

Aplikace PLC pro řízení pneumatického vřetena

Ing. Petr Konečný

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jaroslav Rybín, CSc.

Abstrakt

Tato práce se zabývá problémem regulace otáček přídatného pneumatického rychloběžného vřetena připojeného k CNC stroji. V práci byl vypracován matematický rozbor problému a návrh parametrů a způsobu regulace. Byla provedena též praktická aplikace závěrů.

Klíčová slova

zpětnovazební rychlostní regulace, pneumatické vřeteno, aplikace PLC

1 Úvod

Technologie obrábění má bezesporu výsadní postavení ve strojním průmyslu. Proto je jí po zásluze věnována velká pozornost. Výrobci a výzkumníci přicházejí se stále novými objevy, které posunují technologii obrábění stále kupředu.

Jistě nezanedbatelným je ve smyslu rozvoje obráběcích strojů vývoj a nasazení přídatných zařízení, která rozšiřují možnosti strojů. Díky přídatným zařízením jsme schopni i na konvenčních obráběcích strojích vyrábět náročné a přesné výrobky.

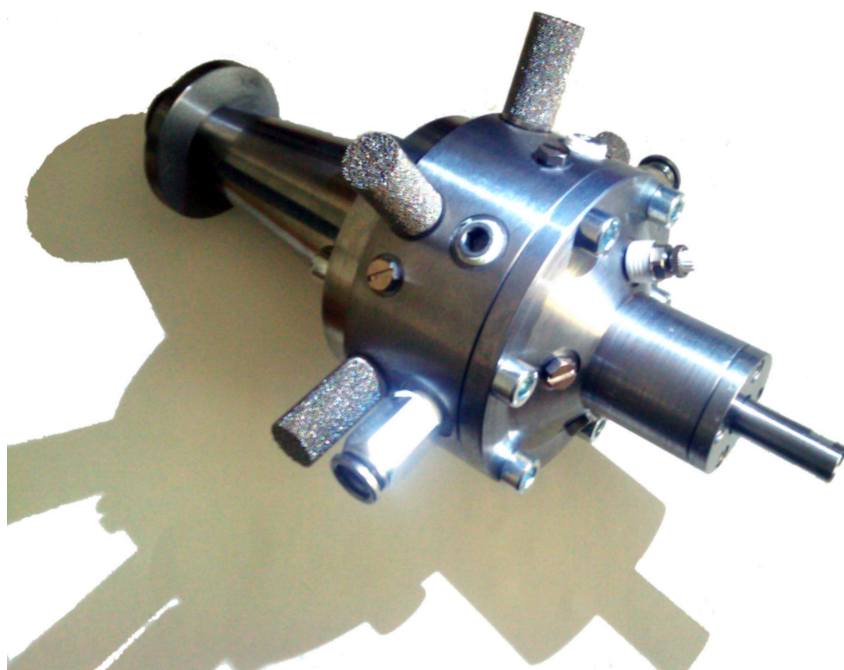
Vývoj přídatných zařízení se odvíjí od aktuálních potřeb technologie obrábění. Jednou z takových potřeb začalo být v poslední době zvyšování otáček vřeten obráběcích strojů. Podnětem v tomto směru jsou stále se zmenšující průměry frézovacích nástrojů. K tomuto trendu přispěl hlavně rozvoj číslicového řízení a nástup 5-ti osého obrábění. Díky tomu je dnes možno vyrábět komplikované obrobky sestávající z obecných ploch a složitých kapes. Abychom byli schopni takovéto součásti vyrobit, je třeba použít nástroje malých průměrů, aby dokázaly kopírovat různě zakřivené plochy dle naprogramované dráhy a proniknout do úzkých kapes.

Běžně používaná elektrická vřetena ve frézovacích strojích již přestávají uspokojovat potřebu stále vyšších otáček. Směr vývoje se tedy přiklání k alternativnímu řešení, kterým je pneumatický pohon. Pneumatická vřetena dosahují několikanásobně vyšších otáček než vřetena elektrická, zatím ovšem výrazně nekonkurují elektrickým vřetenům. Jedním z důvodů je i fakt, že pneumatická vřetena zatím nedisponují propracovanou regulací jako vřetena elektrická. Výrobci dodávají vřetena buď regulovaná ručně škrticím ventilem nebo zcela bez regulace.

Cílem této práce je proto navrhnout regulaci pneumatického vřetena. Vřeteno bylo navrženo a sestaveno ve Výzkumném centru pro strojírenskou výrobní techniku a technologii (dále jen VCSVTT). Vřeteno lze připojit k frézovacímu stroji do zabrzděného hlavního vřetena obráběcího stroje. Požadavky na řízení jsou: možnost nastavení požadovaných otáček a následně jejich konstatní průběh.

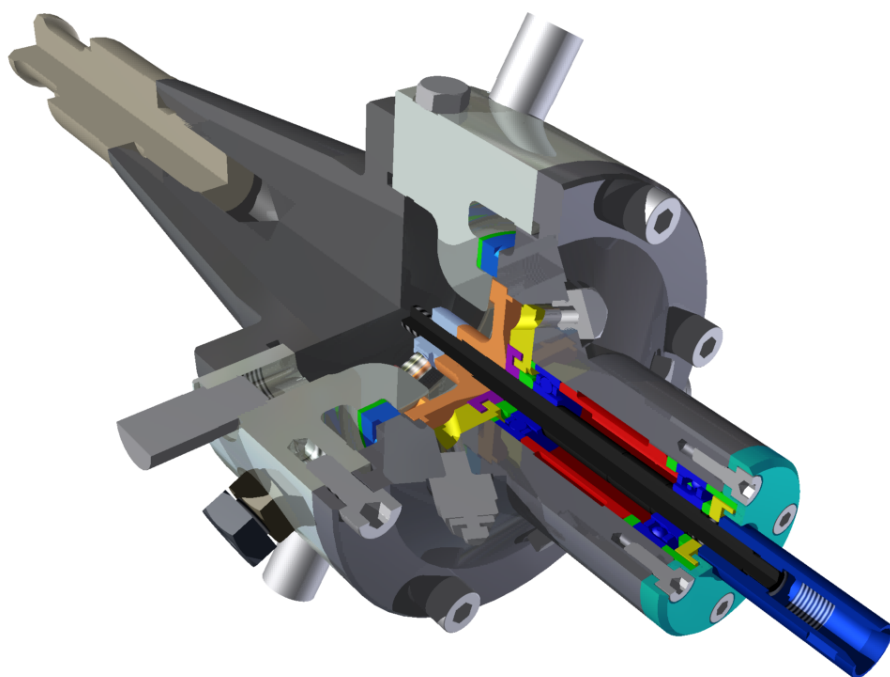
1.1 Popis vřetena V1

Konstrukce připojovaného pneumatického vřetena (viz Obr. 1) vyplývá z návrhu v diplomové práci [1] Ing. Zdeňka Bazaly. Výroba a sestavení proběhly ve VCSVTT v roce 2008. Prozatím nese pracovní název V1. Vřeteno reálně dosahuje maximálních otáček $n = 90\,000\text{ min}^{-1}$. Aby sneslo tak vysoké otáčky využívá kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem v uspořádání do „O“ s keramickými valivými elementy.



Obr. 1: Pneumatické vřeteno VI

Na návrhu bylo třeba provést několik změn. Aktuálně realizovaná verze vřetena, vyplývá z modelu na Obr. 2.



Obr. 2: Řez modelem pneumatického vřetena VI

Vřeteno se připojuje na standardní průmyslový rozvod stlačeného vzduchu o jmenovitém tlaku 0,6 MPa. Odběr vzduchu při maximálních otáčkách činí $240 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$.

2 Návrh regulace

Návrh regulace vřetena vyžaduje znalost jeho dynamických vlastností. Ty se pro jednoduché modely, které budeme používat, dají shrnout do jedné proměnné, časové konstanty τ (udává se v sekundách).

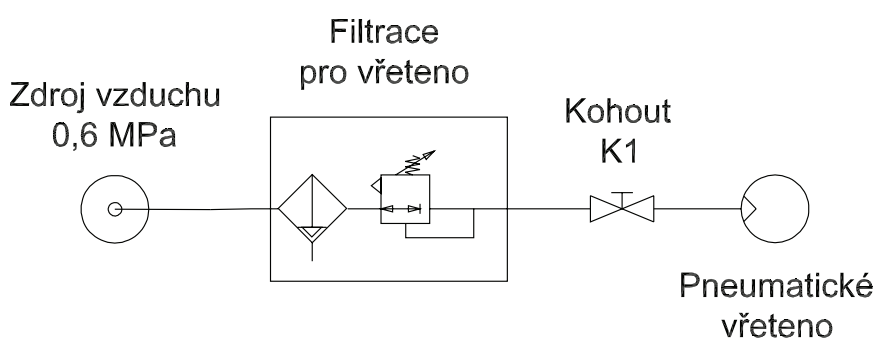
2.1 Zjištění parametrů vřetena

Literatura [2] popisuje způsob, jak zjistit velikost τ . Opírá se o zjištění závislosti odezvy výstupu na skokovou změnu vstupu. Tato závislost se nazývá přechodová funkce. Vstup v našem případě tvoří žádaná rychlost. Budeme tedy zkoumat odezvu vřetena na skokový požadavek rychlosti. Teoretický průběh přechodové funkce systému prvního řádu vyjadřuje rovnice (1).

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = C \quad (1)$$

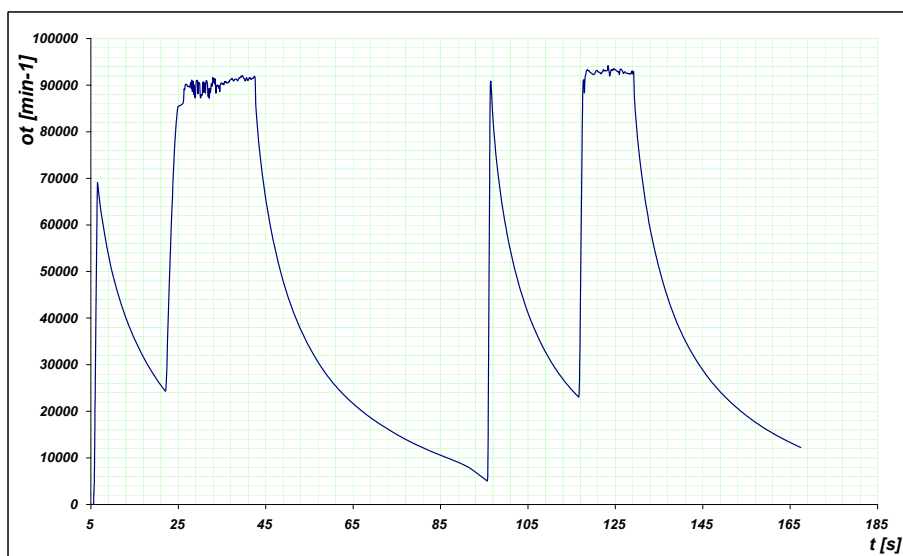
kde	τ	časová konstanta	[s]
	$\frac{dy}{dt}$	derivace funkce odezvy systému podle času	[rad . s ⁻²]
	y	odezva systému	[rad . s ⁻¹]
	C	konstanta představující skok na požadovanou veličinu	[rad . s ⁻¹]

Z měření, které proběhlo ve VCSVTT na vřetenu V1 lze odvodit časovou konstantu τ . Schéma měření znázorňuje Obr. 3. Záznam měření ukazuje Obr. 4. Měření probíhalo tak, že se na vstup vřetena skokově přivedl průtok vzduchu Q rychlým otevřením kohoutu K1 naplno. Do vřetena tedy proudil maximální možný průtok, při kterém dosáhlo nejvyšších otáček 90 000 min⁻¹.



Obr. 3: Schéma zapojení měření odezvy vřetena V1

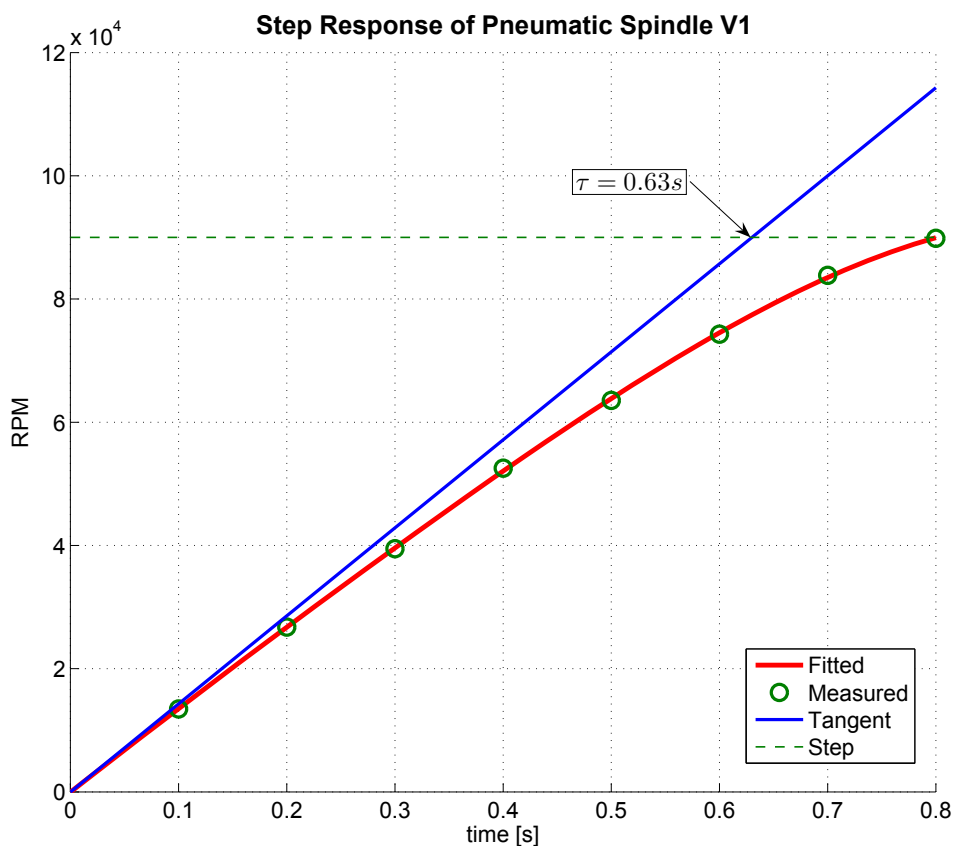
Po dobu několika málo minut bylo vřeteno podrobováno několikanásobnému otevření a zavření kohoutu K1. Z průběhu odezvy vyplývá, že vřeteno má velkou setrvačnost při doběhu. Tato skutečnost však pro naše účely nebude hrát velkou roli. Důležitá je doba náběhu a tedy odezvy na otevření přívodu vzduchu.



Obr. 4: Graf průběhu zkoušky vřetena

Pro odečtení časové konstanty τ z grafu použijeme hodnoty z třetího náběhu mezi 90. a 100. sekundou měření. Hodnoty zaneseme do grafu (viz Obr. 5) a aproximujeme polynomem čtvrtého stupně metodou nejmenších čtverců pomocí programu MATLAB.

Z průběhu vyplývá, že vřeteno V1 má odezvu systému prvního řádu. Určení časové konstanty τ pro tento systém uvádí literatura [3]. Sestrojením tečny vycházející z počátku k funkci odezvy odhadneme hodnotu časové konstanty τ na 0,63 s.



Obr. 5: Graf průběhu odezvy vřetena na skokovou změnu

2.2 Způsob regulace

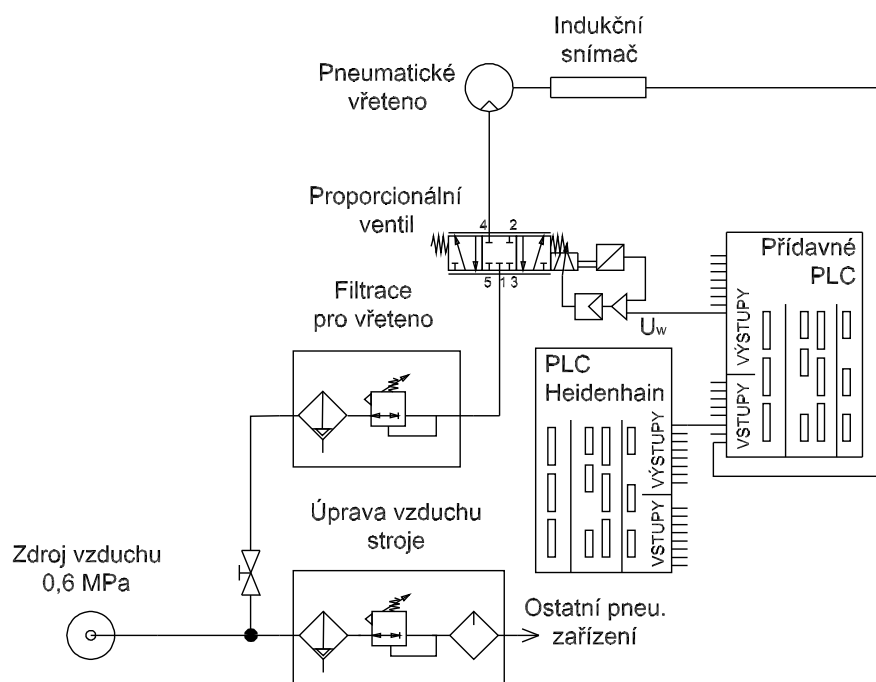
Řízení rychlosti pneumatického vřetena V1 bude provedeno jako zpětnovazební. Tento způsob regulace, jak již název napovídá, nabízí jednu velkou výhodou. Tu představuje zpětná vazba na regulovaný děj. Regulace z této vazby dokáže vyhodnotit rozdíl mezi požadovanou a skutečnou hodnotou, tento rozdíl zpracovat a upravit akční veličinu. Tím koriguje a snižuje odchylku od požadavku na výstupu.

Při návrhu zpětnovazební regulace musíme nejdříve získat matematický model soustavy. Podle modelu určíme parametry regulátoru řídící rychlost vřetena. Pro matematické vyjádření regulace je nejprve nutné znát prvky určené k úloze řízení.

Aby bylo možno zpětnovazební řízení realizovat, musíme disponovat prvkem, od kterého bude odvozena zpětná vazba. V našem případě představuje zpětnou vazbou rychlost otáčení vřetena a zpětnovazební signál realizuje indukční snímač, umístěný v tělese vřetena.

Jako akční člen soustavy bude sloužit pneumatický servoventil. Ovládání servoventilu se děje elektronicky formou proudu nebo napětí. V našem případě byl zvolen ventil řízený napětím. V závislosti na velikosti napětí ventil přestavuje hlavní šoupátko rozváděče spojené s cívkou a tím ovlivňuje velikost průtoku vzduchu ventilem.

Porovnávání vstupů a výstupů celé regulované soustavy bude probíhat v přídavném PLC (programovatelném logickém automatu). To vyhodnotí velikost akčního zásahu v závislosti na požadované hodnotě a na aktuálních otáčkách udávaných indukčním snímačem. Schéma zapojení celé soustavy do soustavy obráběcího stroje je na Obr. 6. Schéma zapojení je pro konkrétní frézovací stroj s řídícím PLC od firmy Heidenhain.

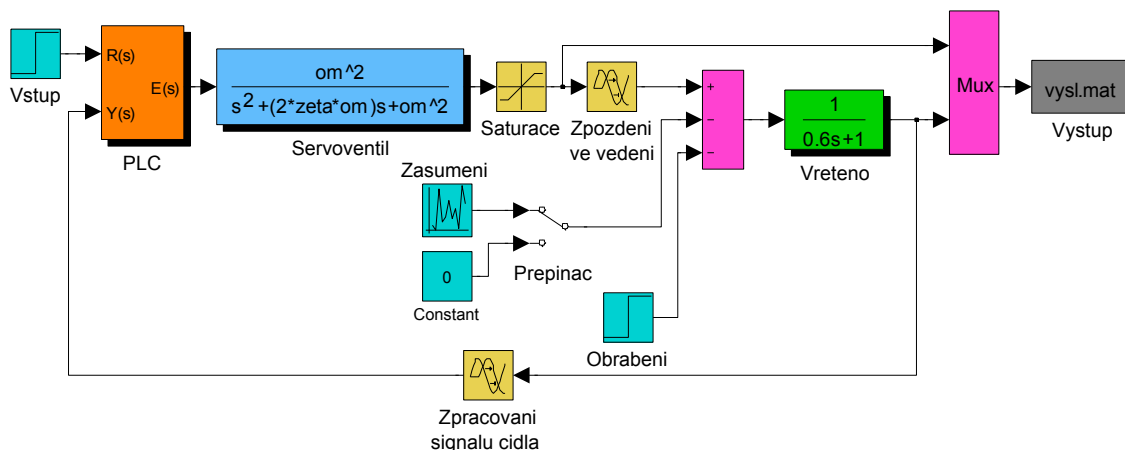


Obr. 6: Schéma řízení s přídavným PLC

Díky použití PLC pro úlohu řízení můžeme užít proporcionálně-integračně-derivační (PID) způsob regulace. Algoritmus PID regulátoru lze jednoduše naprogramovat do přídavného PLC pomocí příslušného vývojového prostředí.

3 Realizace

V první fázi je nutné určit z matematického modelu parametry regulátoru. K tomuto účelu jsem sestrojil simulační model v programu MATLAB – Simulink (viz Obr. 7).



Obr. 7: Matematický model regulované soustavy v Simulinku

Pneumatické vřeteno v soustavě figuruje jako systém prvního řádu. Laplaceův obraz přenosu pneumatického vřetena je popsán rovnicí (2).

$$G_{vr}(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (2)$$

Pro servoventil určíme přenosovou funkci z jeho mechanických vlastností, přesněji řečeno podle pohybové rovnice. Její popis nalezneme v [4]. Pohybová rovnice pro servoventil nabývá tvaru

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + b \frac{dy(t)}{dt} + ky(t) = kr(t) \quad (3)$$

kde	m	hmotnost šoupátka	[kg]
	b	tlumení	[Ns . m ⁻¹]
	k	tuhost systému	[N . m ⁻¹]

Po dosazení

$$\zeta = \frac{b}{2b\Omega}, \quad \Omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

kde	ζ	součinitel poměrného tlumení	[1]
	Ω	vlastní frekvence	[rad . s ⁻¹]

do rovnice (3) dalších úpravách a Laplaceově transformaci dostaneme výslednou rovnici pro přenosovou funkci servoventilu

$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\Omega^2}{s^2 + 2\zeta\Omega s + \Omega^2} \quad (5)$$

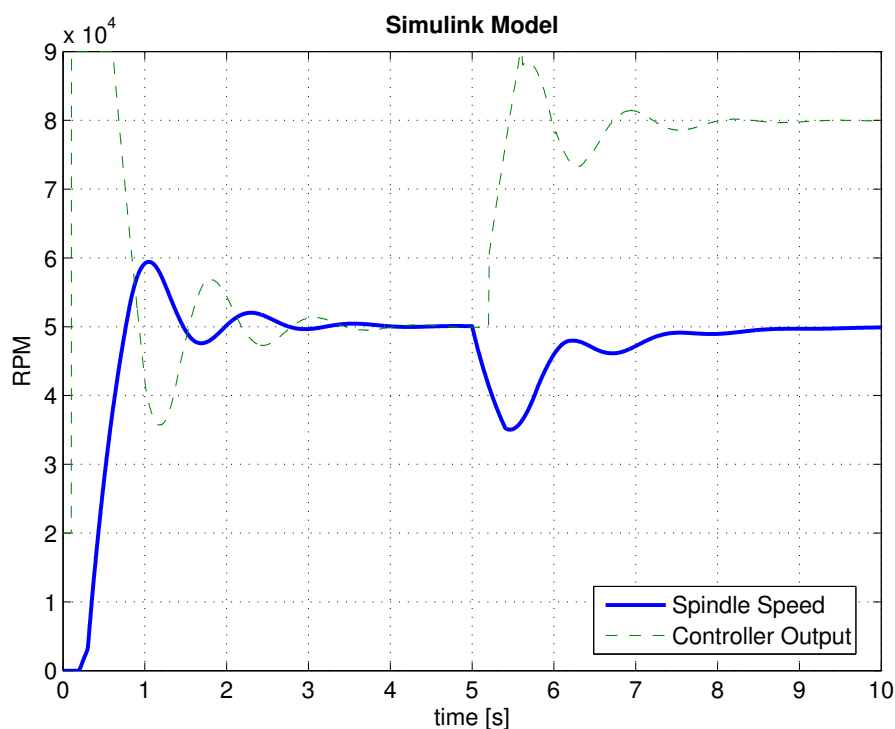
Vstup do systému představuje skokový požadavek rychlosti tak, jak bude přicházet z hlavního PLC stroje. Pro ilustraci zvolíme požadavek $50\,000\text{ min}^{-1}$.

Do modelu ještě přidáme poruchové signály. Poruchy simulují děje, které budou probíhat při provozu. Obrábění nahradíme modelem signálu, který zapříčiní skokový pokles o $30\,000\text{ min}^{-1}$. Druhý poruchový signál má formu generátoru náhodného průběhu, který simuluje rušivé jevy při provozu. Tyto poruchy vznikají např. od ložisek, ve kterých je uložen rotor vřetena.

Parametry PID regulátoru budeme optimalizovat podle výsledků simulace (viz Obr. 8). Maximální povolený překmit hodnoty otáček během přechodového děje při odezvě na skokový požadavek uvažujeme 20%. Optimální hodnoty zesílení a dalších parametrů regulátoru potom vycházejí pro úlohu regulace vřetena V1 následovně:

$$K_p = 2, \quad \tau_i = 0,5, \quad \tau_d = 0,2$$

kde	K_p	proporcionální zesílení	[1]
	τ_i	integrační časová konstanta	[s]
	τ_d	derivační časová konstanta	[s]



Obr. 8: Odezva simulovaného systému na skokovou změnu vstupu

Při simulaci jsem zvolil skokovou změnu vstupu z 0 na 50% maximální hodnoty, protože při odezvě na požadavek nejvyšších otáček by se nepromítl překmit. Odezva nepromítá šumový signál, který byl potlačen. Požadavek skoku činí $50\,000\text{ min}^{-1}$. Hodnota se ustálí na $\pm 4\%$ požadované hodnoty za zhruba 2 s. Počáteční překmit požadované hodnoty vychází přibližně 20%. Po čase 5 s přivedeme poruchový signál formou skokového poklesu o $30\,000\text{ min}^{-1}$. Systém zareaguje vyrovnaním na $\pm 4\%$ požadavku za 2 s.

Po nalezení optimálních hodnot konstant PID regulátoru můžeme přejít k tvorbě řídicího programu pro PLC, které ovládá vřeteno.

3.1 Programování PLC

Programovatelný automat (PLC) zvolený pro úlohu rychlostní regulace pneumatického vřetena pochází od firmy TECO a.s. a nese název Tecomat Foxtrot CP-1004 (viz Obr. 9). PLC automaty od firmy Teco a.s. jsou programovány vývojovým prostředím Mosaic. Tento programovací nástroj splňuje všechny požadavky moderního programování PLC podle normy IEC 61131-3 (viz [5]).

Přímo pro regulaci je vývojové prostředí Mosaic vybaveno modulem PIDMaker, který zjednodušuje programování PLC pro úlohu PID regulátoru.



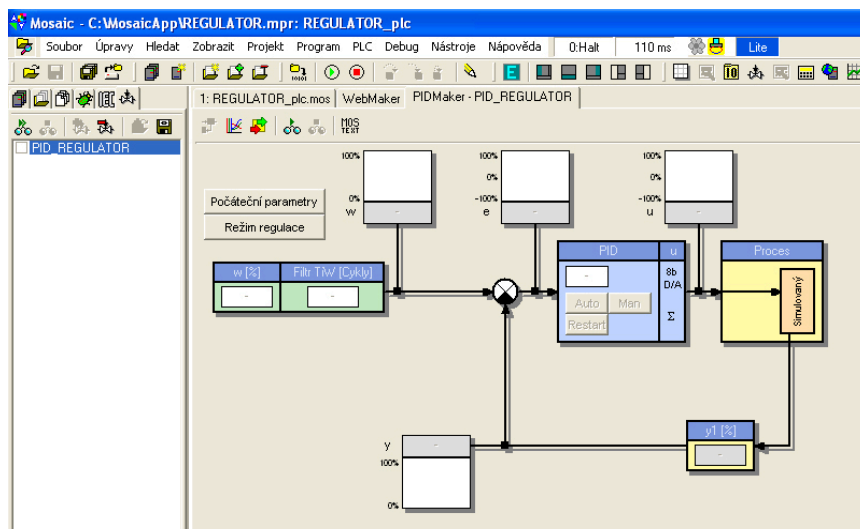
Obr. 9: PLC Tecomat Foxtrot CP-1004

Nejprve je třeba naprogramovat zpracování požadované hodnoty. Požadavek rychlosti otáčení vřetena přichází jako analogová hodnota napětí. Pro zpracování analogových hodnot použijeme přídatný modul IT-1601, který disponuje osmi analogovými vstupy a dvěma analogovými výstupy. Vstupy i výstupy jsou schopny pracovat buď s hodnotami proudu I (4-20 mA) nebo napětí U (0-10 V).

Vstupní napětí přivedené na správně nastavený analogový vstup PLC je třeba zkonvertovat a upravit. Jako výsledek konverze dostaneme hodnotu požadovaných otáček v Hz datového typu uint. Datový typ uint volíme kvůli zmiňované nadstavbě Mosaicu - PIDMaker, který vyžaduje vstupní hodnotu právě v tomto formátu.

Dalším úkolem pro PLC bude zachycovat hodnotu naměřených otáček z indukčního čítače. Automat Foxtrot disponuje tzv. rychlými čítačovými vstupy, které lze nastavit do několika režimů. Pro účely měření frekvence periodických dějů se jeví nejvýhodnější použít režim měření periody a fázového posunu. V tomto režimu představuje výstup z čítače dobu v μs mezi dvěma náběžnými, popř. sestupnými hranami.

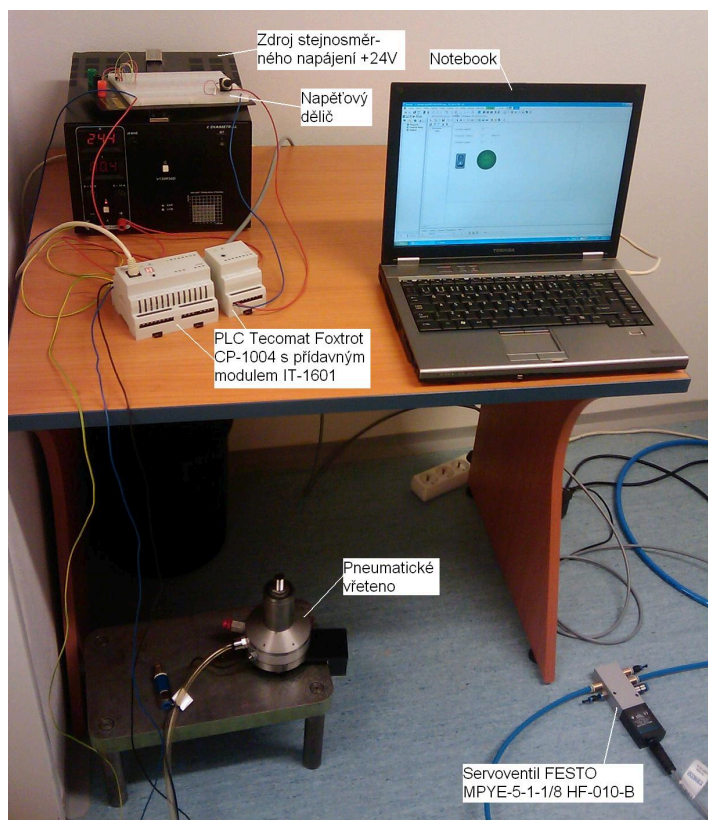
PLC automat můžeme naprogramovat jako P, PI, a dokonce i jako PID regulátor. Nástroj PIDMaker umožňuje nastavení parametrů všech prvků regulace. Časové konstanty a parametry regulátoru nastavujeme v okně PIDMakeru (viz Obr. 10). Do příslušných polí dosadíme hodnoty, získané simulací v programu Simulink.



Obr. 10: PIDMaker

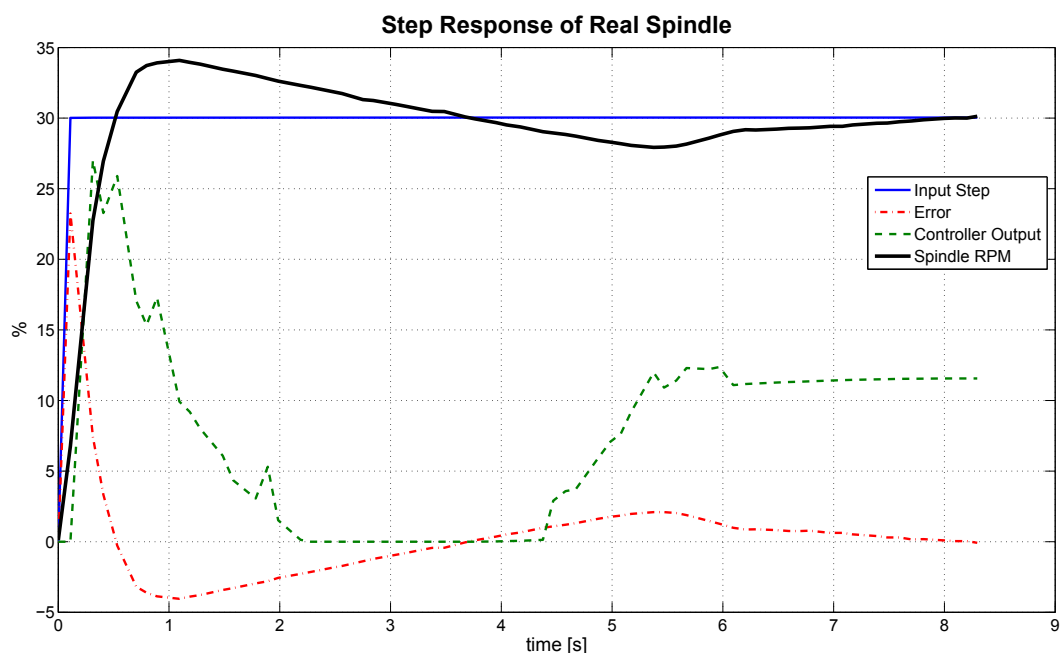
3.2 Zapojení systému

Pro ověření funkce rychlostní regulace pneumatického vřetena byl sestaven zkušební obvod. Experimentální obvod čítající vřeteno, PLC, servoventil a notebook je uveden na Obr. 11.



Obr. 11: Experimentální obvod

Po zapojení systému a nahrání řídicího programu byla regulace odzkoušena zavedením požadavku 3 V na vstup PLC. Tato hodnota odpovídá otáčkám $30\,000\text{ min}^{-1}$. Odezvu vřetena na skok požadované veličiny zachycuje Obr. 12.



Obr. 12: Odezva reálného vřetena V1

Překmit požadované hodnoty otáček při rozběhu by měl činit podle [3] v ideálním stavu 20%. V našem případě dosahuje podle znázorněného průběhu zhruba 12%. Situace tedy není zcela optimální, ale stále uspokojivá.

Delší ustálení hodnoty otáček, zhruba po 6-ti sekundách, je způsobeno setrvačností vřetena. Tento jev pro nás při obrábění nepředstavuje žádnou nevýhodu, ba naopak pomůže udržovat konstantní otáčky, protože jejich změna nebude díky setrvačnosti tak rychlá a PLC stihne na změnu včas reagovat.

4 Závěr

Regulace vřetena po otestování funguje v souladu s požadavky. Zvolená varianta regulace vřetena pomocí přídatného PLC se ukázala jako velmi vhodná. Nejenom že splňuje požadavky zadání, ale navíc pro eventuální budoucí využití vřetena nabízí toto řešení vysokou flexibilitu a mnoho zajímavých možností. Systém regulace s vřetenem může pracovat jako samostatný celek a není nutno zasahovat do řídicího systému stroje, ke kterému bude vřeteno připojeno.

Seznam symbolů

b	tlumení	$[\text{Ns}\cdot\text{m}^{-1}]$
k	tuhost	$[\text{N}\cdot\text{m}^{-1}]$
m	hmotnost	$[\text{kg}]$
n	otáčky	$[\text{min}^{-1}]$
I	elektrický proud	$[\text{A}]$
U	elektrické napětí	$[\text{V}]$
K_p	proporcionální zesílení	$[1]$

τ	časová konstanta	[s]
τ_i	integrační časová konstanta	[s]
τ_d	derivační časová konstanta	[s]
ζ	poměrné tlumení	[1]
Ω	vlastní frekvence	[rad . s ⁻¹]

Seznam použité literatury

- [1] Bazala, Z.: Vysokootáčková přídavná pneumatická vřetena, Diplomová práce, Praha: ČVUT v Praze, 2007, 95 stran .
- [2] Souček, P.: Pohony výrobních zařízení (Servomechanismy), Vyd. 2., Praha: Vykladatelství ČVUT, 1994, 158 stran
- [3] Dorf, R. C., Bishop, R. H.: Modern Control Systems, Tenth Edition, New Jersey, U.S.A., Pearson Education, Inc., 2005, ISBN: 0-13-127765-0, 881 stran
- [4] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: Fyzika, část 1, Mechanika, Brno, VUTIUM, 2000, ISBN 80-214-1868-0
- [5] Webové stránky o programování PLC, programování dle normy IEC 61131-3 (citace 12.3.2010) URL: http://www.plcopen.org/pages/tc1_standards/iec_61131_3/