

Realizace a porovnání samoladících regulátorů za použití systému Tecomat Foxtrot

František Hylmar¹

¹ ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika

Abstrakt

V práci jsou popsány dvě realizace samoladících regulátorů využívajících odlišné metody řízení a je zde porovnána jejich funkčnost za použití dat naměřených na reálné úloze. První metodou je adaptivní řízení s přímým nastavováním parametrů regulačního zákona zvolené struktury (podle J. Maršika 1982), jejímž principem je přímá adaptace parametrů regulátoru na základě vyhodnocování regulačního procesu. Druhou metodou je pak řízení za pomoci PID regulátoru, jehož parametry jsou vypočteny z modelu soustavy prvního řádu s dopravním zpožděním. Tento model je určen pomocí reléové identifikace popsané v práci Automatic Tuning of PID Controllers based on Asymmetric Relay Feedback (viz. Berner J. 2015). K realizaci řízení a měření dat je použit systém Tecomat Foxtrot od společnosti Teco a.s.

Klíčová slova: samoladící regulátory; PID regulace; Tecomat Foxtrot;

1. Úvod

Automatické nastavování regulátorů je velice užitečným nástrojem pro zjednodušení práce s prostředky automatického řízení. Jeho hlavní předností je zpřístupnění práce s regulátory širšímu okruhu technických pracovníků pomocí snížení nároků na kvalifikaci a technickou znalost. Jejich použití je vhodné jak pro jednotlivce bez hlubší technické znalosti, tak pro velké společnosti operující se stovkami datových bodů vyžadujících řízení. V konečném důsledku pak v obou případech nasazení samoladících regulátorů šetří čas svých uživatelů.

Faktorem kritickým pro správnou funkci a maximální efektivitu je spolehlivost a kvalita řízení. Při nesprávně navrženém řízení může nastat situace, kdy dosažené výsledky neodpovídají požadavkům uživatele. Logickým vyústěním je pak ztráta důvěry v daný systém a upřednostnění alternativních, byť časově náročnějších, možností (ruční naladění apod.).

2. Principy samoladících regulátorů

Obecně existuje více možností, jak postupovat při návrhu samoladícího regulátoru. Cílem této práce je porovnat dva odlišné principy řízení.

V prvním případě se jedná o průběžnou úpravu parametrů PID regulátoru v závislosti na chování měřené regulované veličiny. V případě druhém je pak využito identifikace k získání matematického modelu systému, pomocí kterého jsou určeny parametry pro PID regulátor. Zajímavostí v porovnání obou přístupů je fakt, že jejich uveřejnění dělí více než třicet let.

3. Regulátor s průběžnou adaptací

Hlavní předností adaptivního řízení podle J. Maršika[1] je absence identifikace nebo jiné inicializační fáze se zkušebními signály. Řízení je zahájeno ihned a parametry regulátoru se upravují za běhu. Princip adaptace je založen na sledování regulační odchylky podle kritéria zvaného „míra kmitavosti“ (κ). Jedná se o poměr frekvencí průchodů nulou regulační odchylky a její první diference.

Regulovaná soustava může být libovolného řádu, lineární i nelineární. Pro spolehlivou funkci však předpokládáme, že je soustava sama o sobě stabilní a málo kmitavá, nejlépe s monotónní přechodovou charakteristikou[1].

3.1. Algoritmus

Algoritmus pro přímou adaptaci parametrů lze použít na regulátory typu I, PI i PID. Pro potřeby práce byla zvolena struktura PID v přírůstkové formě

$$u(n+1) = \alpha(n)\gamma(n)\Delta e(n) + \alpha(n)\beta(n)e(n) + \sum_i^n \alpha(i)e(i) \quad (1)$$

Pro svou funkci vyžaduje program dva vstupy. Prvním je uživatelem zadaná žádaná hodnota, druhým pak aktuální hodnota regulované veličiny. Výstupem ze soustavy je potom akční zásah u . Jádro programu pro realizaci tohoto řízení obsahuje několik kroků.

1. Ze žádané hodnoty w a regulované veličiny x je vypočtena regulační odchylka e

$$e(n) = w(n) - x(n) \quad (2)$$

* Kontakt na autora: Frantisek.Hylmar@fs.cvut.cz

2. Velikost regulační odchylky e je porovnána s jejím rozptylem a je rozhodnuto, zda regulátor vyžaduje úpravu parametrů.

$$e^2(n) < \sigma_e^2(n) \quad (3)$$

V případě, že je podmínka splněna, program vynechá tu část, kde jsou přepočítávány parametry PID regulátoru a přeskočí rovnou do fáze 10.

3. Výpočet časové konstanty filtru τ pro následné určení středních hodnot parametrů.

$$\tau(n) = 2\pi \sqrt{\frac{v^2(n-1)}{a^2(n-1)}} \quad (4)$$

4. Aktualizace rozptylu regulační odchylky σ_e^2

$$\sigma_e^2(n) = \frac{e^2(n) + 3\tau(n)\sigma_e^2(n-1)}{1 + 3\tau(n)} \quad (5)$$

5. Výpočet parametrů $\overline{e^2(n)}$, $\overline{v^2(n)}$, $\overline{a^2(n)}$

$$\overline{e^2(n)} = \frac{e^2(n) + \tau(n)\overline{e^2(n-1)}}{1 + \tau(n)} \quad (6)$$

$$\overline{v^2(n)} = \frac{(\Delta e(n))^2 + \tau(n)\overline{v^2(n-1)}}{1 + \tau(n)} \quad (7)$$

$$\overline{a^2(n)} = \frac{(\Delta^2 e(n))^2 + \tau(n)\overline{a^2(n-1)}}{1 + \tau(n)} \quad (8)$$

6. Určení míry kmitavosti κ

$$\kappa(n) = \frac{\overline{v^2(n)}}{\sqrt{e^2(n) * a^2(n)}} \quad (9)$$

7. Výpočet společného zesílení regulátoru $\alpha(n)$

$$\alpha(n) = \alpha(n) \frac{1}{\tau(n)} \left(\frac{\kappa_{\text{žád.}}}{\kappa} - 1 \right) \quad (10)$$

8. Výpočet koeficientu proporcionální složky regulátoru

$$\beta(n) = \sqrt{\frac{e^2(n)}{v^2(n)}} \quad (11)$$

9. Výpočet koeficientu diferenciální větve regulátoru

$$\gamma(n) = \sqrt{\frac{e^2(n)}{a^2(n)}} \quad (12)$$

10. Výpočet akční veličiny regulátoru u (dosazení všech vypočtených parametrů do rovnice regulátoru)

$$u(n+1) = \alpha(n)\gamma(n)\Delta e(n) + \alpha(n)\beta(n)e(n) + \sum_i^n \alpha(i)e(i) \quad (1)$$

11. Po nastavení výstupu regulátoru je program ukončen a vrací se na začátek[1].

Z popisu kroků je patrné, že nespornou výhodou regulátorů s přímým nastavováním parametrů je jeho jednoduchost. Pouhým sledováním změn regulační odchylky jsme schopni s pomocí několika matematických operací dosáhnout plynulé adaptivní regulace.

4. Regulátor s reléovou identifikací

Druhý zkoumaný samoladící regulátor využívá pro řízení soustavy PID regulátor v našem případě pracující dle rovnice

$$U(s) = K \left(e(s) + \frac{1}{T_i s} e(s) - \frac{T_d s}{T_f s + 1} y(s) \right) \quad (13)$$

jehož parametry nastavuje výpočtem během identifikační fáze. V této fázi program sleduje chování soustavy při skokových změnách žádané hodnoty. Konkrétně se jedná o periodické střídání nízké a vysoké hodnoty. Vstup do soustavy má tedy povahu relé.

Program vyhodnotí, jak dlouho soustava zůstává v horní respektive dolní poloze a ze vzorků naměřených v průběhu identifikace pak určí parametry modelu soustavy prvního řádu s dopravním zpožděním

$$P(s) = \frac{K_p}{1 + sT} e^{-sL} \quad (14)$$

z těchto parametrů pak vypočítá koeficienty pro rovnici PID regulátoru. Výpočet obsahuje pro každý koeficient z rovnice jeden matematický vztah. Pro zesílení K je to

$$K = \frac{0.2L + 0.45T}{K_p L} \quad (15)$$

pro integrační konstantu T_i pak

$$T_i = \frac{0.4L + 0.8T}{L + 0.1T} L \quad (16)$$

a nakonec pro derivační konstantu T_d

$$T_d = \frac{0.5LT}{0.3L + T} [2]. \quad (17)$$

V rovnici (13) figuruje ještě koeficient T_f . Jedná se o časovou konstantu filtru derivační složky a pro účely práce byla její hodnota ponechána na výchozí hodnotě použitého funkčního bloku PID regulátoru a sice 0.25s.

5. Aplikace zkoumaných regulátorů na reálnou úlohu

Pro porovnání kvality řízení vybraných samoladících regulátorů byly oba dva naprogramovány, nahrány na programovatelný automat a aplikovány na reálné laboratorní úloze. Poté stačilo pouze zaznamenat průběhy a srovnat kvalitu regulace obou algoritmů.

5.1. PLC Tecomat Foxtrot

Pro řízení byl zvolen systém Tecomat Foxtrot od společnosti Teco a.s. v provedení CP-1015. Jedná se o kom-

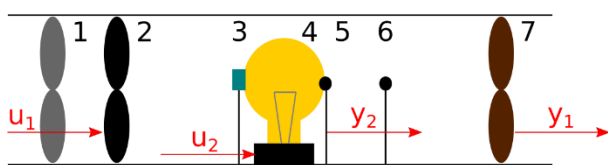
paktní modulární systém s šesti reléovými a dvěma analogovými výstupy a šesti přepínatelnými digitálními respektive analogovými vstupy.

Programování regulátorů probíhalo v programovacím prostředí Mosaic vyvinutém právě za účelem práce s PLC řady Tecomat. Komunikace s počítačem zajišťovala školní laboratorní síť skrze LAN Ethernet.

5.2. Tepl vzdušný model

Porovnávání zkoumaných vlastností regulátorů bylo realizováno na školní úloze Tepl vzdušný model umístěné v budově FS ČVUT v laboratoři č. 111.

Soustavu tvoří krytý tunel čtvercového průřezu, jenž je na jedné straně osazen dvěma ventilátory. Ventilátor vnitřní je hlavním ventilátorem soustavy a slouží pro zajištění proudění vzduchu tunelem. Vnější ventilátor tzv. poruchový, je posazen tak, aby působil proti ventilátoru hlavnímu. Tím pádem je možné ho využít pro simulaci vlivu poruchových veličin na soustavu. Na druhém konci tunelu je pak umístěn vrtulkový průtokoměr sloužící pro měření průtoku vzduchu tunelem. Uvnitř tunelu se nachází žárovka, která plní funkci tepelného zdroje pro ohřev vzduchu v tunelu. Pro měření teploty v okolí žárovky jsou na jejím povrchu umístěny dva senzory – termistor a teplotní senzor KTY82. Ve vzdálenosti 1 cm od žárovky je pak ještě druhý termistor, který je třetím teplotním senzorem soustavy[3].



- 1 vedlejší poruchový ventilátor
- 2 hlavní ventilátor
- 3 teplotní senzor KTY82
- 4 žárovka
- 5 termistor
- 6 termistor
- 7 vrtulkový průtokoměr

Obr. 1. Tepl vzdušný model[4]

Laboratorní soustava Tepl vzdušný model může kombinací zapojení svých vstupů a výstupů pracovat v několika různých modifikacích. Porovnávání algoritmy samoladících regulátorů jsou naprogramovány pro řízení soustav typu SISO proto byl při výběru vhodné modifikace uvažován pouze tento typ zapojení. Z více možností byl pro účely práce zapojen vrtulkový průtokoměr jako vstup do PLC a hlavní ventilátor jako výstup z něj.

6. Porovnání kvality řízení regulátorů

Na začátku měření proběhlo nahrání zkoumaného regulátoru ze stolního počítače do PLC. Program byl vyslán

s pomocí programovacího prostředí Mosaic. V tomto prostředí probíhalo i ovládání programu skrze nástroj Web-Maker. Sběr dat pak zajišťoval nástroj GraphMaker, který je další součástí použitého programovacího prostředí.

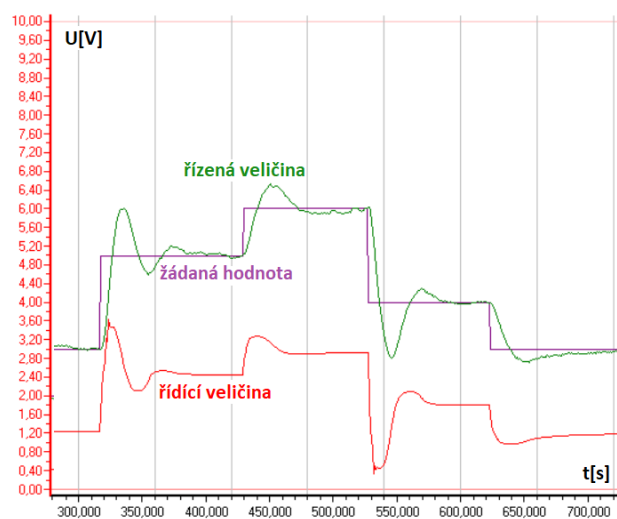
6.1. Průběh testování

U obou regulátorů byl proveden stejný test kvality řízení. V lineární oblasti statické charakteristiky soustavy byly po ustálení provedeny čtyři skokové změny žádané hodnoty. Nejprve se žádaná hodnota navýšila o 2V. Po opětovném ustálení pak znovu tentokrát o 1V. Následně byla hodnota snížena o 2V a po ustálení ještě jednou o 1V.

Mimo celkového charakteru řízení, patrného pouhým pohledem byla vyhodnocena doba ustálení řízené veličiny soustavy na žádané hodnotě a velikost prvního překmitu. Za ustálenou hodnotu je pak považována chvíle, kdy regulační odchylka nepřesáhne hodnotu 5% změny žádané hodnoty.

6.2. Test kvality řízení regulátorem dle J. Maršíka

Z grafu řízení pomocí adaptivního regulátoru dle J. Maršíka jsou na první pohled patrné velké překmity řízené veličiny při skokových změnách žádané hodnoty. V prů-



Obr. 2. Test kvality řízení - regulátor dle J. Maršíka

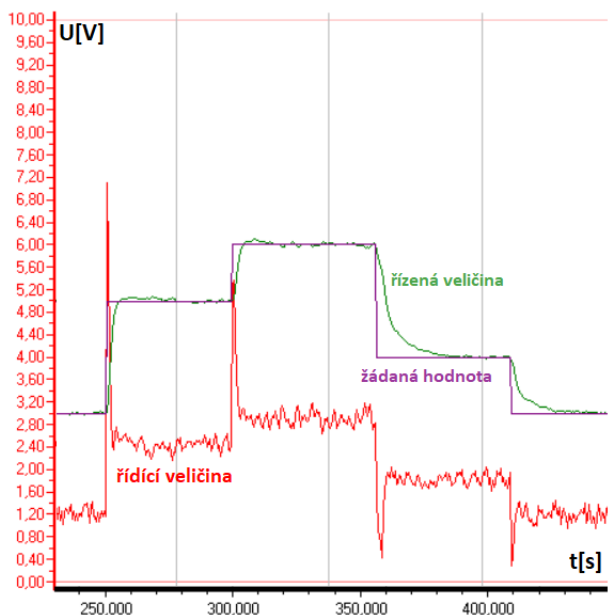
měru je velikost prvního překmitu 39,2%. Můžeme též pozorovat výskyt druhého, v jednom případě i třetího překmitu řízené veličiny. Takovéto chování je při řízení nežádoucí a má vliv i na dobu ustálení soustavy.

Průměrná doba ustálení řízené veličiny na žádané hodnotě odpovídá 89 sekundám.

6.2. Test kvality řízení regulátorem dle J. Berner

Řízení za pomoci regulátoru s využitím modelu soustavy získaného reléovou identifikací dle J. Berner vykazuje značně menší první překmit než u prvního zkoumaného regulátoru. Průměrnou hodnotou je 7,7%.

Také průměrná doba ustálení je kratší než u regulátoru dle J. Maršíka. Odpovídá 41,6 sekundám.



Obr. 1. Test kvality řízení – regulátor dle J. Berner

Zajímavé je pak porovnání obou dvou záznamů průběhu řídicí veličiny. Na první pohled je mezi nimi vidět diametrální odlišnost v rychlosti řízení. Zatímco na prvním grafu můžeme pozorovat rychlé, agresivní změny řídicí veličiny, na grafu druhém je její průběh pozvolný bez výraznějších přechodů a skokových změn.

7. Závěr

Oba dva naprogramované algoritmy samoladících regulátorů jsou schopny nastavit parametry PID regulátoru a řídit vybranou laboratorní úlohu. Jsou mezi nimi patrné rozdíly v kvalitě řízení. Do značné míry je to dáno odlišnou povahou obou přístupů pro návrh samoladících regulátorů.

Adaptivní regulátor dle J. Maršíka vykazuje při skokových změnách žádané hodnoty příliš velké překmity, což je při řízení zásadním nežádoucím jevem. Problém by mohl nastat zejména ve chvíli, kdy by velké přesáhnutí žádané hodnoty ohrožovalo bezpečnost provozu soustavy. Jeho nespornou výhodou je ovšem fakt, že řízení nepředchází žádná identifikační fáze a absence modelu také umožňuje řídit soustavy nehledě na jejich řád. Jeho využití tak je zejména v případech, kdy na žádané hodnotě nedochází ke skokovým změnám.

Regulátor dle J. Berner využívající reléovou identifikaci bez větších problémů spolehlivě řídí zkoumanou soustavu. První překmity jsou pouze minimální nebo vůbec žádné a doba ustálení je přijatelně krátká. Delší je pak při snižování žádané hodnoty, což je zapříčiněno technickými limity soustavy. Jeho nevýhodou oproti regulátoru dle J. Maršíka je nutnost identifikační fáze. Její doba může být při řízení určitých (zejména pomalých) soustav i velmi dlouhá. Při měření zaznamenaném v této práci trvala identifikace bezmála čtyři a půl minuty. Limitem je také řád modelu soustavy, který nemusí být přijatelný pro soustavy vyšších řádů.

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval panu profesorovi Milanu Hofreiterovi za odborný dohled a vedení práce, panu inženýru Jaroslavu Buškovi za pomoc s technickou realizací propojení laboratorních úloh s PLC a paní bakalářce Alžbětě Hornychové za konzultaci ohledně identifikace soustav.

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS16/210/OHK2/3T/12.

Seznam symbolů

- a parametr pro výpočet koeficientů PID regulátoru (-)
- e regulační odchylka (-)
- K zesílení (-)
- K_p parametru z identifikace (-)
- L parametru z identifikace (-)
- T parametru z identifikace (-)
- P přenos modelu (-)
- T_i integrační konstanta (-)
- T_d derivační konstanta (-)
- T_f konstanta filtru (-)
- u akční veličina regulátoru (-)
- v parametr pro výpočet koeficientů PID regulátoru (-)
- α společné zesílení regulátoru (-)
- β koeficient proporcionální složky (-)
- γ koeficient diferenciální větve regulátoru (-)
- κ míra kmitavosti (-)
- σ rozptyl (-)
- τ časová konstanta filtru (-)

Literatura

- [1] MARŠÍK, J. *Jednoduché algoritmy číslicové adaptivní regulace*. Výzkumná zpráva ÚTIA ČSAV, č. 1106, 1981.
- [2] BERNER, Josen. *Automatic Tuning of PID Controllers based on Asymmetric Relay Feedback*. Lund, 2015. Disertační práce. Lund university, Lund Institute of Technology, Department of Automatic Control, 2015.
- [3] Teplovzdušný model. Návod na laboratorní cvičení z automatického řízení. [online].[cit.19.3.2018]. Dostupné z: <http://vlab.fs.cvut.cz/navody/les/tvm.pdf>
- [4] HORNÝCHOVÁ, Alžběta. *Reléová identifikace v uzavřené regulační smyčce pomocí programovatelného automatu Tecomat Foxtort*. In *Studentská tvůrčí činnost: sborník 2018*. V Praze: Fakulta strojní ČVUT, 2018. V době citování v přípravě.