ČVUT Praha
Fakulta elektrotechnická
Katedra řídící techniky

Bakalářská práce

Identifikace proudového motoru pro model letadla

Miroslav Hájek

vedoucí práce: Ing. Ondřej Špinka

Praha 2006

České vysoké učení technické v Praze, fakulta elektrotechnická

Katedra řídící techniky Školní rok: 2005/2006

Zadání bakalářské práce

Student: Miroslav H á j e k

Obor: Kybernetik a měření

Název tématu: Identifikace parametrů proudového motoru pro model letadla

Zásady pro vypracování:

Identifikace parametrů dynamického systému

1. Seznamte se s principem funkce a řízení modelu leteckého proudového motoru.
2. Navrhněte identifikační experimenty a změřte dynamické parametry turbíny.

Seznam odborné literatury: Dodá vedoucí práce

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ondřej Špinka

Datum zadání bakalářské práce: zimní semestr 2005/2006

Termín odevzdání bakalářské práce: 30. 6. 2006

Prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Zbyněk Škvor, CSc.
děkan

V Praze, dne 1. 2. 2006

Prohlášení

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

V Praze dne ……

……

Miroslav Hájek

Abstrakt

Cílem bakalářské práce bylo dostupnými metodami identifikovat proudový motor pro model letadla a navrhnout regulátor otáček.

Pro identifikaci turbíny byl vytvořen program v jazyce C#, který měl na starosti vizualizaci dat. Data odečítal přípravek s mikrokontrolerem HC12, který byl použit kvůli přesnému časování a představoval spojnici mezi počítačem a turbínou. Komunikace probíhala na sběrnici RS232.

Abstract

The goal of this work was to identify the dynamic parameters of a model turbofan engine and to design a RPM controller.

The data that were measured at the turbine were gathered by a purpose-designed data acquisition module built around the Motorola HC12 microcontroller. A data-acquisition and preprocessing program for the host computer was created in the C# language. The data-acquisition module and the host computer communicate via RS-232 serial bus.

Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat rodičům za podporu při studiu a své přítelkyni, která měla se mnou při mé práci velkou trpělivost a pochopení pro mé zaneprázdnění.

Dále bych rád poděkoval Ing. Ondřejovi Špinkovi za pomoc, rady a cenné připomínky a Ing. Martinovi Hromčíkovi, Ph.D. za pomoc ohledně prostředí MATLAB. Následně pak posledním třem zmiňovaným za pečlivé přečtení textu a rady k jeho opravě.

Obsah

1. ÚVOD 1
2. ROZBOR MĚŘENÉHO SYSTÉMU 1
2.1. Popis turbíny 1
2.2. Specifikace vstupů a výstupů 2
2.4. Omezení výkonu 4
2.5. Rychlost náběhu 4
2.6. Šum 4
3. TEORETICKÝ ROZBOR 5
3.1. Systém druhého řádu 5
3.2. Regulační obvod 6
3.3. Regulátor PI 6
4. MĚŘICÍ A ŘÍDICÍ ZAPOJENÍ 8
4.1. Přípravek s mikrokontrolerem HC12 8
4.2. Schéma zapojení 8
4.2.2. Měření otáček 8
4.2.3. Měření teploty 9
5. SOFTWARE 9
5.1. Program pro mikrokontroler HC12 9
5.2. Data Reader 11
5.2.1. Knihovny 13
5.2.2. Popis 13
5.3. Ovládání 16
5.3.1. Nastavení komunikace 16
5.3.2. Otevření portu 16
5.3.3. Měření – chod programu 16
5.3.4. Ukončení měření 17
5.3.5. Uložení dat 17
5.3.6. Načtení dat 17
5.3.7. Další funkce programu 17
5.4. Komunikace 17
5.5. Zápis dat 18
5.6. Error.txt 18
6. POPIS SYSTÉMU 19
7. REGULACE OTÁČEK 22
7.1. Určení rozsahu parametrů přenosu 22
7.2. Návrh regulátoru 24
7.2.1. Geometrická místa kořenů (GMK) 24
7.2.2. Response Optimization Toolbox 26
8. ZHODNOCENÍ 29
PŘÍLOHA A 30
PŘÍLOHA B – OBRÁZKOVÁ PŘÍLOHA 32
PŘÍLOHA C – OBSAH PŘILOŽENÉHO CD 34
POUŽITÁ LITERATURA 34
REJSTŘÍK 35

Seznam tabulek

Tab. 1 Vlastnosti turbíny 4
Tab. 2 Popis k obrázku Data Reader - data....14
Tab. 3 Popis k obrázku Data Reader - graf 16
Tab. 4 Tabulka povelů 17
Tab. 5 Formát telegramu - čtení dat....18
Tab. 6 Formát telegramu - skok....18
Tab. 7 Formát telegramu – rampa....18
Tab. 8 Formát telegramu - změna vzorkovací periody 18
Tab. 9 Formát telegramu - ostatní....18
Tab. 10 Rozsah hodnot 22
Tab. 11 Závislost otáček na napětí na palivovém čerpadle 23
Tab. 12 Vlastnosti 24
Tab. 13 Vlastnosti 27

Seznam obrázků

Obr. 1 Turbína s odstředivou spojkou a převodovkou 1
Obr. 2 Schéma turbíny....2
Obr. 3 Signál z modelářské vysílačky....3
Obr. 4 Signál pro čerpadlo....3
Obr. 5 Stavový diagram startu....3
Obr. 6 Komplexně sdružená dvojice pólů 5
Obr. 7 Přechodová charakteristika kmitavého systému druhého řádu....6
Obr. 8 Blokové schéma jednoduchého regulačního obvodu 6
Obr. 9 Frekvenční charakteristika PI regulátoru 7
Obr. 10 Přechodová charakteristika PI regulátoru 7
Obr. 11 Měřící zapojení 8
Obr. 12 Měření otáček, přívod paliva 8
Obr. 13 Měření teploty - termočlánek 9
Obr. 14 Vývojový diagram programu pro přípravek s mikroprocesorem HC12 10
Obr. 15 Vývojový diagram programu Data Reader 11
Obr. 16 Vývojový diagram - DR - událost zavřít port, vyslat příkaz 12
Obr. 17 Vývojový diagram - DR - událost uložení dat 12
Obr. 18 Data Reader - data 13
Obr. 19 Data Reader - graf....15
Obr. 20 Nastavení komunikace 16
Obr. 21 Naměřené průběhy 19
Obr. 22 Frekvenční charakteristika přenosu....20
Obr. 23 Přechodová charakteristika přenosu (čas ustálení pro 5%) 21
Obr. 24 Přenos s proměnnými parametry....22
Obr. 25 Graf - závislost otáček na napětí na palivovém čerpadle 23
Obr. 26 Graf - rate limit 24
Obr. 27 Přechodová charakteristika (čas ustálení pro 5%) 25
Obr. 28 Akční zásah 25
Obr. 29 Návrh parametrů regulátoru 26
Obr. 30 Uncertain Parameters 26
Obr. 31 Příklad nastavení mezí – REG2....27
Obr. 32 Přechodové charakteristiky 28
Obr. 33 Akční zásahy....28
Obr. 34 Část technického výkresu proudového motoru 30
Obr. 35 Schéma zapojení měřící části 31
Obr. 36 Turbína obr. 1 32
Obr. 37 Turbína obr. 2 33

1. Úvod

Cílem práce je pokusit se dostupnými prostředky identifikovat proudový motor pro model letadla (dále turbína) a navrhnout regulátor.

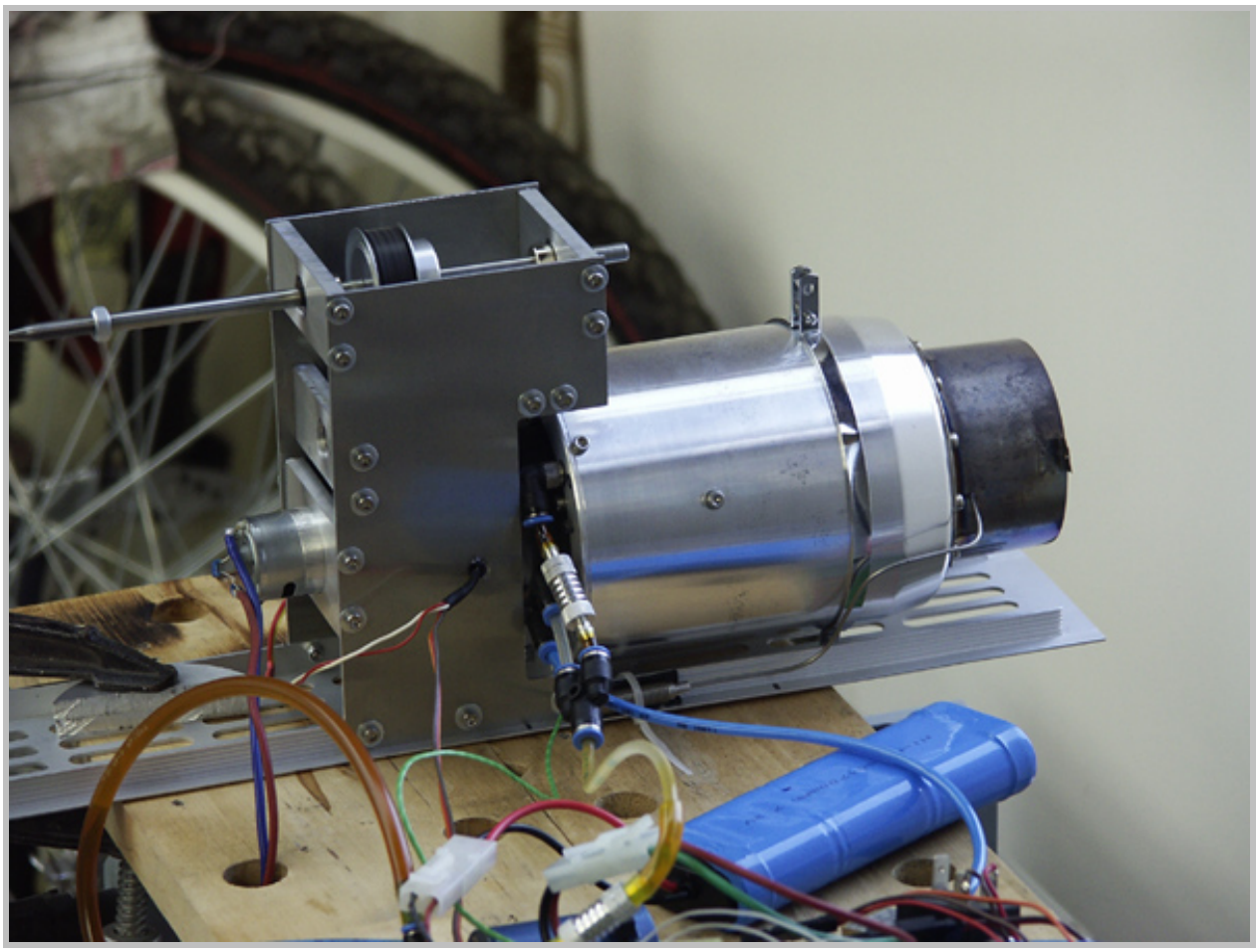
První část se zabývá popisem parametrů a identifikací turbíny. V druhé části se pokusíme navrhnout regulaci otáček. Použijeme k tomu naměřené průběhy a z nich vypočtený rozdílový model systému. Regulátor PI je navržen metodou GMK a pomocí Response Optimization Toolboxu pro SIMULNIK.

2. Rozbor měřeného systému

2.1. Popis turbíny

Turbína je mechanické zařízení, jejíž hlavní částí je rotor, který se otáčí podél své osy. Ten je uložen ve statoru, kterým je turbína připevněna k modelu.

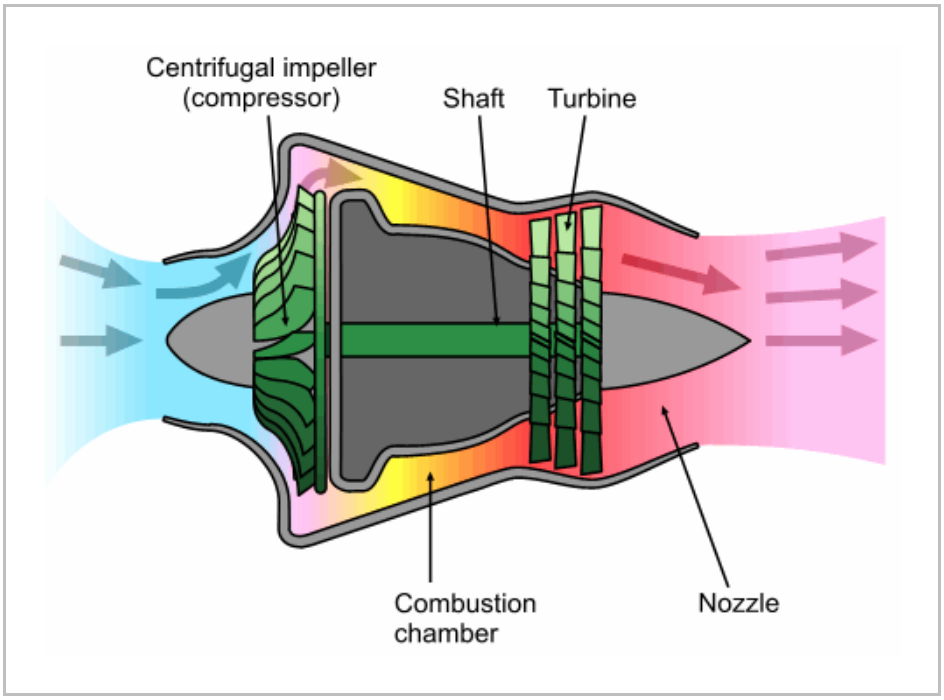
Technický výkres je na Obr. 34 v příloze A.



Obr. 1 Turbína s odstředivou spojkou a převodovkou

Turbína pracuje na principu Newtonova zákona o akci a reakci – spaliny vycházející z motoru působí silou opačným směrem na motor, který tím ženou vpřed.

V přední části motoru se nachází vstupní ústrojí, kterým do něj vstupuje vzduch, a dále je nasáván odstředivým (radiálním) kompresorem, který jej stlačuje až na 100kPa. Čímž se vzduch zahřívá a následně putuje do spalovací komory. Zde se do vzduchu vstřikuje palivo. Zažehnutím směsi se uvolní teplená energie a horké plyny, vycházející ze spalovací komory, roztáčejí turbínu v zadní části motoru, která přes hřídel vedoucí podélnou osou motoru pohání kompresor. Za turbínou, ve výstupní trysce, je vysoký tlak a tepelná energie se mění na kinetickou, a tím vzniká tah motoru.



Obr. 2 Schéma turbíny
Převzato z [10]

Start modelářské turbíny se provádí pomocí elektromotoru, který rotor turbíny roztočí na 3000 otáček za minutu. Současně se přidává propan-butan, který se po chvíli zapálí. Zapálení se provádí žhavící svíčkou. V praxi je zapálení směsi indikováno teplotou s gradientem cca 100°C/15s.

Když dosáhne teplota plynů cca 500°C, zavře se přívod propan-butanu a otevře se přívod kerosinu – leteckého petroleje. Ten je smíchán s 5% syntetického oleje. Přibližně dvě procenta směsi jsou odváděna na mazání ložisek. Tah je následně regulován pouze přísunem petroleje, který čerpá palivové čerpadlo. Průtok se reguluje napětím na vstupu čerpadla.

Z pohledu regulace se jedná o nekmitavý model druhého řádu s jednou rychlou a jednou pomalou časovou konstantou bez dopravního zpoždění. Přenos je podobný elektromotoru.

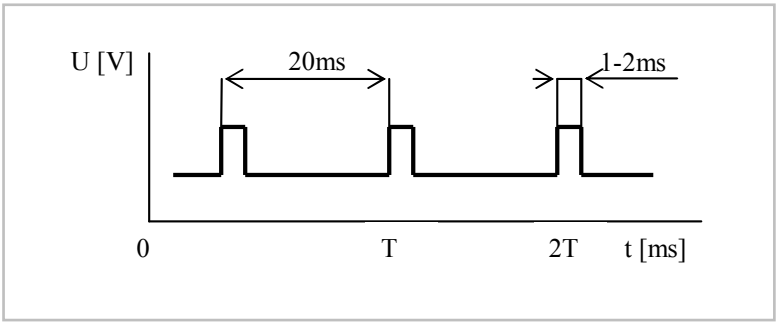
$$P(s) = \frac{k}{(s+p_1)(s+p_2)}$$

2.2. Specifikace vstupů a výstupů

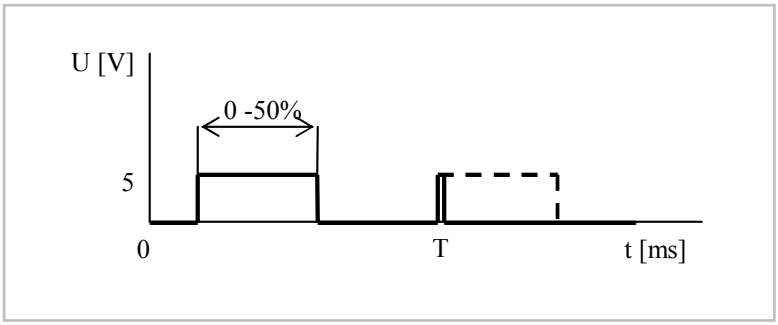
Turbína má jeden vstup, který představuje napětí na palivovém čerpadle a dvě hodnoty výstupů: teplota výfukových plynů a otáčky na hřídeli.

Napětím na čerpadle se následně řídí přítok paliva a tím se ovlivňují hodnoty výstupů podle neznámé matematické závislosti.

Čerpadlo je řízeno PWM signálem se střední hodnotou od 0-2,5V podle Obr. 4. Tento průběh je výstupem silového budiče Obr. 11, který převádí signál z modelářské vysílačky Obr. 3 na PWM signál pro řízení motoru.



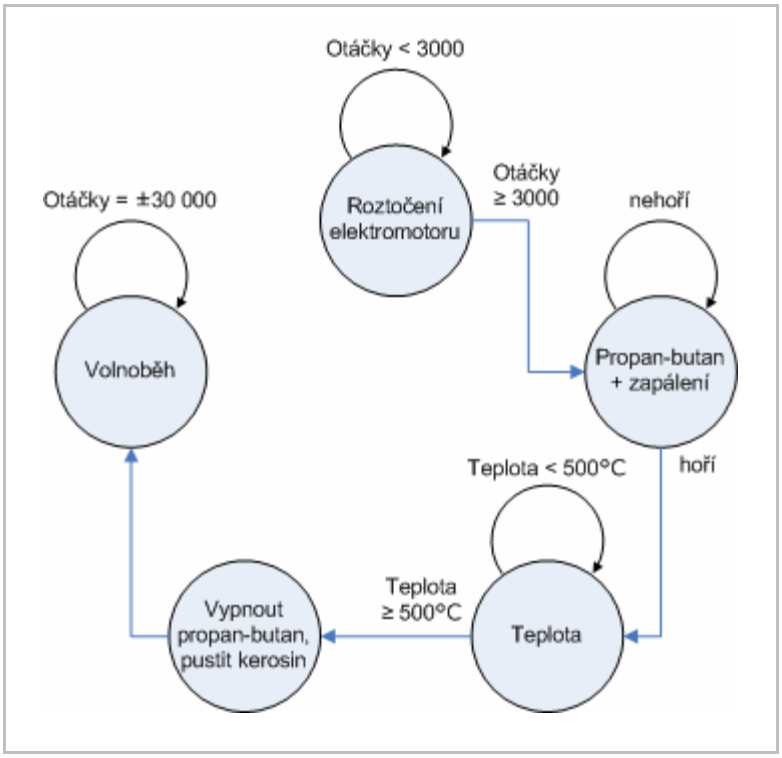
Obr. 3 Signál z modelářské vysílačky



Obr. 4 Signál pro čerpadlo

2.3. Start

Start turbíny se provádí podle následujícího stavového automatu. Při startu se kontrolují otáčky hřídele a gradient teploty výfukových plynů.



Obr. 5 Stavový diagram startu

Start je podrobněji popsán v 2.1 nahoře. Pokud dojde k jakékoliv chybě, např. poklesu otáček či teploty výfukových plynů, je start považován za chybný a startování je ukončeno.

Startování se v současné době provádí ručně a v tomto ohledu bychom rádi pracovali na přípravě automatického starteru.

2.4. Omezení výkonu

V následující tabulce jsou uvedeny základní hodnoty, které by se měly při provozu turbíny dodržet. Hodnoty jsou orientační.

	otáčky	teplota
Volnoběh	30 000 ot.min^{-1}	500°C
Maximální provozní hodnoty	80 000 ot.min^{-1}	700°C
Maximální hodnoty	120 000 ot.min^{-1}	1000°C

Tab. 1 Vlastnosti turbíny

Důležité jsou nejen maximální hodnoty, ale i hodnoty volnoběžné. Maximální hodnoty nesmí turbína překročit, aby nedošlo k její destrukci. Volnoběžné hodnoty zase představují omezení otáček a teploty ze spodní hranice. Pod tyto hodnoty dochází k hasnutí paliva a následnému zastavení chodu. V obou případech tak hrozí zničení turbíny a modelu, nebo alespoň problém s přistáním za problémového manévrování.

2.5. Rychlost náběhu

Pro řízení turbíny je důležitá hodnota maximální možné změny vstupu. Při návrhu a implementaci regulátoru je nutné tuto hodnotu akceptovat a v závislosti na ní navrhnout regulátor.

Tah turbíny se ovládá řízením přísunu paliva resp. řízením chodu palivového čerpadla. Změny v dodávce paliva ale musí být pozvolné a musí odpovídat režimu, v kterém turbína právě pracuje. Například při prudkém přidání se palivo nestačí spálit v komoře a plameny začnou šlehat daleko z výstupní trysky. Naopak při prudkém ubrání je množství paliva vzhledem k proudícímu vzduchu nedostatečné a ten plamen v komoře "sfoukne".

2.6. Šum

Při identifikaci se bude objevovat šum – signál o vysoké frekvenci superponovaný na užitečný signál. Proto bude nutné s tímto problémem počítat a zařadit popřípadě filtr, který tyto frekvence potlačí. Otázkou je, do jaké míry bude tento šum ovlivňovat měřený průběh dynamiky systému. Předpokládáme, že systém bude pomalý.

3. Teoretický rozbor

Teorie systémů a řízení je podrobně popsána v [1] a [2]. Zde uvedeme jen nejdůležitější část.

3.1. Systém druhého řádu

V našem případě, jak už bylo řečeno, budeme počítat s přenosem druhého řádu, který bude průběhy popisovat lépe než řád první.

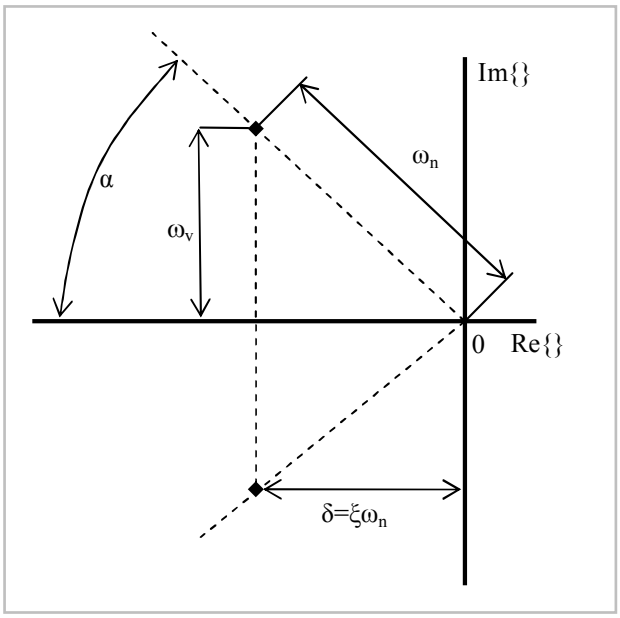
Systém druhého řádu je reprezentován předpisem

$$S(s) = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2},$$

kde poměrné tlumení ξ nabývá hodnot $0 < \xi < 1$ a ω_n je přirozená frekvence. Hodnota k představuje vlastní zesílení systému. Vlastní frekvence zakmitávání přechodového děje je

$$\omega_v = \omega_n\sqrt{(1-\xi)^2}\ .$$

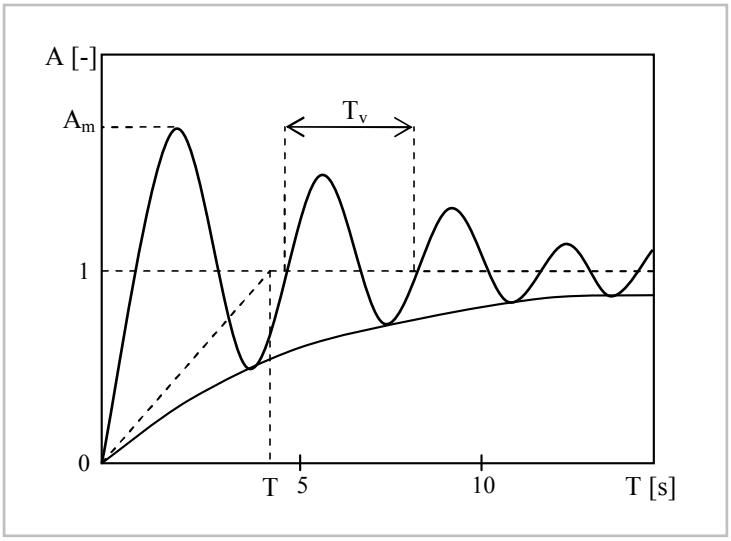
Jmenovateli $S(s)$ odpovídá dvojici komplexně sdružených pólů $p_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_v$ které můžeme nakreslit v komplexní rovině.



Obr. 6 Komplexně sdružená dvojice pólů

Složka přechodového děje je

$$y(t) = A \cdot \exp(-\xi\omega_n t) \cdot \sin(\omega_v t + \varphi).$$



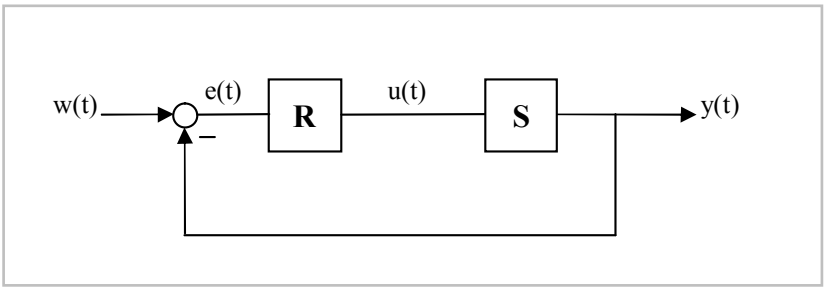
Obr. 7 Přechodová charakteristika kmitavého systému druhého řádu

U kmitavého systému druhého řádu je perioda zákmitů T_v určena vlastní frekvencí $\omega_v = \frac{2\pi}{T_v}$ a poměr dvou za sebou jdoucích amplitud kmitání A_1, A_2 je funkcí poměrného tlumení ξ.

$$\frac{A_2}{A_1} = \exp\left(\frac{-2\pi\xi\omega_n}{\omega_v}\right)$$

3.2. Regulační obvod

Regulační obvod je tvořen soustavou (S) a regulátorem (R), které jsou propojeny zápornou zpětnou vazbou.



Obr. 8 Blokové schéma jednoduchého regulačního obvodu

S(s) … přenos regulované soustavy
R(s) … přenos regulátoru
w(t) … řídící veličina
y(t) … regulovaná veličina
u(t) … akční veličina
e(t) … regulační odchylka

3.3. Regulátor PI

Regulátor P představuje pouhý zesilovač, jeho přenos je

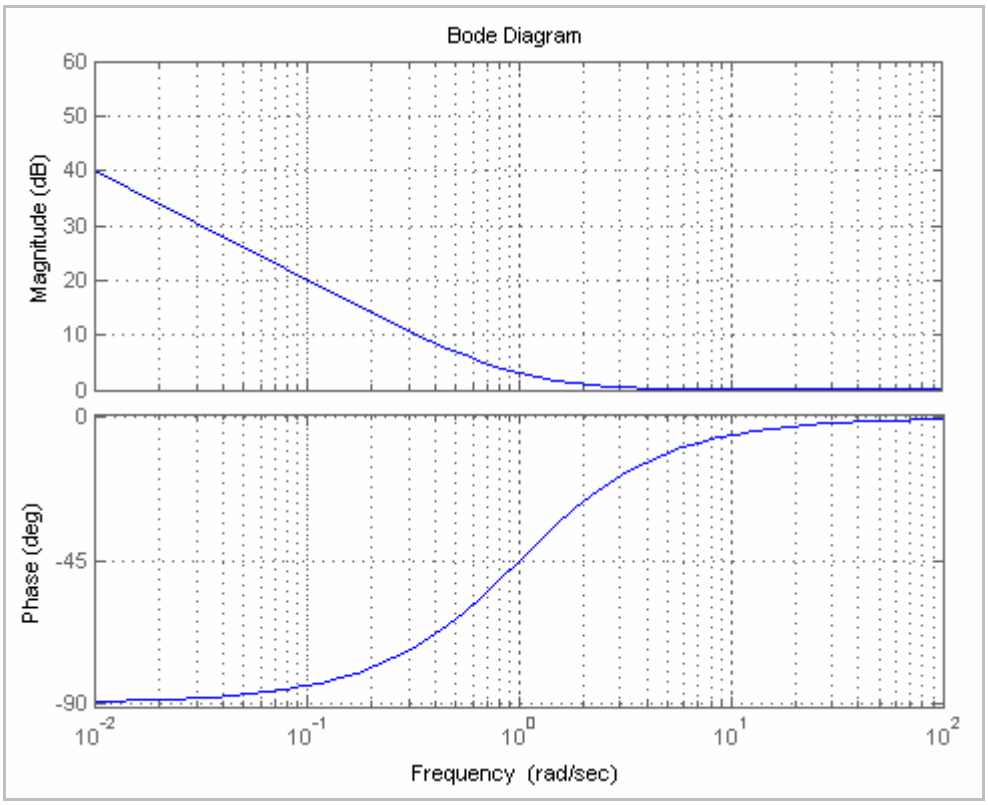
$$R(s) = r_0 .$$

Regulátor I je integrátor. Zvyšuje statickou přesnost regulačního obvodu, ale zhoršuje jeho dynamiku. Pro přenos platí

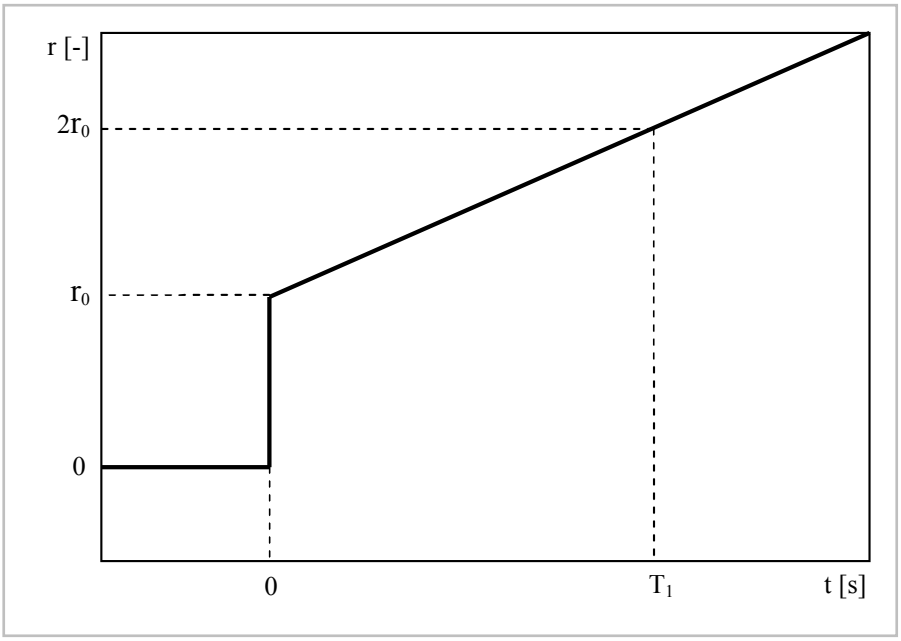
$$R(s) = \frac{r_{-1}}{s}.$$

Regulátor PI je kombinací proporcionálního regulátoru (P) a integrátoru (I). Přenos je dán vztahem

$$R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = \frac{r_{-1}(T_1 s + 1)}{s} = \frac{r_0(s + \omega_1)}{s}.$$



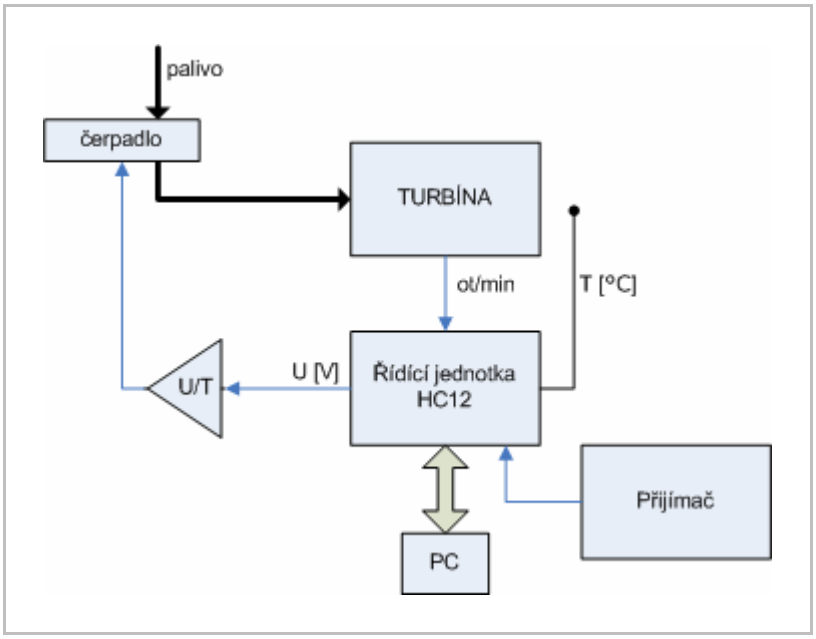
Obr. 9 Frekvenční charakteristika PI regulátoru



Obr. 10 Přechodová charakteristika PI regulátoru

4. Měřicí a řídicí zapojení

Turbína je ovládána řídící jednotkou která představuje přípravek s uC[1] HC12. Přípravek tak generuje signál pro palivové čerpadlo. Pokud je zvoleno manuální řízení, jednotka pouze kopíruje signál z přijímače Obr. 3. Při volbě automatického řízení přebírá funkci řízení vizualizační program. Řídící jednotka pak generuje signál pro čerpadlo podle příkazů, které obdrží od vizualizačního programu Data Reader.



Obr. 11 Měřící zapojení

Přípravek generuje jednotkový skok o zvolené velikosti, nebo je možné generovat rampu s určitou strmostí a délkou. A to jak směrem nahoru, tak i dolů.

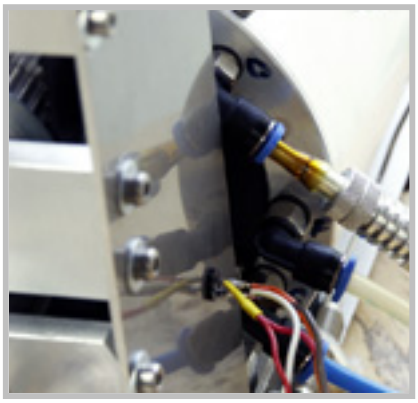
4.1. Přípravek s mikrokontrolerem HC12

Pro přesné odečítání hodnot je použit přípravek s 16bitovým mikrokontrolerem MC68HC912D60A firmy Motorola. Podrobnější popis funkce je v [4].

Takt mikrokontroleru je nastaven na 4MHz.

4.2. Schéma zapojení

Na Obr. 11 je znázorněno blokové schéma zapojení měřící části. Samotné schéma zapojení jednotlivých částí je v příloze A - Obr. 35.



Obr. 12 Měření otáček, přívod paliva

4.2.1. Napájení

Obvod napájení pouze filtruje vstupní stejnosměrné napětí 12V. Na desce s přípravkem je pak toto napětí stabilizováno na 5V se kterým se dále pracuje.

4.2.2. Měření otáček

Měření otáček se provádí pomocí spínání paprsku z infradiody D1, který dopadá na infratranzistor TR1. Tyto členy jsou umístěny v zadní části turbíny, před elektromotorem. Mezi nimi tak prochází

[1] Mikrokontroler – mikroprocesor vybavený speciálními obvody (A/D, D/A převodníky, čítače, časovače atd.) určenými pro použití v řídících aplikacích, tvořený jedním integrovaným obvodem.

otáčející se hřídel s otvorem. Tím je generován signál, který odpovídá otáčkám.

Signál z infratranzistoru je filtrován kondenzátory C6 a C7. Signál pak odpovídá polovině napájecího napětí, to nastavují odpory R3 a R4, nebo nule. Podle toho, zda není nebo je sepnut tranzistor TR1. Operační zesilovač následně představuje komparátor, jehož úrovně nastavují odpory R5-7.

Výstup z operačního zesilovače TLC272 firmy Texas Instruments pak vede do přípravku s uC HC12 na pin (digitální vstup uC) `PT7`.

Parametry použitého operačního zesilovače jsou v [9].

4.2.3. Měření teploty

Pro měření teploty výfukových plynů je použit termočlánek Obr. 13. Termočlánek je zdroj elektrického proudu, který využívá principu termoelektrického jevu. Termočlánek se skládá ze dvou kovů zapojených do série se dvěma spoji – teplý a studený konec termočlánku. Mají-li spoje navzájem různou teplotu, vzniká na každém ze spojů odlišný elektrický potenciál, který je zdrojem proudu.

K měření je použit termočlánek typu K, který je vhodný pro rozsah teplot výfukových plynů. Napětí na termočlánku je zesíleno na invertujícím zesilovači a přivedeno na pin `PAD00` přípravku, kterému odpovídá vstup A/D převodníku uC.

Obr. 13 Měření teploty - termočlánek

5. Software

Pro měření bylo nutné vytvořit dva programy. Jeden v jazyce C, pro desku s uC HC12 [4] a druhý pro vizualizaci měřených dat. Ten byl vytvořen v jazyce C#.

Oba programy jsou na přiloženém cd.

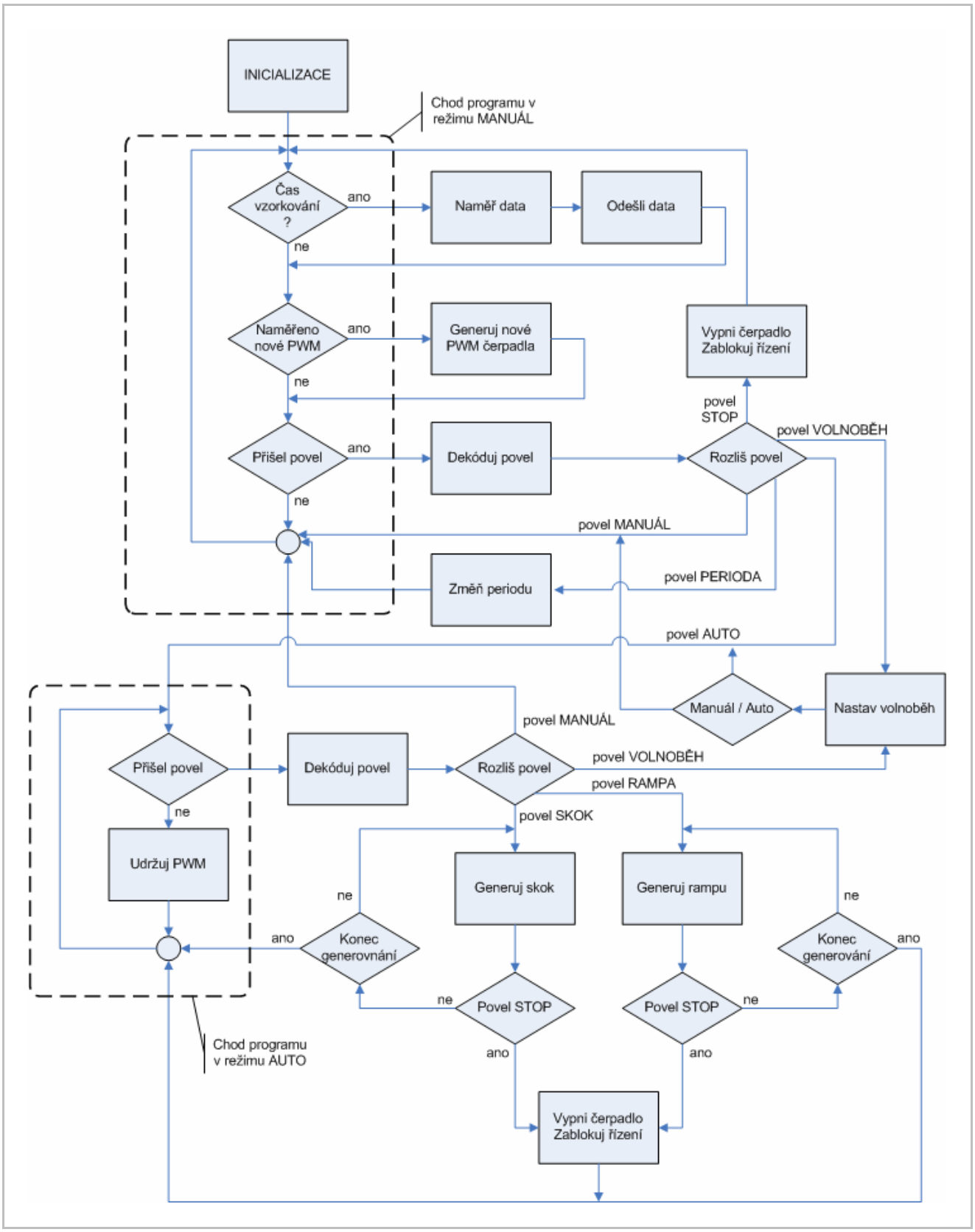
5.1. Program pro mikrokontroler HC12

Program slouží k přesnému odečítání telemetrických dat a pomocí sběrnice RS232 je posílá do pc, kde jsou následně zpracovávána. Funkce programu je patrná z Obr. 14.

Po inicializaci programu se nejprve pomocí modelářské vysílačky kalibruje rozsah ovládací páky. Bezchybná kalibrace je indikována LED diodou připojenou na pin `PH0` uC HC12. Potom program začne vykonávat smyčku – chod v režimu manuál. Zde kontroluje čas odebrání vzorků. Pokud je splněna podmínka, odebere vzorky a odešle je do bufferu sériového rozhraní. Při změně signálu PWM z přijímače je vygenerován nový signál – signál z vysílačky se kopíruje na výstup.

Stále se také kontroluje, zda nepřišel signál ke změně – příkaz k zastavení, k přepnutí na automatické řízení nebo nastavení volnoběžných otáček.

Při přechodu na automatické řízení je udržována poslední hodnota PWM signálu a tak jsou udržovány konstantní otáčky rotoru turbíny. Pokud přijde signál, je následně dekódován podle 5.4 (str. 17). Tak se řízení může vrátit obsluze u vysílačky, nebo je generováno nové PWM – skok nebo rampa. Po skončení generování se program opět vrátí do cyklu, kde udržuje poslední hodnotu.



Obr. 14 Vývojový diagram programu pro přípravek s mikroprocesorem HC12

5.2. Data Reader

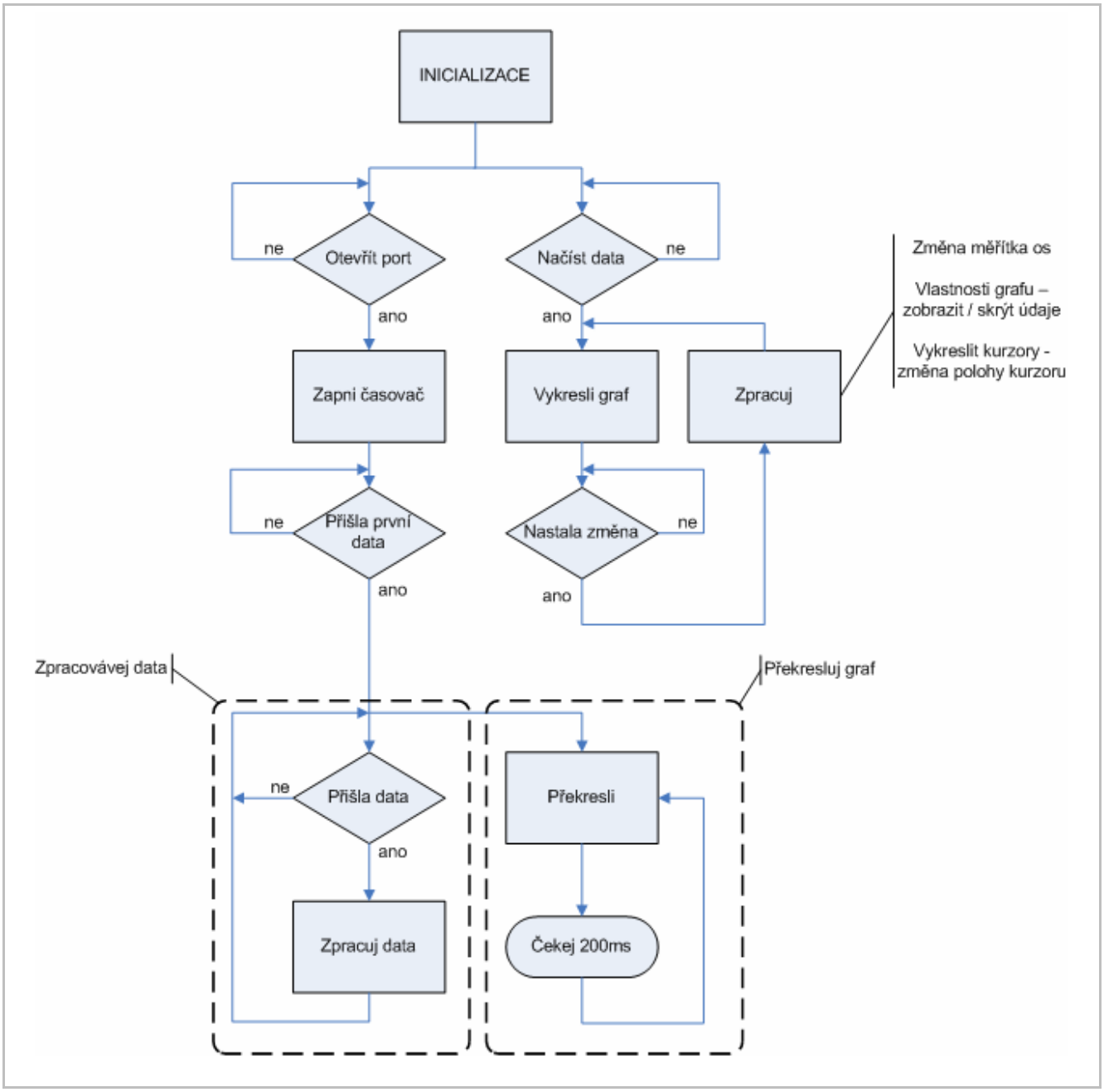
Cílem bylo vytvořit program pro záznam telemetrických dat. Data měří po přesných intervalech přípravek s uC HC12. Viz 4.1 a 5.1. Data Reader se stará o vykreslování průběhů a záznam dat do souboru.

Program byl napsán v jazyce C# ve Visual Studiu .NET 2003. Ke spuštění programu je nutné mít nainstalován Microsoft Framework [6], což je komponenta, která slouží k vývoji a běhu nové generace aplikací a XML služeb.

Po inicializaci se čeká, zda bude následovat čtení ze sériové linky nebo čtení ze souboru – načtení a zobrazení naměřených průběhů.

Po otevření sériové linky se pustí časovač, který volá metodu každých 200ms na překreslování grafů. Příchozí „paket dat" se ukládá do bufferu, kde se kontroluje první kontrolní znak a ze zbylé části se dekódují naměřené hodnoty podle 5.4.

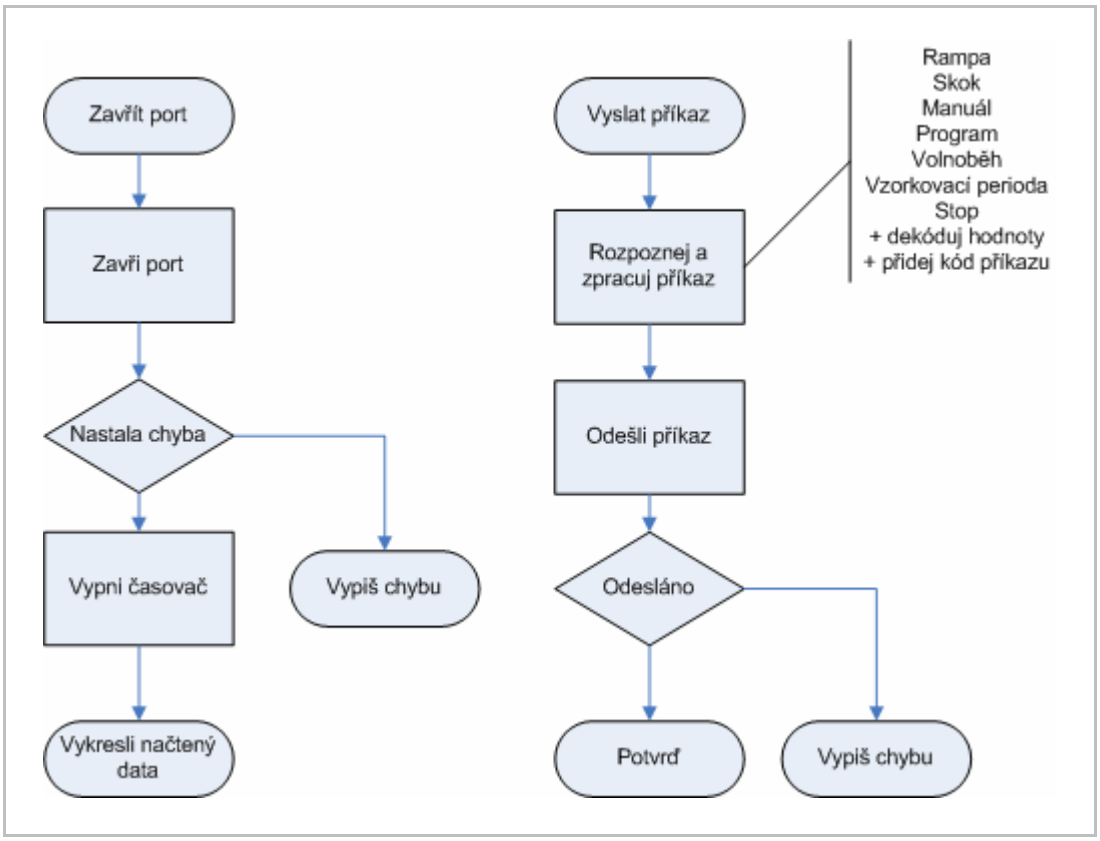
Data jsou ukládána do dynamických polí. Ty lze v průběhu měření ukládat do souboru (5.3.5).



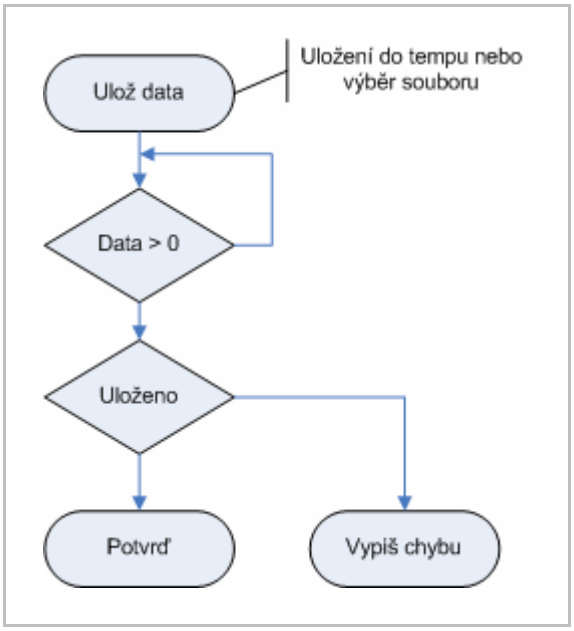
Obr. 15 Vývojový diagram programu Data Reader

Při vykreslování dat se využívá tzv. Double bufferingu [5], kdy se vykresluje obraz do paměti, zatímco první je zobrazován.

Ovládací část je řešena pomocí událostí, které vykonávají daný příkaz. Ty například posílají po sériové lince příkazy měřící desce nebo mění vlastnosti zobrazení. Události jsou popsány v následujících vývojových diagramech.



Obr. 16 Vývojový diagram - DR - událost zavřít port, vyslat příkaz



Obr. 17 Vývojový diagram - DR - událost uložení dat

5.2.1. Knihovny

V programu jsou použity některé externí knihovny.

Komunikaci po sériové lince zajišťuje knihovna [7]

SerialPort.dll, verze 0.7.2172.32019

```
using OpenNETCF.IO.Serial;
```

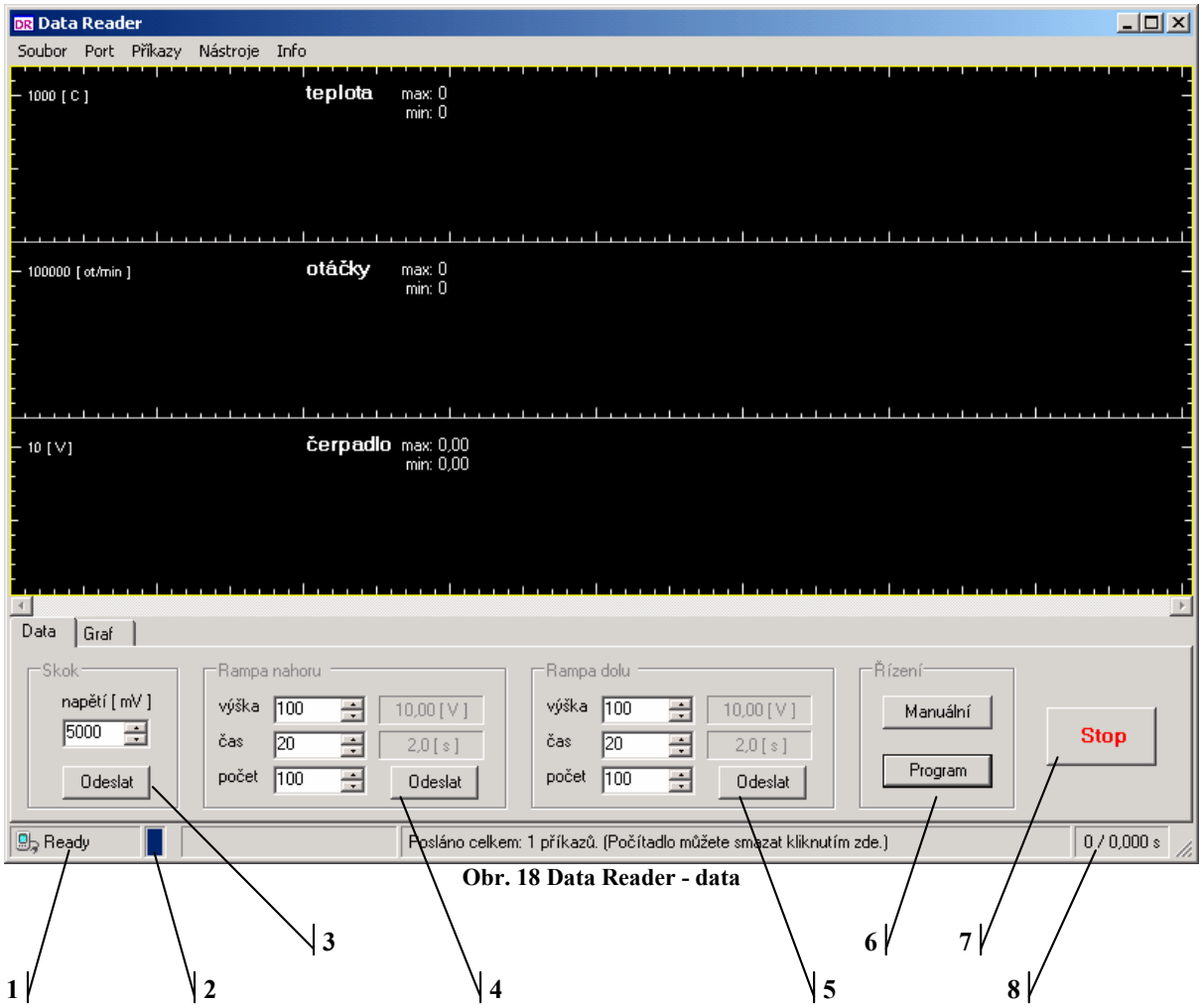
Následující knihovny zajišťují vedlejší funkce, víceméně jen estetické.
Všechny jsou veřejně přístupné na [8].

StatusMessaging.dll, verze 1.0.829.15508
Zobrazuje nápovědu v liště, podle výběru položky v menu.

AnimatedIcon.dll, verze 1.0.2188.22392
Zajišťuje zobrazování ikon v liště.

MenuImageLib.dll, verze 1.0.1058.39033
Přidává ikony k položkám do menu.

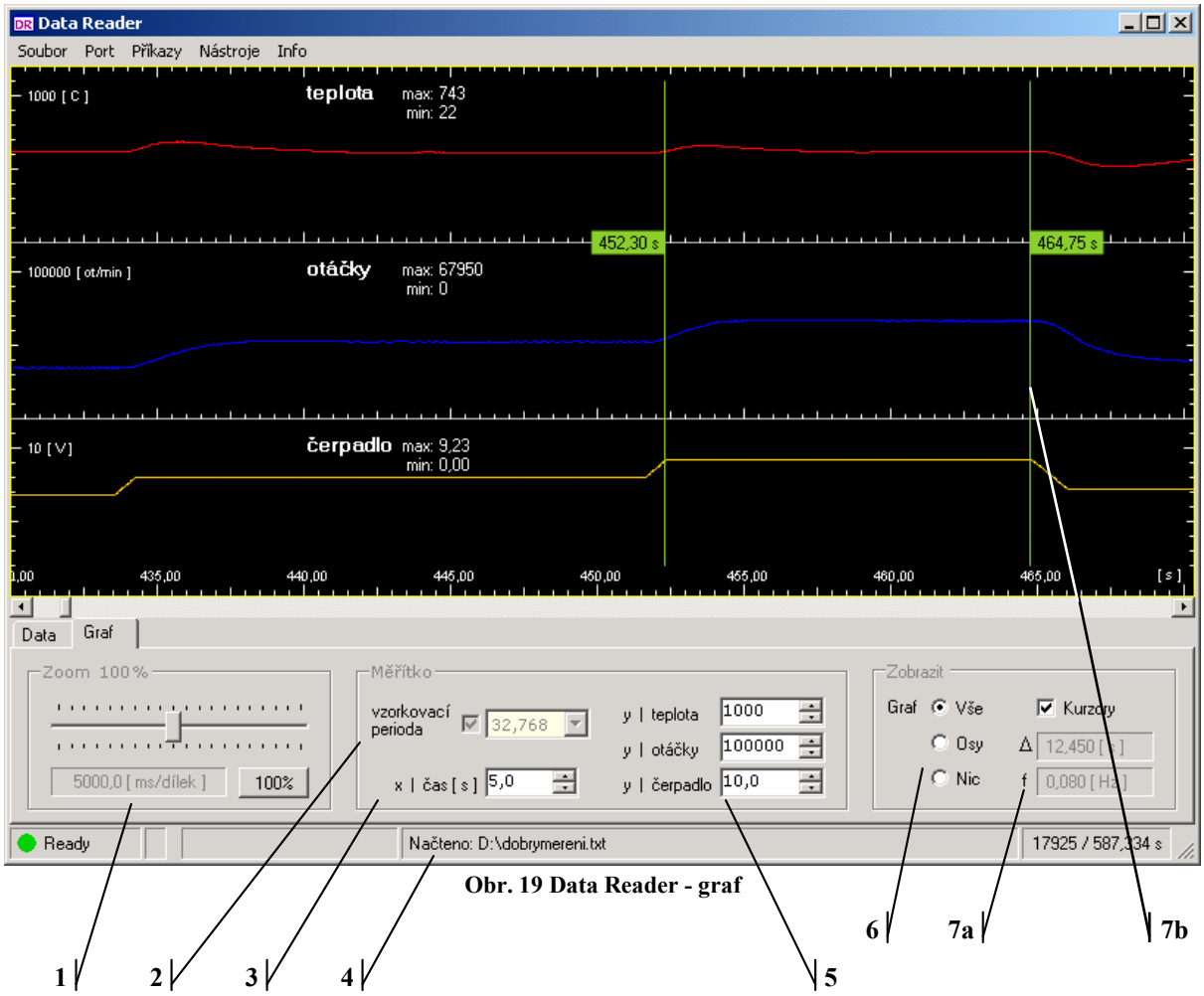
5.2.2. Popis



Obr. 18 Data Reader - data

číslo	funkce	popis	
1	stav programu		**Ready** Pokud je program puštěn bez chyb.
			Error Chybové hlášky se zobrazují ve stavové liště a ukládají do souboru error.txt. Zobrazení chybové hlášky lze smazat kliknutím na stavovou lištu.
	režim řízení		**Manuální řízení** Záložka Data > Manuální Příkazy > Manuální (Ctrl+M) Řízení přebírá obsluha u vysílačky.
			Řízení programem Záložka Data > Program Příkazy > Program (Ctrl+P) Hodnoty na čerpadle paliva jsou nastavovány pomocí programu.
2	port		Zobrazuje, zda je otevřený/zavřený sériový port.
3	skok		Odešle jednotkový skok o zadané velikosti.
4	rampa nahoru		Odešle rampu. Její výška je dána výškou jednotlivého kroku v mV x počet a šířka je součin času jednoho kroku v ms x zadaný počet kroků.
5	rampa dolu		
6	řízení		**Manuální řízení** Nastavení manuálního řízení.
			Řízení programem Hodnoty na čerpadle paliva jsou nastavovány pomocí programu.
7	stop		**Stop** Příkazy > Stop (F12) Vyšle příkaz k ukončení řízení – vypne přívod paliva do turbíny.
8	vzorky/čas		Zobrazuje počet naměřených vzorků a čas měření v závislosti na periodě odečítání vzorků – není to systémový čas, ale čas odvozený od měření.

Tab. 2 Popis k obrázku Data Reader - data



Obr. 19 Data Reader - graf

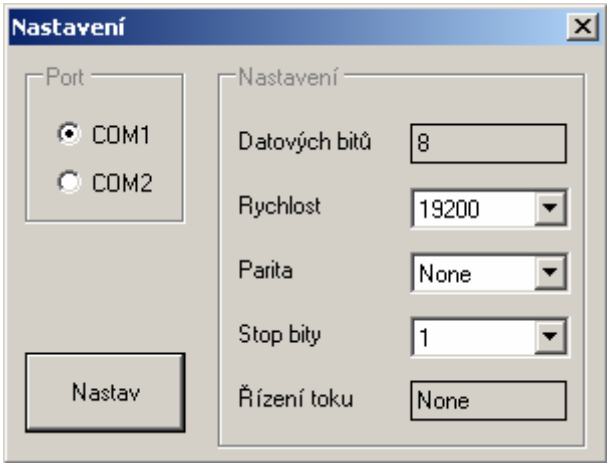
číslo	funkce	popis
1	zoom	Umožňuje zoomovat graf v časové oblasti. Zobrazuje také přesnou hodnotu času na jeden dílek (v grafu od čísla k číslu na časové ose).
2	vzorkovací perioda	Umožňuje nastavit vzorkovací periodu po krocích, které jsou odvozeny od taktu uC HC12. Základní perioda je $16{,}384 \cdot k$ [ms], kde $k \in \{1,2,3...9,10\}$. Po zaškrtnutí políčka se vyšle telegram a zablokuje se výběr. Je tak možné bezpečně volit periodu bez zbytečné komunikace.
3	osa x	Nastavení času
4	popisek	Zobrazuje cestu k načtenému souboru, počítá vyslané příkazy – slouží jako kontrola, zda byl příkaz odeslán, nebo zobrazuje nastalé chyby.
5	osa y	Umožňuje nastavit měřítko pro teplotu, otáčky a čerpadlo.
6	graf	Přepíná mezi zobrazením grafu. Vše – zobrazí popis os, grafu, maximální a minimální naměřené hodnoty k jednotlivým průběhům. Osy – pouze popis os Nic

7a	kurzory	Zobrazení f[Hz] a Δ [s] mezi jednotlivými kurzory. Ty se ovládají pravým a levým kliknutím a tažením myši.
7b		Kurzor a zobrazení času.

Tab. 3 Popis k obrázku Data Reader - graf

5.3. Ovládání

5.3.1. Nastavení komunikace



Obr. 20 Nastavení komunikace

Soubor > Nastavení (Ctrl+N)

Pomocí toho dialogového okna se nastavují parametry sériového portu. Výběr portu, rychlost, parita a počet stop bitů. Na Obr. 20 je výchozí nastavení.

5.3.2. Otevření portu

Port > Otevřít (F5)

Otevře zvolený port a čeká na příjem dat.

5.3.3. Měření – chod programu

Manuální řízení

Záložka Data > Manuální

Příkazy > Manuální (Ctrl+M)

Nastavení manuálního řízení.

Řízení programem

Záložka Data > Program

Příkazy > Program (Ctrl+P)

Hodnoty na čerpadle paliva jsou nastavovány pomocí programu.

Volnoběh

Příkazy > Volnoběh (Ctrl+V)

Nastavení otáček na volnoběžné.

Stop

Příkazy > Stop (F12)

Vyšle příkaz k ukončení řízení – vypne přívod paliva do turbíny.

5.3.4. Ukončení měření

Port > Zavřít (F6)

Zavře port – ukončí se čtení dat. Po opětovném otevření portu je možné číst data, která jsou posílána na port.

5.3.5. Uložení dat

Rychlé uložení

Soubor > Uložit (Ctrl+S)

Uloží data do souboru temp.txt. Data se přepisují! Tento způsob uložení dat je vhodný jako záloha při měření.

Uložení

Soubor > Uložit jako...

Uloží data do vybraného souboru a cesty.

5.3.6. Načtení dat

Soubor > Otevřít (Ctrl+O)

Program načte data ze souboru kde jsou odděleny tabulátorem.

5.3.7. Další funkce programu

Smazat

Data > Smazat (Ctrl +Del)

Smaže načtená data. Tuto funkci lze použít i při měření a smazat tak nepotřebná data.

Reset

Data > Reset měřítka

Nastaví měřítka grafu na výchozí hodnoty.

Zoom

Data > Zoom

Zobrazí, nebo skryje záložku zoom. Při skrytí je zoom nastaven na 100%.

5.4. Komunikace

kód povelu	příkaz
1	Auto
2	Manuál
3	Stop
4	Skok
5	Rampa nahoru
6	Rampa dolu
7	Změna vzorkovací frekvence
8	Volnoběh

Tab. 4 Tabulka povelů

Čtení

Data jsou čtena ze sériové linky. Po kontrolním bajtu přichází vždy sekvence bajtů, představující hodnoty měřené veličiny. Vždy v pořadí vyšší a nižší bajt. Kontrolní bajt je 0x55 (55 hexadecimálně).

Formát (7B):

kontrolní bajt	napětí		otáčky		teplota	
	H	L	H	L	H	L

Tab. 5 Formát telegramu - čtení dat

Příchozí data se vždy dekódují jako vyšších 8b x 256 (část H) + nižších 8b (část L). Napětí na čerpadle je posíláno jako $U \cdot 100$, takže po příchodu a přepočtení je ještě hodnota dělena 100. Stejně tak otáčky. Příchozí hodnota je posílána 10krát větší – výsledný formát čísla (double) je pak číslo s jedním desetinným místem v případě otáček a se dvěma v případě napětí na palivovém čerpadle.

Skok

Formát (3B):

kód povelu	napětí	
	H	L

Tab. 6 Formát telegramu - skok

Rampa nahoru (dolu)

Formát (7B):

kód povelu	výška		čas		počet	
	H	L	H	L	H	L

Tab. 7 Formát telegramu – rampa

Změna vzorkovací frekvence

Formát (2B):

kód povelu	hodnota

Tab. 8 Formát telegramu - změna vzorkovací periody

Hodnota odpovídá číslu k: $16{,}384 \cdot k$, kde $k \in \{1,2,3...9,10\}$.

Ostatní příkazy

Ostatní příkazy, jako je změna řízení, příkaz stop atd., jsou ve formátu:

Formát (1B):

kód povelu

Tab. 9 Formát telegramu - ostatní

5.5. Zápis dat

Data jsou ukládána do textového souboru oddělená tabulátorem.

Příklad zápisu dat:

```
75,0715   6,41  652   29020
75,1043   6,41  653   29040
75,1370   6,41  652   29030
75,1698   6,79  652   29030
75,2026   6,79  652   29050
```

První sloupec je čas [s] (násobek zvolené vzorkovací periody), další napětí na čerpadle [V], teplota [°C] a otáčky [ot/min].

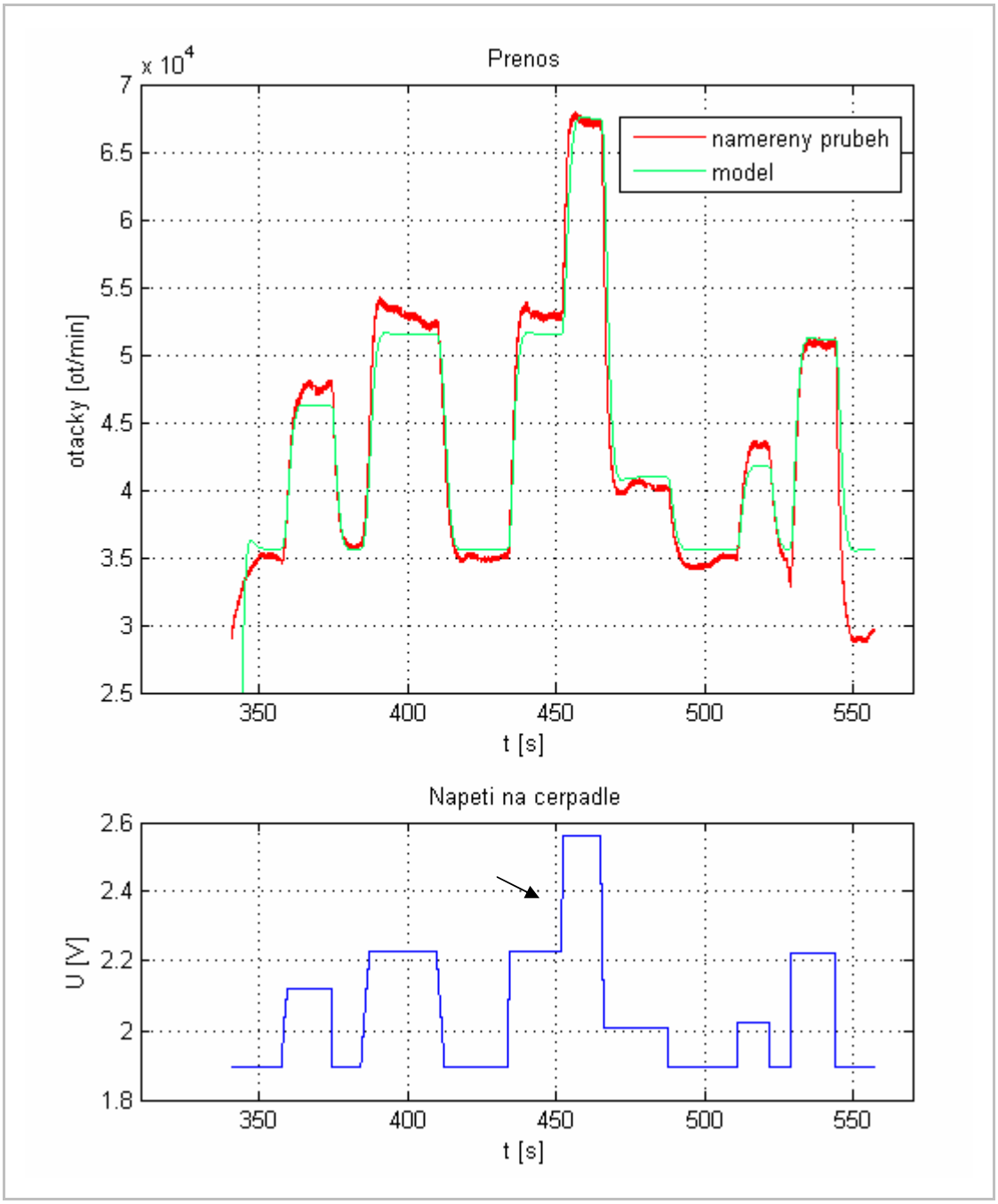
5.6. Error.txt

Chybové hlášky se zapisují do externího souboru error.txt. Příklad zápisu chyb:

```
-- 12.01.2006 11:10:19 ---------------------------------------------
-- 12.01.2006 11:12:52 ---------------------------------------------
    11:12:53 >> Form load. '20' is not a valid value for 'Value'.
                'Value' should be between 'Minimum' and 'Maximum'.
-- 12.01.2006 11:13:20 ---------------------------------------------
-- 12.01.2006 11:14:16 ---------------------------------------------
```

6. Popis systému

Z naměřených dat jsme odečetli zesílení a přirozenou frekvenci [1]. Dále jsme použili iterativní postup tak, aby vznikl přesný rozdílový model.



Obr. 21 Naměřené průběhy

Průběh otáček jsme modelovali jako lineární dynamický systém druhého řádu, kde vstupem je odchylka napětí na palivovém čerpadle od volnoběžného a výstupem je odchylka otáček od volnoběžných. Volnoběžný stav tak je jakýsi pracovní bod. Podrobnější popis je například v [3].

Jednotlivé konstanty jsme dostali „nafitováním" na naměřených průbězích jako kompromis pro různé otáčky a napětí.

$k = 47800$ [-]
$\omega_n = 1{,}23$ rads^{-1}
$\xi = 0{,}846$ [-]

Z těchto hodnot dostáváme podle předpisu

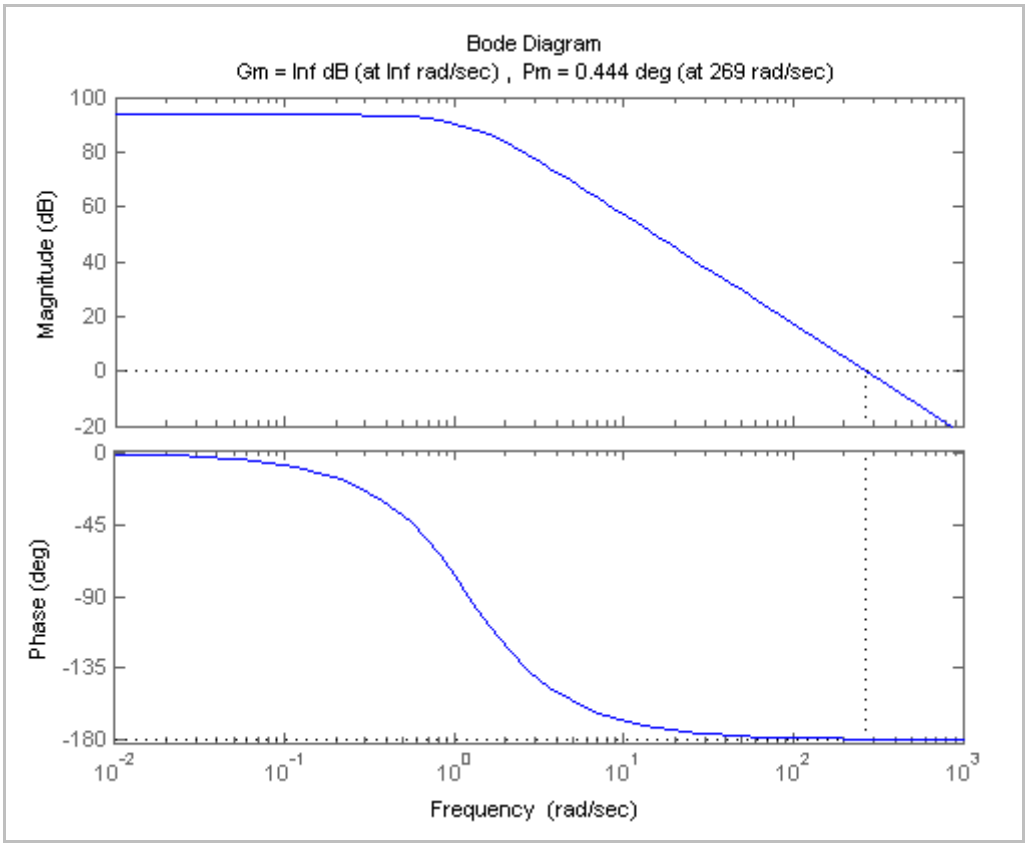
$$S(s) = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

přenos

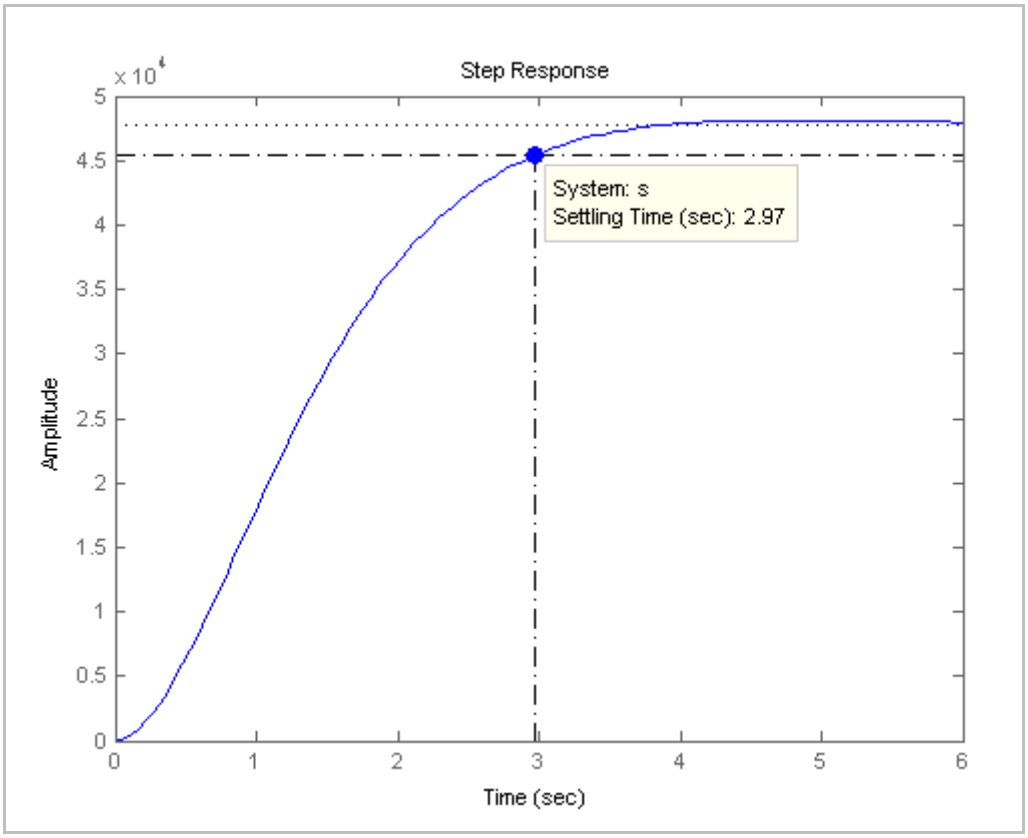
$$S(s) = \frac{47800 \cdot 1{,}23^2}{s^2 + 2 \cdot 0{,}846 \cdot 1{,}23 \cdot s + 1{,}23^2}$$

$$S(s) = \frac{72298}{s^2 + 2{,}08s + 1{,}513}$$

Na následujících obrázcích je frekvenční a přechodová charakteristika přenosu.



Obr. 22 Frekvenční charakteristika přenosu



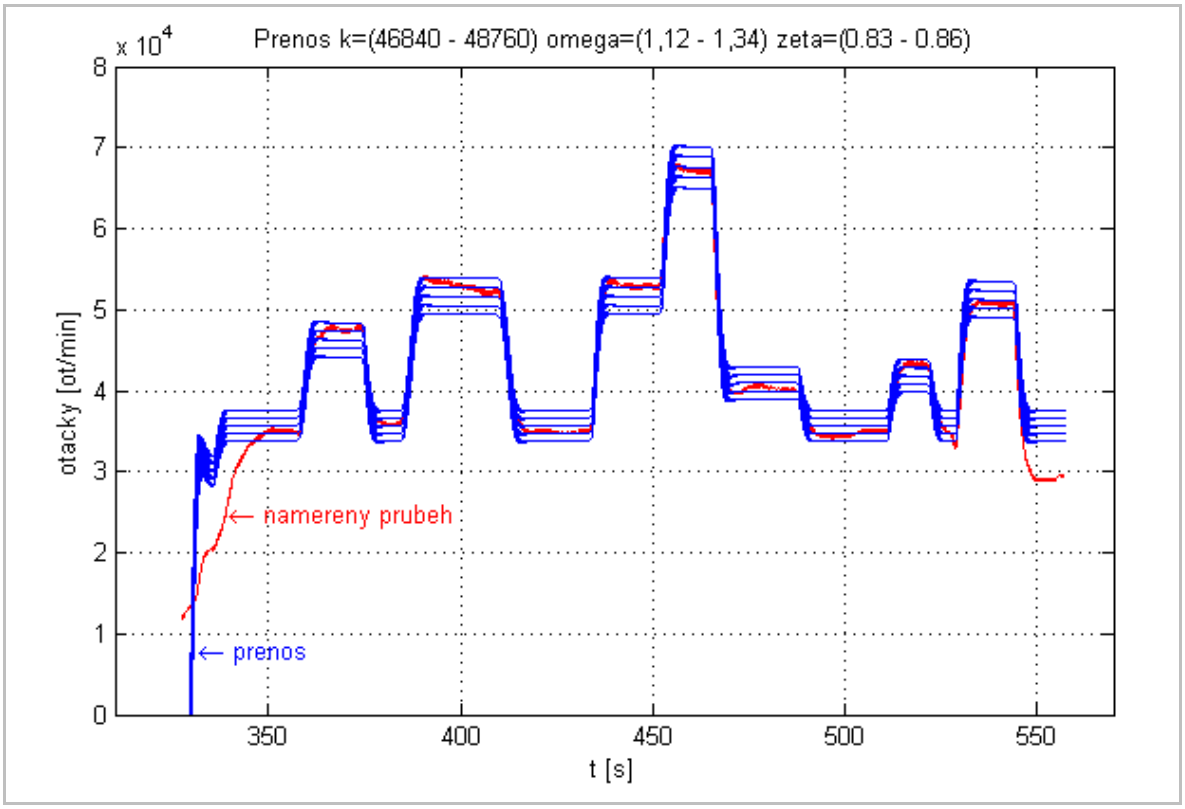
Obr. 23 Přechodová charakteristika přenosu (čas ustálení pro 5%)

7. Regulace otáček

7.1. Určení rozsahu parametrů přenosu

Pro návrh regulátoru jsme nejprve určili rozsah hodnot tak, aby výsledný rozdílový přenos pokryl celý naměřený průběh, jelikož se pro různé vstupní hodnoty napětí liší nejen zesílení ale i ostatní parametry. Z naměřeného průběhu je vidět, že samotný systém je nelineární. My nadále budeme pracovat s linearizovaným rozdílovým modelem turbíny.

Na následujícím obrázku je vidět pokrytí pro zvolené mezní hodnoty zesílení k, přirozenou frekvenci ω_n a tlumení ξ.



Obr. 24 Přenos s proměnnými parametry

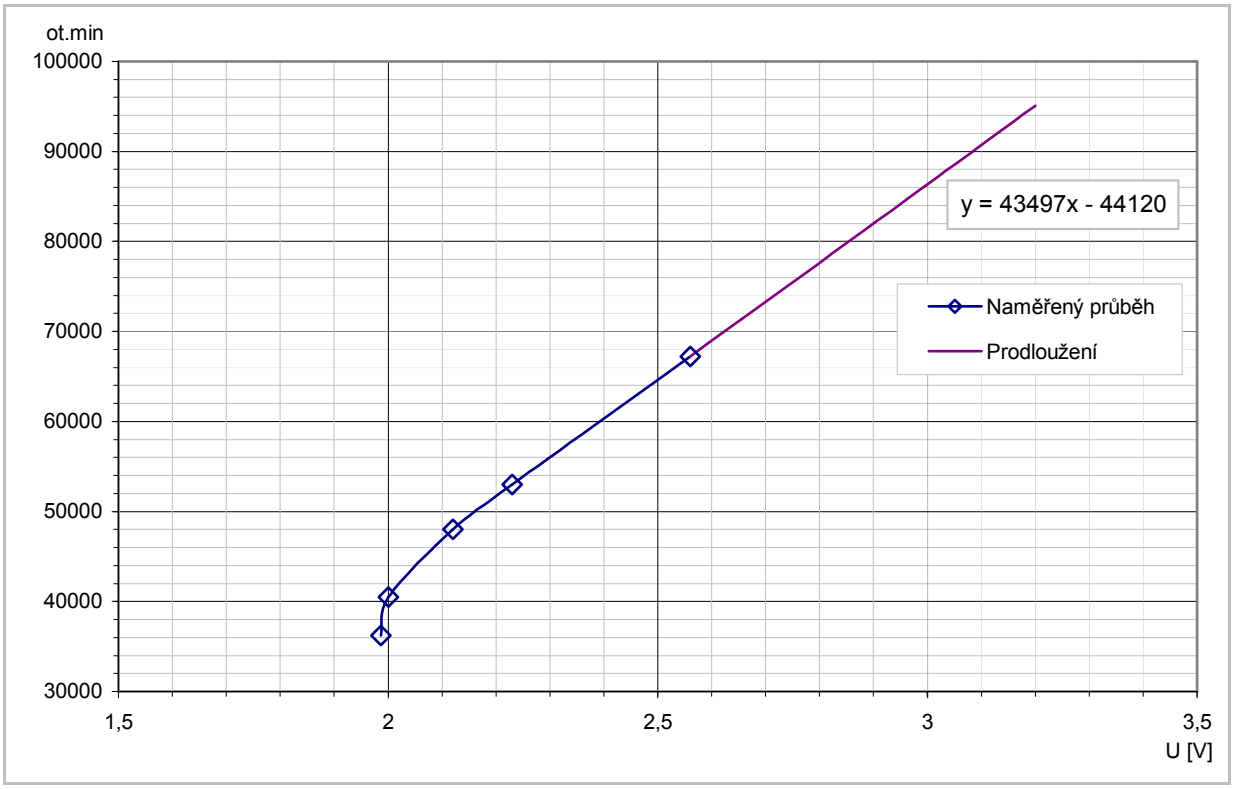
Krajní hodnoty jsme určili experimentem. Hlavním kritériem byl rozsah hodnot. Hodnoty tak byly voleny jako kompromis mezi pokrytím průběhu a rozsahem krajních hodnot.

parametr	minimum	hodnota	maximum
k	46840	47800	48760
ω_v	1,12	1,23	1,34
ξ	0,83	0,846	0,86

Tab. 10 Rozsah hodnot

Z naměřených dat jsme vytvořili převodní graf, který představuje funkční závislost otáček hřídele na napětí na palivovém čerpadle. První část grafu vychází z naměřených dat, která je pak lineárně prodloužena podle rovnice regrese - pro vyšší otáčky se předpokládá lineární průběh.

Volnoběžným otáčkám odpovídá asi 1,9V na palivovém čerpadle. Maximální otáčky (120 000ot/min) by pak nastaly při 3,8V.



Obr. 25 Graf - závislost otáček na napětí na palivovém čerpadle

V následující tabulce je několik důležitých hodnot.

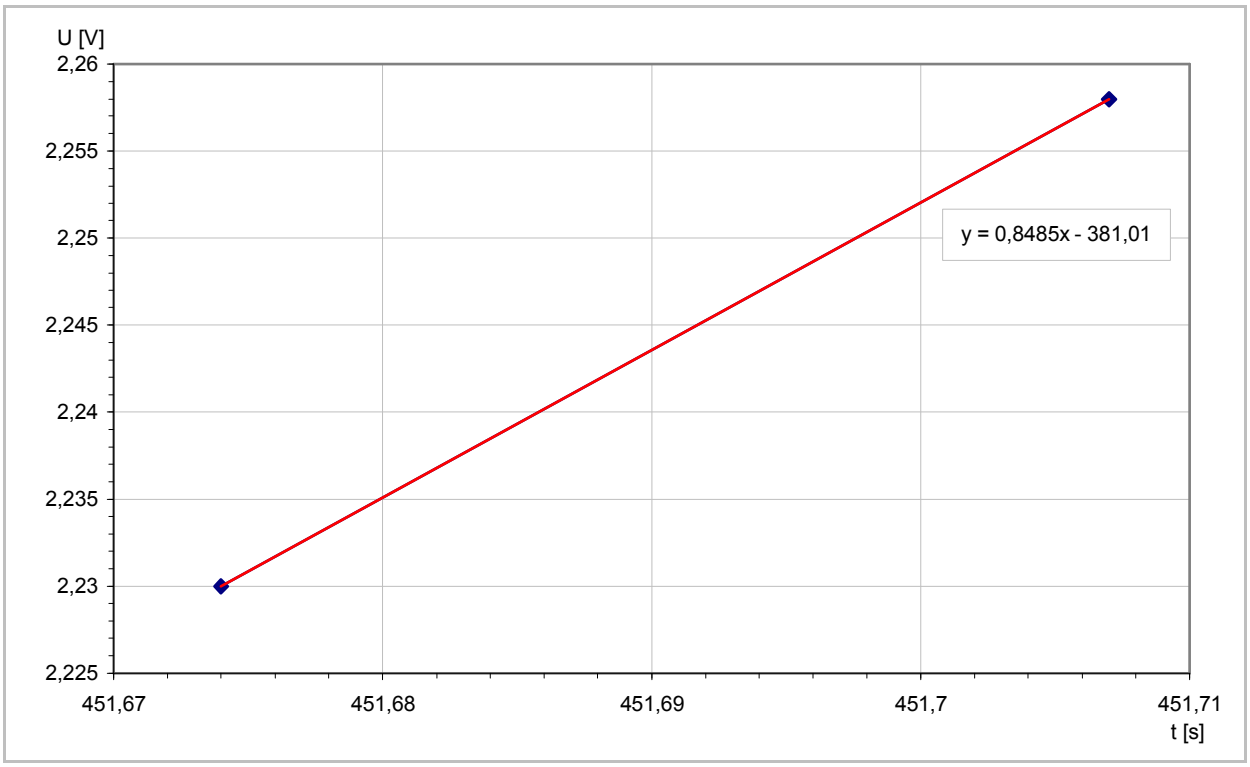
otáčky/min	napětí na čerpadle
100 000	3,32V
80 000	2,86V
35 000	1,897V – *volnoběh*

Tab. 11 Závislost otáček na napětí na palivovém čerpadle

Z naměřených dat jsme dále určili omezení pro rychlost náběhu – rate limit. Vycházeli jsme z Obr. 21 + šipka. Změřenému času od 457,674s do 454,707s odpovídá nárůst napětí z 2,23V na 2,258V. Z těchto hodnot jsme určili maximální povolenou rychlost náběhu.

rate limit = 0,85 [V/s]

Hodnota rate limitu se pohybuje v rozmezí 0,7 – 0,9 pro maximální povolenou rychlost náběhu akčního zásahu.



Obr. 26 Graf - rate limit

7.2. Návrh regulátoru

Z předešlých informací o systému jsme navrhli regulaci otáček. Nejprve metodou GMK[2] a následně jsme využili Response Optimization Toolbox v MATLABu.

Při návrhu se počítalo s možností velkého překmitu. Hlavním parametrem byla rychlost náběhu na požadovanou hodnotu.

7.2.1. Geometrická místa kořenů (GMK)

Pomocí metody GMK jsme navrhli jeden regulátor pro přenos

$$S(s) = \frac{85830}{s^2 + 2,27s + 1,8},$$

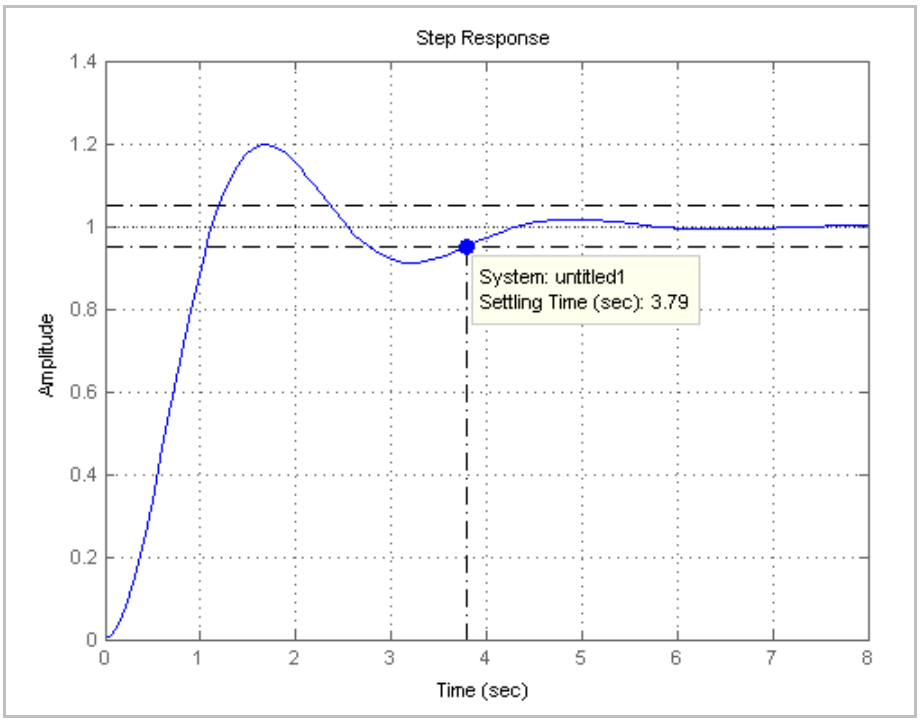
kde $\omega = 1,34 rad \cdot s^{-1}$. Počítalo se tedy s krajní hodnotou, kdy je systém nejpomalejší. Výsledný přenos regulátoru je

$$R(s) = \frac{4,358s + 3,863}{s} \cdot 10^{-5}.$$

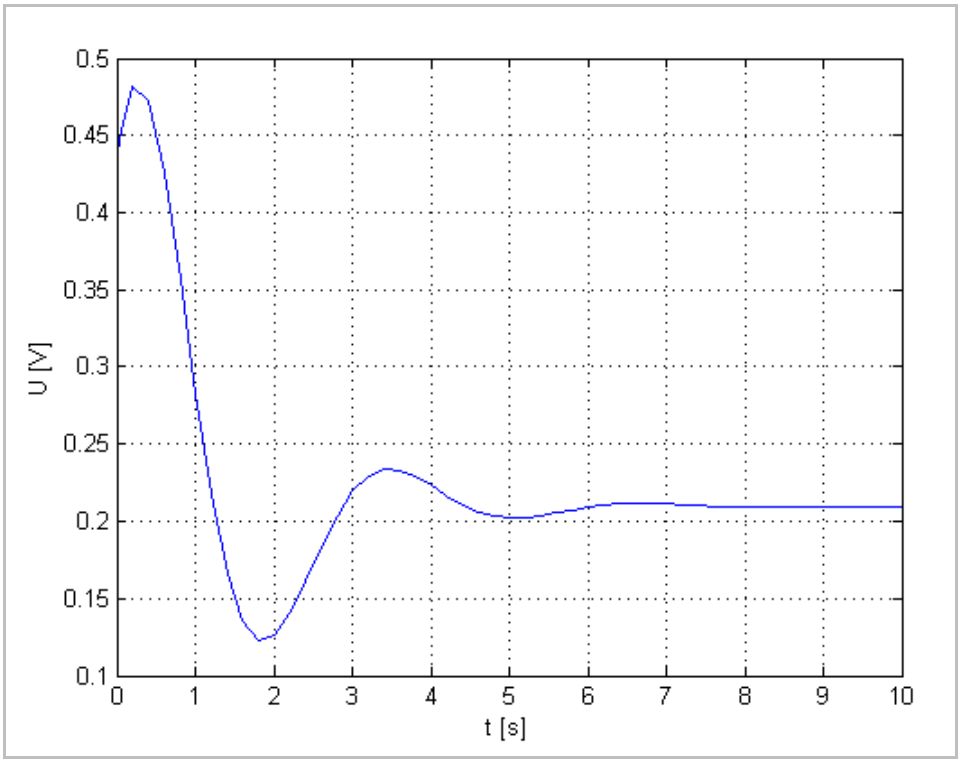
rychlost náběhu	ustálená hodnota (pásmo 5%)	překmit
0,759s	3,79s	19,8%

Tab. 12 Vlastnosti

[2] GMK – metoda geometrického hledání místa kořenů. V teorii řízení se tato metoda využívá k nalezení pólů přenosu uzavřené smyčky na základě znalostí pólů a nul přenosu smyčky otevřené.
Podrobnější popis metody GMK je v [2].



Obr. 27 Přechodová charakteristika (čas ustálení pro 5%)

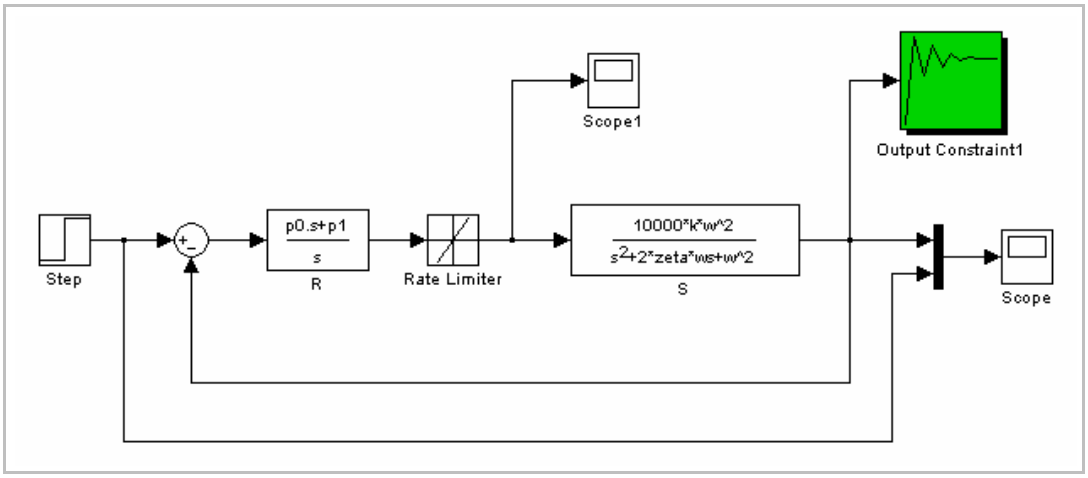


Obr. 28 Akční zásah

Akční zásah byl změřen pro nárůst otáček o 10 000. Z grafu Obr. 28 je vidět, že ustálená hodnota odpovídá podle Obr. 25 na straně 23 zvoleným 10 000ot/min.

7.2.2. Response Optimization Toolbox

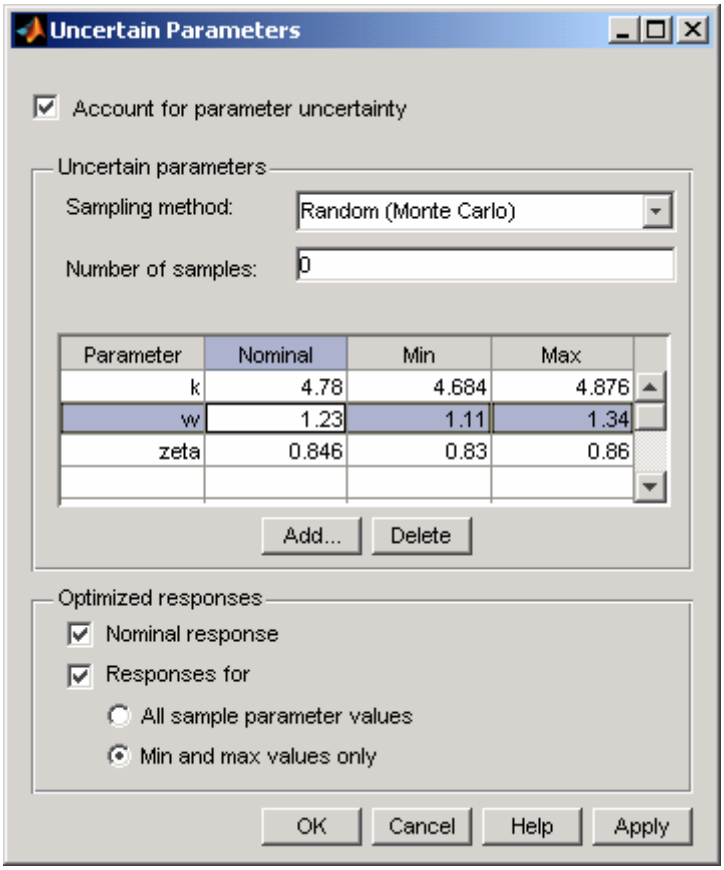
Pro návrh regulátoru jsme použili Response Optimization Toolbox v MATLABu, díky kterému je možné navrhnout regulátor pro neurčitosti parametrů přenosu podle Tab. 10 na straně 22.



Obr. 29 Návrh parametrů regulátoru

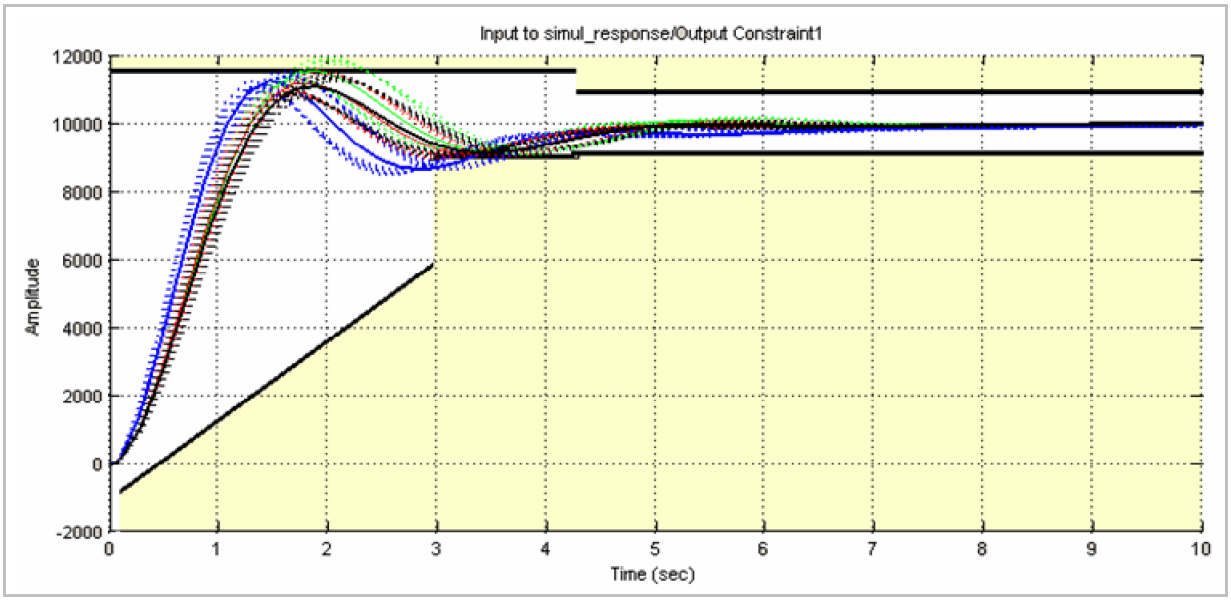
Při návrhu se nepočítalo se saturací akčního zásahu, jelikož jak se ukázalo, akční zásah se zdaleka nepřiblížil k hranici 80tis.ot/min, čemuž odpovídá 2,86V. Hranice 80tis.ot/min byla zvolena jako příklad omezení. Saturace tak hraje pouze ochranou roli. Jediným parametrem tak zůstala rychlost náběhu – blok Rate Limiter.

V bloku Output Constraint1 (Optimization - Uncertain Parameters) bylo nastaveno rozmezí parametrů přenosu Obr. 30 a přidaly se hodnoty p0 a p1 pro regulátor (Optimization – Tuned Parameters).



Obr. 30 Uncertain Parameters

Vhodným nastavením mezí byly následně navrhovány regulátory Obr. 31.



Obr. 31 Příklad nastavení mezí – REG2

V MATLABu tak byly navrženy dva regulátory REG1

$$R(s) = \frac{7{,}8225s + 4{,}3411}{s} \cdot 10^{-5}$$

a REG2

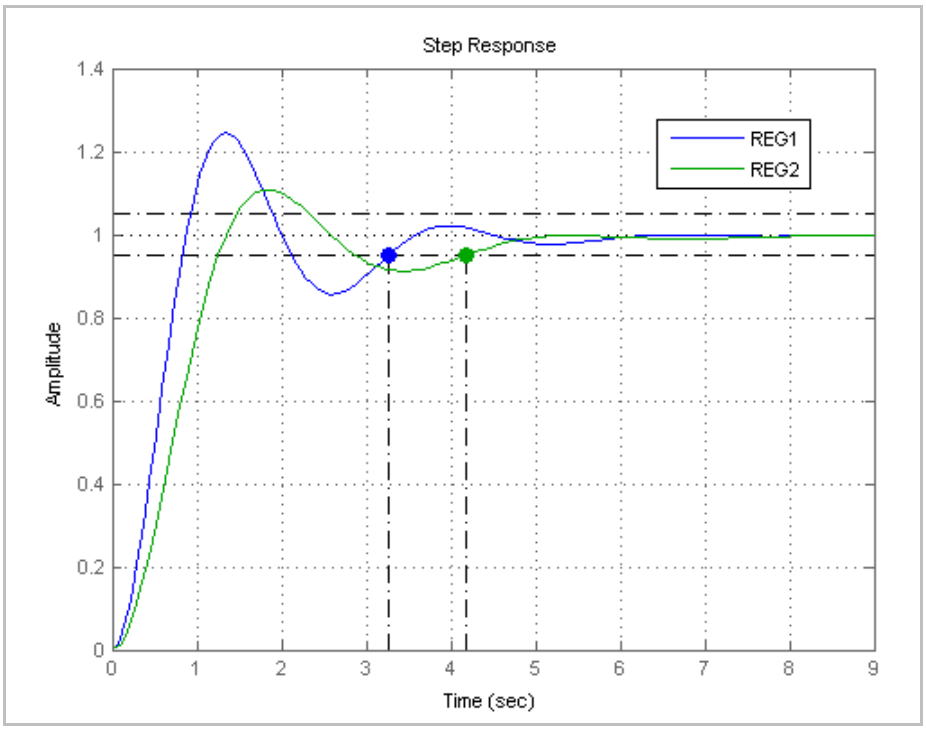
$$R(s) = \frac{4{,}3372s + 2{,}6614}{s} \cdot 10^{-5}.$$

První regulátor má velké statické zesílení a je rychlejší. Díky tomu má přechodová charakteristika uzavřené smyčky velké zákmity – což může, ale také nemusí dělat problémy – dynamika turbíny je pomalá a tak by mohla zákmity částečně utlumit.

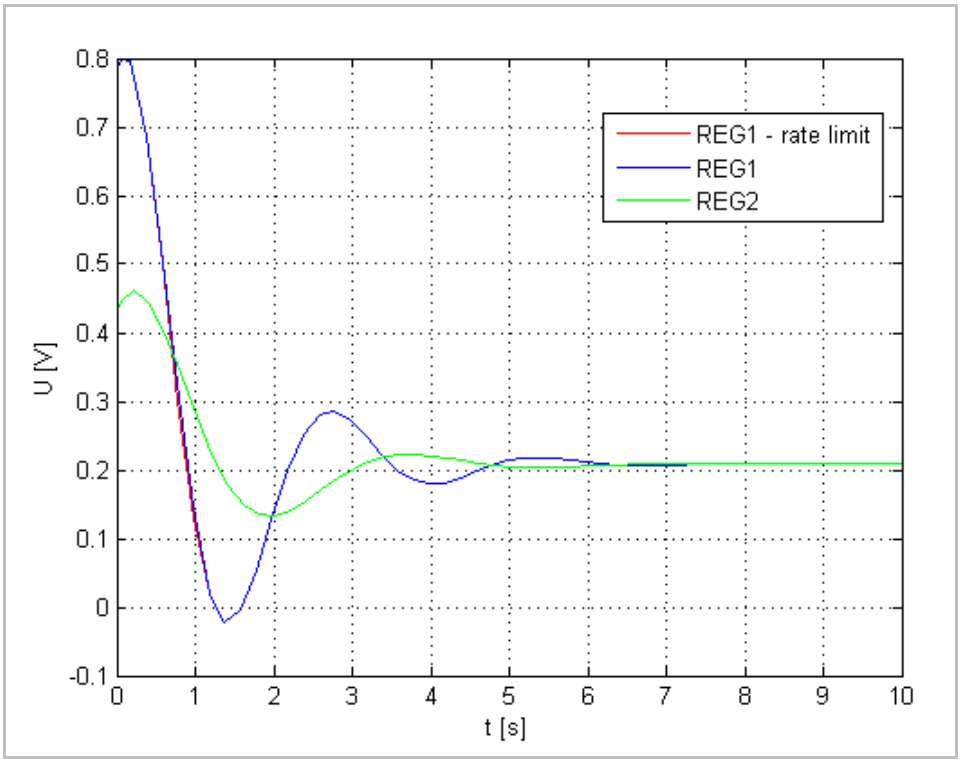
Druhý regulátor má menší akční zásah a rychlost náběhu – to by mohlo být pro turbínu ideálnější řešení – pozvolnější přidávání napětí na čerpadle po delší dobu.

regulátor	rychlost náběhu	ustálená hodnota (pásmo 5%)	překmit	rate limit
REG1	0,59s	3,27s	24,4%	0,9
REG2	0,9s	4,19s	10,8%	0,7

Tab. 13 Vlastnosti



Obr. 32 Přechodové charakteristiky



Obr. 33 Akční zásahy

8. Zhodnocení

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se s proudovým motorem pro model letadla a dostupnými prostředky jej identifikovat. Tento úkol jsme dále rozšířili o návrh regulátoru otáček.

Před samotným měřením jsme absolvovali konzultaci u zákazníka, kde jsme se seznámili s parametry turbíny – hmotnost asi 1kg, spotřeba 300 ml/min, maximální otáčky kolem 120 000ot/min, teplota až 1000°C, výkon až 5kW atd. Jedná se tedy v celku o nebezpečné zařízení, které je při překročení maximálních hodnot životu nebezpečné.

Celá identifikace parametrů probíhala na turbíně přizpůsobené pro pohon rotoru vrtulníku. Měla tedy menší tah a větší kroutící moment.

Před samotnou identifikací bylo nutné navrhnout a realizovat měřící zapojení a vytvořit software pro měřící desku a vizualizační program, který by zobrazoval v reálném čase měřené veličiny a data následně ukládal. Tyto programy byly vytvořeny v jazycích C a C#.

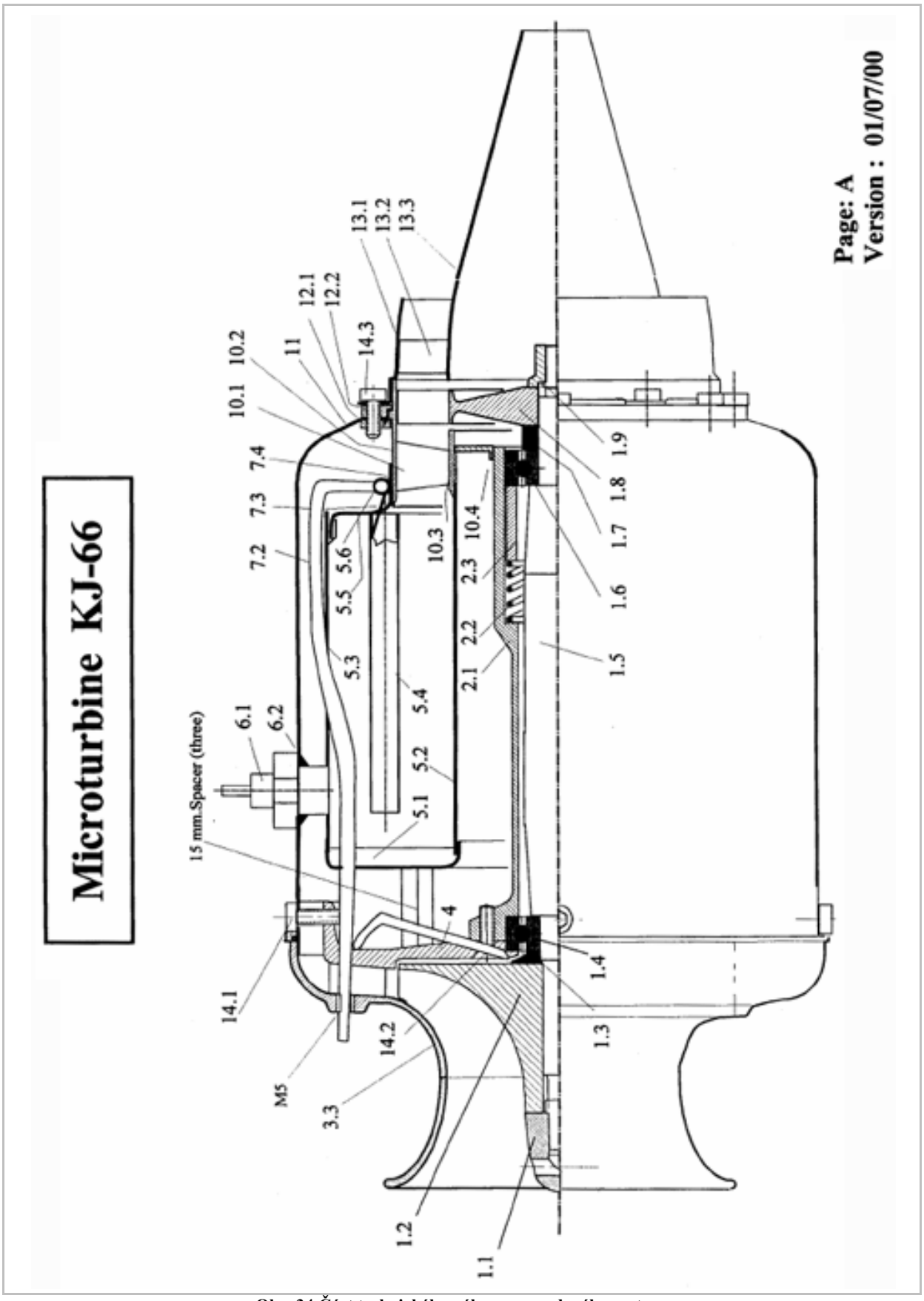
Z naměřených dat jsme vytvořili zjednodušený lineární model, který pro účely regulace otáček přesně odpovídal naměřeným průběhům. S využitím klasických metod (GMK) i moderních výpočetních nástrojů (Response Optimization Toolbox) jsme navrhli několik PI regulátorů pro sledování a regulaci otáček s uvažováním neurčitostí modelu. Některé jsou zde uvedeny.

V plánu jsme měli ještě praktické ověření navrhnutých regulátorů, ale to z časových a technických důvodů nebylo realizováno, jelikož při posledním měření jsme se setkali s velkým rušením a s několika vadami součástek.

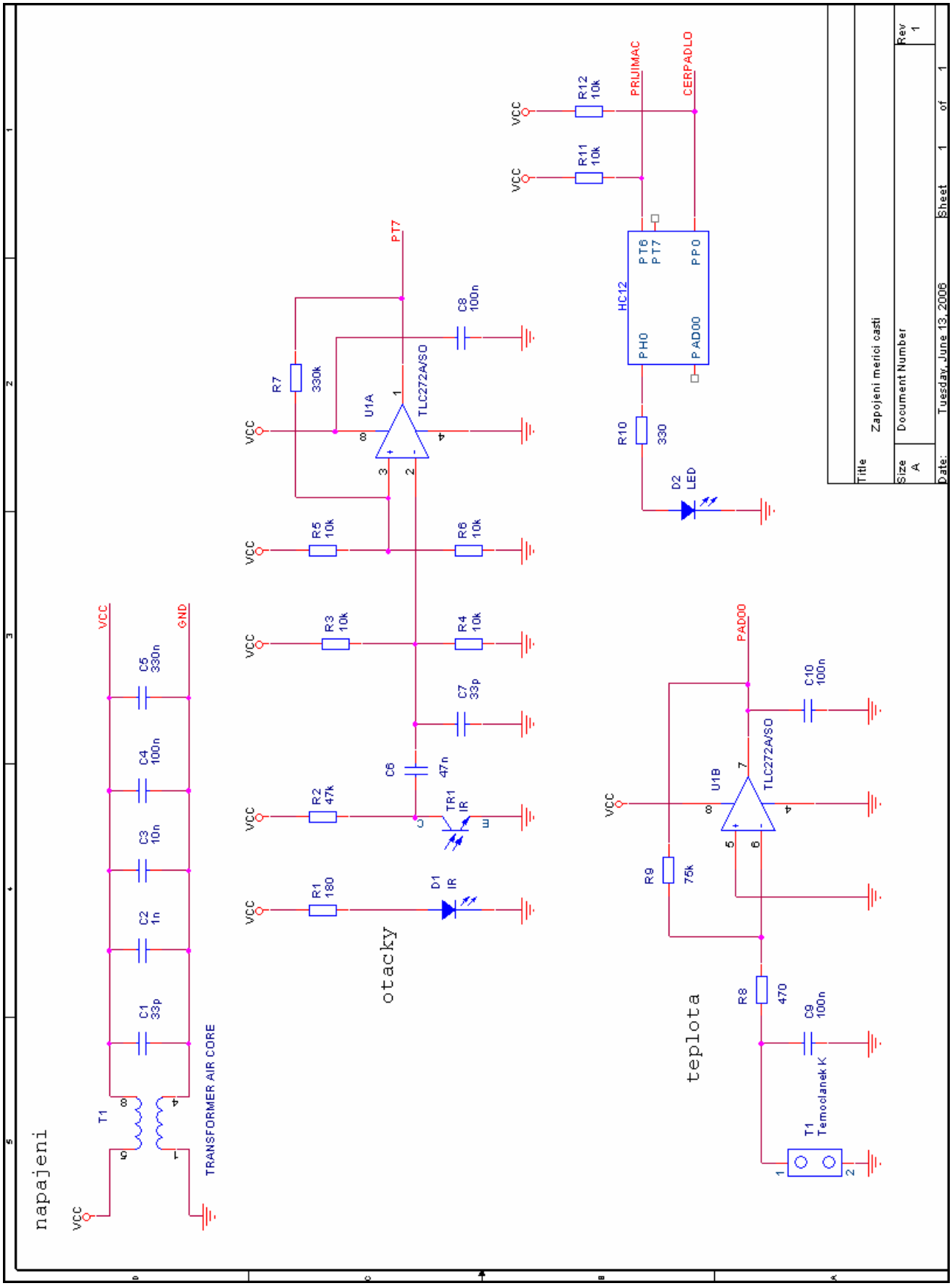
Autor by rád na práci dále pokračoval v rámci diplomové práce a zaměřil se na ověření a úpravách navržených regulátorů pro větší zátěž, jelikož doposud jedinou zátěž turbíny představovala připojená převodovka s odstředivou spojkou. Dále by chtěl navrhnout a vytvořit řídící jednotku, která by měla například umět již zmiňovaný automatický start, nebo automatické vypnutí turbíny s chladící sekvencí, která by co nejefektivněji chladila a vyfukovala zbytky plynů po skončení letu za pomoci startovacího elektromotoru.

Řídící jednotka by pak měla umět komunikovat s programem, který by měl umožňovat například nastavovat mezní hodnoty, nahrávat různé typy regulátorů tak, aby se jednotka stala univerzální při řízení více druhů turbín atd. Jednotka by měla být velmi malá a lehká, aby byla vhodná pro použití v modelu jak letadla tak vrtulníku, a měla by obsahovat například i silové části.

Příloha A

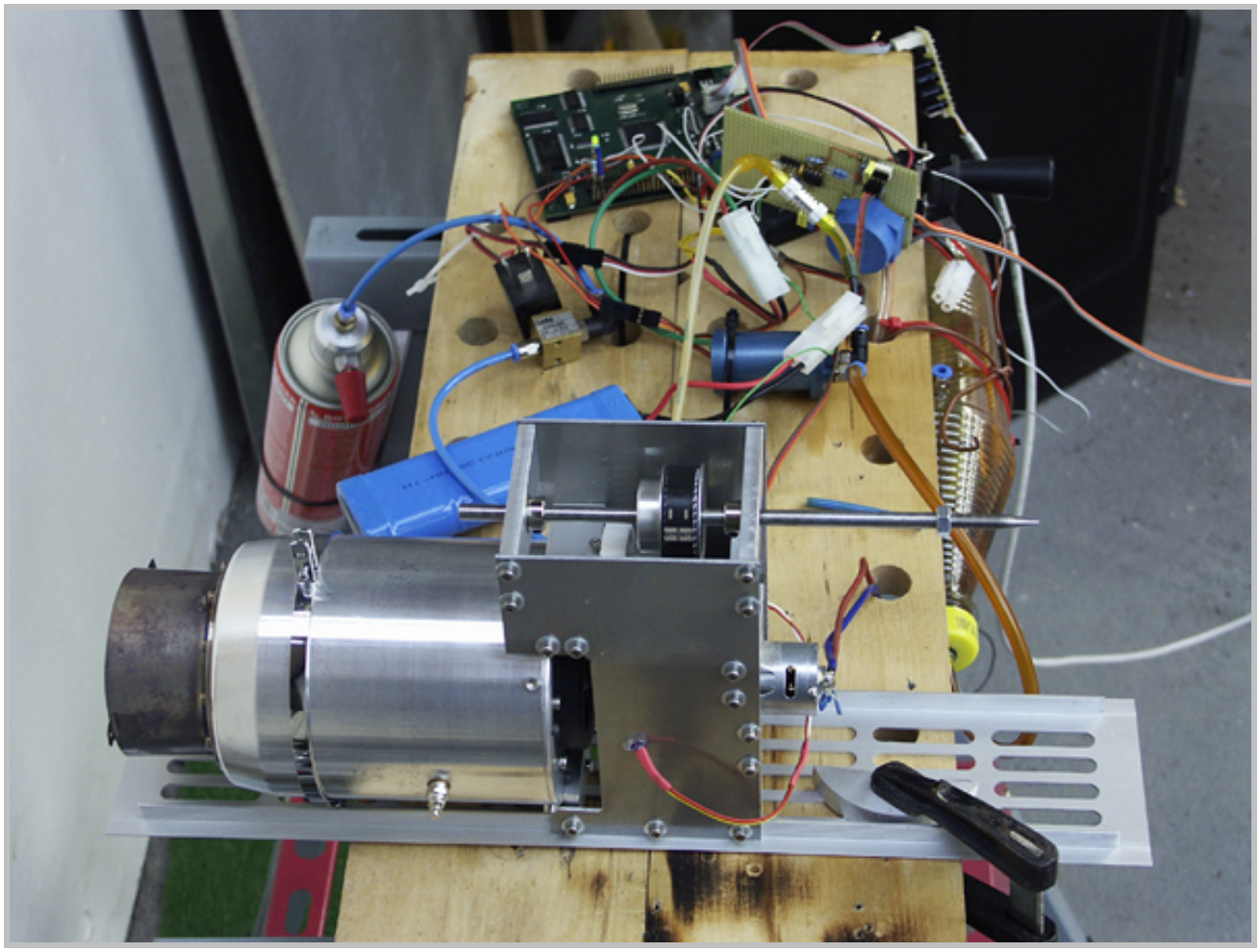


Obr. 34 Část technického výkresu proudového motoru

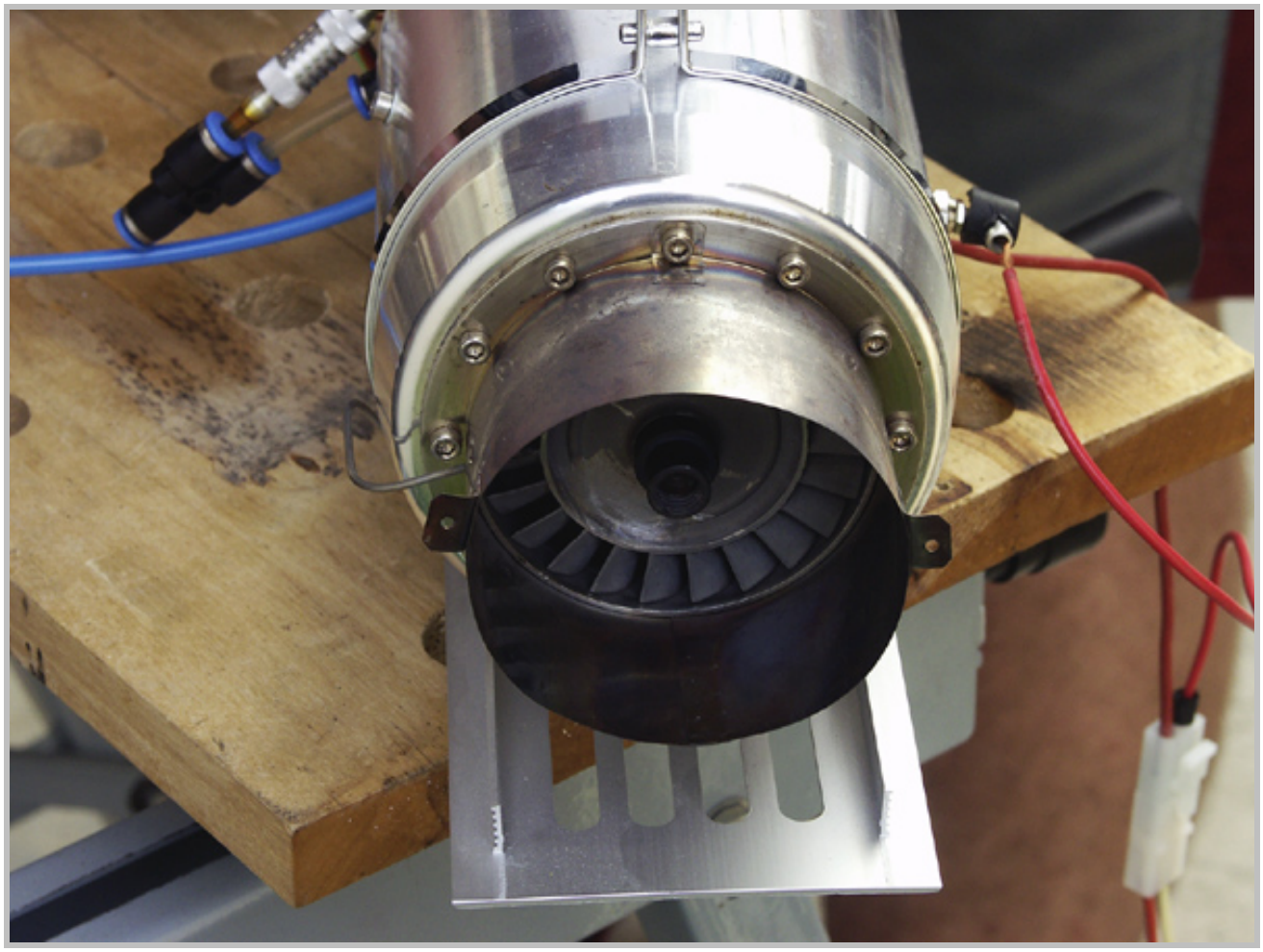


Obr. 35 Schéma zapojení měřící části

Příloha B – obrázková příloha



Obr. 36 Turbína obr. 1



Obr. 37 Turbína obr. 2

Příloha C – obsah přiloženého cd

\bp_Miroslav_Hajek_cz.pdf	bakalářská práce
\DataReader	program Data Reader – zdrojové kódy
\DataReader\bin\Debug\Osc.exe	spustitelný soubor programu Data Leader
\HC12	program pro uC HC12
\Data	naměřená data (vzorkovací perioda 32,768ms)
\Fotky	fotografická dokumentace

Použitá literatura

[1] Doc. Ing. Petr Horáček, CSc., *„Systémy a modely"*, Vydavatelství ČVUT, 1999, ISBN 80-01-01923-3

[2] Doc. Ing. Jan John, CSc., *„Systémy a řízení"*, Vydavatelství ČVUT, 2003, ISBN 80-01-02745-7

[3] Gene F. Franklin, J. David Powell, Abbas Emami-Naeini, *„Feedback Control of Dynamic Systems"*, 2006, ISBN 0-13-149930-0

[4] Miroslav Musil, *„Operační systém reálného času pro automobily"*, 2003

[5] Programovací jazyky pro řízení, http://dce.felk.cvut.cz/pjr/, 2006

[6] Microsoft Download Center, http://www.microsoft.com/downloads/, 2006

[7] OpenNETCF, http://www.opennetcf.org/library/, 2006

[8] The Code Project, http://www.codeproject.com/csharp/, 2006

[9] Texas Instruments, http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/tlc272.html, 2006

[10] Turbojet operation, http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Turbojet_operation-_centrifugal_flow.png, 2006

Rejstřík

A

A/D převodník, 9
akční veličina, 6
akční zásah, 25, 28
AnimatedIcon.dll, 13

B

Bodeho charakteristika, 7

D

Double buffering, 12

E

error, 14
error.txt, 18

F

frekvenční charakteristika, 20

G

geometrická místa kořenů, 24
GMK, 1, 24
graf, 15

J

jednotkový skok, 14

K

kerosin, 2
komplexně sdružené póly, 5
kompresor radiální, 1
komunikace, 16
konstanty, 20
kurzory, 16

M

manuální řízení, 14, 16
MATLAB, 26
MenuImageLib.dll, 13
měřící a řídící zapojení, 8
měřící zapojení, 8
Microsoft Framework, 11
mikrokontroler, 8

N

načtení dat, 17
napětí, 18
napětí na palivovém čerpadle, 2

O

operační zesilovač, 9
otáčky, 18
Output Constraint, 26
ovládání, 16

P

pokrytí, 22
port, 16
povely, 17
propan-butan, 2
přechodová charakteristika, 21, 25
přechodové charakteristika, 28
přenos, 20
přenos regulátoru, 6
přenos regulované soustavy, 6
převodní graf, 22
přijímač, 8
příkazy, 18
přirozená frekvence, 5, 19, 22
PWM, 2, 9

R

rampa, 14
rate limit, 23
Rate Limiter, 26
ready, 14
regulační odchylka, 6
regulátor, 22, 27
regulátor PI, 1
regulovaná veličina, 6
reset, 17
Response Optimization Toolbox, 1, 24, 26
rovnice regrese, 22
rozsah hodnot, 22
rychlé uložení, 17
rychlost náběhu, 4, 23, 26

Ř

řídící veličina, 6
řízení programem, 14, 16

S

SerialPort.dll, 13
sériový port, 14
silový budič, 2
skok, 18
spalovací komora, 1
start, 3
StatusMessaging.dll, 13
stop, 14, 16
střední hodnota, 2

Š

šum, 4

T

telegram, 18
teplota, 18
termočlánek, 9
termoelektrický jev, 9
tlumení, 22

U

ukončení měření, 17
uložení, 17
uložení dat, 17
uncertain parameters, 26

V

Visual Studio, 11
vlastní frekvence, 5
volnoběh, 16
výkon, 4
vzorkovací frekvence, 18

Z

zápis dat, 18
zesílení, 19, 22
zesílení systému, 5
zobrazením grafu, 15
zoom, 15, 17

Ž

žhavící svíčka, 2