

Válasz Vajda István Professzor Úr opponensi véleményére

Köszönöm Vajda István Professzor Úr alapos és gondos szakértői munkáját, gondolatébresztő értékes megjegyzéseit, különös tekintettel a kidolgozott módszerek gyakorlatias oldalról való megközelítésére, amelyek újabb kutatási irányokat inspirálnak.

Ilyen terület a villamos gépes problémák iránya, főleg a járműhajtásokban alkalmazott villamos forgógépek területe, amely a Széchenyi István Egyetem Járműipari Kutató Központjában folyó kutatások egy kiemelt területe, s úgy látom, a győri járműipar érdeklődésére is egyre hangsúlyosabban számítot tart. Másik - főleg alapkutatási - téma a szupravezetőkben fellelhető hiszterézises jelenségek vizsgálata. Jóleső érzés, hogy a hiszterézis modellezése, tervezésbe történő felhasználása napjainkban ismét egyre jobban előtérbe kerül. A felmerülő ipari igények ma találkoznak a számítástechnika nagyon erőteljes fejlődésével, miáltal egyre pontosabb számításokat lehet végezni az egyre szigorúbb követelményeknek megfelelő modern tervező rendszerek segítségével.

Az alábbiakban a Bíráló kérdéseire és megjegyzéseire kívánok reagálni.

A Bíráló kérdése (1): A mérés zajosságának csökkentésére megítélésem szerint kínálkozott volna lehetőség. A zajok feltehetően nem vezettek le lehetek, így lehetőségként vetem fel a teljes mérési elrendezés árnyékolását, ami az elrendezés méreteit ismerve illetve figyelembe véve megoldható lett volna. A digitális szűrés ügyes megoldás, ám a zajok eredendő okainak kiiktatása vagy lényeges redukálása könnyebben kezelhető és értékelhető eredményeket szolgáltatott volna.

A jelölt válasza: A dolgozatban bemutatott mérési elrendezések (toroid transzformátor, lemezvizsgáló) megépítését és a mérőszoftver implementálását főleg 2005 és 2008 között végeztem, azóta csupán újabb vasanyagok rutinszerű vizsgálatára használom a berendezéseket. A mérőrendszer teljes árnyékolásának lehetősége akkor nem merült fel, viszont a digitális elvű szűrés a LabVIEW-rendszer lehetőségeit kihasználva kézenfekvőnek bizonyult. Számos mérést elvégezve, és több anyagot is vizsgálva, úgy tapasztaltam, hogy a mérőszoftver beállításai megfelelőek a hiszterézis karakterisztika felvételére. Amennyiben a jövőben lehetőségem nyílik egy árnyékoló kamra felhasználására, élni fogok vele. Köszönöm a Bíráló felvetését!

A 2.a, 2.b és 2.c kérdésekre együttesen a 2.c kérdés után válaszolok.

A Bíráló kérdése (2.a): Általános megjegyzés, hogy a kitűzött példák specifikációja a Műben nem eléggé részletezett, az olvasó számára sok helyütt nem egyértelmű a feladat kitűzése. Példaként említem, hogy a leírás alapján nem tudható, hogy a villamos gépes feladatban mekkora az alumínium hengergyűrű vastagsági mérete, milyen feltételeket ad meg a feladat, és így tovább.

A Bíráló kérdése (2.b): A „transzformátor”-nak nevezett eszköz valójában csak hasonlít egy valós transzformátorra. A valóságban a teljesítmény-transzformátorok lemezeit átlapoltan készítik. A példa szerinti eszköz egy-egy rétege összefüggő lemezből van kialakítva (kivágva), így az erőter a sarkokban egy rétegen belül hajlik, nem pedig az egyik rétegből lép át a másikba bonyolultabb térbeli úton.

A Bíráló kérdése (2.c): Az indukciósnek nevezett gép sem a tipikus gyakorlati kivített követi, amennyiben állórészén légrés-tekerccseléssel van ellátva. Ez elvileg lehetséges, de indukciós gépekben nem szokásos, például azért sem, mert - hacsak nem nagy amplitúdójú impulzus-gerjesztésről lenne szó - az állórész-gerjesztés nem alkalmas a szokásos nagyságú légrés-indukció létrehozására. Ez a megoldás inkább szinkron gépek armatura-tekerccselésében merült fel, illetve szupravezetős szinkron gépekben ez tekinthető tipikusnak. A másik tényező, hogy a gerjesztőáram megadásából következtethetően a gép áramkényszeres táplálásának látszik. Ez a kényszer használatos a gyakorlatban, de eltér a széles körben használt feszültség-kényszeres táplálás esetétől. Így például álló állapotban nem a szokásos indítási áramokkal számol, hanem a megadott állandónak választott áram értékkel. Emiatt az eredmények - bár a feladatmegoldás szempontjából helyesek - a gyakorlati esetekkel nem vagy nem könnyen összevethetőek.

A jelölt válasza: A háromfázisú transzformátor az 5.3. fejezetben, az indukciós gép az 5.4. fejezetben található bemutatása valóban nagyon szűkszavú és rövid, egyetérték a Bíráló megjegyzésével, s köszönöm a lehetőséget, hogy ezt a hiányosságot itt pótolhatom. Szeretnék itt az 5.2. fejezetben bemutatott, vékony lemez vizsgálatával foglalkozó részhez is kiegészítő információkkal szolgálni, akár csak az 5.5. fejezetben közölt feladathoz.

Előljáróban szeretném megjegyezni, hogy nem ipari feladatok megoldásával foglalkoztam, hanem ún. akadémiai tesztfeladatokkal. Céлом ugyanis nem a közvetlen alkalmazás, hanem a módszer kidolgozása és tesztelése volt. Sok esetben nem lett volna alkalmam konkrét méréseket végezni, viszont a tesztfeladatokat, illetve hasonlókat rajtam kívül többen is megoldottak, így lehetőségem nyílt a megoldás ellenőrzésére. A T.E.A.M.-feladatok (Testing Electromagnetic Analysis Methods) a feladat specifikációjával a Compumag Society oldaláról letölthetők: <http://www.compumag.org/jsite/team.html>. Ezek a feladatok a különféle eljárások összehasonlítását és tesztelését teszik lehetővé, az egyes kutatócsoportok eredményei az irodalomban megtalálhatók, s emiatt felhasználásuk nagyon kényelmes. A jövőben azonban szeretném a felhalmozott ismeretanyagot ipari feladatok megoldása során is kamatoztatni.

- Kiegészítés az 5.2. fejezethez. Az (5.9), illetve az (5.10) diffúziós egyenlet levezetése során egyetlen lemezből álló elrendezést feltételeztem. Ennek a szándékosan egyszerű példának a célja illusztráció, amiből rögtön látható a kidolgozott dinamikus skalár hiszterézis modell és a járulékos komponensekkel kiegészített polarizációs formula összekapcsolása eredményeképp kapott eljárás alkalmazhatósága.

A következő egyenletekből indultam el:

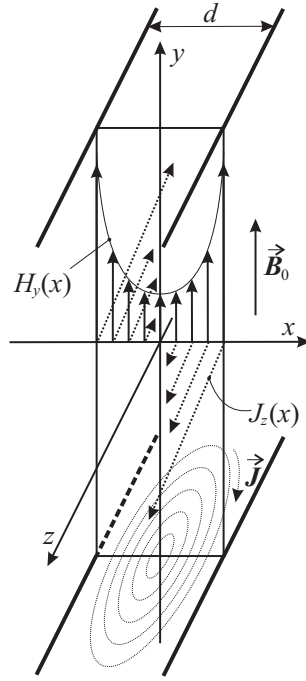
$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E}, \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \vec{B} = \mu (\vec{H} - \vec{H}_{\text{jar}}) + \vec{R}.$$

A $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ egyenlet a dolgozat 5.1. ábráján felvázolt, végül egydimenziós problémára redukált feladatában automatikusan teljesül. A harmadik egyenlet a dolgozat (4.9) egyenletének megfelelően a járulékos mágneses térerősséggel kiegészített polarizációs formula.

A fentiekben felsorakoztatott egyenletekből (5.9) adódik:

$$\nabla \times \frac{1}{\sigma} \nabla \times \vec{H} + \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \mu \frac{\partial \vec{H}_{\text{exc}}}{\partial t} - \frac{\partial \vec{R}}{\partial t}.$$

Az „exc” index helyesebben, a dolgozat korábbi fejezeteinek megfelelően „jár” lenne, a járulékos (angolul excess) komponensre utalva. Ez elírás.



1. ábra. Vékony lemezben külső homogén tér hatására kialakuló elektromos és mágneses tér egy rögzített időpillanatban

Az 5.1. ábrán (l. 1. ábra) látható jelöléseket alapul véve az (5.9) egyenlet egyszerűsíthető, ennek eredménye az (5.10) egyenlet:

$$-\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \mu\sigma \frac{\partial H_y}{\partial t} = \mu\sigma \frac{\partial H_{y,\text{jar}}}{\partial t} - \sigma \frac{\partial R_y}{\partial t}.$$

Ezt a végeselem-módszerrel oldottam meg az alábbi gyenge alakot használva:

$$\int_X \frac{dN}{dx} \frac{\partial H_y}{\partial x} dx + \mu\sigma \int_X N \frac{\partial H_y}{\partial t} dx - \left[N \frac{\partial H_y}{\partial x} \right] \Big|_{\Gamma} = \mu\sigma \int_X N \frac{\partial H_{y,\text{jar}}}{\partial t} dx - \sigma \int_X N \frac{\partial R_y}{\partial t} dx,$$

ahol $N = N(x)$ a súlyozó függvény és egyben a formafüggvény, X jelöli a problémateret, melynek pereme a Γ . Az $\left[N \frac{\partial H_y}{\partial x} \right] \Big|_{\Gamma}$ komponens felel a peremfeltételek megadásáért, erről a következőkben szölok.

Kétfajta gerjesztést vizsgáltam: árammal történő és feszültséggel történő gerjesztést.

Áramgerjesztés esetén a mágneses térerősséget kell megadni a lemez felületén, azaz az $x = \pm d/2$ helyeken. Jelen esetben ez egy-egy pontot jelent Dirichlet-peremfeltétellel, azaz $H_y(\pm d/2)$ kényszerítendő a Γ peremponton, s ekkor $N = 0$.

Feszültséggel történő gerjesztés esetén a következő, Maxwell egyenleteiből levezethető egyenletből indultam el¹:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = -\sigma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.$$

Integrálva mindkét oldalt a lemez $x-z$ síkjában az $y = 0$ helyen lévő A keresztmetszeten, a következő adódik:

$$\int_A \nabla \times \nabla \times \vec{H} \cdot d\vec{A} = -\sigma \int_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A}.$$

¹J. P. A. Bastos, N. Sadowski, **Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods**, Marcel Dekker, New York, 2003.

A bal oldal a Stokes-tétel értelmében egyszerűsíthető, a jobb oldalon pedig a fluxus időbeli megváltozása szerepel, azaz

$$\oint_l \nabla \times \vec{H} \cdot d\vec{l} = -\sigma \frac{d\Phi}{dt},$$

ahol az l zárt görbe az A felületet veszi körbe.

Az A felület egyik oldala a lemez d vastagsága. A másik oldalt L -lel jelölve, $A = dL$, és $L \gg d$.

Az A felületen átmenő Φ fluxust egy átlagos B_a mágneses indukcióval is ki lehet fejezni: $\Phi = B_a A$, s ebben az esetben ezt a $B_a = B_a(t)$ időfüggvényt kell előírni.

A feladatot egydimenziósnek képzelve, az 5.1. ábra jelöléseit használva $\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial H_y}{\partial x} \vec{e}_z$. Körbejárva az l görbét, és a d oldal menti értéket elhanyagolva a következő egyszerű összefüggés adódik, ahol a negatív előjel is eltűnik:

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} 2L = \sigma \frac{dB_a}{dt} dL,$$

azaz

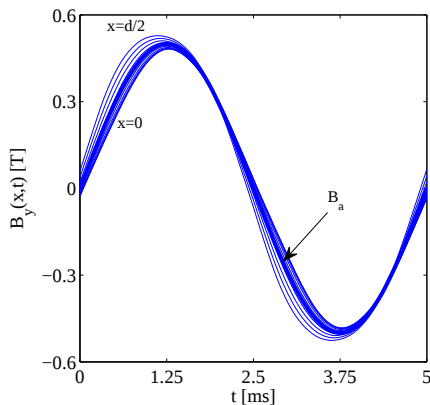
$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = \frac{1}{2} \sigma \frac{dB_a}{dt} d,$$

ami behelyettesíthető a fenti gyenge alak $\left[N \frac{\partial H_y}{\partial x} \right] \Big|_{\Gamma}$ komponensébe, mint Neumann-feltétel, és $N = 1$.

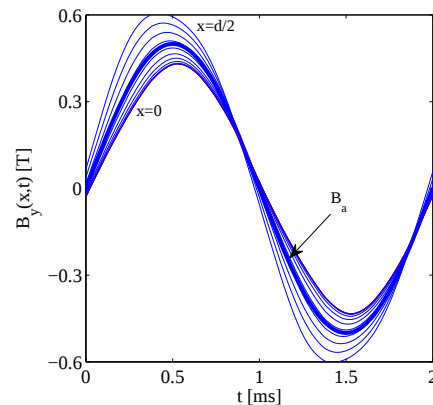
Összefoglalva elmondható, hogy Dirichlet-feltételt kényszerítve a lemez felületén mérhető mágneses térerősség időfüggvénye írható elő, míg Neumann-feltételt alkalmazva a lemezen belül kialakuló mágneses indukció átlagának (ez a mérhető mennyiség) időfüggvénye adható meg.

Megjegyzem, hogy a dolgozatban főleg a mágneses indukció megadása által mért és szimulált adatokkal kapcsolatos eredményeim hangsúlyozom.

Az 5.2. ábra (itt 1. 2. ábra) például azon eredményeket mutatja, amikor a mágneses indukció időbeli lefutása szinuszos. Vastag vonallal rajzoltam az átlagos, azaz az előírt mágneses indukció időfüggvényét, vékony vonallal pedig a lemez felületétől ($x = d/2$) a lemez közepéig ($x = 0$) néhány pontban a kialakuló mágneses indukció időfüggvényét. Utóbbiak átlaga valóban a $B_a(t)$ időfüggvénynek adódott. Az átlagos indukció azért lényeges, mert mérőtekercs segítségével ezt mérni lehet.



(a) $f = 200$ Hz



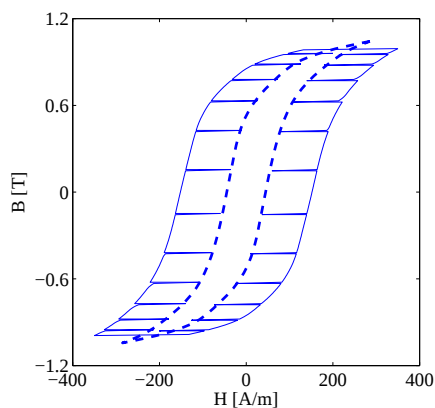
(b) $f = 500$ Hz

2. ábra. A mágneses indukció alakulása a vékony lemezben (a dolgozat 5.2. ábrája)

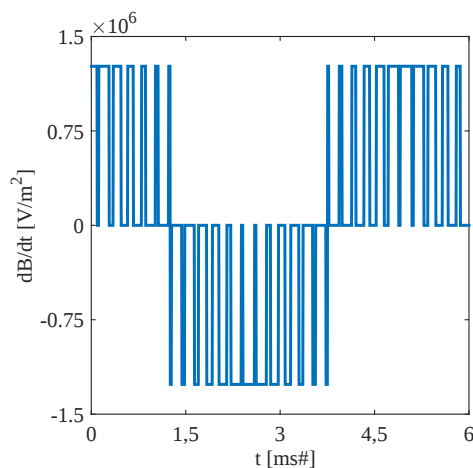
A szimulációkat a fixpontos iterációs sémával végeztem el a (4.65)-(4.69) összefüggéseknek megfelelően.

Ahogy a dolgozatban is említtem, PWM-jellel történő meghajtást a laboratóriumban rendelkezésemre álló eszközökkel nem tudok megvalósítani. Maga a PWM-jellel történő gerjesztés viszont rendkívül fontos, például a hibrid és tisztán villamos járműveken előforduló villamos motorok meghajtása céljából. Emiatt szimulációkat végeztem, amelyben a histerézis karakterisztikát tartalmazó végeselem-modellt PWM-feszültségjellel hajtom meg, igazolva ezzel azt, hogy a jövőben ilyen típusú gerjesztések modellezése is lehetséges lesz az eljárással. Erre nagy szükségünk lesz a Széchenyi István Egyetem Járműipari Kutató Központjában fejlesztés alatt álló különféle hibrid és tisztán villamos járművek meghajtásáért felelős villamos motorok tervezése során.

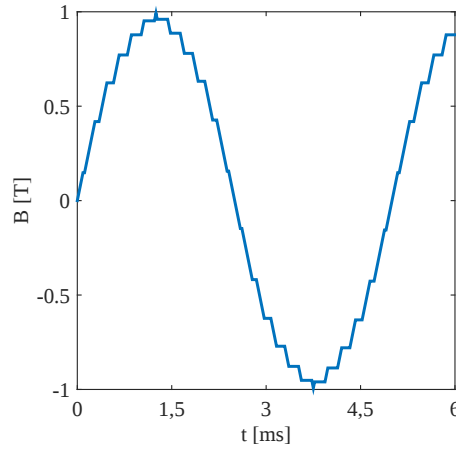
A dolgozatban példaként szereplő 5.4 ábrán (ez itt a 3. ábra) látható szimulált karakterisztika az 4. ábrán látható indukcióváltozás eredményeképp jött létre. Ezt a jelet kell a Neumann-peremfeltételben a $\frac{dB_a}{dt}$ helyére helyettesíteni. A szimuláció eredményeképp a 5. ábrán látható mágneses indukció jön létre az anyag keresztmetszetén átlagolva, a kialakuló mágneses térerősség az anyag felületén a 6. ábrán látható. Sajnos a mágneses térerősség időfüggvénye ugrásokkal tarkított, amit a rendelkezésemre álló áramgenerátor viszonylag szűk sáv szélessége miatt nem tud követni. Jövőbeni terv, hogy ezt a mérést megvalósítsam.



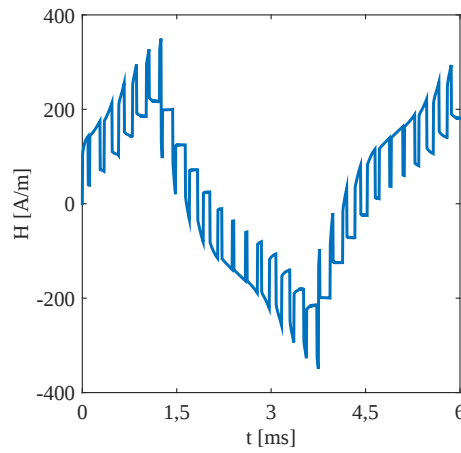
3. ábra. A dolgozat 5.4. ábrája



4. ábra. A PWM-gerjesztéshez tartozó dB_a/dt jel időfüggvénye



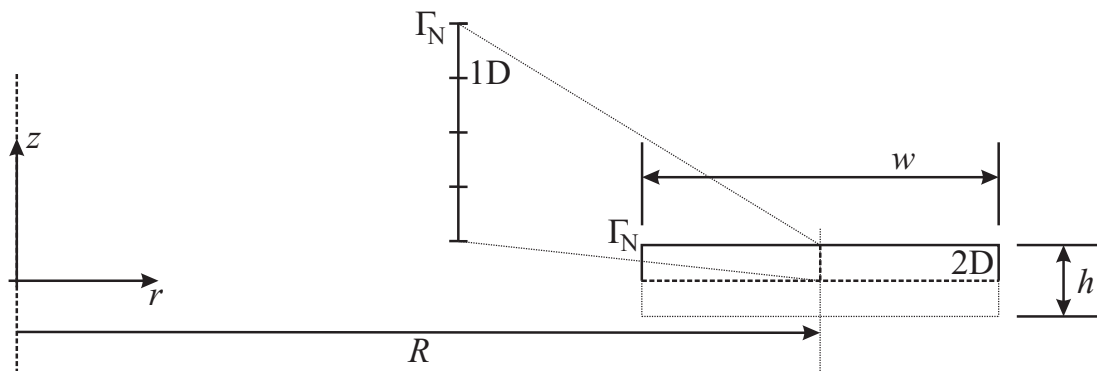
5. ábra. Az átlagos mágneses indukció alakulása, $f = 200$ Hz



6. ábra. A felületi mágneses térerősség alakulása

Az 5.6 ábrán sematikus felvázolt toroid transzformátor modellezését kétféleképp végeztem el: egydimenziós és kétdimenziós modellt realizálva. Mindkét esetben figyelembe vettem a szimmetriát, amit a szaggatott vonal jelöl ($z = 0$) az 5.6 ábrán, illetve a forgásszimmetriát. A modellt itt a 7. ábrán megismételtem.

Az 5.6 ábrán azt is jelöltem, hogy a toroid R közepes sugaránál egy vonal mentén ($z = 0, \dots, h/2$) számítottam a mágneses térerősség φ irányú komponensét ($H_\varphi(z)$), s ezt hívom 1D modellnek, azaz a toroid keresztmetszetében az r irányú kiterjedést első körben



7. ábra. A toroid transzformátor modellje (a dolgozat 5.6. ábrája)

elhagyom, feltételezem ugyanis, hogy $w \gg h/2$ ($w = 5 \text{ mm}$, $h = 0,35 \text{ mm}$).

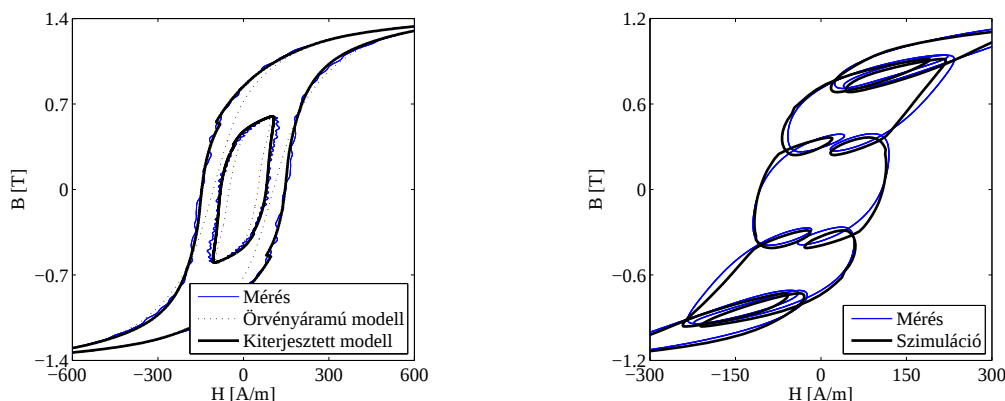
A 2D modell a teljes keresztmetszetet (pontosabban annak felét) modellezi csomóponti végelem-módszert használva a $H_\varphi(z)$ közelítésére, azaz a w szélességű és $h/2$ magasságú téglalapot, természetesen a forgásszimmetriát figyelembe véve.

Egyik esetben sem modellezem a toroidon kívüli elektromágneses teret.

Az 1D modellben a $z = h/2$ helyen lévő pontban kell előírni a peremfeltételt, ezt a pontot jelöli Γ_N , ahol a feszültségkényszert definiálom.

A 2D modell esetében a Γ_N a toroid teljes kerülete, ahol a peremfeltétel vonalintegrálját kiértékeltem.

Azt tapasztaltam, hogy az 1D modell és a 2D modell által számított karakterisztikák praktikusán megegyeznek. A szimulált hiszterézis karakterisztika vízszintes tengelyén a felületi mágneses térerősséget vettem fel, a függőleges tengelyen pedig a végelemeken számított lokális mágneses indukciók átlagát. A mágneses térerősség felületi értéke az 1D modell esetében egyszerű: a felületen lévő csomóponti érték az, a 2D modell esetében a toroid felületére csatlakozó csomóponti értékek átlagát vettem. Az 5.7 ábrán a szimulációs eredményeket így kaptam. Ezeket itt a 8. ábrán megismétlem.



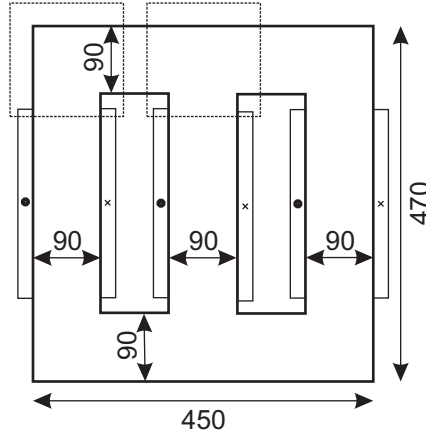
8. ábra. Mért és szimulált dinamikus görbék összevetése (M250-35A)

- Kiegészítés az 5.3. fejezethez. Egyetértek a Bírálóval, a feladat inkább egy lemezvizsgáló berendezés modellje lehetne, mintsem egy valódi transzformátoré. A függőleges oszlopokon például lehetőség kínálkozik a skalár hiszterézis karakterisztika felvételére, hiszen ott a mágneses térerősség vektora és a mágneses indukció vektora párhuzamosak egymással. A T-csatlakozásban pedig lehetőség nyílik a forgó mágneses tér vizsgálatára. Ezt a feladatot többek között a következő cikk 1. ábrája inspirálta:

J. Gyselinck, L. Vandevelde, J. Melkebeek, P. Dular, *Complementary two-dimensional finite element formulations with inclusion of vectorized Jiles-Atherton model*, COMPEL, vol. 23., no. 4., pp. 959-967, 2004.

Ezzel az illusztrációval azt kívántam bemutatni, hogy a különféle modellek nyilvánvalóan különböző eredményeket szolgáltatnak, ha a vasanyag mérés útján felvett hiszterézis karakterisztikáját kevésbé pontos (lineáris, izotrop), vagy épp pontos modellel (például nem-lineáris, vektoriális Preisach-modell) írom le.

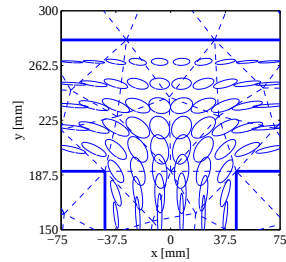
Az elrendezés méretei a 9. ábrán láthatók.



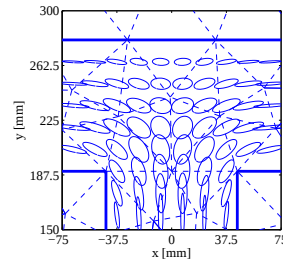
9. ábra. Az elrendezés méretei mm-ben

A gerjesztés háromfázisú, 50Hz frekvenciával, a gerjesztőáram jelalakja szinuszos.

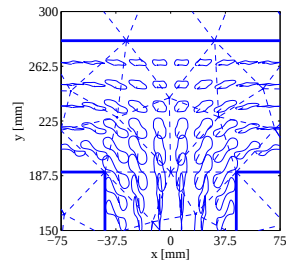
Lineáris anyagmodell esetén $\mu_r = 1000$ relatív permeabilitással számoltam (5.9(a) és 5.9(b) ábra). Az anyag karakterisztikájának telítődését a $B_x = \frac{2B_s}{\pi} \text{atan}(\frac{H_x}{H_0})$ és $B_y = \frac{2B_s}{\pi} \text{atan}(\frac{H_y}{H_0})$ karakterisztikák szerint vettem figyelembe az x és az y irányban egyaránt (5.9(c) és 5.9(d) ábra), ahol $B_s = 2\text{T}$ és $H_0 = 100\text{A/m}$. Az 5.9(e) és 5.9(f) ábrán látható trajektóriákat úgy kaptam, hogy az előbbi inverz tangens típusú karakterisztikákat az x és az y irányban egyaránt lecseréltem a skalár Preisach-modellre, amelyet az M250-35A anyagon mért adatok alapján identifikáltam, s végül az 5.9(g) és 5.9(h) ábra trajektóriáit a vektor Preisach-moddal számoltam. Az egyértelműen látható, hogy az egyes modellek más és más eredményt szolgáltatnak. Úgy gondolom, hogy a hiszterézises jelenséget a felsorolt modellek közül a vektormodell írja le legpontosabban, emiatt jegyeztem meg, hogy az ezzel a modellel számított eredmény „nyilvánvalóan” a legpontosabb. A 10. ábrán megismétltem a lineáris anyagmodellel (legegyszerűbb modell) és a vektor Preisach-moddal (legbonyolultabb modell) kapott eredményeket. A különbség jól látható.



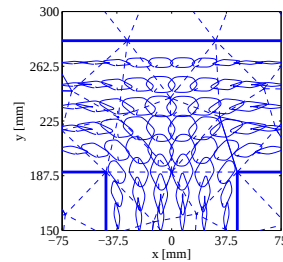
(a) Lineáris modell, $\vec{H}$



(b) Lineáris modell, $\vec{B}$



(c) Vektor Preisach-modell, $\vec{H}$



(d) Vektor Preisach-modell, $\vec{B}$

10. ábra. A mágneses térerősség és a mágneses indukció trajektóriája a lemez különböző pontjaiban

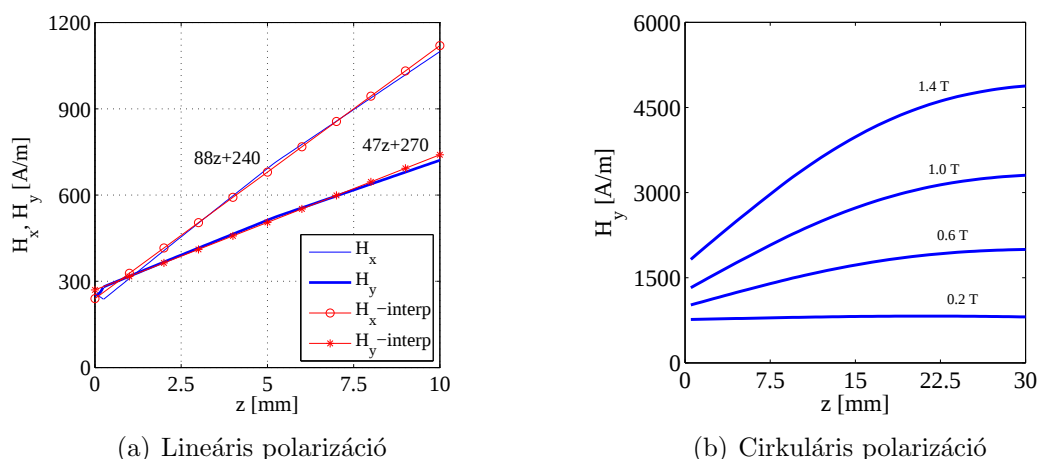
Kiegészítés az 5.4. fejezethez. Ez a 30-as sorszámú tesztfeladat a T.E.A.M.-feladatok közül, a kiírás szabadon hozzáférhető a már említett honlapon. Ez az adatlap tartalmazza a kérdéses információkat az elrendezés geometriáját, a gerjesztést és az anyagparamétereket illetően, így a lineáris feladat megoldása könnyedén megismételhető. Emiatt a dolgozatban nem ismételtem meg a geometria pontos adatait. A 11. ábrán látható jelölések szerint: $r_1 = 20\text{mm}$, $r_2 = 30\text{mm}$, $r_3 = 32\text{mm}$, $r_4 = 52\text{mm}$, $r_5 = 57\text{mm}$, $\sigma_{\text{Fe}} = 1,6 \cdot 10^6 \text{S/m}$, $\sigma_{\text{Al}} = 3,72 \cdot 10^7 \text{S/m}$, $\mu_r = 30$, $\hat{J} = 3,1 \cdot 10^6 \text{A/m}^2$.



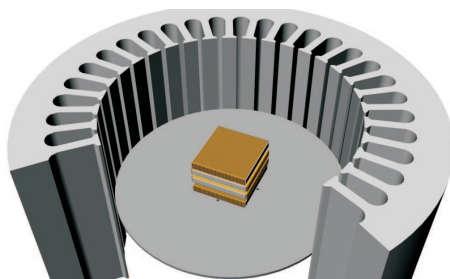
Kiegészítés az 5.5. fejezethez. Ez a 10-es sorszámú tesztfeladat a T.E.A.M.-feladatok közül, a részletekbe menő kiírás a már említett honlapon fellelhető. Emiatt itt sem ismétlem meg az adatokat. Az eredeti kiírás szerint valamennyi mágnesezhető tartomány egyértékű nemlineáris karakterisztikával írható le, a feladat statikus. A módosítás csupán abban áll, ahogy a dolgozatban is jelzem, hogy a mágnesezhető tartományok anyagkarakterisztikáját lecseréltem a dolgozatban bemutatott Preisach-modellre. Ez is egy illusztratív példa, amelyben bemutatom és igazolom a statikus modell és a kiterjesztett dinamikus modell alkalmazhatóságát.

A Bíráló kérdése (2.d): Értékes rész a mérési eredmények átszámítása a kiválasztott pontokra, tartományokra. Ez azért lényeges, mert a számítás az anyag illetve az eszközök egyes komponenseinek adott pontjaiban illetve tartományaiban szolgáltatnak eredményeket, amelyeket ugyanezen pontokban illetve tartományokban Jelölt nem tudott mérni, csak azok közelében. A számítással kapott eredmények saját mérésekkel történő validálása szempontjából lényeges a mérési eredmények pontosságának igazolása.

A jelölt válasza: Az 5.6. fejezet azt a munkát mutatja be, amelyet a vektor hiszterézis mérésére alkalmas elrendezés tervezésekor végeztem. A fő kérdés az volt, hogy a térjellemzők mérésére alkalmas szenzorok méretének kiválasztása és elhelyezése hogyan történjen meg. A legfontosabb eredménynek itt az 5.24. ábrán látható eredményeket tartom, amit a válaszban a 12. ábrán megismételek, miszerint a mágneses térerősség változása a lemez felületéhez közel a lemez felületétől mért távolságban jó közelítéssel lineárisan változik. Ez lehetővé teszi a lemez felületén a mágneses térerősség extrapolációját két szenzor jelét felhasználva az x , illetve az y irányban, ahogy azt a dolgozatban a 3.2.1. fejezetben is bemutattam (l. 13. ábra). A lemez felületén a mágneses térerősség mérése egyébként fizikailag nem lehetséges. Az irodalmat ismerve ez a saját új tudományos eredményem, ami a méréssel függ ugyan össze, de numerikus térszámítás ihlette.



12. ábra. A mágneses térerősség jó közelítéssel lineárisan nő a próbatest felett



13. ábra. A mérési elrendezés, a próbatest és a H -szenzorok elhelyezése

A Bíráló kérdése (2.e): Kiemelem, hogy a 3. tézis körébe tartozó feladat-megoldások nemcsak Jelölt új tudományos eredményeinek alkalmazásaiként értékelhetők: a műszaki tudomány szemszögéből nézve új tudományos eredmények is azonosíthatóak. Például a „villamos gépes” feladatba illesztett saját hiszterézis-modell a vizsgált villamos gépnek a szakirodalomban eddig nem elemzett működéséről szolgáltat új felismeréseket, eredményeket. Hasonlóképpen érdekes eredmények, az egyébként izotropnak definiált lemezek kisebb-nagyobb mértékű anizotrop viselkedésének feltárása.

A jelölt válasza: Köszönöm a Bíráló pozitív értékelését az 5. fejezet eredményeit illetően a praktikus, mérnöki alkalmazhatóságot is meglátó oldalról! Az eredmények valóban új kutatásokat inspirálhatnak a vizsgált berendezések lokális információi alapján. Az irodalomból ismert eredmények birtokában sok, egy-egy speciális esetre alkalmas összefüggést kellett az utófeldolgozás fázisában felhasználnia a tervező mérnöknek, míg a lokális adatok birtokában ezek nem feltétlenül szükségesek.

Magam a 3.c és 3.d altézisekben megfogalmazott eredményeim venném előtérbe, ezeket valóban új tudományos eredményeknek gondolom.

A Bíráló kérdése (3.a): Jelölt érdeme, hogy a mágneses térszámításba illesztett hiszterézis-modell a gyakorló mérnök számára lehetővé teszi a kereskedelemben hozzáférhető térszámító programok képességeit meghaladó feladatok elvégzését, amennyiben a kereskedelmi szoftverek a hiszterézist nem foglalják magukba. Az anizotrop modellekkel az orientált lemezekkel készített villamos gépek (például teljesítmény transzformátorok), míg a forgó mágneses térre való kiterjesztés a villamos forgógépek pontos számítása végezhető el, a gyakorlat számára is kielégítő módon. Bár a futási idő sok feladat megoldásában még jelentős, ám ezekre a számításokra a gyakorlati életben is rendelkezésre áll az idő. A futási idő problémája inkább a tervezési feladatok megoldása során okozhat nehézségeket, amennyiben a tervezési variánsok futtatása, az optimális variáns megtalálása igényel - valószínűsíthetően egyelőre - sok időt.

A jelölt válasza: Az elmúlt két évben a csehországi University of West Bohemia Elméleti Villamosságtan Tanszékével sikerült nagyon szoros és jó kapcsolatot kialakítani. Ők az Agros2D szoftver (<http://www.agros2d.org/>) fejlesztésén dolgoznak, ami egy végeselem-szoftvercsomag, jelenleg kétdimenziós problémák megoldására alkalmas, de már dolgoznak a háromdimenziós kiterjesztésén. Az én kutatócsoportom ebbe a környezetbe implementálja a Preisach-modellt és a kapcsolódó potenciálformalizmusokat, miáltal egy egyedülálló szoftvercsomag jöhet létre olyan értelemben is, hogy ez egy szabad felhasználású és nyílt forráskódú rendszer. A kidolgozott eljárások így bárki számára hozzáférhetőek lesznek.

A Bíráló helyesen világít rá a kidolgozott eljárások nagy futási idejére. Ez a kérdés ma is a kutatások középpontjában áll: választhatunk egy alkalmas hardvert a párhuzamos futtatásra, miáltal jelentős időmegtakarítás érhető el, de kutathatjuk a fixpontos technika gyorsítási lehetőségeit is. Ezekről nem mondtam le, már csak azért sem, mert a kidolgozott eljárásokat az ipari gyakorlat számára is szeretném megnyitni, ahol viszont a futási idő csökkentése nagyon lényeges. Ez tehát jövőbeni terv.

A Bíráló kérdése (3.b): Felmerül a kérdés, melyek azok a gyakorlati problémák, amelyekben a hiszterézis figyelmen kívül hagyása lényeges eredmény-vesztést okozhat. E kérdésre nézetem szerint léteznek válaszok. Egyrészt a hagyományos anyagokból készített hiszterézis motorok

nyilvánvalóan nem számíthatóak kielégítően a hiszterézis-modell hiányában. Kétségtelen, hogy ez a motor típus a villamos gépek szűk osztályát képezi, ám létezik. Másrészt a szupravezetős gépek, különösen az úgynevezett tömbi szupravezetőkből felépített szupravezetős gépek számítása is igényli a hiszterézis jelenségének figyelembe vételét. A villamosipari gyakorlatban, így az említett villamos gépekben alkalmazott II típusú szupravezető anyagok (alacsony-, közepes- és magashőmérsékletű szupravezető huzalok és szalagok, valamint tömbi szupravezető magashőmérsékletű szupravezető anyagok) természetükből következően szignifikánsan hiszterézis tulajdonságúak. Végül a számítási eredmények pontossága, a finom struktúrák feltárása a szokásos számításokban is fontos lehet, amire a Műből választva jó példa lehet a villamos gépes T.E.A.M feladatba illesztett hiszterézis modell eredményei. Egy-egy szaktudomány, szakma fejlődését az alkalmazható számítási módszerek és eszközök fejlődése is előre mozdítja.

A jelölt válasza: Egyértelmű választ erre a kérdésre nagyon nehéz adni. Egészen biztos, hogy vannak olyan feladatcsoportok, amelyeknél a hiszterézis figyelembe vétele nem szükséges, de tagadhatatlan, - ahogy a Bíráló is megjegyzi - hogy vannak olyan problémák, amelyek viszont csak így számíthatóak kielégítő módon. A hiszterézis modell alkalmazása kétségtelenül lassítja és nehezíti a feladat megoldását, de alkalmas lehet arra, hogy a kérdéses feladatot, amennyiben szükséges, nagyon pontosan meg lehessen oldani, s el lehessen dönteni, hogy szükséges hiszterézis modell, vagy sem. Például egy optimalizációs feladat futtatása előtt ezt érdemes lehet tisztázni.

Ismételten köszönöm Professzor Úr szakértő, gondos bírálói munkáját.

Győr, 2015. június 16.

Kuczmann Miklós