

# Návrh mobilného potrubného ministroja

Miroslav Dovica, Michal Gorzás

## Abstrakt

Príspevok sa zaoberá návrhom mobilného potrubného ministroja, ktorý je schopný pohybu v potrubí s vnútorným priemerom cca. 25 mm. Ministroj je určený pre inšpekciu vnútorných stien potrubia. Princíp pohybu spočíva v transformácii rotačného pohybu akčného člena prostredníctvom skrutky a matice na priamočiary, ktorý vytvára zmenu vzdialenosti medzi predným a zadným modulom ministroja.

**Kľúčové slová:** potrubný ministroj, štetiny

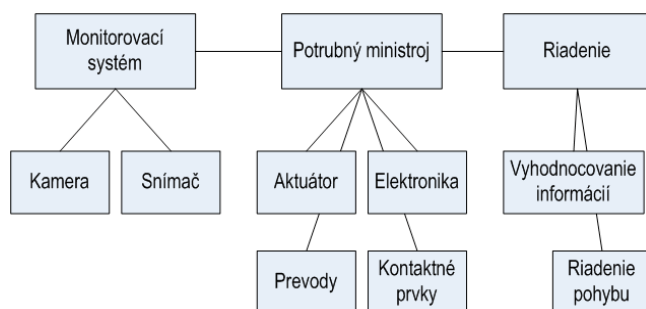
## Úvod

Mobilné stroje pre pohyb v potrubí s malým vnútorným priemerom predstavujú v dnešnej dobe zaujímavú oblasť výskumu. Cieľom je navrhnuť zariadenie schopné efektívne sa pohybovať v potrubíach a potrubných systémoch malého vnútorného prierezu (25 mm a menej), a súčasne transportovať systémy pre monitorovanie a údržbu vnútorných stien potrubia.

Využitie princípov pohybu založených na klasickej kolesovej alebo pásovej trakkii pri návrhu potrubných ministrojov je rozmerovo limitované. Z tohto dôvodu sú pre polohovanie a pohyb využívané kontaktné prvky – štetiny vo forme pružných nosníkov orientovaných pod konkrétnym uhlom voči stene potrubia, ktoré využívajú diferenciu trenia.

## Potrubné ministroje

Hlavnou úlohou potrubných ministrojov je zabezpečiť transport monitorovacích systémov pre snímanie defektov v potrubíach malého priemeru, prípadne transport systémov pre ich opravu a údržbu. V potrubíach s malým vnútorným priemerom je použitie konvenčných pohonov vo funkcií akčných členov obmedzené miniaturizáciou. Okrem toho pohyb pomocou konvenčných prostriedkov akými sú kolesa alebo pásy je nepriaznivo ovplyvňovaný znečistením steny potrubia (dochádza k prekážavaniu), a realizácia týchto pohybov je konštrukčne pomerne náročná. Preto sa pri ich konštrukcii čoraz častejšie používajú nekonvenčné princípy pohybu a netradičné akčné členy. [1],[2]



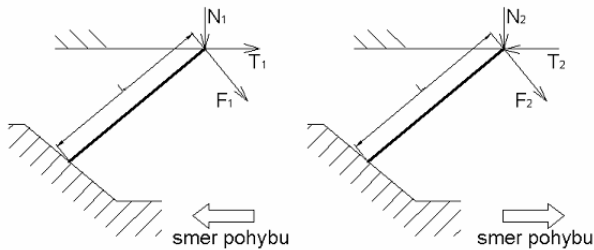
Obr.1 Bloková schéma potrubného ministroja

Fig.1 Block diagram of the in-pipe minimachine

Potrubný ministroj sa skladá z niekoľkých základných komponentov, z ktorých každý má podstatný vplyv na jeho výslednú účelovú funkciu (Obr.1). Ako aktuátory sa už z hore uvedených dôvodov používajú okrem konvenčných (napr. rotačné elektromotory) aj nekonvenčné aktuátory (napr. lineárne elektromagnetické akčné členy, akčný člen zo zliatiny s tvarovou pamäťou). Prevody (napr. ozubené prevody, kľukový mechanizmus) slúžia na prevod pohybu aktuátora na výsledný pohyb ministroja. Kontaktné prvky (kolesá, štetiny) umožňujú pohyb ministroja v potrubí. Monitorovací systém využíva nedeštruktívne metódy kontroly povrchu potrubia. Môže to byť vizuálna kontrola prostredníctvom kamery alebo kontrola snímačom (napr. indukčný snímač, magnetický snímač, snímač na princípe vírivých prúdov). Riadenie slúži na spracovanie informácií prichádzajúcich z ministroja (napr. prehrievanie aktuátora) a monitorovacieho systému a následné ovládanie pohybu ministroja.

## Štetiny

Štetiny sú jednou možnou realizáciou kontaktného prvku potrubného ministroja so stenou potrubia. Sú konštrukčne pomerne jednoducho realizovateľné a to aj v miniaturizovanej forme pre potreby mikro a nano technológií. Majú tvar votknutého nosníka s elasticky deformovateľného materiálu ktorý je do zariadenia (ministroja) votknutý pod určitým uhlom. Tento uhol votknutia má podstatný vplyv na koeficient trenia ktorý vzniká pri posuvnom pohybe telesa (steny potrubia) pôsobiaceho určitou silou na voľný koniec nosníka (štetiny) (Obr.2). Hodnota takto vzniknutého koeficientu trenia je závislá na smere posuvného pohybu voči uhlu votknutia nosníka. V takomto prípade keď hodnota koeficientu trenia je závislá na smere pohybu, teda je pri pohybe rôznymi smermi rozdielna, hovoríme o princípe diferencie trenia. [3]



**Obr.2 Sily pôsobiace na štetinu pri doprednom a spätnom pohybe**  
**Fig.2 Forces acting on bristle in forward and backward motion**

$T_1$  - trecia sila pri doprednom pohybe

$T_2$  - trecia sila pri spätnom pohybe

$N_{1,2}$  - normálové sily

$$y = \frac{FL^3}{3EJ}$$

Pri doprednom pohybe:

$$F_1 = N_1 \cos \alpha + T_1 \sin \alpha$$

$$F_1 = N_1 (\cos \alpha + f \sin \alpha) = \frac{3EJy}{L^3} \tag{1}$$

$$N_1 = \frac{3EJy}{L^3 (\cos \alpha + f \sin \alpha)} \tag{2}$$

$$T_1 = fN_1 \tag{3}$$

Pri spätnom pohybe:

$$F_2 = N_2 \cos \alpha - T_2 \sin \alpha \tag{4}$$

$$F_2 = N_2 (\cos \alpha - f \sin \alpha) = \frac{3EJy}{L^3} \tag{5}$$

$$N_2 = \frac{3EJy}{L^3 (\cos \alpha - f \sin \alpha)} \tag{6}$$

$$T_2 = fN_2 \tag{7}$$

Pri riešení rozdielu trecích síl pri pohybe dopredu a späť dostaneme:

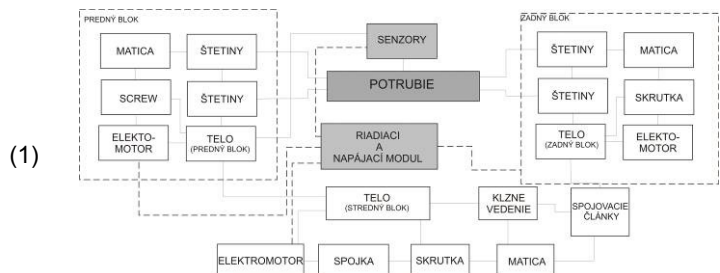
$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\cos \alpha + f \sin \alpha}{\cos \alpha - f \sin \alpha} \tag{8}$$

z tohto vzorca vyplýva, že  $T_2/T_1 \rightarrow \infty$ , ak  $\cos \alpha - f \sin \alpha = 0$ , potom  $f = \cos \alpha / \sin \alpha$ , respektíve  $\operatorname{tg} \alpha = 1/f$ .

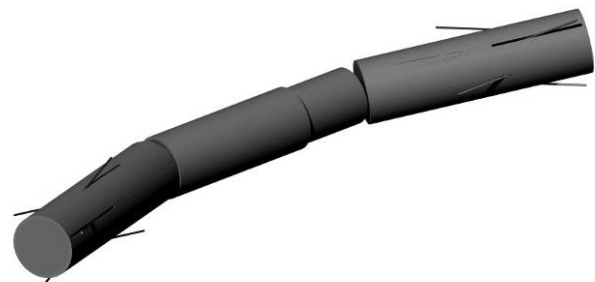
**Koncept potrubného ministroja**

Ministroj je určený pre pohyb v potrubí s vnútorným priemerom cca. 25 mm. Skladá sa z troch modulov, pričom predný a zadný modul sa skladajú z elektromagnetického rotačného akčného člena, skrutky, matice a štetín. Prostredný modul, ktorý vykonáva vlastný pohyb ministroja sa skladá z elektromagnetického rotačného akčného člena, skrutky, matice (Obr.3, Obr.4).

Princíp pohybu spočíva v transformácii rotačného pohybu akčného člena prostredníctvom skrutky a matice na priamočiary, ktorý vytvára zmenu vzdialenosti medzi predným a zadným modulom ministroja. Postupnosť pritláčania štetín predného alebo zadného modulu o stenu potrubia počas pracovného cyklu stredného modulu určuje smer pohybu ministroja v potrubí. Vysunutie štetín a ich pritláčanie o stenu potrubia je taktiež zabezpečené prostredníctvom skrutky a matice. Riadenie ministroja zabezpečuje zmenu smeru lineárneho pohybu a jeho cyklické opakovanie. Vzájomné prepojenie modulov prostredníctvom zjednodušených sférických kĺbov umožňuje ministroju do určitej miery pripôsobiť sa zakriveniu potrubia.



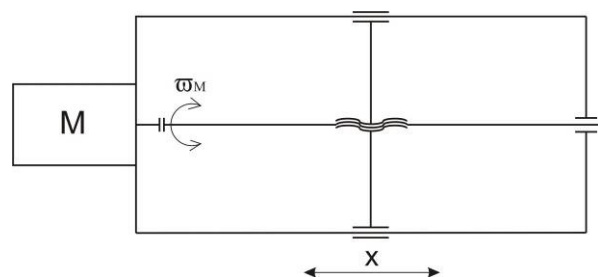
**Obr.3 Blokový diagram potrubného ministroja**  
**Fig.3 Block diagram of the in-pipe minimachine**



**Obr.4 3D model potrubného ministroja**  
**Fig.4 3D model of the in-pipe minimachine**

**Kinematická analýza potrubného ministroja**

Vzhľadom na požiadavky definované v etape konštrukčného procesu sa vykonala kinematická analýza potrubného ministroja. Výsledný lineárny pohyb každého z troch modulov ministroja vzniká transformáciou z rotačného pohybu aktuátora prostredníctvom kinematickej dvojice matica – skrutka. Kinematická schéma, spoločná pre všetky tri moduly, (Obr.5) zahŕňa akčný člen (M), ktorého pohyb definovaný uhlovou rýchlosťou  $\omega_M$  je pomocou spojky prenášaný na skrutku. Pohyb koncového člena mechanizmu vyjadrený pomocou parametra x je vyvolaný maticou. [4],[5]



**Obr.5 Kinematická schéma potrubného ministroja**  
**Fig.5 The kinematics scheme of the middle block of the in-pipe minimachine prototype**

Pre vyjadrenie posunutia koncového člena mechanizmu (Obr.5) je možné napísať

$$x = \frac{P_h}{h} \cdot N \tag{11}$$

kde  $P_h$  je stúpanie závitů  
 $N$  je počet otočení motora.

Po zavedení

$$N = \frac{\varphi}{2\pi} \tag{12}$$

kde  $\varphi$  je uhol pootočení skrutky, a odvodení z pravouhlého trojuholníka

$$P_h = \pi \cdot d \cdot \operatorname{tg} \alpha \tag{13}$$

kde  $\alpha$  je uhol stúpania závitů.

Po dosadení a úprave je možné posunutie koncového člena mechanizmu vyjadriť ako

$$x = \frac{\pi \cdot d \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \varphi}{2\pi} = \frac{d \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2} \cdot \varphi \tag{14}$$

Pre vyjadrenie rýchlostí koncového člena mechanizmu platí

$$v = \frac{dx}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{d\varphi} = \frac{dx}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dx}{d\varphi} \cdot \omega_M = \frac{d \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2} \cdot \omega_M \tag{15}$$

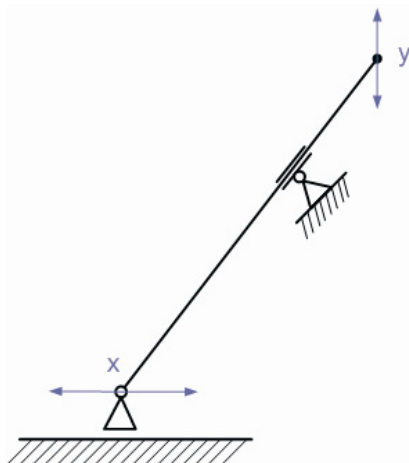
kde  $\omega_M$  je uhlová rýchlosť motora.

Pre vyjadrenie zrýchlenia koncového člena mechanizmu platí

$$v = \frac{d \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2} \cdot \alpha_M \tag{16}$$

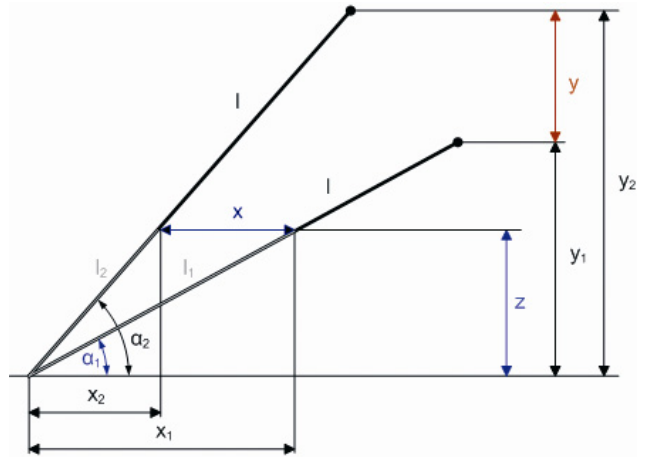
kde  $\alpha_M$  je uhlové zrýchlenie motora.

V prednom a zadnom module ministroja sa tento výsledný lineárny pohyb  $x$  prevádza na pohyb štetiny  $y$  ktorý priblíži a následne zaprie štetinu ministroja o stenu potrubia. Pre výpočet minimálnej dráhy  $x$  potrebnej na priblíženie štetiny k stene potrubia je možné o štetine uvažovať ako o dokonalom tuhom priamom nosníku (Obr.6).



Obr.6 Kinematická schéma priblíženia štetiny  
 Fig.6 Kinematics scheme of bristle approach

Závislosť  $y$  na  $x$  sa dá určiť pomocou zjednodušenej geometrickej schémy, kde poznáme počiatočný uhol  $\alpha_1$ , vzdialenosť  $z$  a dráhu  $x$  (Obr.7).



Obr.7 Geometrické zobrazenie priblíženia štetiny  
 Fig.7 Geometric Picture of bristle approach

Pre výsledné priblíženie platí

$$y = y_2 - y_1 \tag{17}$$

kde  $y_1$  je počiatočná vzdialenosť v krajnej polohe štetiny ( $x=0$ ), a  $y_2$  je vzdialenosť po zmene dráhy  $x$ .

Po použití viet o pravouhlých trojuholníkoch sa  $y$  dá vyjadriť ako

$$y = l \sin \alpha_2 - l \sin \alpha_1 \tag{18}$$

kde

$$\sin \alpha_2 = \frac{z}{l_2} \tag{19}$$

a

$$l_2 = \sqrt{z^2 + x^2} \tag{20}$$

pričom  $l_2$  je čiastková dĺžka štetiny a  $\alpha_2$  je uhol naklopenia po zmene polohy štetiny.

Vzdialenosť  $x$  je možné tiež vyjadriť prostredníctvom čiastkových vzdialeností  $x_1$  a  $x_2$ , pre ktoré platí

$$x_2 = x_1 - x \tag{21}$$

$$x_1 = \frac{z}{\operatorname{tg} \alpha_1} \tag{22}$$

$$x_2 = \frac{z}{\operatorname{tg} \alpha_1} - x \tag{23}$$

Po ich dosadení do rovnice (20) platí, že

$$l_2 = \sqrt{z^2 + \left( \frac{z}{\operatorname{tg} \alpha_1} - x \right)^2} \tag{24}$$

potom rovnica (19) sa dá vyjadriť ako

$$\sin \alpha_2 = \frac{z}{\sqrt{z^2 + \left(\frac{z}{\operatorname{tg} \alpha_1} - x\right)^2}} \quad (25)$$

Po dosadení je výslednú závislosť  $y$  na  $x$  možné zapísať ako

$$y = \frac{l \cdot z}{\sqrt{z^2 + \left(\frac{z}{\operatorname{tg} \alpha_1} - x\right)^2}} - l \cdot \sin \alpha_1 \quad (26)$$

kde dĺžka štetiny  $l$ , vzdialenosť  $z$  a počiatkový uhol  $\alpha_1$  sú známe konštanty.

## Záver

Článok sa zaoberá návrhom mobilného potrubného ministroja vyvíjaného na pracovisku autorov. Návrh sa týka rozpracovania požiadaviek, parametrizácie a etapy návrhu konceptu. V ďalšom výskume bude započaté experimentálne overovanie parametrov za účelom optimalizácie pohybu a realizácia funkčného prototypu.

## PodĎakovanie

*Príspevok je vypracovaný v rámci riešenia projektu VEGA 1/3159/06 "Výskum princípov prírodou inšpirovaných pohybov a ich aplikácia pi návrhu ministrojov."*

## Literatúra

- [1] Isermann, R.: Mechatronic Systems, Springer Verlag, 2003, ISBN 185 2336 935
- [2] Gmiterko, A.,: Mechatronika: Hnacie faktory, charakteristika a koncipovanie mechatronických sústav, Emilena tlačiareň, Košice, 2004, ISBN 80-8073-157-8
- [3] Gmiterko A., Kelemen M., Mlýnková Z.: Bristled in-pipe micromachine based on the principle of the directional fric-

tion force. Automatizácia / Robotika v teórii a praxi Zborník vedeckých prác 6. Celoštátnej konferencie s medzinárodnou účasťou ROBTEP 2002 Košice str.130

[4] Fischer, U. a kol.: Základy strojnictví, Europa – Sobotáles, 2004, ISBN 80-86706-09-5

[5] Dovica, M., Gorzás, M., Kaľuch, P., Kováč, J.: Mechatronický návrh mobilného štetinového potrubného mikrostroja, AT&P Journal Plus 6, 2005, Bratislava

## Abstract

This paper deals with concept of mobile in-pipe minimachine which is assigned to move in the pipes with inner diameter less than 25 mm. We use the minimachine for inspection of inner surface defects. The motion principle is based on the transformation from the rotary to the linear motion by the screw and nut which creates a change of the distance between front and rear module of minimachine.

## doc. Ing. Miroslav Dovica, PhD.

Technická Univerzita v Košiciach  
Strojnícka fakulta/Ústav špeciálnych technických vied  
Katedra biomedicínskeho inžinierstva, automatizácie a merania  
Letná 9  
041 78, Košice  
E-mail: miroslav.dovica@tuke.sk

## Ing. Michal Gorzás

Technická Univerzita v Košiciach  
Strojnícka fakulta/ Ústav bezpečnosti, kvality a enviromentalistiky  
Katedra bezpečnosti a kvality produkcie  
Letná 9  
041 78, Košice  
E-mail: michal.gorzas@tuke.sk