

A folyamatműszerezés érzékelői

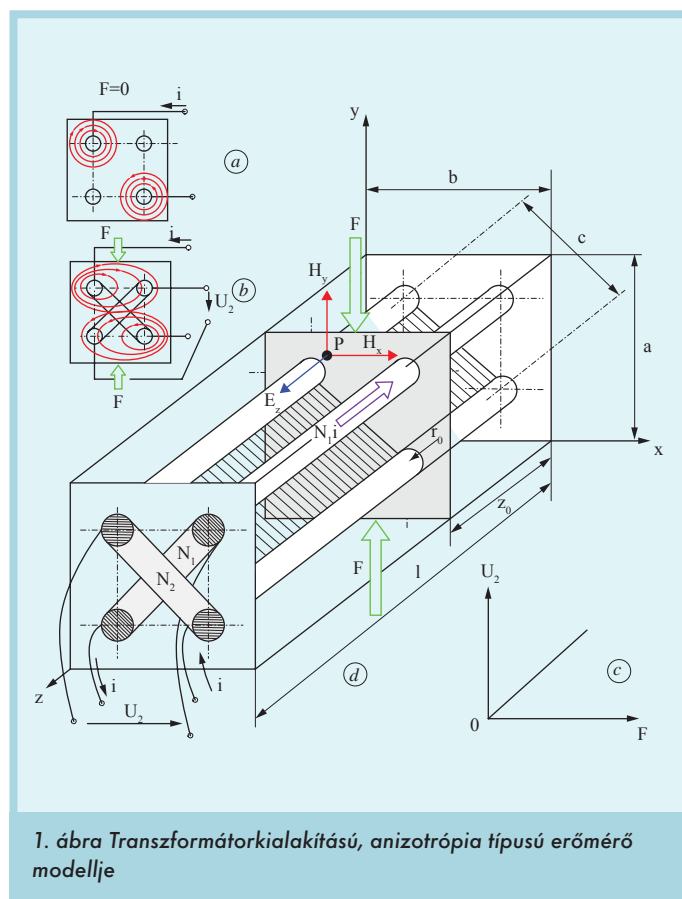
Energiaátalakulások szilárd testekben – magnetoelasztikus érzékelők 3.

Dr. Fock Károly

A magnetoelasztikus érzékelők típusainak tárgyalása során az előző részben megismertük a magnetoelasztikus hatás lineáris egyenletrendszerrel való leírásának hasznosságát, mivel az elektromágneses tér parciális differenciálegyenlet-rendszerének (a Maxwell-egyenleteknek) a felírásával könnyen tudunk kapcsolatot teremteni az érzékelő matematikai modellje és az egyes érzékelőtípusok működési elve között. Ezt a módszert a soron következő részben folytatjuk. A módszer a konstrukció kialakításához is hasznos információkat nyújt.

Anizotrópia típusú, transzformátorkialakítású erőmérők

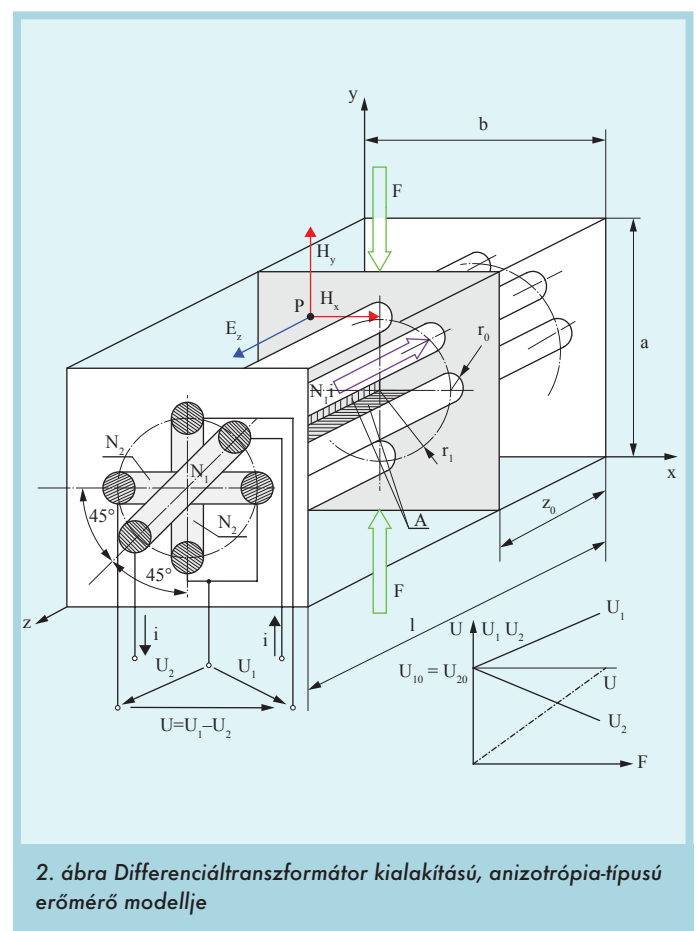
Transzformátor kialakítású erőmérő látható az 1. ábrán. A lemezelt vasmagban elhelyezett két tekercs síkja egymásra merőleges, ezáltal terhelésmentes állapotban a két tekercs között elvileg nincs csatolás (1. a. ábra).



Ismét egyenletesen megoszló terhelésként ható F mérendő erőt feltételezve az i áram hatására keletkező kör alakú erővonalak torzulnak, az erő függvényében arányosan növekszik azon fluxusvonalak száma, amelyek metszik a szekunder tekercs síkját (1. b. ábra), ezáltal a tekercsben U_2 feszültség indukálódik (1. c. ábra). A mechanikai modellből (1. d. ábra) látható, hogy a tekercsek szerepe a szimmetrikus elrendezés miatt felcserélhető.

A lineáris és kis hiszterézisű, statikus karakterisztika elérése nagyon gondos mágnesesanyag gyártási technológiát követel. Az érzékelő robusztus kivitelű, a környezeti hatások közül csak a hőmérsékletfüggés kompenzálásáról kell gondoskodni.

Az erőmérő differenciáltranszformátoros kivitelű modellje látható a 2. ábrán. Az N_1 menetszámú primer tekercsben folyó i áram hatására az egymásra merőleges, N_2 menetszámú tekercsekben terhelésmentes állapotban azonos nagyságú feszültségek indukálódnak, amelyek a mérendő erő hatására ellenkező előjellel változnak. A szekunder feszültségek szembekapcsolásával a különbségképzés kétszeres érzékenységet és nagyfokú zavarérzéketlenséget eredményez.



Magnetoelasztikus nyomatékmérők

Műszaki szempontból szinte kizárólag csak a forgó tengelyre ható csavarónyomaték mérésének van jelentősége (pl. mechanikai teljesítmény méréséhez). Konstruktív és mérés technikai szempontból ez mindenképpen nehézségeket okoz, hiszen az álló érzékelő és a forgó tengely közötti mágneses kapcsolatot kell megteremteni a δ nagyságú légrésen keresztül. A légrés állandóságára és csökkentésére kell törekedni a fordulatszám-függőség és az érzékenység jelentősebb mértékű lecsökkenésének a megakadályozása érdekében.

A matematikai modell megalkotásához a hengeres elrendezéshez jobban illeszkedő hengerkoordináta-rendszert célszerű alkalmazni az r , φ és z koordinátákkal. Az áttekinthetőséget növelő kétdimenziós tárgyalás ($\partial/\partial z=0$) most még tovább egyszerűsödik a mechanikai és elektromágneses hengerszimmetria miatt, vagyis formálisan $\partial/\partial\varphi=0$.

A Maxwell-egyenletek hengerkoordinátákban felírt alakjában ezeket az egyszerűsítéseket végrehajtva azt látjuk, hogy a

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial\varphi} \bar{H}_z - \frac{\partial}{\partial z} r \bar{H}_\varphi \right) &= \gamma \bar{E}_r \\ \frac{\partial}{\partial z} \bar{H}_r - \frac{\partial}{\partial r} \bar{H}_z &= \gamma \bar{E}_\varphi \\ \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} r \bar{H}_\varphi - \frac{\partial}{\partial\varphi} \bar{H}_r \right) &= \gamma \bar{E}_z \\ \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial\varphi} \bar{E}_z - \frac{\partial}{\partial z} r \bar{E}_\varphi \right) &= -j\omega \bar{B}_r \\ \frac{\partial}{\partial z} \bar{E}_r - \frac{\partial}{\partial r} \bar{E}_z &= -j\omega \bar{B}_\varphi \\ \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} r \bar{E}_\varphi - \frac{\partial}{\partial\varphi} \bar{E}_r \right) &= -j\omega \bar{B}_z \end{aligned} \right\} \frac{\partial}{\partial\varphi} = \frac{\partial}{\partial z} = 0$$

megmaradt egyenletek két független egyenletrendszerre esnek szét:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial}{\partial r} \bar{H}_z &= \gamma \bar{E}_\varphi \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \bar{E}_\varphi &= -j\omega \bar{B}_z \end{aligned} \right\}$$

ill.

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \bar{H}_\varphi &= \gamma \bar{E}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} \bar{E}_z &= j\omega \bar{B}_\varphi \end{aligned} \right\}$$

Az elektromágneses tér kiszámításához mindig azt a két egyenletet kell választani, amelyek a gerjesztés, ill. a mágneses kör kialakításához megvalósíthatók (tengelyirányú vagy tangenciális mágneses tér). A megoldáshoz azonban a mágnesezési függvény ismerete is szükséges.

Elemi szilárdságtani számításokkal az M_t csavarónyomaték hatására az R sugarú, körkeresztmetszetű rúdban a rúd tengelyétől r távolságra

$$\tau_{z\varphi} = \tau_{\varphi z} = \tau = \frac{2r}{R^4\pi} M_t,$$

az R_k külső R_b belső sugarú körgyűrű keresztmetszetű csőben pedig

$$\tau_{z\varphi} = \tau_{\varphi z} = \tau = \frac{2r}{\pi(R_k^4 - R_b^4)} M_t$$

(ahol $R_b \leq r \leq R_k$) nagyságú csúsztatófeszültség keletkezik, amely feszültségkomponensekkel a T_{ij} feszültségtenzor

$$(T_{ij}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tau \\ 0 & \tau & 0 \end{bmatrix}$$

alakú lesz. Ezeket a csúsztatófeszültségeket a mágnesezési függvény hengerkoordinátákra felírt alakjába behelyettesítve kapjuk:

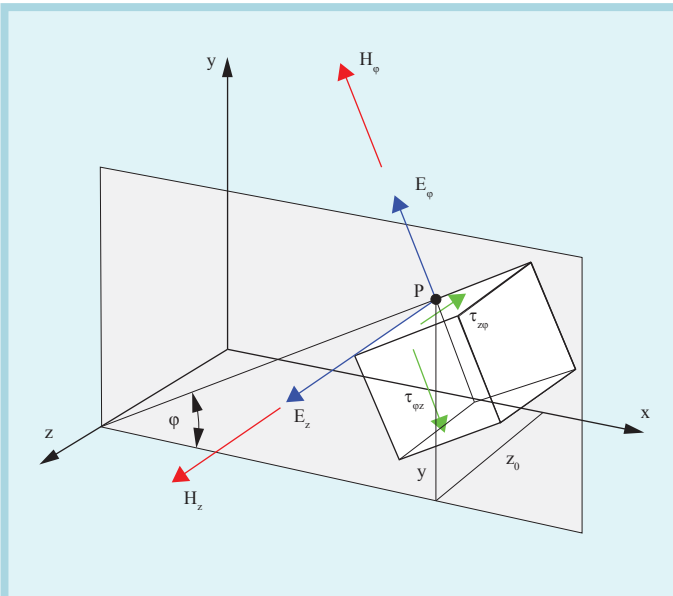
$$\left. \begin{aligned} \bar{B}_\varphi &= \mu_0 \bar{\mu} (\bar{H}_\varphi + \bar{d}_3 \tau \bar{H}_z) \\ \bar{B}_z &= \mu_0 \bar{\mu} (\bar{d}_3 \tau \bar{H}_\varphi + \bar{H}_z) \end{aligned} \right\}$$

Ha ezeket az indukciókomponenseket az egyszerűsített Maxwell-egyenletekbe behelyettesítjük, akkor azt látjuk, hogy a két megoldásrendszer csak terhelésmentes esetben független egymástól, M_t csavarónyomaték hatására már a négy egyenletből álló parciális differenciálegyenlet-rendszert együtt kell megoldanunk. A két elektromágneses tér ugyanis éppen a τ mechanikai feszültség hatására kerül kapcsolatba egymással. A tangenciális irányú \bar{B}_φ indukció a \bar{H}_z -től is, a \bar{B}_z tengelyirányú indukció pedig a \bar{H}_φ -től is függ. Másképpen fogalmazva, csavarónyomaték hatására a gerjesztőáram hatására létrehozott \bar{H}_φ -n kívül \bar{H}_z is keletkezik, ill. \bar{H}_z esetén a \bar{H}_φ komponens is figyelembe kell venni.

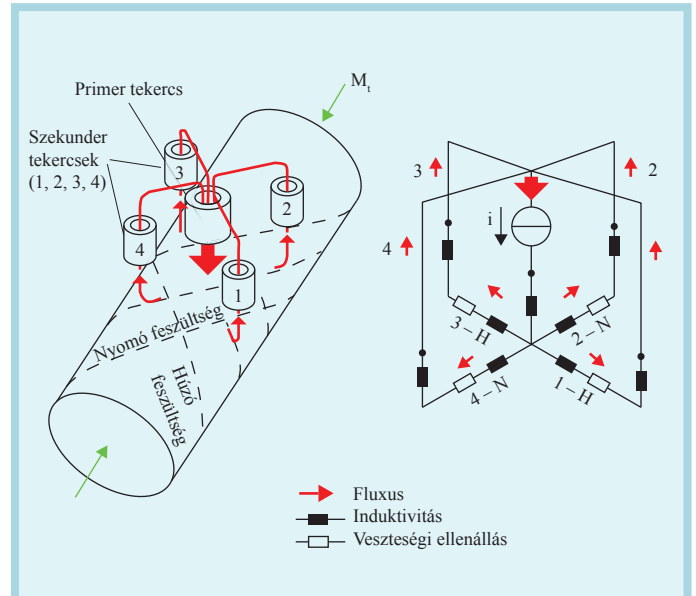
Az elektromágneses tér és a mechanikai feszültségállapot komponensei a 3. ábrán láthatók. A működés leírásához szükséges egyenletek (az érzékelő matematikai modellje):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial\varphi} = 0 \\ \tau_{z\varphi} &= \tau_{\varphi z} = \tau \\ -\frac{\partial}{\partial r} \bar{H}_z &= \gamma \bar{E}_\varphi \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \bar{H}_\varphi &= \gamma \bar{E}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} \bar{E}_z &= j\omega \mu_0 \bar{\mu} (\bar{H}_\varphi + \bar{d}_3 \tau \bar{H}_z) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \bar{E}_\varphi &= -j\omega \mu_0 \bar{\mu} (\bar{H}_z + \bar{d}_3 \tau \bar{H}_\varphi) \end{aligned} \right\}$$

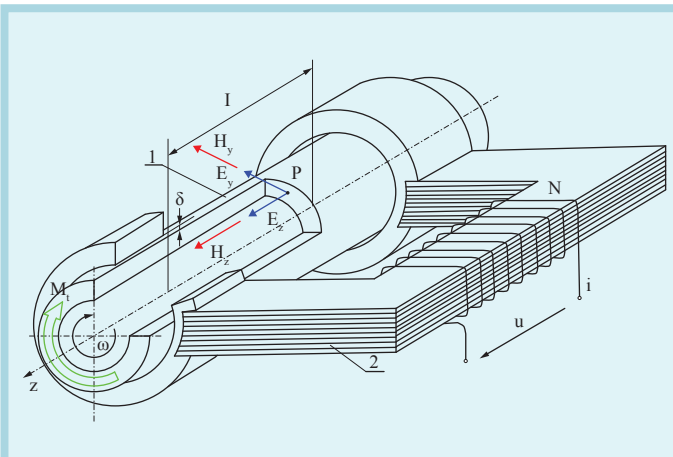
A 3. ábra, ill. a fenti matematikai modell alapján könnyen megérthető a 4. ábrán látható impedanciakimenetű nyomatékmérő működése. A magnetoelasztikus anyagból készült 1. jelű csőtengety és a 2. jelű lemezelts mag egy-egy gyűrű alakú járommal



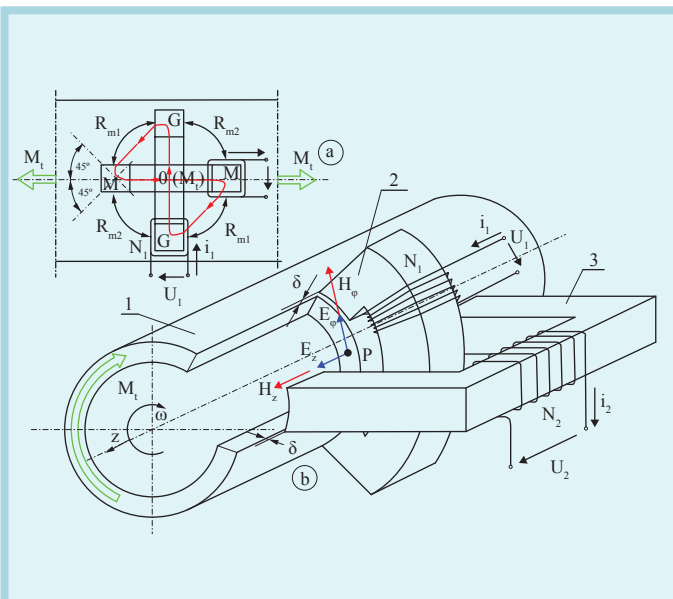
3. ábra Magnetoelasztikus nyomaték mérők mechanikai feszültségállapota és elektromágneses tere



6. ábra Differenciáltranszformátor kialakítású, magnetoelasztikus nyomaték mérő működési vázlatja



4. ábra Impedanciakimenetű, magnetoelasztikus nyomaték mérő



5. ábra Keresztmágneses, transzformátorkialakítású, magnetoelasztikus nyomaték mérő

alkotja azt a mágneses kört, amely a δ nagyságú légréseken keresztül záródik. Terhelésmentes esetben az i áram \vec{H}_z irányú teret hoz létre (ilyenkor $\vec{H}_\phi = 0$), amelyik a nyomaték hatására (a τ csúsztatófeszültség miatt) a $\vec{d}_3 \tau \vec{H}_z$ tangenciális irányú mágneses térerősségkomponens létrejöttét is eredményezi. A két komponensből ekkor egy csavarvonal szerű erővonalkép keletkezik, ami mindenképpen az erővonalhossz és egyben a mágneses ellenállás növekedését vonja maga után, amelyet impedanciaváltozásként érzékelhetünk.

A transzformátor típusú nyomaték mérő egyik fajtája látható az 5. ábrán. A transzformátor tekercsei az egymásra merőleges 2. és 3. jelű vasmagon helyezkednek el. A vasmagok mágneskörei az 1. jelű magnetoelasztikus csőtengelyen keresztül záródnak (természetesen a δ légrések közbeiktatásával). A mágnesköri geometriai elrendezése miatt kapta az érzékelő a keresztmágneses elnevezést.

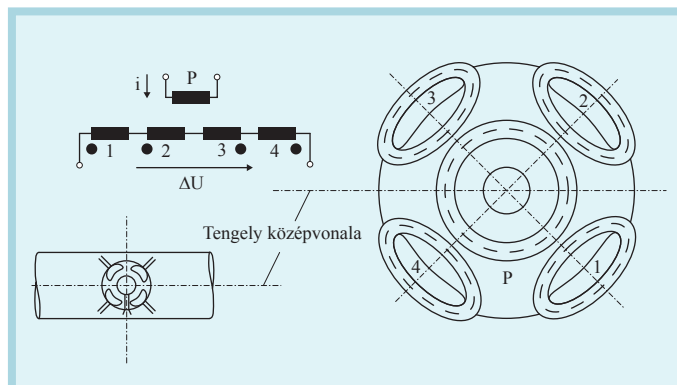
A működés megértéséhez tételezzük fel, hogy a transzformátorban az N_1 menetszámú tekercs a primer. Terhelésmentes esetben a primertekercs fluxusvonalai csak a 2. jelű vasmagon keresztül záródnak, mivel csak \vec{H}_ϕ térerősségkomponens van. Mágneses csatolás a primer és szekunder tekercs között nincs. Csavarónyomaték hatására azonban z irányú, $\vec{d}_3 \tau \vec{H}_\phi$ nagyságú térerősségkomponens is létrejön, amelynek erővonalai a 3. jelű mágneskörön keresztül záródnak, létrehozva ezáltal az U_2 feszültséget. A fluxusvonalak útját az 5. a. ábrán követhetjük. (Az olvasóra bízunk a működés ismertetését, ha a transzformátor tekercseinek a szerepét felcseréljük).

A soron következő differenciálkialakítású, transzformátoros nyomaték mérő működésének megértéséhez figyelembe kell venni, hogy az M_i csavarónyomaték hatására a tengelyre merőleges keresztmetszet minden egyes pontjában keletkező τ csúsztatófeszültség felbontható egy $+\sigma$ húzó- és egy $-\sigma$ nyomófeszültség összegére, ahol a σ feszültségkomponensek iránya a tengelyiránnyal 45° -os szöget zár be. A nyomaték mérő működési elve a 6. ábra alapján érthető meg.

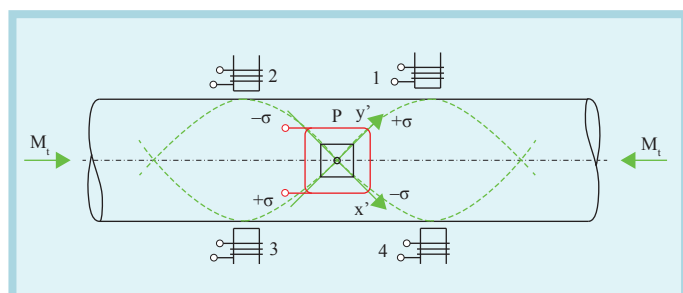
Az érzékelő állórészének középső pólusán helyezkedik el a primertekercs, amelynek árama hozza létre a gerjesztőfluxust. Geometriailag egy négyzet négy csúcsán elhelyezkedő, pólusokon levő 1, 2, 3 és 4 jelű tekercsek képezik a transzformátor szekunder tekercseit. A pólusok a magnetoelasztikus anyagból készült

tengelyhez légrésen keresztül csatlakoznak. A szekunder tekercsek síkjai a nyomó- és a húzófeszültségek síkjával párhuzamosak, és érzékelik a kiválasztott irányban keletkező fluxusokat.

A mágneses kör felépítését szemléltető ábrán a tekercsek induktivitásain kívül feltüntettük a magnetoelasztikus hatástól függő induktivitást és a soros veszteségi ellenállást is. A fluxusok útját nyilak jelölik. Az 1-H és 3-H irányban lévő impedanciák a $+\sigma$ húzófeszültség hatására csökkennek, a 2-N és 4-N irányban levők pedig a $-\sigma$ nyomófeszültség hatására nőnek. Állandó gerjesztés esetén az 1. és 3. tekercs fluxusa növekszik, a 2. és 4. tekercs pedig csökken, ami az egyes tekercsekben hasonló értelmű feszültségváltozást is jelent. A kimenőjel az $(U_1+U_3)-(U_2+U_4)=U_m$ nagyságú villamos feszültség. A különbségképzés miatt a környezeti hatások (elsősorban a hőmérsékletfüggés) befolyása a működésre igen kismértékű.

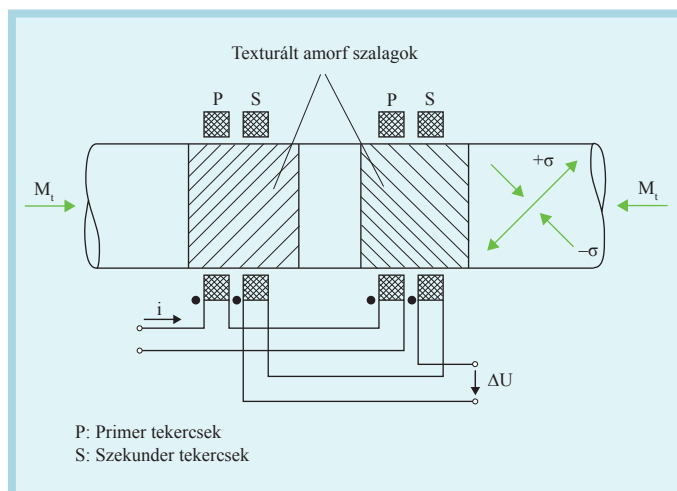


8. ábra Differenciáltranszformátor kialakítás, magnetoelasztikus nyomaték mérő szerkezeti kialakítása ferrit fazékvasmagból



7. ábra Koordinátatranszformáció a differenciáltranszformátor kialakítás, magnetoelasztikus nyomaték mérő matematikai modelljének felírásához

A nyomaték mérő matematikai modellje a 7. ábra segítségével egyszerűen felállítható abból a megfontolásból, hogy az érzékelő minden egyes pontjában a hengerpalást érintősíkjában a tengelyirányhoz képest 45° -os szöggel elforgatott koordináta-rendszer x' , ill. y' irányában a viszonyok azonosak.



9. ábra Koaxiális típusú, differenciáltranszformátoros, magnetoelasztikus nyomaték mérő elvi szerkezeti felépítése és működése

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y'} &= 0 & \frac{\partial}{\partial x'} &= 0 \\ -\frac{\partial}{\partial z'} \bar{H}_y &= \gamma \bar{E}_x & \frac{\partial}{\partial z'} \bar{H}_x &= \gamma \bar{E}_y \\ \frac{\partial}{\partial x'} \bar{H}_y &= \gamma \bar{E}_z & -\frac{\partial}{\partial y'} \bar{H}_x &= \gamma \bar{E}_z \\ \frac{\partial}{\partial z'} \bar{E}_x - \frac{\partial}{\partial x'} \bar{E}_z &= -j\omega \bar{B}_y & \frac{\partial}{\partial y'} \bar{E}_z - \frac{\partial}{\partial z'} \bar{E}_y &= -j\omega \bar{B}_x \\ \bar{B}_y &= \mu_0 \bar{\mu} [1 + (\bar{d}_1 - \bar{d}_2) \sigma] & \bar{B}_x &= \mu_0 \bar{\mu} [1 - (\bar{d}_1 - \bar{d}_2) \sigma] \end{aligned}$$

A matematikai modellből látható, hogy akkor kapunk nagy érzékenységet, ha olyan anyagot tudunk kiválasztani, amelynek $(\bar{d}_1 - \bar{d}_2)$ érzékenységekülönbsége nagy.

A 6. ábra elvi működési vázlatának viszonylagosan bonyolult kialakítása egyszerűen kivitelezhető a kereskedelmi forgalomban kapható ferrit fazékvasmagok felhasználásával (8. ábra).

A keresztmágneses és differenciálkialakítású transzformátoros érzékelők közös hibája a mágneses anyag inhomogenitásából és a szerelési pontatlanságból fakadó – egy körülfordulás során bekövetkező – moduláció. Csökkentésének lehetősége a tengelyt körül fogó több érzékelő elhelyezése és kimeneti jelük átlagolása.

Az amorf ferromágneses anyagok megjelenése azonban megteremtette a lehetőségét olyan – koaxiális típusúnak elnevezett – nyomaték mérő kifejlesztésének, amelyik minimálisra csökkenti ezt a modulációs hibát, és egyúttal az érzékenység is nagyobb,

a több érzékelőt tartalmazó nyomaték mérőkhöz képest pedig lényegesen egyszerűbb konstrukciójú.

A nem mágneses acélból készült tengelyre a 9. ábra szerint 45° -os magnetoelasztikus anizotrópiával készült amorf szalagokat hegesztettek. A nyomatékot a tengely veszi fel, a tengellyel együtt deformálódó szalagok csupán a jelátalakításban vesznek részt.

Az Ni váltakozó áramú gerjesztés tengelyirányú teret hoz létre, ez nyomatékmentes állapotban a szimmetrikus elrendezés miatt mindkét tekercsben azonos fluxust generál. A szekunder tekercsek szembekapcsolása miatt a ΔU feszültség zérus. Nyomaték hatására (negatív λ_s magnetostrikciót feltételezve) az ismert módon $+\sigma$ húzó- és $-\sigma$ nyomófeszültség keletkezik. A nyomófeszültség a jobb oldali szalagban a fluxusvezetést -45° -os irányban segíti, míg a bal oldaliban a húzófeszültség $+45^\circ$ -os irányban azt csökkenti. Az eredmény a jobb oldali fluxus növekedése és a bal oldali csökkenése, amelyik a szekunder tekercsben a ΔU kimeneti feszültséget hozza létre. A nyomaték előjelének megváltozása a kimeneti feszültség 180° -os fázistolásában jelentkezik.

Az érzékelő matematikai modellje megegyezik a 7. ábrához tartozó egyenletrendszerrel. Az állítás helyességéről könnyen meggyőződhetünk, ha a magnetoelasztikus fóliákat síkba terítjük és elvégezzük az $x'-y'$ koordinátatranszformációt. A $(\bar{d}_1 - \bar{d}_2)$ érzékenységekülönbségek növelését az amorf szalag anizotrópiájával érik el.

(Folytatjuk!)

editor@magyar-elektronika.hu