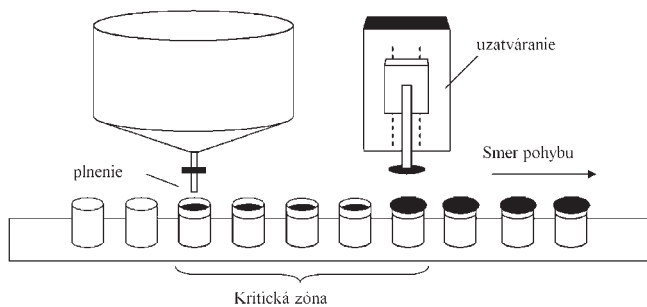


# Metóda bezrezonančného riadenia pohybu plniacej linky

## Úvod

Súčasná plniaca linka (napríklad v mliekarenskom priemysle) predstavujú plne automatizované systémy, ktoré pracujú samostatne, bez akéhokoľvek zásahu človeka. Plniaca linka pozostáva z viacerých samostatných procesných staníc, ktoré sú spojené do jedného funkčného celku a kontrolované vnútornými senzormi.

Takáto linka musí zabezpečovať množstvo funkcií od čistenia nádob až po ich plnenie a uzatváranie. V priemyselných aplikáciách sa možno stretnúť s dvomi typmi pracovného procesu takýchto strojov. Je to buď spojité prevádzka, alebo taktovanie. Počas spojitých prevádzok sa kontajnery na dopravníku posúvajú bez zastavenia, takže pri jednotlivých pracovných krokoch, ako sú sterilizácia nádob, plnenie a uzatváranie, dopravník nezastavuje. To znamená, že jednotlivé pracovné stanice sa musia vedieť pohybovať súčasne s dopravníkom. Takéto riešenia sú po mechanickej a elektrickej stránke značne komplikované a zároveň finančne náročné. Pri taktovaných plniacich linkách sú už spomenuté pracovné kroky statické, takže dopravník musí zastaviť pri každej pracovnej stanici. Takéto riešenie má však nevýhodu vo vzniku takzvanej kritickej zóny (obr. 1).



Obr.1 Princíp taktovanej plniacej linky

Po tom, čo sa obaly naplnia príslušnou tekutinou, prejde niekoľko cyklov, kým sa uzatvoria. Práve to je príčinou vzniku kritickej zóny, kde dochádza k zastaveniu a opätovnému štartu dopravníka s už naplnenými obalmi. Ten má za následok vznik pohybu tekutiny v obale, čo v hraničných prípadoch môže dokonca viesť k vyliatiu tekutiny na vonkajší okraj obalu. Takto kontaminovaný obal potom nemožno hermeticky uzavrieť, čím dochádza k znehodnoteniu výrobku. Ďalším problémom je aj kontaminácia sterilnej výrobnéj linky, čo zvyšuje náklady na jej čistenie.

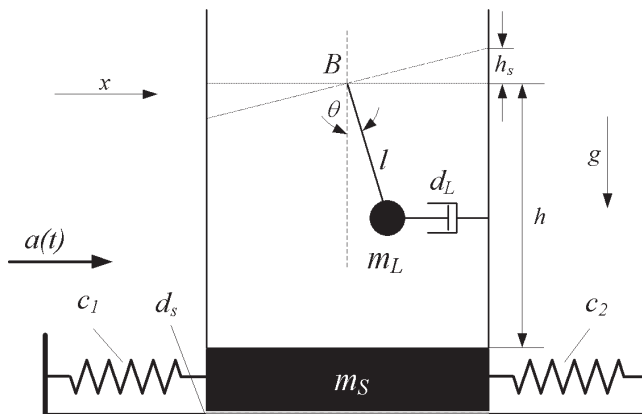
Najdôležitejšou požiadavkou na takéto linky je, samozrejme, čo najväčšia možná produkcia. To znamená minimalizáciu pohybu dopravníka, ktorý spolu s vlastným plnením obalov zaberá najväčšiu časť procesného času takýchto liniek.

Špecifikovaný problém teda môžeme definovať takto: po zastavení dopravníka musí tekutina zostať v pokoji, teda nesmie sa v obale pohybovať (rezonovať); zároveň nesmie dôjsť k prekročeniu maximálneho sklonu obalu s tekutinou pri minimálnom čase pohybu dopravníka.

Po pri spomínaných aspektoch spojených s kmitaním tekutiny existuje aj ďalší problém. Ak zoberieme do úvahy možnú dĺžku takejto linky až 22 metrov a celkovú prenášanú hmotnosť okolo 1 tony v taktovacom režime, vyplýva z toho aj možnosť vzniku vibrácií samotného dopravníka, respektíve jeho ozubenej reťaze. Tieto vibrácie sa síce držia v medziach vlastného napätia reťaze, no určite nie sú zanedbateľné vzhľadom na oscilácie tekutiny. Len potlačením oboch zdrojov vibrácií súčasne možno zabezpečiť spoľahlivosť prevádzky taktovaných plniacich liniek.

## 1. Odvodenie modelu systému

Na obr. 2 je model kompletného systému, v ktorom je systém kmitajúcej hladiny tekutého obsahu nádoby nahradený systémom kyvadla s príslušnými parametrami.



Obr.2 Schéma kompletného systému

Na nádobu s tekutinou v pružnom uložení pôsobí externá sila vyvolávajúca lineárne zrýchlenie systému  $a(t)$ , za výstupnú veličinu budeme považovať uhol  $\theta(t)$ , ktorý zvierá naklonená hladina a horizontálna roviná. Načrtnutý systém možno po linearizácii systému kyvadla v okolí pracovného bodu zodpovedajúceho stabilnej polohe kyvadla opísať dvomi od seba závislými lineárnymi diferenciálnymi rovnicami 2. rádu.

$$\ddot{x}_S = -\frac{d_S}{m_S} \cdot \dot{x}_S - \frac{c}{m_S} \cdot x_S + \frac{d_L}{m_S} \cdot l \cdot \dot{\theta} + \frac{m_L}{m_S} \cdot g \cdot \theta + a(t) \quad (1)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{(m_S + m_L)}{m_S \cdot m_L} \cdot d_L \cdot \dot{\theta} - \frac{(m_S + m_L)}{m_S} \cdot \frac{g}{l} \cdot \theta + \frac{d_S}{m_S \cdot l} \cdot \dot{x}_S + \frac{c}{m_S \cdot l} \cdot x_S \quad (2)$$

Prenosová funkcia tohto systému 4. rádu sa vyznačuje existenciou dvoch dvojíc slaboztlmených komplexne združených pólov, ktoré sú príčinou kmitavosti prechodových dejov.

## 2. Návrh metódy bezrezonančného riadenia

Metóda riadenia pre bezrezonančné polohovanie dvojmódových kmitavých systémov musí byť využiteľná v praxi a pri jej návrhu treba brať do úvahy určité technické obmedzenia. Podmienky nasadenia plniacej linky (napríklad nutnosť sterilného pracovného prostredia) redukujú možnosti výberu vhodného riadiaceho konceptu a neumožňujú využitie zatvorenej riadiacej slučky, ale len čistého riadenia, teda aplikáciu otvorenej riadiacej slučky.

Použitie riešenie vychádza z metódy tvarovania vstupného signálu, ktorá je založená na konvolutornom násobení riadiaceho signálu postupnosťou vhodne oneskorených Diracových impulzov, čo pri praktickej realizácii vedie k sčítaniu vhodne váhovaných časovo posunutých sekvenčii vstupného (riadiaceho) signálu.

Ak označíme  $D$  tlmenie systému, amplitúdu  $i$ -tého Diracovho impulzu  $A_i$  a jeho oneskorenie voči prvému z nich  $t_i$ , potom je na zabezpečenie eliminácie kmitov potrebné splnenie vektorovej podmienky v tvare:

$$V(\omega, D) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot e^{-j \cdot D \cdot \omega_n \cdot t_i} = 0 \quad (3)$$



Ak požadujeme, aby sa tvarovaním vstupného (riadiaceho) signálu zmenila výsledná poloha servosystému určená pre prípad netvarovaného riadiaceho signálu, treba splniť aj amplitúdovú podmienku v tvare:

$$\sum_{i=1}^n A_i = 1 \tag{4}$$

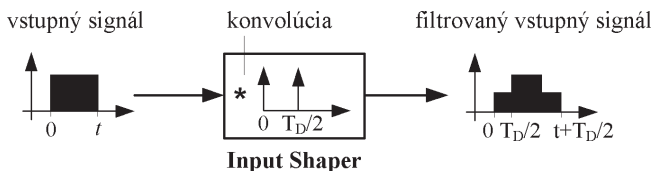
Na základe týchto a ďalších doplnkových podmienok možno odvodiť rôzne typy tvarovačov.

**2.1 ZV tvarovač**

ZV tvarovač (zero vibration shaper) tvoria minimálne dva impulzy a má teda najmenšie oneskorenie ohlasu systému. Na základe rovnice (3) a s ohľadom na rovnicu (4) sú amplitúdy a časové oneskorenia tvarovača takéto:

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & k \\ 1+k & 1+k \\ 0 & \frac{T_D}{2} \end{bmatrix} \quad k = e^{-\frac{D \cdot \pi}{\sqrt{1-D^2}}} \tag{5}$$

Amplitúda a časové oneskorenie sú teda závislé len od hodnoty vlastnej periódy tlmeného systému  $T_D$  a od jeho tlmenia  $D$  (damping). Konvolúciou týchto dvoch Diracových impulzov so vstupným riadiacim signálom vzniká filtrovaná vstupná premenná, pričom kmity systému sa eliminujú už po druhom impulze. Obr. 3 vysvetľuje princíp konvolúcie vstupného signálu a impulzov tvarovača.



**Obr.3 Funkčný princíp ZV tvarovača (deformácia pravouhého vstupného signálu)**

**2.2 ZVD tvarovač**

ZVD (zero vibration derivative) tvarovač je rozšírenou verziou ZV tvarovača. Pri realizácii ZVD tvarovača sa okrem podmienok (3) a (4) berie do úvahy aj ďalšia podmienka:

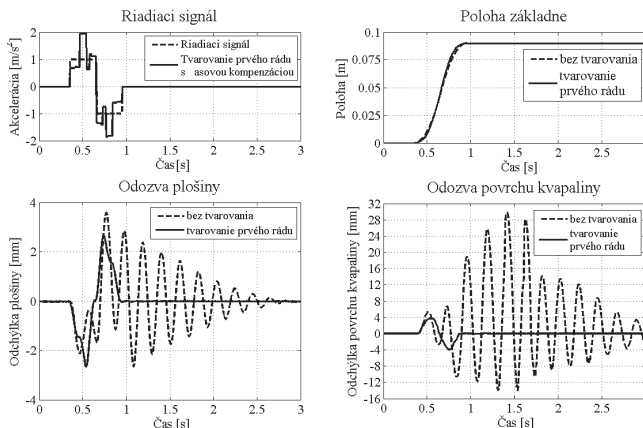
$$\frac{d}{d\omega} V(\omega, D) = 0 \tag{6}$$

Riešením trojice rovníc získavame toto riešenie s tromi impulzmi s takto určenými amplitúdami a časovými oneskoreniami:

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{2 \cdot k}{(1+k)^2} & \frac{k^2}{(1+k)^2} \\ (1+k)^2 & \frac{T_D}{2} & T_D \\ 0 & \frac{T_D}{2} & T_D \end{bmatrix} \quad k = e^{-\frac{D \cdot \pi}{\sqrt{1-D^2}}} \tag{7}$$

Podobne ako pri ZV tvarovači, ani pri ZVD tvarovači nevznikajú v systéme počas polohovania žiadne kmity. Je charakteristický dlhším ohlasom systému a súčasne vyššou odolnosťou proti chybám modelovania, resp. zmenám parametrov systému (hodnôt jeho vlastných frekvencií) počas riadiaceho procesu, keďže na vlastnej frekvencii systému tvarovač vytvára v priebehu amplitúdy spektra vstupného signálu lokálne minimum s nulovou hodnotou, ktoré sa vyznačuje pozvoľným rastom jeho hodnoty okolo predpokladanej hodnoty vlastnej frekvencie a umožňujú tak akceptovať aj kolísanie jej hodnoty, resp. toleruje aj jej nie úplne presné určenie.

V prípade viacmódového (v našom prípade dvojmódového) systému možno realizovať vzájomnú konvolúciu dvoch rôznych jednomódových tvarovačov typu ZV alebo ZVD, pričom každý z nich je odvodený pre inú vlastnú frekvenciu a tlmenie. V podstate sú možné akékoľvek kombinácie, líšia sa však vo výslednej spoľahlivosti a časovom posune vstupného signálu. Inou možnosťou je aplikovať metódu priameho návrhu viacmódového tvarovača, ktorá je založená na transformácii systému zo spojitej časovej oblasti do diskretnej, v ktorej sa potom realizujú potrebné výpočty na zabezpečenie vhodného rozmiestnenia núl



**Obr.4 Porovnanie ohlasov jednotlivých stavových veličín**

eliminujúcich vplyv pólových dvojíc prislúchajúcich jednotlivým kmítovým módom. Inou možnosťou je priamy návrh viacmódového tvarovača pomocou genetických algoritmov a im podobných optimalizačných metód zabezpečujúcich optimalizáciu zvolených kritérií kvality regulačného deja.

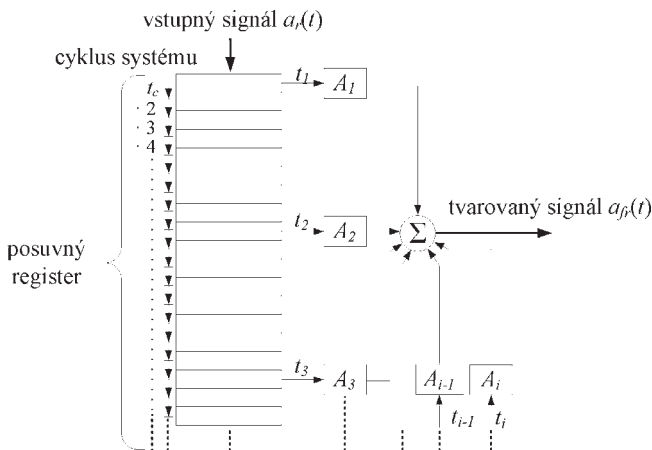
S tvarovačom pracujúcim na báze sekvencie piatich Diracových impulzov možno v skúmanom dvojmodovom systéme dosiahnuť výsledky demonštrované na obr. 4, z ktorých je zrejma účinnosť navrhutej metódy na tlmenie oboch oscilačných módom.

**3. Implementácia tvarovača**

Tvarovač možno považovať za dopredný filter vstupnej veličiny systému a metódu riadenia možno opísať takto: konvolúciou žiadanej hodnoty  $a(t)$  a postupnosti impulzov treba vytvoriť novú filtrovanú žiadanú hodnotu zrýchlenia, ktorú spracuje servosystém; pre amplitúdy  $A_i$  a časové oneskorenia  $t_i$  impulzu tvarovača možno odvodiť matematický opis profilu filtrovanej vstupnej hodnoty zrýchlenia v diskretnej forme:

$$a(t) * \sum_{i=1} A_i \cdot \delta(t-t_i) = \sum_{i=1} A_i \cdot a(t-t_i) \tag{8}$$

Rovnica (8) nepredstavuje pre deterministické PLC (s vhodným zbernicovým systémom, ktorým je v našom prípade Ethernet Powerlink) z výpočtového hľadiska v reálnom čase žiadny problém. Na obr. 5 je naznačený princíp implementácie algoritmu podľa (8).



**Obr.5 Princíp softvérovej implementácie tvarovača**

Postup je takýto: Deterministické vnútorné počítadlo v PLC spustí posuvný FIFO register. Prvá žiadaná hodnota vstupného signálu sa načíta do posuvného registra (v tomto prípade na prvú pozíciu zodpovedajúcu  $t_1 = 0$  s). Keďže vzorkovanie vstupného signálu je dopredu známe, možno označiť elementy posuvného registra, ktoré zodpovedajú časovým oneskoreniam  $t_i$  impulzov tvarovača. To tiež znamená, že dĺžka posuvného registra závisí od dĺžky cyklu PLC a od oneskorenia posledného zo série impulzov. Ďalším krokom je už len vynásobenie označených elementov posuvného registra obsahujúcich žiadanú hodnotu

vstupnej veličiny zodpovedajúcou amplitúdou impulzov a nakoniec sumarizácia takto určených hodnôt.

### Záver

Predložený príspevok mal za úlohu prispieť k optimalizácii výrobného procesu plniacich liniek tekutých potravín. Na výskumné účely bol postavený experimentálny model plniacej linky tak, aby bolo možné simulovať procesy prebiehajúce pri transporte obalov s tekutinou na reálnej plniacej linke. Tento model bol vybavený kmitavým transportným vozíkom, ktorý umožňuje simulovať kmity samotného dopravníkového pásu. Pomocou senzorov možno identifikovať parametre systému a kontrolovať správanie sa tekutiny v nádobe počas jej pohybu. Matematicky odvodený model odzrkadľuje nielen kmitavé vlastnosti jednotlivých subsystémov (kmitanie povrchu hladiny a kmitanie samotného transportu), ale aj celkového systému a poskytuje informácie na odvodenie optimálnej metódy riadenia tohto systému.

Výsledky realizovanej "bezsenzorovej" metódy riadenia sú pre jednotlivé subsystémy aj pre celkový dvojmódový systém výborné, čo je doložené zodpovedajúcimi meraniami. Vhodnosť použitia tejto metódy v praxi dokazujú nielen dosiahnuté experimentálne výsledky, ale aj jej jednoduchý spôsob implementácie na reálnych zariadeniach vo výrobných prevádzkach.

### Literatúra

[1] SINGHOSE, W. E., SEERING, W. P., SINGER, N. C.: Shaping inputs to reduce vibration: a vector diagram approach. Robotics and Automation, Proceedings, IEEE International Conference on Volume, 13 – 18 May 1990, s. 922 – 927.

[2] MECKL, P. H., SEERING, W. P.: Controlling Velocity – Limited Systems to Reduce Residual Vibration. Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Philadelphia, PA, USA, 1998, s. 1428 – 1443.

[3] GRUNDELIUS, M.: Methods for Control of Liquid Slosh. Department of Automatic Control Lund Institute of Technology 2001, ISSN 0280-5316.

[4] HUBINSKÝ, P., GRUHLER, G., VRANKA, B.: Feedforward – Methods With Spectral Approach to Reduction of Oscillations in Mechatronic Systems. SPS/IPC/DRIVES Conference, November 2004 in Nürnberg, s. 569 – 577.

[5] HUBINSKÝ, P., VRANKA, B., JURÍŠICA, L.: Genetic algorithm based method of elimination of residual oscillation in mechatronic systems. In: Kybernetika, roč. 41, č. 5/2005, s. 623 – 636, ISSN 0023-5954.

[6] HUBINSKÝ, P., POSPIECH, T.: Input shaping for slosh-free moving containers with liquid. In: International Journal of Mechanics and Control. ISSN 1590-8844, roč. 9, č. 2/2008, s. 27 – 34.

[7] POSPIECH, T., HUBINSKÝ, P.: The right impulse. Resonance-free positioning of vibratory systems using the example of open liquid-filled containers. In: Automation (EN) č. 3/2009, s. 32 – 34.

**doc. Ing. Peter Hubinský, PhD.**  
**Dipl. Ing. Thomas Pospiech, PhD.**

**e-mail: peter.hubinsky@stuba.sk**  
**pospiech@hs-heilbronn.de**

29