

# **AUTOTUNING PID REGULÁTORŮ ZALOŽENÝ NA VYHODNOCOVÁNÍ FREKVENČNÍCH UKAZATELŮ OTEVŘENÉ SMYČKY V UZAVŘENÉ SMYČCE**

## **Autotuning of PID Controllers Based on Closed-Loop Evaluation of Open-Loop Frequency Indicators**

**Stanislav Vrána**

*Abstrakt:* Vyhodnocování frekvenčních ukazatelů v uzavřené smyčce umožňuje získat hodnoty frekvenčních ukazatelů i v průběhu regulačního pochodu. Díky tomu, že nevyžaduje využití modelu regulované soustavy, je možné samoseřizovací metodu PID regulátorů založenou na vyhodnocování frekvenčních ukazatelů otevřené smyčky v uzavřené smyčce použít i při regulaci soustav s nelineárním chováním.

*Klíčová slova:* Amplituda, autotuning, bezmodelový, indikátor, regulátor, frekvence, nelinearita.

### **1. Úvod**

Od doby, kdy Ziegler a Nichols publikovali metodu nastavování PID regulátorů založenou na vyhodnocení experimentů [18], bylo publikováno mnoho dalších seřizovacích metod. Přestože tyto metody byly charakterizovány jako metody poskytující lepší a vhodnější nastavení regulátorů než metoda Zieglera a Nicholse, nedosáhly takového rozšíření jako právě metoda Zieglera a Nicholse. Přitom počet existujících seřizovacích metod PID regulátoru je neuvěřitelný, pouze v [7] je uvedeno téměř 250 metod a s největší pravděpodobností neuvádí všechny. Jedním z důvodů, proč nové seřizovací metody nejsou tak často používané, je bezmodelovost metody Zieglera a Nicholse, zatímco následně publikované metody převážně nějakým způsobem využívají model regulované soustavy [2]. Jediným vážným konkurentem metody Zieglera a Nicholse je metoda relé, která je také bezmodelová a je založena na podobných principech jako metoda kritických kmitů Zieglera a Nicholse. Další používané metody, které jsou (pravděpodobně) bezmodelové, jsou Exact (Foxboro) a Looptune (Honeywell). Exact je metoda založená na rozpoznávání vzorů, když se v průběhu regulační odchylky objeví definovaný vzor, je na aktuální nastavení regulátoru aplikováno předdefinované pravidlo [3]. Pravidla byla definována odborníky (Exact je zkratka z Expert Adaptive Controller Tuning). Looptune je metoda založená na vyhodnocování kvadratického kritéria. Metoda čas od času změní parametry regulátoru, přičemž je hledáno minimum tohoto kritéria [5]. Detailní funkce seřizovacích metod Exact a Looptune nebyly zveřejněny.

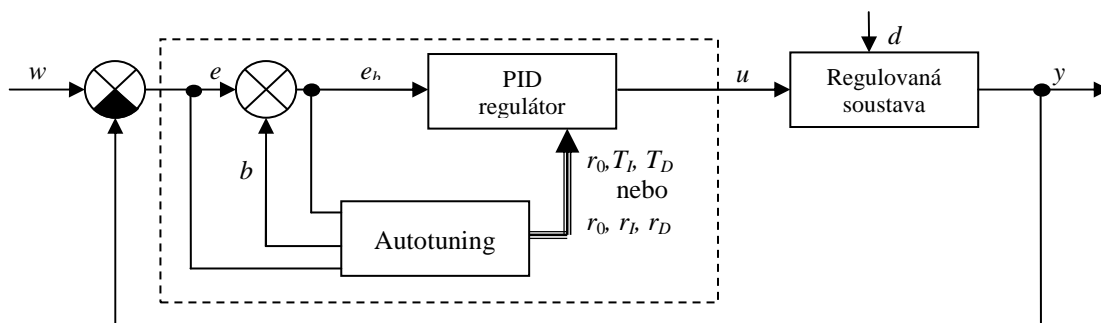
Kromě PID regulátorů existují i regulátory založené na jiných algoritmech. Přestože byly uváděny jako lepší než PID regulátor, PID regulátor stále zůstává nejpoužívanějším regulátorem [2], [5]. Jedním z důvodů, proč novější algoritmy nejsou využívány ve větší míře, je i jednoduchost a snadná pochopitelnost funkce PID regulátoru [12]. Přestože někteří specialisté prohlašují, že v oblasti PID regulátorů nemůže být objeveno nic nového, jsou stále prezentovány další inovace, jako například momentová metoda nastavování PID regulátoru [10], využití referenčního průběhu regulační odchylky [11] nebo MIMO PID regulátor jako alternativa stavové regulace [8].

Kromě toho, že seřizovací metody regulátorů využívají model regulované soustavy, obvykle mívají i jiné nevýhody. V mnoha případech musí být regulátor odpojen nebo jeho funkce podstatně omezena během identifikačních procesů, který vede k určení nového nastavení. Pokud je regulátor odpojen, identifikační experiment musí být co možná nejkratší, aby regulovaná soustava byla neregulována po nejkratší možné době. V mnoha případech tato doba maximální doba, kdy regulovaná soustava není regulována, není vůbec garantována. Tuto nevýhodu lze obejít využitím seřizovací metody, která odpojení regulátoru nevyžaduje.

## 2. Princip samoseřizovací metody založené na vyhodnocování frekvenčních ukazatelů

Experimentální přístupy získávání aktuálních parametrů regulované soustavy jsou ve většině případů založené na vyhodnocování odezvy na definovanou změnu (např. skok, puls nebo rampa). Je také možné využít odezvu na harmonické buzení, kdy je vyhodnocováno amplitudové zesílení a fázový posun budícím signálem a odezvou na něj. Zatímco vyhodnocování časové odezvy na vybudění je obvykle prováděno pro samostatnou regulovanou soustavu, kdy regulátor musí být odpojen, vyhodnocení frekvenční odezvy může být provedeno v uzavřené regulační smyčce, při příznivých podmínkách dokonce i během regulačního pochodu.

Tato výhoda je využita v samoseřizovací metodě založené na vynuceném harmonickém vybudění. Princip metody je založen na vyhodnocování frekvenčních ukazatelů definovaných pro otevřenou smyčku v uzavřeném regulačním obvodu [16]. Schéma uzavřeného regulačního obvodu s přidaným samoseřizováním regulátoru je zobrazeno na obr. 1. Předpokládejme, že regulovaná soustava může být popsána pomocí lineárního modelu, a situaci, kdy  $w = 0$ ,  $y = 0$ ,  $d = 0$ . Je-li uzavřená smyčka vybuděna harmonickým signálem  $b = A_b \sin(\omega t)$ , po té co se odezva na toto harmonické buzení ustálí, tj. může být popsáno vztahem  $e_b = A_{e_b} \sin(\omega t - \varphi_{e_b})$ , odezva na tento signál na výstupu regulované



Obr. 1 – Schéma regulačního obvodu s přidaným samoseřizováním PID regulátoru

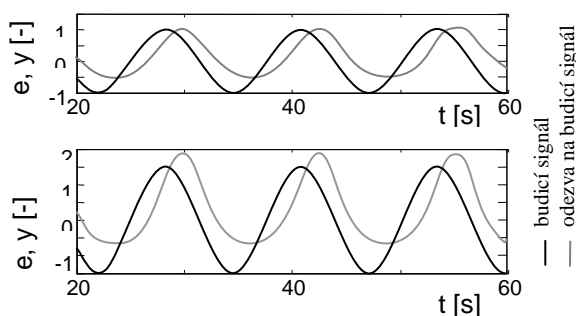
soustavy je  $y = A_y \sin(\omega t - \varphi_y)$ , což odpovídá  $e = A_e \sin(\omega t - \varphi_e)$ . Jelikož přenos odčítacího bloku vzhledem k  $y$  je  $G_{ye} = -1$ , platí  $A_e = A_y$ ,  $\varphi_e = \varphi_y - \pi$ . Z tohoto plyne, že frekvenční ukazatele definované pro otevřenou smyčku mohou být vyhodnoceny v uzavřené regulačním obvodu přímo porovnáním průběhů  $e$  a  $e_b$ . Vhodná volba frekvence budicího signálu  $b$  umožní přímé měření jakéhokoliv zvoleného frekvenčního ukazatele definovaného pouze pro otevřenou smyčku. Více informací o samoseřizovací metodě je uvedeno v [14], [16].

### 3. Vliv velikosti amplitudy budicího signálu

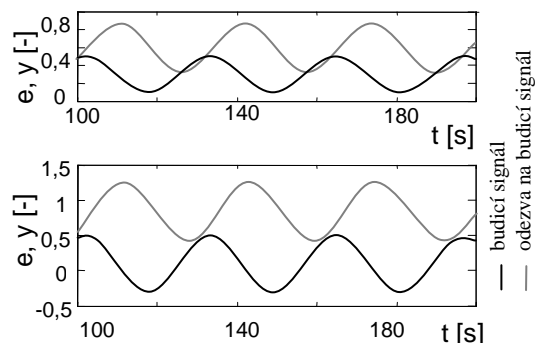
Je-li možné dostatečně přesně popsat regulovanou soustavu pomocí lineárního modelu, volba velikosti amplitudy budicího signálu  $b$  je závislá pouze na povoleném pásmu pohybu regulované veličiny  $y$  v ustáleném stavu. V případě, že regulovaná soustava vykazuje nelineární chování, mohou se při vyhodnocování frekvenčních ukazatelů objevit problémy.

#### 3.1 Experimentální vyhodnocování frekvenčních ukazatelů v otevřené smyčce

Během experimentálního vyhodnocování frekvenčních ukazatelů v otevřené smyčce se mohou vyskytnout dva typy nelinearity. Jednodušší nelinearity způsobují pouze deformaci výstupního signálu regulované soustavy, kdy změna velikosti amplitudy změní míru deformace tohoto výstupního signálu, ale je možné říct, že odezva na budicí harmonický signál osciluje okolo víceméně stejné střední hodnoty (viz obr. 2). Nebezpečnější typ nelinearit způsobuje nejen deformaci odezvy na budicí signál, ale navíc offset střední hodnoty, který je navíc závislý na velikosti amplitudy budicího signálu (viz obr. Obr. 3).



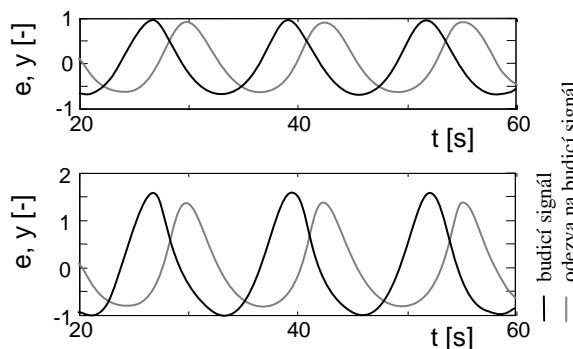
Obr. 2 – Vliv velikosti amplitudy budicího signálu na průběh odezvy v otevřené smyčce pokud v případě soustavy vykazující exponenciální chování – větší amplitudy způsobí mírný offset



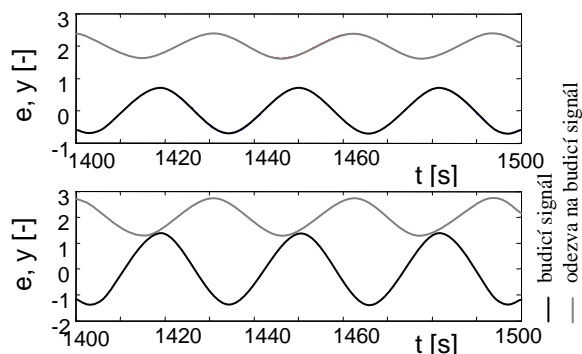
Obr. 3 – Vliv velikosti amplitudy na průběh odezvy v otevřené smyčce v případě soustavy dvou nádrží – větší amplituda způsobí offset

#### 3.2 Experimentální vyhodnocování frekvenčních ukazatelů v uzavřené smyčce

Vyhodnocování frekvenčních ukazatelů v uzavřené smyčce má dvě hlavní výhody: změřené hodnoty ukazatelů jsou méně ovlivněny velikostí amplitudy budicího signálu a offset, který může vzniknout během vyhodnocování v otevřené smyčce je v uzavřené smyčce potlačen.



Obr. 4 – Porovnání vlivu amplitudy na odezvu v uzavřené regulační smyčce v případě soustavy vykazující exponenciální chování



Obr. 5 – Porovnání vlivu amplitudy na odezvu v uzavřené regulační smyčce v případě soustavy dvou nádrží

### 3.3 Maximální amplituda budícího signálu

Vztah mezi  $e_b = A_{e_b} \sin(\omega t - \varphi_{e_b})$  a  $y = A_y \sin(\omega t - \varphi_y)$  (v případě nelineární soustavy se jedná o první harmonické signálů v regulační smyčce) je jednoduchý, signál  $y$  je fázově posunut o  $\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_{e_b}$  a jeho amplituda je změněna vzhledem k budícímu signálu v poměru  $k_A = A_y / A_{e_b}$ . Odezva na harmonické buzení pak může být vyjádřena jako  $y = k_A A_{e_b} \sin(\omega t - \varphi_{e_b} - \Delta\varphi)$ . Požadavky na vynucené kmitání jsou protichůdné, amplituda odezvy musí být dostatečně velká, aby vyhodnocování frekvenčních ukazatelů bylo dostatečně přesné, ale současně nesmí přesáhnout povolené tolerance nepřesnosti při regulaci. Obvykle se vyskytují dva typy omezení: maximální povolené kmity regulované veličiny  $y$  a maximální rychlost změny hodnoty regulované veličiny  $\dot{y}$ .

Maximální povolené kmity jsou obvykle stanoveny technologem regulované soustavy. Maximální rychlost změny ve většině případů vyplývá pouze z parametrů regulované soustavy (použité akční členy, pasivní odpory, atd.), tedy ve většině případů není zjistitelná bez přesného modelování regulované soustavy. Jelikož maximální rychlost průběhu harmonického signálu závisí jak na jeho amplitudě, tak na jeho frekvenci  $\omega$ , je nutné volit amplitudu budícího signálu s ohledem právě na frekvenci budícího signálu  $A_{e_b} = \dot{y} / (k_A \omega)$ .

## 4. Porovnání s metodou relé

Hlavním rozdílem mezi samoseřizovací metodou založenou na vyhodnocování frekvenčních ukazatelů a metodou relé je přítomnost generátoru harmonického kmitání, což přináší některé výhody. Metoda relé generuje budící signál v závislosti na aktuální hodnotě regulované veličiny (regulátor je nahrazen relé během identifikačního procesu) [1]. Díky tomu může šum ovlivnit vyhodnocování parametrů. Navíc, pokud se objeví větší porucha, tato může identifikační proces dokonce zastavit. Frekvence budícího signálu může být nastavena pouze pomocí vložení dopravního zpoždění do zpětné vazby nebo nastavením hystereze relé [6]. Tímto způsobem může být budící frekvence pouze snížena, ale ne zvýšena. Pro získání parametrů bodu frekvenční charakteristiky se zpožděním  $-\pi/2$  může být použito sériového spojení relé a integrátoru [13]. Existují i zapojení umožňující identifikaci více bodů frekvenční charakteristiky [4][9] pomocí zapojení více relé, ale jedná se o zapojení dosti

složitá. Samoseřizovací metoda založená na vyhodnocování frekvenčních ukazatelů umožňuje nastavení budicí frekvence podstatně jednodušeji, pouhou změnou nastavení generátoru budicího signálu. Připojením více generátorů budicího signálu může být vyhodnocováno více bodů frekvenční charakteristiky současně a nezávisle na sobě.

Díky tomu, že metoda relé využívá budicí signál generovaný na základě průběhu regulované veličiny, není možné identifikovat současně více smyček MIMO regulované soustavy [17], neboť se mohou vzájemně ovlivňovat a tím způsobit chybné vyhodnocení parametrů jednotlivých smyček. Pro MIMO regulovanou soustavu je doporučována postupná identifikace jednotlivých smyček. Díky přítomnosti generátoru harmonických kmitů může být při použití samoseřizovací metody založené na vyhodnocování frekvenčních ukazatelů vyhodnocováno více smyček MIMO regulované soustavy paralelně. Pouze je nutné jednotlivé odezvy od sebe vhodným způsobem oddělit.

## **5. Závěr**

Vyhodnocování frekvenčních ukazatelů v uzavřené smyčce v porovnání s vyhodnocováním těchto ukazatelů v otevřené smyčce prokázalo několik výhod. Může být provedeno bez nutnosti přerušit nebo jinak omezit regulační pochod. Díky tomu, že takovéto vyhodnocování je bezmodelové, je použitelné i pro regulační obvody s nelinearitami. Uzavřená regulační smyčka snižuje stupeň deformace odezev na harmonické buzení, jsou-li v obvodu přítomny nelinearity, které při vyhodnocování v otevřené smyčce ovlivňují výsledky.

V rámci simulačních experimentů bylo úspěšně ověřeno že samoseřizovací metoda založená na vyhodnocování frekvenčních ukazatelů z vynucených frekvenčních odezev umožňuje paralelní seřizování více PID regulátorů MIMO regulované soustavy.

## **Poděkování**

Tato práce byla podpořena grantem Grantové agentury ČR č. 101/07/1667 a grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS10/252/OHK2/3T/12.

## **Literatura**

- [1] Åström, K. J., Hägglund, T., Automatic Tuning of Simple regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins. *Automatica*. 1984, No. 20, pp. 645-651
- [2] Åström, K. J., Hägglund, T., The Future of PID Control. *Control Engineering Practice*. 2001, Volume 9, Issue 11, s. 1163-1175
- [3] Åström, K. J., Hägglund, T., Hang, C. C., Ho, W. K., Automatic tuning and adaptation for PID controllers - a survey. *Control Engineering Practice*. 1993, Volume 1, Issue 4, pp. 699-714
- [4] Friman, M., Automatic Retuning of PI Controllers in Oscillating Control Loops. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1997, No. 36, pp. 4255-4263

- [5] Klán, P., Komerčně využívané pokročilé metody nastavování PID regulátorů. *Automa.* 2009, No. 12. pp 14-18. ISSN 1210-9592
- [6] Macháček, J., Identifikace soustav pomocí nelinearity ve zpětné vazbě. *Automatizace.* 1998, No. 9. ISSN 0005-125X
- [7] O'Dwyer, A., *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules.* London : Imperial College Press. 2003. ISBN 1-86094-342-X
- [8] Rojas-Moreno, A., Parra-Quispe, A., Design and Implementation of a Water Tank Control System Employing a MIMO PID Controller. *IMETI 2008: International Multi-Conference on Engineering and Technological Innovation Proceedings, vol. II.* Orlando : IIIS – International Institute of Informatics and Systemics. 2008, pp. 344-349. ISBN 978-1-934272-44-2
- [9] Shen, S. H., Wu, J. S., Yu, C. C., Autotune Identification under Load Disturbance. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1996, No. 35, pp. 1174-1180
- [10] Sobota, J., Schlegel, M., LTI systems identification using generalized method of moments. *Proceedings of the 7th International Conference on Process Control 2006.* Pardubice : University of Pardubice, 2006, pp. 1-12. ISBN 80-7194-860-8
- [11] Šulc, B., Autotuned PI Level Control in a Two-Tank-Cascade Model with Sliding Control Error Reference Course. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems.* 2005, vol. 4, no. 9, pp. 1077-1084. ISSN 1109-2734
- [12] Šulc, B., Vrána, S., Some Observations on Development and Testing of a Simple Autotuning Algorithm for PID Controllers. *WSEAS Transactions on Systems and Control.* 2009, Volume 4, Issue 10, pp. 497-508. ISSN 1991-8763
- [13] Vítečková, M., Víteček, A., Experimental Plant Identification by Relay Method. *Proceedings of XXX. Seminary ASR '05 "Instruments and Control".* Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2005, pp. 479–490. ISBN 80-248-0774-2
- [14] Vrána, S., Šulc, B., Control Quality Indicators in PID Controller Autotuning. *The 4th International Conference on Cybernetics and Information Technologies, Systems and Applications: CITSA 2007 Jointly with The 5th International Conference on Computing, Communications and Control Technologies: CCCT 2007 Proceedings, Volume II,* Orlando : IIIS – International Institute of Informatics and Systemics, 2007. pp. 280-285. ISBN 978-1-934272-08-4
- [15] Vrána, S., Šulc, B., Model-free PID Controller Autotuning Algorithm Based on Frequency Response Analysis. *Proceedings of The International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics: IMCIC 2010.* Orlando: IIIS – International Institute of Informatics and Systemics, 2010
- [16] Vrána, S., Šulc, B., Multicriterion Modelles PID Controller Autotuning Keeping Desired Values of Control Quality Indicators. *Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava. Mechanical Series,* vol. LIII, no. 2. Ostrava: VŠB - Technická Univerzita Ostrava, 2007, p. 167-170. ISSN 1210-0471
- [17] Yu, C. C., *Autotuning of PID Controllers.* London : Springer – Verlag, London Limited. 1999. ISBN 3-540-76250-7
- [18] Ziegler, J. G., Nichols, N. B., Optimum settings for automatic controllers. *Trans. ASME* 64, 1942. s. 759–768