

A folyamatműszerezés érzékelői

Dinamikus modellezés AHK-módszerrel – 6.

Dr. Fock Károly

Az aktív átalakítók analóg helyettesítő képének tárgyalása során a cikksorozat soron következő részében az elektromágneses és a mechanikai-áramlási (akusztikai) átalakítókkal foglalkozunk. Mint a tárgyalásból is látható, az AHK-módszer alkalmas arra, hogy finomításával a valóságos működésmódhoz igen jól közelítő modellt hozzunk létre.

Elektromágneses átalakító

A műszaki gyakorlatban kivitelezett érzékelők több típusa is az 1. ábrán látható modellre vezethető vissza. A mágneskör egy részét itt egy mozgó járom képezi. A mágneskörben egy permanens mágnes található, a járom légrések közbeiktatásával zárja a mágneses kört. A tárgyalás során a mágneskör vasrészeinek és az állandó mágnesnek a mágneses ellenállását a légrés mágneses ellenállása mellett elhanyagoljuk. A mágneskört egy N menetszámú tekercs veszi körül, amelynek i árama az állandó mágnesen kívül egy további Ni mágneses feszültséggel egészíti ki az állandó mágnes \mathcal{O}_0 mágneses feszültségét. Az elektromechanikai kölcsönhatás a légrés elválasztó felületein keletkező vonzóerőn keresztül valósul meg.

A bemeneti villamos kapcsolók és az erő, ill. a mozgás között – amely a mozgó járommal a kapcsolódó mechanikai impedanciákra adódik át – a mágneses átalakítókra kidolgozott négypólus rajzolható fel. Most a tekercs ohmos ellenállásán kívül a zárójárom tömegét és a súrlódást zárhatjuk ki a közvetlen elektromechanikai kölcsönhatásból.

A maradék négypólus ismét veszteségmentes és meghatározott feltételek esetén lineáris is. Ismételen előttünk áll a feladat, hogy az L_b , X és n_m paramétereket a modell fizikai és geometriai paramétereiből meghatározzuk. A tárgyalás az előzőekben látottakhoz igen hasonló, ezért azt viszonylag röviden foglalhatjuk össze.

Az L_b induktivitás a mágneses kör (közelítőleg a légrés) R_m mágneses ellenállásától függ. A járom nyugalmi $\ell=\ell_0$ helyzetében

$$L_b = \frac{N^2}{R_m} ,$$

ahol

$$R_m \approx \frac{2\ell_0}{\mu_0 A}$$

(a mágneses anyagok mágneses ellenállásának elhanyagolása miatt).

Az X csatolási tényező meghatározásához az $1/X=F/i$ definíciós egyenletből indulunk ki, amikor is rögzített állapotban az erő az áramtól, ill. a légrés mágneses térjellemező vektoraitól függ. Ez ismét az $F=f_2(\theta, x)$ függvény meghatározását jelenti, amit a W energia ismeretében tehetünk meg.

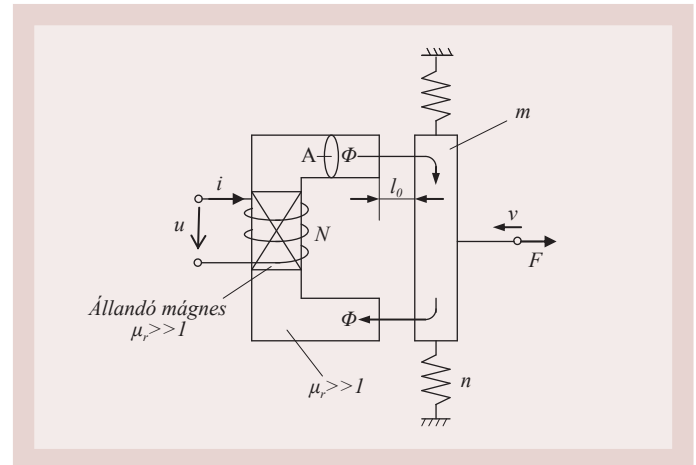
$$W = \frac{N^2}{2L} \Phi^2 + \frac{1}{2n} x^2 ,$$

ahol

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N^2 \mu_0 A}{2(\ell_0 - x)}$$

és

$$F = f_2(\Phi, x) = -\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\Phi^2}{\mu_0 A} - \frac{1}{n} x .$$



1. ábra Elektromágneses átalakító modellje

Az utolsó egyenletből $x=0$ esetén az F erőre az

$$F = \frac{\Phi^2}{\mu_0 A}$$

kifejezés adódik.

Az 1. ábrán látható Φ fluxus két forrásból ered. A permanens mágnes létrehozza a Φ_0 fluxust, a tekercs i árama pedig a Φ_{el} fluxust, ami a

$$\Phi_{el} = \frac{iN}{R_m} = \frac{iL_b}{N}$$

képlettel számítható. A két fluxus összegét az F erő képletébe helyettesítve:

$$F = \frac{1}{\mu_0 A} (\Phi_0^2 + 2\Phi_0\Phi_{el} + \Phi_{el}^2) ,$$

ami egyszerűsödik, ha feltételezzük, hogy $\Phi_0 \gg \Phi_{el}$. Ekkor a zárójelben lévő összeg harmadik tagja elhanyagolható. Így

$$F = \underbrace{\frac{\Phi_0^2}{\mu_0 A}}_{F_0} + 2 \underbrace{\frac{\Phi_0 L_b}{\mu_0 AN}}_{F_b} i .$$

Az F_0 erőt a rúg veszi fel (ekkor lesz a légrés ℓ_0 nagyságú). Az X csatolási tényező az F_b kifejezéséből számítható, ugyanis

$$\frac{1}{X} = \frac{F_b}{i} = \frac{B_0 AN}{\ell_0} .$$

A továbbiakban még annak a bizonyítása van hátra, hogy az $1/X=u/v$ összefüggéssel definiált csatolási tényezőre az előzővel azonos eredményt kapunk. Ehhez változtassuk $i=0$ mellett az 1. ábrán látható ℓ távolságot, akkor a mágneses ellenállás változása miatt fluxusváltozás jön létre.

Itt jegyezzük meg, hogy az átalakítónak ez a működése az érzékelők jelentős családjának a modellje. Ezeket az átalakítókat reluktáns érzékelőknek hívjuk. A légrés időbeli változása (sebessége) ilyenkor a tekercsben feszültséget indukál.

A fluxusváltozás és a mágneses ellenállás-változás közötti lineáris kapcsolatra felírható:

$$\frac{\Phi(\ell)}{\Phi_0(\ell_0)} = \frac{R_m(\ell_0)}{R_m(\ell)},$$

ahonnan

$$\Phi(\ell) = B_0 A \frac{\ell_0}{\ell}.$$

Az indukált feszültség a fluxus időbeli változásából számítható:

$$u_\ell = N \frac{d\Phi}{dt} = N \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \ell} \right)_{\ell=\ell_0} \cdot \frac{d\ell}{dt} = \frac{B_0 AN}{\ell_0} v,$$

és ebből

$$\frac{u_\ell}{v} = \frac{1}{X} = \frac{B_0 AN}{\ell_0},$$

ami megegyezik az előző levezetés eredményével.

Az n_l rugóengedékenység kiszámításához abból kell kiindulnunk, hogy az F_m mágneses vonzóerő az ℓ távolság függvénye:

$$F_m = \frac{\Phi^2}{\mu_0 A} = \frac{\Phi_0^2}{\mu_0 A} \frac{R_m^2(\ell_0)}{R_m^2(\ell)} = \frac{\Phi_0^2 \ell_0^2}{\mu_0 A \ell^2} = \frac{B_0^2 A \ell_0^2}{\mu_0 \ell^2}.$$

A zárójárom $x = \ell - \ell_0 \ll \ell_0$ kitérésére az F_m növekedése

$$\Delta F_m = F_m(\ell - x) - F_m(\ell_0) = \frac{B_0^2 A \ell_0^2}{\mu_0} \left(\frac{1}{(\ell_0 - x)^2} - \frac{1}{\ell_0^2} \right)$$

$$\Delta F_m = 2 \frac{B_0^2 A}{\mu_0} \frac{1}{\ell_0} x.$$

Az x kitéréshez szükséges összes F erő az x/n mechanikai rugó által kifejtett erőnek és a ΔF_m mágneses erőnek a különbségéből számítható:

$$F = \frac{1}{n} x - 2 \frac{B_0^2 A}{\mu_0 \ell_0} x,$$

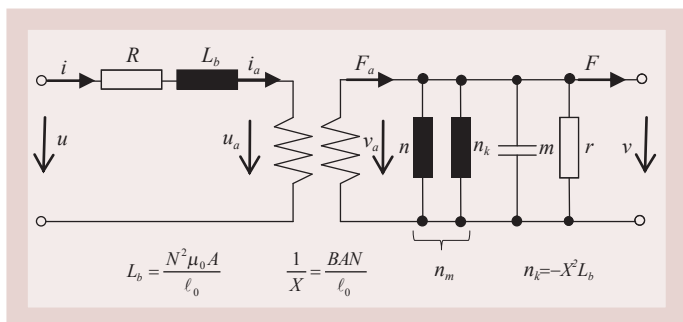
amiből az

$$\frac{F}{x} = \frac{1}{n} - \frac{1}{X^2 L_b}$$

eredmény adódik.

A kapott eredményekkel alakilag az elektrodinamikus átalakító analóg helyettesítő képével azonos felépítést kapunk, amit most azért ismételünk meg újra (2. ábra), hogy rajta az elemek ki-

2. ábra Elektromágneses átalakító analóg helyettesítő képe a szórás és a vasveszteségek figyelembevétele nélkül



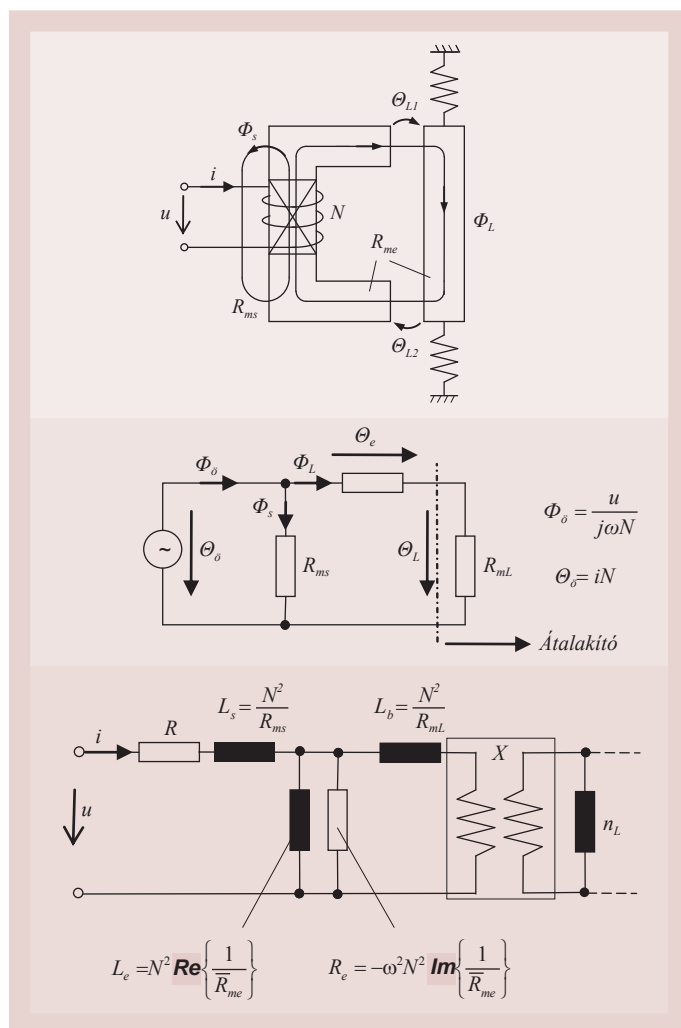
fejezéseit feltüntethessük. Az analóg helyettesítő kép az 1. ábrán látható mechanikai vázlat idealizált modellje abban az értelemben, hogy feltételeztük a veszteség nélküli vasanyagot és eltekintettünk a mágneses tér szórásától. Ennél az átalakítónál azonban ez elég durva közelítés, ezért a továbbiakban – alkalmazási példaként – az vizsgáljuk meg, hogy ezeket a hatásokat hogyan lehet az analóg helyettesítő képben figyelembe venni [1].

Vasveszteség és szórás az elektromágneses átalakító modelljében

Elsőként tekintünk az elektromágneses átalakító valódi viszonyokat tükröző működési vázlatát (3. ábra felső kép). A Φ_σ teljes fluxus a légrésen (és a vasjármokon) áthaladó Φ_L , és lényegében a levegőben záródó Φ_s szórási fluxusra válik szét. Mindkét fluxust a $\theta = Ni$ gerjesztés hozza létre. A Φ_L részfluxus két mágneses ellenálláson halad keresztül, mégpedig a permanens mágnesből és a lágymágneses anyagból készült jármokon, valamint a légrésen. Ezáltal két mágneses feszültség (gerjesztés) keletkezik, a θ_e és a θ_L (látható, hogy $\theta_L = \theta_{L1} + \theta_{L2}$). Az ismert mágneses és villamos mennyiségek közötti analógia (1. táblázat) alapján felrajzolható az elektromágneses átalakító mágneses körének villamos helyettesítő kapcsolása (3. ábra középső része). Az R_{me} mágneses impedancia most komplex mennyiség, amelynek valós és képzetes része van.

Az $\text{Re} \left\{ \frac{1}{R_{me}} \right\}$ mennyiségből a vasmag inductivitása, az $\text{Im} \left\{ \frac{1}{R_{me}} \right\}$ mennyiségből pedig a vasveszteséget reprezentáló veszteségi el-

3. ábra Elektromágneses átalakító helyettesítő képe a szórással és a vasveszteséggel

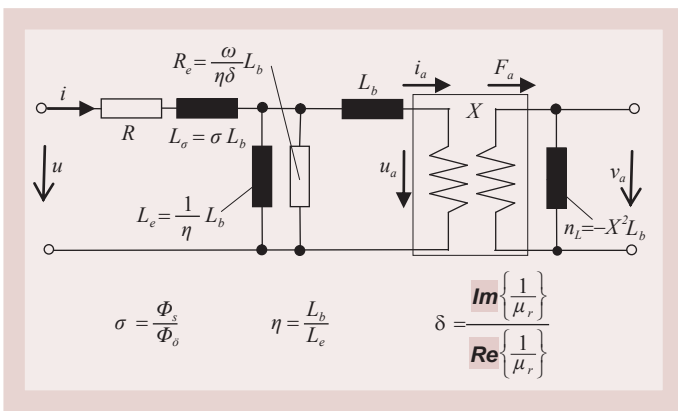


Villamos mennyiségek		Mágneses mennyiségek	
Elnevezés	Jelölés	Elnevezés	Jelölés
Feszültség	u	Gerjesztés (mágneses feszültség)	$\Theta = Ni$
Áram	i	Fluxus	Φ
Ellenállás	R	Mágneses ellenállás	R_m
Villamos Ohm-törvény	$U = Ri$	Mágneses Ohm-törvény	$\Theta = R_m \Phi$

1. táblázat Villamos–mágneses analógia

lenállás számítható. A 3. ábra alsó felében látható analóg helyettesítő kép L_e és R_e elemeit ezekből határoztuk meg.

A mágneskörök tárgyalásának gyakorlatában a σ szórási tényező mellett egyéb arányszámok használata is szokásos. Pl. η jelöli a légrés L_b és a vasmag L_e induktivitásának a hányadosát, δ pedig a vasmag μ_r relatív permeabilitás reciprok értékének a veszteségi tényezőjét. Ezekkel az adatokkal kapjuk a 4. ábrán látható helyettesítő képet.



4. ábra Elektromágneses átalakító valóságos viszonyok között érvényes analóg helyettesítő képe

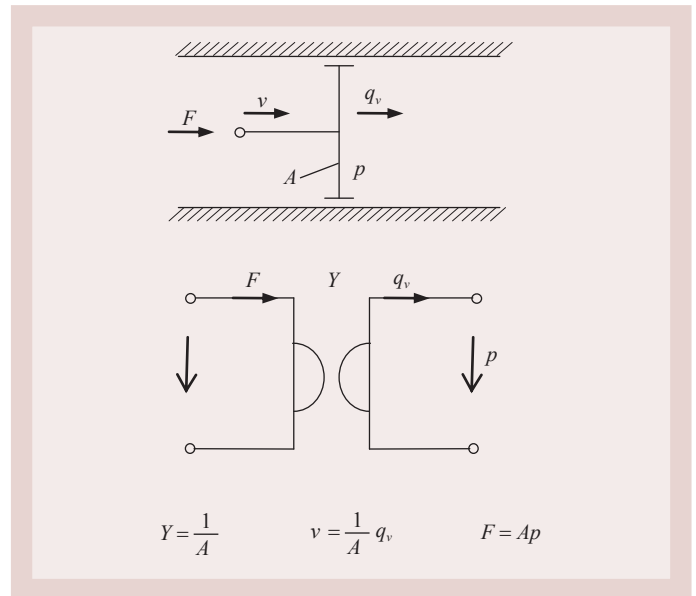
Mechanikai-áramlási (akusztikai) átalakítók

A mechanikai rendszereket az áramlási rendszerekkel összekötő elemek általában a sokféle változatban kialakított membránok, amelyek ugyanúgy használhatók az akusztikában (hangszórók, mikrofonok), mint a mérés technikában – elsősorban a nyomásmérés területén –, de gyakran előfordulnak analitikai műszerekben membránszivattyúként is.

A mechanikai-áramlási átalakító legegyszerűbb – elsősorban csak elméleti vizsgálatokra alkalmas – típusa a merev, tömeg nélküli, A felületű dugattyú, ami egy csőben súrlódás nélkül, a cső tengelyének irányában mozog (5. ábra). A mechanikai oldalon ható v sebesség az áramlási oldalon $q_v = vA$ térfogatsebességet hoz létre, míg ellenkező irányban a p nyomásból $F = pA$ nagyságú erő keletkezik. Az összefüggésekből látható, hogy az analóg helyettesítő kép egy ideális girátor. A csatlósi tényező a dugattyú A felülete.

A valódi mechanikai-áramlási átalakítókat reprezentáló membránok tömeggel rendelkeznek és deformálódnak, a rugó- és tömeghatások térben elosztottak. A koncentrált paraméterű tárgyalhatóság érdekében azokat a statikus és kvázistacioner esetekre kidolgozott – az elasztomechanikai összefüggésekből levezetett – deformációs és rugalmassági összefüggéseket használjuk, amelyek a mechanikai szakirodalomban táblázatos formában a különböző membrán- és lemeztípusokra rendelkezésre állnak [2].

Az elasztomechanikai differenciálegyenletekből következik, hogy az átalakító belső energiája állapotfüggvény, továbbá az differenciálegyenletek lineárisak is, aminek értelmében a négy koordináta között lineáris kapcsolat van.



5. ábra Merev, tömeg nélküli dugattyú, mint mechanikai-áramlási átalakító

A fentiek alapján az

$$F = f_1(x, p)$$

és a

$$V = f_2(x, p)$$

egyenletekből álló egyenletrendszer ($V = \int q_v dt$ integrális változó a térfogat) lineáris és

$$F = \alpha_{11}x + \alpha_{12}p$$

$$V = \alpha_{21}x + \alpha_{22}p$$

alakban adható meg. Az energiából levezethető vegyes másodrendű differenciálhányadosok egyenlőségéből következik:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial p}\right)_{x=0} = \left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)_{p=0} = \alpha_{12} = \alpha_{21} = T_0$$

A fennmaradó együtthatók fizikai jelentése:

$$\frac{1}{\alpha_{11}} = \left(\frac{x}{F}\right)_{p=0} = n_k$$

a mechanikai rugóengedékenység áramlási rövidzár esetén ($p=0$);

$$-\alpha_{22} = \left(\frac{-V}{p}\right)_{x=0} = C_A$$

az áramlási kapacitás (akusztikus vagy áramlási engedékenység) mechanikai rövidzár esetén ($x=0$).

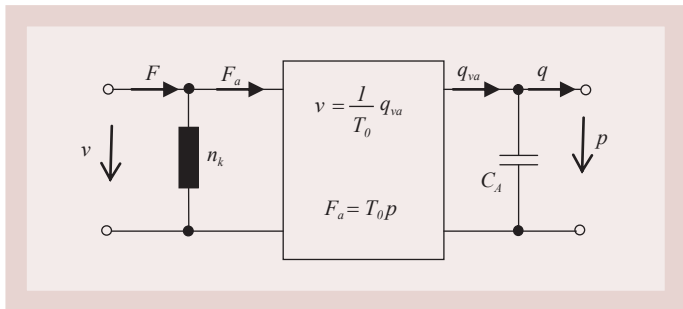
Komplex amplitúdók bevezetésével (szinuszos jelváltozásokra) az

$$F = \frac{1}{j\omega n_k} v + T_0 p$$

$$q_v = T_0 v - j\omega C_A p$$

egyenletrendszert kapjuk, amely alapján a mechanikai áramlási (akusztikai) átalakító analóg helyettesítő képe összeállítható (6. ábra).

A T_0 állandó fizikai jelentését az 5. ábra merev, tömegtelen dugattyúja esetén az egyenletrendszerből könnyen meghatározhatjuk: $T_0 = A$, vagyis a dugattyú A felülete.



6. ábra Mechanikai-áramlási (akusztikai) átalakító helyettesítő képe

Deformálódó membrán esetén a membrán egyes pontjainak a sebessége helyfüggő, ezért célszerű egy átlagsebességgel számolni:

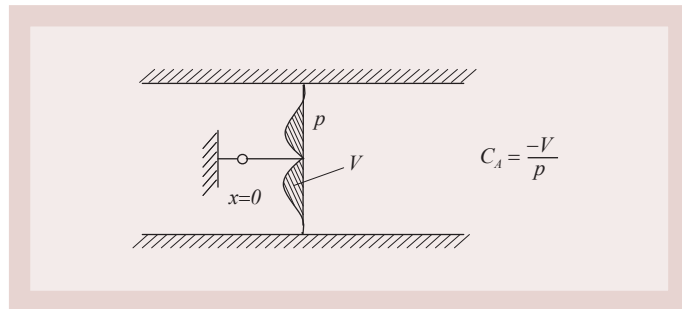
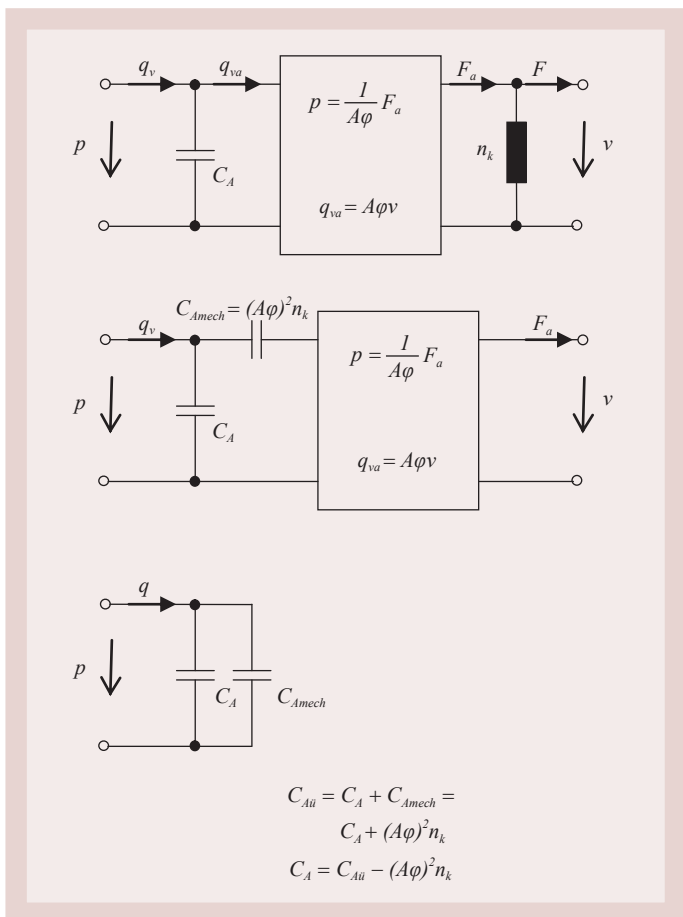
$$T_0 = \left(\frac{q_v}{v_0} \right)_{p=0} = \frac{1}{v_0} \int v dA = A \frac{1}{A} \int \frac{v}{v_0} dA = \varphi A \quad .$$

Az egyenletekben v_0 az erő támadáspontjából mért sebesség, és v a lemez vagy membrán változó, helyfüggő sebessége. A φ együttható jelöli v_0 és a lemez vagy membrán átlagsebessége közötti arányt:

$$\varphi = \frac{\bar{v}}{v_0} = \frac{1}{v_0} \int v dA \quad .$$

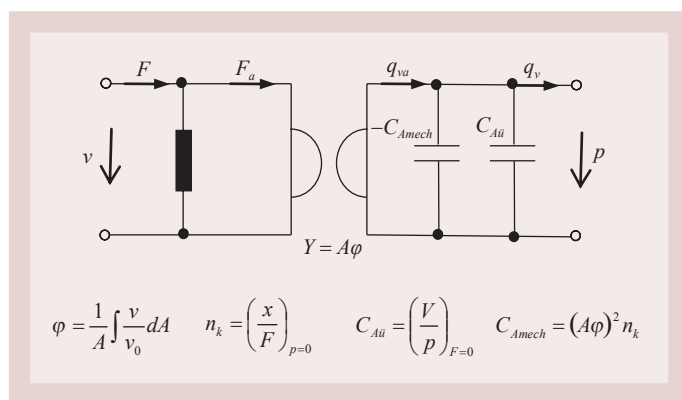
A C_A áramlási kapacitást az erő támadáspontjánál rögzített ponttal, az érzékelőelem deformációjából kell meghatározni. A viszonyok a 7. ábra alapján képzelhetők el. A vázolt membrándeformáció azonban a membránok vagy lemezek esetében általában nem ismert. Ezzel szemben az $F=0$ -hoz tar-

8. ábra C_A áramlási kapacitás számítása $C_{Aü}$ és n_k értékekből



7. ábra C_A áramlási kapacitás értelmezése

tozó üresjárású áramlási kapacitás számításához a deformációs függvények adóttak, amelyekből azonban csak a mechanikai üresjárásához tartozó $C_{Aü}$ áramlási kapacitás számítható ki. Az áramlástanilag hatásos C_A kapacitás viszont az üresjárású $C_{Aü}$ kapacitásból a helyettesítő kép alapján a girátor típusú kapcsolat felhasználásával meghatározható (8. ábra).



9. ábra Valódi mechanikai-áramlási (akusztikai) átalakító analóg helyettesítő képe

Összefoglalva tehát egy mechanikai-áramlási (akusztikai) átalakító analóg helyettesítő képe a 9. ábrán látható. Az ábrán feltüntetjük az egyes paraméterek definíciós összefüggéseit is.

A mechanikai-áramlási átalakító analóg helyettesítő képe a fenti tárgyalásmódban egy girátor típusú modell. Ez a köznapi műszaki gondolkodástól kissé idegen, a transzformátoros működésmód inkább közismert. Ismételten felhívjuk a figyelmet arra, hogy a változók szerepének megválasztása dönti el, hogy az energiatároló milyen típusú. Bármelyik oldal duáljának választása az átalakító típusát is megváltoztatja [3].

A folytatásban a nyomásmérési gyakorlatban elterjedt befogott peremű síkmembrán dinamikus modelljét ismerjük meg, majd egy viszonylag bonyolult felépítésű elektromechanikai szintmérő rendszer analizálásával demonstráljuk az AHK-módszer előnyeit és használhatóságát.

IRODALOM

[1.] A. Lenk: Elektromechanische Systeme Band 1: Systeme mit konzentrierten Parametern, VEB Verlag Technik, Berlin, 1973
 [2.] Bosznay Á.: Mechanikai lengés tan, Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, Budapest, 1956
 [3.] Bársony A.: Az analóg helyettesítő képek módszere. Segédanyag az Ipari folyamatok mérés technikája c. tárgyhoz, Budapesti Műszaki Egyetem, Folyamat szabályozási Tanszék, 1976

(Folytatjuk!)