

OTKA T 049389 sz. projekt

“Elektromágneses térszámítási problémák vizsgálata széles mérettartományban”

Beszámoló a kutatási időszakban (2005-2008) végzett munkáról.

BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék.

Kutatási tevékenységünk az elektromágneses térszámítási problémák elméleti kérdéseire, és azok numerikus módszerekkel történő modellezéséhez kapcsolódott. A pályázat keretében elvégzett munkát, és a megoldott feladatokat összefoglalóan ismertetjük az alábbiakban, hivatkozva a szakmai részleteket tartalmazó publikációkra.

1. Örvényáramú elektromágneses terek vizsgálata.

Vasmas elrendezések esetén, hiszterézis veszteség kiszámítására alkalmas modell megalkotása gyakorlati szempontból is fontos feladat. A probléma megoldásának fontos lépéseként kidolgoztunk a hiszterézis karakterisztika vektoriális (3-dimenziós) modellezésére egy a neurális hálózatokon alapuló vektor hiszterézis modellt. Kidolgoztuk a modell felépítéséhez szükséges identifikációs eljárást, amelynek segítségével lehetőség nyílik a modell paramétereinek mérési eredményekhez történő illesztésére.

A hiszterézis modellt beépítettük egy háromdimenziós elektromágneses térszámításra alkalmas szoftverbe, amely a végeselem-módszeren alapul. A Maxwell-egyenletekből felírható parciális differenciálegyenletek megoldására olyan potenciálformalizmust alkalmaztunk, amely eredményül a mágneses térerősség vektorát szolgáltatja, és ez egyben a vektoriális hiszterézis modell bemeneti változója. Ily módon az ún. direkt modell alkalmazása lehetséges, amely gyorsabb megoldást eredményez, mint az indirekt modellek. A szoftver által szolgáltatott eredményeket saját mérési eredményekkel vetettük össze, amely igazolta a modell működésének helyességét [Kuczmann, *Priesach Memorial Book* 2005, [Kuczmann, *PhD* 2005,].

A neurális vektor hiszterézis modellt implementáltuk a vasveszteségek meghatározására kidolgozott végeselemes számítógépi programba, és összehasonlítottuk más számítási módszerekkel. Az összehasonlítás alapja a "COMPUMAG workshop TEAM problem 21" volt. Az eredményekről a 15-dik COMPUMAG konferencián tartottunk előadást [Sebestyén, Kuczmann, *Proc. the TEAM Workshop*, 2005].

A projekt keretében elvégeztük egy a vektoriális hiszterézis karakterisztika mérésére alkalmas berendezés megtervezését. A mérés célja a vektor hiszterézis modell identifikációja. A mérési elrendezés egy átalakított motor, amelynek gerjesztő tekercseit eltávolítottuk, és kicseréltük egy speciális kétdimenziós mágneses tér generálására alkalmas tekercsrendszerre. A próbatest kör alakú lemez, amelybe furatokat készítünk. A furatokba helyezett szenzorral mérjük a mágneses indukció két ortogonális komponensét. A korábban kidolgozott szoftverekkel implementáltuk a mérési elrendezés numerikus végeselemes szimulációját. Az anyag karakterisztikáját a korábban implementált vektoriális Preisach-modellel írtuk le, és a nemlineáris egyenletrendszert fixpont iterációval oldottuk meg. A számítások eredményét felhasználva a mérési elrendezés pontosabb, a részleteket is feltáró tervezését megvalósítottuk meg. A témáról több publikáció jelent meg [Kuczmann, *12th International IGTE Symposium* 2006, Kuczmann, *Journal of Electrical Engineering*, 2006, Kuczmann, *Pollack Periodica*, 2007, Kuczmann, *Physica B*, 2008].

A tervek szerint elkészült a skalár hiszterézis karakterisztika felvételére alkalmas

mérési elrendezés, amellyel a karakterisztika rögzítése oly módon lehetséges, hogy a mérési zajokat teljes egészében elimináljuk. Ennek megvalósítása érdekében a mért jeleket (primer áram és szekunder feszültség) Fourier-transzformáltuk, majd digitális szűrés után a szűrt jeleket visszatranszformáltuk az időtartományba. A mérőkártyából és a számítógépből származó zajok hatását így tökéletesen szűrni lehet. A mérések során rögzítésre kerültek az elsőrendű visszatérő görbék, a koncentrikus görbék, valamint elsőrendű és magasabb rendű minor hurkok, amelyek felvételével az egyes hiszterézis modellek ellenőrizhetők. Olyan szabályozó algoritmust valósítottunk meg, amelynek segítségével a mágneses indukció időfüggvénye vezérelhető [Pólik, Ludvig, Kuczmann, *Journal of Electrical Engineering*, 2007].

Továbbfejlesztettük a ferromágneses anyagok viselkedését leíró nemlineáris hiszterézis karakterisztikák végeselemes szimulációkba történő beillesztését, amelyre alapvetően két lehetőség kínálkozik. A fixpontos alakra hozott nemlineáris egyenletrendszer a szukcesszív approximáció módszerével oldható meg hatékonyan. A módszer előnye, hogy tetszőleges karakterisztika esetén alkalmazható, és globálisan konvergens eljárást eredményez. Hátránya viszont, hogy konvergenciája rendkívül lassú. A lassú konvergencia azonban valamelyest gyorsítható a klasszikus fixpontos eljárás és egy relaxációs módszer kombinálásával. A másik lehetséges eljárás a Newton-Raphson iterációs séma, amely a megoldás környezetében kvadratikusan konvergál ugyan, de sokkal érzékenyebb a karakterisztikára. Abban az esetben, ha a hiszterézis karakterisztikát a fixpontos formalizmusban is alkalmazott ún. polarizációs technikával felbontjuk, és egy alulrelaxációs eljárással biztosítjuk a biztonságos konvergenciát, akkor nagyon hatékony és gyors algoritmust kapunk [Kuczmann, *Przeгляд Elektrotechniczny*, Kuczmann, *COMSOL Conference*, 2008, Kuczmann, *13th International IGTE Symposium* 2008]

A fixpontos eljárást és a Newton-Raphson iterációs sémát a nemzetközi szakirodalomban megtalálható ún. TEAM feladatokon teszteltük. A TEAM 10-es feladat és a TEAM 13-as feladat nemlineáris statikus mágneses térszámítást igénylő problémák. Mindkét módszer konvergens megoldást adott, azonban a Newton-Raphson eljárás sokkal gyorsabban konvergált. Mindkét eljárás természetesen ugyanarra az eredményre vezet, amely eredmények gyakorlatilag megegyeznek a TEAM feladatokkal együtt közölt mérési eredményekkel.

2. Nagyfrekvenciás elektromágneses hullámterjedési feladatok.

Mikrohullámú csatolók, szűrők és polarizáció váltók komplex analízisére és optimalizálására alkalmas módszert dolgoztunk ki. Egyes esetekben a számítási és mérési eredmények kitűnően egyeztek. A módszer alapja az ún. „full wave”, tehát nem csupán egyes módusokra korlátozódó végeselemes numerikus térszámítás, amellyel az eszközparamétereket meghatározzuk a vizsgált frekvencia sávban. E paraméterek ismeretében genetikus algoritmust alkalmazó optimalizációs eljárással határozzuk meg az optimális modell paramétereket. Az módszert és az eredményeket két nyelven publikáltuk [Sebestyén, Ladányi-Thuróczy, *IGTE* 2006], [Sebestyén, Ladányi-Thuróczy, *Híradástechnika*, 2007].

A széles mérettartományokban megfogalmazható problémák megoldási módszereinek vizsgálatához kapcsolódóan a tanszéken elkészült egy diplomaterv, amely

mikrohullámú antennák analízisével foglalkozott. Ebben a sajátérték probléma és a sugárzási feladat megoldásainak összekapcsolására dolgozott ki eljárást a szerző [Benkő Péter Tamás, *BME Diplomaterv*, 2005]. További fejlesztésként rácsos parabola antennák (a parabolikus felületet hengeres vezetők alkotják, a szélterhelés csökkentése érdekében) tervezésére dolgoztunk ki számítási és tervezési eljárást [Benkő, Ladányi-Turóczy, Pávó, *IGTE* 2006]. A bemutatott eljárás lényege, hogy az antennafaj által sugárzott teret és a reflektáló felület terét szétválasztottunk. Így egy alacsony számítási igényű módszert sikerült kidolgozni, amelynek köszönhetően a tervezési feladat is aránylag gyorsan megoldható.

Dekompozíció alapuló módszert dolgoztunk ki négyszög keresztmetszetű csőtápvonalból kialakított résantenna analízisére és tervezésére. A módszer lényege, hogy az antenna réseiben kialakuló elektromos teret a végtelen térrészbe történő sugárzás hatásának elhanyagolásával végeselem módszerrel kiszámítjuk, majd a résekben ismert téreloszlásból a kisugárzott teret analitikus formula segítségével kapjuk meg. A probléma leírtak szerinti dekomponálásával a számítási igény az eredeti töredékre csökkent, így a módszert alkalmazni lehetett bonyolult résantenna tervezésére és optimalizációjára [Benkő, Ladányi-Turóczy, Pávó, *IEEE Magn.* 2008]. A fenti eredményeket a Grante Zrt. is hasznosította termékfejlesztésben.

EMC kamrák reflexiómentességének numerikus analízisére dolgoztunk ki homogenizáláson és tartományi dekompozíció alapuló végeselemes számítási eljárást. Az EMC kamrára jellemző NSA (Normalized Site Attenuation) meghatározása numerikus szimulációval az adó- és vevőantennák valamint a környezet pontos modellezését igényli, amely rendkívül nagy aktív memória igényt (RAM) és hosszú futási időt eredményez a leggyorsabb szuperkomputereken is. A RAM igény és a futási idő csökkentése érdekében a kamra falán elhelyezett nagyfrekvenciás abszorbert, a homogenizálás módszerét felhasználva, felületi impedanciával modelleztük. Ennek lényege, hogy először egy adott frekvenciájú síkhullám gerjesztésre a vizsgált abszorber struktúra egységnyi cellája által reflektált elektromágneses teret kiszámítjuk végeselem módszerrel. A kialakult hullámteret felfogható az abszorber síkjában felvett felületen pozitív és negatív irányba haladó síkhullámok összegeként. Az adott felület reflexiós tulajdonságát az elektromos és mágneses tér egymásra merőleges komponenseinek hányadosával az ún. felületi impedanciával jellemezzük. A vizsgált frekvenciasávban (30 MHz-1000 MHz) ezt az impedanciát kiszámítva és az általa előírt feltételt az elektromágneses térre kényszerítve (peremfeltételként megadva) a felület pontosan ugyanúgy viselkedik, mintha az a vizsgált abszorber előtti felület lenne.

A modell további egyszerűsítése (és a számítási idő további csökkentése) lehetséges, ha a terem analízisét tartományi dekompozíciót alkalmazva résztartományokra végezzük el, és a résztartományok elektromágneses terét csatoljuk egymáshoz. Számításainkban a 6,4mx8,5mx5,4m méretű termet két résztartományra bontottuk: az adó és a vevőantennát befoglaló T1, valamint a terem falait körbevevő T2 résztartományra. Kiindulásul, reflexiómentes terjedést feltételezve, a T1 résztartományban meghatároztuk az adóantenna által gerjesztett hullámteret. A következő lépésben a T1 határán kiszámított teret a T2 határára transzformálva gerjesztésként adtuk meg, és kiszámítottuk az elektromágneses teret a T2 tartományban, amely a falak reflexióját is tartalmazza. Ezt a teret T1 határára transzformálva ismét elvégeztük a T1 tartomány analízisét. A két számítási lépést ismételve a vevőantenna környezetében az

elektromágneses tér kellő pontossággal meghatározható. A fenti számításokat két tanulmányban foglaltuk össze [Benkő, Gyimóthy, Pávó, Sebestyén, *INNOTECH*, 2007], [Benkő, Gyimóthy, Pávó, Sebestyén, *INNOTECH*, 2008]. Az eredményeket a T-Network Kft. reflexiómentes kamrák tervezésében hasznosította.

3. Örvényáramú, roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek kvantitatív kiértékeléséhez kapcsolódó térszámítási feladatok.

Örvényáramú vizsgálófejek jelének számítása

Az anyaghiba által létrehozott mágneses tér perturbációjának szimulálásához kapcsolódó kutatásaink lényeges eredménye az infinitezimálisan vékony repedésekre vonatkozó, integrálegyenlettel megfogalmazott modell újszerű numerikus megoldása. Itt a téglalap alakú repedéseket reprezentáló ismeretlen áramdipólus réteget olyan függvény-sor formájában keressük, amelyben a sorfejtés tagjai az egész repedés felületén azonosan nem nullaértékűek (globális közelítés). A módszer segítségével az irodalomban ismert megoldásoknál gyorsabb és numerikusan stabilabb eredményeket kaptunk [Pavo, Lesselier, *IEEE Magn* 2006]. A felsorolt jó tulajdonságokon túl a kidolgozott eljárás használatával lehetőség nyílt a kapott eredmények numerikus hibájának becslésére [Maurice, Premel, Pavo, Lesselier Alain, *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2007] A hibabecslés különösen fontos, ha az integrálegyenlet automatikus diszkretizációja a célunk. Megállapítottuk, hogy a kidolgozott globális közelítésen alapuló eljárás - a kis számítási igény, a jó numerikus stabilitás és az automatikus diszkretizáció lehetősége miatt - széles körben felhasználható.

Véges vastagságú repedések analízisére az esetek legnagyobb részében az ún. felületszerű repedés modellt is használhatjuk, amely segítségével a térfogati anyaghiba modellnél jelentősen kisebb számítási munka mellett kaphatunk pontos eredményt. Bizonyos speciális adó- és vevő tekercsből álló vizsgálófej konfigurációknál azonban a felületszerű repedés modell pontatlan eredményt ad. Kidolgoztunk egy módszert, amely segítségével, a felületi modellel kapott eredményt korrigálni tudjuk annak érdekében, hogy pontosabb eredményt kapjunk adó- és vevő tekercsekből álló vizsgálófejek esetében is. A korrekcióhoz szükséges számítási igény nem jelentős, így az összes számítási igény lényegesen kevesebb a térfogati modell alkalmazásakor fellépő számítási igénynél.[L. Maurice, D. Prémel, J. Pávó, D. Lesselier, and A. Nicolas, *COMPEL*, 2008]

Számításokat végeztünk egy újszerű szenzor (FluxMAP) vizsgálatára, amelyet fém lemezekben vizuálisan nem érzékelhető lyukak pozicionálására terveznek alkalmazni. A szenzor által generált jel alakját határoztuk meg, miközben a szenzor a lyuk környezetében egyenes mentén mozog. A feladat különlegessége abból adódik, hogy a mágneses indukció szenzor által érzékelt komponense kb. 1%-a mágneses indukció abszolút értékének. Emiatt a számítással kapcsolatos diszkretizációs hibákat ki kell küszöbölni. Ezt a feladatot több módon is megoldottuk: a lyuk által generált perturbációs teret végeselem módszerrel és hibrid végeselem-térfogati integrálok módszerével is kiszámítottuk, úgy, hogy a lyuk helyén lévő vezetődarabban a szenzor által gerjesztett örvényáramokat adtuk meg gerjesztésként [Sebestyén, Bilicz, Pávó, Gasparics, Szöllösy, *IGTE*, 2008]. Ezzel a módszerrel a kisebb számítási ráfordítással nagyobb pontosság

érhető el, mint a teljes mágneses mezőnek a szenzor minden egyes pozíciójában történő kiszámításával.

A roncsolásmentes anyagvizsgálat inverz-feladatának megoldása optimalizációval

Az optimalizáláson alapuló anyaghiba-rekonstrukció előnye, hogy számos, a tervezési gyakorlatban már bevált optimalizációs eljárás adaptálható a feladatra. Ezek közül kiemelten a statisztikai alapú *kriging*-eljárással, illetve az arra épülő *expected improvement* (EI) stratégiával dolgoztunk, és azt elsőként alkalmaztuk a roncsolásmentes anyagvizsgálat inverz-feladatának megoldására. Tapasztalatainkat a [Bilicz, Vazquez, Lambert, Gyimóthy, Pávó, *COMPEL*, 2009] publikációban foglaltuk össze. A témában TDK dolgozat is született, amely első helyezést ért el [Hajdu, *BME-VIK TDK*, 2008].

Anyaghiba-rekonstrukció háló-adatbázissal

Speciális adatbázist fejlesztettünk ki roncsolásmentes anyagvizsgálat céljára. Az optimális adatbázis létrehozására adaptív hálógeneráló módszert használtunk. Az adatbázis alkalmazásának egyik előnye, hogy lehetővé teszi a gyors anyaghiba-rekonstrukciót, hiszen a bonyolult optimalizációs eljárás helyett csak egy keresést kell lefolytatni. Másik előnye, hogy nem kell a bonyolult szimulációs szoftvert az ipari végfelhasználó rendelkezésére bocsátani, csupán az előre kiszámított adatokat. A projekt során az adatbázis-alapú anyaghiba-rekonstrukciót számos területen alkalmaztuk, és az alább részletezett tapasztalatokat szereztük [J. Pávó and Sz. Gyimóthy, *NDT&E* 2007].

Kimutattuk, hogy a háló-adatbázis segítségével nem csak a rekonstruálandó elrendezés (pl. anyaghiba) paramétereinek optimális közelítése határozható meg, hanem a közelítés bizonytalansága, sőt az inverz probléma gyengén kondicionáltságának mértéke is megállapítható. Ide kapcsolódik az a tapasztalatunk, hogy az adatbázis alkalmas olyan típusú anyaghibák egyes jellemzőinek meghatározására is, amelyek adatait közvetlenül nem tartalmazza. Így például közelítőleg meg lehet állapítani több szimultán repedés átlagos hosszát csupán egyetlen repedés mérési adatait tartalmazó adatbázisban történő kereséssel [Gyimóthy, Pávó, *COMPEL*, 2005], [Tsuboi, Gyimóthy, Pávó, Sebestyén, *IEE Japan*, 2005].

Tapasztalatunk szerint az optimalizált háló-adatbázis szerkezete jól tükrözi az egyes modell-paraméterek szerepét, jelentőségét, és a köztük lévő esetleges összefüggéseket. Ebben elengedhetetlen szerepe van a szimplex-háló úgynevezett anizotrópiájának (optimálisan megnyújtott szimplexek jelenlétének). Végül soron a hálóstruktúra elemzése segíthet a problémához legjobban illeszkedő, minimális paraméterszámú és optimális paraméterezésű inverziós modell megalkotásában. Ezen elméleti eredményeket a porózus szilíciumból készített optikai multirétegek roncsolásmentes vizsgálatán demonstráltuk [Gyimóthy, Pávó, Tsuboi, *IEEE Magn* 2006].

Az ipari alkalmazásokban fontos a gyors rekonstrukció, amelyhez éppen ezért az adatbázisban történő közvetlen keresés helyett neurális hálózatot használtunk. Az általunk vizsgált tesztfeladat egy fémlemezben található repedés paramétereinek meghatározása volt az alkalmazott örvényáramú vizsgálófej mérési adatainak ismeretében. Tény, hogy a neurális hálózat működése szempontjából döntő fontosságú a betanítására használt adathalmaz minősége, konzisztenciája. Kísérleteink alátámasztották

azt a sejtést, hogy ha a neurális hálózatot az optimalizált háló-adatbázis elemeivel tanítjuk be, az jobban működik, mint ha a betanítás azonos számú, de véletlenszerűen kiválasztott mérési adattal történik. A különbség leginkább a zajtűrő képességben mutatkozik meg. Kísérleteinkben MLP (multilayer perceptron) és RBF (radial basis function) típusú neurális hálózatokat vizsgáltunk [Gyimóthy, Le-Bihan, Pávó, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2007], [Gyimóthy, Le-Bihan, Pávó, *OIPE 2006*], [Le-Bihan, Gyimóthy, Pávó, Marchand, *ECNDT 2006*].

A korábban kifejlesztett háló-adatbázist szigetelőanyag permittivitásának mikrohullámú frekvenciákon történő mérésére is alkalmaztuk, francia kooperáció keretében. Az adatbázis elemeit az ANSYS szoftverrel számítottuk ki, majd azokat neurális hálózat betanítására használtuk [Acikgoz, Santandrea, Le Bihan, Gyimóthy, Pávó, Meyer, Pichon, *IET* 2008].

Legutóbb az optimalizált háló-adatbázis létrehozására egy teljesen új módszert is kifejlesztettünk. Az eredeti eljárás problémáját a dimenzióval hatványozottan növekvő számítási komplexitás, valamint a háló-anizotropia kezelése jelentette. Ennek kiküszöbölésére a háló-adatbázis generálását az anyaghiba paraméter-teréből egy absztrakt kontroll-térbe helyeztük át, ahol a háló képe egyenletes és izotrop. A módszer implementációjában szinte minden ismert hálomanipuláló eljárást felhasználtunk: hálófinomítást, hálókiterjesztést, a perem mozgatását, valamint hálósimítást a rugóanalógia alapján. Eredményeinket a [Gyimóthy, Kiss, Pávó *IGTE 2008*] [Gyimóthy, Kiss, Pávó, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 2008*] cikkekben publikáltuk. A témában TDK dolgozat is született, amely első helyezést ért el [Kiss, *BME-VIK TDK*, 2008].

Összetett anyaghibák rekonstrukciója a mért jel dekompozíciójával

Az anyaghiba-modellezés egyik fontos kutatási iránya a dekompozíción alapuló, úgynevezett hibrid megoldási módszerek vizsgálata. Ezen módszerek lényege, hogy különböző numerikus eljárásokat és modellfeltevéseket alkalmazhatunk a beiktatott tér és az anyaghiba által generált visszahatás számításakor. Ennek eredményeként igen pontos és nagyon effektív számítási eljáráshoz jutunk. Ennek alapján egy általánosított számítási környezetet dolgoztunk ki az ilyen jellegű problémákra. Az általánosított környezet alkalmazhatóságát egy konkrét megvalósítás vizsgálatával és a módszerrel számított eredmények kísérleti bizonyításával támasztottuk alá [Le Bihan, Pavo, Bensetti, Marchand, *IEEE Magnetics*, 2006], [Le Bihan, Pavo, Marchand, *NDT&E*, 2006].

Ipari alkalmazás kapcsán a dekonvolúción alapuló rekonstrukciós módszereket vizsgáltunk. Feladat: lézer segítségével fémtárgyak felületére írt logisztikai kódok elektromágneses elven történő leolvasása [Pávó, Gyimóthy, Kiss, Sebestyén, *IGTE 2006*], [Gyimóthy, Kiss, Pávó, Kalincsák, Gasparics, Sebestyén, Vértesy, Takács, Tsuboi, *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2007]. A lézeres jelölés geometriája, a vonalkód-szisztéma, a kiolvasási elv, valamint a mérőfej optimális megválasztásának elősegítésére végeselemes szimulációs modellt alkottunk. A modell segítségével sikerült bizonyítani, hogy vonalsorozat esetén kiolvasott jel – bizonyos feltételek esetén – előállítható az egyetlen vonalra kapott kimenő jel térbeli szuperpozíciójával. Ezért alkalmazhatók a dekonvolúción alapuló rekonstrukciós módszerek. Így, térbeli inverz szűréssel a mérőfej kimenő jelének ismeretében sikerült

nagy pontossággal azonosítani a lézerrel beírt vonalak helyét. A számítás eredményeit a mérési adatok is alátámasztották.

A többszörös anyaghibák kölcsönhatásának vizsgálata kapcsán kvantitatív leírást adtunk arra, hogy az egyes elkülönült anyaghibák (pl. egymáshoz közel lévő repedések) közötti elektromágneses interakció mértéke mekkora az adott anyaghiba és a vizsgálófej közötti interakcióhoz viszonyítva. Azt feltételezzük, hogy - amennyiben az anyaghibák közötti interakció elhanyagolható - elegendő csupán az egyes anyaghibák és a vizsgálófej közötti interakció modellezése. Ebben az esetben a feladat komplexitása jelentősen csökken, mivel egymáshoz közel lévő anyaghibák jele a csoportban lévő egyes anyaghibák jelének szuperpozíciójaként kapható. Ezen állítás eredményeként csökken az elrendezés analíziséhez szükséges idő és szinte változtatás nélkül alkalmazhatók azon meglévő szoftverek, amelyek egy különálló anyaghiba modellezésére használhatók. A második következtetés szerint – az anyaghibák közötti elhanyagolható interakció esetében – a rekonstrukciós eljárások (a kapcsolódó inverz probléma megoldása) is nagyban egyszerűsíthetők. Ilyen esetben ugyanis az invertálandó jel lineáris dekompozíciója után lehet az egyes anyaghibák rekonstrukcióját elvégezni, így az inverz probléma jelentősen egyszerűsödik [Gyimóthy, Pávó, Kiss, Sebestyén, *IEEE Magn.* 2008].

A pályázat egyik résztvevője az örvényáramú anyagvizsgálattal kapcsolatos kutatási eredményeinek összefoglalásként 2008. szeptemberében beadta MTA Doktori értekezését [Pávó J., Szimulációs és rekonstrukciós eljárások örvényáramú, roncsolásmentes anyagvizsgálathoz, MTA Doktori Értekezés, 2008. (elbírálásra beadva)].