

# **ZJIŠŤOVÁNÍ FREKVENČNÍCH VLASTNOSTÍ OTEVŘENÉHO OBVODU V UZAVŘENÉ REGULAČNÍ SMYČCE**

## **Obtaining Open Loop Frequency Indicators from Closed Control Loop Frequency Response Assessment**

**Stanislav Vrána**

*Abstrakt:* Lineární teorie poskytuje nástroje využitelné pro seřizování regulátorů. Jedním z těchto nástrojů jsou indikátory kvality regulačního pochodu, které jsou odvozeny od přenosu otevřeného regulačního obvodu. Při znalosti modelu soustavy a modelu regulátoru, jsou-li oba tyto modely lineární, lze tyto indikátory vypočítat matematicky. Nejsou-li lineární, je jedinou možností jejich experimentální zjištění. Cílem příspěvku je ověření možnosti získat tyto indikátory nejen v otevřené smyčce, ale i v uzavřeném regulačním obvodu během regulačního pochodu bez nutnosti rozpojení regulační smyčky.

*Klíčová slova:* frekvenční charakteristika, otevřená smyčka, uzavřený regulační obvod, budicí kmitý, harmonický signál

### **1. Úvod**

Indikátory kvality regulačního pochodu definované na Nyquistově křivce jsou vhodným nástrojem pro seřizování regulátorů [1]. Mezi nejznámější indikátory kvality regulačního pochodu patří bezpečnost ve fázi, bezpečnost v amplitudě, maximální citlivost a průchozí frekvence [2], ale je možné definovat i další indikátory. Je-li známý lineární model soustavy a lineární model regulátoru, je možné tyto indikátory kvality regulačního pochodu určit matematicky. Nejsou-li lineární modely známy, je možné podle lineární teorie určit indikátory kvality regulačního pochodu experimentálně v otevřené smyčce, což ale vyžaduje přerušování probíhajícího regulačního pochodu. Pokud jsou indikátory kvality regulačního pochodu získány v uzavřeném regulačním obvodu, tato podstatná nevýhoda odpadá. Indikátory kvality regulačního pochodu lze využít pro samoseřizovací metodu [3], [4].

### **2. Princip zjišťování frekvenčních vlastností otevřené smyčky v uzavřeném obvodu**

Při experimentálním zjišťování frekvenčních vlastností, tj. ustálený přenos kmitů, v otevřené smyčce se spojitou proporcionální setrvačnou soustavou a spojitým regulátorem

obecně platí (viz obr. 1), že přivedené vstupní harmonické kmity se přetransformují na fázově posunuté kmity s jinou amplitudou, tzn. že

$$A_e \sin(\omega t) \neq A_y \sin(\omega t + \varphi_y) \quad (1)$$

Pro zjednodušení můžeme zavést transformační operátor (přenos) vyjadřující vzájemný vztah mezi těmito kmity v rovnovážném stavu v časové oblasti  $G = [g, \varphi_g]$ , který je definován jako

$$GA \sin(\omega t + \varphi) = gA \sin(\omega t + \varphi + \varphi_g) \quad (2)$$

takže můžeme psát

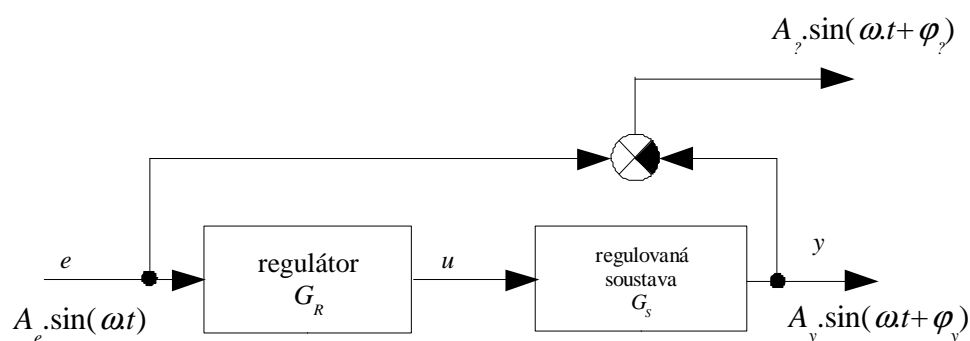
$$A_y \sin(\omega t + \varphi_y) = GA_e \sin(\omega t) \quad (3)$$

Obsahuje-li otevřená smyčka integrační člen, platí

$$A_y \sin(\omega t + \varphi_y) = GA_e \sin(\omega t) + k_\omega(\omega) \quad (4)$$

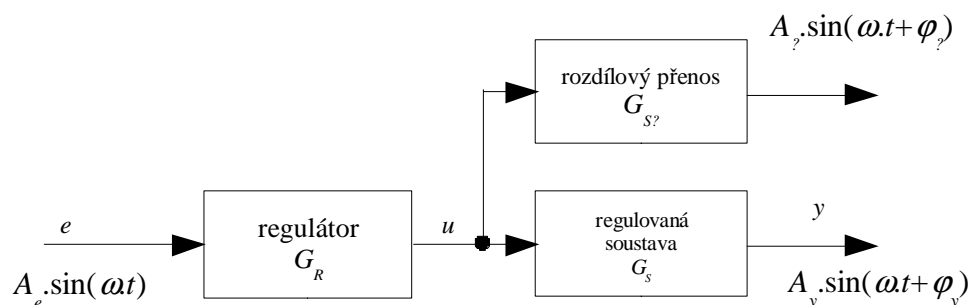
kde  $k_\omega$  je stejnosměrná složka. Tuto stejnosměrnou složku můžeme zanedbat neboť vyhodnocování frekvenčních vlastností nijak neovlivní. Dále je nutné určit rozdílové kmity

$$A_\gamma \sin(\omega t + \varphi_\gamma) = A_e \sin(\omega t) - A_y \sin(\omega t + \varphi_y) \quad (5)$$



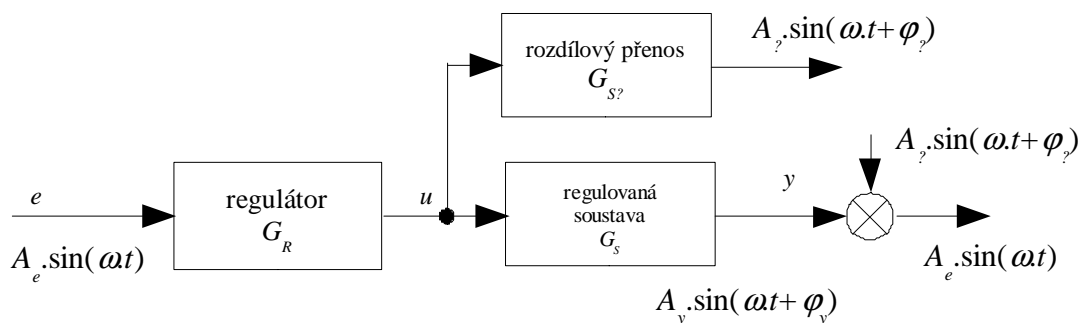
Obr. 1 Schéma otevřeného obvodu doplněného o určování rozdílových kmitů

Po zavedení rozdílového přenosu  $G_{S\gamma}$ , pro který platí  $G_{S\gamma} = \frac{1}{G_R} - G_S$ , můžeme schéma na obr. 1 upravit na tvar uvedený na obr. 2.



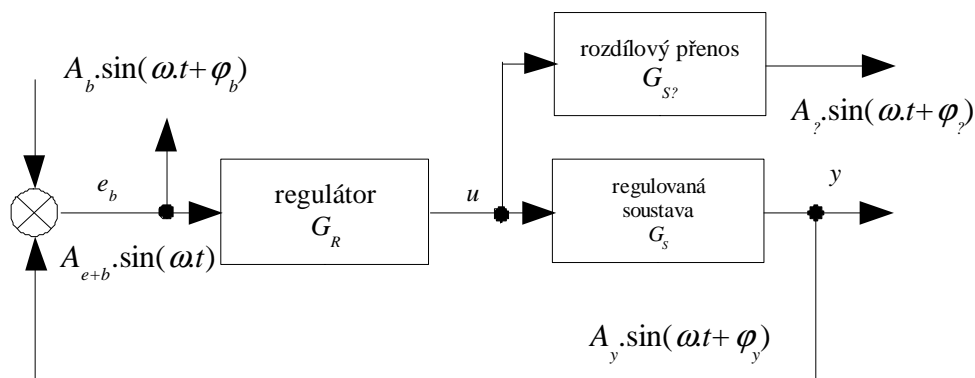
Obr. 2 Schéma otevřeného obvodu doplněného o určování rozdílových kmitů po zavedení rozdílového přenosu

Je-li soustava buzena harmonickými kmitů  $A_e \sin(\omega t)$  a podaří-li se nám nějakým způsobem určit parametry kmitů  $A_z \sin(\omega t + \varphi_z)$  a přičteme-li tyto kmitů ke kmitům regulované veličiny  $A_y \sin(\omega t + \varphi_y)$ , získáme opět původní budící kmitů  $A_e \sin(\omega t)$ , jak je schématicky uvedeno na obr. 3.



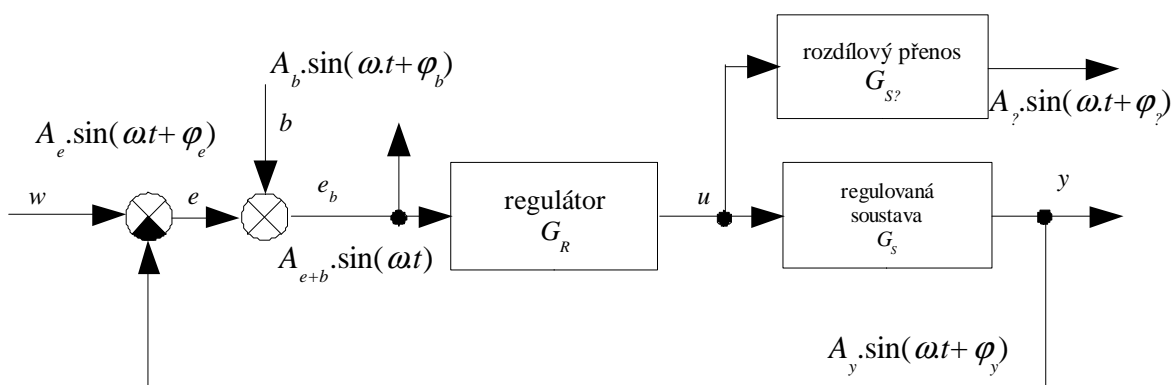
Obr. 3 Schéma otevřeného obvodu se znovuzískáním budících kmitů

Nyní můžeme uzavřít smyčku (budící kmitů jsou dále označovány  $A_b \sin(\omega t + \varphi_b)$ ), přičemž platí  $A_b \sin(\omega t + \varphi_b) = A_z \sin(\omega t + \varphi_z)$ , čímž získáme uzavřenou smyčku, která je ekvivalentní uzavřené smyčce se samobuzením, což znamená, že získáme uzavřenou smyčku (obr. 4), která umožní měřit frekvenční vlastnosti otevřeného obvodu, neboť umožňuje přítomnost ustáleného harmonického kmitání bez nutnosti nastavení parametrů regulátoru tak, aby se kořeny charakteristického polynomu uzavřeného regulačního obvodu nacházely na mezi stability. Vzhledem k tomu, že stabilní regulační smyčka se v ustáleném stavu nachází v rovnováze, při jakékoliv volbě parametrů budících kmitů  $A_b \sin(\omega t + \varphi_b)$  se průběhy harmonických kmitů  $e_b$  a  $y$  ustálí tak, aby velikost rozdílových kmitů  $A_z \sin(\omega t + \varphi_z)$  v soustavě byla rovna velikosti budících kmitů  $A_b \sin(\omega t + \varphi_b)$ .



Obr. 4 Schéma uzavřeného obvodu umožňujícího zjišťování frekvenčních vlastností otevřeného obvodu

Velmi podstatnou nevýhodou takovéto smyčky je její nepoužitelnost jako regulační smyčky, neboť se v ní nachází pouze kladná zpětná vazba, přičemž pro správnou funkci uzavřeného regulačního obvodu potřebujeme zápornou zpětnou vazbu. Proto je nutné tuto smyčku o zápornou zpětnou vazbu rozšířit (obr. 5), čímž se ale změní vztahy mezi průběhy jednotlivých harmonických kmitů v obvodu.



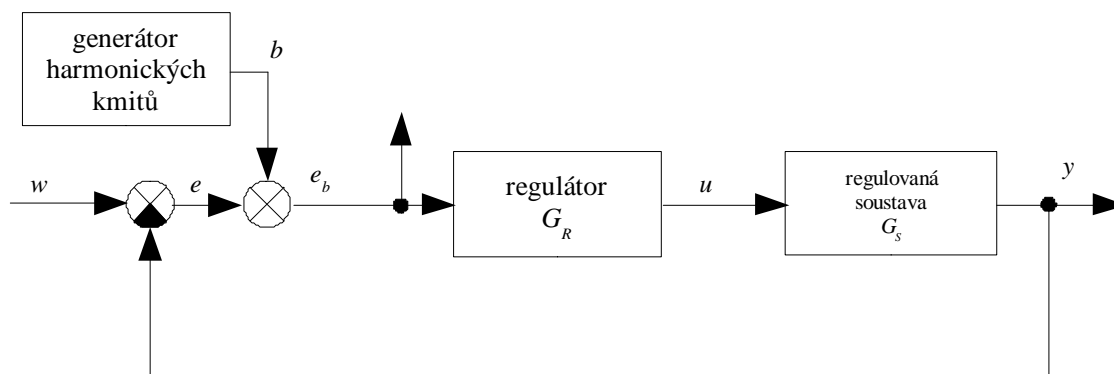
Obr. 5 Schéma uzavřeného obvodu se zpětnou vazbou umožňujícího zjišťování frekvenčních vlastností otevřeného obvodu

Tyto změny se projeví také v tom, že se změní rozdílový přenos

$$G_{S?} = \frac{1}{G_R} - G_S G_- \quad (6)$$

kde  $G_-$  je přenos odečítacího členu.

Pro vlastní zjišťování frekvenčních vlastností otevřeného obvodu v uzavřené regulační smyčce není nutné přenos  $G_{S?}$  znát (obr. 6).



Obr. 6 Schéma uzavřeného regulačního obvodu s generátorem harmonických kmitů

V uzavřeném regulačním obvodu pak můžeme odvodit

$$G_{E_B E} = G_R G_S G_- \quad (7)$$

$$G_{E_B B} = G_R G_S? \quad (8)$$

(vztah (8) vychází z definice velikosti budících kmitů)

Po sečtení (7) a (8) dostaneme

$$G_{E_B E} + G_{E_B B} = G_R (G_S G_- + G_S?) \quad (9)$$

po dosazení (6) do (9) dostaneme

$$G_{E_B E} + G_{E_B B} = G_R \left( G_S G_- + \frac{1}{G_R} - G_S G_- \right) \quad (10)$$

Vztah (10) můžeme zjednodušit na

$$G_{E_B E} + G_{E_B B} = 1 \quad (11)$$

Díky platnosti vztahu (11) je zajištěno, že nedojde k postupnému utlumení kmitů  $e_b = A_{e+b} \sin(\omega t + \varphi_{e+b})$ , ani k neomezeně rostoucím kmitům (mimo případu, kdy dojde k rezonanci), pokud je uzavřená regulační smyčka stabilní.

Protože v jakékoliv stabilní uzavřené regulační smyčce platí

$$A_\gamma \sin(\omega t + \varphi_\gamma) = A_b \sin(\omega t + \varphi_b) \quad (12)$$

Ize tento způsob experimentální způsob zjišťování frekvenčních vlastností otevřeného obvodu využít i pro nelineární soustavy a nelineární regulátory.

### **3. Závěr**

Zjišťování indikátorů kvality regulačního pochodu je možné využít k ověření vhodnosti nastavení parametrů regulátoru nebo jako součást samoseřizovací metody. Výhodou zjišťování indikátorů kvality regulačního pochodu v uzavřeném regulačním obvodu je, že pro toto zjišťování není nutné odpojovat regulátor nebo jinak omezovat jeho funkci. Zjišťování může navíc probíhat i během regulačního pochodu.

### **Poděkování**

Práce vznikla za podpory grantu GAČR č. 101/07/1667.

### **Literatura**

- [1] Åström, K. J., Hägglund, T. Advanced PID Control. USA: ISA, Research Triangle Park, NC, 2006. ISBN 978-1-55617-942-6
- [2] Šulc, B., Vítečková, M. Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů. Monografie ČVUT. Praha: ČVUT v Praze, 2004. ISBN 80-01-03007-5
- [3] Vrána, S., Šulc, B. Control Quality Indicators in PID Controller Autotuning. In: The 4<sup>th</sup> International Conference on Cybernetics and Information Technologies, Systems and Applications: CITSA 2007 Jointly with The 5<sup>th</sup> International Conference on Computing, Communications and Control Technologies: CCCT 2007 PROCEEDINGS Volume II. Orlando: IIS – International Institute of Informatics and Systemics, 2007, p. 280-285. ISBN 978-1-934272-08-4
- [4] Vrána, S., Šulc B. Frequency Based Autotuning Tested on a Laboratory Set-up in Comparison with Other Setting Techniques. In: Automatizácia a riadenie v teórii a praxi ARTEP 2009 – Zborník príspevkov. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2009, s. 7-1-7-11.

### **Kontaktní adresa**

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky, Odbor automatického řízení a inženýrské informatiky, Technická 4, Praha 6 - Dejvice, Česká republika, +420 2 2435 2651, stanislav.vrana@fs.cvut.cz