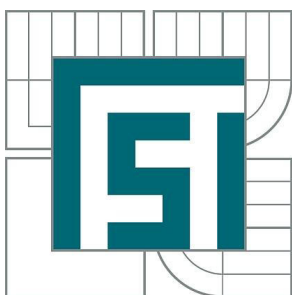


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

NÁVRH ŘÍDICÍHO ALGORITMU PRO ELEKTROMECHANICKÝ AKTUÁTOR S VÝRAZNÝM SUCHÝM TŘENÍM

DESIGN OF CONTROLLER FOR ELECTROMECHANICAL ACTUATOR WITH SIGNIFICANT DRY
FRICTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ANTONÍN VESELÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ROBERT GREPL, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Antonín Veselý

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906T001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh řídicího algoritmu pro elektromechanický aktuátor s výrazným suchým třením

v anglickém jazyce:

Design of controller for electromechanical actuator with significant dry friction

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tato práce se bude zabývat návrhem a ohodnocením různých variant řídicího algoritmu pro elektromechanický polohově řízený aktuátor s výrazným suchým třením. Předpokládá se kompozitní struktura řízení, která zahrnuje zpětnovazební složku (PID) a někdy kompenzátor tření a přímovazební složku (model systému, někdy model tření). Z hlediska praktické aplikace je důležitá volba vhodné struktury regulátoru a nalezení odpovídajících parametrů. Přitom je také prakticky velmi důležité, jaká je citlivost zvoleného kompozitního řízení na nepřesnost určení parametrů.

Cíle diplomové práce:

- 1) Rešeršní studie v oblasti modelování tření a kompenzace tření při řízení aktuátorů.
- 2) Provést identifikaci vybraného pohonu s DC motorem. Pro získaná experimentální data hledat pomocí nástroje Simulink Parametr Estimation parametry modelů s různým použitým modelem tření. U každého modelu ohodnotit míru shody s naměřenými daty.
- 3) Navrhnout několik variant kompozitního regulátoru pro DC motor lišící se použitým modelem tření, zahrnutím dynamiky (nebo pouze statické části) modelu v přímé vazbě apod. U všech variant sledovat přesnost řízení pro zadanou referenční trajektorii a to i v závislosti na změně některých parametrů (frekvence PWM, nepřesnost určení třecího parametru, která může např. simulovat změnu v závislosti na teplotě nebo opotřebení, pásma necitlivosti v okolí chyby polohy v zpětnovazebním kompenzátoru tření apod.). Smyslem této části zadání je vyhodnotit nejen, která varianta kompenzátoru je pro daný systém nejlepší, ale také jak se jednotlivé varianty liší v citlivosti na změny některých parametrů.
- 4) Získané zkušenosti využít při návrhu kompozitního řízení pro reálný aktuátor s nelineární vratnou pružinou (např. škrticí klapka, EGR ventil apod.). Opět ohodnotit citlivost na změnu některých parametrů navrženého řízení.
- 5) Vytvořit algoritmus pro automatický odhad parametrů nelineárního aktuátoru. Aktuátor provede

v režimu identifikace měření potřebných vstupně-výstupních dat a odhadne parametry zvoleného modelu. Následně je na základě těchto parametrů nakonfigurován kompozitní regulátor a aktuátor řízen.

Ukažte funkčnost vytvořeného algoritmu na několika odlišných aktuátorech stejného typu (škrticí klapka, EGR ventil).

Seznam odborné literatury:

- Nelles: Nonlinear System Identification, Springer 2001
- Jung, L.: System Identification, 2009
- Valášek, M.: Mechatronika, Vydavatelství ČVUT 1995

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Robert Grepl, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 21.11.2014

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá identifikací aktuátorů s výrazným suchým třením, případně vratnou pružinou. Identifikované modely tření a pružiny jsou následně optimalizovány pomocí Parameter Estimation toolboxu. Protože tření a vratná pružina nejsou příznivé pro kvalitu regulace, jsou získané modely použity jako kompenzační členy v obvodu regulátoru. Práce se také zabývá vlivem parametrů kompenzačních členů na kvalitu regulace.

ABSTRACT

This work deals with identification of systems with high dry friction and/or return spring. Identified models are optimised by Parameter Estimation toolbox. Because friction and return spring have negative influence in control systems, models are used as compensators in control loop. Also effect of parameters variation is investigated in this paper.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tření, vratná pružina, kompenzační členy, regulace, identifikace, optimalizace, odhad parametrů, ETC, škrticí klapka, stejnosměrný motor

KEY WORDS

Friction, return spring, compensation, control, identification, optimization, parameter estimation, ETC, electronic throttle, DC motor

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VESELÝ, A. Návrh řídicího algoritmu pro elektromechanický aktuátor s výrazným suchým třením. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 54 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Robert Grepl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Návrh řídicího algoritmu pro elektromechanický aktuátor s výrazným suchým třením vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu na konci tohoto dokumentu

Datum:

.....

Bc. Antonín Veselý

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych velmi rád poděkoval doc. Ing. Robertu Greplovi, Ph.D. za vedení, podnětné připomínky, názory, rady a především trpělivost při tvorbě této práce. Velký dík patří také mé ženě a synovi za neustálou podporu a pochopení.

Obsah

1	Úvod.....	2
2	Rešerše metod	3
2.1	Měřené zařízení.....	3
2.1.1	Stejnoseměrný motor	3
2.1.2	Škrticí klapka	4
2.2	Modely tření.....	6
2.2.1	Statické modely tření	6
2.2.2	Dynamické modely tření.....	7
2.3	Regulace.....	7
2.4	Kompenzace tření	9
2.4.1	Zpětnovazební kompenzace (Feedback).....	9
2.4.2	Dopředná kompenzace (Feedforward).....	10
2.5	Optimalizace parametrů modelů	11
2.6	Hodnotící funkce.....	11
2.6.1	Funkce Modprec	12
3	Měřicí zařízení	14
3.1	HW rozhraní.....	14
3.2	SW rozhraní	15
3.3	Budicí signály	16
4	Měření a simulace stejnosměrného motoru	18
4.1	Identifikace modelu stejnosměrného motoru.....	18
4.1.1	Použitý model motoru.....	18
4.1.2	Identifikace zobecněného momentu setrvačnosti	18
4.1.3	Identifikace modelu tření	20
4.2	Optimalizace modelu stejnosměrného motoru.....	21
4.3	Validace modelu stejnosměrného motoru.....	22
4.4	Regulace stejnosměrného motoru	24
4.4.1	Sinusový průběh žádaného natočení.....	24
4.4.2	Lineární průběh žádaného natočení	26
4.4.3	Referenční průběh žádaného natočení	27
4.5	Vliv parametrů na kvalitu regulace	29
5	Měření a simulace škrticí klapky	33
5.1	Model škrticí klapky	33

5.2	Identifikace škrticí klapky.....	34
5.2.1	Identifikace vratné pružiny	34
5.2.2	Identifikace parametrů tření klapky	35
5.3	Optimalizace modelu škrticí klapky	37
5.3.1	Validace modelu škrticí klapky.....	38
5.4	Regulace škrticí klapky	39
5.4.1	Sinusový průběh žádaného otevření	39
5.4.2	Lineární průběh žádaného otevření.....	40
5.4.3	Referenční průběh žádaného otevření.....	42
5.5	Vliv parametrů kompenzátoru na kvalitu regulace	43
6	Závěr	47
7	Seznam obrázků	48
8	Seznam tabulek	50
9	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	51
10	Seznam zdrojů.....	53

1 Úvod

Tato práce se zabývá regulací stejnosměrných motorů použitých v akčních členech s vysokým suchým třením, případně vratnou pružinou. Takovéto prvky se používají například v automobilovém průmyslu, ve kterém se postupně prosazují čím dál tím více. Souvisí to jak se snížením spotřeby, což je nutnost pro splnění přísných emisních limitů, tak s pořizovací cenou, která je nižší než u pneumatických a hydraulických systémů.

Důvody pro vysoké tření v těchto soustavách jsou v základu dva. Prvním jsou provozní podmínky, za kterých musí být prvky provozuschopné. Zejména teplota, která se pohybuje od -40 do 200 °C, je jednou z příčin. Díky tepelné roztažnosti materiálů se s teplotou výrazně mění i tření v kontaktních plochách. Druhým je cena, která se zejména v segmentu osobních automobilů stává velmi kritickým parametrem. V rámci jejího snižování se používají méně kvalitní komponenty, nebo konstrukčně jednodušší, ale funkčně horší postupy.

Hlavním cílem práce je přesná polohová regulace škrticích klapek, které se velmi rozmohly při řízení spalovacích motorů. Většinou se jedná o tzv. ETC (Electronic throttle control) [1] systémy, které jsou založeny na bázi drive-by-wire a jsou inspirovány řízením dopravních letadel. Právě z důvodu nízké ceny výrobci používají stejnosměrné motory s čelní převodovkou jako hnací ústrojí a uložení hřídele bez použití ložisek. Tím vzniká vysoké suché tření, které působí proti požadovanému pohybu. Navíc jsou klapky z důvodu havarijních stavů vybaveny vratnou pružinou, která klapku v případě potřeby uzavře.

Všechny tyto aspekty jsou z hlediska regulace velmi nepříznivé. Na druhou stranu výrobci automobilů pokládají požadavky na velmi přesné řízení, aby byl co nejvíce využit výkon motoru a zároveň co nejvíce sníženy náklady na provoz. Oba tyto požadavky je potřeba zpracovat způsobem, který je co nejlépe naplní.

Samotnou konstrukci bez navýšení finančních prostředků příliš vylepšit nelze. Proto nezbyvá, než se zaměřit na regulaci. Do regulačních obvodů škrticích klapek se přidávají členy, které zlepšují její kvalitu. Takovým členem je například kompenzátor suchého tření a kompenzátor vratné pružiny. Tato práce se zabývá řešením právě takovýchto kompenzačních členů. V první kapitole je stručný výtah z teoretických podkladů. Kde to lze, jsou odkazy na literaturu, která danou problematiku podrobněji rozvíjí. Následující kapitoly už jsou zaměřeny na samotné řešení. To koresponduje se zadáním a skládá se z identifikace měřených soustav, optimalizace parametrů modelů a jejich aplikace. Prozkoumán je také vliv parametrů modelů na kvalitu regulace daných soustav.

2 Rešerše metod

Tato práce je postavena na znalostech z oblasti modelování stejnosměrných motorů, tření a regulace. V následujících kapitolách jsou stručně popsány podklady použité při řešení bodů zadání.

Jelikož všechny zmíněné oblasti jsou velice obsáhle postihnuty v mnoha publikacích, je výběr omezen pouze na nejdůležitější vztahy a závěry. Pro obsáhlejší studium jsou kapitoly doplněny o odkazy na vhodnou literaturu.

2.1 Měřené zařízení

Jak je specifikováno v zadání, použité metody a postupy mají být aplikovány na alespoň dvě soustavy. Jednou z nich je stejnosměrný motor, který slouží zejména k ověření postupů a teoretických znalostí z oblasti identifikace a kompenzace tření. Druhou je soustava s výrazným suchým třením a vratnou pružinou, jejíž přesná polohová regulace je hlavním cílem. V následujících dvou kapitolách je popis zvolených soustav s odvozením rovnic pro jejich model.

2.1.1 Stejnosměrný motor

Stejnosměrný motor je základní prvek v mechatronických systémech. Nejvíce používaný tvar diferenciálních rovnic při jeho modelování vychází z napěťové rovnice elektrické části *a*) a mechanické rovnice rotoru *b*) [2]:

$$\begin{aligned} \text{a)} \quad U &= U_R + U_L + U_i = R_a \cdot I + L_a \cdot \frac{di}{dt} + K \cdot \omega \\ \text{b)} \quad J_{Mot} \cdot \frac{d\omega}{dt} &= M - M_z = K \cdot i - M_z - M_T \end{aligned} \quad (2.1)$$

kde U je napětí na svorkách motoru; R_a je odpor vinutí; L_a je indukčnost vinutí; i je proud tekoucí motorem; K je napěťová (proudová) konstanta motoru; ω je úhlová rychlost rotoru; J_{Mot} je moment setrvačnosti hřídele motoru; M_z je zátěžný moment motoru a M_T je moment třecí síly. Napěťovou a proudovou konstantu motoru budeme považovat za shodnou, protože rozdíl v jejich hodnotách bývá zanedbatelný.

Jako stejnosměrný motor byl použit motor Transmotec PD52103-24-39-0E s parametry uvedenými v následující tabulce.

Jmenovité napětí [V]	Jmenovitý moment [mNm]	Jmenovité otáčky [ot/min]	Jmenovitý proud [A]	Otáčky naprázdno [ot/min]	Proud naprázdno [A]	Jmenovitý výkon [W]
24	88	3100	1,6	3600	0,4	29

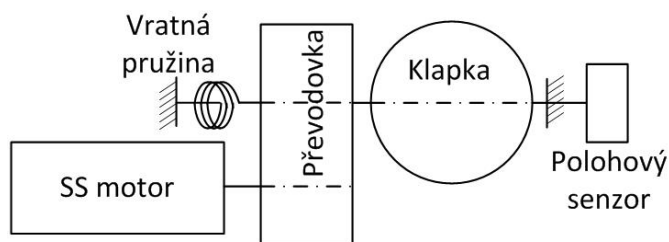
Tab. 1: Katalogové hodnoty motoru [3]

Motor je dále osazen planetovou převodovkou s převodovým poměrem 39:1 a účinností 62%. Dále je motor vybaven optickým dvoukanálovým inkrementálním enkodérem s 1000 pulzy na jednu otáčku rotoru.

2.1.2 Škrticí klapka

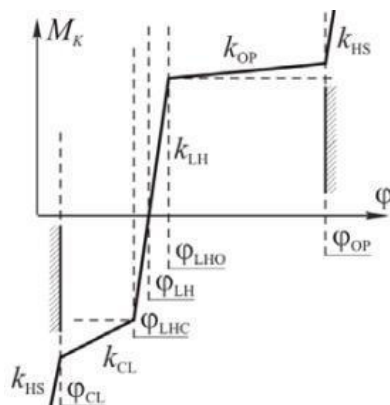
Druhou soustavou je elektronická škrticí klapka (electronic throttle či throttle body). Jedná se o jedno ze zařízení používaných k lepšímu a efektivnějšímu spalování motorů. Regulací vzduchu hnaného do spalovací komory pomáhá dosažení optimální směsi a tím získání vyššího výkonu a nižších emisí. Obvykle je řízena ECU (electronic control unit), která na základě vstupních dat jako je např. míra sešlápnutí plynového pedálu reguluje polohu (otevření) klapky.

Škrticí klapka se skládá ze stejnosměrného motoru, čelní převodovky, vratné (zkrutné) pružiny, klapky a absolutního snímače otevření, jak je znázorněno na Obr. 1. Poloha klapky je omezena pomocí mechanických dorazů, tzv. hard stopů, na úhel od 0 do 86°. Při vytváření modelu lze tedy vyjít z rovnic pro stejnosměrný motor (2.1) a doplnit je o model vratné pružiny a mechanických dorazů. Setrvačnost klapky a převody lze redukcí převést do soustavy motoru.



Obr. 1: Schématický model elektronické škrticí klapky

Dle [1] je moment pružiny v závislosti na jejím stlačení značně nelineární, jak lze vidět na obr. 2, kde parametry k jsou tuhosti pružiny a φ jsou úhly otevření klapky pro danou oblast: CL – close (zavírání klapky), LH – limp home (poloha klapky při nulovém napětí na motoru), OP – open (otevírání klapky), HS – hard stop (mechanické dorazy).



Obr. 2: Závislost momentu vratné pružiny na úhlu otevření klapky (převzato z [1])

Závislost síly pružiny na otevření klapky lze popsat pomocí rovnic:

$$M_k = \begin{cases} k_{LH} \cdot (\varphi - \varphi_{LH}), & \text{pro } -M_{LHC} < M_k < M_{LHO} \\ M_{LHO} + k_{OP} \cdot (\varphi - \varphi_{LH}), & \text{pro } M_k > M_{LHO} \\ -M_{LHC} + k_{CL} \cdot (\varphi - \varphi_{LH}), & \text{pro } M_{LHC} > M_k \end{cases} \quad (2.2)$$

Modelování dorazů je mnohem komplikovanější. Některé zdroje doporučují modelovat dorazy jako velmi tuhé pružiny (viz. [1]). Jiné zase uvádějí, že dorazy lze modelovat jako omezení polohy, např. [4]. Jelikož jsou všechny modely v této práci tvořeny v Simulinku, jeví se jakožto nejvhodnější použít postup z [4] využívající integrátoru druhého řádu se saturací. Tím jsou splněny jak podmínka omezení polohy, tak dynamiky rychlosti (více v [4]). Praktické využití v modelu klapky a důsledky jsou nastíněny v kapitole 5.

Měřená klapka je od Italského výrobce aktuátorů Magneti Marelli. Bohužel se od zástupců firmy nepodařilo získat jiné, než obecné informace. I ty však byly předány pouze ústně. Jednou z podstatných informací je, že i když je klapka navržena na napětí 12V, nikdy není používána při větším napětí než 8V. Klapka je regulována pomocí PWM signálu z řídicí jednotky, který má maximální frekvenci 1kHz, jak je v automobilovém průmyslu zvykem.

Další podstatnou informací je, že klapka je osazena dvojitou zkrutnou pružinou. Jedna strana pružiny slouží pro návrat klapky do nulové polohy. Druhá strana, se závity natočenými v opačném směru, slouží jako mechanický tlumič při ztrátě napětí motoru. Je-li totiž klapka otevřena, vratná pružina ji silně zavře. Pokud by v nulové poloze nebyla tlumicí pružina, mohlo by při opakování tohoto jevu dojít k poškození osy klapky a tím k jejímu celkovému zničení či poškození motoru.



Obr. 3: Foto použité škrtecí klapky

2.2 Modely tření

Celá tato kapitola vychází (není-li uvedeno jinak) z článku [5], který shrnuje a dostatečně popisuje celou problematiku modelování tření. V následujícím textu je pouze souhrn nejdůležitějších poznatků. Pro bližší studium problematiky tření doporučuji důsledné studium uvedeného zdroje a související literatury.

Obecně je tření tečná reakční síla mezi dvěma styčnými plochami, která závisí na mnoha parametrech (geometrie těles, materiál, posun, relativní rychlost, přítomnost maziva atd.). Lze jej však teoreticky popsat pomocí dvou typů rovnic, a to statických a dynamických.

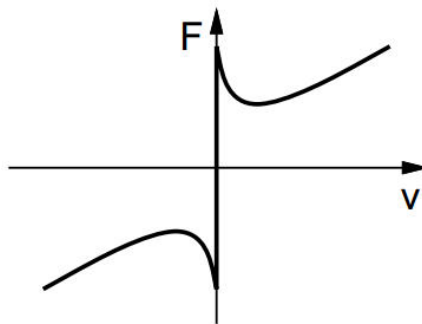
2.2.1 Statické modely tření

Jako statické modely tření jsou dle [5] považovány takové modely, které uvažují pouze elastickou deformaci při působení třecí síly. Jinak řečeno, jejich rovnice neobsahuje dynamickou část (nejedná se o diferenciální rovnici).

Jako plný model statického tření lze považovat takový, který dostatečně popisuje charakteristiku tření, která je na Obr. 4. Tento průběh lze popsat např. pomocí rovnice:

$$F(v) = \left(F_C + (F_S - F_C) \cdot e^{-|v/v_s|^{\delta_s}} + F_v \cdot v \right) \cdot \text{sgn}(v) \quad (2.3)$$

kde F_C je hodnota Coulombova tření (také nazýváno suché tření), F_S je maximální hodnota statického tření (bod zvratu, v anglické literatuře označován jako break-away force), F_v je koeficient viskózního tření, v_s je Stribeckova rychlost (v hodnotě Coulombova tření), δ_s je koeficient Stribeckova jevu (viz dále) který se obvykle rovná dvěma a v je rychlost pohybu povrchů vůči sobě.



Obr. 4: Závislost třecí síly na rychlosti pro statický model tření (převzato z [5])

Exponenciální pokles, který nastane po překonání maximální statické třecí síly, se nazývá Stribeckův jev. Ten nastává u soustav s mazivem, kdy při vyšší rychlosti může mazivo separovat styčné plochy (stává se významným hydrodynamický efekt maziva).

Jak je z rovnice (2.3) patrné, jedná se o součet dílčích členů – koeficientů tření. Z toho plyne, že lze model rozdělit na jednodušší modely, které berou v úvahu pouze některé členy nebo jejich kombinace. Obecně však platí, že pro nulovou rychlost je

výsledek rovnice nejednoznačný. Proto se do výpočtu třecí síly zavádí navíc následující podmínka:

$$F = \begin{cases} F(v) & \text{pokud } v \neq 0 \\ F_e & \text{pokud } v = 0 \wedge |F_e| < F_C \\ F_C \cdot \text{sgn}(F_e) & \text{v jiném případě} \end{cases} \quad (2.4)$$

kde F_e je síla, jíž působíme na těleso, kterým chceme pohybovat. Tím je nelinearita při nulové rychlosti jasně definována a statický model tření je tak kompletní.

2.2.2 Dynamické modely tření

Oproti statickým modelům tření berou dynamické modely v úvahu i plastickou deformaci tělesa. V matematickém popisu je tedy použita diferenciální rovnice. Asi nejběžnější dynamický model tření je tzv. LuGre model (2.5), který vychází z Bristlova modelu (viz [5]). Model je založen na představě, že plocha těles má tvar pomyslných štětin. Tření pak vzniká při pohybu těchto štětin vůči sobě. Rovnice pro model LuGre dle [5] jsou:

$$\begin{aligned} F &= \sigma_0 \cdot z + \sigma_1 \cdot \frac{dz}{dt} + F_V \cdot v \\ \frac{dz}{dt} &= v - \sigma_0 \cdot \frac{|v|}{g(v)} \cdot z \\ g(v) &= F_C + F_S \cdot e^{-(v/v_s)^2} \end{aligned} \quad (2.5)$$

kde F_C je koeficient Coulombova tření, F_S je hodnota bodu zvratu, F_V je koeficient viskózního tření, z představuje průměrné vychýlení štětin, σ_0 je tuhost štětin, σ_1 je koeficient tlumení, v je rychlost pohybu a v_s je Stribeckova rychlost (viz výše). Dynamický stav z je virtuální, tedy není měřitelný.

Pokud srovnáme rovnici pro $g(v)$ s rovnicí pro model statického tření (2.3), zjistíme, že jsou si velmi podobné – $g(v)$ totiž v modelu LuGre nahrazuje právě část tření v okolí Stribeckova jevu. Dynamický model na rozdíl od toho statického nemusí mít explicitně definováno chování při nulové rychlosti.

2.3 Regulace

Cílem této práce je mimo jiné regulovat soustavu na určenou polohu s pomocí členů kompenzujících tření. Akčním členem obou soustav je stejnosměrný motor – jde tedy v podstatě o servomechanismus. Dle [6] je pro regulaci stejnosměrných pohonů na polohu doporučena tzv. kaskádní regulace, která se skládá ze tří zpětnovazebních regulačních smyček vnořených do sebe: proudové, rychlostní a polohové.

Jelikož se jedná o zpětnovazební regulaci, je pro její korektní fungování velmi důležité přesné měření skutečných veličin. To však není u zvoleného zařízení zaručeno.

Hlavním faktorem je nepřesné měření proudu (viz kapitola 3.1), který je problémem pro obě zvolené soustavy. Při regulaci stejnosměrného motoru je dalším nepříznivým faktorem měření rychlosti otáčení motoru na základě dat z enkodéru. To je také značně nepřesné, zejména pro malé rychlosti. Určení rychlosti pro enkodéry provozované při nízkých rychlostech je možné, např. postupy popsány [7], avšak zjištěné přístupy vyžadují na měřicím zařízení počítání času od přerušení, což na zvolené měřicí kartě nelze realizovat (více v kapitole 3.1).

U škrticí klapky může být rychlost počítána pomocí derivace změřené polohy. Je tedy teoreticky možné vytvořit dvě vnořené regulační smyčky: jednu pro rychlost a druhou pro polohu. Derivace však zanáší do signálu výrazný šum a je použitelná pouze po aplikaci filtru. Ten naopak způsobuje fázový posun, který je pro regulaci v nízkých rychlostech také kritický.

Jedinou veličinou, kterou tedy lze v obou případech měřit, tak aby nezanášela zbytečnou chybu do regulace, je poloha. Pro kaskádní regulaci je to však nedostačující.

Jiným přístupem, který je praxí ověřený, je použití PID regulátoru, nebo jeho zjednodušené varianty. Z hlediska nastavení a programování takového regulátoru je nejvýhodnější použití jeho součtového tvaru, který navíc umožňuje snímat akční zásahy jednotlivých složek. Protože měření probíhá v softwaru na počítači s jasně definovanou vzorkovací periodou, je vhodné tomu přizpůsobit i regulátor. Nabízí se tedy použití PID regulátoru v číslicovém (diskrétním) tvaru [8]:

$$u = r_0 \cdot \left(1 + \frac{T}{T_I} \cdot \frac{z}{z-1} + \frac{T_D}{T} \cdot \frac{z-1}{z} \right) \quad (2.6)$$

kde u je akční zásah regulátoru; r_0 je zesílení proporcionální složky, T_I je časová konstanta integrační složky, T_D je časová konstanta derivační složky a T je vzorkovací perioda. Tento tvar pak lze zjednodušit na tvar se zesílením jednotlivých složek:

$$u = K_P + K_I \cdot \frac{z}{z-1} + K_D \cdot \frac{z-1}{z} \quad (2.7)$$

kde K_P je zesílení proporcionální složky, K_I je zesílení integrační složky a K_D je zesílení derivační složky.

Podíváme-li se na představené modely tření, tak zjistíme, že všechny počítají sílu (moment), kterou tření působí na danou soustavu. Zahrnutí síly jako takové do regulačního obvodu stejnosměrného motoru není snadné. Regulace by totiž musela být právě na úrovni proudové smyčky a kompenzátor také. Je to jediný způsob, jak lze regulovat moment stejnosměrného motoru (viz rovnice (2.1)) bez použití vyšších forem řízení. Z tohoto důvodu (a z hlediska použitých měřicích zařízení) je vhodnější použít regulaci napěťovou – tedy regulovat napětí na vstupu motoru. Při použití rozhraní popsaného v kapitole 3 je pak jako akční zásah na výstupu regulátoru střída pro PWM signál.

2.4 Kompenzace tření

Tření, zejména u soustav s vysokým suchým třením, má nepříznivý dopad na kvalitu regulace. Dle [1] ve většině případů vzniká trvalá regulační odchylka, kterou klasický přístup regulace pomocí PID regulátoru nedokáže odstranit. Proto, pokud je to možné, je vhodné tření v regulační smyčce kompenzovat.

Některé základní druhy kompenzace tření lze dohledat v [5]. Všechny však předpokládají znalost modelu soustavy a tření na úrovni působících momentů. Jak je popsáno výše, na zvoleném zařízení je regulace momentu velmi obtížná a nepřesná. Proto je nutné zvolit jiný způsob, např. použít kompenzátor sdružený s regulátorem napětí.

V [1] je popsán kompenzátor postavený na napětovém modelu aktuátoru, tedy modelu, který je v jednotkách napětí. Model je odvozen ze základních rovnic pro stejnosměrný motor (2.1) a má následující tvar:

$$J \frac{d\omega}{dt} = u - b \cdot \frac{d\varphi}{dt} - u_{Treni}(\omega) - u_{Pruziny}(\varphi) \quad (2.8)$$

kde J je zobecněný moment setrvačnosti soustavy, ω je úhlová rychlost, u je napětí na svorkách stejnosměrného motoru, b je zobecněné tlumení soustavy, φ je úhel natočení, $u_{Pruziny}$ je model vratné pružiny převedený na napětí a u_{Treni} je model tření převedený na napětí. Samozřejmě, že při vyšetřování soustavy bez vratné pružiny je část $u_{Pruziny}$ rovna nule. Odvození tohoto modelu je popsáno v [1]. Model se díky výše zmíněným informacím a omezením jeví jako nejvhodnější.

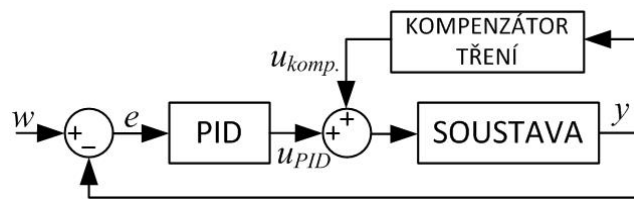
Jako kompenzační členy jsou uvažovány systémy, které mají za úkol eliminovat nepříznivé vlivy působící na soustavu, v našem případě tření a vratnou pružinu. Kompenzátory bývají použity ve vnitřní regulační smyčce. K akčnímu zásahu regulátoru pak přičítají, nebo odečítají, vliv tření a vratné pružiny a tím regulátoru pomáhají je překonat.

Modely kompenzátorů potřebují pro své fungování vstupní parametr. Pomocí něj pak model určí hodnotu výstupu kompenzátoru. V základu lze získat vstupní parametr dvojitým způsobem. Prvním je měření, neboli zpětná vazba. Jedná se pak o zpětnovazební kompenzátor, tzv. Feedback (FB). Druhým je výpočet parametru ze žádané hodnoty, jedná se o předřadnou kompenzaci, tzv. Feedforward (FF).

2.4.1 Zpětnovazební kompenzace (Feedback)

Budeme-li uvažovat problematiku kompenzace tření, hlavním vstupním parametrem je dle rovnic (2.3) a (2.5) rychlost pohybu. Z ní se pomocí konstant vypočítá výsledná třecí síla. Jak je popsáno výše, probíhá regulace na zvolených soustavách na úrovni natočení/polohy otevření. Rychlost je tedy teoreticky možné získat derivací změřené polohy, jako je to naznačeno na Obr. 5, kde w je žádaná hodnota; e je regulační odchylka; u_{PID} je akční zásah regulátoru; u_{komp} je akční zásah kompenzátoru a y je

skutečná hodnota regulované veličiny. Je zřejmé, že při kompenzaci dochází ke zpoždění způsobenému měřením polohy. Jedná se v podstatě o zpoždění zpětné vazby.

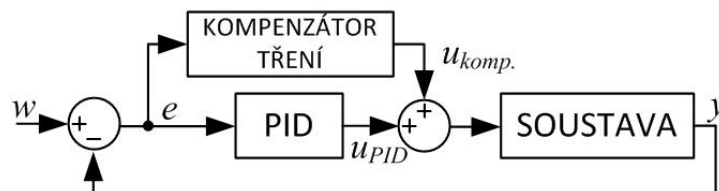


Obr. 5: Schematické znázornění zpětné kompenzace

Další nevýhodou takového přístupu je šum na změřených datech. Ten může v kombinaci se zmíněným zpožděním způsobit, že kompenzátor bude počítat neadekvátní výstupní hodnotu. Pokud budou měřená data filtrována, zanáší to do soustavy kompenzátoru další zpoždění, což může v konečném důsledku vést ke zhoršení kvality regulace.

Jednou z možností, jak předešlé nepříznivé vlivy omezit je použití zpětného kompenzátoru, který k výpočtu použije regulační odchylku (Obr. 6). V regulační smyčce pak dochází k tomu, že jak akční zásah regulátoru, tak akční zásah kompenzátoru jsou počítány z totožných dat. Kompenzátor se tak více přizpůsobí regulátoru.

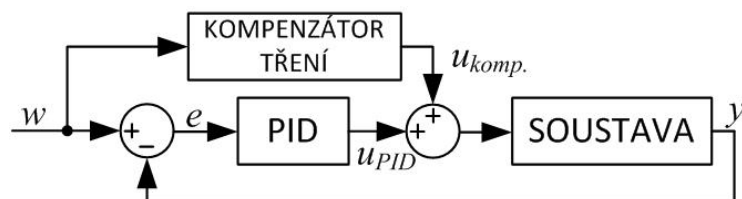
Zde však nastává situace, kdy je regulační odchylka v podstatě rovna šumu senzoru – šum modulovaný v okolí nuly. Tento šum lze odstranit použitím pásma necitlivosti v okolí ustálené regulační odchylky.



Obr. 6: Schematické znázornění zpětné kompenzace počítané z regulační odchylky

2.4.2 Dopředná kompenzace (Feedforward)

Pro výpočet akčního zásahu kompenzátoru není nutné měřit jakékoli veličiny. Tento typ kompenzátoru používá jako vstupní data žádanou hodnotu (Obr. 7). Tím v podstatě dopředu vypočítá hodnotu v dalším kroku. Odpadají tak problémy spojené se zpětnou kompenzací: zpoždění výpočtu a šum signálu (za předpokladu, že žádaná veličina není také měřená). Nevýhodou však je, že při nesprávném nastavení regulátoru kompenzátor počítá jiné hodnoty, než by měl. To je logickým důsledkem jeho vyloučení ze zpětné vazby. Může tak snáze dojít až k havarijnímu stavu soustavy.



Obr. 7: Schematické znázornění dopředné kompenzace

2.5 Optimalizace parametrů modelů

Určení parametrů modelů je dalším ze stěžejních úkolů této práce. Jak je uvedeno v mnoha zdrojích, např. [1] a [14], není většinou možné určit parametry modelů s vysokou přesností pouze měřením. Je to dáno jak nepřesností měření, tak především zjednodušenými modely. Je tedy vždy nutné parametry získané měřením optimalizovat pro zvolenou soustavu a model.

V této práci je po vzoru výše zmíněných zdrojů použit k optimalizaci parametrů nástroj Parameter Estimation Tool, který je součástí programu Matlab/Simulink. Nástroj využívá model soustavy vytvořený v Simulinku a pomocí hodnotící funkce srovnává jeho výstup s daty naměřenými na reálném zařízení v závislosti na shodném vstupním signálu. Na základě hodnotící funkce se pak pomocí různých metod snaží upravit parametry modelu tak, aby shoda s naměřenými daty byla co možná nejvyšší.

Jelikož je problematika optimalizace parametrů dosti obsáhlá, není zde prostor pro popis všech nastavení a metod. Pro pochopení dané problematiky v prostředí Matlab lze v tomto bodě doporučit dostupnou literaturu [10] a [11].

2.6 Hodnotící funkce

Jedním z hlavních kritérií vlivu kompenzátoru v regulačním obvodu je kvalita regulace. V této práci jsou k jejímu hodnocení použito pět metod, a to ISE (integral squared error), MSE (mean square error), ITAE (integral of time-weighted absolute error) MAE (mean absolute error) a funkce *Modprec* (model precision).

Metoda MSE je velmi dobře známá [12]. Počítá průměr z kvadratických odchylek mezi žádanou a skutečnou veličinou (případně mezi skutečnými a simulovanými daty). Výhodou této metody je, že dává díky kvadrátu větší váhu větší chybě mezi žádanou a skutečnou veličinou. Hodnota chyby se vypočítá pomocí rovnice:

$$ISE = \sum_{i=1}^n (\text{žádaná}_i - \text{skutečná}_i)^2; \quad MSE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\text{žádaná}_i - \text{skutečná}_i)^2 \quad (2.9)$$

kde n je počet dat, pro které je chyba počítána.

Metoda MAE oproti tomu podává větší přehled o průměrné chybě mezi žádanou a skutečnou hodnotou. Jak vyplývá z názvu, jedná o průměr absolutních chyb mezi daty. Vyjádřit lze pomocí:

$$ITAE = \sum_{i=1}^n |\dot{z}ádaná_i - skutečná_i|; MAE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |\dot{z}ádaná_i - skutečná_i| \quad (2.10)$$

2.6.1 Funkce Modprec

Funkce *Modprec* je vytvořena přímo pro tuto diplomovou práci. Návrátová hodnota je procentuální shoda mezi žádanou a skutečnou (měřenou a simulovanou) veličinou. Algoritmus je vytvořen ve skriptovacím jazyku Matlab, je však snadno přenositelný i do jiných syntaxí.

Funkce na začátku ověří korektnost dat (např. totožnou velikost srovnávaných datových vektorů). Je-li nalezen problém, je uživatel upozorněn chybovou hláškou. Jinak algoritmus pokračuje k samotnému výpočtu, který lze vidět na Ukázka kódu 1.

Nejdříve se všechna data znormují k nevyšší hodnotě žádané (měřené) veličiny v absolutní hodnotě. Důvodem je snadnější výpočet samotné přesnosti v následujících krocích – není nutné normovat v každém kroku výpočtu. Procentuální shoda se pak spočítá jako poměr žádané ku skutečné. Při výpočtu může nastat několik situací, při kterých by byl výsledek ovlivněn limitními stavy.

Jelikož se jedná o podíl, je nutné ošetřit dělení nulou, což by vedlo k výsledku, který by se limitně blížil nekonečnu.

Pokud je rozdíl mezi žádanou a skutečnou menší než zvolená mez (v tomto případě 1%), považují se data za 100% shodná.

Pokud je výsledek větší než jedna, znamenalo by to shodu větší než 100%, což je v praxi nereálné. Proto je do výpočtu zahrnuta také podmínka pro tento případ. Řešením je potom doplněk do jedničky výsledku sníženého o 1 (v podstatě 100%). Pak je vše v pořádku a procentuální shoda odpovídá. Pokud by se stalo, že shoda dat bude menší než 0%, tato podmínka zajistí výsledek se zápornou hodnotou. To znamená, že se model od skutečné soustavy velmi odlišuje.

Tato metoda je nejvhodnější pro hodnocení kvality modelů. Při řešení identifikace a optimalizace modelů v další kapitole je jasně demonstrováno, že při jejím použití je oproti jiným hodnotícím funkcím na první pohled zřejmé, jaké přesnosti model dosahuje.

```

% Normovani k maximalni skutečne (merene) hodnotě
model = abs(model./max(skutečna));
skutečna = abs(skutečna./max(skutečna));
% Vypocet presnosti pro kazdy bod mereni
for i = 1:1:rm
    if skutečna(i,1) < 1e-2
        if (model(i,1) - skutečna(i,1)) < 1e-2
            dif(i,1) = 1;
        else
            dif(i,1) = model(i,1)/1e3;
        end
    else
        dif(i,1) = model(i,1)/skutečna(i,1);
    end
    if dif(i,1) > 1
        dif(i,1) = 1 - (dif(i,1) - 1);
    end
end
presnostModelu = (sum(dif)/length(dif))*100;

```

Ukázka kódu 1: Hlavní část funkce modprec

V předchozí ukázce kódu je *rm* počet dat, pro která se odchylka počítá; *dif* je proměnná do které se ukládají odchylky mezi měřenou hodnotou a hodnotou získanou z modelu a proměnná *presnostModelu* představuje výslednou procentuální shodu mezi měřenými a simulovanými daty.

3 Měřicí zařízení

V této krátké kapitole je stručný popis HW a SW, který byl použit během experimentů. Obsahuje také informace o nastavení, které jsou společné pro všechny experimenty.

3.1 HW rozhraní

Všechna měření byla provedena pomocí měřicí karty MF624. Tato karta může zpracovávat digitální i analogové signály s teoretickou vzorkovací frekvencí do 100kHz – počítáno z doby převodu A/D převodníků. Bezpečnější je používat kartu na nižších frekvencích. Hlavní nevýhodou této měřicí karty je neschopnost programově obsluhovat registry. Tím pádem není možné detekovat ani určovat jejich časování, což má v této práci dva zásadní důsledky.

Zprvce nelze synchronizovat frekvenční výstup s dobou vzorkování. To vede k tomu, že na soustavách komutátorových stejnosměrných motorů napájených pulzním měničem nelze efektivně měřit proud. Více k této problematice např. v literatuře [6].

Druhý důsledek souvisí s měřením rychlosti motoru pomocí enkodéru. Při prostudování přístupů z [7] totiž zjistíme, že pro určení rychlosti jsou potřebné dvě veličiny (např. počet pulzů vysokofrekvenčního generátoru, které jsou vygenerované mezi pulzy enkodéru), které právě díky absenci obsluhy registrů není možné z této karty získat. Více informací o samotné kartě lze najít na stránkách výrobce: www.humusoft.cz.

Jako rozhraní mezi měřenými zařízeními a měřicí kartou je použit čtyřkvadrátový pulzní měnič (tzv. H-můstek). Jedná se o neefektivnější řešení z hlediska číslicového řízení (viz [6]). Tento měnič je součástí obvodu DPS, který je uzpůsoben pro kartu MF624 a je vyvinut v mechatronické laboratoři (<http://mechlab.fme.vutbr.cz/>). Pro obě soustavy je použit specializovaný integrovaný obvod LMD 18200 od fy Texas Instruments určený právě pro řízení stejnosměrných motorů. Tento obvod může pracovat s napětím od 12 do 55V a stálým proudem 3A (špičkově až 6A). Další parametry a schéma obvodu lze najít na stránkách výrobce (www.ti.com).

Vstupní parametry pro tento obvod jsou: směr otáčení motoru, frekvence PWM, střída a příznak k zabrzdění (nejedná se o fyzické brzdění, ale pouze o interní odpojení výstupního napětí). Výstupy pak jsou: signál PWM, proud a příznak přehřátí obvodu.

Z důvodu zlepšení vlastností měření proudu (LMD modul má problém měřit proud na malých indukčních zátěžích) je obvod doplněn o čidlo proudu LEM LTS 6-NP, které dokáže měřit proud do $\pm 6A$ s výstupním napětím 0-5V a nulovým bodem v 2.5V (více informací na stránkách výrobce: www.lem.com).

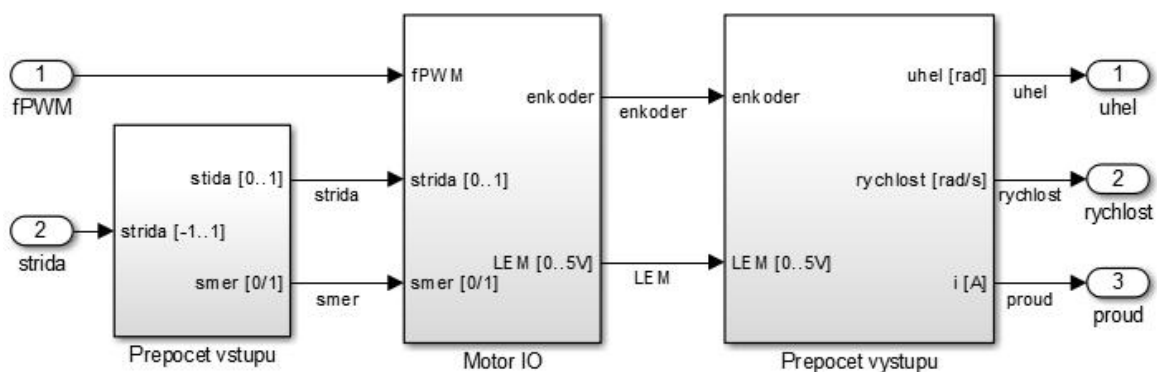
K měřicí kartě jsou dále připojeny buď optický inkrementální enkodér pro stejnosměrný motor, nebo potenciometr pro škrťací klapku jakožto čidla polohy (viz dále).

3.2 SW rozhraní

Pro všechna měření a simulace je použit nástroj Matlab Simulink R2013b. Důvodem je přehledná a efektivní tvorba měřících algoritmů a kompatibilita s použitým HW. Měření probíhala pomocí Real-Time Windows Target (RTWT) toolboxu v externím módu, tedy v módu, kdy měřící algoritmus běží na úrovni jádra operačního systému. Důvodem je vyšší vzorkovací frekvence a lepší spolehlivost načítání dat (více např. v [14]). Není-li uvedeno jinak, jsou všechna měření vzorkována s frekvencí 20kHz.

Použitá verze Matlabu byla 32 bitová, což je z hlediska dostupné paměti pro měření velmi omezující. Matlab je při delších měřeních značně paměťově nestabilní. Při zaplnění interní paměti není jiná možnost jak jí uvolnit, než Matlab zcela restartovat. Důvodem je zjevně Java, na které je Matlab postaven. Díky tomu se měření stalo významně časově náročným a nebylo možné vytvořit bezobslužné měřící skripty.

Oba měřící modely v Simulinku mají shodnou strukturu. Nejdříve se přepočítá vstupní signál, tedy střída, na příznak směru a absolutní hodnotu v subsystému *Prepocet vstupu*. Poté se hodnoty společně s frekvencí PWM zapíší na výstup měřící karty a načtou se nové hodnoty ze senzorů v subsystému *Motor IO*. Nakonec se načtené hodnoty přepočítají na fyzikální jednotky v subsystému *Prepocet vstupu*.



Obr. 8: Model měření stejnosměrného motoru

Přepočet výstupů je z části rozdílný dle měřené soustavy. Přepočet napětí LEM čidla na proud je u obou soustav shodné. Výpočet vychází z rovnice uvedené v dokumentaci [13].

Přepočet pulzů enkodéru na polohu je proveden dle rovnice:

$$poloha = \frac{1}{k_E} \cdot \frac{1}{k_P} \cdot 2 \cdot \pi \quad [rad] \quad (3.1)$$

kde k_E je konstanta enkodéru (počet pulzů na jednu otáčku) a k_P je konstanta převodovky (převodový koeficient).

Pro určení polohy klapky je použita míra otevření v procentech. Tento přístup je z hlediska představitivosti nejintuitivnější. Klapka má operační úhel <0-86°. Tento úhel

je měřen dvěma potenciometry, které jsou zapojeny inverzně (při otevírání klapky jeden zvyšuje svůj odpor a druhý snižuje). Pro výpočet míry otevření jsou použity rovnice:

$$\begin{aligned} \text{otevření}_1 &= \frac{p_{1,M} - p_{1,\max}}{p_{1,\text{delta}}} \\ \text{otevření}_2 &= \frac{p_{2,M} - p_{2,\min}}{p_{2,\text{delta}}} \end{aligned} \quad (3.2)$$

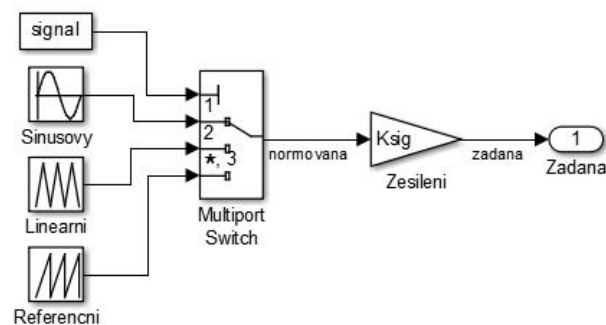
kde $p_{1,M}$ je změřená hodnota potenciometru 1; $p_{1,\max}$ je maximální hodnota potenciometru 1 a $p_{1,\text{delta}}$ je rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou potenciometru 1. Obdobně je tomu u potenciometru 2. Výpočet v podstatě normuje rozsah potenciometrů k jedničce. Výsledkem je tedy míra otevření klapky v rozsahu $\langle 0-1 \rangle$.

3.3 Budící signály

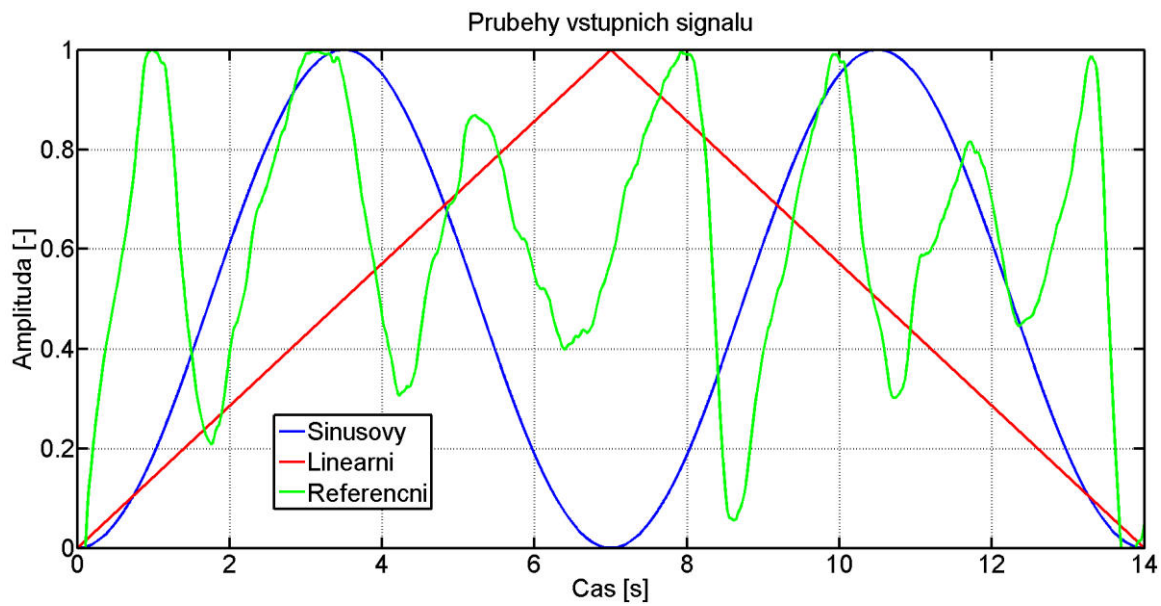
Dle zadání mají být zvolené soustavy testování pro několik typů vstupních, či budících signálů. Jelikož hlavním cílem práce je aplikovat kompenzátor tření na soustavě s vratnou pružinou, byly s ohledem na to voleny i budící signály.

Jsou jimi sinusový průběh, lineární průběh a pseudo-reálný průběh, který je dále označován jako referenční. Sinusový průběh má za cíl otestovat tření v nízkých rychlostech, tedy v okolí amplitudy, kdy se rychlost mění z kladné na zápornou. Lineární průběh naopak vyšetřuje chování soustavy při rozběhu a konstantní rychlosti s prudkou změnou směru v maximu. Referenční průběh byl získán měřením za potenciometru škrticí klapky při jejím manuálním otevírání a zavírání. Tento signál je volen zejména kvůli škrticí klapce a má simulovat reálný požadavek na její otevření. Navíc díky měření je na signálu modulován šum, který má nepříznivý vliv na regulaci při aplikaci jako žádaná hodnota.

Všechny tři popsané signály byly použity jako budící, tedy jako velikost střídý při identifikaci, tak jako žádané hodnoty polohy při regulaci. Všechny signály jsou normovány k jedničce a jejich amplituda je společně upravena až na výstupu pomocí zesílení K_{sig} . Sinusový a lineární signál byl v některých případech identifikace upraven na delší periodu.



Obr. 9: Generátor žádané hodnoty



Obr. 10: Průběhy budících signálů

4 Měření a simulace stejnosměrného motoru

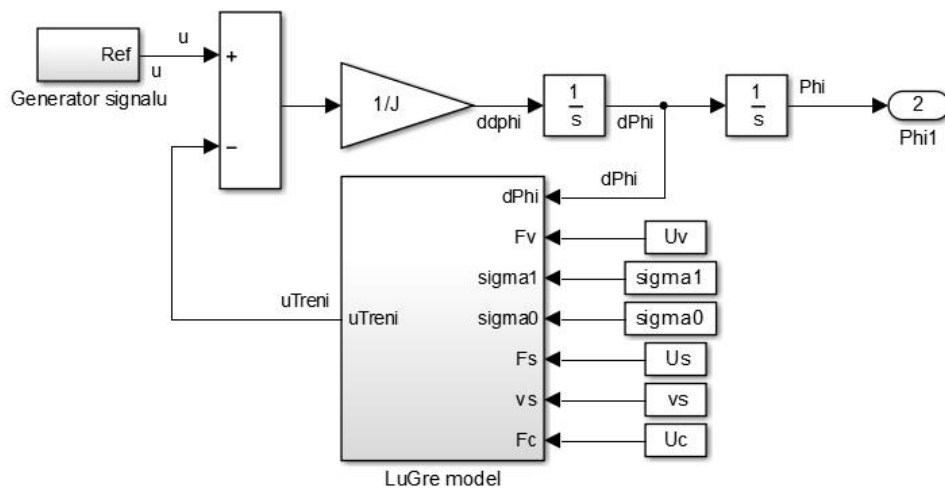
V praktické části této práce se nejdříve ověří získané znalosti na jednoduché soustavě, jakou je stejnosměrný motor. V následujících kapitolách je popsán postup a nejdůležitější výsledky z měření a simulace motoru popsaného v kapitole 2.1.1.

4.1 Identifikace modelu stejnosměrného motoru

V této kapitole je řešení a výsledky druhého bodu zadání. První část popisuje použitý model a způsob identifikace parametrů vybraného stejnosměrného motoru.

4.1.1 Použitý model motoru

Vzhledem k teoretickým podkladům uvedeným v kapitole 2.1 a omezením plynoucím z kapitoly 3, je použit napěťový model motoru uvedený v rovnici (2.8). Pro tření je použita soustava rovnic LuGre modelu (2.5). Celkové schéma modelu v Simulinku je na následujícím obrázku:



Obr. 11: Model stejnosměrného motoru s třením

4.1.2 Identifikace zobecněného momentu setrvačnosti

Zobecněný moment setrvačnosti vystupující v rovnici (2.8) je v podstatě jediným parametrem reprezentujícím polohovou odezvu motoru na přivedené napájecí napětí. Je proto vhodné mít co nejpřesnější odhad tohoto parametru pro následnou optimalizaci.

Ze vztahů v [1] můžeme odvodit teoretickou rovnici:

$$J = \frac{J_{Red} \cdot R_a}{k_{emf} \cdot i_{12} \cdot \eta_{12}} \quad (4.1)$$

kde J_{Red} je moment setrvačnosti celé mechanické části redukováný na hřídel motoru, R_a je odpor vinutí motoru, k_{emf} je napěťová konstanta motoru, i_{12} je celkový

převodový poměr soustavy a η_{12} je celková účinnost převodů. Ze všech těchto parametrů známe pouze převodový poměr a účinnosti převodovky. Je tedy nutné identifikovat další parametry.

Moment setrvačnosti motoru lze změřit několika způsoby. Většina z nich vyžaduje mnoho informací o rotoru (jako je velikost, materiály atd.), nebo jsou tyto metody pro motor deformační (je potřebné rotor vyjmout a měřit jeho moment setrvačnosti pomocí redukce momentu setrvačnosti). Pro nedestrukční a informačně méně náročnou metodu stačí změřit pouze přechodovou elektro-mechanickou charakteristiku.

Tato charakteristika se měří tak, že se na vstup motoru přivedeme skokové napětí a motor se nechá ustálit na konstantních otáčkách. Výsledná charakteristika lze aproximovat soustavou setrvačného členu 1. řádu. Poté z přechodové charakteristiky můžeme odečíst elektro-mechanickou časovou konstantu τ_m , která je rovna 63% ustálené hodnoty. Moment setrvačnosti se vypočítá upravením rovnice (2.1) b):

$$\tau_m = \frac{J_{\text{Red}} \cdot R_a}{k_{emf}^2} \Rightarrow J_{\text{Red}} = \frac{\tau_m \cdot k_{emf}^2}{R_a} = \frac{82 \cdot 10^{-3} \cdot 1,83^2}{6,3} = \underline{\underline{43,58 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^2}} \quad (4.2)$$

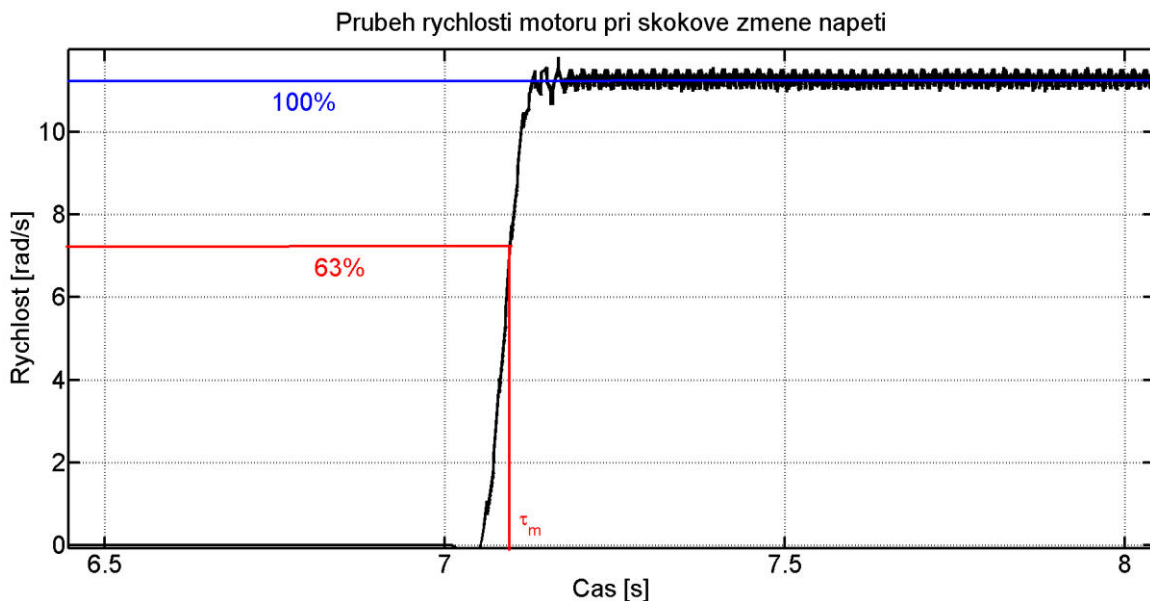
K jejímu vyřešení potřebujeme změřit konstantu τ_m , odpor vinutí a napěťovou konstantu motoru. Konstanta τ_m byla získána z přechodové charakteristiky na Obr. 12. Je důležité podotknout, že průběh rychlosti byl získán derivací polohy a následnou filtrací dolní propustí s mezní frekvencí 10Hz. Odpor vinutí byl změřen RLC metrem a jeho hodnota je $R_a = 6,3\Omega$.

Napěťovou konstantu motoru lze opět určit z napěťové rovnice motoru. Pokud je motor v ustáleném stavu (nedochází ke změně proudu ani otáček motoru), lze napěťovou rovnici (2.1) a) upravit do podoby (4.3). Pro výpočet konstanty pak stačí pouze změřit napětí U , proud I a otáčky motoru ω . Otáčky motoru byly použity z Obr. 12 jako hodnota 100%. Postup výpočtu s výsledkem je:

$$k_{emf} = \frac{U - R_a \cdot I}{\omega} = \frac{23,61 - 6,3 \cdot 0,45}{11,3} = \underline{\underline{1,83 \text{ Vs/rad}}} \quad (4.3)$$

Dosazením do rovnice (4.1) pak získáme hodnotu zobecněného momentu setrvačnosti:

$$J = \frac{J_{\text{Red}} \cdot R_a}{k_{emf} \cdot i_{12} \cdot \eta_{12}} = \frac{43,58 \cdot 10^{-3} \cdot 6,3}{1,83 \cdot 39 \cdot 0,62} = \underline{\underline{6,2 \cdot 10^{-3}}}$$

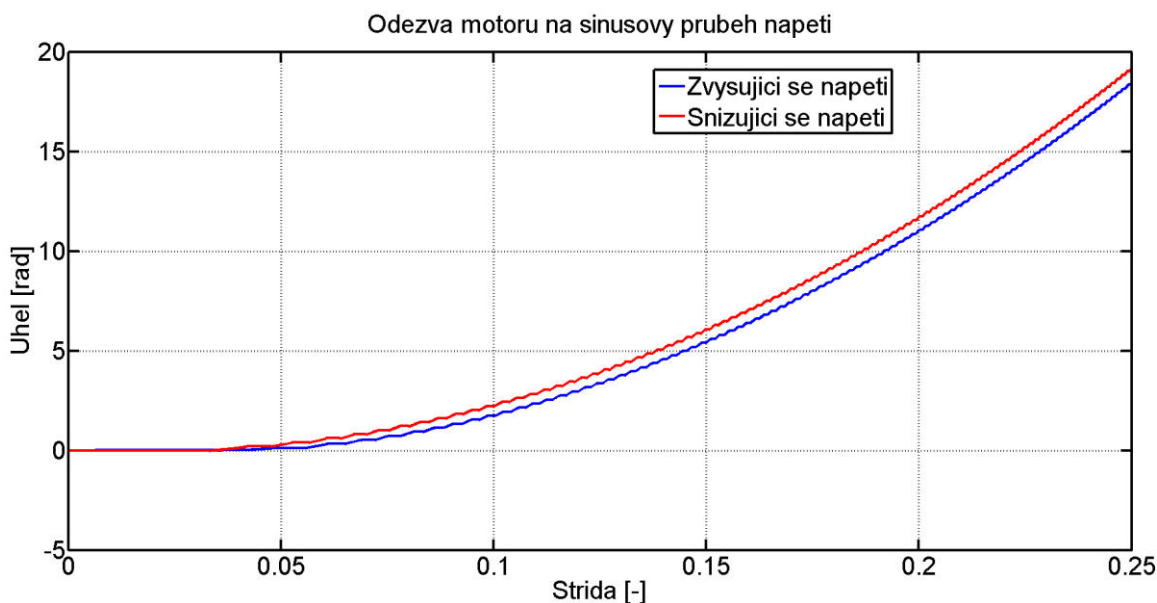


Obr. 12: Odezva motoru na skokovou změnu napětí

4.1.3 Identifikace modelu tření

Pro model tření je nutné identifikovat 6 parametrů. Statické parametry lze získat např. pomocí postupu popsáno v [9]. Ten však vyžaduje přesné měření rychlosti, neboť je založen na identifikaci statického modelu z charakteristiky zobrazené na Obr. 4. To v našem případě nelze s větší přesností realizovat.

Uvážíme-li, že statické parametry se projevují především v okolí nulové rychlosti, tak pokud se budeme pokoušet motorem pomalu otáčet, měli bychom získat alespoň jejich hrubé odhady. Pro pomalé vybudování motoru byl použit sinusový signál napětí motoru s vysokou periodou. Odezva polohy motoru je na Obr. 13



Obr. 13: Natočení motoru při sinusové změně napětí

Z této odezvy můžeme odhadnout velikost střídy v bodě zvratu, což je bod kdy se dá motor do pohybu při zvyšujícím se napětí a velikost střídy pro Coulombovo tření, což je bod kdy se úhel přiblíží nule při snižujícím se napětí motoru. Z výše uvedeného průběhu pak lze vyčíst tyto hodnoty: $F_S = 0,04$; $F_C = 0,03$.

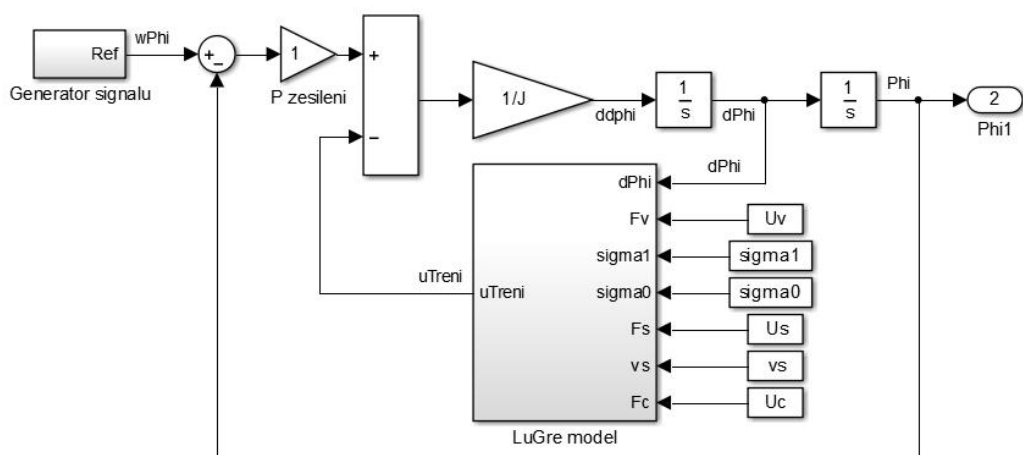
Další parametry tření se nepodařilo experimentálně určit. Jejich počáteční odhad pro optimalizaci je čistě empirický. Všechny parametry použité pro počáteční odhad jsou uvedeny v Tab. 2

4.2 Optimalizace modelu stejnosměrného motoru

V literatuře [1] je uvedeno, že při řešení optimalizace se autoři setkali s velmi výrazným vlivem vstupních dat. Při identifikaci napěťového modelu měření dat otevřené smyčky (v jejich případě klapka pouze reaguje na změnu vstupního napětí a je snímáno její otevření) nebylo možné dosáhnout parametrů modelu, které by dostatečně reprezentovaly změřená data. V rámci řešení tohoto bodu byl zmíněný předpoklad potvrzen i na soustavě stejnosměrného motoru. Při použití měření dat v otevřené smyčce se nepodařilo, bez ohledu na typ a parametry vstupního signálu, optimalizovat model tak, aby vykazoval shodu s referenčními změřenými daty. Autoři článku [1] v tomto případě doporučují použít data z měření v uzavřené regulační smyčce s jednoduchým P regulátorem a malým zesílením. Jako vstupní data do modelu je tedy přivedena hodnota žádaného otevření, v našem případě natočení, a regulátor se snaží soustavu regulovat na tuto hodnotu.

Tento přístup je v souvislosti s použitým modelem velmi intuitivní. Do hlavního součtového členu pak v podstatě vstupuje akční zásah regulátoru a adekvátní akční zásah modelu tření. Tak v případě úspěšné optimalizace získáme přímo model tření odpovídající strategii kompenzace popsané v kapitole 2.4.

Model pro optimalizaci vypadá následovně:



Obr. 14: Model motoru určený pro optimalizaci parametrů

Hodnotící funkce během optimalizace srovnává úhel natočení vystupující z modelu s úhlem natočení změřeným na motoru. Během optimalizace byly vyzkoušeny různé typy řešičů a hodnot počátečních odhadů parametrů, které nebylo možné změřit. Nakonec byl jako neoptimálnější vyhodnocen výsledek nelineární metody nejmenších čtverců s počátečními odhady uvedenými v Tab. 2. Hodnotící kritéria pro výběr nejlepšího modelu byla dvě

- 1) Hodnota Cost Function (SSE) [15] na konci optimalizace
- 2) Adekvátnost optimalizovaných parametrů

Například při záporných hodnotách některých parametrů byl výsledek optimalizace vyhodnocen jako chybný, neboť takovéto parametry nemají fyzikální opodstatnění.

Parametr	J	F_S	F_C	v_s	F_V	σ_0	σ_1
Počáteční odhad	6,20E-03	4,00E-02	3,00E-02	1,00E-03	1,00E-02	1,00E+02	2,00E+00
Výsledek optimalizace	1,03E-03	1,22E-01	2,24E-02	5,16E-03	1,38E-01	1,09E+01	1,20E-01

Tab. 2: Počáteční odhad a výsledek optimalizace parametrů modelu stejnosměrného motoru

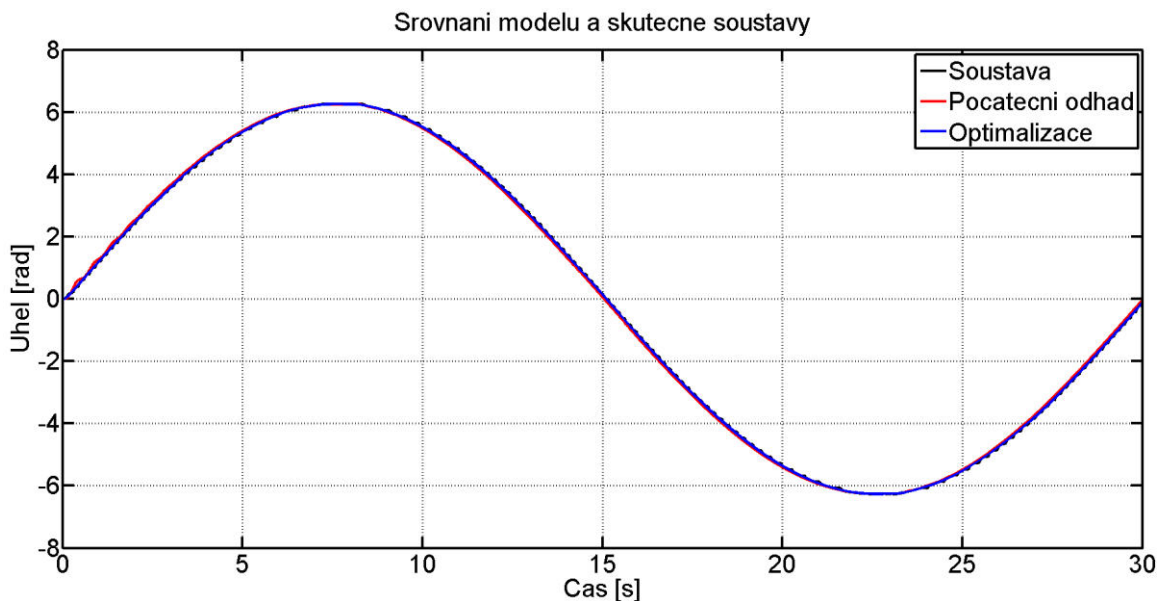
Model stejnosměrného motoru s LuGre modelem tření je v některých případech velmi numericky nestabilní. Zejména se to týká dynamických parametrů při rychlých dějích, jaké simuluje referenční průběh.

4.3 Validace modelu stejnosměrného motoru

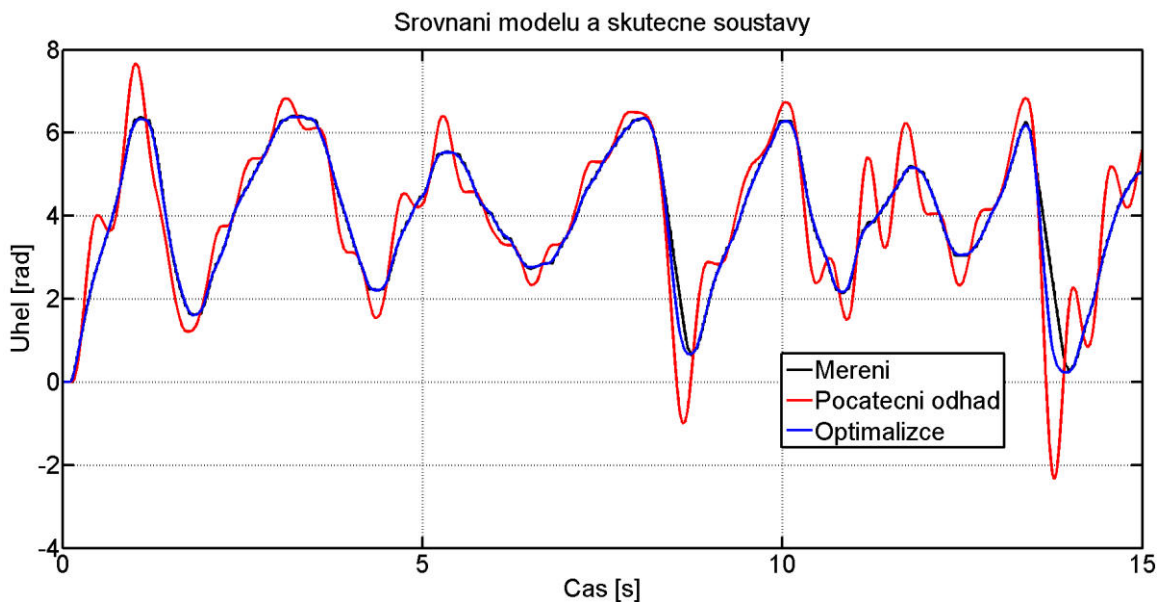
Parametry modelu vybrané po všech optimalizacích jako nejvhodnější byly následně validovány pro všechny typy signálů. Validace probíhala srovnáním výstupu modelu s adekvátními daty z měření a výpočtem hodnotících funkcí z kapitoly 2.6. Výsledky validace jsou uvedeny v Tab. 3. Dále jsou vykresleny příklady srovnání výstupu modelu s naměřenými daty pro validované parametry.

Pro sinusový průběh žádané veličiny je shoda dat velmi dobrá v porovnání s referenčním průběhem, který má mnohem vyšší dynamiku. Při simulaci parametrů počátečního odhadu lze vidět, že právě dynamika působí modelu s nepřesnými parametry největší obtíže a jeho výstup se při prudkých změnách rozkmitá.

I když kvantitativní zhodnocení modelu není přesvědčivé, na zvolené soustavě se nepodařilo optimalizací získat přesnější model.



Obr. 15: Srovnání simulací modelu motoru s různými parametry pro sinusový průběh žádaného úhlu



Obr. 16: Srovnání simulací modelu motoru s různými parametry pro referenční průběh žádaného úhlu

Signál	Parametry	ISE	MSE	ITAE	MAE	Modprec
		[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
Sinusový	Počáteční odhad	1,202E+07	40,077	1,517E+06	5,057	39,630
	Optimalizaci	1,195E+05	0,398	1,510E+04	0,050	80,301
Lineární	Počáteční odhad	1,944E+06	0,480	6,275E+05	2,092	19,213
	Optimalizaci	1,923E+04	0,064	6,230E+03	0,021	50,953
Referenční	Počáteční odhad	8,100E+05	0,400	2,830E+05	1,887	37,424
	Optimalizaci	6,786E+03	0,045	2,584E+03	0,017	72,765

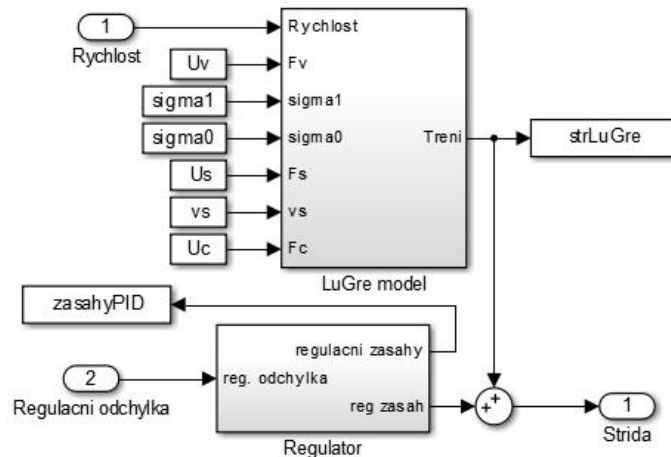
Tab. 3: Validace modelu stejnosměrného motoru – srovnání výsledků pro různé signály

4.4 Regulace stejnosměrného motoru

Regulace motoru byla provedena dle strategie popsané v kapitole 2.3. Srovnány jsou tři typy regulátorů: bez kompenzátoru, s dopředným kompenzátorem tření (dále označován jen jako kompenzátor FF) a zpětným kompenzátorem tření založeným na skutečné hodnotě (dále označován jako kompenzátor FB – skutečná).

Jako parametry kompenzátoru byly použity hodnoty získané z optimalizace.

Schéma regulátoru s kompenzátorem je znázorněno na Obr. 17.

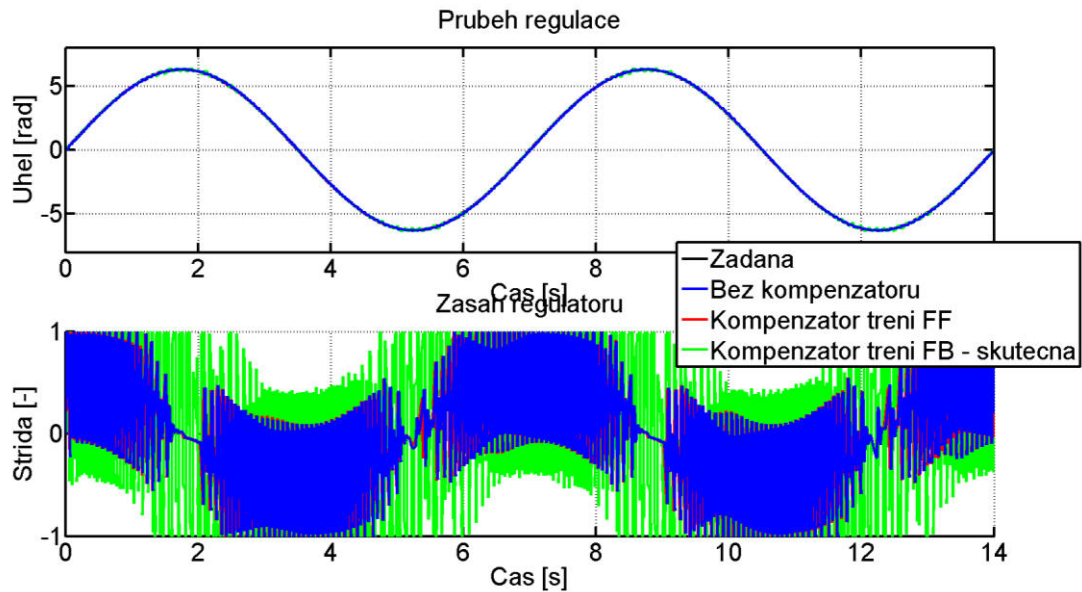


Obr. 17: Schéma regulátoru s kompenzátorem Coulombova tření

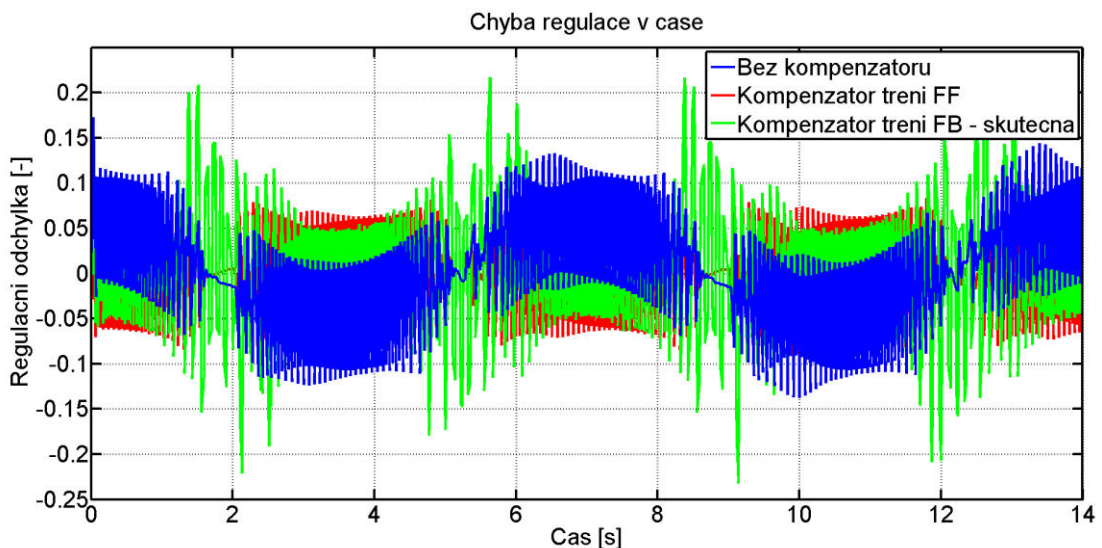
4.4.1 Sinusový průběh žádaného natočení

Jako první byla vyšetřována regulace při sinusovém průběhu žádané veličiny. Jak ze změřených průběhů, tak z tabulky hodnotících funkcí lze vyčíst, že nejlepší vliv na regulaci měl FF kompenzátor. Nejhorší výsledky má naopak regulátor se zpětným kompenzátorem počítaným ze skutečné hodnoty. Důvod je prostý. Díky zpětné vazbě se na vstup kompenzátoru moduluje šum, který má nepříznivý vliv na jeho vlastnosti. To dokládá i průběh akčního zásahu regulátoru, který má větší amplitudu než u ostatních typů regulátoru. Je to způsobeno právě tím, že se regulátor snaží uregulovat zašuměný výstup kompenzátoru.

Z Tab. 4 lze vyčíst, že tření v soustavě není u takového signálu příliš významné. Regulátor bez kompenzačního členu vykazuje velmi dobré výsledky.



Obr. 18: Průběh regulace motoru pro různé typy kompenzátorů a sinusový průběh žádaného natočení



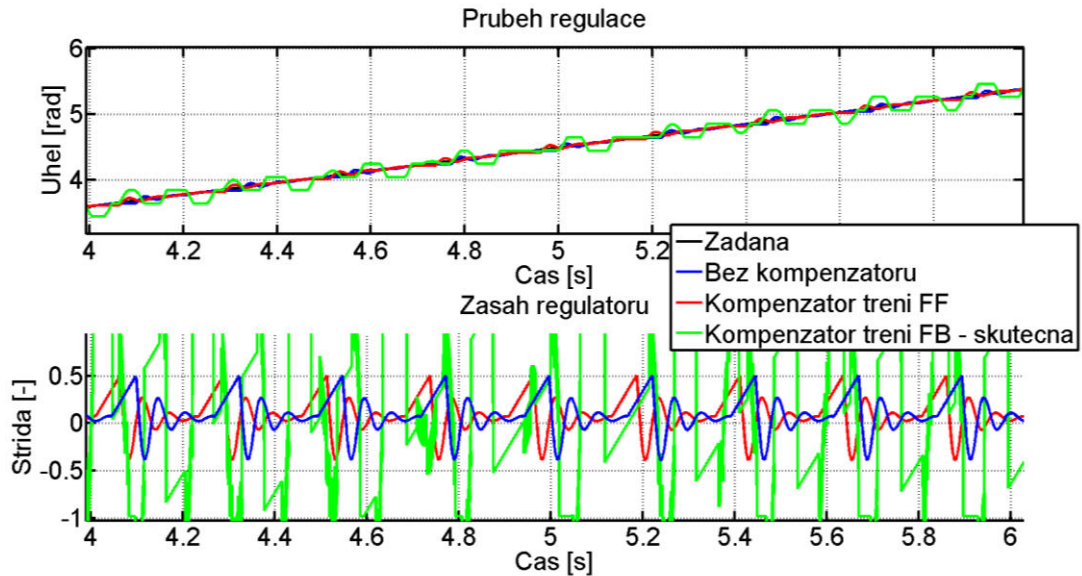
Obr. 19: Regulace motoru – regulační odchylka pro sinusový průběh žádaného natočení

Regulátor	ISE	MSE	ITAE	MAE	Modprec
	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
Bez kompenzátoru	779,036	2,782E-03	11649,618	4,161E-02	97,086
FF	373,693	1,335E-03	8311,093	2,968E-02	98,306
FB-skutečná	1266,724	4,524E-03	14610,590	5,218E-02	97,845

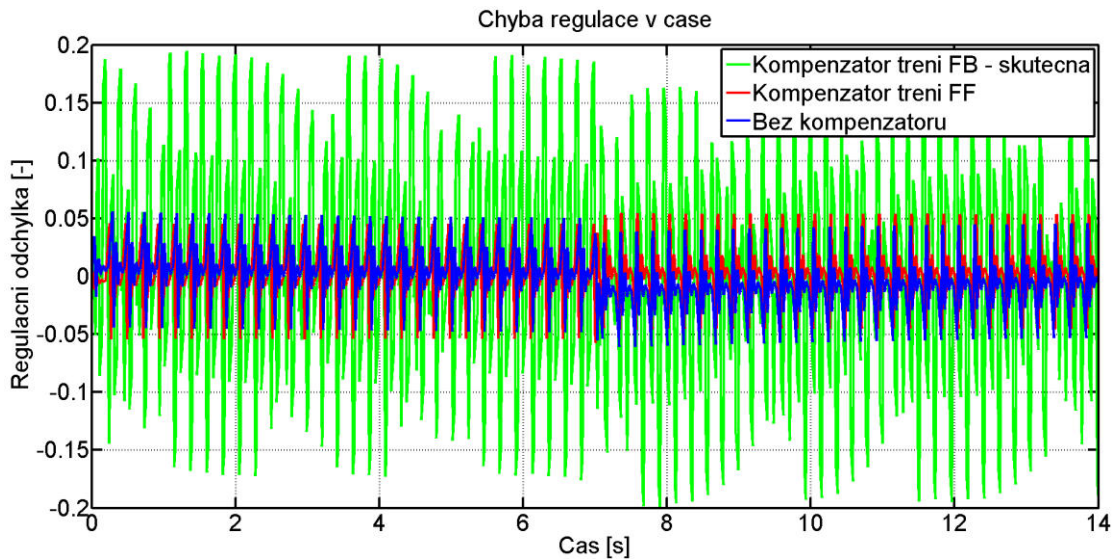
Tab. 4: Kvantitativní zhodnocení regulace stejnosměrného motoru se sinusovým průběhem

4.4.2 Lineární průběh žádaného natočení

U lineárního průběhu žádané veličiny je situace velmi podobná. Na Obr. 20 je zobrazen detail průběhu mezi 4 a 6 sekundou měření. Jak z natočení, tak ze zásahu regulátoru je patrné, že soustava při použití FB kompenzátoru neustále mírně kmitá.



Obr. 20: Průběh regulace motoru pro různé typy kompenzátorů a lineární průběh žádaného natočení



Obr. 21: Regulace motoru – regulační odchylka pro lineární průběh žádaného natočení

Jelikož se motor při takovémto průběhu pohybuje v podstatě konstantní rychlostí, není ani zde vliv kompenzátoru tření tak znatelný, což dokazují výsledky v Tab. 5. U zpětnovazebního kompenzátoru jsou dokonce výsledky hodnotících funkcí horší, než u regulace bez kompenzátoru. Výsledek je tedy shodný jako u sinusového signálu.

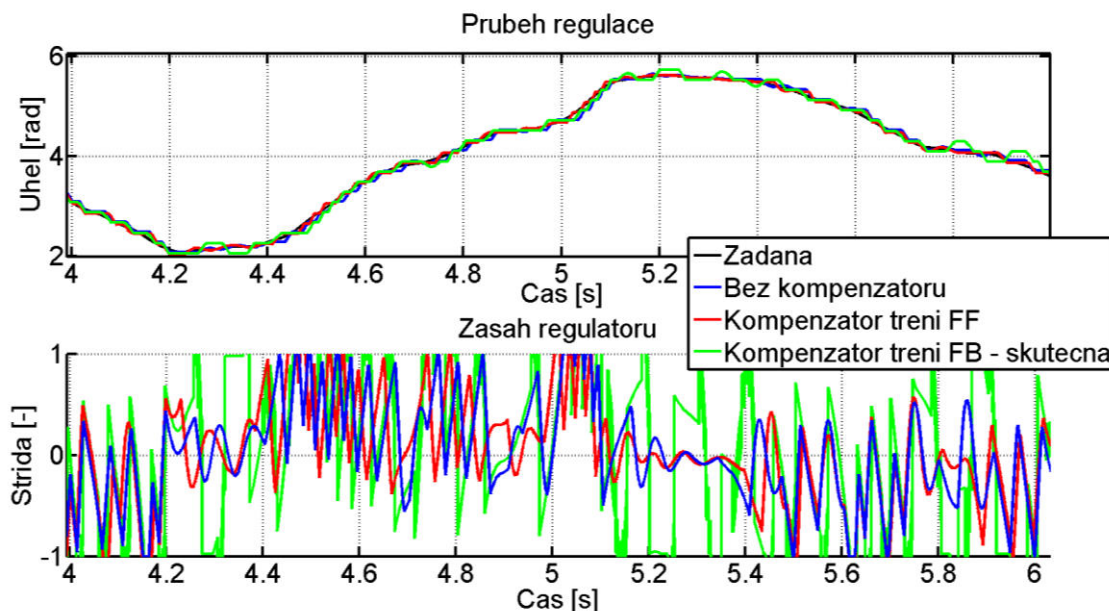
Regulátor	ISE	MSE	ITAE	MAE	Modprec
	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
Bez kompenzátoru	138,032	4,930E-04	4681,817	1,672E-02	98,856
FF	115,713	4,133E-04	4100,987	1,465E-02	98,969
FB - skutečná	2521,974	9,007E-03	22239,324	7,943E-02	94,256

Tab. 5: Kvantitativní zhodnocení regulace stejnosměrného motoru s lineárním průběhem

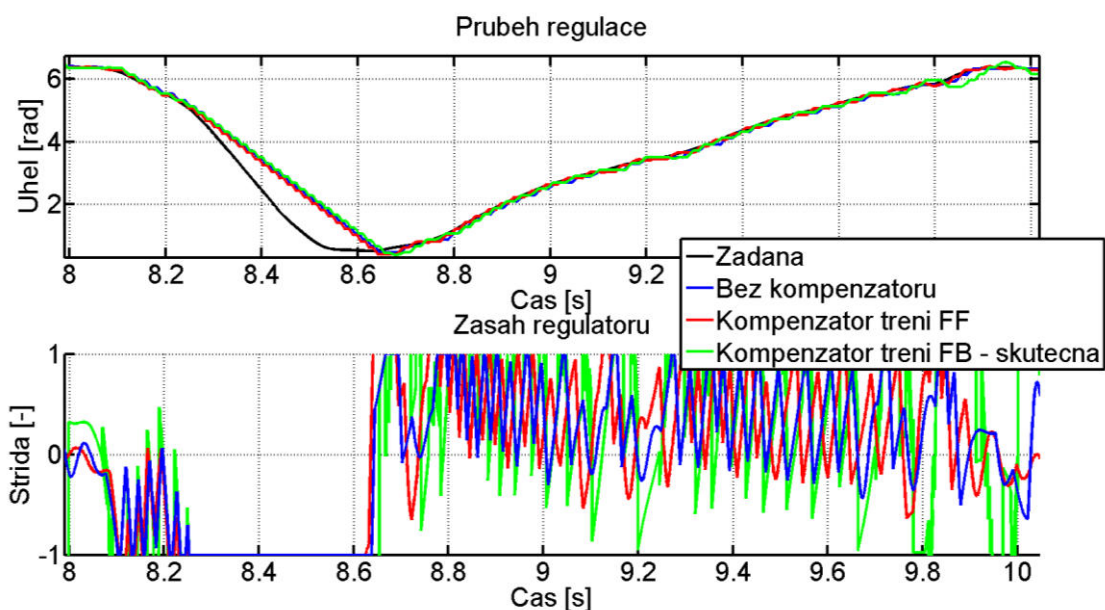
4.4.3 Referenční průběh žádaného natočení

Na regulaci při referenčním signálu žádané hodnoty lze demonstrovat, že zvolený motor má velmi pomalou dynamiku. Na Obr. 22 lze vidět, že se poloha rotoru drží v okolí žádané polohy. Pokud však má signál vyšší dynamiku, není daný motor schopný požadavek splnit. Jeho moment setrvačnosti je totiž příliš vysoký, a tak při prudkých změnách nedokáže regulátor pohnout rotorem dostatečně rychle. To dokládají zobrazené průběhy regulace a akčního zásahu na Obr. 23 a průběh regulační odchylky na Obr. 24, kde špičky v průběhu jsou právě rychlé změny žádané hodnoty (např. v rozmezí 8 až 10s).

Z hlediska hodnotících funkcí má FF kompenzátor mírně příznivý vliv na kvalitu regulace. To se vzhledem k výše zmíněnému dalo očekávat, tedy v pomalých dějích se kompenzátor příliš neprosadí a v dynamických dějích není možné motorem otočit dostatečně rychle z omezení jeho konstrukce a kompenzátor na to nemá nejmenší vliv.



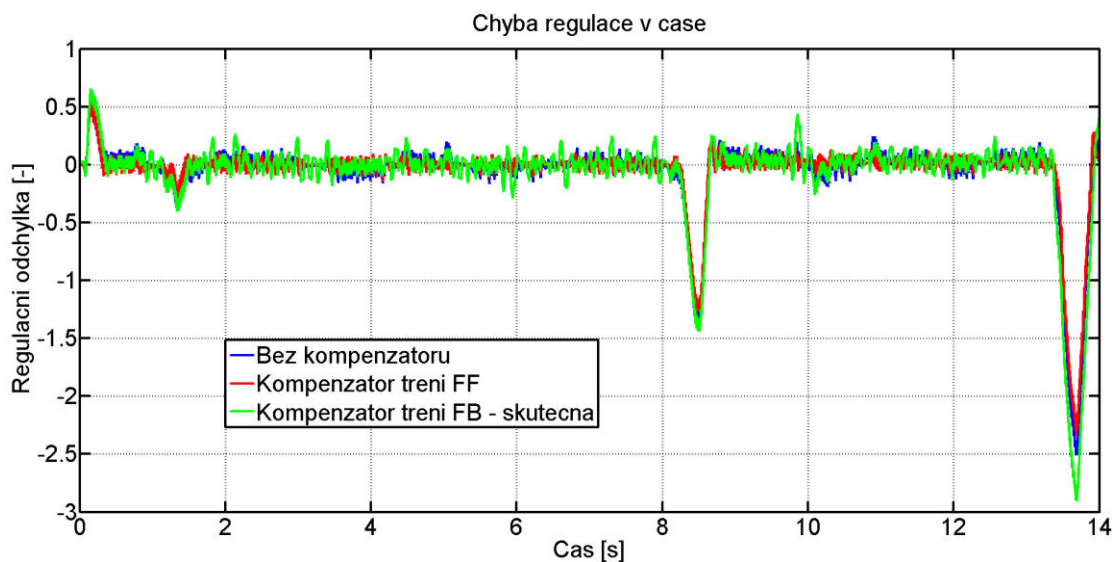
Obr. 22: Průběh regulace motoru pro různé typy kompenzátorů a referenční průběh žádaného natočení



Obr. 23: Průběh regulace motoru pro různé typy kompenzátorů a lineární průběh žádaného natočení
2

Regulátor	ISE	MSE	ITAE	MAE	Modprec
	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
Bez kompenzatoru	32911,764	1,175E-01	35077,876	1,253E-01	79,277
FF	26534,095	9,476E-02	28245,762	1,009E-01	81,745
FB - skutečná	47441,343	1,694E-01	44429,826	1,587E-01	73,335

Tab. 6: Kvantitativní zhodnocení regulace stejnosměrného motoru s referenčním průběhem



Obr. 24: Regulace motoru – regulační odchylka pro referenční průběh žádaného natočení

4.5 Vliv parametrů na kvalitu regulace

Jak je popsáno ve třetím bodě zadání, je cílem této práce také identifikovat, jaký vliv má změna parametrů kompenzačních členů na kvalitu regulace. Tento úkol se ukázal jako velmi obtížně řešitelný a to hned z několika důvodů.

Vezmeme-li v úvahu model tření popsáný rovnicí (2.5), je nutné vyšetřit vliv šesti parametrů na soustavu (stejnoseměrný motor) a regulátor. Díky tomu významně rostou časové nároky na experimenty, a to exponenciálně. Abychom pokryli opravdu celou škálu, museli bychom změřit změnu všech parametrů na sebe navzájem. Při 10 krocích změny každého parametru a při počtu šesti parametrů se dostáváme na hodnotu jednoho milionu experimentů. To je jak z hlediska časové dispozice této práce nereálné, tak by především soustava měla na konci měření díky opotřebení velmi odlišné parametry než na začátku a tím by bylo celé měření nevalidní.

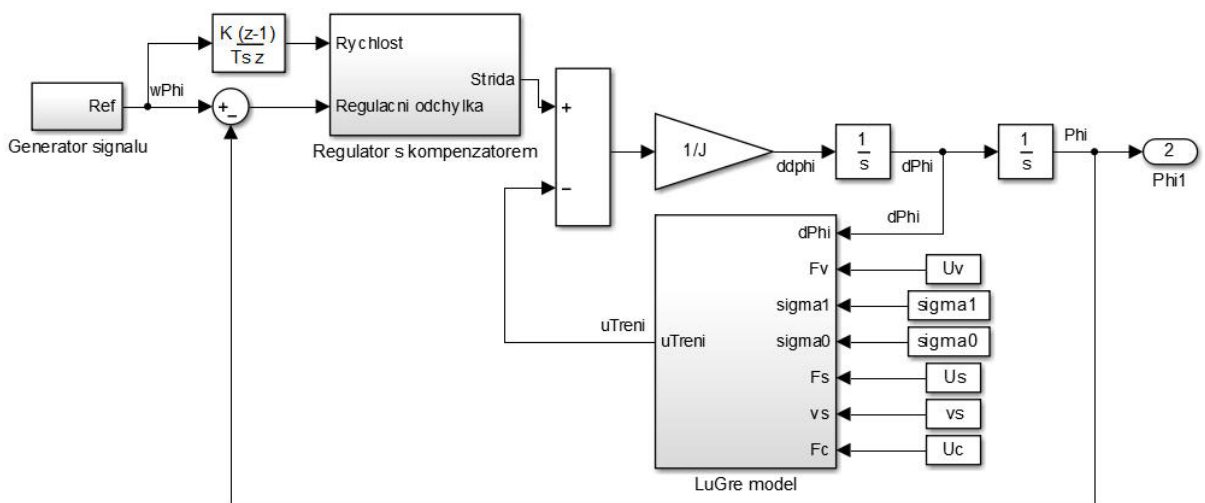
Druhý významný vliv je numerická stabilita modelu tření. Při experimentech s různými hodnotami parametrů kompenzačního členu se totiž ukázalo, že při jejich nevhodné kombinaci dochází k saturaci kompenzátoru na maximální hodnotě, nebo k neřízeným oscilacím. Dále se již nedalo mluvit o regulaci, neboť se soustava chovala naprosto nepředvídatelně. Navíc reálně hrozilo její poškození.

Proto bylo v rámci řešení tohoto úkolu přistoupeno k simulacím. Model soustavy získaný optimalizací byl považován za ideální a referenční soustavu. K tomuto modelu byl dále přidán regulátor s FF kompenzací, neboť ta se prokázala jako nejučinnější. Schéma modelu je na Obr. 25. Subsystém *Regulator s kompenzátořem* je totožný s tím na Obr. 17, pouze byly odlišeny parametry tření tak, aby je bylo možné měnit nezávisle na parametrech modelu motoru.

V ideálním případě kdy se hodnoty kompenzátoru rovnají hodnotám modelu tření, je shoda žádané a simulované polohy 100%. Po aplikaci výše popsaného přístupu, tedy simulace vlivu všech parametrů na sebe navzájem opět nastal problém se stabilitou. Výstup modelu tření často satureoval na hodnotě nekonečno.

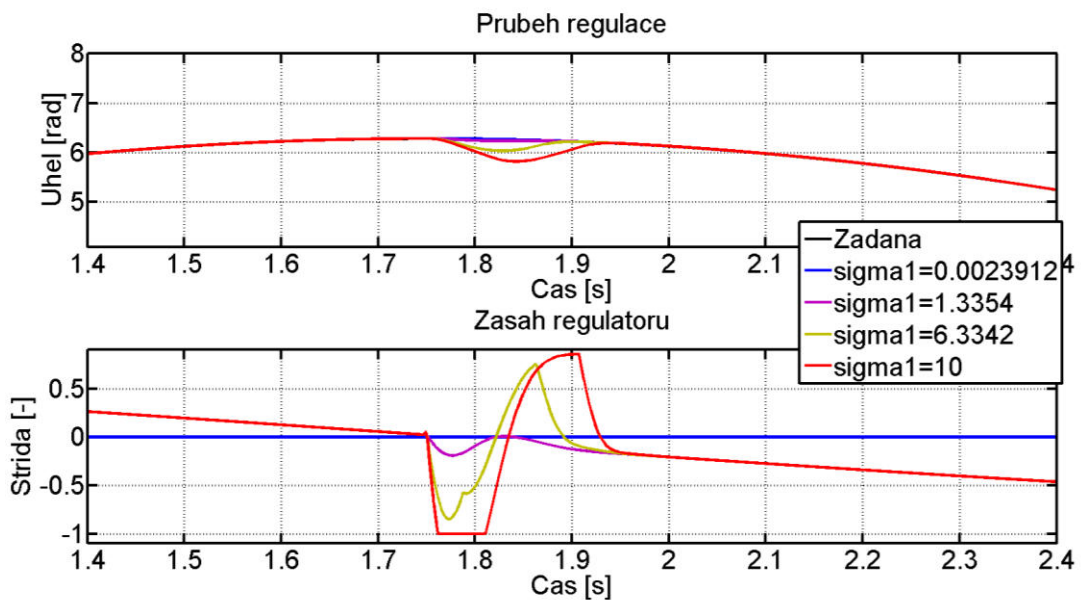
Proto bylo přistoupeno ke třetímu pokusu, a to vyšetřovat všechny parametry kompenzátoru samostatně. Tyto simulace se vyznačovaly mnohem větší stabilitou. V první fázi proběhla simulace ideálního kompenzátoru, kdy se parametry modelu tření rovnaly parametrům kompenzátoru. Následně se každý parametr kompenzátoru měnil v definovaném rozsahu, při zachování původních hodnot ostatních parametrů.

Po každé simulaci byla vyhodnocena kvalita regulace hodnotícími funkcemi, tak jako by se jednalo o reálnou soustavu. Výsledkem jsou závislosti kvality regulace na hodnotě daného parametru, tak jak jsou uvedeny na obrázcích níže.

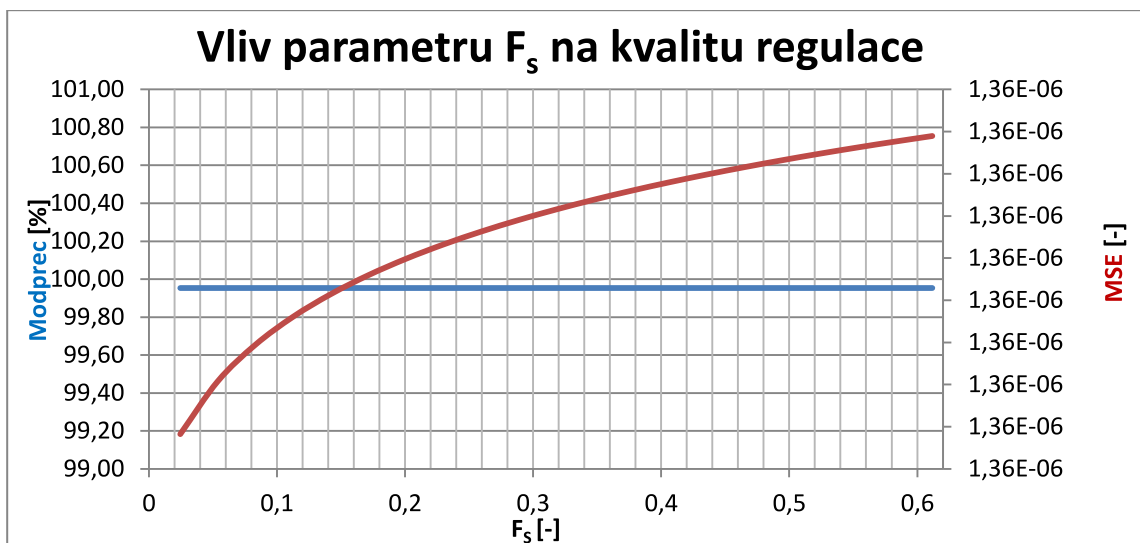


Obr. 25: Model použitý při zjišťování vlivu parametrů kompenzátoru na kvalitu regulace

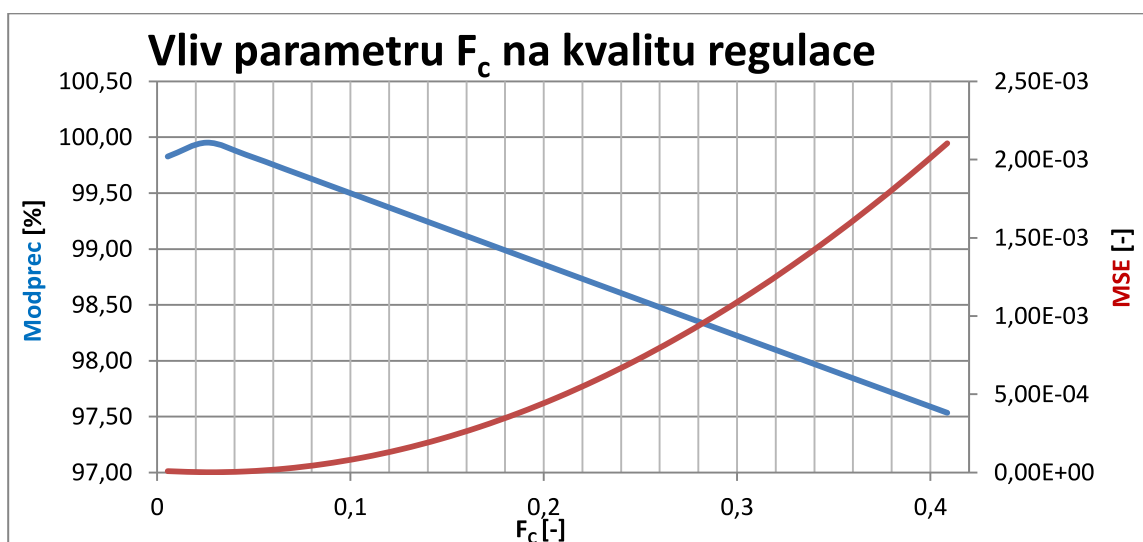
U většiny parametrů je totožný trend. Se zvyšující se hodnotou parametru se kvalita regulace snižuje. Pouze parametry F_S a v_s neprojevily významnější vliv na kvalitu regulace. Z hlediska průběhů regulace je zajímavý vliv parametru σ_1 na dynamiku kompenzátoru. Zvyšující se velikost způsobuje v okolí nulové rychlosti výrazný zásah kompenzačního členu. To koresponduje s matematickým popisem v rovnici (2.5). Průběh regulace je zobrazen na následujícím obrázku.



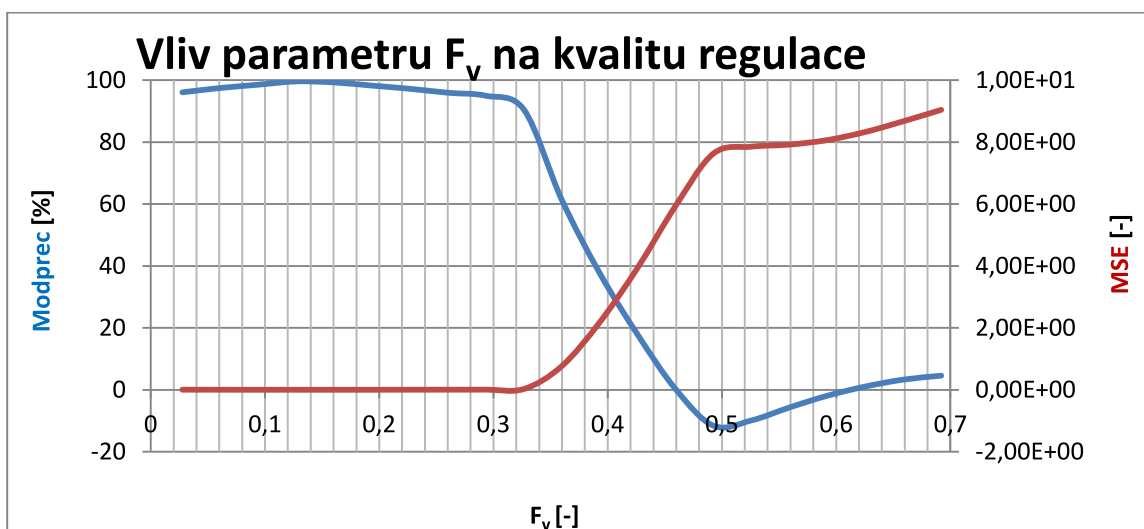
Obr. 26: Průběh regulace motoru s různou hodnotou parametru σ_1



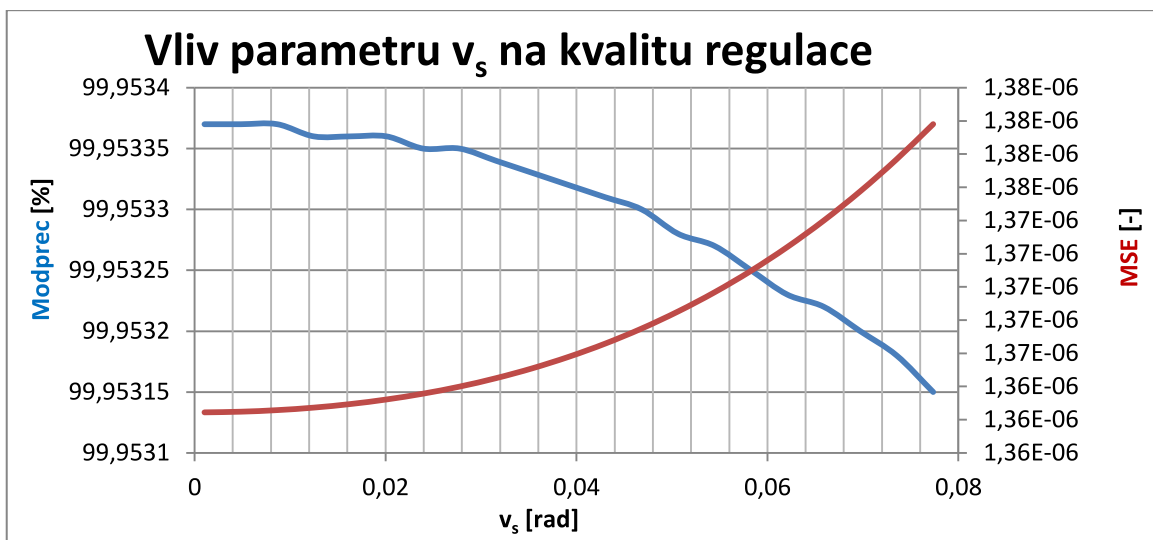
Obr. 27: Vliv parametru F_s na kvalitu regulace stejnosměrného motoru



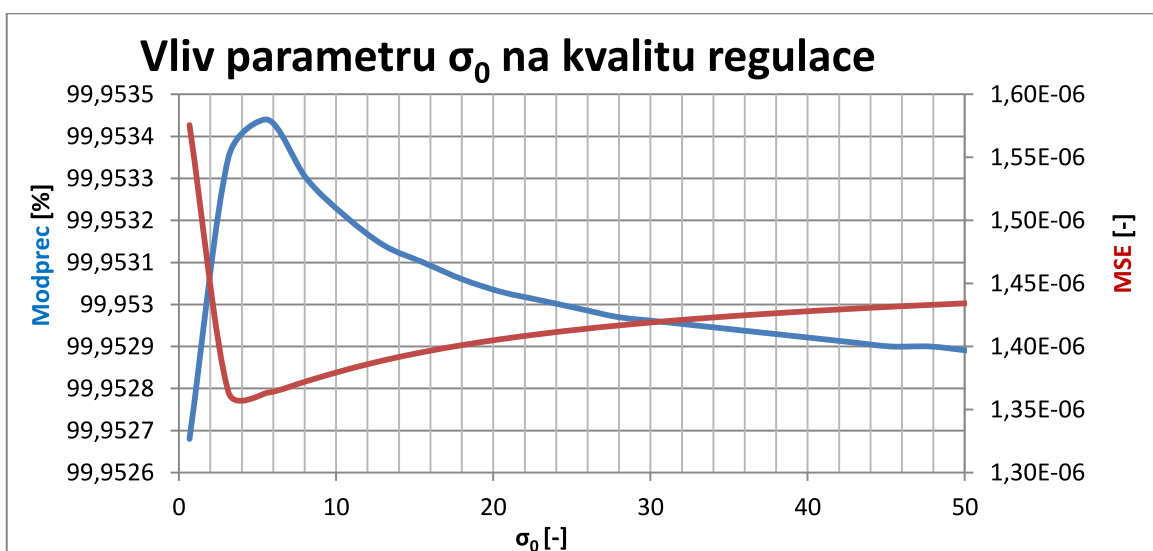
Obr. 28: Vliv parametru F_c na kvalitu regulace stejnosměrného motoru



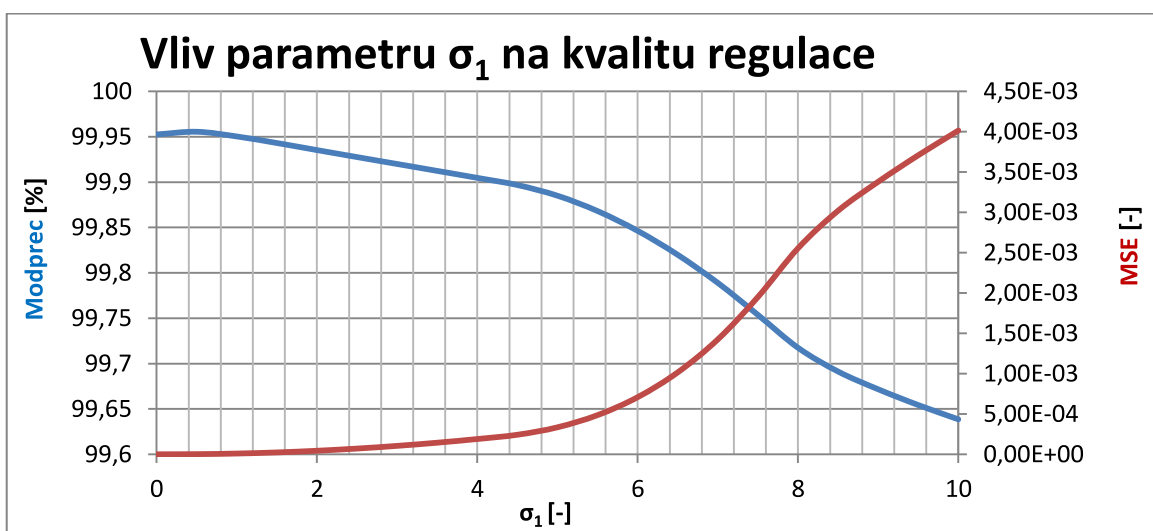
Obr. 29: Vliv parametru F_v na kvalitu regulace stejnosměrného motoru



Obr. 30: Vliv parametru v_s na kvalitu regulace stejnosměrného motoru



Obr. 31: Vliv parametru σ_0 na kvalitu regulace stejnosměrného motoru



Obr. 32: Vliv parametru σ_1 na kvalitu regulace stejnosměrného motoru

5 Měření a simulace škrticí klapky

Dalším bodem zadání je aplikovat získané zkušenosti s identifikací a regulací stejnosměrného motoru na škrticí klapku. V následujících podkapitolách je představeno chronologické řešení tohoto úkolu.

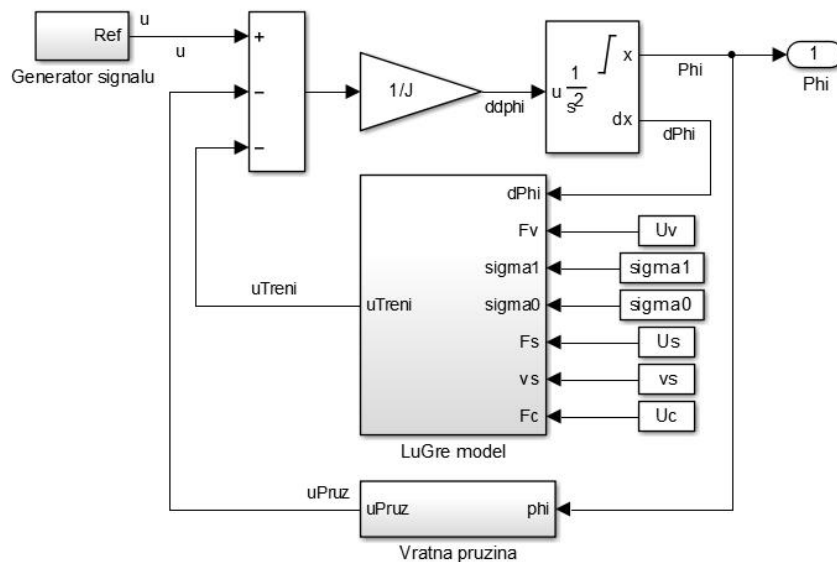
5.1 Model škrticí klapky

Model vychází přímo z rovnice (2.8), kde jednotlivé členy jsou shodné s těmi u modelu stejnosměrného motoru. Navíc je pouze přidán člen vratné pružiny ve tvaru:

$$u_{\text{Pruziny}} = u_{\text{Pruziny0}} + k_{\text{Pruziny}} \cdot \varphi \quad (5.1)$$

kde u_{Pruziny0} je napětí při nulový bod pružiny a k_{Pruziny} je její tuhost. Nulový bod pružiny, v [1] označeno jako napětí v bodě LH, je v podstatě napětí potřebné pro předeptnutí pružiny.

Celý model v prostředí Simulink pak vypadá následovně:



Obr. 33: Model pružiny použitý pro estimaci

Mechanické dorazy jsou modelovány pomocí integrátoru druhého řádu se saturací, tak jak je to popsáno v kapitole 2.1.2. Volba takového modelu je možná ze dvou hledisek.

- 1) Mechanické dorazy nás zajímají pouze z hlediska omezení polohy, nikoli z hlediska mechanické deformace. Omezí se tak případné kmitání polohy při velké rychlosti dosažení dorazů a nepřesných parametrech modelu, jako tomu hrozí při použití velmi tuhých pružin
- 2) Dynamika dorazů je mnohem stabilnější, než při použití rozhodovacích členů, jako je to popsáno v [4]

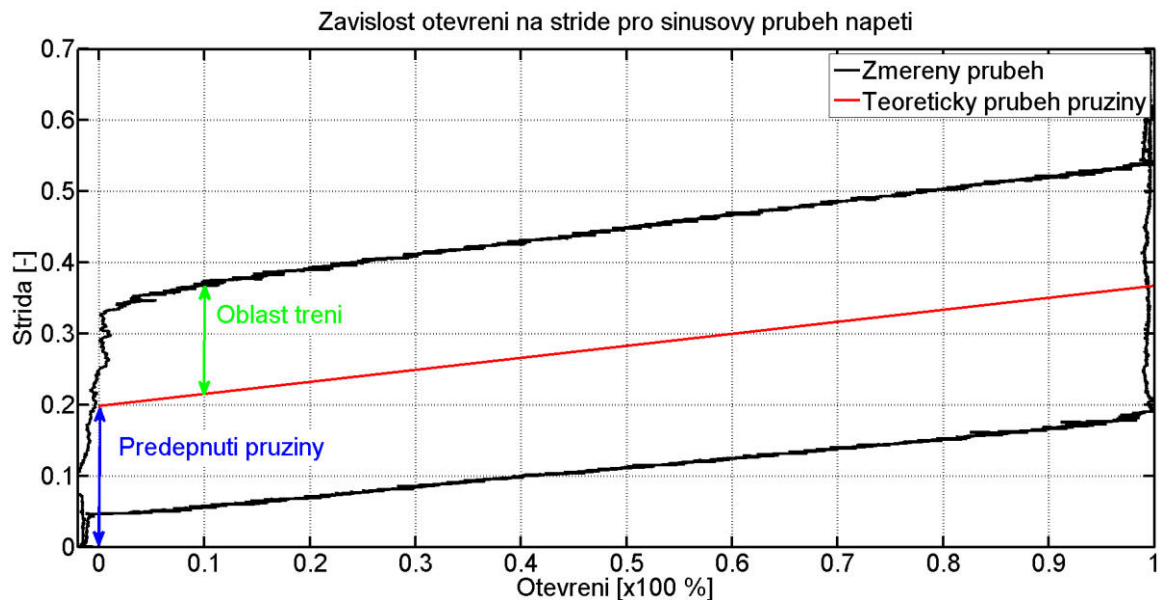
5.2 Identifikace škrticí klapky

Jak je řečeno v kapitole 2.1.2, nejsou dostupné žádné informace od výrobce mimo těch obecných. Je tedy nutné klapku plně identifikovat.

Pro identifikaci parametrů je opět zvolen zjednodušený napěťový model (2.8), který tento úkol velmi zjednodušuje. Oproti stejnosměrnému motoru je však nutné identifikovat také parametry vratné pružiny. V následujících podkapitolách jsou popsány různé experimenty, pomocí kterých byly získány počáteční odhady parametrů modelu.

5.2.1 Identifikace vratné pružiny

Použijeme-li shodný postup jako při identifikaci stejnosměrného motoru. Získáme při pomalé změně napětí následující průběh. Ten je změřeni při sinusové změně napětí.



Obr. 34: Závislost střída na otevření klapky

V tomto průběhu lze vidět mechanické dorazy v otevření 0 a 100%. Rudě je pak vyznačen teoretický (ideální) průběh pružiny, zeleně oblast tření, která způsobuje výraznou hysterzezi a modře napětí pro nulový bod pružiny.

Počáteční odhad parametrů pružiny získáme tak, že horní lineární část průběhu, např. mezi otevřením 0,1 a 0,9, aproximujeme přímkou. Z její rovnice dostaneme hodnotu tuhosti a hodnotu napětí protínající nulovou polohu. Toto napětí musíme pouze snížit do nulového bodu, tak jak je to znázorněno na Obr. 34 modrou šipkou.

Tímto postupem byly získány následující parametry pružiny v jednotkách střída:

$$u_{\text{Pružiny}0} = 0,198; k_{\text{Pružiny}} = 0,192$$

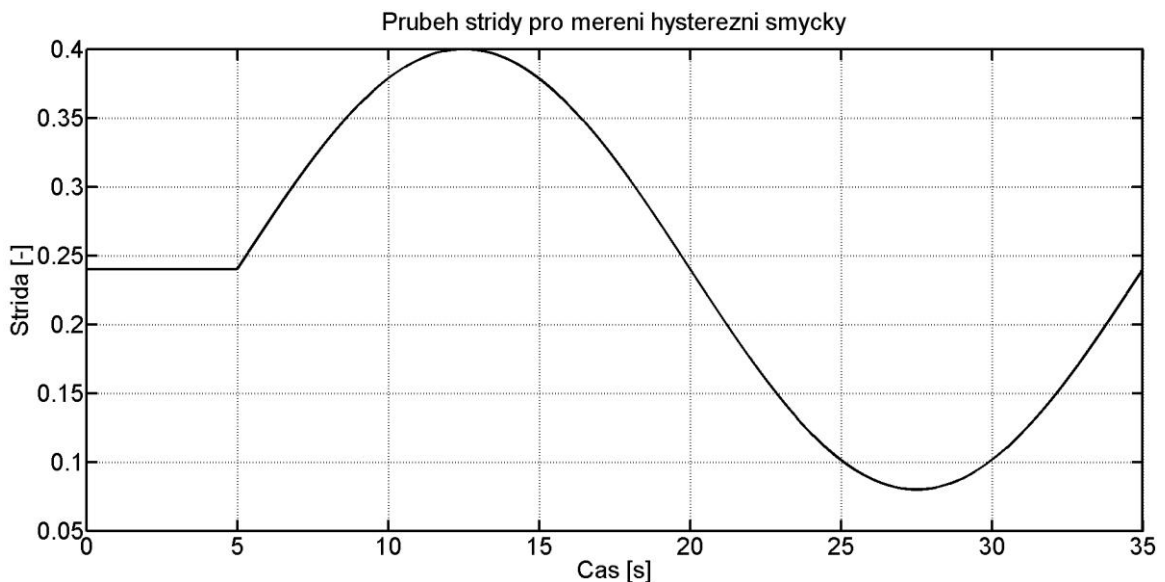
5.2.2 Identifikace parametrů tření klapky

Jak je řečeno v předchozí kapitole, tření je hlavní příčinou výrazné hystereze v charakteristice na Obr. 34. Využijeme-li tohoto předpokladu, lze z měření hystereze odhadnout statické parametry modelu tření.

Abychom se vyhnuli nepříznivému vlivu pružiny v nulovém bodě, byla hystereze měřena v její lineární části. Měření bylo rozděleno do dvou bodů:

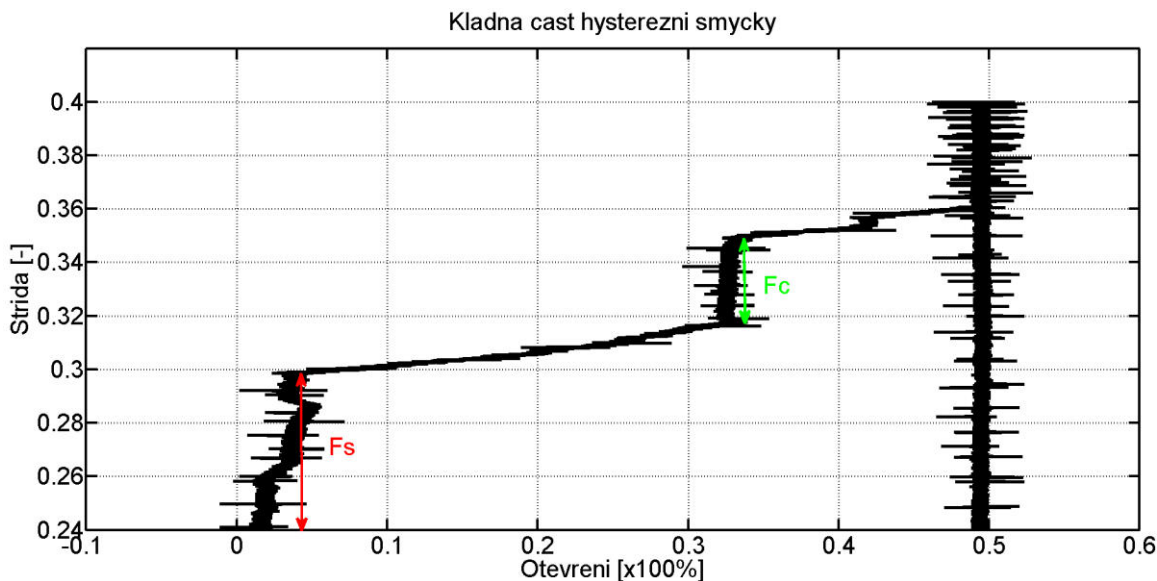
- 1) Na svorky motoru bylo přivedeno napětí 2,8V při kterém se klapka otevřela na ustálenou hodnotu
- 2) Po době ustálení 5s bylo napětí pomocí sinusového či lineárního průběhu s amplitudou 2V měněno nejdříve nahoru a poté dolů

Průběh střidy při měření hysterezní smyčky tedy vypadal následovně:



Obr. 35: Průběh střidy pro měření hysterezní smyčky

Tím byla změřena celá hysterezní smyčka v okolí určitého otevření klapky. Kladná část této smyčky je na následujícím obrázku. Rudě je vyznačena hodnota, která teoreticky odpovídá hodnotě tření v bodě zvratu F_S , zeleně pak hodnota, která byla použita pro počáteční odhad velikosti Coulombova tření F_C . Tato oblast pro odhad Coulombova tření byla zvolena z toho důvodu, že rozdíl mezi spodní a horní hodnotou střidy není tak vysoký jako u oblasti bodu zvratu. Navíc byla klapka v tomto bodě v pohybu – pouze se z nedostatku momentu na malý okamžik téměř zastavila. Obě hodnoty jsou v jednotkách střidy: $F_S = 0,06$; $F_C = 0,045$.

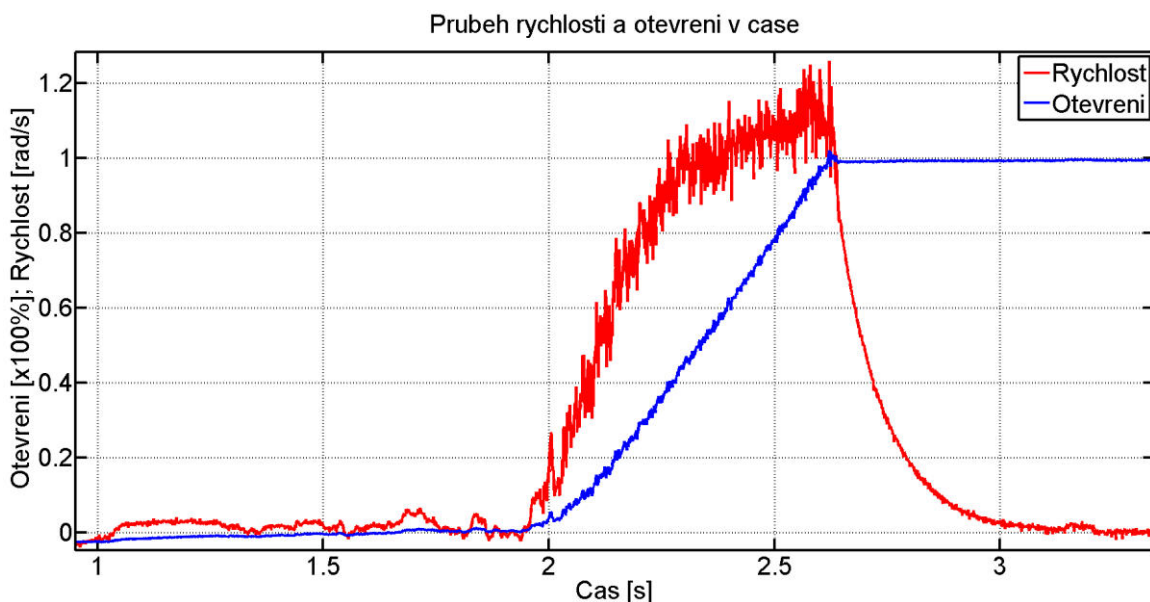


Obr. 36: Kladná část hysterezní smyčky

Velikost Striebeckovy rychlosti byla odhadnuta z porovnání průběhu rychlosti a otevření. Bohužel jak bylo řečeno v předchozích kapitolách, rychlost je počítána derivací polohy. Signál rychlosti byl proto filtrován diskretním IIR filtrem s přenosem:

$$y(z) = \frac{99,95 \cdot 10^{-4}}{z - 0,99} \quad (5.2)$$

Tím je do signálu rychlosti zanesen výrazný fázový posun, jak lze vidět na následujícím obrázku v bodě dosažení mechanického dorazu (přibližně čas 2,65s). Hodnota Striebeckovy rychlosti je proto jen orientační a byla určena jako $v_s = 0,1 \text{ rad/s}$



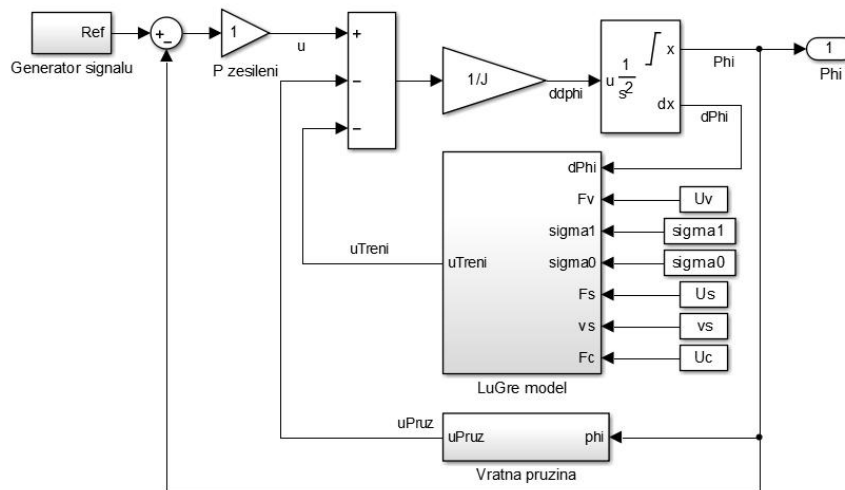
Obr. 37: Počáteční odhad Striebeckovy rychlosti pro škrťací klapku

Ostatní parametry tření nelze, tak jako v případě stejnosměrného motoru, efektivně změřit nebo určit. Hlavní podíl na tom má právě mechanické omezení pohybu klapky. Byly proto odhadnuty na základě zkušenosti, pokusů a dostupných zdrojů.

5.3 Optimalizace modelu škrticí klapky

Jelikož u modelu škrticí klapky nelze přesně identifikovat všechny parametry modelu, je nutné provést optimalizaci mezi modelem a změřenými daty.

Stejně jako u stejnosměrného motoru, i u škrticí klapky byla optimalizace prováděna na několika typech vstupních dat. Jsou jimi sinusový průběh, lineární průběh a referenční průběh změřený pomocí potenciometru. Totožný je i postup identifikace, tedy že pro měření referenčních dat byla použita zpětná vazba s P regulátorem a zesílením rovným 1. Stejná vazba byla použita i v modelu klapky, který vypadá následovně.



Obr. 38: Model klapky použitý při odhadu parametrů pomocí PE Toolbox

Optimalizace probíhala v mnoha krocích, pro různé počáteční odhady parametrů a různé vstupní signály. Vyzkoušeny byly rovněž různé metody hledání parametrů, především nelineární verze nejmenších čtverců a Simplex Search. Výsledky mezi jednotlivými optimalizacemi byly hodnoceny dle dvou hledisek:

- Velikost hodnotící funkce (Cost Function – SSE) na konci optimalizace
- Adekvátnost získaných parametrů

Druhé hledisko bylo zahrnuto především při použití metody Simplex Search, u které není možné nastavit minimální a maximální hodnoty parametrů. Tato metoda pak může vracet výsledky, které jsou sice z hlediska hodnotící funkce optimálnější, avšak z fyzikálního hlediska nedávají smysl.

Po porovnání všech výsledků se jako neoptimálnější ukázaly parametry v Tab. 7. Získány byly pomocí metody nejmenších čtverců s výchozím nastavením. Jako žádaná hodnota byl použit referenční vstupní signál.

Počáteční odhady jsou taktéž uvedeny v Tab. 7. Optimalizace proběhla ve 20 krocích. Hodnotící funkce SSE měla na konci optimalizace hodnotu 94,754. Optimalizace byla ukončena z důvodu dosažení lokálního minima.

Parametr	F_S	F_C	v_s	F_V	σ_0	σ_1	$k_{Pruziny}$	$u_{Pruziny0}$	J
Počáteční odhad	0,06	0,045	0,1	0,025	200	0,01	0,192	0,198	4,00E-04
Výsledek optimalizace	0,05143	0,03944	0,9464	0,1458	359	17,67	0,2252	0,19492	0,008803

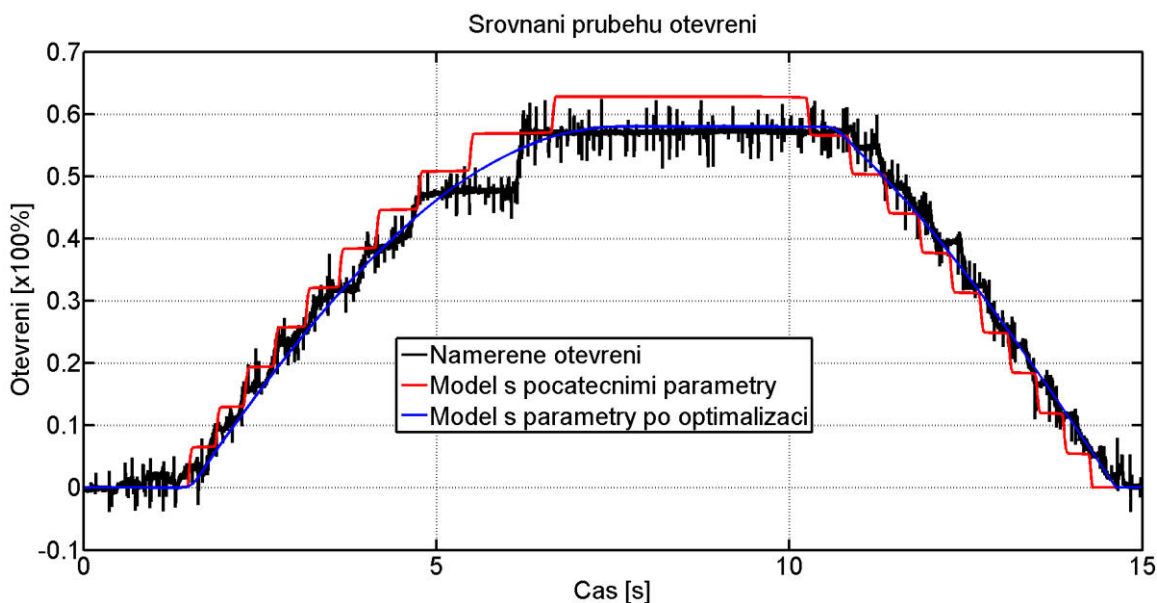
Tab. 7: Hodnoty parametrů modelu škrticí klapky před a po optimalizaci

5.3.1 Validace modelu škrticí klapky

Po získání parametrů modelu byly tyto parametry validovány pro různé průběhy žádané hodnoty. Validace probíhala zhodnocením s daty naměřenými na reálné soustavě. V následující tabulce je srovnání modelů s parametry získanými měřením/odhadem a parametry získanými optimalizací, které jsou uvedeny v Tab. 7. Na první pohled je patrné, že optimalizace modelu vykázala mnohem lepší výsledky než v případě stejnosměrného motoru.

Signál	Parametry	ise	mse	itae	mae	modprec
Sinusový	Odhad měřením	558,214	1,861E-03	10714,334	3,571E-02	80,020
	Optimalizací	84,521	2,817E-04	3789,586	1,263E-02	88,517
Lineární	Odhad měřením	771,129	1,285E-03	17554,405	2,926E-02	73,916
	Optimalizací	167,696	2,795E-04	7235,833	1,206E-02	83,991
Referenční	Odhad měřením	860,203	2,867E-03	13999,939	4,667E-02	80,140
	Optimalizací	469,731	1,566E-03	8872,537	2,958E-02	81,973

Tab. 8: Kvantitativní srovnání parametrů modelu škrticí klapky



Obr. 39: Srovnání modelů klapky s naměřenými daty pro sinusový vstupní signál

5.4 Regulace škrticí klapky

Po získání parametrů modelu tření z předchozí kapitoly, byly tyto parametry použity při regulaci s kompenzátorem tření a vratné pružiny. S ohledem na zadání je experimentálně ověřeno několik typů regulátorů a kompenzátorů pro různé typy vstupního signálu, podobně jako tomu bylo u regulace stejnosměrného motoru.

5.4.1 Sinusový průběh žádaného otevření

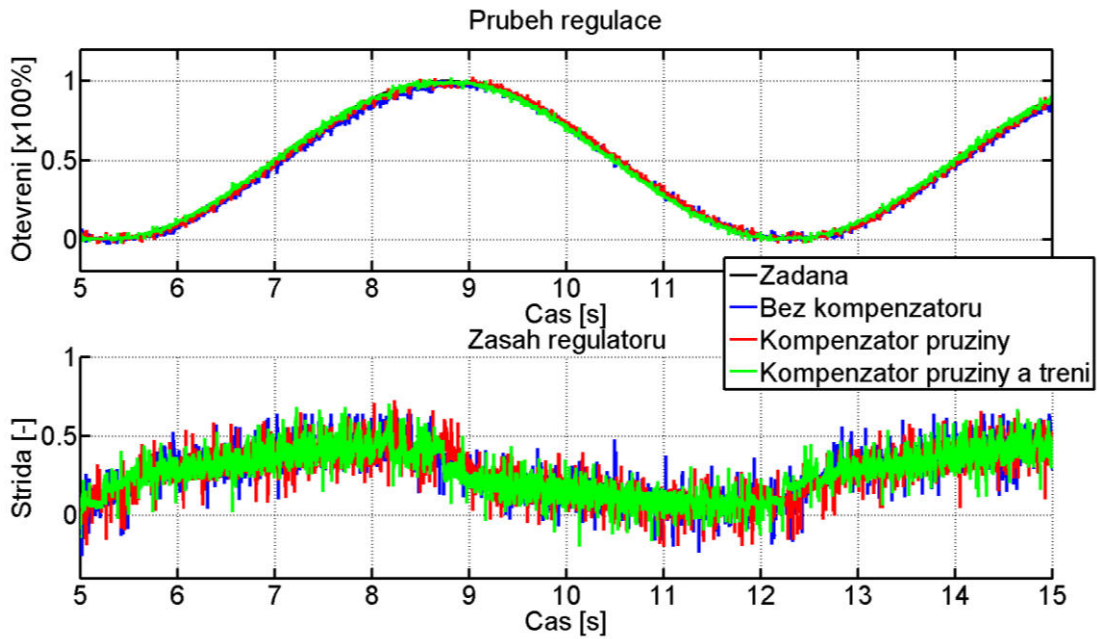
Jako první byla zkoumána reakce systému na sinusový průběh žádané veličiny. Regulátor je použit typ PI odvozený z tvaru (2.7) s parametry: $K_p = 10$; $K_I = 1$. Výsledky regulace dle hodnotících funkcí jsou uvedeny v Tab. 9. Z uvedených dat je patrné, že kompenzátor má významný vliv na kvalitu regulace. Rozdíl při regulaci bez kompenzátorů a s kompenzátory pružiny a tření je dle funkce Modprec okolo 15%.

Srovnáme-li výsledky pro různé zapojení kompenzátorů do regulačního obvodu (dopředný vs. zpětný), lze vidět nejlepší výsledek pro kombinaci: kompenzátor pružiny ze skutečné polohy a kompenzátor tření ze žádané.

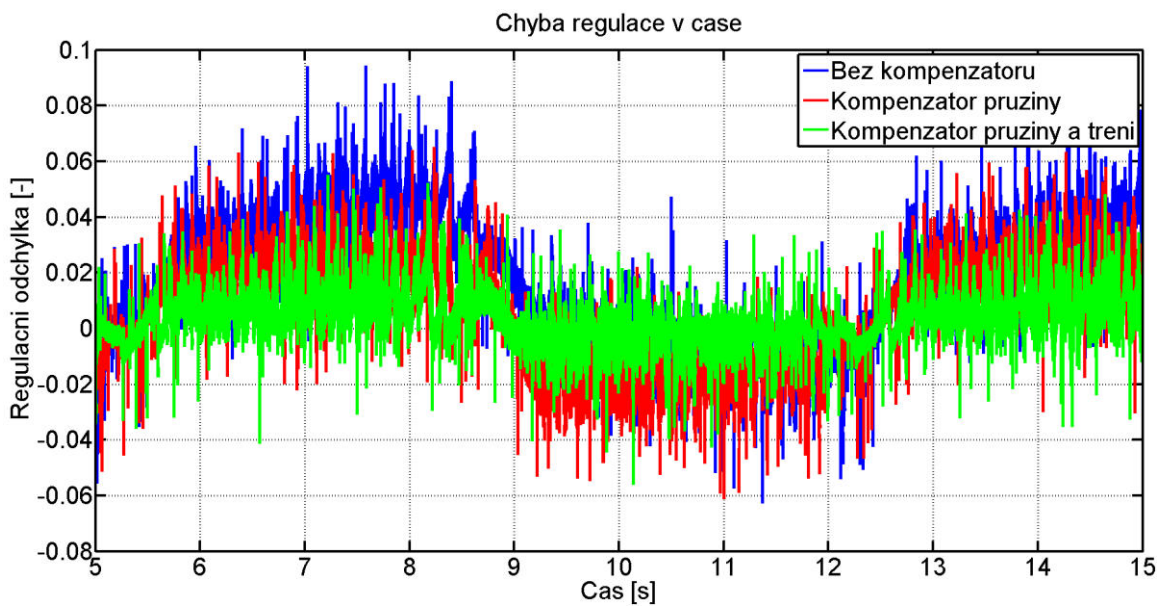
Kompenzátor	ISE	MSE	ITAE	MAE	Modprec
	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
Bez kompenzátoru	1664,961	2,973E-03	22528,387	4,023E-02	80,190
Pružina	394,179	7,039E-04	9924,592	1,772E-02	90,781
Pružina + tření	49,390	8,820E-05	4027,570	7,192E-03	95,869
Pružina FB	78,967	2,820E-04	4121,454	1,472E-02	90,580
Pružina FB + tření	19,938	7,121E-05	1772,157	6,329E-03	95,949
Pružina + Tření FB	23,756	8,484E-05	1954,978	6,982E-03	95,182

Tab. 9: Zhodnocení regulace klapky pro sinusový průběh žádaného otevření

I z grafických výsledků je patrné zlepšení. Zejména z průběhu regulační odchylky a akčního zásahu regulátoru.



Obr. 40: Srovnání regulace škrtící klapky při sinusovém průběhu žádaného otevření



Obr. 41: Průběh chyby regulace při sinusovém průběhu žádaného otevření

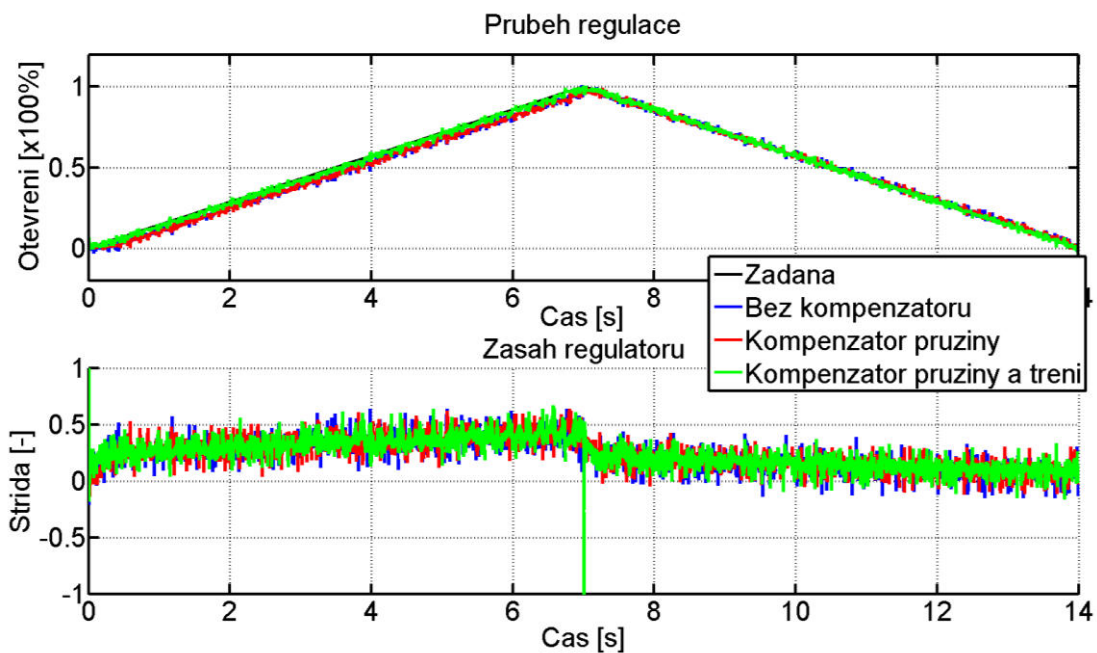
5.4.2 Lineární průběh žádaného otevření

Pro lineární průběh žádaného otevření platí stejné parametry jako pro sinusový průběh. Výsledek regulace z hlediska hodnotících funkcí je v Tab. 10.

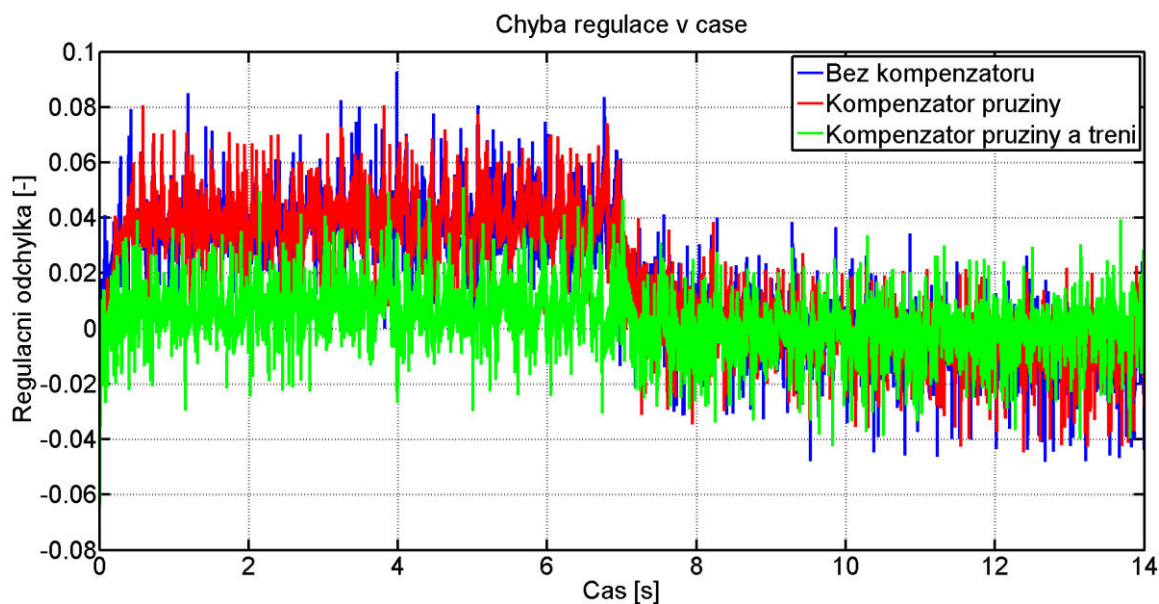
U lineárního průběhu není vliv kompenzátorů tak patrný jako u sinusového průběhu. Způsobeno je to především konstantním a pozvolným růstem žádané hodnoty. Jak již bylo zmíněno dříve, vyznačuje se tento průběh téměř konstantní hodnotou rychlosti.

Kompensátor	ISE	MSE	ITAE	MAE	Modprec
	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
Bez kompensátoru	306,644	5,476E-04	10842,548	1,936E-02	91,313
Pružina	135,789	2,425E-04	7956,109	1,421E-02	93,981
Pružina + tření	33,000	5,893E-05	3243,249	5,792E-03	97,356
Pružina FB	231,363	8,263E-04	6431,362	2,297E-02	90,331
Pružina FB + tření	20,906	7,467E-05	1845,313	6,590E-03	96,985
Pružina + Tření FB	18,765	6,702E-05	1738,615	6,209E-03	97,272

Tab. 10: Zhodnocení regulace klapky pro lineární průběh žádaného otevření



Obr. 42: Srovnání regulace škrtkící klapky při lineárním průběhu žádaného otevření



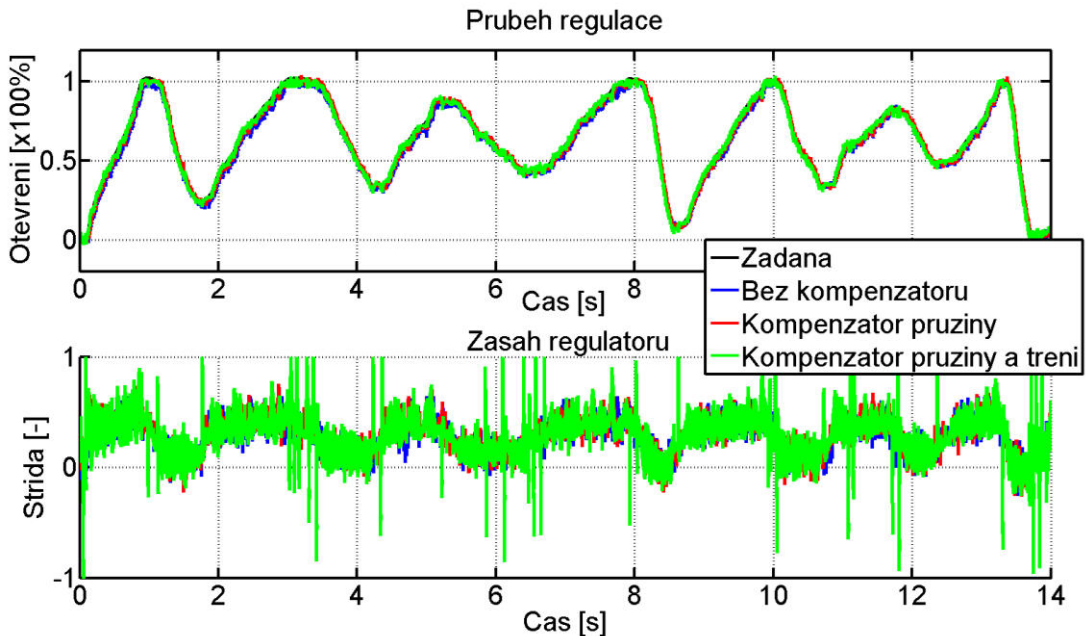
Obr. 43: Průběh regulační odchylky při regulaci klapky pro lineární průběh žádaného otevření

5.4.3 Referenční průběh žádaného otevření

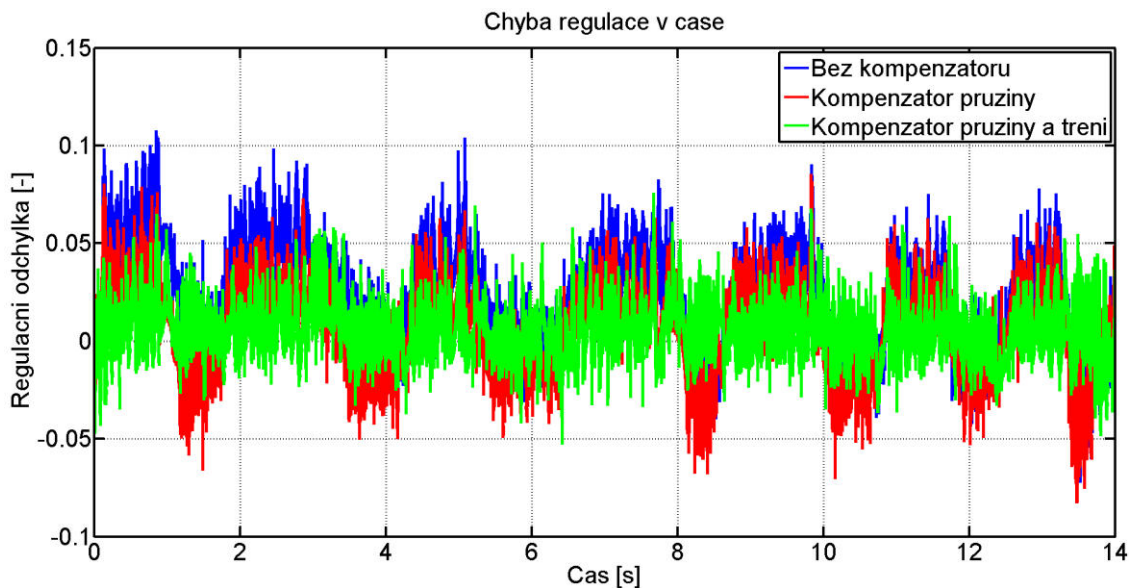
Při použití dat nahranych z potenciometru, která mají reprezentovat skutečný požadavek na otevření a jsou zatížena šumem, je výsledek mnohem zajímavější. V základní verzi kompenzátorů je zvýšení přesnosti vidět zejména na funkcích vyhodnocujících regulační odchylku. Procentuální shoda žádané a skutečné veličiny se nevyšila o více než 3%. Zajímavé však je, že další verze kompenzátorů, které v předchozích případech zanašeli do regulace šum a tím ji zhoršovali, vykazují lepší výsledky. Důvodem je pravděpodobně šum žádané hodnoty, který nutí regulátor k neustálé aktivitě. Z průběhu akčního zásahu regulátoru to lze vidět. Z hlediska automatizace, však tento průběh není neoptimálnější, neboť je řídicí obvod neustále zatížen.

Kompenzátor	ISE	MSE	ITAE	MAE	Modprec
	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
Bez kompenzátoru	866,467	1,547E-03	14344,427	2,562E-02	94,717
Pružina	735,607	1,314E-03	11489,182	2,052E-02	95,522
Pružina + tření	453,049	8,090E-04	5855,191	1,046E-02	97,151
Pružina FB	157,636	5,630E-04	5714,859	2,041E-02	95,441
Pružina FB + tření	47,718	1,704E-04	2763,018	9,868E-03	97,027
Pružina + Tření FB	47,970	1,713E-04	2763,806	9,871E-03	96,873

Tab. 11: Zhodnocení regulace klapky pro referenční průběh žádaného otevření



Obr. 44: Srovnání regulace škrtkic klapky při referenčním průběhu žádaného otevření

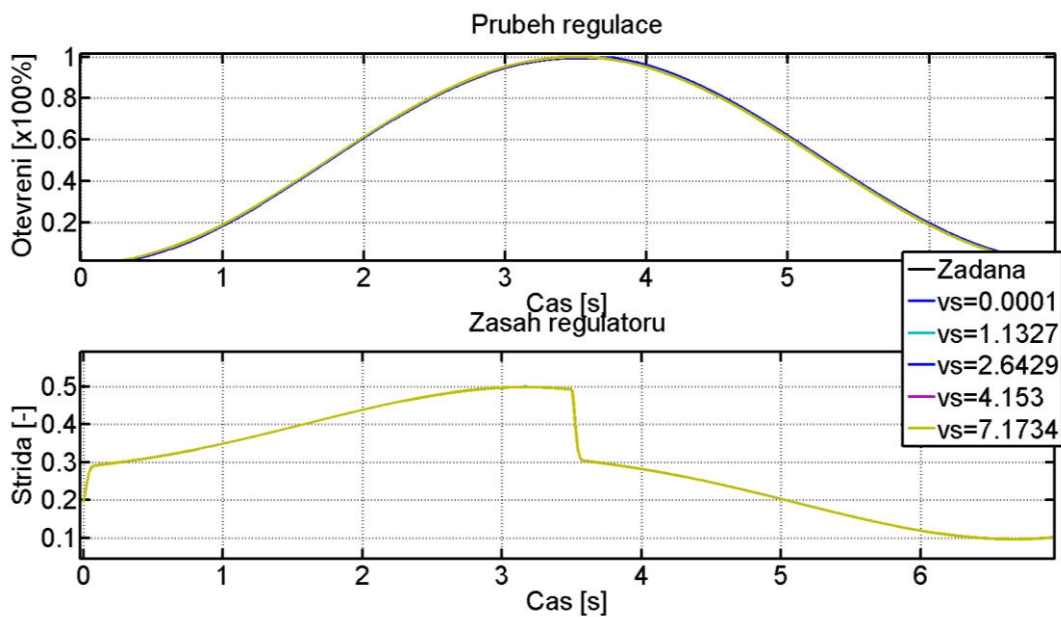


Obr. 45: Průběh regulační odchylky při regulaci klapky pro referenční průběh žádaného otevření

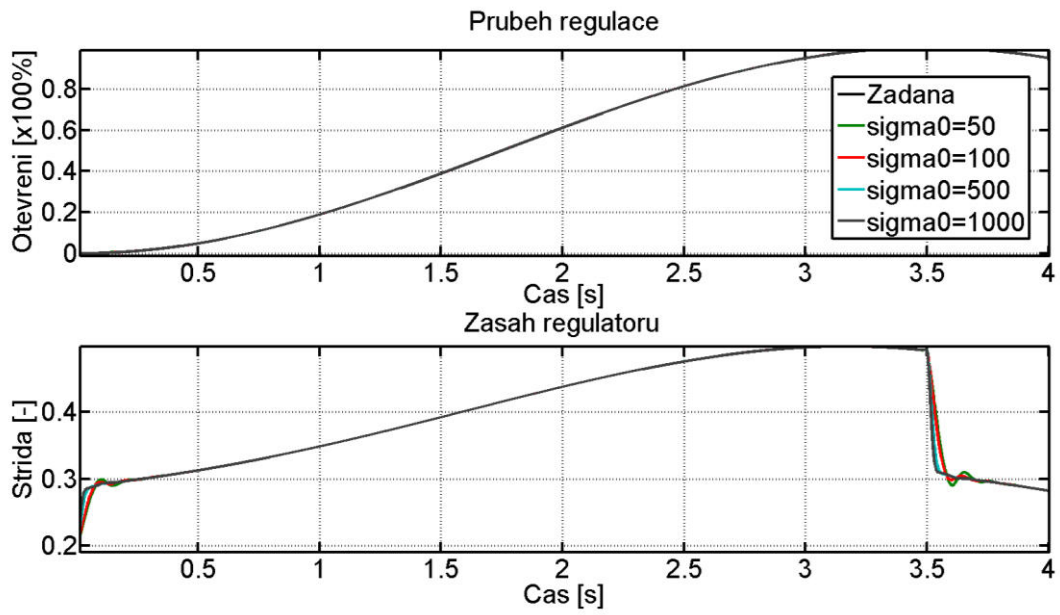
5.5 Vliv parametrů kompenzátoru na kvalitu regulace

Zde byl postup totožný jako v případě stejnosměrného motoru. Model získaný optimalizací s parametry uvedenými v Tab. 7 je brán jako referenční a zkoumá se vliv jednotlivých parametrů na kvalitu regulace z hlediska hodnotících funkcí.

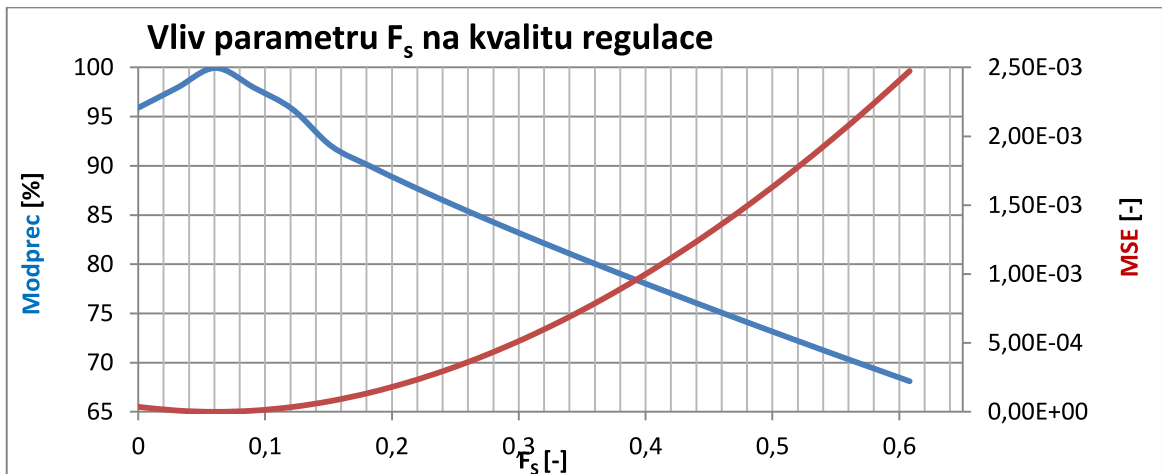
I u tohoto modelu je jasný trend. Se zvyšující se hodnotou parametru klesá přesnost. To se však netýká parametrů v_s a σ_0 . V jejich případě se v určitém bodě kompenzační člen jakoby saturuje a vykazuje téměř identické výsledky. Jak lze vidět na Obr. 46 a Obr. 47, akční zásah regulátoru při nulové rychlosti velmi dobře simuluje jev na Obr. 4, při téměř shodné velikosti bodu zvratu a suchého tření.



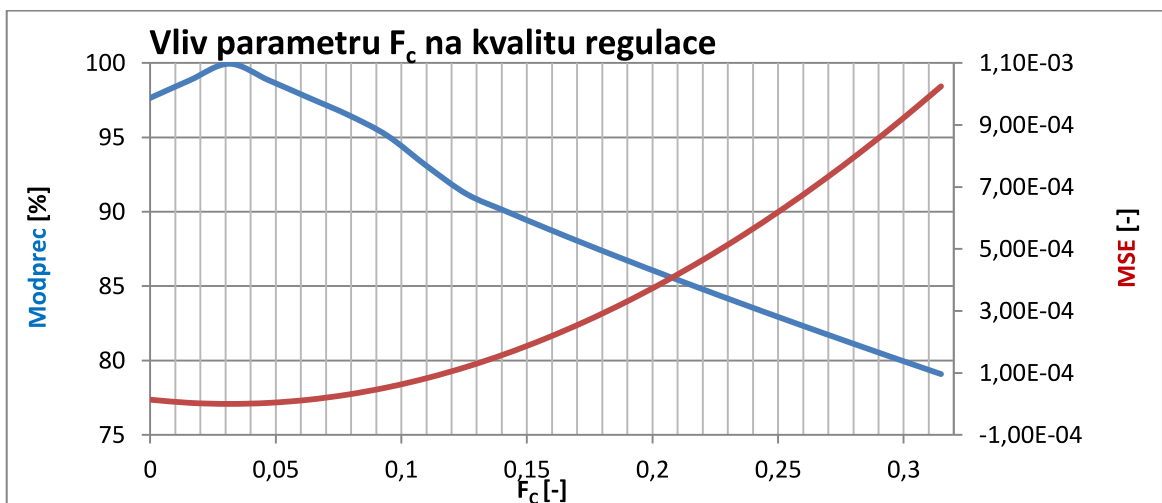
Obr. 46: Průběh regulace škrtkové klapky pro různé hodnoty parametru v_s



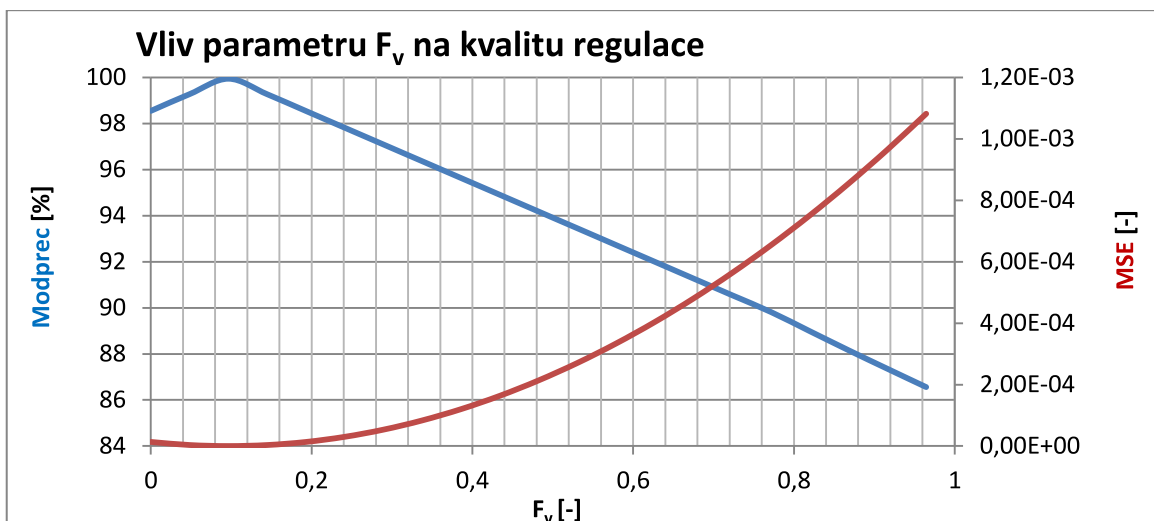
Obr. 47: Průběh regulace škrtkicí klapky pro různé hodnoty parametru σ_0



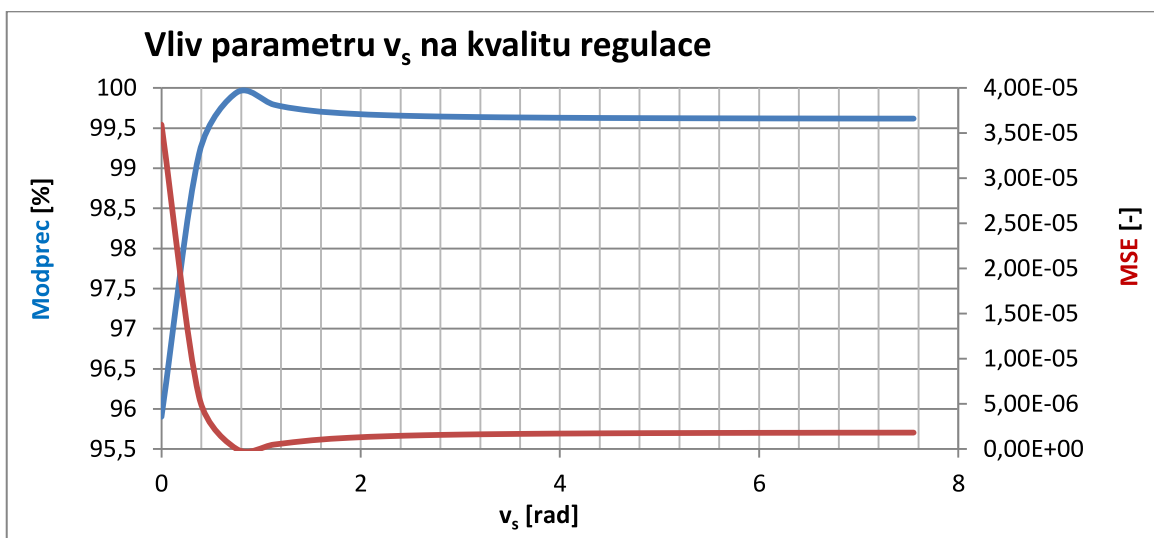
Obr. 48: Vliv parametru F_s na kvalitu regulace škrtkicí klapky



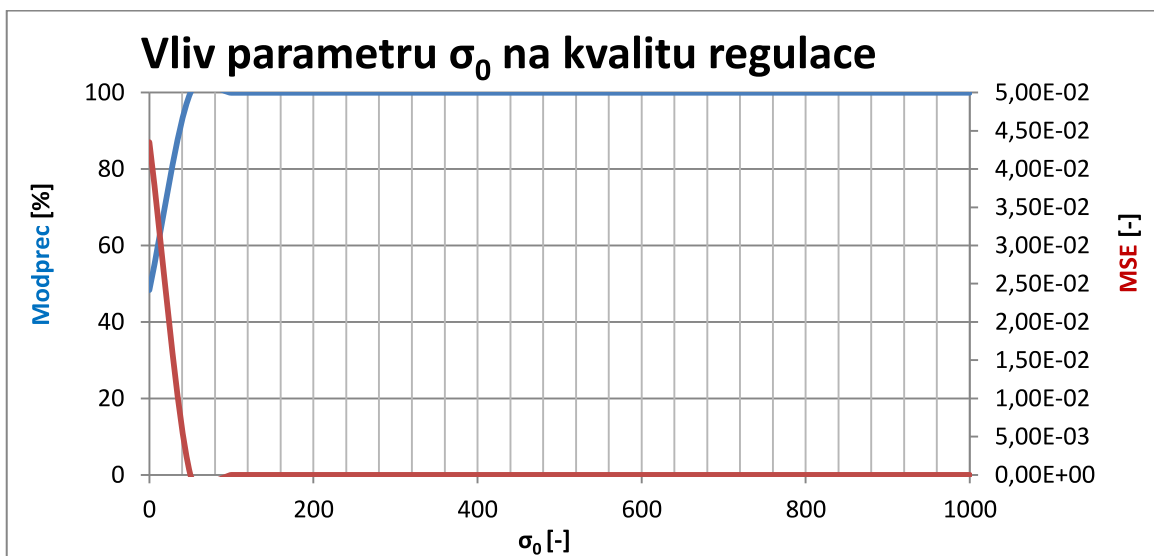
Obr. 49: Vliv parametru F_c na kvalitu regulace škrtkicí klapky



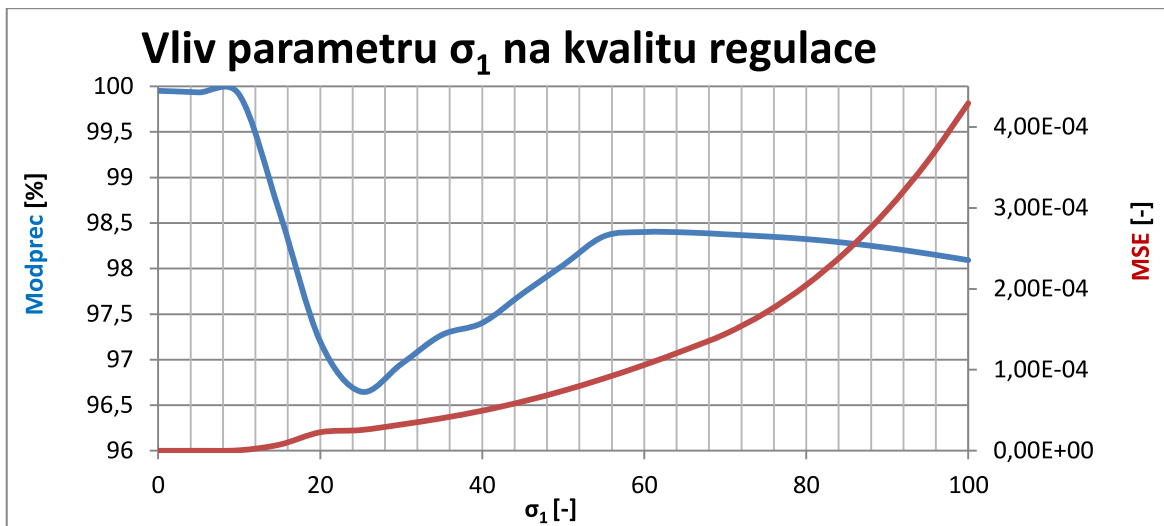
Obr. 50: Vliv parametru F_v na kvalitu regulace škrticí klapky



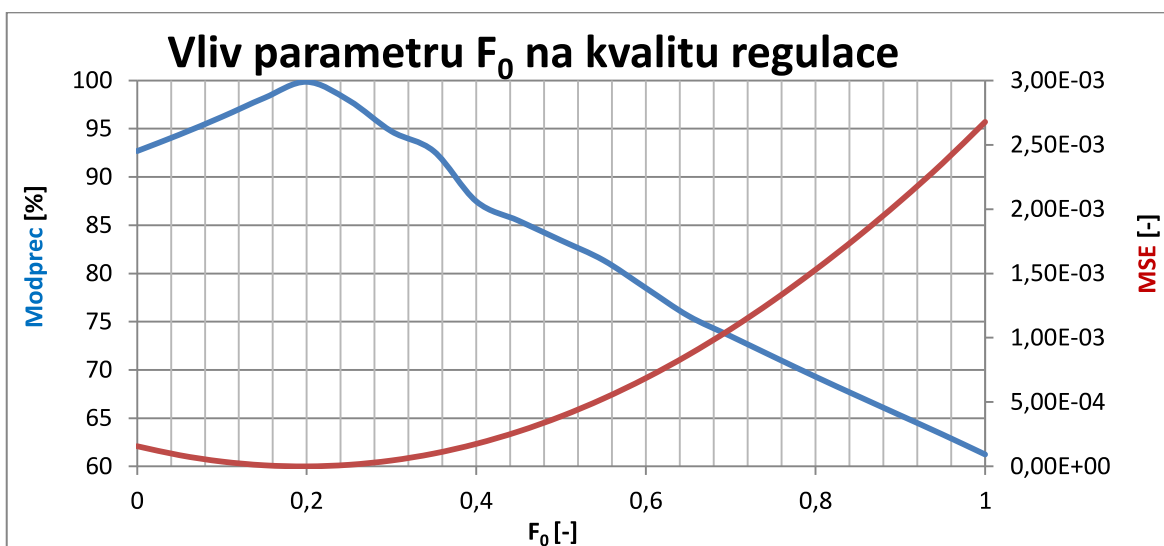
Obr. 51: Vliv parametru v_s na kvalitu regulace škrticí klapky



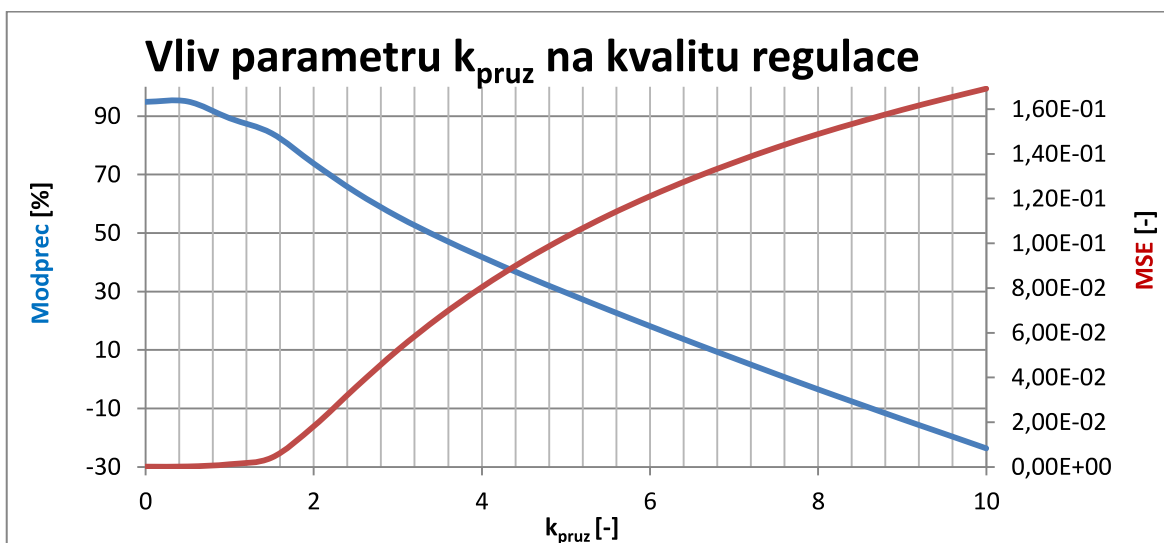
Obr. 52: Vliv parametru σ_0 na kvalitu regulace škrticí klapky



Obr. 53: Vliv parametru σ_1 na kvalitu regulace škrticí klapky



Obr. 54: Vliv parametru u_{pruz0} na kvalitu regulace



Obr. 55: Vliv parametru u_{pruz} na kvalitu regulace škrticí klapky

6 Závěr

V rámci této práce bylo řešeno pět cílů zadání. První z nich, rešeršní studie, je popsán v kapitole 2. Ve zhuštěné podobě je zde prezentována teorie potřebná k pochopení této práce s odkazy na literaturu doporučenou k prohloubení znalostí.

Druhý a třetí cíl je řešen v rámci kapitoly 4. Pro použitý stejnosměrný motor byl identifikován model v napěťovém tvaru. Kompenzace tření nevykázala v tomto případě větší vliv na regulaci soustavy, jak dokazují hodnoty v Tab. 4 až Tab. 6. Z hlediska zkoumání vlivu parametrů kompenzátoru na kvalitu regulace se dospělo k několika závěrům, které v konečném důsledku specifikovaly postup řešení. Tím je simulace ideálního modelu a následné zkoumání vlivu každého parametru zvlášť. Jedině tak je možné získat numericky stabilní a experimentálně validní výsledky. Obecně lze říci, že se zvyšujícími se hodnotami parametrů kompenzátoru se snižuje kvalita regulace.

V rámci 5. kapitoly je řešen hlavní cíl této práce, tedy identifikace a regulace soustavy s vysokým suchým třením a vratnou pružinou. Tou je elektronická škrticí klapka. Výsledky ukazují, že teoretické předpoklady a empirické znalosti získané v rámci předchozích cílů mají reálné uplatnění. Jak výsledky identifikace modelu v kapitole 5.3, tak výsledky regulace soustavy s kompenzátoru v kapitole 5.4 jsou dle zvolených hodnotících funkcí velmi dobré. U regulace s kompenzačními členy bylo dosaženo až o 15% vyšší shody žádaného a skutečného otevření klapky, než u regulace bez kompenzátoru. Vliv parametrů na kvalitu regulace je velmi podobný těm v předchozím bodě zadání.

Poslední cíl se ukázal být velmi komplexním. Při jeho řešení bylo nastudováno velké množství různých materiálů a zdrojů. Nicméně složitost je velmi vysoká a v čase daném k řešení této práce nebylo dosaženo jasně prokazatelných závěrů. Z toho důvodu nejsou výsledky tohoto bodu v práci zahrnuty.

Zvolené téma v sobě skrývá velký potenciál. Zejména při regulaci škrticí klapky v provozních podmínkách, tedy za vysokých teplot a vibrací, může být dosaženo velmi zajímavých závěrů z teorie kompenzace tření. Při dalším rozvoji tohoto tématu by také bylo vhodné zvolit aktuálnější model škrticí klapky, který bude vybaven přesnějším senzorem polohy bez výrazného zatížení šumem.

Perspektiva dalšího rozvoje je tedy vysoká. Elektrické aktuátory se totiž, zejména v automobilovém průmyslu, prosazují čím dál tím častěji a nároky na jejich regulaci se stále zvyšují.

7 Seznam obrázků

Obr. 1: Schématický model elektronické škrticí klapky	4
Obr. 2: Závislost momentu vratné pružiny na úhlu otevření klapky (převzato z [1])	4
Obr. 3: Foto použité škrticí klapky	5
Obr. 4: Závislost třecí síly na rychlosti pro statický model tření (převzato z [5]).....	6
Obr. 5: Schematické znázornění zpětné kompenzace.....	10
Obr. 6: Schematické znázornění zpětné kompenzace počítané z regulační odchylky.....	10
Obr. 7: Schematické znázornění dopředné kompenzace	11
Obr. 8: Model měření stejnosměrného motoru	15
Obr. 9: Generátor žádané hodnoty	16
Obr. 10: Průběhy budících signálů	17
Obr. 11: Model stejnosměrného motoru s třením	18
Obr. 12: Odezva motoru na skokovou změnu napětí.....	20
Obr. 13: Natočení motoru při sinusové změně napětí	20
Obr. 14: Model motoru určený pro optimalizaci parametrů	21
Obr. 15: Srovnání simulací modelu motoru s různými parametry pro sinusový průběh žádaného úhlu	23
Obr. 16: Srovnání simulací modelu motoru s různými parametry pro referenční průběh žádaného úhlu	23
Obr. 17: Schéma regulátoru s kompenzátořem Coulombova tření.....	24
Obr. 18: Průběh regulace motoru pro různé typy kompenzátořů a sinusový průběh žádaného natočení.....	25
Obr. 19: Regulace motoru – regulační odchylka pro sinusový průběh žádaného natočení	25
Obr. 20: Průběh regulace motoru pro různé typy kompenzátořů a lineární průběh žádaného natočení.....	26
Obr. 21: Regulace motoru – regulační odchylka pro lineární průběh žádaného natočení.	26
Obr. 22: Průběh regulace motoru pro různé typy kompenzátořů a referenční průběh žádaného natočení.....	27
Obr. 23: Průběh regulace motoru pro různé typy kompenzátořů a lineární průběh žádaného natočení 2.....	28
Obr. 24: Regulace motoru – regulační odchylka pro referenční průběh žádaného natočení	28
Obr. 25: Model použitý při zjišťování vlivu parametrů kompenzátořů na kvalitu regulace	30
Obr. 26: Průběh regulace motoru s různou hodnotou parametru σ_1	30
Obr. 27: Vliv parametru F_S na kvalitu regulace stejnosměrného motoru	31
Obr. 28: Vliv parametru F_C na kvalitu regulace stejnosměrného motoru.....	31

Obr. 29: Vliv parametru F_V na kvalitu regulace stejnosměrného motoru.....	31
Obr. 30: Vliv parametru v_s na kvalitu regulace stejnosměrného motoru.....	32
Obr. 31: Vliv parametru σ_0 na kvalitu regulace stejnosměrného motoru	32
Obr. 32: Vliv parametru σ_1 na kvalitu regulace stejnosměrného motoru	32
Obr. 33: Model pružiny použitý pro estimaci.....	33
Obr. 34: Závislost střídý na otevření klapky.....	34
Obr. 35: Průběh střídý pro měření hysterezní smyčky	35
Obr. 36: Kladná část hysterezní smyčky	36
Obr. 37: Počáteční odhad Striebeckovy rychlosti pro škrticí klapku	36
Obr. 38: Model klapky použitý při odhadu parametrů pomocí PE Toolboxu	37
Obr. 39: Srovnání modelů klapky s naměřenými daty pro sinusový vstupní signál	38
Obr. 40: Srovnání regulace škrticí klapky při sinusovém průběhu žádaného otevření	40
Obr. 41: Průběh chyby regulace při sinusovém průběhu žádaného otevření.....	40
Obr. 42: Srovnání regulace škrticí klapky při lineárním průběhu žádaného otevření	41
Obr. 43: Průběh regulační odchylky při regulaci klapky pro lineární průběh žádaného otevření	41
Obr. 44: Srovnání regulace škrticí klapky při referenčním průběhu žádaného otevření ...	42
Obr. 45: Průběh regulační odchylky při regulaci klapky pro referenční průběh žádaného otevření	43
Obr. 46: Průběh regulace škrticí klapky pro různé hodnoty parametru v_s	43
Obr. 47: Průběh regulace škrticí klapky pro různé hodnoty parametru σ_0	44
Obr. 48: Vliv parametru F_S na kvalitu regulace škrticí klapky	44
Obr. 49: Vliv parametru F_C na kvalitu regulace škrticí klapky	44
Obr. 50: Vliv parametru F_V na kvalitu regulace škrticí klapky	45
Obr. 51: Vliv parametru v_s na kvalitu regulace škrticí klapky	45
Obr. 52: Vliv parametru σ_0 na kvalitu regulace škrticí klapky	45
Obr. 53: Vliv parametru σ_1 na kvalitu regulace škrticí klapky	46
Obr. 54: Vliv parametru u_{pruz0} na kvalitu regulace	46
Obr. 55: Vliv parametru u_{pruz} na kvalitu regulace škrticí klapky.....	46

8 Seznam tabulek

Tab. 1: Katalogové hodnoty motoru [3]	3
Tab. 2: Počáteční odhad a výsledek optimalizace parametrů modelu stejnosměrného motoru.....	22
Tab. 3: Validace modelu stejnosměrného motoru – srovnání výsledků pro různé signály	23
Tab. 4: Kvantitativní zhodnocení regulace stejnosměrného motoru se sinusovým průběhem	25
Tab. 5: Kvantitativní zhodnocení regulace stejnosměrného motoru s lineárním průběhem	27
Tab. 6: Kvantitativní zhodnocení regulace stejnosměrného motoru s referenčním průběhem	28
Tab. 7: Hodnoty parametrů modelu škrticí klapky před a po optimalizaci	38
Tab. 9: Kvantitativní srovnání parametrů modelu škrticí klapky	38
Tab. 10: Zhodnocení regulace klapky pro sinusový průběh žádaného otevření.....	39
Tab. 11: Zhodnocení regulace klapky pro lineární průběh žádaného otevření.....	41
Tab. 12: Zhodnocení regulace klapky pro referenční průběh žádaného otevření.....	42

9 Seznam použitých symbolů a zkratek

- U - napětí na svorkách motoru
 R_a - odpor vinutí
 L_a - indukčnost vinutí
 i - proud tekoucí motorem
 K - napěťová (proudová) konstanta motoru
 ω - úhlová rychlost rotoru
 J_{Mot} - moment setrvačnosti hřídele motoru
 M_z - zátěžný moment motoru
 M_T - moment třecí síly
CL – close (zavírání klapky)
LH – limp home (poloha klapky při nulovém napětí na motoru)
OP – open (otevírání klapky)
HS – hard stop (mechanické dorazy)
 F_c - hodnota Coulombova tření (také nazýváno suché tření)
 F_s - maximální hodnota statického tření (bod zvratu)
 F_v - koeficient viskózního tření
 v_s - Stribeckova rychlost
 δ_s - koeficient Stribeckova jevu
 F_e – síla působící na soustavu těles s třením
 σ_0 – pomyslná tuhost štětín LuGre modelu
 σ_1 - pomyslný koeficient tlumení štětín LuGre modelu
 u - akční zásah regulátoru
 r_0 - zesílení proporcionální složky v číslicovém regulátoru
 T_I - časová konstanta integrační složky
 T_D - časová konstanta derivační složky
 T - vzorkovací perioda
 K_P - zesílení proporcionální složky
 K_I - zesílení integrační složky
 K_D - zesílení derivační složky
 J - zobecněný moment setrvačnosti soustavy
 ω - úhlová rychlost
 b - zobecněné tlumení soustavy
 φ - úhel natočení
 $u_{Pruziny}$ - model vratné pružiny převedený na napětí
 u_{Treni} - model tření převedený na napětí
FB – FeedBack, zpětnovazební kompenzace
FF – FeedForward, dopředná kompenzace

w - žádaná hodnota
 e - regulační odchylka
 u_{PID} - akční zásah regulátoru
 u_{komp} - akční zásah kompenzátoru
 y - skutečná hodnota regulované veličiny
ISE - integral squared error
MSE - mean squared error
ITAE - integral of time-weighted absolute error
MAE - mean absolute error
DPS – deska plošných spojů
 k_E - konstanta enkodéru (počet pulzů na jednu otáčku)
 k_P - konstanta převodovky (převodový koeficient)
 $p_{1,M}$ - změřená hodnota potenciometru 1 (obdobně pro potenciometr 2)
 $p_{1,max}$ - maximální hodnota potenciometru 1 (obdobně pro potenciometr 2)
 $p_{1,delta}$ - rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou potenciometru 1 (obdobně pro potenciometr 2)
 J_{Red} - moment setrvačnosti celé mechanické části redukováný na hřídel motoru
 k_{emf} - napěťová konstanta motoru
 i_{12} - celkový převodový poměr soustavy
 η_{12} - celková účinnost převodů
 τ_m – elektro-mechanická časová konstanta motoru
 $u_{pruziny0}$ – napětí vratné pružiny pro nulový bod
 $k_{pruziny}$ – tuhost vratné pružiny

10 Seznam zdrojů

- [1] GREPL, R.; LEE, B. Modeling, Parameter Estimation and Nonlinear Control of Automotive Electronic Throttle using a Rapid-Control Prototyping Technique. *International Journal of Automotive Technology*. 2010, vol. 11, no. 4, s. 601-610. ISSN 1229-9138.
- [2] MĚŘIČKA, J.; HAMATA, V.; VOŽENÍLEK, P. *Elektrické stroje*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1993. 311 s. ISBN 80-01-01020-1.
- [3] *Transmotec.Cz[online]*. [cit. 20.5.2015]. Dostupný z WWW: <<http://www.transmotec.com/dc-motors/planetary-gear/PD52-Series.aspx>>.
- [4] Rouleau, G., *How to model a hard stop in Simulink[online]*. [cit. 20.5.2015]. Dostupný z WWW: <<http://blogs.mathworks.com/seth/2014/01/22/how-to-model-a-hard-stop-in-simulink/>>.
- [5] OLSSON, H., et al. Friction Models and Friction Compensation. *European Journal of Control*. 1998, vol. 4, no. 3, s. 176-195. ISSN 0947-3580.
- [6] SKALICKÝ, J. *Elektrické regulované pohony*. Brno : skriptum VUT FEKT, 2007. 123 s.
- [7] PETRELLA, R., et al. *Speed measurement algorithms for low-resolution incremental encoder equipped drives: a comparative analysis*, 2007. 780-787 s. ID: 1.
- [8] ŠVARC, I., et al. *Automatické řízení*. 2. vyd. . Brno : CERM, s.r.o., 2011. 348 s. ISBN 978-80-214-4398-3.
- [9] DEWIT, CC; LISCHINSKY, P. Adaptive Friction Compensation with Partially Known Dynamic Friction Model. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 1997, vol. 11, no. 1, s. 65-80. ISSN 0890-6327.
- [10] MathWorks inc. *Simulink Design Optimization[online]*. [cit. 24,5,2014]. Dostupný z WWW: <<http://www.mathworks.com/help/slido/index.html#parameter-estimation>>.
- [11] MathWorks inc. *Estimate Parameters and States[online]*. [cit. 24,5,2014]. Dostupný z WWW: <<http://www.mathworks.com/help/slido/estimate-parameters-and-states.html>>.

- [12] WIKIPEDIA, The F. e. *Mean Squared Error*[online]. 9.5.2014, [cit. 24.5.2014]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Mean_squared_error>.
- [13] LEM. *Current Transducer LTS 6-NP Datasheet*[online]. [cit. 18.5.2014]. Dostupný z WWW: <www.lem.com>.
- [14] MathWorks inc. *Getting Started with Simulink Desktop Real-Time*[online]. [cit. 23.5.2015]. Dostupný z WWW: <<http://www.mathworks.com/help/rtwin/getting-started-with-real-time-windows-target.html>>.
- [15] MathWorks inc. *SSE Function*[online]. 2014 [cit. 27.5.2014]. Dostupný z WWW: <<http://www.mathworks.com/help/nnet/ref/sse.html>>.
- [16] MathWorks inc. *Functions in Optimization Toolbox*[online]. [cit. 24,5,2014]. Dostupný z WWW: <<http://www.mathworks.com/help/optim/functionlist.html>>.