

## Villamos forgógépek anyagi jellemzőinek mérési és modellezési kérdései

### 1. BEVEZETÉS

A villamos forgógépek egyik fő alkotóeleme – amely a gépen belül a mágneses tér irányát megszabja, s ami által a forgógép elindul – a lemezelte vasmag (állórész és rotor vastestek). A vasmagban a váltakozó mágneses tér hatására, a lemezelés ellenére örvényáramok keletkeznek, amelyek veszteséget idéznek elő, s ez melegíti a vasmagot. A vastest anyaga lágyvas, ennek hiszterézis karakterisztikája további veszteségeket okoz.<sup>[2]</sup> A hiszterézis olyan anyagi jellemző, amely megadja a vasmag viselkedését a mágneses térben: nemlineáris és többértékű, frekvencia-, hőmérséklet- és mechanikai behatástól függő kapcsolat a mágneses térerősség és az indukció között. A hiszterézis karakterisztikát, illetve az anyag elektromos és mágneses tulajdonságait néhány fizikai behatás jelentősen megváltoztatja. Ilyen a hőmérséklet és a mechanikai behatás vagy a gerjesztés frekvenciája.<sup>[3]</sup>

A fajlagos teljesítmény növelésének igénye, azaz a gépek méretének csökkentésére tett kísérletek és a fordulatszám növelése miatt ezek a veszteségek számottevő értéket érhetnek el.<sup>[4]</sup> A veszteségek pontos számítása a mai napig nem megoldott, tervezhetősége tehát rendkívül fontos a villamosgép-tervezőmérnök számára: pontos modellel prediktálható a villamos gép viselkedése (pl. nyomatéka, áramfelvétele, energiaigénye, zaja stb.).

A klasszikus alapkutatói téma ma újra reneszánszát éli, egyrészt a tisztán villamos meghajtású járművek iránti növekvő igény, másrészt a számítástechnika fejlődése miatt, hiszen egyre bonyolultabb és egyre nagyobb méretű problémákat tudunk megoldani, egyre pontosabban. Ma például érdekes kérdés, hogy egy akkumulátor vajon mennyi ideig képes egy villamos járművet kellő energiával

[1] Egyetemi adjunktus, Széchenyi István Egyetem, Gépészmérnöki, Informatikai és Villamosmérnöki Kar, Automatizálási Tanszék.

[2] SIMONYI KÁROLY – ZOMBORY LÁSZLÓ: *Elméleti Villamosságtan*, 2000, Műszaki Könyvkiadó, Budapest.; FODOR GYÖRGY: *Elektromágneses Terek*, 1996, Műegyetemi Kiadó, Budapest.; KRON MÜLLER, H. –PARKIN, S.: *Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials I-V*, 2007, John Wiley&Sons, New York.; BÍRÓ, O.: *Potential Functions in Eddy Current Field Analysis by the Finite Element Method*, 2003, Magyar Tudományos Akadémia, MTA Doktori disszertáció.

[3] KUCZMANN MIKLÓS: *Ferromágneses hiszterézis az elektromágneses térszámításban*, 2014, DSc disszertáció, Magyar Tudományos Akadémia.; IVÁNYI, AMÁLIA: *Hysteresis Models in Electromagnetic Computation*, 1997, Akadémiai Kiadó, Budapest.

[4] TAPANI, JOKINEN (ed.): *Design of Rotating Electrical Machines*, 2008, John Wiley&Sons, Chippingham.

ellátni, miközben a sebességprofil, az útviszonyok, a hőmérséklet, a terhelés stb. változik, vagy milyen a villamos gép akusztikája, milyen módon lehet előre jelezni a gép viselkedését (diagnosztika). A villamos forgógép, ami a villamos jármű motorja, nagyon pontos modellezésével előbbre juthatunk ezekben a kérdésekben is.

Jelen cikkben a hiszterézis karakterisztika hőmérséklet- és frekvenciafüggésének vizsgálatával és modellezésével foglalkozom, továbbá az irodalomra támaszkodva megvizsgálom a mechanikai behatásokat. Előbbiekre az EMobilitás Kompetencia Központban saját mérési eljárásokat dolgoztunk ki, utóbbi vizsgálatára a jövőben tervezünk mérési környezetet felállítani.

Érdekes, és az alkalmazás szempontjából fontos konklúzió, hogy a nominális adatokhoz képest az egyes fizikai behatások milyen irányban és mennyire módosítják az anyagi jellemzőket.

A cikk szándékosan nem tartalmaz képleteket és matematikai összefüggéseket, az elvégzett munka eredményeire, azok alkalmazhatóságára kívánok rámutatni.

## 2. A HISZTERÉZIS KARAKTERISZTIKA LEÍRÁSA VILLAMOSMÉRNŐKI MEGKÖZELÍTÉSBN

A villamosmérnöki gyakorlat számára oly fontos ferromágneses anyagok mágneses tulajdonságainak hátterében mikroszkopikus léptékű folyamatok állnak. Az atomban az elektron saját nyomatéka, az elektron keringése során befutott pálya nyomatéka és az atommag saját nyomatéka együttesen hozza létre a mágnesezettséget. Ezen elemi nyomatékok, más szóval mágneses momentumok térfogategységre vett sűrűsége az anyag  $M$  mágnesezettsége. Ismeretes, hogy a ferromágneses anyagok domenekből állnak, amelyek azonos mágnesezettségi iránnyal bíró tartományok.<sup>[5]</sup>

A villamosmérnöki tervezésben nem szükséges a ferromágneses anyagot alkotó mikrorendszerek modellezése, megelégszünk azok nagy sokaságának halmaza által adott, könnyen mérhető makroszkopikus jellemzők matematikai leírásával. Ilyen makroszkopikus jellemző a mágnesezettség, amely azon mágneses térerősségtől függ, amelyben a ferromágneses anyag helyet foglal. A két vektor között a kapcsolat bonyolult: nemlineáris és többértékű, az anyag fizikai jellemzőitől függ. Ez a kapcsolat a hiszterézis karakterisztika.<sup>[6]</sup>

A jelenség modellezésének nehézségét és összetettségét az 1. ábrán látható görbékkel világítom meg. Lemágnesezett állapotban az egyes domenek egy-

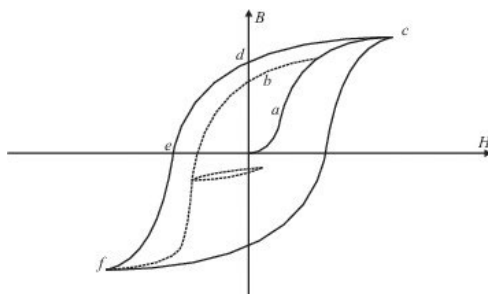
---

[5] MAYERGOYZ, ISAAC DAVID: *Mathematical Models of Hysteresis*, 1991, Springer.; DAVID JILES: *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, CRC Press.; BERTOTTI, GIOVANNI –MAYERGOYZ, ISAAC DAVID: *The Science of Hysteresis*, 2006, Academic Press, New York.

[6] JOKINEN, TAPANI (ed.): *Design of Rotating Electrical Machines*, 2008, John Wiley&Sons, Chippingham.; MAYERGOYZ, ISAAC DAVID: *Mathematical Models of Hysteresis*, 1991, Springer.; BELAH-CEN, ANOUAR – DLALA, EMAD – PIPPURI, JENNI: Modelling Eddy-Current in Laminated Nonlinear Magnetic Circuit, in: *COMPEL*, 2011, Vol. 30., No. 3., 1082–1091,

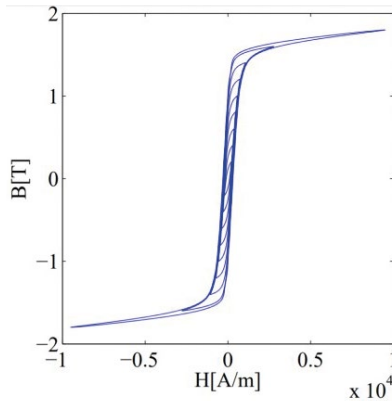
más hatását kölcsönösen kioltják, az anyag mágneselesen semleges. Nagyon kicsi mágneses tér hatására a domenek elfordulnak, a domenek közt húzóó falak elmozdulnak úgy, hogy azon tartományok térfogata növekedjék, amelyek mágnesezettsége a külső tér irányához közelebb esik. Ha a mágneses térerősség növekszik, akkor a mágnesezettség és a mágneses indukció is növekszik az *a*-val jelölt első mágnesezési görbe mentén. A domenek forgása és a domenfalak mozgása az első mágnesezési görbe kezdeti szakaszán reverzibilis, azaz csökkenő értékű külső tér eredményeképp az anyag lemágnesezett állapotba kerülhet. Nagyobb térerősség mellett a folyamat irreverzibilissé válik, egyes tartományok ugrászerű átfordulása eredményeképp egyre több domen áll be a külső mágneses tér irányába, az indukció értéke meredeken nő az első mágnesezési görbe mentén. A mágneses térerősség esetleges csökkentése ekkor már nem vezet vissza az origóba, a mágneses indukció a *b*-vel jelzett szaggatott vonalnak megfelelően alakul. A külső tér további növelése ugyanakkor ún. szaturációt eredményez, azaz bizonyos térerősség felett valamennyi domen a külső tér irányába áll, következésképp az indukció csak lassan növekedhet (*c* szakasz). A térerősség csökkentésével, a szaturációból indulva a karakterisztika lefelé vezető *c-d-e-f* ága szerint alakul a mágneses indukció. A *d* helyen a nevezetes remanens indukció értékét kapjuk, a mágneses térerősség további csökkentése pedig az ún. koercitív teret adja. A külső tér további csökkentésével az *f*-fel jelölt szaturációhoz lehet eljutni. Látható, hogy a *b*-vel jelölt görbén is el lehet jutni az *f* szaturációs pontba. A mágneses térerősség megfelelő időfüggvényével például a *b* jelű görbén ún. minor hurkok, vagy minor görbék is előidézhetők. Ezek alakja függ a kiindulás helyétől, azaz az előlélettől.

1. ábra: A hiszterézis hurok magyarázatához

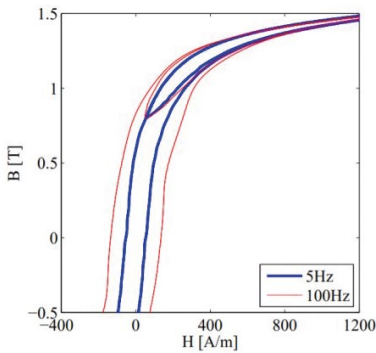


A 2. ábrán laboratóriumunkban mért koncentrikus hiszterézis hurkok láthatók, a 3. ábra pedig a frekvenciafüggésre mutat mérési eredményeket.

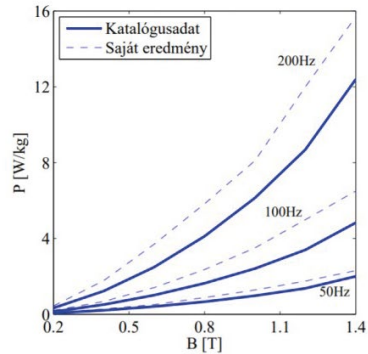
2. ábra: Példa méréssel felvett koncentrikus görbékre



A mágneses térerősség és így a mágnesezettség mindennemű megváltozása hatással van a domenekre. A domenek forgása, a domenfalak mozgása, domenek összeolvadása stb. mind örvényáramot hoz létre a ferromágneses anyagban. Ezek az örvényáramok aztán Joule-hőt termelnek, amely veszteség formájában jelentkezik, hiszen hővé alakul.



3. ábra: A hiszterézis hurok frekvenciafüggése



4. ábra: Mért veszteségi adatok összevetése katalógusbeli adatokkal

A 4. ábrán egy tipikus veszteségi görbesereg látható W/kg egységben. A mérés során különböző frekvenciájú, szinuszos lefutású mágneses indukciófüggvény mellett számítjuk a veszteséget. A katalógusbeli adatokat saját mérési eredményekkel hasonlítottuk össze. Az látható, hogy a saját veszteségi értékek nagyobbak a katalógusbeli értékeknél. Ennek oka a próbatest gyártási folyamataiban (vágás, megmunkálás, hőkezelés) keresendő, amit a laboratóriumban nem sikerült nagyon pontosan megvalósítani. A próbatest előkészítése tehát egy lényeges kérdés. A 4. ábra fontos eredménye, hogy a saját mérési adatok nagyobb veszteségeket

adnak, mint a katalógusbeli adatok. Ennek oka, hogy a saját mérési eredményeket szolgáltató próbatestet mechanikai roncsolással nyertük ki egy villamos gépből (az állórész fogait levágtuk, s így kaptunk egy toroid alakú próbatestet). Ez az egyszerű mérés is megmutatja, hogy a mechanikai behatás jelentősen növelheti a gépben fejlődő hőt, hiszen a karakterisztika megváltozik.

5. ábra: Egy tipikus adatlap


Typical data for SURA® M250-35A

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	W/kg at 100 Hz	W/kg at 200 Hz	W/kg at 400 Hz	W/kg at 1000 Hz	W/kg at 2500 Hz
0,1	0,02	0,06	28,8	0,04	0,08	0,21	0,98	4,09
0,2	0,06	0,15	35,7	0,14	0,33	0,90	3,65	14,8
0,3	0,13	0,27	41,8	0,31	0,73	1,93	7,58	30,6
0,4	0,21	0,40	47,6	0,51	1,23	3,24	12,7	51,7
0,5	0,31	0,56	53,4	0,75	1,82	4,81	18,8	76,8
0,6	0,41	0,74	60,0	1,01	2,49	6,69	26,3	113
0,7	0,52	0,95	67,9	1,31	3,26	8,82	35,2	155
0,8	0,66	1,21	77,5	1,64	4,12	11,2	45,7	208
0,9	0,81	1,52	90,0	2,00	5,07	14,0	58,1	273
1,0	0,98	1,92	107	2,41	6,14	17,1	72,6	352
1,1	1,15	2,46	133	2,87	7,33	20,6	89,6	
1,2	1,37	3,30	179	3,40	8,69	24,6		
1,3	1,65	4,97	284	4,03	10,3	29,2		
1,4	2,00	10,3	642	4,83	12,4	35,1		
1,5	2,35	30,0	1810	5,72	14,7	41,6		
1,6	2,65	75,7	4030					
1,7	2,87	153	7290					
1,8	3,06	267	11700					

Loss at 1.5 T, 50 Hz, W/kg	2,35
Loss at 1.0 T, 50 Hz, W/kg	0,98
Anisotropy of loss, %	10
Magnetic polarization at 50 Hz	
H = 2500 A/m, T	1,53
H = 5000 A/m, T	1,64
H = 10000 A/m, T	1,76
Coercivity [DC], A/m	40
Relative permeability at 1.5 T	660
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	55
Yield strength, N/mm <sup>2</sup>	455
Tensile strength, N/mm <sup>2</sup>	575
Young's modulus, RD, N/mm <sup>2</sup>	185 000
Young's modulus, TD, N/mm <sup>2</sup>	200 000
Hardness HVS [VFN]	215

RD represents the rolling direction  
TD represents the transverse direction  
Values for yield strength 10.2 % proof strength and tensile strength are given for the rolling direction  
Values for the transverse direction are approximately 5% higher



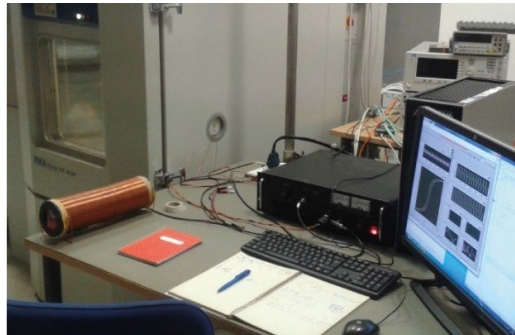
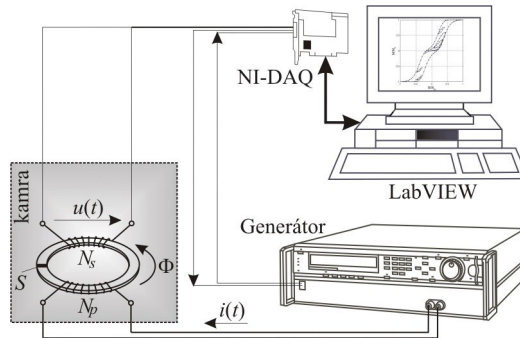
cogent  
Suzhou Iron Works Ltd.  
June 2008

Egy tipikus adatlap látható az 5. ábrán, amely az M250-35A ferromágneses anyagról ad néhány információt (a jelölésben az M betű utal a mágnesezhető acélra, 2,5 W/kg a maximális veszteség 1,5 T mágneses indukció mellett, 50 Hz frekvencián, s a lemez vastagsága 0,35 mm. A jelölés végén álló A betű a hengerelésre és a gyártásra utal, az anyagban nincs kitüntetett mágnesezési irány). A táblázatban különböző amplitúdójú és különböző frekvenciájú, szinuszos mágneses indukció mellett adják meg a veszteség értékét W/kg egységben. Egy oszlop tartalmazza a mágneses térerősség értékét is, azaz az összetartozó H és B értékekből az első mágnesezési görbe felrajzolható. Az adattábla néhány más információt is megoszt. A 4. ábra felrajzolásakor egy ilyen anyagból készült toroidon végeztük el a méréseket.

### 3. A HISZTERÉZIS KARAKTERISZTIKA MÉRÉSE ÉS MODELLEZÉSE

A jelen munka szempontjából a karakterisztika azért lényeges, mert az általa körbehatárolt területtel arányos veszteség képződik a lemezlevezésekben. A karakterisztika függ a hőmérséklettől és a frekvenciától is. Ennek feltérképezésére valószínűleg meg egy automatizált mérési elrendezést, amelynek blokkvázlata és fényképe a 6. ábrán látható.

6. ábra: A hiszterézis karakterisztika mérésével történő felvétele



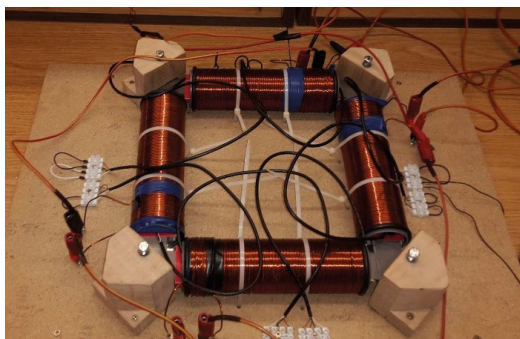
A skalár hiszterézis karakterisztika mérése során feltételezzük, hogy a próbatesten (de legalább a mérés helyén) kialakuló mágneses térerősség vektor és mágneses indukció vektor egymással párhuzamos, azaz irányuktól eltekinthetünk, s a cél a közöttük fennálló skalár jellegű kapcsolat felvétele.

Hiszterézis karakterisztika mérésekor célszerű törekedni a zárt mágneses kör felépítésére, vagy eleve olyan alakú próbatestet kell alkalmazni, amely zárt. Az egyik leggyakrabban alkalmazott mérési összeállítás toroid alakú próbatestet tartalmaz. A toroid transzformátor árammal átjárt primer tekercse adja a mágneses anyag gerjesztését, s válaszát a nyitott szekunder tekercsen mérhető indukált feszültségből lehet meghatározni. Nagy előnye, hogy a toroid alakú próba-

test nem tartalmaz légrést, azaz a mágneskör zárt, továbbá a geometriából adódik, hogy a szórt mágneses fluxus elhanyagolható. Ennek eredményeképp a mágneses térerősség az áramból közvetlenül számítható. Hátránya viszont, hogy a különféle anyagokból készült próbatesteket külön-külön kell tekerccsel ellátni. A mérést LabVIEW környezetben implementált szoftver vezérli.

A másik etalonnak számító mérés technikai eljárás az ún. szabványos Epstein-keret alkalmazása a 7. ábrán látható (IEC Standard Ref. No. 404-2, 1996). Az Epstein-keret négy oldala 30 mm széles, 280–305 mm hosszúságú lemezekből épül fel, melyeket a sarkoknál átlapolással kell összeilleszteni. A sarkok hatását elhanyagolják. A négy keret mindegyikén gerjesztő tekerccs van, melyek árama gerjeszti az elektromágneses teret a lemezekben belül. A négy egyforma tekerccset normál üzemben természetesen egymással sorba kell kapcsolni. A mágneses indukció a próbatestek köré helyezett tekerccsel mérhető, a mágneses térerősség pedig a gerjesztő áram alapján számítható. A keret nagy előnye, hogy különféle anyagok viszonylag gyorsan cserélhetők, továbbá a kereskedelemben szabványosított mérési összeállítások beszerezhetők.

7. ábra: A saját fejlesztésű szabványos Epstein-keret



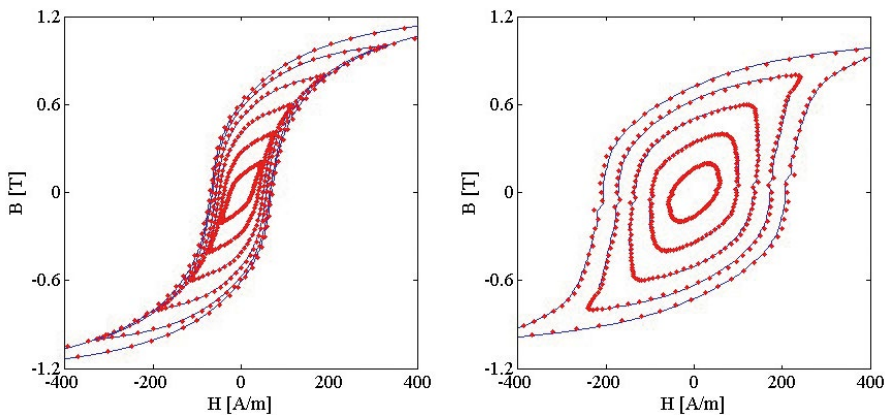
Az Epstein-keret alkalmas a vizsgálni kívánt anyag karakterisztikájának felvételére. Az Epstein-kerettel alapvetően skalár karakterisztikát lehet mérni, de akár anizotrop anyagból készült lemez viselkedése is feltérképezhető vele. Ebben az esetben minden irányból megfelelő számú lemezre van szükség, a mérés tehát időigényes. Az izotrop anyagoknak is van némi anizotrop viselkedése, mert a lemezeket hengereléssel gyártják, majd hőkezelik, ennek ellenére a hengerelés irányában az anyagot kis mértékben könnyebb mágnesezni, mint a hengerelésre merőleges irányban.

A mérési alapelv mindkét elrendezésnél hasonló. A karakterisztika mérése során a primer tekerccset előre definiált időfüggvényű árammal vagy feszültséggel lehet gerjeszteni, aminek hatására a transzformátor szakadással lezárt, azaz üresben járó szekunder tekerccsében üresjárási feszültség indukálódik. A laboratóriumunkban rendelkezésre álló mérési elrendezésben az áram és az indukált

feszültség időfüggvénye a számítógépbe helyezett National Instruments mérési adatgyűjtő (Data Acquisition, NI-DAQ) kártya segítségével mérhető. Az áram jelalakját ugyanezen kártyán keresztül lehet a generátorhoz eljuttatni. A számítógépen futó, LabVIEW környezetben kifejlesztett eljáráscsomag vezérli a teljes mérést, szabályozza az áramgenerátort, méri és feldolgozza a bejövő jeleket, valamint megjeleníti a mérési eredményeket.

A karakterisztika modellezésére számos módszer létezik az irodalomban,<sup>[7]</sup> melyek közül az ún. Preisach-modellt alkalmaztuk.<sup>[8]</sup> A modell alapvetően statikus és a hőmérséklettől független működésű. Megvalósítottuk a modell dinamikus kiterjesztését, azaz figyelembe tudom venni a frekvenciafüggést. Megoldottam a hőmérsékletfüggés modellezését is. A 8. ábrán az 50 Hz-en és szobahőmérsékleten, valamint a 200 Hz-en és 420°C-on mért és szimulált karakterisztika összehasonlítása látható. A mérési eredmény folytonos vonallal, a szimulációs eredményt pedig pontokkal ábrázoltam.

8. ábra: Mérési és szimulációs eredmények összehasonlítása



## 5. KONKLÚZIÓ

A jelen alapkutató program azt a célt szolgálta, hogy a hiszterézismodellek pontosságán mérések alapján javítsunk, hogy a modellek pontosan le tudják írni a veszteségeket, a frekvencia- és a hőmérsékletfüggést, a mechanikai behatásokat. A realizált modellek fő alkalmazási területe terveink szerint a villamos gépek analízisében és szintézisében lesz. Annak ellenére, hogy a problémakör régóta

[7] KIS PÉTER: *Jiles-Atherton Model Implementation to Edge Finite Element Method*, 2006, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest.

[8] BERTOTTI, GIOVANNI: Dynamic Generalization of the Scalar Preisach Model of Hysteresis, in: *IEEE Transactions on Magnetics*, 1992, Vol. 28., 2599–2601,



kutatott terület, az itt bemutatott problémák megoldása és a modellek kereskedelmi forgalomban lévő szoftverbe illesztése – egyszerűbb esetektől eltekintve – még nem történt meg.

Meggyőződésünk, hogy a gépek modellezésére valósidejű alkalmazásokban (például diagnosztika) szükség lesz. Erre a végeelem-módszer alkalmatlan. Hosszabb távú cél, hogy a gépek (q)LPV-alapú modellezését megvalósítsuk, ami az irányításelmélet területén ma egy kurrens kutatási terület. Ekkor a modellezést a gép differenciálegyenletéből kiindulva kell megvalósítani.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- BELAHCEN, ANOUAR – DLALA, EMAD – PIPPURI, JENNI: Modelling Eddy-Current in Laminated Nonlinear Magnetic Circuit, in: *COMPEL*, 2011, Vol. 30, No. 3., 1082–1091,
- BERTOTTI, GIOVANNI –MAYERGOYZ, ISAAK DAVID: *The Science of Hysteresis*, 2006, Academic Press, New York.
- BERTOTTI, GIOVANNI: Dynamic Generalization of the Scalar Preisach Model of Hysteresis, in: *IEEE Transactions on Magnetics*, 1992, Vol. 28. 2599–2601,
- BÍRÓ, O.: *Potential Functions in Eddy Current Field Analysis by the Finite Element Method*, 2003, Magyar Tudományos Akadémia, MTA Doktori disszertáció.
- CHIKAZUMI, S.: *Physics of Ferromagnetism*, 1997, Clarendon Press.
- DAVID JILES: *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, CRC Press.
- DLALA, E.: A Simplified Iron Loss Model for Laminated Magnetic Cores, in: *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, Vol. 44., 3169–3172.
- DLALA, E.: Comparison of Models for Estimating Magnetic Core Losses in Electrical Machines Using the Finite Element Method, in: *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, Vol. 45., 716–725.
- FODOR GYÖRGY: *Elektromágneses Terek*, 1996, Műegyetemi Kiadó, Budapest.
- FÜZI, J.: *Mathematical Models of Magnetic Hysteresis and Their Implementation in Computer Codes Modelling Electromagnetic Systems*, PhD Disszertáció, 1997, Brassó, Románia.
- HANDGRUBER, P.: *Advanced Eddy Current and Hysteresis Loss Models for Steel Laminations of Rotating Electrical Machines*, 2015, PhD dissertation, University of Graz.
- IVÁNYI, AMÁLIA: *Hysteresis Models in Electromagnetic Computation*, 1997, Akadémiai Kiadó, Budapest.
- JOKINEN, TAPANI (ed.): *Design of Rotating Electrical Machines*, 2008, John Wiley&Sons, Chippenham.
- KIS, PÉTER: *Jiles-Atherton Model Implementation to Edge Finite Element Method*, 2006, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest.

- KRONMÜLLER, H. –PARKIN, S.: *Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials I-V*, 2007, John Wiley&Sons, New York.
- KUCZMANN MIKLÓS: *Ferromágneses hiszterézis az elektromágneses térszámításban*, 2014, DSc disszertáció, Magyar Tudományos Akadémia.
- KUCZMANN, M.: Temperature and frequency dependent Preisach model, in: *Przegląd Elektrotechniczny*, 2018, Vol. 94., No. 4. 5–8.
- KUCZMANN, M. –KOVÁCS, G.: Improvement and Application of the Viscous-Type Frequency-Dependent Preisach Model, in: *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, Vol. 50. 385–388.
- MAYERGOYZ, ISAAK DAVID: *Mathematical Models of Hysteresis*, 1991, Springer.
- SIMONYI KÁROLY – ZOMBORY LÁSZLÓ: *Elméleti Villamosságtan*, 2000, Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- SIPEKY, A.: *Relationship between mechanical stress and magnetic hysteresis*, PhD dolgozat, 2009, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.
- SZABÓ, Zs.: *Hysteresis Models of Elementary Operators and Integral Equations*, PhD disszertáció, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2002.
- TAPANI, JOKINEN (ed.): *Design of Rotating Electrical Machines*, 2008, John Wiley&Sons, Chippenham.
- ZIRKA, S. E. – MOROZ, Y. I. – MARKETOS, P. – MOSES, A. J.: Viscous Type Dynamic Hysteresis Model as a Tool for Loss Separation in Conducting Ferromagnetic Laminations, in: *IEEE Transactions and Magnetics*, 2005, Vol. 41. 1109–1111.
- ZIRKA, S. E. – MOROZ, Y. I. – MARKETOS, P. – MOSES, A. J.: Comparison of Engineering Methods of Loss Prediction in Thin Ferromagnetic Laminations, in: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, Vol. 320., 2504–2508.