



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék

PhD Tézisfüzet

**MECHANIKAI IGÉNYBEVÉTELEK ÉS A MÁGNESES
HISZTERÉZIS KAPCSOLATA**

Készítette:

Sipeky Attila

Témavezető:

Prof. Iványi Amália

**Budapest
2009**

1 Bevezetés

A mágneses eszközökben fellépő, az elektromágneses tér időbeli változásából származó erőhatások nemcsak az anyag mechanikai terhelését eredményezik, hanem megváltoztatják az anyag mágneses tulajdonságait is. Kísérleti tapasztalatok alapján különböző erőhatások esetén azonos mágneses térben különböző indukció keletkezik az anyagban. Ez a jelenség Villari effektusként, vagy inverz magnetostrikcióként ismert. Több kutató mérte és modellezte a mágnesezettség változását külső mechanikai hatások esetén, akár csak a magnetostrikció jelenségét. Mindemellett a fémek mágneses viselkedése mechanikai igénybevételek hatására meglehetősen bonyolult jelenséget takar. Általában a mechanikai igénybevételek hatására változó mágnesezettség jellege függ az anyag magnetostrikciós tulajdonságaitól. A pozitív magnetostrikciójú anyag a mágneses térerősség növelésekor megnyúlik, illetve mágnesezettsége megnő húzóerővel való terhelés esetén. A negatív magnetostrikciójú anyag a mágneses térerősség növelésekor összezsugorodik, illetve mágnesezettsége csökken húzóerő alkalmazása esetén. A legtöbb fém és fémötvözet mindkét tulajdonsággal rendelkezhet az anyagot ért mágneses térerősség mértékétől függően. Alkalmazott mechanikai igénybevételek hatására mágnesezettségük különböző módon alakul különböző erősségű mágneses térben. Megfordítva, ezen anyagok magnetostrikciós tulajdonsága nemcsak a mágneses térerőtől függ, hanem az anyagot ért, ill. az alkalmazott mechanikai hatásoktól is.

Kutatómunkám célja, hogy ezen hatásokat megvizsgáljam egy adott anyag esetében, a jelenséget kielemezzem, és modellezem. A vizsgálat tárgyául a Fe-(3,1 wt%)Si fémötvözetet választottam, mely a napjainkban használatos transzformátorlemezek alapanyaga. A feszültségfüggő mágneses mérések elvégzéséhez mérőelrendezést fejleszték ki, és különböző alakú és periódusidejű gerjesztőjelekkel, különböző mechanikai feszítettség értékeknél vizsgálom a mágneses karakterisztikát, majd a mérési eredményeket kiértékelem.

A mérési eredmények ismeretében mechanikai feszültségfüggő mágneses skalár hiszterézis modellt fejleszték ki, melyet a mérési eredményekre illeszttek, és pontosságát tetszőleges mechanikai feszültségérték megadása mellett a mérési eredményekkel összehasonlítva vizsgálom. A mechanikai feszültségfüggő mágneses skalár hiszterézis modellt alapul véve kifejleszték egy izotrop és egy anizotrop mechanikai feszültségfüggő mágneses vektor hiszterézis modellt, és megvizsgálom működését különböző mechanikai feszültségértékek esetén.

Az anizotrop mechanikai feszültségfüggő mágneses vektor hiszterézis modellt beépítem egy térszámítási modellbe, ahol összekapcsolom az örvényáramokkal terhelt elektromágneses teret a mechanikai erőhatások terével. E térszámítási feladatot a COMSOL Multiphysics és a MATLAB programozói környezetek együttes használatával valósítom meg. Az összekapcsolás eredményét egy kétdimenziós elektromágneses példán keresztül mutatom be, kihangsúlyozva a modellezett anyagban jelenkező mechanikai változásokat.

2 Feszültségfüggő mágneses mérések

Kifejlesztettem és megvalósítottam két mérési elrendezést, mely alkalmas a külső húzóerővel terhelt mintadarab mágneses karakterisztikájának mérésére. A méréseket GO Fe-(3,1 wt%)Si (Grain-Oriented) fémötvözetből készült, hidegen hengerelt transzformátor lemezekkel végeztem. Ezen lemezek esetén a mágneses főtengely, az „easy axis”, amely irányban az anyag a legkönnyebben mágnesezhető, majdnem egybeesik a hengerlési iránnyal, és síkja közel párhuzamos a lemez felületével. Ezt az anyag szerkezetet, mágneses domén elrendeződést Goss textúrának nevezik.

A felhasznált lemezek hossza 250 mm, szélessége 12 mm, vastagsága 0,27 mm a csavaros feszítőszerkezettel történő mérések esetén. Az anyag maximális teljes magvesztése $W_{15/50}=0,89$ W/kg 1,5 T-nál, 50 Hz-en. Az anyag sűrűsége 7.65 kg/dm³, folyáshatára 335 MPa, maximális húzófeszültsége 350 MPa, maximális nyúlása 9.5 %.

A mérések elvégzéséhez egy számítógéppel segített mérési eljárást dolgoztam ki. A mérőberendezés része két számítógép, melyek egymástól függetlenül mérik a mechanikai, illetve a mágneses tulajdonságokat. A mechanikai erőhatás kifejtése a csavaros rendszerű, kézi működtetésű húzógéppel valósul meg, melynél az erőhatás mérése két, nyúlásmérő bélyegekkel (HBM 1-LY11-6/120 hőmérséklet optimalizált) ellátott etalon lemezzel történik. Az etalon lemezekon lévő nyúlásmérő bélyegek ellenállás változását egy Spider 8 mérőberendezésen keresztül az 1. számítógépen futó Catman Express szoftver rögzíti, majd ebből számítjuk húzóerő értékét.

A mágneses térerősség és fluxus értékét a 2. számítógép regisztrálja a tekercsen mérhető adatok alapján. A primer tekercset árammal gerjesztve a szekunder tekercsen az „üresjárás” feszültséget mérve a mágneses karakterisztika $H-B$ változói meghatározhatók. A gerjesztő jelet egy, a LabVIEW programkörnyezetben kifejlesztett virtuális mérőműszer generálja, melyet egy KIKUSHUI PBX 20-20 jelgenerátor formál áramjellé. A mérni kívánt értékeket szintén a virtuális mérőműszer fogadja egy NI PCI-6030E típusú DAQ mintavételező kártyán keresztül [5].

A feszítőszerkezet nagy előnye, hogy erős konstrukciója révén nagy húzófeszültséget lehet előidézni a vizsgált anyagban. Hátránya viszont, hogy nem képes nyomóerőt kifejteni a mintadarabra.

A második mérőelrendezésben egy módosított Epstein keretbe foglalt lemezekon, az előzőhöz hasonló módon, a két számítógépen, egymástól függetlenül mértem az anyag mágneses és mechanikai tulajdonságait. A húzóerőt egy S9 típusú Hottinger-Baldwin erőmérő cellán keresztül alkalmaztam, melynek maximális húzóereje 5kN. Az erőmérő cella jelét ebben az esetben is a Spider 8 mérőberendezésen keresztül az 1. számítógépen futó Catman Express szoftver rögzíti.

A mintadarab anyaga ugyanaz, mint az előző mérőelrendezés esetén, a vizsgált lemezek csak méretben különböznek. Az Epstein keret lemezei 340 mm hosszúak, 30 mm szélességűek, vastagságuk 0,27 mm. Az összeépített keret közepes mágnesezési hossza 250x250 mm. Az erőhatás itt is egy csavarrendszeren keresztül adható át a mintadarabra, de egy az alaphoz rögzített axiális csapágnak köszönhetően a szerkezet alkalmas nem csak húzóerő, de nyomóerő kifejtésére is [7].

A mérési eredmények alapján az anyag mágneses tulajdonságait kielemeztem, és megállapítottam, hogy a mágneses tulajdonságok változása külső mechanikai feszültség hatására igen összetett jelenség, és a mágneses karakterisztikát erőteljesen befolyásolják a külső erőhatások.

A mérések igazolták, hogy a mérési frekvencia növelésével megnő az energiaveszteséget. Ezt azzal magyarázhatjuk, hogy a frekvencia növelésével a lemezben keletkező örvényáramok „klasszikus veszteséget” eredményeznek. Az egyszerű mérések során azonban nem lehet elkülöníteni frekvencia növekedését követően a fel és lemágnesezésből származó, a domének gyors átbillenésekor keletkezett „mikro örvényáramok” hatását, amely a gyakorlatban egy további, a járulékos veszteségekben megjelenő energiaveszteséget eredményez.

A mérési eredmények mindkét mérőberendezés esetén hasonló viselkedést mutattak, a csekély eltérés abból ered, hogy a módosított Epstein keret esetén pontosabban meg lehet határozni a záródó fluxusvonalak hosszát, illetve a csavarós feszítőrendszer esetén a mintadarab és a szerkezet anyaga nem pontosan egyezik.

A méréseket különböző gerjesztő jel esetén megismételtem. A méréshez alkalmaztam szinuszos gerjesztőjelet, mely egy frekvenciakomponenst tartalmaz, ill. ezzel megegyező amplitúdójú háromszög jelet, mely több frekvencia-összetevőből áll. Az összehasonlításnál elsődleges cél volt, hogy a megfelelő áramerősségű gerjesztéssel elérjük, hogy az anyag „szaturációs” állapotba kerüljön, és összehasonlítsuk az energiaveszteségeket.

A mérési eredmények azt mutatták, hogy háromszög jel alkalmazásával nagyobb a mágnesezettség értéke, mint szinuszos jel esetén azonos mágneses térerősség esetén. Háromszög jel alkalmazásával csökken az energiaveszteség, ez a különbség a szinuszos gerjesztéssel kapott eredményhez képest 18-25% a gerjesztő jel frekvenciájától függően [14].

A mérések alapján anyagunkban húzófeszültség növekedésének hatására növekszik az anyag mágnesezettsége, illetve csökken az energiaveszteség. A jelenség oka szoros kapcsolatban van az anyag magnetostriktív tulajdonságával. A pozitív magnetostriktív anyag a mágneses térerősség növelésekor megnyúlik, illetve mágnesezettsége megnő húzóerővel való terhelés esetén. A negatív magnetostriktív anyag a mágneses térerősség növelésekor összehúzódik, illetve mágnesezettsége csökken húzóerő alkalmazása esetén. A legtöbb fém és fémötvözet mindkét tulajdonsággal rendelkezik az anyagot ért mágneses térerősség mértékétől függően.

A húzófeszültség növelésével az energiaveszteség exponenciálisan csökkent minden frekvenciatartományban. A változás mértéke a húzófeszültség nélküli és a maximális ($\sigma = 136,66$ MPa) feszültség esetén mért veszteségnél 25-48%-os különbséget eredményez mérési frekvenciától függően. A húzófeszültség hatása az energiaveszteségre mindkét gerjesztőjel típusnál megmutatkozott. Azonos frekvencián a szinuszos, ill. háromszög jellel gerjesztett mágneses karakterisztikából kiszámítható veszteségek közötti eltérés 21-23 %-os értéket mutat a húzófeszültség mértékétől függően. Kimutatható az is, hogy a mérési frekvencia növelésével az alkalmazott mechanikai stressz hatása fokozódik. Ez a hatás tovább növelhető a tekercs belsejében lévő egymástól elszigetelt fémlamezek számának növelésével [13].

Keresztirányban vágott lemezek feszültségfüggő mágneses mérései is hasonló viselkedést mutatnak mindkét mérőberendezés alkalmazása esetén. A gerjesztési frekvencia növelésével nő a hiszterézisgörbe területe, nő az energiaveszteség, a mechanikai feszültség növelésével megváltozik a görbe alakja, csökken az energiaveszteség, igaz, keresztirányú mérések esetén ez a változás nem olyan nagy mértékű.

Összegzés képen elmondható, hogy a vizsgált anyag mágneses tulajdonságai igen érzékenyek az alkalmazott húzófeszültségre. A húzófeszültség növelésével nő az anyag mágnesezettsége, csökken az energiaveszteség azonos térerősség esetén. Mindez függ az anyag magnetostríkción tulajdonságától, mely befolyásolja az anyag mechanikai hatásoktól függő mágneses tulajdonságait. A mérési frekvencia növelésével az előbb említett jelenség egyre jelentősebb [16].

3 Feszültségfüggő mágneses hiszterézis modell

Kifejlesztettem egy erősen mérési eredményeken alapuló mechanikai feszültség és mérési frekvenciafüggő mágneses hiszterézis modellt. Elvégeztem a modell illesztését a mérési eredmények alapján, és kidolgoztam egy interpolációs eljárást a modell paramétereinek meghatározására tetszőleges mechanikai feszültség és gerjesztési frekvencia értékek mellett [12].

Ötféle gerjesztési frekvencia mellett (1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz és 20 Hz) egyenként öt mechanikai feszültségértékkel (0 MPa, 34,16 MPa, 68,33 MPa, 102,49 MPa, 136,66 MPa) végzett mérések eredményeit értékeltem ki, így 25 mágneses hiszterézis karakterisztikát kaptam. Az egyes hiszterézis karakterisztikákat Everett felületek segítségével illesztettem a modellre, majd a tetszőleges mechanikai feszültség és gerjesztési frekvencia értékek megadásakor a mért értékekből számított Everett felületek között végeztem 2D spline interpolációt, ezáltal előállítva a megadott paraméterekre illeszkedő új Everett felületet.

A modell pontosságának vizsgálatára elvégeztem egy mágneses karakterisztika mérést 6 Hz mérési frekvencián 115,66 MPa mechanikai húzófeszültséggel, és összehasonlítva a modell által alkotott karakterisztikával a maximális hiba értéke 0,76%, az átlagos négyzetes hiba értéke 0,17% lett. A kis mértékű hiba azt igazolja, hogy a modell alkalmas az anyag mágneses tulajdonságainak mechanikai feszültség és gerjesztési frekvencia értékektől való függésének bemutatására az adott mérési tartományon belül [2].

A modell hátránya a nagy számítási igény, és az erős függőség a mérési eredményektől. Ezért a következő lépés egy analitikus modell kifejlesztése volt, ahol egy matematikai formulával leírható a mágneses karakterisztika mechanikai feszültségfüggése. Ezen modell alapjául a skaláris mágneses karakterisztikát jellemző Preisach-modellt választottam, ahol a karakterisztika milyenségét elsősorban a Preisach sűrűségfüggvény határozza meg.

Az alapgondolat az volt, hogy ez a sűrűségfüggvény $P(\alpha, \beta, \sigma)$ tartalmazza a mechanikai feszültség értékét is, ezzel befolyásolva a hiszterézis görbe alakját. Két eloszlástípust vizsgálva, a normál, azaz Gauss, és a Gauss-Lorentz eloszlások sűrűségfüggvényét átalakítva kidolgoztam egy paraméterillesztési módszert, melynek lényege, hogy adott mérési frekvencián a sűrűségfüggvény szabad paraméterei közül a

feszültségtől független paraméterek értékeit $\sigma=0$ MPa esetén meghatároztam, majd második lépésben ezeket a paramétereket felhasználva egy tetszőleges $\sigma \neq 0$ MPa esetén a feszültségfüggő paramétereket is illesztettem a mérési eredményekhez. Ezután az illesztett paraméterekkel és a feszültségérték tetszőleges módosításával adott gerjesztési frekvencián a modell képes prezentálni az anyag mágneses tulajdonságainak mechanikai feszültségfüggését.

Mindkét eloszlástípus esetén a modell nagyon jó pontossági értékeket mutatott (pl. 1 Hz gerjesztési frekvencián feszültségértéktől függően az átlagos négyzetes hiba értéke a mérés és a szimuláció között 0,03%-0,06% között van) [9]. Normál eloszlás esetén kevesebb szabad paramétert kell illeszteni, így kisebb a számításigénye, ezért ez a modellt választottam az elkészítendő vektoriális modell alapjául.

Az előbb említett analitikus modellt felhasználva kifejlesztettem egy izotrop, ill. egy anizotrop mágneses vektorhiszterézis modellt, mely képes szimulálni a mágneses anyag mechanikai feszültségfüggését. A feszültségfüggő mágneses vektormodell különböző irányú feszültségfüggő mágneses skalármodellek szuperpozíciójaként épül fel. A mágnesezettséget befolyásoló térerősségvektor adott irányokra vetített összetevői befolyásolják az egyes skalár modellekben keletkező indukció értékeket, melyek vektoriális összege határozza meg a vektormodell mágneses indukciójának irányát és mértékét.

A dolgozatomban bemutatott példa két dimenzióban mutatja be a $\sigma=0$ MPa és $\sigma=136,66$ MPa esetek mágneses vektoriális viselkedésének összehasonlítását. Az összehasonlításból kiderül, hogy az anizotrópia módosítja a vektoriális viselkedés dinamikáját, a mechanikai feszültség megváltoztatja a karakterisztika alakját, és módosítja a mágnesezettség értékét [1, 10, 11].

4 Mágneses térszámítás végelem módszerrel

Megvalósítottam az általam kifejlesztett mechanikai feszültségfüggő anizotrop mágneses vektorhiszterézis modell implementálását a mágneses térszámításba végelem módszert alkalmazva. A térszámítási feladatban összekapcsoltam az örvényáramokkal terhelt mágneses és a mechanikai teret leíró egyenletrendszereket, melynek eredménye erős magnetoelasztikus kapcsolódás lett. A feladat numerikus megoldását a COMSOL Multiphysics és a MATLAB programozói környezetek együttes használatával valósítom meg [4].

A vizsgált anyag mágneses viselkedése a Maxwell egyenletek segítségével írható le. A vizsgált példát az örvényáram-terekre felírt egyenletekkel modelleztem, az egyenleteket az $\mathbf{A}, \mathbf{V} - \mathbf{A}$ potenciálformulák segítségével definiáltam. Nemlineáris anyagok esetén a mágneses indukció \mathbf{B} és a mágneses térerősség \mathbf{H} között hiszteretikus $\mathbf{H}\{\cdot\}$ kapcsolat van, melynek kezelését egyéni módon kell megoldani. A problémát fixpont technikával oldottam meg, melynek során a hiszteretikus összefüggést egy lineáris és egy nemlineáris részre bontottam, ahol a nemlineáris tag értékét minden időlépésben iteratív módon számítottam [15].

A térszámítási kapcsolat működését a módosított Epstein-keret kétdimenziós modelljén mutattam be, kihangsúlyozva a vizsgált lemezanyag elektromágneses térszámítás mellett

jelentkező mechanikai tulajdonságait, változásait [3]. A mérési eredményekkel összehasonlítva a szimuláció eredményét 1 Hz és 10 Hz gerjesztési frekvencia és 136,66 MPa feszültségérték esetén az átlagos négyzetes hiba néhány százalék lett, így térmodell alkalmas a nagy húzófeszültséggel terhelt transzformátor lemezanyagok mechanikai feszültségfüggő mágneses vizsgálatára.

5 További kutatómunka

Munkámban bemutattam a kifejlesztésre került mérőberendezéseket, melyekkel statikus erőhatással terheltlen mértem a kiválasztott anyag mágneses tulajdonságait. Emellett a berendezések alkalmasak lennének dinamikus mechanikai terhelésre is kisebb átalakítás után, illetve megoldandó feladat a dinamikus feszültségekkel való mérés esetén a mechanikai és mágneses adatok szinkronizálása.

A kifejlesztett mágneses hiszterézis modell a mechanikai feszültség statikus értékét tartalmazza, és a dinamikus változások követése a modell módosítását igényli. Az analitikus modell adaptálása csak kisebb finomítást jelent, viszont a numerikus megvalósítása annál több problémát vet fel, leginkább a megnövekedő számításigény miatt.

Munkámban bemutattam a kifejlesztésre került mechanikai feszültségfüggő mágneses vektorhiszterézis modell beillesztésének technikáját az elektromágneses térszámításba. A megvalósított példa a módosított Epstein-keret kétdimenziós modellje volt, habár a háromdimenziós eset implementálása sem bonyolultabb feladat, a problémát leginkább a nagy számítási igény jelenti. A végeselemes modell finomítása és háromdimenziós megvalósítása érdekében nagyobb kapacitású, többprocesszoros vagy több számítógépes grid rendszert kellene alkalmazni, és a programkódokat a párhuzamos számításokra optimalizálva alkalmazni.

6 Új tudományos eredmények összefoglalása

I. Tézis

Kidolgoztam és megvalósítottam két mechanikai feszültségfüggő mágneses karakterisztika mérésére alkalmas rendszert és egy mérési eljárást, mely egymástól függetlenül rögzíti, kezeli és tárolja a vizsgált mágneses és mechanikai értékeket. Az Fe-(3.1 wt%)Si anyagú transzformátorlemezek vizsgálatával olyan adatsorhoz jutottam, mely szisztematikusan jellemzi az anyag mechanikai feszültségfüggő mágneses viselkedését, és az adatsor alkalmas a kifejlesztett mechanikai feszültségfüggő mágneses hiszterézis modell mérési eredményekhez való illesztésére. A mérések adatait kiértékelve megállapítom, hogy a vizsgált anyagot folyáshatára 40%-ának megfelelő mechanikai feszültséggel terhelve a mágneses energiavesztés akár 30%-kal csökkenthető [5,6, 9, 14, 16].

Részletezve:

- Kidolgoztam és megvalósítottam két mechanikai feszültségfüggő mágneses karakterisztika mérésére alkalmas rendszert. A feszítő csavaros berendezés alkalmas nagy feszítőerő kifejtésére a masszív konstrukciónak köszönhetően, és alkalmas az erőhatás pontos beállítására. A módosított Epstein-keret az erőmérő cellával nagy érzékenységgel, így alkalmas a lemezeken jelentkező magnetostriktív erő mérésére is. A módosított Epstein-keret szerkezete alkalmas húzó- és nyomóerő kifejtésére is.
- Kidolgoztam egy mérési eljárást, melynek során a mágneses és a mechanikai mérési eredményeket külön számítógépek kezelik, tárolják. A mechanikai paraméterek rögzítése Catman Express programcsomag segítségével történik, míg a mágneses mérésekhez szükséges gerjesztőjeleket, az adatgyűjtést, az adatok feldolgozását, szűrését és tárolását a LabVIEW programozói környezetben általam kifejlesztett virtuális berendezés végzi.
- Különböző szempontok alapján méréseket végeztem Fe-Si anyagú transzformátorlemezekon. Figyelembe véve a szakirodalomban fellelhető eredményeket, a mérések elemzése után elmondhatom, hogy a mechanikai feszítettség megkönnyíti az anyag felmágnesezését, csökkenti a mágnesezési folyamat járulékos energiavesztését pozitív magnetostriktív anyag esetén.

II. Tézis

Kidolgoztam két, a mechanikai feszültségeket figyelembevevő, mágneses hiszterézismodellt, egy interpolációs technikán alapuló modellt és egy analitikus modellt. Az első modell esetében a modell identifikáció a mért hiszterézis karakterisztikákból számított Everett felületek segítségével történik, és a mechanikai feszültségértéktől való függésen kívül a gerjesztési frekvencia karakterisztikaformáló hatását is követi. A második modell esetében a Preisach modell sűrűségfüggvényét egészítettem ki a jól ismert Gauss és a Gauss-Lorentz eloszlást vizsgálva a mechanikai feszültség paraméterével, és a módosítás eredményeképp a modellem alkalmas a mágneses karakterisztika mechanikai feszültségfüggésének jellemzésére. Kidolgoztam egy mechanikai feszültségfüggő izotróp és anizotróp mágneses vektorhiszterézis modellt, mely a normál eloszlásra alkalmazott skaláris mágneses modell kiterjesztését jelentette a vektortérre [1, 2, 7, 8, 10, 11, 12, 13].

Részletezve:

- Kidolgoztam egy interpolációs technikán alapuló mechanikai feszültség- és mérési frekvencia-függő mágneses skaláris hiszterézis modellt. A modell identifikációja erősen mérésalapú, nagy számításigényű, ám igen pontos szimulációt tesz lehetővé.
- Kifejlesztettem egy analitikus mechanikai feszültségfüggő mágneses skaláris hiszterézis modellt, melyben a Gauss és a Gauss-Lorentz eloszlások sűrűségfüggvényének kiterjesztésével a módosított Preisach modell képes követni a mechanikai feszültségek okozta mágneses karakterisztika-változásokat. Az identifikációt követően a modell működését összehasonlítottam a mérési eredményekkel, és mindkét eloszlás esetében az egyezés igen nagy pontosságú volt.
- Kiterjesztettem a feszültségfüggő skaláris hiszterézis modellt a vektortérre, és kidolgoztam egy mechanikai feszültségfüggő izotróp és anizotróp mágneses vektorhiszterézis modellt, melynek alapjául a Gauss eloszlás sűrűségfüggvényét választottam a pontosság és számításigény figyelembevételével. Szimulációt végeztem a kidolgozott modellel forgó mágneses térben az anyag mágneses tulajdonságainak vizsgálatára, figyelembe véve a mechanikai feszültségeket. Habár a bemutatott példa kétdimenziós, a modell leírása tartalmazza a háromdimenziós tulajdonságok leírására is.

III. Tézis

Végeselem módszer felhasználásával implementáltam a kifejlesztett mechanikai feszültségfüggő anizotróp mágneses vektorhiszterézis modellemet az örvényáramokkal terhelt mágneses térszámításba. Erős magnetoelasztikus kapcsolatot alakítottam ki a térszámítási feladat megoldására, melybe az általam kifejlesztett modellt implementálva a polarizációs módszerrel kezeltem a mágneses indukció \mathbf{B} és a mágneses térerősség \mathbf{H} közötti hiszteretikus kapcsolatot, és az egyenletrendszert fixpont iteráció segítségével oldottam meg. Összehasonlítottam a térszámítási feladat szimulációs és mérési eredményeit, mely során a mágneses karakterisztika és a mért hiszterézis közötti négyzetes eltérés kevesebb, mint 5% [3, 4, 15].

Részletezve:

- A Maxwell egyenletekből kiindulva megfogalmaztam a feladat megoldásához szükséges egyenleteket, definiáltam a peremfeltételeket. Meghatároztam az erős magnetoelasztikus kapcsolat megvalósításához szükséges egyenletrendszert.
- Elvégeztem az általam kidolgozott mechanikai feszültségfüggő anizotróp mágneses vektorhiszterézis modell beillesztését a numerikus térszámításba végeselem módszer felhasználásával. A mágneses egyenletek megfogalmazásához az $A-V$, A potenciálformulákat használtam. A mágneses indukció \mathbf{B} és a mágneses térerősség \mathbf{H} közötti hiszteretikus kapcsolat kezelésére polarizációs módszert alkalmaztam, és az egyenletrendszert fixpont iteráció segítségével oldottam meg.
- Összehasonlítottam a szimulációs és mérési eredményeket. A kiszámított átlagos hiba értéke alapján a kifejlesztett modell kis eltéréssel képes a vizsgált anyag örvényáramteres mágneses modellezésére nagy mértékű mechanikai feszítettség esetén.

Irodalomjegyzék

- [1] A. Sipeky, A. Ivanyi, Anisotropic magnetic vector hysteresis model under applied stress, *Third International PhD Symposium in PÉCS*, Pécs, Hungary, 2007, pp. 43.
- [2] A. Sipeky, A. Ivanyi, Identification of a Preisach-based stress and frequency dependent magnetic hysteresis model, *Proceedings of the Fifth International Conference on Engineering Computational Technology*, Las Palmas, Spain, 2006, p. 12.
- [3] A. Sipeky, A. Ivanyi, Magnetic FEM simulation of a modified Epstein frame with applying external mechanical stress, *Fourth International PhD Symposium in PÉCS*, Pécs, Hungary, 2008, pp. 52–53.
- [4] A. Sipeky, A. Ivanyi, Magnetic field computation with stress dependent hysteresis, *Proceedings of the Sixth International Conference on Engineering Computational Technology*, Athens, Greece, 2008, p. 13.
- [5] A. Sipeky, A. Ivanyi, Magnetic hysteresis under applied stress, *Physica B*, vol. 372, 2006, pp. 177–180.
- [6] A. Sipeky, A. Ivanyi, Magnetic measurement and simulation under applied mechanical stress, *XXV. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium „Science in Practice”*, Schweinfurt, Germany, 2007, pp. 79–87.
- [7] A. Sipeky, A. Ivanyi, Magnetic measurement and vector modeling under applied mechanical stress, *Pollack Periodica*, vol. 3, no. 1, 2008, pp. 53–65.
- [8] A. Sipeky, A. Ivanyi, Measurement and modeling of the stress dependent magnetic characteristic, *Proceedings of the ISEF'2007 International Symposium on Electromagnetic Fields*, Prague, Czech Republic, 2007, pp. 362–363.
- [9] A. Sipeky, A. Iványi, Mechanikai igénybevételek hatása a mágneses karakterisztikára, *Informatika a Felsőoktatásban 2008*, Debrecen, Magyarország, 2008, p. 8.
- [10] A. Sipeky, A. Ivanyi, Preisach-based stress dependent magnetic hysteresis models, *Proceedings of the 10th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, Brasov, Romania, vol. I., 2006, pp. 3–8.
- [11] A. Sipeky, A. Ivanyi, Preisach-type stress-dependent magnetic vector hysteresis model, *Physica B*, vol. 403, 2008, pp. 491–495.
- [12] A. Sipeky, A. Ivanyi, Stress dependent magnetic vector hysteresis model, *Second International PhD Symposium in PÉCS*, Pécs, Hungary, 2006, pp. 51.
- [13] A. Sipeky, A. Ivanyi, Stress dependent Preisach-type magnetic hysteresis model, *First International PhD Symposium in PÉCS*, Pécs, Hungary, 2005, pp. 52.
- [14] A. Sipeky, A. Ivanyi, Stress effects on magnetic properties under different shape of excitation, *Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Fields*, Baiona, Spain, 2005, pp. 199–202.
- [15] A. Sipeky, A. Ivanyi, Stress-dependent hysteresis model implemented to the magnetic field calculation, *Proceedings of the 13th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, Athens, Greece, 2008, pp. 128.
- [16] A. Sipeky, A. Ivanyi, Virtual laboratory for magnetic measurements, *Proceedings of the International Conference on Engineering Education*, Pécs, Hungary, 2008, p. 8.