

VYŠŠÍ ODBORNÁ ŠKOLA, STŘEDNÍ ŠKOLA,
CENTRUM ODBORNÉ PŘÍPRAVY



ABSOLVENTSKÁ PRÁCE

Návrh a výroba modelu proudového motoru
s návrhem a realizací řízení otáček rotoru

Sezimovo Ústí, 2022

Autor: Jiří Chromý



ZADÁNÍ ABSOLVENTSKÉ PRÁCE

Student: **Jiří Chromý**
Obor studia: 26-41-N/01 Elektrotechnika – mechatronické systémy
Název práce: **Návrh a výroba modelu proudového motoru s návrhem a realizací řízení otáček rotoru**
Anglický název práce: **The Design and Manufacture of a Jet Engine Model, Including the Design and Implementation of Shaft Speed Control**

Zásady pro vypracování:

1. Navrhněte vhodný elektromotor, kterým budete pohánět model proudového motoru.
2. Navrhněte způsob snímání otáček proudového motoru a uložení elektroniky v podstavci modelu.
3. Navrhněte konstrukci uchycení elektromotoru, vytiskněte plastový model proudového motoru a sestavte jej.
4. Vytvořte počítačový simulační model proudového motoru a pomocí něho navrhněte PID regulaci otáček.
5. Vytvořte popis výukového modelu, který bude sloužit studentům při výuce.
6. Absolventskou práci vypracujte problémově ve struktuře odpovídající vědecké práci.


Doporučená literatura:

- [1] ŠIKÝŘ, T. Systém vodního hospodářství – laboratorní model (Absolventská práce), VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí, Sezimovo Ústí, 2011.
- [2] ROUBAL, J., HUŠEK, P. A KOL. *Regulační technika v příkladech*. Praha: BEN – technická literatura, 2011, ISBN 978-80-7300-260-2.

Vedoucí práce: Ing. Jiří Roubal, Ph.D., VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí
Odborný konzultant práce: Mgr. Bc. Miroslav Hospodářský, VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí
Oponent práce: Ing. Jiří Bumba, VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí

Datum zadání absolventské práce: **3. 9. 2021**

Datum odevzdání absolventské práce: **13. 5. 2022**


.....
Ing. Jiří Roubal, Ph.D.
(vedoucí práce)



V Sezimovo Ústí dne 3. 9. 2021


.....
doc. PhDr. Lenka Hrušková, Ph.D.
(ředitel školy)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou absolventskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Sezimově Ústí dne 13.5.2022

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Aleš', written above a horizontal line.

podpis

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil velké poděkování především vedoucímu absolventské práce Ing. Jiřímu Roubalovi, Ph.D. za nemalý čas a velkou píli, kterou věnoval tomuto projektu. Bez jeho vedení, podnětných a cenných rad a obdivuhodné ochoty při poskytování konzultací, by tato práce nikdy nevznikla. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Bc. Miroslavu Hospodářskému za jeho cenné rady a pomoc při realizaci této práce. Velké poděkování patří též vedení školy za poskytnutí finančních prostředků na výrobu modelu proudového motoru včetně jeho elektroniky a za poskytnutí šablony pro napsání této práce v prostředí L^AT_EX 2_ε. Taktéž děkuji mým blízkým za podporu během mého studia.

Anotace

Tato absolventská práce se zabývá návrhem a výrobou školní učební pomůcky v podobě modelu proudového motoru určeného zejména k výuce regulační techniky. Model proudového motoru je realizován pro Laboratoř aplikované informatiky a fyziky na Vyšší odborné škole v Sezimově Ústí. Je zde popsána konstrukce včetně samotné výroby proudového motoru. Poté následuje podrobný popis návrhu řízení otáček proudového motoru od tvorby počítačového simulačního modelu, jeho identifikaci z přechodové charakteristiky, až po samotný návrh PID regulátoru a jeho aplikaci na modelu proudového motoru.

Klíčová slova: Proudový motor, 3D tisk, systém, model, přechodová charakteristika, statická převodní charakteristika, identifikace systému, regulace, PID, GMK, MATLAB, Simulink.

Annotation

This graduate thesis deals with the design and manufacture of a school teaching aid in the form of a jet engine model designed primarily for teaching control technology. The jet engine model is implemented for the Laboratory of Applied Informatics and Physics at the Higher Vocational School in Sezimovo Ústí. The construction is described here, including the actual production of the jet engine. This is followed by a detailed description of the jet engine speed control design from the creation of a computer simulation model, its identification from the step response of the system, to the design of the PID controller and its application to the jet engine model.

Key words: Jet engine, 3D printing, systém, model, step response, static transfer function, system identification, control, PID, root locus, MATLAB, Simulink.

Obsah

Seznam použitých symbolů	ix
Seznam obrázků	xi
Seznam tabulek	xiii
1 Úvod	1
2 Výroba proudového motoru	3
2.1 Výběr vhodného elektromotoru a způsobu snímání otáček	4
2.2 Konstrukční úpravy a realizace 3D tisku	6
2.2.1 Sestavení proudového motoru	7
2.2.2 Konstrukce brzdy	9
2.2.3 Spojení elektromotoru s proudovým motorem	11
3 Počítačový model proudového motoru	13
3.1 Vstup a výstup reálného systému	13
3.2 Statické převodní charakteristiky motoru	14
3.3 Identifikace dynamického modelu motoru	16
3.3.1 Určení přenosu proudového motoru z přechodové charakteristiky	17
3.3.2 Porovnání získaného přenosu s odezvou reálného modelu	18
4 Řízení otáček proudového motoru	21
4.1 Návrh PID regulace otáček proudového motoru	21
4.1.1 Jednoduchý postup návrhu P regulátoru	22
4.2 Geometrické místo kořenů a návrh PID regulace	23
4.2.1 Návrh P regulátoru pomocí GMK	23
4.2.1.1 Aplikace navržené P regulace na reálný systém	27

4.2.2	Návrh PI regulátoru pomocí GMK	31
4.2.2.1	Aplikace navržené PI regulace na reálný systém	35
4.3	Realizace PID regulace pomocí PLC	37
5	Závěr	39
	Literatura	42
A	Obsah přiloženého DVD	I
B	Použitý software	III
C	Časový plán absolventské práce	V
D	Rozpočet projektu	VII
E	Převodník frekvence → napětí	IX
E.1	Popis převodníku frekvence → napětí	IX

Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
f	frekvence	Hz
i_b	proud do báze tranzistoru	A
i_m	proud protékající elektromotorem	A
k_p	proporcionální zesílení PID regulátoru	-
k_i	integrační zesílení PID regulátoru	-
n	otáčky proudového motoru	min^{-1}
n_i	počet impulzů z enkodéru	-
t	čas	s
T_i	integrační časová konstanta PID regulátoru	s
u	elektrické napětí na vstupu do systému	V
u_m	elektrické napětí na elektromotoru	V
w_n	požadované otáčky proudového motoru	min^{-1}
φ	úhel otočení hřídele proudového motoru	rad
ω	úhlová rychlost motoru	rad s^{-1}
ω_1	nula přenosu PI regulátoru	rad s^{-1}

Seznam obrázků

2.1	3D model navrženého proudového motoru	3
2.2	Motor Pololu 12 V, 170 min ⁻¹	4
2.3	Hallův jev (WIKISKRIPTA, 2022)	5
2.4	Princip magnetického a optického enkodéru (ROZUM ROBOTICS, 2022)	5
2.5	Průběh signálu z enkodéru elektromotoru Polulu	5
2.6	Řez původním proudovým motorem (SHAKAL, CH., 2016)	6
2.7	Řez upraveným proudovým motorem	6
2.8	3D model hřídelů proudového motoru – způsob demontáže	7
2.9	3D model s ocelovými náboji	8
2.10	Náhled výkresu hřídele kompresoru	8
2.11	Náhled výkresu hřídele turbíny	9
2.12	Umístění brzdy na proudovém motoru (3D model)	10
2.13	3D model brzdy proudového motoru	10
2.14	3D model brzdy – nastavení maximální brzdné síly	11
2.15	Ocelová spojka	11
2.16	Provedení ocelové spojky	12
2.17	Povolený maximální náklon elektromotoru	12
2.18	Výsledná podoba proudového motoru včetně elektroniky	12
3.1	Proudový motor (vstup a výstup systému)	14
3.2	Statická převodní charakteristika proudového motoru $u \rightarrow n$	16
3.3	Odezva proudového motoru na vstupní skok	17
3.4	Přechodová charakteristika motoru a jeho přenosu	18
3.5	Simulinkový model pro verifikaci počítačového modelu proudového motoru	19
3.6	Nelineární model proudového motoru: pohled pod masku	19
3.7	Porovnání odezvy proudového motoru a jeho modelu	19
3.8	Detail časových odezev z obr. 3.7	20

4.1	Blokové schéma regulačního obvodu	21
4.2	Závislost obrazu výstupu na obrazu vstupu pomocí přenosu	22
4.3	Schéma uzavřené reg. smyčky: P regulátor a přenos systému	24
4.4	Výsledný přenos uzavřené regulační smyčky	24
4.5	GMK uzavřené regulační smyčky s proporcionálním regulátorem	26
4.6	Návrh P regulátoru v prostředí <code>sisotool</code>	27
4.7	Regulační smyčka: lineární model motoru s PID regulátorem	28
4.8	Časové odezvy regulační smyčky z obr. 4.7 s P regulátorem ($k_p = 0,275$) .	28
4.9	Regulační smyčka: nelineární model s PID regulátorem	29
4.10	Časové odezvy regulační smyčky z obr. 4.9 s P regulátorem ($k_p = 0,275$)	29
4.11	Regulační smyčky: reálný systém a nelineární model	30
4.12	Časové odezvy regulačních smyček z obr. 4.11 s P regulátorem ($k_p = 0,275$)	30
4.13	Detail časových odezev regulačních smyček z obr. 4.12	31
4.14	Schéma uzavřené regulační smyčky: PI regulátor a přenos systému	32
4.15	Výsledný přenos uzavřené regulační smyčky	32
4.16	GMK uzavřené regulační smyčky přenosu (4.4) s PI regulátorem	33
4.17	Návrh PI regulátoru v prostředí <code>sisotool</code>	34
4.18	Časové odezvy regulační smyčky z obr. 4.7 ($k_p = 0,275, k_i = 0,5$)	35
4.19	Časové odezvy regulační smyčky z obr. 4.9 ($k_p = 0,275, k_i = 0,5$)	36
4.20	Časové odezvy regulačních smyček z obr. 4.11 ($k_p = 0,275, k_i = 0,5$) . . .	36
4.21	Detail časových odezev regulačních smyček z obr. 4.20	37
4.22	PID algoritmus pro PLC firmy AMiT	38
E.1	Fotografie převodníku frekvence \rightarrow napětí	XVI

Seznam tabulek

2.1	Označení vodičů motoru	4
3.1	Statická převodní charakteristika proudového motoru $u \rightarrow n$	15
D.1	Finanční rozpočet projektu	VII
D.2	Hodinový rozpočet projektu	VIII

Kapitola 1

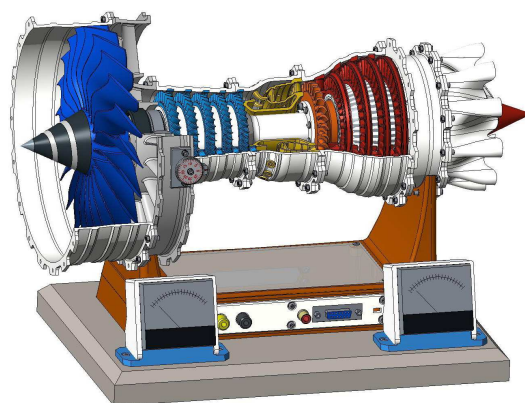
Úvod

V dnešním světě lze kolem sebe spatřit mnoho zařízení, která fungují bez zásahu člověka, to jest automaticky. Například robotické vysavače a sekačky, automatické vytápění budov, anebo systém, jež je součástí každého elektrokola, které „samo“ dokáže zvýšit svůj výkon při zdolávání velkého převýšení za lehké výpomoci unaveného cyklisty. Všechny tyto systémy využívají řízení, kterému se říká automatická regulace.

O té se často hovoří jako o skryté technologii, neboť pokud vše pracuje správně, tak si málokdo její přítomnost uvědomuje.

Regulace technických systémů umožňuje udržovat výstupní veličiny na požadovaných hodnotách. Při automatické regulaci se zjišťují, to znamená měří pomocí tak zvaných snímačů fyzikálních veličin, hodnoty řízených veličin a porovnávají se s hodnotami požadovanými. Podle zjištěné momentální odchylky (požadovaná mínus skutečná hodnota) se zasahuje do regulovaného procesu tak, aby tato odchylka byla co nejmenší. To znamená, že při regulaci existuje vždy zpětná vazba od výstupu systému na jeho vstup (ROUBAL, J. et al., 2011; ROUBAL, J., 2012), která je dnes nejčastěji realizována počítačem nebo programovatelným automatem (PLC).

Návrh kvalitní regulace a úlohy s tím spojené předpokládají interdisciplinární znalosti z oborů jako je matematika, fyzika, elektronika, automatizace, výpočetní technika a v neposlední řadě strojírenství. Výuka regulační techniky by byla bez praktických pokusů na reálných systémech, na kterých si lze vyzkoušet jejich řízení, poměrně obtížná,



dosti nenázorná a příliš nezáživná. V Laboratoři aplikované informatiky a fyziky na Vyšší odborné škole v Sezimově Ústí již vzniklo v rámci absolventských prací, pod vedením vedoucího této práce, několik pomůcek k výuce regulační techniky (ŠIKÝŘ, T., 2011; BOŠTIČKA, J., 2014; RABIŇÁK, P., 2014; PAVLÁT, P., 2015). Také zde vznikly práce zabývající se přímo návrhem a následnou realizací řízení, a to, buď laboratorních systémů (VACEK, J., 2014; MAREK, J., 2019), nebo průmyslových technologií (BRYNYCH, T., 2017). Ale vyložení jednoduchý systém, jehož součástí by byl i podrobněji popsany postup návrhu PID regulátoru, ve zdejší laboratoři doposud chyběl.

Cílem této absolventské práce je vytvořit učební pomůcku, která umožní žákům a studentům lépe pochopit a vyzkoušet si základní fyzikální pochody probíhající v regulační technice. Dalším cílem je na této vyrobené učební pomůcce ukázat způsob řešení regulace na jednoduchém dynamickém systému, jakým model vyráběného proudového motoru beze sporu je. Práce ukáže systematický postup při návrhu řízení od modelování dynamických systémů, přes jejich identifikaci, návrh regulátoru na základě identifikovaného modelu, jeho otestování na simulačním modelu a konečně aplikaci navrženého řízení na reálném systému.

Struktura této práce, která je napsána v $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}^1$, je následující. V kapitole 2 je popsán výběr vhodného 3D modelu proudového motoru a jeho následné konstrukční úpravy před samotným 3D tiskem. Dále je popsán výběr vhodného elektromotoru pro pohon proudového motoru a jeho uchycení uvnitř proudového motoru. Kapitola 3 popisuje tvorbu počítačového simulinkového modelu a jeho následnou identifikaci. Kapitola 4 se zabývá návrhem PID regulace otáček proudového motoru a aplikací navržené regulace na reálný systém. V závěru jsou popsány dosažené výsledky a analýza problémů, které vznikly během realizace této práce. V přílohách práce je uveden obsah příloženého DVD, použitý software, časový plán AP, dále pak finanční rozpočet tohoto projektu a návrh elektroniky pro komunikaci s proudovým motorem.

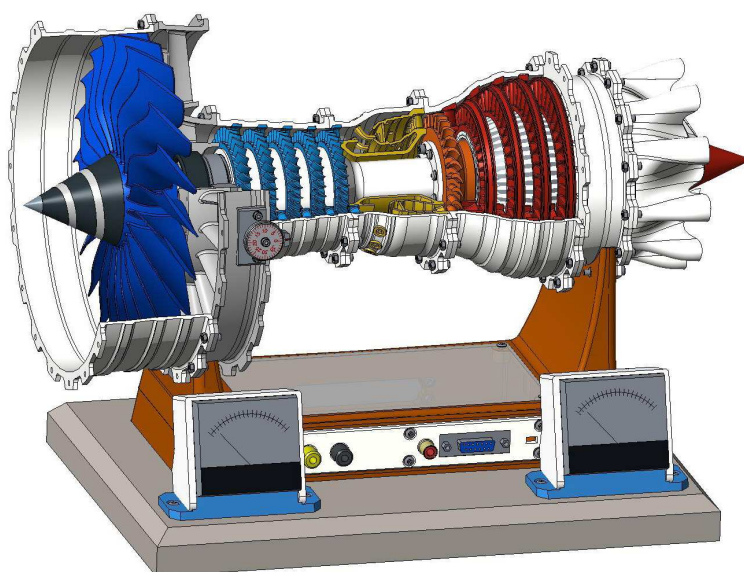
¹ $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ je rozšíření systému \LaTeX , což je kolekce maker pro \TeX . \TeX je ochranná známka American Mathematical Society. LaTeX čti [l_at_ex].

Kapitola 2

Výroba proudového motoru

Tato kapitola popisuje vlastní výrobu proudového motoru včetně jeho konstrukčních úprav, to je výběr vhodného elektromotoru, vyřešení měření otáček motoru a v neposlední řadě návrh uložení elektroniky a s tím související návrh stojanu celé učební pomůcky. 3D model této vyráběné učební pomůcky je na obr. 2.1.

Pro návrh konstrukce proudového motoru byl použit již hotový 3D model, který je volně dostupný na internetových stránkách Thingiverse (SHAKAL, CH., 2016). Tyto stránky jsou v podstatě jakási banka 3D modelů, které jsou volně stažitelné a které lze použít k vlastní tvorbě či potřebě. Výroba proudového motoru a jeho konstrukční úpravy byly časově nejnáročnější a nejpracnější částí celé absolventské práce, podrobněji viz následující podkapitoly.



Obrázek 2.1: 3D model navrženého proudového motoru

2.1 Výběr vhodného elektromotoru a způsobu snímání otáček

Při výběru vhodného elektromotoru pro pohon proudového motoru byl brán zřetel na jeho malé rozměry tak, aby se vešel do útrob proudového motoru a taktéž se přihlíželo k možnosti vybrat si ze široké produktové řady pro různé rozsahy otáček a vhodné provozní napětí. Z tohoto úhlu pohledu velmi dobře vyhovoval americký výrobce robotických komponent Pololu. V jeho produktové řadě malých elektromotorů lze též vybrat elektromotor s již zabudovaným enkodérem pro snímání úhlu otočení hřídele motoru. Výrobce Pololu poskytuje kvalitní technickou podporu, takže bylo možné stáhnout z jeho internetových stránek kvalitní 3D model celého motoru i s enkodérem, což byla velká výhoda při úpravě vnitřních prostor proudového motoru, kde nebylo moc místa a každý milimetr hrál svoji roli.

Pro pohon proudového motoru byl vybrán motor Pololu s vestavěnou převodovkou a vestavěným enkodérem s těmito parametry: jmenovité napětí 12 V, jmenovité otáčky motoru 170 min^{-1} , poměr převodového stupně převodovky 1:47. Vybraný elektromotor je na obr. 2.2, barevné označení vodičů tohoto motoru uvádí tabulka 2.1. Enkodér motoru má dva kanály a na jedno otočení hřídele elektromotoru připadá 48 impulzů z enkodéru. Do počtu 48 impulzů na jednu otáčku elektromotoru jsou započteny impulzy z obou kanálů zároveň a počítá se náběžná i sestupná hrana impulzu. Pokud by se jako výstup z enkodéru počítala frekvence a to pouze z jednoho kanálu, potom na jedno otočení hřídele elektromotoru připadá 12 period, to je

$$\frac{48}{(\text{počet kanálů}) \cdot (\text{počet hran vzestupných i náběžných})} = \frac{48}{2 \cdot 2} = 12.$$

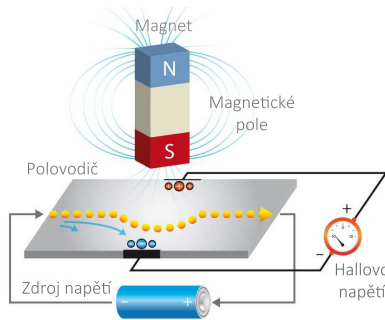
Tabulka 2.1: Označení vodičů motoru

Barva vodiče	Funkce
červená	napájení motoru (+)
černá	napájení motoru (-)
zelená	napájení enkodéru (GND)
modrá	napájení enkodéru (+5 V)
žlutá	výstup enkodéru A
bílá	výstup enkodéru B



Obrázek 2.2: Motor Pololu 12 V, 170 min^{-1}

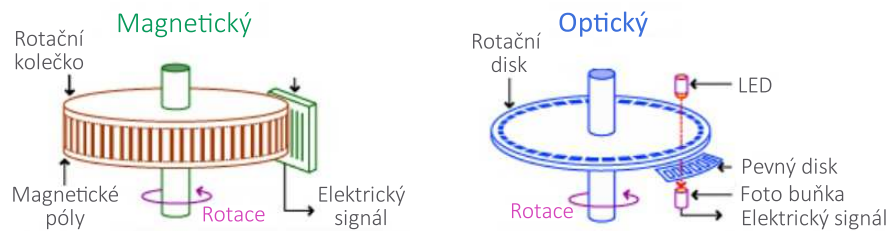
2.1. VÝBĚR VHODNÉHO ELEKTROMOTORU A ZPŮSOBU SNÍMÁNÍ OTÁČEK 5



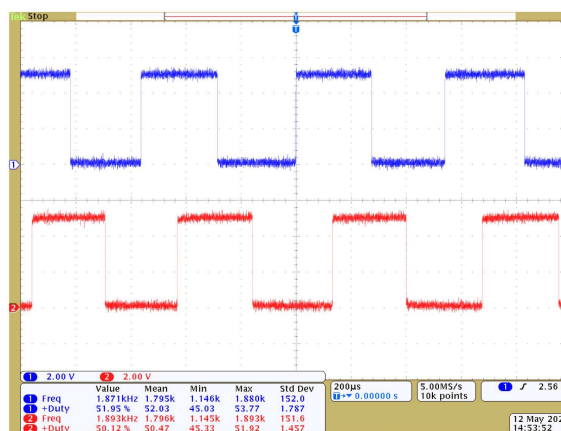
Obrázek 2.3: Hallův jev (WIKISKRIPTA, 2022)

Motor Pololu používá enkodér založený na principu tzv. Hallova jevu, viz obr. 2.3, kde skrze polovodičovou desku teče proud a díky kolmému magnetickému poli je náboj v destičce přeskupen na jednu stranu a toto přeskupení vytvoří měřitelné tzv. Hallovo napětí na jeho okrajích (stranách). Toto napětí je úměrné síle magnetického pole.

U servopohonů a u malých elektromotorů se pro snímání polohy rotoru, respektive otáček motoru používají dva typy enkodérů, viz obr. 2.4. Jeden typ je optický, založený na principu optické závory a druhý typ magnetický, využívající již výše zmíněného principu Hallova jevu. Magnetické enkodéry mohou být ovlivněny okolním magnetickým polem nebo feromagnetickým materiálem. Naproti tomu optický encoder je rezistentní vůči magnetickému poli, ale může být náchylný na prachové částice.



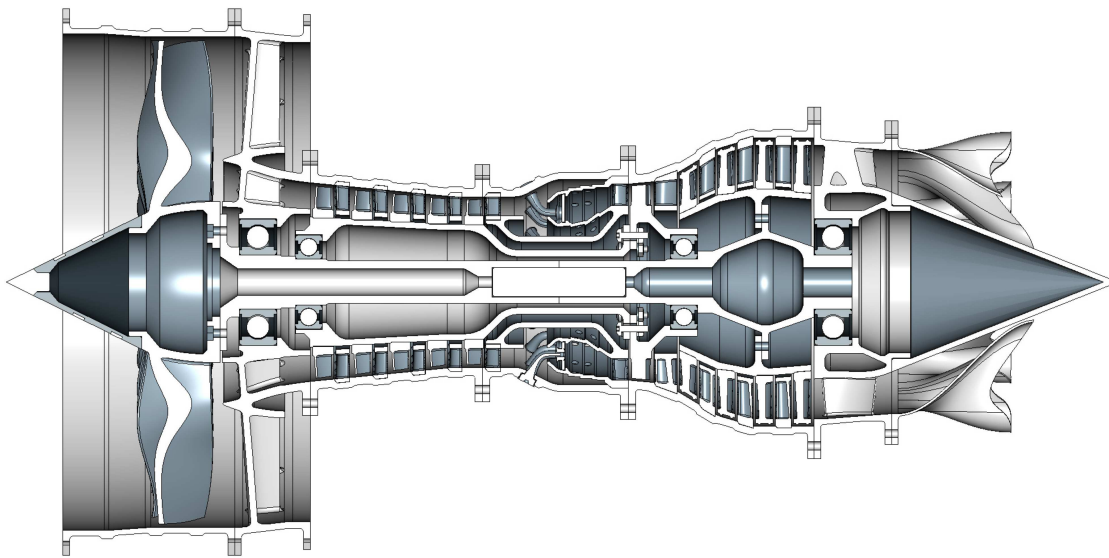
Obrázek 2.4: Princip magnetického a optického enkodéru (ROZUM ROBOTICS, 2022)



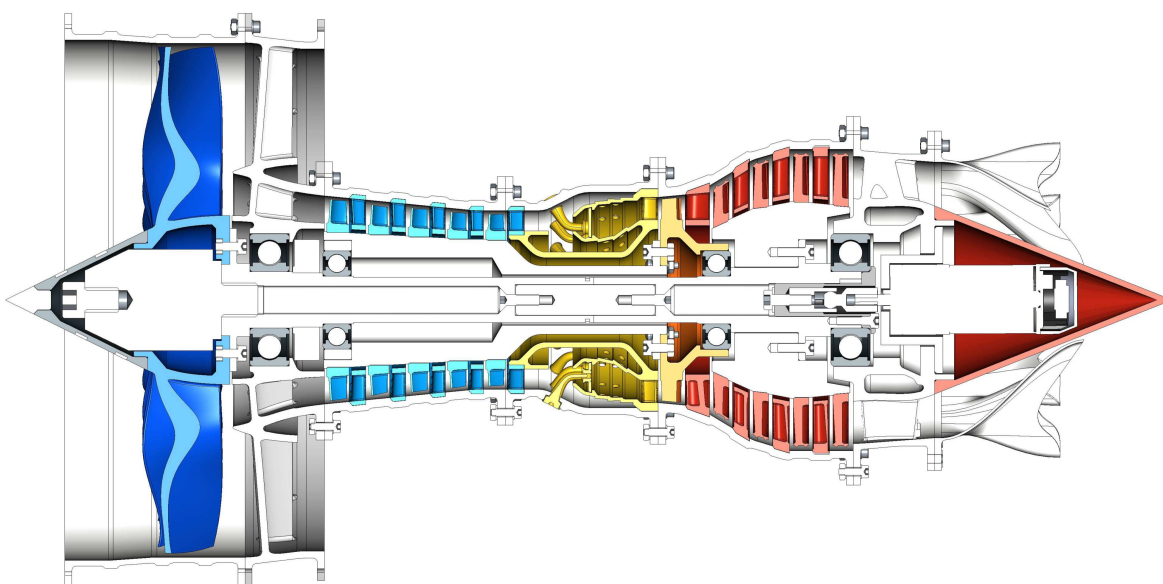
Obrázek 2.5: Průběh signálu z enkodéru elektromotoru Pololu – převzato z katalogového listu motoru

2.2 Konstrukční úpravy a realizace 3D tisku

Před samotným 3D tiskem jednotlivých částí motoru bylo potřeba konstrukčně upravit vnitřní uspořádání pod axiální turbínou proudového motoru tak, aby bylo možné zabudovat elektromotor Pololu s enkodérem dovnitř proudového motoru, viz porovnání původní verze na obr. 2.6 a upravené verze na obr. 2.7.



Obrázek 2.6: Řez původním proudovým motorem (SHAKAL, CH., 2016)



Obrázek 2.7: Řez upraveným proudovým motorem

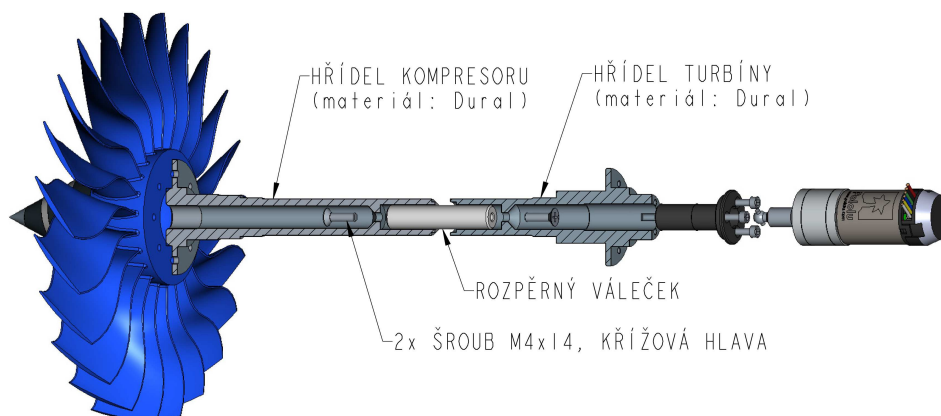
Díly motoru byly vytištěné na domácí 3D tiskárně čínského výrobce Tronxy XY-2. Jedná se o levnou variantu (čtvrtinová cena) k zavedené značce českého výrobce ve světě dobře známých a kvalitních tiskáren Prusa. Kvalita výtisků z tiskárny Tronxy, dle zkušeností autora této práce, je téměř srovnatelná s výtisky z tiskárny Prusa.

Pro plastové výtisky byl zvolen plast PLA. Jedná se o plastickou hmotu vyrobenou z biomasy, konkrétně z kukuřičného škrobu. Od klasických plastů se liší tím, že je možné jej biologicky degradovat, zkompostovat a přeměnit na kvalitní biomasu či humus, čímž nepředstavuje ekologickou zátěž pro životní prostředí. Výtisky z PLA plastu mají vysokou pevnost a jediná nevýhoda je jejich nízká teplotní odolnost – výtisky se začínají deformovat od 55 °C – 60 °C (PRŮŠA, J., 2022).

2.2.1 Sestavení proudového motoru

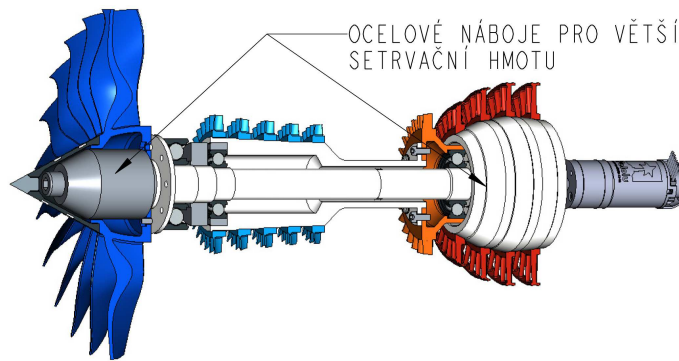
Při prvním složení plastového modelu proudového motoru bylo zřejmé, že nebude jednoduché poskládat jednotlivé díly tak, aby se rotor hladce otáčel a nedocházelo k brzdění rotoru v důsledku kolizí různých rotačních částí motoru. Vždy po smontování celého proudového motoru někde docházelo k drobným kolizím a z motoru se ozývaly různé vrzavé zvuky. Bylo provedeno zvětšení vůle mezi lopatkami turbíny z 0,8 mm na 1,3 mm a lopatky byly znovu vytištěny. Dále bylo rozhodnuto, že se hlavní hřídel, která se skládá ze dvou částí, vyrobí z duralu. Náhled výkresové dokumentace k těmto hřídelím je na obr. 2.10 a 2.11. Kompletní výkresová dokumentace je v příloze této práce.

Na obrázku 2.8 je vidět způsob rozpojení hřídelů, které umožňuje demontáž celého motoru. Pro demontáž motoru je potřeba vědět, že obě dvě hřídele jsou k sobě spojeny pomocí rozpěrného válečku a dvou zápusťných šroubů M4×14 s křížovou hlavou.

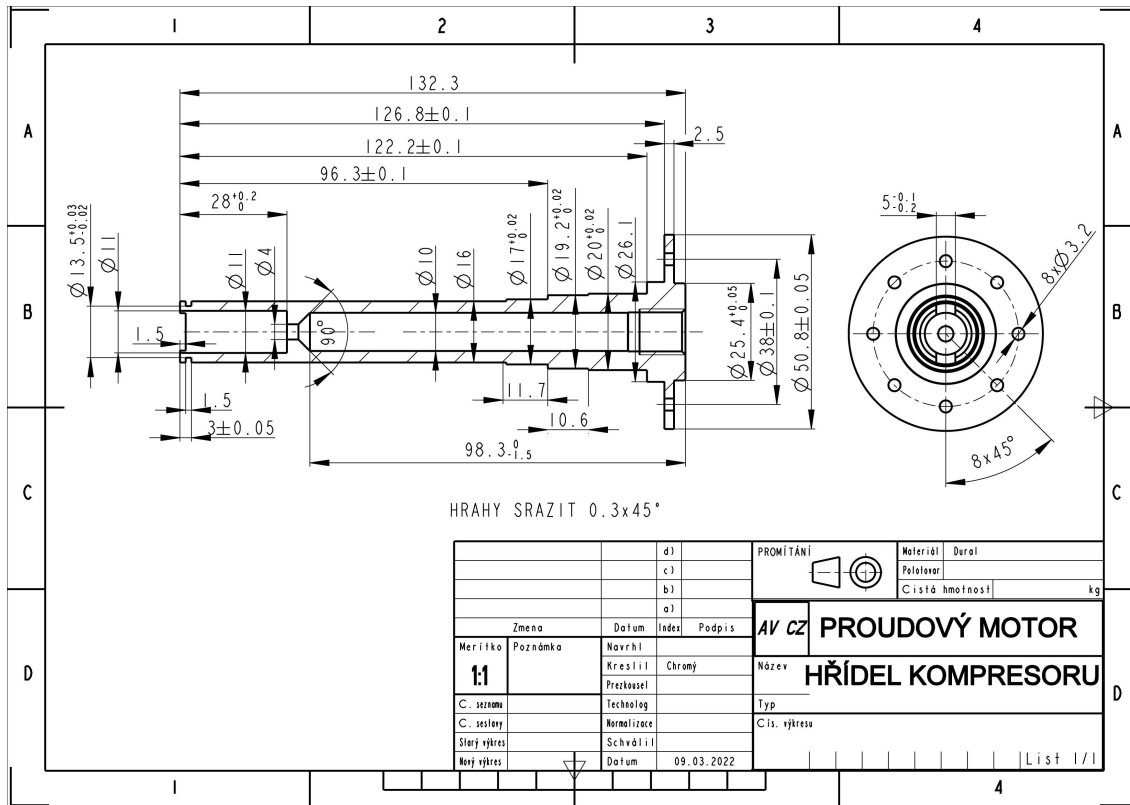


Obrázek 2.8: 3D model hřídelů proudového motoru – způsob demontáže

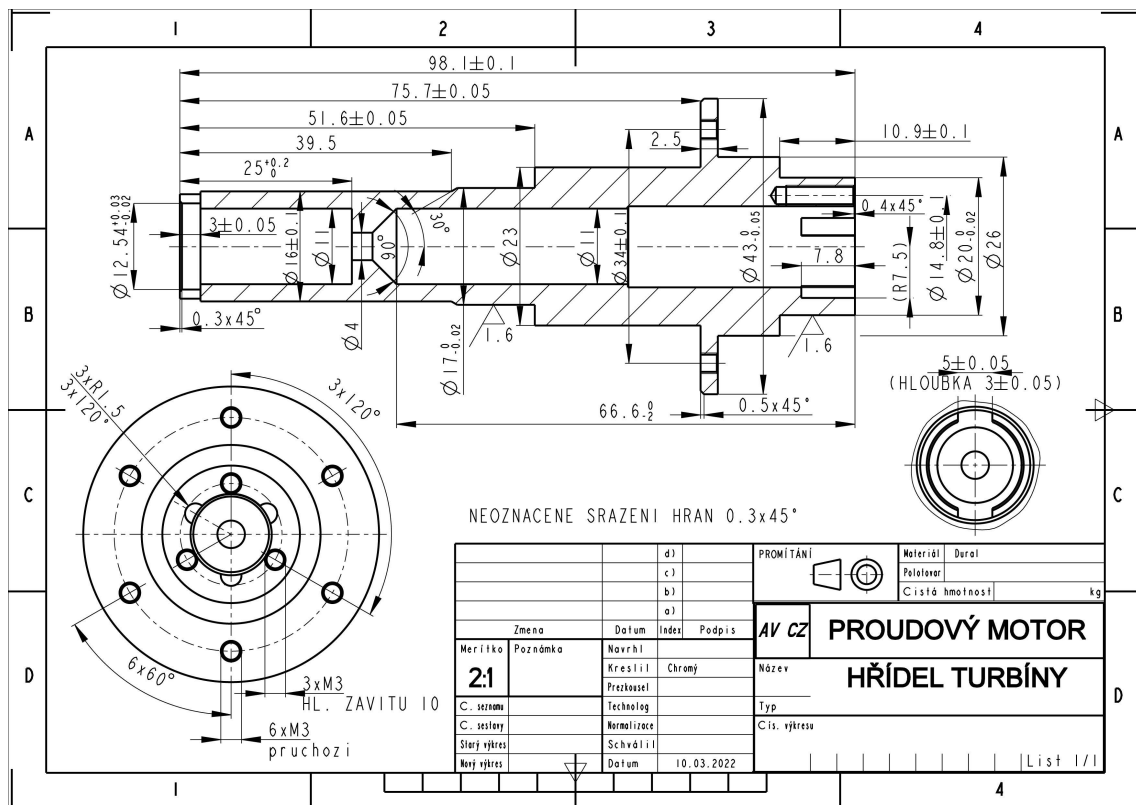
Dále při prvním roztočení proudového motoru bylo shledáno, že elektromotor je docela výkonný na lehký plastový model proudového motoru. To se projevovalo velmi rychlou změnou otáček, což nebylo vhodné pro výukové potřeby regulace. Proto bylo přistoupeno k vyrobení dvou ocelových nábojů, které přidaly proudovému motoru setrvační hmotu (zvýšily moment setrvačnosti) a zpomalily tak reakci na změnu napětí elektromotoru, viz obr. 2.9.



Obrázek 2.9: 3D model s ocelovými náboji



Obrázek 2.10: Náhled výkresu hřídele kompresoru



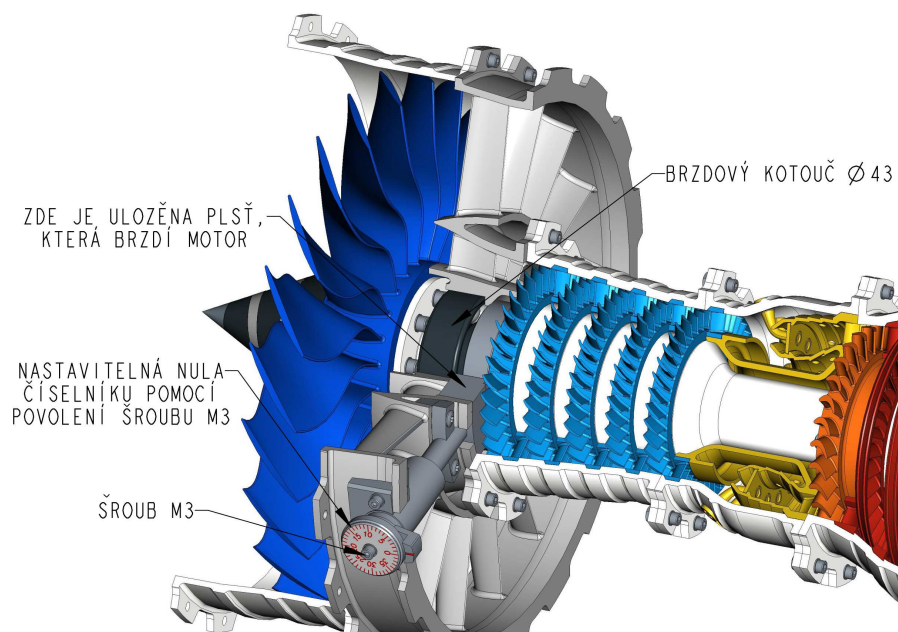
Obrázek 2.11: Náhled výkresu hřídele turbíny

2.2.2 Konstrukce brzdy

Aby bylo možné při testování kvality regulace simulovat poruchovou veličinu, bylo rozhodnuto vymyslet a konstrukčně zakomponovat do motoru mechanickou brzdou, která by snižovala otáčky proudového motoru (simulace poruchové veličiny). Jako nejlepší varianta se jevila brzda v podobě šroubu, který by se šroubováním přes nějaký mechanismu tlačil na rotor proudového motoru a tím by ho přibrzdil.

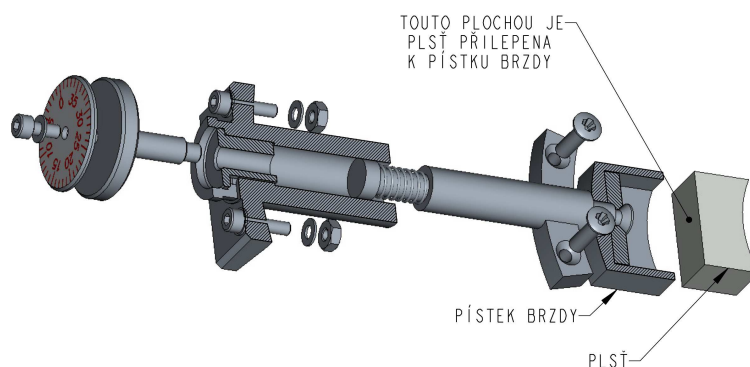
První varianta brzdy se příliš neosvědčila. Třecí destička byla přivedena přímo na rotor kompresoru o průměru 19 mm. Brzda nedokázala vyvinout dostatečný přítlak, aby přibrzdila proudový motor. Proto byla přepracována a výsledné provedení je vidět na obr. 2.12. Na hřídel kompresoru bylo nalisováno duralové kolečko, jakýsi brzdny kotouč průměru 43 mm, které zvětšilo rameno páky, přes kterou brzda přibrzdí proudový motor. Taktéž byla zvětšena přitlačná plocha působící na brzdny kotouč.

Nastavitelný šroub brzdy byl opatřen ciferníkem, aby bylo možné porovnávat jednotlivá nastavení intenzity brzdění. Třecí účinek brzdy je realizován přes vloženou plst', která se bude časem opotřebovávat a bude se tedy zároveň měnit i pozice nuly na číselníku.



Obrázek 2.12: Umístění brzdy na proudovém motoru (3D model)

Z toho důvodu je možné číselníkem otáčet povolením šroubu M3. Pokud bude potřeba vyměnit plst' zajišťující brzdny účinek z důvodu jeho opotřebení, je možné brzdu demontovat bez zasahování do šroubované sestavy proudového motoru. Způsob demontáže brzdy by měl být patrný z následujícího obrázku.



Obrázek 2.13: 3D model brzdy proudového motoru

Také bylo potřeba zajistit, aby brzdny mechanismus nevyvinul větší přítlačnou sílu, než na jakou je systém proudového motoru navržen tak, aby nedocházelo k přílišnému namáhání elektromotoru (čím více bude motor brzděn, tím větší proud bude odebírat ze zdroje). Taktéž bylo žádoucí snadné přenastavení maximální přítlačné síly, ať už z důvodu opotřebení plstěného brzdny špalíku a nebo z důvodu optimálního nastavení zesilo-

vacího tranzistoru. Proto byl vymyšlen způsob nastavení maximální přitlačné síly pomocí distančních podložek 0,1 mm (0,2 mm), kterými se zajišťuje nastavení dorazu otočného kolečka s ciferníkem, viz následující obrázek.



Obrázek 2.14: 3D model brzdy – nastavení maximální brzdné síly

2.2.3 Spojení elektromotoru s proudovým motorem

Spojení mezi elektromotorem a proudovým motorem bylo nejdříve vyřešeno vytištěním plastové spojky. Toto řešení se ukázalo jako nevhodné, neboť po delší době provozu proudového motoru se začaly ozývat pravidelné rušivé zvuky, které nesvědčily o hladkém otáčení hlavního hřídele proudového motoru. Motor byl proto rozebrán a hledala se příčina poruchy. Bylo shledáno, že konstrukce spojky z plastu po čase ztratí svoji pevnost a dojde k prokluzu mezi hřídelí elektromotoru a spojkou. Dále bylo shledáno, že navrhovaný tvar spojky dostatečně neeliminuje nesouosost hřídele elektromotoru a rotoru proudového motoru, čímž docházelo k nadměrnému namáhání a zahřívání plastové spojky. Plastová spojka byla vytištěna z materiálu PLA, který začíná měknout již při 50 °C. Proto bylo přistoupeno k přepracování konstrukce spojky a spojka byla vyrobena z oceli, viz obr. 2.15. Ocelová spojka se skládá ze dvou dílů, viz obr. 2.16.

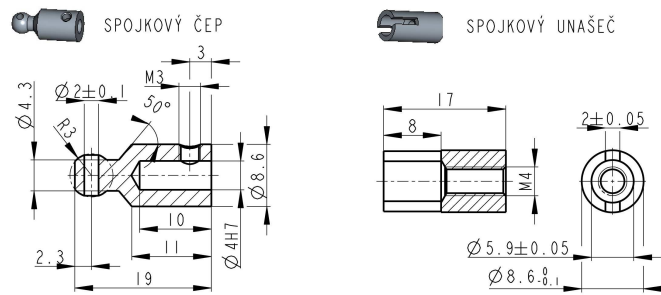
V dílu spojkový čep je zalisován pružný kolík průměru 2 mm, který je zajištěn lepidlem Loctite 638. Tento díl je posléze nasazen na hřídel elektromotoru a zajištěn stavitelným šroubem M3. Protikus pojmenovaný spojkový unašeč je pevně spojen přes šroubový spoj



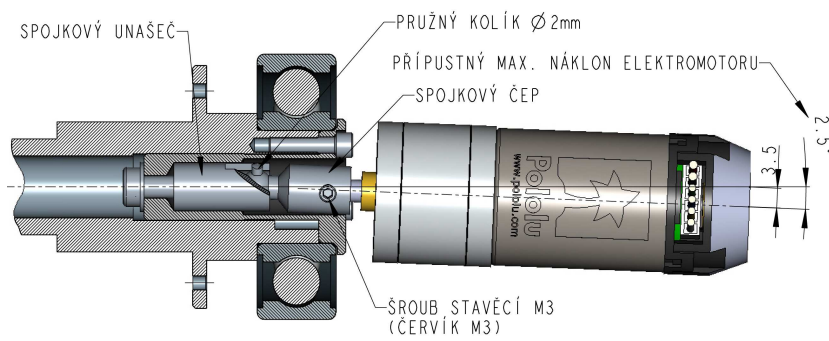
Obrázek 2.15: Ocelová spojka

s vlastní hřídelí proudového motoru. Takto navržená spojka umožní eliminovat vyosení elektromotoru až do 2,5°, což činí na konci motoru vyosení 3,5 mm, viz obr. 2.17. K takto velkému vyosení by reálně nemělo dojít (je i pouhým okem patrné) a navržená spojka by měla dostatečně eliminovat případnou nesouosost hřídelí.

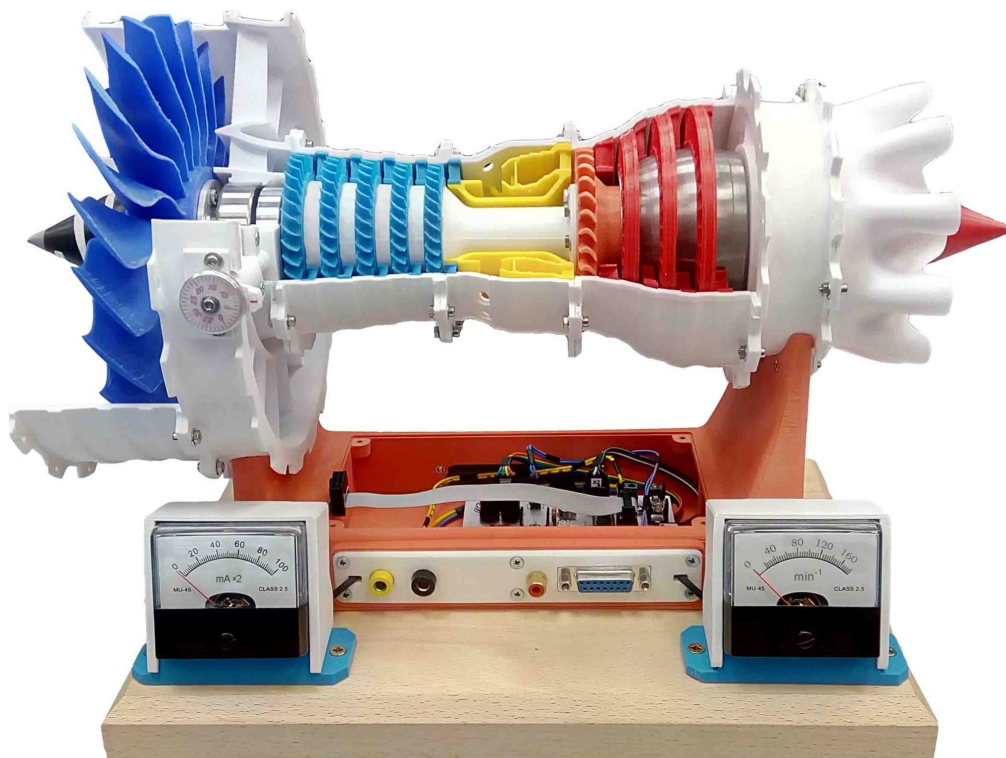
Fotografie výsledné podoby modelu proudového motoru, který byl navržen a následně vyroben v rámci této absolventské práce, včetně elektroniky pro komunikaci počítače s motorem, je zobrazena na obr. 2.18.



Obrázek 2.16: Provedení ocelové spojky



Obrázek 2.17: Povolný maximální náklon elektromotoru



Obrázek 2.18: Výsledná podoba proudového motoru včetně elektroniky

Kapitola 3

Počítačový simulační model proudového motoru

Přestože by mohl být pro takto jednoduchý systém, jakým bezesporu proudový motor z této práce je, navržen PID regulátor metodou pokus omyl, bude v této absolventské práci použita systematictější metoda návrhu PID regulace, která je založena na modelování dynamických systémů pomocí počítače (ROUBAL, J., 2012; ROUBAL, J. et al., 2011). To znamená, že bude nejprve nalezen počítačový simulační model, který bude reprezentovat chování reálného proudového motoru, a až poté bude na základě tohoto počítačového modelu navržen PID regulátor pro řízení otáček proudového motoru.

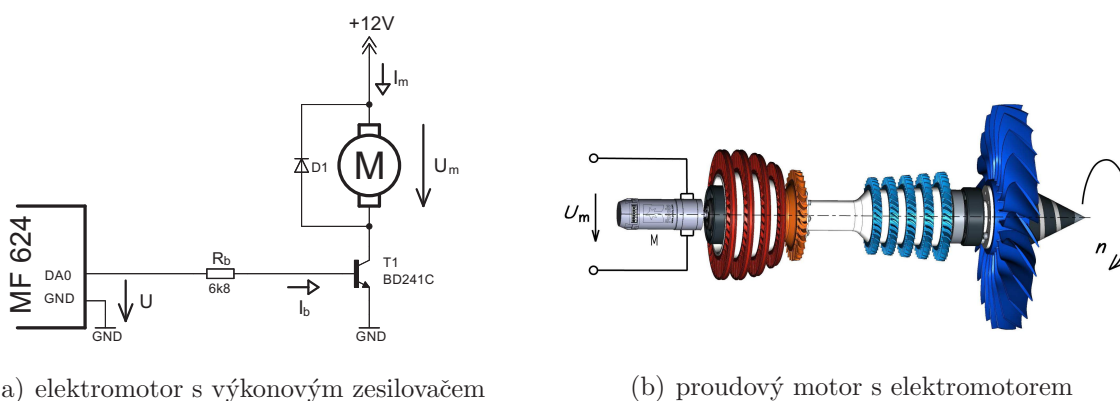
Počítačový simulační model bude v této práci reprezentován přenosem v Laplaceově transformaci mezi vstupem a výstupem reálného systému (proudového motoru). Tento přenos bude získán identifikací z přechodové charakteristiky reálného systému pomocí metody profesora Strejce (FENCLOVÁ, M. et al., 1993; ROUBAL, J. et al., 2011, kapitola 12). Ještě před samotným hledáním přenosu motoru budou změřeny statické převodní charakteristiky proudového motoru. Ty ukáží oblast, ve které se proudový motor chová lineárně.

3.1 Vstup a výstup reálného systému

Na začátku tvorby každého počítačového simulačního modelu je potřeba určit vstupy a výstupy daného systému (ROUBAL, J., 2012, strana 10). Při modelování dynamických systémů jsou vstupy systému nezávislé veličiny a výstupy závislé veličiny. Z toho plyne,

že vstupem proudového motoru je napětí na elektromotoru u_m [V]. Výstupem systému jsou otáčky proudového motoru n [min^{-1}].

Protože proudový motor bude řízen počítačem, bude nutné jej rozšířit o výkonový zesilovač s tranzistorem, viz schéma na následujícím obrázku. Potom vstupem systému (proudový motor s výkonovým zesilovačem) bude napětí u [V] na analogovém výstupu počítačové karty MF 624 (HUMUSOFT, 1991). Toto napětí ovládá proud do báze tranzistoru, který tento bázev proud zesiluje na proud kolektorový, to je proud, který protéká elektromotorem. Řízeným systémem v této práci tedy nebude samotný proudový motor, ale motor včetně tranzistorového zesilovače, viz následující obrázek.



(a) elektromotor s výkonovým zesilovačem

(b) proudový motor s elektromotorem

Obrázek 3.1: Proudový motor (vstup a výstup systému)

3.2 Statické převodní charakteristiky proudového motoru

Prvním krokem identifikace dynamického systému je změření statických charakteristik (ROUBAL, J., 2012, kapitoly 3.1.1.1 a 3.1.3.1). V první řadě je třeba určit statickou převodní charakteristiku snímače. V případě systému proudového motoru, který je náplní této absolventské práce, se jedná o snímač úhlu otočení elektromotoru, který je řešen pomocí enkodéru založeného na principu Hallova jevu. V katalogovém listu k tomuto enkodéru výrobce uvádí, že na jednu otáčku rotoru elektromotoru připadá 48 impulzů, viz kapitola 2.1. Součástí elektromotoru je i převodovka s převodovým poměrem 1 : 47. Z toho vyplývá, že na jedno otočení výstupní hřídele (za převodovkou) elektromotoru

připadá $48 \cdot 47 = 2256$ impulzů. Odtud plyne, že pro úhel otočení hřídele proudového motoru φ [rad] platí

$$\varphi(t) = \frac{2\pi}{2256} n_i(t), \quad (3.1)$$

kde n_i je počet impulzů z enkodéru.

Pro potřeby regulace je třeba z úhlu otočení hřídele motoru φ [rad] určit otáčky proudového motoru n [min^{-1}]. To bude v této práci řešeno pomocí derivace úhlu otočení proudového motoru, tedy

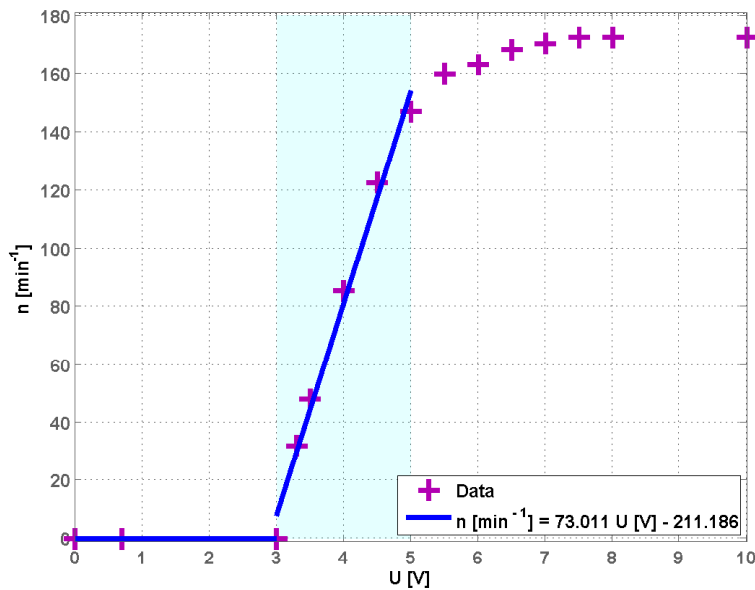
$$n(t) = \frac{60}{2\pi} \omega(t) = \frac{60}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt}. \quad (3.2)$$

Tím je vyřešena statická převodní charakteristika snímače.

Pro potřeby návrhu regulátoru, který vychází z lineární teorie řízení, je třeba zjistit, v jakém rozsahu otáček n [min^{-1}] se systém chová lineárně. K tomu je nutné změřit statickou převodní charakteristiku proudového motoru, která udává závislost otáček motoru n [min^{-1}] na napětí u [V] v ustáleném stavu, viz následující tabulka, respektive následující obrázek. Měření bylo provedeno tak, že bylo nejprve nastaveno na výstupu měřicí karty MF 624 napětí $u = 10$ V a poté bylo toto napětí postupně snižováno.

Tabulka 3.1: Statická převodní charakteristika proudového motoru $u \rightarrow n$

U [V]	I_b [mA]	U_m [V]	I_m [mA]	f [Hz]	n [min^{-1}]
0,0	0,00	0,00	0	0	0,0
0,7	0,01	0,01	0,5	0	0,0
3,0	0,32	0,50	52	0	0,0
3,3	0,37	2,50	57	300	31,9
3,5	0,40	3,50	62	450	47,9
4,0	0,48	6,11	72	800	85,1
4,5	0,54	8,52	82	1150	122,3
5,0	0,62	10,15	90	1380	146,8
5,5	0,69	10,70	95	1500	159,6
6,0	0,77	11,10	98	1530	162,8
6,5	0,84	11,30	100	1580	168,1
7,0	0,91	11,51	100	1600	170,2
7,5	0,98	11,62	100	1620	172,3
8,0	1,06	11,70	101	1620	172,3
10,0	1,35	11,79	101	1620	172,3



Obrázek 3.2: Statická převodní charakteristika proudového motoru $u \rightarrow n$

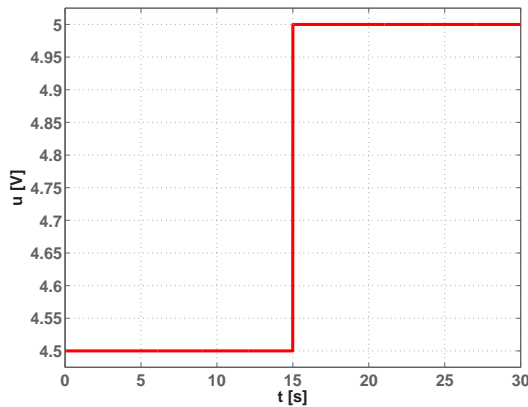
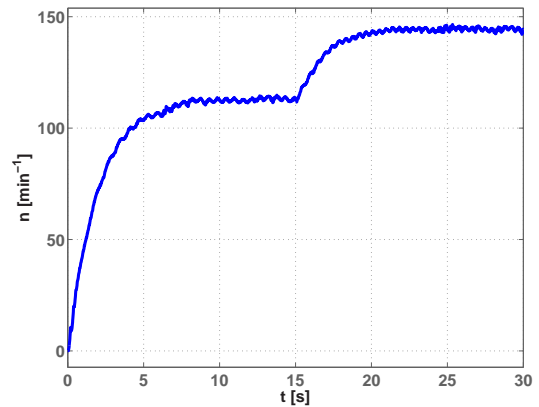
Na obrázku 3.2 je vidět pásmo necitlivosti, kdy motor nereaguje na vstupní napětí. Pásmo necitlivosti je v intervalu $u \in \langle 0; 3 \rangle$ V. Lineární oblast převodní charakteristiky je v intervalu $u \in \langle 3; 5 \rangle$ V. Pásmo saturace je $u > 10$ V. Z převodní charakteristiky proudového motoru tedy vyplývá, že PID regulátor bude navrhován, a tedy systém identifikován, právě v pásmu $u \in \langle 3; 5 \rangle$ V.

3.3 Identifikace dynamického modelu proudového motoru

Jak už bylo zmíněno výše, bude v této práci určen přenos proudového motoru z naměřené přechodové charakteristiky pomocí metody profesora Strejce (FENCLOVÁ, M. et al., 1993; ROUBAL, J. et al., 2011, kapitola 12). Hledaný přenos bude reprezentovat vztah mezi napětím u [V], které je přiváděno na bázi tranzistoru, viz obr. 3.1, a otáčkami rotoru proudového motoru n [min^{-1}]. Aby mohla být změřena relevantní přechodová charakteristika, musí být systém nejprve v ustáleném stavu. U tohoto systému může být zvolen ustálený stav pro $u \in \langle 3; 5 \rangle$ V, viz obr. 3.2, neboť se systém v tomto rozsahu chová lineárně (ROUBAL, J. et al., 2011, příklad 12.3).

3.3.1 Určení přenosu proudového motoru z přechodové charakteristiky

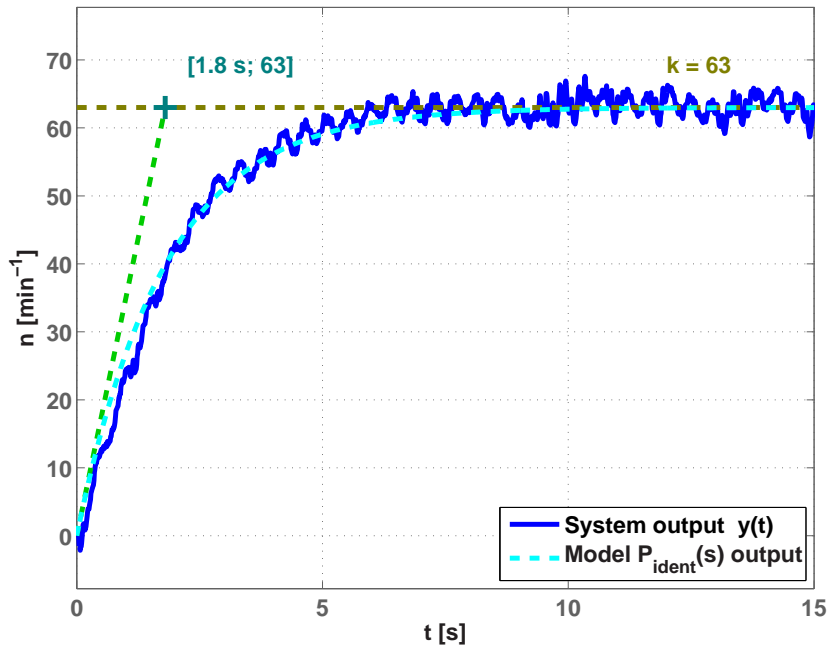
Přechodová charakteristika je grafickým vyjádřením přechodové funkce, která je definována jako časová odezva na jednotkový skok vstupní veličiny při nulových počátečních podmínkách (ROUBAL, J. et al., 2011). Z důvodu pásma necitlivosti, viz obr. 3.2, je třeba nejprve motor rozběhnout a počkat na ustálení otáček (ustálený stav) a až poté skokově zvýšit vstupní veličinu tak, jak je zobrazeno na následujícím obrázku. Ustálený stav systému v čase 15 s je definován hodnotami vstupní a výstupní veličiny, tedy $U_0 = 4,5 \text{ V}$ a $n_0 = 113 \text{ min}^{-1}$.

(a) průběh vstupní veličiny u [V](b) průběh výstupní veličiny n [min^{-1}]

Obrázek 3.3: Odezva proudového motoru na vstupní skok

Pomocí metody profesora Strejce lze z výše naměřené odezvy následně získat přenos v Laplaceově transformaci celého systému proudového motoru. K tomu lze s výhodou použít skript `IdentTF_bySTREJC.m`, který je součástí školních toolboxů pro softwarové prostředí MATLAB. Tento skript usnadní identifikaci přenosu a zobrazí odezvu nalezeného přenosu spolu s naměřenými daty, viz obrázek 3.4. Nicméně se nesmí zapomenout na to, že odezva systému, viz obr. 3.3(b), byla odezvou na 0,5-krát jednotkový skok, viz obr. 3.3(a). Proto je nutné, před použitím tohoto skriptu, vynásobit naměřené otáčky dvěma. Kompletní matlabovský skript je na příloženém DVD. Nalezený přenos proudového motoru ze vstupního napětí u [V] na výstupní otáčky n [min^{-1}] je

$$P(s) = \frac{63}{1,8s + 1}. \quad (3.3)$$



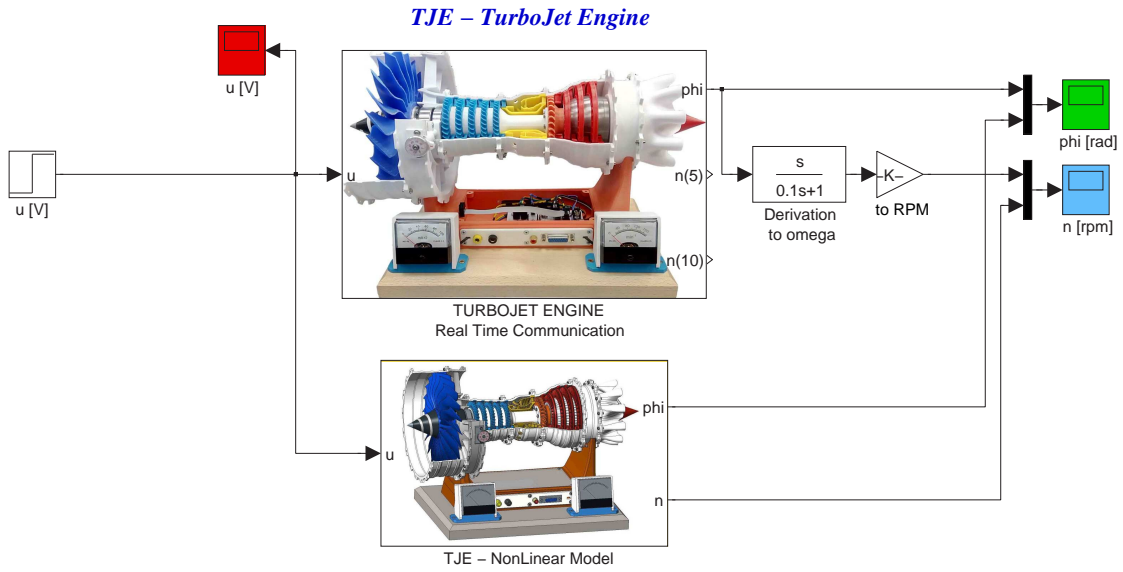
Obrázek 3.4: Přechodová charakteristika motoru a jeho přenosu

3.3.2 Porovnání získaného přenosu s odezvou reálného modelu

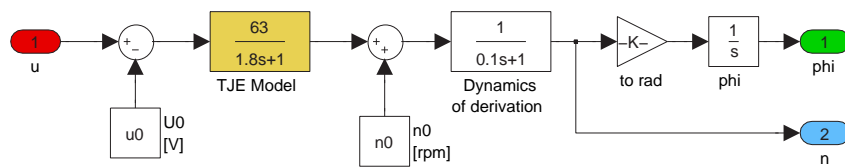
K ověření získaného přenosu poslouží simulinkové schéma na obrázku 3.5, pomocí kterého bude porovnána odezva získaného počítačového modelu (3.3) s odezvou reálného proudového motoru. Vrchní bloček v tomto schématu, s fotografií proudového motoru, slouží pro komunikaci s reálným systémem. Výstupem tohoto bločku je signál z enkodéru, který je v tomto schématu (pod maskou) přepočítáván na úhel hřídele pomocí vztahu (3.1). Dále je tento úhel přepočítáván na otáčky n [min^{-1}] pomocí rovnice (3.2). Aproximovanou derivaci realizuje bloček *Derivation to omega*. Konstanta *to RPM* realizuje pouze převod z radiánů za sekundu na otáčky za minutu.

Spodní větev schématu na obrázku 3.5 představuje počítačový nelineární model proudového motoru s přenosovou funkcí (3.3), která byla identifikována z přechodové charakteristiky na obr. 3.4. Vnitřní zapojení nelineárního modelu uvádí obrázek 3.6. V tomto zapojení je použit bloček *Dynamics of derivation*, který odpovídá dynamice aproximované derivace z obr. 3.5.

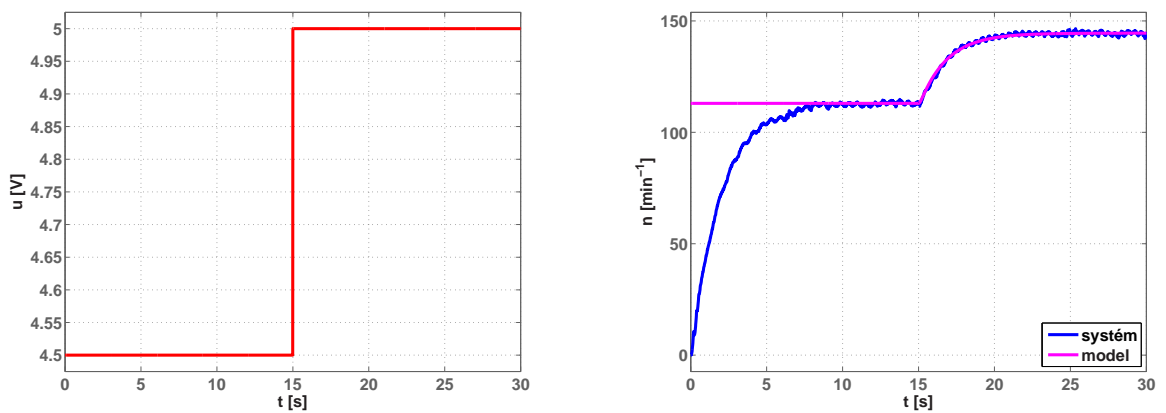
Výsledné porovnání odezvy nalezeného počítačového nelineárního modelu s odezvou reálného proudového motoru je možno vidět na obrázku 3.7. Na obr. 3.8 je zobrazen detail této skokové odezvy. Odtud je patrné, že nalezený model z obr. 3.6 je věrnou reprezentací reálného systému.



Obrázek 3.5: Simulinkový model pro verifikaci počítačového modelu proudového motoru



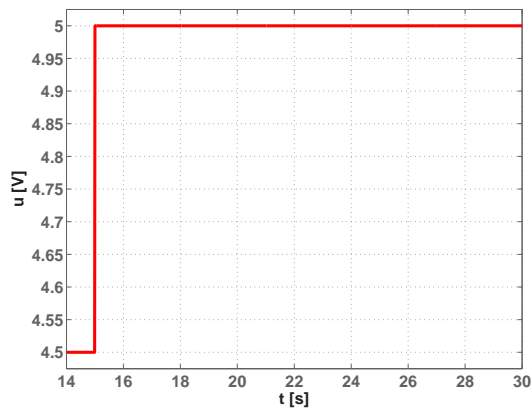
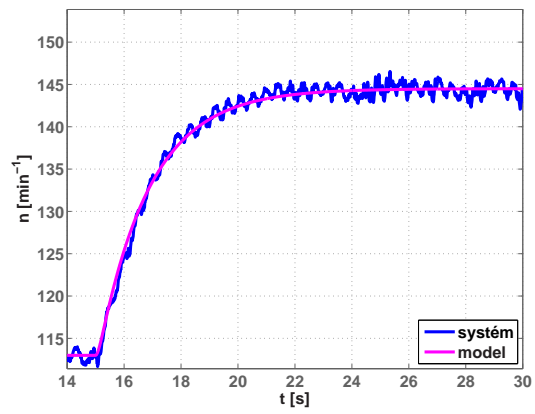
Obrázek 3.6: Nelineární model proudového motoru: pohled pod masku nelineárního modelu z obr. 3.5



(a) průběh vstupní veličiny u [V]

(b) průběh výstupní veličiny n [min^{-1}]

Obrázek 3.7: Porovnání odezvy proudového motoru a jeho modelu

(a) průběh vstupní veličiny u [V](b) průběh výstupní veličiny n [min^{-1}]

Obrázek 3.8: Detail časových odezev z obr. 3.7

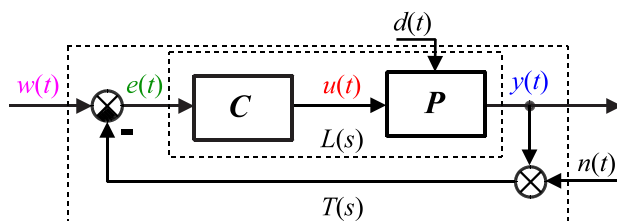
Kapitola 4

Řízení otáček proudového motoru

Poté, co byl v předchozí kapitole nalezen počítačový simulační model proudového motoru, lze přistoupit k návrhu řízení otáček tohoto motoru. V této práci bude pro řízení otáček použit regulátor typu PID, který je v průmyslové praxi hojně používán, neboť je implementován ve většině programovatelných automatů (PLC). Jeho návrh bude proveden pomocí Geometrického Místa Kořenů (GMK). Konkrétně budou navrženy dva regulátory a to regulátory typu P a PI. Oba regulátory budou nejprve otestovány na nelineárním počítačovém modelu proudového motoru a až posléze budou aplikovány na reálný systém proudového motoru. Porovnání regulačních odezev počítačového simulačního modelu s odezvy reálného systému potvrdí správnost identifikace z předchozí kapitoly (ROUBAL, J. et al., 2011).

4.1 Návrh PID regulace otáček proudového motoru

PID regulátor patří mezi spojité regulátory a skládá se z proporcionální, integrační a derivační složky. V této práci bude použita regulační smyčka (obvod) podle obr. 4.1.



Obrázek 4.1: Blokové schéma regulačního obvodu

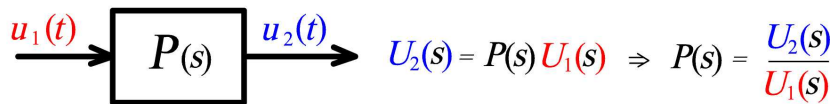
V regulačním obvodu na obr. 4.1, který je převzatý z (ROUBAL, J. et al., 2011), se vyskytují tyto veličiny: žádaná hodnota regulované veličiny $w(t)$, regulační odchylka $e(t) = w(t) - y(t)$, akční zásah $u(t)$, regulovaná veličina $y(t)$, poruchová veličina $d(t)$ a šum měření $n(t)$. Bloček P symbolizuje proudový motor a bloček C právě PID regulátor. Dále jsou v regulačním obvodu na obr. 4.1 naznačeny přenosy, které budou využívány pro návrh regulátorů. Konkrétně se jedná o přenos otevřené regulační smyčky (vnitřní čárkované ohrazení obsahující sériové spojení regulátoru a systému)

$$L(s) = P(s)C(s) \quad (4.1)$$

a přenos uzavřené regulační smyčky (vnější čárkované ohrazení)

$$T(s) = \frac{L(s)}{1 + L(s)}. \quad (4.2)$$

Přenos systému je podíl obrazu výstupní veličiny $U_2(s)$ daného systému ku obrazu vstupní veličiny $U_1(s)$ tohoto systému, jak naznačuje následující obrázek.



Obrázek 4.2: Závislost obrazu výstupu na obrazu vstupu pomocí přenosu

Bližší vysvětlení pojmu přenos lze nalézt v (ROUBAL, J. et al., 2011, kapitola 4).

4.1.1 Jednoduchý postup návrhu P regulátoru

Než bude použita metoda GMK pro návrh PID regulátoru pro řízení otáček proudového motoru, bude uveden primitivní návrh regulátoru typu P, který by měl osvětlit základní pochody v regulační smyčce a zároveň ukázat jednoduché základoškolské užití matematiky v technické praxi.

Situace je následující: Žádaná hodnota regulované veličiny je $w_n = 113 \text{ min}^{-1}$. Proudový motor se otáčí těmito otáčkami díky hodnotě akční veličiny $u_0 = 4,5 \text{ V}$. Regulovaná veličina má tedy také hodnotu $n_0 = 113 \text{ min}^{-1}$. Nyní mají být zvýšeny otáčky motoru na 133 min^{-1} , to je změna žádané hodnoty regulované veličiny o $+20 \text{ min}^{-1}$, tak, aby nebyla překročena maximální hodnota akčního zásahu ($u \leq 10 \text{ V}$).

Z teorie regulace (ROUBAL, J. et al., 2011) je známo, že proporcionální regulátor vypočítává akční zásah podle vztahu

$$u(t) = k_p e(t) + u_0, \quad (4.3)$$

kde $u(t)$ je akční zásah, k_p je proporcionální zesílení P regulátoru, $e(t)$ je regulační odchylka a u_0 je napětí na vstupu systému v pracovním bodě, to je v tomto případě $u_0 = 4,5 \text{ V}$. Odtud pro proporcionální zesílení platí rovnice

$$k_p = \frac{u(t) - u_0}{e(t)}.$$

Nyní stačí do tohoto vztahu dosadit za $u(t)$ jeho maximální hodnotu a za $e(t)$ hodnotu 20 min^{-1} , viz výše. Pak

$$k_p = \frac{10 \text{ V} - 4,5 \text{ V}}{20 \text{ min}^{-1}} = 0,275.$$

Odpověď na zadaný příklad tedy je: Pokud nemá dojít k překročení maximálního napětí na vstupu systému, pak je maximální zesílení P regulátoru rovno 0,275. Zvědavý čtenář může tento výpočet ověřit simulací například v prostředí Simulink.

4.2 Geometrické místo kořenů a návrh PID regulace

Geometrické Místo Kořenů (GMK) je metoda, která se převážně využívá k analýze chování uzavřené regulační smyčky $T(s)$ na základě znalostí smyčky otevřené $L(s)$. Ale díky grafickému prostředí `sisotool` v programu Matlab (MATLAB, 2007), které bude v této kapitole použito, může být metoda GMK využita i pro návrh regulátoru (ROUBAL, J. et al., 2011, kapitola 16).

Geometrické místo kořenů je graf křivek, které znázorňují, kde mohou ležet póly uzavřené regulační smyčky (přenosu $T(s)$) v závislosti na poloze nul a pólů smyčky otevřené (přenosu $L(s)$). Parametrem těchto křivek je zesílení otevřené smyčky. To znamená, že volbou jednoho konkrétního zesílení regulátoru (zesílení systému je již dané) je vybrána právě jedna kombinace pólů uzavřené regulační smyčky, která leží na těchto křivkách (ROUBAL, J. et al., 2011, kapitola 16). V následujícím textu bude ukázán postup návrhu regulátoru typu P a PI pomocí metody GMK.

4.2.1 Návrh P regulátoru pomocí GMK

V této podkapitole bude popsán návrh P regulátoru pomocí geometrického místa kořenů. Poté bude ukázán postup návrhu P regulátoru v prostředí `sisotool`. Propor-

cionální regulátor bude sice navržen pro proudový motor, jehož řízením se zabývá tato absolventská práce, ale obecně lze tento postup použít pro jakýkoliv jiný systém.

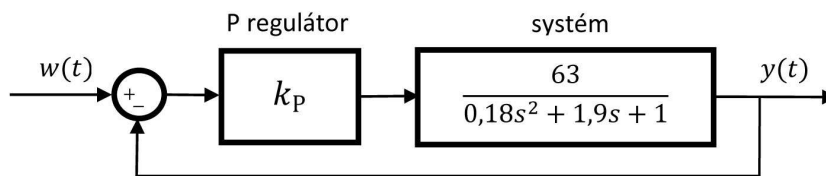
Přenos, který popisuje proudový motor, je znám z kapitoly 3.3.1

$$P(s) = \frac{b(s)}{a(s)} = \frac{63}{1,8s + 1} \cdot \frac{1}{0,1s + 1} = \frac{63}{0,18s^2 + 1,9s + 1}. \quad (4.4)$$

Pro přenos P regulátoru platí

$$C(s) = k_p. \quad (4.5)$$

Regulační obvod v tomto případě reprezentuje následující obrázek.



Obrázek 4.3: Schéma uzavřené reg. smyčky: P regulátor a přenos systému

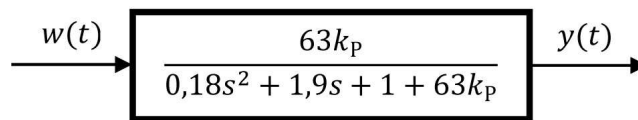
Podle vztahu (4.1) platí pro přenos otevřené regulační smyčky

$$L(s) = k_p \frac{b(s)}{a(s)} = k_p \frac{63}{0,18s^2 + 1,9s + 1}. \quad (4.6)$$

Pro přenos uzavřené regulační smyčky platí podle vztahu (4.2)

$$T(s) = \frac{k_p \frac{b(s)}{a(s)}}{1 + k_p \frac{b(s)}{a(s)}} = \frac{k_p b(s)}{a(s) + k_p b(s)} = \frac{63k_p}{0,18s^2 + 1,9s + 1 + 63k_p}. \quad (4.7)$$

Výsledný regulační obvod lze tedy reprezentovat následujícím obrázkem.



Obrázek 4.4: Výsledný přenos uzavřené regulační smyčky

Póly přenosu uzavřené regulační smyčky $T(s)$, které mají přímý vliv na časovou odezvu uzavřené regulační smyčky (ROUBAL, J. et al., 2011, kapitola 4), jsou kořeny rovnice charakteristický polynom uzavřené regulační smyčky (jmenovatel přenosu (4.7)) rovná se nula, tedy

$$a(s) + k_p b(s) = 0,18s^2 + 1,9s + 1 + 63k_p = 0. \quad (4.8)$$

Výpočet pólů přenosu uzavřené regulační smyčky pro zesílení P regulátoru $k_p = 0$ lze provést následujícím postupem.

$$\begin{aligned} 0,18s^2 + 1,9s + 1 + 63k_p &= 0 \\ 0,18s^2 + 1,9s + 1 + 63 \cdot 0 &= 0 \\ s_{1,2} &= \frac{-1,9 \pm \sqrt{1,9^2 - 4 \cdot 0,18 \cdot 1}}{2 \cdot 0,18} \\ s_1 &= -10 \\ s_2 &\doteq -0,56 \end{aligned}$$

Tyto póly jsou zobrazeny na obr. 4.5 pomocí modrých křížků.

Výpočet pólů přenosu uzavřené regulační smyčky pro zesílení P regulátoru $k_p = 0,275$ lze provést obdobným postupem.

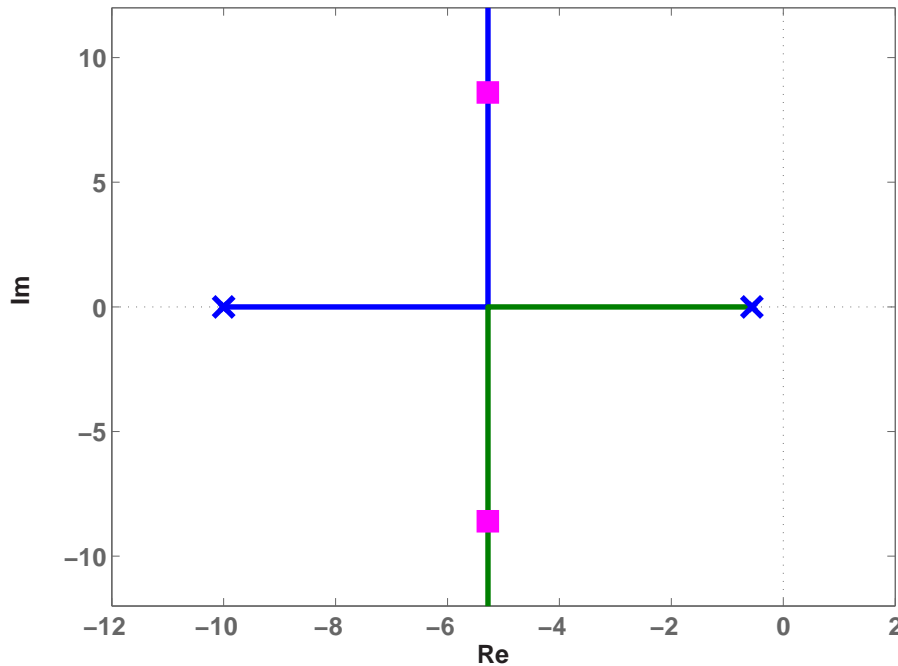
$$\begin{aligned} 0,18s^2 + 1,9s + 1 + 63k_p &= 0 \\ 0,18s^2 + 1,9s + 1 + 63 \cdot 0,275 &= 0 \\ s_{1,2} &= \frac{-1,9 \pm \sqrt{1,9^2 - 4 \cdot 0,18 \cdot 18,325}}{2 \cdot 0,18} \\ s_{1,2} &\doteq -5,28 \pm 8,60i \end{aligned} \quad (4.9)$$

Tyto póly jsou zobrazeny na obr. 4.5 pomocí fialových čtverečků.

Výpočet zesílení P regulátoru k_p pro případ dvojnásobných pólů přenosu uzavřené regulační smyčky (místo, kde se GMK na reálné ose na obr. 4.5 rozdvojí) lze provést následujícím postupem.

$$\begin{aligned} 0,18s^2 + 1,9s + 1 + 63k_p &= (s + p)^2 \\ s_{1,2} &= \frac{-1,9 \pm \sqrt{0}}{2 \cdot 0,18} \\ s_{1,2} &\doteq -5,28 \\ \Rightarrow 1,9^2 - 4 \cdot 0,18(1 + 63k_p) &= 0 \\ \Rightarrow k_p &\doteq 0,0637 \end{aligned}$$

Na obrázku 4.5 je pomocí Matlabovské funkce `rlocus` vykresleno geometrické místo kořenů systému proudového motoru s proporcionálním regulátorem. GMK začíná na reálné ose v pólech přenosu proudového motoru $s_1 = -10$ a $s_2 \doteq -0,56$. Dále se póly uzavřené regulační smyčky se zvětšujícím se proporcionálním zesílení pohybují po křivkách GMK. Například pro $k_p = 0,275$ leží na místech označených fialovými čtverečky.

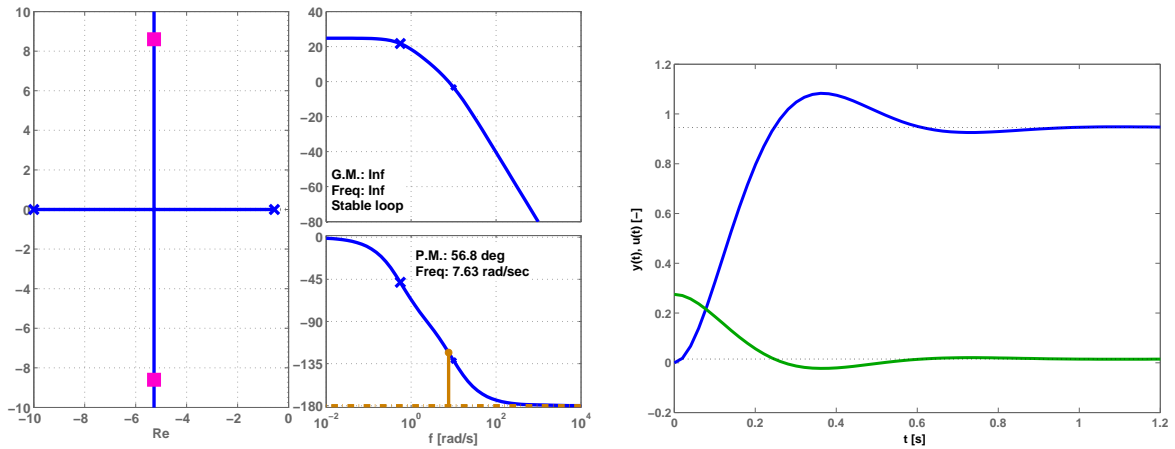


Obrázek 4.5: Geometrické místo kořenů uzavřené regulační smyčky přenosu (4.4) s proporčním regulátorem

Analýzou GMK lze zjistit, že čím více vlevo od imaginární osy se budou póly přenosu pohybovat, tím bude větší zesílení P regulátoru, tedy rychlejší reakce systému. Pokud jsou póly přenosu komplexní, znamená to, že systém bude v uzavřené smyčce kmitat (ROUBAL, J. et al., 2011, kapitola 6).

Těchto poznatků lze využít při návrhu regulátoru v prostředí `sisotool` (MATLAB, 2007) pro systém proudového motoru, viz obrázek 4.6. V tomto prostředí lze posouváním pólů přenosu uzavřené regulační smyčky, viz obr. 4.6(a), ihned pozorovat odezvu uzavřené regulační smyčky, viz obr. 4.6(b), na jednotkový skok žádané hodnoty regulované veličiny. Poté, co je v tomto prostředí nastavena odezva systému proudového motoru dle požadovaných vlastností, je možné v okně s odezvami regulační smyčky, viz obr. 4.6(b), vyčíst zesílení proporčního regulátoru k_p . Z obrázku 4.6 lze vyčíst, na základě rovnice (4.3), že zesílení P regulátoru je $k_p = 0,275$, neboť akční veličina (zelená odezva) na obr. 4.6(b) protíná vodorovnou osu na hodnotě 0,275.

Na obrázku obr. 4.6(a) lze pozorovat, že póly přenosu uzavřené regulační smyčky (fialové čtverečky) pro zesílení $k_p = 0,275$ jsou $s_{1,2} \doteq -5,28 \pm 8,60i$. Tyto odečtené hodnoty pólů jsou shodné s póly vypočítanými (4.9) a potvrzují jak správnost výpočtu (4.9), tak i správnou funkci prostředí `sisotool`.



(a) GMK uzavřené regulační smyčky

(b) časové odezvy regulační smyčky

Obrázek 4.6: Návrh P regulátoru v prostředí `sisotool`

Pro zvědavé čtenáře lze též uvést, že pokud by se doplnily získané póly přenosu (4.7) $s_{1,2} \doteq -5,28 \pm 8,60i$ do rovnice (4.8), ze které by se následně vyjádřilo k_p , vyšlo by zesílení opět 0,275, tedy

$$k_p = \frac{-0,18s^2 - 1,9s - 1}{63} = \frac{-0,18(-5,28 + 8,6i)^2 - 1,9(-5,28 + 8,6i) - 1}{63} = 0,275.$$

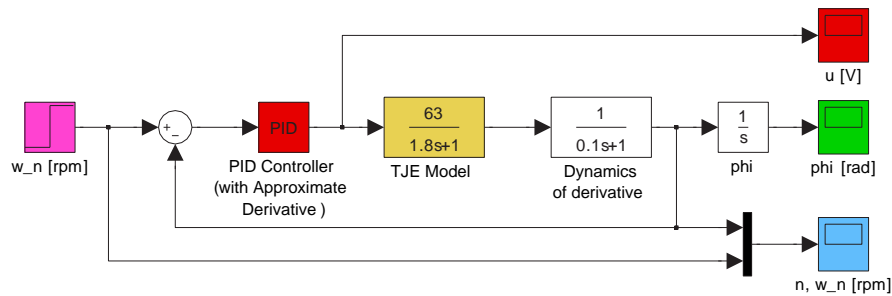
4.2.1.1 Aplikace navržené P regulace na reálný systém proudového motoru

V této podkapitole je nejprve ověřena funkce navrženého P regulátoru se zesílením $k_p = 0,275$ na simulinkových modelech proudového motoru a nakonec i na samotném reálném systému proudového motoru. Jsou zde použity tři regulační smyčky: lineární model s PID regulátorem (obr. 4.7), nelineární model s PID regulátorem (obr. 4.9) a nakonec porovnání nelineárního modelu s reálným systémem, taktéž s PID regulátorem (obr. 4.11). Stejná zapojení regulačních smyček jsou použita i pro PI regulaci v kapitole 4.2.2, proto je zde hovořeno obecně o PID regulátoru. U každé regulace jsou dále zobrazeny její časové odezvy a napsán stručný komentář.

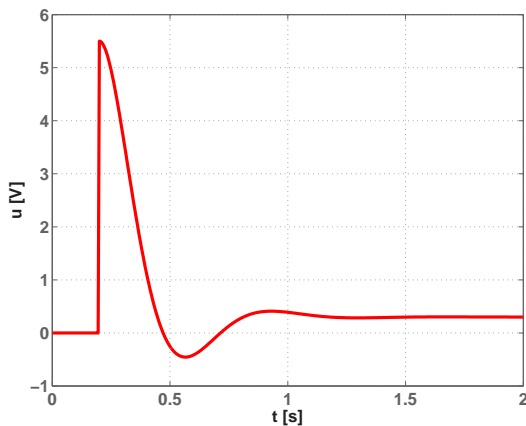
Jako první je na obr. 4.7 zobrazena regulační smyčka se simulinkovým lineárním modelem a PID regulátorem. Na obr. 4.8 jsou zobrazeny časové odezvy této regulace. Tyto odezvy jsou obdobné jako odezvy z prostředí `sisotool`, jen jsou 20-krát zvětšené. Akční veličina na obr. 4.8(a) dosahuje maxima 5,5 V, tomu odpovídá v prostředí `sisotool` (zelená odezva na obr. 4.6(b)) maximální hodnota akční veličiny 0,275 (tj. $20 \cdot 0,275 = 5,5$ V).

Taktéž odpovídá největší překmit otáček, který je přibližně v čase 0,35 s od skoku žádané hodnoty regulované veličiny.

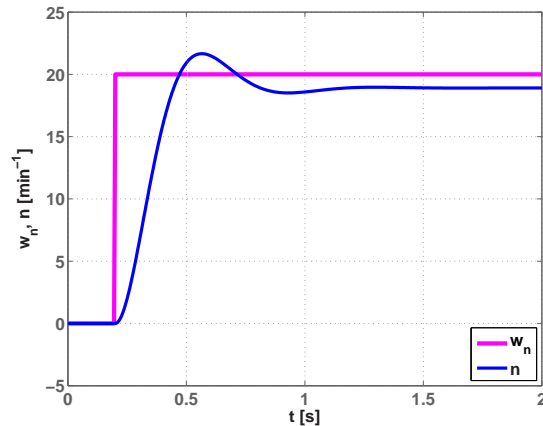
Na 4.8(b) je možno si povšimnout rozdílu přibližně jedné otáčky za minutu mezi regulovanou veličinou a její požadovanou hodnotou. P regulátor není nikdy schopen přesně vynulovat regulační odchylku u tohoto typu systému a to z matematické či fyzikální podstaty. Pokud by totiž byla nulová regulační odchylka, tak poté nula krát jakékoli zesílení se rovná nulovému akčnímu zásahu.



Obrázek 4.7: Regulační smyčka: lineární model motoru s PID regulátorem



(a) průběh akční veličiny u [V]

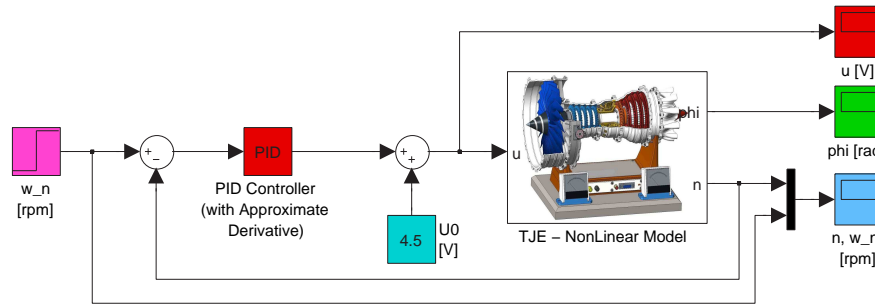


(b) průběh regulované veličiny n [min^{-1}]

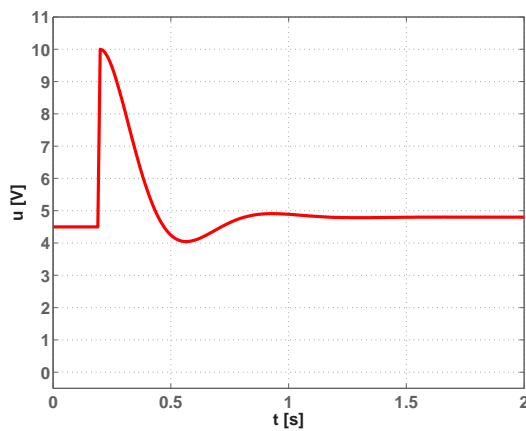
Obrázek 4.8: Časové odezvy regulační smyčky z obr. 4.7 s P regulátorem ($k_p = 0,275$)

Následující obrázek zobrazuje regulační smyčku se simulinkovým nelineárním modelem proudového motoru a PID regulátorem. Na obr. 4.10 jsou zobrazeny časové odezvy této regulační smyčky s proporcionálním regulátorem $k_p = 0,275$. Průběh regulované veličiny na obr. 4.10(b) je obdobný s průběhem regulované veličiny na obr. 4.8(b), jen je tato odezva posunuta do pracovního bodu, to je na 113 min^{-1} . Průběh akční veličiny

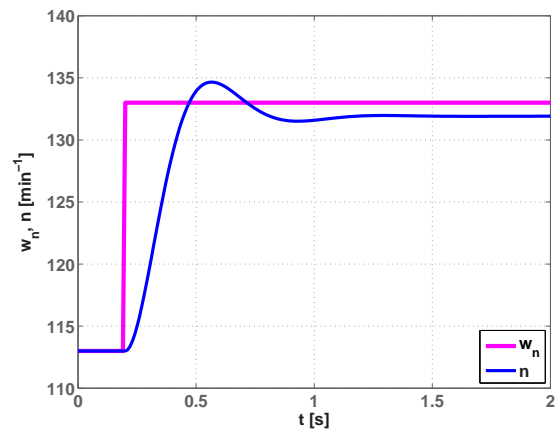
na obr. 4.10(a) je obdobný s průběhem akční veličiny na obr. 4.8(a), jen je k tomuto průběhu navíc připočteno napětí pracovního bodu systému $u_0 = 4,5$ V. Na průběhu akční veličiny na obr. 4.10(a) je vidět, že není překročeno maximální napětí na vstupu do systému $u \leq 10$ V, proto může být navržený regulátor použit pro řízení reálného proudového motoru.



Obrázek 4.9: Regulační smyčka: nelineární model s PID regulátorem



(a) průběh akční veličiny u [V]

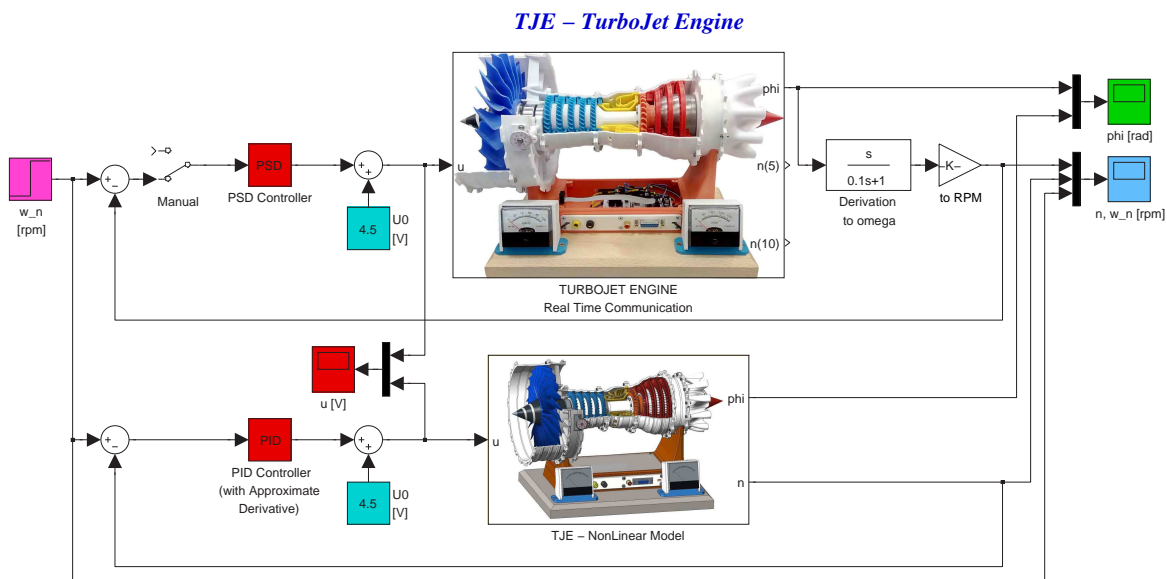


(b) průběh regulované veličiny n [min^{-1}]

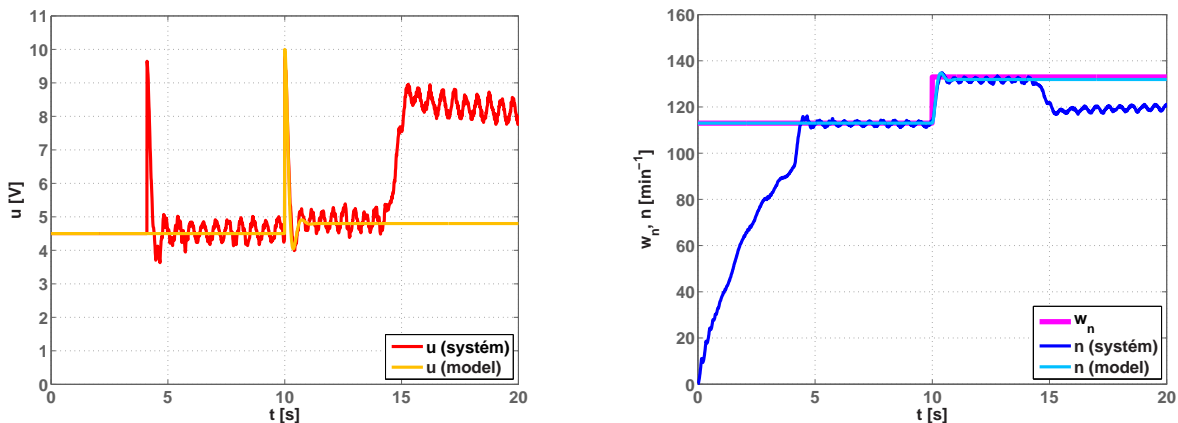
Obrázek 4.10: Časové odezvy regulační smyčky z obr. 4.9 s P regulátorem
($k_p = 0,275$)

Na obrázku 4.11 je simulinkové schéma dvou regulačních smyček. Horní je s reálným proudovým motorem a dolní s nelineárním modelem z obr. 4.9. Časové průběhy z těchto dvou regulací jsou na obr. 4.12. Odtud je vidět, že rozběh reálného systému proudového motoru byl proveden v režimu ovládání tak, že byla regulační smyčka rozpojena pomocí přepínače `Manual`, viz obr. 4.11. Pokud by byla při rozběhu proudového motoru zapnuta regulace, došlo by k překročení maximálního povoleného napětí na vstupu do systému,

kteřé by mohlo u složitějších systémů způsobit až destabilizaci regulační smyčky (ROUBAL, J. et al., 2011). V momentě rozběhu proudového motoru by totiž byla regulační odchylka $e(t) = 113 \text{ min}^{-1}$. Této odchylce dle vztahu (4.3) odpovídá hodnota akčního zásahu $u(t) = 0,275 \cdot 113 + 4,5 = 35,575 \text{ V}$. Na obr. 4.12 je vidět, že v čase přibližně $t = 4 \text{ s}$ došlo pomocí bločku Manual k zapnutí regulace. V tomto čase je vidět zásah regulace, který se projeví na obr. 4.12(a) zvýšením akčního zásahu a na obr. 4.12(b) strmějším náběhem otáček na požadovanou hodnotu 113 min^{-1} .



Obrázek 4.11: Regulační smyčky: reálný systém a nelineární model

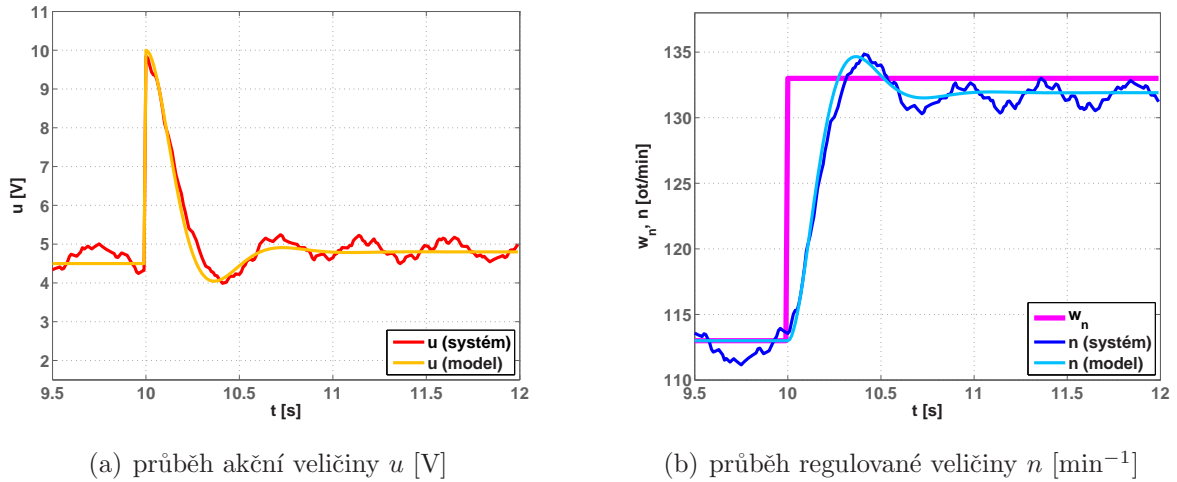


(a) průběh akční veličiny u [V]

(b) průběh regulované veličiny n [min^{-1}]

Obrázek 4.12: Časové odezvy regulačních smyček z obr. 4.11 s P regulátorem ($k_p = 0,275$)

Na obr. 4.13 jsou zobrazeny detaily z průběhů na obr. 4.12, kde jsou porovnány odezvy reálného systému a jeho nelineárního počítačového modelu. Z těchto časových odezev lze konstatovat, že P regulace reálného systému se chová ve shodě s P regulací počítačového simulačního modelu. Tímto je potvrzena správnost identifikace nelineárního modelu systému proudového motoru z kapitoly 3.



Obrázek 4.13: Detail časových odezev regulačních smyček z obr. 4.12

Na časových odezvách na obr. 4.12 je v čase přibližně $t = 14$ s vidět zásah regulace na poruchovou veličinu, která byla záměrně vyvolána pomocí brzdy proudového motoru, viz obr. 2.12. Na obr. 4.12(b) je vidět, že si P regulátor příliš neporadil s touto poruchovou veličinou a nepodařilo se mu dostatečně zvýšit otáčky proudového motoru. Nicméně bez použití P regulace by byl pokles otáček výrazně vyšší než je tomu na obr. 4.12(b), kde je použita P regulace. Na obr. 4.12(a) je vidět, jak je od času $t = 14$ s akční zásah trvale zvýšen a regulátor se snaží tímto zvýšeným napětím na vstupu do systému zvýšit otáčky proudového motoru.

4.2.2 Návrh PI regulátoru pomocí GMK

V této podkapitole bude zobrazeno geometrické místo kořenů uzavřené regulační smyčky systému proudového motoru s PI regulátorem a následně v prostředí `sisotool` navržena PI regulace pro řízení proudového motoru.

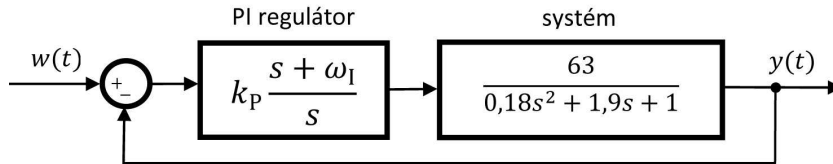
Přenos, který popisuje proudový motor, je znám z kapitoly 3.3.1

$$P(s) = \frac{b(s)}{a(s)} = \frac{63}{1,8s + 1} \cdot \frac{1}{0,1s + 1} = \frac{63}{0,18s^2 + 1,9s + 1}. \quad (4.10)$$

Pro přenos PI regulátoru platí

$$C(s) = k_P + \frac{k_I}{s} = k_P \frac{s + \omega_I}{s}, \quad \omega_I = \frac{k_I}{k_P}. \quad (4.11)$$

Regulační obvod v tomto případě reprezentuje následující obrázek.



Obrázek 4.14: Schéma uzavřené regulační smyčky: PI regulátor a přenos systému

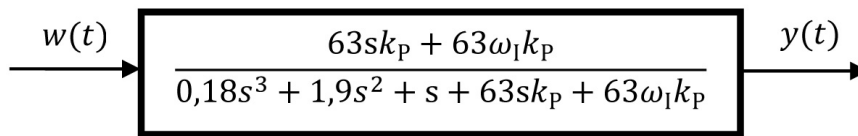
Podle vztahu (4.1) platí pro přenos otevřené regulační smyčky

$$L(s) = \frac{b(s)}{a(s)} \cdot k_P \frac{s + \omega_I}{s} = k_P \frac{s b(s) + \omega_I b(s)}{s a(s)} = k_P \frac{63s + 63\omega_I}{0,18s^3 + 1,9s^2 + s}. \quad (4.12)$$

Pro přenos uzavřené regulační smyčky platí podle vztahu (4.2)

$$T(s) = \frac{L(s)}{1 + L(s)} = \frac{k_P \frac{s b(s) + \omega_I b(s)}{s a(s)}}{1 + k_P \frac{s b(s) + \omega_I b(s)}{s a(s)}} = \frac{63s k_P + 63\omega_I k_P}{0,18s^3 + 1,9s^2 + s + 63s k_P + 63\omega_I k_P}. \quad (4.13)$$

Výsledný regulační obvod lze tedy reprezentovat následujícím obrázkem.



Obrázek 4.15: Výsledný přenos uzavřené regulační smyčky

Póly přenosu uzavřené regulační smyčky $T(s)$, které mají přímý vliv na časovou odezvu uzavřené regulační smyčky (ROUBAL, J. et al., 2011, kapitola 4), jsou opět kořeny rovnice charakteristický polynom uzavřené regulační smyčky (jmenovatel přenosu (4.13)) rovná se nula, tedy

$$0,18s^3 + 1,9s^2 + s + 63s k_P + 63\omega_I k_P = 0. \quad (4.14)$$

Výpočet pólů přenosu uzavřené regulační smyčky pro PI regulátor (4.11) se zesíleními $k_p = 0,275$ a $k_i = 0,5$ ($\omega_I = 0,5/0,275 \doteq 1,82$) lze provést následujícím postupem.

$$0,18s^3 + 1,9s^2 + s + 63sk_p + 63\omega_I k_p = 0$$

$$0,18s^3 + 1,9s^2 + s + 63s \cdot 0,275 + 63 \cdot 0,5 = 0$$

$$s_1 \doteq -2,08$$

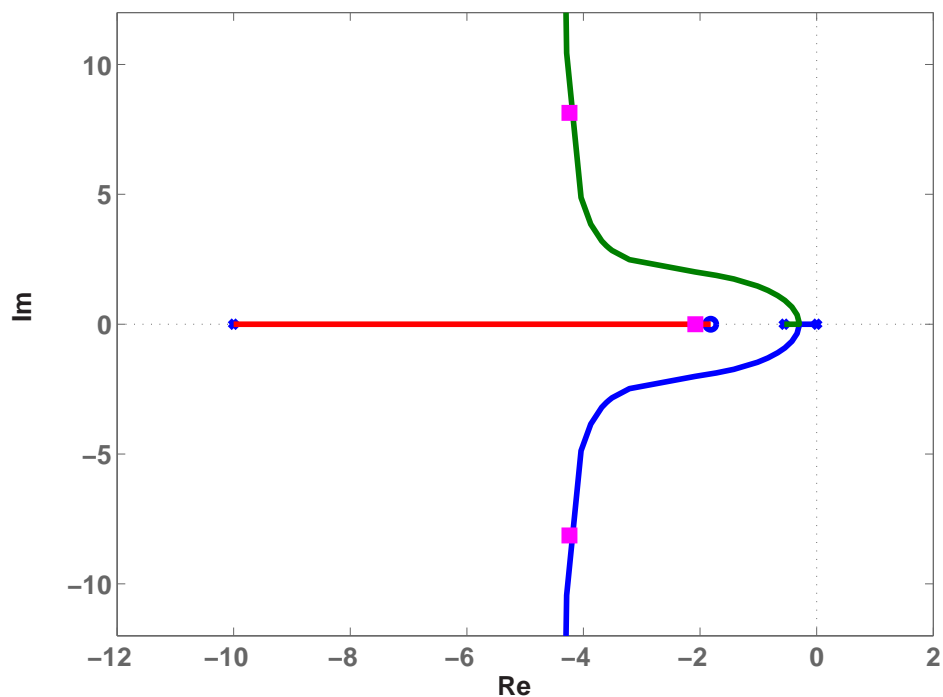
$$s_{2,3} \doteq -4,24 \pm 8,14i$$

Tyto póly jsou zobrazeny na obr. 4.16 pomocí fialových čtverečků a pro jejich výpočet lze použít následující jednoduchý matlabovský skript.

```
syms s

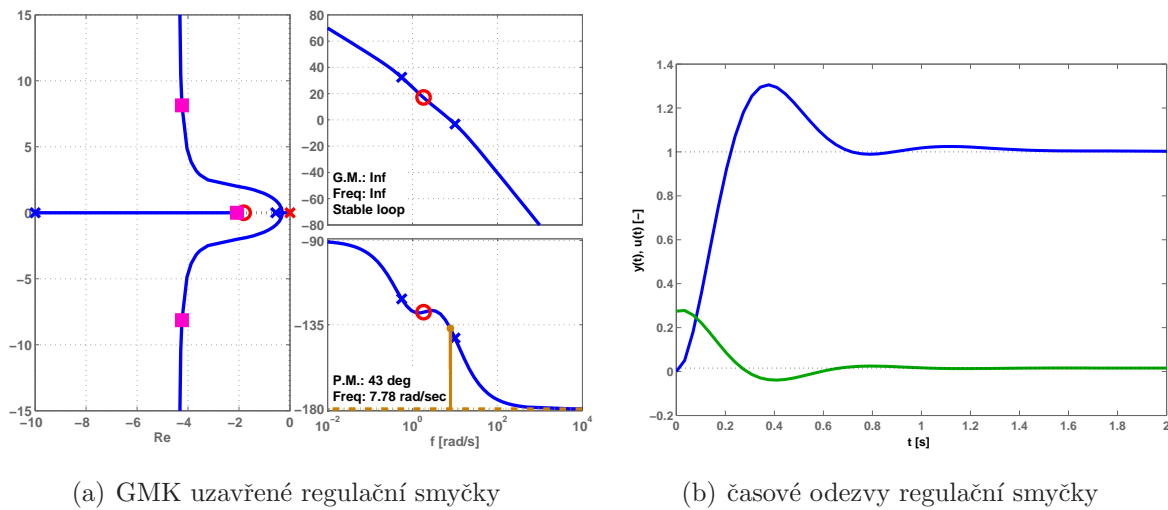
kp = 0.275; % proporcionální zesílení
ki = 0.5; % integrační zesílení
omegaI = ki/kp; % nuly přenosu PI regulátoru

eqn = 0.18*s^3 + 1.9*s^2 + s + 63*s*kp + 63*omegaI*kp;
koreny_GMK = single(solve(eqn))
```



Obrázek 4.16: GMK uzavřené regulační smyčky přenosu (4.4) s PI regulátorem

Nyní bude proveden návrh PI regulátoru v prostředí `sisotool` v programu Matlab pro systém proudového motoru obdobně, jako tomu bylo při návrhu P regulátoru. Postup návrh PI regulace v prostředí Matlab `sisotool` je následující. Nejprve se do GMK přidá křížek (pól přenosu regulátoru) do počátku souřadnic (integrátor) a poté se přidá kolečko (nula přenosu regulátoru) na zápornou reálnou poloosu. Poté lze začít ladit regulaci dle konkrétních požadavků na časové odezvy uzavřené regulační smyčky, viz následující obrázek.



Obrázek 4.17: Návrh PI regulátoru v prostředí `sisotool`

Posouváním červeného kolečka (nuly přenosu regulátoru) po reálné ose na obr. 4.17(a) se nastavuje poměr proporcionálního zesílení a integračního zesílení regulátoru ω_1 , viz rovnice (4.11). Posouváním fialových čtverečků (póly uzavřené regulační smyčky) po křivkách GMK na obr. 4.17(a) se mění proporcionální zesílení regulátoru.

Odečtení hodnoty proporcionálního zesílení lze provést obdobně jako u návrhu P regulátoru v podkapitole 4.2.1, to je na hodnotě, kde akční veličina (zelená odezva) na obr. 4.17(b) protíná svislou osu, tedy $k_p = 0,275$. Následně hodnotu zesílení integrační složky PI regulátoru lze zjistit ze vztahu (4.11), tedy

$$k_I = \omega_1 \cdot k_P.$$

Pro zvědavé čtenáře lze opět uvést, že pokud by se doplnily získané póly přenosu z obr. 4.17(a) do rovnice (4.14), ze které by se následně vyjádřilo k_p , vyšlo by zesílení opět 0,275, tedy

$$k_P = \frac{-0,18s^3 - 1,9s^2 - s}{63s + 63\omega_1} = \frac{-0,18(-2,08)^3 - 1,9(-2,08)^2 - 1(-2,08)}{63(-2,08) + 63(0,5/0,275)} \doteq 0,275. \quad (4.15)$$

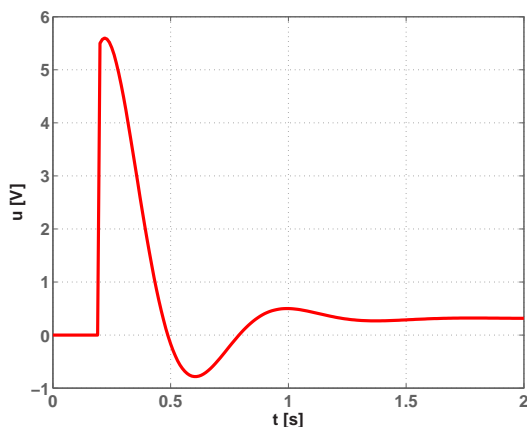
Výše uvedený výraz lze vyčíslit pomocí následujícího matlabovského skriptu.

```
syms s
s = -2.08; % za proměnou "s" může být dosazen kterýkoliv kořen
          % rovnice (4.15) a výsledek bude vždy stejný
omegaI = 1.82 % omegaI = nula přenosu PI regulace,
          % červené kolečko na reálné ose, SISOTOOL - okno Root Locus Editor
kp = simplify((-0.18*s^3-1.9*s^2-s)/(63*s+63*omegaI))
```

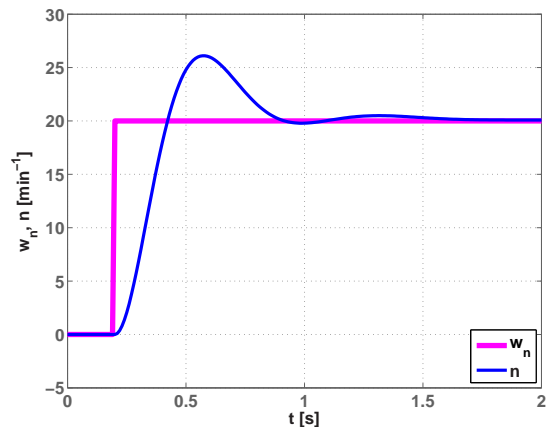
4.2.2.1 Aplikace navržené PI regulace na reálný systém proudového motoru

V této podkapitole, obdobně jako v podkapitole 4.2.1.1, je nejprve ověřena funkce navrženého PI regulátoru se zesíleními $k_p = 0,275$ a $k_i = 0,5$ na simulinkových modelech proudového motoru a nakonec i na samotném reálném systému proudového motoru. Jsou zde opět použity tři regulační smyčky: lineární model s PID regulátorem (obr. 4.7), nelineární model s PID regulátorem (obr. 4.9) a nakonec porovnání nelineárního modelu s reálným systémem, taktéž s PID regulátorem (obr. 4.11).

Na obr. 4.18 jsou zobrazeny časové odezvy z regulační smyčky se simulinkovým lineárním modelem z obr. 4.7. Tyto odezvy jsou obdobné jako odezvy z prostředí `sisotool` na obr. 4.17(b), jen jsou 20-krát zvětšené. Akční veličina na obr. 4.18(a) dosahuje maxima 5,5 V, tomu odpovídá v prostředí `sisotool` (zelená odezva na obr. 4.17(b)) s maximální hodnotou akční veličiny 0,275 (to je $20 \cdot 0,275 = 5,5$ V). Taktéž odpovídá největší překmit otáček, který je přibližně v čase 0,4 s od skoku žádané hodnoty regulované veličiny a zároveň je tento překmit na obr. 4.18(b) 20-krát větší než na obr. 4.17(b).



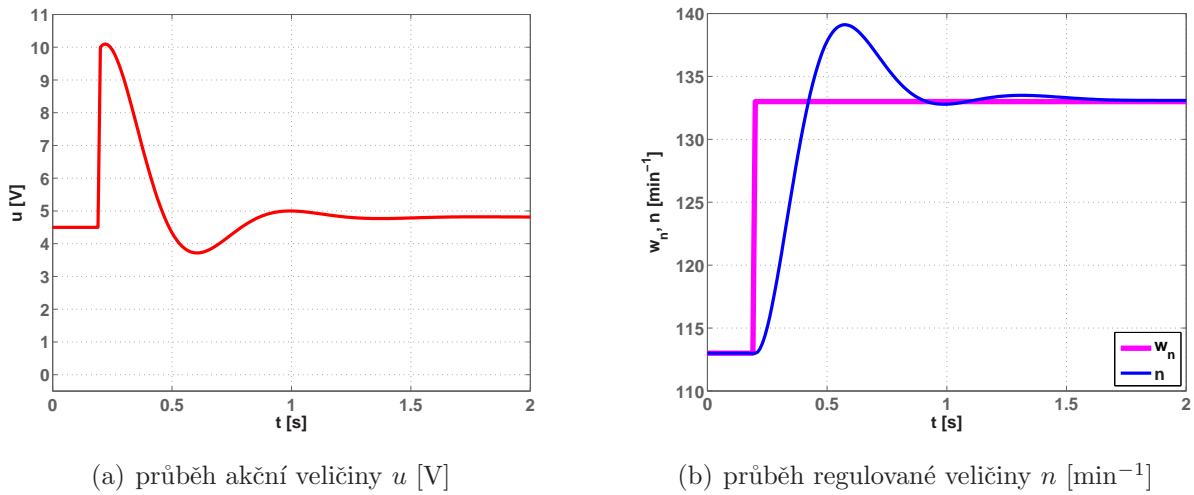
(a) průběh akční veličiny u [V]



(b) průběh regulované veličiny n [min^{-1}]

Obrázek 4.18: Časové odezvy regulační smyčky z obr. 4.7 s PI regulátorem
($k_p = 0,275$, $k_i = 0,5$)

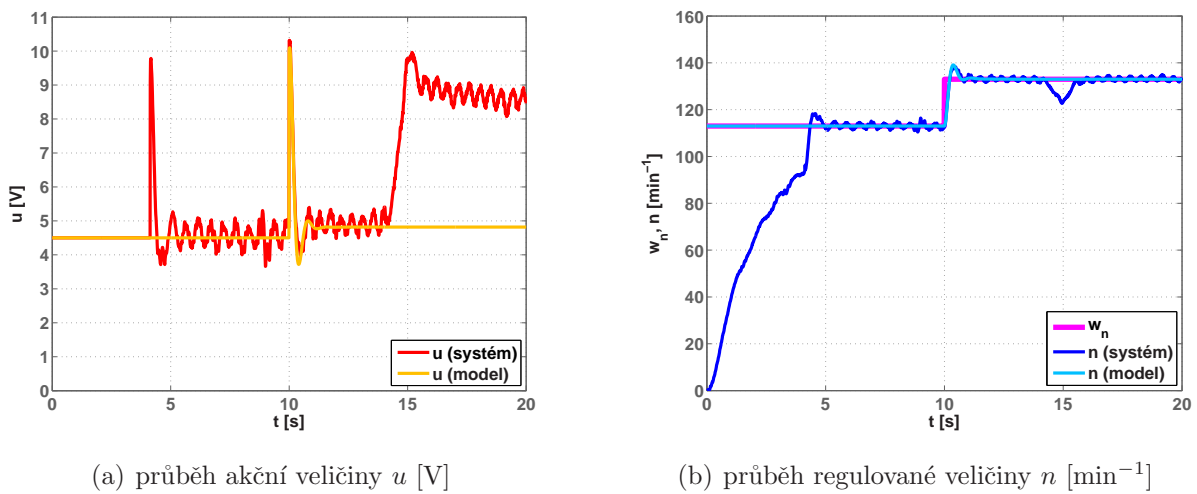
Na obr. 4.19 jsou zobrazeny časové odezvy regulační smyčky se simulinkovým nelineárním modelem z obr. 4.9. Tyto časové průběhy jsou obdobné s průběhy z obr. 4.18, jen jsou posunuté do pracovního bodu proudového motoru, tedy na 4,5 V a 113 min^{-1} .



Obrázek 4.19: Časové odezvy regulační smyčky z obr. 4.9 s PI regulátorem

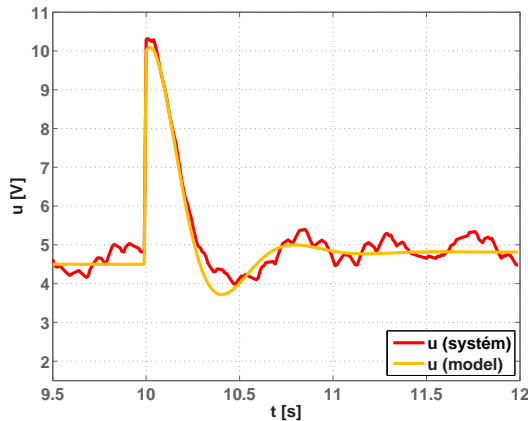
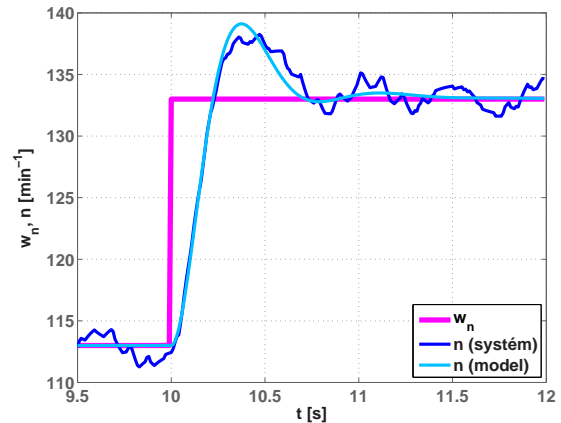
$$(k_p = 0,275, k_i = 0,5)$$

Na obrázku 4.20 je zobrazeno porovnání odezev dvou regulačních smyček z obr. 4.11. Jedná se tedy o porovnání odezev reálného systému a jeho nelineárního počítačového modelu. Na obr. 4.21 jsou zobrazeny detaily průběhů z obr. 4.20.



Obrázek 4.20: Časové odezvy regulačních smyček z obr. 4.11 s PI regulá-

$$\text{torem } (k_p = 0,275, k_i = 0,5)$$

(a) průběh akční veličiny u [V](b) průběh regulované veličiny n [min^{-1}]

Obrázek 4.21: Detail časových odezev regulačních smyček z obr. 4.20

Z časových odezev na obr. 4.20 a 4.21 lze konstatovat, že PI regulace reálného systému se chová ve shodě s PI regulací počítačového simulačního modelu. Tímto je opět potvrzena správnost identifikace nelineárního modelu systému proudového motoru z kapitoly 3. Dále je možné si povšimnout vlivu integrační složky PI regulátoru. Oproti průběhu P regulace na obr. 4.12 je integrační složka schopna snížit regulační odchylku na minimální hodnotu a taktéž si dokáže velmi dobře poradit s poruchou vyvolanou v čase přibližně 14 s a opět snížit regulační odchylku na minimální hodnotu.

4.3 Realizace PID regulace pomocí PLC

V praxi je PID regulace nejčastěji realizována pomocí programovatelných logických automatů neboli PLC (z anglického Programmable Logic Controller). V této podkapitole bude vytvořen program realizující PID algoritmus v malém PLC automatu od firmy AMiT, kterými je vybavena Laboratoř aplikované informatiky a fyziky na Vyšší odborné škole v Sezimově Ústí.

Aby bylo dosaženo pomocí PLC automatu stejné odezvy regulační smyčky jako při použití prostředí Simulink v podkapitole 4.2.2, je zcela zásadní si uvědomit, že nelze pouze zkopírovat konstanty PID regulátoru z podkapitoly 4.2.2 do programu PLC! Jednotliví výrobci PLC automatů mohou používat rozdílné PID algoritmy. Je tedy nutné nejprve zjistit, podle jaké rovnice daný PLC automat vypočítává akční zásah a tuto rovnici porovnat s rovnicí naprogramovanou v použitém simulinkovém prostředí v podkapitole 4.2.2.

V Simulinku je použita rovnice

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (4.16)$$

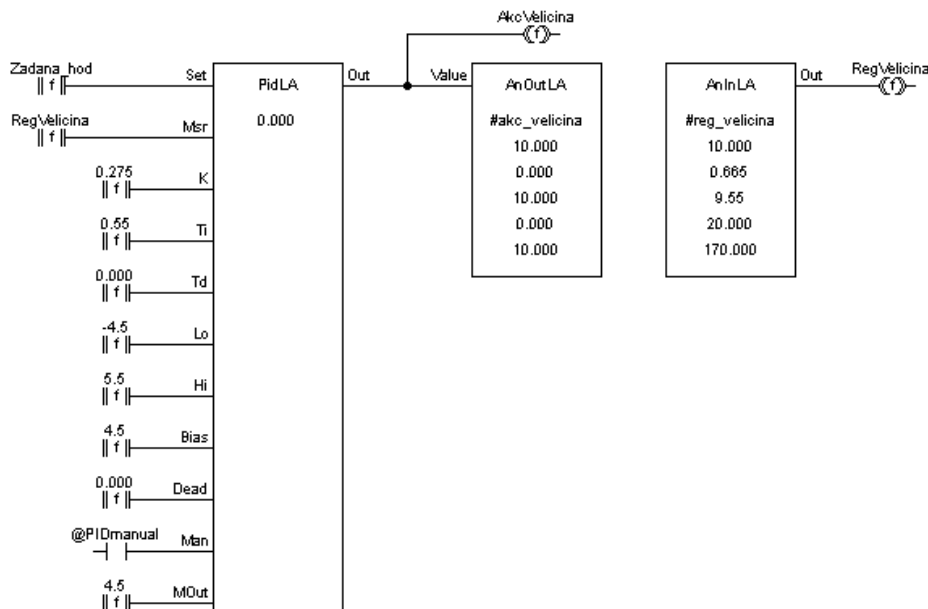
kdežto v PLC od firmy AMiT je použita rovnice

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) d\tau \right). \quad (4.17)$$

Z porovnání obou výše uvedených rovnic je patrné, že konstanta K regulátoru v PLC automatu AMiT má stejnou hodnotu jako konstanta proporcionálního zesílení k_p v simulinkovém PID regulátoru. Ale pro integrační časovou konstantu T_i regulátoru v PLC automatu AMiT platí následující vztah

$$\frac{K}{T_i} = k_i \quad \Rightarrow \quad T_i = \frac{K}{k_i} = \frac{0,275}{0,5} = 0,55.$$

Tyto přepočítané konstanty byly použity pro algoritmus PID regulace, který byl naprogramován ve vývojovém prostředí DetStudio, viz následující obrázek. Odezva regulační smyčky byla stejná jako na obr. 4.20. Pro bližší prostudování je tento program uložen na DVD, které je součástí této práce.



Obrázek 4.22: PID algoritmus pro PLC firmy AMiT

Kapitola 5

Závěr

V této absolventské práci byly splněny všechny požadavky zadání. Nejprve byl vybrán vhodný elektromotor pro pohon modelu proudového motoru. Vybraný motor Pololu s enkodérem pomohl vyřešit i způsob měření otáček proudového motoru. Signál z enkodéru lze v simulinkovém prostředí převést pomocí násobení na úhel otočení hřídele motoru φ [rad] a tento úhel lze následně pomocí derivace převést na otáčky proudového motoru n [min^{-1}]. Následovaly konstrukční úpravy 3D modelu proudového motoru tak, aby do jeho útrobu mohl být vložen vybraný elektromotor Pololu. Při konstrukčních úpravách byla navržena i brzda, pomocí které je možno simulovat poruchovou veličinu regulace. Poté již mohlo být přistoupeno k časově nejnáročnější části absolventské práce a to k samotnému 3D tisku, následnému sestavení proudového motoru a odstranění jeho mechanických kolizí při otáčení motoru.

Tisk proudového motoru byl realizován na domácí 3D tiskárně Tronxy. Výtisk motoru je z plastu PLA a všechny jeho díly jsou ošetřeny ochranným bezbarvým lakem, který pomůže ochránit motor proti nepříznivým vlivům a to zejména UV záření. Po samotném sestavení proudového motoru byly shledány jeho první nedostatky. Bylo velmi obtížné sestavit motor tak, aby se při jeho otáčení neozývaly skřípavé zvuky, které signalizovaly drobné kolize točivých částí motoru. Proto bylo přistoupeno k výrobě hlavní hřídele z materiálu dural a byla zvětšena vůle mezi lopatkami jak kompresoru, tak i turbíny. Dále došlo k předělání konstrukce brzdy tak, aby umožnila vyvinout větší brzdový účinek. Toho bylo docíleno nalisováním brzdného kotoučku o průměru 43 mm na hlavní hřídel a tím bylo zvětšeno rameno páky, přes kterou působí brzda na motor. Fotografie vyrobeného proudového motoru je na obr. 2.18.

Po sestavení proudového motoru bylo přistoupeno k návrhu řízení tohoto motoru. Při prvním měření přechodové charakteristiky bylo shledáno, že systém proudového motoru

je příliš rychlý, což by nebylo úplně vhodné pro názorný výklad problematiky regulace. Proto bylo rozhodnuto přidat rotoru proudového motoru více setrvační hmoty a to skrze vyrobení dvou rotorových dílů z oceli. Poté již byla provedena identifikace systému proudového motoru metodou profesora Strejce. Následovalo vytvoření počítačového simulačního modelu proudového motoru a poté bylo přistoupeno k samotnému návrhu PID regulace. Kapitoly věnované řízení otáček proudového motoru byly vypracovány názorně a podrobně tak, aby mohly sloužit studentům při výuce regulační techniky.

Během realizace učební pomůcky proudového motoru přišel vedoucí této absolventské práce s myšlenkou převést signál z encoderu na standardní unifikovaný napěťový signál v rozsahu $\langle 0; 5 \rangle$ V, respektive $\langle 0; 10 \rangle$ V. Záměrem této myšlenky bylo rozšířit užití učební pomůcky i na předmět automatizace na střední škole. Toto rozšíření užití učební pomůcky předpokládalo navrhnout a vyrobit převodník frekvence na stejnosměrné napětí. Protože by návrh a realizace takového převodníku již přesahovalo zadání této práce, rozhodl se vedoucí této absolventské práce provést návrh a výrobu převodníku vlastními silami, viz příloha E. Autor této práce poté navrhl podstavec učební pomůcky, kde bylo možné uložit navrženou elektroniku.

Obrázek 4.20 a jeho detail na obr. 4.21 dokládají úspěšné vyřešení regulace otáček proudového motoru. Jednoduše lze říci, že navržená PI regulace dokáže udržet otáčky motoru na požadované hodnotě a to i při působení poruchové veličiny (brzdy), která začala působit přibližně v čase 14 s. Podrobněji je toto popsáno v podkapitole 4.2.2. Nad rámec zadání této práce byl regulátor naprogramován také do PLC automatu. Odezvy tohoto řízení byly stejné jako na obrázcích 4.20 a obr. 4.21.

Učební pomůcka proudového motoru, která je náplní této práce, vhodně doplní již stávající učební pomůcky v Laboratoři aplikované informatiky a fyziky na Vyšší odborné škole v Sezimově Ústí, neboť bude reprezentovat jednoduchý dynamický systém včetně učebního výkladu k jeho regulaci. Bude snadno přenositelná a může být využita nejen při výuce regulační techniky, ale i automatizace v širším slova smyslu, například při výkladu snímačů, práci s elektrickými signály apod. V neposlední řadě může být využita při propagačních akcích školy a pomoci tak zaujmout nejednoho zájemce o studium technických oborů na zdejší škole.

Literatura

- BOŠTIČKA, J. (2014), Model vodní elektrárny – elektronika, (Absolventská práce), VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí, Sezimovo Ústí.
- BRYNYCH, T. (2017), Návrh energeticky úspornějšího řízení udržovací pece, (Absolventská práce), VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí, Sezimovo Ústí.
- FENCLOVÁ, M., PECH, Z. A SUKOVÁ, M. (1993), *Teorie automatického řízení*, Praha: ČVUT.
- HUMUSOFT (1991), Humusoft, s. r. o. [online]. [cit. 2022-04-09], <http://www.humusoft.cz/>.
- MAREK, J. (2019), Návrh regulace vytápění laboratorního domku, (Absolventská práce), VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí, Sezimovo Ústí.
- MATLAB (2007), *version 7.4.0287 (R2007a)*, The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts.
- PAVLÁT, P. (2015), Řízení otáček turbíny pomocí Wattova odstředivého regulátoru, (Absolventská práce), VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí, Sezimovo Ústí.
- PRŮŠA, J. (2022), Prusament [online]. [cit. 2022-05-01], <https://www.prusa3d.com/cs/>.
- RABIŇÁK, P. (2014), Model vytápěného domku – elektronika, (Absolventská práce), VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí, Sezimovo Ústí.
- ROUBAL, J. (2012), Výukové materiály pro Laboratoř aplikované informatiky na VOŠ, (Bakalářská práce), ČVUT v Praze, MUVS, Praha.
- ROUBAL, J., HUŠEK, P. A KOL. (2011), *Regulační technika v příkladech*, Praha: BEN – technická literatura. ISBN 978-80-7300-260-2.

- ROZUM ROBOTICS (2022), The Right Encoder For a Servo Motor [online]. [cit. 2022-03-07], <https://rozum.com/encoder-servo-motor/>.
- SHAKAL, CH. (2016), 3D Printable Jet Engine [online]. [cit. 2022-03-07], <https://www.thingiverse.com/thing:1327093/files>.
- ŠIKÝŘ, T. (2011), Systém vodního hospodářství – laboratorní model, (Absolventská práce), VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí, Sezimovo Ústí.
- VACEK, J. (2014), Model a řízení inverzního kyvadla, (Absolventská práce), VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí, Sezimovo Ústí.
- WIKISKRIPTA (2022), Hallův jev [online]. [cit. 2022-03-07], https://www.wikiskripta.eu/w/Halluv_jev.

Příloha A

Obsah přiloženého DVD

K této práci je přiloženo DVD s následující adresářovou strukturou.

- Absolventská práce v $\text{\LaTeX}2\text{e}$
- Elektronika
 - Atmel program: program pro μP ATtiny85 pro převodník f na U
 - Schéma zapojení elektroniky: převodník f na U
 - Motivy plošných spojů: převodník f na U
- Fotodokumentace
- Informační štítek modelu
- Manuály: Motor Pololu s enkoderm, operační zesilovač MAA 741, diody LED, μP ATtiny85
- MatLab: zdrojové kódy z Matlabu a Simulinku (složka je z důvodu provázanosti s publikačním systémem $\text{\LaTeX}2\text{e}$ umístěna v podsložkách složky Absolventská práce v $\text{\LaTeX}2\text{e}$)
- Objednávky a faktury
- Simulinkový komunikační soubor
- Výkresová dokumentace
- Chromy_AP_2021_2022.pdf – absolventská práce ve formátu PDF

Příloha B

Použitý software

AutoCAD LT 2000 \langle <http://www.autodesk.cz/> \rangle

L^AT_EX 2 ϵ \langle <http://www.miktex.org/> \rangle

MATLAB/Simulink R2006b \langle <http://www.mathworks.com> \rangle

PTC Creo Parametric 3.0 \langle <http://www.ptc.com/> \rangle

Tronxy Slicer v1.4.12 \langle <https://www.tronxyonline.com/> \rangle

WinEdt 6 \langle <http://www.winedt.com/> \rangle

Software z výše uvedeného seznamu je buď volně dostupný, nebo jeho licenci toho času vlastní Vyšší odborná škola, Střední škola, Centrum odborné přípravy, Sezimovo Ústí, Budějovická 421, kde autor téhož času studoval a vytvořil tuto práci, nebo jeho licenci toho času vlastní firma ČZ a. s. u níž byl autor toho času zaměstnán a firma mu umožnila využívat její software pro realizaci této absolventské práce.

Příloha C

Časový plán absolventské práce

Činnost	Časová náročnost	Termín ukončení	Splněno
návrh vhodného elektromotoru, stanovení spotřeby a výběr vhodného filamentu, následné stanovení celkových fin. nákladů	3 týdny	30.04.2021	30.04.2021
objednání a dodání elektrických komponent a filamentu	2 týdny	10.05.2021	10.05.2021
úprava 3D modelu proudového motoru (zakomponování ss motoru, návrh brzdy proudového motoru, umístění elektroniky)	4 týdny	30.06.2021	14.07.2021
realizace 3D tisku na domácí tiskárně, ruční úprava výtisků, montáž proudového motoru, odladění hladkého chodu motoru	3 měsíce	15.09.2021	9.12.2021
návrh simulinkového modelu proudového motoru a jeho identifikace s reálným modelem	1 měsíc	15.10.2021	18.02.2022
návrh PID regulace	3 týdny	07.11.2021	22.03.2022
vypracování úvodní části textu AP	3 týdny	30.11.2021	30.02.2022
vytvoření hlavní části textu AP, tj. popisu výukového modelu, který bude sloužit studentům při výuce	3 měsíce	30.02.2022	29.04.2022
vypracování závěrečné části AP	3 týdny	20.03.2022	02.05.2022
kompletní dokončení textu AP	6 týdnů	30.04.2022	11.05.2022

Příloha D

Rozpočet projektu

Následující tabulka uvádí finanční rozpočet modelu zahrnující nákupy jednotlivých součástí. Ceny jsou uvedeny včetně DPH a obvykle včetně poštovného a balného.

Tabulka D.1: Finanční rozpočet projektu

Komponenta	Kusů	Cena 1 kus	Cena celkem
PLA filament z recyklátu 1,75 mm bílá EKO-MB	1kg	449,-	449,-
Filament pro 3D tisk – barva žlutá	0,5kg	353,-	353,-
Filament pro 3D tisk – barva červená	0,5kg	353,-	353,-
Filament pro 3D tisk – barva oranžová	0,5kg	353,-	353,-
Filament pro 3D tisk – barva tmavě modrá	0,5kg	353,-	353,-
Filament pro 3D tisk – barva světle modrá	0,5kg	353,-	353,-
Filament pro 3D tisk – barva šedivá	0,5kg	353,-	353,-
Stejnoseměrný motor s enkodérem	1	864,-	864,-
Ložisko kuličkové jednořadé $\emptyset 35 \times \emptyset 17 \times 10$	2	25,-	50,-
Ložisko kuličkové jednořadé $\emptyset 47 \times \emptyset 20 \times 14$	2	36,-	72,-
Šroubky (včetně matice a podložky, M2,5, M3, M4)	120		250,-
Elektronické součástky			299,-
Voltmetr	1	229,-	229,-
Ampérmetr	1	229,-	229,-
Celkem			4 560,-

Následující tabulka uvádí hodinový rozpočet práce na výrobě školní pomůcky modelu proudového motoru. Tabulka obsahuje zkratky, které znamenají: AP – autor absolventské práce, VP – vedoucí absolventské práce.

Tabulka D.2: Hodinový rozpočet projektu

Práce	Člověko- hodin	Pra- covník
Výběr vhodného: filamentu, proudového motoru, el. motoru	14	AP
Úpravy 3D modelu + výkresová dokumentace	65	AP
3D tisk: příprava 3D modelů a jejich úpravy, ruční úprava výtisků, montáž – demontáž (nezapočítán čas 3D tisku)	260	AP
Identifikace modelu, simulinkové modely, návrh regulace, analýza a realizace řízení	20	AP, VP
Návrh a realizace elektroniky	101	VP
Text absolventské práce včetně konzultací a korektur	228	AP, VP
Celkem	688	

Příloha E

Převodník frekvence \rightarrow napětí

Úkolem autora této absolventské práce bylo navrhnout měření otáček proudového motoru tak, aby bylo možné motor zpětnovazebně řídit. To autor elegantně vyřešil tak, že použil motor s encoderem (přesný název: 47:1 Metal Gearmotor 25Dx67L mm MP 12V with 48 CPR Encoder), viz obr. 2.2, který umožňuje přímo měřit úhel otočení hřídele motoru pomocí magnetického inkrementálního snímače. Tento úhel převedl pomocí softwarové derivace v prostředí Simulink na otáčky motoru, viz obr. 3.5.

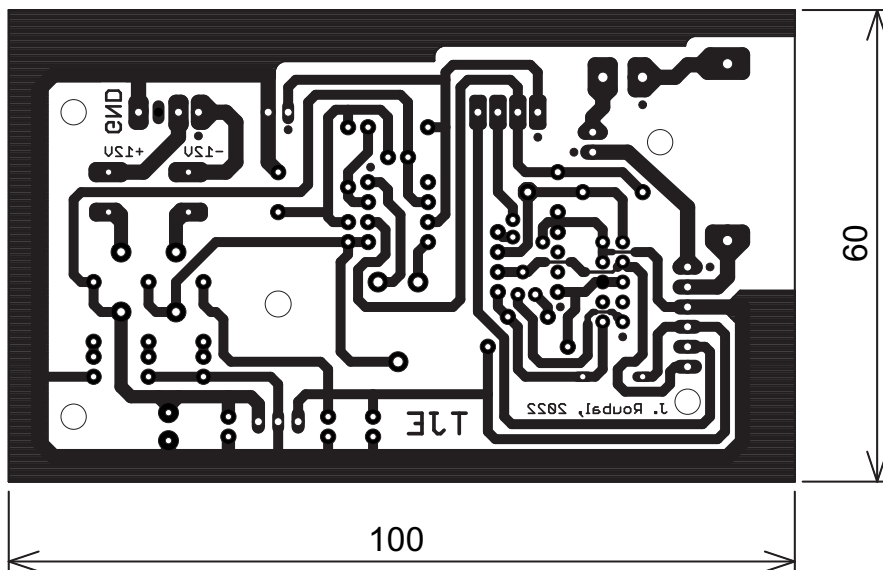
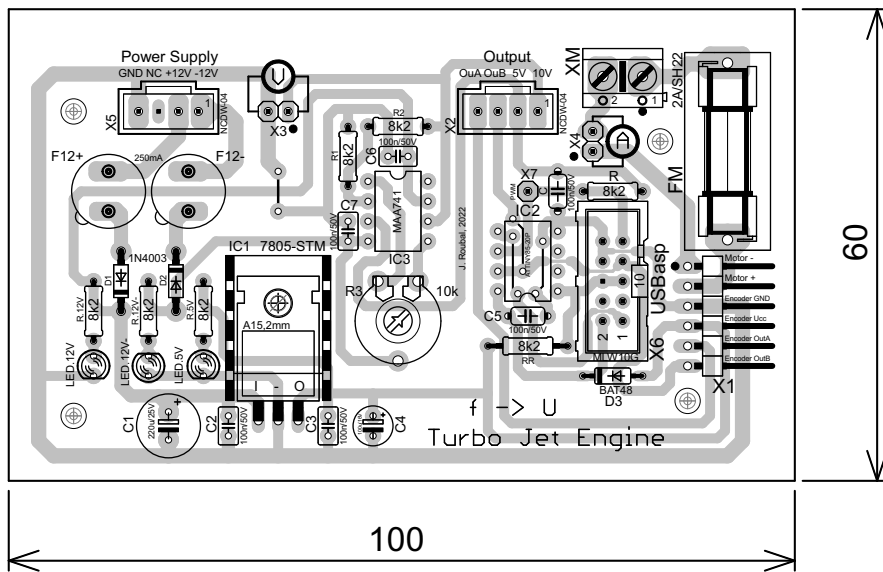
Vedoucí absolventské práce poté přišel s myšlenkou převést signál z encoderu na standardní unifikovaný napěťový signál v rozsahu $\langle 0; 5 \rangle$ V, respektive $\langle 0; 10 \rangle$ V, aby rozšířil užití učební pomůcky v předmětu automatizace na střední škole. Protože toto bylo nad rámec zadání této absolventské práce, provedl návrh a realizaci tohoto převodníku sám vedoucí této práce. Tato příloha popisuje stručně tento navržený převodník.

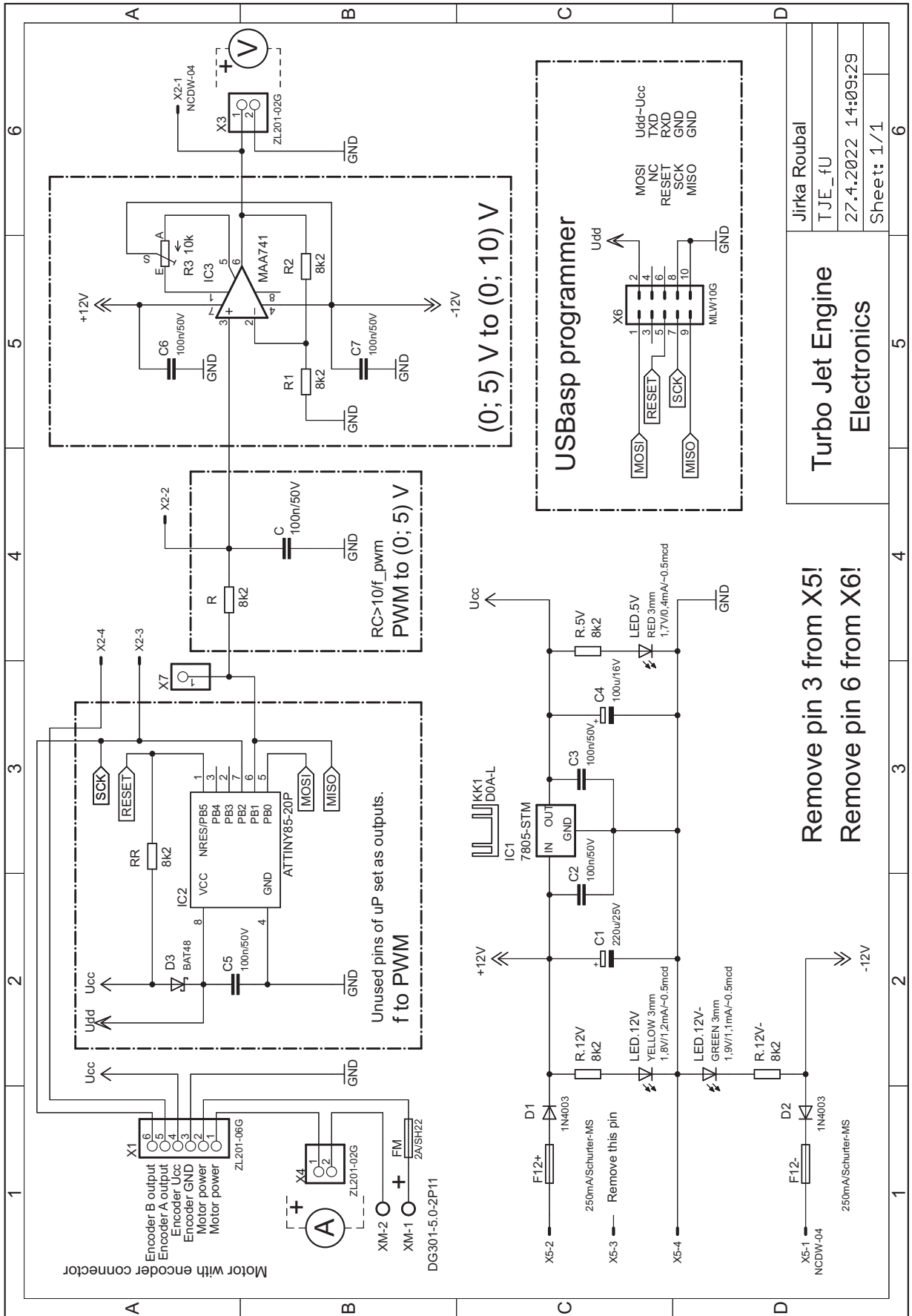
E.1 Popis převodníku frekvence \rightarrow napětí

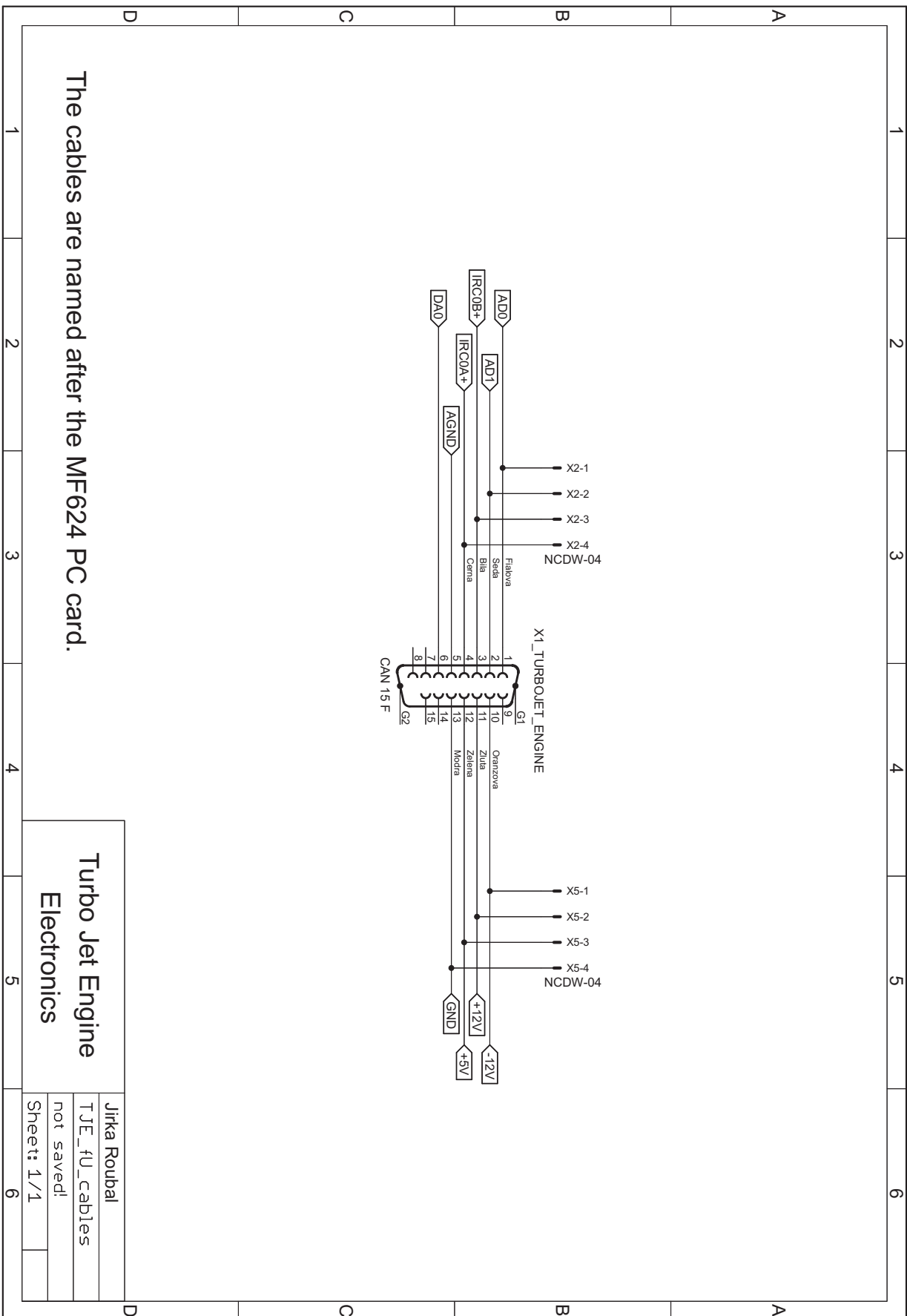
Navržený převodník je převodníkem *frekvence \rightarrow napětí* a skládá se ze čtyř částí, viz schéma na stránce XI. První částí je stabilizovaný zdroj na +5 V, jehož ústřední součástí je lineární stabilizátor napětí 7805. Druhou částí je obvod s mikropočítačem ATtiny85 a programovacím konektorem X6. Mikropočítačem je pomocí Timeru0 měřena perioda signálu z encoderu motoru na PortuB.2 (pin 7). Ta je v mikropočítači přepočítávána na střídu PWM signálu, který je generován pomocí Timeru1 na PortuB.1 (pin 6). Třetí částí převodníku je RC článek, který převádí PWM signál na stejnosměrné napětí v rozsahu $\langle 0; 5 \rangle$ V. Čtvrtou částí převodníku je obvod s operačním zesilovačem MAA741,

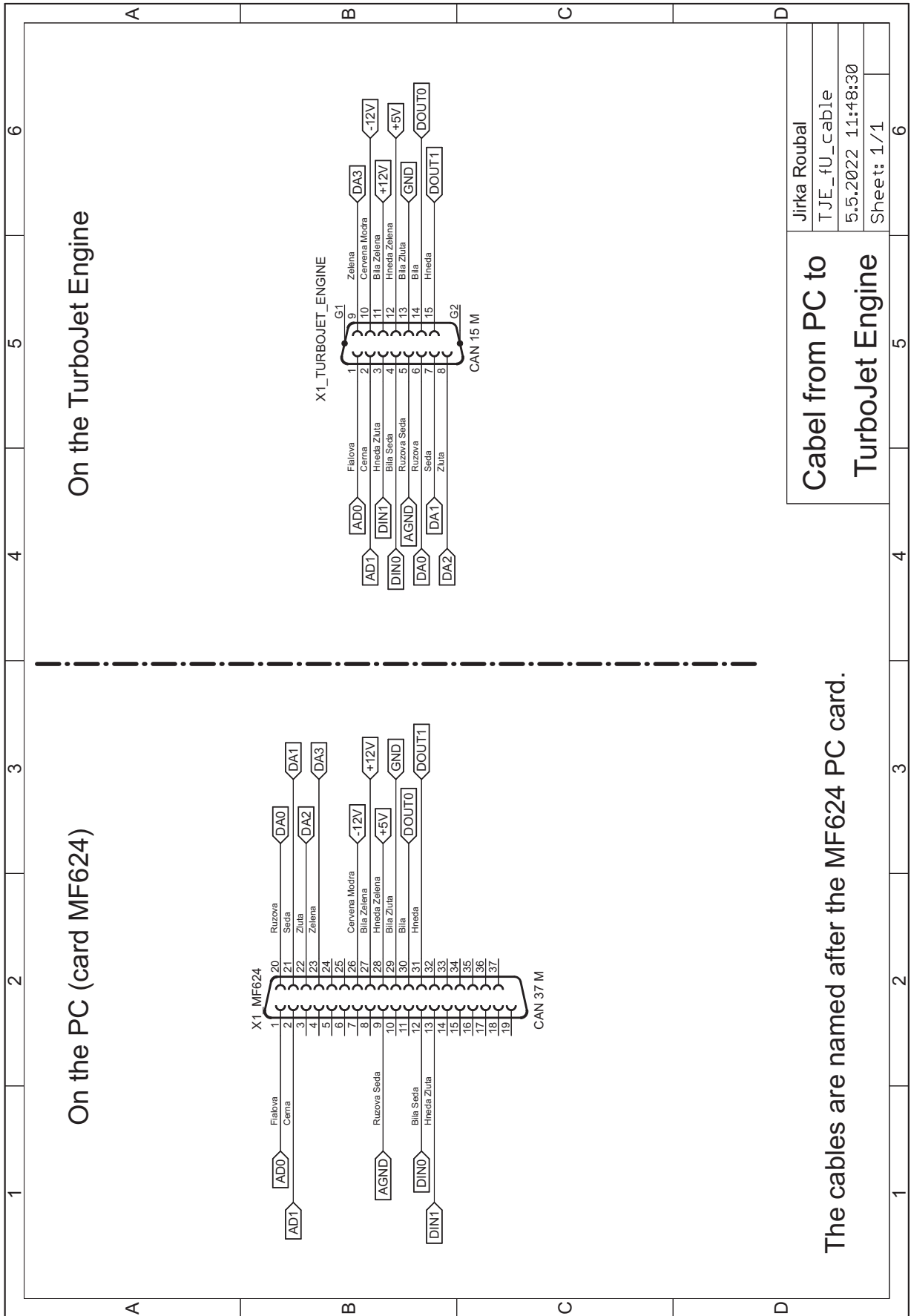
který toto napětí zesílí dvakrát, to je, převede ho na rozsah $\langle 0; 10 \rangle$ V. Navržený převodník je napájen symetrickým napětím ± 12 V.

Dále se bez bližšího popisu nachází motiv plošného spoje, osazovací výkres, schéma převodníku *frekvence* → *napětí* včetně kabeláže, program pro mikropočítač ATtiny85 a fotografie vyrobeného převodníku.









```

/*****
 * TJE_fU
 * MCU: ATtiny85, Crystal 8MHz, Ucc=5V
 * J. Roubal, 29.04.2022
 *****/

// **** DIRECTIVES by Martin Krásl ****
#define bitRead(_register_, _bit_) (_register_ & (1<<_bit_))
#define bitReset(_register_, _bit_) (_register_ &= ~(1<<_bit_))
#define bitSet(_register_, _bit_) (_register_ |= (1<<_bit_))
// ****

#define F_CPU 8000000
#include <avr/io.h>           // Library for I/O pin definitions
#include <avr/interrupt.h>    // Library for interrupts
#include <util/delay.h>       // Library for busy-wait delay loops

/** GLOBAL VARIABLES DECLARATION **/
unsigned int NofTimerOverflow = 0;    // NofTimerOverflow is the number of Timer0 overflows
unsigned long int NofMicroseconds = 0; // NofMicroseconds is the period of the signal from the encoder
float Frequency = 0;                 // Frequency is the frequency of the signal from the encoder
float DutyCycle = 0;                 // DutyCycle is the duty cycle of the PWM output
unsigned char N = 0;                 // N = DutyCycle is declared as Byte <0;255>

ISR(INT0_vect) {
    // The subroutine for servicing the external interrupt.
    NofMicroseconds = 39 * NofTimerOverflow;
    NofTimerOverflow = 0;
    Frequency = 1000000 / NofMicroseconds;
    DutyCycle = 0.15 * Frequency;
    N = round(DutyCycle);
    if (Frequency>1690) {N = 254;}
    if (Frequency<50) {N = 0;}
    OCR1A = (char) N;
}

ISR(TIMO_OVF_vect) {
    //The subroutine for servicing the interrupt when Timer0 overflows.
    bitSet(GTCCR, PSRO);           // Prescaler reset
    NofTimerOverflow++;
}

```



```

int main(void) {
    /** HARDWARE DEVICES CONFIGURATION ***/
    bitSet(DDRB, DDB0); // PORTB0 is configured as the output (unused)
    bitSet(DDRB, DDB3); // PORTB3 is configured as the output (unused)
    bitSet(DDRB, DDB4); // PORTB4 is configured as the output (unused)

    bitSet(DDRB, DDB1); // PORTB1 is configured as the output (PWM output)
    bitReset(DDRB, DDB2); // PORTB2 is configured as the input (signal from encoder)
    bitSet(PORTB, PB2); // Enable Pull up resistor on PIN2

    bitSet(SREG,7); // All interrupts are enabled (I bit in SREG register set to 1)
    bitSet(GIMSK,INT0); // The external pin interrupt is enabled (INT0 bit in GIMSK register set to 1)
    bitSet(MCUCR,ISC01); // The falling edge of INT0 generates an interrupt request (MCUCR register),
    bitReset(MCUCR,ISC00); // see Table 9-2 in uP ATtiny25-45-85 from Atmel.pdf
    bitSet(TIMSK, TOIE0); // The interrupt of the Timer0 overflow is enabled (in TIMSK register)
    bitReset(TIMSK, TOIE1); // The interrupt of the Timer0 overflow is enabled (in TIMSK register)

    TCCR0B |= 0B00000001; // Timer0 is configured as a timer, Prescaling source of Timer0 = CLK/1
    TCCR1 |= 0B01100001; // Timer1 is configured as a timer (PWM generator),
                        // see page 89 in uP ATtiny25-45-85 from Atmel.pdf
                        // Bit 6 - PWM1A: Pulse Width Modulator A Enable (PWM mode based on
                        // comparator OCR1A in Timer/Counter1)
                        // Bits 5:4 - COM1A[1:0]: Comparator A Output Mode; PORTB1 = OC1A
                        // (OCR1A means DutyCycle/100*255)
                        // Bits 3:0 - CS1[3:0]: Clock Select Bits; Prescaling source of
                        // Timer1 = CLK/1

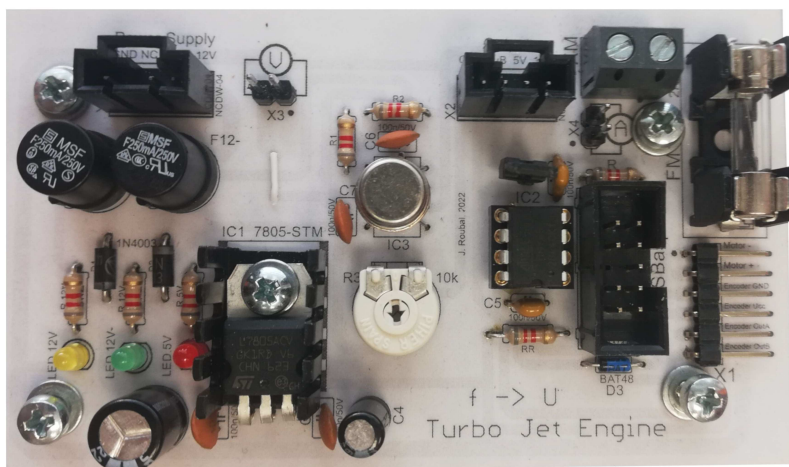
    /**vvv INITIALIZATION vvv*/
    OCR1A = 127;
    _delay_ms(500);
    OCR1A = 0;
    _delay_ms(500);

    NofTimer0overflow = 0;
    NofMicroseconds = 0;
    bitSet(TCCR0B, PSR0); // Prescaler reset
    TCNT0 = 0; // The Timer0 is reset (TCNT0 register)
    /**^^^ INITIALIZATION ^^^*/

    while(1) {
        }
    }

```

Poznámka: Mikro počítač ATtiny85 má pojistku CKDIV8, která je ve výchozím stavu naprogramována (log. 0). To znamená, že systémové hodiny jsou děleny osmi. Pro správnou funkci výše uvedeného programu je třeba pojistku CKDIV8 deaktivovat (nastavit na log. 1). Pak bude mít hodinový signál, který je zdrojem pro časovače (Timer0 a Timer1), frekvenci 8 MHz, viz tabulka 20-5 v technické specifikaci mikro počítače ATtiny85. □



Obrázek E.1: Fotografie převodníku frekvence → napětí