

Katedra informatiky
Přírodovědecká fakulta
Univerzita Palackého v Olomouci

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Aplikace řízení hydrostatického pohonu chlazení nástavby
vozidla



2016

Vedoucí práce: Mgr. Jan Outrata,
Ph.D.

Daniel Batla

Studijní obor: Aplikovaná informatika,
prezenční forma

Bibliografické údaje

Autor: Daniel Batla
Název práce: Aplikace řízení hydrostatického pohonu chlazení nástavby vozidla
Typ práce: bakalářská práce
Pracoviště: Katedra informatiky, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci
Rok obhajoby: 2016
Studijní obor: Aplikovaná informatika, prezenční forma
Vedoucí práce: Mgr. Jan Outrata, Ph.D.
Počet stran: 29
Přílohy: 1 CD/DVD
Jazyk práce: český

Bibliographic info

Author: Daniel Batla
Title: Application of control of hydrostatic drive cooling system of vehicle superstructure
Thesis type: bachelor thesis
Department: Department of Computer Science, Faculty of Science, Palacký University Olomouc
Year of defense: 2016
Study field: Applied Computer Science, full-time form
Supervisor: Mgr. Jan Outrata, Ph.D.
Page count: 29
Supplements: 1 CD/DVD
Thesis language: Czech

Anotace

Výsledkem práce je souhrn teorie k matematickému postupu pro výpočet optimálního nastavení regulátoru pro stabilní uzavřený hydrostatický obvod včetně popisu PID regulátoru a jeho funkčnosti. Dále práce obsahuje demonstraci regulátoru v nasimulovaných podmínkách, založených na reálných datech ve vývojovém prostředí MATLAB s nadstavbou Simulink a porovnání výsledků různých implementací PID regulátoru.

Synopsis

The result of my thesis is a summary of mathematical procedure for optimal controller settings calculation working at stable hydrostatic circuit including description of PID controller and its functionalities. This paper also include demonstration of a controller in simulated conditions based on real data with a help of MATLAB (Simulink) and comparison of results of various PID controller implementations.

Klíčová slova: PID regulátor; chlazení nástavby vozidla, hydraulický obvod, výpočet nastavení PID regulátoru

Keywords: PID controller; vehicle superstructure cooling system, hydraulic circuit, calculation for PID controller setting

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Mgr. Janu Outratovi PhD. za užitečné rady, prof. Ing. Miluši Vítečkové, CSc. za konzultace a Ing. Michalu Janíkovi, technickému poradci ve firmě Technotrade s.r.o. za spolupráci.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou práci včetně příloh vypracoval/a samostatně a za použití pouze zdrojů citovaných v textu práce a uvedených v seznamu literatury.

datum odevzdání práce

podpis autora

Obsah

1	Úvod	7
2	Teorie z oblasti regulace a řízení	8
2.1	Regulační obvod	8
2.2	Laplaceova transformace	9
2.3	Přechodová funkce a charakteristika	10
2.4	Rozdělení základních regulačních členů	10
2.5	Regulátory	10
2.6	Stabilita regulačního obvodu	12
2.6.1	Hurowitzovo kritérium	13
2.6.2	Michajlov-Leonhardovo kritérium	13
2.7	Ziegler-Nichols metoda	14
2.8	Přenos řízení hydromotoru	15
3	Praktické využití regulátoru	16
3.1	Výpočet nastavení regulátoru	17
3.2	Hydraulický obvod	19
3.2.1	Ukázka (regulátor MATLAB)	19
3.3	Vlastní implementace regulátoru	19
3.3.1	Ukázka (vlastní regulátor)	20
4	Možná vylepšení	21
	Závěr	26
	Conclusions	27
A	Obsah přiloženého CD/DVD	28
	Literatura	29

Seznam obrázků

1	Regulační obvod[7]	8
2	Michailov-Leonhardova křivka pro polynom stupně n=4	14
3	Hydraulický obvod (MATLAB)	22
4	GRAF - vstupní otáčky motoru vozidla	23
5	GRAF - činnost regulátoru (MATLAB)	23
6	GRAF - výstupní otáčky hydromotoru (MATLAB)	24
7	GRAF - vstupní otáčky motoru vozidla	24
8	GRAF - činnost regulátoru (vlastní implementace)	25
9	GRAF - výstupní otáčky hydromotoru (vlastní implementace)	25

Seznam tabulek

1	Seřízení podle Ziegler-Nicholse	14
2	Seznam použitých veličin	16
3	Počáteční hodnoty pro výpočet regulace	17

Seznam vět

1	Definice (Stabilita regulačního obvodu)	12
---	---	----

Seznam zdrojových kódů

1	C++	20
---	-----	----

1 Úvod

Téma této práce jsem zvolil na základě nabídky spolupráce z firmy Technotrade s.r.o.. Tato práce vznikla za účelem řešení problému regulace hydraulického obvodu, na základě dat přednesených zákazníkem. Tento obvod slouží ke zpracování nestálých otáček vozidla na vstupu do obvodu a přeměny v konstantní otáčky hydromotoru na výstupu. Hlavními prvky hydraulického obvodu jsou hydrogenerátor a hydromotor. Hydrogenerátor je poháněn spalovacím motorem vozidla a slouží jako zdroj tlakové kapaliny pro hydromotor, který plní funkci pohonu pro elektrický generátor. Elektrický generátor vytváří elektrický proud pro kompresor, který je součástí chladicího systému v nástavbě vozidla pro transport zvířat v rámci Evropského kontinentu. Z hlediska správné funkce chladicího systému a bezproblémového provozu zařízení jako celku, je nutné zajistit generování konstantního elektrického proudu generátorem, respektive konstantní otáčky hydromotoru, a to za předpokladu nekonstantních otáček spalovacího motoru. S ohledem na zmíněné požadavky je zřejmé, že hydraulický obvod musí být regulován. Ačkoliv řešení obdobných systémů již existují, je snahou vyvíjet stále efektivnější systémy z hlediska snížení pořizovacích a provozních nákladů a z důvodu stále se zpřísňující emisní legislativy.

První část této práce obsahuje rozsáhlou teorii potřebnou k pochopení všech částí této práce. Regulátory jsou v dnešní době často používaná zařízení. Práce seznamuje s různými druhy regulátorů a popisuje jejich základní části. Dále uvádí některé matematické aparáty, které jsou nutné pro výpočet samotné regulace, doplněné o další zjednodušující výpočty. Doplnující teorie popisuje funkčnost a vlastnosti jednotlivých regulátorů za různých podmínek.

V další části práce je zmíněná teorie aplikována na „praktických“ modelových příkladech s využitím reálných dat. Následuje porovnání vlastností regulátoru vytvořeného pro vývojové prostředí MATLAB (nadstavba Simulink) s vlastním implementovaným regulátorem. Výstup z modelových příkladů je následně interpretován za pomoci grafů.

V poslední kapitole této práce jsou uvedeny poznatky pro zkvalitnění modelu hydraulického obvodu z hlediska jeho návrhu a také samotné implementace regulátoru. Dále jsou navržena a popsána zkvalitnění výpočtu pro nastavení parametrů regulátoru, což je hlavní náplní této práce.

2 Teorie z oblasti regulace a řízení

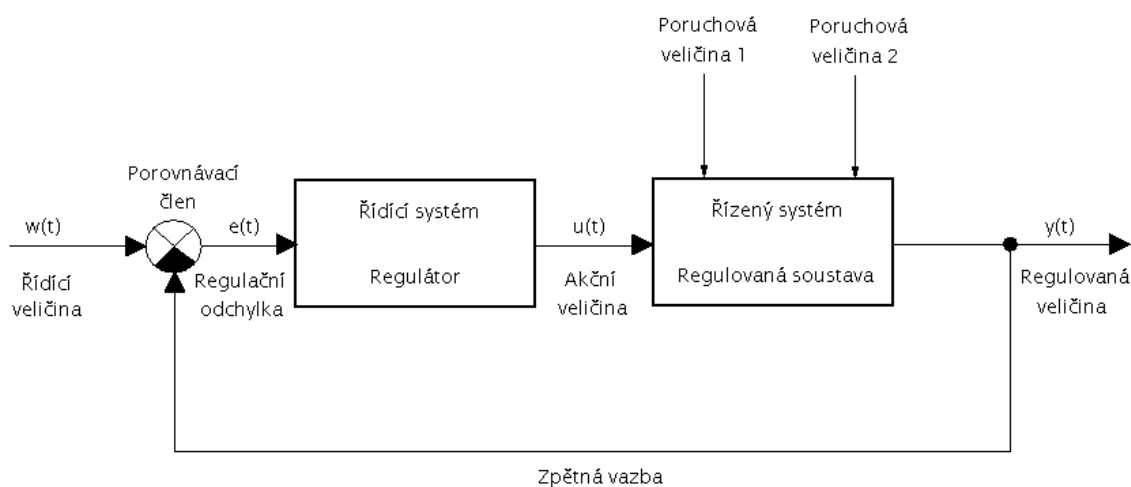
2.1 Regulační obvod

Regulačním obvodem[1][2] nazýváme regulační systém, kde regulační prvek nastavuje určenou veličinu na požadovanou hodnotu a udržuje ji na této hodnotě. Regulační obvod se skládá ze dvou elementárních částí. První částí je regulátor, což je zařízení, které vykonává potřebnou regulaci v obvodu. Druhou částí je regulovaná soustava, která je objektem regulace.

Regulovaná veličina, označována symbolem y , je výstupem z regulované soustavy a zároveň je udržována regulací na požadované hodnotě. Žádaná hodnota, označována symbolem w , je veličina, pomocí které nastavujeme výstupní hodnotu regulované veličiny. Regulační odchylka je označována symbolem e a slouží jako vstupní veličina regulátoru. Významově jde o rozdíl žádané hodnoty a regulované veličiny, tedy: $e = w - y$. Pokud je tedy tento rozdíl nenulový, regulátor se v ideálním případě snaží tento rozdíl dorovnat na nulovou hodnotu. Výstupem regulátoru je pak akční veličina, označována symbolem u . Tato veličina slouží jako vstup do regulované soustavy. Důvodem regulace jsou také poruchové veličiny, označovány symbolem v , které působí na regulovanou soustavu nepředvídatelným způsobem a ovlivňují tak regulovanou veličinu. Celý tento systém je popsán na obrázku 1.

V tomto případě je regulačním obvodem hydraulický obvod, kde vstupní veličinou je počet otáček spalovacího motoru vozidla a výstupní veličinou jsou otáčky hydromotoru. Jako regulátor je použit mikrokontroler s naprogramovaným PID regulátorem, který reguluje naklopení desky hydrogenerátoru tak, aby bylo docíleno konstantního průtoku oleje v systému, respektive konstantních otáček hydromotoru. Detailní popis obvodu bude popsán v kapitole 3.

Obrázek 1: Regulační obvod[7]



2.2 Laplaceova transformace

Laplaceova transformace [1][4] je jedna ze základních matematických transformací (integrálních), která se používá k řešení lineárních diferenciálních rovnic. Používá se k získání lineárního spojitého regulačního systému, tzv. přenosu, což je ve skutečnosti jednoduchá algebraická rovnice. Vyřešením této rovnice a následnou zpětnou transformací získáme výsledek původní diferenciální rovnice.

Transformace spočívá v přiřazení každé funkci reálné proměnné $f(t)$ funkci komplexní proměnné $F(s)$. Některé složité vztahy původních funkcí jsou touto transformací radikálně zjednodušeny. Následkem transformace se z diferenciální rovnice stane polynom, jehož členové mají stupeň odpovídající výši příslušné derivace v rovnici.

Regulační člen se vstupem $u(t)$ a výstupem $y(t)$ lze popsat diferenciální rovnicí

$$a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_1 y' + a_0 y = b_m u^{(m)} + \dots + b_1 u' + b_0 u,$$

kde a_i, b_i jsou konstanty. Abychom mohli však tuto rovnici v reálném případě použít, musí být splněna podmínka $m \leq n$. Pokud je tedy tato podmínka splněna, tak po dosazení vstupního signálu $u(t)$ a počátečních podmínek do rovnice a jejím vyřešením dostaneme průběh výstupního signálu.

Přenos regulačního obvodu je pak definován jako poměr Laplaceova obrazu výstupního signálu a Laplaceova obrazu vstupního signálu v nulových počátečních podmínkách.

$$G_s(s) = \frac{L\{y(t)\}}{L\{u(t)\}} = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

Použijeme-li tedy rovnici regulačního členu a provedeme transformaci této rovnice

$$L\{a_n y^{(n)}(t) + \dots + a_1 y'(t) + a_0 y(t)\} = L\{b_m u^{(m)}(t) + \dots + b_1 u'(t) + b_0 u(t)\}$$

pak při nulových počátečních podmínkách a vytknutí $Y(s)$ a $U(s)$ je výsledkem rovnice

$$Y(s)(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0) = U(s)(b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0).$$

Z této rovnice vyplývá vzorec pro výpočet přenosu.

$$G_s(s) = \frac{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0}{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}$$

2.3 Přejchodová funkce a charakteristika

Přejchodová funkce[2] je definována jako časová odezva systému na jednotkový skok vstupní veličiny při nulových počátečních podmínkách. Přejchodová charakteristika je grafickým vyjádřením přechodové funkce. Jedna z výhod této funkce a charakteristiky je získání výsledků nenáročnou experimentální metodou. Přejchodovou funkci lze také získat z diferenciální rovnice (bez nutnosti převodu na přenos). K získání charakteristiky se s výhodou používá přenos a výsledný vztah přechodové funkce, označované symbolem $h(t)$ v čase t , a přenosu je

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{G_s(s)}{s} \right\}.$$

2.4 Rozdělení základních regulačních členů

Regulační členy můžeme dle jejich charakteristiky, které se v konečném čase ustálí na určité hodnotě, rozdělit na tři skupiny:

- proporcionalní (ustálí se na konečné hodnotě)
- derivační (ustálí se na nule)
- integrační (neustálí se)

V další kapitole budeme toto rozdělení na základě chování přechodové funkce využívat k vytvoření regulátoru.

2.5 Regulátory

Regulátor[1][2][10] je součást regulačního obvodu, starající se o udržování regulované veličiny, která ovlivňuje regulovanou soustavu na předem zadané hodnotě, a zároveň se stará o nulovou či minimální regulační odchylku.

Regulátory lze rozdělit na direktní (přímé), které nepotřebují k své činnosti žádnou vnější energii, a indirektní (nepřímé), které naopak musí mít vlastní zdroj energie potřebný ke své činnosti. Dnes se používají hlavně indirektní regulátory, které lze opět rozdělit do skupin podle typu zdroje energie na pneumatické, hydraulické a elektrické. V našem případě budeme používat regulátor elektrický, který snímá počet otáček na výstupu z regulovaného obvodu a vysílá elektrický signál, potřebný pro korektní naklopení desky hydrogenerátoru. Dle průběhu vstupního signálu se regulátory dají rozdělit na spojitě a nespojitě. V této práci se budeme zabývat výhradně nespojitým signálem, jelikož čidlo výstupních otáček hydromotoru nám generuje jen množinu bodů, na které náš regulátor reaguje.

Regulátor jako takový se skládá z několika elementárních částí. Jsou jimi měřící člen, ústřední člen a akční člen.

Měřící člen (v našem případě čidlo otáček na hydromotoru) je částí regulátoru, která zjišťuje skutečnou hodnotu regulované veličiny.

Ústřední člen zpracovává regulační odchylku, pomocí matematických operací ji upravuje a výsledek posílá do akčního členu. V našem případě je vstup rozdílem aktuálních otáček na hydromotoru a požadované hodnoty otáček na výstupu. Výstupem ústředního členu a zároveň vstupem do akčního členu je pak číslo (účinnost) v rozmezí 0 až 1 (0-100%), které ovlivňuje naklopení desky hydrogenerátoru.

Dynamické vlastnosti ústředního členu, kde vstupem je regulační odchylka $e(t)$ a výstupem akční veličina $u(t)$ jsou tři a odvíjejí se z rozdělení základních regulačních členů v kapitole 2.4.

Regulátor může tedy zesilovat, derivovat a integrovat regulační odchylku. Nejjednodušší možnost, jak se vypořádat s regulační odchylkou je zesílení, potom je akční veličina úměrná regulační odchylce

$$u(t) = r_0 e(t)$$

Takový regulátor se nazývá proporcionální (P regulátor).

Dalším obvyklým případem je úměrnost akční veličiny a integrálu regulační odchylky

$$u(t) = r_{-1} \int e(t) dt,$$

takový regulátor se nazývá integrační (I regulátor).

Regulátor, který by měl svou akční veličinu úměrnou derivaci regulační odchylky, není technicky možný, ale lze jej teoreticky zapsat jako

$$u(t) = r_1 e'(t),$$

takový regulátor by byl derivační (D regulátor). Význam derivačního členu samotného tedy nemá smysl uvažovat, ale můžeme ho použít v kombinaci s ostatními typy.

Regulátory používající kombinaci těchto typů mohou být například regulátory proporcionálně-integrační (PI regulátory), kde se jednotlivé členy v rovnici sčítají

$$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int e(t) dt,$$

stejně tak regulátory proporcionálně-derivační (PD regulátory) s rovnicí

$$u(t) = r_0 e(t) + r_1 e'(t),$$

a poslední kombinací je tedy regulátor proporcionálně-integračně-derivační (PID regulátor), který má svou akční veličinu úměrnou regulační odchylce, jejímu integrálu a její derivaci s rovnicí

$$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int e(t) dt + r_1 e'(t).$$

Obecně se používá PID regulátor, a v případě, že některý člen nepotřebujeme, položíme adekvátní konstantu r_0 , r_{-1} nebo r_1 rovnu nule. Tyto konstanty nám

určují vliv jednotlivých složek regulátoru při výpočtu akční veličiny. Nastavení velikosti těchto konstant lze matematicky vypočítat, více v kapitole 2.6.

Rovnici pro výpočet akční veličiny PID regulátoru lze pomocí Laplaceovy transformace převést na rovnici přenosu regulátoru. Budeme uvažovat ideální případ, kdy nám regulátor neovlivňují setrvačnosti jednotlivých těles, dopravní zpoždění a jiné veličiny, které pak výpočet značně komplikují.

$$G_r(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s$$

2.6 Stabilita regulačního obvodu

Stabilita regulačního[1][3] obvodu je bezpodmínečně nutná k správnému fungování celého obvodu.

Definice 1 (Stabilita regulačního obvodu)

Regulační obvod je stabilní, jestliže po svém vychýlení z rovnovážného stavu a odstranění vzruchu, který vychýlení způsobil, je schopen se ustálit v rovnovážném stavu

Stabilita je tedy schopnost ustálit regulovanou veličinu při jakékoli změně vychýlení. Obvod můžeme přivést do mezního stavu, kdy regulovaná veličina osciluje o konstantní amplitudě. Takový případ se nazývá hranice stability, která je důležitá pro další výpočty, viz kapitola 2.7.

Stabilitu regulačního obvodu lze spočítat, známe-li přenos regulované soustavy $G_s(s)$ a přenos řízení regulátoru $G_r(s)$. Vztahem

$$G_0(s) = G_r(s)G_s(s)$$

sestavíme charakteristickou rovnici, která má tvar polynomu a pokud obsahují všechny kořeny polynomu zápornou reálnou část, pak můžeme tvrdit, že je obvod stabilní. Platí tedy, že aby byl obvod stabilní, musí být všechny koeficienty charakteristické rovnice kladné (nutná podmínka, ale ne postačující, pozn. pokud je charakteristická rovnice polynom druhého stupně, je předcházející podmínka nutná a zároveň postačující, a říkáme tedy, že obvod je strukturálně stabilní).

Vyčíslení kořenů u polynomů stupně vyššího než 2, je tento výpočet pracný. Můžeme ale k výpočtům použít tzv. kritéria stability, které nám bez výpočtů rovnice ověří stabilitu obvodu. Stabilitu lze odvodit na základě několika kritérií. Pro ilustraci jsou následně vybrána dvě z nich, jenž jsou vzájemně principiálně odlišná.

2.6.1 Hurowitzovo kritérium

Hurowitzovo kritérium[1] se řadí k algebraickým kritériím, kde se k ověření stability používají výpočty determinantů z matic.

Z charakteristické rovnice v obvyklém tvaru

$$a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0 = 0,$$

u níž je splněna nutná podmínka kladnosti všech koeficientů, vypočítáme determinant matice

$$H_n = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{vmatrix}$$

z determinantu n -tého stupně H_n postupně utvoříme subdeterminanty H_{n-1} až H_2 tak, že se vždy vynechá poslední řádek a poslední sloupec.

Obvod nazveme stabilním, když determinant H_n a všechny jeho subdeterminanty jsou kladné. Pokud je některý z determinantů záporný, obvod není stabilní, pokud je některý determinant nulový, nachází se obvod na hranici stability.

2.6.2 Michajlov-Leonhardovo kritérium

Michajlov-Leonhardovo kritérium[1] se řadí mezi frekvenční kritéria, které opět vychází z charakteristické rovnice regulačního obvodu. Pokud do charakteristické rovnice

$$H(s) = a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0 = 0,$$

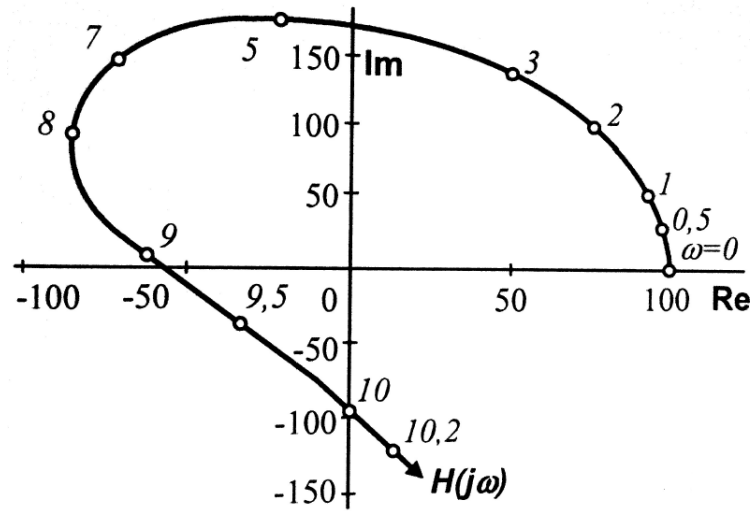
dosadíme za komplexní proměnnou s proměnnou $j\omega$, vznikne nám charakteristická funkce

$$H(j\omega) = a_n (j\omega)^n + \dots + a_1 (j\omega) + a_0,$$

kteřá mění frekvenci ω od 0 do ∞ . Kritérium hodnotí stabilitu podle křivky, kterou opíše koncový bod právě při změně frekvence. Tuto křivku nazýváme Michajlov-Leonhardovou křivkou. Ukázka grafu této křivky pro charakteristický polynom stupně $n=4$ (Obrázek 2).

Aby byl obvod stabilní, musí křivka začínat na kladné reálné poloose komplexní roviny, a s rostoucí frekvencí musí křivka projít v protisměru hodinových ručiček tolika kvadranty, kolikátého stupně je charakteristická rovnice.

Obrázek 2: Michailov-Leonhardova křivka pro polynom stupně $n=4$



2.7 Ziegler-Nichols metoda

V případě, kdy nelze (nebo lze, ale jen obtížně) použít některou z matematických metod na získání parametrů nastavení regulátoru, lze využít některou z experimentálních metod. Jedna z nich se nazývá Ziegler-Nichols metoda[3][6] nebo taky metoda seřízení regulátoru dle kritického zesílení. Tato metoda je v praxi velice často používána, protože regulační obvody bývají často příliš složité pro analytický výpočet.

Tato metoda spočívá v nastavení obvodu na kritickou hodnotu regulace tím, že proporcionální složku regulátoru nastavíme natolik vysokou, aby se dostala na hranici stability, jinými slovy, aby se nikdy neustálila na zadané hodnotě, přičemž integrační složku položíme rovnu nekonečnu a derivační složce nastavíme nulu, aby obě složky do regulace nezasahovaly.

Proces výpočtu je tedy takový, že proporcionální složku regulátoru r_0 nastavíme na kritickou mez (kritické zesílení r_{0k}). Při obvodu na hranici stability obvod kmitá konstantní amplitudou, která je důležitá pro další výpočet. Na základě doby jednoho celého kmitu (tzv. kritická perioda T_k) spolu se zesílením r_{0k} dokážeme spočítat hodnoty ostatních složek regulátoru dle následující tabulky.

typ reg.	r_0	T_i	T_d
P	$0,5r_{0k}$	-	-
PI	$0,45r_{0k}$	$0,83T_k$	-
PD	$0,4r_{0k}$	-	$0,05T_k$
PID	$0,6r_{0k}$	$0,5T_k$	$0,12T_k$

Tabulka 1: Seřízení podle Ziegler-Nicholse

Tato metoda je z hlediska výpočtu jednoduchá, v praxi používaná, avšak nelze tvrdit, že je naprosto přesná. Výsledkem této metody jsou jen přibližné

hodnoty parametrů regulátoru, ale pro většinu případů jsou tyto hodnoty dostačující. Selhává ale u strukturálně stabilních obvodů, které nelze přivést na hranici stability. V takovém případě se používá metoda pokus-omyl.

2.8 Přenos řízení hydromotoru

Abychom mohli spočítat přenos řízení hydromotoru[5], musíme stanovit konstantní zátěž. Přenos řízení je pak poměr obrazů průtoků Q , Q_M (obrazy vytvořené Laplaceovou transformací), tedy $\frac{Q_M(s)}{Q(s)}$.

Výsledná rovnice pak vypadá následovně

$$\frac{Q_M(s)}{Q(s)} = \frac{1}{1 + \frac{R_M}{R_P}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{C \cdot R_M + \frac{L}{R_P}}{1 + \frac{R_M}{R_P}} s + \frac{C \cdot L}{1 + \frac{R_M}{R_P}} s^2}$$

kde:

$$R_M = \frac{2\pi}{V_M^2} \cdot b_m$$

$$R_P = \frac{\Delta p}{Q_Z}$$

$$L = \left(\frac{2\pi}{V_M}\right)^2 \cdot J_M$$

$$C = \left(\frac{V_M}{2}\right) \cdot \frac{1}{K}$$

K samotnému výpočtu je pak nutné znát další data, jejichž seznam se nalézá v tabulce 3. Seznam použitých veličin se nalézá v tabulce 2. Celkový výpočet se všemi použitými daty bude podrobněji popsán v kapitole 3.1.

Tabulka 2: Seznam použitých veličin

L	odpor proti zrychlení
V_M	teoretický objem hydromotoru
J_M	moment setrvačnosti hydromotoru a zátěže
C	hydraulická kapacita na tlakové straně hydromotoru
K	modul objemové pružnosti kapaliny
M_M	teoretický moment
M_Z	moment pasivních odporů
Δp	tlakový spád na hydromotoru
η_M	účinnost přenosu momentu
b_M	linearizovaný součinitel hydraulického odporu
n_M	otáčky hydromotoru
R_M	odpor proti pohybu hydromotoru
R_P	odpor proti pohybu
Q_M	teoretický průtok
Q_Z	svodová propustnost
η_Q	průtoková účinnost
y	parametr nastavení regulačního hydromotoru (neregulační $y=1$)

3 Praktické využití regulátoru

Užitím čistě proporcionálního regulátoru dosáhneme vcelku uspokojujících výsledků. Čím je tedy regulační odchylka větší, tím důrazněji ovlivňuje akční veličinu. Principiálně a implementačně je velice jednoduchý a spolehlivý. Nevýhodou však je ustálení na přibližné hodnotě, tedy existuje tzv. trvalá regulační odchylka. Proporcionální regulátor je vhodný pro obvody bez dopravního zpoždění.

Komplikovanějším regulátorem je integrační regulátor. Samostatně málokdy použitelný, ale v kombinaci s proporcionálním regulátorem dokáže zcela eliminovat regulační odchylku a zrychluje celý proces regulace. Nevýhodou pak je, že integrační složka může znestabilnit celý regulační obvod při nevhodném nastavení, tudíž se nemusí vždy ustálit. Při regulaci je více kmitavý, tím může docházet k rychlejšímu opotřebením některých součástí akčních částí regulovaného obvodu. Kombinace proporcionálního a integračního regulátoru je vhodná pro obvody s dopravním zpožděním.

Z matematického hlediska je na obdobné úrovni jako integrační regulátor také derivační regulátor, který je však samostatně nepoužitelný. Na druhou stranu v kombinaci s P nebo PI regulátorem vylepšuje vlastnosti regulace jakými jsou rychlost regulace, zkracuje periodu kmitů, atd.. Funguje jako přibližná předpověď, kam se bude další průběh vstupní funkce ubírat. Nevýhodou je, že špatným nastavením můžeme průběh regulace také zhoršit a také tím celý obvod znestabilnit.

3.1 Výpočet nastavení regulátoru

Pro výpočet přenosu[4] a vypočtení parametrů regulátoru je třeba znát data, se kterými lze výpočet provést. Uvedená data jsou reálná a výsledky budeme používat pro náš případ použití.

Tabulka 3: Počáteční hodnoty pro výpočet regulace

V_M	40×10^{-6}	$[\text{m}^3]$
J_M	0,0038	$[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$
K	$1,6 \times 10^9$	$[\text{Pa}^{-1}]$
průtoková účinnost	93	%
účinnost přenosu momentu	92,5	%
Δp	20×10^6	$[\text{Pa}]$
n	1500	$[\text{min}^{-1}]$
y	1	$[-]$

S daty uvedenými v tabulce 3, s rovnicemi uvedenými v kapitole 2.8 a dalšími odvozenými rovnicemi můžeme vypočítat rovnici přenosu.

$$L = \left(\frac{2\pi}{V_M} \right)^2 \cdot J_M = \left(\frac{2\pi}{40 \cdot 10^{-6}} \right)^2 \cdot 0,0038 = 93761241,81 \text{ kg m}^{-4}$$

$$C = \left(\frac{V_M}{2} \right) \cdot \frac{1}{K} = \left(\frac{40 \cdot 10^{-6}}{2} \right) \cdot \frac{1}{1,6 \times 10^9} = 1,25 \times 10^{-14} \text{ N}^{-1} \text{m}^5$$

$$M_M = \frac{\Delta p \cdot V_M}{2\pi} = \frac{(20 \times 10^6) \cdot (40 \times 10^{-6})}{2\pi} \doteq 127,324 \text{ N m}$$

$$M_Z = M_M \cdot (1 - \eta_M) = 127,324 \cdot (1 - 0,925) \doteq 10,3236 \text{ N m}$$

$$b_M = \frac{M_Z}{n_M} = \frac{10,3236}{\frac{1500}{60}} = \frac{10,3236}{25} \doteq 0,413 \text{ N s m}$$

$$R_M = \frac{2\pi}{V_M^2} \cdot b_m = \frac{2\pi}{40 \times 10^{-6}} \cdot 0,413 \doteq 1621621622 \text{ N s m}^{-5}$$

$$Q_M = y \cdot n_M \cdot V_M = 1 \cdot \frac{1500}{60} \cdot 40 \times 10^{-6} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$Q_Z = Q_M \cdot (1 - \eta_Q) = 1 \times 10^{-3} \cdot (1 - 0,93) = 7 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$R_P = \frac{\Delta p}{Q_Z} = \frac{20 \times 10^6}{7 \times 10^{-5}} \doteq 2,857 \times 10^{10} \text{ N s m}^{-5}$$

$$\frac{1}{1 + \frac{R_M}{R_P}} \doteq \frac{1}{1,0057}$$

$$\frac{C \cdot R_M + \frac{L}{R_P}}{1 + \frac{R_M}{R_P}} = \frac{0,0033}{1,0057} \doteq 0,00328$$

$$\frac{C \cdot L}{1 + \frac{R_M}{R_P}} = \frac{0,00000117}{1,0057} \doteq 0,00000116$$

Výsledná rovnice je tedy

$$\begin{aligned} \frac{Q_M(s)}{Q(s)} &= \frac{1}{1 + \frac{R_M}{R_P}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{C \cdot R_M + \frac{L}{R_P}}{1 + \frac{R_M}{R_P}} s + \frac{C \cdot L}{1 + \frac{R_M}{R_P}} s^2} \doteq \\ &\doteq \frac{1}{1,0057 + 1,009s + 0,00000117s^2} \end{aligned}$$

Z výsledku je patrné, že nám ve jmenovateli vyšel polynom 2. stupně. Tudíž nelze použít ani jedna z výše zmíněných metod, které lze brát v úvahu pouze od polynomu 3. stupně a výše. Je tedy splněna nutná i postačující podmínka stabilityz[1]. Navíc lze tento obvod brát za strukturálně stabilní obvod, kde parametry nastavení regulátoru nelze získat ani metodou Zieglera-Nicholse, jelikož tento obvod nelze uvést na hranici stability. Jedinou metodu, kterou lze v našem případě použít je čistě experimentální metoda.

3.2 Hydraulický obvod

Pro ukázkou funkčnosti regulace tohoto hydraulického systému navrženého firmou Technotrade s.r.o. byl vytvořen simulační model v programu MATLAB s nadstavbou Simulink[8] [9] (Obrázek 3), kde byl za použití předdefinovaných součástí namodelovaný hydraulický obvod, který z velké části odpovídá reálné aplikaci tohoto zařízení. Všem prvkům byly předány reálné vstupní hodnoty odpovídající našemu příkladu v kapitole 3.1. Výstupem tohoto modelu je grafické znázornění chování vstupních otáček spalovacího motoru vozidla, činnost regulátoru a výsledné hodnoty otáček hydromotoru.

3.2.1 Ukázka (regulátor MATLAB)

Výsledkem praktické demonstrace jsou grafy 4, 5 a 6, které znázorňují vstupní otáčky spalovacího motoru vozidla, činnost regulátoru a výsledné hodnoty otáček na hydromotoru.

Nastavení parametrů regulátoru byly odzkoušeny na výsledcích tohoto modelu experimentální metodou, protože náš obvod je strukturálně stabilní (tvrzení založeno na výpočtech v kapitole 3.1). Pro tento test byly použity hodnoty pro proporcionální složku $r_0 = 30$, pro integrační složku $r_{-1} = 18,5$ a pro derivační složku $r_1 = 0$.

Z grafů 4, 5 a 6 je zřejmé, že při prvním rozjezdu vozidla se otáčky hydromotoru ustálí na přibližné požadované hodnotě za dobu 5 sekund a při dalších změnách otáček vozidla reaguje obvod přiměřeně. Otáčky hydromotoru se pohybují na dobrých hodnotách, které se příliš neliší od požadované hodnoty. Otáčky vozidla (obvykle v rozmezí 800-1800 otáček/min) začínáme regulovat až od hodnoty 1400 otáček/min z důvodu příliš velké zátěže na spalovací motor vozidla při nízkých otáčkách spalovacího motoru a malé rychlosti vozidla. Je tak činěno z praktického důvodu, aby se vozidlo mohlo plynule rozjíždět. Námi vytvořený obvod také začíná fungovat až od určité rychlosti vozidla, aby nedošlo k omezení plynulého průběhu rozjíždění vozidla.

3.3 Vlastní implementace regulátoru

Součástí této práce je také test vlastní implementace regulátoru v připraveném hydraulickém obvodu. Regulátor byl naprogramován v jazyku C/C++. Důvodem implementace v tomto jazyku je jednoduchá přenositelnost mezi vývojovým prostředím MATLAB[8][9] a vývojovým prostředím s vlastním programovacím jazykem PLUS+1 GUIDE, pro který byl tento program určen vzhledem k pozdějšímu nahrávání programu do mikrokontroleru, který má obstarávat regulaci v reálném případě.

Pro naprogramování PID regulátoru dle rovnice

$$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int e(t) dt + r_1 e'(t).$$

jsem využil znalostí z numerických metod pro výpočet derivací a integrálů. Kód funkce, která počítá akční veličinu z regulační odchylky je popsán níže.

```
1 #define PROP 29
2 #define INTE 0.5
3 #define DERI 2
4
5 double lastErr = 0;
6 double cumErr = 0;
7
8 double pidController(double error){
9
10     double pCorr, iCorr, dCorr, resCorr, slope, minErr = -10000,
11         maxErr = 10000;
12
13     pCorr = PROP * error;
14
15     iCorr = (INTE * error) + cumErr;
16     cumErr += error;
17
18     slope = error - lastErr;
19     dCorr = DERI * slope;
20
21     lastErrOut = error;
22
23     resCorr = pCorr + iCorr + dCorr;
24
25     if(resCorr > maxErr) {
26         resCorr = maxErr;
27     }
28
29     if(resCorr < minErr) {
30         resCorr = minErr;
31     }
32
33     return resCorr;
34 }
```

Zdrojový kód 1: C++

3.3.1 Ukázka (vlastní regulátor)

Tato praktická demonstrace ukazuje výsledky stejného hydraulického obvodu s vlastním implementovaným PID regulátorem. Výsledkem jsou grafy 7, 8 a 9. Pro tento test platí stejné podmínky (potřebná rychlost a výše otáček pro spuštění obvodu), které jsou popsány v kapitole 3.2.1.

Nastavení parametrů regulátoru byly opět odzkoušeny na výsledcích tohoto modelu, tentokrát s nově implementovaným regulátorem opět experimentální

metodou. Pro tento test byly použity hodnoty pro proporcionální složku $r_0 = 29$, pro integrační složku $r_{-1} = 0,5$ a pro derivační složku $r_1 = 2$.

Z grafů 4, 8 a 9 vyplývá, že při stejném vstupu jako v případě simulace při použití regulátoru z vývojového prostředí MATLAB dosáhneme jiných výsledků, které nejsou tolik uspokojivé. Výsledné hodnoty otáček hydromotoru se pohybují ve větším rozmezí a nástup regulace je pomalejší s větším kmitáním. Jedním z důvodů rozdílnosti výsledků je použití jednodušších funkcí na výpočet integrálu a derivace. Dalším důvodem pak může být čistě matematický přístup k naprogramování funkce regulátoru. Regulátory v praxi používané zahrnují vlivy technických nedokonalostí obvodu. Na druhou stranu, použití tohoto regulátoru není v praxi nemožné.

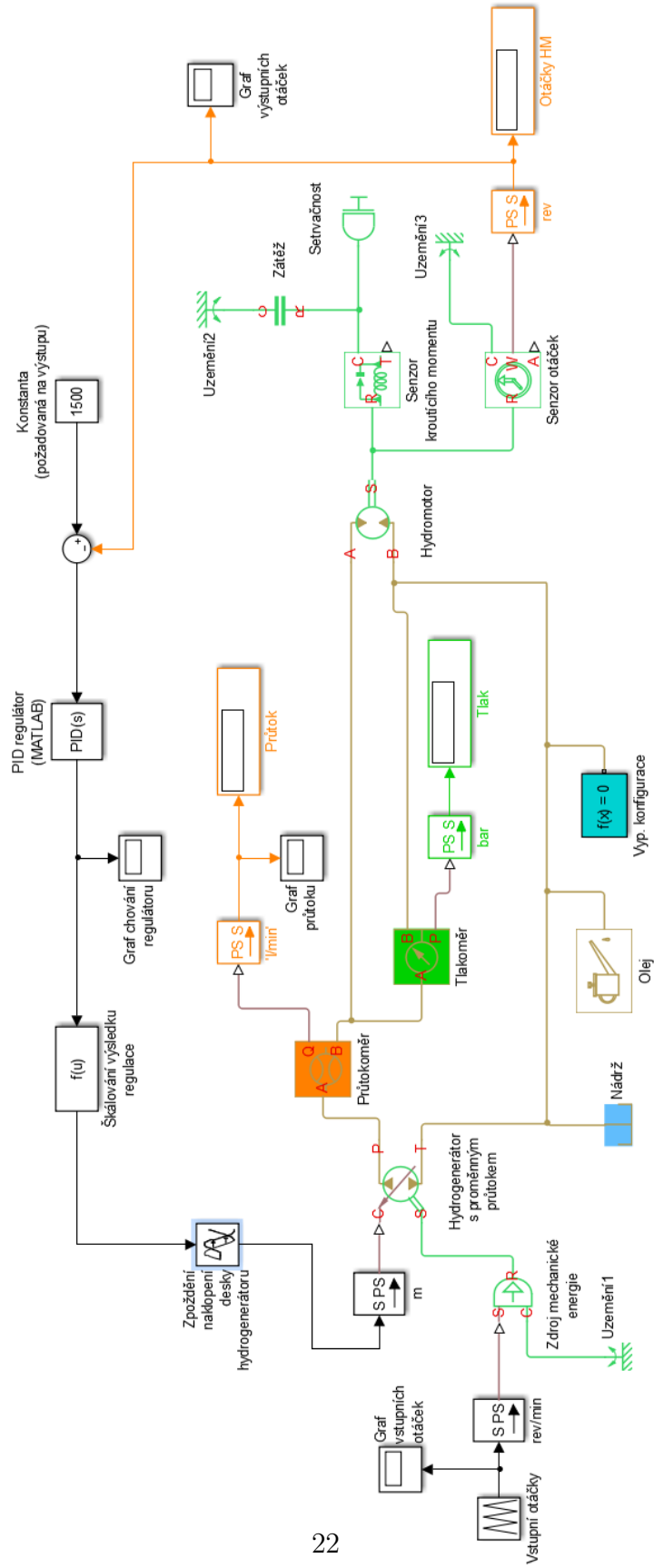
4 Možná vylepšení

Mezi vylepšení týkající se návrhu simulačního modelu hydraulického obvodu patří například nahrazení hydraulických spojení mezi jednotlivými prvky obvodu, které nemají žádné nastavitelné vlastnosti, prvky typu hadice a dalšími spojovacími prvky, kde lze nastavit chování a vlastnosti těchto prvků. Dostali bychom tak přesnější odhad chování tohoto obvodu, ale v našem příkladě jsou tyto změny zanedbatelné. Další možné vylepšení je zavedení přesnějšího zdroje otáček pro tento obvod. V ukázce v kapitolách 3.2.1 a 3.3.1 jsme použili opakující se lineární funkci jako zdroj otáček. V případě použití bloku představující spalovací motor bychom dostali přesnější výstup z našeho obvodu založený na reálnějších podmínkách na vstupu.

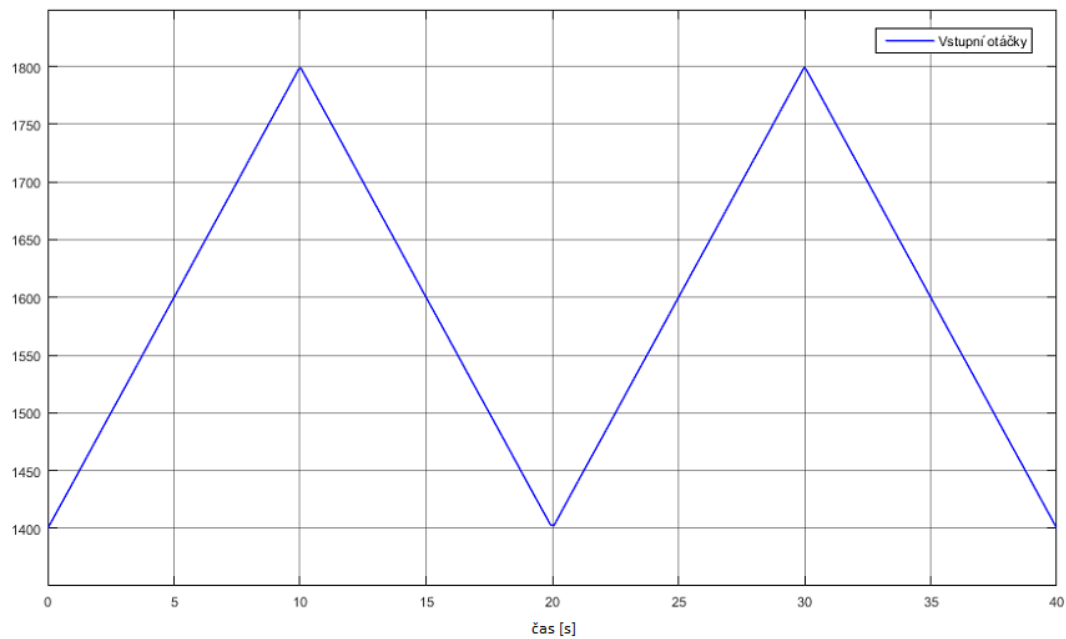
Vylepšení vlastní implementace regulátoru použitého v 3.3.1 mohou být v přesnějších výpočtech pro integrál a derivaci. Pro oba tyto výpočty lze použít hned několik metod, které pramení z teorie pro numerický výpočet derivace a integrálu. Složitost některých pokročilých metod by však mohla celý výpočet radikálně zpomalit, což je pro regulátor, který musí reagovat v reálném čase, nežádoucí.

Poslední oblastí, kde spatřuji prostor pro vylepšení, je vytvoření matematického modelu hydraulického obvodu a tím získání rovnice přenosu, z které lze vypočítat nastavení parametrů regulátoru. Matematický model našeho obvodu, vytvořený ve spolupráci s prof. Miluší Vítečkovou (VŠB Ostrava), je zjednodušený tak, aby pokrýval značnou většinu prvků v tomto obvodu, ale aby bylo zároveň možné vypočítat tuto rovnici s použitelným výsledkem pro další použití. Komplikovanější model by mohl výpočty zpřesnit, ale také další výpočty znemožnit.

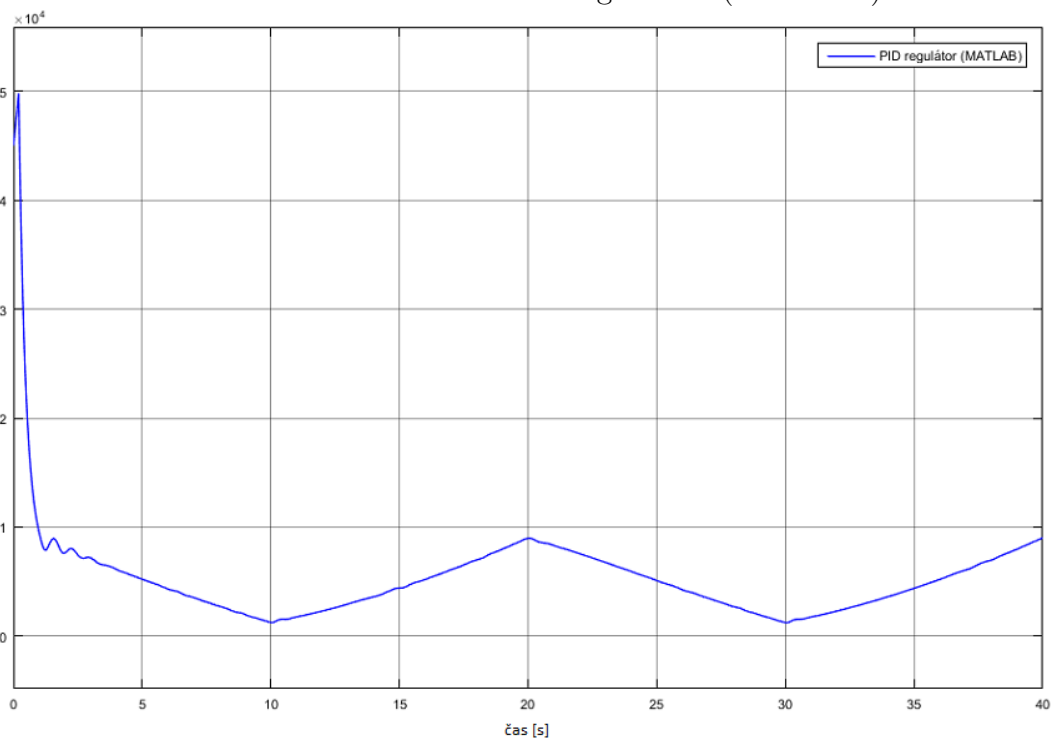
Obrázek 3: Hydraulický obvod (MATLAB)



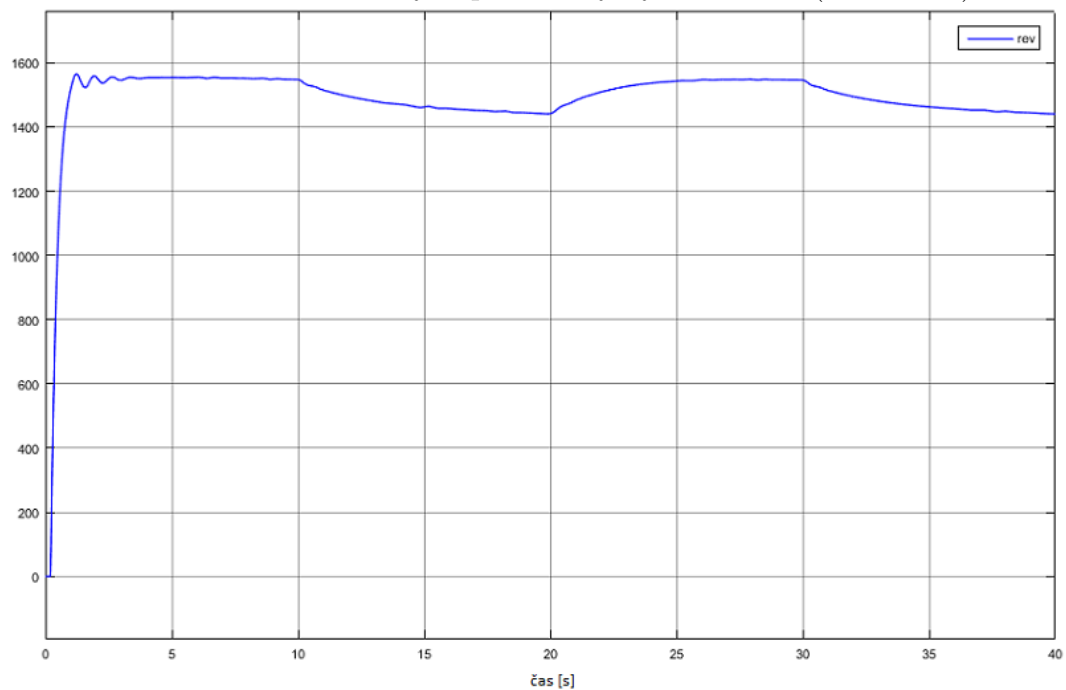
Obrázek 4: GRAF - vstupní otáčky motoru vozidla



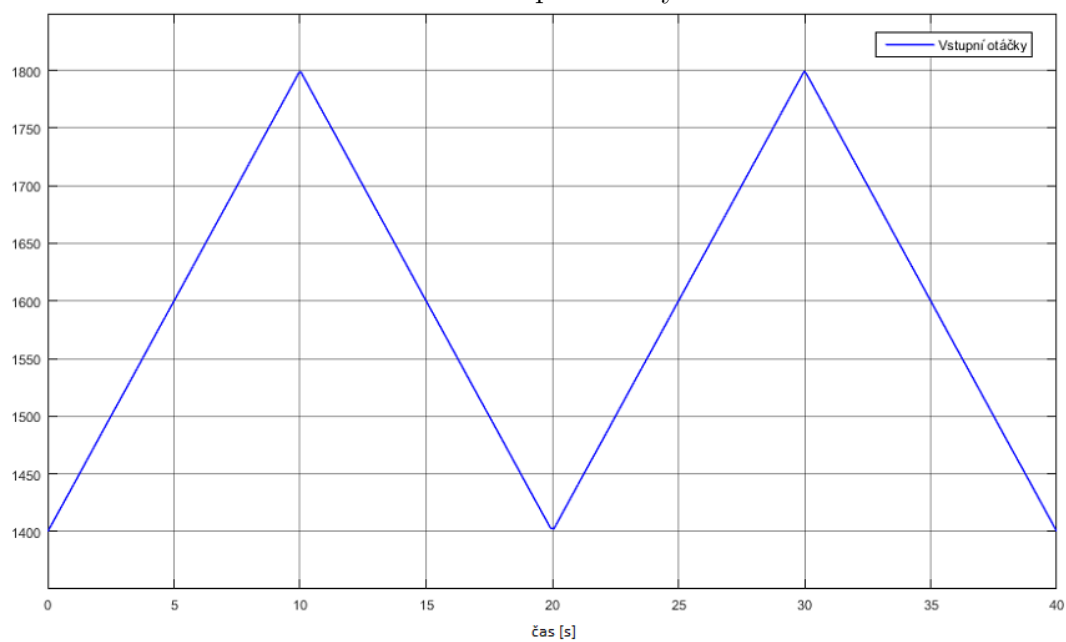
Obrázek 5: GRAF - činnost regulátoru (MATLAB)



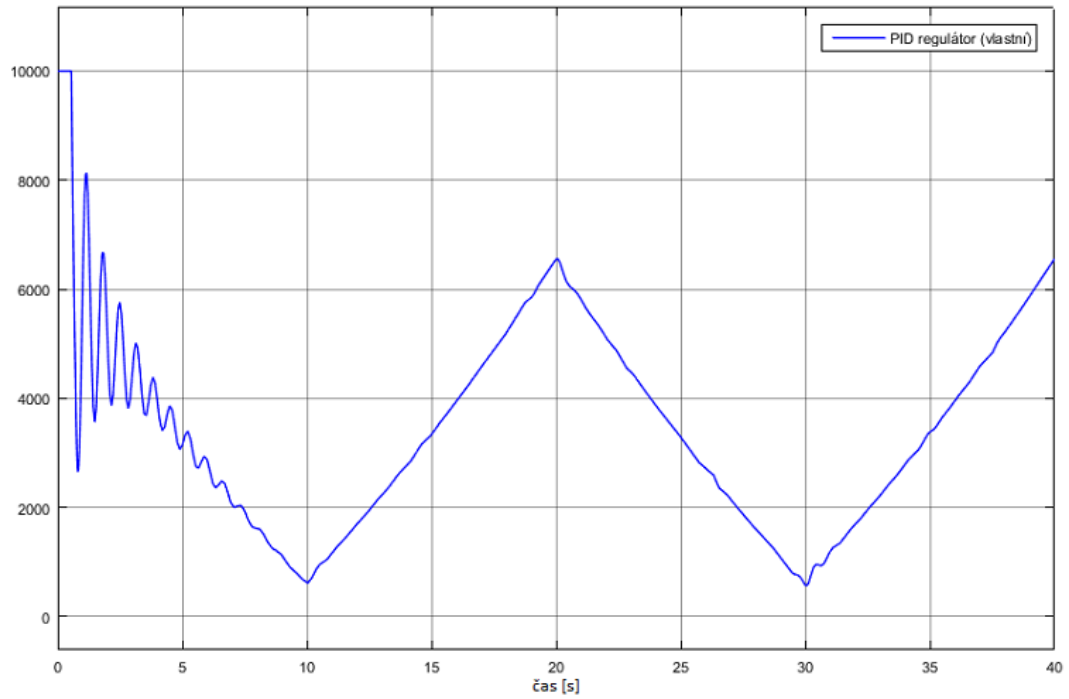
Obrázek 6: GRAF - výstupní otáčky hydromotoru (MATLAB)



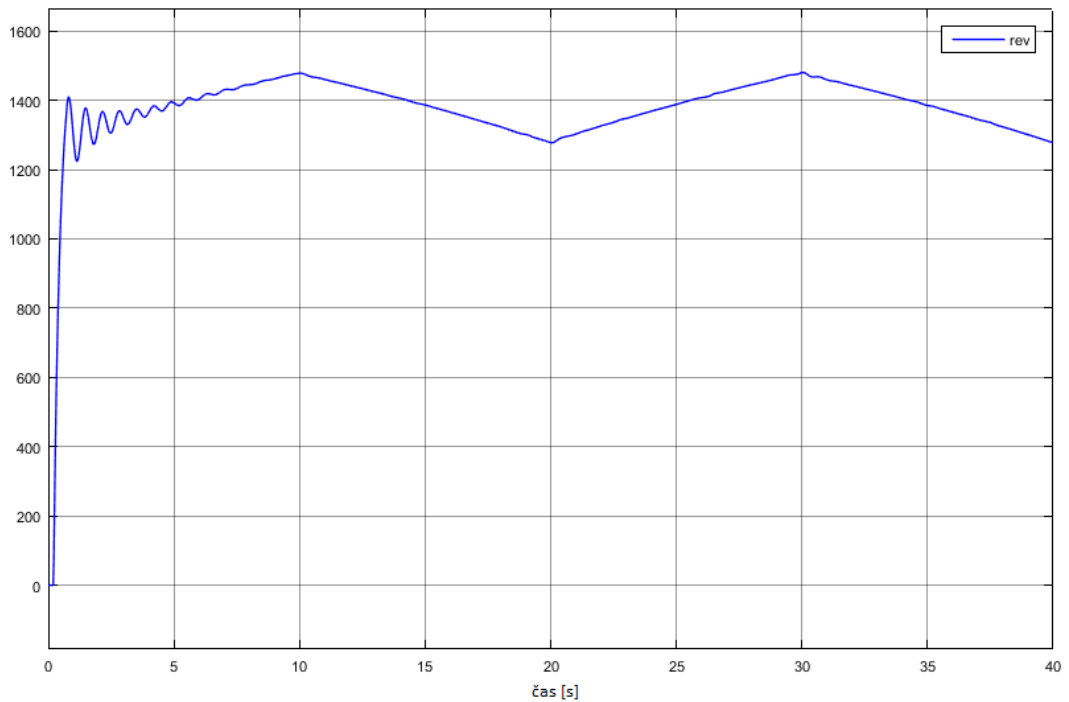
Obrázek 7: GRAF - vstupní otáčky motoru vozidla



Obrázek 8: GRAF - činnost regulátoru (vlastní implementace)



Obrázek 9: GRAF - výstupní otáčky hydromotoru (vlastní implementace)



Závěr

Výsledkem této práce je shrnutí veškeré potřebné teorie z oblasti regulace a hydrauliky, které jsou nutné k výpočtu nastavení parametrů regulátoru a zároveň k vlastní implementaci PID regulátoru.

Konkrétní výsledky práce, získané použitím simulace nelze brát za naprosto přesné, z důvodu uvažování ideálních podmínek chování částí hydraulického obvodu. Pro základní přehled o fungování hydraulického obvodu jako celku, jsou ale naše nasimulované podmínky naprosto dostačující.

Rozdíl ve výsledcích obou implementací regulátoru je značný, přesto může být nově implementovaný regulátor vhodný pro další použití. Hodnoty parametrů nastavení regulátorů byly odzkoušeny experimentální metodou a v obou případech jsme dosáhli kvalitních výsledků vhodných pro využití takto nastavených regulátorů v praxi.

Conclusions

The result of this paper is summary of all theory from hydraulics and controlling field necessarily needed for calculation of controller settings and for PID controller implementation.

Concrete results which were obtained by simulation cannot be taken as absolutely accurate because of thinking an ideal conditions of hydraulic parts behavior. For basic introduction of the circuit usage are the simulated conditions satisfying.

Although the difference between both results is considerable, the newly implemented controller is suitable for further usage. Parameter values of controllers were tested experimentally and we have reached proper results in both cases and both controllers are suitable for usage in real life.

A Obsah příloženého CD/DVD

doc/

Text práce ve formátu PDF, vytvořený s použitím závazného stylu KI PřF UP v Olomouci pro závěrečné práce, včetně všech příloh, a všechny soubory potřebné pro bezproblémové vygenerování PDF dokumentu textu (v ZIP archivu), tj. zdrojový text textu, vložené obrázky, apod.

src/

Kompletní zdrojový kód programu (PID regulátoru), pro vytvoření bloku S-Function ve vývojovém prostředí MATLAB s nadstavbou Simulink.

data/

Simulační modely vytvořené ve vývojovém prostředí MATLAB s nadstavbou Simulink.

readme.txt

Instrukce k vytvoření bloku S-Function Builder ve vývojovém prostředí MATLAB s nadstavbou Simulink, včetně všech požadavků pro jeho bezproblémový provoz.

Literatura

- [1] ŠVARC, Ivan. Automatické řízení. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4398-3.
- [2] VÍTEČKOVÁ, Miluše a Antonín VÍTEČEK. Základy automatické regulace. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1068-9.
- [3] VÍTEČKOVÁ, Miluše a Antonín VÍTEČEK. Vybrané metody seřizování regulátorů. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2011. ISBN 978-80-248-2503-8.
- [4] NOSKIEVIČ, Petr. Modelování a identifikace systémů. Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 80-7225-030-2.
- [5] KUČÍK, P. Hydraulický přenos energie: Mobilné pracovní stroje. Žilina: Žilinská univerzita, 2000. ISBN 80-7100-725-0.
- [6] Automa: odborný časopis pro automatizační techniku. Praha: FCC public, 2000(číslo 4), 2000(číslo 9), 2001(číslo 12). ISSN 1210-9592.
- [7] Obrázek: Blokové schéma automatického regulačního obvodu; Automatizace a automatizační technika: systémové pojetí automatizace. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2012-2014, 2 sv. (217;241 s.). ISBN 978-80-251-4106-92.
- [8] KUPKA, Libor. Matlab & Simulink: úvod do použití. Lanškroun: SOŠ a SOU Lanškroun, 2007. ISBN 978-80-239-8871-0.
- [9] DUŠEK, František a Daniel HONC. Matlab a Simulink: úvod do používání. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2005. ISBN 80-7194-776-8.
- [10] PID Controller. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-07-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller