

SAMONASTAVUJÍCÍ SE REGULÁTOR PRO VELMI SLABĚ TLUMENÉ KMITAVÉ SYSTÉMY

Miloš Schlegel, Oldřich Večerek

Katedra kybernetiky, Fakulta aplikovaných věd, Západočeská univerzita v Plzni

Abstrakt: Příspěvek se zabývá samonastavujícím se regulátorem pro podkriticky tlumené systémy. Je popsán nový algoritmus frekvenční identifikace, který ve spojení se standardním návrhem stavového regulátoru s vnitřním modelem poruchy tvoří jádro automatického návrhu regulátoru. Hlavním výsledkem je obecně použitelný funkční blok samonastavujícího se regulátoru realizovaný jako C MEX S-funkce v programovém systému Simulink, který může být též (beze změn) instalován na real-time hardwaru dSPACE nebo na libovolné otevřené platformě (PLC, DSP s jazykem C). Dále jsou uvedeny výsledky aplikace vyvinutého regulátoru na reálný problém kmitání trubky v aerodynamickém tunelu.

1 Úvod

Regulátory se zabudovanou funkcí automatického seřízení parametrů jsou v praxi velmi žádané, neboť mohou podstatným způsobem zkrátit a zkvalitnit obvykle složitý proces uzavírání regulační smyčky. Dříve běžný postup, ve kterém se odděleně řeší identifikace řízeného systému a problém návrhu regulátoru, se zdá být dnes v masovém měřítku v průmyslu nepoužitelný. Místo toho je třeba hledat integrální řešení vedoucí v konečné podobě k automatickému návrhu regulátoru na základě automaticky provedeného experimentu.

Většina řízených soustav v průmyslu má monotónní vlastnosti (monotónní přechodovou a frekvenční charakteristiku). Z tohoto důvodu je hlavní směr ve vývoji samonastavujících se regulátorů zaměřen na nadkriticky tlumené systémy. Apriorní předpoklad o nadkritickém tlumení umožňuje podstatným způsobem redukovat složitost návrhové procedury (identifikačního experimentu a výpočtu regulátoru) [1]. V důsledku toho již pro tento případ existují dosti spolehlivé průmyslové autotunery, které na povel operátora provedou zcela automaticky jednorázové seřízení příslušného PID regulátoru ve standardních situacích [2], [4].

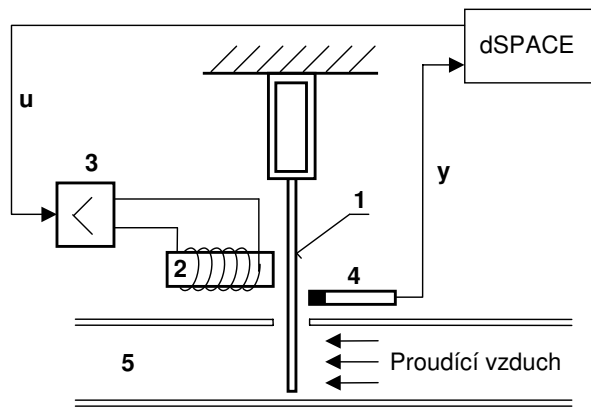
Tento příspěvek vybočuje z výše uvedeného směru výzkumu a popisuje samonastavující se stavový regulátor pro třídu podkriticky tlumených systémů, které lze v okolí rezonanční frekvence obvykle s dostatečnou přesností popsat přenosem druhého řádu ve tvaru

$$F(s) = \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + 2\xi\Omega s + \Omega^2}, \quad (1)$$

kde $\Omega > 0$ je přirozená (netlumená) frekvence, ξ , $0 < \xi < 1$, je koeficient tlumení a b_1 , b_0 jsou libovolná reálná čísla. Základní zde uvažovaný požadavek na samonastavující se regulátor lze stručně vyjádřit následovně: na povel operátora se regulátor automaticky naladí tak, aby v uzavřené smyčce dostatečně zatlumil rezonanční kmity řízeného systému. Dodatečně může být požadováno, aby výstup řízeného systému sledoval s nulovou regulační odchylkou v ustáleném stavu konstantní nebo sinusový referenční signál. Takto formulovaný problém se zdá býti dostatečně zajímavý z aplikačního hlediska. Patří sem například četné úlohy aktivního tlumení mechanických soustav.

Vývoj samonastavujícího se regulátoru, popisovaného v této práci, byl však motivován zcela konkrétním problémem řízení elektromechanického kmitavého systému navrženého pro zkoumání vzájemného ovlivňování kmitajících trubek v aerodynamickém tunelu. Jeho zjednodušené schéma je zobrazeno na obr. 1. Trubka 1, impulsně vybuzená, kmitá přibližně na frekvenci 44Hz s koeficientem tlumení $\xi = 0,027$. Cílem regulátoru je na ni silově působit elektromagnetem 2 tak, aby byly rezonanční kmity odstraněny. Samonastavující se regulátor byl implementován ve formě C MEX S-funkce (Simulink) na hardwaru dSPACE.

Článek je členěn následovně: v oddílu 2 je stručně popsána základní koncepce samonastavujícího se regulátoru pro kmitavé systémy a navržený příslušné algoritmy frekvenční identifikace



Obrázek 1: Zjednodušené schéma elektromechanického systému. 1 – ocelová trubka s rezonanční frekvencí 44Hz, 2 – elektromagnet silově působící na kmitající trubku, 3 – výkonový člen, 4 – snímač polohy trubky, 5 – aerodynamický tunel.

a návrhu stavového regulátoru metodou přiřazení pólů. V oddílu 3 je uveden detailní uživatelský popis činnosti funkčního bloku SC2FA (C MEX S-funkce) realizujícího vyvinutý regulátor. Oddíl 4 popisuje jeho aplikaci na výše zmíněný elektromechanický systém. Poslední 5. oddíl obsahuje závěrečné poznámky.

2 Koncepce regulátoru

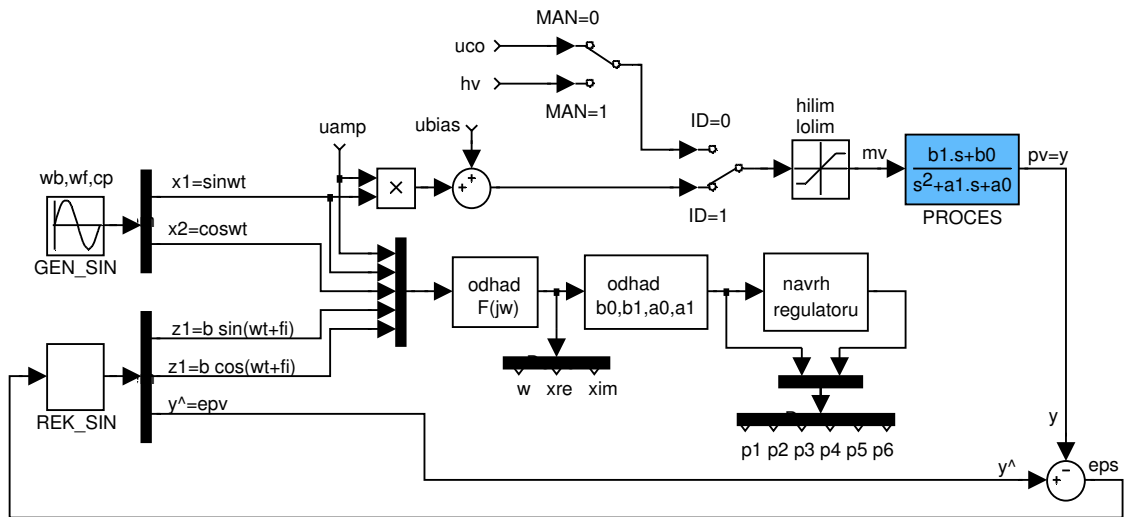
Samonastavující se regulátor musí zajišťovat automaticky následující funkce:

- identifikaci řízeného systému,
- návrh algoritmu řízení,
- realizaci navrženého algoritmu řízení.

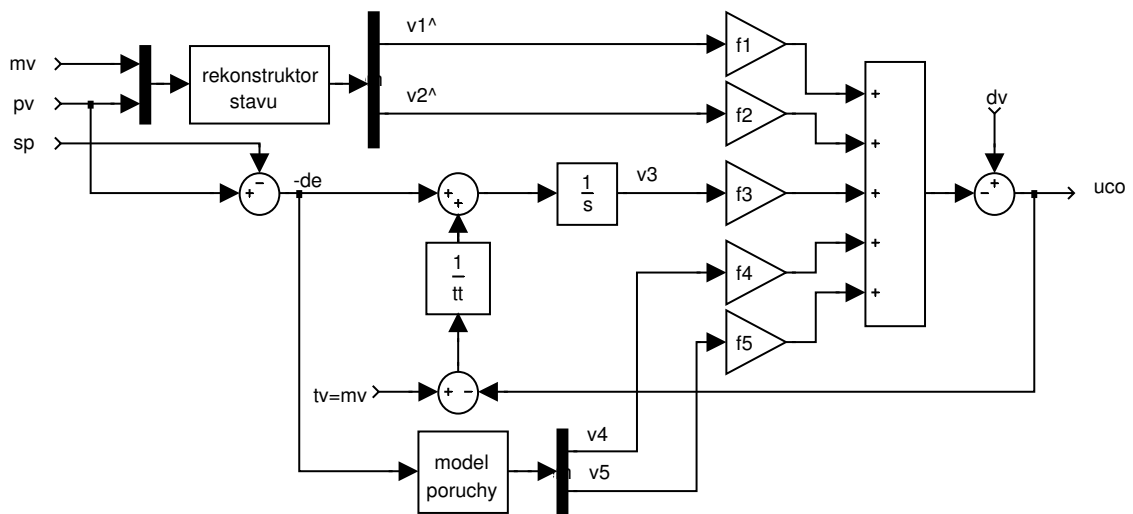
První dvě z uvedených funkcí mohou být realizovány různým způsobem [3]. Hlavním kritériem při výběru vhodných technik byla spolehlivost a jednoduchost identifikační a návrhové metody. Důležité bylo též minimalizovat množství apriorní informace o řízeném systému.

Pro identifikaci řízeného systému byla zvolena frekvenční metoda, která omezuje množství potřebné apriorní informace pouze na hrubou znalost frekvenčního pásma obsahujícího rezonanční frekvenci systému. V identifikačním experimentu je systém buzen harmonickým signálem, jehož frekvence pomalu spojitě probíhá zadaným intervalem. Výstup systému je zpracováván rekonstruktorem stavu (Kalmanovým filtrem) hypotetického lineárního t-variantního systému, který odhaduje jeho stejnosměrnou složku, amplitudu a fázi. Tyto údaje již postačují pro průběžný výpočet odhadu frekvenčního přenosu. Parametrický model ve tvaru (1) je poté automaticky určen ze dvou vhodných bodů frekvenční charakteristiky, které jsou definovány fázovými zpožděními (např. -60° a -120°). Schématicky je nově vyvinutá frekvenční metoda zobrazena na obr. 2a. Detailnější matematický popis snadněji pochopitelné spojitě variantní algoritmu je naznačen v odstavci 2.1. Skutečně realizovaný algoritmus je však samozřejmě diskretní.

Na rozdíl od identifikace je návrh regulátoru standardní. Zákon řízení je tvořen lineární stavovou zpětnou vazbou od stavu rozšířeného systému. Je použit separační teorém a princip vnitřního modelu poruchy [3]. Stav řízeného systému je odhadován identickým rekonstruktorem. Dynamické vlastnosti uzavřené smyčky jsou definovány dvěma požadovanými póly rekonstruktora a dvěma až pěti póly uzavřené smyčky (podle řádu rozšířeného systému). Poloha komplexních pólů se zadává přirozenou frekvencí a koeficientem tlumení, přičemž přirozená frekvence a reálný pól se nezadávají absolutně, ale relativně vzhledem k odhadu přirozené frekvence Ω řízeného systému. Takto mohou být přednastaveny rozumné návrhové požadavky pro předem neznámou rezonanční frekvenci Ω . V případě, kdy rozšířený systém obsahuje integrátor, je řešen



(a)



(b)

Obrázek 2: Zjednodušené vnitřní schéma samonastavujícího se stavového regulátoru. (a) frekvenční identifikace, (b) stavová zpětná vazba s rekonstruktorem stavu a ošetřením unášení integrační složky. Na obrázku není znázorněna skutečnost, že blok návrh regulátoru v části (a) automaticky nastaví parametry rekonstruktoru stavu a koeficienty $f_1 - f_5$ stavové zpětné vazby v části (b).

problém unášení integrační složky standardní technikou. Celková struktura stavového regulátoru je zobrazena na obr. 2b. Podrobnější popis návrhu spojité varianty je uveden v odstavci 2.2.

Implementace obou algoritmů (identifikace a řízení) musí z podstaty věci splňovat vysoké nároky na rychlost. Například výše zmiňovaný elektromechanický systém má rezonanční frekvenci 44Hz a rozumná perioda vzorkování tedy musí být kolem 0,1ms. Z tohoto důvodu byly algoritmy kódovány v jazyku C jako MEX S-funkce programového systému Matlab-Simulink a byl užit hardware pro vývoj prototypů dSPACE 1104. Navíc byla použita nestandardní technologie psaní S-funkcí, která umožňuje snadnou implementaci vyvinutého algoritmu na libovolnou cílovou platformu (PLC, DSP, ...) podporující jazyk C. Podrobný popis vyvinutého bloku SC2FA z uživatelského hlediska je uveden v oddílu 3.

2.1 Algoritmus frekvenční identifikace

- **Generátor budícího sinusového signálu** (GEN_SIN) je ve tvaru

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega(t) \\ -\omega(t) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

kde $\omega(t) = \omega_b e^{\gamma t}$ probíhá interval $\langle \omega_b, \omega_f \rangle$ a γ je nepřímým zadávaným parametrem (viz (6)), který musí být dostatečně malý, aby rychlost rozmitání frekvence byla zanedbatelná vůči frekvenci $\omega(t)$ a dynamice identifikovaného systému (1).

- **Rekonstruktor stavu** hypotetického generátoru sinusovky s aditivní stejnosměrnou složkou (REK_SIN) je popsán vztahy

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega(t) & 0 \\ -\omega(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1(\omega) \\ k_2(\omega) \\ k_3(\omega) \end{bmatrix} \epsilon, \quad (3)$$

$$\hat{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix}, \quad \epsilon = \hat{y} - y, \quad (4)$$

kde y je výstup identifikovaného systému. Požadované póly rekonstruktoru jsou

$$-\alpha_0 \omega(t) \left(\xi_0 \pm \sqrt{\xi_0^2 - 1} \right), \quad -\alpha_0 \omega(t),$$

kde α_0 určuje relativní polohu pólů vůči aktuální budící frekvenci $\omega(t)$ a ξ_0 udává koeficient tlumení prvního a druhého pólu. Z tohoto požadavku lze odvodit vztahy pro zesílení $k_1(\omega)$, $k_2(\omega)$ a $k_3(\omega)$ ve tvaru

$$\begin{aligned} k_1(\omega) &= \alpha_0 \omega(t) [\alpha_0^2 - (2\xi_0 + 1)], \\ k_2(\omega) &= \omega(t) [1 - \alpha_0^2 (2\xi_0 + 1)], \\ k_3(\omega) &= -\alpha_0^3 \omega(t). \end{aligned}$$

Poznámka: Vzhledem k tomu, že systém (3) je časově variantní (jeho vlastnosti se mění s frekvencí $\omega(t)$), nelze přísně vzato hovořit o jeho pólech a používat metodu přiřazení pólů. Rychlost změny frekvence $\omega(t)$ však musí být volena tak malá, aby námi použitý předpoklad t-invariantnosti systému (3) byl aproximativně splněn.

- **Odhad frekvenčního přenosu** $\hat{F}(j\omega)$

$$\begin{aligned} x_1 &= \sin \omega t, \\ x_2 &= \cos \omega t, \\ z_1 &= b \sin(\omega t + \varphi) = b(x_1 \cos \varphi + x_2 \sin \varphi), \\ z_2 &= b \cos(\omega t + \varphi) = b(x_2 \cos \varphi - x_1 \sin \varphi). \end{aligned}$$

Odtud obdržíme

$$\begin{aligned} b &= \sqrt{z_1^2 + z_2^2}, \\ \cos \varphi &= \frac{1}{b}(x_1 z_1 + x_2 z_2), \\ \sin \varphi &= \frac{1}{b}(x_2 z_1 - x_1 z_2), \\ \varphi &= \text{atan2}(\cos \varphi, \sin \varphi). \end{aligned}$$

A konečně

$$\hat{F}(j\omega) = \frac{b}{a} e^{j\varphi},$$

kde a je amplituda budícího harmonického signálu.

• **Koeficienty přenosové funkce řízeného systému** vypočteme ze dvou naměřených bodů $\hat{F}(j\omega_1)$ a $\hat{F}(j\omega_2)$ s požadovaným fázovým zpožděním po řadě φ_1 a φ_2 .

2.2 Návrh stavového regulátoru

• **Model rozšířeného systému** (model řízeného systému doplněný integrátorem a modelem poruchy druhého řádu) je ve tvaru

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -a_0 & -a_1 & 0 & 0 & 0 \\ b_0 & b_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ b_0 & b_1 & 0 & -e_0 & -e_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} w, \quad (5)$$

kde a_0, a_1, b_0, b_1 jsou parametry řízeného systému (1) získané v procesu frekvenční identifikace, u je vstup řízeného systému, w je požadovaná hodnota a

$$e_0 = \Omega_d^2, \quad e_1 = 2\xi_d \Omega_d,$$

kde Ω_d a ξ_d jsou volitelné parametry odpovídající po řadě přirozené frekvenci a koeficientu tlumení modelu poruchy.

• **Rekonstruktor stavu řízeného systému** je ve tvaru

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{v}_1 \\ \hat{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_1 \\ \hat{v}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} \left(y - \begin{bmatrix} b_0 & b_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_1 \\ \hat{v}_2 \end{bmatrix} \right),$$

kde inovační zesílení g_1 a g_2 jsou určena z požadavku na přiřazení pólů rekonstruktoru. Označujeme-li

$$\Omega = \sqrt{a_0}$$

přirozenou frekvenci řízeného systému, potom jsou požadovány následující póly rekonstruktoru

$$-\alpha_R \Omega \left(\xi_R \pm \sqrt{\xi_R^2 - 1} \right),$$

kde α_R určuje zadanou relativní polohu pólů vůči přirozené frekvenci Ω řízeného systému a ξ_R je požadovaný koeficient tlumení.

• **Stavová zpětná vazba** ve tvaru

$$u = f_1 \hat{v}_1 + f_2 \hat{v}_2 + f_3 v_3 + f_4 v_4 + f_5 v_5$$

je navržena metodou přiřazení pólů. Jsou požadovány následující póly uzavřené smyčky:

$$-\alpha_1 \Omega \left(\xi_1 \pm \sqrt{\xi_1^2 - 1} \right), \quad -\alpha_2 \Omega \left(\xi_2 \pm \sqrt{\xi_2^2 - 1} \right), \quad -\alpha_3 \Omega,$$

kde $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \xi_1$ a ξ_2 jsou návrhové parametry. Prvé tři z nich určují relativní polohu pólů vůči přirozené frekvenci Ω a zbývající dva definují požadované koeficienty tlumení.

Poznámka: Při konfiguraci stavového regulátoru lze definovat rozšířený systém různými způsoby. Je možné se omezit pouze na model řízeného systému (2. řád), případně ho rozšířit pouze o integrátor (3. řád) nebo o integrátor a model poruchy (5. řád). Posledně uvedené případy se využívají při sledování konstantního nebo sinusového referenčního signálu s nulovou odchylkou v ustáleném stavu.

3 Uživatelský popis bloku regulátoru

Funkční blok SC2FA (viz obr. 3) realizuje stavový regulátor pro systém druhého řádu (1) s frekvenčním autotunerem. Je vhodný především pro aktivní řízení (zatlumení) kmitavých systémů s velmi slabým tlumením ($\xi < 0,1$). Může však být použit též jako samonastavující se regulátor pro libovolný systém, který lze s dostatečnou přesností popsat přenosem ve tvaru (1).

3.1 Identifikace a návrh

Blok pracuje ve dvou režimech. V režimu „identifikace a návrh“ (binární vstup ID=1) se vlastní proces identifikace a návrhu spouští náběžnou hranou vstupu RUN. Na výstupu bloku mv se poté objeví budící harmonický signál se stejnoměrnou složkou **ubias**, amplitudou **uamp** a frekvencí ω postupně probíhající interval $\langle \mathbf{wb}, \mathbf{wf} \rangle$, kde **ubias**, **uamp**, **wb** a **wf** jsou parametry bloku (viz přehled parametrů v odstavci 3.3). Aktuální frekvence ω je přitom kopírována na výstup **w**. Rychlost změny (rozmítání) frekvence je dána parametrem **cp**, který udává relativní zmenšení počáteční periody $T_b = \frac{2\pi}{\mathbf{wb}}$ budící sinusovky za čas T_b , tedy

$$c_p = \frac{\mathbf{wb}}{\omega(T_b)} = \frac{\mathbf{wb}}{\mathbf{wb}e^{\gamma T_b}} = e^{-\gamma T_b}. \quad (6)$$

Hodnota parametru **cp** se obvykle pohybuje v intervalu $c_p \in (0,95; 1)$. Čím menší je koeficient tlumení řízeného systému, tím více se musí **cp** blížit k jedné.

Po uplynutí času **stime** po spuštění generátoru budícího signálu se startuje výpočet odhadu aktuálního bodu frekvenční charakteristiky. Jeho reálná a imaginární část se průběžně kopíruje po řadě na výstupy **xre** a **xim**. Je-li parametr bloku MANF nastaven na 0, potom se v procesu identifikace dvakrát zastaví rozmítání frekvence na dobu **stime** a to v okamžicích, kdy jsou poprvé dosaženy body s fázovým zpožděním **ph1** a **ph2**. Přednastavené hodnoty parametrů **ph1** a **ph2** jsou po řadě -60° a -120° a mohou být změněny na libovolné hodnoty v intervalu $(-360^\circ, 0^\circ)$. Na konci každého zastavení se uchová průměr posledních **iavg** bodů (tedy celkem dva zprůměrované vzorky) pro následný výpočet parametrického modelu ve tvaru (1). Je-li MANF=1, potom je možné provést „navzorkování“ dvou bodů frekvenční charakteristiky ručně pomocí vstupu HLD. Vstup HLD=1 zastaví rozmítání frekvence a opětovné nastavení HLD=0 vede k jeho pokračování. Ostatní funkce jsou identické.

V případě potřeby je možné proces identifikace přerušit vstupem BRK=1. Jsou-li již v tomto okamžiku oba dva body pro parametrickou identifikaci určeny, pokračuje se v návrhu regulátoru normálním způsobem. V opačném případě je proces ukončen bez návrhu regulátoru a výstup IDE=1 signalizuje chybu.

Během vlastní „identifikace a návrhu“ je výstup IDBSY nastaven na 1. Po skončení je shozen na 0. Po bezchybném návrhu regulátoru se na výstupu IDE objeví 0, jinak IDE=1 a číslo na výstupu **iIDE** specifikuje příslušnou chybu.

Vypočtené parametry stavového regulátoru jsou instalovány okamžitě do algoritmu řízení, jestliže vstup SETC je trvale nastaven na 1. V opačném případě se to provede až po ukončení návrhu na náběžnou hranu vstupu SETC. Výsledky parametrické identifikace a návrhu stavového regulátoru je možné získat na výstupech **p1**, **p2**, ..., **p6** vhodným nastavením vstupu **ips**. Náběžná hrana na vstupu MFR po skončení identifikace (IDBSY=0) odstartuje generování frekvenční charakteristiky získaného parametrického modelu na výstupech **w**, **xre**, **xim**. Takto je možno porovnat její průběh s „přímo odměřenou“ frekvenční charakteristikou systému.

3.2 Regulace

V režimu „regulace“ (binární vstup $ID=0$) může regulátor pracovat v manuálním módu ($MAN=1$) nebo v automatickém módu. Algoritmus řízení je v obou případech patrný z obr. 2. Jestliže je blok regulátoru spuštěn (při studeném startu) s hodnotou vstupu $ID=0$, potom se předpokládá, že zadané parametry bloku $mb0$, $mb1$, $ma0$ a $ma1$ odpovídají dříve určeným koeficientům b_0 , b_1 , a_0 a a_1 přenosu řízeného systému a automaticky proběhne návrh stavového regulátoru. Je-li regulátor navíc v automatickém módu a $SETC=1$, potom zákon řízení od počátku využívá nově navržené parametry. Takto lze vypustit identifikaci při opakovaném spuštění bloku.

3.3 Přehled vstupů, výstupů a parametrů bloku SC2FA

Vstupy

dv	dopředná vazba
sp	požadovaná hodnota
pv	regulovaná veličina
tv	sledovaná veličina
hv	výstup regulátoru v manuálním módu
MAN	mód regulátoru (manuální mód: $MAN=1$)
ID	režim regulátoru (identifikace: $ID=1$)
RUN	start generování budícího harmonického signálu
HLD	zastavení rozmítání frekvence
BRK	stop identifikace
SETC	instalace vypočtených parametrů stavového regulátoru do zákona řízení
ips	přepínání významu výstupů $p1, \dots, p6$
MFR	generování frekvenční charakteristiky parametrického modelu

Výstupy

mv	výstup regulátoru
de	regulační odchylka
SAT	příznak saturace výstupu regulátoru
IDBSY	příznak probíhající identifikace
w	frekvence příslušná k okamžitému odhadu bodu frekvenční charakteristiky
xre	reálná část odhadovaného bodu frekvenční charakteristiky
xim	imaginární část odhadovaného bodu frekvenční charakteristiky
epv	rekonstruovaný signál pv (pro účely ručního ladění rekonstruktoru)
IDE	příznak chyby identifikace
iIDE	detailní specifikace chyby
$p1, \dots, p6$	výsledky identifikace a návrhu

Parametry

Identifikace

ubias	stejnoseměrná složka budícího harmonického signálu
uamp	amplituda budícího harmonického signálu (a)
wb	počátek frekvenčního intervalu
wf	konec frekvenčního intervalu
isweep	způsob rozmítání frekvence (exponenciální, lineární)
cp	rychlost rozmítání
iavg	počet vzorků pro průměrování
alfa	relativní poloha pólů rekonstruktoru (α_0)
ksi	koeficient tlumení rekonstruktoru (ξ_0)
MANF	příznak ručního vzorkování frekvenční charakteristiky
ph1	fázové zpoždění prvního bodu
ph2	fázové zpoždění druhého bodu
stime	doba ustálení

Návrh stavového regulátoru

ralfa	relativní poloha pólů rekonstruktoru (α_R)
rksi	koeficient tlumení rekonstruktoru (ξ_R)
ac11	relativní poloha 1. dvojice pólů uzavřené smyčky (α_1)
ksic11	tlumení 1. dvojice pólů uzavřené smyčky (ξ_1)
INTGF	příznak rozšíření o integrátor
apc1	relativní poloha reálného pólu (α_3)
DISF	příznak rozšíření o model poruchy

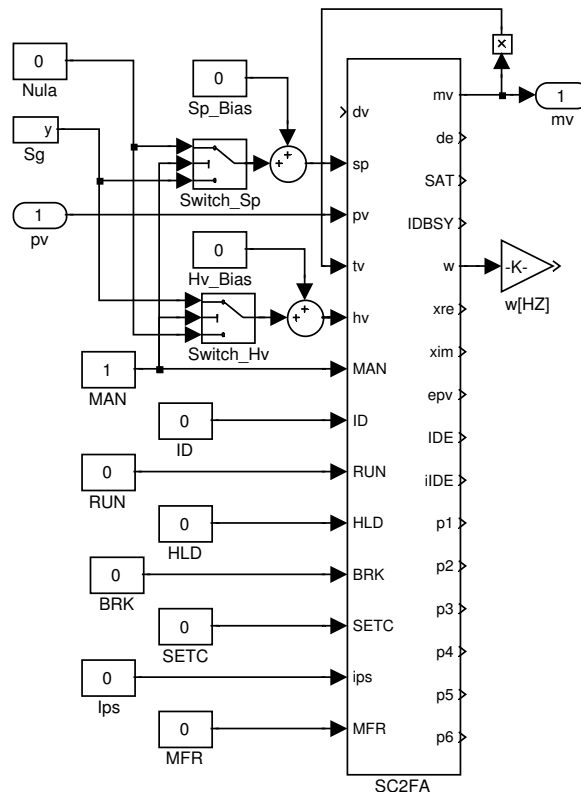
dom	přirozená frekvence modelu poruchy (Ω_d)
dksi	koeficient tlumení modelu poruchy (ξ_d)
ac12	relativní poloha 2. dvojice pólů uzavřené smyčky (α_2)
ksic12	tlumení 2. dvojice pólů uzavřené smyčky (ξ_2)

Stavový regulátor

tt	časová konstanta vysledování
hilim	horní saturační mez
lolim	dolní saturační mez
mb1	koeficient přenosu řízeného systému (b_1)
mb0	koeficient přenosu řízeného systému (b_0)
ma1	koeficient přenosu řízeného systému (a_1)
ma0	koeficient přenosu řízeného systému (a_0)

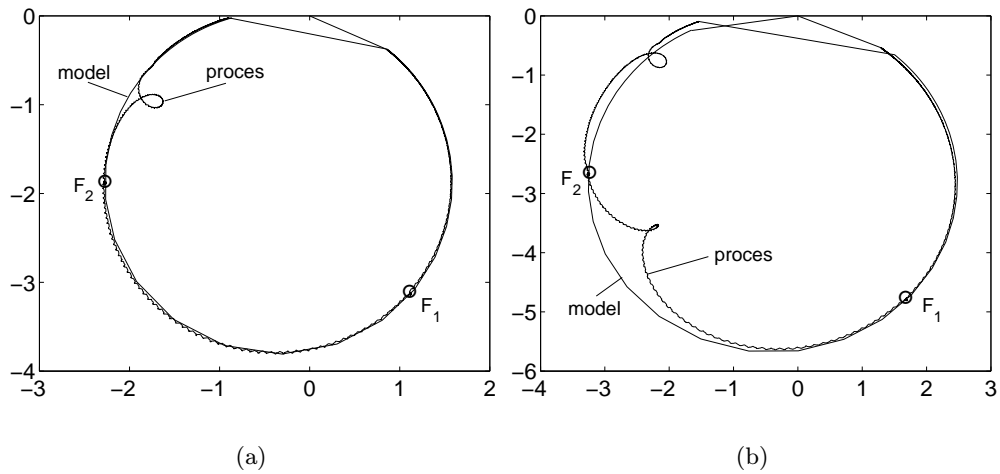
4 Aplikace na systém „kmitající trubky“

Po důkladném otestování funkčních vlastností v Simulinku byl regulátor SC2FA pomocí RTW (Real Time Workshop - součást Simulinku) a s užitím hardwarově specifických bloků (analogové vstupy a výstupy) jednoduše přeložen ze Simulinku přímo na cílový hardware dSPACE 1104 [5]. Byla zvolena perioda vzorkování $50\mu s$. Aplikace obsahuje dva nezávislé regulátory s pomocnými bloky (viz obr. 3) a uživatelský interface navržený ve vývojovém prostředí programu ControlDesk [6].

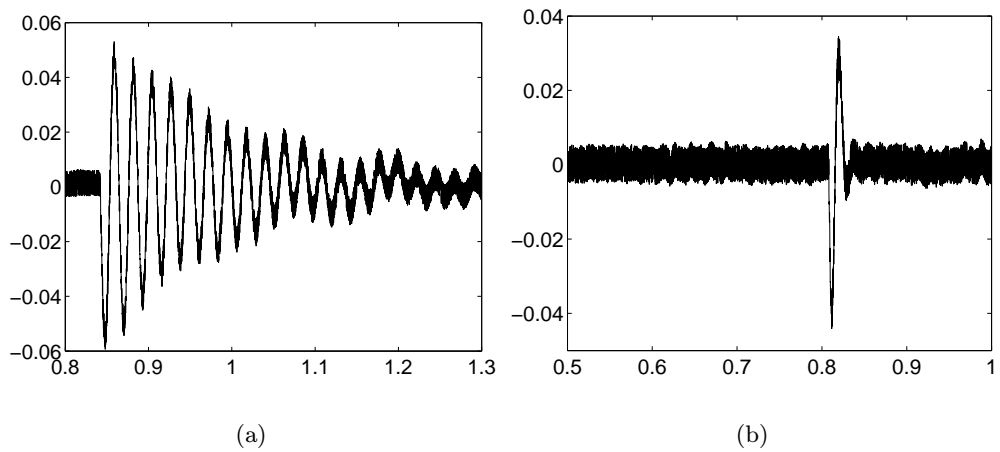


Obrázek 3: Schéma s regulátorem SC2FA pro řízení elektromechanického systému na obr. 1.

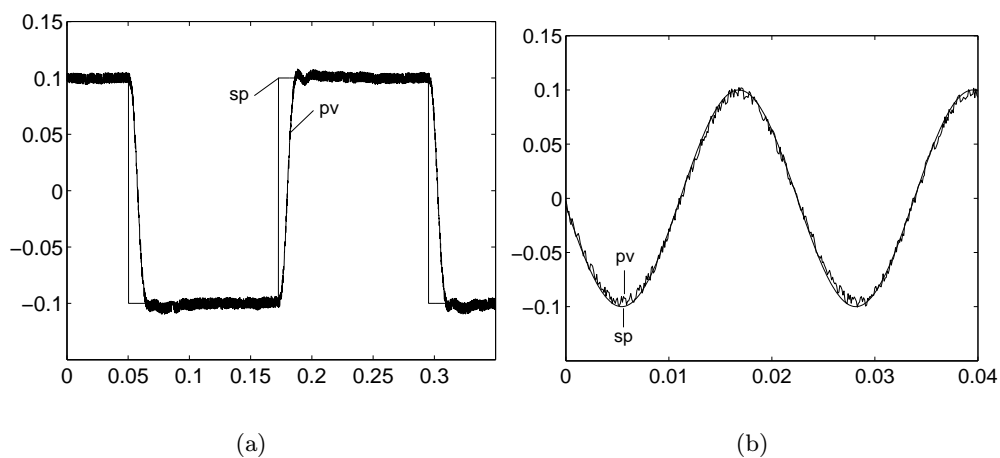
Výsledky identifikačního algoritmu pro dvě různé trubky jsou ilustrovány na obr. 4. Frekvenční charakteristika označená „proces“ je v obou případech křivka, která se průběžně vykruslovala během identifikačního experimentu. Všimněme si, že rozmítání frekvence bylo dostatečně pomalé, neboť při jeho zastavení v bodech F_1 a F_2 není znatelný žádný výraznější posuv v odhadu. Křivka označená slovem „model“ odpovídá frekvenční charakteristice vypočteného parametrického modelu ve tvaru (1). Je zajímavé, že v obou případech bylo dosaženo pozoruhodné shody. Výsledky identifikace nejsou navíc citlivé na volbu frekvenčních mezí w_b , w_f a rychlosti rozmítání c_p v širokých mezích.



Obrázek 4: Frekvenční charakteristiky získané v identifikačním experimentu (a) dolní trubka, (b) horní trubka.



Obrázek 5: Úderem vybuzené kmitání trubky. (a) bez regulace, (b) s regulací.



Obrázek 6: Sledování požadované hodnoty. (a) obdélníkový signál, (b) sinusový signál s frekvencí ω pro případ modelu poruchy: $\Omega_d = \omega$ a $\xi_d = 0,01$.

Na obr. 5 je ilustrována schopnost navrženého algoritmu řízení ztlumit kmitavý systém. Obr. 5a zobrazuje kmitání trubky po lehkém úderu v případě otevřené smyčky. Výsledek stejného experimentu, avšak pro případ uzavřené smyčky, je znázorněn na obr. 5b. Schopnost regulátoru zajistit sledování konstantního nebo sinusového signálu s nulovou odchylkou v ustáleném stavu ilustruje obr. 6. Poznamenejme však, že v tomto případě musíme správně zvolit model poruchy. Požadavky na polohu pólů rekonstruktoru stavu a uzavřeného systému byly ve všech případech ponechány na přednastavených hodnotách

$$\alpha_R = 3; \quad \alpha_1 = 1,3; \quad \alpha_2 = 1,3; \quad \alpha_3 = 1,3; \\ \xi_R = 0,7; \quad \xi_1 = 0,7; \quad \xi_2 = 0,8.$$

Význam jednotlivých parametrů je vysvětlen v odstavci 3.

5 Závěr

Při řešení reálné úlohy regulace kmitání trubky v aerodynamickém tunelu byl vyvinut univerzální samonastavující se regulátor pro podkriticky tlumené systémy. Automatický návrh regulátoru je založen na nové metodě frekvenční identifikace, principu vnitřního modelu a na stavové zpětné vazbě navržené technikou přiřazení pólů. Experimenty na hardwaru dSPACE 1104 prokázaly velmi dobré funkční vlastnosti vyvinutého regulátoru. Pozoruhodná je skutečnost, že regulátor lze úspěšně aplikovat i na nadkriticky tlumené systémy vyšších řádů. V těchto případech je však nutné věnovat zvýšenou pozornost volbě dvou vzorků frekvenční charakteristiky pro výpočet „lokálního“ modelu řízeného systému. Vyvinutý blok regulátoru SC2FA je součástí rozsáhlé knihovny funkčních bloků pro průmyslovou regulaci [7].

Tato práce byla částečně podpořena Grantovou agenturou ČR, projekt č. 102/01/1347.

Reference

- [1] Åström, K.J., Hägglund, T.: The future of PID control. *Control Engineering Practice*, 9(2001), 1163-1175.
- [2] Leva, A.: Model-based tuning: the very basics and some useful techniques. *Journal A*, 42(2001), 3, 14-22.
- [3] Goodwin, G.C., Graebe, S.F., Salgado, M.E.: *Control system design*. Prentice Hall, Upper Saddle River, 2001.
- [4] Schlegel, M.: Exact revision of the Ziegler-Nichols frequency response method. In: *Proceeding of IASTED International Conference on Control and Application*, Cancun, Mexico, May 2002.
- [5] *Real-Time Interface (RTI and RTI-MP) Implementation Guide*. dSPACE GmbH, Paderborn, 2001.
- [6] *ControlDesk Experiment Guide*. dSPACE GmbH, Paderborn, 2001.
- [7] www.rexcontrols.cz

Kontaktní informace

Doc.Ing. Miloš Schlegel, CSc., e-mail: schlegel@kky.zcu.cz,
Ing. Oldřich Večerek, e-mail: vecer@kky.zcu.cz,
Katedra kybernetiky, ZČU v Plzni, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň.