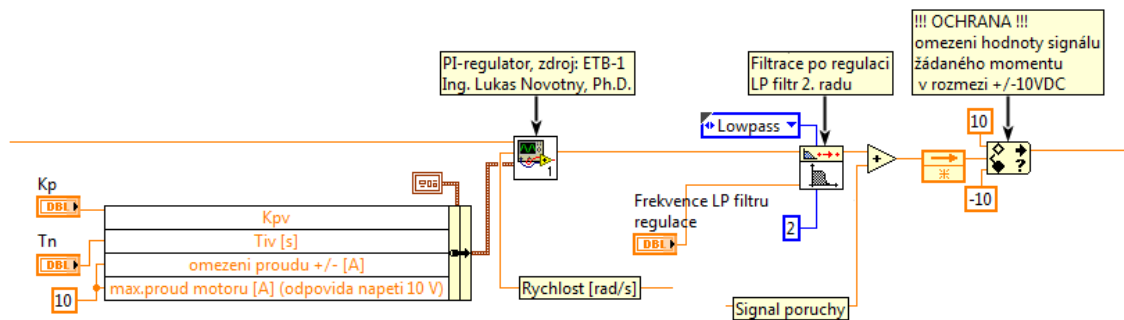
Polohový regulátor je realizován přenosobením polohové regulační odchylky proměnnou  $K_v$ . Zařazení polohového regulátoru je podmíněno proměnnou „Regulace“, pomocí které se definuje typ regulace. Provedení polohového regulátoru je patrné z Obrázek 37.



Obrázek 37: RT řízení - polohový regulátor

#### Řízení rychlosti

Rychlostní PI-regulátor byl původně realizován pomocí bloku „PID-regulátor“, který je součástí knihoven LabVIEW, odstraněním derivační složky regulátoru. U tohoto bloku bylo při ožívování zařízení pozorováno nestandardní a nedeterministické chování. Z tohoto důvodu byl použit PI-regulátor z řídicího softwaru ETB-1. Se svolením autora byl tento blok implementován do RT řídicího softwaru, viz Obrázek 38.



Obrázek 38: RT řízení - rychlostní regulátor, filtrace a omezení amplitudy

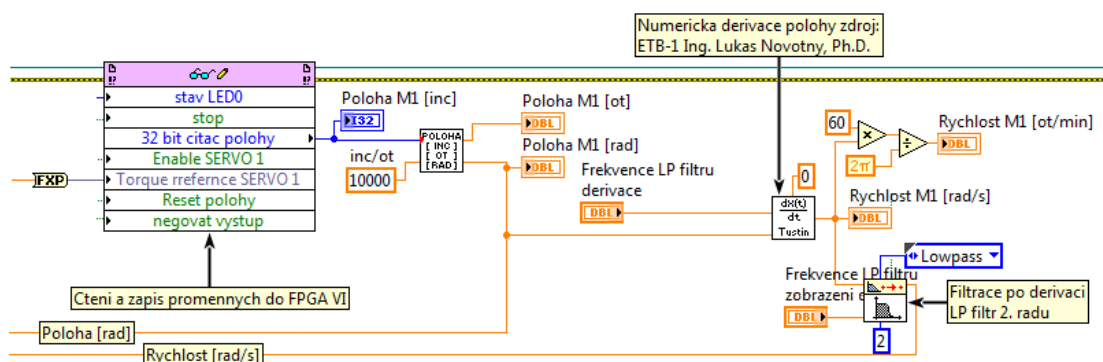
#### Filtrace výstupního signálu z rychlostního regulátoru

Za rychlostním regulátorem je zařazen LP filtr nastavený na frekvenci 150 Hz. Toto relativně nízké nastavení propustného pásma filtrace je podmíněno velmi zašuměným signálem rychlosti, který je důsledkem derivace signálu polohy z enkodéru s nízkým rozlišením.

Po filtraci výstupního signálu z regulátoru následuje blok hlídající rozsah signálu rychlostní regulační odchylky. Toto omezení je podmíněno napětovou úrovní jak řídicího počítače NI myRIO, tak vstupů měničů servomotorů, která je  $\pm 10\text{VDC}$ . Signál s amplitudou vyšší než 10V je oříznut.

Takto omezený výstupní signál rychlostního regulátoru je zaveden na fyzické výstupy řídicího počítače NI myRIO pomoci programu v FPGA jako žádaná hodnota krouticího momentu. Z FPGA je snímán signál aktuální polohy motorů, který je zaveden jako vstup do polohového regulátoru.

Pro potřeby rychlostní regulace je signál polohy derivován na rychlost. Tato derivace je realizována pomocí bloku numerické derivace, který byl převzat s řídicího softwaru výukového standu ETB-1. Signál polohy motoru, který je derivován, má tvar „schodů“, což je zapříčiněno nízkým rozlišením enkodérů zakoupených motorů. Z tohoto důvodu je signál derivované polohy výrazně zašuměný a je nutné jej ještě dodatečně filtrovat LP filtrem nastaveným na 150 Hz. Filtrovaný signál rychlosti je následně zaveden jako vstup do rychlostního PI-regulátoru. Část zdrojového kódu RT řízení zajišťující měření a zpracování signálu polohy je uvedena na Obrázek 39.



Obrázek 39: RT řízení - měření a zpracování signálu polohy

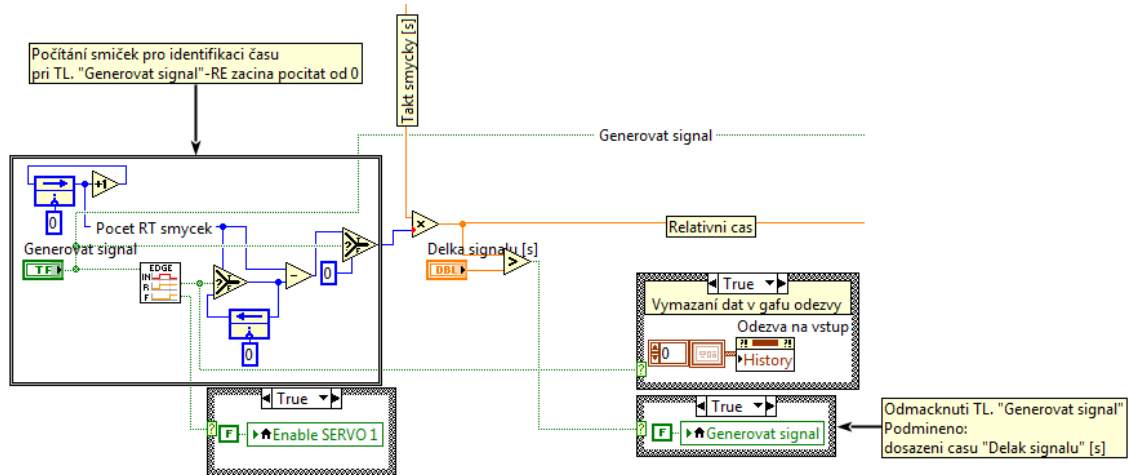
### 6.3.4 Generování vstupních signálů

Pro potřeby ladění konstant regulátorů a vyhodnocení frekvenčního chování mechanických soustav jednotlivých konfigurací navrhovaného výukového zařízení je nezbytné navrhnout generátor vstupních signálů. Typy generovaných vstupních signálů byly zloveny dle požadavků stanovených v kapitole 5 Návrh laboratorních úloh. V následujících odstavcích je podrobně popsán generátor vstupních signálů a jednotlivé typy generovaných signálů.

Generování vstupních signálů je podmíněno proměnnou „Generovat signál“. Tato proměnná řídí měření relativního času a zobrazování průběhů vstupních a výstupních signálů regulace. Délka generovaného signálu je podmíněna proměnnou „Délka signálu [s]“. Pokud dosáhne relativní čas hodnoty definované proměnnou „Delka signálu [s]“ dojde k odměčknutí tlačítka „Generovat signál“ a „ENABLE“, jak je patrné z Obrázek 40, str.:56.

#### Měření relativního času

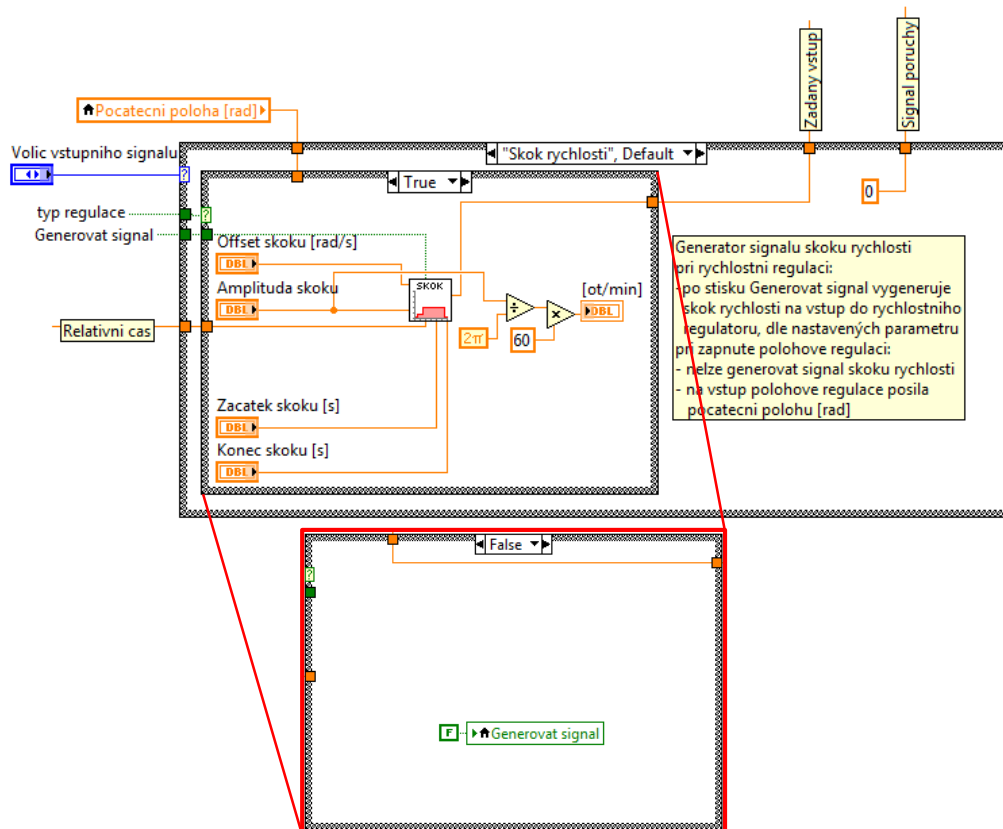
Pro potřeby generování vstupních signálů je měřen relativní čas od okamžiku stisku tlačítka „Generovat signál“. Relativní čas je používán kvůli vizualizaci, aby zobrazované průběhy vstupů a výstupů začínaly vždy v nule na časové ose. Pro výpočet jsou počítány průběhy smyček RT řízení od okamžiku náběžné hrany proměnné „Generovat signál“, které jsou následně vynásobeny periodou RT řízení. Následující Obrázek 40 ukazuje část zdrojového kódu RT řízení, která odpovídá za měření relativního času.



Obrázek 40: RT řízení - měření relativního času, vliv proměnné "Generovat signál"

### Skok rychlosti

Pro potřeby ladění konstant rychlostního regulátoru byl vytvořen generátor skoku rychlosti. Tento typ vstupního signálu je podporován pouze pro rychlostní regulaci. Při zapnutí polohové regulaci není povoleno tento signál generovat a na vstup polohového regulátoru je zadáván požadavek setrvání na aktuální poloze. Po stisku tlačítka „Generovat signál“ je vygenerován signál skoku rychlosti na vstup rychlostního regulátoru dle parametrů nastavených v záložce „Skok rychlosti“ na FP řídicího softwaru. V parametrech je možné nastavit offset rychlosti před skokem za účelem potlačení dynamických vlivů pasivních odporů při odtržení z nulové rychlosti. Na Obrázek 41 je uvedena část zdrojového kódu RT řízení s generátorem skoku rychlosti.

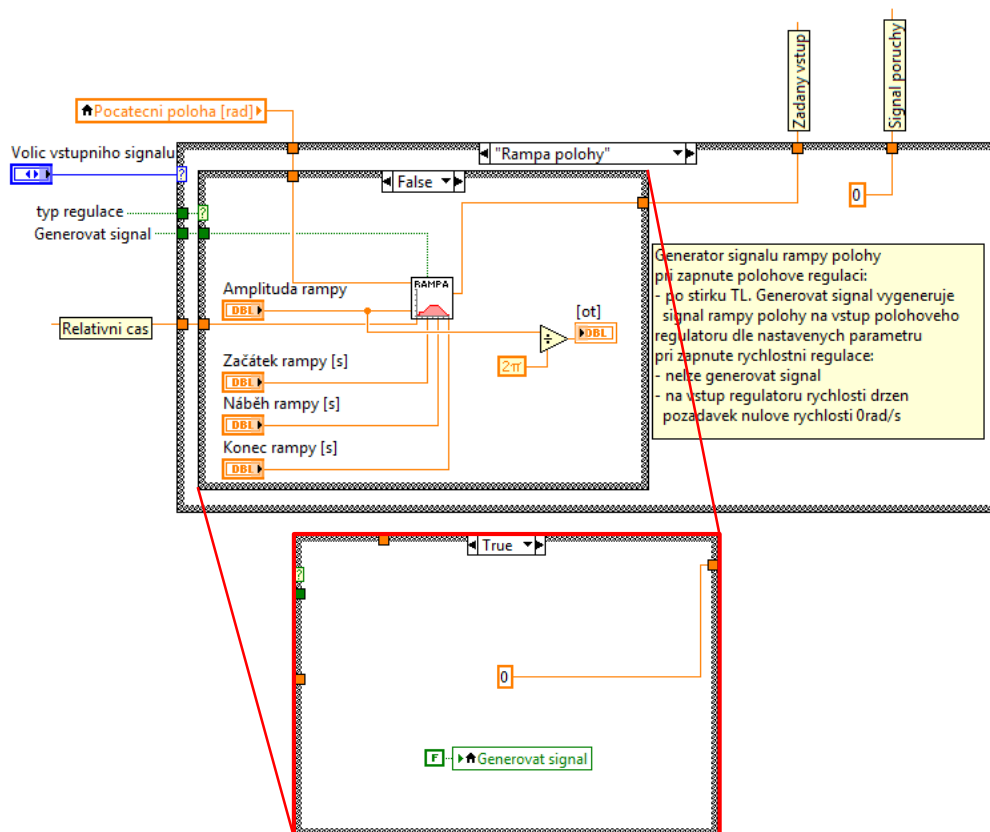


Obrázek 41: RT řízení - generátor skoku rychlosti



### Rampa polohy

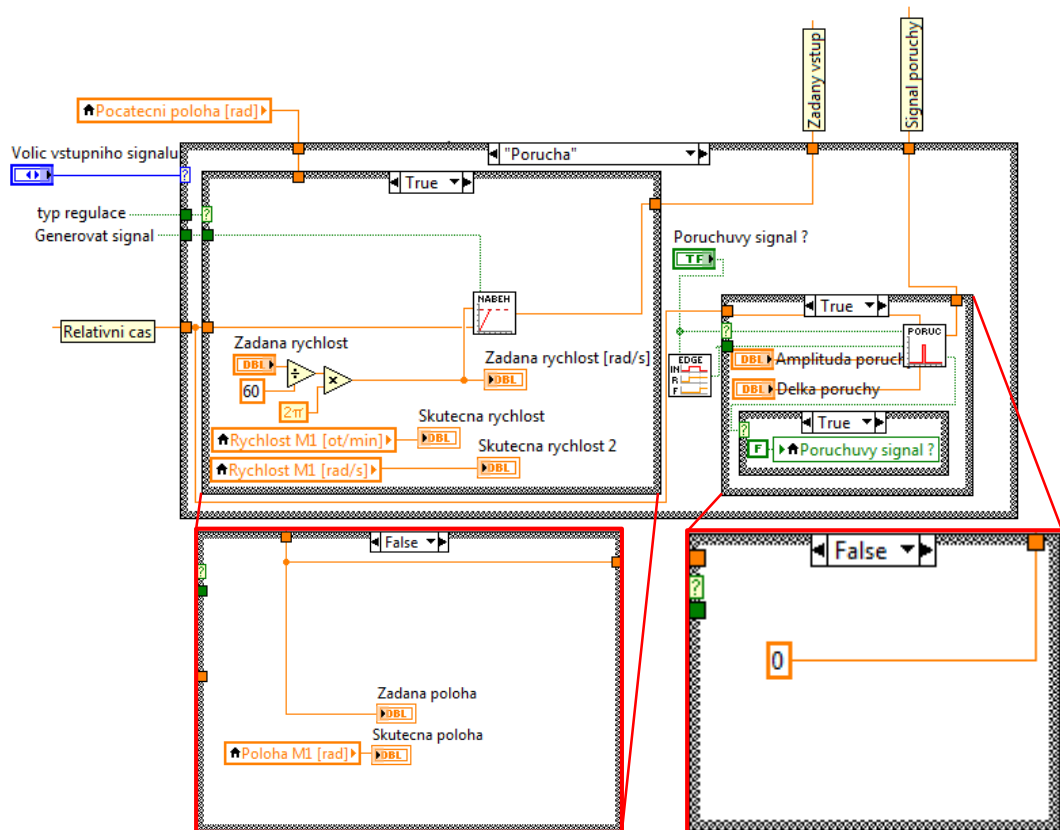
Pro potřeby ladění konstant polohového regulátoru byl vytvořen generátor rampového signálu polohy. Tento typ vstupního signálu je podporován pouze pro polohovou regulaci. Při zapnuté rychlostní regulaci není povoleno tento signál generovat a na vstup rychlostního regulátoru je zadáván požadavek nulové rychlosti. Po stisku tlačítka „Generovat signál“ je vygenerován signál rampy polohy na vstup polohového regulátoru dle parametrů nastavených v záložce „Rampa polohy“ na FP řídicího softwaru. Signál rampy polohy začíná vždy od aktuální polohy motoru. Pro posunutí průběhu rampy polohy do nuly ve vizualizačním grafu na FP je nutno před generováním signálu resetovat aktuální polohu motoru pomocí tlačítka Reset na FP. Na Obrázek 42 je uvedena část zdrojového kódu RT řízení s generátorem rampy polohy.



Obrázek 42: RT řízení - rampa polohy

### Porucha – skok žádaného momentu

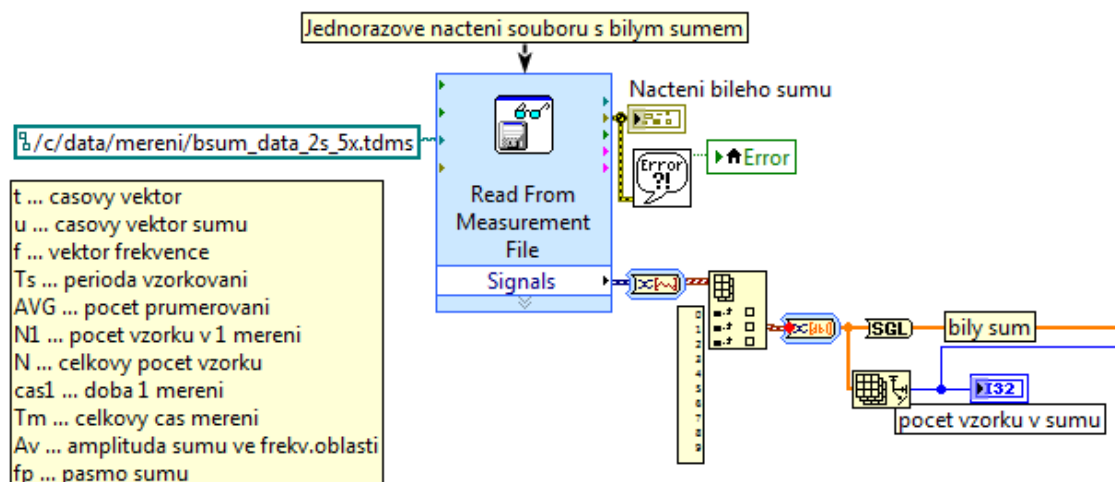
Po naladění parametrů rychlostního a polohového regulátoru je možné sledovat odezvu mechanické soustavy na poruchový signál ve formě skoku žádaného momentu zavedeného za rychlostní regulátor na vstup měniče, viz Obrázek 38, str.: 54. Poruchový signál skoku žádaného momentu je v závislosti na typu regulace generován buď při požadavku konstantní rychlosti zadávané jako vstup rychlostního regulátoru při rychlostní regulaci, nebo při požadavku držení aktuální polohy zavedeného na vstup polohového regulátoru při polohové regulaci. Proto je nutné nejprve generovat dostatečně dlouhý signál žádaného vstupu příslušného regulátoru a následně generovat signál poruchového momentu. Generování signálu poruchy je ovládáno tlačítkem „Porucha“ na FP. Část zdrojového generátoru poruchového signálu je uvedena na Obrázek 43, str.: 58.



Obrázek 43: RT řízení - poruchový signál

### Bílý šum pro měření přenosových charakteristik

Pro potřeby měření frekvenčních přenosových charakteristik byl použit generátor signálu s bílým šumem, který byl převzat ze softwaru pro řízení výukového standu ETB-1, jehož autorem je Ing. Lukáš Novotný, Ph.D. Pomocí tohoto softwaru je vygenerován signál s bílým šumem a uložen do souboru, ze kterého je následně načítán a po úpravě zadáván a příslušné vstupy v RT řízení. Zdrojový kód generátoru bílého šumu a ovládací panel tohoto softwaru je uveden v Příloha č. 6 a Příloha č. 7. Na Obrázek 44 je část zdrojového kódu RT řízení, která obstarává jednorázové načtení signálu s bílým šumem.



Obrázek 44: RT řízení - načtení bílého šumu ze souboru

Pro jednotlivé měřené přenosy je potřeba generovaný vstupní signál s bílým šumem zavádět na konkrétní vstupy regulace. Kvůli potlačení dynamického vlivu pasivních odporů při odtržení z nulové rychlosti je signál s bílým šumem modulován na požadavek nenulové konstantní rychlosti, pro přenosy rychlostní regulace, nebo na požadavek rampy polohy, pro měření přenosů polohové regulace. Pro každý typ generovaného signálu s bílým šumem je možné nastavit offset rychlosti, dobu ustálení a amplitudu šumu. Při zapnuté polohové regulaci není povoleno generovat přenosy rychlostní regulace a naopak. V následujícím textu je popsáno zpracování a zadávání signálu s bílým šumem pro měření jednotlivých přenosových charakteristik. Na Obrázek 45 je uvedena část zdrojového kódu RT řízení, ve které je zpracován signál bílého šumu.

#### ***Přenos rychlostní regulace $v$ skutečná / $v$ žádaná***

Pro měření frekvenční přenosové charakteristiky závislosti skutečné rychlosti motoru na žádané je nutné zavést signál s bílým šumem na vstup rychlostního regulátoru jako žádanou hodnotu rychlosti a měřit skutečnou rychlost motoru. Amplituda signálu bílého šumu musí být taková, aby výsledný signál žádané rychlosti nepřekročil nulovou rychlost. Jinými slovy nesmí dojít k zastavení nebo reverzaci pohybu. Na Obrázek 46 je uvedena část zdrojového kódu RT řízení, která obstarává tvorbu a zadávání vstupního signálu žádané rychlosti s namodulovaným bílým šumem na vstup rychlostního regulátoru.

#### ***Přenos rychlostní regulace $v$ skutečná / $M_K$ poruchy***

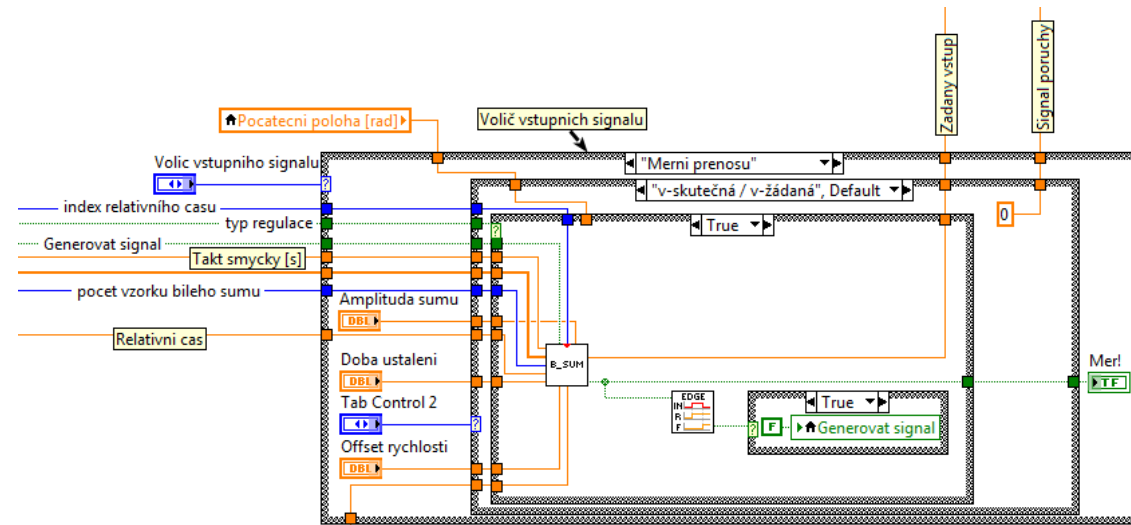
Pro měření frekvenční přenosové charakteristiky závislosti skutečné rychlosti motoru na poruchovém momentu je nutné zavést signál s bílým šumem za rychlostní regulátor na vstup měniče jako žádanou hodnotu krouticího momentu a signál požadavku konstantní rychlosti na vstup rychlostního regulátoru. Amplituda signálu s bílým šumem musí být nastavena s ohledem na to, aby nedocházelo k reverzaci motoru. Na Obrázek 47 je uvedena část zdrojového kódu RT řízení, která obstarává tvorbu a zadávání vstupního signálu žádaného offsetu rychlosti na vstup rychlostního regulátoru a signálu s bílým šumem na vstup měniče motoru.

#### ***Přenos polohové regulace $x$ skutečná / $x$ žádaná***

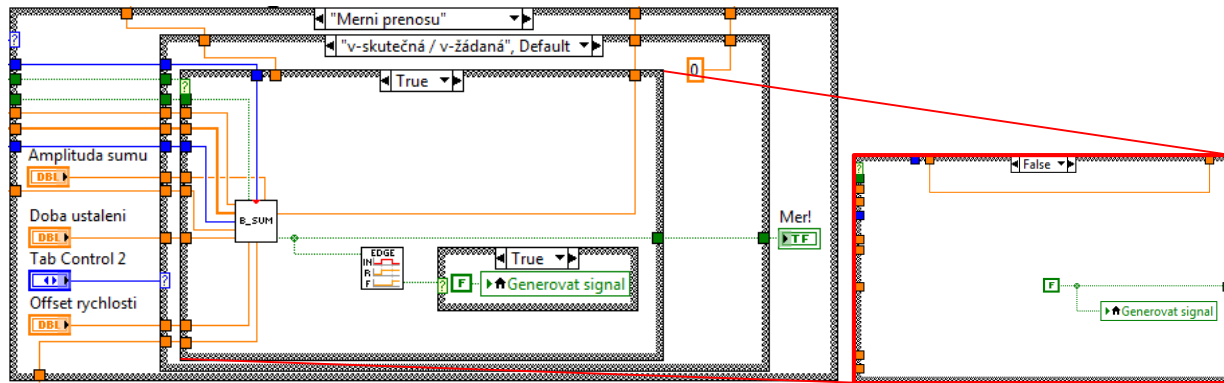
Pro měření frekvenční přenosové charakteristiky závislosti skutečné polohy motoru na žádané je nutné zavést signál s bílým šumem na vstup polohového regulátoru jako žádanou hodnotu polohy a měřit skutečnou polohu motoru pomocí přímého a nepřímého odměřování. Amplituda signálu bílého šumu musí být nastavena taková, aby nedocházelo k zastavení či reverzaci pohybu motoru. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** uvádí část zdrojového kódu RT řízení, která obstarává tvorbu a zadávání vstupního signálu žádané polohy s namodulovaným bílým šumem na vstup polohového regulátoru.

#### ***Přenos polohové regulace $x$ skutečná / $M_K$ poruchy***

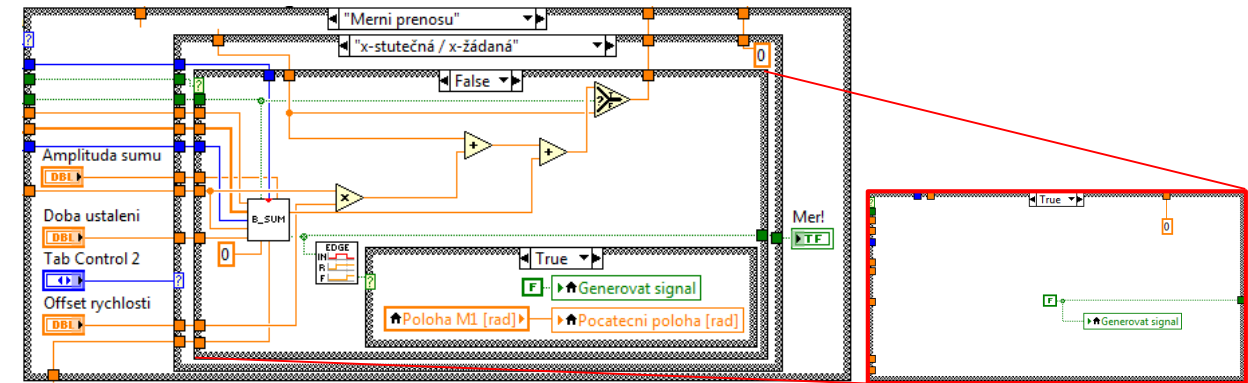
Pro měření frekvenční přenosové charakteristiky závislosti skutečné polohy motoru na poruchovém momentu je nutné zavést signál s bílým šumem za rychlostní regulátor na vstup měniče jako žádanou hodnotu krouticího momentu a signál požadavku rampy polohy na vstup polohového regulátoru. Amplituda signálu s bílým šumem musí být nastavena s ohledem na to, aby nedocházelo k zastavení nebo reverzaci pohybu motoru. Na Obrázek 49 je uvedena část zdrojového kódu RT řízení, která obstarává tvorbu a zadávání vstupního signálu žádané rampy polohy na vstup polohového regulátoru a signálu s bílým šumem na vstup měniče motoru.



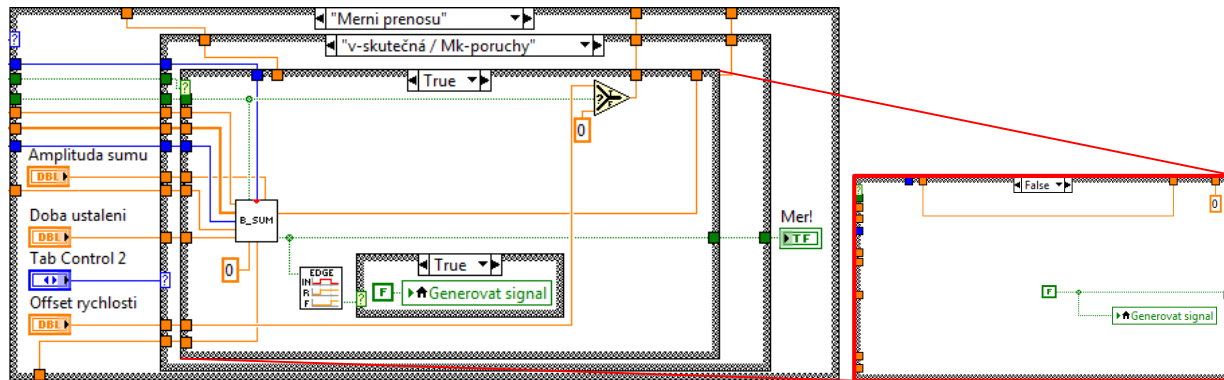
Obrázek 45: RT řízení - zpracování signálu bílého šumu pro měření frekvenčních přenosových charakteristik



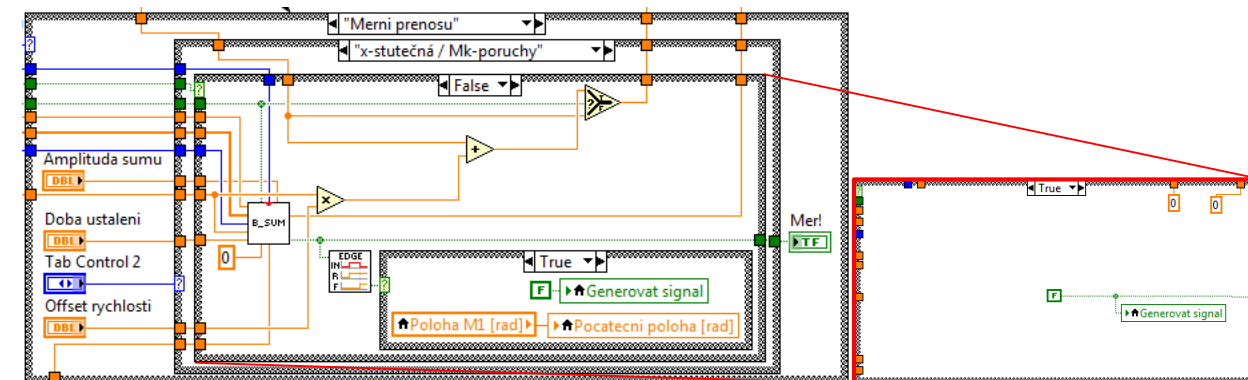
Obrázek 46: RT řízení - generátor vstupního signálu pro měření přenosu v skutečná/v žádaná



Obrázek 48: RT řízení - generátor vstupního signálu pro měření přenosu x skutečná/x žádaná



Obrázek 47: RT řízení - generátor vstupního signálu pro měření přenosu v skutečná/MK poruchy



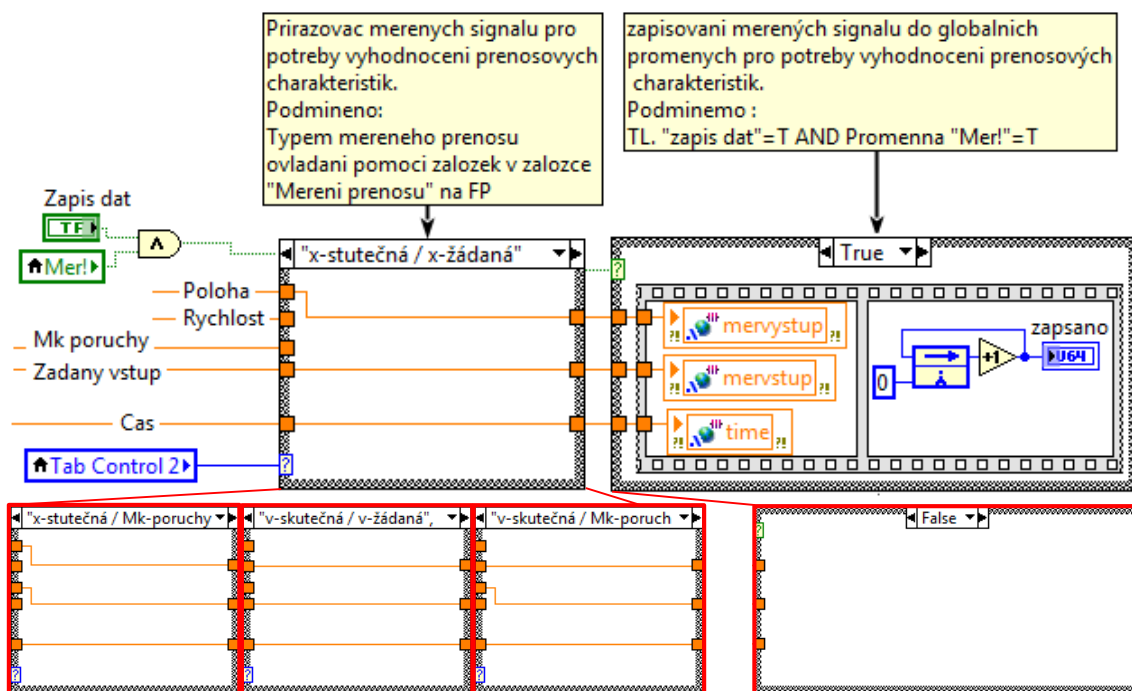
Obrázek 49: RT řízení - generátor vstupního signálu pro měření přenosu x skutečná/MK poruchy

### Zápis měřených dat

Jelikož je vyhodnocení přenosových charakteristik systému výpočetně náročné a mohlo by docházet ke zpoždování smyček RT řízení, je toto vyhodnocení prováděno v samostatném programu „bily sum vyhodnoceni.vi“ viz kapitola 6.4 Vyhodnocení přenosových charakteristik. Proto je nutné data s průběhy měřených vstupních a výstupních veličin ukládat do souboru, který je následně načten ve vyhodnocovací programu. Zdrojový kód a ovládací panel vyhodnocovacího softwaru je uveden v Příloha č. 8 a Příloha č. 9.

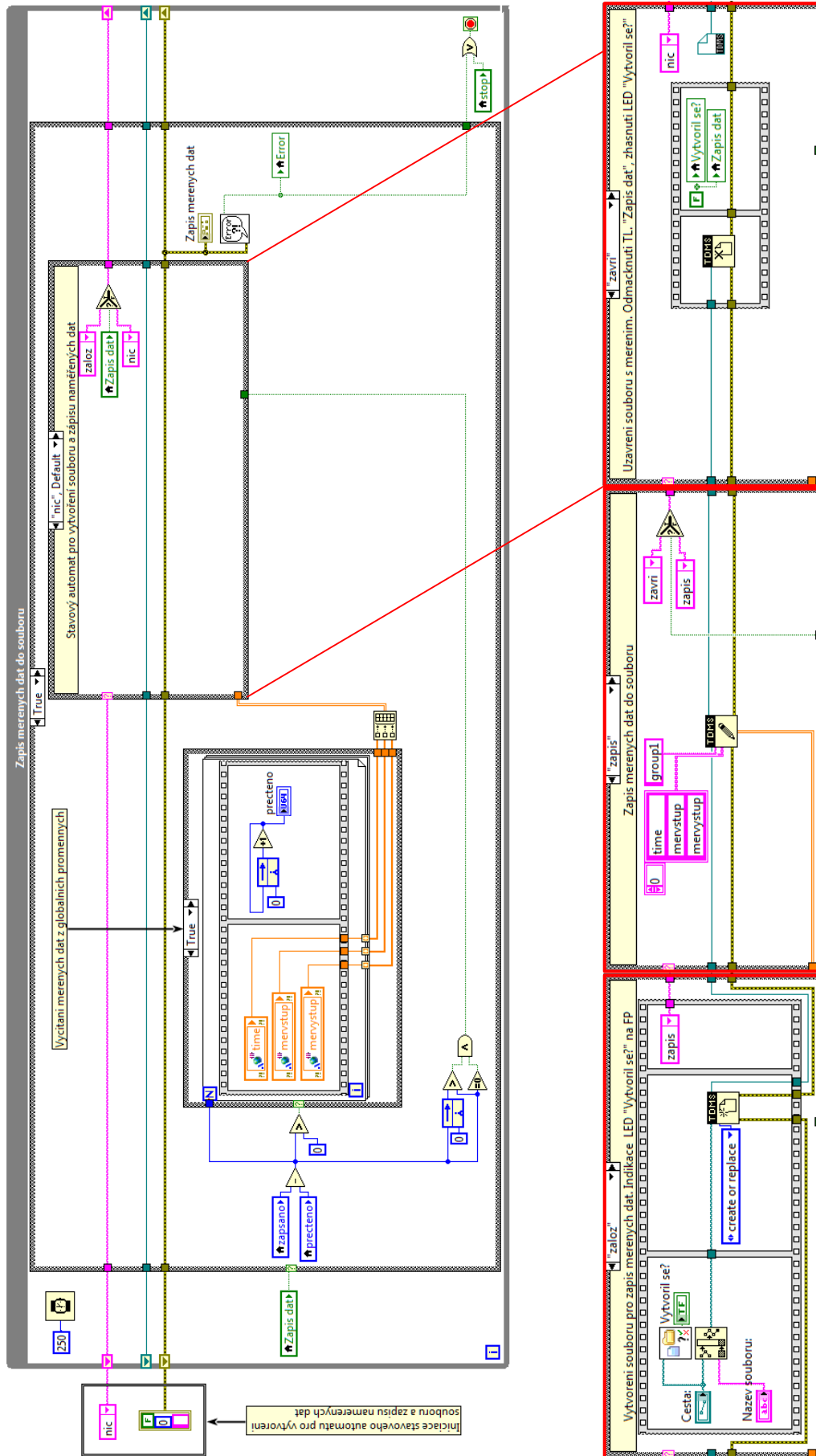
Pro potřeby vyhodnocení přenosových charakteristik je nutné měřit tři kanály, konkrétně průběh vstupní veličiny, výstupní veličiny a čas. Který signál je vstupní, případně výstupní veličina je závislé na typu měřené přenosové charakteristiky. Proto je potřebné přiřadit příslušné signály na jednotlivé měřené kanály. Volba typu měřeného přenosu je prováděna pomocí záložek proměnné „Tab control 2“, v záložce „Mereni prenosu“ na FP.

Měřená data jednotlivých kanálů jsou v RT smyčce zapisována do pomocných proměnných „time“, „mervstup“ a „mervystup“ a následně zapsána do souboru. Zápis měřených dat do souboru je podmíněn tlačítkem „Zapis dat“ a proměnnou „Mer!“ . Část zdrojového kódu zajišťující měření je uvedena na Obrázek 50.



Obrázek 50: RT řízení - měření přenosových charakteristik

Aby nedocházelo ke zpoždování chodu RT řízení, je zápis dat do souboru prováděn v paralelní běžící while smyčce s taktem 4 Hz. Součástí smyčky, ve které probíhá zápis měřených dat do souboru, je stavový automat, který zajišťuje vytvoření souboru, zápis dat do souboru a jeho následné korektní uzavření po zapsání všech naměřených dat z pomocných proměnných. Část zdrojového kódu zajišťující zápis dat měřených přenosů do souboru je na Obrázek 51 na následující straně.

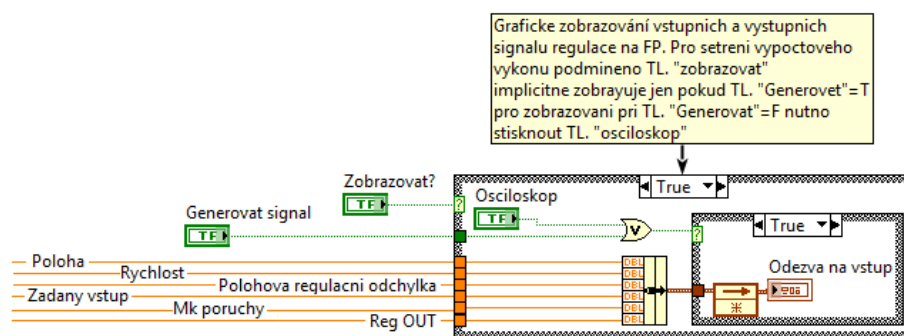


Obrázek 51: RT řízení - zápis dat měření přenosů do souboru



### 6.3.5 Vizualizace měřených signálů

Pro potřeby ladění konstant regulátorů a kontrolu tvarů generovaných vstupních signálů je na ovládacím panelu řídicího softwaru umístěn graf, na kterém jsou zobrazovány průběhy měřených signálů. Jelikož je vizualizace poměrně náročná na výpočetní výkon a mohlo by docházet ke zpoždování smyček RT řízení, je vizualizace průběhu měřených signálů podmíněna tlačítkem „Zobrazovat“. Implicitně probíhá vizualizace pouze po doby kdy je generován některý z vstupních signálů. Zobrazování aktuální hodnoty měřených signálů v době, kdy není generován žádný ze vstupních signálů, je umožněno pomocí tlačítka „Osciloskop“. Pro vizualizaci jsou měřeny následující signály: poloha, rychlost, polohová regulační odchylka, žádaný vstup, porucha a hodnota žádaného momentu. Zobrazování jednotlivých signálů v grafu na FP je možné zrušit pomocí zaškrtačacích okének na FP. Část zdrojového kódu RT řízení zajišťující vizualizaci měřených signálů je uvedena na Obrázek 52.



Obrázek 52: RT řízení - vizualizace měřených signálů

### 6.3.6 Ovládací panel

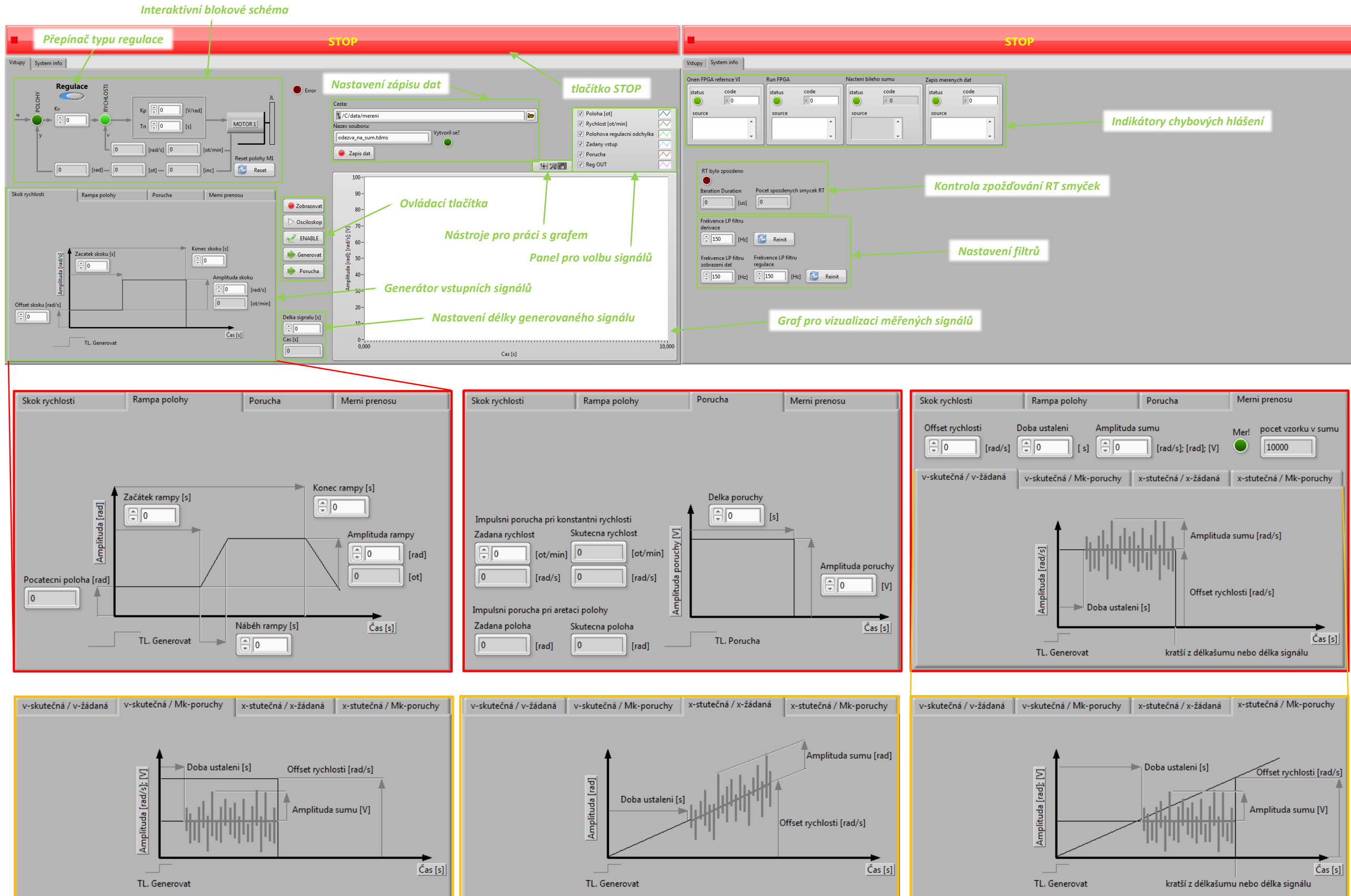
Pro ovládání výukového zařízení byl v prostředí LabVIEW vytvořen ovládací panel řídicího softwaru tzv. Front Panel viz Obrázek 53. Tento panel umožňuje nastavování parametrů regulátorů, přepínání typu regulace, přepínání typů generovaných vstupních signálů, nastavování jejich parametrů a vizualizaci měřených signálů. FP je rozdělen na dvě základní části „Vstupy“ a „Systém info“, které jsou prezentovány záložkami. Záložka „Vstupy“ je rozdělena do čtyř částí.

V první části je interaktivní blokové schéma regulace pohonu. Přímou v blokovém schématu je možno nastavovat parametry regulátorů. Nacházejí se zde také ukazatele aktuálního stavu pohonu.

Další částí je generátor vstupních signálů. Jednotlivé typy generovaných vstupních signálů jsou zařazeny do záložek. V jednotlivých záložkách generovaných signálů je možné nastavovat parametry generovaného signálu. V každé záložce je vždy uveden obrázek, ze kterého je patrný tvar generovaného signálu a význam nastavovaných parametrů signálu.

Třetí částí je graf pro vizualizaci měřených signálů polohy. Součástí grafu je panel se zaškrtačacími okénky pro volbu zobrazovaných signálů a paleta s tlačítky, které umožňují přiblížení/oddálení grafu, jeho posouvání atd. Poslední částí záložky „Vstupy“ je skupina tlačítek, pomocí kterých je řídicí software ovládán.

V záložce „Systém info“ jsou umístěny indikátory případných chybových hlášek, indikace zpoždování RT smyček a nastavení frekvenčního rozsahu filtrů.



Obrázek 53: Ovládací panel řídicího softwaru - 1. laboratorní úloha



## 6.4 Vyhodnocení přenosových charakteristik

Jak již bylo zmíněno výše, vyhodnocení přenosových charakteristik probíhá v samostatném softwaru, který byl vytvořen pro řízení výukového standu ETB-1. Vstupními daty pro vyhodnocení jsou naměřená data přenosové charakteristiky a soubor s parametry bílého šumu vytvořený generátorem signálu bílého šumu.

Po spuštění softwaru pro vyhodnocování přenosových charakteristik proběhne výpočet amplitudové a frekvenční charakteristiky přenosu, který je následně zobrazen v Bode diagramu na FP.

Zdrojový kód a ovládací FP softwaru pro vyhodnocení přenosových charakteristik je uveden v Příloha č. 8 a Příloha č. 9.

## 6.5 Ošetření proměnných

Pro zajištění správné funkce a bezpečnosti při provozování výukového zařízení je nezbytné definovat limitní hodnoty některých proměnných v řídicím systému. Tato podkapitola je věnována popisu důležitých proměnných v řídicím softwaru výukového standu. Bude zde popsána jejich funkce, typ, omezující hodnoty a důvod jejich omezení.

### **32 bit čítač polohy**

Tato proměnná je použita k počítání pulzních signálů enkodéru motoru a tedy indikuje aktuální polohu rotoru v jednotkách [inc]. Pro další zpracování je v softwaru řízení několikrát numericky upravena za účelem převodu jednotek na otáčky a následně numericky derivována pro získání aktuální rychlosti v jednotkách [ot/min].

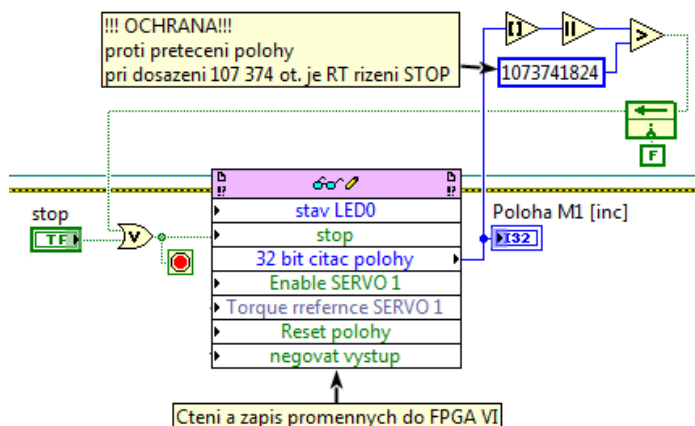
Jak už název napovídá, proměnná je typu *32-bit integer*, což znamená, že může nabývat hodnot od  $-2^{31}$  do  $+2^{31}$  ( $\pm 2\,147\,483\,648$ ). Z toho plyne, že při otáčení motoru z počáteční polohy jedním směrem nominálními otáčkami 3000 ot/min, může běžet motor cca 71,5 minut, než dojde k přetečení proměnné.

$$t_{KRIT} = \frac{2^{31}}{10000 \left[ \frac{inc}{ot} \right] \cdot 3000 \left[ \frac{ot}{min} \right]} = 71,58 \text{ min} \quad (5.1)$$

Pro řízení pohonu v polohové vazbě je naprosto nezbytné zajistit, aby nedošlo přetečení proměnné indikující polohu. Toto přetečení znamená, že by v řídicím softwaru v momentu přetečení došlo ke skoku polohy odpovídající 429 496,7 otáček opačným směrem, než byl dosavadní pohyb.

Jako opatření je sledována aktuální poloha motoru a pokud tato hodnota dosáhne limitní hodnoty, dojde k zastavení běhu řídicího softwaru. Jako limitní hodnota byla zvolena polovina rozsahu proměnné jedním směrem, tedy  $2^{30}$ , což odpovídá cca 107 000 otáčkám. Při rychlosti 3000 ot/min jedním směrem z nulové počáteční polohy je tohoto limitu dosaženo za 36 minut. Při dosažení limitní polohy motoru je zastaven software řízení.

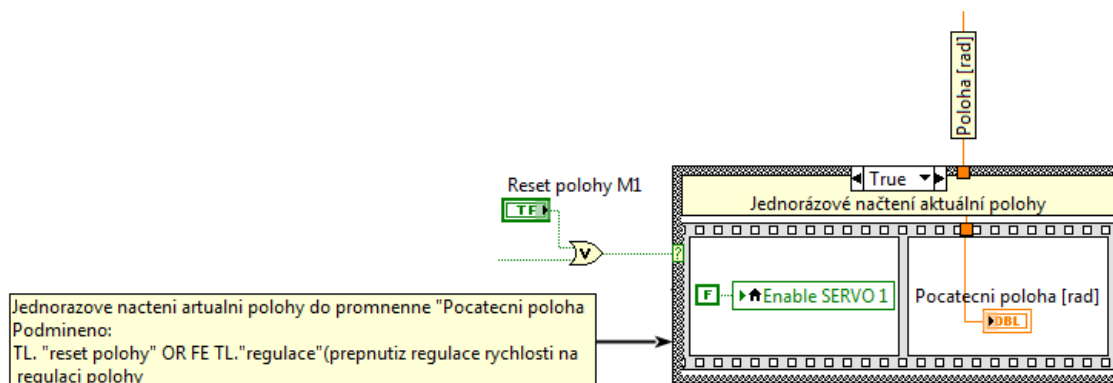
Část zdrojového kódu, která hlídá přetečení proměnné indikující polohu je uveden na Obrázek 54.



Obrázek 54: RT řízení - hlídání přetečení polohy

### Skok polohy

K výše zmiňovanému skoku polohy může dojít také při přepnutí regulace z rychlostní na polohovou. Proto je nezbytné při přepínání typu regulace vždy vypnout servoměnič pomocí signálu ENABLE a jednorázově načíst aktuální polohu motoru a tuto hodnotu nastavit vždy jako iniciační hodnotu žádané polohy při polohové regulaci. Část zdrojového kódu RT řízení je uvedena na Obrázek 55 níže.



Obrázek 55: RT řízení - načtení aktuální polohy při přepnutí typu regulace

### Počet RT smyček

Celý řídicí software probíhá v RT smyčce s taktem 4 kHz. Proměnná *Počet RT smyček* slouží k počítání proběhnutých smyček programu a následně po numerickém přenásobení periodou 1000  $\mu$ s k určení relativního času v grafech.

Opět je nezbytné, aby tato proměnná nedosáhla přetečení, protože by došlo ke ztrátě informace o čase v průběhu řízení. Z tohoto důvodu je proměnná *Počet RT smyček* typu *unsigned 64-bit integer*, což znamená, že může nabývat hodnot od 0 do  $2^{64}$ . To zajistí, že software může běžet asi sto milionu let bez přetečení proměnné, která indikuje relativní čas. Část zdrojového kódu pro počítání proběhnutých smyček RT řízení je uvedena v Obrázek 40, str.: 56.

## Závěr

### *Splnění cílů práce*

V první kapitole práce byla provedena rešerše současné koncepce výuky cvičení z předmětu PSS III. Na základě sylabu cvičení a obsahu jednotlivých cvičení byly vytipovány tři laboratorní úlohy, které byly následně podrobně zpracovány. Náplň vybraných laboratorních úloh koresponduje s hlavními nosnými tématy probíranými na cvičeních a přednáškách z PSS III. Těmito tématy jsou:

- Teorie kaskádní regulace a typy regulátorů v jednotlivých smyčkách, sledování jejich limitních stavů stability
- Řízení vícehmotové mechanické soustavy s poddajným členem, stabilita regulace (limitní a optimální naladění regulátorů)
- Řízení mechanické soustavy s vloženým převodem, vliv přímého a nepřímého odměřování, stabilita regulace (limitní a optimální naladění regulátorů)

Na základě obsahu těchto témat byly vytipovány následující laboratorní úlohy pro návrh výukového zařízení a podrobné zpracování podkladů pro cvičení:

- Řízení polohy a rychlosti jednohmotové mechanické soustavy
- Řízení rychlosti dvouhmotové mechanické soustavy s vloženým poddajným členem
- Řízení polohy a rychlosti dvouhmotové mechanické soustavy s vloženým převodem

Dle obsahu vytipovaných laboratorních úloh byly stanoveny požadavky na navrhované výukové zařízení a řídicí software umožňující demonstraci regulace a měření uvedených mechanických soustav. Tyto požadavky byly podrobně rozebrány v následující kapitole.

V kapitole 2 Rozbor požadavků na zařízení byly podrobně definovány požadavky na jednotlivé funkční části navrhovaného výukového zařízení. Byly zde postupně definovány požadavky na mechanickou část výukového zařízení, elektrokomponenty, řídicí aparaturu, bezpečnost a ergonomii. Na základě definovaných požadavků proběhl v následujících kapitolách návrh jednotlivých funkčních celků výukového zařízení.

V 3. kapitole, Návrh mechanické konstrukce, byl proveden návrh mechanické konstrukce. Hlavními částmi mechanické konstrukce navrhovaného zařízení jsou:

- *Upínací deska*, zajišťující variabilitu upínání mechanické soustavy pro jednotlivé laboratorní úlohy
- *Konzole motoru*, zajišťující tuhé a nastavitelné upnutí motorů k upínací desce
- *Krytování*, zajišťující bezpečný provoz zařízení a ochranu obsluhy
- *Vlastní mechanická struktura*

Byl zde proveden výpočet modálních vlastností navrhovaných mechanických soustav s ohledem na názornost a snadnou vybuditelnost jevů, které mají být demonstrovány na cvičeních. Součástí tohoto výpočtu je i kontrola maximálních otáček hřídele. Na základě těchto výpočtů byly zvoleny jednotlivé části navrhované mechanické struktury výukového zařízení. V závěru kapitoly je uvedena tabulka s výčtem komponent mechanické konstrukce zařízení

a jejich cenou. Pro vyráběné díly mechanické konstrukce byla vypracována výkresová dokumentace. Součástí výkresové dokumentace jsou i výkresy sestav jednotlivých konfigurací navrženého zařízení.

V textu 4. kapitoly, Návrh elektrické části, byly vytipovány servopohony a elektrokomponenty pro navrhované výukové zařízení.

Nejprve byl proveden výběr servopohonů. Na základě požadavků stanovených v kapitole 2 byly vytipovány čtyři servopohony od různých výrobců, z nichž byl následně na základě technických parametrů a cenových nabídek vybrán servopohon od firmu ESTUN.

Následně byl dle technické dokumentace a požadavků na funkcionalitu výukového zařízení proveden návrh elektrického zapojení a volba ovládacích signálů. Byl realizován elektrická rozvaděč, ve kterém jsou umístěny servoměmiče pohonů. K tomuto rozvaděči bylo vytvořeno schéma elektrického zapojení, které je součástí přílohy Výkresová dokumentace. Na rozvaděči byla provedena revize elektrických spotřebičů.

V závěru kapitoly je opět uvedena tabulka s výčtem použitých elektrokomponent a jejich cenou.

V textu 5. kapitolu Návrh laboratorních úloh byla podrobně popsána náplň jednotlivých cvičení a postup měření. Z náplně jednotlivých cvičení byly následně vyspecifikovány požadavky na funkcionalitu navrženého řídicího softwaru. Součástí této kapitoly je také popis návrhu podkladů pro jednotlivá laboratorní cvičení. Vypracované podklady pro jednotlivé laboratorní úlohy jsou součástí příloh této práce.

V poslední kapitole je popsán návrh a tvorba řídicího softwaru. Navržený řídicí software se skládá ze tří částí. Návrh a funkce jednotlivých částí jsou popsány v textu práce. Hlavní části navrženého řídicího softwaru jsou:

- *Obsluha fyzických vstupů a výstupů v FPGA*
- *Real-Time řízení*
- *Software pro vyhodnocení přenosových charakteristik*

V závěrečné podkapitole návrhu řízení je popsáno ošetření důležitých proměnných používaných RT řídicím softwaru. Jsou zde popsány jejich limitní stavy, důsledky překročení těchto stavů a opatření, kterými je dosažení limitních stavů zabráněno.

### **Shrnutí práce**

Byly splněny všechny body zadání diplomové práce. Nad rámec zadání byla realizována výroba a nákup všech navržených částí výukového zařízení. Výukové zařízení bylo sestaveno elektricky zapojeno a oživeno. Výsledkem je funkční výukové zařízení, které je připraveno pro výuku s řídicím softwarem a podklady pro vybrané laboratorní úlohy. Součástí práce je kompletní výkresová dokumentace, pro případnou výrobu více stejných zařízení, a kompletní technická dokumentace jednotlivých komponent.

# Seznamy

## Seznam použitých pramenů

1. **MAREK Industrial, a.s.** Hliníkové konstrukční profily FM-SYSTEME. *MAREK Industrial, a.s.* [Online] 2006. [Citace: 29. Červen 2016.] <http://www.marek.eu/cz/produkty/hlinikove-profil-y-konstrukce-dopl-ny-b-fm-systeme-b-fath/hlinikove-konstrukcni-profil-y-b-fm-systeme-b/hlinikove-profil-y/>.
2. **ESTUN Automation Technology Co., Ltd.** Estun's Brochures and Technical Guidance. místo neznámé : ESTUN Automation Technology Co., Ltd., 2012. Sv. ES2013-A ProNet Series Product Brochure.
3. **Souček, P.** *Elektrohydraulické servomechanismy*. Praha : Ediční středisko ČVUT, 1990.
4. **KULIČKOVÉ ŠROUBY KUŘIM, a.s.** Výpočtová část. *KULIČKOVÉ ŠROUBY KUŘIM*. [Online] 2013. [Citace: 29. Červen 2016.] <http://www.ksk-pm.cz/kulickove-srouby/vypoctova-cast/>.
5. **Švihálek, Zdeněk.** Moduly pro řízení pohonů. *AUTOMA*. 2012, 11.
6. **Mitsubishi Electric Corporation.** MEL SERVO-J4. [Online] [Citace: 26. Červen 2016.]
7. **Autocont Control System s.r.o.** MR-J4. *Autocont Control System s.r.o.* [Online] 2013. [Citace: 24. Listopad 2015.] <http://www.accs.cz/FAList?dept=100060>.
8. **SANYO DENKI EUROPE SA.** SANMOTION R. [Online] [Citace: 26. Červen 2016.] <http://www.sanyodenki.eu/-SANMOTION-R-.html>.
9. **Omron Corporation.** Accurax G5. [Online] 2016. [Citace: 26. Červen 2016.] <https://industrial.omron.cz/cs/products/accurax-g5>.
10. **Raveo s. r. o.** Servomotory ESTUN řada EMJ. [Online] [Citace: 26. Červenec 2016.] <http://www.raveo.cz/servomotory-estun-emj>.
11. **ESTUN Automation Technology Co., Ltd.** ProNet Series AC Servo User's Manual. místo neznámé : ESTUN Automation Technology Co. Ltd, 2011. V2.12.
12. **National Instruments Corporation.** Choosing Pull-up Resistor Values for R Series Devices Digital Output Lines. [Online] 2014. <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/D58C269F7771770E86256F490082E6C8>.
13. **Finder S.p.A.** 34 series - Solid State Relay. *Finder*. [Online] 2016. [Citace: 4. Červenec 2016.] <http://www.findernet.com/en/products/sku/348170059024>.
14. **National Instruments Corporation.** Tiskové zprávy z NI Week. *Web National Instruments Corporation*. [Online] 2013. [Citace: 24. Listopad 2015.] <http://www.ni.com/newsroom/release/students-can-now-design-sophisticated-systems-in-one-semester-with-ni-myrio/cs/>.

15. —. NI myRIO Support. *National instruments*. [Online] 2016. [Citace: 4. Červenec 2016.]  
<http://sine.ni.com/psp/app/doc/p/id/psp-1166/lang/cs>.

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Stand s lineárním hydraulickým servomotorem .....	13
Obrázek 2: Stand ETB-1 s prstencovým motorem .....	14
Obrázek 3: Stand s čtyřhnotovou mechanickou soustavou.....	15
Obrázek 4: Stand s kuličkovým šroubem .....	15
Obrázek 5: Pracoviště v laboratoři A-131c .....	22
Obrázek 6: Průřez hliníkového profilu 40x160 S8; zdroj: (1) .....	23
Obrázek 7: Konzole motoru .....	24
Obrázek 8: Krytování výukového zařízení.....	24
Obrázek 9: Návrh výukového zařízení - konfigurace pro 1. laboratorní úlohu.....	25
Obrázek 10: Návrh výukového zařízení - konfigurace pro 2. laboratorní úlohu.....	25
Obrázek 11: Návrh výukového zařízení - konfigurace pro 3. laboratorní úlohu.....	26
Obrázek 12: Schéma mechanické struktury 2. laboratorní úlohy .....	27
Obrázek 13: Schéma mechanické struktury 3. laboratorní úlohy .....	28
Obrázek 14: Schéma mechanické struktury náhradního modelu mechaniky 3. úlohy ....	28
Obrázek 15: Schéma mechanické struktury ROTOR - HŘÍDEL ROTORU - SETRVAČNÍK....	29
Obrázek 16: Servopohon Mitsubishi Electric; zdroj: (7) .....	31
Obrázek 17: Servopohon SANYO DENKI; zdroj: (8).....	32
Obrázek 18: Sevoměnič OMRON; zdroj: (9).....	32
Obrázek 19: Servopohon ESTUN; zdroj: (10) .....	33
Obrázek 20: Schéma zapojení vstupů a výstupů měniče – myRIO .....	35
Obrázek 21: Fotografie elektrického rozvaděče .....	36
Obrázek 22: Schéma zapojení Enable signálu s Pull-up rezistorem.....	37
Obrázek 23: Schéma regulace pro 1. laboratorní úlohu.....	40
Obrázek 24: Odezva systému na skok rychlosti při $K_P$ krit .....	41
Obrázek 25: Odezva systému na skok rychlosti.....	41
Obrázek 26: Odezva systému na rampu polohy .....	42
Obrázek 27: Schéma regulace pro 2. laboratorní úlohu.....	44
Obrázek 28: Schéma regulace pro 3. laboratorní úlohu.....	45
Obrázek 29: Řídící počítač NI myRIO; zdroj: (15) .....	47
Obrázek 30: Schéma architektury počítače NI myRIO.....	48
Obrázek 31: FPGA - iniciace proměnných.....	48
Obrázek 32: FPGA - pro Indikaci stavu FPGA .....	49
Obrázek 33: FPGA - čtení polohy z enkodérů servomotorů .....	50
Obrázek 34: FPGA - obsluha fyzických výstupů NI myRIO .....	51
Obrázek 35: RT řízení - iniciace proměnných.....	51
Obrázek 36: RT řízení - vazba mezi RT řízením a obsluhou I/O v FPGA .....	53
Obrázek 37: RT řízení - polohový regulátor .....	54
Obrázek 38: RT řízení - rychlostní regulátor, filtrace a omezení amplitudy .....	54
Obrázek 39: RT řízení - měření a zpracování signálu polohy .....	55
Obrázek 40: RT řízení - měření relativního času, vliv proměnné "Generovat signál" .....	56
Obrázek 41: RT řízení - generátor skoku rychlosti .....	56
Obrázek 42: RT řízení - rampa polohy.....	57
Obrázek 43: RT řízení - poruchový signál.....	58

Obrázek 44: RT řízení - načtení bílého šumu ze souboru .....	58
Obrázek 45: RT řízení - zpracování signálu bílého šumu pro měření frekvenčních přenosových charakteristik.....	60
Obrázek 46: RT řízení - generátor vstupního signálu pro měření přenosu v skutečná/v žádaná .....	60
Obrázek 47: RT řízení - generátor vstupního signálu pro měření přenosu v skutečná/MK poruchy .....	60
Obrázek 48: RT řízení - generátor vstupního signálu pro měření přenosu x skutečná/x žádaná .....	60
Obrázek 49: RT řízení - generátor vstupního signálu pro měření přenosu x skutečná/MK poruchy .....	60
Obrázek 50: RT řízení - měření přenosových charakteristik .....	61
Obrázek 51: RT řízení - zápis dat měření přenosů do souboru.....	62
Obrázek 52: RT řízení - vizualizace měřených signálů .....	63
Obrázek 53: Ovládací panel řídicího softwaru - 1. laboratorní úloha.....	64
Obrázek 54: RT řízení - hlídání přetečení polohy.....	66
Obrázek 55: RT řízení - načtení aktuální polohy při přepnutí typu regulace .....	66

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Výčet komponent mechanické konstrukce .....	30
Tabulka 2: Vybrané parametry pohonu Mitsubishi Electric .....	31
Tabulka 3: Vybrané parametry servopohonu SANYO DENKI .....	32
Tabulka 4: Vybrané parametry pohonu OMRON .....	32
Tabulka 5: Vybrané parametry pohonu ESTUN .....	33
Tabulka 6: Vybrané parametry poptávaných servopohonů .....	34
Tabulka 7: Přenastavené parametry měničů .....	38
Tabulka 8: Výčet elektrokomponent .....	39



## Seznam použitých programů

- Microsoft Word 2013
- Microsoft Excel 2013
- PDFcreator
- profiCAD 8.4.1
- Siemens NX 10.0
- National Instruments LabView 2015
- National Instruments DIADEM
- National Instruments MAX
- Mozilla Firefox
- Matlab R2014a
- ESview 2.1
- Lantronix CPR Manager 4.3.0.3

## Seznam příloh

### *Textové přílohy*

- Příloha č. 1 Osnova výuky předmětu PSS III
- Příloha č. 2 Matlab - script pro výpočet modálních vlastností
- Příloha č. 3 Protokol z laboratorního měření
- Příloha č. 4 Protokol z laboratorního měření
- Příloha č. 5 Protokol z laboratorního měření
- Příloha č. 6 Zdrojový kód generátoru bílého šumu
- Příloha č. 7 Ovládací panel generátoru bílého šumu
- Příloha č. 8 Zdrojový kód pro vyhodnocení přenosových charakteristik
- Příloha č. 9 Zdrojový kód pro vyhodnocení přenosových charakteristik

## Výkresová dokumentace

VYUKOVY_STAND_V1	DP-ASM-00-001	A0 – 1 list
VYUKOVY_STAND_V2	DP-ASM-00-002	A0 – 1 list
VYUKOVY_STAND_V2	DP-ASM-00-003	A0 – 1 list
KONZOLE	DP-PRT-00-001	A2 – 1 list
KONZOLE	DP-PRT-01-001	A2 – 1 list
KRYT	DP-PRT-01-002	A3 – 1 list
PLECH_1	DP-PRT-02-001	A3 – 1 list
PLECH_2	DP-PRT-02-002	A3 – 1 list
PLECH_3	DP-PRT-02-003	A3 – 1 list
KRYT_CELO	DP-PRT-02-004	A3 – 1 list
KRYT_BOK	DP-PRT-02-005	A3 – 1 list
KRYT_VRCH	DP-PRT-02-006	A3 – 1 list
TYC	DP-PRT-02-007	A4 – 1 list
ROZPERNA LISTA	DP-PRT-02-008	A3 – 1 list
VYUKOVY_STAND	DP-ELE-00-001	A3 – 1 list

## CD médium

1728 – Bc. Michal Drhlík. pdf – soubor s textem DP

Zadání DP

- KOMPONENTY složka s technickou dokumentací komponent
  - AROCOELECTRIC
  - EATON
  - ESTUN
  - FINDER
  - MAREK INDUSTRIAL
  - MEAN WELL
  - MISUMI
  - ORACK
  - POPOUCH
  - SCHNEIDER ELECTRIC
  - SUNON
  - TYMA
- KONSTRUKCE složka s modely výkresovou dokumentací
  - DXF
  - MODELÝ
  - STEP214
  - VYKRESY
- SOFTWARE instalační soubory freeware softwaru
- TEXTOVÉ PŘÍLOHY Příloha č. 1 – 9
- LabVIEW složka s navrženým řídicím softwarem

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PREZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Diplomová práce

Návrh výukového pracoviště pro řízení elektrických pohonů

TEXTOVÉ PŘÍLOHY

## **Příloha č. 1 Osnova výuky předmětu PSS III**

### Cvičení

1. (Souček) Kopírovací zařízení, Řízení polohy lineárního hydromotoru, Stavová regulace
2. (Moravec) Proudová regulace prstencového motoru
3. (Moravec) Řízení polohy a rychlosti prstencového motoru
4. (Matyska) Řízení poddajné vícehmotové soustavy
5. (Matyska) Řízení polohy a rychlosti pohonu s kuličkovým šroubem
6. (Matyska) Souběh dvou pohonů v gantry regulaci

### Přednášky

1. Úvod do servomechanismů I
2. Úvod do servomechanismů II
3. Proudová regulace
4. Rychlostní regulace
5. Polohová regulace
6. Předkorekce rychlosti a proudu (feedforward), rekapitulace
7. Polohová zpětná vazba s dynamikou 2. řádu
8. Kaskádní regulace 2-hmotového systému
9. Interakce dynamických vlastností 2-hm. systému a regulace
10. Problematika pohybových os s přímými pohony
11. Přesnost polohování
12. Součinnost dvou a více pohonů
13. Vysoce dynamické pohony

## Příloha č. 2 Matlab - script pro výpočet modálních vlastností

```
% Výpočet modálních vlastností dvouhmotové úlohy
clear;
% Vstupní parametry:
Mk=0.64; % [Nm] Krouticí moment motoru
Jm=19e-6; % [kgm2] Moment setrvačnosti motoru
Js=32.3e-6; % [kgm2] Moment setrvačnosti spojky
ks=20000; % [Nm/rad] Tuhost spojky

% Parametry poddajného hřídele:
ro=7800; % [kg/m3] Hustota materiálu hřídele
E=2.1e11; % [N/m2] Modul pružnosti v tahu
mi=0.3; % [/] Poissonovo číslo
G=E/(2*(1+mi)); % [N/m2] Modul pružnosti v krutu
Dh=0.014; % [m] Průměr hřídele
lh=0.9; % [m] Délka hřídele
kh=(pi*Dh^4*G)/(32*lh); % [Nm/rad] Tuhost hřídele
Jh=ro*pi*Dh^4*lh/32; % [kgm2] Moment setrvačnosti hřídele

% Parametry řemenového převodu:
m=5; % [/] Modul ozubení řemenice
k1m=86; % [m*N/mm] Tuhost 1 m řemene
zm=112; % [zubu] Počet zubů řemenice motoru
z1=136; % [zubu] Počet zubů řemenice zátěže
rm=m*zm/2/pi/1000; % [m] Poloměr řemenice motoru
rl=m*z1/2/pi/1000; % [m] Poloměr řemenice zátěže
p=z1/zm; % [/] Převodový poměr řemenic
a=0.535; % [m] Osová vzdálenost řemenic
dv=sqrt(a^2-(rm-rl)^2); % [m] Délka větve řemene
J1=9905e-6; % [kgm2] Moment setrvačnosti malé řemenice
J2=21468e-6; % [kgm2] Moment setrvačnosti velké řemenice
JT1=165e-6; % [kgm2] Moment setrvačnosti upínacího pouzdra malé řemenice
JT2=479e-6; % [kgm2] Moment setrvačnosti upínacího pouzdra velké řemenice

ktah=k1m/dv; % [N/mm] Tuhost 1 větve řemene
ktor=2*ktah*rm^2*1000; % [Nm/rad] Torzní tuhost řemenového převodu na hřídeli motoru

% Výpočet pro soustavu s dlouhým poddajným hřídelem
JM=Jm+Js+J1+JT1; % [kgm2] Moment setrvačnosti pohonu
JL=JM; % [kgm2] Moment setrvačnosti zátěže

OmM1=sqrt(kh/JM); % [rad/s] vlastní frekvence pohonu při zablokované zátěži
omM1=OmM1/2/pi; % [Hz] vlastní frekvence pohonu při zablokované zátěži
OmL1=sqrt(kh/JL); % [rad/s] vlastní frekvence zátěže při zablokovaném pohonu
omL1=OmL1/2/pi; % [Hz] vlastní frekvence zátěže při zablokovaném pohonu
OmV1=sqrt((kh*(JM+JL))/(JM*JL)); % [rad/s] vlastní frekvence volně kmitající soustavy
omV1=OmV1/2/pi; % [Hz] vlastní frekvence volně kmitající soustavy
nkrit=0.8*10^4*10*Dh/lh^2; % [ot/min] kritické otáčky hřídele

% Výpočet pro soustavu s řemenovým převodem
JM2=Jm+J1+JT1; % [kgm2] Moment setrvačnosti pohonu
JL2=Jm+J2+JT2; % [kgm2] Moment setrvačnosti zátěže

OmM2=sqrt(ktor/JM2); % [rad/s] vlastní frekvence pohonu při zablokované zátěži
omM2=OmM2/2/pi; % [Hz] vlastní frekvence pohonu při zablokované zátěži
OmL2=sqrt(ktor/JL2/p^2); % [rad/s] vlastní frekvence zátěže při zablokovaném pohonu
omL2=OmL2/2/pi; % [Hz] vlastní frekvence zátěže při zablokovaném pohonu
OmV2=sqrt((ktor/JM2/p^2)+(ktor/JL2)); % [rad/s] vlastní frekvence volně kmitající soustavy
omv2=OmV2/2/pi; % [Hz] vlastní frekvence volně kmitající soustavy

% Verifikační výpočet pro jednohmotovou soustavu
lh0=0.05; % [m] délka pružného hřídele motoru
Dh0=0.024; % [m] průměr hřídele motoru
kh0=(pi*Dh0^4*G)/(32*lh0); % [Nm/rad] Tuhost hřídele rotoru
JL0=J1+JT1; % [kgm2] Moment setrvačnosti setrvačnicku

OmL0=sqrt(kh0/JL0); % [rad/s] Antirezonanční frekvence setrvačnicku
omL0=OmL0/2/pi; % [Hz] Antirezonanční frekvence setrvačnicku
```

## Příloha č. 3 Protokol z laboratorního měření

### *Řízení polohy a rychlosti jednohmotové mechanické soustavy*

Akademický rok:

Měřil a vypracoval:

Datum měření:

## Úkoly pro měření

- 1) Sestavte mechanickou soustavu výukového zařízení do konfigurace pro danou laboratorní úlohu
- 2) Nakreslete blokové schéma polohové regulace jednohmotové mechanické soustavy
- 3) Naladte parametry rychlostního regulátoru podle měřené odezvy rychlosti na signál skoku rychlosti zavedený na vstup rychlostního regulátoru
- 4) Naladte zesílení polohového regulátoru  $K_V$  podle měřené odezvy polohy na rampový signál zavedený na vstup polohového regulátoru
- 5) Změřte následující přenosové charakteristiky:  $\frac{v_{skutečná}}{v_{žádaná}}$ ;  $\frac{v_{skutečná}}{M_{K\ poruchy}}$ ;  $\frac{x_{skutečná}}{x_{žádaná}}$ ;  $\frac{x_{skutečná}}{M_{K\ poruchy}}$
- 6) V závěru zhodnoťte výsledky měření

Blokové schéma rychlostní regulace jednohmotové mechanické soustavy:

# Postup měření

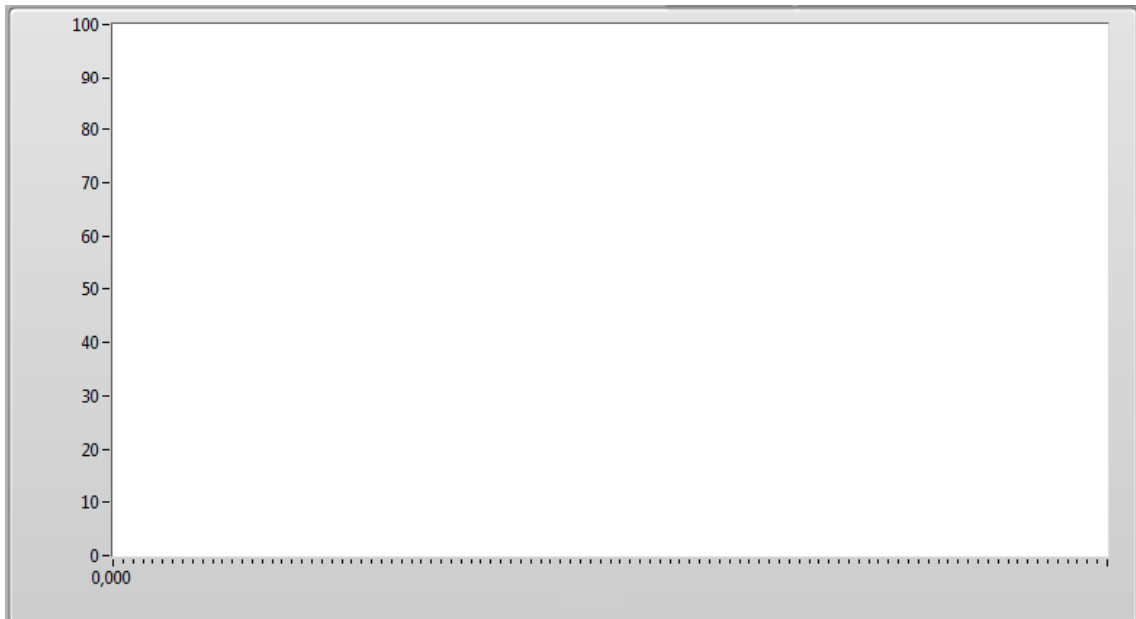
## *Naladění rychlostní regulace*

- Zapněte rychlostní regulaci
- Potlačte vliv integrační složky rychlostního PI-regulátoru nastavením vysoké integrační časové konstanty  $T_N$ , např. 0,5 s
- Nastavte nízké proporcionální zesílení rychlostního PI-regulátoru  $K_P$ , např. 0,1Vs/rad
- V panelu zaškrtněte zobrazování signálů rychlosti a žádaného vstupu
- Zmáčknete tlačítko zobrazovat
- Generujte signálu skoku rychlosti na vstup rychlostní regulace a sledujte odezvu rychlosti motoru na skok rychlosti
- Postupně zvyšujte hodnotu  $K_P$  až na hodnotu  $K_{P\ krit}$ , kdy je dosaženo meze stability odezvy systému na skok rychlosti
- Vypočítejte  $K_P$  dle Ziegler-Nichols:

$$K_P = 0,45 \cdot K_{P\ krit}$$

- Nastavte vypočítané  $K_P$  do rychlostního regulátoru
- Postupně snižujte hodnotu časové integrační konstanty rychlostního regulátoru  $T_N$  až na hodnotu, kdy je dosaženo co nejrychlejšího ustálení na hodnotě žádané rychlosti, přičemž je povoleno překmitnutí žádané hodnoty o maximálně 25%.

Do následujícího grafu zakreslete odezvu rychlosti motoru na skok rychlosti při naladěném rychlostním regulátoru a popište osy grafu včetně jednotek.



Zapište naladěné parametry rychlostního regulátoru včetně jednotek:

## ***Naladění polohové regulace***

- Vypněte Enable
- Vyresetujte polohu
- Přepněte na polohovou regulaci
- Nastavte nízké zesílení  $K_v$ , např.  $0,1 \text{ s}^{-1}$
- V panelu zaškrtněte zobrazování signálů polohy, žádaného vstupu a polohové regulační odchylky
- Zmáčkněte tlačítko zobrazovat
- Generujte signálu rampy polohy na vstup polohového regulátoru a sledujte odezvu motoru na rampový signál polohy a průběh polohové regulační odchylky
- Postupně zvyšujte hodnotu proporcionálního zesílení  $K_v$  až na hodnotu kdy je dosaženo co nejmenšího zpoždění skutečné polohy za žádanou, přičemž na signálu polohové regulační odchylky nesmí být patrné zakmitání

Do následujícího grafu zakreslete odezvu polohy motoru na skok rychlosti při naladěném polohovém regulátoru a průběh polohové regulační odchylky. Popište osy grafu včetně jednotek.



Zapište naladěné parametry polohového regulátoru včetně jednotek:



## Měření přenosových charakteristik

- Měřte následující frekvenční přenosové charakteristiku zavedením signálu ve formě bílého šumu na příslušný vstup regulace. Signál bílého šumu je vždy modulován na signál konstantního offsetu rychlosti.
1. Měření frekvenční přenosové charakteristiky rychlostní odezvy systému na signál žádané rychlosti ve formě bílého šumu

$$\frac{v_{skutečná}}{v_{žádaná}}$$

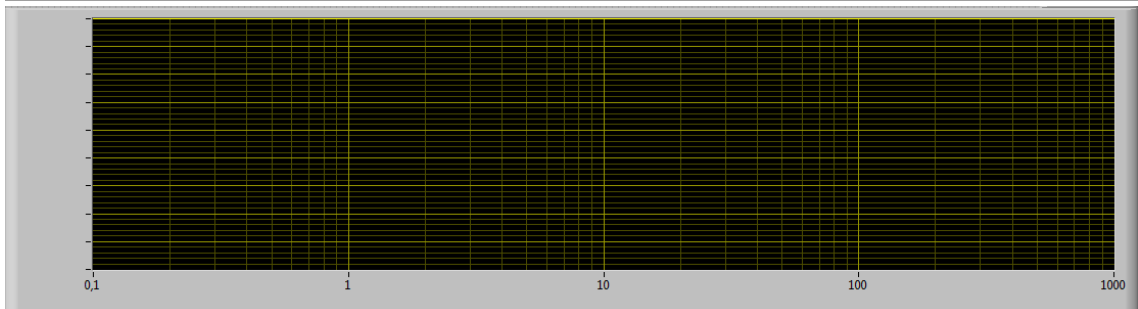
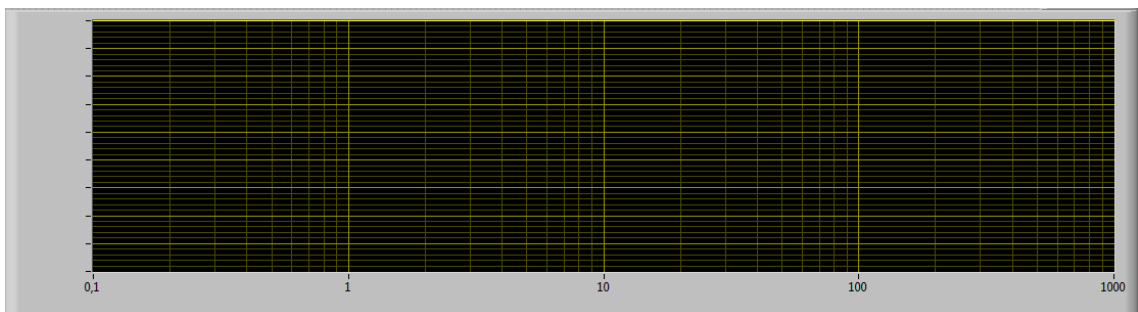
- Přepněte do rychlostní regulace
- V generátoru signálu zvolte: měření přenosu - vskutečna/vzadana
- Vygenerujte vstupní signál s bílým šumem bez zapojeného motoru
- Zkontrolujte vygenerovaný signál. NESMÍ dojít k zastavení nebo reverzaci pohybu motoru.
- Vypněte vizualizaci a zapněte zápis dat
- Pokud se soubor vytvořil, zmáčkněte ENABLE a vygenerujte signál

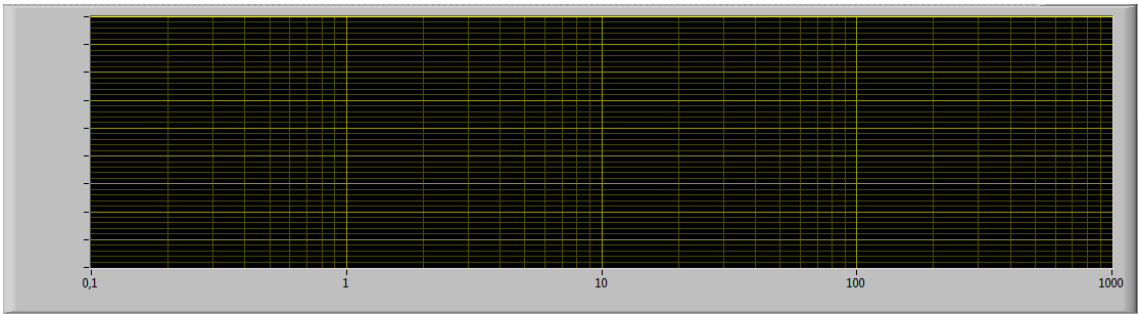
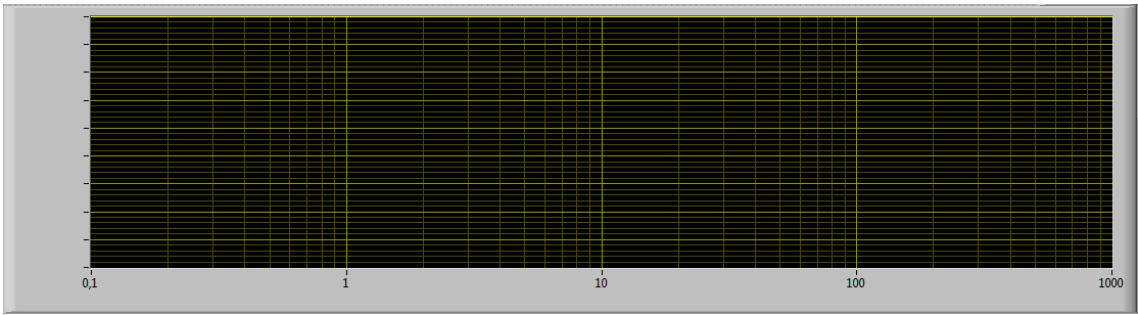
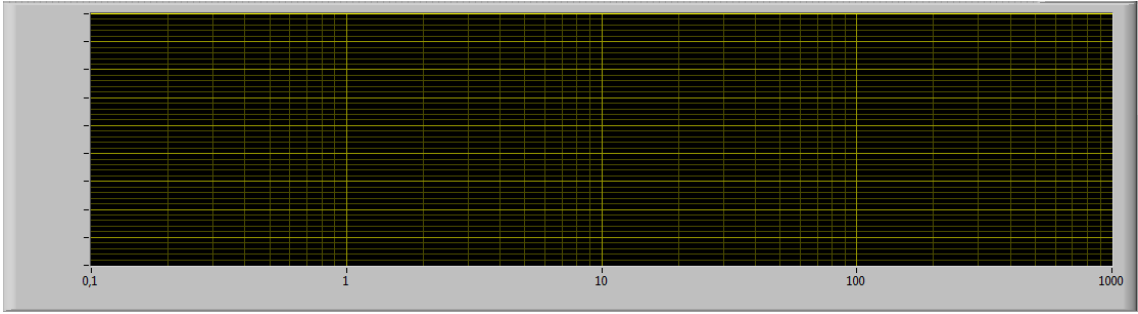
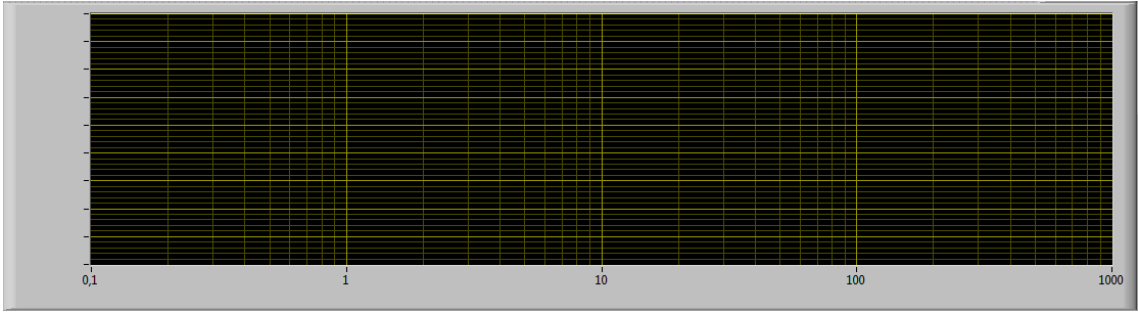
Stejně postupujte pro následující přenosy

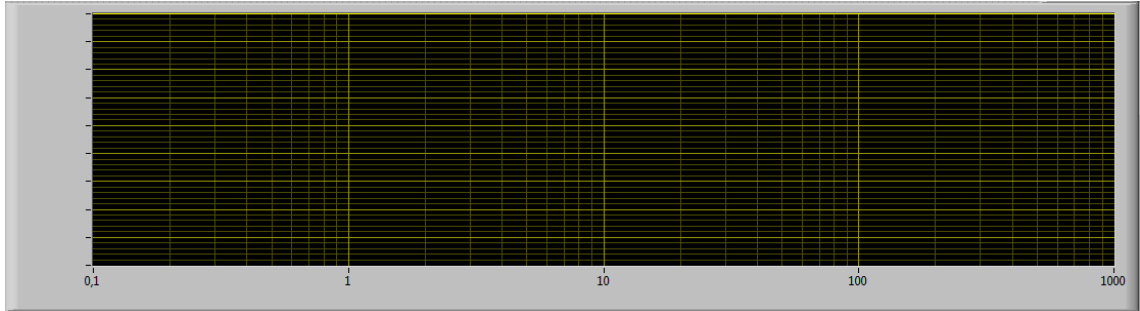
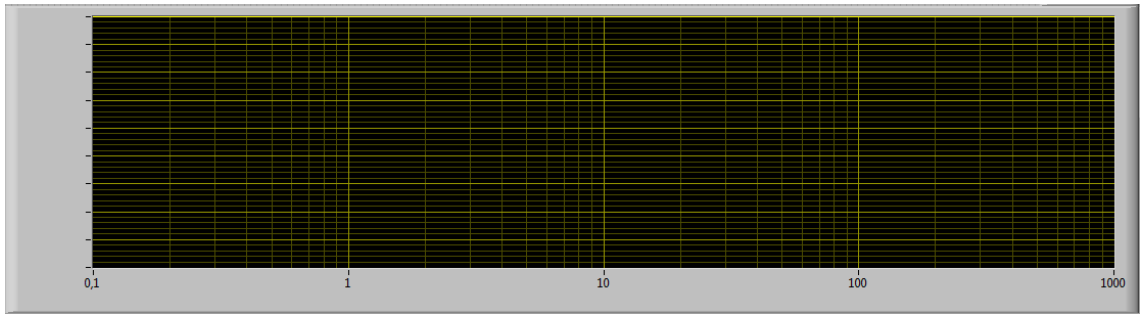
$$\frac{v_{skutečná}}{M_K poruchy}; \frac{x_{skutečná}}{x_{žádaná}}; \frac{x_{skutečná}}{M_K poruchy}$$

## Vyhodnocení přenosových charakteristik

- Zapněte program pro vyhodnocování přenosových charakteristik
- Postupně načítejte jednotlivé soubory s naměřenými daty přenosových charakteristik a vykreslujte Bodeho diagramy
- Do následujících slepých grafů překreslete průběhy jednotlivých přenosů. Popište osy včetně jednotek







**Závěr**

## **Příloha č. 4 Protokol z laboratorního měření**

### *Řízení polohy a rychlosti jednohmotové mechanické soustavy s vloženým poddajným členem*

Akademický rok:

Měřil a vypracoval:

Datum měření:

## **Úkoly pro měření**

- 7) Sestavte mechanickou soustavu výukového zařízení do konfigurace pro danou laboratorní úlohu
- 8) Nakreslete blokové schéma PI regulátoru a jeho frekvenční charakteristiku
- 9) Naladte parametry rychlostního regulátoru podle měřené odezvy rychlosti na signál skoku rychlosti zavedený na vstup rychlostního regulátoru
- 10) Změřte následující přenosové charakteristiky:  $\frac{v_{skutečná}}{v_{žádaná}}$ ;  $\frac{v_{skutečná}}{M_K poruchy}$
- 11) V závěru zhodnoťte výsledky měření

Blokové schéma PI regulátoru a jeho frekvenční charakteristika

# Postup měření

## *Naladění rychlostní regulace*

- Zapněte rychlostní regulaci
- Potlačte vliv integrační složky rychlostního PI-regulátoru nastavením vysoké integrační časové konstanty  $T_N$ , např. 0,5 s
- Nastavte nízké proporcionální zesílení rychlostního PI-regulátoru  $K_P$ , např. 0,1Vs/rad
- V panelu zaškrtněte zobrazování signálů rychlosti a žádaného vstupu
- Zmáčkněte tlačítko zobrazovat
- Generujte signálu skoku rychlosti na vstup rychlostní regulace a sledujte odezvu rychlosti motoru na skok rychlosti
- Postupně zvyšujte hodnotu  $K_P$  až na hodnotu  $K_{P\ krit}$ , kdy je dosaženo meze stability odezvy systému na skok rychlosti
- Vypočítejte  $K_P$  dle Ziegler-Nichols:

$$K_P = 0,45 \cdot K_{P\ krit}$$

- Nastavte vypočítané  $K_P$  do rychlostního regulátoru
- Postupně snižujte hodnotu časové integrační konstanty rychlostního regulátoru  $T_N$  až na hodnotu, kdy je dosaženo co nejrychlejšího ustálení na hodnotě žádané rychlosti, přičemž je povoleno překmitnutí žádané hodnoty o maximálně 25%.

Do následujícího grafu zakreslete odezvu rychlosti motoru na skok rychlosti při naladěném rychlostním regulátoru a popište osy grafu včetně jednotek.



Zapište naladěné parametry rychlostního regulátoru včetně jednotek:

## **Měření přenosových charakteristik**

- Měřte následující frekvenční přenosové charakteristiku zavedením signálu ve formě bílého šumu na příslušný vstup regulace. Signál bílého šumu je vždy modulován na signál konstantního offsetu rychlosti.
2. Měření frekvenční přenosové charakteristiky rychlostní odezvy systému na signál žádané rychlosti ve formě bílého šumu

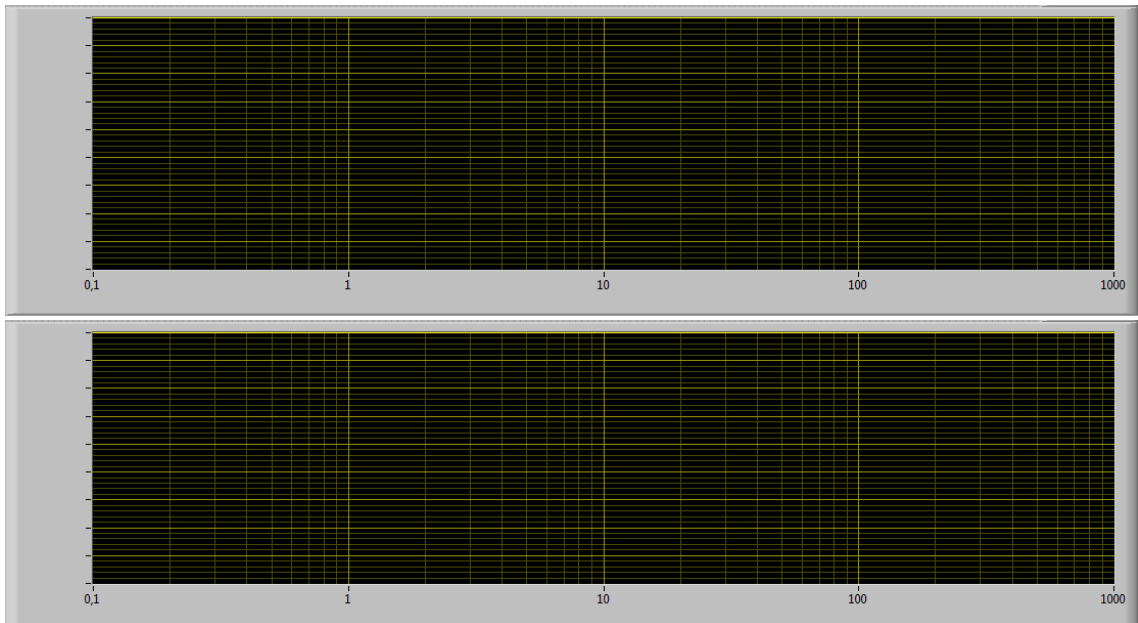
$$\frac{v_{skutečná}}{v_{žádaná}}$$

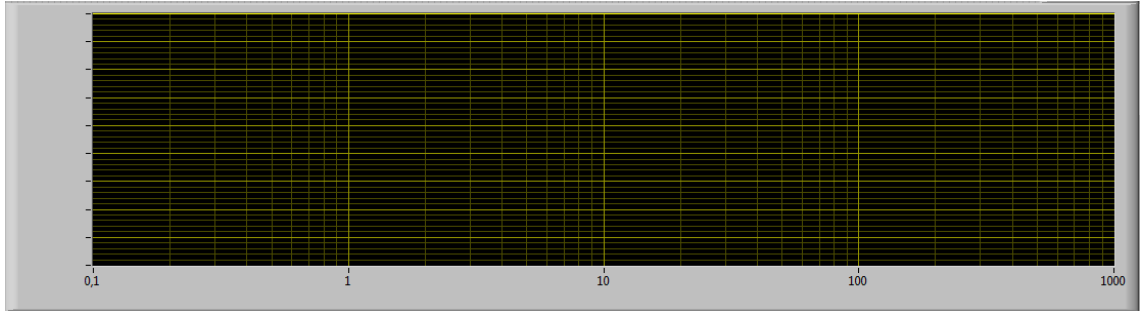
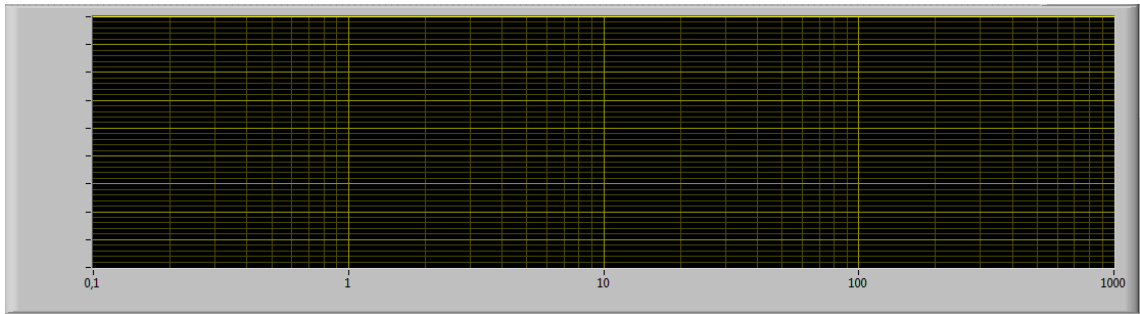
- Přepněte do rychlostní regulace
- V generátoru signálu zvolte: měření přenosu - vskutečna/vzadana
- Vygenerujte vstupní signál s bílým šumem bez zapojeného motoru
- Zkontrolujte vygenerovaný signál. NESMÍ dojít k zastavení nebo reverzaci pohybu motoru.
- Vypněte vizualizaci a zapněte zápis dat
- Pokud se soubor vytvořil, zmáčkněte ENABLE a vygenerujte signál

Stejně postupujte pro přenos  $\frac{v_{skutečná}}{M_K poruchy}$

## **Vyhodnocení přenosových charakteristik**

- Zapněte program pro vyhodnocování přenosových charakteristik
- Postupně načítejte jednotlivé soubory s naměřenými daty přenosových charakteristik a vykreslujte Bodeho diagramy
- Do následujících slepých grafů překreslete průběhy jednotlivých přenosů. Popište osy včetně jednotek





**Závěr**

## Příloha č. 5 Protokol z laboratorního měření

### Řízení polohy a rychlosti dvoumotové mechanické soustavy s vloženým převodem

Akademický rok:

Měřil a vypracoval:

Datum měření:

## Úkoly pro měření

- 12) Sestavte mechanickou soustavu výukového zařízení do konfigurace pro danou laboratorní úlohu
- 13) Nakreslete blokové schéma polohové regulace s přímým a nepřímým odměřováním. Naznačte odvození přenosové matce a určete význam jednotlivých přenosů
- 14) Naladte parametry rychlostního regulátoru podle měřené odezvy rychlosti na signál skoku rychlosti zavedený na vstup rychlostního regulátoru
- 15) Naladte zesílení polohového regulátoru  $K_V$  podle měřené odezvy polohy na rampový signál zavedený na vstup polohového regulátoru
- 16) Změřte následující přenosové charakteristiky:  $\frac{v_{skutečná}}{v_{žádaná}}$ ;  $\frac{v_{skutečná}}{M_K poruchy}$ ;  $\frac{x_{skutečná}}{x_{žádaná}}$ ;  $\frac{x_{skutečná}}{M_K poruchy}$
- 17) V závěru zhodnoťte výsledky měření

Blokové schéma polohové regulace s přímým a nepřímým odměřováním:

Naznačení odvození přenosové matice



# Postup měření

## *Naladění rychlostní regulace*

- Zapněte rychlostní regulaci
- Potlačte vliv integrační složky rychlostního PI-regulátoru nastavením vysoké integrační časové konstanty  $T_N$ , např. 0,5 s
- Nastavte nízké proporcionální zesílení rychlostního PI-regulátoru  $K_P$ , např. 0,1Vs/rad
- V panelu zaškrtněte zobrazování signálů rychlosti a žádaného vstupu
- Zmáčkněte tlačítko zobrazovat
- Generujte signálu skoku rychlosti na vstup rychlostní regulace a sledujte odezvu rychlosti motoru na skok rychlosti
- Postupně zvyšujte hodnotu  $K_P$  až na hodnotu  $K_{P\ krit}$ , kdy je dosaženo meze stability odezvy systému na skok rychlosti
- Vypočítejte  $K_P$  dle Ziegler-Nichols:

$$K_P = 0,45 \cdot K_{P\ krit}$$

- Nastavte vypočítané  $K_P$  do rychlostního regulátoru
- Postupně snižujte hodnotu časové integrační konstanty rychlostního regulátoru  $T_N$  až na hodnotu, kdy je dosaženo co nejrychlejšího ustálení na hodnotě žádané rychlosti, přičemž je povoleno překmitnutí žádané hodnoty o maximálně 25%.

Do následujícího grafu zakreslete odezvu rychlosti motoru na skok rychlosti při naladěném rychlostním regulátoru a popište osy grafu včetně jednotek.



Zapište naladěné parametry rychlostního regulátoru včetně jednotek:

## ***Naladění polohové regulace***

- Vypněte Enable
- Vyresetujte polohu
- Přepněte na polohovou regulaci s přímým odměřováním
- Nastavte nízké zesílení  $K_v$ , např.  $0,1 \text{ s}^{-1}$
- V panelu zaškrtněte zobrazování signálů polohy, žádaného vstupu a polohové regulační odchylky
- Zmáčkněte tlačítko zobrazovat
- Generujte signálu rampy polohy na vstup polohového regulátoru a sledujte odezvu motoru na rampový signál polohy a průběh polohové regulační odchylky
- Postupně zvyšujte hodnotu proporcionálního zesílení  $K_v$  až na hodnotu kdy je dosaženo co nejmenšího zpoždění skutečné polohy za žádanou, přičemž na signálu polohové regulační odchylky nesmí být patrné zakmitání
- Ladění polohové regulátoru zopakujte pro nepřímé odměřování

Do následujícího grafu zakreslete odezvu polohy motoru na skok rychlosti při naladěném polohovém regulátoru a průběh polohové regulační odchylky. Pro regulaci s přímým i nepřímým odměřováním. Popište osy grafu včetně jednotek.



Zapište naladěné parametry polohového regulátoru včetně jednotek:

### **Měření přenosových charakteristik**

- Měřte následující frekvenční přenosové charakteristiku zavedením signálu ve formě bílého šumu na příslušný vstup regulace. Signál bílého šumu je vždy modulován na signál konstantního offsetu rychlosti.
3. Měření frekvenční přenosové charakteristiky rychlostní odezvy systému na signál žádané rychlosti ve formě bílého šumu

$$\frac{v_{skutečná}}{v_{žádaná}}$$

- Přepněte do rychlostní regulace
- V generátoru signálu zvolte: měření přenosu - vskutecna/vzadana
- Vygenerujte vstupní signál s bílým šumem bez zapojeného motoru
- Zkontrolujte vygenerovaný signál. NESMÍ dojít k zastavení nebo reverzaci pohybu motoru.
- Vypněte vizualizaci a zapněte zápis dat
- Pokud se soubor vytvořil, zmáčkněte ENABLE a vygenerujte signál

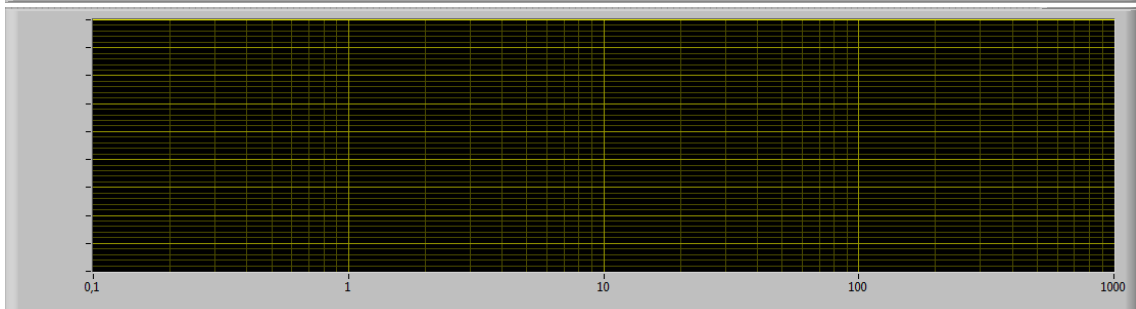
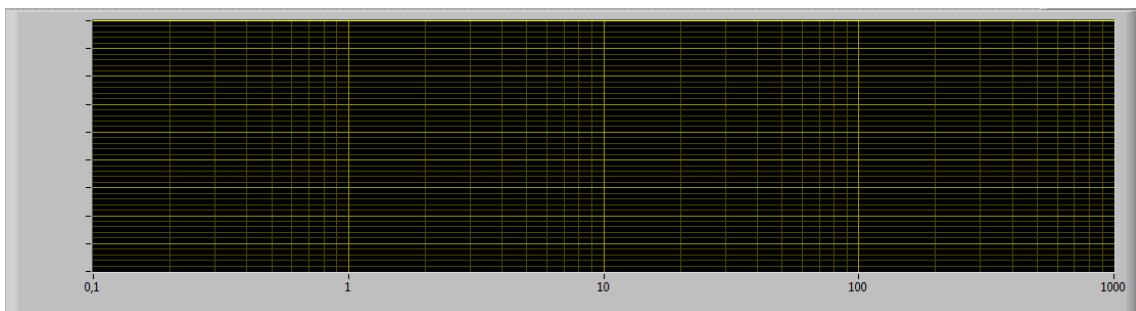
Stejně postupujte pro následující přenosy

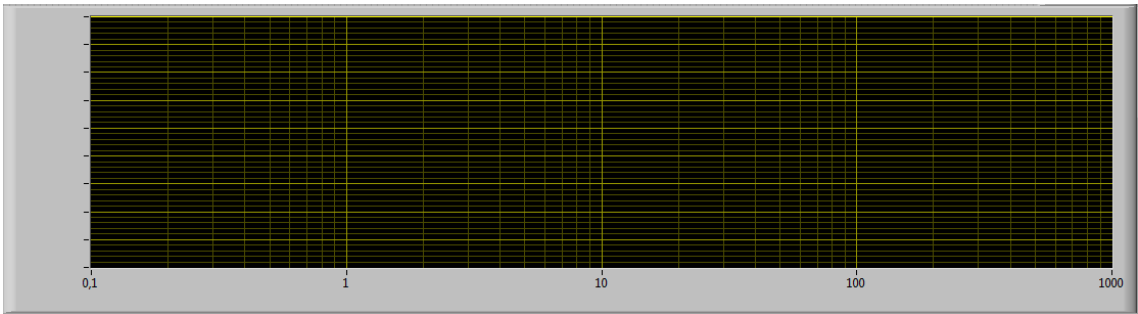
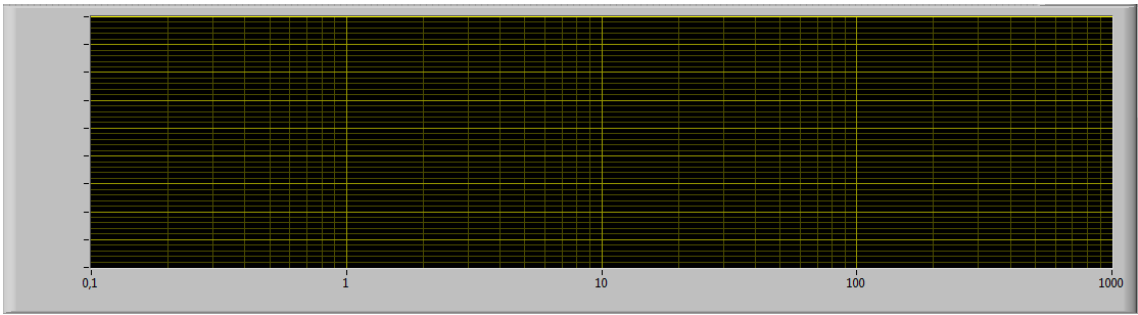
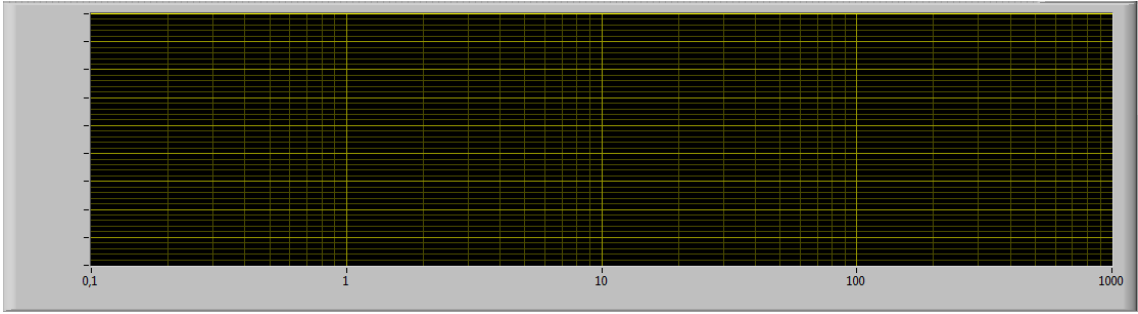
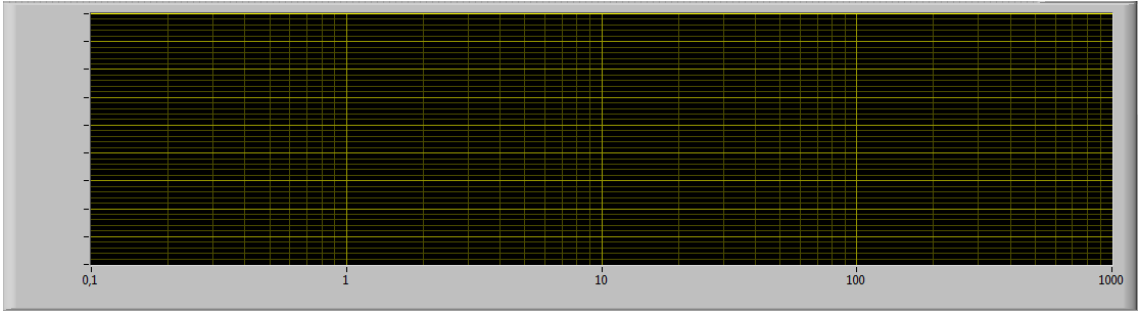
$$\frac{v_{skutečná}}{M_K poruchy}, \frac{x_{skutečná}}{x_{žádaná}}, \frac{x_{skutečná}}{M_K poruchy}$$

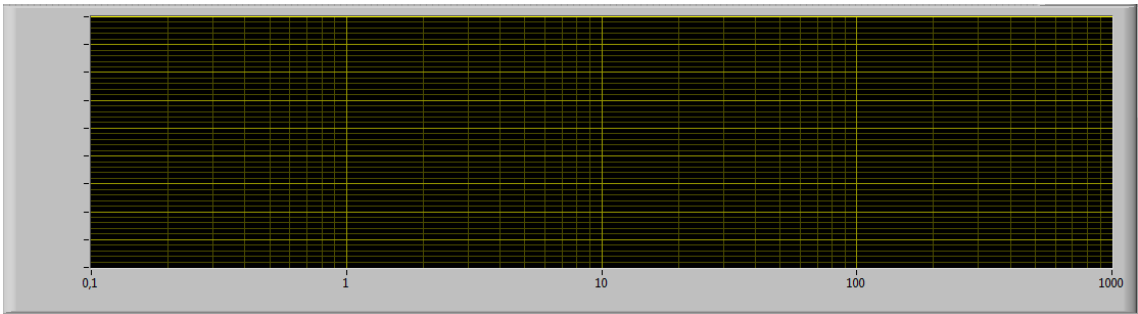
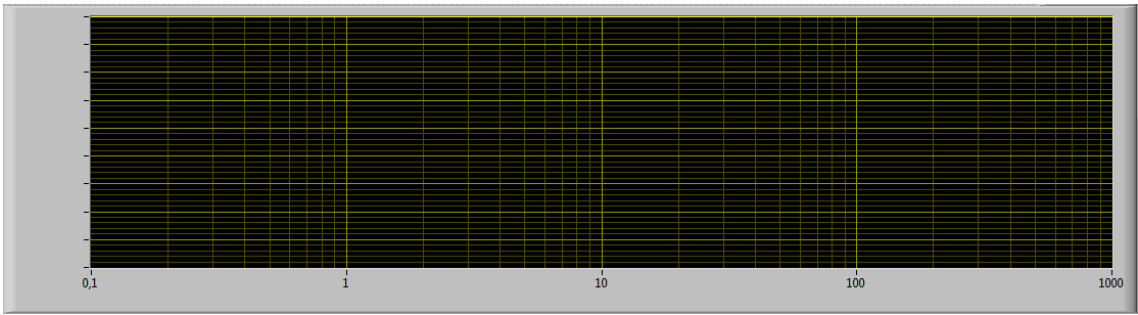
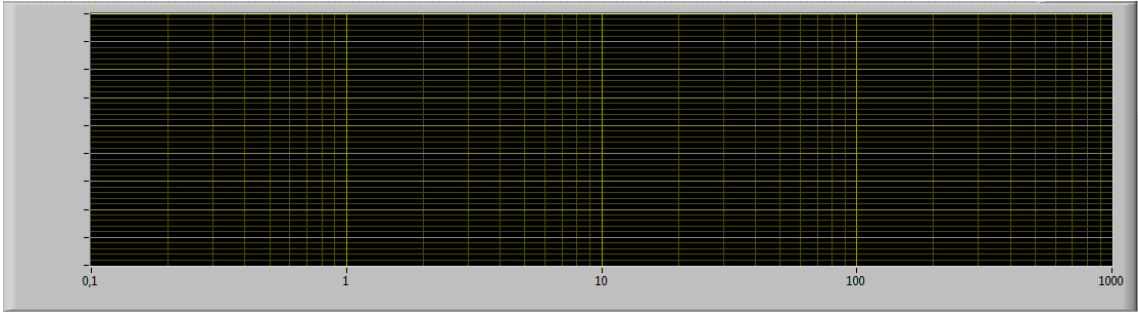
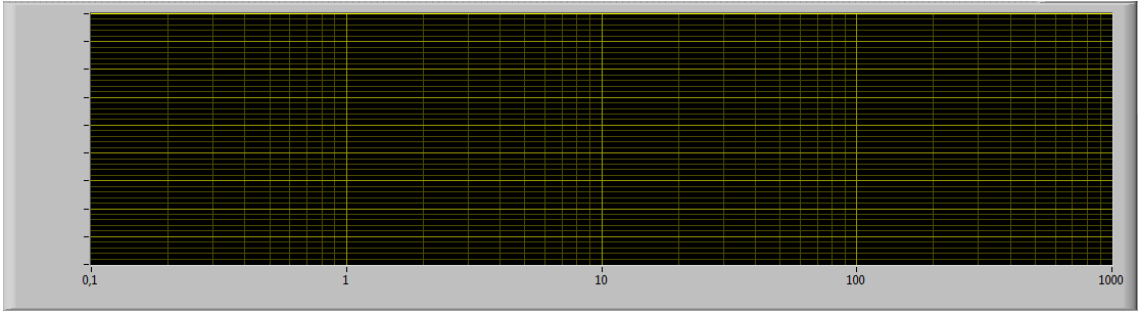
Přenosy polohové regulace měřte jak s přímým tak nepřímým odměřováním

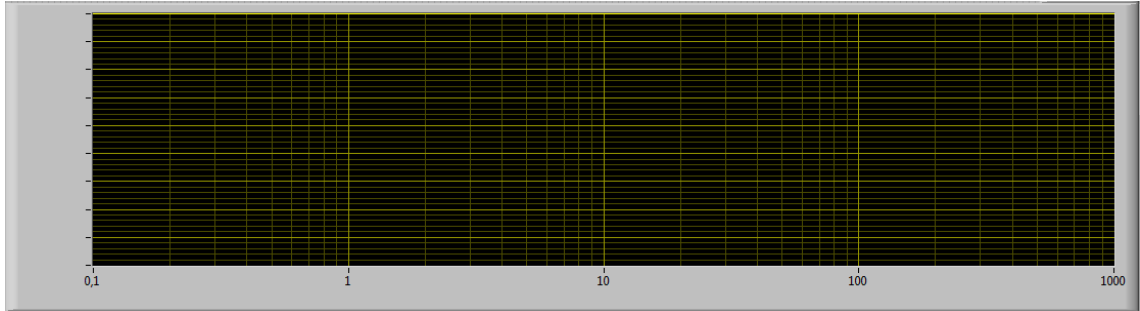
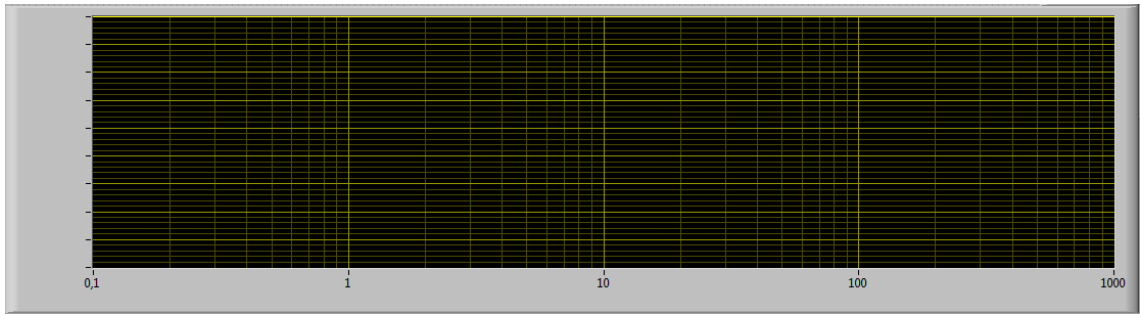
### **Vyhodnocení přenosových charakteristik**

- Zapněte program pro vyhodnocování přenosových charakteristik
- Postupně načítejte jednotlivé soubory s naměřenými daty přenosových charakteristik a vykreslujte Bodeho diagramy
- Do následujících slepých grafů překreslete průběhy jednotlivých přenosů. Popište osy včetně jednotek





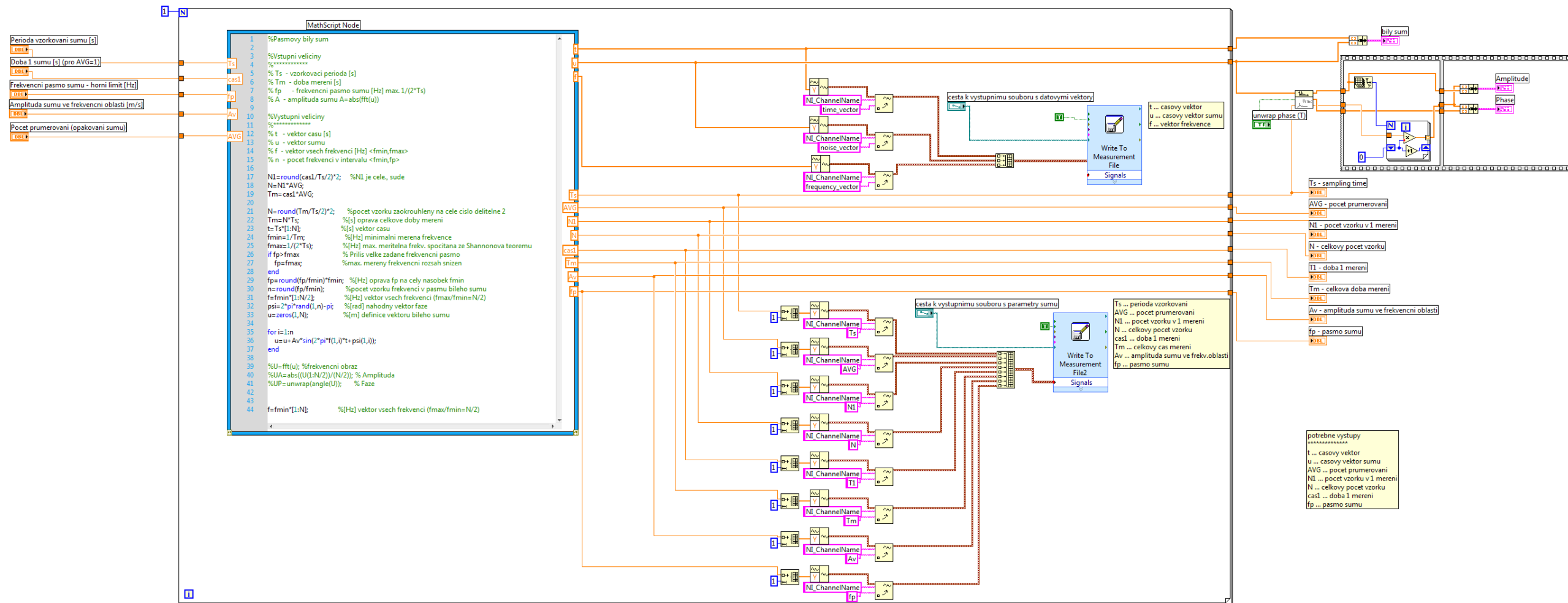




**Závěr**

# Příloha č. 6 Zdrojový kód generátoru bílého šumu

autor: Ing. Lukáš Novotný, Ph.D.



# Příloha č. 7 Ovládací panel generátoru bílého šumu

autor: Ing. Lukáš Novotný, Ph.D.

cesta k vystupnimu souboru s datovymi vektory  
/C/data/mereni/bsum\_data\_2s\_5x.tdms

cesta k vystupnimu souboru s parametry sumu  
/C/data/mereni/bsum\_parametry\_2s\_5x.tdms

Pocet prumerovani (opakovani sumu)  
5

Doba 1 sumu [s] (pro AVG=1)  
2

Perioda vzorkovani sumu [s]  
0,0005

Frekvencni pasmo sumu - horni limit [Hz]  
200

Amplituda sumu ve frekvencni oblasti [m/s]  
1

Ts - sampling time  
0

T1 - doba 1 mereni  
0

AVG - pocet prumerovani  
0

Tm - celkova doba mereni  
0

N1 - pocet vzorku v 1 mereni  
0

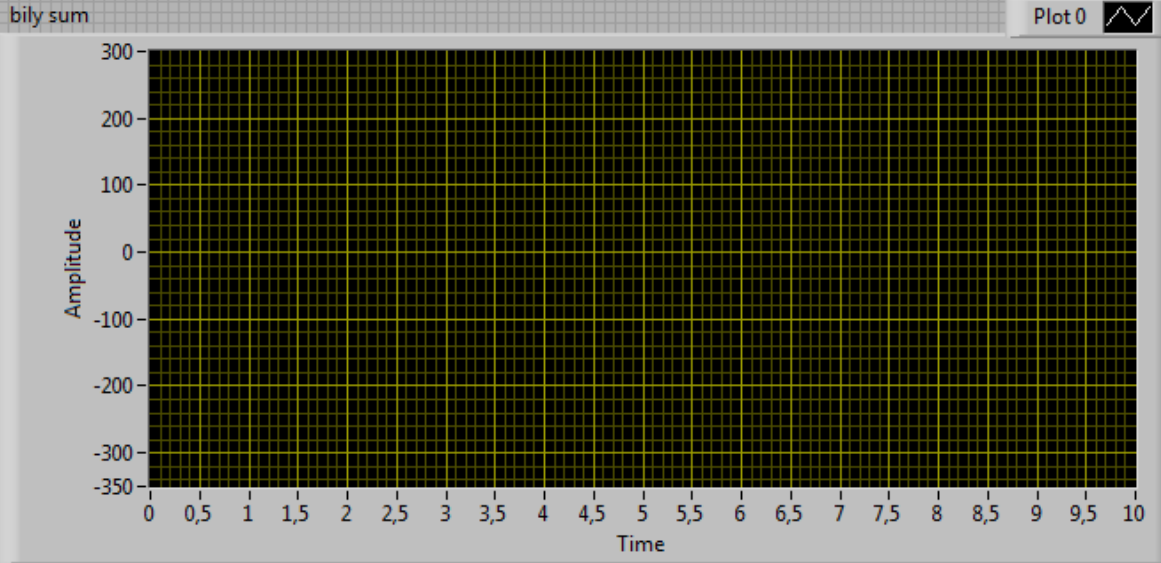
Av - amplituda sumu ve frekvencni oblasti  
0

N - celkovy pocet vzorku  
0

fp - pasmo sumu  
0

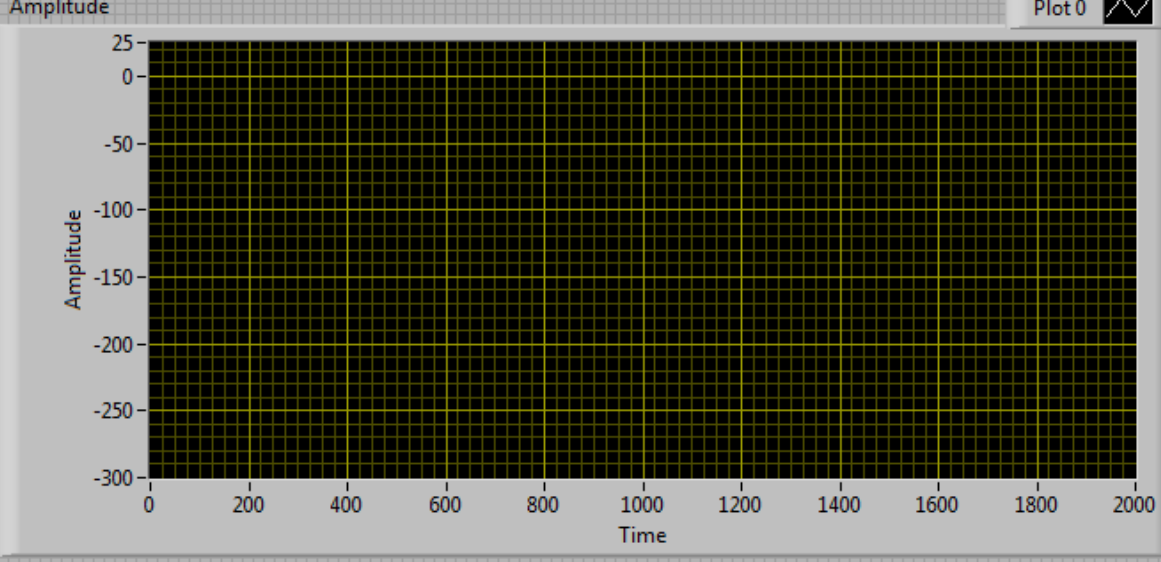
unwrap phase (T)  
 ON

bily sum  
Plot 0



Amplitude

Plot 0

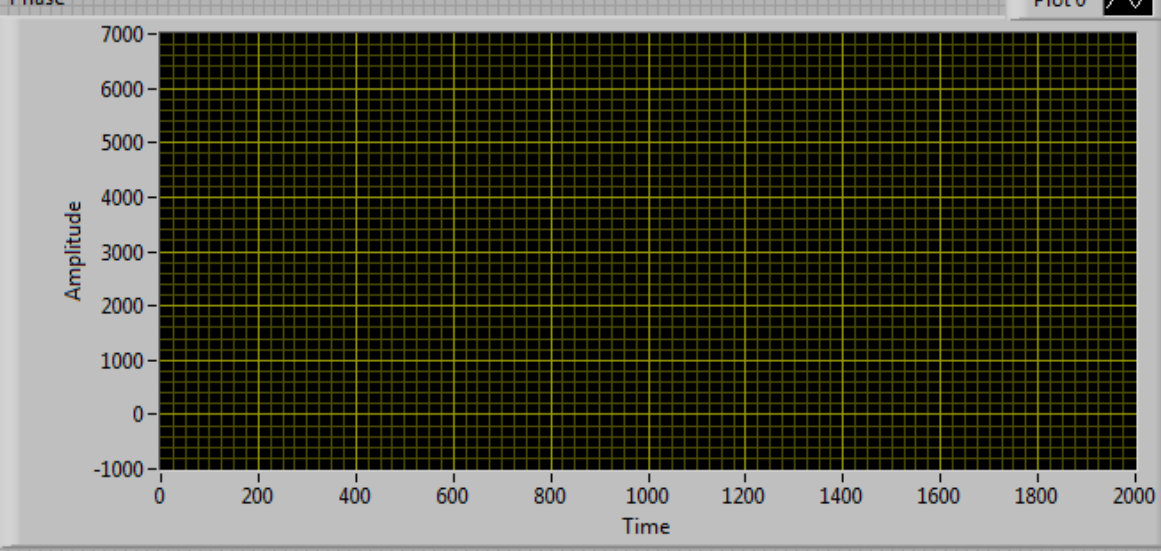


Amplitude

Plot 0

Phase

Plot 0



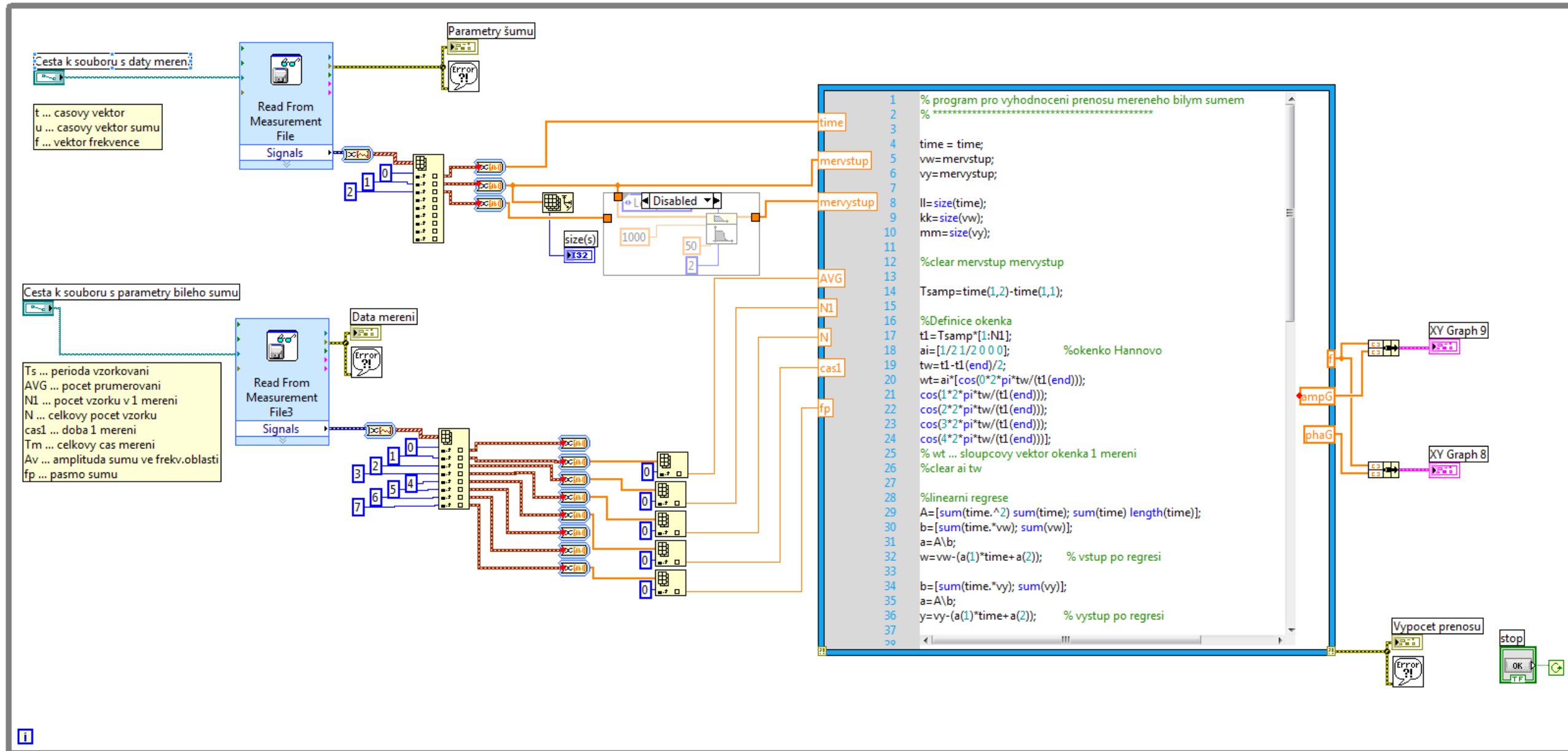
Amplitude

Time



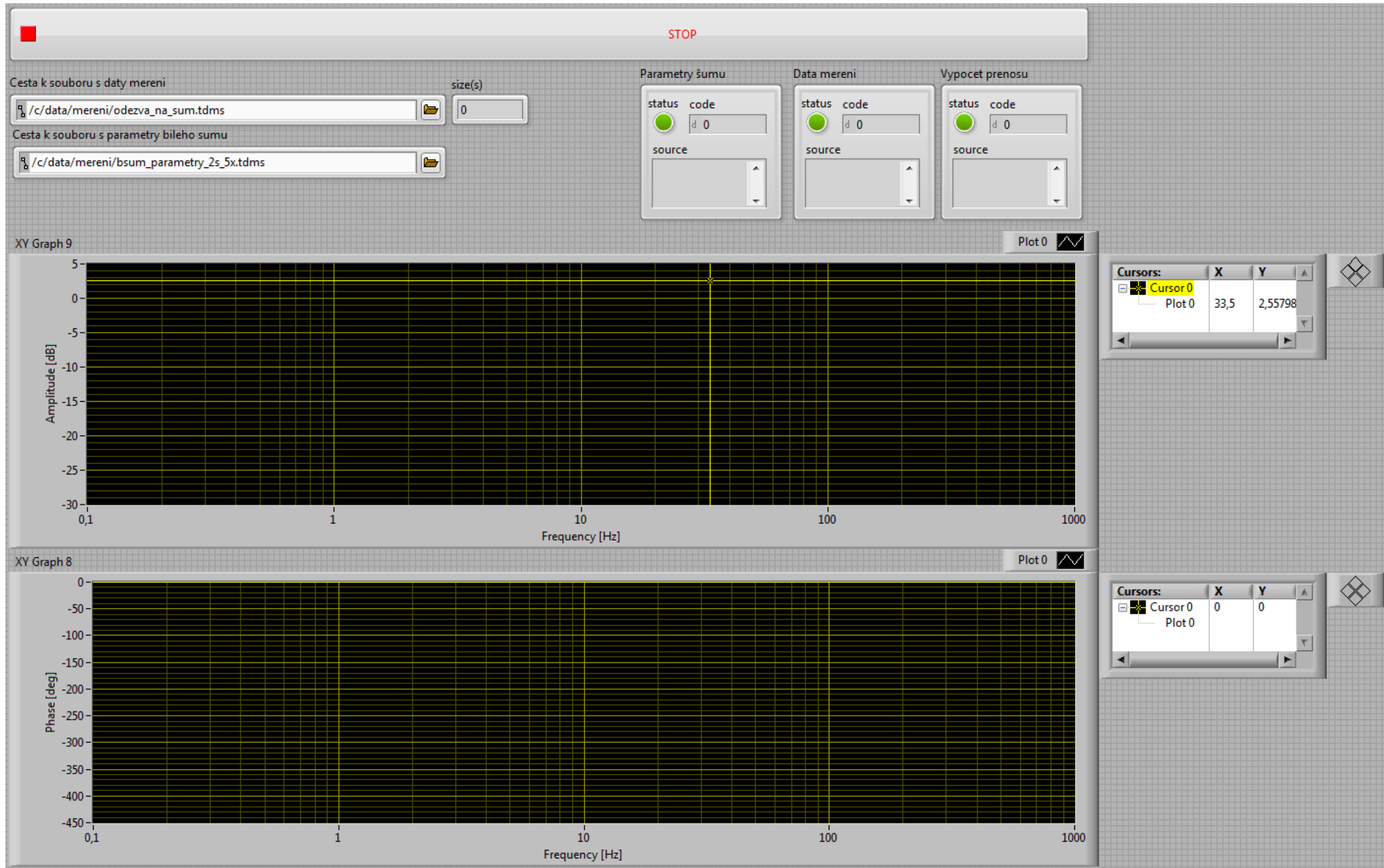
# Příloha č. 8 Zdrojový kód pro vyhodnocení přenosových charakteristik

autor: Ing. Lukáš Novotný, Ph.D.



# Příloha č. 9 Zdrojový kód pro vyhodnocení přenosových charakteristik

autor: Ing. Lukáš Novotný, Ph.D.



## CD médium

