

# ELEKTROAKTÍV POLIMER FÓLIA MODELLEZÉSE

## MODELING ELECTROACTIVE POLIMER FOIL

Horváth Péter PhD

### ABSTRACT

Electroactive polymers (EAPs) belong to smart materials that can be used to create novel sensors and actuators. Unfortunately just incomplete data of EAP foil are available. This paper derives expressions calculated from diagrams of EAP foil manufacturer to make possible analytical design of EAP actuators.

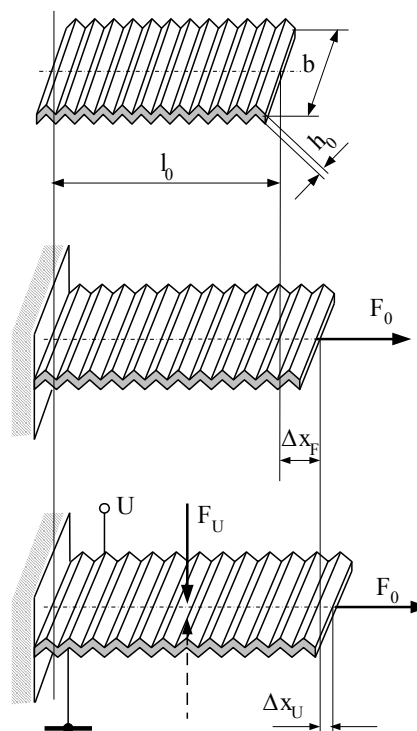
### 1. BEVEZETÉS

Az elektroaktív polimerok az intelligens anyagok körébe sorolható eszközök, melyekből újszerű szenzorok és aktuátorok készíthetők. Tulajdonképpen egy rugalmas dielektrikumú síkkondenzátornak tekinthető, melyben a rákapcsolt több ezer volt nagyságrendű feszültség hatására az elektrosztatikus erők összenyomják a dielektrikumot, ami a másik irányokban kitágul. Ez a hosszváltozás jelenti az EAP aktuátorok („műizmok”) mozgástartományát. A mozgások és erők nem számottevőek, de a súlyegységre vonatkoztatott értékük jelentős lehet. Bizonyos alkalmazásokban (pl. fényképezőgép lencsemozgató rendszere, inzulinpumpa, stb.) már alkalmazást nyert egyszerű és könnyű kivitele következtében. Reménytelen kísérletek folynak vele mechanikus energia közvetlen villamos energiává alakítása területén is. Az elektroaktív polimerrel működő szenzorok és aktuátorok aktív eleme az EAP fólia, melyet a dán Danfoss cégtől lehet beszerezni. Sajnálatosan a cég csak néhány diagramot közöl, melyek alapján első közelítésben nem lehetséges aktuátort tervezni. A cikk célja a rendelkezésre álló adatok alapján a fólia viselkedésének mérnöki szemléletű leírására alkalmas elemi összefüggések kidolgozása, melyek lehetővé teszik a Danfoss fóliával működő EAP aktuátorok tervezését. Nem célja a tanulmánynak az anyag anizotróp viselkedésének teljes körű leírása, mely főként az ismeretlen mértékű és szemmel láthatatlan redőzöttségből fakad, csupán a hosszváltozás, erő és gerjesztő feszültség közötti analitikus kapcsolat megállapítása. A célul tűzött összefüggések a gyártó által közölt görbeseregek egyenleteit adják, melyek levezetése nem egyszerű görbeillesztéssel történik, hanem elemi fizikai törvényszerűségek felhasználásával.

### 2. AZ EAP FÓLIA MŰKÖDÉSE

Az EAP fólia alkalmazásakor minden esetben a fólia aktív,  $x$  irányú hosszváltozása játssza a fő szerepet. A hosszváltozás két ok miatt következhet be:  $F_0$  erővel való nyújtás (előfeszítés), valamint az azt követő  $U$  feszültséggel történő gerjesztés következtében [2].

A működés az 1. ábrán követhető nyomon. A mindkét oldalán fémbevonattal ellátott fólia kiindulási állapotában  $l_0$  hosszúságú és  $h_0$  vastagságú, rugalmas dielektrikumú síkkondenzátornak tekinthető. Mivel a fólia statikai értelemben véve kötélnek minősül, ezért csak húzóerő felvételére alkalmas, tehát hosszirányú előfeszítése (előnyújtása) szükséges.  $F_0$  előfeszítő erő hatására a fólia  $\Delta x_F$  mértékben megnyúlik. A működtetés a fólia szemközti homlokfelületeire kapcsolt  $U$  feszültséggel történik: az  $F_U$  elektrosztatikus nyomóerők következtében a fólia vastagsága csökken, a térfogatállandóság és a redőzöttség következtében hosszirányban  $\Delta x_U$  mértékkel tovább megnyúlik, miközben szélessége nem változik jelentősen. A  $\Delta x_U$  járulékos nyúlást az



1. ábra. Az EAP fólia működése aktuátor mozgástartományának tekinthetjük. A járulékos nyúlás miatt az előfeszítő rugó kissé

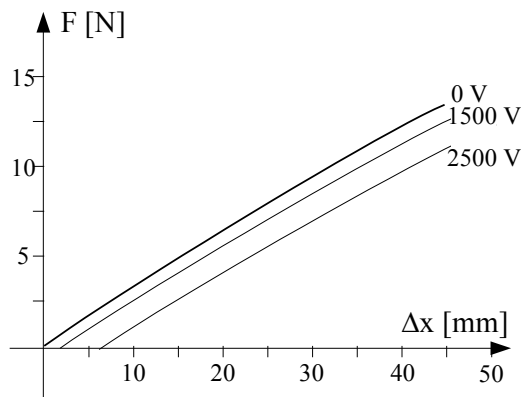
elernyed, benne az előfeszítés  $F_0'$  értékre csökken. A villamos feszültséget megszüntetve az aktuátor igyekszik visszanyerni eredeti hosszát. Ha ebben valami megakadályozza, akkor az aktuátor az akadályra ható  $F_{sz}$  szorító erő kifejtésére lesz képes (gátolt alakváltozás).

### 3. Az EAP FÓLIA RENDELKEZÉSRE ÁLLÓ ADATAI

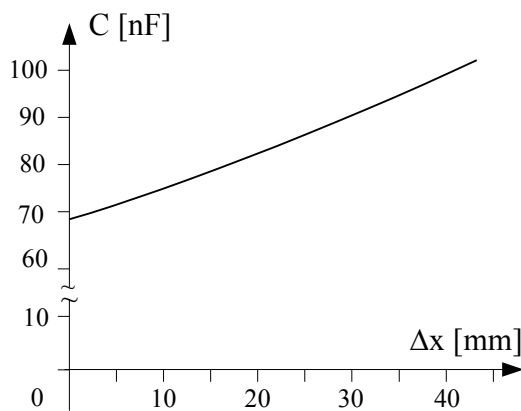
A gyártó cég néhány anyagjellemzőt megad, ezek a következők [3]:

Rugalmassági modulusz:  $E=1,1\text{MPa}$   
 Relatív dielektromos állandó.  $\epsilon_r=3,1$   
 Szakítószilárdság x irányban  $\sigma=2\text{MPa}$   
 Maximális nyúlás x irányban 30%

További három diagram áll rendelkezésre a leíró függvények megalkotásához. A 2. ábrán az EAP fólia erő-megnyúlás jelleggörbéje látható  $l_0=200$  mm kezdeti fóliahosszra vonatkoztatva,  $b=1$  m széles fóliacsík esetén, különböző villamos gerjesztés esetén.



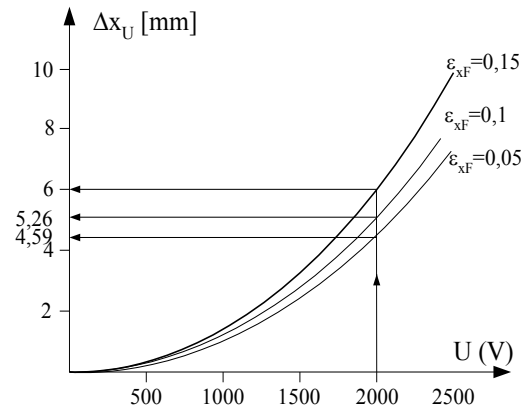
2. ábra. Danfoss EAP fólia erő-megnyúlás jelleggörbéje



3. ábra. Danfoss EAP fólia kapacitás-megnyúlás jelleggörbéje

A fólia kapacitásának változása a megnyúlás függvényében a 3. ábrán látható. A 4. ábrán

különböző mechanikus előnyújtások esetén láthatjuk a villamos gerjesztés hatására bekövetkező járulékos nyúlást

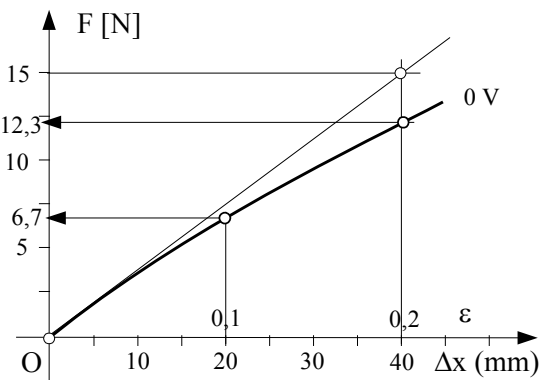


4. ábra. Danfoss EAP fólia megnyúlás-feszültség jelleggörbéje villamos gerjesztés hatására, különböző mechanikai előnyújtások esetén

### 4. AZ ADATOK FELDOLGOZÁSA

#### 4.1. Erő-megnyúlás diagram

Az  $U=0\text{V}$  görbe alkalmas a tisztán mechanikai jellemzők ellenőrzésére, illetve a viselkedésre vonatkozó következtetések levonására.



5. ábra. Differenciális rugalmassági modulus értelmezése

Rögtön megállapítható, hogy a differenciális rugalmassági modulus  $A_0=bh_0$  húzott keresztmetszet esetében

$$E = \frac{dF}{d(\Delta x)} \cdot \frac{l_0}{A_0} \quad (1)$$

értelmezése szerint a rugalmassági modulus értéke nem állandó, hiszen a görbe érintőjének a meredeksége változik. A rugalmassági modulus kezdeti, kis alakváltozásokra érvényes értékét a görbéhez húzott érintő megszerkesztésével kapjuk, értéke

$$E_O = \frac{15}{0,04} \cdot \frac{0,2}{0,00008} = 9,375 \cdot 10^5 \text{ MPa} \quad (2)$$

Megállapíthatjuk, hogy a cég által közölt értéktől kb. 15 százalékkal eltér a diagram alapján meghatározható rugalmassági modulus. Feltehetően az eltérés oka a fólia redőzöttségében keresendő, mely rugalmasabbá teszi a fóliát hosszirányban. A továbbiakban  $E=937500$  MPa állandó értékkel számolunk.

Még magyarázatot kell találnunk arra is, hogy miért változik az  $F-\Delta x$  görbe meredeksége? A rugalmassági modulus értéke változik, vagy esetleg egyszerűbb magyarázat is adható a változás okára? Szembetűnő, hogy fémekhez képest igen jelentős a fólia fajlagos nyúlása. A nagy alakváltozás következtében a kiindulási geometriai adatok jelentősen megváltoznak, így például a térfogat állandósága következtében a fólia vastagsága  $h = \frac{h_0}{1 + \varepsilon_{xF}}$  értékre változik, a húzott keresztmetszet pedig  $A = \frac{A_0}{1 + \varepsilon_{xF}}$  lesz. Ha a Hooke-törvényt az alakváltozás végállapotában mért értékekkel írjuk fel, akkor

$$E = \frac{F(1 + \varepsilon_{xF})}{A_0 \varepsilon_{xF}} \quad (3)$$

lesz. Innen a fajlagos nyúlást kifejezve

$$\varepsilon_{xF} = \frac{\Delta x_F}{l_0} = \frac{F}{A_0 E - F} \quad (4)$$

nemlineáris összefüggést nyerjük. Ellenőrzésképpen kiszámítottuk  $F=6,7$  N és  $12,3$  N erőkre a megnyúlást és nagyon jó egyezést találtunk a diagramon közölt értékekkel. Levonhatjuk tehát a következtetést, hogy számolhatunk állandó rugalmassági modulussal, de akkor a tényleges (terhelés hatására megváltozott) geometriai méreteket kell számításba venni.

#### 4.2. Kapacitás-megnyúlás diagram

Egy mechanikailag terheletlen,  $b=1$  m szélességű,  $l_0=0,2$  m hosszú ( $A_{h0}=0,2$  m<sup>2</sup> homloklapfelületű),  $h_0=80$  μm vastagságú fólia kapacitása a 3. ábra alapján kb. 68 nF. Számítással ez az érték

$$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A_{h0}}{h_0} = 8,86 \cdot 10^{-12} \cdot 3,1 \frac{1 \cdot 0,2}{8 \cdot 10^{-5}} = 68,66 \cdot 10^{-9} \text{ F} \quad (4)$$

ami tökéletesen megegyezik a közölt 68 nF értékkel. Ez a számítás a nyújtatlan fólia vastagságának és a relatív dielektromos állandónak a helyességét igazolja. Egy másik,  $\Delta x_F=0,04$  m ( $\varepsilon_{xF}=0,2$ ) nyúláshoz tartozó diagrampontban a fólia kapacitása  $C=98$  nF. Térfogat-állandóságot, valamint változatlan fólia szélességet feltételezve a fólia kapacitása ekkor

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A_{h0}(1 + \varepsilon_{xF})}{\frac{h_0}{1 + \varepsilon_{xF}}} = 68,66 \cdot 10^{-9} \cdot 1,2^2 = 98,8 \cdot 10^{-9} \text{ F} \quad (5)$$

A számított érték tökéletesen egyezik a diagramról lemérhető értékkel, amiből a térfogat állandóság feltételezésének helyességére következtethetünk.

#### 4.3. Megnyúlás villamos gerjesztés hatására

A mechanikus előnyújtás következtében megváltozott  $h=h_0/(1+\varepsilon_{xF})$  vastagságú és  $A_h=A_{h0}(1+\varepsilon_{xF})$  homloklapfelületű fóliára ható elektrosztatikus erő a kondenzátor potenciális energiájának gradienseként számítható:

$$F_y = -\frac{\partial E}{\partial h} = -\frac{\partial}{\partial h} \left( \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A_h}{h} U^2 \right) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r U^2 \frac{A_{h0}(1 + \varepsilon_{xF})^3}{h_0^2} \quad (6)$$

Az  $F_y$  erő következtében a fólia vastagsági irányban további

$$\varepsilon_{yU} = \frac{F_y}{A_{h0}(1 + \varepsilon_{xF})E} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r U^2 \frac{(1 + \varepsilon_{xF})^2}{E h_0^2} \quad (7)$$

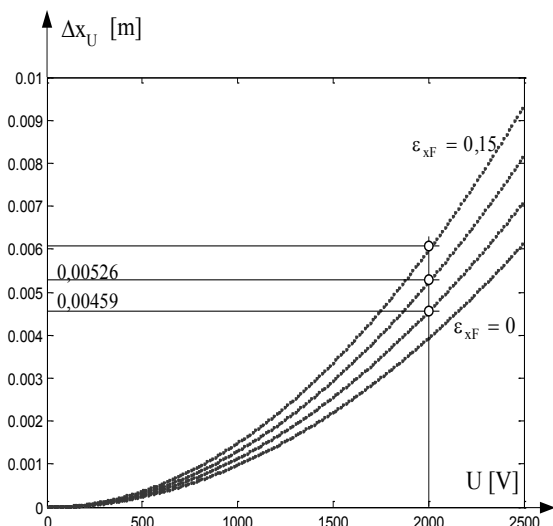
alakváltozást szenved. Megjegyzendő, hogy a villamos gerjesztés hatására bekövetkező fólia vastagság változás az előnyújtáshoz képest nagyságrendileg kisebb. A hosszirányban már előnyújtott,  $l=l_0(1+\varepsilon_{xF})$  hosszúságú fólia a villamos gerjesztés hatására további

$$\Delta x_U = l_0(1 + \varepsilon_{xF}) \cdot \varepsilon_{yU} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r U^2 \frac{(1 + \varepsilon_{xF})^3}{E h_0^2} \cdot l_0 \cdot K \quad (8)$$

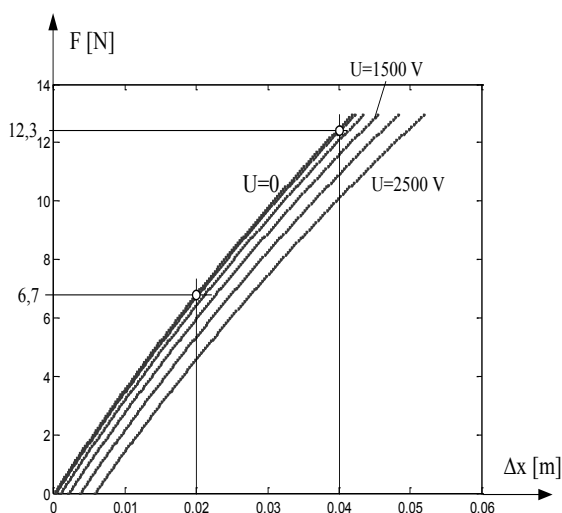
járulékos megnyúlást szenved. Az összefüggésben alkalmazott, villamos-mechanikai kölcsönhatásra vonatkozó, paraméterillesztéssel kapott  $K=2,15$  korrekciós tényező a fólia redőzöttségét veszi figyelembe azáltal, hogy nem csupán a térfogat állandóság fenntartása, hanem a redő-

zöttség kisimulása is oka a fólia hosszirányú alak változásának.

A (8) összefüggés alapján számított görbék az 5. ábrán láthatók és teljesen megegyeznek a gyártó által megadott, 4. ábrán látható diagrammal, bizonyítva a számítási algoritmus helyességét.



5. ábra. A villamos gerjesztés hatására fellépő alakváltozás különböző előfeszítések esetén.



6. ábra. A fólia eredő megnyúlása az erő és a feszültség függvényében, számított értékek alapján

Most, hogy részleteiben sikerült leírni az EAP fólia viselkedését, a fólia együttes, mechanikus és villamos hatásokra történő hosszváltozása is kiszámítható a

$$\Delta x(F, U) \approx l_0(\varepsilon_{xF} + \varepsilon_{xU}) =$$

$$= l_0 \left[ \frac{F}{A_0 E - F} + \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{K U^2}{E h_0^2} \cdot \left( \frac{A_0 E}{A_0 E - F} \right)^3 \right] \quad (9)$$

összefüggéssel. Ellenőrzésképpen a 6. ábrán megrajzoltuk a (9) összefüggés inverzét, a 2. ábrával való összehasonlítás érdekében. Az egyezés meggyőző.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A gyártó cég diagramjai alapján sikerült levezetni olyan összefüggéseket, melyek lehetővé teszik EAP aktuátorok és szenzorok méretezését. A rendelkezésre álló információk alapján megállapításra került, hogy a fólia rugalmassági modulusának helyes értéke 937500 MPa. Helyesek az anyag vastagságára és relatív dielektrikus állandójára közölt értékek, továbbá a térfogat állandóságára tett feltételezés azzal a megszorítással, hogy a villamos-mechanikus kölcsönhatás során  $K=2,15$  korrekciós tényezővel kell figyelembe venni a szerkezet anizotrópiáját. A (9) összefüggés alapján megrajzolt diagramok tökéletes egyezést mutatnak a gyártó által közölt diagramokkal, így lehetőséget teremtnek EAP aktuátorok és szenzorok analitikus módon történő tervezésére.

## 6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány az „Elektroaktív polimerek ipari felhasználási lehetőségeinek kutatása” című BAROSS-ND07-ND-INRG5-07-2008-0062 projekt támogatásával készült.

## 7. IRODALOM

- [1] S. Rosset, M. Niklaus, P. Dubois, H.R. Shea: Mechanical characterization of a dielectric elastomer microactuator with ion-implanted electrodes. *Sensors and Actuators A* 144 (2008)185–193
- [2] Electroactive Polymer (EAP) Actuators. [www.empa.ch](http://www.empa.ch)
- [3] PolyPower DEAP Introduction. [www.polypower.com](http://www.polypower.com)