

A folyamatműszerezés érzékelői

Dinamikus modellezés AHK-módszerrel - 1.

Dr. Fock Károly

Érzékelők mérés-technikai és szabályozástechnikai alkalmazásában egyre nagyobb szerepe van a dinamikus viselkedésnek. Az analóg helyettesítő képek (AHK) módszere segítségével a dinamikus viselkedés leírására a villamosmérnöki szemléleten alapuló egységes modellezés alakítható ki. A cikksorozat az AHK-módszer összefoglalásával konkrét példákon keresztül ismerteti meg az olvasót ennek előnyeivel.

Az AHK-módszer

Az analóg helyettesítő képek módszere azon a felismerésen alapul, hogy a különféle fizikai rendszerek dinamikus viselkedését leíró differenciálegyenletek között – ha a dinamikus karakterisztikát lineáris, állandó együtthatós differenciálegyenlettel közelítjük – analógia mutatható ki.

Célunk az, hogy a térben koncentrált elemekből felépített mechanikai, áramlási és termikus rendszerek dinamikus összefüggéseit, a villamos hálózatokhoz hasonlóan, kapcsolástechnikai formában ábrázoljuk. Ehhez mintaként az elektrotechnika hálózatelmélete szolgál. A megfelelő koordináták definiálása után csomóponti és hurokegyenletek írhatók fel, amelyek segítségével a rendszerek kvantitatív viselkedése a villamos hálózatokkal azonos módon már jól ismert.

Természetesen bármelyik fizikai rendszer tárgyalható a saját fizikai összefüggései segítségével is, az egységes – villamosmérnöki szemléleten alapuló – tárgyalásmód elsősorban ott válik igen előnyössé, ahol az érzékelők különféle rendszereket összekapcsoló szerepét kell figyelembe venni.

Analógia a villamos, mechanikai, áramlási és termikus rendszerek között

A fizikai rendszerek leírására első lépésben változó párokat kell kiválasztani, és az analógia létrehozásához el kell dönteni, hogy a változók közül melyeket tekintjük a villamos rendszerekben használt u feszültséggel, illetve i árammal analóg viselkedésűnek.

A rendszer-analógiáknak elég nagy irodalma van, és a kialakult módszerek korántsem egységesek. Különböző okok miatt szerencsés, ha a változó párok szorzata teljesítmény (komplementer változó páros), de ez nem mindig egyezik a történelmileg kialakult szokásokkal. Pl. az áramlási rendszerek komplementer változó pára a p nyomás és a q_v térfogatsebesség, de a hidraulika szívesebben használja az m emelőmagasság és a q_v térfogatsebesség változó párt szemben a pneumatikával, ahol viszont a p nyomás mellett a q_s súlyáram szokásos. A termikus rendszerek leírásának szokásos változó pára a ϑ hőmérséklet és a q hőáram (ami nem komplementer változó páros, hiszen q maga már teljesítmény), a változó páros komplementer tulajdonságához a ϑ hőmérséklet mellett az s entrópia áramot kellene használni. A változó páros kiválasztása az általunk definiált alkotóelemek dimenziójára van elsősorban meghatározó jelentőséggel.

Rendszer	Jelölés	Változó páros		
		Feszültség típusú	Áram típusú	
Villamos	V	Feszültség u [V]	Áram i [A]	
Mechanikai	Transzlációs	MT	Sebesség v $\left[\frac{m}{s}\right]$	Erő F [N]
	Rotációs	MR	Szögsebesség Ω $\left[\frac{rad}{s}\right]$	Nyomaték M [Nm]
Áramlási	A	Nyomás p $\left[\frac{N}{m^2}\right]$	Térfogatsebesség q_v $\left[\frac{m^3}{s}\right]$	
Termikus	T	Hőmérséklet ϑ [°C]	Hőáram q $\left[\frac{J}{s}\right]$	

1. táblázat Változó páros analógiája

Az analógia létrehozásának következő fontos mozzanata annak az eldöntése, hogy a különböző rendszerek változó páraiban közül melyek legyenek a villamos feszültséggel és melyek a villamos árammal analógok. Az irodalomban többféle módszer terjedt el, amelyek elsősorban a mechanikai rendszerek leírásában térnek el egymástól.

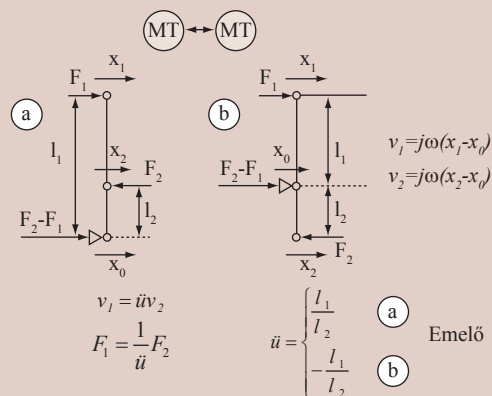
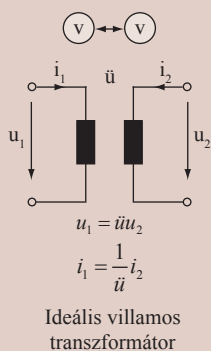
A fenti megfontolások alapján az 1. táblázat a cikksorozatban használt változó párokat és azoknak a villamos változó párral analóg definícióját tartalmazza. (A felsorolásban csak a termikus rendszerek változó pára nem komplementer).

Rendszerelemek

A rendszer elemek definíciójánál feltételezzük, hogy azok invariáns, lineáris, koncentrált paraméterű modellezése indokolt. Annak érdekében, hogy a rendszer elemeket impedancia elemekként az 1. táblázatban feltüntetett változókkal definiálni lehessen; és a definíciós egyenletek alaki hasonlóságára is rá tudjunk mutatni, a változókat szinuszos időfüggvényűnek választjuk és a változó párokat komplex amplitúdókkal jelöljük. (A komplex

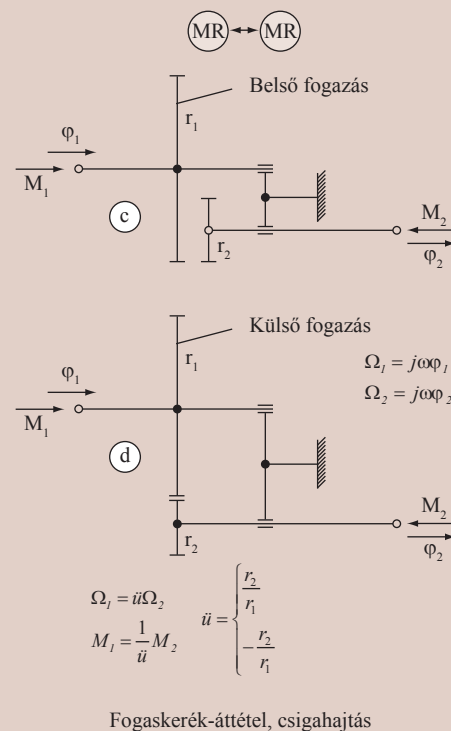
írásmódnál szokásos felülvonást elhagyjuk, és a nagybetűk alkalmazását a jelölésekben nem alkalmazzuk következetesen.)

A 2. táblázat az egyes rendszerek elemeit és definíciós egyenleteit foglalja össze. A rendszereken belül az elemeket ideális transzformátorok egészítik ki, ezeket az 1. ábra tartalmazza. A translációs és a rotációs mechanikai rendszerek között kapcsolatot is ideális transzformátorral vehetjük figyelembe, amelynek néhány típusát a 2. ábra foglalja össze.



2. táblázat Rendszerelemek analógiája

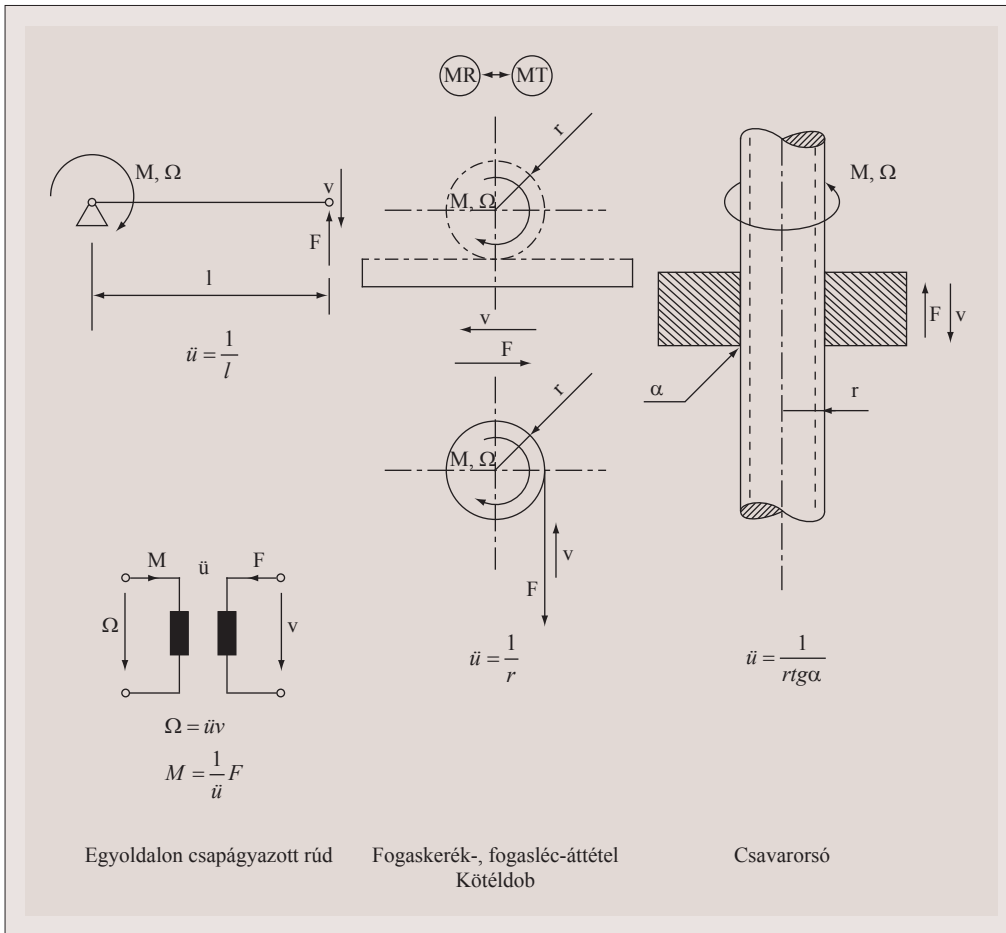
V	<p>Induktivitás</p> <p>$u = j\omega Li$</p>	<p>Kapacitás</p> <p>$u = \frac{1}{j\omega C} i$</p>	<p>Ellenállás</p> <p>$u = \frac{1}{G} i$</p>
MT	<p>Rugóengedékenység</p> <p>$v = j\omega n_i F$</p>	<p>Tömeg</p> <p>$v = \frac{1}{j\omega m} F$</p>	<p>Surlódás</p> <p>$r_i = \frac{1}{h_i}$ $v = \frac{1}{r_i} F$</p>
MR	<p>Rugóengedékenység</p> <p>$\Omega = j\omega n_r M$</p>	<p>Tehetlenségi nyomaték</p> <p>$\Omega = \frac{1}{j\omega \Theta} M$</p>	<p>Surlódás</p> <p>$r_r = \frac{1}{h_r}$ $\Omega = \frac{1}{r_r} M$</p>
A	<p>Áramlási induktivitás</p> <p>$p = j\omega L_A q_v$</p>	<p>Áramlási kapacitás</p> <p>$p = \frac{1}{j\omega C_A} q_v$</p>	<p>Áramlási ellenállás</p> <p>$p = r_A q_v$</p>
T		<p>Termikus kapacitás</p> <p>$\Theta = \frac{1}{j\omega C_T} q$</p>	<p>Termikus ellenállás</p> <p>$\Theta = r_T q$</p>



1. ábra Mechanikai és villamos transzformátorok analógiája

A kiindulási feltételként szabott linearitás és invariancia az analóg helyettesítő képek módszeréből következik, a koncentrált paraméterű közelítés a számításokat egyszerűsíti, és az eredményeket teszi áttekinthetőbbé. Az egyes rendszerek közötti összehasonlítás alapján megállapítható, hogy a villamos hálózatokban sokkal több lineáris és invariáns elemet találunk, és a koncentrált paraméterű leírás is sokkal magasabb frekvenciatartományig jogos, mint a többi rendszerben.

A mechanikai rendszerekben a koncentrált paraméterű viselkedést leíró frekvenciatartományban indokolt a tömeg és a tehetlenségi nyomaték lineáris közelítése. Mind méréssel, mind számítással értékük nagy pontossággal meghatározható. A rugóerevség már kevésbé tekinthető ideálisnak. Elsősorban a linearitás jelenthet gondot. Rugalmas anyagból készült szerkezeti elemek a rugalmassági határ alatt, kis kitérésnél általában lineáris rugók. Elektromágneses rendszerekből felépített szerkezeti elemek (pl. mágneses tengelykapcsoló) mechanikai rugalmas tulajdonságainak linearitását azonban mindenképpen ellenőrizni kell.



2. ábra Ideális transzformátoros kapcsolatok translációs és rotációs mechanikai rendszerek között

A különféle súrlódásokból származó, hővé vált veszteségeknek egy olyan disszipatív elemből történő leszármaztatása, amely a sebesség (szögsebesség) és az erő (nyomaték) közötti lineáris veszteségi mechanikai ellenállással (vagy vezetéssel) valósul meg, igencsak durva és pontatlan közelítés. Az ideálisnak tekinthető lineáris, ún. viszkózus súrlódási ellenállás csak lamináris áramlási kép esetén jó közelítés. Az ún. száraz vagy Coulomb-súrlódás a sebesség irányával ellentétes irányú, de sebességfüggetlen súrlódó erőt vagy nyomatékot jelent, a közegáramlással szembeni fékező erő (vagy nyomaték) pedig a sebesség négyzetével arányos.

Az analóg helyettesítő képek módszerének alkalmazásakor az elmondottak ellenére lineáris vagy linearizált mechanikai elemekkel dolgozunk, emiatt az eredmények bizonyos mértékig csak közelítők lehetnek. A mechanikai lengéstanban kidolgozott módszereket [pl. 3], amellyel pl. a szabad, Coulomb-súrlódással csillapított lengőmozgás vagy a szabad, a sebesség négyzetétől függő csillapítással csillapított lengőmozgás időfüggvényét le lehet írni egyszerű, egyszabadságfokú modellen. A módszer alkalmazása azonban bonyolultabb esetben meglehetősen nehézkes.

Mechanikai rendszerek fogaskerék- és tengelykapcsolataiban a holtjáték konstrukciós, ill. gyártástechnológiai okok miatt gyakran jelen van, ami az esetek többségében nem kívánt rezgést, a szabályozási rendszerekben pedig labilitást okozhat, ezenkívül a mechanikai elemek gyorsabb elhasználódásához is vezet. Az elemzés szempontjából a holtjáték nemlinearitást jelent.

A dinamikai vizsgálatokban a holtjáték hatása a kimeneti szerkezeti elem mechanikai terhelésétől is függ, az elmozdulás (szögelfordulás), a sebesség (szögsebesség) és a gyorsulás

(szöggyorsulás) időfüggvényei ismert bemeneti jelre lényegesen eltérőek attól függően, hogy a kimeneti szerkezeti elemhez kapcsolódó terhelés főként súrlódás-ként vagy inkább tehetetlenség-ként jelentkezik [2].

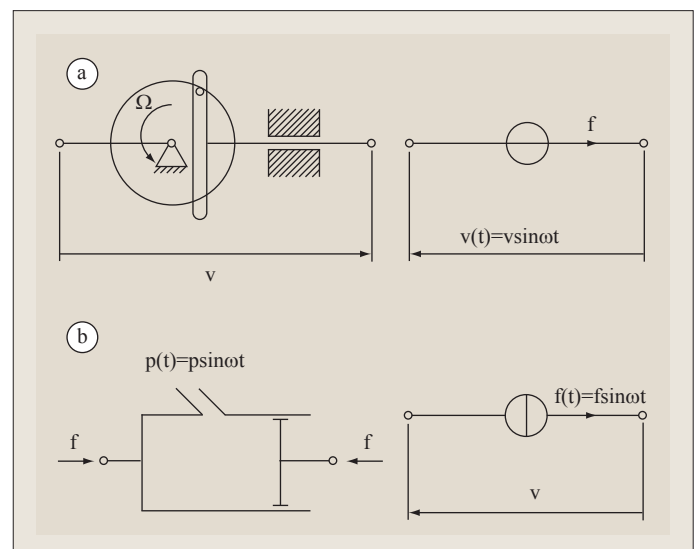
Áramlási rendszerekben gázok esetében az összenyomhatóság jelent komoly gondot, továbbá a súrlódások meghatározásánál figyelembe kell venni az áramlási kép hatását (Re-szám függés).

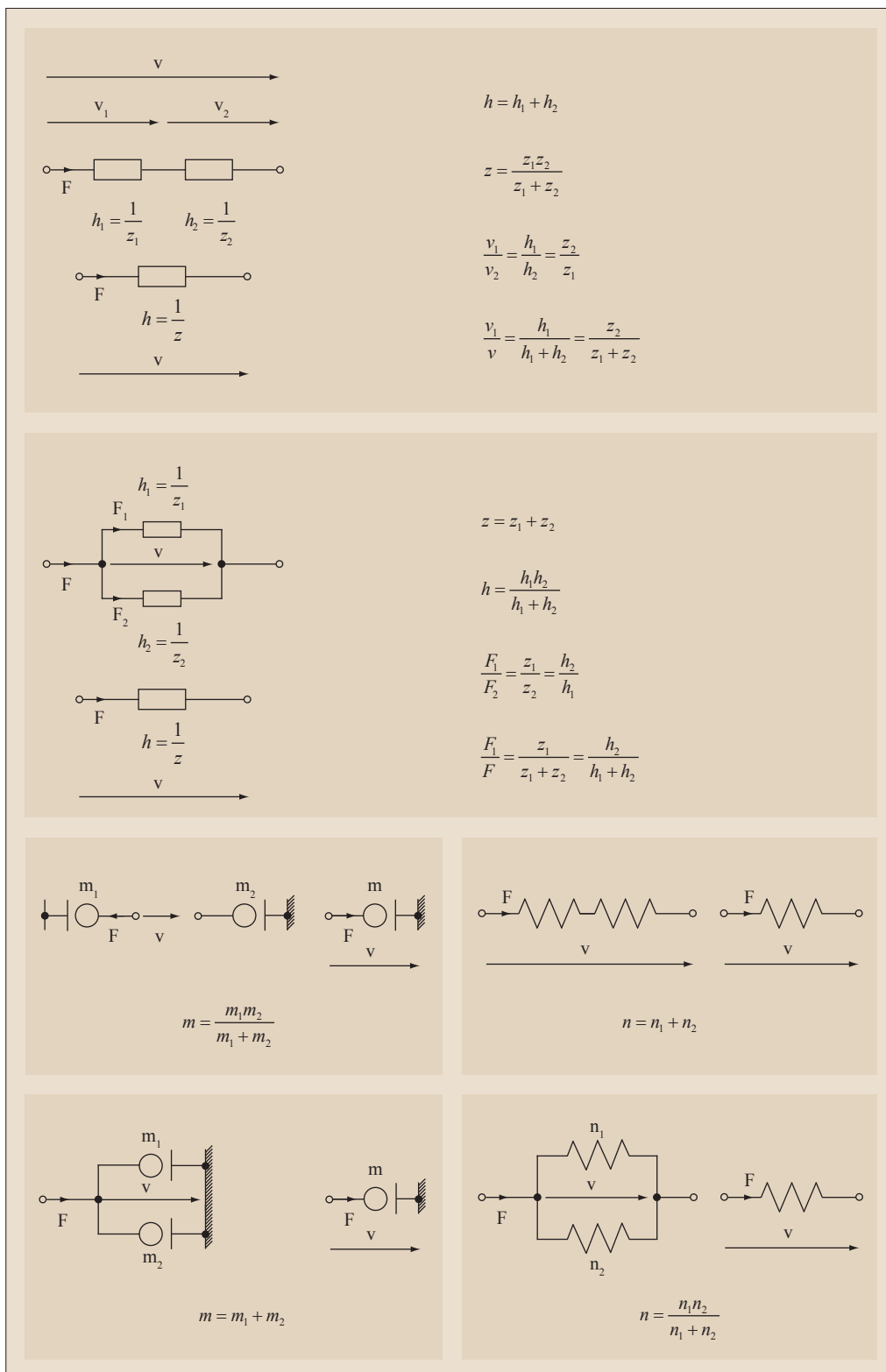
A termikus kapacitások szilárd testek esetén közel lineárisak, viszonylag könnyen meghatározható elemek; a termikus ellenállások azonban többnyire nemlineárisok (hőátadási tényező munkapontfüggése, sugárzási ellenállás nemlinearitása), lineáris elemmel történő helyettesítésük durva közelítés.

A rendszerelemek fontos kiegészítőjét képezik a generátorok. Az elektrotechnikában megismert módon más rendszerekben is ismertek az ideális generátorok, amelyeket a belső impedanciák segítségével lehet a valódi viselkedéshez hasonlóvá tenni.

A 3. ábrán a mechanikai translációs rendszerek ideális generátorait láthatjuk. A sebességgenerátort (3.a ábra) egy állandó ω szögsebességgel hajtott kulisszás hajtóművel valósíthatjuk meg, az erőforrást egy hengerben súrlódásmentesen mozgó dugattyú hozza létre, amelyre egy szinuszos időfüggvényű nyomás hat (3.b ábra). A vázolt elvi lehetőségek műszaki realizációja alkalmanként komoly nehézségekkel járhat, hiszen az állandó jelamplitúdót a lehetőség szerint széles frekvenciatartományban fenn kell tartani.

3. ábra Transzlációs mechanikai rendszerek ideális generátorai
a sebességgenerátor
b erőgenerátor





4. ábra Mechanikai impedanciaelemek számítási szabályai

A torziós mechanikai rendszerek szögsebesség- és nyomaték-generátorának műszaki megvalósítása meglehetősen bonyolult feladat. A megoldáshoz el kell képzelnünk egy rendszeren belül gerjesztett, rotációs rezgőmozgást végző rendszert, amely a lezárástól függően belső impedanciával rendelkező szögsebesség vagy nyomaték-generátor lesz [1].

Áramlási rendszerek nyomás-, ill. térfogatáram-generátorának megvalósítását egy szinuszos időfüggvény szerint mozgó dugattyúval képzelhetjük el, amelyik egy zárt térre (nyomás-generátor) vagy egy nagy puffertartállyal összekötött csővezetékre (térfogatáram-generátor) dolgozik. Mindkét esetben figyelembe

kell venni, hogy a dugattyú áramlási impedanciával terhelt.

Amennyiben az 1. táblázat változóválasztásával definiált impedanciaelemekből (2. táblázat), transzformátorokból (1. és 2. ábra), valamint a generátorokból felrajzoltuk az analóg hálózatot, akkor a villamos rendszereknél szokásos hálózatszámítási módszerekkel a hálózat bármely pontján a keresett mennyiségek kiszámíthatók. Természetesen alkalmazható a huroktörvény a feszültséggel, a csomóponti törvény pedig az árammal analóg mennyiségekre.

A 2. táblázat impedancia-elemeinek definíciójához mindenképpen célszerű két megjegyzést tenni.

Az első az, hogy a táblázat utolsó sorában nincs feltüntetve termikus induktivitás. Ennek az a fizikai magyarázata, hogy nem létezik olyan elem, amelyen azért mérhetnénk hőmérsékletet, mert változik rajta a hőáram (gondoljunk ellenpéldaként pl. a villamos rendszerek induktivitására).

A másik megjegyzés a mechanikai rendszerekkel kapcsolatban. Az 1. táblázat szerinti változó megválasztás – miszerint a v sebesség és az Ω szögsebesség a feszültségtípusú, az F erő és az M nyomaték pedig áramtípusú változó – egy olyan impedanciaelem-definíciót eredményezett, amelynek számítási szabályait a 4. ábra foglalja össze. A számításnál abból kell kiindulni, hogy a kapcsolódó elemeken az erő (vagy a nyomaték), ill. a sebesség (vagy a szögsebesség) a közös, és melyek azok a változók, amelyek összegeződnek. A 4. ábrában z jelöli a (komplex) mechanikai impedanciát, h pedig a mechanikai admittanciát.

Az elmondottak szemléltetésére a folytatásban néhány mérés-technikai vonatkozású, dinamikus analízist igénylő feladattal ismerkedhetünk meg.

IRODALOM

[1] A. Lenk: Elektromechanische Systeme Band 1: Systeme mit konzentrierten Parametern, VEB Verlag Technik, Berlin, 1973
 [2] B. C. Kuo: Önműködő szabályozó rendszerek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979
 [3] Bosznay Á.: Mechanikai lengéstan, Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, Budapest, 1956

(Folytatjuk!)

editor@magyar-elektronika.hu