

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MECHANIKY, BIOMECHANIKY A MECHATRONIKY

Odbor mechaniky a mechatroniky



## **Bakalářská práce**

**Výukový demonstrátor pro identifikaci parametrů a řízení poddajné soustavy**

**Praha, 2016**

**David Písek**



## Anotační list

<b>Jméno autora:</b>	<b>David Písek</b>
<b>Název bakalářské práce:</b>	<b>Výukový demonstrátor pro identifikaci parametrů a řízení poddajné soustavy</b>
<b>Anglický název:</b>	<b>Educational demonstrator for parameter identification and control of flexible system</b>
<b>Akademický rok:</b>	<b>2015/2016</b>
<b>Obor studia:</b>	<b>Teoretický základ strojního inženýrství</b>
<b>Ústav/odbor:</b>	<b>Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Odbor Mechaniky a mechatroniky</b>
<b>Vedoucí bakalářské práce:</b>	<b>Ing. Petr Beneš, Ph.D.</b>
<b>Bibliografické údaje:</b>	<b>Počet stran: 37 Počet obrázků: 27 Počet příloh: 1</b>
<b>Klíčová slova:</b>	<b>Demonstrátor, identifikace parametrů, poddajná soustava, Arduino, Matlab, Simulink, inkrementální čidlo</b>
<b>Keywords:</b>	<b>Demonstrator, parameter identification, pliable system, Arduino, Matlab, Simulink, incremental encoder</b>
<b>Anotace:</b>	<b>Práce se zabývá návrhem a přípravou výukového demonstrátoru poddajné soustavy k ukázce nastavení PID-regulátoru. Celý systém je řízen deskou Arduino Mega 2560 z prostředí Matlab/Simulink. Dále je na základě měření provedena identifikace parametrů poddajné soustavy.</b>
<b>Abstract:</b>	<b>The thesis deals with the design and preparation of the educational demonstrator flexible system to showcase the PID-controller settings. The entire system is controlled by a board Arduino Mega 2560 from Matlab/Simulink. The parameters of flexible system are identified by measuring.</b>

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze, dne .....

.....  
Podpis

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Benešovi za vedení, pomoc a podporu při řešení problémů s realizací této práce.

Dále děkuji rodičům za podporu a trpělivost, kterou se mnou měli při tvorbě bakalářské práce.

# Obsah

Anotační list.....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah .....	6
Seznam obrázků .....	7
1. Úvod .....	8
2. Cíle práce.....	8
3. Mechanika poddajných soustav.....	9
3.1. Volný tlumený kmitavý pohyb .....	9
3.2. Lineární tlumení .....	9
3.3. Experimentální identifikace modálních parametrů kmitavé soustavy.....	13
4. Analogové řízení.....	17
4.1. Regulátory typu P-I-D .....	18
4.2. P-regulátor .....	18
4.3. I-regulátor.....	19
4.4. PI-regulátor .....	19
4.5. PD-regulátor .....	20
5. Inkrementální čidlo .....	21
6. Matlab/Simulink.....	23
7. Simulační model .....	23
7.1. Simulace .....	26
7.2. Zpětnovazební řízení .....	27
8. Dvoumotový demonstrátor.....	29
8.1. Konstrukce.....	29
8.1.1. Arduino.....	30
8.1.2. Arduino Motor Shield R3.....	31
8.1.3. Motor Maxon 244746 .....	32
8.1.4. Inkrementální čidlo LARM IRC 327.....	32
8.2. Zapojení.....	33
8.3. Měření .....	33
9. Závěr.....	36
10. Literatura.....	37

## Seznam obrázků

Obr. 1 – Volné kmitání tlumeného systému.....	9
Obr. 2 – Zkušební stolice.....	13
Obr. 3 – Schéma experimentálního modelu.....	13
Obr. 4 – Chirp signal.....	14
Obr. 5 – Závislosti amplitudy výchylky na čase.....	14
Obr. 6 – Frekvenční jednostranné spektrum.....	16
Obr. 7 – Regulační obvod – převzato z [2].....	17
Obr. 8 – Statická charakteristika P-regulátoru – převzato z [2].....	18
Obr. 9 – Přejchodová charakteristika PD-regulátoru – převzato z [2].....	20
Obr. 10 – Princip inkrementálního čidla – převzato z [10].....	21
Obr. 11 – Pulsní disky – převzato z [9].....	22
Obr. 12 – Vyhodnocení signálu – převzato z [8].....	22
Obr. 13 – Model dvoumotové soustavy.....	23
Obr. 14 – Silové účinky.....	24
Obr. 15 – Simulační model.....	25
Obr. 16 – Funkce fminsearch.....	26
Obr. 17 – Model řízení soustavy.....	27
Obr. 18 – Mez stability.....	28
Obr. 19 – Výsledný průběh.....	28
Obr. 20 – Dvoumotový demonstrátor.....	29
Obr. 21 – Deska Arduino Mega 2560 – převzato z [3].....	30
Obr. 22 – Adafruit Motor Shield – převzato z [6].....	31
Obr. 23 – Konektor čidla – převzato z [7].....	32
Obr. 24 – Převodník z analogového na digitální signál.....	32
Obr. 25 – Frekvenční jednostranné spektrum.....	33
Obr. 26 – Schéma řízení.....	34
Obr. 27 – Graf závislosti polohy na čase.....	35

## 1. Úvod

Svět kolem nás je plný mechanických systémů – strojů, robotů apod., které jsou vesměs poddajné. Pro jejich dobrou kontrolu a řízení je třeba znát jednak jejich parametry a jednak je umět řídit dle našich požadavků. To vše by se měl student naučit ve škole, proto je vhodné připravit názornou úlohu vhodnou k demonstraci.

Nejprve se seznámíme s programovacím prostředím Matlab/Simulink. Vysvětlíme si jak postupovat při vytvoření simulačního modelu, jeho možnosti pro identifikaci nebo řízení poddajných soustav. Navrhne a sestavíme výukový dvoumotový demonstrátor poddajné soustavy, vhodný pro praktické předvedení zpětnovazebního řízení. K tomu je nutné seznámení s regulátory, jejich výhodami, nevýhodami a možnostmi nastavení, dále s řízením stejnosměrného motoru, funkcí inkrementálního čidla a s metodami zpracování naměřených dat. Na závěr se budeme zabývat identifikací parametrů z experimentálního měření.

## 2. Cíle práce

Cílem této práce je názorně přiblížit chování a řízení poddajných soustav na připraveném demonstrátoru za pomoci programovacího prostředí Matlab/Simulink a platformy Arduino.

Cíle práce byli shrnuty do těchto bodů:

- Sestavte simulační dynamický model dvoumotové poddajné soustavy.
- Seznamte se s ovládáním platformy Arduino z prostředí Matlab/Simulink.
- Sestavte dvoumotový demonstrátor.
- Připravte programy pro experimentální identifikaci parametrů demonstrátoru a jeho řízení.



### 3. Mechanika poddajných soustav

Soustava těles je seskupení alespoň tří těles včetně základního rámu, které jsou vzájemně spojeny vazbami. Vzhledem k tomu, že uvažujeme reálné soustavy, musíme je pokládat za poddajné.

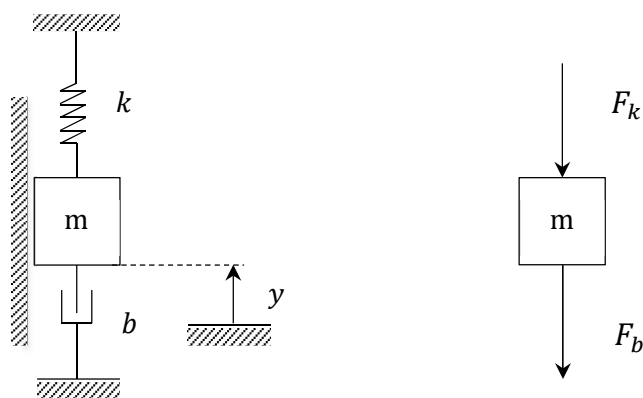
Mechanika soustav těles řeší pohyb hmotných soustav těles a silových soustav, které tento pohyb způsobují nebo při něm vznikají. Umožňuje tak optimalizaci celé řady strojů a strojních zařízení. Jde především o vytvoření mechanického a matematického modelu daného problému a jeho řešení.

#### 3.1. Volný tlumený kmitavý pohyb

U reálného pružného elementu dochází k disipaci energie. V důsledku úbytku energie se volné kmity tlumí. Tlumení rozlišujeme na vnitřní, které lze ještě dělit na materiálové a konstrukční, a na vnější způsobené třením. Pro popis těchto procesů se využívá mnoha modelů. V našem případě si vystačíme pouze s modelem lineárního tlumení.

#### 3.2. Lineární tlumení

Abychom mohli popsat volně kmitavou tlumenou soustavu, musíme si nejprve zavést potřebné parametry. Pro zjednodušení uvažujme volné kmity lineárně tlumeného systému podle Obr. 1. Výsledné rovnice odpovídají analogicky pro rotační pohyb.



Obr. 1 – Volné kmitání tlumeného systému

Počáteční podmínky jsou  $t = 0, y = y_0, \dot{y} = v_0$ . Tělíčko je vedeno po dokonale hladké svislé ploše. Výchylka  $y$  je měřena od statické rovnovážné polohy, takže neuvažujeme vliv gravitace. V obecné poloze, předpokládané na obrázku, působí na uvolněné tělíčko síla ideální pružiny  $F_k$  a tlumící síla  $F_b$ .

Vlastní pohybová rovnice získaná Newtonovou metodou je

$$ma = -F_b - F_k, \quad (3.1)$$

kde

$$a = \ddot{y}, \quad F_b = b\dot{y}, \quad F_k = ky. \quad (3.2)$$

Po dosazení vztahů (3.2) do rovnice (3.1) získáme vztah

$$m\ddot{y} = -b\dot{y} - ky. \quad (3.3)$$

Převědeme prvky na jednu stranu

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = 0 \quad (3.4)$$

a vydělíme hmotností

$$\ddot{y} + \frac{b}{m}\dot{y} + \frac{k}{m}y = 0. \quad (3.5)$$

Dále víme, že lineární diferenciální rovnice druhého řádu pro řešení závislosti výchylky  $y$  na čase  $t$  volného tlumeného kmitání lze zapsat i tímto způsobem

$$\ddot{y} + 2b_r\Omega\dot{y} + \Omega^2y = 0. \quad (3.6)$$

Z porovnáním členů stejného řádu rovnic (3.5) a (3.6) vyplývají následující rovnosti: pro vlastní úhlovou frekvenci  $\Omega$  a pro poměrný útlum  $b_r$ . Pomocí koeficientů členů nultého řádu získáme vyjádření pro vlastní úhlovou frekvenci netlumených kmitů  $\Omega$

$$\Omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (3.7)$$

Zároveň porovnáme členy prvního řádu

$$2b_r\Omega = \frac{b}{m}, \quad (3.8)$$

po úpravě získáme vyjádření pro poměrný útlum  $b_r$

$$b_r = \frac{b}{2\Omega m}. \quad (3.9)$$

Diferenciální rovnice (3.6) je homogenní, tudíž tvar jejího řešení závisí na vlastnostech kořenů charakteristické rovnice, která má tvar

$$\lambda^2 + 2b_r\Omega\lambda + \Omega^2 = 0, \quad (3.10)$$

určíme kořeny rovnice

$$\lambda_{1,2} = -b_r\Omega \pm \Omega\sqrt{b_r^2 - 1}. \quad (3.11)$$

Kořeny mohou být buď reálné (pro  $b_r \geq 1$ ) nebo komplexní (pro  $b_r < 1$ ). V našem případě budeme uvažovat tlumení podkritické, kdy je  $b_r < 1$  a výsledný pohyb bude kmitavý. Oba kořeny charakteristické rovnice jsou tedy komplexně sdružené. Zapišeme je ve tvaru

$$\lambda_{1,2} = -b_r\Omega \pm i\Omega_b, \quad (3.12)$$

kde  $\Omega_b$  je vlastní (úhlová) frekvence tlumené soustavy a je rovna

$$\Omega_b = \Omega\sqrt{1 - b_r^2}. \quad (3.13)$$

Řešení diferenciální rovnice lze pak upravit do tvaru

$$y = e^{-b_r\Omega t} [A\cos(\Omega_b t) + B\sin(\Omega_b t)]. \quad (3.14)$$

Vyjádříme-li poměr výchylek v čase  $t$  a v čase  $(t + nT)$ , kde  $n$  je přirozené číslo a  $T$  je perioda kmitů, dostaneme

$$\begin{aligned} \frac{y(t + nT)}{y(t)} &= \frac{e^{-b_r\Omega(t+nT)} [A\cos(\Omega_b t + n\Omega_b T) + B\sin(\Omega_b t + n\Omega_b T)]}{e^{-b_r\Omega t} [A\cos(\Omega_b t) + B\sin(\Omega_b t)]} \\ &= \frac{e^{-b_r\Omega(t+nT)} [A\cos(\Omega_b t + n2\pi) + B\sin(\Omega_b t + n2\pi)]}{e^{-b_r\Omega t} [A\cos(\Omega_b t) + B\sin(\Omega_b t)]} = e^{-b_r\Omega nT}. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Přirozený logaritmus tohoto podílu pro  $n = 1$  je

$$\ln \frac{y(t)}{y(t+T)} = b_r\Omega T = \vartheta, \quad (3.16)$$

kde bezrozměrná veličina  $\vartheta$  označuje logaritmický dekrement.

Pomocí  $\vartheta$  můžeme vyjádřit poměrný útlum  $b_r$ , následujícími matematickými úpravami

$$\vartheta = b_r \Omega T = b_r \Omega \frac{2\pi}{\Omega_b} = b_r \Omega \frac{2\pi}{\Omega \sqrt{1 - b_r^2}} = \frac{2\pi b_r}{\sqrt{1 - b_r^2}}, \quad (3.17)$$

$$1 - b_r^2 = \frac{4\pi^2 b_r^2}{\vartheta^2}, \quad (3.18)$$

$$1 = b_r^2 \left( \frac{4\pi^2 + 1}{\vartheta^2} \right), \quad (3.19)$$

$$b_r = \sqrt{\frac{\vartheta^2}{4\pi^2 + \vartheta^2}}. \quad (3.20)$$

Odvodíme i vlastní frekvenci netlumených kmitů  $\Omega$

$$\Omega_b = \Omega \sqrt{1 - b_r^2}, \quad (3.21)$$

$$\Omega^2 = \frac{\Omega_b^2}{1 - b_r^2} = \frac{\Omega_b^2}{1 - \frac{\vartheta^2}{4\pi^2 + \vartheta^2}} = \frac{\Omega_b^2}{\frac{4\pi^2 + \vartheta^2 - \vartheta^2}{4\pi^2 + \vartheta^2}} = \frac{\frac{4\pi^2}{T^2} (4\pi^2 + \vartheta^2)}{4\pi^2} = \frac{4\pi^2 + \vartheta^2}{T^2}, \quad (3.22)$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{4\pi^2 + \vartheta^2}{T^2}}. \quad (3.23)$$

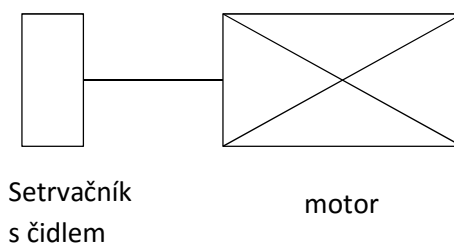
### 3.3. Experimentální identifikace modálních parametrů kmitavé soustavy

Experimentální měření bylo provedeno na zkušební stolici modelující systém pohonu automatického tkalcovského stavu, jak můžeme vidět na Obr. 2.



Obr. 2 – Zkušební stolice

Pro účely měření byla použita konfigurace motor s jedinou připojenou hmotou, neboli setrvačnickem, zbylé setrvačnický byly odpojeny, viz schéma na Obr. 3.



Obr. 3 – Schéma experimentálního modelu

Dále uvažujeme jako hmotu pouze setrvačnick nikoliv spojku nebo hřídel, jejichž hmotnost je zanedbatelná oproti setrvačnicku. Pro úplnou identifikaci budeme potřebovat rozměry kotouče, změříme tedy nejprve průměr  $D$  a tloušťku kotouče  $h$

$$D = 195\text{mm} = 0,195\text{m} \quad (3.24)$$

$$h = 40\text{mm} = 0,04\text{m}, \quad (3.25)$$

v tabulkách nalezneme hodnotu hustoty  $\rho$  pro hliník

$$\rho = 2700\text{ kg/m}^3. \quad (3.26)$$

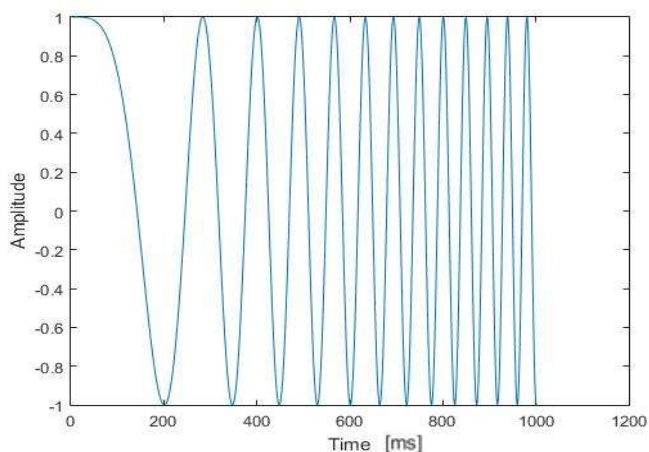
Pomocí naměřených rozměrů spočítáme moment setrvačnosti  $J$  vzhledem k ose otáčení

$$J = \frac{1}{2} \rho \pi R^4 h = \frac{1}{2} \rho \pi \left(\frac{D}{2}\right)^4 h, \quad (3.27)$$

$$J = \frac{1}{2} \cdot 2700 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,195}{2}\right)^4 \cdot 0,04 = 1,533 \cdot 10^{-2} \text{kg} \cdot \text{m}^2. \quad (3.28)$$

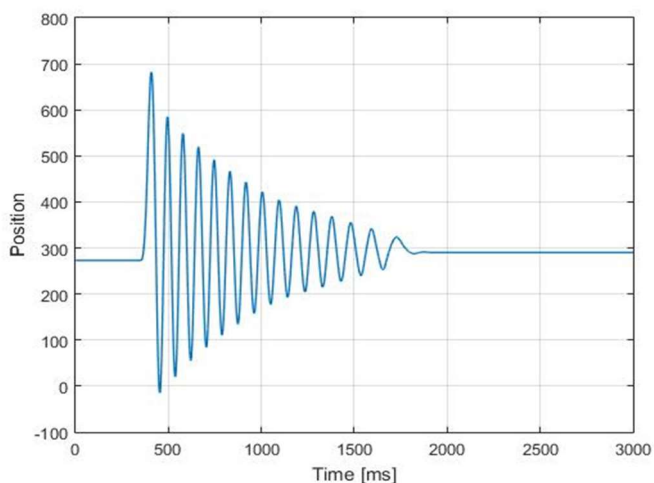
Po těchto základních úkonech se můžeme zaměřit na samotné vlastnosti soustavy jako torzní tuhost, torzní tlumení a frekvence vlastních kmitů.

Do motoru vyšleme „chirp signal“, tedy signál který mění svou frekvenci s časem. Příklad obecného signálu vygenerovaného Matlabem můžeme vidět na obrázku Obr. 4, kde je znázorněna závislost výchylky na čase.



Obr. 4 – Chirp signal

Pomocí čidla umístěného na kotouči změříme jeho chování. Naměřená data zobrazíme v grafu závislosti amplitudy výchylky na čase.



Obr. 5 – Závislosti amplitudy výchylky na čase

K dalšímu výpočtu využijeme rovnice z kapitoly 3.1, vzhledem k tomu, že se jedná o rotační pohyb, musíme zaměnit hmotnost  $m$  za moment setrvačnosti  $J$ , délkovou výchylku  $y$  za úhlovou  $\varphi$  a tlumení  $k$  s tuhostí  $b$  za torzní  $k_t, b_t$ . Z grafu průběhu amplitudy výchylky na čase spočítáme logaritmický dekrement. Pro větší přesnost vezme v potaz větší časový úsek a to mezi body o souřadnicích [407; 682] a [1596; 341], tedy dobu odpovídající  $n = 13$  periodám. Výsledný vztah pro logaritmický dekrement  $\vartheta$  pak vypadá následovně

$$\vartheta = \frac{1}{n} \cdot \ln \frac{\varphi(t)}{\varphi(t + nT)}, \quad (3.29)$$

$$\vartheta = \frac{1}{13} \cdot \ln \left( \frac{682 - 290}{341 - 290} \right) = 0,1569. \quad (3.30)$$

Dále určíme poměrný útlum  $b_r$ , který jsme si již vyjádřili ze vztahu pro logaritmický dekrement

$$b_r = \sqrt{\frac{\vartheta^2}{4\pi^2 + \vartheta^2}}, \quad (3.31)$$

$$b_r = \sqrt{\frac{0,1569^2}{4\pi^2 + 0,1569^2}} = 0,0250. \quad (3.32)$$

Při výpočtu vlastní úhlové frekvence netlumených kmitů  $\Omega$  je důležité počítat s průměrnou periodou kmitu  $T$

$$\Omega = \sqrt{\frac{4\pi^2 + \vartheta^2}{T^2}}, \quad (3.33)$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{4\pi^2 + 0,1569^2}{\left(\frac{1,596 - 0,407}{13}\right)^2}} = 68,7190 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (3.34)$$

Nyní už můžeme dopočítat torzní tuhost  $k_t$ , torzní tlumení  $b_t$  a vlastní úhlovou frekvenci tlumených kmitů  $\Omega_b$

$$k = J \cdot \Omega^2 \quad (3.35)$$

$$k_t = 1,533 \cdot 10^{-2} \cdot 68,7190^2 = 72,3962 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad}^2 \cdot \text{s}^{-2} \quad (3.36)$$

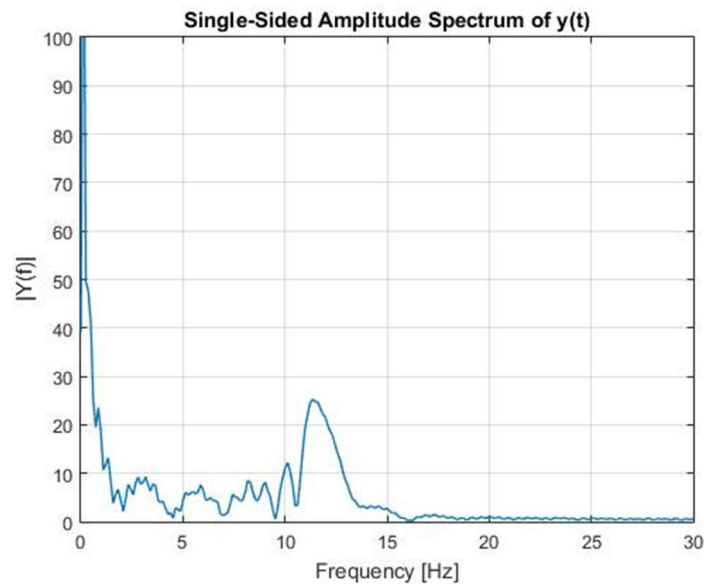
$$b_t = 2b_r \cdot \Omega \cdot J \quad (3.37)$$

$$b_t = 2 \cdot 0,0250 \cdot 68,7190 \cdot 1,533 \cdot 10^{-2} = 0,0526 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.38)$$

$$\Omega_b = \Omega \cdot \sqrt{1 - b_r^2} \quad (3.39)$$

$$\Omega_b = 68,7190 \cdot \sqrt{1 - 0,0250^2} = 68,6976 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (3.40)$$

Na závěr vezmeme naměřená data a v Matlabu za pomoci Fourierovi transformace necháme vykreslit jednostranné frekvenční spektrum, čímž získáme následující graf.



Obr. 6 – Frekvenční jednostranné spektrum

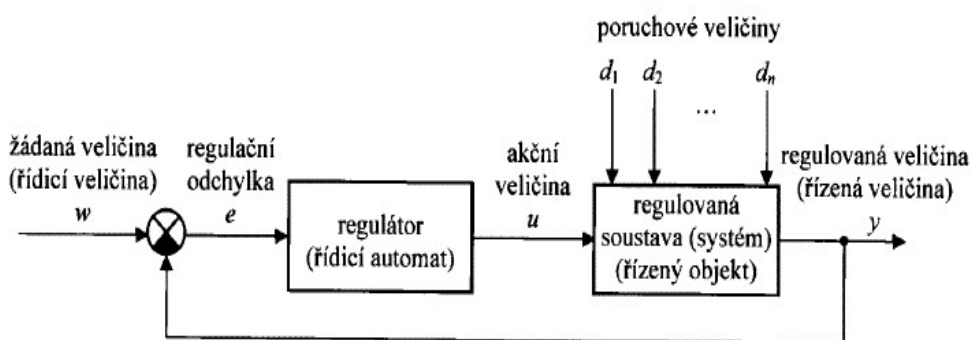
Vlastní frekvence kmitavé soustavy pak představují špičky ve frekvenčním spektru, v našem případě je přibližně  $f = 11,2 \text{ Hz}$ .



## 4. Analogové řízení

Analogové nebo též spojité řízení se využívá při vyšších nárocích na kvalitu řízení, např. při udržování řízených veličin na předepsaných hodnotách, kdy nejsou přípustné skokové zásahy nebo při nebezpečí rozkmitání objektu. V těchto případech je potřeba stav objektu popsat spojitě proměnnými příznaky a akční veličiny nastavovat spojitě. Všechny vstupy a výstupy jsou tedy spojitě proměnné v čase a spojitý řídicí systém zajišťuje mezi nimi nepřetržitou vazbu.

Řízení lze rozdělit na zpětnovazební a bez zpětné vazby. V našem případě se zaměříme pouze na zpětnovazební řízení čili regulaci. Příklad takového regulačního obvodu nalezneme v Obr. 7.



Obr. 7 – Regulační obvod – převzato z [2]

Kroužek na Obr. 7 představuje součtový člen, kde vyčerněná část znamená odečtení signálu. Při analogovém řízení regulátor porovnává regulovanou veličinu  $y$  s žádanou hodnotou  $w$ . Podle okamžitého rozdílu  $w - y$  těchto veličin, což je tzv. regulační odchylka  $e$ , nastavuje regulátor akční zásah tak, aby se regulační odchylka odstranila. Regulační odchylka  $e$  je dána vztahem

$$e = w - y. \quad (4.1)$$

Regulační obvod zajišťuje, aby regulovaná veličina  $y$  co nejlépe sledovala průběh řídicí veličiny  $w$ . Zároveň eliminuje poruchové veličiny tak, aby se jejich vliv v obvodu projevil co nejméně na regulované veličině  $y$ .

V širším slova smyslu jsou regulátory tvořeny třemi základními prvky: měřícím členem, ústředním členem regulátoru a akčním členem. Měřící člen pomocí senzoru zaznamenává skutečnou hodnotu regulované veličiny a transformuje ji na vhodný signál. Následně je v porovnávacím členu tento signál porovnán se signálem odpovídajícím požadované hodnotě veličiny. Výstup je zpracován v ústředním členu, kde je určena velikost akčního zásahu. Akční veličina je vstupem akčního členu tvořeného pohonem a regulačním orgánem (např. ventilem). V užším smyslu odpovídá regulátor ústřednímu členu.

#### 4.1. Regulátory typu P-I-D

Regulátory typu P-I-D jsou regulátory nepřímé, spojitě a lineární. Podle požadavku na výsledný přenos jsou tvořeny 3 složkami: proporcionální (P), integrační (I) a derivační (D). Při řízení demonstrátoru si vystačíme pouze s P-I složkami.

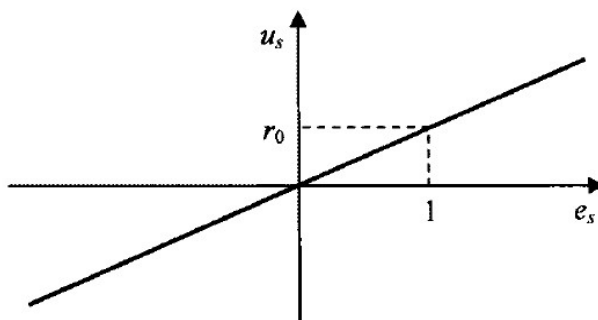
#### 4.2. P-regulátor

Pro naše potřeby budeme uvažovat ideální P-regulátor tedy ideální proporcionální regulátor, který nastavuje hodnotu akční veličiny  $u$  proporcionálně neboli úměrně k regulační odchylce  $e$ , tudíž lze jeho chování popsat vztahem

$$u(t) = r_0 \cdot e(t), \quad (4.2)$$

kde  $r_0$  je proporcionální konstanta čili zesílení a  $e$  regulační odchylka.

Statická charakteristika P-regulátoru je přímka se směrnici  $r_0$  jak vidíme na Obr. 8, kde index „s“ značí ustálený stav. Z existence této charakteristiky plyne, že P-regulátor je statický systém, proto při řízení nezajistí nulovou regulační odchylku. Pokud ale řídí astatický systém, trvalá regulační odchylka bude nulová.



Obr. 8 – Statická charakteristika P-regulátoru – převzato z [2]

### 4.3. I-regulátor

Opět postačí uvažovat ideální I-regulátor neboli ideální integrační regulátor. Nastavuje akční veličinu  $u$  úměrně integrálu regulační odchylky  $e$ , toto chování lze zapsat rovnicí:

$$u(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + u(0) = r_I \int_0^t e(\tau) d\tau + u(0), \quad (4.3)$$

kde  $T_I$  je časová integrační konstanta regulátoru. Vezmeme-li její převrácenou hodnotu  $\frac{1}{T_I}$  získáme regulační konstantu regulátoru, značenou také jako  $r_I$ .

Derivací předchozí rovnice (4.3) získáme rychlostní formu ve tvaru

$$u'(t) = r_I \cdot e(t). \quad (4.4)$$

Z této rovnice plyne, že rychlost změny akční veličiny  $u$  je přímo úměrná regulační odchylce. Dále lze říct, že regulátor dosáhne ustáleného stavu pouze v jediném bodě kdy  $u'(t) = 0$ . Ten nastane jen tehdy, když je nulová regulační odchylka a tedy i trvalá regulační odchylka je nulová.

I-regulátor je astatický systém, důkazem je rovnice (4.3), nemá tedy statickou charakteristiku a jeho trvalá regulační odchylka je nulová.

### 4.4. PI-regulátor

Ideální PI-regulátor vznikne spojením proporcionální a integrační složky. Lze jej vyjádřit rovnicí:

$$u(t) = r_0 \cdot e(t) + r_I \int_0^t e(\tau) d\tau + u(0) \quad (4.5)$$

nebo též ve tvaru

$$u(t) = r_0 \cdot \left( e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) + u(0), \quad (4.6)$$

kde pro integrační časovou konstantu  $T_I$  platí

$$T_I = \frac{r_0}{r_I}. \quad (4.7)$$

PI-regulátor je opět astatický systém, při řízení statického systému lze dosáhnout nulové trvalé regulační odchylky.

#### 4.5. PD-regulátor

Derivací regulační odchylky  $e$  v čase  $t$  lze předvídat budoucí průběh regulační odchylky a podle toho upravit akční zásah  $u$ . Samotný D-regulátor nelze využít, protože reaguje pouze na změnu  $e$ . Pokud se tedy regulační odchylka ustálí, je i derivační složka nulová. Derivační složka se využívá ve spojení s P nebo PI složkami. Pro ukázkou postačí ideálním PD-regulátor, vzniklý spojením derivační a proporcionální složky, který lze popsat následujícím vztahem

$$u(t) = r_0 \cdot e(t) + r_D \cdot e'(t) \quad (4.8)$$

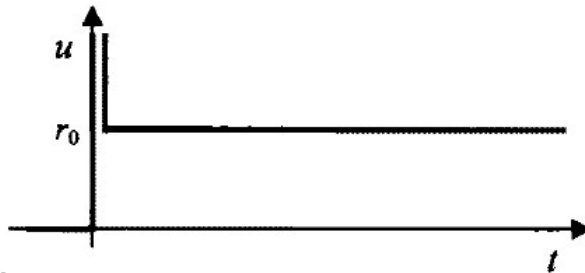
nebo ve tvaru

$$u(t) = r_0 \cdot (e(t) + T_D \cdot e'(t)), \quad (4.9)$$

kde pro derivační časovou konstantu  $T_D$  a derivační konstantu  $r_D$  platí

$$T_D = \frac{r_D}{r_0} . \quad (4.10)$$

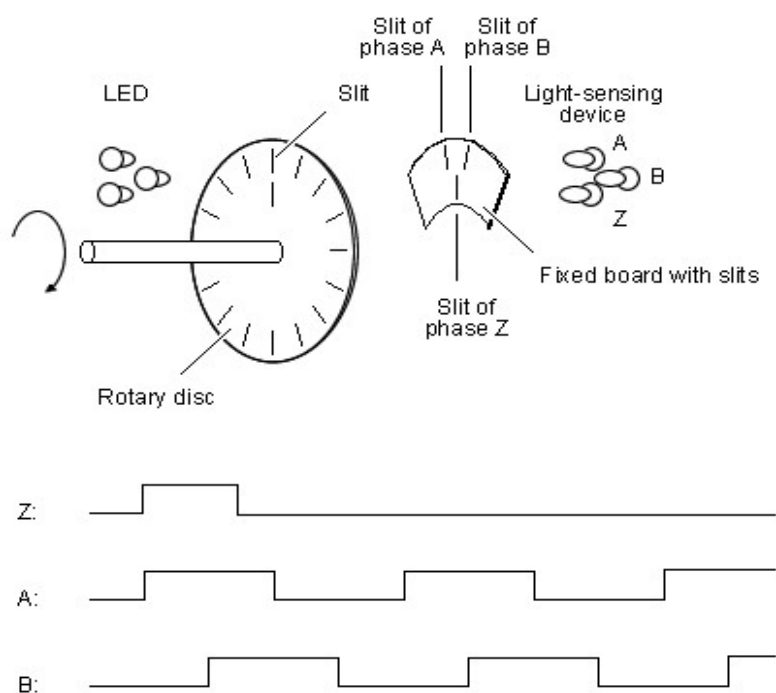
PD-regulátor při řízení statického systému není schopen dosáhnout nulové trvalé regulační odchylky. Z přechodové charakteristiky na Obr. 9 je vidět jak ostře reaguje na její změnu, což má negativní dopad při ovlivnění regulační odchylky šumem.



Obr. 9 – Přechodová charakteristika PD-regulátoru – převzato z [2]

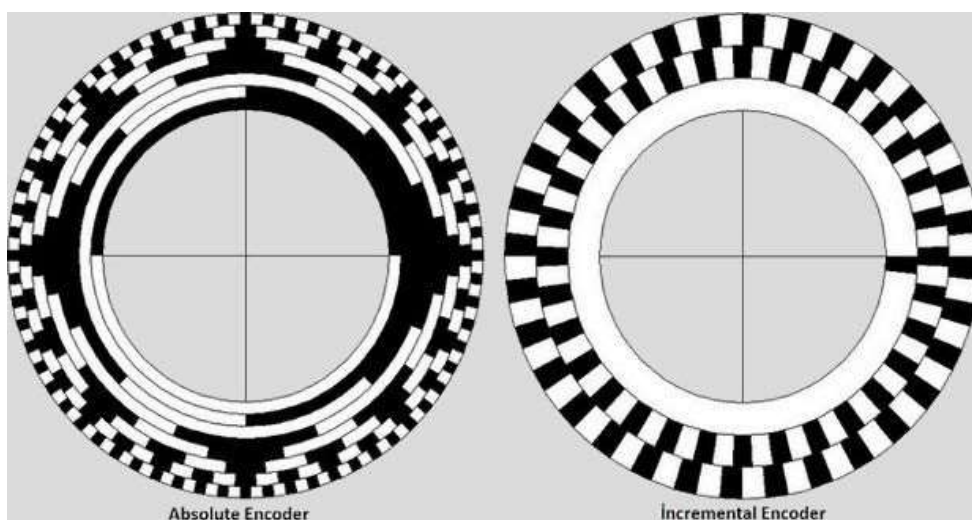
## 5. Inkrementální čidlo

Optické rotačního inkrementálního čidla poskytuje relativní informaci o změně polohy. Základem čidla je tzv. pulsní disk vyráběný z různých materiálů. Tento disk je mechanicky spojen s hřídelí procházející osou snímače. Na kotouči je několik řad otvorů vzájemně posunutých. Světlo generované diodami, které se pohybuje obvykle v infračervené oblasti spektra, prochází přes membránu a pulsní disk. Následně je zachyceno na fotodetektoru umístěném z druhé strany pulsního disku. Při otáčení hřídele pak disk střídavě propouští a nepropouští světlo na fotodetektor. Tyto světelné pulsy jsou dále zpracovány elektronikou snímače a převedeny na výstupní elektrický signál zpravidla obdélníkového nebo sinusového typu.



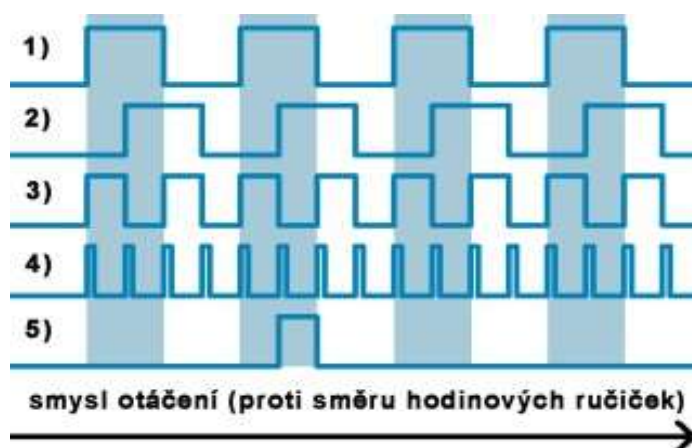
Obr. 10 – Princip inkrementálního čidla – převzato z [10]

Jeden z nejdůležitějších parametrů udávaných u každého inkrementálního čidla je tzv. rozlišení, tedy počet neprůhledných a průhledných polí odpovídajících počtu pulsů na jednu otáčku. Dnes se nejčastěji používají 3kanálové snímače, jež mají tři řady okének na pulsním disku. Signály dvou kanálů jsou vzájemně posunuty o 90°, což umožňuje rozpoznat směr otáčení. Třetí kanál generuje puls jednou za otáčku a zpravidla se nazývá „nulovým pulsem“. Z principu činnosti si inkrementální snímače na rozdíl od snímačů absolutních „nepamatují“ polohu při vypnutí napájení. Souvisí to s rozložením otvorů na impulsním disku, jak můžeme vidět na Obr. 11.



Obr. 11 – Pulsní disky – převzato z [9]

Při použití vícenásobného vyhodnocení signálu je možné získat větší rozlišení. Například má-li snímač 100 pulsů/ot pak při čtyřnásobném vyhodnocení signálu (obě náběžné i sestupné hrany kanálů A a B) lze získat rozlišení 400 kroků/ot. Princip vícenásobného vyhodnocení je názorně zobrazen na Obr. 12.



Obr. 12 – Vyhodnocení signálu – převzato z [8]

Pozice na Obr. 12 odpovídají:	
1	kanál A
2	kanál B
3	dvojnásobné vyhodnocení výstupního signálu
4	čtyřnásobné vyhodnocení výstupního signálu
5	kanál Z

## 6. Matlab/Simulink

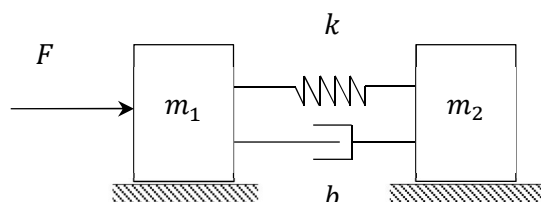
Matlab je programovací prostředí určené pro vědecké a technické výpočty, analýzy dat, simulace, vizualizaci a vývoj algoritmů. Je určen pro řešení úloh napříč obory např. ke zpracování signálu či obrazu, komunikaci, v robotice a dokonce i ve finančnictví. Pro práci v tomto prostředí je však zapotřebí zvládnout daný programovací jazyk.

Simulink je součástí programu Matlab. Podporuje provádění širokého sortimentu simulací, vytváření modelů, automatického generování kódu, průběžné testování a ověřování vestavěných systémů. Umožňuje začlenit algoritmy z Matlabu do modelů a naopak převést výsledky simulací zpět do Matlabu pro další analýzu.

Simulink představuje grafický editor s obsáhlou knihovnou bloků. Bloky představují určitou funkci či operaci, u níž uživatel mění pouze parametry. Díky těmto blokům a schématickému zobrazení je prostředí Simulink uživatelsky velmi přívětivé.

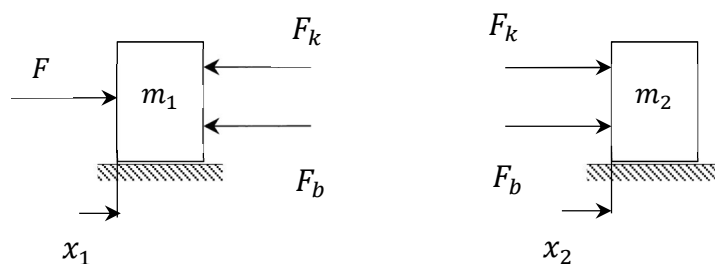
## 7. Simulační model

Představme si zjednodušeně demonstrátor, jako dvouhmotovou poddajnou soustavu s vnějším buzením, vedenou po vodorovné dokonale hladké ploše. Jinými slovy, dvě hmoty spojené poddajnou vazbou, představovanou paralelně zařazenou pružinou a tlumičem, přičemž na jednu z hmot působí vnější síla, viz Obr. 13:



Obr. 13 – Model dvouhmotové soustavy

Pružina nahrazuje poddajnost vazby, tlumič naopak představuje disipaci energie tedy tlumení. Předpokládejme dokonale hladkou podložku, tudíž můžeme zanedbat tření při pohybu hmot. Nyní můžeme tělesa uvolnit a zavést souřadnicový systém, jak je níže znázorněno.



Obr. 14 – Silové účinky

Síla  $F_k$  znázorňuje silový účinek způsobený pružinou a síla  $F_b$  silový účinek od tlumiče, tyto síly můžeme zapsat pomocí následujících rovnic

$$F_k = k \cdot \xi \quad (7.1)$$

$$F_b = b \cdot \dot{\xi}. \quad (7.2)$$

Síla  $F_k$  je tedy přímo úměrná tuhosti pružiny  $k$  a deformaci pružiny  $\xi$ , kdežto síla  $F_b$  je přímo úměrná tlumení  $b$  a rychlosti deformace  $\dot{\xi}$ .

Podle druhého Newtonova zákona napíšeme pro každou hmotu základní Newtonovy pohybové rovnice. Jak můžeme vidět na Obr. 14, vykonávaný pohyb i síly působící na tělesa leží v jednom směru, proto nám bude stačit právě jedna rovnice pro jednu hmotu.

$$m_i \vec{a}_i = \vec{F}_i \quad (i = 1, 2, \dots, N). \quad (7.3)$$

Newtonovy pohybové rovnice do osy  $x$ :

$$m_1 \ddot{x}_1 = F - k(x_1 - x_2) - b(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (7.4)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = k(x_1 - x_2) + b(\dot{x}_1 - \dot{x}_2). \quad (7.5)$$

Rovnice (7.4) a (7.5) vydělíme hmotnostmi

$$\ddot{x}_1 = \frac{1}{m_1} [F - b(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k(x_1 - x_2)] \quad (7.6)$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{1}{m_2} [b(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k(x_1 - x_2)]. \quad (7.7)$$



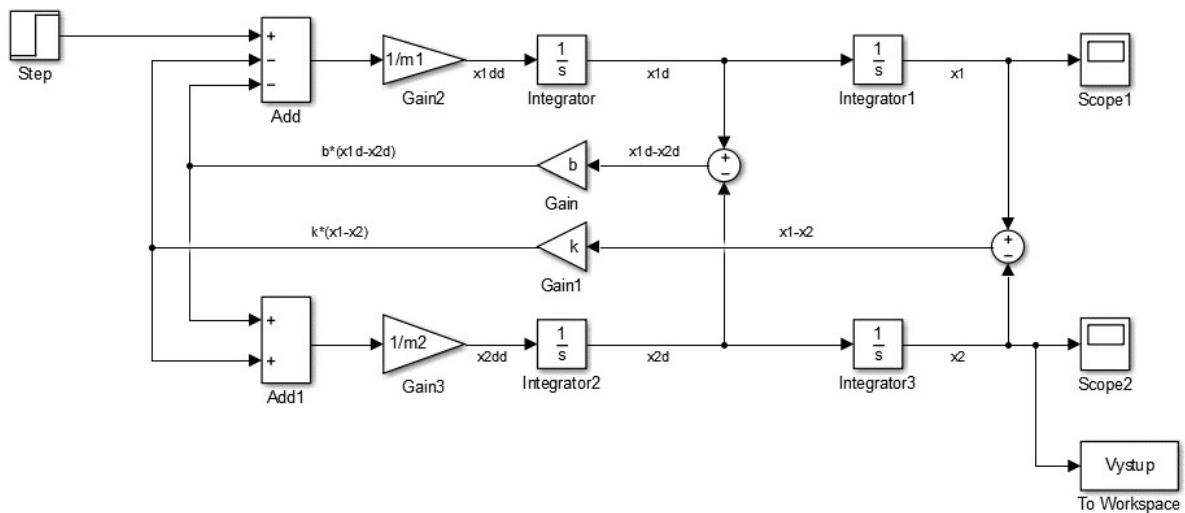
Pomocí Laplacovi transformace při nulových počátečních podmínkách, můžeme přepsat rovnice do tvaru

$$s^2 x_1 = \frac{1}{m_1} [F - sb(x_1 - x_2) - k(x_1 - x_2)] \quad (7.8)$$

$$s^2 x_2 = \frac{1}{m_2} [sb(x_1 - x_2) + k(x_1 - x_2)]. \quad (7.9)$$

Nyní máme rovnice připravené, pro vytvoření funkční simulačního schématu v Simulinku.

Otevřeme Simulink a vytvoříme nový model. Z knihovny Simulink využijeme následující bloky „Gain, Integrator, Add, Sum, Scope“. Blok „Gain“ umožňuje pře násobení konstantou, bude tedy představovat konstanty hmotnosti, tuhosti a tlumení. Po jeho otevření se objeví dialogové okno, kde v záložce „Main“ lze měnit hodnotu. Bloky „Add“ a „Sum“ fungují podobně, umožňují součet a rozdíl vstupních parametrů. Po otevření můžeme přidávat nebo ubírat počet vstupů. Blok „Scope“ vykreslí do grafu průběh veličiny v daném místě v závislosti na čase. Sílu  $F$  lze zvolit podle potřeb dané úlohy. Vzhledem k našim potřebám není prozatím nutné sílu  $F$  více specifikovat, proto jsem zvolil pro příklad blok „Step“. Díky těmto blokům vytvoříme schéma podle Obr. 15.



Obr. 15 – Simulační model

## 7.1. Simulace

Takto vytvořený model lze využít několika způsoby. První možností je dosadit za konstanty  $m_1, m_2, k, b$  a zvolit vhodně sílu  $F$ . Pak už jen nastavíme dobu trvání a spustíme simulaci zeleným tlačítkem, vše nalezneme v horní liště skriptu. Pomocí bloků „Scope 1 a 2“ sledujeme chování jednotlivých hmot v čase. Lze přidat blok „To Workspace“, který vytvoří proměnnou „Vystup“ a uloží do ní data pro další zpracování, v modelu se nachází vpravo dole na Obr. 15. Po otevření bloku nastavíme „Variable name“, u kolonky „Save format“ zvolíme „Array“ a „Sample time“ nastavíme podle požadovaného vzorkování např. 0,002.

Simulační model lze použít i pro identifikaci parametrů soustavy pokud budeme mít naměřené její chování. To si můžeme následně ověřit. Nejprve si pro známé parametry  $m_1, m_2, k, b$  a známou působící sílu  $F$  necháme vygenerovat data odezvy soustavy. Následně si představíme, že známe pouze tyto parametry a data: hmotnost  $m_1$ , budící sílu  $F$  a chování druhé hmoty.

K identifikaci pak využijeme dva jednoduché skripty, které jsou na přiloženém CD. První skript „Cilova\_fce.m“, dále jen CF, zavádí globální proměnné  $m_2, k, b$  a řadí je v tomto pořadí do vektoru. Důležitou částí kódu je řádek „sim('Rce\_model\_identifikace')“, který spustí simulaci daného systému v Simulinku. „Rce\_model\_identifikace“ je model podobný Obr. 15 s tím rozdílem, že nastavíme známou hodnotu  $m_1 = 10kg$  a sílu  $F$ , jako jednotkový skok o velikosti  $5N$  v čase  $t = 1s$ . Samotná CF je definována jako:  $CF = (Vystup - experiment)' * (Vystup - experiment)$ , kde „experiment“ představuje naměřená a „Vystup“ zkoumaná data. Druhý skript „Start.m“ spouští samotné vyhodnocení. Obsahuje funkci „fminsearch“, ta mění hodnotu hledaných parametrů na základě definované cílové funkce, kterou se snaží minimalizovat, dokud není splněno požadované kritérium např. počet iterací nebo přesnost výsledku, v našem případě jsem zvolil přesnost výsledku na  $10^{-8}$ . Tato funkce tedy pošle sadu parametrů a zjistí výsledek CF, poté změní parametry a sleduje, zda s nimi CF klesla nebo ne. Pokud už dále neklesá, vypíše optimální hodnoty parametrů. Na Obr. 16 je zobrazena právě tato funkce.

```
p0=[1,10,1]; % počáteční hodnoty pro iteraci
options=optimset('Display','iter','Tolx',1e-8,'TolFun',1e-8);
[x,fval,exitflag,output]=fminsearch(@(x) Cilova_fce_ml(x,experiment),p0,options)
% x ... nalezene reseni (minimum)
% fval ... hodnota cilove fce. pro nalezene x
% exitflag ... 1 - fminsearch dokonvergoval k x
%           0 - prekrocen max. pocet iteraci
%           -1 - vypocet prerusen vystupni funkci
% output ... vraci structure output s informacemi o vypoctu
```

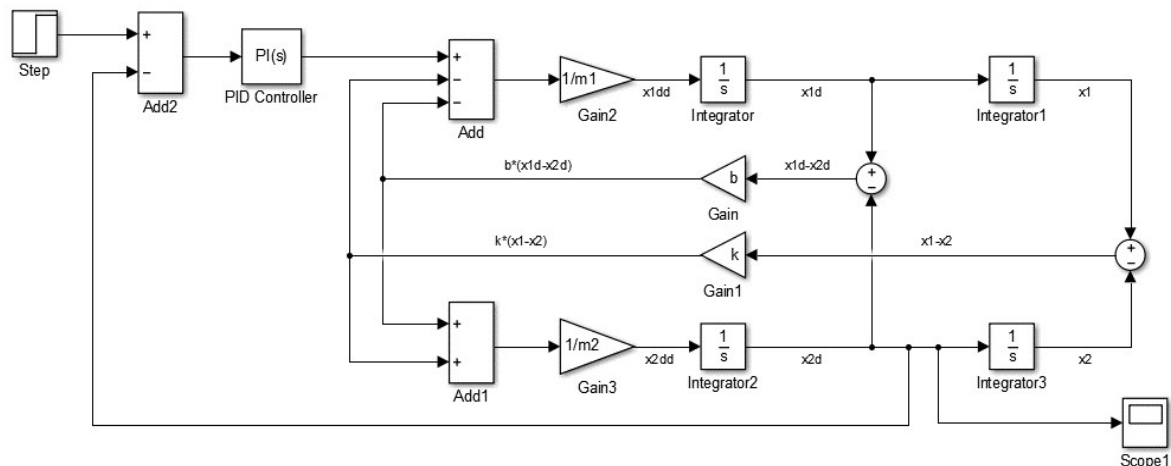
Obr. 16 – Funkce fminsearch

Počáteční podmínku jsem zvolil  $p_0 = [1,10,1]$ , předpokládal jsem vyšší tuhost  $k$  v porovnání s ostatními hledanými hodnotami. Identifikaci spustí napsání příkazu „Start“ do příkazového řádku Matlabu. Následně proběhne výpočet, na jehož konci se vypíše hodnoty hledaných parametrů. V našem případě po 332 iterací získáme výsledek v podobě  $m_2 = 10.0000kg$ ,  $k = 150.0002kg \cdot s^{-2}$ ,  $b = 4.9999kg \cdot s^{-1}$ , ke srovnání máme původní hodnoty pro generovaná data, které byly  $m_2 = 10kg$ ,  $k = 150kg \cdot s^{-2}$ ,  $b = 5kg \cdot s^{-1}$ .

Stejný postup lze samozřejmě použít i v případě reálného experimentu. U něj bychom však neměli možnost porovnat výsledky.

## 7.2. Zpětnovazební řízení

Další možností využití modelu je ukázka zpětnovazebního řízení pomocí PI-regulátoru. Z knihovny Simulinku použijeme blok „PID Controller“, který umístíme do modelu dle Obr. 17.

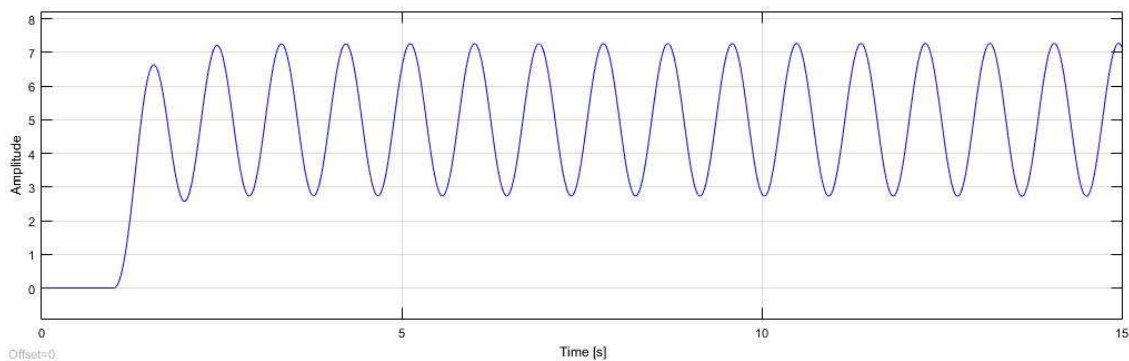


Obr. 17 – Model řízení soustavy

Blok „Scope1“ vykreslí průběh rychlosti druhé hmoty, která je regulovanou veličinou.

Existuje mnoho postupů nastavení parametrů regulátoru, jedním z nich je metoda Zieglera a Nicholse kritických parametrů. Tato metoda umožňuje seřízení regulátoru pomocí experimentálně zjištěného kritického zesílení a kritické frekvence.

Nejprve vyřadíme integrační složku regulátoru, respektive nastavíme  $r_I = 0$ . Zbylou P složku, tedy zesílení  $r_0$ , dáme na nejnižší hodnotu a postupně navyšujeme, dokud se regulovaná soustava nedostane na mez stability. Mez stability se projeví v grafu, jako kmity s konstantní amplitudou, viz Obr. 18.



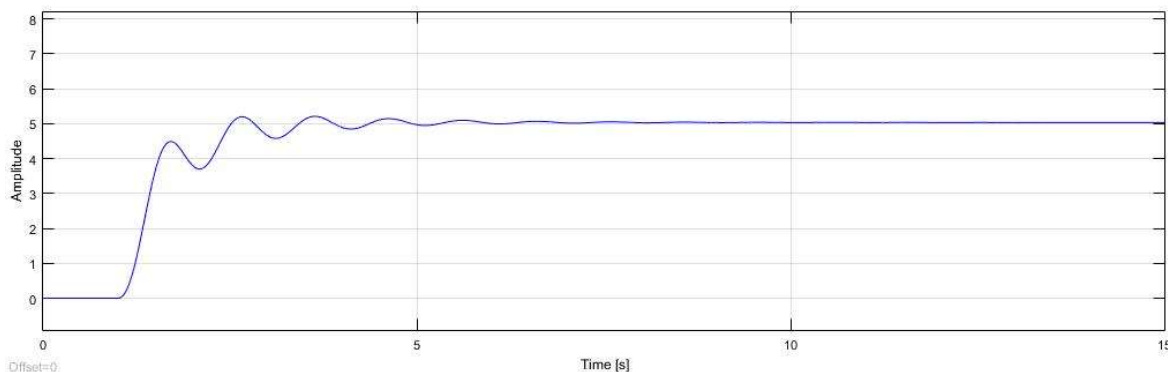
Obr. 18 – Mez stability

Z periodického průběhu regulované veličiny odečteme kritickou periodu  $T_k$  a z nastavení P-regulátoru odečteme kritické zesílení  $r_{0k}$ . Pro zvolený PI-regulátor získáme potřebné parametry dosazením do Tab. 1.

Regulátor	$r_0$	$T_I = \frac{r_0}{r_I}$	$T_D = \frac{r_D}{r_0}$
P	$0,5 \cdot r_{0k}$	—	—
PI	$0,45 \cdot r_{0k}$	$0,85 \cdot T_k$	—
PID	$0,6 \cdot r_{0k}$	$0,5 \cdot T_k$	$0,125 \cdot T_k$
I	—	$2 \cdot T_k$	—

Tab. 1 – Určení parametrů dle metody Zieglera a Nicholse – převzato z [2]

Výsledný průběh rychlostí pak může vypadat následovně:



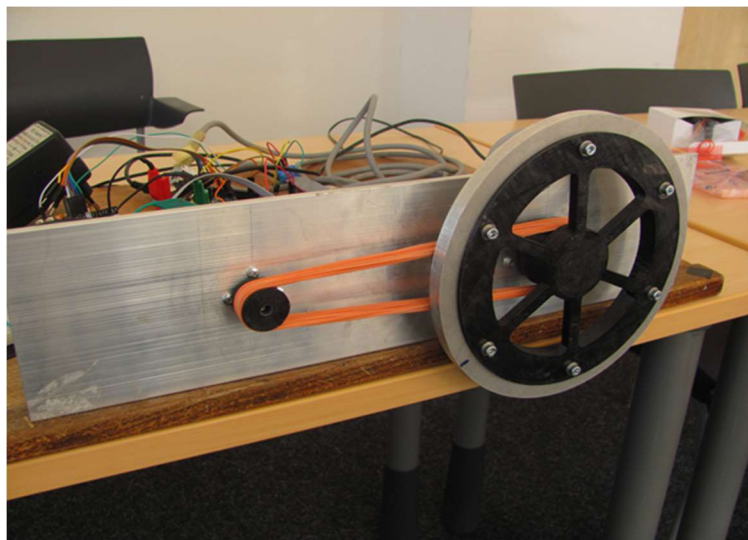
Obr. 19 – Výsledný průběh

Grafy z Obr. 18 a Obr. 19 jsou vykresleny pro parametry soustavy  $m_1 = 10kg$ ;  $m_2 = 20kg$ ;  $b = 20kg \cdot s^{-1}$ ;  $k = 250kg \cdot s^{-2}$ ;  $r_{0k} = 118,5$ ;  $r_0 = 53,325$  a  $T_I = 0,78$ .

## 8. Dvoumotový demonstrátor

Ukázkový dvoumotový demonstrátor byl navržen s ohledem na jednoduchost montáže, snadnou obsluhu a možnost úpravy podle potřeb uživatele. Přípravu tohoto demonstrátoru lze rozdělit do těchto částí:

- Konstrukce a elektronické propojení demonstrátoru, popis jednotlivých částí.
- Měření a vyhodnocení dat.



Obr. 20 – Dvoumotový demonstrátor

### 8.1. Konstrukce

Konstrukce demonstrátoru se skládá ze dvou celků. První je řemenička umístěná na hřídeli motoru, zajištěná stavěcím šroubem. Druhý je setrvačnick. Jde o hliníkový kotouč připojený k plastovému středu. Střed představuje věnec pro hliníkový kotouč, řemeničku a čep pro uložení do rotačního čidla. Mezi oběma řemeničkami jsou nataženy gumové svazky. Jejich přidáváním nebo ubíráním lze nastavit různé modální vlastnosti demonstrátoru. Pro usnadnění výroby jsou řemenička na motoru i střed setrvačnicku vytisknuty na 3D tiskárně. Motor a čidlo jsou přišroubovány k hliníkovému profilu "L" tak, aby použité gumičky byly dostatečně napnuty (vzdálenost os je 18cm).

Řízení motoru a načítání dat z čidla zajišťuje deska Arduino a motor shield Arduino. Veškeré elektronické součástky jsou popsány v následujících podkapitolách.

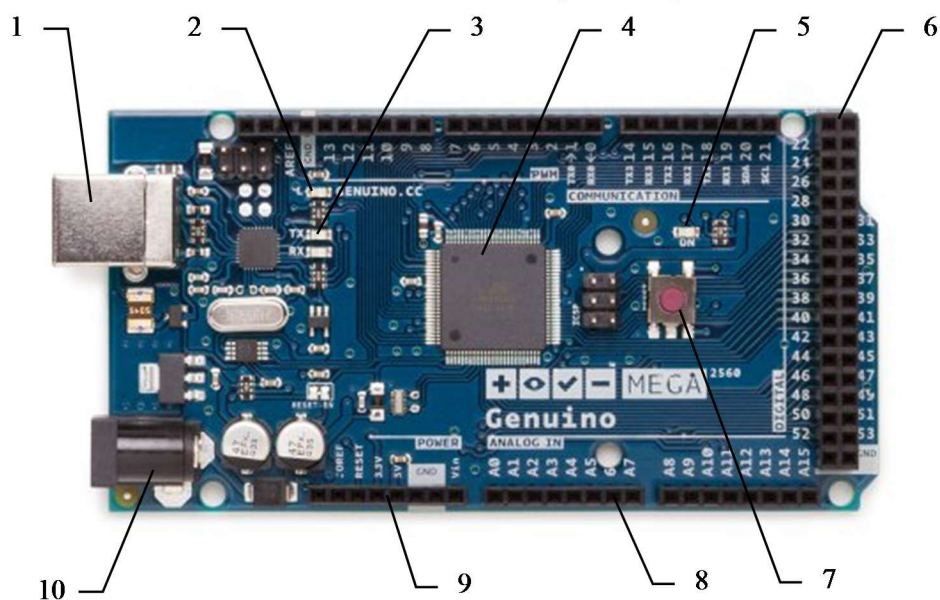
### 8.1.1. Arduino

Arduino je open-source platforma založená na snadno použitelném hardwaru a softwaru. V našem případě jde především o programovatelnou desku Arduino MEGA 2560. Velké množství pinů zvládne jak analogové tak digitální vstupy a výstup, což zaručuje široké využití. Umožňuje zpracovat vstupy, jako např. světlo dopadající na snímač, zmačknutí tlačítka či polohu předmětu a přeměnit je na výstup v podobě zapnutí morku, rozsvícení LED diody atd.

Technické parametry:

Mikrořadič	ATmega2560
Provozní napětí	5V
Vstupní napětí (doporučeno)	7-12V
Vstupní napětí (limitní)	6-20V
Digitální vstupní / výstupní piny	54 (z toho 15 poskytuje výstup PWM)
Analogový vstupní piny	16
DC proud připadající na jeden vstupní / výstupní pin	20 mA
DC proudu pro 3,3V pin	50 mA
Flash paměť	256 KB z toho 8 KB používané zavaděč
SRAM (statická paměť RAM)	8 KB
EEPROM	4 KB
Taktovací frekvence	16 MHz
Délka	101.52 mm
Šířka	53.3 mm
Hmotnost	37 g

Tab. 2 – Technické parametry



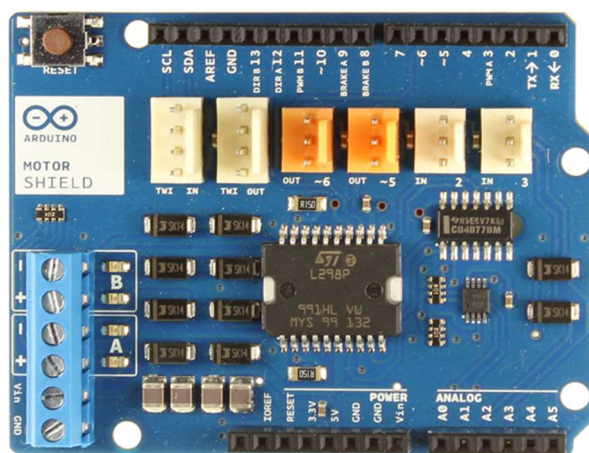
Obr. 21 – Deska Arduino Mega 2560 – převzato z [3]

Pozice na desce z Obr. 21 odpovídají:	
1	USB konektor
2	LED dioda propojena s digitálním pinem 13, která svítí při průchodu hodnoty HIGH (1) nebo nesvítí při průchodu LOW (0)
3	LED dioda signalizující přenos dat z počítače na desku
4	mikroprocesor ATmega2560 s 256 KB flash paměti
5	LED dioda indikující napájení z externího zdroje či přes USB kabel.
6	digitální piny
7	reset tlačítko, přináší hodnotu LOW (0) na mikroprocesor
8	analogové piny
9	piny s napětím 3,3V a 5V pro napájení externích součástí (např. DC motor)
10	napájecí konektor

Ke správné komunikaci desky Arduino s počítačem je nutné nainstalovat vhodný software. Existuje několik variant. První možností je stáhnout vývojové prostředí Arduino přímo z webových stránek výrobce, je však zapotřebí zvládnout programovací jazyk Arduino. Další možností je ovládat desku z prostředí Matlab/Simulink, k tomu je nutné stáhnout doplňkovou podporu pro Arduino. Po spuštění programu Matlab najedeme v horní liště na „Add-Ons/Get Hardware Support Packages“, v nově otevřeném okně zvolíme „Download from Internet“ a vybereme veškeré dostupné balíčky pro Arduino.

### 8.1.2. Arduino Motor Shield R3

Arduino Motor Shield je určen k pohonu indukčních zátěží, jako jsou relé, elektromagnety, DC a krokové motory. Společně s deskou Arduino umožní řídit dva motory na stejnosměrný proud, respektive rychlost a směr každého z nich nezávisle na sobě. Pro řízení DC motorů je třeba posílat dva signály – 0 nebo 1 pro určení směru otáčení a 0 – 255 pomocí PWM pro určení otáček. Je také schopen změřit spotřebu proudů obou motorů, během jiných funkcí.

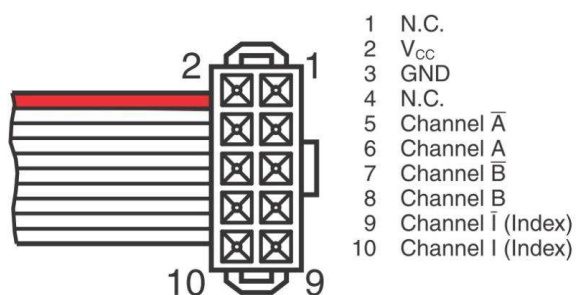


Obr. 22 – Adafruit Motor Shield – převzato z [6]

### 8.1.3. Motor Maxon 244746

Motor Maxon obsahuje nejen samotný motor, ale i planetovou převodovku a inkrementální čidlo. Motor může být napájen maximálně 24V, jmenovité otáčky jsou 5060 ot/min a krouticí moment 45,5mNm. Planetová převodovka, která je připojena k motoru, redukuje výstupní otáčky a zvyšuje krouticí moment motoru. Redukce převodovky je 4,8:1. Maximální krouticí moment, který je převodovka schopna přenést, je 0,75Nm. Otáčky výstupního hřídele při nezatíženém stavu jsou pak 1054 ot/min. Poslední částí je inkrementální čidlo, které je schopné zaznamenávat přesnou polohu rotoru. Čidlo zaznamenává 500 elektrických pulzů při jedné otočce rotoru. Je napájeno 5V a maximální otáčky rotoru, které je čidlo schopné rozpoznávat, je 12 000 otáček za minutu.

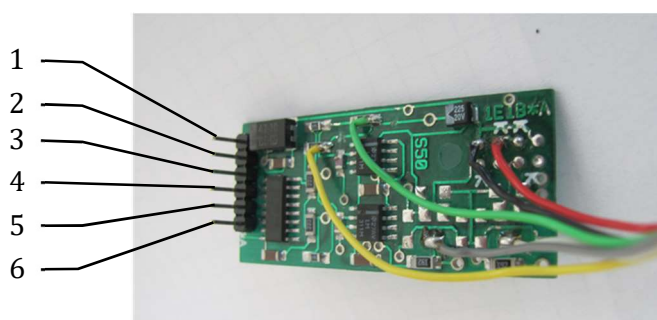
Jak bylo řečeno, součástí toho kompletu je i inkrementální čidlo, jehož funkci jsme si již vysvětlili. Proto si ukážeme pouze rozložení pinů na konektoru, kvůli správnému zapojení.



Obr. 23 – Konektor čidla – převzato z [7]

### 8.1.4. Inkrementální čidlo LARM IRC 327

Čidlo LARM má analogový výstup, ten byl zpracován dodaným převodníkem na standardizovaný kvadrurní digitální signál, jak bylo popsáno v předchozí kapitole.



Obr. 24 – Převodník z analogového na digitální signál

Pozice na desce z Obr. 24 odpovídají:	
1,2	napájení
3	kanál A
4	negace A
5	kanál B
6	negace B



## 8.2. Zapojení

Propojení jednotlivých elektronických součástí si nejnázve ukážeme v následující tabulce.

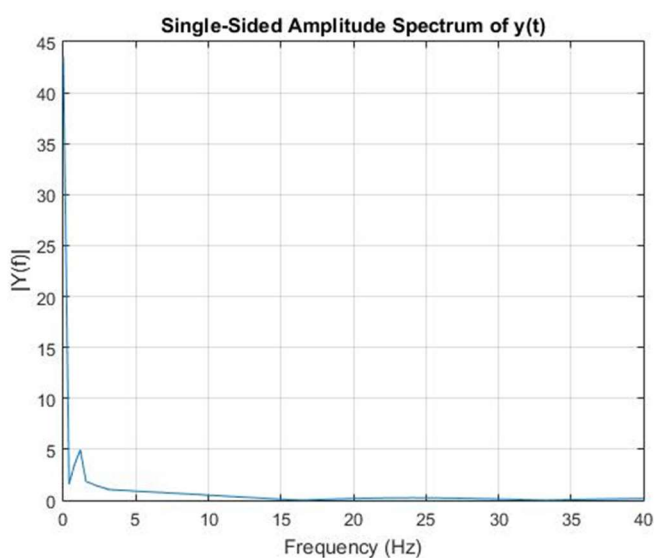
Arduino Mega 2560	Arduino Motor Shield	Inkrementální čidlo motoru	Inkrementální čidlo setrvačnicku
GND	GND	pin 3	pin 2
5V	5V	pin 2	pin 1
3.3V	3.3V		
IOREF	IOREF		
RESET	RESET		
pin 10	pin 3 PWM		
pin 12	pin 12		
pin 18		pin 6	
pin 19		pin 8	
pin 2			pin 5
pin 3			pin 3

Tab. 3

Na závěr připojíme konektory motoru +/- na Motor Shield na piny A +/-.

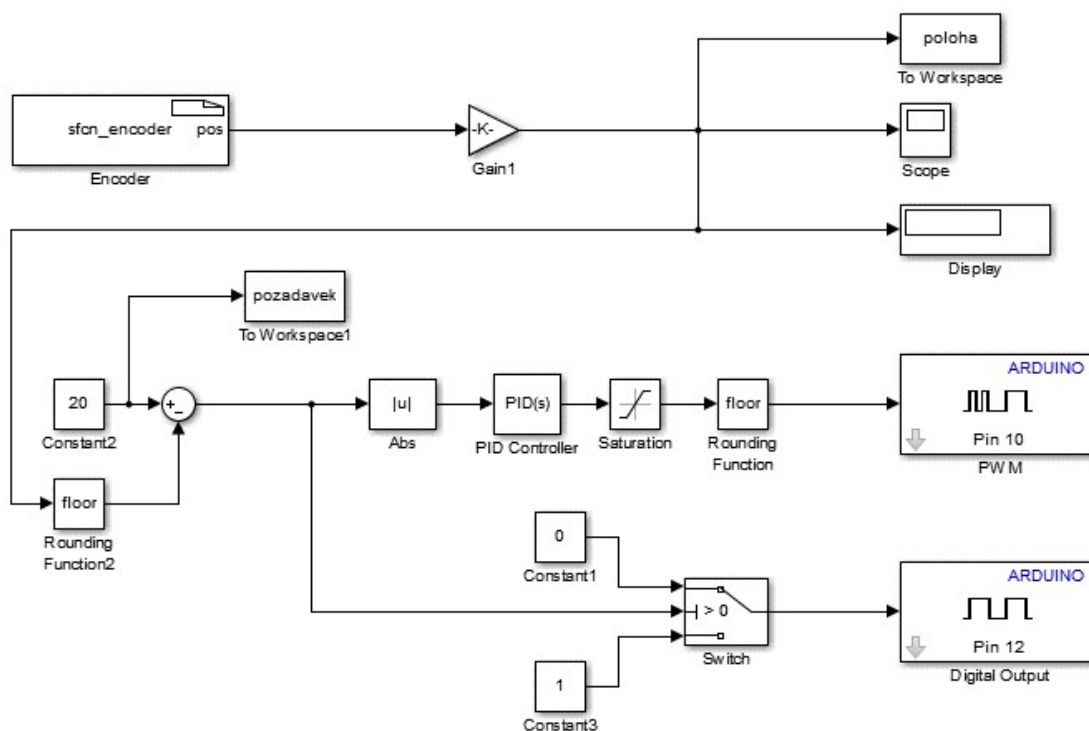
## 8.3. Měření

Metodou popsanou v kapitole 3.3 byla pro demonstrátor s 20 gumičkami zjištěna vlastní frekvence  $f = 1,1\text{Hz}$ . Následné vykreslení jednostranného frekvenčního spektra naměřeného signálu na Obr. 25 potvrdilo náš výpočet, vlastní frekvence soustavy se zobrazila jako špička grafu, kolem hodnoty  $f = 1,1\text{Hz}$ .



Obr. 25 – Frekvenční jednostranné spektrum

Dalším cílem měření je optimální nastavení PI-regulátoru. K ovládání využijeme schéma dle Obr. 26.



Obr. 26 – Schéma řízení

Rozeberme postupně jednotlivé části. Blok „Encoder“ zpracovává přicházející signály z čidla umístěného na setrvačnicku v reálném čase a transformuje je na údaje o poloze. Vzhledem k tomu, že čidlo má rozlišení 10000 pulzů na jednu otáčku, vynásobíme výstupní signál hodnotou 0.01 pro lepší manipulaci. Údaje o poloze se zobrazují na displeji nebo se vykreslují do grafu a zároveň se ukládají do proměnné pod názvem „Poloha“ ve formátu „Structure With Time“.

Požadavek na polohu určuje číslo v „Constant2“ k němuž je připojen blok „ToWorkspace1“, který uloží průběh požadované hodnoty do proměnné „požadavek“.

Vzhledem k použití zpětnovazebného řízení musíme od požadované polohy odečíst skutečnou. Rozdíl těchto hodnot putuje do „Switch“. Podle znaménka se rozhodne, kterým směrem se bude motor otáčet. V druhé větvi jde absolutní hodnota rozdílu signálů do „PID Controller“. Ten určí, jakou rychlostí bude motor rotovat. S ohledem na rozsah hodnot udávajících rychlost rotace je přidán blok „Saturation“, který udržuje hodnoty v rozsahu 0 až 255. Bloky „Rounding Function“ převádí signály na celá čísla.

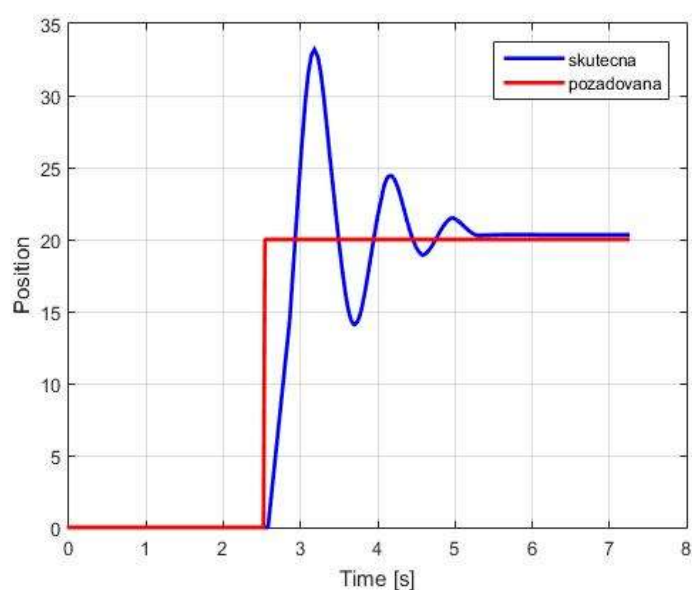
Nyní už stačí jen nastavit v kolonce „Tools/Run on Target Hardware/Options“ používanou desku Arduino MEGA 2560. V horní liště zvolíme mód „External“, který umožňuje komunikaci s deskou Arduino v reálném čase. Abychom mohli pracovat v tomto módu

dostatečnou dobu, nastavíme čas na „inf“. Zeleným tlačítkem na horní liště se skript nahraje na desku a spustí.

Doporučuji před spuštěním nastavit požadovanou hodnotu polohy na 0 a až po spuštění ji měnit v „Extenal“ módu.

Pozn.: Blok „Encoder“ je možné stáhnout na oficiálních stránkách Matlabu: <http://www.mathworks.com/>.

Jak bylo zmíněno, na řemeničkách je napnuto 20 gumiček. Metodou Zieglera a Nicholse kritických parametrů, uvedenou v kapitole 7.2, nastavíme parametry PI-regulátoru na  $r_0 = 3,17$  a  $T_I = 0,9$ . Průběh polohy v závislosti na čase je zaznamenán na Obr. 27.



Obr. 27 – Graf závislosti polohy na čase

V grafu vidíme, jak setrvačnick dosáhnul požadované polohy. Z tohoto průběhu lze říci, že PI-regulátor byl nastaven správně a funguje.

## 9. Závěr

Na začátku této práce byly zavedeny a odvozeny parametry potřebné k popisu poddajných soustav s lineárním tlumením. Uzpůsobením těchto rovnic pro rotační pohyb byla provedena identifikace modálních parametrů kmitavé soustavy. Z experimentálně naměřených dat chování soustavy byly stanoveny hodnoty hledaných parametrů. Postup výpočtu byl detailně rozebrán.

Dalším cílem bylo seznámení s prostředím Matlab/Simulink a sestavení simulačního dynamického modelu dvouhmotové poddajné soustavy. Pro vytvoření simulačního modelu se vycházelo z rovnic rovnováhy pro danou soustavu. Model byl dále využit pro identifikaci parametrů s ohledem na získaná data a známé parametry. Pro možnosti řízení bylo potřeba vysvětlit funkci analogového, konkrétně zpětnovazebného, řízení. Dále byly rozebrány vlastnosti jednotlivých typů regulátorů a předvedena jedna z mnoha metod jejich nastavení.

V závěru práce je popsán návrh ukázkového demonstrátoru. Byly popsány jednotlivé části a předvedena jedna z možností vzájemného propojení. Důležitou součástí je platforma Arduino, která umožňuje ovládání celého demonstrátoru a je detailně popsána v práci. Dílčím úkolem byla demonstrace využití zpětnovazebného řízení. V prostředí Simulink byl vytvořen skript s využitím PI-regulátoru. Následně byla aplikována metoda Zieglera a Nicholse kritických parametrů pro nastavení jednotlivých složek regulátoru. Získaná data potvrdila předpokládané chování. Proto lze říci, že návrh i realizace ukázkového demonstrátoru naplnila očekávání.

Tímto byly splněny veškeré cíle této práce. Experiment potvrdil, že demonstrátor je funkční a lze jej použít pro ukázkou zpětnovazebného řízení poddajných soustav. Všechny použité programy jsou uloženy na přiloženém disku.

## 10. Literatura

- [1] STEJSKAL, Vladimír, BROUSIL, Jaromír and STEJSKAL, Stanislav, 2001, *Mechanika III*. Vyd. 2. Praha : ČVUT. ISBN 80-01-02388-5.
- [2] HOFREITER, Milan. *Základy automatického řízení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-01-05007-1.
- [3] Arduino MEGA 2560. *Arduino* [online]. 2016 [cit. 2016-06-08]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>.
- [4] SIMULINK. *The MathWorks* [online]. ©1994-2016 [cit. 2016-06-08]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/simulink/>.
- [5] MATLAB. *The MathWorks* [online]. ©1994-2016 [cit. 2016-06-08]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
- [6] Arduino Motor Shield R3. *Arduino* [online]. 2016 [cit. 2016-06-08]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoMotorShieldR3>
- [7] Motor Maxon 244746. *Maxon motor* [online]. 2016 [cit. 2016-06-08]. Dostupné z: [http://www.maxonmotor.com/maxon/view/service\\_search?query=244746](http://www.maxonmotor.com/maxon/view/service_search?query=244746)
- [8] Inkrementální enkodery. *AJP-tech* [online]. ©2009 [cit. 2016-06-08]. Dostupné z: <http://www.ajptech.cz/produkty/prumyslova-automatizace/baumer-senzory/snimace/snimace-otacek-a-uhlu/inkrementalni-enkodery/>
- [9] ENCODER, ANGLE MEASUREMENT CCS C PIC16F628 SAMPLE APPLICATION. *Electronics Projects Circuits* [online]. ©2016 [cit. 2016-06-08]. Dostupné z: <http://320volt.com/en/encoder-kullanimi-aci-olcumu-ve-ccs-c-pic16f628-ornek-uygulama/>
- [10] Working with an rotary encoder. *MATRIX VISION* [online]. 2016 [cit. 2016-06-08]. Dostupné z: [https://www.matrix-vision.com/manuals/mvHYPERION/UseCases\\_page\\_0.html](https://www.matrix-vision.com/manuals/mvHYPERION/UseCases_page_0.html)
- [11] Inkrementální rotační snímače IRC 307,317,327. *LARM a.s.* [online]. 2010 [cit. 2016-06-08]. Dostupné z: [http://www.larm.cz/inkrementalni-rotacni-snimace-irc-307-317-327\\_files/#bxc](http://www.larm.cz/inkrementalni-rotacni-snimace-irc-307-317-327_files/#bxc)