

# A folyamatműszerezés érzékelői

## Érzékelők mérőkörei - 2.

Dr. Fock Károly

Az impedanciakimenetű érzékelők mérőkörei közül az ellenállásos és a kapacitív érzékelők után az alábbi részben ismertetésre kerülnek az induktív érzékelők kiegyenlítettlen hídkapcsolásai, valamint egy összehasonlító elemzés alapján kiderül az induktív érzékelők előnye a kapacitív eszközökkel szemben.

### Induktív érzékelők kiegyenlítettlen hídkapcsolásban

Az *induktív érzékelők* igen bőséges típusválasztékából az összehasonlítás érdekében ugyancsak az elmozdulás mérésére alkalmas változó légrésű (1. ábra) és a merülő-vasmagos (2. ábra) kivittelt emeljük ki, ezek közül is csak a differenciálkialakításokat.

Az 1. a ábrán látható, változó légrésű, induktív átalakító mágneses köre 2 db **U** alakú járomból és a közöttük elmozduló **I** alakú zárótestből áll. Az **U** alakú járomokon elhelyezkedő  $N$  menetszámú tekercsek  $L_1$  és  $L_2$  induktivitása a zárótest helyzetétől, vagyis a légrések  $R_{L1}$  és  $R_{L2}$  jelű – az  $x$  mérendő elmozdulással ellentétes irányban változó – mágneses ellenállásától függ. (Ehhez feltételeztük, hogy a járomok  $R'_m$  és a zárótest  $R_m$  mágneses ellenállása a légrés mágneses ellenállásához képest elhanyagolható.)

Az érzékelő  $\bar{Z}_1$  és  $\bar{Z}_2$  villamos impedanciája az 1. b ábrán látható analóg mágneses helyettesítő képből számítható ( $R$  a tekercsek eredő veszteségi ellenállása). Ha a zárótest  $R_m$  mágneses ellenállása a légrések  $R_{L1}$  és  $R_{L2}$  mágneses ellenállásai mellett elhanyagolható, akkor a két fél között kölcsönös induktivitás sincs. Nem hanyagolható el azonban a tekercsek állandónak feltételezett  $R$  villamos veszteségi ellenállása, amelynek figyelembevételével az 1. c ábrán látható **u - u** típusú híd  $\bar{u}_k$  kimenő feszültsége – a részletek mellőzésével (közelítőleg) – az

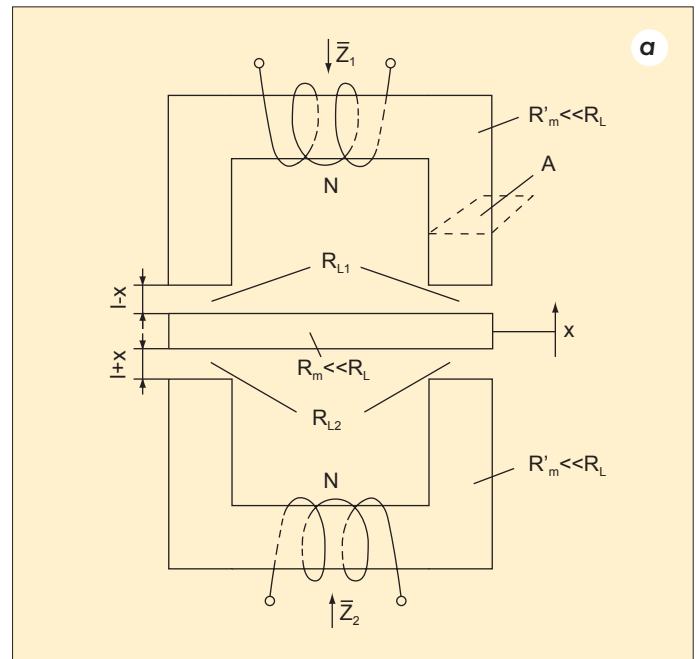
$$\bar{u}_k \approx \frac{u_T}{2} \frac{1}{1 - j \frac{1}{Q}} (1 - \sigma) \frac{x}{l}$$

alakra egyszerűsíthető, amely eredményben az érzékelők statikus karakterisztikája az

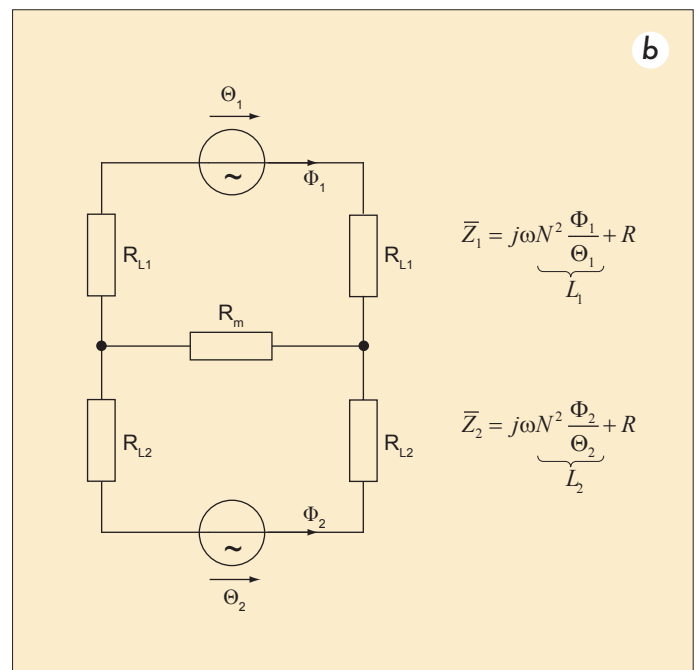
$$L_1 = L_0 \left( \frac{1}{1 - \frac{x}{l}} + \frac{\sigma}{1 - \sigma} \right)$$

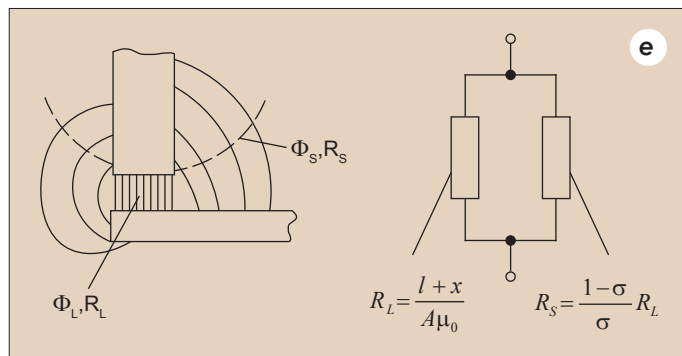
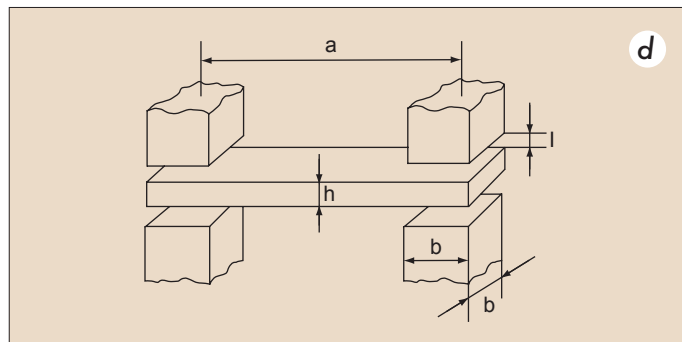
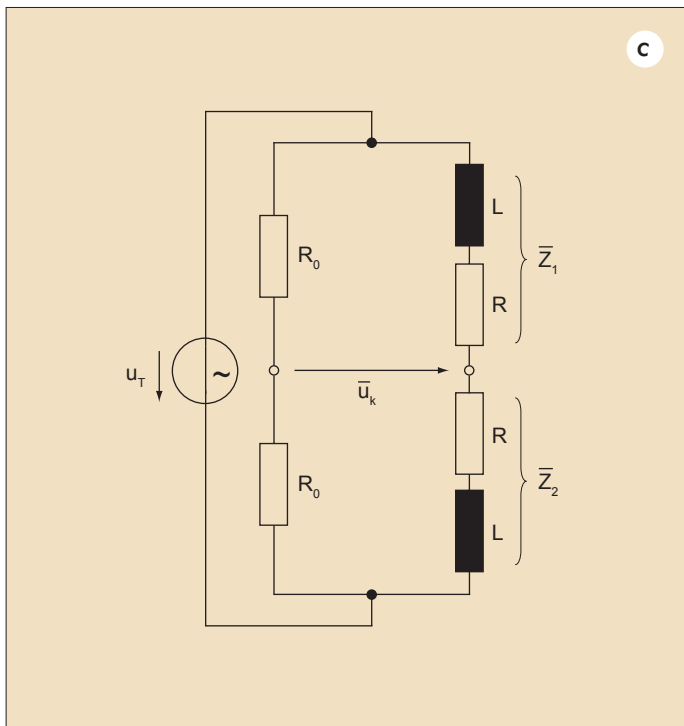
$$L_2 = L_0 \left( \frac{1}{1 + \frac{x}{l}} + \frac{\sigma}{1 - \sigma} \right)$$

képletekkel számítható, amelyekben az 1. a ábra jelöléseivel



1. ábra Változó légrésű, differenciálkialakítású, induktív érzékelő  
a) **U - I** típusú érzékelő elvi szerkezeti felépítése  
b) Az érzékelő analóg mágneses köre





1. ábra Változó légrésű, differenciálkialakítású, induktív érzékelő  
 c) Az érzékelő  $u - u$  üzemmódú, kiegyenlített hídkapcsolású mérőköre

d) Az érzékelő szerkezeti kialakítása a zárójárom környezetében  
 e) A  $\Phi_s$  szórás fluxus és analóg mágneses helyettesítő képe

$$L_0 = \frac{N^2 \mu_0 A}{2l}$$

a járom középhelyzetéhez tartozó induktivitás.

Az  $\bar{u}_k$  kimenőfeszültség kifejezésében

$$Q = \frac{\omega L_0}{R}$$

jelöli a tekercs soros veszteségi tényezőjét és  $\sigma$  a szórás tényezőt. A  $\sigma$  szórás tényező veszi figyelembe a zárótest körül (1. d ábra) kialakuló – és el nem hanyagolható –  $\Phi_s$  fluxussal és az  $R_s$  mágneses ellenállással jellemzett, ún. szórt mágneses teret (1. e ábra).

Értékelve az eredményt, megállapítható, hogy a változó légrésű induktív érzékelők statikus karakterisztikája szintén hiperbolikus, és ezek után nem meglepő, hogy a híd kimenőfeszültsége a mérendő  $x$  elmozdulás lineáris függvénye. A nem elhanyagolható szórásnak jelentős érzékenységsökkentő szerepe lehet. Figyelemreméltó az  $\bar{u}_k$  kimenőfeszültség és az  $u_T$  tápfeszültség közötti fázistolás, amit most a tekercsek veszteségei okoznak.

Az általánosnak mondható szabály mellett – miszerint lineárisan változó üresjárási kimenő feszültséget kapunk differenciálkialakítású lineáris vagy hiperbolikus, statikus karakterisztikájú érzékelők alkalmazásával – érdemes megvizsgálni a 2. ábrán látható ún. merülő-vasmagos induktív érzékelő hídkapcsolású mérőkörének jelátviteli tulajdonságait is. A példa arra figyelmeztet, hogy akkor is érdemes egyedi vizsgálatba fogni, ha a fenti megállapítás feltételei nem teljesülnek.

A 2. ábra a merülő-vasmagos, differenciálkialakítású, induktív elmozdulásmérő elvi szerkezeti felépítését szemlélteti. Két szolenoid típusú, egymással mechanikusan csatlakozó, koaxiális tekercsben tengelyirányban egy rúd alakú vasmag mozog. A vasmag  $x$  elmozdulásának hatására megváltozik a tekercsek

$L_1$  és  $L_2$  induktivitása, valamint a – most nem elhanyagolható –  $M$  kölcsönös induktivitás is. Szokásos kialakításban a vasmag  $l_k$  hossza megközelítően egy tekercs  $l$  hosszával azonos, és – a külső villamos és mágneses terek zavarásától védendő – az érzékelőt egy mágnesesen és villamosan is árnyékoló csőben helyezik el.

Az érzékelő  $u - u$  üzemmódú, kiegyenlített hídkapcsolású mérőköre kimenőfeszültségének meghatározásánál most a tekercsek veszteségeinek az elhanyagolása jogos, és a 2. a ábrán látható összefüggéssel számítható. A 2. b ábrán a kimenőfeszültség meghatározásához a jelváltozásokat tüntettük fel.

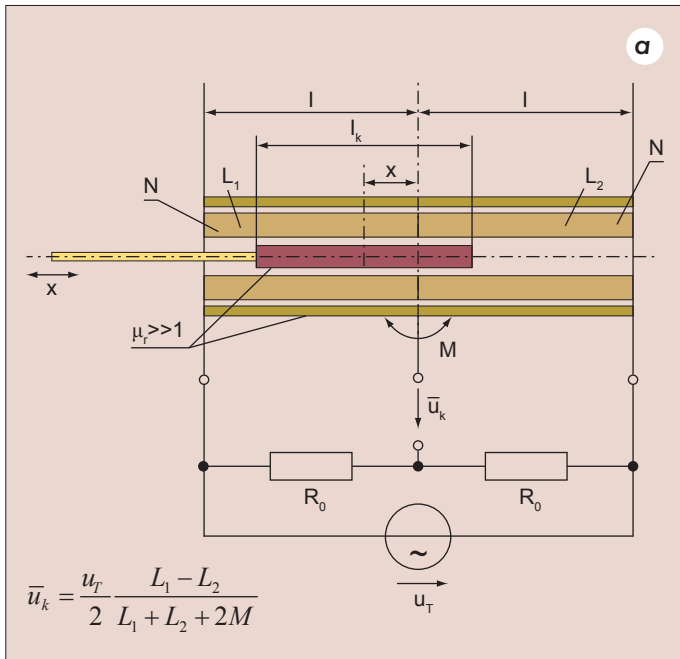
Figyelemreméltó, hogy a tekercsek  $L_1$  és  $L_2$  öninduktívitásai hogyan változnak az  $x$  elmozdulás függvényében. Ez a statikus karakterisztika számítással nehezen meghatározható, erősen nemlineáris, a tekercsek geometriai középpontján átmenő derékszögű koordináta-rendszerben a függőleges tengely szerint páros függvény. Alkalmazása egyedi érzékelőként alig elképzelhető.

A tekercsek között az  $M$  kölcsönös induktivitás akkor maximális, ha a vasmag középpontja a két tekercs csatlakozásával esik egybe, a szimmetria miatt szintén páros függvény.

Ha ezekből az öninduktívitás- és a kölcsönös induktívitás-változásokból a 2. a ábra összefüggései szerint pontról pontra kiszkeresztjük az  $\bar{u}_k$  kimenőfeszültséget, akkor azt tapasztaljuk, hogy szerencsés esetben – pontosabban fogalmazva, sok-sok kísérletező munka eredményeképpen – a két tekercs találkozási pontja körül – kb. a teljes  $2l$  nagyságú szerkezeti hosszúság 40...60%-ában a híd  $\bar{u}_k$  kimenőfeszültsége az  $x$  elmozdulás lineáris függvénye. Ez azzal magyarázható, hogy az  $\bar{u}_k$  kifejezés  $(L_1(x)-L_2(x))$  számlálójában ebben a tartományban lineárisan változik, miközben az  $(L_1(x)+L_2(x)+2M(x))$  nevező közel állandó.

**Az induktív és kapacitív érzékelők összehasonlítása**

Az eddig elmondottak szerint mind a kapacitív, mind az induktív érzékelők igen nagy csoportja a differenciálkialakítás nyújtotta előnyös tulajdonságok kihasználásával kiegyenlített hídkap-



2. ábra Merülő-vasmagos induktív érzékelő elmozdulás mérésére  
 u – u üzemmódú, kiegyenlített hídkapcsolásban  
 a) Az érzékelő elvi-szerkezeti felépítése és mérőköre

csolásban lineáris, vagy közel lineáris mérési karakterisztikát (a definíció szerint: mérendő mennyiség – híd üresjárás kimenő-feszültség) produkál.

A részletesebb vizsgálatokból kitűnik, hogy a kapacitív érzékelők felépítése lényegesen egyszerűbb, velük könnyebb kisebb linearitási hibát elérni. Mielőtt azonban egyértelműen a kapacitív érzékelők oldalára billenne a mérleg nyelve, és ellentétbe kerülne a kialakult gyakorlattal – ami általában az induktív érzékelőket részesíti előnyben –, vizsgáljuk meg a kapacitív és az induktív érzékelők hídkapcsolású mérőköreiből kivethető maximális villamos teljesítményeket, ill. azok arányát.

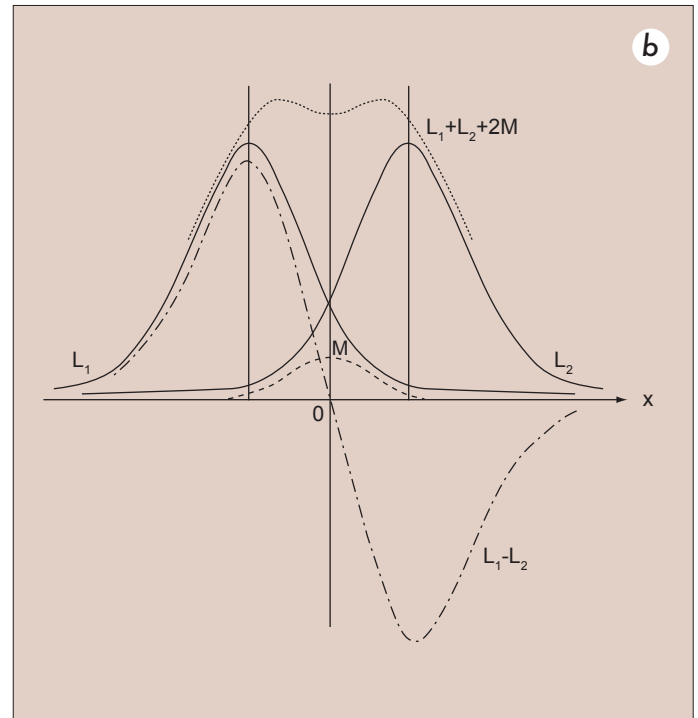
Az összehasonlítás elsődleges célja a kivethető teljesítmények arányainak a meghatározása. Ehhez elegendő és célszerű a legegyszerűbb érzékelő modellekből kiindulni (3. ábra 1. sor). A vizsgálat során kis relatív kitérésekre szorítkozunk, és ezzel jogos a hiperbolikus karakterisztika  $C_0$  ill.  $L_0$  értékek körüli linearizálása.

Az érzékelőket u – u típusú negyedhidakba kötjük, és kis változásokra kiszámíthatjuk az  $u_{kk}$  és  $u_{ki}$  üresjárás feszültségeket (3. ábra 2. sor).

A hídkapcsolások ismeretében meghatározható a Thevenin-helyettesítő képek elemeinek értéke. A Thevenin-feszültség a híd üresjárás kimenőfeszültsége, a belső impedancia pedig a választott hídalkalításokban jó közelítéssel  $C_0$ , ill.  $L_0$  értékű. Az áramkört az  $R_t$  terhelő-ellenállással zárjuk le (3. ábra 3. sor).

A mérőkörökből kivethető maximális teljesítmény az  $R_t = X_k$ , ill. az  $R_t = X_i$  feltétel mellett a 3. ábra 4. sora szerint számítható. Látható, hogy a kivethető maximális teljesítmény a hidakat tápláló  $u_T$  feszültség növelésével fokozható, aminek azonban korlátai vannak. Kapacitív érzékelőknél a maximálisan megengedhető villamos térerősség, induktív átalakítóknál pedig a maximális fluxus szab határt a híd tápfeszültsége növelésének.

Fizikai szempontból kapacitív érzékelőknél a dielektrikum átütési szilárdsága (levegő esetében  $E_{max} = 4 \cdot 10^6$  V/m), mágneses anyagoknál a telítési fluxus ( $B_{Tmax} = 2$  T) szab határt a választható maximális tápfeszültségnek. A technikailag realizálható korlátok azonban ennél kisebbek. Életvédelmi okok miatt a maximális villamos térerősség általában  $E = 1 \dots 3 \cdot 10^5$  V/m értéknél nem



b) Jelváltozások a híd kimeneti feszültségének szerkesztéséhez

lehet nagyobb, légréses mágneskörök esetében pedig nemigen lehet  $B = 0,1 \dots 0,3$  T-nál nagyobb légrésindukciót elérni. Ezen adatok alapján megkísérelhetjük a 3. ábra 4. sorában közölt maximális teljesítményadatokat, ill. azok arányát megbecsülni. A részletszámítások mellőzésével a kivethető maximális teljesítmények arányára a

$$\frac{P_{i\max}}{P_{k\max}} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \frac{B^2 V_i}{E^2 V_k}$$

kifejezés adódik,

ahol  $V_i$  az induktív átalakító légrésének a térfogatát,  $V_k$  pedig a kapacitív érzékelő elektródái közötti térfogatot jelenti.

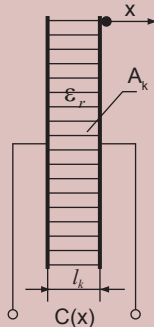
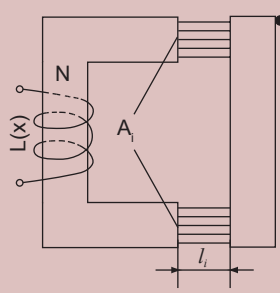
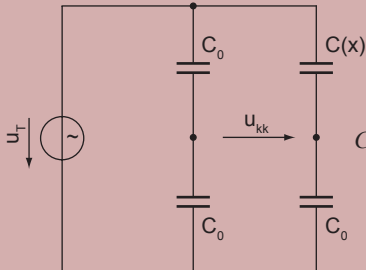
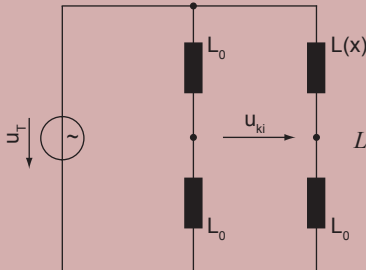
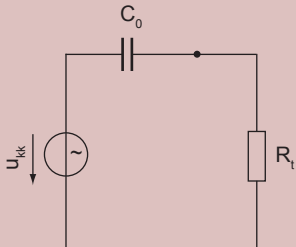
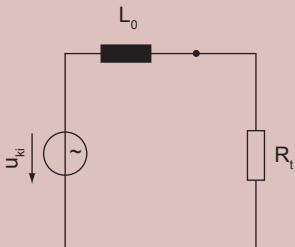
A gyakorlati kialakításokat figyelembe véve a térfogatok arányára a  $V_i/V_k \approx 0,3$  érték becsülhető. Eredményül a realizálható  $E$  és  $B$  értékeknél a  $P_{i\max}/P_{k\max} = 18 \cdot 10^3$ , a fizikai határok figyelembevételével pedig a  $P_{i\max}/P_{k\max} = 0,22 \cdot 10^3$  arányszámokat kapjuk.

A fenti becslés egyértelműen az induktív érzékelőket részesíti előnyben, hiszen a több ezerszeresen nagyobb, kivethető teljesítmény lényegesen kisebb zavarérzékenységet is jelent. Természetesen a korszerű, vékonyréteg, ill. az integrált áramköri technológiával készült kapacitív érzékelőknél a fenti következtetéseknek nincs nagy jelentősége.

A folytatásban a kiegyenlített hídkapcsolások tulajdonságainak elemzése során ismertetésre kerül a véges terhelő impedancia és a vezeték-ellenállások hatása, a mérőhely-átkapcsolás, a nullpontelnyomás, valamint a zavarkompenzáció vizsgálata.

IRODALOM:

[1] E. Schrüfer: Elektrische Meßtechnik, 6. erweiterte Auflage. Carl Hanser Verlag, München Wien, 1995  
 [2] S. Gutnikov - A. Lenk - U. Mende: Sensorelektronik (Primerelektronik von Meßumformer). VEB Verlag Technik, Berlin, 1984

		Kapacitív érzékelő (index: k)	Induktív érzékelő (index: i)
1	Érzékelőmodell	 $C(x) = C_0 \frac{1}{1 + \frac{x}{l_k}} \approx C_0 \left(1 - \frac{x}{l_k}\right)$ <p>ha <math>\frac{x}{l_k} \ll 1</math></p> $C_0 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A_k}{l_k}$	 $L(x) = L_0 \frac{1}{1 + \frac{x}{l_i}} \approx L_0 \left(1 - \frac{x}{l_i}\right)$ <p>ha <math>\frac{x}{l_i} \ll 1</math></p> $L_0 = \frac{N^2 \mu_0 A_i}{2l_i}$
2	u – u típusú kiegyenlített negyedhíd	 $C(x) = C_0 \left(1 - \frac{x}{l_k}\right)$ $u_{kk} \approx \frac{1}{4} u_T \frac{x}{l_k}$	 $L(x) = L_0 \left(1 - \frac{x}{l_i}\right)$ $u_{ki} \approx \frac{1}{4} u_T \frac{x}{l_i}$
3	Thevenin-helyettesítő kép	 $u_{kk} \approx \frac{1}{4} u_T \frac{x}{l_k}$	 $u_{ki} \approx \frac{1}{4} u_T \frac{x}{l_i}$
4	Teljesítményillesztés	$P_{k \max} = \frac{u_{kk}^2}{2X_k} \quad \text{ahol } X_k = \frac{1}{\omega C_0}$ $P_{k \max} = \frac{1}{32} \omega \left(\frac{x}{l_k}\right)^2 u_T^2 C_0$ $u_T = El_k$	$P_{i \max} = \frac{u_{ki}^2}{2X_i} \quad \text{ahol } X_i = \omega L_0$ $P_{i \max} = \frac{1}{32\omega} \left(\frac{x}{l_i}\right)^2 \frac{u_T^2}{L_0}$ $u_T = \omega N \Phi$

3. ábra Kapacitív és induktív érzékelők összehasonlítása

[3] Folyamatszabályozási Tanszék Munkaközössége, szerkesztő: Bárony A. – Megyeri J.: Ipari folyamatok mérés-technikája és műszerei 1/1 (Jelátalakítók), egyetemi jegyzet. Tankönyvkiadó, Budapest, 1968

(Folytatjuk)