

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 392

ISSN 1213-418X

Robert Grepl

**MODELOVÁNÍ A ŘÍZENÍ
ŠKRTICÍ KLAPKY OSOBNÍHO AUTOMOBILU
- SOUČASNOST A TRENDY
V NÁVRHU MECHATRONICKÝCH SOUSTAV**

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Ing. Robert Grepl, Ph.D.

**Modelování a řízení škrticí klapky osobního automobilu
– současnost a trendy v návrhu mechatronických
soustav**

Modelling and control of automotive throttle – present and
trends in design of mechatronic systems

**Teze habilitační práce
v oboru Aplikovaná mechanika**



Brno 2011

Klíčová slova

mechatronika, modelování, řízení, škrticí klapka, lokální modely, Kalmanův filtr

Keywords

mechatronics, modeling, control, electronic throttle, local learning models, Kalman filter

Místo uložení práce

Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2

Obsah

Představení autora	4
1 Úvod	5
1.1 Popis mechatronické škrticí klapky	6
1.2 Cíle práce	7
2 Modelování škrticí klapky	8
2.1 Model pro odhad parametrů	8
2.2 Virtuální prototyp	10
2.3 Model pro HIL simulaci	11
3 Odhad stavů a parametrů systému	12
3.1 Offline odhad parametrů modelu – statická charakteristika	12
3.2 Odhad stavů a parametrů pomocí EKF	12
3.3 Odhad parametrů systému pomocí MMS	15
4 Řídicí algoritmus založený na modelu s odhadovanými parametry	16
5 Řídicí algoritmus založený na učícím se inv. modelu dynamiky	18
5.1 Základní předpoklady a struktura regulátoru	18
5.2 Ukázka z výsledků simulačních experimentů	19
5.3 Shrnutí a další možnosti výzkumu	19
6 Vývoj ECU	21
6.1 Hardwarová specifikace ECU	21
6.2 Implementace řídicího algoritmu v celočíselných datových typech (Fixed-Point)	21
7 Závěr	23

Představení autora

Robert Grepl se narodil v r. 1976 v Brně. Vysokoškolské vzdělání získal v oboru Aplikovaná mechanika na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Za diplomovou práci „Aktivní tlumení pohybu břemene mostového jeřábu“ obhájenou v r. 2000 získal Cenu děkana.

V letech 2000–2004 absolvoval pod vedením školitele doc. Ing. Čestmíra Ondrůška, CSc. doktorské studium, které ukončil v r. 2004 obhajobou disertační práce „Využití komplexních dynamických modelů při návrhu a řízení kráčejičího robotu“. Během studia absolvoval šestiměsíční odbornou stáž v norské firmě UMOE SchatHarding a také několik kratších pobytů na univerzitách v Polsku a na Ukrajině.

Významným impulzem pro další práci byla dvouměsíční vědeckovýzkumná stáž v laboratoři prof. B. Lee na Keimyung University, Daegu, v Jižní Koreji. Následně se autor zaměřil na výzkum a vývoj v oblasti modelování, identifikace a řízení silně nelineárních systémů, konkrétně s aplikací na aktuátory používané v automobilech. Aktivně se podílel na vybudování výukové a výzkumné laboratoře mechatroniky na ÚMTMB vybavené moderní přístrojovou technikou.

Autor byl hlavním řešitelem vědeckovýzkumných projektů GAČR 101/06/P108 „Výzkum simulačního a experimentálního modelování dynamiky mobilních kráčejičích robotů“ a FSI-S-10-15 „Využití nelineárního dynamického modelu pro pokročilé řízení mechatronických soustav“ a aktivně se podílel na řadě dalších projektů, především výzkumných záměrů MSM 262100024 „Výzkum a vývoj mechatronických soustav“ a MSM 0021630518 „Simulační modelování mechatronických soustav“. Také se zúčastnil řešení řady vývojových úkolů z průmyslové praxe (Bosch, ŽĎAS, Poličské strojírný).

V pedagogické oblasti pracoval na projektech FRVŠ 2002/1912 „Vývoj flexibilního systému pro komplexní analýzu mechatronických mechanismů“, 2009/974 „Výuková laboratoř dynamiky mechatronických soustav“, 2010/3038 „Platforma pro výuku identifikace a řízení servopohonu s výraznou nelinearitou typu suché tření“.

Odborné zájmy zahrnují kinematiku a dynamiku, robotiku, simulační modelování v prostředí Matlab/Simulink, modelování MBS v prostředí SimMechanics, neholonomní systémy s aplikací v mobilní robotice, řízení v reálném čase, rychlý vývoj řídicích systémů a HIL simulace. Je autorem a spoluautorem více než 25 článků v časopisech a na vědeckých konferencích, z toho dvou článků v impaktovaných časopisech.

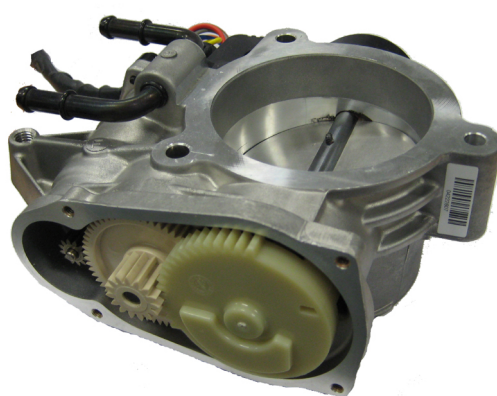
Vytvořil a garantuje předmět „Kinematika a dynamika mechatronických systémů“, ke kterému napsal skripta a je také autorem odborné příručky „Modelování mechatronických systémů v Matlab/SimMechanics“.



1. Úvod

Mechatronika je relativně novým technickým a vědním oborem, který kombinuje mechanickou, elektrickou, elektronickou a řídicí část systému v jeden funkčně vyvážený celek. Dosažený synergický efekt umožňuje podstatné vylepšení funkční kvality předchozích technických systémů a výrobků, případně vznik zcela nových zařízení. Známým příkladem je nová koncepce návrhu letadel, kdy se letadlo navrhuje jako nestabilní a následně stabilizuje počítačovým řízením (fly-by-wire). Podstatným vylepšením funkce je u vojenských letadel zvýšení manévrovatelnosti, u civilních dopravních letadel pak snížení spotřeby paliva.

Tato práce se zabývá modelováním a řízením škrticí klapky osobního automobilu, která je velmi dobrou ukázkou mechatronického přístupu. Původní čistě mechanické řešení, kdy je natočení klapky ovládáno přes bowden přímo plynovým pedálem, je nahrazeno řešením mechatronickým. Klapka je doplněna elektromotorem s převodovkou a vratnou pružinou, úhel natočení je snímán polohovým senzorem a řízení celé soustavy je realizováno mikroprocesorem. Plynový pedál je osazen senzorem, který předává informaci o žádané hodnotě natočení klapky mikroprocesoru.



Obr. 1.1: Fotografie škrticí klapky z vozidla Hyundai Tucson

Nové mechatronické řešení nabízí kromě základní funkcionality (klapka je ovládána plynovým pedálem) další možnosti, např. korekce požadovaného úhlu natočení na základě jiných provozních dat a sensorických informací (teplota, otáčky, . . .), jejímž důsledkem je snížení emisí, jednodušší implementace automatického řízení rychlosti vozidla (tempomat) a řízení průtoku množství vzduchu do motoru může být použito algoritmem řízení jízdní stability.

Zajímavým aspektem mechatronického řešení klapky je vyvážení úrovně jednotlivých částí, kdy je relativně špatná elektromechanická část (výrobní tolerance, vysoké suché tření, variabilita parametrů) vylepšena sofistikovaným řídicím algoritmem tak, aby celkové chování dosahovalo požadovaných parametrů. Motivace takového přístupu je ekonomická: při hromadné výrobě v automobilovém průmyslu se vyplatí vyrábět mechanické komponenty s nižší kvalitou a investovat značné prostředky do vývoje vestavěného softwaru, který se pak „pouze kopíruje“.

V automobilovém průmyslu se uvedená koncepce aplikuje i na další systémy mimo škrticí klapku a intenzivně se rozvíjí. Souhrnně se tyto technologie označují jako X-by-wire. Vznikají tak *steer by wire*, kdy je klasické mechanické řízení s hydraulickým posilovačem nahrazeno mechatronickým řešením a *brake by wire*, kde je podobně chápán brzdový systém. Řízení a brzdy tvoří z hlediska bezpečnosti pochopitelně řádově kritičtější komponenty v porovnání se škrticí klapkou a také proto je stále nemožné homologovat vozidlo bez mechanického spojení volantů s koly. V budoucnosti lze nicméně v této oblasti očekávat změny [46].

Jakkoli je mechatronický přístup demonstrován výhradně na jednom technickém objektu, výsledky, použité a vyvinuté metody a postupy jsou obecněji aplikovatelné v oblasti strojírenství, kdy je vyžadována identifikace procesů, modelování a nelineární řízení, především pak v oblasti elektromechanických aktuátorů.

Důležitá část práce byla vykonána v rámci spolupráce FSI VUT v Brně s Keimyung University, Daegu v Koreji v rámci dvouměsíční stáže u prof. Byoungsoo Leeho.

1.1 Popis mechatronické škrticí klapky

Koncept elektronické škrticí klapky¹ (electronic throttle) se objevuje poprvé v sériových vozidlech BMW v r. 1988, v současné době je (také díky přísným emisním limitům) montována do všech vozidel. Na obr. 1.2 je uvedeno základní schéma, které je u většiny variant shodné.

Systém mechatronické škrticí klapky se skládá z stejnosměrného elektromotoru s permanentními magnety na statoru a komutátorem, převodovky s plastovým čelním ozubením, vratné pružiny, elementu klapky, který je typu „motýlek“, sensoru natočení elementu klapky, plynového pedálu se senzorem a elektronické řídicí jednotky (ECU) nejčastěji integrované s výkonovým H-můstkem.

Přestože lze mechatronickou škrticí klapku charakterizovat jako polohově řízený servopohon, jedná se o netriviální a technicky i vědecky zajímavý problém. Důvody jsou následující:

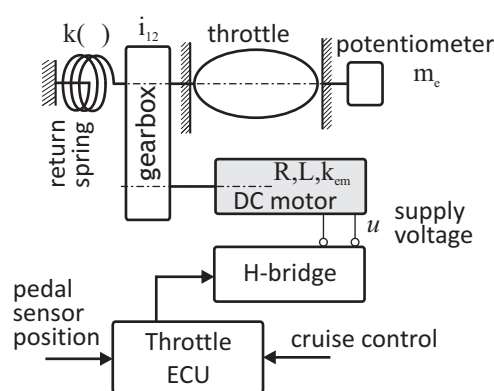
1) Na servopohon jsou kladeny vysoké nároky pokud jde o přesnost a rychlost řízení: ustálení na požadované hodnotě v čase $t < 0.15\text{sec.}$, bez překmitu a s minimální ustálenou odchylkou.

2) Elektromechanický subsystém se vyrábí ve velkých sériích s důrazem na minimalizaci nákladů, což vede k relativně velkým výrobním tolerancím, významnému suchému tření a rozdílu v parametrech jednotlivých kusů výrobku.

3) Vratná pružina je silně nelineární – z bezpečnostních důvodů musí být mechanicky zajištěno, že při poruše (řídicí nebo výkonové elektroniky, kabeláže, atd.) dojde z libovolné polohy k samovolnému uzavření klapky do tzv. limp home (LH) pozice, kdy je klapka jen mírně otevřena, takže motor může běžet na nízké otáčky a řidič může „dokulhat“ do servisu. Z toho důvodu je tuhost pružiny v okolí neutrální (LH) polohy vysoká. Zároveň je ale vhodné, aby se moment potřebný pro ovládání klapky nad určitou hodnotu (která zajistí překonání pasivních odporů) již příliš nezvětšoval a mohl být použit motor menšího výkonu. Výsledkem je silně nelineární a z hlediska návrhu řízení nepříjemná charakteristika pružiny schématicky znázorněná na obr. 2.1 a experimentálně zjištěná na obr. 3.2.

4) Stejně jako u mechanické části, jsme i u řídicí jednotky omezeni požadavkem minimalizace nákladů. V jednotkách tohoto typu se stále používají 8-bitové, případně 16-ti bitové MCU.

5) Provozní podmínky, ve kterých aktuátor pracuje, se vyznačují značnými změnami



Obr. 1.2: Schéma škrticí klapky

¹Termín Electronic Throttle Control se v literatuře i praxi používá.

teplot, vibracemi, může docházet k průniku paliva do mechanismu klapky a tím k významné změně parametrů pasivních odporů.

1.2 Cíle práce

Z popisu problematiky uvedené v předchozím úvodním textu a také z rozsáhlé rešerše současného stavu uvedené v plném textu habilitační práce vyplývá, že se jedná o studijně, vědecky i prakticky zajímavý a aktuální problém, u kterého zůstává řada otevřených oblastí a otázek k řešení. Cílem této práce je nalézt odpovědi alespoň na některé z nich:

- Jak sestavit optimální simulační model(y) aktuátoru vzhledem k různým požadavkům na aplikaci (non-real-time vs. real-time simulace, HIL, kompletní virtuální prototyp)?
- Jak odhadovat stavy (poloha, rychlost, event. proud) ze silně zašumělých údajů z potenciometru?
- Jak odhadovat parametry modelu (offline vs. online)?
- Jakým způsobem využít získaný dynamický model pro návrh nelineárních kompenzátorů ve struktuře kompozitního regulátoru?
- Jak efektivně transformovat výsledky získané na real-time control prototyping (RCP) hardwaru (např. systém dSPACE) s relativně vysokým výpočetním výkonem do malého vestavěného cílového zařízení?

2. Modelování škrticí klapky

V této kapitole popíšeme sestavení matematického modelu elektromechanické škrticí klapky a jeho implementaci v prostředí Matlab/Simulink. Budeme přitom rozlišovat tři cílové aplikace modelu:

- 1) odhad parametrů modelu na základě naměřených dat;
- 2) simulační experimenty různé povahy, např. v rámci komplexních modelů vozidel – tento model může být nazýván *virtuálním prototypem*;
- 3) kompilace modelu HIL simulace na real-time zařízení.

Ve všech uvedených případech uvažujeme tyto zjednodušující předpoklady: mechanismus přenosu momentu z DC motoru na klapku považujeme za soustavu tuhých těles propojených vazbami, zanedbáme silový účinek proudícího vzduchu, zanedbáváme vůle v ozubení.

2.1 Model pro odhad parametrů

Nejprve odvodíme základní model, který bude platný v pracovní oblasti klapky. Nebude zahrnovat omezení natočení a volbu modelu tření provedeme pouze s ohledem na dobrou konvergenci offline odhadu parametrů.

2.1.1 Mechanická rovnice

Schéma elektromechanické soustavy škrticí klapky je uvedeno na obr. 1.2. Mechanická část se skládá z hřídele motoru, ozubeného převodu, hřídele s vlastním elementem klapky a vratné pružiny. V případě, že provedeme zjednodušení popsané v předchozím úvodu, můžeme mechanický subsystém chápat jako redukovanou soustavu s jedním stupněm volnosti a popsat rovnicí:

$$I_{\text{red}}\ddot{\varphi}_M = M_e - M_v - M_s - M_F \quad (2.1)$$

kde M_e je elektrický moment, M_v je moment viskózního tlumení, M_s moment od nelineární vratné pružiny a M_F moment třecích sil. V následujícím textu tyto veličiny postupně vyjádříme.

2.1.2 Model DC motoru

Dynamiku elektrického a mechanického subsystému popíšeme známým lineárním modelem:

$$u = Ri + L\frac{di}{dt} + c\phi\dot{\varphi}_M \quad (2.2)$$

$$m_{eM} = c\phi i \quad (2.3)$$

kde u je napájecí napětí, R je odpor vinutí, i je proud, L indukčnost vinutí, $c\phi$ je konstanta motoru, φ_M je natočení hřídele motoru a m_{eM} je moment na hřídeli motoru.

Kinematickou a silovou vazbu mezi motorem a klapkou přes ozubený převod budeme uvažovat pouze jako statickou závislost

$$\varphi = \frac{\varphi_M}{i_{12}} \quad (2.4)$$

$$m_e = m_{eM} i_{12} \eta_{12} \quad (2.5)$$

kde i_{12} je převodový poměr, η_{12} účinnost převodovky a m_e je moment vyvozený motorem přepočtený na hřídel klapky. Vzhledem k relativně velké setrvačnosti a především tlumení mechanického subsystému a naopak malé indukčnosti L je výsledný model – typickým numericky tuhým systémem. U běžných provozních režimů motoru můžeme dynamiku elektrické části zanedbat a uvažovat pouze statickou závislost

$$u = Ri + c\phi i_{12} \dot{\varphi}. \quad (2.6)$$

Z rovnice 2.6 vyjádříme proud i

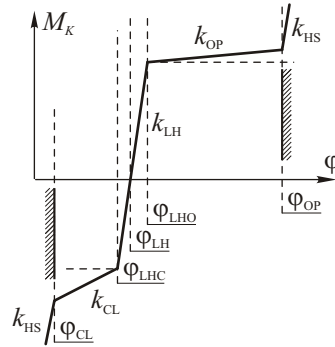
$$i = \frac{1}{R}u - \frac{c\phi i_{12}}{R} \dot{\varphi} \quad (2.7)$$

a dosadíme do rovnice elektrického momentu 2.1.2

$$M_e = \frac{c\phi i_{12} \eta_{12}}{R}u - \frac{c\phi^2 i_{12}^2 \eta_{12}}{R} \dot{\varphi} \quad (2.8)$$

2.1.3 Nelineární pružina

Důležitou mechanickou vlastností systému, která významně komplikuje návrh a ladění řídicího algoritmu, je silná (a z hlediska řízení nevhodná) nelineární charakteristika pružiny. Předpokládaná modelová charakteristika je znázorněna na obrázku 2.1 a popsána



Obr. 2.1: Schéma nelineární pružiny (LH limp home, neutrální poloha, kdy je klapka mírně otevřená; CL klapka je zavřená; OP klapka otevřená; HS tuhost koncových dorazů, pokud jsou modelovány)

matematicky takto:

$$M_S = \begin{cases} k_{LH}(\varphi_{LHO} - \varphi_{LH}) + k_{OP}(\varphi - \varphi_{LHO}), & \varphi > \varphi_{LHO} \\ k_{LH}(\varphi_{LHC} - \varphi_{LH}) + k_{CL}(\varphi - \varphi_{LHC}), & \varphi < \varphi_{LHC} \\ k_{LH}(\varphi - \varphi_{LH}), & \text{jinak} \end{cases} \quad (2.9)$$

2.1.4 Pasivní odpory

Mechanické odporové momenty lze rozdělit na viskózní

$$M_v = b_{\text{mech}}\dot{\varphi} \quad (2.10)$$

a moment suchého tření M_F , který zároveň představuje nejobtížnější část modelu. Pro různé přístupy k odhadování parametrů modelu jsme použili odlišné modely tření:

- **Dynamické modely tření** (Reset Integrator a LuGre) byly používány v etapě offline identifikace. Blíže jsou popsány v kap. 2.2.2 plného textu habilitační práce, případně v literatuře [35].
- **Statický model s výpočtem externí síly** je použit v rozšířeném Kalmanově filtru popsaném v kap. 3.2.

Oba momenty M_v a M_F vztahujeme rovnou k výstupnímu hřídeli (souřadnice φ).

2.1.5 Výsledná rovnice

Do mechanické rov. 2.1 dosadíme elektrický moment 2.8 a viskózní tlumení a dostáváme tvar

$$I_{\text{red}}\ddot{\varphi} = \frac{c\phi i_{12}\eta_{12}}{R}u - \frac{c\phi^2 i_{12}^2 \eta_{12}}{R}\dot{\varphi} - b_{\text{mech}}\dot{\varphi} - M_S - M_F \quad (2.11)$$

který upravíme na

$$I_{\text{red}}\ddot{\varphi} = \frac{k_{\text{emf}}i_{12}\eta_{12}}{R}u - \left(b_{\text{mech}} + \frac{k_{\text{emf}}^2 i_{12}^2 \eta_{12}}{R} \right) \dot{\varphi} - M_S - M_F \quad (2.12)$$

Rovnici 2.12 vydělíme $\frac{c\phi i_{12}\eta_{12}}{R}$ a dostáváme model v jednotkách [V]:

$$I\ddot{\varphi} = u - b\dot{\varphi} - u_S(\varphi) - u_F(\dot{\varphi}) \quad (2.13)$$

Vidíme, že model je určen dvěma konstantami I a b a dvěma nelineárními funkcemi $u_S(\varphi)$ a $u_F(\dot{\varphi})$. Pro účely odhadování parametrů tyto nelineární funkce parametrizujeme podle rov. 2.9 resp. podle použitého modelu tření.

2.2 Virtuální prototyp

Virtuální prototyp je v poslední době často užívaným pojmem, přičemž ne vždy je zcela jasné, jak jej autor odlišuje od běžného simulačního modelu. Všeobecně platná a uznávaná definice neexistuje, dobrý rozbor však lze najít v článku [57]. Autor zde uvádí návrh definice takto:

Virtuální prototyp je počítačová simulace reálného výrobku, která může být prezentována, analyzována a testována z hlediska těch částí celého životního cyklu výrobku (návrh, výroba, servis, recyklace), které nás zajímají, a to stejně (nebo lépe) jako reálný fyzikální model (prototyp).

Virtuální prototyp má pak tyto základní komponenty: 3D solid model, model interakce člověk–produkt, konkrétní testovací modely (strukturální analýza, MBS model, modelování výrobních procesů, atd.).

V případě našeho systému škrtecí klapky požadujeme od virtuálního prototypu takové chování, které umožní jeho využití pro účely testování a optimalizace řídicích a odhadovacích algoritmů stejně, jako bychom využívali reálný fyzický výrobek.

2.2.1 Model unilaterálních vazeb omezujících pohyb klapky

Modelování unilaterálních (jednostranných) vazeb v mechatronice jako důležité součásti virtuálního prototypu jsme se detailně věnovali v článku [A10]. Jedná se o problematiku modelování kontaktu a rázu aplikovanou takovým způsobem, který při zachování dostatečné věrohodnosti zaručuje přijatelnou výpočetní náročnost. Podrobnější rozbor této problematiky je v plném textu habilitační práce, zde uvedeme pouze výsledný tvar modelu soustavy s unilaterální vazbou ve tvaru:

$$I\ddot{\varphi} = u - b\dot{\varphi} - u_S(\varphi) - u_F(\dot{\varphi}) + u_{HS} \quad (2.14)$$

kde

$$\delta = \varphi - \varphi_{OP} \quad (2.15)$$

$$u_{HS} = \begin{cases} -k_{HS}\delta - b_{HS}|\delta|\dot{\delta}, & \text{pro } \varphi > \varphi_{OP} \\ 0 & \text{jinak} \end{cases} \quad (2.16)$$

Volba konstant k_{HS} a b_{HS} je otázkou simulačního experimentování.

2.3 Model pro HIL simulaci

Model použitelný pro HIL simulaci představuje další krok navazující na virtuální prototyp. Model musí mimo základní chování (kap. 2.1) zajistit věrohodnou reprezentaci jednostranných vazeb (kap. 2.2) a to *v reálném čase na prototypovém hardwaru*. V našem případě se jednalo o zařízení DS1103 firmy dSPACE. Z modelu v Simulinku je pomocí RTW a RTI vygenerován C kód, zkompileován a nahrán do cílového hardwaru. Zásadním omezením zde je možnost použít pouze řešič ODE s konstantním krokem. Model škrticí klapky je přitom díky přítomnosti suchého tření a modelu jednostranné vazby silně numericky tuhým (stiff) systémem. Můžeme tedy očekávat komplikace při volbě optimálního kroku simulace. Podrobnější rozbor a testování vlivu typu řešiče s pevným krokem a délky kroku integrace jsou uvedeny v plném textu práce.

3. Odhad stavů a parametrů systému

V této kapitole popíšeme výsledky, kterých jsme dosáhli v oblasti odhadování stavů a parametrů systému škrtecí klapky. Díky silné nelinearitě pružiny, významnému vlivu suchého tření a velkému rozsahu provozních podmínek (teplota, vibrace, mazání) jsou uvedené úlohy netriviální a konkrétní použitá metoda musí být uvážlivě volena podle charakteru požadavku na odhad stavu nebo parametru.

3.1 Offline odhad parametrů modelu – statická charakteristika

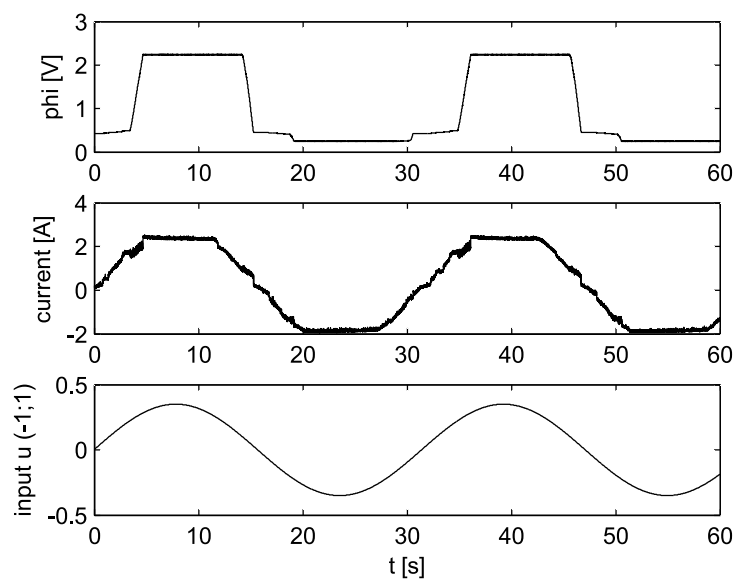
Základní vlastnosti polohového servopohonu s vratnou pružinou jsou dány statickou charakteristikou $u - \varphi$. V případě lineární pružiny a zanedbatelného tření dostaneme přímkovou charakteristiku. V případě, že je v soustavě podstatný vliv suchého tření, lze získat pouze kvazistatickou charakteristiku s výraznou hysterezi.

Na vstup u přivedeme sinusový signál o relativně malé frekvenci, který volíme tak, aby došlo k plnému otevření klapky. V našem případě postačovalo 35% z plného rozsahu napájecího napětí. Při použití větší hodnoty by docházelo ke zbytečnému přehřívání vinutí elektromotoru. Na obrázku 3.1 vidíme odezvu (natočení klapky) v časové oblasti. Z průběhu je patrné významné pásmo necitlivosti okolo LH polohy a velká citlivost v pracovní oblasti (při překonání kritické síly dojde k velmi rychlému otevření klapky). Podstatně zajímavější je vykreslení $\varphi - u$ charakteristiky na obr. 3.2, ze které lze získat následující poznatky. Pružina zajišťující návrat do neutrální (LH) polohy má na počátku velmi strmou charakteristiku a dále při otevření naopak velmi plochou. Pružina je tedy nelineární a můžeme ji aproximovat po částech lineární závislostí (rov. 2.9). Suché tření způsobuje významnou hysterezi. Velikost třecí síly přitom můžeme odhadnout přibližně jako 10% z u . V okolí neutrální LH polohy je patrná vůle. Chování systému se jeví jako deterministické – vykreslený průběh $\varphi - u$ reprezentuje několikanásobné otevření a zavření klapky.

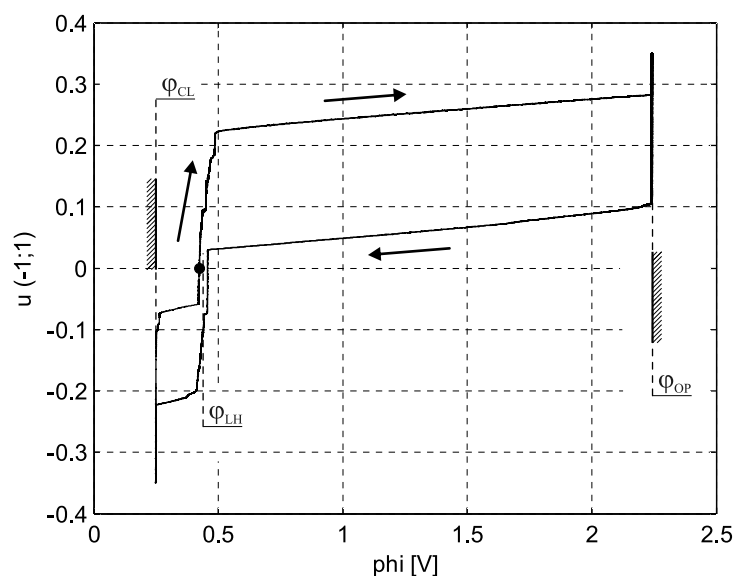
Získaná kvazistatická charakteristika nám potvrzuje základní představu o nelinearitě pružiny a významu suchého tření, přičemž z ní lze odečíst i odhady příslušných konstant. Pro jejich zpřesnění a pro získání konstant souvisejících s dynamickými jevy však musíme provést další experimenty s využitím nástroje Simulink Parameter Estimation. Jejich podrobný popis a výsledky jsou uvedeny v plném textu habilitační práce. Veškeré experimenty proběhly ve spolupráci s prof. B. Lee v laboratoři *Automotive Mechatronics Parts Nurturing Group, Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu, Korea* v rámci dvouměsíční odborné stáže.

3.2 Odhad stavů a parametrů pomocí EKF

Kalmanův filtr je standardním nástrojem pro odhad stavů lineárního systému. V případě silně nelineárních systémů je možné použití rozšířeného Kalmanova filtru (EKF), odhad stavů ale na rozdíl od lineární úlohy není optimální a vlastnosti výsledného estimatoru je nutné prověřit simulací. Klíčovou nelinearitou je suché tření a vlastnosti



Obr. 3.1: Odezva systému na pomalý sinusový signál na vstupu (vykreslení v časové oblasti)



Obr. 3.2: Odezva systému na pomalý sinusový signál na vstupu ($\varphi-u$ kvazistatická charakteristika)

EKF se tedy budou lišit podle jeho použitého modelu. V následujícím textu popíšeme implementaci EKF se statickým modelem tření s externí silou.

EKF vyžaduje integraci nelineárního modelu soustavy. Rovnici 2.13 vyjádříme ve tvaru

$$I\ddot{\varphi} = F_e - u_{FE}(\dot{\varphi}) \quad (3.1)$$

kde

$$F_e = u - b\dot{\varphi} - u_S \quad (3.2)$$

Třecí sílu u_{FE} pak vyjádříme jako

$$u_{FE} = \begin{cases} \operatorname{sgn}(v)F_k, & |v| > \varepsilon \\ F_e, & |v| < \varepsilon \wedge |F_e| < F_S \\ \operatorname{sgn}(F_e)(1+a)F_k, & \text{jinak} \end{cases} \quad (3.3)$$

Stavový vektor rozšíříme o odhadovaný parametr F_k na tvar

$$\dot{\mathbf{x}} = [\varphi, \dot{\varphi}, F_k]^T \quad (3.4)$$

a standardním způsobem zapíšeme nelineární stavový model:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} x_2 \\ 1/I(F_e + u_{FE}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Tím je nelineární model pro predikci v EKF definován. Dále budeme potřebovat linearní zaci tohoto modelu (jakobián):

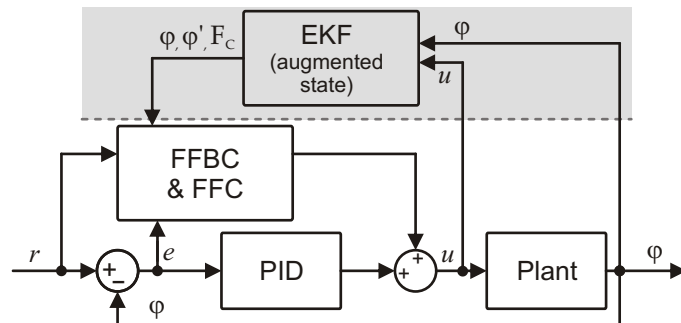
$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -J_S/I & -b/I & -J_F/I \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

kde

$$J_F = \begin{cases} \operatorname{sgn}(v), & |v| > \varepsilon \\ 0, & |v| < \varepsilon \wedge |F_e| < (1+a)F_k \\ \operatorname{sgn}(F_e)(1+a), & \text{jinak} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$J_s = \begin{cases} k_{OP}, & \varphi > \varphi_{LHO} \\ k_{CL}, & \varphi < \varphi_{LHC} \\ k_{LH}, & \text{jinak} \end{cases} \quad (3.8)$$

Navržený a testovaný EKF je schopen dobře sledovat pomalé změny F_k . Implementační detaily a výsledky jsou uvedeny v plném textu habilitační práce.



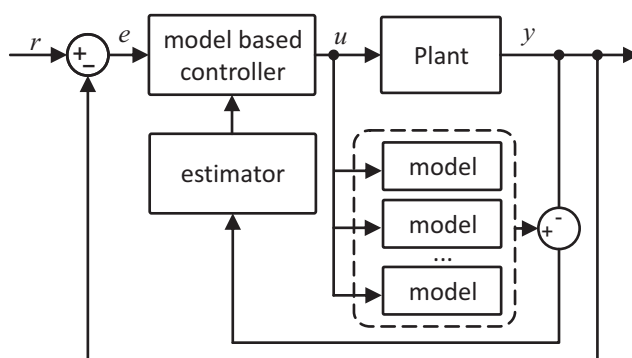
Obr. 3.3: Blokový diagram navrženého řízení s odhadem velikosti třecí síly pomocí EKF s rozšířeným stavovým vektorem

3.3 Odhad parametrů systému pomocí MMS

V této části popíšeme aplikaci tzv. multi-model simulace (MMS) na odhad parametrů škrticí klapky. Některé výsledky simulačních experimentů uvedených v této kap. dále byly publikovány v konferenčním příspěvku [A6].

Návrh řídicích členů a estimátorů s využitím běhu několika (mnoha) paralelních simulačních modelů je aktuálně předmětem výzkumu i zájmu aplikační sféry. Velkou publikační aktivitu lze zaznamenat zvláště v oblasti řízení chemických a technologických procesů, kde je typickým problémem obtížnost nalezení matematického popisu spojená s významnými změnami parametrů procesu za provozu [6, 56]. Z dalšího popisu je zřejmé, že MMS je značně výpočetně náročný přístup a jeho aplikace je tedy prakticky možná pouze s rozvojem výpočetní (řídicí) techniky v posledních letech.

Základní schéma MMS je znázorněno na obr. 3.4. Reálný vstupní signál u je použit jako vstup pro banku paralelně běžících dynamických modelů systému. Výstup z reálného systému je pak porovnán v bloku estimator s výstupem jednotlivých modelů. Na základě definovaného kritéria je vybrán nejlepší model a jeho parametry použity (např.) v regulátoru, který využívá model. V našem případě škrticí klapky se může jednat o kompenzátor tření.



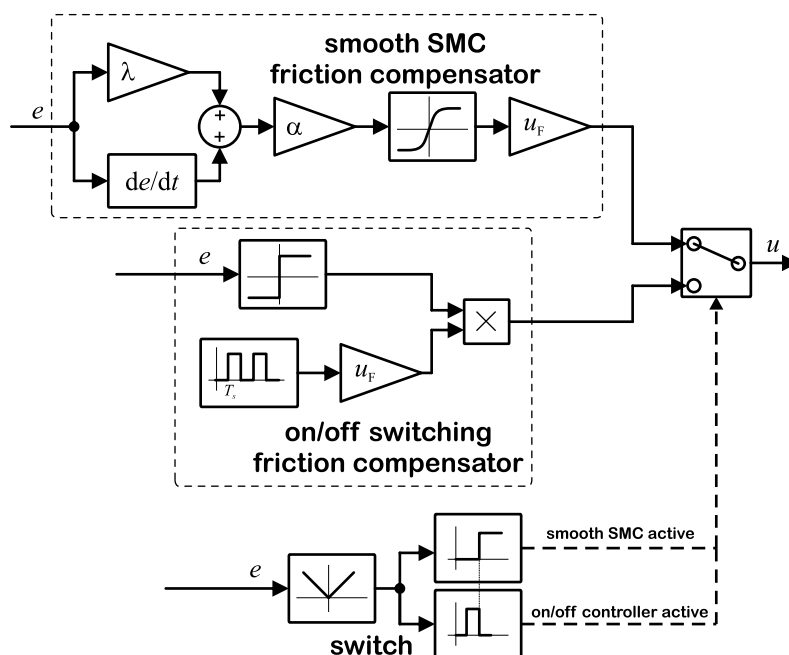
Obr. 3.4: Blokový diagram multi-model simulace využití pro odhad parametrů

V plném textu habilitační práce jsou dále diskutovány otázky provádění změn parametrů jednotlivých modelů při simulaci, definice kritéria vzdálenosti modelů a odstranění vlivu rozdílných počátečních podmínek simulace a reálného zařízení. Dále jsou zde uvedeny implementační detaily a výsledky, které lze považovat za úvod do studia možností použití MMS přístupu pro odhad parametrů dynamického systému v reálném čase. Jeho potenciál by mohl ještě významně růst pokud by se simulaci jednotlivých modelů podařilo paralelizovat a výpočty realizovat na vícejádrovém procesoru, případně GPU.

4. Řídicí algoritmus založený na modelu s odhadovanými parametry

V této části habilitační práce byly porovnány tři typy kompozitních regulátorů se samostatným PID regulátorem a to pro dva odlišné typy referenčního signálu. V plném textu práce je podrobně popsána struktura navržených nelineárních regulátorů, způsob jejich multikriteriálního hodnocení, implementační detaily a popis simulace výpočetního zpoždění reálné řídicí jednotky. Zde se omezíme pouze na uvedení struktury nově navrženého kompozitního regulátoru typu C na obr. 4.1. Jeho porovnání s ostatními testovanými typy regulace pro schodovitý referenční signál je uvedeno v tab. 4.1 a na obr. 4.2.

Tento regulátor se skládá z běžného PID doplněného o zpětnovazební a/nebo dopřednou kompenzaci statické či dynamické charakteristiky systému. Kombinuje výhody SSMC a klasické kompenzace tření jako funkce chyby polohy [22].

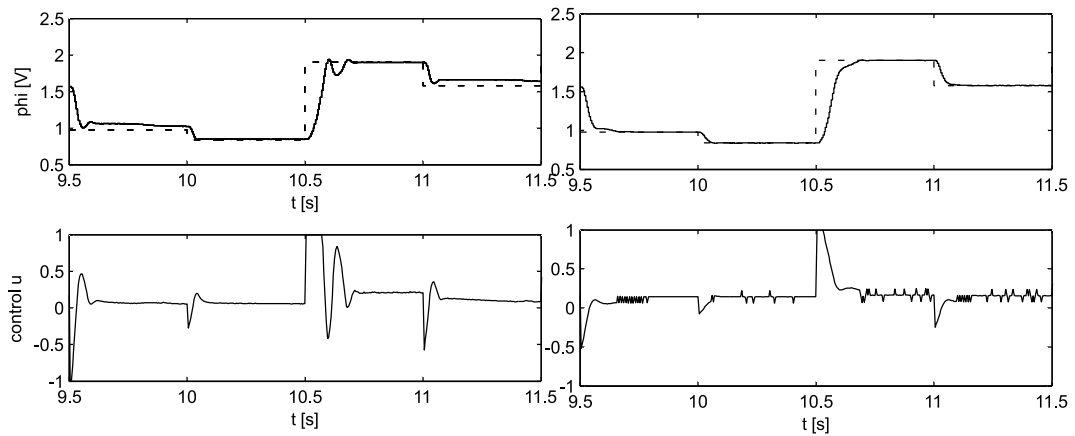


Obr. 4.1: Blokový diagram kompenzátoru tření v regulátoru C

Klíčové výsledky popsané v této kapitole byly získány během odborné stáže v laboratoři prof. B. Lee v *Automotive Mechatronics Parts Nurturing Group, Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu, Korea* a byly publikovány v [A9].

Tab. 4.1: Multikriteriální ohodnocení testovaných variant regulátorů – schodovitý referenční signál

	Minimalní vzorkování $50\mu\text{s}$				Realistické vzorkování 5ms			
	MSE $1\text{e-}3$	MAE $1\text{e-}3$	maxE	MAE(u) $1\text{e-}3$	MSE $1\text{e-}3$	MAE $1\text{e-}3$	maxE	MAE(u) $1\text{e-}3$
PID	0,414	14,6	0,0491	34,1	0,850	20,4	0,0849	40,4
A	0,00145	0,968	0,0049	79,5	0,0499	4,80	0,0299	20,2
B	0,00116	0,863	0,0039	70,4	0,0158	2,80	0,0150	44,4
C	0,00183	1,1	0,0053	0,660	0,00214	1,04	0,0089	15,5
D			–				–	



Obr. 4.2: Odezva PID (vlevo) vs. regulátoru C (vpravo) pro schodovitý referenční signál a vzorkování 5ms

5. Řídicí algoritmus založený na učícím se inverzním modelu dynamiky

V této kapitole je popsán návrh a testování nelineárního kompozitního regulátoru, ve kterém je dopředný kompenzátor (FFC) založen na inverzním modelu systému vytvořeném automaticky na základě měřených vstupně-výstupních dat za pomoci lokálních lineárních aproximátorů. Optimální automatický návrh řídicího členu a jeho adaptivní chování je obecně pro nelineární systémy stále otevřeným vědeckým a inženýrským problémem. Základní myšlenka této kapitoly byla publikována v [A7]. Struktura kompozitního regulátoru zůstává shodná s předchozí kapitolou, zcela se však mění charakter použitého modelu soustavy. Zatímco v předchozí kapitole je použit fyzikální model s odhadnutými parametry, v této kapitole získáváme model automaticky při procesu učení na základě naměřených a zpracovaných vstupně-výstupních dat.

Použitý přístup lze shrnout takto:

- 1) PID jako součást kompozitního regulátoru má nastaveno relativně malé zesílení, pro daný charakter soustavy (škrticí klapka) je tedy stabilnější.
- 2) Signál z polohového sensoru filtrujeme a numerickou derivací počítáme rychlost. Vzhledem k tomu, že učící se algoritmus pracuje s posunutým časem, jedná se o offline filtraci, lépe řečeno o vyhlazování.
- 3) Samoučící člen je zapojen v dopředné vazbě a jeho vstupem je pouze poloha a filtrovaná rychlost. Zanedbáváme tedy vliv setrvačnosti.
- 4) Samoučící člen je dále rozdělen podmínkou $v = 0$ na dva samostatné aproximátory, což vzhledem k charakteru aproximované funkce (suché tření je podstatnou složkou) významně vylepšuje proces učení.

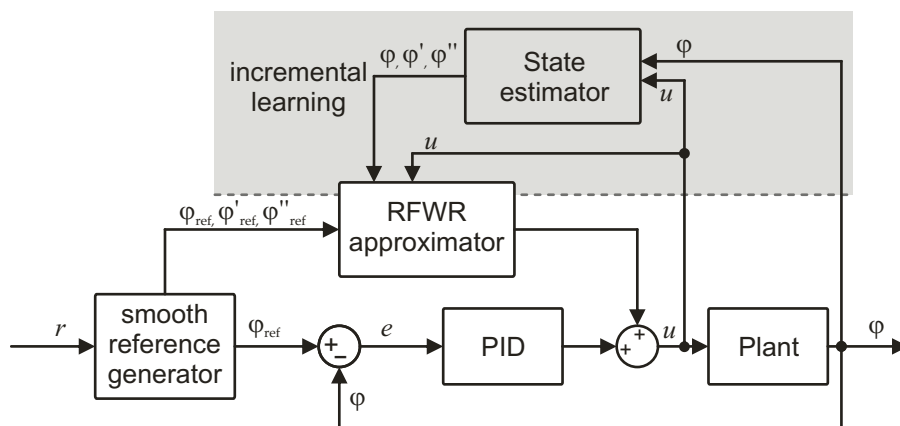
5.1 Základní předpoklady a struktura regulátoru

Uvažujme následujícím způsobem formulovaný problém:

- 1) Řízená soustava je stabilní nebo stabilizovaná lineárním regulátorem, přičemž kvalita řízení je nedostačující. V takovém případě snadno navrhne PID regulátor, který však zajistí dosažení požadované hodnoty za mnohonásobně větší čas, než požadujeme a s ustálenou výchylkou příp. překmitem.
- 2) Předpokládáme, že máme k dispozici generátor spojitě a hladké trajektorie, jehož výstupem je poloha $\varphi(t)$, rychlost $\dot{\varphi}(t)$ a zrychlení $\ddot{\varphi}(t)$.
- 3) Inverzní model formulujeme jako statický model $u = f(\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi})$ kde f musí být funkce.
- 4) Předpokládáme pouze obecné apriorní znalosti systému: základní uspořádání škrticí klapky, významné suché tření.
- 5) Předpokládáme, že se parametry modelu mění pomalu (např. vlivem změny teploty motoru).

Základní myšlenkou kompozitního regulátoru je výpočet inverzního modelu v dopředné smyčce a korekce nepřesností modelu, poruch apod. klasickým lineárním regulátorem, nejčastěji PID. V našem případě, kdy je inverzní model tvořen online učícím se algoritmem, se bude regulátor skládat z následujících komponent: 1) generár spoji-

tého hladkého referenčního signálu; 2) určení polohy, rychlosti a zrychlení z měřeného signálu; 3) RFWR aproximátor inverzního dynamického modelu zařazen v dopředné vazbě (FFC); 4) PID. Blokové schéma je znázorněno na obr. 5.1.



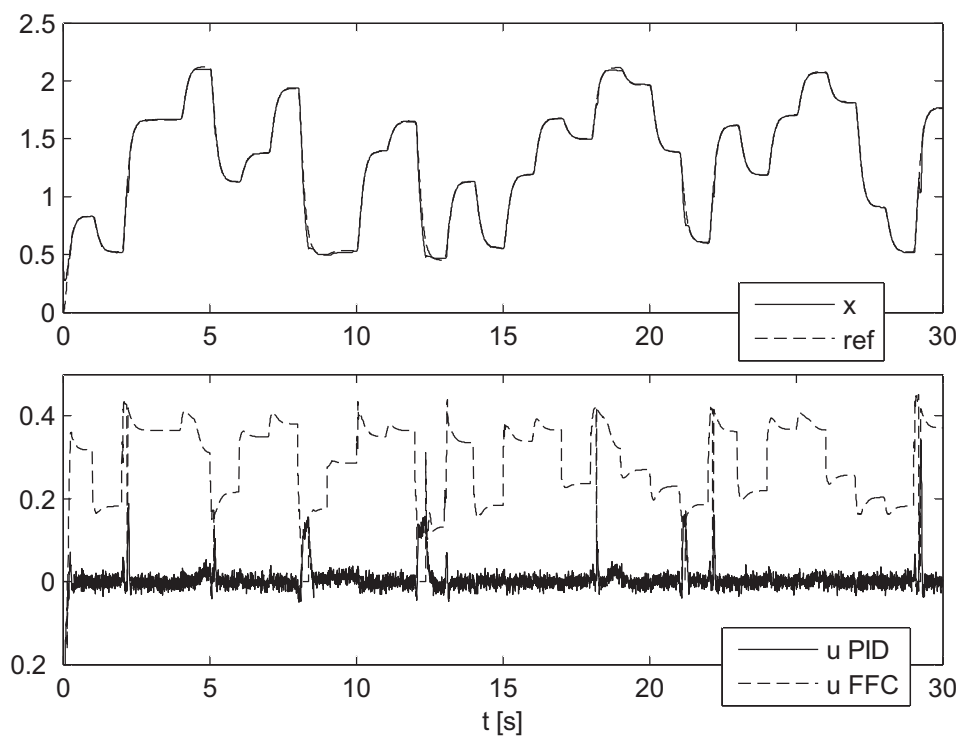
Obr. 5.1: Blokový diagram využití RFWR aproximátoru pro FFC

5.2 Ukázka z výsledků simulačních experimentů

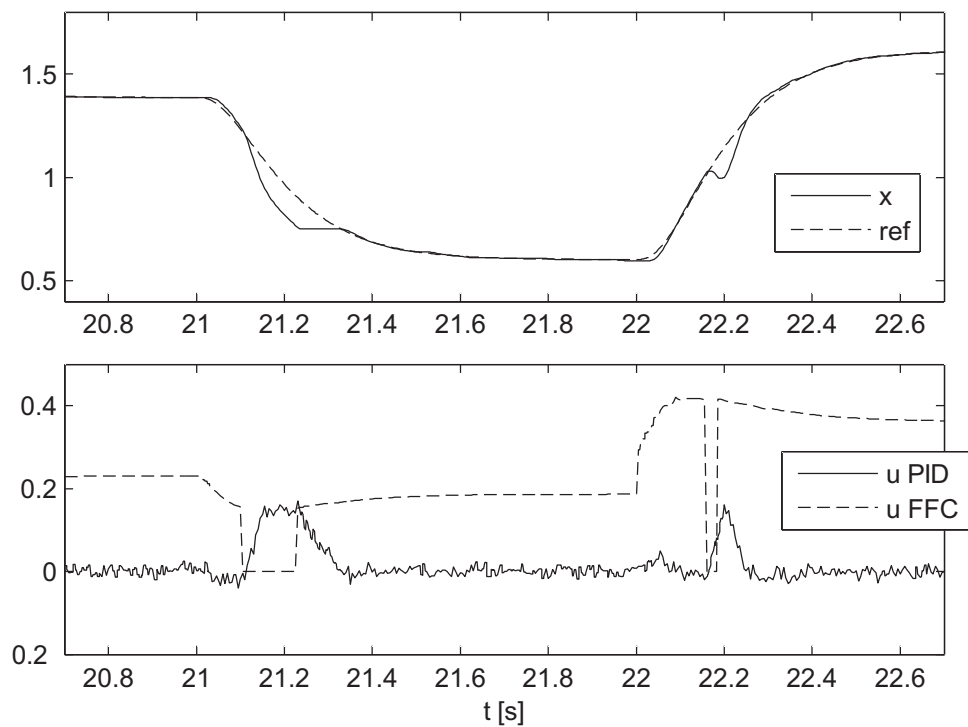
V plném textu habilitační práce je uvedena řada výsledků simulačních experimentů s uvažováním znalosti zrychlení a především dále se zanedbáním zrychlení. Omezíme se zde pouze na ukázkou činnosti RFWR kompenzátoru, kdy byl použit simulační model s odhadnutými parametry, byl aplikován bílý aditivní šum na výstupu (potenciometr) s rozptylem $\sigma = 0.005$, vzorkování simulace bylo $T_s = 0.005$, pro filtraci bylo použito vyhlazování funkcí `smooth` v Matlabu – velikost okna = 30. Dále byla inicializována prázdná RFWR struktura dvou aproximátorů a při učení RFWR byla data selektována podmínkou $v > 0.1$ resp. $v < -0.1$. Výsledky jsou uvedeny na obr. 5.2 a 5.3.

5.3 Shrnutí a další možnosti výzkumu

Uvedený přístup lze realizovat s obecně jakýmkoliv aproximátorem, který umožňuje doučování. Při prezentovaných simulačních experimentech byl použit algoritmus RFWR [42], který je bezpaměťový a u kterého byla ukázána dobrá schopnost adaptivity, jejíž míru lze podle potřeby nastavit. Aproximovaný model se tak může při provozu zařízení přizpůsobovat změně pracovních podmínek (teplota, mazání, opotřebení) a z toho vyplývajících parametrů (velikost tření, viskózního tlumení). Simulační experimenty se soustředily výhradně na konkrétní model škrticí klapky, lze však důvodně předpokládat, že bude algoritmus i celý přístup obecně použitelný na celou třídu podobných elektromechanických aktuátorů. Získané výsledky jsou poměrně povzbudivé a jsou také potenciálním základem dalšího výzkumu, který by se mohl zaměřit na optimalizaci algoritmu bezpaměťového lokálního modelování pro výpočetní prostředek s limitovanými zdroji.



Obr. 5.2: Ukázka účinnosti RFWR kompenzátoru: přesnost polohového řízení (nahore), podíl akce PID regulátoru a RFWR dopředného kompenzátoru



Obr. 5.3: Ukázka účinnosti RFWR kompenzátoru – detail

6. Vývoj ECU

V této kapitole jsme stručně naznačili moderní přístup k vývoji softwaru pro řídicí jednotku, který využívá kompletního modelu řízené soustavy (klapka) a řídicí jednotky (model based design), používá celočíselné datové typy a automaticky generovaný C kód. Kvalita implementovaného regulátoru je testována pomocí HIL simulace.

6.1 Hardwarová specifikace ECU

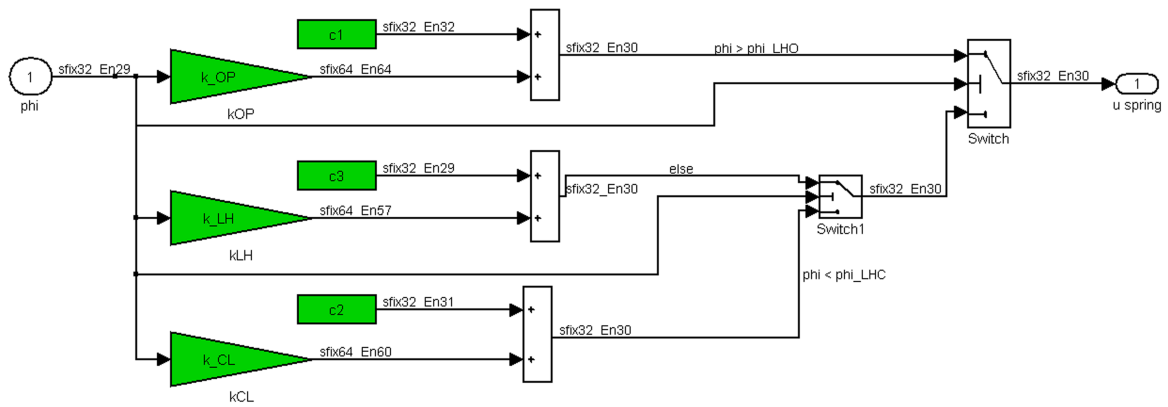
Vzhledem k tomu, že naším cílem bylo ukázat současné možnosti návrhu ECU určené pro hromadnou výrobu s použitím moderních simulačních technologií, byl výběr podmíněn následujícími faktory: nízká cena, absence matematického koprocesoru (FPU) a existence podpory pro generování kódu ze Simulinku pro daný mikrokontrolér. Na základě výše uvedených kritérií a s ohledem na možnosti našeho pracoviště byl pro praktické experimenty vybrán 32-bitový mikrokontrolér firmy Microchip PIC32MX360F512L. Je dostupný jak v pouzdře QFN, tak v TQFP a je tedy vhodný pro kusovou ruční výrobu v prostředí naší laboratoře.

6.2 Implementace řídicího algoritmu v celočíselných datových typech (Fixed-Point)

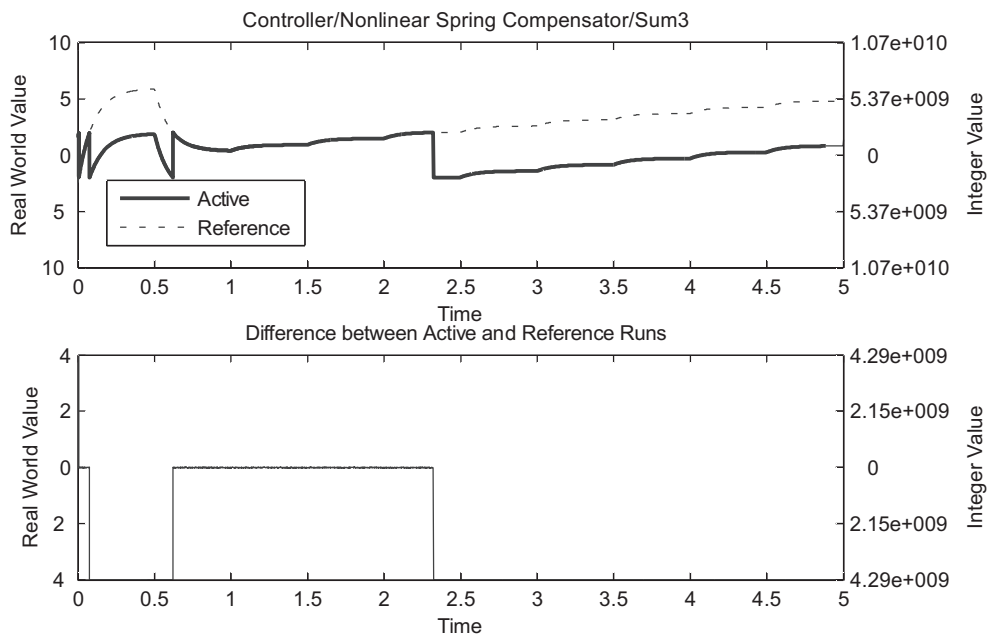
Pro použití mikrokontroléru bez FPU je zásadní implementace výpočtů v aritmetice s pevnou desetinnou čárkou (FP). FP výpočty jsou běžně několikanásobně rychlejší, výjimečné není ani zrychlení o jeden řád a více. Pro složitější úlohu tedy velmi rychle zjistíme, že kód implementovaný s plovoucí čárkou nelze počítat s požadovaným vzorkováním. Stále se zvyšující zájem o FP výpočty je dán také možnostmi FPGA, na kterých nelze pracovat s plovoucí aritmetikou.

Simulink má díky Simulink Fixed Point velmi slušnou podporu FP datových typů, které lze individuálně specifikovat pro podporované bloky. Po zadání minimální a maximální hodnoty a délky slova lze automaticky určit počet bitů za desetinnou čárkou. Mezi jednotlivými datovými typy se převádí pomocí bloku Data type conversion. Na obr. 6.1 je ukázka vizualizace datových typů pro jednotlivé signály pro řídicí subsystém kompenzace pružiny.

Základním přístupem pro nastavení pozice desetinné čárky u FP datových typů a validaci FP kódu je jeho porovnání s výpočtem s plovoucí čárkou (double). K tomuto účelu jsme použili nástroj Fixed Point Tool (FPT). Na obr. 6.2 je ukázka výsledku, kdy došlo k přetečení FP proměnné a přitom nebyla zvolena volba „saturace při přetečení“.



Obr. 6.1: Ukázka subsystému kompenzace nelineární pružiny s vyznačením FP datových typů u jednotlivých signálů



Obr. 6.2: Ukázka zobrazení přetečení FP datového typu vzhledem k referenčnímu double (výstup z FPT)

7. Závěr

Aktuálnost řešené problematiky

Náplní této práce je studium současného stavu, teoretický rozbor, simulační modelování a reálné experimenty v oblasti návrhu kompozitního regulátoru pro třídu nelineárních polohově řízených aktuátorů. Experimentální část práce byla prováděna na jednom konkrétním automobilovém aktuátoru (škrticí klapka v sacím potrubí), výsledky jsou ale zobecnitelné a použitelné v řadě jiných aplikací v automobilovém průmyslu (např. EGR ventily) i mimo něj (např. řízení směšovacích ventilů).

Aktuálnost řešené problematiky je vysoká. *Vědecký význam* lze ukázat na množství publikací, které se věnují konkrétně řízení škrticí klapky [2, 4, 5, 8, 12, 20, 36, 50, 52, 59, 61], ale i obecně návrhu nelineárního řízení aktuátorů, identifikaci nelineárních systémů a využití metod umělé inteligence a strojového učení pro modelování těchto systémů.

Praktický význam práce vyplynul také z diskusí s odborníky, kteří se v ČR i ve světě výrobou a nasazením podobných aktuátorů v automobilovém průmyslu zabývají (Honeywell, Continental). Potenciál dalšího výzkumu je významný minimálně z těchto důvodů:

1. Vývoj komponent aktuátoru (elektromechanická část, řídicí jednotka (ECU)) probíhá v praxi odděleně. Důvodem je vysoce konkurenční prostředí, kdy výrobu ECU i aktuátorů realizuje celosvětově několik firem pro všechny automobilky. Aktuátor i ECU běžně pochází od různých výrobců. Tím se ovšem do značné míry redukuje možnost aplikace „mechatronických přístupů“ k řešení, kdy je systém navrhován jako celek.
2. Řídicí algoritmus nakupované ECU je vlastnictvím dané firmy a přesnější znalost jeho struktury není dostupná – a to ani výrobci aktuátorů.
3. Přestože jsou obecně rotační aktuátory podobné koncepce a konkrétně škrticí klapky standardní součástí dnešních automobilů, jejich provoz je spojen se stále neuspokojivě řešenými problémy (omezená možnost diagnostiky, omezení funkčnosti při znečištění atd.).

Získání dalších inženýrských i vědeckých poznatků z této oblasti by mohlo mít pozitivní dopad na řadu firem působících v ČR, které se zabývají výrobou různých aktuátorů pro automobilový průmysl.

Důležitost a zajímavost řešené problematiky dokumentují i práce autora publikované na konferencích [A7] (IEEE), [A5], v časopise s IF [A9], v odborném časopise [A8] a jako kapitola v knize [A4].

Významná část práce na vývoji modelu, identifikaci systému a návrhu kompozitního regulátoru byla provedena během dvou zahraničních stáží autora v laboratoři prof. B. Leeho (Automotive Mechatronics Parts Nurturing Group, Keimyung University, Daegu, Korea).

Shrnutí obsahu práce

Na základě studia dostupné literatury a praktických experimentů byl formulován nelineární dynamický model soustavy jako soustava ODE, který popisuje pohyb klapky v pracovní oblasti. Dále pak byly vytvořeny dva speciální modely:

- model zahrnující i omezení pohybu v rotační vazbě (unilaterální vazby), který může být považován za *virtuální prototyp* zařízení, a
- model vhodný pro výpočty na real-time platformě (dSPACE, dsPIC), který je omezen použitím pevného kroku integrace.

Následně byly v kap. 3 aplikovány čtyři přístupy k nalezení parametrů fyzikálního modelu nelineární soustavy.

- Základem je *offline dávkový odhad parametrů*, který slouží jako reference pro ostatní online metody a získané parametry byly také použity při simulačních experimentech (např. MMS v kap. 3.3).
- *Rozšířený Kalmanův filtr (EKF)* je klasickým algoritmem pro odhad stavů nelineárního systému. Vyžaduje model a s použitím techniky rozšířeného stavu (**augmented state**) umožňuje i odhad parametrů. Jeho konvergenci obecně nelze zaručit a typicky selhává při pokusech odhadovat dynamické stavy modelů tření (Reset Integrator, LuGre). V této práci (v kap. 3.2) jsme ukázali, že i při použití statického modelu tření s externí silou v algoritmu EKF pracuje odhad třecí síly a na něm založený kompenzátor velmi dobře.
- *Pozorovatel s vysokým zesílením (HGO)* nevyžaduje znalost modelu systému. Simulační výsledky ukazují, že přesnost odhadu rychlosti je za určitých podmínek srovnatelná s EKF.
- *Multi-model simulace (MMS)* je metodou pro odhad parametrů extrémně náročnou na výpočetní zdroje. Zásadní výhodou metody je, že neklade prakticky žádná omezení na charakter, nelinearitu a vlastnosti soustavy. Vyžaduje model, ale umožňuje použití různých typů parametrizovaných modelů a tím zvyšuje robustnost metody. V této práci (kap. 3.3) a v publikaci [A6] jsme ukázali konkrétní úspěšné simulační experimenty s použitím MMS přístupu pro odhad velikosti (proměnné) třecí síly.

V kap. 4 je představen nový typ kompozitního regulátoru založený na znalosti přesného modelu soustavy a je provedeno multikriteriální srovnání jeho parametrů se známými přístupy. Podstatná část výsledků byla publikována v [A9].

Zcela jiný přístup je popsán v kap. 5. Regulátor sestává z PID a dopředného kompenzátoru, který je automaticky online doučován na základě zaznamenávaných vstupně-výstupních dat. Řídicí člen se tak může adaptovat na změny teploty, mazání a opotřebení aktuátoru.

V poslední kap. 6 je algoritmus navrženého regulátoru z kap. 4 upraven pro relativně méně výkonný 32-bitový mikrokontrolér PIC. S pomocí nástrojů prostředí Matlab jsou výpočty s datovými typy **double** převedeny na typy s pevnou desetinnou čárkou (**fixed point**). Následně je vytvořená řídicí jednotka testována technikou hardware-in-the-loop na zařízení dSPACE.

Přínos práce

Přínos této habilitační práce je především v následujících oblastech:

- Byl vytvořen *věrohodný simulační model konkrétního elektromechanického aktuátoru* vhodný pro hardware-in-the-loop simulaci, která vyžaduje provádění výpočtů v reálném čase. Model obsahuje i submodel kontaktu v mezní poloze aktuátoru (unilaterální vazba) a byl odladěn na základě naměřených experimentálních dat. Model je detailně popsán v kap. 2.
- Relativně *nový přístup MMS* (multi-model simulace) používaný dosud převážně při řízení chemických procesů [6] *byl úspěšně aplikován na problém online odhadu parametrů tření nelineárního systému*. Principem tohoto přístupu je paralelní výpočet sady obecně odlišných modelů soustavy v reálném čase a jejich srovnání s výstupy skutečného systému. Model s minimální chybou výstupu je vybrán jako reprezentant systému a použit v kompenzátoru pro řízení. Metoda je výpočetně náročná, při simulačních experimentech jsme však ukázali, že je použitelná na výpočetním zařízení výkonu běžného PC. Popis je uveden v kap. 3 a publikován v článku [A6].
- Byla navržena *nová varianta kompozitního regulátoru*, která kombinuje výhody SSMC a klasické kompenzace tření založené na chybě polohy. Komplexní porovnání se známými typy regulátorů ukazuje, že má nová varianta lepší vlastnosti jak s ohledem na řízenou polohu, tak míru aktivity vstupního řídicího signálu. Multikriteriální srovnávání bylo přitom založeno na experimentech prováděných na Rapid Control Prototyping zařízení dSPACE, porovnány byly čtyři typy regulátorů a zohledněn charakter referenčního signálu. Dále bylo korektně simulováno výpočetní zpoždění a možné vzorkování uvažované ECU. Podrobnosti a porovnání s existujícími regulátory jsou uvedeny v kap. 4 a publikovány v [A9].
- Simulačními experimenty byla ověřena využitelnost konceptu *adaptivního řídicího členu* založeného na částečném lokálním modelování dynamiky. Pro tvorbu dopředného kompenzátoru je použita pouze informace o poloze (měřená) a rychlosti (filtrovaná). Výsledný řídicí člen se v průběhu provozu online učí z vstupně-výstupních dat a je tak schopen reagovat na pomalé změny parametrů soustavy (opotřebení, oteplení, atd.), které jsou pro danou třídu aktuátorů typické.
- Praktickým přínosem je také úprava a implementace algoritmu kompozitního řídicího členu pro levný mikrokontrolér bez FPU s použitím nástrojů Matlab/Simulink.
- Pedagogickým přínosem práce je *komplexní zpracování celého tématu*, které přesvědčivě ukazuje na užitečnost propojení a návaznosti znalostí a dovedností v rámci oboru mechatronika. Komplexní přístup k návrhu řídicího členu pro daný aktuátor vyžaduje studium dynamiky těles, simulačního modelování, identifikace systémů a řízení v reálném čase. Výsledky této práce mohou být tedy také dále využity jako případová studie při dalším rozvoji studijního oboru.

Náměty a cíle dalšího výzkumu

V této práci bylo naznačeno několik cest, které mají potenciál dalšího výzkumu a rozvoje.

Především je to obecná otázka automatické návrhu modelu systému a jeho využití pro řízení. Na základě našich zkušeností se přístup založený na lokálním modelování bez paměti (např. RFWR) jeví jako velice perspektivní. Zatímco však současný vývoj směřuje spíše k realizaci úloh s vysokou dimenzí stavového prostoru [54], pro naše aplikace by bylo vhodnější vyvíjet algoritmy pro nízkou dimenzi ovšem s podstatně menšími nároky na hardware (rychlost výpočtu i paměť). Takový algoritmus by pak byl implementovatelný i na levný mikrokontrolér a otevřel by tak cestu k praktickému použití adaptivních systémů založených na lokálních modelech.

Vytvořený (naučený) model přitom nutně nemusí být použit pouze pro řízení, ale i pro diagnostiku, predikci a případně simulaci.

V kap. 4 jsme ukázali, že kvalita kompenzace tření silně závisí na časovém kroku řídicí smyčky. Přirozeně se zde tedy nabízí možnost implementace části nebo celého algoritmu v FPGA, což by umožnilo realizaci s řádově nižším krokem.

V neposlední řadě stojí za pozornost možnost dalšího vývoje MMS přístupu k odhadu parametrů a stavů soustav. V blízké době patrně nelze očekávat nasazení těchto metod v řídicích jednotkách, uplatnění by ale mohli díky vícejádrovým a GPU výpočtům najít při simulačním modelování a odhadu parametrů na PC.

Použité veličiny

α	parameter v SMC
η_{12}	celková účinnost mechanického systému
φ	úhel hřídele klapky
φ_{ref}	referenční natočení klapky
φ_{LH}	LH pozice klapky
φ_M	natočení hřídele motoru
λ	parameter v SMC
μ	koeficient suchého tření
b_{mech}	mechanické viskózní tření
$c\phi$	konstanta motoru
e	chyba úhlu natočení
i	elektrický proud
i_{12}	celkový převodový poměr od motoru po klapku
I_{red}	setrvačný moment ve fyzikálních jednotkách
I	setrvačný moment v normalizovaných jednotkách
k_p	proporcionální zesílení PID regulátoru
k_I	integrální zesílení PID regulátoru
k_{xy}	tuhost nelineární pružiny v úseku xy
k_S	tuhost pružiny
L	indukčnost vinutí motoru
m_e	elektrický moment přepočtený na hřídel klapky
m_{eM}	elektrický moment na hřídeli motoru
m_M	mechanický moment přepočtený na hřídel klapky
$M_{(e,v,s,F)}$	moment elektrický, viskózní, pružiny, tření vyjádřený ve fyzikálních jednotkách
N	normálová síla
N	počet vzorkovacích kroků
p	stav v třecím modelu Reset Integrator
R	odpor vinutí motoru
T_d	derivační časová konstanta v PID regulátoru
T_s	vzorkovací perioda
u	řídící vstup do systému, napětí normalizováno na rozsah (-1;1)

Použité zkratky (jsou zahrnuty všechny použité z plné verze habilitační práce)

ADC	analogově-digitální převodník
CAN	Controller area network, standardní sběrnice používaná v automobilovém průmyslu
CFD	Computational Fluid Dynamics
DAC	digitálně-analogový převodník
ECU	Electronic Control Unit
EKF	Extended Kalman Filter – rozšířený KF
FP	Fixed Point – výpočty s pevnou desetinnou čárkou
FPA	Fixed Point Advisor – softwarový nástroj v Simulink/Simulink Fixed Point
FPGA	Field-programmable gate array, programovatelné hradlové pole
FPT	Fixed Point Tool – softwarový nástroj v Simulink/Simulink Fixed Point
FPU	Floating Point Unit, matematický koprocesor
HGO	pozorovatel s vysokým zesílením, high gain observer
HIL	Hardware-in-the-loop
HW	hardware
KF	Kalmanův filtr
LH	limp home - nulová (neutrální) poloha škrticí klapky
LIN	Local Interconnect Network – master-slave komunikační systém určený pro distribuované elektronické systémy vozidel
LWPR	Locally Weighted Projection Regression
LWR	Locally Weighted Regression
MMS	multi-model simulace
MSE	střední kvadratická chyba, mean square error
ODE	obyčejná diferenciální rovnice
PID	proporcionálně-integračně-derivační regulátor
PIL	processor-in-the-loop
PWM	pulzně-šířková modulace
RCP	Rapid Control Prototyping
RFWR	Receptive Field Weighted Regression
RT	real-time
RTT	Real-Time toolbox
RTW	Real-Time Workshop
RTWT	Real-Time Windows Target
SIL	software-in-the-loop
SPE	Simulink Parameter Estimation
(S)SMC	(Smooth) Sliding Mode Control
SPE	Simulink Parameter Estimation
SPI	Serial Peripheral Interface
SW	software
UKF	unscentovaný Kalmanův filtr

Použitá literatura (jsou zahrnuty všechny použité zdroje z plné verze habilitační práce)

- [1] Åström, K. J.; Wittenmark, B.: *Computer-controlled systems (3rd ed.)*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1997, ISBN 0-13-314899-8.
- [2] Aono, T.; Kowatari, T.: A Throttle Control Algorithm for Improving Engine Response Based on the Characteristics of Electronic-Throttle-Control Actuator. In *IECON*, 2001.
- [3] Atkeson, C. G.; Moore, A. W.; Schaal, S.: Locally weighted learning. , č. 1-5, 1997: s. 11–73.
URL <http://www-clmc.usc.edu/publications/A/atkeson-AIR-I-1997.pdf>
- [4] Baotic, M.; Vasak, M.; Morari, M.; aj.: Hybrid system theory based optimal control of an electronic throttle. In *American Control Conference, Proceedings of the 2003*, 2003.
- [5] Beghi, A.; Nardo, L.; Stevanato, M.: Observer-based discrete-time sliding mode throttle control for drive-by-wire operation of a racing motorcycle engine. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, ročník 14, 2006: s. 767–775.
- [6] Boling, J. M.; Seborg, D. E.; Hespanha, J. P.: Multi-model adaptive control of a simulated pH neutralization process. *Control Engineering Practice*, ročník Vol. 15, 2007.
- [7] Box, G. E. P.; Draper, N. R.: *Empirical Model-Building and Response Surfaces*. Wiley, p. 424. ISBN 0471810339., 1987.
- [8] Contreras, A. F.; Quiroz, I. P.; Wit, C. C.: Further Results on Modelling and Identification of an Electronic Throttle Body. In *10th Mediterranean Conference on Control and Automation, Lisbon, Portugal, July 9-12.*, 2002.
- [9] Corke, P.: A Robotics Toolbox for MATLAB. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, ročník 3, č. 1, Březen 1996: s. 24–32.
- [10] Craig, J.: *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Addison-Wesley, 1989.
- [11] Crassidis, J. L.; Junkins, J. L.: *Optimal Estimation of Dynamic Systems*. Chapman & Hall, 2004.
- [12] Deur, J.; Pavkovi, D.; Jansz, M.; aj.: Automatic Tuning of Electronic Throttle Control Strategy. In *11th Mediterranean Conference on Control and Automation MED 2003, Rhodes, Greece, June 18-20*, 2003.
- [13] Duník, J.: *Návrh nelineárního systému odhadu v úlohách filtrace, predikce a vyhlazování*. Dizertační práce, Katedra kybernetiky, ZČU Plzeň, 2007.
- [14] Dutton, K.; Thompson, S.; Barraclough, B.: *The Art of Control Engineering*. Prentice Hall, 1997.
- [15] Faik; Witteman: Modeling of Impact Dynamics: A Literature Survey. In *2000 International ADAMS User Conference*, 2000.
- [16] Gelb, A.: *Applied Optimal Estimation*. The M.I.T. Press, 1974.
- [17] dSPACE GmbH: *DS 1103 PPC Controller Board - Features, release 5.1*. 2006.
- [18] dSPACE GmbH: Informace o produktech. 2010.
URL <http://www.dspace.com/>
- [19] Goddard, S.: CSCE 990: Real-Time Systems. 2010.
URL <http://www.cse.unl.edu/~goddard/Courses/RealTimeSystems/Lectures/Lectures.html>
- [20] Hadilbab, M.; Chafouk, H.; Hoblos, G.; aj.: Modeling and identification of non-linear systems by a multimodel approach: application to a throttle valve. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INFORMATION AND SYSTEMS SCIENCES*, ročník

- Volume 3, Number 1, 2007: s. pp. 79–99.
- [21] Heredia, J. A.; Yu, W.: A High-Gain Observer-Based PD Manipulator. 2000.
- [22] Isermann, R.: Information processing for mechatronic systems. *Robotics and Autonomous Systems*, ročník 16, 1996: s. 117–134.
- [23] Ishikawa, M.; McCune, D.; Saikalis, G.; aj.: CPU Model-based Hardware/Software Co-design, Co-simulation and Analysis Technology for Real-Time Embedded Control Systems. In *13th IEEE Real Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, 2007.
- [24] Jung, H.; Kwak, B.; Park, Y.: Slip Controller Design for Traction Control System. *International Journal of Automotive Technology*, ročník 1, 2000: s. 48–55.
- [25] Kerhuel, L.: Simulink Blockset Embedded Target for Microchip devices. 2010.
URL http://www.kerhuel.eu/wiki/Simulink_-_Embedded_Target_for_PIC
- [26] Khalil, H. K.: *New Directions in nonlinear observer design*, kapitola High-gain observers in nonlinear feedback control. Springer Berlin / Heidelberg, 1999, s. 249–268.
- [27] Khalil, H. K.: *Nonlinear Systems*. Prentice Hall, 2002.
- [28] Ljung, L.: *System Identification - Theory for the User*. Prentice Hall, 1999.
- [29] Ljung, L.: Perspectives on System Identification. In *IFAC Congress in Seoul*, 2008.
- [30] M. Birattari, G. B.: *The Lazy Learning Toolbox for Matlab*. 1998.
- [31] Merwe, R. V. D.; Wan, E. A.; Julier, S. I.: The Unscented Kalman Filter for nonlinear estimation. 2000, s. 153–158.
- [32] Microchip: Dokumentace k mikrokontroléru PIC32MX360F512L. 2010.
URL <http://www.microchip.com/>
- [33] Nelles, O.: *Nonlinear System Identification*. Springer, 2001.
- [34] Noskievič: *Modelování a identifikace systémů*. Montanex, 1999.
- [35] Olsson, H.; Astrom, K. J.; de Wit, C. C.; aj.: Friction models and friction compensation. *Eur. J. Control*, ročník 4, č. 3, 1998: s. 176–195.
- [36] Pavkovi, D.; Deur, J.; Jansz, M.; aj.: Adaptive Control of Automotive Electronic Throttle. *Control Engineering Practice*, ročník 14, 2006: str. pp. 121–136.
- [37] Phytex: phyCORE MPC555 Rapid Development Kit. 2010.
URL <http://www.phytex.com/products/rdk/PowerPC/phyCORE-MPC555.html>
- [38] Pivoňka, P.: *Vyšší formy řízení*. VUT v Brně, 2003.
- [39] Pivoňka, P.; Schmidt, M.: Comparative Analysis of Discrete Derivative Implementations in PID Controllers. In *Systems Theory and Applications, vol.2. WSEAS, ISBN: 978-960-8457-90-4, pp. 33-37*, 2007.
- [40] Åström, K. J.; Wittenmark, B.: *Computer-controlled systems: theory and design (2nd ed.)*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1990, ISBN 0-13-168600-3.
- [41] Ryu, J.; Yoon, M.; Sunwoo, M.: Development Of a Network-Based Traction Control System, Validation Of Its Traction Control Algorithm and Evaluation Of Its Performance Using Net-Hils. *International Journal of Automotive Technology*, ročník Vol. 6, No. 2, 2005: s. pp. 171–181.
- [42] Schaal, S.; Atkeson, C. G.: Constructive Incremental Learning from Only Local Information. , č. 8, 1998: s. 2047–2084.
URL <http://www-clmc.usc.edu/publications/S/schaal-NC1998.pdf>; <http://www-clmc.usc.edu/publications/S/schaal-TRH209.pdf>
- [43] Sciavicco, L.; Siciliano, B.; Sciavicco, B.: *Modelling and Control of Robot Manipulators*. Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2000, ISBN 1852332212.

- [44] Semiconductor, F.: MPC555. 2010.
URL http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=MPC555
- [45] Slotine, J.-J.; Li, W.: *Applied Nonlinear Control*. Prentice-Hall Engineering/Science/Mathematics, 1991.
- [46] Stence, R. W.: *Electronic Braking, Traction, and Stability Controls*, kapitola Digital By-Wire Replaces Mechanical Systems in Cars. Society of Automotive Engineers, Inc., USA, 2006, s. 29–36.
- [47] STMicroelectronics: L9958 H-bridge DC-motor driver. 2010.
URL <http://www.st.com/stonline/products/promlit/pdf/br199581208.pdf>
- [48] Tasora, A.: An iterative fixed-point method for solving large complementarity problems in multibody systems. In *In: GIMC 2006, XVI Congress of the Italian Group of Computational Mechanics, 2006, Bologna, p. 88-89, ISBN/ISSN: 88-371-1621-7*, 2006.
- [49] Ting, J.-A.; D'Souza, A.; Vijayakumar, S.; aj.: Efficient Learning and Feature Selection in High Dimensional Regression. *Neural Computation*, ročník vol. 22, no. 4, 2010: s. pp. 831–886.
- [50] Trebi-Ollennu, A.; Dolan, J.: Adaptive Fuzzy Throttle control for an All Terrain Vehicle. Technická zpráva, Carnegie Mellon University, Internal Report 04, 2004.
- [51] Valášek, M.: *Mechatronika*. Praha : České vysoké učení technické, 1. vyd., ISBN: 80-01-01276-X, 1995.
- [52] Vašák, M.; Baoti, M.; Petrovi, I.; aj.: Hybrid Theory-Based Time-Optimal Control of an Electronic Throttle. , *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ročník 54, 2007: s. pp. 1483–1494.
- [53] Vijayakumar, S.: Receptive Field Weighted Regression (RFWR). 1998.
URL <http://homepages.inf.ed.ac.uk/svijayak/software.1.html>
- [54] Vijayakumar, S.; D'Souza, A.; Schaal, S.: Incremental Online Learning in High Dimensions. *Neural Computation*, ročník vol. 17, no. 12, 2005: s. pp. 2602–2634.
- [55] Vijayakumar, S.; Schaal, S.: LWPR : An O(n) Algorithm for Incremental Real Time Learning in High Dimensional Space. In *Proc. of Seventeenth International Conference on Machine Learning (ICML2000) Stanford, California, pp.1079-1086*, 2000.
- [56] Wang, F.; Bahri, P.; Lee, P. L.; aj.: A multiple model, state feedback strategy for robust control of non-linear processes. *Computers and Chemical Engineering*, ročník 31, 2007.
- [57] Wang, G. G.: Definition and Review of Virtual Prototyping. *ASME Transactions, Journal of Computing and Information Science in Engineering*, ročník Vo. 2, No. 3, 2002: s. pp. 232–236.
- [58] Wasfy, T. M.; Ahmen, K. N.: Computational procedure for simulating the contact/impact response in flexible multibody systems. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, ročník Vol. 147, 2006: s. pp. 153–166.
- [59] Yang, C.: Model-Based Analysis and Tuning of Electronic Throttle Controllers. In *SAE World Congress, Detroit, Michigan, March 8-11, 2004*.
- [60] Young, K. D.; Utkin, V. I.; Ozguner, U.: A Control Engineers Guide to Sliding Mode Control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, ročník 7, 1999.
- [61] Zhang, P.; Yin, C.; Zhang, J.: Sliding Mode Control with Sensor Fault Tolerant for Electronic Throttle. In *International Conference on Automation Science and Engineering, Shanghai, China, 2006*.

Související publikace autora

- [A1] Grepl, R.: *Počítačové modelování dynamiky soustav tuhých těles*. ÚMTMB, FSI, VUT v Brně; ÚT AV ČR, 2004.
- [A2] Grepl, R.: *Modelování mechatronických systémů v Matlab/SimMechanics*. BEN - technická literatura, 2007.
- [A3] Grepl, R.: *Mechatronika – vybrané problémy*, kapitola Řízení škrticí klapky osobního automobilu. FSI, VUT v Brně, 2008, ISBN 978-80-214-3804-0, s. 43–71.
- [A4] Grepl, R.: *Mechatronic Systems*, kapitola Modelling and Control of Electromechanical Servo System with High Nonlinearity. IN-TECH, 2009.
- [A5] Grepl, R.: Model Based Controller Design for Automotive Electronic Throttle. In *Recent Advances in Mechatronics*, 2009.
- [A6] Grepl, R.: Multi-Model Based Online Parameter Estimation Applied To System With Significant Dry Friction. In *Modelling of Mechanics and Mechatronics Systems*, ISBN 978-80-553-0288-1, 2009.
- [A7] Grepl, R.: Adaptive Composite Control of ET using Local Learning Method. In *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Bari, Italy*, 2010.
- [A8] Grepl, R.; Lee, B.: Řízení elektronické škrticí klapky osobního automobilu. *Automa*, 2009.
- [A9] Grepl, R.; Lee, B.: Modeling, parameter estimation and nonlinear control of automotive electronic throttle using a Rapid-Control Prototyping technique. *Int. J. of Automotive Technology*, ročník Volume 11, Number 4, 2010: s. pp. 601–610, doi:10.1007/s12239-010-0072-7.
- [A10] Grepl, R.; Vlach, R.; Krejčí, P.: Modelling of Unilateral Constraints for Virtual Prototyping in SimMechanics. In *IEEE International Conference on Mechatronics 2007, Kumamoto, Japan*, 2007, doi:10.1109/ICMECH.2007.4279996.

Abstrakt

Náplní této práce je studium současného stavu, teoretický rozbor, simulační modelování a reálné experimenty v oblasti návrhu kompozitního regulátoru pro třídu nelineárních polohově řízených aktuátorů. Experimentální část práce byla prováděna na jednom konkrétním automobilovém aktuátoru, výsledky jsou ale zobecnitelné a použitelné v řadě jiných aplikací v automobilovém průmyslu i mimo něj.

Simulační modely vytvořené v rámci práce jsou fyzikální i založené na naměřených datech a jsou použity různým způsobem pro návrh řídicích členů a jejich testování.

Nejdůležitějšími přínosy práce jsou vytvoření věrohodného simulačního modelu nelineárního aktuátoru vhodného pro hardware-in-the-loop simulaci, aplikace multi-model simulace na problém online odhadu parametrů, navržení nové varianty kompozitního regulátoru na bázi SSMC, simulační ověření konceptu využití receptivních polí pro automatický návrh nelineárního kompenzátoru a také úprava algoritmu pro implementaci do mikrokontroléru bez matematického koprocessoru.

Abstract

This thesis deals with the study, theoretical analysis, simulation modeling and real experiments in the field of composite controller designed for a class of nonlinear actuators. Experimental work has been carried out on particular automotive actuator but results are generally applicable for similar problems in automotive and other industry.

Created simulation models are based on physical laws as well as measured data and are applied for the design of controllers and their testing.

The most important contributions of this work are the design and verification of simulation model of nonlinear actuator (model is usable for hardware-in-the-loop simulation), application of multi-model simulation to the problem of parameter estimation, the design of new variant of composite controller based on SSMC, the simulation verification of the automatically learned receptive fields based nonlinear compensator and also the adjustment of algorithm for implementation on low cost microcontroller without floating point unit.