

A folyamatműszerezés érzékelői

Energiaátalakulások szilárd testekben – magnetoelasztikus érzékelők 2.

Dr. Fock Károly

A magnetoelasztikus érzékelők működésének leírásához célszerű a legegyszerűbben tárgyalható, lineáris matematikai modellt választani. Ehhez az előző számban megismertük a komplex mágneses permeabilitás fogalmát, valamint a dinamikus mágnesezési függvény ferde helyzetű ellipszissel való helyettesítésének lehetőségét és korlátait. A folytatásban ezek felhasználásával lehetőség nyílik a magnetoelasztikus hatás lineáris egyenletrendszerrel való leírására, és a nagyszámú – ezen az elven működő – erő- és nyomatékmérő egységes szempontok szerinti csoportosítására, működésének ismertetésére.

A magnetoelasztikus hatás fenomenológiai leírása

Szinuszosan változó mágneses térjellemező vektorok esetén kvázistacionárius esetben a

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{\mu}_{ij}) \vec{H}$$

mágnesezési függvény mechanikai feszültségfüggése derékszögű Descartes-koordináta-rendszerben a

$$\begin{pmatrix} \vec{B}_x \\ \vec{B}_y \\ \vec{B}_z \end{pmatrix} = \mu_0 \vec{\mu} \begin{pmatrix} 1 + \bar{d}_1 \sigma_x + \bar{d}_2 (\sigma_y + \sigma_z) & \bar{d}_3 \tau_{xy} & \bar{d}_3 \tau_{xz} \\ \bar{d}_3 \tau_{xy} & 1 + \bar{d}_1 \sigma_y + \bar{d}_2 (\sigma_x + \sigma_z) & \bar{d}_3 \tau_{yz} \\ \bar{d}_3 \tau_{xz} & \bar{d}_3 \tau_{yz} & 1 + \bar{d}_1 \sigma_z + \bar{d}_2 (\sigma_x + \sigma_y) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{H}_x \\ \vec{H}_y \\ \vec{H}_z \end{pmatrix}$$

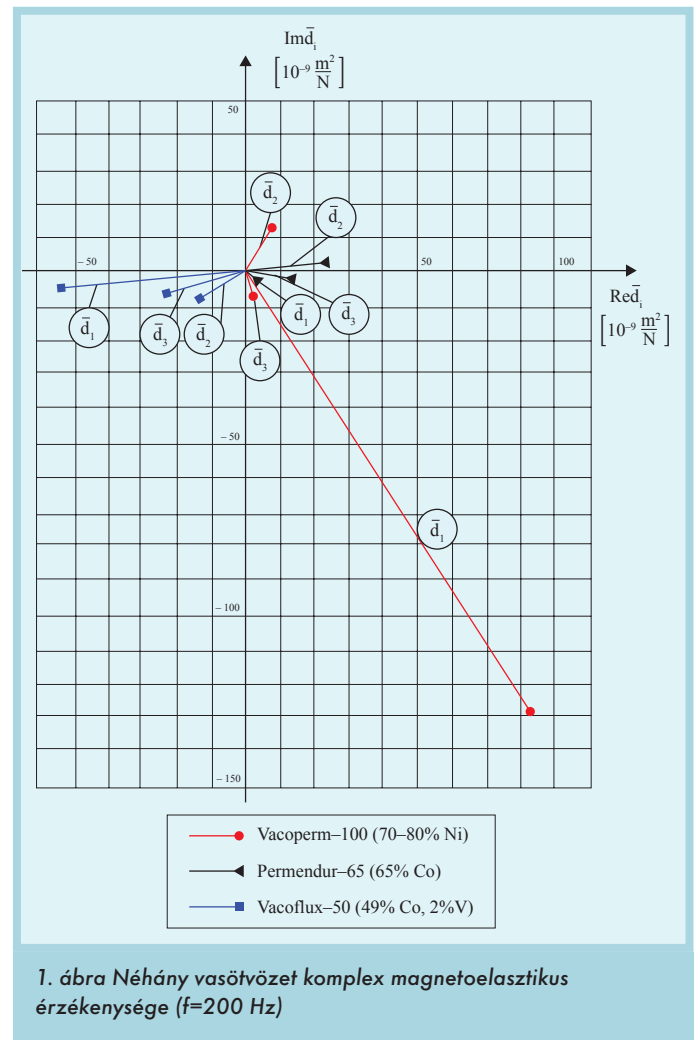
egyenletrendszerrel írható le. Az egyenletből kiolvasható a magnetoelasztikus hatás is, vagyis a permeabilitás megváltozása a mechanikai feszültségállapot függvényében:

$$\begin{pmatrix} \Delta \vec{\mu}_x \\ \Delta \vec{\mu}_y \\ \Delta \vec{\mu}_z \\ \Delta \vec{\mu}_{xy} \\ \Delta \vec{\mu}_{xz} \\ \Delta \vec{\mu}_{yz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{d}_1 & \bar{d}_2 & \bar{d}_2 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{d}_2 & \bar{d}_1 & \bar{d}_2 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{d}_2 & \bar{d}_2 & \bar{d}_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{d}_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{d}_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{d}_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix},$$

ahol

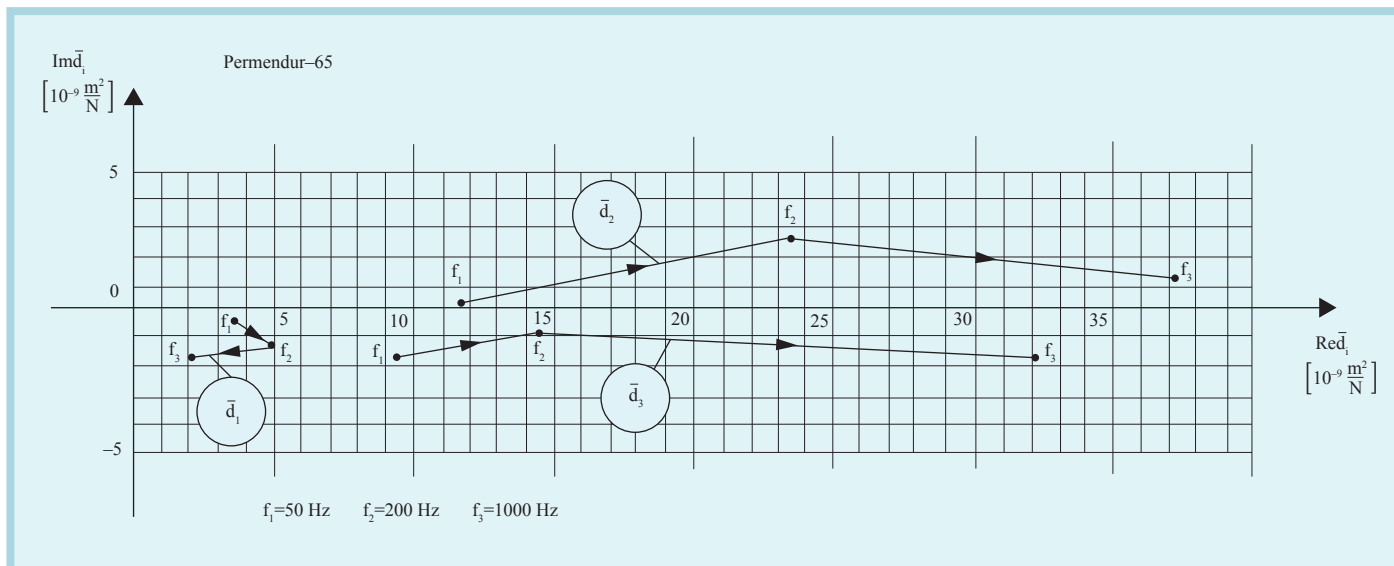
$$\Delta \vec{\mu}_{xy} = \Delta \vec{\mu}_{yx}, \quad \Delta \vec{\mu}_{xz} = \Delta \vec{\mu}_{zx}, \quad \Delta \vec{\mu}_{yz} = \Delta \vec{\mu}_{zy}$$

a feszülsténzor szimmetriája miatt.



Az egyenletekben \bar{d}_1 , \bar{d}_2 és \bar{d}_3 együttthatók a komplex magnetoelasztikus érzékenységeket jelölik. Dimenziójuk: m^2/N , értékük megadja az egységnyi mechanikai feszültség hatására bekövetkező komplex relatív permeabilitásváltozást.

Tekintettel arra, hogy a komplex permeabilitás frekvenciafüggő (lásd: 2012/4. szám, 46.o. 2.ábra), a magnetoelasztikus érzékenységek is frekvenciafüggő mennyiségek. Az 1. ábrán lát-



2. ábra Permendur-65 magnetoelasztikus érzékenységeinek frekvenciafüggése

ható értékek 200 Hz frekvenciáira vonatkoznak, a 2. ábrán pedig a Permendur-65 elnevezésű ötvözet magnetoelasztikus érzékenységeinek frekvenciafüggése látható.

A mágnesezési függvény vektorkomponensekre felírt egyenletrendszeréből látszik, hogy mechanikai feszültségmentes állapotban a ferromágneses anyag valóban mágneseesen izotróp. A magnetoelasztikus érzékenységek miatt létrejövő irányérzékenység számos magnetoelasztikus érzékelőtípus kialakítását teszi lehetővé.

Magnetoelasztikus érzékelők csoportosítása

Tekintettel arra, hogy a magnetoelasztikus hatás a ferromágneses anyagok mechanikai feszültségállapotával van kapcsolatban, a magnetoelasztikus érzékelőket kizárólag mechanikai igénybevétel – erő, ill. torziós nyomaték – mérésre használják. Elvileg szóba jöhetne a nyomás is, de a más elven működő nyomásmérők méréstechnikailag lényegesen előnyösebb tulajdonságokkal rendelkeznek, emiatt a magnetoelasztikus hatást – bár elvileg lehetne – nyomásmérésre csak elvétve használják.

A magnetoelasztikus érzékelők működésének vizsgálata során célunk annak a folyamatnak a megismerése, amelynek során a mérendő erőből, ill. nyomatékból villamos kimenőjel, pl. feszültség lesz. Ezt a jelátalakítási láncot szemlélteti a 3. ábra.

A jelátalakítási lánc egyben kijelöli azokat a feladatokat is, amelyeket az analízis vagy tervezés során végre kell hajtanunk. Az analízis fázisában indulunk ki abból a feltételezésből, hogy ismerjük az érzékelő anyagát és az érzékelő ferromágneses anyagának mechanikai feszültségállapotát, szükség esetén fel tudjuk írni a mechanikai feszültségállapottól függő mágnesezési függvényt, vagyis a magnetoelasztikus hatást.

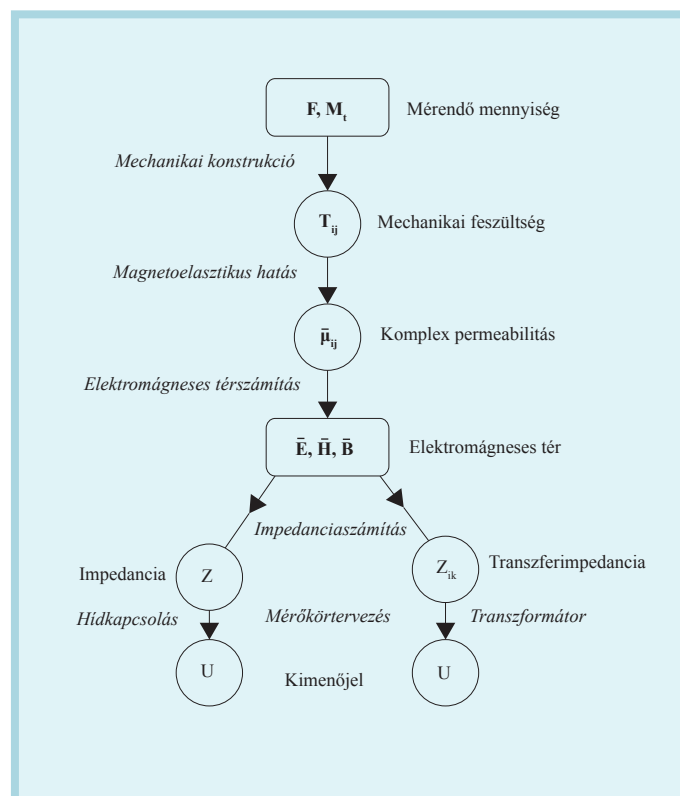
A továbbiakban szükség van az elektromágneses tér vektoraira is, amelyeket a

$$\begin{aligned}
 \text{rot} \vec{H} &= \gamma \vec{E} \\
 \text{rot} \vec{E} &= -j\omega \vec{B} \\
 \vec{B} &= \mu_0 (\vec{\mu}_{ij}) \vec{H}
 \end{aligned}$$

Maxwell-egyenletek megoldásaként kapjuk. A szinuszosan változó komplex helyvektorokra felírt parciális differenciálegyenlet-

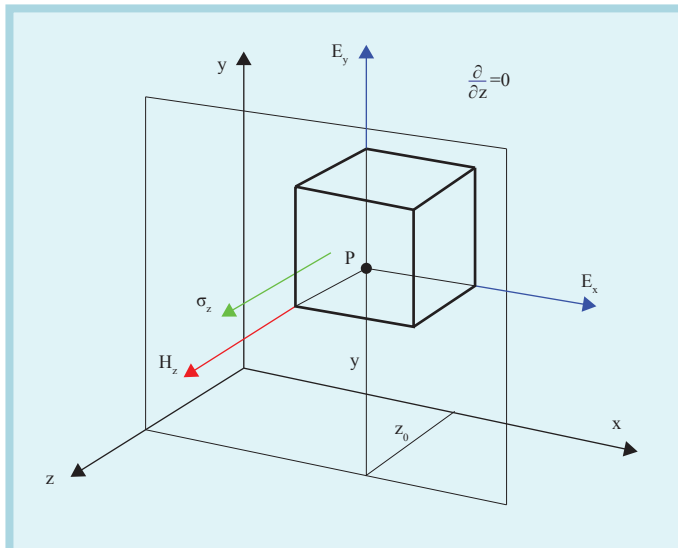
rendszer megoldásával itt nem foglalkozunk, de az első két egyenlet komponensekre felírt alakja megoldás nélkül is alkalmas az érzékelők működésének további vizsgálatára.

Írjuk fel az első két Maxwell-egyenletet komponensekre. Az érzékelők működésének bemutatásához a háromdimenziós általános eset analízise helyett elfogadható eredményre jutunk a kétdimenziós síkprobléma tárgyalásával is. Mint a későbbiekben látni fogjuk, erre az egyszerűsítésre az ad alapot, hogy az érzékelők belsejében lejátszódó változások is jó közelítéssel síkproblémaként kezelhetők. Ehhez tekintünk pl. a z tengely mentén a teret változatlanoknak, amit az egyenletrendszerben formálisan a $\partial/\partial z=0$ behelyettesítésével vesszük figyelembe (ezeket a tagokat az egyenletrendszerben áthúztuk). Természetesen bármely másik irány kiválasztása a jelenlegivel minőségileg azonos eredményhez vezet.



3. ábra Magnetoelasztikus érzékelő működése

	$\frac{\partial}{\partial y} \bar{H}_z - \cancel{\frac{\partial}{\partial z} \bar{H}_y} = \gamma \bar{E}_x$	$\frac{\partial}{\partial x} \bar{E}_y - \frac{\partial}{\partial y} \bar{E}_x = -j\omega \bar{B}_z$	}
intenzitás típusú	$\cancel{\frac{\partial}{\partial z} \bar{H}_x} - \frac{\partial}{\partial x} \bar{H}_z = \gamma \bar{E}_y$	$\frac{\partial}{\partial y} \bar{E}_z - \cancel{\frac{\partial}{\partial z} \bar{E}_y} = -j\omega \bar{B}_x$	
anizotrópia típusú	$\frac{\partial}{\partial x} \bar{H}_y - \frac{\partial}{\partial y} \bar{H}_x = \gamma \bar{E}_z$	$\cancel{\frac{\partial}{\partial z} \bar{E}_x} - \frac{\partial}{\partial x} \bar{E}_z = -j\omega \bar{B}_y$	



4. ábra A mechanikai feszültségállapot és az elektromágneses tér az intenzitás típusú, magnetoelasztikus érzékelőben (z irányú síkprobléma és z irányú, egytengelyű mechanikai feszültségállapot feltételezésével)

Általános síkbeli feszültségállapot az x-y síkban:

$$(T_{ij}) = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}, \quad \tau_{xy} = \tau_{yx}$$

Az egyenletekben a feszültségállapotot leíró (megmaradó) mechanikai feszültségkomponenseket bekereteztük, a kereten kívüli, többi komponens (bár nem jelöltük) zérus.

Intenzitástípusú, magnetoelasztikus erőmérők

A működést leíró matematikai modellhez a z irányú síkprobléma és z irányú, egytengelyű mechanikai feszültségállapot feltételezésével (4. ábra), az alábbi differenciálegyenlet-rendszert kapjuk:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \bar{H}_z &= \gamma \bar{E}_x \\ -\frac{\partial}{\partial x} \bar{H}_z &= \gamma \bar{E}_y \\ \frac{\partial}{\partial x} \bar{E}_y - \frac{\partial}{\partial y} \bar{E}_x &= -j\omega \bar{B}_z \\ \bar{B}_z &= \mu_0 \bar{\mu} (1 + \bar{d}_1 \sigma_z) \bar{H}_z \end{aligned} \right\} \text{ha } \frac{\partial}{\partial z} = 0$$

$$(T_{ij}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{pmatrix}$$

Ennek az egyszerűsítésnek az lesz az eredménye, hogy a bekeretezett felső három egyenletben a mágneses térnek csak a H_z és B_z komponensre szerepel. A magnetoelasztikus érzékelőben tehát csak egyirányú mágneses tér van, amelynek csak az amplitúdója függ a mérendő mennyiségtől. Ezeket az érzékelőket **intenzitás típusú** magnetoelasztikus érzékelőknek hívják.

Ezzel szemben az alsó három egyenletben csak a kiválasztott z irányra merőleges, x-y síkban lévő mágneses vektorkomponensek találhatóak. A működés során elképzelhető ezen vektorok olyan megváltozása, aminek eredményeképpen a \bar{H} és \bar{B} vektora nem lesz egymással párhuzamos, tehát az anyag mágnesesen anizotróppá válik. Ezen jelenség miatt azokat a magnetoelasztikus érzékelőket, amelyek működését ezek az egyenletek írják le, **anizotrópia típusú** érzékelőknek hívják.

Az egyszerűsítő feltételezéseket a mechanikai feszültségállapotra is kiterjesztjük. Válasszunk egy egytengelyű és egy általános síkbeli feszültségállapotot, amelyeket az előbb választott z irány miatt az alábbi egyenletekkel definiáljuk:

Egytengelyű feszültségállapot z irányban:

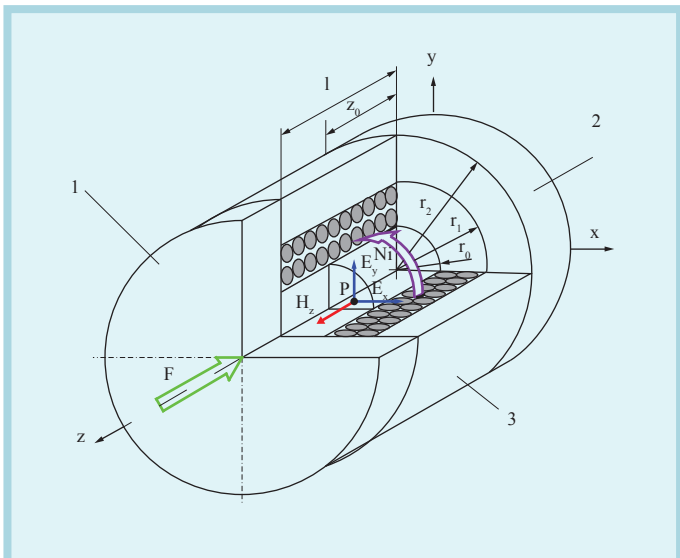
$$(T_{ij}) = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}$$

Az 5. ábrán látható fizikai modell megvalósítja a fenti feltételezéseket. Az N menetszámú, szolenoid típusú tekercs Ni nagyságú gerjesztése az r_0 átmérőjű magban és a 3. jelű csőben H_z mágneses teret hoz létre, amelyeket az 1. és 2. jelű – szintén magnetoelasztikus anyagból készült – nyomótárcsák közvetítésével az F erőből származó mechanikai feszültség terhel. Tehát az érzékelő l hosszúságú szakaszára érvényes a felírt matematikai modell. Az 1. és 2. jelű nyomótárcsa légrés nélkül csatlakozik az érzékelő elemeihez, létrehozva ezáltal a zárt mágneses kört. Kimenőjel a tekercs Z impedanciája.

Az érzékelő anyagának a nagy érzékenység elérése érdekében – az 1. ábra figyelembevételével – a 70-80% Ni-tartalmú vasötvetet célszerű használni (Vacoperm-100). A hőmérsékletfüggés kompenzálására az érzékelő belsejébe hőmérsékletfüggő ellenállás-kombinációt építenek be.

Anizotrópia típusú, magnetoelasztikus erőmérők

Az x-y síkban az általános mechanikai feszültségállapot feltételezésével a Maxwell-egyenletek felhasználásával jutunk el az anizotrópia típusú, magnetoelasztikus erőmérők matematikai



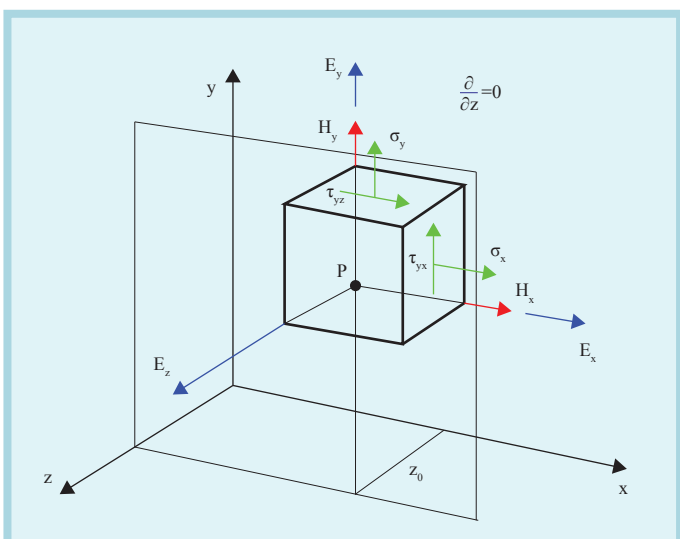
5. ábra Intenzitás típusú, magnetoelasztikus erőmérő modellje

modelljéhez, amelynek segítségével könnyen megérthető az ilyen típusú érzékelők működése.

Az érzékelő matematikai modelljét alkotó

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \bar{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \bar{H}_x}{\partial y} &= \gamma \bar{E}_z \\ \frac{\partial \bar{E}_z}{\partial y} &= -j\omega \bar{B}_x \\ \frac{\partial \bar{E}_x}{\partial z} &= -j\omega \bar{B}_y \\ \bar{B}_x &= \mu_0 \bar{\mu} \left[(1 + \bar{d}_1 \sigma_x + \bar{d}_2 \sigma_y) \bar{H}_x + \bar{d}_3 \tau_{xy} \bar{H}_y \right] \\ \bar{B}_y &= \mu_0 \bar{\mu} \left[\bar{d}_3 \tau_{xy} \bar{H}_x + (1 + \bar{d}_1 \sigma_y + \bar{d}_2 \sigma_x) \bar{H}_y \right] \end{aligned} \right\}$$

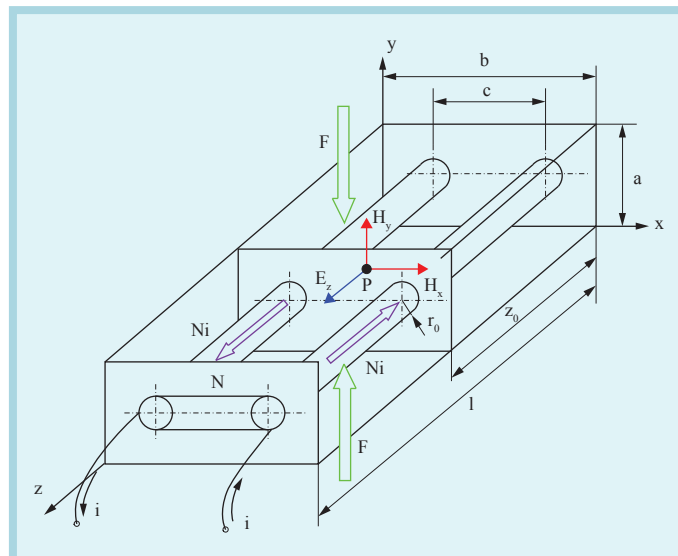
egyenletrendszerből látható, hogy az x-y síkban a változó mechanikai feszültségkomponensek ismeretében meghatározható az x és y irányú komponensekből álló mágneses tér, amelynek fluxu-



6. ábra Síkbeli mechanikai feszültségállapot és síkbeli mágneses tér az anizotrópia típusú, magnetoelasztikus érzékelőben

sából egy tekercs inductivitása, vagy több tekercs esetén a tekercsek közötti kölcsönös inductivitás kiszámítható.

Elsőként tekintünk a 7. ábrán látható impedanciakimenetű erőmérőt. Tételezzük fel, hogy az $a \times b \times l$ méretű, tömör anyagból készült vagy lemezelts vasmagú érzékelőre a mérendő F erő egyenletesen megoszló terhelésként hat. A vasmag két r_0 sugarú, z irányú furatában egy N menetszámú tekercs helyezkedik el, amelyben i gerjesztőáram folyik. A tekercsek körül kialakult mágneses



7. ábra Impedanciakimenetű, anizotrópia típusú erőmérő modellje

tér terhelésmentes állapotban kör alakú, amely az F erő hatására torzul, és ez a torzulás a mágneses fluxus és az impedancia megváltozásához vezet. A hőmérsékletfüggés kompenzálásáról gondoskodni kell, pl. egy különbségképzést megvalósító, kiegyenlítettlen hídkapcsolásban.

A 7. ábrán látható impedanciakimenetű, anizotrópia típusú erőmérő anyagválasztásában a korábban említett kompromisszumos megoldás kerül ismét előtérbe. Sejthető, és a részletes – itt helyhiány miatt nem közölt – részletszámítások eredményeiből is az látható, hogy az érzékelő induktív jellegű ΔZ impedanciaváltozása az erőváltozásra annál érzékenyebb, minél nagyobbak a \bar{d}_1 , \bar{d}_2 , \bar{d}_3 magnetoelasztikus érzékenységek.

Másfelől a fizikai modell alakja nagyon közel áll a műszakilag kivitelezett érzékelőhöz, amelynek előnyei közé tartozik a rendkívül alacsony (y irányú) geometriai méret és a nagy teherbíróképesség elérése érdekében a viszonylag nagy $b \times l$ felület, amelyre a mérendő F erő hat. Ilyen geometriai forma elsősorban tömör anyagból alakítható ki a legegyszerűbben. A mágneses veszteségek csökkentése céljából célszerűnek látszó lemezelts kialakításnak ugyanis technológiai akadályai vannak. Ebből kifolyólag a \bar{d}_1 , \bar{d}_2 , \bar{d}_3 magnetoelasztikus érzékenységeknek döntő jelentőségük van a Z impedanciában nemcsak az induktív, hanem a veszteségi komponens meghatározásában is.

Ez azonban felveti a hőmérsékletkompenzáció megvalósíthatóságának a kérdését is. A \bar{d}_1 , \bar{d}_2 , \bar{d}_3 magnetoelasztikus érzékenységek hőmérsékletfüggése a működési hőmérséklettartományban akár előjelet is válthat, emiatt az erőmérő hőmérsékletkompenzációjának sikere bizonytalan, a mérési bizonytalanság nagyobb lesz. A szerző tapasztalatai szerint az 1. és 2. ábrában is feltüntetett Permendur-65 elnevezésű vas-kobalt ötvözetrel eredményes hőmérsékletkompenzáció hajtható végre.