

# Simulačný model potrubného stroja založeného na zotrvačnom krokovacom princípe

Michal Kelemen

## Úvod

Existuje mnoho rozličných systémov, ktoré obsahujú potrubné systémy v rôznych formách. Potrubie je použité na vedenie tekutín alebo suspenzií alebo aj ako ochranné zariadenie pre iné systémy. Potrubné zariadenia sú obsiahnuté najmä v zariadeniach jadrových elektrární, výmenníkoch tepla, chemických, leteckých zariadeniach atď.

Mnoho faktorov má nepriaznivý vplyv na celkový stav a životnosť potrubia. Substancie, ktoré sú prepravované potrubím, majú často nebezpečný charakter a každá trhlinka môže byť príčinou katastrofy. Dôsledky týchto katastrof môžu byť rozsiahle a môžu nadobudnúť charakter nevratných zmien s celosvetovým dosahom, pričom môžu ohroziť aj bezpečnosť ľudí. Preto musí byť potrubie periodicky podrobené inšpekcii, aby sa zistili trhliny a iné poruchy. Včasný varovanie je tu dôležitým prvkom a prevencia sa teda stáva strategickým nástrojom zamedzenia strát.

Všetky tieto aspekty sú podnetom na vývoj vnútornej potrubnej inšpekcie na detekciu porúch potrubia a tento typ inšpekcie sa v tejto oblasti považuje za najobjektívnejšiu metódu. Ak je napríklad potrebné realizovať inšpekciu potrubného systému parného generátora jadrovej elektrárne, je to veľmi komplikované vykonať to z vonkajšej strany potrubia. Práve tu je priestor na použitie vnútornej potrubnej inšpekcie potrubia a v niektorých prípadoch je to jediný aplikovateľný spôsob. Tieto dôvody sú dôvodom pre rapídny vývoj potrubných strojov (angl. in-pipe devices, in-pipe crawlers). Tieto zariadenia sa dokážu pohybovať vnútri potrubia a niesť sondu, CCD kameru alebo iné zariadenie určené na danú špeciálnu úlohu. Voľba vhodnej metódy inšpekcie a z nej vyplývajúce nasledujúce kroky sú dôležité a v každom prípade lacnejšie než odstraňovanie následkov havárie.

Tento článok sa zaoberá simuláciou potrubného mikrostroja KAROLÍNA vyvinutým na Strojníckej fakulte TU v Košiciach. Karolína (obr. 1) je potrubný mikrostroj určený na pohyb v potrubí s vnútorným priemerom 11 mm. Princíp pohybu je založený na zotrvačnom krokovacom princípe. Cieľom tejto práce je prispieť novými poznatkami do oblasti mechatroniky a najmä do oblasti výskumu potrubných strojov [1], [2], [3].

## Použité symboly a označenia

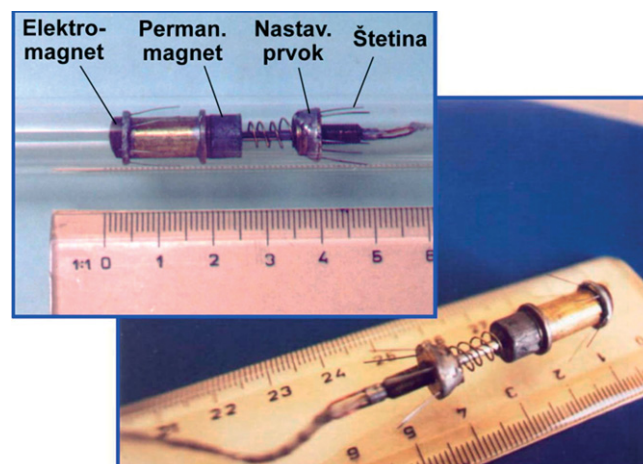
- $b$  – brzdňá konštanta
- $F_1$  – trecia sila hnacieho telesa
- $F_2$  – trecia sila medzi koncami štetín a stenou potrubia
- $F_P$  – príťažlivá sila hnacieho telesa k aktívnej ploche mikrostroja
- $F_{PRUŽINY}$  – sila pružiny
- $F_o$  – odpudivá sila hnacieho telesa od aktívnej plochy mikrostroja
- $F_h$  – hnacia sila mikrostroja

- $G_{PR}, H_{PR}, I_{PR}$  – koeficienty modelu príťažlivej sily medzi hnacím telesom (magnetom) a jadrom cievky
- $J_{OD}, K_{OD}, L_{OD}$  – koeficienty modelu odpudivej sily medzi hnacím a hnacím telesom mikrostroja
- $k_p$  – konštanta pružiny, reprezentujúca deformáciu hnacieho a hnacieho telesa počas zrážky na aktívnej ploche
- $k_e$  – ekvivalentná tuhosť reprezentujúca viazanú sústavu telies počas zrážky hnacieho a hnacieho telesa
- $m_r$  – redukovaná hmotnosť mikrostroja
- $m_1$  – hmotnosť hnacieho telesa (permanentný magnet) mikrostroja
- $m_2$  – hmotnosť hnacieho telesa mikrostroja
- $T$  – čas cyklu mikrostroja
- $t$  – čas
- $v_{1Dd}$  – rýchlosť hnacieho telesa v okamihu nárazu  $t = t_d$  vo fáze  $D$
- $x_1, v_1$  – dráha, rýchlosť hnacieho telesa
- $x_2, v_2$  – dráha, rýchlosť hnacieho telesa
- $x_{1P}$  – vzdialenosť ťažiska hnacieho telesa

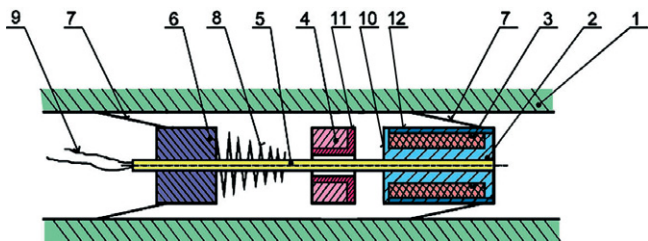
## 1. Činnosť potrubného mikrostroja

Mikrostroj KAROLÍNA (obr. 1) využíva na pohyb v potrubí energiu uvoľnenú počas zrážky dvoch telies [1], pričom jedno z telies je hnacie a druhé hnané. Usporiadanie mikrostroja je na obr. 2. Hnacie teleso je zložené z elektromagnetu (2, 3), klzného vedenia (5) a nastavovacieho prvku (6). Hnacie teleso (4 – permanentný magnet), ktoré má tvar valca s pozdĺžnym otvorom sa pohybuje vplyvom magnetických síl po klznom vedení (5) medzi dvoma nárazovými plochami hnacieho telesa.

Aktívna plocha (10) predstavuje jednu z nárazových plôch hnacieho telesa. Druhá z nárazových plôch je tvorená dosadacou plo-



Obr.1 Potrubný mikrostroj pohybujúci sa na zotrvačnom krokovacom princípe



Obr.2 Celkové usporiadanie mikrostroja

chou skrutkovej pružiny (8), ktorá je opretá o nastavovací prvok. Zotrvačný krokovací princíp je vytvorený nárazom hnacieho telesa (ďalej aj permanentného magnetu) na hnané teleso mikrostroja, pričom z hľadiska fyziky ide o centrálny zraz dvoch telies. Pri zrážke týchto dvoch telies (hnacieho – permanentný magnet a hnaného) sa v pomerne krátkom čase zmení ich pôvodný pohybový stav. Túto zmenu pohybového stavu vyvolávajú tzv. nárazové sily. Pri zrážke telies zmeny ich hybnosti bývajú veľké, a teda aj nárazové sily sú veľké, a to tým väčšie, čím kratší je čas trvania ich dotyku, t. j. čím sú tvrdšie telesá, ktoré sa zrazili. Nárazová sila rastie pri zrážke od nuly až po svoje maximum.

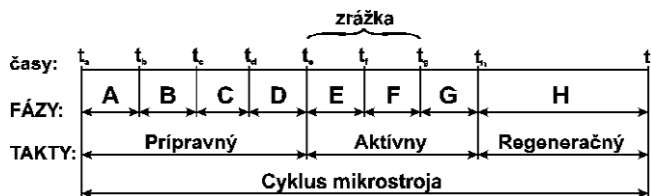
Na nastavovacom module (6) a kryte elektromagnetu (12) sú po obvode upevnené štetiny (7). Tieto štetiny zabezpečujú kontakt mikrostroja so stenou potrubia. Jednosmerný pohyb mikrostroja vzniká v dôsledku toho, že nárazová sila na aktívnej ploche je väčšia ako trecia sila medzi štetinami a stenou potrubia, čo však neplatí pre nárazovú silu na nastavovacom prvku s pružinou. Priemer mikrostroja je 11 mm a dĺžka 35 mm.

Hnacie teleso – permanentný magnet je z materiálu SmCo (Samarium – Cobalt) s hodnotou magnetickej indukcie 0,35T. Je osadený na mosadznom puzdre (11), s ktorým sa pohybuje po vedení (5). Cievka elektromagnetu (3) je budená obdĺžnikovými prúdovými pulzmi. Výška prúdového pulzu je stabilizovaným prúdovým zdrojom udržiavaná na konštantnej hodnote. Šírku týchto pulzov a ich frekvenciu možno meniť pomocou mikropočítača typu BS2.

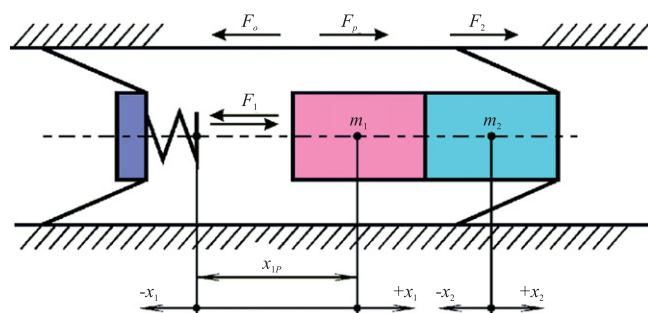
Na zohľadnenie podstatných detailov ovplyvňujúcich pohyb mikrostroja je vhodné činnosť mikrostroja rozdeliť do troch taktov, ktoré na seba nadväzujú:

1. prípravný takt,
2. aktívny takt,
3. regeneračný takt.

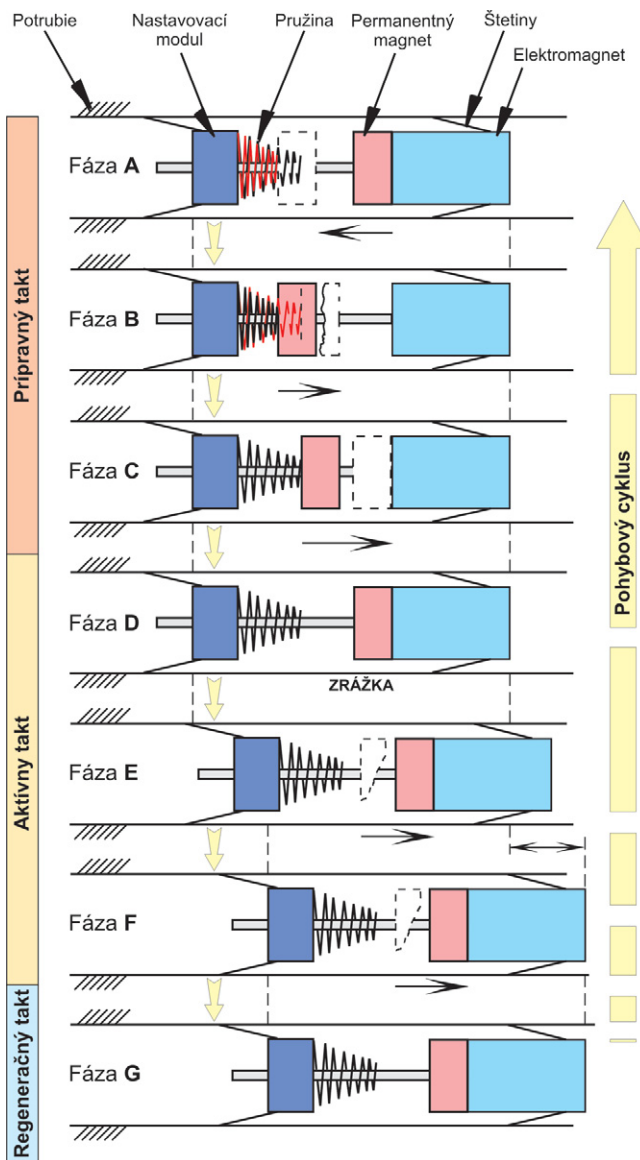
Tieto takty tvoria spolu cyklus mikrostroja, ktorý sa počas jeho činnosti opakuje s istou opakovacou frekvenciou  $f$ , resp. časom



Obr.3 Časová dekompozícia činnosti mikrostroja [1]



Obr.4 Model mikrostroja [1]



Obr.5 Pohybový cyklus mikrostroja

cyklu  $T$ . Jednotlivé takty sú rozdelené na fázy. Graficky je táto časová dekompozícia znázornená na obr. 3 spolu s časmi začiatku a konca fáz. Ďalej je opísaná činnosť mikrostroja v jednotlivých fázach, pričom sa vychádza z modelu mikrostroja podľa obr. 4 [1], [4], [5], [6].

## 2. Opis pohybu z hľadiska dynamiky

Na vytvorenie opisu mikrostroja sa použil zjednodušený model (obr. 4). Ďalej uvedený opis je vytvorený za predpokladu pohybu vo vodorovnom potrubí.

**Prípravný takt** sa skladá z troch fáz: A, B, C (obr. 3, obr. 5), pričom sa predpokladá, že vo všetkých troch fázach je hnacie teleso vystavené vplyvu trecej sily  $F_2$ .

Na začiatku fázy A je hnacie teleso (permanentný magnet) v kontakte s aktívnou plochou mikrostroja v dôsledku pôsobenia príťažlivej sily  $F_p$ . Privedením napätového impulzu do cievky elektromagnetu v čase  $t = t_a$  sa aktivuje odpudivá sila  $F_o$  ( $|F_o| > |F_p|$ ), v dôsledku ktorej sa hnacie teleso pohybuje smerom k nastavovaciemu prvku. Doba trvania odpudivej sily je nastavovaná experimentálne, napr. podľa požadovanej rýchlosti. V okamihu ukončenia (pôsobenia) odpudivej sily (v čase  $t = t_b$ ) končí fáza A a začína fáza B. Odpudivá sila trvá až do okamihu, keď klesne rýchlosť v dôsledku deformačnej sily pružiny opretej o nastavovací prvok opäť na nulu. Týmto okamihom ( $t = t_c$ ) je ukončená fáza A a začína sa fáza B. Fáze A zodpovedajú tieto stavové rovnice [1]:

a) fáza A bez kontaktu s pružinou opretou o nastavovací prvok

$$\begin{aligned}\frac{dx_1(t)}{dt} &= v_1(t) \\ \frac{dv_1(t)}{dt} &= \frac{1}{m_1} \cdot [F_o - b \cdot v_1(t)]\end{aligned}\quad (1)$$

b) fáza A v kontakte s pružinou nastavovacieho modulu

$$\begin{aligned}\frac{dx_1(t)}{dt} &= v_1(t) \\ \frac{dv_1}{dt} &= \frac{1}{m_1} \cdot [F_o - b \cdot v_1(t) - k_p \cdot (x_1(t) - x_2(t) - x_{1p})]\end{aligned}\quad (2)$$

**Fáza B** sa začína okamihom ukončenia pôsobenia odporivej sily v čase  $t = t_b$  a končí sa okamihom ukončenia kontaktu hnacieho telesa s pružinou nastavovacieho modulu v čase  $t = t_c$ . V tejto fáze na hnacie teleso pôsobí príťažlivá sila  $F_p$ . Absolútna hodnota deformačnej sily tlmiacej pružiny vznikajúcej ako dôsledok zrážky hnacieho telesa s pružinou nastavovacieho modulu je počas tejto fázy menšia ako absolútna hodnota trecej sily  $F_2$ . To znamená, že mikrostroj nezmení svoju polohu. Z teoretickej analýzy [1] vyplýva, že maximálna rýchlosť nárazu hnacieho telesa na aktívnu plochu mikrostroja je vtedy, ak odporivá sila  $F_o$  trvá až do okamihu maximálneho stlačenia pružiny opretej o nastavovací prvok. Stavové rovnice opisujúce túto fázu sú:

$$\begin{aligned}\frac{dx_1(t)}{dt} &= v_1(t) \\ \frac{dv_1}{dt} &= \frac{1}{m_1} \cdot [F_p - b \cdot v_1(t) - k_p \cdot (x_1(t) - x_2(t) - x_{1p})]\end{aligned}\quad (3)$$

**Fáza C** sa začína okamihom ukončenia kontaktu hnacieho telesa s pružinou vo fáze B v čase  $t = t_c$  a končí okamihom kontaktu s aktívnou nárazovou plochou mikrostroja v čase  $t = t_d$ . Hnacie teleso je v tejto fáze urýchľované príťažlivou silou  $F_p$  smerom k aktívnej nárazovej ploche mikrostroja. Táto fáza je reprezentovaná stavovými rovnicami (4).

$$\begin{aligned}\frac{dx_1(t)}{dt} &= v_1(t) \\ \frac{dv_1(t)}{dt} &= \frac{1}{m_1} \cdot [F_p - b \cdot v_1(t)]\end{aligned}\quad (4)$$

**Aktívny takt má tri fázy: D, E, F** (obr. 3, obr. 5)

**Fáza D** sa začína okamihom kontaktu hnacieho telesa s hnaným telesom na aktívnej nárazovej ploche. Fáza D je bezprostredným pokračovaním prípravného taktu a jej trvanie je ohraničené trvaním zrážky hnaného telesa a hnacieho telesa v čase  $t = t_d$  a končí sa, keď sa hnacia sila  $F_h$  rovná trecej sile  $F_2$  v čase  $t = t_e$ . To znamená, že mikrostroj sa nepohybuje (nemení svoju polohu).

Začiatok **fázy E** je v okamihu  $t = t_e$ , keď  $F_h = F_2$ , a končí v čase  $t = t_f$ , keď hnacia sila  $F_h = 0$ . Počas celej tejto fázy sa mikrostroj pohybuje.

Tieto fázy možno v simulačnom experimente opísať spoločnou sústavou stavových rovníc. Dynamika pohybu je opísaná nasledujúcou sústavou rovníc [1], [4], [5], [6]:

Fáza D + fáza E (obdobie zrážky, pre ktoré platí  $v_1 \geq 0$ )

$$\begin{aligned}\frac{dx_1(t)}{dt} &= v_1(t) \\ \frac{dv_1(t)}{dt} &= \frac{1}{m_1} \cdot [F_p - b \cdot v_1(t) - F_h] \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= v_2(t) \\ \frac{dv_2(t)}{dt} &= \frac{1}{m_2} \cdot [F_h - F_2]\end{aligned}\quad (5)$$

kde

$$F_h = k_e \cdot [x_1(t) - x_2(t)]$$

Nakoľko hodnota príťažlivej sily je v každom okamihu menšia ako trecia sila medzi štetinami a stenou potrubia, nebude ďalej uvažovaný vplyv príťažlivej sily na pohyb hnaného telesa.

**Fáza F** nasleduje bezprostredne po zrážke hnacieho a hnaného telesa v čase  $t = t_f$  a končí sa v čase  $t = t_g$ , okamihom zastavenia mikrostroja, keď činnosť mikrostroja prechádza do regeneračného traktu. Z hľadiska matematického opisu je táto fáza najkomplikovanejšia. Ak by sa hnacie a hnané telesá neovplyvňovali prostredníctvom magnetických síl, tak by sa obidve telesá po kontakte pohybovali nezávisle od seba. Keďže však dochádza k vzájomnému ovplyvňovaniu, celý dej v tejto fáze bude zložitejší. V snahe vyhnúť sa týmto komplikáciami je ďalej predpokladané, že k ovplyvňovaniu magnetickými silami nedochádza, a že hnané teleso sa ďalej pohybuje nezávisle od hnacieho telesa. Stavové rovnice pre túto fázu sú:

$$\begin{aligned}\frac{dx_2(t)}{dt} &= v_2(t) \\ \frac{dv_2(t)}{dt} &= \frac{F_2}{m_2}\end{aligned}\quad (6)$$

Regeneračný takt má iba jednu fázu G (obr. 3 a 5). Jej trvanie v čase  $t - t_g$  určuje dovoľená prevádzková teplota mikrostroja (k ohrevu dochádza v dôsledku joulových strát v cievke elektromagnetu). V tejto fáze sa cievka ochladzuje. Počas tejto fázy sa mikrostroj a permanentný magnet nepohybujú.

V práci [1] je odvodená stredná rýchlosť mikrostroja:

$$\begin{aligned}v_{2str} &= \frac{1}{T} \cdot \int_{t_a}^{t_g} v_2(t) dt = \frac{2 \cdot m_r^2 \cdot v_{1Dd}^2}{m_2 \cdot T \cdot F_2} \\ m_r &= \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}\end{aligned}\quad (7)$$

kde  $m_r$  je redukovaná hmotnosť mikrostroja,

- $T$  – trvanie cyklu mikrostroja,
- $F_2$  – trecia sila medzi koncami štetín a stenou potrubia,
- $v_{1Dd}$  – rýchlosť hnacieho telesa v okamihu nárazu, vo fáze D,
- $v_2$  – rýchlosť hnaného telesa,
- $m_2$  – hmotnosť hnaného telesa.

Z uvedeného vzťahu vyplýva, že čím je hybnosť hnacieho telesa  $m_1 \cdot v_{1Dd}$  v okamihu kontaktu s hnaným telesom v čase  $t = t_d$  väčšia, tým je väčšia hodnota strednej rýchlosti mikrostroja. Stredná rýchlosť mikrostroja dosahuje svoje maximum aj v prípade, že trecia sila medzi koncami štetín a stenou potrubia konverguje k nule  $F_2 \rightarrow 0$ . Štetiny mikrostroja sú vzhľadom na os mikrostroja prichytené šikmo pod uhlom. Zo skúseností získaných pri riešení práce [6] je zjavné, že takéto usporiadanie štetín spôsobuje diferenciáciu trenia medzi koncom štetiny a stenou potrubia pri pohybe dopredu a dozadu. V ideálnom prípade trecia sila pri pohybe dozadu konverguje do nekonečna a trecia sila pri pohybe dopredu je minimálna. Nesmieme pritom zabúdať na fakt, že trecia sila medzi koncom štetín a stenou potrubia musí byť väčšia než náraz magnetu na nastavovací modul. V opačnom prípade bude mikrostroj vykonávať aj neželaný pohyb dozadu.

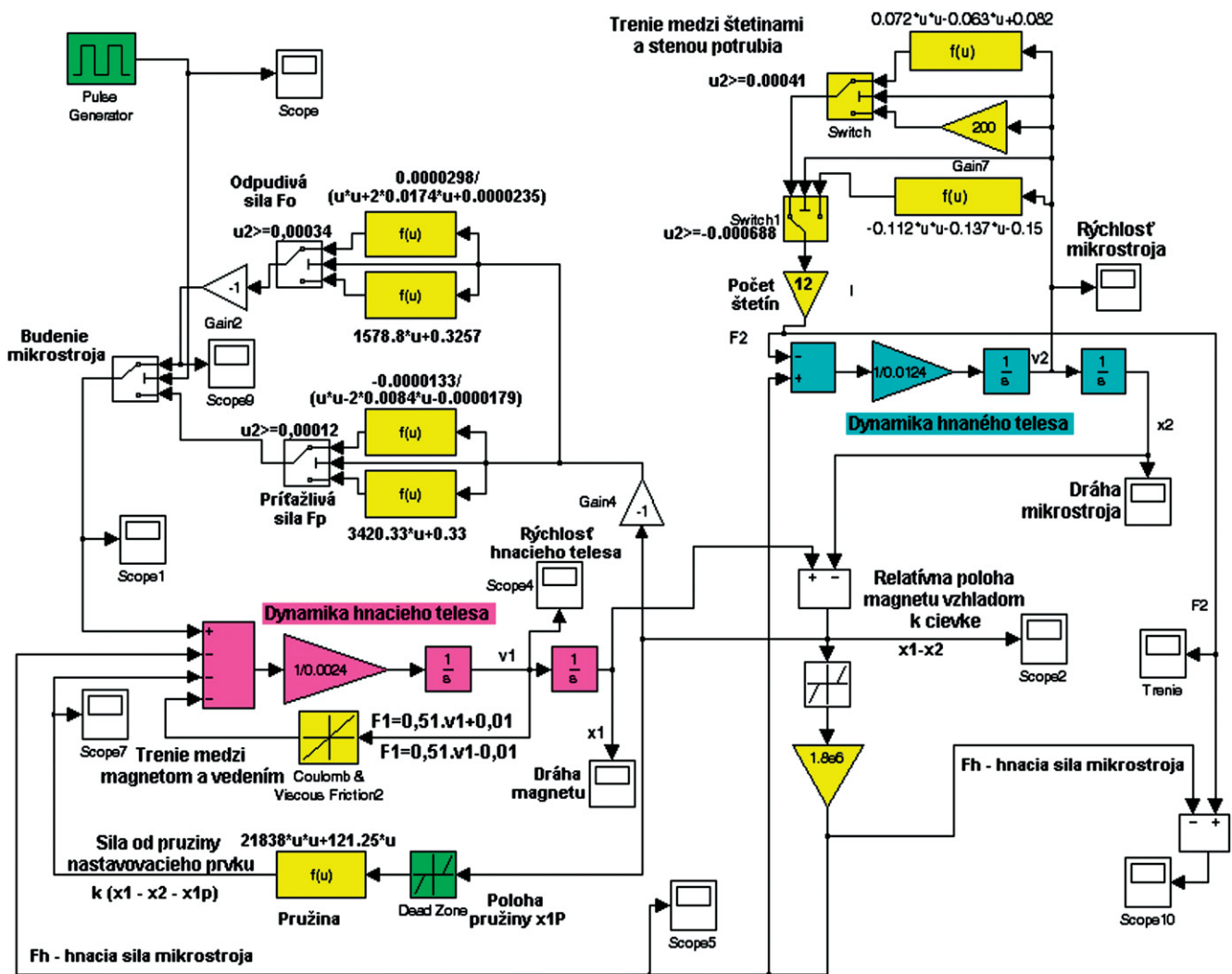
### 3. Simulačný model pohybu mikrostroja

Simulačný model mikrostroja zostavený podľa opisu mikrostroja je na obr. 6. V tomto modeli sú žltou farbou zvýraznené bloky, ktorých parametre alebo závislosti sú neznáme a treba ich identifikovať, t. j.:

- a) závislosť trecej sily medzi štetinami a stenou potrubia od rýchlosti pohybu štetiny,







Obr.6 Bloková schéma modelu mikrostroja

- b) závislosť odpudivej sily medzi hnaným a hnacím telesom od ich vzájomnej vzdialenosti,
- c) závislosť príťažlivej sily medzi hnaným a hnacím telesom od ich vzájomnej vzdialenosti,
- d) závislosť trecej sily medzi magnetom a vedením od rýchlosti pohybu magnetu,
- e) závislosť sily pružiny od jej deformácií,
- f) ekvivalentnú tuhosť telies pri zrážke.

Bloky označené zelenou farbou predstavujú vstupné premenné. Určenie neznámych parametrov a závislosti a ich následná implementácia do modelu mikrostroja je ťažiskom ďalšej práce, ktorú treba vykonať.

Na obr. 6 je simulačný model mikrostroja realizovaný v prostredí Matlab/Simulink. Model je v podstate zložený z dvoch základných podsystémov, t. j. dynamiky hnacieho telesa (označené fialovou farbou) a dynamika hnaného telesa (označené modrou farbou).

Vstupom do systému je generátor impulzov a nastavenie polohy pružiny (označené zelenou farbou). Úlohou generátora impulzov je aktivovať (resp. budiť) cievku elektromagnetu v periodických intervaloch s konštantnou striedou. Táto aktivácia je v modeli reprezentovaná blokom impulzný generátor, ktorého výstup je pripojený na dvojestavový prepínač budenie mikrostroja, pričom tento prepínač podľa charakteru pulzov (obdĺžnikový priebeh s jednotkovou amplitúdou) striedavo aktivuje odpudivú silu (pri hodnote 1) a príťažlivú silu (pri hodnote 0). Príťažlivá a odpudivá sila sú reprezentované blokmi funkcie príťažlivá sila  $F_p$  a odpudivá sila  $F_o$ .

Druhým vstupom do systému je poloha pružiny  $x_{1p}$ . Tento vstupný parameter je v modeli zastúpený blokom (typu Dead Zone) nastavenie pružiny  $x_{1p}$ . Pomocou tohto bloku je aktivovaná sila pružiny, a to len pre prípad, keď vznikne kontakt magnetu s pružinou, pričom veľkosť tejto sily je určená blokom funkcie pružina.

Pohyb magnetu po vedení mikrostroja je brzdený trecou silou  $F_1$  a v modeli je reprezentovaný blokom Coulomb&Viscous Friction, pričom jeho vstupom je rýchlosť pohybu magnetu po vedení.

Hnané teleso ma po svojom obvode štetiny, ktorých cieľom je zabezpečenie silovej väzby so stenou potrubia. Táto väzba v podstate predstavuje treciu silu  $F_2$  a je určená blokom funkcie trenie medzi štetinami a stenou potrubia.

Hnacia sila mikrostroja  $F_h$  je určená tuhosťou telies mikrostroja pri zrážke. Táto sila je aktivovaná len po kontakte hnacieho telesa s hnaným telesom (pomocou bloku typu Dead Zone), pričom tuhosť je určená blokom (typu Gain) ke Ekvivalentná tuhosť telies.

V celom modeli sa na vizualizáciu sledovaných veličín použili bloky typu Scope.

### Záver

V úvodnej časti je opísaný potrubný mikrostroj KAROLÍNA založený na princípe zrážky dvoch telies. Podľa uvedeného opisu z hľadiska dynamiky bol zostavený simulačný model v prostredí Matlab/Simulink. Tento model bol zostavený na štúdium pohybu mikrostroja a možnosti optimalizácie jeho chodu (aké vstupné parametre majú byť zvolené, aby bol pohyb čo najefektívnejší a čo

najrýchlejší). Tento model zároveň umožňuje nasimulovať správanie mikrostroja v rôznych situáciách, a tak možno odhaliť slabé miesta konštrukcie mikrostroja. Simulácia mechatronických sústav je v súčasnosti pomerne často využívaná metóda pri analýze a syntéze výrobkov, pretože umožňuje návrhárom študovať správanie ich výrobku aj v atypických situáciách bez rizika poškodenia hotového prototypu [7], [8], [9], [10].

#### Podakovanie

Autor týmto ďakuje Slovenskej grantovej agentúre pre vedu GU VEGA 1/2188/05 Výskum princípov lokomócie potrubného stroja v potrubí za účelom ťahania káblov do existujúcich potrubných sietí za čiastkovú podporu tejto práce.

#### Literatúra

[1] DOVICA, M., GMITERKO, A., HOMIŠIN, J. and JURČO, M. (1998): Základná štúdia mobilného minimechanizmu pre pohyb v potrubíach s malým priemerom. Strojnícky časopis č. 2, ročník 49, 1998, s. 124 – 140. ISSN 0039-2472.

[2] FATIKOW, S. and REMBOLD, U. (1997): Microsystem Technology and Microrobotics. Berlin: Springer Verlag, 1997. ISBN: 3540606580.

[3] FUKUDA, T. and MENZ, W. (1998): Micro mechanical systems, principles and technology. Amsterdam: Elsevier, 1998. ISBN: 0444823638.

[4] GMITERKO, A. and KELEMEN, M. (2004): Miniaturné potrubné stroje. Edícia vedeckej a odbornej literatúry. TU-SjF. 2004. Emilena Tlačiareň. ISBN 80-8073-213-2

[5] GMITERKO, A. and KELEMEN, M. (2002): In-Pipe Two Masses Micromachine Karolina. Robtep 2002, Košice, máj 2002, s. 117 – 122.

[6] KELEMEN, M. (2002): Mechatronické aspekty optimalizácie pohybu štetinového potrubného mikrostroja. Doktorandská dizertačná práca. SjF TU v Košiciach. Košice 2002.

[7] VALENTA, F., MICHALEC, J., RŮŽIČKA, M., ŘEZNÍČEK, M., ŠPANIEL, J., NOVOTNY, C., DOUBRAVA, K.: Experimentální a výpočtová analýza složeného plošného defektu na potrubí dn 900. Technical Report FS 2051/02/21, ČVUT v Praze FS, Ústav mechaniky, Odbor pružnosti a pevnosti, 2002.

[8] VALENTA, F., RŮŽIČKA, M., DOUBRAVA, K.: Experimentální a výpočtová analýza namáhání skládacích stropních schodů. Technical Report FS 2051/01/10, ČVUT v Praze FS, Ústav mechaniky, Odbor pružnosti a pevnosti, 2001.

[9] MAREŠ, T.: Metodický přístup ke konstrukční optimalizaci. Bulletin of Applied Mechanics, 2: s. 75 – 76, 2005.

[10] MAREŠ, T.: Metody a přístupy k optimalizaci topologie. Bulletin of Applied Mechanics, 2: s. 85 – 89, 2005.

#### Ing. Michal Kelemen, PhD.

Technická univerzita v Košiciach  
Strojnícka fakulta  
Ústav špeciálnych technických vied  
Katedra aplikovanej mechaniky a mechatroniky  
Letná 9, 042 00 Košice  
e-mail: michal.kelemen@tuke.sk

