

## MIKROKAPCSOLÓ MŰKÖDÉSÉNEK MODELLEZÉSE

### Szabó Tamás

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet,  
Robert Bosch Mechatronikai Intézeti Tanszék  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [szabo.tamas@uni-miskolc.hu](mailto:szabo.tamas@uni-miskolc.hu)

### Rónai László

tanársegéd, Miskolci Egyetem, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet,  
Robert Bosch Mechatronikai Intézeti Tanszék  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [ronai.laszlo@uni-miskolc.hu](mailto:ronai.laszlo@uni-miskolc.hu)

### Kakuk József

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet,  
Robert Bosch Mechatronikai Intézeti Tanszék  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [jozsef.kakuk@hu.bosch.com](mailto:jozsef.kakuk@hu.bosch.com)

### **Absztrakt**

A cikk egy mikrokapcsoló mechanikai modellezésével foglalkozik. A mikrokapcsoló működtetésekor a mechanizmus számos eleme nagy elmozdulást és forgást szenved. A vizsgálat numerikusan meghatározza a nyomógomb elmozdulásához tartozó erőszükségletet és a be- és kikapcsolás folyamatának histerézis jellegét. Meghatározza a rugóban ébredő erőt a teljes folyamatra nézve. Dinamikailag numerikusan vizsgálja a kapcsoló átpattanását és a bekövetkező prell jelenséget.

**Kulcsszavak:** mikrokapcsoló, dinamikai modell, szimuláció

### **Abstract**

This paper deals with the mechanical modeling of a micro switch. When the micro switch is actuated, many elements of the mechanism undergo large displacement and rotation. The investigation numerically determines the force required for the displacement of the pushbutton and the hysteresis nature of the on and off process. The force exerted in the spring for the entire process is determined. The simulation dynamically numerically examines the switch snap-through and the resulting prell phenomenon.

**Keywords:** micro switch, dynamical model, simulation

## 1. Bevezetés

A mikrokapcsolókat napjainkban is széles körben alkalmazzák villamos kapcsolási folyamatok elvégzésére. A kapcsolási mechanizmust gyakran villamos aktuátor hajtja meg, amelyet elektromechanikai modellel vizsgálnak [1]–[3]. Számos kapcsolóra jellemző a mechanikai stabilitásvesztés, azaz az átpattanás [4]. Ekkor a mechanikai rendszer egyik stabil helyzetéből átvált a másikba, úgy hogy közben feléphet a pergés (prell) jelensége is.

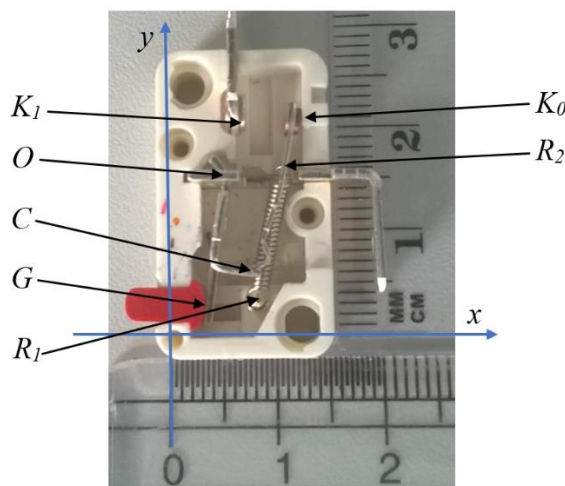
Ez a cikk felépíti a szerkezet mechanikai modelljét és azt először kvázistatikus módszerrel vizsgálja. A nyomógomb elmozdulásának függvényében felírja a rendszer jellemző pontjainak elmozdulását és meghatározza a beépített rugóban ébredő erőt. Az egyensúlyi feltételeknek megfelelően meghatározza

az átpattanás helyeit, a fel- és lekapcsolásnál egyaránt. Egy dinamikai modellel külön vizsgálja a kapcsoló elem (kalapács) átpattanását és az új stabil helyzetben bekövetkező pergését.

A cikk a 2. fejezetben felépíti a kapcsoló mechanizmus kvázistatikus mozgását leíró egyenletet és a hozzátartozó erő-elmozdulás összefüggéseket. A 3. fejezetben a nyomógomb működtetési erőszükségletének, illetve a mikrokapcsoló rugókarakterisztikájának meghatározásáról esik szó. A 4. fejezet a kalapács dinamikai vizsgálatával foglalkozik átpattanáskor. Az 5. fejezet foglalja össze az elért eredményeket.

## 2. Mikrokapcsoló mechanikai modellje

A mikrokapcsoló fényképét a jellemző pontok megjelölésével az 1. ábra mutatja. A pontok koordinátáinak meghatározása a kép alapján történt.  $O$  pont jelöli a mechanizmus forgáspontját,  $G$  pont a nyomógomb érintkezési pontja a mechanizmussal,  $C$  pont a mechanizmus és az érintkező kalapács csuklópontja,  $R_1$  a rugó stabil felfüggesztésének a pontja, míg  $R_2$  a rugó és a kalapács csatlakozási pontja,  $K_0$  jelöli a kalapács nyugalmi helyzetét,  $K_1$  pedig a kalapács átbillent pozícióját. A pontok koordinátáiból meghatározhatók a következő hosszak és szögek:  $l$  a kalapács hossza a  $C$  és a  $K_0$  között,  $l_1$  a  $C$  csukló és a rugó  $R_2$  felfüggesztés közötti távolsága,  $L_3$  jelenti az  $O$  és a  $G$  pontok közötti távolságot,  $r_c$  az  $O$  és a  $C$  pont közötti távolságot adja meg,  $\alpha_{og}$  az  $\overline{OG}$  szakasz függőlegessel bezárt szögét, az  $\alpha_{oc}$  az  $\overline{OC}$  szakasz függőlegessel bezárt szögét definiálja.



1. ábra. A csengő sematikus vázlata

Az 1. ábrán szereplő bázispontok koordinátaival és az  $O$  pont körül elforduló csuklós mechanizmus  $\alpha$  szögelfordulásával megadhatók a mozgó pontok helykoordinátái.

A csuklópont az  $\alpha$  szögelfordulás függvényében számítható

$$x_c = x_o + r_c \sin(\alpha + \alpha_{oc}), \quad (1)$$

$$y_c = y_o - r_c \cos(\alpha + \alpha_{oc}). \quad (2)$$

A kalapács függőleges koordinátájának számítása a kalapács  $K_0$  és  $K_1$ ,  $x_k$  helyének függvényében:

$$y_k = \sqrt{l^2 - (x_k - x_c)^2} + y_c. \quad (3)$$

A rugó  $R_2$  mozgó végpontjának koordinátái:

$$x_{r2} = \frac{l_1(x_k - x_c)}{l} + x_c, \quad (4)$$

$$y_{r2} = \frac{l_1(y_k - y_c)}{l} + y_c. \quad (5)$$

A deformálódott rugó hossza:

$$l_r = \sqrt{(x_{r2} - x_{r1})^2 + (y_{r2} - y_{r1})^2}. \quad (6)$$

A rugóban ébredő erő meghatározható

$$F_r = k_r(l_r - l_{r0}), \quad (7)$$

ahol  $k_r$  a rugó merevsége,  $l_{r0}$  a rugó terheletlen hossza.

A  $C$  csuklóban ébredő erővektor  $x$  és  $y$  irányú összetevőinek meghatározásához egy nyomatéki egyenletet, illetve egy vetületi egyenletet írunk fel. Az  $F_r$  rugóerő nyomatéka a  $K_0$  ponton átmenő a kép síkjára merőleges tengelyre:

$$m_{k0} = F_r e_{Fry}(x_k - x_{r2}) - F_r e_{Frx}(y_k - y_{r2}), \quad (8)$$

ahol az  $F_r$  erő vektor iránykoszinuszai:

$$e_{Frx} = (x_{r1} - x_{r2})/l_r, \quad (9)$$

$$e_{Fry} = (y_{r1} - y_{r2})/l_r. \quad (10)$$

A függőleges irányú vetületi egyenletből kapjuk, hogy:

$$F_{cy} = -F_r e_{Fcy}, \quad (11)$$

ahol  $e_{Fcy} = (y_c - y_o)/r_c$ .

A (8) felhasználásával meghatározhatjuk a csuklóerő vízszintes komponensét:

$$F_{cx} = \frac{m_{k0} + F_{cy}(x_k - x_c)}{y_k - y_c}. \quad (12)$$

A csuklóerő vízszintes és függőleges komponenseiből kiszámítható az  $\overline{OC}$  karra merőleges  $F_{cm}$  erő, amely a kapcsolómechanizmus  $m_0$  nyomatékát adja:

$$F_{cm} = -F_{cx} e_{Fcy} + F_{cy} e_{Fcx}, \quad (13)$$

ahol  $e_{Fcx} = (x_c - x_o)/r_c$ , azaz

$$m_0 = F_{cm} r_c. \quad (14)$$

A mechanizmust működtető nyomógomb ereje a (14) felhasználásával jó közelítéssel számítható:

$$F_G = m_0 / (y_o - y_{go}). \quad (15)$$

Megjegyezzük, hogy az  $x_k$  kalapács koordináta az  $m_{k0}$  nyomaték előjelétől függ:

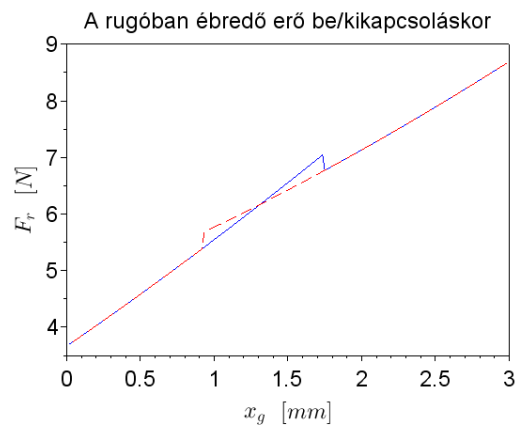
$$x_k = \begin{cases} x_{k0}, & \text{ha } m_k > 0, \\ x_{k1}, & \text{ha } m_k < 0, \end{cases} \quad (16)$$

amelyet a (3) összefüggésben kell érvényesíteni.

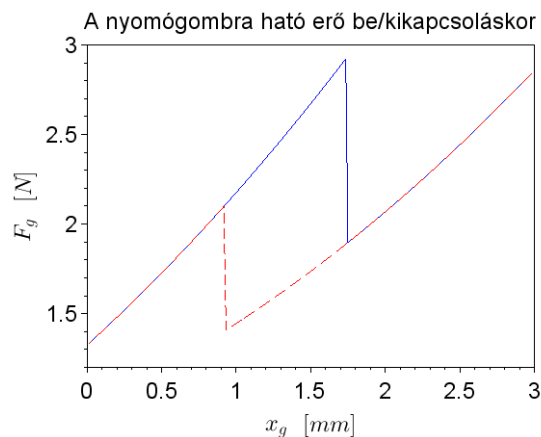
### 3. A kapcsoló rugókarakterisztikájának meghatározása

A 2. fejezetben előállított egyenletek alapján Scilab rendszer alatt egy szimulációs program kifejlesztése történt meg. A vizsgált mikrokapcsoló adatai a következők:  $x_o = 5,2 \text{ mm}$ ,  $y_o = 15,1 \text{ mm}$ ,  $x_{go} = 3,3 \text{ mm}$ ,  $y_{go} = 2,7 \text{ mm}$ ,  $x_{co} = 7,4 \text{ mm}$ ,  $y_{co} = 6 \text{ mm}$ ,  $x_{r1} = 8 \text{ mm}$ ,  $y_{r1} = 3,5 \text{ mm}$ ,  $x_{r20} = 10,42 \text{ mm}$ ,  $y_{r20} = 12 \text{ mm}$ ,  $x_{k0} = 12 \text{ mm}$ ,  $y_{k0} = 21,2 \text{ mm}$ ,  $x_{k1} = 8,5 \text{ mm}$ ,  $y_{k1} = 21,9 \text{ mm}$ ,  $l_{r0} = 12 \text{ mm}$ ,  $k_r = 5 \text{ N/mm}$ ,  $l = 15,9 \text{ mm}$ ,  $l_1 = 10,4 \text{ mm}$ ,  $l_3 = 12,5 \text{ mm}$ ,  $r_c = 9,36 \text{ mm}$ ,  $\alpha_{og} = 0,152 \text{ rad}$ ,  $\alpha_{oc} = 0,237 \text{ rad}$ .

Az  $O$  pont körül forgó alkatrész (kengyel) maximális szögelfordulása  $0,239 \text{ rad}$ , mialatt a  $G$  benyomógomb  $3 \text{ mm}$  utat tesz meg. A számítások során ezt a szögelfordulást  $200-200$  lépésre felosztva a kengyel mozgását mindkét irányban oda-vissza előírtuk. Minden egyes lépésben meghatároztuk a rugóban- és a nyomógombban fellépő erőket, amelyeket rendre a 2. és 3. ábrák szemléltetnek.



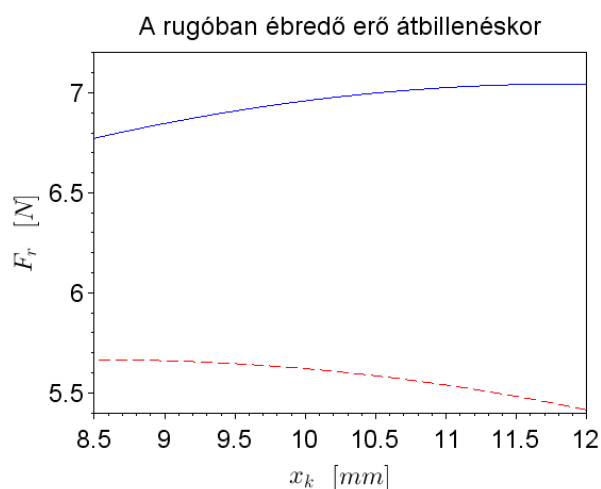
2. ábra. A rugóban ébredő erő a nyomógomb elmozdulása függvényében



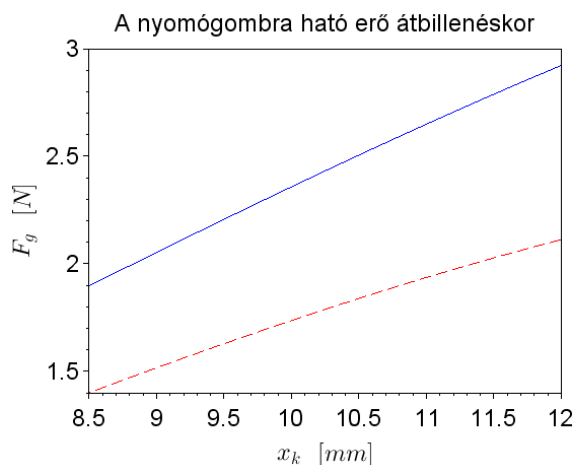
3. ábra. A nyomógomb működtetési erőszükséglete az elmozdulása függvényében

Kék színű görbe jelzi a nyomógomb benyomása során számított erőket, a piros színűek pedig a gomb visszaengedésekor fellépő erőket. A 2. ábrán látható, hogy mind a gomb benyomásakor, mind a kiengedésekor az átpattanás alatt erőcsökkenés lép fel a rugóban. Ettől különbözik a 3. ábrán vázolt nyomógomb karakterisztikája, a benyomás során hirtelen erőcsökkenés, míg a kiengedésnél erőnövekedés tapasztalható az átpattanás pillanatában.

Külön megvizsgáltuk az átpattanás rövid ideje alatt a kalapács mozgásának a függvényében a rugóerőt (lásd: 4. ábra) és a gomb erőváltozását (lásd: 5. ábra). Kék színnel reprezentáltuk a kalapács  $K_0$  pontból a  $K_1$  pontba történő átpattanása során fellépő rugóerőt, amely a 4. ábrán az  $x_k$  mentén negatív irányba megy végbe. A pozitív  $x_k$  irányba történő visszapattanás rugó görbáját piros szaggatott vonal jelöli. Az át- és visszapattanás jelensége egyaránt rugóerő csökkenést mutat.



4. ábra. A rugóban ébredő erő változása a kalapács átpattanásakor



5. ábra. A nyomógombnál tapasztalható erő változása a kalapács átpattanásakor

Ezzel összhangban változik a nyomógombon tapasztalt erők is az átpattanások alatt, ahogy az az 5. ábrán is megfigyelhető.

#### 4. A kalapács átpattanásának dinamikai vizsgálata

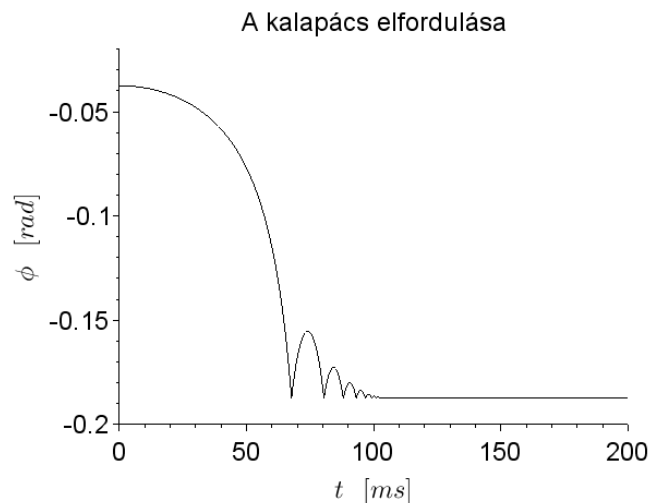
A 4. ábrán látható  $F_r$  rugóerő, és a kalapács geometriájának és tömegének ismeretében felírható az átpattanás mozgásegyenlete a  $C$  pontra felírt perdülettétel segítségével.

$$J_k \ddot{\phi} = F_r(\phi) l_1, \quad (17)$$

ahol  $J_k$  a kalapács tehetetlenségi nyomatéka, és az  $F_r(\phi)$  rugóerő is a kalapács  $\phi$  szögelfordulásának függvényeként szerepel az egyenletben. Az átpattanás végén a kalapács rugalmasan ütközik a  $K_I$  pontban rögzített állónek, amelyet egy  $k_c$  merevségű rugóval és vele párhuzamosan kötött  $d_c$  csillapítással modellezünk. A csillapítás az ütközési energia egy részét eldisszipálja, amely az ütközési tényező figyelembevételét teszi lehetővé. A felütközés során az egyenlet az alábbi alakot ölti:

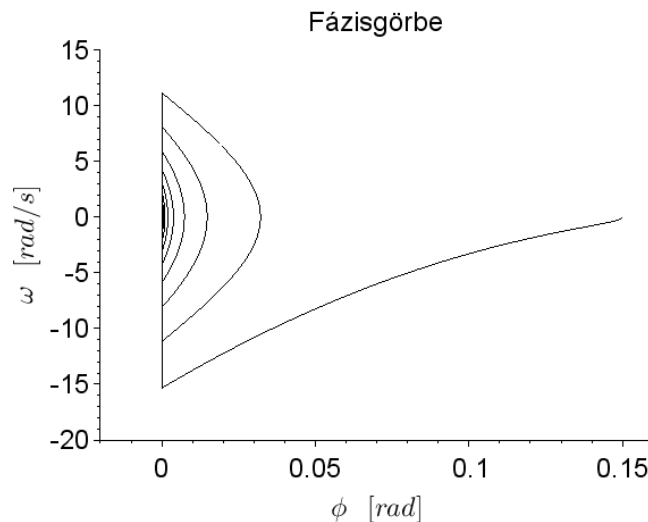
$$J_k \ddot{\phi} = F_r(\phi) l_1 - l d_c \dot{\phi} - l k_c \phi. \quad (18)$$

A kalapács tehetetlenségi nyomatéka  $J_k = 3,072 \cdot 10^{-8} \text{ kgm}^2$ , az üllő rugómerevsége és csillapítása rendre  $k_c = 2 \cdot 10^8 \text{ Nm}$ ,  $d_c = 0,5 \text{ Ns/m}$ . A (17), (18) differenciálegyenleteket numerikusan megoldva a  $\phi(0) = 0,0375 \text{ rad}$  kezdeti értékkel, az eredményeket a 6. és a 7. ábrák szemléltetik.



**6. ábra.** A kalapácsszögelfordulása a benyomásnál jelentkező átpattanáskor

A 6. ábrán látható, hogy átpattanáskor a kalapács gyorsuló mozgással csapódik az üllőre, ahonnan többször is visszapattan. Ezt a jelenséget nevezzük pergésnek. Megjegyezzük, hogy a kalapács  $K_0$  pontból indul, majd  $K_I$  pontba csapódik be, ahol, mint stabil helyzetben nyugalomba kerül. A 6. ábrán a  $\phi$  szög negatív irányba változik, de a 7. ábrán egy olyan transzformációt hajtunk végre  $\hat{\phi} = \phi_1 - \phi$ , hogy a  $K_I$  pontban  $\hat{\phi}$  zérus legyen. A  $\phi_1$  értéke a kalapács átpattanásának szögtartományát fedi le. A fázisgörbe jól mutatja az ütközés pillanatában tapasztalható sebesség előjelének és nagyságának megváltozását.



7. ábra. A kalapács átpattanásának fázisgörbéje a  $K_1$  nyugalmi pontra értelmezve

## 5. Összefoglalás

A cikk egy mikrokapcsoló nemlineáris modellezésével és szimulációjával foglalkozott. Kvázistatikus folyamatot feltételezve meghatározásra került a nyomógomb és a rugó erőértékek a nyomógomb elmozdulásának függvényében. A nyomógomb erődiagramja hiszterézis jelleget mutat, mert a gomb benyomásánál és a kiengedésekor különböző helyzetekben történik meg az érintkező kalapács átpattanása, azaz a stabilitásvesztés bekövetkezte.

Az érintkező kalapács átpattanásának dinamikai vizsgálata kimutatta a gyakorlatban nem kívánatos prell, azaz a pergés jelenségét.

## Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

## Irodalom

- [1] Jrad, M. Younis, M., Najjar, F.: (2016), *Modeling and design of an electrically actuated resonant switch*, Journal of Vibration and Control, 22. pp. 559-569. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20120104001>
- [2] Casals-Terré, J., Shkel, A. M.: (2005), *Snap-action bistable micromechanism actuated by nonlinear resonance*, IEEE, pp.893-896. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2005.1597843>
- [3] Medina, L., Gilat, R., Ilic, B., Krylov, S.: *Two-directional operation of bistable latchable micro switch actuated by a single electrode*, Eurosensors Conference, September 3-6, 2017, Paris, pp. 1-5. <https://doi.org/10.3390/proceedings1040277>
- [4] Rónai, L.: *Elektromos kapcsoló mechanizmus átpattanási jelenségének modellezése*, Doktoranduszok Fóruma, Miskolci Egyetem, 2017, pp. 79-84.