

**Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok**  
**Budapest 100**  
**1476**  
**Pf. 289**

## **ZÁRÓJELENTÉS**

**Téma címe:**

A végeselem-módszer alkalmazása mérnöki szimulációkban  
(PD 73242)

**Vezető kutató:**

Dr. Kuczmann Miklós, PhD  
egyetemi docens

Széchenyi István Egyetem  
Távközlési Tanszék  
Elektromágneses Terek Laboratórium  
9026, Győr, Egyetem tér 1.



Győr, 2011. február 11.

## Az elvégzett munka leírása, az eredmények bemutatása

A kutatás során fő célom elméleti eredményeink bővítése és azok mérnöki gyakorlatban való alkalmazhatósága volt. Nagy hangsúlyt fektettem ezen két irányvonal egyensúlyban tartására. Az elméleti kutatások célkitűzése a végeelem-módszer behatóbb tanulmányozása és alkalmazása volt, amely a szakirodalomban az egyik legtöbbet hivatkozott mérnöki CAD rendszer elektromágneses terek numerikus analízisében. A munka során elsősorban az egyenáramú (statikus mágneses tér) és az alacsony frekvenciás váltakozó áramú (örvényáramú elektromágneses tér) eszközök numerikus analízisére koncentráltunk, de a rádiófrekvenciás berendezések vizsgálatával is elkezdünk foglalkozni. A statikus mágneses tér, valamint az örvényáramú elektromágneses tér a ferromágneses anyagok modellezésére szolgáló hiszterézis karakterisztikával történő összekapcsolása kulcskérdés az iparban is előforduló problémák megoldása kapcsán (villamos gépek analízise, transzformátorok, induktivitások fejlesztése és tervezése, veszteségek csökkentése stb.). A csatolt feladat egy nagyméretű és erősen nemlineáris egyenletrendszer megoldására vezet, amelyet a kereskedelemben kapható szoftverekben mind a mai napig nem implementáltak. Fő cél volt ezen problémahalmaz beható tanulmányozása, és egy konvergencia megoldó kifejlesztése, amely a vektoriális hiszterézis karakterisztika kezelésére is alkalmas. A kidolgozott módszer a nemlineáris egyenletrendszer fixpontos megfogalmazásán alapul. Elméleti eredményeim saját méréseimmel validáltam. Kidolgoztam egy vektor hiszterézis mérésére alkalmas egyszerű elrendezést, amely alkalmas a vektormodell identifikációjához szükséges mintahalmaz előállításához. A túlságosan elméleti téma nem vonzza a hallgatókat. Ezen oknál fogva olyan TDK-témákat és diplomaterveket írtam ki, amelyek a gyakorlat oldaláról közelítenek az elektrodinamika témaköre felé. Így különböző mérési elrendezések megismerését és analízisét céloztam meg, melyeket a tehetségesebb hallgatók sikeresen meg tudtak oldani, ugyanakkor egyszerűsített szimulációs problémák megoldását is sikerrel el tudták végezni. Saját mérési és az általunk implementált programok szimulációs eredményeinek összevetésével elméleti eredményeinket is igazolni tudtuk.

---

A végeelem-módszer az egyik leghatékonyabban alkalmazható és legerjedtebb, ugyanakkor sok érdekes kérdést felvető numerikus eljárás az elektromágneses terek szimulációjában. A kutatás egyik fő célja ezen módszer megismerése, az idevágó nemzetközi irodalom felkutatása és az eredmények megértése, összegzése volt. A nemzetközi szakirodalom és saját kutatási eredmények tematikus összefoglalásaként jelent meg az Akadémiai Kiadó gondozásában egy angol nyelvű szakkönyv, amely tankönyvnek is használható (M. Kuczmann, A. Iványi, *The Finite Element Method in Magnetics*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2008, ISBN: 978 963 05 8649 8). A könyv bemutatja a végeelem-módszer különböző formalizmusait, amelyek a stacionárius mágneses tér, valamint az örvényáramú tér szimulációjára alkalmasak. A könyv hét feladat (zömmel nemzetközileg kiírt TEAM-feladat) megoldásával zárul, melyek a tervezési és szimulációs feladatok megoldásával foglalkozó mérnökök számára nagy segítség lehet, diákok számára pedig hasznos tananyag. Ezen kutatási feladat legfontosabb konklúziója, hogy a nemlineáris hiszterézis jelenségének figyelembevétele a numerikus analízis során meglehetősen időigényes iteratív eljárást eredményez. A több napos futási idő alkalmas, Newton-Raphon-típusú iterációs sémával csökkenthető, ami újabb kutatási célokat fogalmaz meg. A könyv több egyetem könyvtárában fellelhető, az Elektrodinamika című tantárggyal mélyebben foglalkozni kívánó egyetemi hallgatók és doktoranduszaim számára hasznos segédeszköz lehet. A Korszerű antennarendszerek tervezése című MSc tárgyat hallgatók számára a végeelem-módszer alapjainak elsajátítása végett fontos a mű. A könyvvel 2009-ben elnyertem az Akadémiai Nívódíjat, a Pécsi Tudományegyetem „A 2008. év Kiemelkedő Szellemi Alkotása” díját,

valamint Egyetemünk Publikációs Nívódíját. Részben ezen könyvnek köszönhetem, hogy 2010-ben elnyertem a „VEAB Kiemelkedő Ifjú Kutatója” címet is.

---

A skalár hiszterézis karakterisztika felvételét korábban, jelen pályázat beadása előtt befejeztem, jelen munkában viszont tökéletesítettem, finomítottam. A számítógéppel vezérelt mérési elrendezés segítségével egy torroid alakú próbatestet használva tetszőleges ferromágneses anyag karakterisztikáját fel lehet venni. A zajos mérési eredmények szűrésére egy Fourier-transzformáción alapuló szűrési eljárást dolgoztam ki. Megoldottam továbbá az előírt mágneses indukció időfüggvényének előállítását egy egyszerű proporcionális visszacsatolással, melynek eredményeképp tetszőleges lefutású indukcióhoz tartozó áramjel előállítható. A LabVIEW-ban implementált eljárásokat a vektoriális hiszterézis karakterisztika felvételére alkalmas mérési elrendezés kapcsán is fel tudtam használni. A vektoriális hiszterézis karakterisztika mérésére alkalmas elrendezés egy átalakított villamos gép, melynek háromfázisú tekercselését lecseréltem egy kétfázisú tekercsrendszerre. A két fázis árama külön-külön számítógéppel vezérelhető, melynek eredményeképp a villamos gép belsejében kétdimenziós mágneses teret lehet gerjeszteni. A motor belsejébe egy kör alakú próbatest helyezhető, melyben a vektoriális hiszterézis karakterisztika mérhető. A mérés teljesen automatizált. Az így felvett mérési eredmények hűen követhetők a skalár-, valamint a vektoriális hiszterézis modellek valamelyikével. Én munkám során a Preisach-féle hiszterézis karakterisztikát használom, melynek olyan változatát valósítottam meg, amely többprocesszoros számítógépeken az eddiginél rövidebb futási időt biztosít. Elvégeztem a vektoriális Preisach modell saját ötleteimen alapuló identifikációját is, melyet az imént említett berendezésen végzett méréseimmel validáltam. Ezen megkezdett munkát a romániai Iasi városban működő „Alexandru Ioan Cusa” Egyetem Fizika Tanszékén dolgozó kollégával (Dr. Laurentiu Stoleriu) fejleszttem tovább.

---

A Rádiófrekvenciás Vizsgáló Laboratóriummal közösen elkezdtünk foglalkozni egyszerűbb antennák, antennarendszerek, valamint mikrohullámú eszközök mérésével. A mérések célja, hogy tematikusan mérési eredményeket generáljunk a numerikus analízis számára. Ezen rádiófrekvenciás eszközök analízisére a végeelem-módszer nem minden esetben előnyös, ezért más technikák (pl. integrálegyenletek módszere) megismerésébe is belekezdtünk. A téma korántsem lezárt, rengeteg új ötlet, jövőbeni terv született ezen munka kapcsán.

---

A három éves munka során egy sikeres, eredményekben, és elismerésekben is gazdag laboratóriumot sikerült felépítenem hallgatóim segítségével. Jelenleg 2 BSc, 5 MSc és 2 PhD hallgató végzi tudományos kutatómunkáját, akik egy-egy érdekes feladat megoldása, vagy kutatómunka kapcsán tanulják meg a numerikus analízist. A következő témákkal foglalkozunk.

- Roncsolásmentes anyagvizsgálat (Kovács Gergely). A téma célja, hogy a vezető anyagokban (itt acél) a korrózió és egyéb külső behatások eredményeképp kialakuló repedéseket, anyaghibákat mágneses elveket felhasználva detektáljuk. A nemzetközi érdeklődésre is számot tartó témakörben megépítettünk egy szórt fluxust mérő berendezést és annak LabVIEW szoftverrel történő vezérlését. Elvégeztük a berendezés kétdimenziós és háromdimenziós nemlineáris végeelemes analízisét is. Az anyag nemlinearitását egyértékű görbével vettük figyelembe. A szimuláció célja az volt, hogy meghatározzuk a mérőszenzorok optimális helyét abból a szempontból, hogy a mért jel a repedés környékén a lehető legnagyobb legyen. A konkrét mérések eredményeképp BSc diplomamunka született, melynek védelme sikerrel megtörtént. A témát a hallgató MSc diplomaterveben folytatja, védelme ebben a félévben megtörténik. A hallgató PhD hallgatóként kívánja tanulmányait folytatni.

- Villamos gépek analízise (Marcsa Dániel). A frissdiplomás villamosmérnök elvégezte a 30. TEAM-feladat ([www.compumag.co.uk](http://www.compumag.co.uk)) megoldását, amely egy villanymotor forgórészében a forgás hatására kialakuló örvényáramok kérdésével foglalkozik. A feladat analitikus megoldása az irodalomból ismert, a lineáris örvényáramú feladat végesselemes numerikus analízisét a hallgató mind időtartományban, mind frekvenciatartományban elvégezte, s a kapott eredmények jó egyezése igazolja az egyes formalizmusok alkalmazhatóságát. A mechatronika MSc szakon egy igazi mechatronikai problémával, a mágneses lebegtetés, mágneses csapágy témakörével foglalkozott. Marcsa Dániel a 2009-es OTDK-n harmadik díjat kapott, PhD hallgatóként kívánja tanulmányait folytatni.
- SMT induktivitások vizsgálata (Pólik Zoltán). A szombathelyi székhelyű EPCOS Elektronikai Alkatrész Kft. (ma TDK) ösztöndíjasaként a mikroelektronikai iparban használt SMT (surface mounted technology) induktivitások numerikus analízisével foglalkozott. A munka során elkészítettük egy, az elektronikai iparban nagyon sok helyen alkalmazott rádiófrekvenciás induktivitás numerikus analízisét. A cél az eszköz jósági tényezőjének növelése volt. A kapott szimulációs eredmények nagyon jó egyezést mutatnak a cégnél elvégzett mérési eredményekkel. Pólik Zoltán ezen témában írta BSc diplomamunkáját, melyet sikerrel védett meg a 2008-as évben. Diplomamunkájával elnyerte a Híradástechnikai Egyesület Diplomatervező Díját. 2009-ben az OTDK-n második díjat kapott. Tanulmányait a villamosmérnöki MSc-n folytatta, ahol fraktálantennák numerikus analízisével és gyakorlati alkalmazási kérdéseivel foglalkozott. Pólik Zoltán PhD hallgatóként kívánja tanulmányait folytatni.
- Antennák vizsgálata (Gergő Gábor). A hallgató a 2009-es évben csatlakozott, MSc diplomatervezésében a Rádiófrekvenciás Laboratóriumban található elektromos tér mérésére alkalmas mérőfej numerikus analízisét, kalibrációját és egyszerű antennák mérésében való alkalmazását oldotta meg.
- Rendszeranalízis (Katona Éva). Az informatika (és párhuzamosan villamosmérnöki) szakos hallgató egy villamos hálózatok és rendszerek analízisére alkalmas szoftver fejlesztésén dolgozik, amely egyben a jelölt diplomaterve is. A szoftver alkalmas Kirchhoff-típusú és jelfolyam típusú hálózatok analízisére, amely a villamosmérnöki és a mérnök informatikus szakokon oktatott „Villamosságtan” és „Jelek és Rendszerek” című tárgyak nagyon jó segédeszköze lesz. Terveink szerint a szoftver alkalmazható lesz bonyolultabb, mérnöki feladatok megoldására is.
- Végesselemes szoftver fejlesztése (Mészáros István). Az informatika szakos hallgató egy olyan végesselemes szoftver implementálásába kezdett, amely a fentebb említett könyvben összefoglalt formalizmusokat tartalmazza. A cél az, hogy egy olyan szoftvercsomagot, olyan tervezői környezetet hozzunk létre, amely alkalmas a lineáris és nemlineáris, hiszterézist is tartalmazó elrendezések analízisére. A feladat a jelölt diplomaterve is, nemcsak a BSc képzésben, de az MSc képzésben is. A fejlesztés folyamatban van.
- SMT induktivitások modellezése (Csurgai Péter). A doktorandusz hallgató a szombathelyi székhelyű EPCOS Elektronikai Alkatrész Kft. (ma TDK) fejlesztőmérnöke, aki a felületszerelt induktivitások fejlesztésével foglalkozik. A doktori munka célja egy konkrét családba tartozó induktivitás minél pontosabb és minél egyszerűbb modelljének megalkotása, amely a mérnöki tervezésben hatékonyan alkalmazható. A végesselemes numerikus szimulációkba egy olyan, analitikus formalizmuson alapuló modell implementálása a cél, amely nagymértékben csökkenti a futási időt.
- Párhuzamos számítások (Hegedűs Géza). A PhD hallgató feladata a rádiófrekvenciás berendezések és mikrohullámú eszközök numerikus analízisére alkalmas parciális differenciálegyenletek olyan informatikai eszközökkel történő implementálása, amely kihasználja az egyre népszerűbb és egyre olcsóbb párhuzamos számítástechnikai architektúrákat.

## **Kapott eredmények és hasznosságuk**

A kapott eredményeket az előző pontban már felvázoltam. Itt ezek hasznosságára és jövőbeni terveimre utalok.

---

A végeselem-módszer (vagy más elektromágneses térszámításra alkalmas numerikus technika) magas szintű ismerete elengedhetetlen a megcélzott kutatási eredmények elvégzéséhez. Ezen ismeretanyag ma ismert eredményeit azért foglaltam össze egy szakkönyvben, hogy azok egységes alapokon állva, egységes jelölések mellett elérhető legyenek az érdeklődő olvasó számára. A könyv írása közben természetesen újabb ötletek jöttek, melyek újabb kutatási feladatokat és újabb könyvek megírását ösztönzik. Én a COMSOL Multiphysics programcsomagot használtam az elmélet igazolására, de ezen szoftver eljárásai, összekapcsolva azokat a MATLAB függvényeivel, sok esetben –különösen nemlineáris feladatok megoldása során– nagyon lassú eljárásokat eredményeznek. Ez új programcsomag kifejlesztését kívánja meg. A probléma párhuzamosíthatósági kérdései szintén érdekes feladatot jelent. Fontos hangsúlyozni, hogy a végeselem-módszer nem az egyetlen numerikus technika. Más eljárások (véges differenciák módszere, véges differenciák az időtartományban, momentum-módszer) más előnyökkel és hátrányokkal bírnak, de ezek alkalmas összekapcsolása nagymértékben lendítheti elő egyes problémák megoldását. Jelenleg ezen numerikus módszerek megismerése a célom, melyek a tananyagba is bekerültek a Korszerű antennarendszerek tervezése és a Szimulációs technológiák című tárgyakban.

---

A skalár hiszterézis modell, és főleg a vektoriális hiszterézis modell implementálása pontosabb leírását biztosítja a vizsgált anyagok viselkedésének. A modell végeselemes eljárásokba történő illesztése a fixpontos technika keretében már nem jelent problémát, de a futási idő sajnálatosan nagy. A futási idő csökkentése a Newton-Raphson-típusú eljárások irányába mutat, azonban ezek implementálása nehezebb, különös tekintettel kell lenni a stabilitás vizsgálatára. Az első lépések azonban már megtörténtek ezirányban, a stacionárius mágneses térszámítást igénylő problémák megoldása a Newton-Raphson-módszernek köszönhetően sokkal gyorsabban történik.

---

Hallgatóim a munka során megismerkednek egy korszerű CAD rendszerrel, és annak alkalmazhatóságával, sőt önálló feladatokon keresztül egyre mélyebb ismeretekre tesznek szert. Diplomatervük egy-egy része már a beadás előtt 1-1,5 évvel nemzetközi fórumon is megmérettetett, angol nyelvű cikkekben is publikált eredmények. Kettő közülük azon kevesek közé tartoznak, akik az előírt időn belül már végeztek a BSc képzésben és az MSc képzésben is. Hosszú távon ők lehetnek első doktorandusz hallgatóim, sőt tapasztalom, hogy évről-évre a legjobb hallgatók megfordulnak laboratóriumomban.

## **A kutatási munka hasznosíthatóságáról**

A budapesti székhelyű FETI (Furukawa Electric Institute of Technology) kutatóintézet egyik kollégájával, dr. Kis Péterrel már több, mint 9 éve szoros kapcsolatban vagyok. Munkahelyén ő is a végeselem-módszerrel foglalkozik, több problémán közösen dolgoztunk, s dolgozunk ma is. Ez a kapcsolat reményeim szerint nagyon gyümölcsöző lesz, hiszen egy japán kutatóhellyel folytatott hosszú távú együttműködés nemcsak laboratóriumomnak, hanem a villamosmérnöki szak legjobb hallgatóinak is előnyös lehet. A cégtől egy alkalommal szakképzési támogatást kaptunk. Dr. Kis Péter több alkalommal járt a Rádiófrekvenciás Vizsgáló Laboratóriumban, ahol különféle méréseket végeztünk. Bízunk abban, hogy a jövőben további megrendelésekre számíthatunk.

---

A kutatásban résztvevő egyik hallgatóm (Pólik Zoltán) a szombathelyi székhelyű EPCOS Elektronikai Alkatrész Kft. (ma TDK) ösztöndíjasa is volt. Az ösztöndíj keretében SMT (surface mounted technology) induktivitások numerikus analízisével foglalkozik. A kutatás célja, hogy választ találjunk arra a kérdésre, hogy a gyártás során előforduló, a gyártási technológiából adódó esetleges pontatlanságok milyen hatást gyakorolnak a legyártott termékek induktivitására, az induktivitás értéke mennyire tér el a névlegestől. Fontos továbbá bizonyos rádiófrekvenciás induktivitások jósági tényezőjének növelési kérdései is. Pólik Zoltán ezen kérdésekre BSc diplomatervében adta meg a választ, a kapott eredmények nagyon jól korrelálnak a mérési adatokkal. Ezen kapcsolatnak is köszönhető, hogy Csurgai Péter, aki ezen cég fejlesztőmérnöke, nálam végzi doktori tanulmányait.

Ugyanezen cég 2007-ben is és 2008-ban is 1.000.000 forinttal támogatta az Elektromágneses Terek Laboratóriumot, valamint a Távközlési Tanszékot, amelyből korábban a COMSOL Multiphysics végeelem-programrendszert sikerült beszereznünk. Ezen szakképzési támogatásra a jövőben is számítunk.

---

A Iasi városában (Románia) található „Center for Applied Research in Physics and Advanced Technologies” (CARPATH) kutatóival szorosabb kapcsolatba kerültünk, melyet egy elnyert, három évre szóló „Kétoldalú TÉT Pályázattal” is erősíteni tudtunk. A pályázattal 2.092.000-forintot sikerült elnyerni, amelyet mobilitásra tudtunk fordítani. Ezen tanszéken egy világszerte elismert kutatói gárda dolgozik azon a szakterületen, melyet mi is szeretnénk mind magasabb szinten művelni, így csak előnyünkre válhat a velük folytatott kooperáció.

---

A 2009-es évben járt le a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Posztdoktori Ösztöndíjam, melynek sikeres teljesítéséhez ezen pályázat nagymértékben hozzájárult. Itt kell megemlítenem, hogy ezen ösztöndíj záró eredménye kiváló lett. Ez számomra azt mutatja, hogy az elvégzett tudományos munkám az Akadémián is elismerik, s jó úton járok a következő tudományos fokozat megszerzése felé.

---

Megkaptam a jogot, hogy 2012-ben én szervezhessem a Symposium of Applied Electromagnetics (SAEM) című konferenciasorozat SAEM'12 rendezvényét. Ezzel bekerültem a konferencia szervező bizottságába.

---

A Maribori Egyetemen dolgozó dr. Bojan Stumbergerrel, a Szófia Egyetem tanszékvezető egyetemi tanárával, dr. Lidija Petkovskával és a SAEM konferenciasorozat főszervezőjével, dr. Andrzej Krawczykkal nagyon jó kapcsolatot sikerült kialakítani az elmúlt években. Remélhetőleg ezen kapcsolatrendszer a jövőben is gyümölcsöző lesz.

---

Az OTKA kutatási támogatás eredményeként adtam be pályázatom a habilitált doktor cím elnyerésére a Széchenyi István Egyetem Műszaki Tudományi Karán. Védésem várhatóan 2011. áprilisában lesz.