

ZJIŠŤOVÁNÍ INDIKÁTORŮ OPTIMÁLNÍHO SEŘÍZENÍ REGULÁTORŮ Z FREKVENČNÍCH ODEZEV

S. Vrána, B. Šulc

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky
Technická 4, 166 27 Praha 6 – Dejvice

Abstrakt

Hodnocení kvality regulace je spojeno s nějakou formou kritéria. Povaha těchto kritérií je ovšem velmi různorodá – od přísně matematicky definovaných hledisek, nejlépe analyticky vypočitatelných, až po empiricky formulovaná hlediska obvykle zahrnující do hodnocení více (protichůdných) aspektů najednou. Průmyslová praxe upřednostňuje seřizovací postupy nevyžadující znalost matematického modelu regulované soustavy založené na vyhodnocení regulačních odezev. Velkou popularitu si proto udržel postup podle Zieglera a Nicholse, ovšem potřeba dosáhnout s kritickou hodnotou zesílení amplitudově nekontrolovatelné autooscilace regulačního obvodu může být velkou realizační překážkou. Proto Åström a Hägglund navrhli k vytvoření nezlumených kmitů zařadit relé ve zpětnovazebním zapojení s regulovanou soustavou, kdy je možné amplitudu samovybuzených kmitů ovlivňovat parametry relé. V základní verzi je ovšem třeba odpojit regulátor a provádět experimenty se soustavou ve spojení s relé. Během experimentů soustava není regulována. Z klasické lineární teorie regulace jsou však známy indikátory globálního optimálního seřízení regulátoru, např. bezpečnost ve fázi nebo bezpečnost v amplitudě jsou těmi nejznámějšími. Tyto indikátory lze pro lineární modely soustav vypočítat analyticky z frekvenčních přenosů nebo frekvenčních charakteristik rozpojeného regulačního obvodu. V tomto příspěvku je však popsán způsob zjišťování těchto indikátorů optimálního seřízení přímo v uzavřeném regulačním obvodu, ve kterém je k regulační odchylce přidán harmonický budící signál. Indikátory jsou průběžně vyhodnocovány ze záznamu regulované veličiny a regulační odchylky v regulačním obvodu, který zůstává uzavřen a plní svoji regulační funkci. Tento postup nevyžaduje znalost modelu regulované soustavy (v podstatě ani regulátoru) a je tudíž vhodný i pro případ, kdy se v chování soustavy výrazně projevují nelineární vlastnosti.

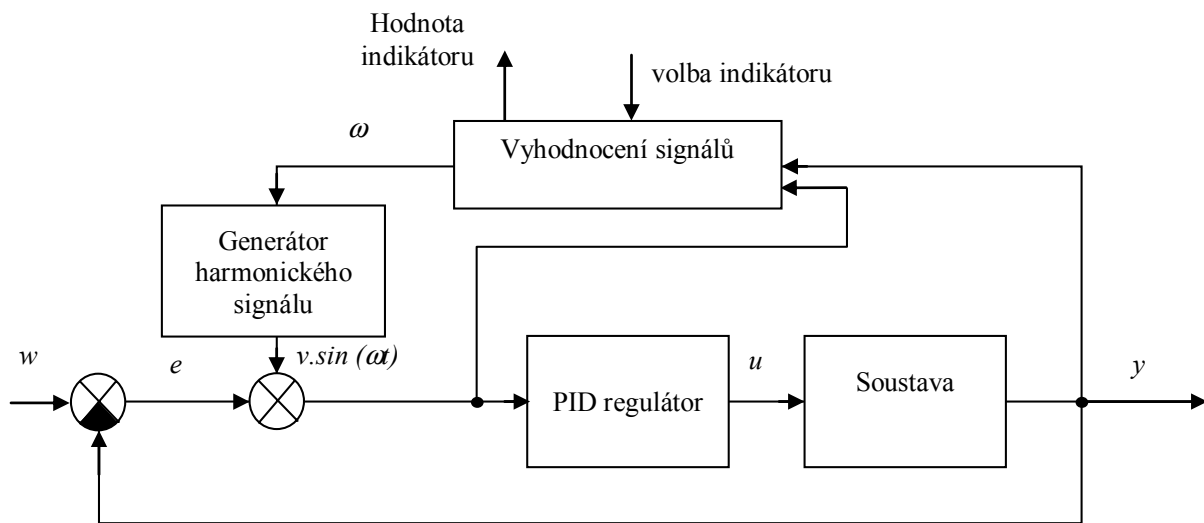
1 Princip zjišťování indikátorů

Princip metody zjišťování indikátorů seřízení je odvozen od metody Åströma a Hägglunda [1], kdy do smyčky, kde je zapojeno relé je navíc připojen i regulátor a tedy je možné zjistit informace (jako zesílení a fázové zpoždění) o jednom bodu Nyquistovy křivky pro frekvenci ω_{krit} , což je frekvence, při které je dosaženo fázového zpoždění 180° a je tedy možné určit bezpečnost v amplitudě. Je-li nastavení regulátoru takové, že regulační pochod je stabilní a není na mezi stability, bezpečnost ve fázi a další indikátory je možné zjišťovat pro frekvenci $\omega < \omega_{krit}$. Pro dosažení této frekvence ω je nutné zapojení podle metody Åströma a Hägglunda upravit. Jsou možné dvě úpravy:

- místo relé je ke smyčce připojen generátor harmonického signálu o zadané frekvenci ω ,
- do zpětné vazby je vloženo dopravní zpoždění, čímž se dojde k prodloužení periody kmitů a tedy i ke snížení frekvence ω_{krit} na ω_f v závislosti na velikosti dopravního zpoždění.

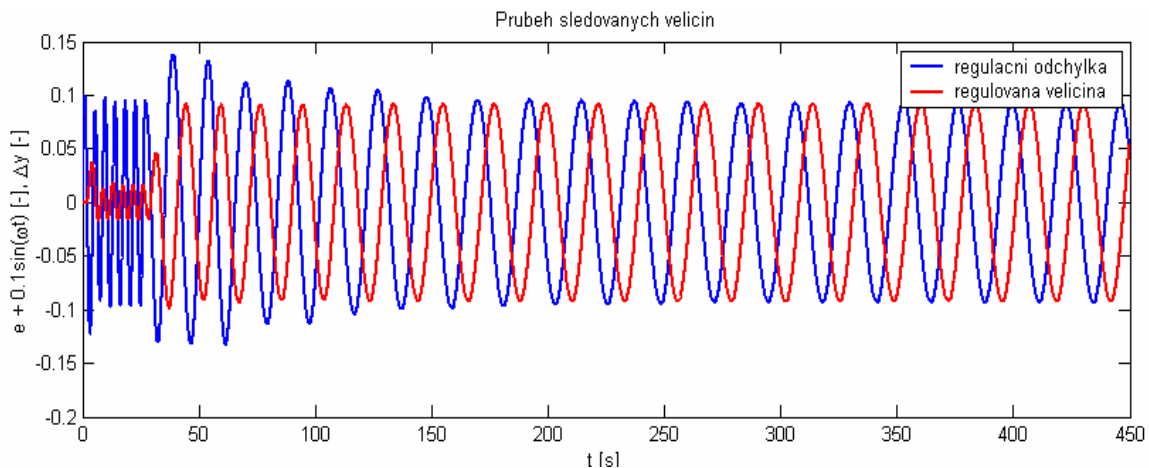
Co se týká výsledků, principiálně jsou obě úpravy rovnocenné; použití generátoru harmonického signálu je však konstrukčně jednodušší ve skutečném procesu a pomocí něho je možné zjišťovat i hodnoty indikátorů, při hodnotách $\omega > \omega_{krit}$, což při použití dopravního zpoždění ve zpětné vazbě možné není.

2 Postup zjišťování indikátorů



Obr. 1 – Schéma uzavřené regulační smyčky s vyznačením signálů a bloků použitých pro zjišťování indikátorů

Na obr. 1 je znázorněno schéma uzavřené regulační smyčky rozšířené o měření regulační odchylky s přidáním harmonickým signálem $e + v \cdot \sin(\alpha)$. Průběhy změřené regulační odchylky (vstupu regulátoru) a regulované veličiny jsou vyhodnocovány v bloku “Vyhodnocení signálů”, kde je určována pro nastavenou hodnotu frekvence ω hodnota zesílení obvodu a fázový posun, které by vznikly v otevřené regulační smyčce. Tyto dva údaje jsou důležité pro stanovení hodnoty indikátoru pro danou frekvenci ω . Na základě provedeného vyhodnocení a zvoleném indikátoru je realizována změna frekvence ω vkládaného signálu tak, aby bylo dosaženo požadovaného fázového zpoždění,



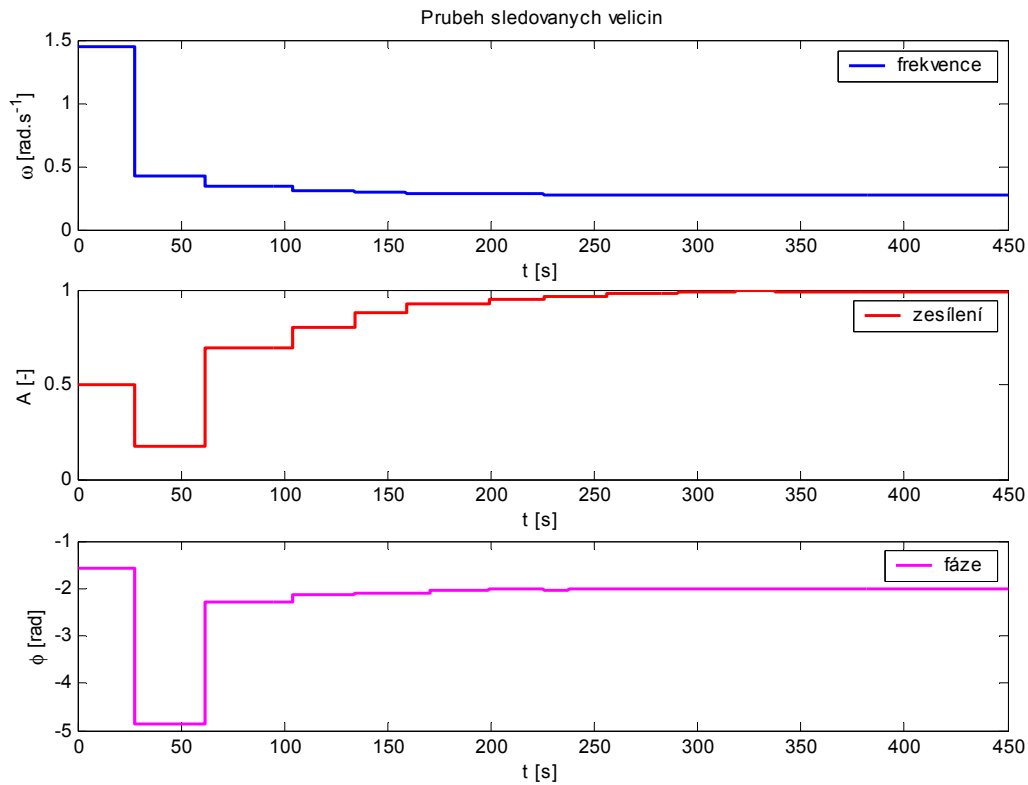
Obr. 2 – Průběh regulační odchylky a regulované veličiny při zjišťování hodnoty indikátoru „bezpečnost ve fázi“

resp. požadovaného zesílení, které vyplývají z optimálních (doporučovaných) hodnot bezpečnosti v amplitudě nebo bezpečnosti ve fázi. Obecně lze takto vyhodnocovat jakkoliv jinak definovaný indikátor, např. lze zobecnit indikátor bezpečnosti v amplitudě tak, že nebude vyhodnocován při fázovém zpoždění 180° , ale při jakémkoliv fázovém zpoždění, např. 120° . Stejným způsobem lze zobecnit indikátor bezpečnosti ve fázi.

Záznam průběhu regulační odchylky s přidáním harmonickým signálem a průběh odezvy regulované veličiny na tento signál je zobrazen na obr. 2. Zjišťování hodnoty indikátoru bezpečnosti ve fázi bylo provedeno v ustáleném stavu. Výsledek tohoto vyhodnocování, konkrétně na modelu regulačního obvodu, v němž soustava je modelována přenosem $G_S = 1/(s^2 + 1,2s + 1)$ a je použit PI regulátor, je zobrazen na obr. 3. Je v něm zachycen průběh sledovaných parametrů zesílení a úhlu fázového zpoždění v závislosti na frekvenci budicího signálu při zjišťování hodnoty indikátoru,

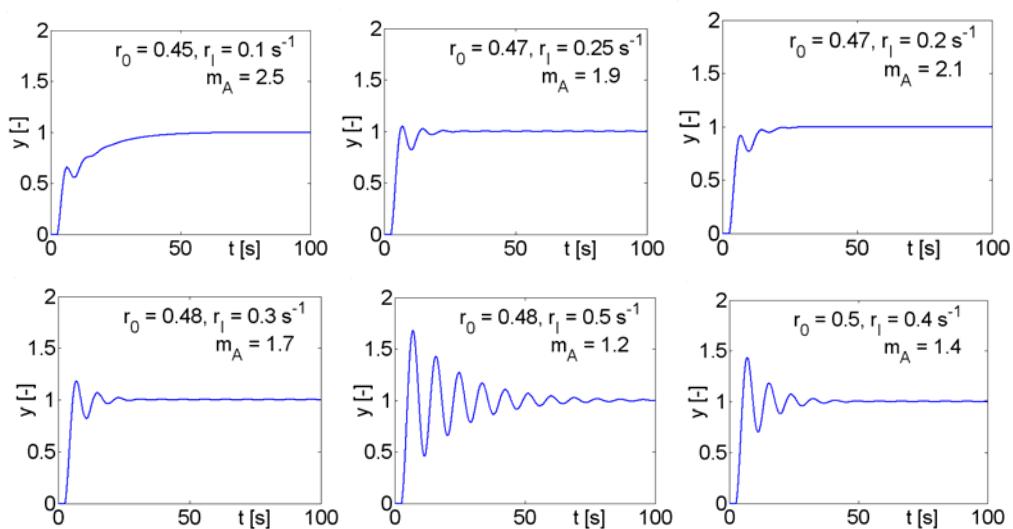
indikátoru bezpečnosti ve fázi. Je vidět, že ve smyslu definice úhlu bezpečnosti ve fázi jej bylo dosaženo při fázovém zpoždění $\varphi = -2,09$ rad (-120°), kdy bezpečnost ve fázi má hodnotu $\gamma = 1,05$ rad (60°), při frekvenci budicího signálu $\omega = 0,27$ rad.s $^{-1}$.

Zjišťování hodnoty indikátoru neprobíhá spojitě, ale skokově, neboť je prováděno, je-li detekováno minimum nebo maximum v průběhu regulační odchylky a jemu odpovídající minimum nebo maximum v průběhu regulované veličiny a jsou splněny některé další podmínky umožňující vyhodnocení průběhu.



Obr. 3 – Průběh sledovaných parametrů frekvenční odezvy pro určení indikátoru „bezpečnost ve fázi“

Naskýtá se otázka, kolik indikátorů je vhodné zjišťovat, abychom zjistili, zda je seřízení regulátoru je skutečně optimální. Odpověď na tuto otázku naznačuje obr. 4. Jsou zde zobrazeny skokové odezvy regulované veličiny pro různá nastavení PI regulátoru, které vykazují stejnou hodnotu



Obr. 4 – Ukázky přechodových odezvy pro různá nastavení PI regulátoru s bezpečností ve fázi $\gamma = 60^\circ$

indikátoru bezpečnosti ve fázi, ale liší se hodnotou indikátoru bezpečnosti v amplitudě m_A . Je vidět, že volba počtu indikátorů je do jisté míry subjektivní záležitost závislejší na pohledu a dalších požadavcích, jak kterou odezvu posuzovat jako kvalitní regulační pochod. Průběhy na obr. 4 jsou v podstatě všechny použitelné, pokud nezáleží na velikosti přeregulování a kmitavosti odezvy. V takovém případě by stačilo nejspíše zjišťovat hodnotu pouze jednoho indikátoru. Pokud bychom měli přísnější požadavky na velikost přeregulování, zjištění hodnoty jediného indikátoru by nepostačovalo a bylo by nutné zjišťovat hodnotu indikátoru dalšího. V otázce volby počtu indikátorů platí, že počet nezávislých indikátorů je roven počtu nezávisle nastavitelných parametrů regulátoru. Hodnoty indikátorů zvolených do počtu nezávisle nastavitelných parametrů regulátoru jsou na sobě nezávislé, hodnoty indikátorů nad počet nastavitelných parametrů jsou již na sobě závislé. Ovšem neztrácejí přitom svoji informační hodnotu.

3 Závěr

Během určování indikátorů optimálního seřízení regulátorů popsaným způsobem je vlastní funkce regulačního obvodu zachována a není negativně ovlivňována. a dosahované regulační pochody pouze minimálně. Amplitudu kmitů přidávaného signálu lze snadno nastavovat v generátoru harmonických kmitů. Vyhodnocování nemusí být prováděno neustále, ale např. na žádost operátora nebo i automaticky v případě, kdy regulační odchylka e přesáhne stanovenou hodnotu, případně nastane jiná závažná okolnost. Možné je i vyhodnocování v pravidelných intervalech. Na vývoji hodnot indikátorů je možné budovat různé mechanismy změn parametrů regulátoru včetně samoseřizování. K vyhodnocení optimality seřízení je ve většině případů vhodné zjišťovat hodnotu více indikátorů. Prezentované výsledky byly sice získány za použití lineárního modelu regulačního obvodu, postup je však zcela aplikovatelný v reálných regulačních obvodech, kdy chování regulované soustavy je spjité nelineární.

Literatura

- [1] Åstrom, K. J., Hägglund, T. *Automatic Tuning of Simple regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins*. Automatica, 20, 1984, s. 645 – 651
- [2] Friman, M. *Automatic Retuning of PI Controllers in Oscillating Control Loops*. Ind. Eng. Chem. Res., 36, 1997, s. 4255 – 4263
- [3] Shen, S. H., Wu, J. S., Yu, C. C. *Autotune Identification under Load Disturbance*. Ind. Eng. Chem. Res., 35, 1996, s. 1174 – 1180
- [4] Yu, C. C. *Autotuning of PID Controllers*. London: Springer – Verlag London Limited. 1999. ISBN 3-540-76250-7
- [5] Macháček, J. Identifikace soustav pomocí nelinearity ve zpětné vazbě in *Automatizace č. 9*. Praha. 1998.
- [6] Šulc, B., Vítečková, M. *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. Praha: Vydavatelství ČVUT. 2004. 1. vyd. ISBN 80-01-03007-5
- [7] Vrána, S., Šulc, B. Control Loop Oscillation Based PID Tuning. In: *Proceedings of ICC'2006 (7th International Carpathian Control Conference)*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, Katedra Automatizační techniky a řízení, 2006
- [8] Vrána, S. Použití metody relé při regulaci nelineárního objektu In: *Sborník přednášek konference ARaP 2005*. Praha: FCC Public, 2005, s. 37-40. ISBN 80-86534-08-1.

Ing. Stanislav Vrána, DiS.

E-mail: stanislav.vrana@fs.cvut.cz

Tel.: +420 2 2435 2896

Doc. Ing. Bohumil Šulc, CSc.

E-mail: bohumil.sulc@fs.cvut.cz

Tel.: +420 2 2435 2531

Oba:

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky
Technická 4

166 27 Praha 6 – Dejvice