

dc_872_14

MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

FERROMÁGNESES HISZTERÉZIS
AZ
ELEKTROMÁGNESES TÉRSZÁMÍTÁSBAN

KUCZMANN MIKLÓS
SZÉCHENYI ISTVÁN EGYETEM

Győr
2014

1. A kutatás előzményei és célkitűzései

1.1. Előzmények

Az értekezés középpontjában a ferromágneses anyagok hiszterézis karakterisztikájának modellezése és mérésekkel egybekötött identifikációja, továbbá villamosmérnöki tervezésbe történő átültetése áll. Ennek megfelelően kutatásaim során az alábbi négy témával foglalkoztam.

(a) A hiszterézis karakterisztikával jellemzett rendszer egy bonyolult nemlineáris és többértékű kapcsolatot realizál a rendszer által modellezett mérnöki objektum bemeneti és kimeneti jele között [1–3]. Ferromágneses anyagok esetén a mágneses térerősség és a mágneses indukció között fennálló kapcsolatot kell modellezni. A matematikai és a villamosmérnöki, valamint az informatikai alkalmazások szempontjából a modell egy fekete doboz, amelynek bemenete és kimenete között a kapcsolatot a hiszterézismodell írja le. A mágneses anyagok viselkedésének leírása ugyanis többféleképp is megtehető: a fizikusok számára érdekes lehet az anyag belsejében lejátszódó mikromágneses hatások vizsgálata, azok modellezése; matematikailag a hiszterézis egy nemlineáris operátor; villamosmérnöki oldalról pedig egy eszköz, amellyel ez a bonyolult bemenet-kimenet kapcsolat leírható, s a modell tervező rendszerekhez illeszthető. A dolgozatban ezen utóbbi makroszkopikus szempont szerint foglalkozom a hiszterézis karakterisztika modellezésével.

(b) A modellek felépítéséhez, identifikációjához és validációjához elengedhetetlen a jelenség laboratóriumi körülmények között történő vizsgálata [3]. A számomra fontos makroszkopikus kapcsolat a mágneses térerősség és a mágneses indukció között számos jól ismert mérési eljárással vizsgálható. A skalár hiszterézis karakterisztika felvételére egyik elterjedten alkalmazott mérési eljárás toroid alakú próbatestet alkalmaz [3, 4]. Munkám során én is a toroid transzformátort alkalmaztam. Az Epstein-keret szabványos elrendezés a skalár karakterisztika vizsgálatára [3–7]. Skalár karakterisztika esetén a feltételezés az, hogy a mágneses térerősség és a mágneses indukció vektorok egymással párhuzamosak. Ez azonban számos, gyakorlatban is előforduló elrendezés esetén nem igaz. A legtöbb, ipari körülmények között előforduló probléma bonyolult alakzatokat tartalmaz. Például a villamos gépek hornyaiban a geometria miatt a mágneses térerősség és a mágneses indukció között nagyon bonyolult kapcsolat áll fenn, az E-I lemezekből felépített transzformátorok sarkokat tartalmaznak, ahol a kialakuló mágneses tér iránya megváltozik követve a vasmag alakját. Minden elrendezés alapvetően háromdimenziós, ahol a mágneses tér alakulása általában nehezen számítható. Ezen okok vezettek el az ún. vektor hiszterézis karakterisztika méréséhez és modellezéséhez. Az utóbbi egy-két évtizedben számos mérési elrendezés készült a jelenség vizsgálatára a legkülönbözőbb alakú próbatestekkel és mérési technikákkal [3, 6–19]. A mérési eljárások közül egyet magam is felépítettem, melynek tervezése és analízise során a korszerű tervező technikákat alkalmaztam, s amelyet a dolgozatban részletesen bemutatok.

(c) A hiszterézis jelenségének modellezése tehát több módszerrel is elvégezhető [1]. A Stoner–Wohlfarth-modell [1, 3, 20] egy mágneses részecske viselkedését írja le és a részecskére felírható energia minimalizálásából indul el. Alkalmas a skalár jelenség és a vektoriális viselkedés modellezésére is, és a mágneses részecskék sokaságából felépített rendszer bonyolultabb folyamatok leírására is használható. A Jiles–Atherton-modell [6, 21–23] egy paramágneses momentum viselkedésének leírásából indult el, s számos módosítás után alkalmassá tették a ferromágneses hiszterézis modellezésére is. A Preisach-féle hiszterézismodell talán a legelterjedtebben alkalmazott technika a villamosmérnöki alkalmazások világában, magam is ezen modellt használom a munkám során [1–3, 24–41]. Ezekén kívül számos egyszerűbb modell is létezik [1], mint például a Rayleigh-modell, a Frölich-modell, a Duhem-modell, alkalmaznak egyszerű függvényekből felépített modelleket is stb. Az alkalmazás, az elérni kívánt pontosság, az identifikáció, a számítási sebesség, mind befolyásolja a megfelelő modell kiválasztását. Az utóbbi időben a veszteségek csökkentését is célzó veszteségszámítások a még pontosabb frekvenciafüggő modelleket helyezik előtérbe [1, 3, 33, 34, 36–39, 41].

(d) A villamosmérnöki gyakorlatban a numerikus elektromágneses térszámítást igénylő problémák megoldása, a különféle eszközök tervezése és analízise a Maxwell-egyenletek valamely numerikus, közelítő módszerrel történő megoldásán alapszanak [42–50]. A Maxwell-egyenletek rendszere az elektromágneses tér változóira felírt parciális differenciálegyenletek, vagy integrálegyenletek, amelyek a térszámítást igénylő feladatok megoldására alkalmasak. Potenciálok bevezetésével kevesebb ismeretlent tartalmazó parciális differenciálegyenletek formájában írhatók fel a megoldandó egyenletek [42–62]. A számos numerikus technika közül a dolgozatban a végeselem-módszert alkalmazom [44–52, 63–65], melynek lényege abban áll, hogy a vizsgált tartományt egyszerű alakzatokra bontja fel, amelyekre egyszerű egyenletek írhatók fel, végül ezen egyszerű egyenletek összesítésével a probléma egy közelítő megoldása áll elő. A végeselem-módszer a súlyozott maradék elvének gyenge alakjára épül, s a Galjorkin-eljárást alkalmazza. A végeselem-módszer a diszkretizálás eredményeképp a parciális differenciálegyenleteket algebrai egyenletek rendszerévé transzformálja. Amennyiben a konstitúciós reláció nemlineáris, ahogy az a hiszterézis karakterisztika figyelembe vételekor is fennáll, úgy a nemlineáris parciális differenciálegyenleteket alkalmas, konvergens megoldó algoritmussal kell összekapcsolni. A dolgozatban a fixpontos technikával foglalkozom [22, 31, 32, 66–88].

Célkitűzéseim ezen ismeretekre alapozva a következőkben fogalmazom meg.

1.2. A kutatás célkitűzései

Munkám során egy könnyen alkalmazható, hatékonyan identifikálható, gyors és pontos hiszterézismodell felépítése az egyik cél, amihez eddigi tapasztalataim alapján a Preisach-féle hiszterézismodell a legalkalmasabb. Villamosmérnöki alkalmazási szem-

pontból nagyon lényeges a gyors és minél pontosabb működés. Előbbi megcélozható a lépcsősgörbe alkalmas tárolásával és kezelésével, amely párhuzamos működést is lehetővé kell, hogy tegyen, ugyanis arra kell gondolnom, hogy a modellt numerikus térszimulációkba is illeszteni kívánom. Végeselem-módszer esetén a vizsgált geometria meghatározott pontjaiban összesen nagyszámú hiszterézismodell futtatására van szükség, és emiatt az implementálás rendkívül lényeges. A sebesség úgy is növelhető, hogy az Everett-függvényt alkalmazom a modell kimenetének számítása során. Identifikációhoz a koncentrikus görbékből kiindulva tehát az Everett-függvényt kívánom alkalmazni. Mindez természetesen a vektoriális hiszterézismodell esetében is előnyös lesz, hiszen a vektormodell kimenetét számos skalármodell szuperpozíciója adja. A numerikus térszimulációba történő illesztés szempontjából nagyon fontosnak ítélem, hogy a modell változtatás nélkül alkalmas legyen a direkt karakterisztika és az inverz karakterisztika modellezésére. Ezt az Everett-függvény identifikációja során lehet megvalósítani. A vektor hiszterézismodell és identifikációjának átdolgozására biztosan szükség van, mivel a Preisach-modell említett kiterjesztése forgó mágneses tér modellezésére nem tökéletesen alkalmas. Foglalkozni kívánok a frekvenciafüggés modellezésével is, az irodalomból ismert technikák közül a viszkozitáson alapuló modelleket gondolom a makroszkopikus gondolkodásmódhoz legközelebb állónak.

A mérések során a jól bevált toroid alakú próbatestet kívánom alkalmazni az ugyancsak jól bevált National Instruments mérési adatgyűjtő környezetben. A mért jelek esetében mindig periodikusak, de sok esetben a mért jelek eddigi tapasztalataim alapján nagyon zajosak. A periodicitást kihasználva egy olyan Fourier-sorfejtésen alapuló digitális szűrési technikát kívánok kifejleszteni, amely a laboratóriumomban meglévő eszközökkel kidolgozható. A szűrés a vektoriális mérések során még fontosabb, mert a mérőtekercsek a levegőben helyezkednek el, aminek eredményeképp a mért indukált feszültség amplitúdója nagyon kicsi. Sok esetben szükség van a mágneses indukció időfüggvényének előírására, ami csakis szabályozás útján állítható elő. Ki kell dolgoznom tehát egy hatékony és robusztus szabályozási rendszert, amely ezt az előre nem ismert nemlineáris rendszert szabályozni képes. A vektor hiszterézis karakterisztika mérésére a laboratóriumomban is könnyedén megépíthető elrendezést kívánom megvalósítani, amely egy villamos forgógép átalakítását igényli, s amely kör alakú próbatest vizsgálatára szorítkozik. Mérnöki munka lévén, a mérések elvégzése során rendkívül fontosnak tartom, hogy a méréseket a saját magam által összeállított mérési elrendezéssel magam végezzem el, hiszen így a munka minden egyes fázisát jól megismerem és ellenőrizhetem, ami az esetleges hibák javítása, illetve új ötletek implementálása során előnyt jelent. A mérések elvégzése során a mérési eredményeket pontról-pontra ellenőrizni és analizálni kívánom a végeselem-módszeren alapuló tervező rendszerrel. Ebben a fázisban ellenőrizni és igazolni szeretném az irodalomból ismeretes mérési elvek alapjait, s ezek által a saját mérési elrendezésem is tökéletesíteni tudom.

A Maxwell-egyenletekből kiindulva a lineáris statikus mágneses tér és a lineáris örvényáramú tér számítására alkalmas potenciálformalizmusok az irodalomból rendelkezésre állnak. Ehhez újat úgy kívánok adni, hogy a formalizmusokban bevezetem a nemlineáris hiszterézis karakterisztika kezelésére alkalmas polarizációs formulát, amely mellé a frekvenciafüggő hatásokat is illeszteni kívánom. Ezáltal minden formalizmus alkalmas lehet a nemlinearitás kezelésére, s a kapott nemlineáris parciális differenciálegyenleteket valamilyen nemlineáris egyenletrendszerek megoldására alkalmas technikával meg lehet oldani. Munkám során a fixpontos technika részleteinek kívánok utánajárni, s azt a végeselem-módszerben implementálni. Szeretném a polarizációs formula minden válfaját minden potenciálformalizmussal együttesen alkalmazni anélkül, hogy a modell kimeneti jelének ismeretében további iterációs lépésekre legyen szükség a modell bemenetének meghatározására.

A kidolgozott módszerek akkor működnek hatékonyan, ha azok alkalmazhatók a mérnöki tervezésben. Ennek igazolására számos feladatot meg szeretnék oldani. Ezek egy része nemzetközileg kiírt tesztfeladat, másik része pedig saját mérési eredményeim és a numerikus módszerek eredményeinek összevetése lesz.

A tervezés során a mérnökök, az informatikai háttér hatalmas fejlődésének köszönhetően, ma már főleg számítógéppel támogatott tervező rendszereket használnak. A végeselem-módszer az egyik legjobban elterjedt módszer a tervezésben. A numerikus technikákhoz azonban megfelelő anyagmodellek szükségesek, amelyek hűen visszaadják a vizsgált anyag viselkedését.

2. Az alkalmazott módszerek és eredményeik

A skalár hiszterézis karakterisztika mérésére kidolgoztam egy mérési elrendezést. A mérések során toroid alakú próbatestet vizsgáltam, a mágneses teret a toroidra tekercselt primer tekercsen átfolyó áram gerjeszti, amelyből a mágneses térerősség közvetlenül számítható, a nyitott szekunder tekercsen mérhető indukált feszültségből pedig a mágneses indukció meghatározható, s a hiszterézis karakterisztika felrajzolható. A méréseket a számítógépen futó, a LabVIEW fejlesztői környezetben általam implementált szoftver vezérli, a National Instruments cég méréseket támogató termékeivel pedig a generált és a mérendő jeleket továbbítottam, illetve mértem. A mérések során azt tapasztaltam, hogy a mért jelek meglehetősen zajosak, és a zaj jelenléte a mért jelek feldolgozása során a dolgozatban részletezett nehézségeket okozza. A zaj szűrése érdekében a jeleket Fourier-transzformáltam, majd a nem kívánatos harmonikusokat elhagytam, s az így szűrt spektrumot az időtartományba transzformálva tökéletes eredményt kaptam. Kidolgoztam egy proporcionális szabályozó algoritmust, amellyel gyakorlatilag tetszőleges időbeli lefutású mágneses indukciót tudok előállítani. Az algoritmus lépésről-lépésre módosítja az áramjel időfüggvényét úgy, hogy a kívánt mágneses indukció előálljon.

A skalár mérés során kidolgozott eljárásokat általánosítottam oly módon, hogy azok alkalmasak legyenek a kétdimenziós vektoriális hiszterézis karakterisztika felvételére. A vektor hiszterézis karakterisztika mérésére építettem egy mérési elrendezést, amely egy átalakított villamos motort tartalmaz. A motor háromfázisú tekercselését kétfázisúra cseréltem, amelyet speciálisan erre a célra készítettem, a vizsgált próbatestet a forgórész helyére helyeztem, s ebben a kör alakú lemezben vizsgáltam a mágneses térerősség és a mágneses indukció vektorok alakulását. A proporcionális szabályozóval tetszőleges trajektóriájú mágneses indukció és mágneses térerősség elérhető. Ezeknél a méréseknél a digitális elven működő szűrési algoritmus különösen előnyös volt, mivel a mágneses térerősség mérésére használt szenzorok jele rendkívül zajos. A mágneses indukció ortogonális komponenseit a próbatestbe fúrt kis átmérőjű lyukakon átvezetett tekercsekkel mértem. A mágneses térerősség tangenciális komponense közvetlen a lemez felületén nehezen mérhető. Erre a célra egy két-két tekercset tartalmazó tekercsrendszert készítettem, s a két tekercs jeléből lineáris extrapolációval számoltam ki a térerősség két ortogonális komponensét a lemez felületén. A lineáris extrapoláció alkalmazhatóságát végeselem-módszeren alapuló szimulációkkal igazoltam és a mérési összeállítást a megvalósítás során a végeselem-módszerrel terveztem és analizáltam.

A fenti mérései környezet eredményeit felhasználva építettem fel, illetve tökéletesítettem a modelleket. Kidolgoztam a skalár hiszterézis karakterisztika szimulációjára alkalmas Preisach-féle hiszterézismodell, amely a mérési szimulációkban rendkívül előnyösen alkalmazható. A modell gyors futási idővel bír, amit a lépcsősgörbe speciális szervezésével és tárolásával értem el. A kidolgozott eljárás alkalmas a párhuzamos futtatásra is, ami tovább növeli a modell sebességét a számítások során. A modell nagyon pontosan visszaadja a mérési eredményeket a kétváltozós Everett-függvény spline alapokon nyugvó approximációjának köszönhetően. Kidolgoztam a statikus skalármodell frekvenciafüggő módozatát is a viszkozitáson alapuló kiterjesztés felhasználásával, a modell paramétereinek meghatározására pedig identifikációs technikát dolgoztam ki. A skalármodellből kiindulva kétdimenziós vektormodellt realizáltam, amelyben skalármodellek szuperpozíciójaként állítom elő a vektormodell kimenetét. A modell felépítéséhez saját méréseken alapuló identifikációs technikát is javaslok. A vektoriális modellt egy új paraméter bevezetésével általánosítottam oly módon, hogy az alkalmas legyen a forgó mágneses tér pontosabb leírására is, és a paraméter meghatározására identifikációs technikát javaslok. A modell alkalmazható izotrop mágneses anyagok és anizotropiával bíró anyagok modellezésére is. Realizáltam a dinamikus vektormodell is, s a modell paramétereit saját mérési eredményeim felhasználásával identifikáltam. A viszkozitáson alapuló dinamikus kiterjesztés segítségével a modelleket alkalmassá tettem a mágnesezési folyamatok során előálló domenfal-elmozdulások okozta mikro-örvényáramok makroszkopikus leírására, miáltal a frekvenciafüggés nagyon pontosan leírható a modern mérnöki tervező eljárásokban.

Megvizsgáltam a fixpontos iterációs séma alkalmazhatóságát a nemlineáris statikus mágneses tér és a nemlineáris örvényáramú problémák megoldásában. A nemlineáris hiszterézis karakterisztikát a polarizációs formulának megfelelően két tag összegére bontottam fel, s megvizsgáltam a direkt karakterisztika és az inverz karakterisztika felbontására alkalmas két formulát. Az első tag a bemeneti változó lineáris függvénye, a második tag pedig az iteratíván meghatározandó rezíduum. Ezután a polarizációs formulát általánosítottam oly módon, hogy a mikro-örvényáramok okozta – Maxwell-egyenletekkel nem modellezhető – frekvenciafüggő járulékos veszteségek reprezentálására alkalmas mágneses térerősséget figyelembe lehessen venni. Így a fixpontos technikát alkalmassá tettem dinamikus modellek térszámításba való beillesztésére is. A megfogalmazott formalizmus általános, vagyis tetszőleges hiszterézismodellekre alkalmazható. A nemlineáris rezíduumot a fixpontos módszerrel iteratíván határoztam meg, amely bizonyítottan konvergens sémákat eredményez. Kidolgoztam az iterációs séma négy lehetséges alakját, amelyek összekötik a Maxwell-egyenletek megoldásaként adódó mágneses térerősséget, vagy a mágneses indukciót a direkt típusú és az inverz típusú hiszterézismodellekkel. Az összesen négy módszerből álló módszercsalád nagy előnye, hogy tetszőleges modell tetszőleges formalizmussal összekapcsolható, s nincs szükség további belső iterációra, amely nagymértékben csökkenti a szimulációs időt.

Ezen téma kutatása során kidolgoztam és a [89] monográfiában tematikailag is rendszereztem számos potenciálformalizmust, amelyek segítségével a nemlineáris problémák megfogalmazhatók. A jelen értekezésben ezeket általánosítottam úgy, hogy figyelembe veszik a mikro-örvényáramok frekvenciafüggő hatását is. A megfogalmazott potenciálformalizmusok természetesen alkalmazhatók lineáris feladatok megoldása során is. A súlyozott maradék elvre támaszkodva kidolgoztam a formalizmusokhoz tartozó gyenge alakokat is, amelyek a végeselem-módszert alkalmazó szimulációkban használhatók. Megvizsgáltam, hogy az egyes formalizmusok milyen módon reprezentálhatók csomóponti és élmenti formafüggvényekkel, és számos feladat megoldása és analizálása során bemutattam az egyes megoldások előnyeit és hátrányait. A potenciálformalizmusok alkalmazása kapcsán olyan új potenciálformalizmus peremérték-feladatát fogalmaztam meg, amely nagyon előnyösen alkalmazható a forrásáram reprezentálására használt áramvektorpotenciál modern élmenti végeselemekkel történő approximációjára. Ezen összefoglaló munkám oktatási szempontból is nagyon hasznos.

A kidolgozott eljárások működésének helyességét és mérnöki gyakorlatban történő alkalmazhatóságát különféle problémák megoldásával prezentáltam. A mérési adatok és a szimulációs eredmények összevetésével, valamint az egyes formalizmusok által számított eredmények összehasonlításával igazoltam a kidolgozott eljárások, módszerek és formalizmusok alkalmazhatóságát a mérnöki tervező és kutató munkában.

3. Az új tudományos eredmények összefoglalása

Végül összefoglalom az értekezésben bemutatott és részletesen kifejtett új tudományos eredményeim.

1. Tézis

Realizáltam a Preisach-féle hiszterézismodell-család egy, a mérnöki szimulációkban rendkívül előnyösen alkalmazható verzióját, amely kis futási ideje mellett nagy pontossággal bír. A gyors működést a lépcsősgörbe alkalmas szervezésével, a pontosságot pedig az Everett-függvény spline technikán alapuló közelítésével biztosítottam. Kidolgoztam az izotrop és az anizotrop vektor Preisach-modell egy általánosítását, amely alkalmas a forgó mágnesezési folyamatok még pontosabb leírására, a modellek identifikációjára pedig eljárást javasoltam. Kidolgoztam a modellek dinamikus általánosítását is, amelyek alkalmasak a frekvenciafüggés pontos reprezentálására, a modellek identifikációjára pedig eljárást javasoltam. Az egyes modellek elemzésén túl a modellek saját mérési eredményekkel történő összevetésével igazoltam elméleti eredményeim helyességét.

- 1.a A skalár hiszterézis karakterisztika mérésére egy automatizált mérési elrendezést dolgoztam ki, amely a különféle hiszterézismodellek identifikációjához szükséges tanítási mintahalmazt felveszi. A zajjal terhelt mért jelekből a zavaró összetevőket egy Fourier-transzformáción alapuló, digitális elveken megvalósított szűrési technikával tökéletesen elimináltam. Az előre definiált jelalakú mágneses indukció elérésére egy proporcionális szabályozó eljárást implementáltam, amelynek robusztusságát nagymértékben befolyásolja a szűrés sikeressége.
- 1.b A skalár hiszterézis karakterisztika modellezésére a frekvenciafüggetlen Preisach-modellt alkalmaztam oly módon implementálva, hogy az gyors és pontos legyen a mérnöki szimulációkban. A megvalósított modell képes kihasználni a mai modern párhuzamos számítástechnika előnyeit. A modell felállítása során az Everett-függvényt identifikáltam, ami tökéletes egyezést biztosít a mért és a szimulált eredmények között. A frekvenciafüggetlen modellt kiegészítettem a járulékos veszteségeket makroszkopikusan leíró komponenssel, s elvégeztem annak identifikálását.
- 1.c Kidolgoztam a vektor hiszterézis karakterisztika mérésére alkalmas automatizált mérési elrendezést, amely alkalmas a kialakuló mágneses tér rögzítésére egy kör alakú próbatestben. Realizáltam a mérések pontos elvégzéséhez szükséges szenzorokat. A szenzorok jele ebben a mérésben gyakorlatilag elveszik a környezeti zajban, emiatt a skalár mérésnél kidolgozott szűrési technika itt még nagyobb jelentőségű volt. A vektoriális mérések során nemcsak a mágneses indukció, de a mágneses térerősség előírt jelalakja is csak szabályozással érhető el. Ezen oknál fogva általánosítottam a skalár mérésnél alkalmazott proporcionális szabályozót.

Az általam implementált mérési elrendezés kiválóan alkalmas a vektoriális karakterisztika felvételére, s a vektoriális hiszterézismodellek identifikációjához szükséges minták előállítására.

- 1.d A klasszikus izotrop vektor Preisach-hiszterézismodellt általánosítottam oly módon, hogy egy új paraméter bevezetésével az alkalmas legyen a forgó mágnesezési folyamatok pontosabb leírására. Az izotrop modell identifikációjára általam korábban kidolgozott eljárást ennek megfelelően módosítottam. A klasszikus anizotrop vektor Preisach-hiszterézismodellt pedig általánosítottam oly módon, hogy az alkalmas legyen az anizotropia kezelésére úgy, hogy a forgó mágnesezési folyamatok során tapasztalható jelenségek leírása még pontosabb legyen. Ezt a mért Everett-függvények térbeli irányok szerinti Fourier-sorba fejtésével értem el, s az izotrop modellre alkalmazható identifikációs technikát tudtam alkalmazni, de ebben az esetben több paramétert kell a forgó mágnesezési folyamatok alapján identifikálni. A modellek kimeneti jelét saját mérési eredményekkel vetettem össze, ami igazolta elméleti eredményeim helyességét. A frekvenciafüggetlen modellt kiegészítettem a járulékos veszteségeket makroszkopikusan leíró komponenssel, s elvégeztem annak identifikálását.

Az 1. tézis a következő műveimen alapul: [89–110].

2. Tézis

A kidolgozott Preisach-féle hiszterézismodelleket a polarizációs formulát használva numerikus térszimulációt alkalmazó eljárásokba illesztettem. A polarizációs formulával linearizáltam a nemlineáris karakterisztikát, a lineáris tag meredekségének alkalmas megválasztásával pedig kontraktív leképezést nyertem, amely a Maxwell-egyenleteken keresztül bizonyítottan konvergens fixpontos iterációs sémára vezet. A polarizációs formulát általánosítottam oly módon, hogy a járulékos veszteségek reprezentálására alkalmas mágneses térerősséget figyelembe lehessen venni, így a fixpontos technikát alkalmassá tettem dinamikus modellek beillesztésére is. Kidolgoztam a statikus mágneses tér és az örvényáramú tér számítására alkalmas potenciálformalizmusok nemlineáris hiszterézis figyelembevételére alkalmas alakját, s kidolgoztam az egyes formalizmusok gyenge alakját is, amelyek a végeelem-módszerben is alkalmazhatók. A polarizációs formula két alakját és az egyes formalizmusok elsődleges változóját alapul véve kidolgoztam az összes lehetséges variációt, ahogy a formalizmusok és a direkt, vagy inverz alakban implementált hiszterézismodellek összekapcsolhatók. Mindez összesen négy lehetséges módszer családot eredményez, amelyek mentesek a további belső iterációktól, miáltal a futási idő jelentősen redukálható.

A 2. tézishez szorosan kapcsolódnak a következő publikációim: [89, 90, 98, 102, 105–119].

3. Tézis

Elvégeztem a nemlineáris statikus és örvényáramú problémák megoldására alkalmas potenciálformalizmusok beható analízisét különféle problémák megoldásának előállítására és elemzése során. Az egyes formalizmusokat alkalmazva implementáltam a fixpontos iterációs sémát, miközben a nemlinearitást és a frekvenciafüggést az általánosított polarizációs formulával kezeltem. A realizált mérési elrendezések tervezése és validálása kapcsán igazoltam a kidolgozott skalár és vektoriális Preisach-féle hiszterézismodellek alkalmazhatóságát a villamosmérnöki tervező eljárásokban. Ezen tézishoz kapcsolódóan olyan új szabad formalizmust alkalmazó peremérték-feladatot fogalmaztam meg a $\vec{T}_0$ áram-vektorpotenciál meghatározására, amely jól illeszkedik a modern vektoriális végelelem-módszerhez.

- 3.a Elvégeztem a villamos gépeket alkotó lemezek vizsgálatát. Igazoltam a kidolgozott dinamikus skalár Preisach-modell helyességét különböző jellegű veszteségi komponenseket, és különféle gerjesztési módokat realizálva.
- 3.b A toroid transzformátor modellezésével és a szimulációs eredmények saját mérési adatokkal történő összevetésével igazoltam, hogy a frekvenciafüggetlen hiszterézismodell örvényáramú problémák esetén nem ad teljesen pontos eredményt, azaz a Maxwell-egyenletekből számítható örvényáramok okozta veszteségek csupán a teljes veszteség egy részét modellezzik. A járulékos veszteségekkel kiegészített modell viszont jó közelítést ad.
- 3.c Igazoltam, hogy a kidolgozott numerikus térszimuláció hatékonyan alkalmazható a villamosmérnöki tervező munkában: elvégeztem egy háromfázisú transzformátor és egy háromfázisú villamos szinkrongép analízisét, s figyelembe vettem a különféle hiszterézismodelleket, vizsgáltam azok viselkedését; elvégeztem egy bonyolultabb háromdimenziós elrendezés vizsgálatát, amelyben a várt eredményeket értem el; a vektor hiszterézis felvételére alkalmas mérési összeállítás numerikus analízisével igazoltam, hogy a méréseket végző H -szenzorok elhelyezése optimális, s a mágneses térerősség felületmenti komponensének számítása a lineáris extrapolációval valóban helyes.
- 3.d Olyan új peremérték-feladatot fogalmaztam meg, amely egy szabad formalizmus keretében alkalmas a $\vec{T}_0$ áram-vektorpotenciál előállítására, és a gyenge alakban megfogalmazható probléma megoldásaként meghatározható vektorpotenciál közvetlenül kapcsolódhat a modern élmenti végelelem-módszerhez.

A 3. tézis a következő munkáimon alapul: [89, 90, 97–99, 102–111, 114, 115, 117–122].

4. Összefoglalás

A disszertáció fő témája a hiszterézis karakterisztika mérése és modellezése, valamint a kidolgozott modellek numerikus térszimulációba, jelen esetben a végelem-módszerbe történő illesztése volt. A skalár karakterisztika mérése során a toroid transzformátort alkalmaztam, de nem vizsgáltam más méréstechnikai megoldásokat, mint például a bevezetőben említett I alakú lemezek vizsgálatára alkalmas Epstein-keretet. A vektor hiszterézis karakterisztika mérésére egy saját magam által épített mérési elrendezést használtam, amelynek tervezése során az irodalmi ismeretanyagra támaszkodtam, és saját végelem-módszeren alapuló tervező eljárással is alátámasztva végeztem el az eszköz megvalósítását. A mérési eredmények birtokában implementáltam a Preisach-féle hiszterézismodellt és annak kétdimenziós kiterjesztését mind izotrop, mind anizotrop esetre. A modellek identifikációjára eljárást is javasoltam, a modellek viselkedésének helyességét pedig saját mérési eredményeim által validáltam és igazoltam. Elvégeztem továbbá a modellek dinamikus kiterjesztését, miáltal a Maxwell-egyenletekből számítható örvényáram-veszteségek mellett a járulékos veszteségek hatását is modellezni tudom.

A végelem-módszer a súlyozott maradék elv gyenge alakjának megoldására alkalmas technika a Galjorkin-eljárásnak megfelelően. Ennek kapcsán megvizsgáltam a Maxwell-egyenletekből levezethető különféle potenciálformalizmusokat, s azokat kiterjesztettem a nemlinearitás figyelembe vételére a polarizációs formulán keresztül. Az így előálló egyenletek megoldására a fixpontos technikát alkalmaztam, amely bizonyítottan konvergens a polarizációs formulában szereplő lineáris tag meredekségének alkalmas megválasztása mellett. A módszer nagy hátránya a lassú konvergencia. Ezen oknál fogva célszerű foglalkozni a különféle gyorsítási lehetőségekkel. Megjegyzem, hogy a hiszterézis karakterisztikát is tartalmazó elektrodinamikai rendszerek modellezése még nem elterjedt, egyszerű karakterisztikák kezelésére alkalmasak a kereskedelembe is beszerezhető szoftverek, de bonyolultabb nemlinearitás kezelése ma is nyitott kérdés. Ezt a hiányt igyekszünk pótolni a Széchenyi István Egyetem Automatizálási Tanszékén fejlesztés alatt álló szoftverünkkel, aminek elsődleges célja a járműiparban is felhasználásra kerülő különféle villamos gépek modellezése, és tervezésének elősegítése. Erre lehetőségünk a Széchenyi István Egyetem Járműipari Kutatóközpontjában van. A másik nagyon ígéretes irány a numerikus szimulációk gyorsításának területén a módszerek párhuzamosíthatósági kérdéseinek vizsgálata a különböző domen dekompozíciós technikákon, vagy az eljárások párhuzamosításán keresztül. Mindez előnyösen kihasználná a mai modern számítástechnikai háttérrel. Nemzetközi szinten is sikerült bekapcsolódnunk a tudományos vérkeringésbe: a Plzen Műszaki Egyetem Elméleti Villamosságtan Tanszékén fejlesztett Agros2D végelem-szoftverhez (<http://www.agros2d.org/>) a cseh kollégákkal közösen elkezdtük a kidolgozott hiszterézismodellek és a fixpontos technika implementálását.

Hivatkozások

- [1] Iványi A. *Hysteresis Models in Electromagnetic Computation*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1997.
- [2] Krasnoselskii M. A. and Pokrovskii A. V. *Systems with Hysteresis*. Nauka, Moszkva, 1983.
- [3] Bertotti G. and Mayergoyz I. D. *The Science of Hysteresis*. Academic Press, New York, 2006.
- [4] Zurek S., Marketos P., Meydan T., and Moses A. J. Use of novel adaptive digital feedback for magnetic measurements under controlled magnetizing conditions. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41(11):4242–4249, 2005.
- [5] Antonelli E., Cardelli E., and Faba A. Epstein frame: How and when it can be really representative about the magnetic behavior of laminated magnetic steels. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41(5):1516–1519, 2005.
- [6] Iványi A. *Magnetic Field Computation with R-functions*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1998.
- [7] Enokizono M. (szerk.). *Two-Dimensional Magnetic Measurement and its Properties*. Japan Society of Applied Electromagnetics, 1992.
- [8] Guo Y. G., Zhu J. G., Zhong J. J., Lu H., and Jin J. X. Measurement and modeling of rotational core losses of soft magnetic materials used in electrical machines: a review. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(2):279–291, 2008.
- [9] Enokizono M. Vector magnetic property and magnetic characteristic analysis by vector magneto-hysteretic E&S model. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(3):1148–1151, 2009.
- [10] Zhu J. G. and Ramsden V. S. Improved formulations for rotational core losses in rotating electrical machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 34(4):2234–2242, 1998.
- [11] Makaveev D., Rauch M., Wulf M., and Melkebeek J. Accurate field strength measurement in rotational single sheet tester. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215-216:673–676, 2000.
- [12] Makaveev D., Wulf M., Gyselinck J., Maes J., Dupré L., and Melkebeek J. Measurement system for 2D magnetic properties of electrical steel sheets: Design and performance. *6th International Workshop on 1&2-Dimensional Magnetic Measurement and Testing, Bad Gastein, Ausztria, 2000. szeptember 20-21*, pp:48–55.
- [13] Makaveev D., Wulf M., and Melkebeek J. Field homogeneity in a two-phase rotational single sheet tester with square samples. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 196-197:937–939, 1999.
- [14] Brix W., Hempel K. A., and Schulte F. J. Improved method for the investigation of the rotational magnetization process in electrical steel sheet. *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-20(5):1708–1710, 1984.
- [15] Makaveev D., Maes J., and Melkebeek J. Controlled circular magnetization of electrical steel in rotational single sheet testers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 37(4):2740–2742, 2001.

- [16] Hasenzagl A., Wieser B., and Pfützner H. Novel 3-phase excited single sheet tester for rotational magnetization. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 160:180–182, 1996.
- [17] Cardelli E. and Faba A. Vector hysteresis measurements via a single disk tester. *Physica B*, 372:143–146, 2006.
- [18] Gorican V., Hamler A., Jesenik M., Stumberger B., and Trlep M. Unreliable determination of vector B in 2-D SST. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 254-255:130–132, 2003.
- [19] Jesenik M., Gorican V., Trlep M., Hamler A., and Stumberger B. Field homogeneity in a two-phase round rotational single sheet tester with one and both side shields. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 254-255:247–249, 2003.
- [20] Chikazumi S. *Physics of Magnetism*. John Wiley and Sons, New York, 1964.
- [21] Jiles D. C. *Introduction to Magnetism and Magnetic Material*. Chapman and Hall, London, 1991.
- [22] Kis P. *Jiles-Atherton Model Implementation to Edge Finite Element Method*. PhD thesis, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2007.
- [23] Hamimid M., Mimoune S. M., and Feliachi M. Hybrid magnetic field formulation based on the losses separation method for modified dynamic inverse Jiles-Atherton model. *Physica B*, 406:2755–2757, 2011.
- [24] Füzi J. Computationally efficient rate dependent hysteresis model. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 18:445–457, 1999.
- [25] Mayergoyz I. D. and Friedman G. Generalized Preisach model of hysteresis. *IEEE Transactions on Magnetics*, 24:212–217, 1988.
- [26] Mayergoyz I. D. and Friedman G. On the integral equation of the vector Preisach hysteresis model. *IEEE Transactions on Magnetics*, 23:2638–2640, 1987.
- [27] Cardelli E., Della Torre E., and Pinzaglia E. Identifying the Preisach function for soft magnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 39:1341–1344, 2003.
- [28] Dupré L. R., Bottuasco O., Chiampi M., Fiorillo F., Lo Bue M., Melkebeek J., Repetto M., and Rauch M. Dynamic Preisach modelling of ferromagnetic laminations under distorted flux excitation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 34:1231–1233, 1998.
- [29] Bertotti G. Dynamic generalization of the scalar Preisach model of hysteresis. *IEEE Transactions on Magnetics*, 28:2599–2601, 1992.
- [30] Szabó Zs. Preisach functions leading to closed form permeability. *Physica B*, 372:61–67, 2006.
- [31] Szabó Zs. *Hysteresis Models of Elementary Operators and Integral Equations*. PhD thesis, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2002.
- [32] Kuczmann M. *Neural Network Based Vector Hysteresis Model and the Nondestructive Testing Method*. PhD thesis, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2005.
- [33] Bertotti G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 24:621–630, 1988.

- [34] Zirka S. E., Moroz Y. I., Marketos P., and Moses A. J. Comparison of engineering methods of loss prediction in thin ferromagnetic laminations. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320:2504–2508, 2008.
- [35] Bastos J. P. A. and Sadowski N. *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*. Marcel Dekker, New York, 2003.
- [36] Barbisio E., Fiorillo F., and Ragusa C. Predicting loss in magnetic steels under arbitrary induction waveform and with minor hysteresis loops. *IEEE Transactions on Magnetics*, 40(4):1810–1819, 2004.
- [37] Bottauscio O., Chiampi M., and Chiarabaglio D. Advanced model of laminated magnetic cores for two-dimensional field analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*, 36:561–573, 2000.
- [38] Belahcen A., Dlala E., and Pippuri J. Modelling eddy-current in laminated non-linear magnetic circuits. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 30(3):1082–1091, 2011.
- [39] Belahcen A., Dlala E., Fonteyn K., and Belkasim M. A posteriori iron loss computation with vector hysteresis model. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 29(6):1493–1503, 2010.
- [40] Bottauscio O., Canova A., Chiampi M., and Repetto M. Iron losses in electrical machines: influence of different material models. *IEEE Transactions on Magnetics*, 38(2):805–808, 2002.
- [41] Zirka S. E., Moroz Y. I., Marketos P., and Moses A. J. Properties of dynamic Preisach models. *Physica B*, 343:85–89, 2004.
- [42] Jackson J. D. *Classical Electrodynamics*. J. Wiley, New York, 1962.
- [43] Simonyi K. and Zombory L. *Elméleti villamosságtan*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 2000.
- [44] Jin J. *The Finite Element Method in Electromagnetics*. John Wiley and Sons, New York, 2002.
- [45] Bíró O. and Richter K. R. CAD in electromagnetism. *In Series Advances in Electronics and Electron Physics, Academic Press, New York*, 82, 1991.
- [46] Luomi J. *Finite Element Methods for Electrical Machines*. Chalmers University of Technology, Göteborg, 1993.
- [47] Bíró O. *Potenciálfüggvények örvényáramterek végeselem-analízisében*. DSc disszertáció, Magyar Tudományos Akadémia, 2003.
- [48] Silvester P. P. and Ferrari R. L. *Finite Elements for Electrical Engineers*. Cambridge University Press, Cambridge, 1983.
- [49] Schwarz H. R. *Methode der Finiten Elemente*. B.G. Teubner, Stuttgart, 1991.
- [50] Iványi A. *Folytonos és diszkrét szimulációk az elektrodinamikában*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2003.
- [51] Bossavit A. *Computational Electromagnetism*. Academic Press, Boston, 1998.

- [52] Bíró O. Edge element formulations of eddy current problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 169(3):391–405, 1999.
- [53] Nakata T. (szerk.). 3-D electromagnetic field analysis. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 9:263–274, 1990.
- [54] Bíró O., Preis K., Vrisk G., and Richter K. R. Computation of 3-D magnetostatic fields using a reduced scalar potential. *IEEE Transactions on Magnetics*, 29:1329–1332, 1993.
- [55] Preis K., Bardi I., Bíró O., Magele C., Renhart W., Richter K. R., and Vrisk G. Numerical analysis of 3D magnetostatic fields. *IEEE Transactions on Magnetics*, 27:3798–3803, 1991.
- [56] Preis K., Bárdi I., Bíró O., Magele C., Vrisk G., and Richter K. R. Different finite element formulations of 3D magnetostatic field. *IEEE Transactions on Magnetics*, 28:1056–1059, 1992.
- [57] Bíró O. and Preis K. On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy currents. *IEEE Transactions on Magnetics*, 25:3145–3159, 1989.
- [58] Bíró O., Preis K., and Richter K. R. On the use of the magnetic vector potential in the nodal and edge finite element analysis of 3D magnetostatic problems. *IEEE Transactions on Magnetics*, 32:651–654, 1996.
- [59] Bíró O. and Preis K. Finite element analysis of 3-D eddy currents. *IEEE Transactions on Magnetics*, 26:418–423, 1990.
- [60] Preis K., Bárdi I., Bíró O., Magele C., Renhart W., Richter K. R., and Vrisk G. Numerical analysis of 3D magnetostatic fields. *IEEE Transactions on Magnetics*, 27:3798–3803, 1991.
- [61] Bíró O., Preis K., Vrisk G., Richter K. R., and Tícar I. Computation of 3-D magnetostatic fields using a reduced scalar potential. *IEEE Transactions on Magnetics*, 29:1329–1332, 1993.
- [62] Coulomb J. L. Finite element three dimensional magnetic field computation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 17:3241–3246, 1981.
- [63] Koltai M. and Zombory L. *Elektromágneses terek gépi analízise*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.
- [64] Zienkiewicz O. C. and Taylor R. *The Finite Element Method*. McGraw-Hill, Maidenhead, 1991.
- [65] Gyimóthy Sz. *Adaptív automatikus hálógenerálás a végelem módszerhez*. PhD thesis, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2003.
- [66] Katzenelson J. and Seitelman L. H. An iterative method for solution of networks of nonlinear monotone resistors. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 13(3):397–407, 1966.
- [67] Hantila I. F. A method of solving stationary magnetic field in non-linear media. *Revue Roumaine Des Sciences Techniques, Électrotechnique et Énergétique, Bukarest*, 20:397–407, 1975.

- [68] Hantila I. F. A method based on the components of polarization for solving stationary fields problems. *Revue Roumaine Des Sciences Techniques, Électrotechnique et Énergétique, Bukarest*, 28:121–126, 1983.
- [69] Hantila I. F. Mathematical model of the relation between B and H for non-linear media. *Revue Roumaine Des Sciences Techniques, Électrotechnique et Énergétique, Bukarest*, 19:429–448, 1974.
- [70] Hantila I. F. and Grama G. An overrelaxation method for the computation of the fixed point of a contractive mapping. *Revue Roumaine Des Sciences Techniques, Électrotechnique et Énergétique, Bukarest*, 27:395–398, 1974.
- [71] Hantila I. F., Tugulea C., Drosu O., Cranganu Cr., and Leuca T. Fixed point methods for electromagnetic field computation. *3rd International Conference on Renewable Sources and Environmental Electro-Technologies, Felix-Spa, România*, pp:11–17, 2000.
- [72] Ifrim C. Numerical method for transient non-linear diffusion problems. *Proceedings of the 11th IGTE Symposium, Graz, Ausztia, 2004. szeptember 12-15*, pp:161–165.
- [73] Peterson W. Fixed-point technique in computing nonlinear eddy current problems. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 22:231–252, 2003.
- [74] Dupre L.R., Bottuascio O., Chiampi M., Repetto M., and Melkebeek J. Modeling of electromagnetic phenomena in soft magnetic materials under unidirectional time periodic flux excitation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 35:4171–4184, 1999.
- [75] Chiampi M., Negro A. L., and Tartaglia M. A finite element method to compute three-dimensional magnetic field distribution in transformer cores. *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-16:1413–1419, 1980.
- [76] Bottuascio O., Chiampi M., and Ragusa C. Transient analysis of hysteretic field problems using fixed point technique. *IEEE Transactions on Magnetics*, 39:1179–1182, 2003.
- [77] Ossart F. and Ionita V. Convergence de la méthode du point fixe modifiée pour le calcul de champ magnétique avec hystérésis. *The European Physical Journal, Applied Physics*, 5:63–69, 1999.
- [78] Chiampi M., Chiarabaglio D., and Repetto M. A Jiles-Atherton and fixed-point combined technique for time periodic magnetic field problems with hysteresis. *IEEE Transactions on Magnetics*, 31(6):4306–4309, 1995.
- [79] Saitz J. Newton-Raphson method and fixed-point technique in finite element computation of magnetic field problems in media with hysteresis. *IEEE Transactions on Magnetics*, 35(3):1398–1401, 1999.
- [80] Henrotte F., Nicolet A., Delincé F., Genon A., and Legros Pr. W. Modeling of ferromagnetic materials in 2D finite element problems using Preisach’s model. *IEEE Transactions on Magnetics*, 28(5):2614–2616, 1992.
- [81] Agarwall P., Mechan M., and O’Reage D. *Fixed Point Theory and Applications*. Cambridge University Press, 2001.
- [82] Bahvalov N. Sz. *A gépi matematika numerikus módszerei*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977.

- [83] Chiampi M., Ragusa C., and Repetto M. Strategies for accelerating convergence in nonlinear fixed point method solutions. *Proceedings of the 7th International IGTE Symposium, Graz, Ausztria, 1996. szeptember 23-26*, pp:245–250.
- [84] Dlala E., Belahcen A., and Arkkio A. Locally convergent fixed-point method for solving time-stepping nonlinear field problems. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(11):3969–3975, 2007.
- [85] Petersen B. E. The Picard iteration (<http://oregonstate.edu/~peterseb>, utolsó látogatás: 2014. május 29.). 2007.
- [86] Takahashi N., Shimomura K., Miyagi D., and Kaimori H. Speed-up of nonlinear magnetic field analysis using a modified fixed-point method. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 32(5):1749–1759, 2013.
- [87] Ciric I. R. Convergence acceleration in the polarization method for nonlinear periodic fields. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 30(6):1688–1700, 2011.
- [88] Ciric I. R., Maghiar T., Hantila F., and Ifrim C. Error bounds for the FEM numerical solution of non-linear field problems. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 23(3):835–844, 2004.
- [89] Kuczmam M. and Iványi A. *The Finite Element Method in Magnetics*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2008.
- [90] Kuczmam M. and Kovács G. Improvement and application of the viscous-type frequency-dependent Preisach model. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(2), 2014.
- [91] Pólik Z. and Kuczmam M. Measuring and control the hysteresis loop by using analog and digital integrators. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 10(7):1861–1865, 2008.
- [92] Kuczmam M. Fourier transform and controlling of flux in scalar hysteresis measurement. *Physica B*, 403(2-3):410–413, 2008.
- [93] Kuczmam M. Scalar hysteresis measurement using FFT. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 10(7):1828–1833, 2008.
- [94] Pólik Z., Ludvig T., and Kuczmam M. Measuring of the scalar hysteresis characteristic with a controlled flux density using analog and digital integrators. *Journal of Electrical Engineering*, 58(4):236–239, 2007.
- [95] Kuczmam M. Arbitrary flux waveform generation in scalar hysteresis measurement. *Pollack Periodica*, 2(3):3–14, 2007.
- [96] P. Kis, Kuczmam M., Füzi J., and Iványi A. Hysteresis measurement in LabVIEW. *Physica B*, 403(2-3):410–413, 2008.
- [97] Kuczmam M. Dynamic Preisach hysteresis model (online: <http://stoner.phys.uaic.ro/jarp/index.php/jarp>, utolsó látogatás: 2014. május 29.). *Journal of Advanced Research in Physics*, 1(1), 2010.
- [98] Kuczmam M. Vector Preisach hysteresis modeling: Measurement, identification and application. *Physica B*, 406(8):1403–1409, 2011.

- [99] Kuczmam M. Measurement and simulation of vector hysteresis. *Przegląd Elektrotechniczny*, 87(3):103–106, 2011.
- [100] Kuczmam M. Simulation of uniaxial anisotropy by vector Preisach model. *Pollack Periodica*, 5(2):97–106, 2010.
- [101] Kuczmam M. and Stoleriu L. Anisotropic vector Preisach model (online: <http://stoner.phys.uaic.ro/jarp/index.php/jarp>, utolsó látogatás: 2014. május 29.). *Journal of Advanced Research in Physics*, 1(1), 2010.
- [102] Kuczmam M. Simulation of a vector hysteresis measurement system taking hysteresis into account by the vector Preisach model. *Physica B*, 403(2-3):433–436, 2008.
- [103] Kuczmam M. Identification of the 2D vector Preisach hysteresis model. *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 30(2):538–551, 2011.
- [104] Kuczmam M. Measurement and simulation of vector hysteresis characteristics. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(11):5188–5191, 2009.
- [105] Kuczmam M. Vector hysteresis measurement and simulation. *Przegląd Elektrotechniczny*, 85(12):92–95, 2009.
- [106] Kuczmam M. Design of a 2D RRSST system by FEM and the $\mathbf{T}, \Phi - \Phi$ potential formulation. *Pollack Periodica*, 3:67–80, 2008.
- [107] Kuczmam M. Analysis of a vector hysteresis measurement system. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 10(7):1823–1827, 2008.
- [108] Kuczmam M. Numerical analysis of a 2D vector hysteresis measurement system. *Pollack Periodica*, 2:17–26, 2007.
- [109] Kuczmam M. Numerical analysis of a 2D vector hysteresis measurement system under construction. *Journal of Electrical Engineering*, 57:44–47, 2006.
- [110] Kuczmam M. Finite element simulation of a RRSST system under investigation. *Proceedings of the 12th International IGTE Symposium, Graz, Ausztia, 2006. september 17-20, P2-13*.
- [111] Kuczmam M. The polarization method combined with the Newton-Raphson technique in magnetostatic field problems. *Przegląd Elektrotechniczny*, 84(12):198–201, 2008.
- [112] Kuczmam M. Nodal and edge finite element analysis of eddy current field problems. *Przegląd Elektrotechniczny*, 84(12):194–197, 2008.
- [113] Kuczmam M. Nonlinearity in the finite element simulations. *Przegląd Elektrotechniczny*, 86(12):83–86, 2010.
- [114] Marcsa D. and Kuczmam M. Analysis of ferromagnetic core combining Preisach hysteresis modeling and finite element techniques (online: <http://stoner.phys.uaic.ro/jarp/index.php/jarp>, utolsó látogatás: 2014. május 29.). *Journal of Advanced Research in Physics*, 1(1), 2010.
- [115] Marcsa D. and Kuczmam M. Two-dimensional modeling of the motion in induction motor with ferromagnetic hysteresis. *Revue Roumaine des Sciences Techniques - Serie Electrotechnique et Energetique*, 55(4):351–356, 2010.

- [116] Kuczmam M. Nonlinear finite element method in magnetism. *Pollack Periodica*, 4(2):13–24, 2009.
- [117] Marcsa D. and Kuczmam M. Nonlinear two-dimensional motional finite element modeling of a rotational eddy current field problem. *Przegląd Elektrotechniczny*, 85(12):110–113, 2009.
- [118] Marcsa D. and Kuczmam M. Direct Preisach hysteresis model for finite element analysis of magnetic fields. *Przegląd Elektrotechniczny*, 85(12):114–117, 2009.
- [119] Kuczmam M. Using the NewtonRaphson method in the polarization technique to solve nonlinear static magnetic field problems. *IEEE Transactions on Magnetism*, 46(3):875–879, 2010.
- [120] Kuczmam M., Budai T., Kovács G., Marcsa D., Friedl G., Prukner P., Unger T., and Tomozi Gy. Application of PETSc and other useful packages in finite element simulation. *Pollack Periodica*, 8(2):141–148, 2013.
- [121] Budai T. *Acceleration of the Finite Element Method by Using Parallel Computation Techniques*. Széchenyi István Egyetem, 2014.
- [122] Marcsa D. and Kuczmam M. Comparison of the $\mathbf{A}, V - \mathbf{A}$ and the $\mathbf{T}, \phi - \phi$ formulations for the 2-d analysis of solid-rotor induction machine. *IEEE Transactions on Magnetism*, 45(9):3329–3333, 2009.