

# A folyamatműszerezés érzékelői

## Energiaátalakulások szilárd testekben – magnetoelasztikus érzékelők – 1.

Dr. Fock Károly

A mechanikai érzékelők tárgyalása után rátérünk az anyag mágneses tulajdonságainak megváltozásán alapuló érzékelők egy speciális csoportjának, a magnetoelasztikus érzékelőknek az ismertetésére.

A termodinamikai alapokon nyugvó csoportosítás<sup>1</sup> szerint a lágy ferromágneses anyagok belsejében a mechanikai igénybevétel hatására a  $B$  mágneses indukció és a  $H$  mágneses térerősség közötti kapcsolatot leíró, mágneses tulajdonságok mérés-technikai célú vizsgálatáról lesz szó. A klasszikus csoportosítási szabályok szerint ezek az érzékelők vezérelt impedanciák<sup>2</sup>, de – mint látni fogjuk – működésüket az anyag belsejében végbe-  
menő energiaátalakulások alapján lehet megérteni.

### Magnetoelasztikus érzékelők

A magnetoelasztikus érzékelők csoportjának közös jellemzője a ferromágneses anyagok mágneses tulajdonságainak a mechanikai igénybevétel hatására történő megváltozása. A mágneses teret váltakozó áramú gerjesztés hozza létre, amelyet az erő vagy a csavarónyomaték hatására keletkező mechanikai feszültségváltozás eltorzítja. Az érzékelők kimenőjele induktív impedancia-változás, vagy több tekercs esetén a transzferimpedancia megváltozása (transzformátor típusú kialakítás).

### Magnetomechanikai kölcsönhatások ferromágneses anyagokban

A ferromágneses anyagokban a mágneses és a mechanikai mennyiségek közötti kölcsönhatást a ferromágneses anyagok domainszerkezetével magyarázhatjuk. A domainszerkezet az anyag belső energiaállapotának a függvénye, ami az alábbi komponensekből áll:

- $W_H$  a mágneses tér energiája (arányos a mágneses térerősség és a mágneses polarizáció szorzatával),
- $W_\sigma$  a mechanikai energia (kapcsolatban van a magnetostrikcióval),
- $W_K$  a kristályenergia (csak kristályos fémekben), ami erősen anyagfüggő, amorf anyagokban nem létezik,
- $W_A$  az anizotrópiaenergia (anyagfüggő, de erősen befolyásolja az alakítás és hőkezelés módja).

A domainek – vagyis a telítésig mágnesezett tartományok – olyan méretűek és az anyagban úgy rendeződnek el, hogy a

$$\sum W_i = W_H + W_\sigma + W_K + W_A$$

összenergiája minimális legyen. Amennyiben az energiakomponensek közül akár egy is megváltozik, ez természetesen a domainszerkezet megváltozásához vezet.

Tekintsük először a  $H$  külső mágneses tér megváltozásának a hatását. A domainek mágnesezettségük és a külső mágneses tér

kölcsönhatása következtében igyekeznek a tér irányába befordulni. Ezt a jelenséget tapasztaljuk a  $B(H)$  mágnesezési függvény felvétele közben. A mágnesezési függvény ebben az értelmezésben azt fejezi ki, hogy a domainek a külső mágneses tér adott értékénél milyen mértékben fordultak be a tér irányába. Mivel az elfordulások belső súrlódással is járnak, kézenfekvő magyarázatot kapunk ezzel a hiszterézis jelenségének a megértéséhez is. A domainek ilyen jellegű átrendeződése azonban méretváltozással is jár. A ferromágneses anyagok mágneses tér hatására bekövetkező méretváltozását **magnetostrikciónak** nevezik. Előjele anyagtól függően lehet pozitív vagy negatív. Az irodalom a magnetostrikciót – mint relatív méretváltozást –  $\lambda$ -val jelöli. A  $H_S$  telítési mágneses térerősséghez tartozó mennyiség a  $\lambda_S$  telítési magnetostrikció.

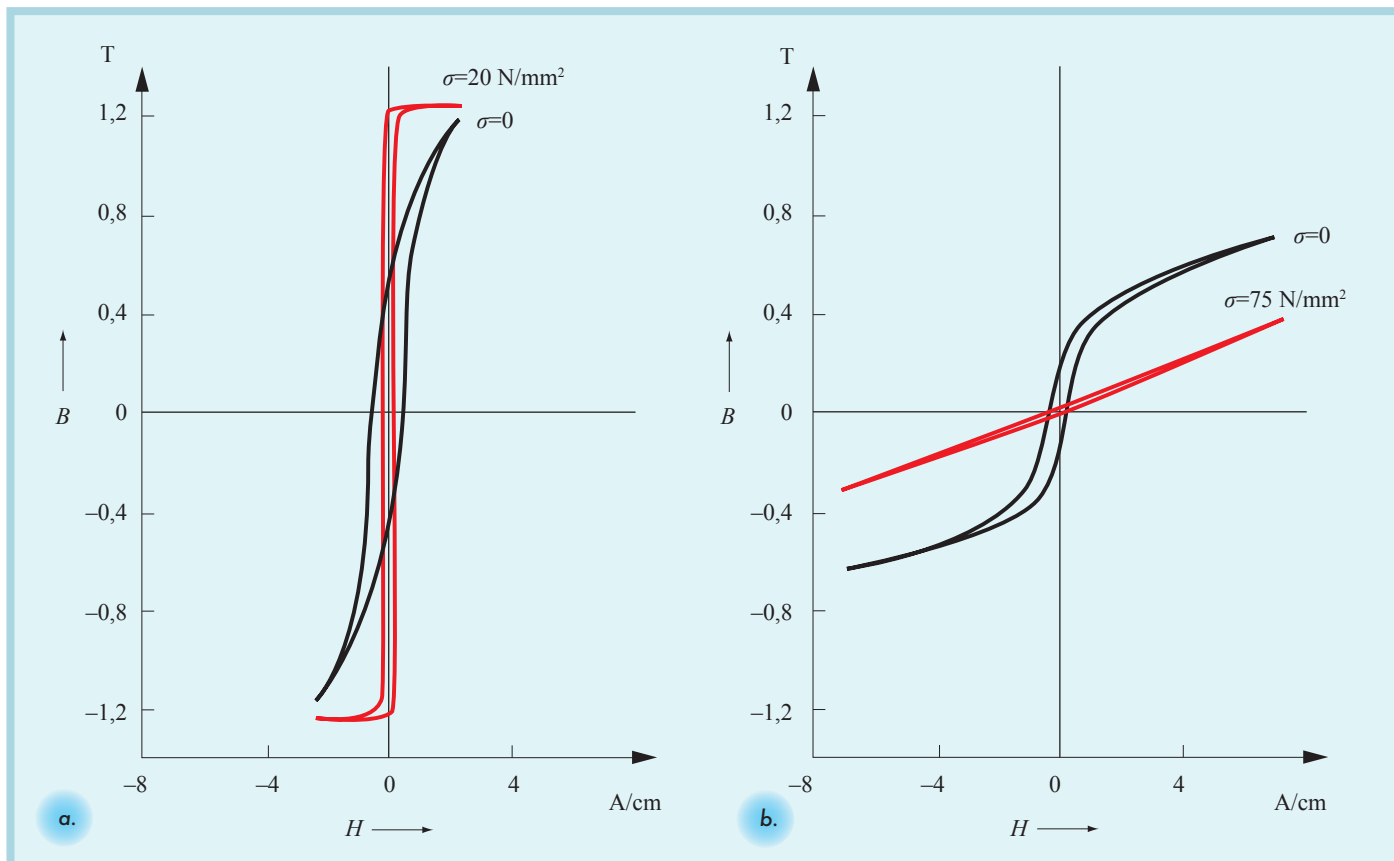
A fentiek alapján nyilvánvaló, hogy ha a külső mágneses tér  $W_H$  energiáján kívül megváltozik még az anyag  $W_\sigma$  mechanikai energiája is (pl. a ferromágneses anyag mechanikai igénybevételének hatására), akkor a terhelésmentes állapotban felvett  $B(H)$  mágnesezési függvénynek változnia kell. A változást többféleképpen számszerűsíthetjük, pl. jellemezhetjük a  $\mu_r$  relatív permeabilitás megváltozásával. Ezek alapján a ferromágneses anyagok permeabilitásának mechanikai igénybevétel hatására történő megváltozását **magnetoelasztikus hatásnak** nevezzük. Lehetőség lenne pl. a  $B_r$  remanens indukció változását is kimenőjelnek tekinteni, de ennek mérés-technikai jelentősége jelentéktelen. Emiatt a továbbiakban csak lágy ferromágneses anyagokkal foglalkozunk, és a  $\mu_r$  relatív permeabilitás változását vizsgáljuk.

Szemléltetésképpen az 1. ábrán néhány anyag  $B(H)$  mágnesezési függvényének a  $\sigma$  mechanikai feszültség hatására bekövetkező megváltozását láthatjuk. A változás iránya  $\lambda_S$  előjelétől függ. Fontos megjegyezni, hogy az ábrákon statikus mágnesezési görbét tüntettünk fel.

A definíció alapján érthető, hogy a magnetoelasztikus érzékelők működésében alapvető fontosságúak az anyagok mágneses és mechanikai tulajdonságai. A kedvező lágymágneses tulajdonságoknak kiváló mechanikai szilárdsággal kell(ene) párosulniuk. Ha a jól ismert kristályos fémeket tekintjük (pl. a kiváló lágymágneses tulajdonságokkal rendelkező FeNi-ötvözeteket), akkor megállapíthatjuk, hogy azok alacsony szakítószilárdsága és szűk rugalmassági tartománya miatt magnetoelasztikus érzékelők ki-

<sup>1</sup> Dr. Fock Károly: A folyamatműszerezés érzékelői, Energiaátalakulások szilárd testekben – 1. Magyar Elektronika 2011/4. 40-44. old.

<sup>2</sup> Dr. Fock Károly: A folyamatműszerezés érzékelői, Az érzékelők csoportosítása – 1. Magyar Elektronika 2009/4. 23-24. old.



1. ábra Magnetoelasztikus hatás homogén  $\sigma$  húzófeszültség esetén  
 a. 68% Ni-tartalmú, kristályos Fe-ötvözet ( $\lambda_s = +25 \cdot 10^{-6}$ )  
 b. Co-bázisú, amorf fémötvözet ( $\lambda_s = -3,5 \cdot 10^{-6}$ )

alakításához kevésbé alkalmasak (bár készültek ilyen anyagból sorozatban gyártott erőmérők). A nagyszilárdságú szerkezeti acélokban pedig a mágneses tulajdonságai kedvezőtlenek (ennek ellenére hajócsavarok acélból készült meghajtótengelyeire ható csavarónyomatékot magnetoelasztikus elven, ipari körülmények között mértek). Tehát a klasszikus, ferromágneses tulajdonsággal rendelkező ötvözetek magnetoelasztikus célú mérés-technikai alkalmazása mindig kompromisszumokat követel.

Az újonnan kifejlesztett és elterjedőben lévő amorf ötvözetek mind mágneses, mind mechanikai szempontból ideális anyagnak

tűnek. Fontos azonban megjegyezni (és a jelen témakörben hátrányának kell tekinteni), hogy csak kb. 0,05 mm vastagsági mértékben, szalagalakban gyárthatók.

Az alkalmazás szempontjából a magnetoelasztikus érzékelők legfontosabb mágneses és mechanikai anyagi jellemzőit foglalja össze az 1. táblázat. A tapasztalat az elméleti vizsgálatokkal egyezően azt mutatja, hogy a magnetoelasztikus érzékenységgel négyzetesen nő, a  $\lambda_s$  telítési mágneseszettséggel pedig hiperbolikusan csökken. A  $J_s^2/\lambda_s$  arány sokféle érzékenységi adatot határoz meg.

1. táblázat Magnetoelasztikus érzékelők anyagainak mágneses és mechanikai jellemzői

| Anyagszerkezet  | Ötvözet   | $\lambda_s$ [ $10^{-6}$ ] | $H_c$ [A/cm] | $J_s$ [T]     | Vickers-keménység [HV] | $\sigma_s$ szakítószilárdság [N/mm <sup>2</sup> ] | E Young-modulus [kN/mm <sup>2</sup> ] |
|---|---|---------------------------|--------------|---------------|------------------------|---|---------------------------------------|
| kristályos  | 50 Co, 50 Fe  | +70                       | 1,4          | 2,35          | 200                    | 400   | 230                                   |
|   | 50 Ni, 50 Fe  | +25                       | 0,05         | 1,55          | 110                    | 140   | 140                                   |
|   | 97 Fe, 3 Si   | +9                        | 0,1          | 2,0           | 180                    | 350   | 150                                   |
|   | 77 Ni, 15 Fe, Mo+Cu   | $\pm 1$                   | 0,01         | 0,8           | 100                    | 150   | 200                                   |
|   | 77 Ni, 15 Fe, Mo+Cu +Ti+Nb                                  | $\approx 0,5$             | 0,025        | 0,5           | 220                    | 500   | 200                                   |
|   | Rugóacél  | -1                        | 15           | 2,1           | 550                    | 1500  |                                       |
|   | Tengelyacél (CK 45)   |                           | 10           | $\approx 2,1$ |                        | 450   |                                       |
| amorfs <sup>3</sup>   | Ni  | -35                       | 1,5          | 0,6           | 75                     | 120   | 210                                   |
|   | Fe <sub>80</sub> B <sub>14</sub> Si <sub>6</sub>            | +30                       |              | 1,5           | 950                    | } 1500...2000                                     | } kb. 150                             |
|   | Fe <sub>40</sub> Ni <sub>38</sub> (Mo, Si, B) <sub>22</sub> | +8                        | 0,04         | 0,8           | 800                    |   |                                       |
|   | (Co, Fe Mo) <sub>73</sub> (B, Si) <sub>27</sub>             | $\approx 0,2$             | 0,03         | 0,55          | 1000                   |   |                                       |
|   | Co <sub>75</sub> Si <sub>15</sub> B <sub>10</sub>           | -3,5                      | 0,003        | 0,7           | 1000                   |   |                                       |
| Co <sub>68</sub> Ni <sub>10</sub> B <sub>14</sub> Si <sub>8</sub> | -8  | 0,025                     | 0,85         |               |                        |   |                                       |

3 Példa az amorf anyagok kereskedelmi nevére: METGLAS (Allied Signal Inc.), VITROVAC (Vacuumschmelze GmbH).

**A komplex permeabilitás definíciója**

Mielőtt a magnetoelasztikus hatás részletesebb vizsgálatára rátérnénk, célszerű a mágneses anyagok jellemzésére előnyös – de általában ritkán használt – komplex mágneses permeabilitás fogalmával megismerkedni.

Tapasztalati tény, hogy meghatározott körülmények között (kis kivezérlések és magasabb frekvenciartomány) a  $B(H)$  mágnesezési függvény hasonlít egy ferde helyzetű ellipszisre. Ez a jelenség adta az ötletet, hogy ezt az ellipszist teljesen formálisan az analitikus geometria szabályai alapján tárgyaljuk. Kiindulásul vegyük észre, hogy a szinuszos változásának feltételezett mágneses térjellemző mennyiségek

$$\left. \begin{aligned} H(t) &= \hat{H}e^{j\omega t} \\ B(t) &= \hat{B}e^{j(\omega t - \delta)} \end{aligned} \right\}$$

egyenletrendszere a  $B-H$  derékszögű koordináta-rendszerben is egy ferde helyzetű ellipszis paraméteres egyenletrendszere (2. ábra). A paraméter a  $t$  idő. Megjegyzendő, hogy a  $B$  mágneses indukció és a  $H$  mágneses térerősség egyidejű szinuszos változása a gyakorlatban éppen amiatt nem megvalósítható, mert a mágnesezési függvény nem pontosan ellipszis alakú. A továbbiakban az analitikusan leírható ellipszisre úgy tekintünk, mint a vizsgált hiszterézishurok közelítésére.

Az egyenletrendszer komplex együtthatóiból meghatározható a komplex permeabilitás amelynek két összetevője a

$$\bar{\mu} = \frac{\hat{B}}{\mu_0 \hat{H}} e^{-j\delta} = \mu e^{-j\delta} = \mu \cos\delta - j\mu \sin\delta = \mu_L - j\mu_R,$$

amelynek két összetevője a

- $\mu_L$  induktív-permeabilitás és a
- $\mu_R$  ellenállás-permeabilitás.

A mágnesezési függvény a komplex permeabilitással, ill. annak komponenseivel a következő alakú:

$$\hat{B} = \bar{\mu}\mu_0\hat{H} = \mu_L\mu_0\hat{H} - j\mu_R\mu_0\hat{H}.$$

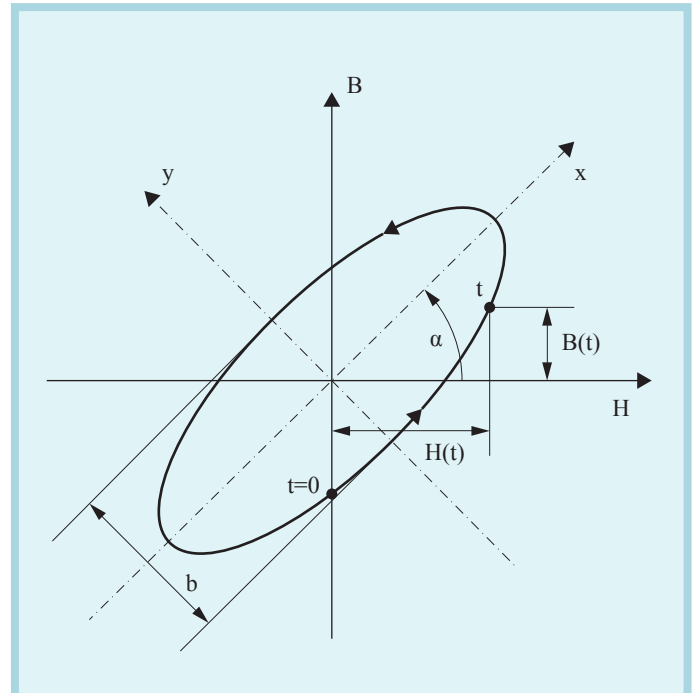
A kifejezés fizikai tartalmának megértéséhez a fenti egyenletrendszer alapján az indukció

$$B(t) = \hat{B} \cos(\omega t - \delta)$$

valós részének átalakításából (a trigonometrikus összefüggések felhasználásával) a

$$B(t) = \hat{B}(\cos\delta \cos\omega t + \sin\delta \sin\omega t)$$

egyenletet kapjuk. Látható, hogy ugyanannak az indukciófüggvénynek kétféle felírási formáját kaptuk. Az első egyenlet az indukció komplex amplitúdóját, a második pedig az indukció pillanatértékét adja meg.



2. ábra Mágnesezési görbe szinuszos időfüggvényű  $H$  térerősség és  $B$  indukció esetén

A komplex amplitúdó kifejezését a következőképpen értelmezzük: az indukciónak szinuszos (vagy koszinuszos) alakú térerősséggel való gerjesztésénél két összetevője van: a térerősséggel fázisban levő összetevő az induktív-permeabilitással, a  $\pi/2$  fázisszöggel késő összetevő az ellenállás-permeabilitással arányos. Az induktív-permeabilitás tulajdonképpen megegyezik a klasszikus permeabilitás fogalommal. Az ellenállás-permeabilitás az anyagban hővé alakuló veszteségeket tükrözi. Ezekkel a mennyiségekkel a meddő mágnesezési teljesítmény

$$P_m = \frac{\mu_L \mu_0 H_1^2 \omega}{2},$$

a veszteségi teljesítmény pedig

$$P_v = \frac{\mu_R \mu_0 H_1^2 \omega}{2}.$$

A két teljesítmény hányadosából a veszteségi tényezőt a

$$D_v = \frac{P_v}{P_m} = \frac{\mu_R}{\mu_L}$$

kifejezés adja.

A komplex permeabilitás bevezetésével egy olyan számítási eszközhöz jutottunk, amelynek segítségével – korlátozott körben – a nemlineáris hiszterézis jelenségét is a lineáris komplex algebra apparátusával számíthatjuk, és a valódi hiszterézishurkot közelítőleg csak két adattal – a komplex permeabilitás valós és képzetes komponensével – jellemezhetjük.

A bevezetőben feltételezett megszorításokból következik, hogy a komplex permeabilitás (és annak komponensei is) frekvenciafüggő. A 3. ábra néhány ferromágneses vasötvözet komplex permeabilitásának frekvenciafüggését szemlélteti.

A komplex permeabilitás komponenseinek fizikai tartalmát az ellipszissel helyettesített mágnesezési függvény (2. ábra) alapján is vizsgálhatjuk. Ehhez a ferde helyzetű ellipszis analitikai geometriai egyenletének elemzésére van szükség. Terjedelmi okok miatt a levezetés mellőzésével csak a végeredményt közöljük.

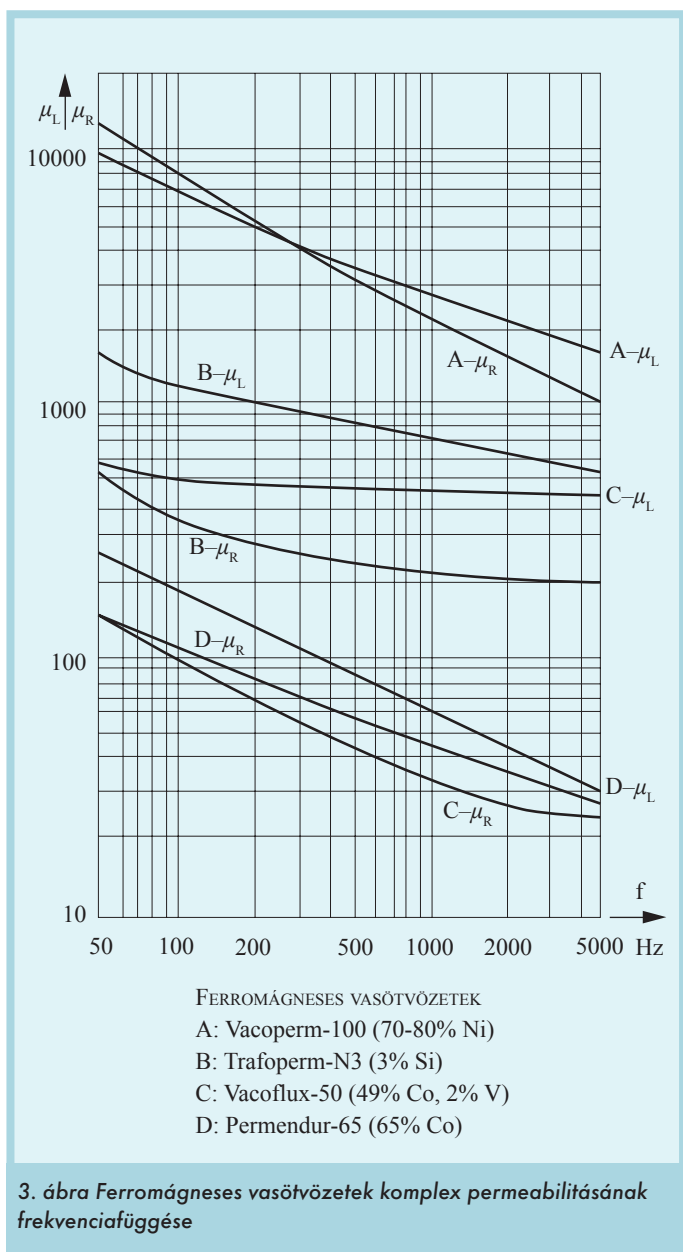
A 2. ábra jelöléseivel a főtengelynek a  $H$  tengely pozitív felé által bezárt  $\alpha_k$  szöge jó közelítéssel az

$$\alpha \approx \mu_0 \mu_L$$

az ellipszis  $b$  hosszúságú kistengelye pedig közelítőleg a

$$b \approx 2\mu_0 \mu_R \hat{H}$$

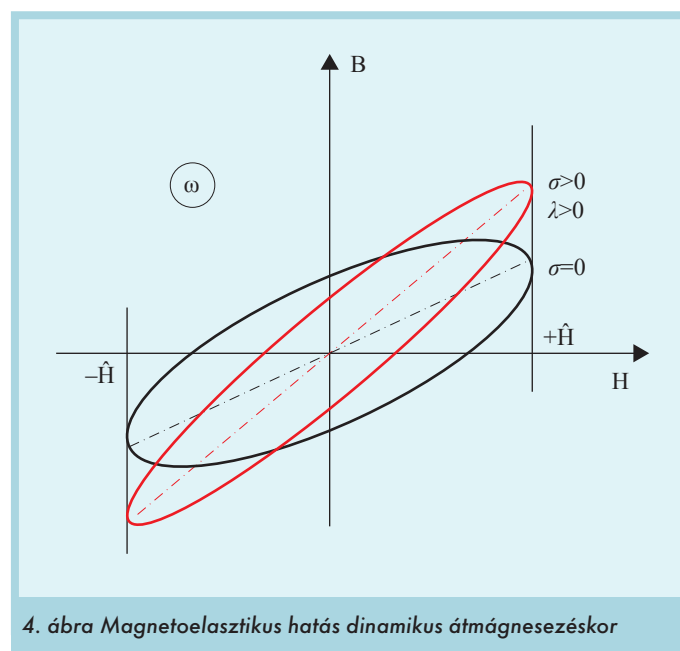
kifejezéssel írható le.



Ezek az egyenletek választ adnak a  $\mu_L$  induktív- és a  $\mu_R$  ellenállás-permeabilitás elnevezésére és fizikai jelentésére (lásd 2. ábra). Az  $\alpha$  egyenletéből látható, hogy az ellipszis nagytengelyének meredeksége a  $\mu_L$  induktív-permeabilitástól függ. Minél nagyobb a  $\mu_L$  induktív-permeabilitás, annál meredekebb a  $B(H)$  mágnesezési görbe. A másik egyenlet alapján pedig megállapítható, hogy az ellipszis kistengelyének  $b$  hossza – a hiszterézishurok vastagsága (a veszteségi ellenállás nagysága) – a  $\mu_R$  ellenállás-permeabilitás lineáris függvénye.

### A magnetoelasztikus hatás dinamikus átmágnesezéskor

A bevezető fejezetben szemléltetett magnetoelasztikus hatás (1. ábra) kizárólag statikus mágnesezési görbékre vonatkozik. Dinamikus átmágnesezés (váltakozó áramú gerjesztés) során a frekvencia növekedésével a hiszterézishurok egyre inkább egy ferde helyzetű ellipszissel közelíthető. A mechanikai igénybevétel hatására ez az ellipszis fog deformálódni (4. ábra). Az ábra egy lehetséges változást ábrázol  $\omega$  körfrekvencián,  $\hat{H}$  amplitúdójú szinuszos gerjesztésnél, húzó  $\sigma$  feszültség hatására, pozitív  $\lambda_s$  telítési magnetostrikció feltételezésével. Látható, hogy az ellipszis nagytengelyének meredeksége nőtt és kistengelyének hossza csökkent.



A  $\bar{\mu}$  komplex mágneses permeabilitás  $\mu_L$  valós és  $\mu_R$  képzetes komponensének mechanikai terhelésfüggését lineáris egyenletrendszerrel közelítjük. Feltételezzük, hogy a ferromágneses anyag mechanikailag feszültségmentes állapotban izotróp, de a mechanikai igénybevétel az anyagot mágnesesen anizotróppá teszi (feszültséganizotrópia).

Megismerve a ferromágneses anyagok domainszerkezetét – illetve annak létrehozásában szerepet játszó energiakomponenseket –, megállapítottuk, hogy a mágnesesen izotróp anyag úgy képzelhető el, hogy a domainek külső mágneses tér nélkül teljesen rendezetlenül helyezkednek el (a domainek telítési mágnesezettségét reprezentáló vektorok eredője zérus). A ferromágneses anyag előállítás (öntés, hűtés, megalakítás, mechanikai megmunkálás) azonban a domain eloszlást valamilyen irányban többé-kevésbé rendezetté teszi, texturált anyagszerkezet alakulhat ki.

(Folytatjuk!)

editor@magyar-elektronika.hu