

# Speciális kontinuummodellek az alkalmazott elektrodinamikában

Gyimóthy Szabolcs

MTA doktori értekezés tézisei  
Budapest, 2020.

## Bevezető

Manapság a villamosmérnököt az elektromágneses elven működő eszközök, berendezések tervezésében általában számítógépes szimuláció segíti, amelynek egyik elterjedt eszköze a végeelem módszer (*finite element method*, FEM). Bár a megfelelő szoftver és hardver többnyire a mérnök rendelkezésére áll, a numerikus mezőszimuláció távolról sem rutinfeladat: sok esetben speciális tudást, sőt azon túlmenően némi találékonyságot is igényel.

Kutatási területem az elektromágneses terek numerikus analízise, és annak mérnöki alkalmazása. A PhD fokozat megszerzését követően foglalkoztam többek között a végeelem módszer elemszintű számításainak grafikus kártyán történő párhuzamosításával [24], az anyaghibák által okozott perturbáció számításával [25], valamint az elektrodinamika inverz (rekonstrukciós) feladatainak megoldásával. Az utóbbihoz kifejlesztettem egy szimplexháló-alapú, adaptív technikával optimalizált, szintetikus mérési adatbázist [26, 27, 28, 29, 30], valamint részt vettem a sztochasztikus és neurális-hálózatos módszerek kutatásában (pl. [31, 32]).

Az említett területeken számottevő eredményeket sikerült elérni, amelyekből 2014-ben, az egyetemi habilitációm során három tézist fogalmaztam meg. Ennek ellenére úgy döntöttem, hogy az akadémiai doktori fokozathoz készített disszertációt többségében a habilitáció óta született eredményeimre alapozom, részint a témák aktualitása, részint azok nagyobb koherenciája miatt. Ugyanakkor nyilvánvaló, hogy az eltelt viszonylag rövid idő alatt az új eredmények még nem nyerhettek annyi alkalmazást, illetve nem tehettek szert akkora publicitásra, mint a korábbiak.

\* \* \*

Gyakori eset, hogy a modellezendő eszköz egésze, illetve térbeli részletessége több nagyságrendnyi mérettartományt fog át; az ilyet többléptékű (angolul *multiscale* vagy *large scale*) problémának nevezik. Hatékony megoldásuk általában többlépcsős, hierarchikus térbeli felbontáson (dekompozíción) alapul, vagyis a jelenséget különböző méretskálákon modellezik, majd az eredményeket valamilyen módon kombinálják. Így a szimulációs lépések együttes futásiideje, valamint memóriaigénye lényegesen kisebb, mintha az elrendezést teljes részletességgel, egyidejűleg kellene modellezni – már ha az adott erőforrások mellett ez egyáltalán lehetséges.

Tipikusan többléptékű problémának számít a finomsztruktúrát, például metaanyagot, illetve sodrott, fonott, csévélt, rétegezett vagy lemezelt szerkezetet tartalmazó elrendezés. Az ilyen finomszerkezettel rendelkező összetevőt egy nagyobb léptékű modellben célszerű *kontinuumként* kezelni, azaz egy vele elektromágneses szempontból (makroszkopikus skálán) ekvivalens, homogén közeggel helyettesíteni. E fiktív helyettesítő közeg ekvivalens anyagparamétereinek meghatáro-

zására bevált *homogenizáló* módszerek vannak, például különböző keverési törvények, vagy periodikus struktúra esetén a cella-analízis. Két példa a gyakorlati alkalmazásra – amelyek jelen munka előzményeinek tekinthetők – az energiaátviteli transzformátor lemezelt vastestében fejlődő örvényáram- és hiszterézisvesztesség számítása [15], illetve a villamos hajtású autókban használt kábelárnyékolás EMC mérésének szimulációja [2].

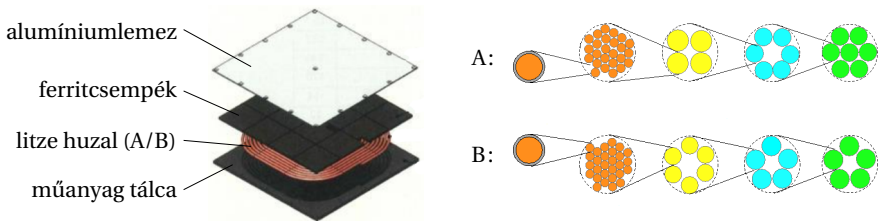
Disszertációm olyan többléptékű elektromágneses problémák végeselemes szimulációjáról szól, amelyek rutineljárással történő modellezése nem – vagy csak extrém erőforrás-felhasználás mellett – vezetne eredményre. A vizsgált problémákban közös, hogy megoldásukhoz speciális kontinuummodelleket kellett alkotni. E modellek nem csupán a számítást teszik hatékonyabbá, de egyúttal segítik a jelenség mélyebb megértését, és gazdagítják a szemléletet. A kidolgozott elmélet gyakorlati alkalmazást nyert többek között a vezeték nélküli energiaátvitel és a magas hőmérsékletű szupravezető tekercsek területén.

# 1. Litze huzal örvényáram-veszteségének számítása

A litze huzal egymástól elszigetelt vezetősálakból sodrott vagy fonott kábel. Létezik négy-öt szintű hierarchiában kötegelt litze huzal, amely több ezer elemi szál tartalmaz. Rádiófrekvenciás eszközökben használják – jellemzően a kilohertzes tartományban – mivel speciális kialakítása révén csökkenthető az örvényáram-veszteség [33]. Manapság az egyik legfontosabb alkalmazási területe a vezeték nélküli energiaátvitel (*wireless power transfer*, WPT), ahol alapvetően a tekercsveszteség határozza meg az átvitel hatásfokát, ezért csökkentése kulcsfontosságú [34]. A veszteség azonban nem csak a huzal belső felépítésétől, szálszerkezetétől függ, hanem a tekercs kialakításától és annak beépítési környezetétől is, ezért számítása igazi többléptékű problémát jelent (1. ábra).

A WPT eszközök szimulációjára a szakirodalomban analitikus közelítések és numerikus módszerek sokféle kombinációját használják akár több lépcsőben, akár szimultán csatolva [35, 36, 37]. Ha a huzalban viszonylag kevés elemi szál van, úgy a végeelem módszer (FEM) kombinálható például integrálegyenletekkel [38] vagy a PEEC (Partial Element Equivalent Circuit) módszerrel [39]. Nagyobb számú elemi szál esetén inkább a homogenizálás jön szóba, amely szintén a FEM-mel kombinálható [40]. Egyébként a tömör, szigetelt vezetőből csévéltszerű (rendszerint vasmagos) tekercsek számítására igen hasonló módszerek terjedtek el, amit az áramkényszer hasonlósága indokol [41].

Munkám során olyan hatékony, többlépcsős eljárást fejlesztettem ki a tekercsveszteség számítására, amelynek a FEM adja a keretét, de szerepet kap benne a homogenizáció és az analitikus megoldások is. Az eljárásban messzemenően kihasználom a huzal speciális geometriájából, valamint az örvényáram-jelenségek elkülöníthetőségéből eredő előnyöket. A huzalveszteségek pontos leírása és számítása irányt mutathat a minél kisebb veszteségű huzalkonstrukciók kifejlesztésében.



1. ábra. WPT tekercsmodul felépítése, és kétféle litze huzal kötegrendje.

**1. Tézis:** *Különböző léptékű és közelítésű elektrodinamikai modellek újfajta, hierarchikus összekapcsolásán alapuló, numerikus módszert fejlesztettem ki, amellyel hatékonyan számítható az összetett struktúrájú (pl. litze) huzalok örvényáramvesztése. A módszer nem csak pontosabb, mint az eddigiek, de jobban megvilágítja a veszteség mechanizmusát, ezzel elősegíti kisebb veszteségű huzalok tervezését.*

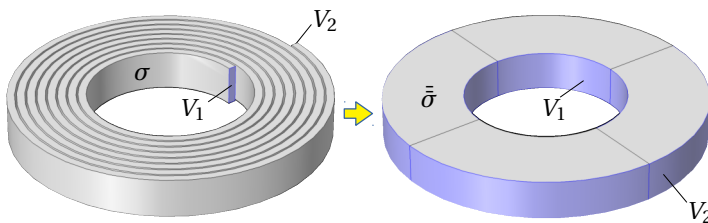
- a) Ezen belül legfontosabb eredményemnek a *kötegekzi áramkiszorítás* újfajta, nem-lokális kontinuummodelljét tekintem, amely a huzal geometriáját kihasználó, statisztikai alapú homogenizáláson alapul. A modellel megmagyarázható az említett részjelenség egyedi karakterisztikája és aszimptotikus viselkedése, amely egyúttal rámutat a korábbi homogenizált modellek elégtelenségére.
- b) Kidolgoztam a huzalvesztés összetevőkre bontásának új elméletét, amelyben a keresztmetszeti áramképet teljesítményortogonális *módusok* összegként írom le. Ehhez az elmélet egyes, már létező elemeit kiegészítettem, illetve tágabb rendszerbe foglaltam; az áramtagokat matematikai formába öntöttem és bizonyítottam ortogonalitásukat.
- c) A kidolgozott többlépcsős, numerikus számítási eljárás kerete a végeselem módszer. Az eljárás viszonylag kis erőforrásigényű, hatékony, és könnyen adaptálható a különböző huzalstruktúrákhoz. Alkalmazhatóságát egy litzetekeercset tartalmazó, vezeték nélküli energiaátviteli rendszer szimulációján demonstráltam; az elmélet és a számítás helyességét mérések igazolják.

## 2. Homogenizált szalagtekerccs-modell

Vékony szalagból vagy fóliából készült áramvezető tekerccsel a műszaki élet számos területén találkozunk. Hagyományos vezetőanyagból (rézből vagy alumíniumból) göngyölt fóliatekerccset használnak például a hangtechnikai eszközökben és a fóliatranszformátorokban, de újabban tanúi lehetünk a magas hőmérsékletű szupravezető (*high temperature superconductor*, HTS) szalagtekerccsek térhódításának. Ilyet találunk többek között a részecskegyorsítók és MRI berendezések nagy térerejű elektromágnesekben, mágneses energiátárolókban, energiaellátó rendszerek fojtótekerccseiben és zárlatiáram-korlátozóiban, valamint villamos forgógépekben és transzformátorokban [42]. Felépítésüket tekintve ugyancsak ide sorolhatók a fóliakondenzátorok és a spirálcellás akkumulátorok [43], habár a bennük lejátszódó fizikai jelenségek némileg más természetűek.

A tömör, illetve a szálakból sodrott vezetők mellett – mintegy köztes esetként – a szalagból göngyölt struktúrák modellezésével külön is foglalkozik a szakirodalom. Ennek oka, hogy míg a szalag szélességi mérete általában a tekerccs nagyságrendjébe esik, addig a vastagsága jóval kisebb annál, ami speciális közelítő módszerek használatát igényli. Elsősorban valamilyen felületszerű modell [44, 45] vagy homogenizálás jöhet szóba [46, 47]; utóbbinak elengedhetetlen eleme – a menetáramok egyenlőségének kényszere miatt – az *anizotrop vezetőképesség* [48] (2. ábra). Fontos kérdés még a tekerccs gerjesztésének (pl. feszültségkényszer, áramkényszer) érvényesítése a modellen, amelynek módja az alkalmazott végeeselemes formalizmustól függ [49, 50, 51].

A HTS tekerccsnél mindezt tetézi még a bonyolult nemlineáris, csatolt hőtani-elektromágneses jelenség. A szupravezetést – praktikus, makroszkopikus megközelítésben – az ún. *kritikus állapot* modell írja le [42]. HTS tekerccsek szimulációs alapfeladatai közé tartozik az üzemi kritikus értékek ellenőrzése [52], a váltakozóáramú veszteség számítása [45], valamint az ún. *quench* modellezése [53, 54].



2. ábra. Spirálszalagtekerccs és homogenizált modellje (illusztráció).

**2. Tézis:** *Vékony szalagból vagy fóliából készült áramvezető tekercsek háromdimenziós végeselemes számításához olyan homogenizált modellt dolgoztam ki, amellyel kiváltható azok – rendkívül erőforrásigényes – menetszintű diszkretizálása. Fő alkalmazásként a magas hőmérsékletű szupravezetőből (HTS) készült, hengeres spirálszalag-tekercsek elektromágneses modellezését tartottam szem előtt. Mindazonáltal a modell könnyen adaptálható más geometriára, alkalmazható többek között fóliatranszformátorok vagy akkumulátor-cellák modellezésére, valamint kiterjeszhető a hőtani szimulációra.*

- a) Modellem újdonságát egy olyan helyfüggő, ekvivalens, anizotrop vezetőképesség-tenzor adja, amelynek főirányai lokálisan a *spirális* szalagra illeszkednek. A szakirodalomban található, hasonló célú, homogenizált vezetőképesség-tenzorok ugyanis mind az idealizált – végtelen menetsűrűségre vonatkozó – hengeres irányt követik.
- b) Az általam kidolgozott modellben virtuálisan megjelenik a szalag két végpontja, amelyekre a kapocsfeszültség egyszerűen értelmezhető. Mivel az utóbbi által indított áramot az anizotrop vezetőképesség automatikusan a megfelelő spirális pályára tereli, ezért *feszültségkényszer* is alkalmazható. Ezzel szemben a korábbi homogenizált szalagtekercs-modellek lényegében olyan kötegelt vezetőknek felelnek meg, amelyben a szalagok egymástól független, zárt hurkokat alkotnak; emiatt számításukra jobbára csak áramkényszer alkalmazható, és a kapocsfeszültség utólagos számítása is körülményes.
- c) A peremérték-feladatot az  $(\mathbf{A}-V, \mathbf{A})$  formalizmussal fogalmaztam meg, a Coulomb-mérték előírásával; diszkretizálásra csomóponti változójú végeselemeket használtam. E ritkán használt kombinációnak több előnye van az adott feladat szempontjából. Például a tekercs kapocsfeszültsége egyszerűen előírható, ami általában jobban kondicionált együtthatómátrixot eredményez, mint az áramra vonatkozó integrális kényszerfeltételek. A kis elemszám és a mérték előírása pedig lehetővé teszi direkt megoldó használatát.
- d) Többféle lineáris tesztfeladaton keresztül megvizsgáltam a módszer konvergenciáját, pontosságát és korlátait. Ezt követően sikerrel szimuláltam nemlineáris HTS szalagtekercsek bekapcsolási tranziensét és kritikus állapotát.

### 3. Mozgó közeg ekvivalens nyugalmi modellje

A mozgó testek elektrodinamikájának tárgykörében gyakran találkozunk olyan feladattal, amelyben a test alakja invariáns a mozgásra. Ilyen például a hengerszimmetrikus test forgása a szimmetriatengelye körül, vagy a mozgás irányában igen nagy kiterjedésű rúd, illetve lemez translációja. Ezt a mozgást *stacionáriusnak* hívjuk. Számos gyakorlati alkalmazása közül említhetjük a mágneses lebegtetést [55], a mágneses kivetőszerkezetet [56], az örvényáramú fékezést [57] és a Lorentz-erőn alapuló sebességmérést [58]. Ugyancsak ide sorolható néhány elméletibb jellegű probléma, mint a homopoláris generátor (Faraday-korong), a fémcsőben eső állandómágnes [0] és a Wilson&Wilson kísérlet [59].

Az elektromágneses jelenség fizikai leírásában a mozgás ténye háromféleképpen jelenhet meg: (i) az időben változó geometriában, (ii) a konstitúciós egyenletekben, valamint (iii) a közeghatárra vonatkozó folytonossági feltételekben. Mivel a szóban forgó problémátípusban az első nyilvánvalóan nem játszik szerepet, továbbá a határfeltételek is a nyugalmi alakjukban érvényesek [60], a mozgás egyedül a konstitúciós egyenletekben jelenik meg, amelyek eredeti értelmezésükben az *anyag* elektromágneses viselkedésére vonatkoznak.

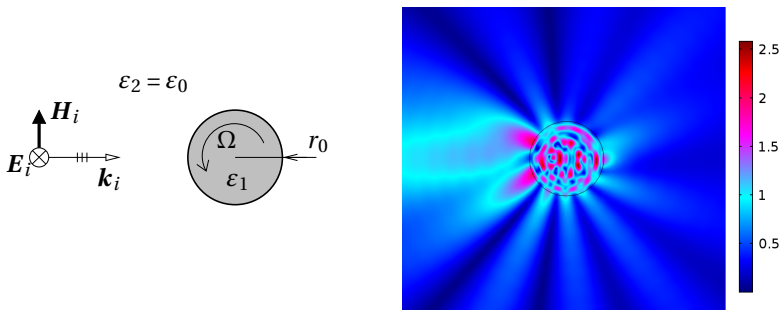
Ismert tény, hogy a közegmozgás egyfajta csatolt *magnetoelektromos* hatást kelt [61]. Ugyanakkor léteznek ún. bi-anizotrop anyagok (pl. bizonyos kristályok és kompozit meta-anyagok), amelyek nyugalomban is hasonló mágneses-elektromos csatolást hoznak létre. A mozgó közegnek tehát elvileg megfeleltethető egy vele elektromágneses szempontból ekvivalens, nyugvó, bi-anizotrop közeg, jóllehet a megfeleltetés nem egyértelmű, és többnyire fiktív közegre utal. Ezt az ekvivalenciát használják ki például a transzformációs optikában a mozgás illúziójának keltésére [62] vagy éppen elrejtésére [63].

Munkám során olyan eljárást dolgoztam ki, amellyel a stacionárius közegmozgás elektromágneses modellje egy nyugvó közeg ekvivalens modelljévé alakítható. Az eljárás alapja a parciális differenciálegyenlet (PDE) konvekciós tagjának „beolvasztása” a diffúziósba. Az igény eredetileg a végeselemes számítások kapcsán merült fel, ugyanis a FEM szoftverek egy része nem támogatja a közegmozgás modellezését. A konvekciós-diffúziós átalakítás további előnyt is ígért: a tapasztalat szerint a PDE numerikusan instabillá válik, és megoldásában hamis (fizikailag megalapozatlan) térbeli oszcilláció jelenhet meg, ha (nagyobb sebességnél) a konvekciós tag dominál a diffúzióssal szemben [56, 57]. Az átalakítás igazi hozadéka mégis a bi-anizotrop közegek határán érvényes folytonossági feltételek végeselemes implementációjának felülvizsgálata és korrekciója lett.



**3. Tézis:** Új eljárást fejlesztettem ki, amellyel a stacionárius közegmozgás elektromágneses modellje egy nyugvó közeg ekvivalens modelljévé alakítható. Ennek során a mozgó közeg konvekciós-diffúziós típusú parciális differenciálegyenletét formálisan tisztán diffúzióssá alakítom át, amelyhez nem szükséges az ekvivalencia alapjául szolgáló bi-anizotrop közeg karakterisztikájának meghatározása.

- A javasolt eljárással olyan FEM szoftverekben is lehetővé válik a stacionárius közegmozgás modellezése, amelyekben ez a funkció nincs beépítve, anélkül hogy a szoftver alacsonyabb hozzáférési szintjén kellene azt implementálni. Tény, hogy a PDE diffúziós tagja ilyenkor általában inhomogén tenzor-egytűthetőt kap, ám ennek kezelésére számos végeselemkód eleve alkalmas.
- Megmutattam, hogy a végeselem-modellben a mozgó tartományt helyettesítő bi-anizotrop közeg határán fel kell venni egy *fiktív felületi forrást* az ekvivalencia biztosítására. Ez a gyenge alakban felírt egyenletek és a közegethárón érvényes folytonossági feltételek együttes következménye. A szakirodalom ezzel az implementációs problémával nem foglalkozik, mert az ekvivalencia elméleti vizsgálatában hallgatólagosan állandó vagy folytonosan változó közegjellemzőre szorítkozik.
- Az eljárást két eltérő jellegű tesztfeladat megoldásán mutattam be; eredményeim helyességét szakirodalmi adatok támasztják alá.



3. ábra. Radarszóródás gyorsan forgó szigetelőhengeren (illusztráció).

## Az eredmények eddigi hasznosítása

Az 1. és 2. tézis esetében már magát a témaválasztást is jelentősen befolyásolta a FETI Kft.-vel több évtizedre visszatekintő együttműködésem. A FETI a japán Furukawa Electric Co., Ltd. hazai kutató leányvállalata.

- A homogenizálási elvre épülő szimulációs eljárásomat sikerrel alkalmazták a villamos hajtású autókban használt kábelek árnyékolásának nagyfrekvenciás EMC méréséhez és a kábelkonstrukció optimalizálásához.
- Japán kollégáimmal egy litze huzalt tartalmazó, vezeték nélküli energiaátviteli eszköz fejlesztésén dolgoztunk az utóbbi időben. Ennek keretében alkalmam nyílt arra is, hogy a modellszámításokhoz ellenőrző méréseket végezzek a cég Hiratsuka-ban lévő telephelyén.
- A Furukawa a tulajdonosa az amerikai székhelyű SuperPower Inc. vállalatnak, amely jelenleg a világ egyik legnagyobb szupravezető-gyártója. Így a cég a HTS tekerccsel kapcsolatos eredményeimnek is potenciális felhasználója.

A vezeték nélküli energiaátvitellel (1. tézis) kapcsolatban tudományosvezető tevékenységet folytattam: 2015-2017 között az európai COST Action IC1301 számú (Wireless Power Transmission for Sustainable Electronics) programjában a magyar kutatócsoport vezetője voltam. Ezen kívül felvállaltam a WPT hazai népszerűsítését is: előadásokat tartottam többek között A Magyar Tudomány Ünnepe keretében 2014-ben, valamint az Elektrotechnikai Szakkollégium rendezvényén 2017-ben.

Végül, de nem utolsó sorban eredményeim beépültek néhány speciális, általam (is) alapított, illetve megújított egyetemi tantárgy (pl. Mezőszimuláció véges elem módszerrel, Vezeték nélküli energiaátvitel, Relativisztikus elektrodinamika mérnököknek) oktatásába, valamint minden bizonnyal szerepet játszottak a tehetséggondozásban és a kutatói utánpótlás nevelésében.

# A tézisekhez kapcsolódó tudományos közlemények

## Folyóiratcikkek

- [1] Sz. Gyimóthy, Zs. Badics, J. Pávó, and A. Vaskó. „Inspection of the delamination of magnetic and non-magnetic conducting layers using NDT”. In: *IEEE T Magnetics* 48.2 (Feb. 2012), pp. 499–502.
- [2] Sz. Gyimóthy, J. Pávó, P. Kis, T. Toratani, R. Katsumi, and G. Varga. „Simulation of the absorbing clamp method for optimizing the shielding of power cables”. In: *COMPEL* 32.5 (Sept. 2013), pp. 1567–1580.
- [3] Sz. Gyimóthy, S. Kaya, D. Obara, M. Shimada, M. Masuda, S. Bilicz, J. Pávó, and G. Varga. „Loss computation method for litz cables with emphasis on bundle-level skin effect”. In: *IEEE T Magnetics* 5.6 (2019), pp. 1–4.
- [4] Sz. Gyimóthy. „Modeling stationary moving medium by static magneto-electric material”. In: *European Physical Journal, Applied Physics* 85.1 (2019), p. 10901.
- [5] S. Bilicz, Sz. Gyimóthy, J. Pávó, L. L. Tóth, Zs. Badics, and B. Bálint. „Modeling of resonant wireless power transfer with integral formulations in heterogeneous media”. In: *IEEE T Magnetics* 52.3 (Mar. 2016), pp. 1–4.
- [6] S. Bilicz, Zs. Badics, Sz. Gyimóthy, and J. Pávó. „Modeling of dense windings for resonant wireless power transfer by an integral equation formulation”. In: *IEEE T Magnetics* 53.6 (June 2017), pp. 1–4.
- [7] S. Bilicz, J. Pávó, Sz. Gyimóthy, and Zs. Badics. „An integral equation formulation with global series expansion for resonant wireless power transfer”. In: *COMPEL* 36.5 (2017), pp. 1474–1487.
- [8] S. Bilicz, Zs. Badics, Sz. Gyimóthy, and J. Pávó. „A full-wave integral equation method including accurate wide-frequency-band wire models for WPT coils”. In: *IEEE T Magnetics* 54.3 (Mar. 2018), pp. 1–4.
- [9] Zs. Badics, S. Bilicz, Sz. Gyimóthy, and J. Pávó. „Finite-element-integral equation full-wave multisolver for efficient modeling of resonant wireless power transfer”. In: *IEEE T Magnetics* 52.3 (Mar. 2016), pp. 1–4.
- [10] Zs. Badics, S. Bilicz, Sz. Gyimóthy, and J. Pávó. „Nonlocal impedance boundary conditions in modeling WPT coils for all frequencies”. In: *Int J Applied Electromagnetics and Mechanics* 59.1 (2019), pp. 9–18.
- [11] Zs. Badics, J. Pávó, S. Bilicz, and Sz. Gyimóthy. „Subdomain perturbation finite-element method for quasi-static Darwin approximation”. In: *IEEE T Magnetics* 56.1 (Jan. 2020), pp. 1–4.

- [12] A. Bingler, S. Bilicz, Zs. Badics, Sz. Gyimóthy, and J. Pávó. „Integral equation formulations for modeling wireless power transfer systems in close proximity to foreign objects”. In: *IEEE T Magnetics* 55.6 (June 2019), pp. 1–4.
- [13] J. Pávó, I. Sebestyén, Sz. Gyimóthy, and O. Bíró. „Approximate prediction of losses in transformer plates”. In: *COMPEL* 22.3 (2003), pp. 689–702.
- [14] J. Pávó, Zs. Badics, S. Bilicz, and Sz. Gyimóthy. „Efficient perturbation method for computing two-port parameter changes due to foreign objects for WPT systems”. In: *IEEE T Magnetics* 54.3 (Mar. 2018), pp. 1–4.
- [15] I. Sebestyén, Sz. Gyimóthy, J. Pávó, and O. Bíró. „Calculation of losses in laminated ferromagnetic materials”. In: *IEEE T Magnetics* 40.2 (Mar. 2004), pp. 924–927.
- [16] I. Sebestyén, J. Pávó, Sz. Gyimóthy, and O. Bíró. „Modeling of nonlinear material with linear inhomogeneous medium for loss prediction of transformer cores”. In: *Int J Applied Electromagnetics and Mechanics* 19.1-4 (2004), pp. 427–431.

### **Egyéb publikációk**

- [17] Sz. Gyimóthy. „Emulation of stationary moving medium by magneto-electric material in the finite element method”. In: *20th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, COMPUMAG*. Montreal, Canada, 28 June - 2 July 2015, pp. 213–214.
- [18] Sz. Gyimóthy, S. Bilicz, B. Bálint, J. Pávó, and P. Horváth. „Visualization of steady-state power flow in resonant WPT systems”. In: *17th International IGTE Symposium*. Graz, Austria, 18-21 Sep 2016, pp. 163–167.
- [19] Sz. Gyimóthy, A. Kenderes, S. Bilicz, J. Pávó, and Zs. Badics. „Homogenized 3-D FEM model for simulation of HTS coils”. In: *22nd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, COMPUMAG*. Paris, France, 15-19 July 2019, pp. 1–4.
- [20] Sz. Gyimóthy. *Vezeték nélküli energiaátvitel*. Energetikai Szakkollégium. 2017. URL: <https://www.eszk.org/rendezvenyeink/archivum/archivum-2017/vezetek-nelkuli-energiaatvitel>.
- [21] S. Bilicz and Sz. Gyimóthy. „Approximate and proper electromagnetic modelling in moving conductors”. In: *19th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, COMPUMAG*. Budapest, Hungary, 30 June - 4 July 2013, pp. 577–578.

- [22] S. Bilicz, Sz. Gyimóthy, J. Pávó, P. Horváth, and K. Marák. „Uncertainty quantification of wireless power transfer systems”. In: *IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*. Aveiro, Portugal, May 2016, pp. 1–3.
- [23] J. Pávó, Sz. Gyimóthy, S. Bilicz, L. L. Tóth, P. Kis, and G. Varga. „Field computational aspects of wireless power transfer”. In: *16th International IGTE Symposium*. Graz, Austria, 14-17 Sep 2014, pp. 239–244.

## A tézisekhez közvetlenül nem kötődő, válogatott közlemények

- [24] I. Kiss, Sz. Gyimóthy, Zs. Badics, and J. Pávó. „Parallel realization of the element-by-element fem technique by cuda”. In: *IEEE T Magnetics* 48.2 (Feb. 2012), pp. 507–510.
- [25] Sz. Gyimóthy, J. Pávó, I. Kiss, and I. Sebestyén. „Practical criteria for the separability of eddy-current testing signals on multiple defects”. In: *IEEE T Magnetics* 44.6 (June 2008), pp. 1634–1637.
- [26] Sz. Gyimóthy and J. Pávó. „Qualification of the inverse problem of defect reconstruction using optimized mesh database”. In: *COMPEL* 24.2 (2005), pp. 436–445.
- [27] Sz. Gyimóthy, J. Pávó, and H. Tsuboi. „Conceptual evaluation of inversion models used for layered structures”. In: *IEEE T Magnetics* 42.4 (Apr. 2006), pp. 1091–1094.
- [28] J. Pávó and Sz. Gyimóthy. „Adaptive inversion database for electromagnetic nondestructive evaluation”. In: *NDT & E Int* 40 (Apr. 2007), pp. 192–202.
- [29] Sz. Gyimóthy, I. Kiss, and J. Pávó. „Adaptive sampling technique based on moving meshes for building data-equidistant inversion databases for NDT”. In: *Int J Applied Electromagnetics and Mechanics* 30.3-4 (2009), pp. 309–319.
- [30] Sz. Gyimóthy. „Optimal sampling for fast eddy current testing inversion by utilising sensitivity data”. In: *IET Science, Measurement & Technology* 9.3 (2015), pp. 235–240.
- [31] Sz. Gyimóthy, Y. Le Bihan, and J. Pávó. „Optimized database for training neural networks used in non-destructive testing”. In: *Int J Applied Electromagnetics and Mechanics* 25.1-4 (2007), pp. 717–721.
- [32] S. Bilicz, M. Lambert, and Sz. Gyimóthy. „Kriging-based generation of optimal databases as forward and inverse surrogate models”. In: *Inverse Problems* 26.7 (June 2010), p. 074012.

## Szakirodalmi hivatkozások

- [33] Gy. Tevan. *Analytical Skin Effect Models in Electrical Engineering*. Akadémiai Kiadó, 2010.
- [34] Q. Deng, J. Liu, D. Czarkowski, M. K. Kazimierczuk, M. Bojarski, H. Zhou, and W. Hu. „Frequency-dependent resistance of litz-wire square solenoid coils and quality factor optimization for wireless power transfer”. In: *IEEE T Industrial Electronics* 63.5 (May 2016), pp. 2825–2837.
- [35] J. A. Ferreira. „Analytical computation of AC resistance of round and rectangular litz wire windings”. In: *IEE Proceedings B - Electric Power Applications* 139.1 (Jan. 1992), pp. 21–25.
- [36] C. R. Sullivan and R. Y. Zhang. „Analytical model for effects of twisting on litz-wire losses”. In: *IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics*. Santander, Spain, 22-25 June 2014, pp. 1–10.
- [37] S. Wang and D. G. Dorrell. „Copper loss analysis of EV charging coupler”. In: *IEEE T Magnetics* 51.11 (Nov. 2015), pp. 1–4.
- [38] S. Hiruma, Y. Otomo, and H. Igarashi. „Eddy current analysis of litz wire using homogenization-based FEM in conjunction with integral equation”. In: *IEEE T Magnetics* 54.3 (Mar. 2018), pp. 1–4.
- [39] A. Roßkopf, E. Bär, C. Joffe, and C. Bonse. „Calculation of power losses in litz wire systems by coupling FEM and PEEC method”. In: *IEEE T Power Electronics* 31.9 (Sept. 2016), pp. 6442–6449.
- [40] H. Igarashi. „Semi-analytical approach for finite-element analysis of multi-turn coil considering skin and proximity effects”. In: *IEEE T Magnetics* 53.1 (Jan. 2017), pp. 1–7.
- [41] J. Gyselinck and P. Dular. „Frequency-domain homogenization of bundles of wires in 2-D magnetodynamic FE calculations”. In: *IEEE T Magnetics* 41.5 (May 2005), pp. 1416–1419.
- [42] I. Vajda. „Szupravezetők villamosipari alkalmazásai”. In: *Megújuló energiák villamos rendszerei (BMEVIVEM262 jegyzet)*. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamos Energetika Tanszék, 2009.
- [43] F. Pichler, N. Koester, and A. Thaler. „Thermo-electric simulation of battery-modules with reduced order modelling of linear electrical components”. In: *COMPEL* 36.5 (2017), pp. 1488–1500.

- [44] W. K. Chan, P. Masson, C. Luongo, and J. Schwartz. „The 3D mixed-dimensional quench model of a high aspect ratio high temperature superconducting coated conductor tape”. In: *Proceedings of the COMSOL Conference*. Boston, MA, USA, 2010.
- [45] E. Berrospe-Juarez, V. M. R. Zermeño, F. Trillaud, and F. Grilli. „Real-time simulation of large-scale HTS systems: multi-scale and homogeneous models using the T–A formulation”. In: *Superconductor Science and Technology* 32.6 (Apr. 2019), p. 065003.
- [46] H. De Gersem and K. Hameyer. „A finite element model for foil winding simulation”. In: *IEEE T Magnetics* 37.5 (Sept. 2001), pp. 3427–3432.
- [47] P. Dular and C. Geuzaine. „Spatially dependent global quantities associated with 2-D and 3-D magnetic vector potential formulations for foil winding modeling”. In: *IEEE T Magnetics* 38.2 (Mar. 2002), pp. 633–636.
- [48] V. M. R. Zermeño and F. Grilli. „3D modeling and simulation of 2G HTS stacks and coils”. In: *Superconductor Science and Technology* 27.4 (2014), p. 044025.
- [49] M. Kuczmann and A. Iványi. *The finite element method in magnetics*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2008.
- [50] S. Schöps, H. De Gersem, and T. Weiland. „Winding functions in transient magnetoquasistatic field-circuit coupled simulations”. In: *COMPEL* 32 (Nov. 2013), pp. 2063–2083.
- [51] F. Sass, D. H. N. Dias, G. G. Sotelo, and R. de Andrade Junior. „Superconducting magnetic bearings with bulks and 2G HTS stacks: comparison between simulations using H and A-V formulations with measurements”. In: *Superconductor Science and Technology* 31.2 (Jan. 2018), p. 025006.
- [52] M. Zhang, J.-H. Kim, S. Pamidi, M. Chudy, W. Yuan, and T. A. Coombs. „Study of second generation, high-temperature superconducting coils: determination of critical current”. In: *Journal of Applied Physics* 111.8 (2012), p. 083902.
- [53] P. J. Masson, V. R. Rouault, G. Hoffmann, and C. A. Luongo. „Development of quench propagation models for coated conductors”. In: *IEEE T Applied Superconductivity* 18.2 (2008), pp. 1321–1324.
- [54] E. Härö and A. Stenvall. „Reducing modeling domain to speed-up quench simulations of HTS coils”. In: *IEEE T Applied Superconductivity* 24.3 (2014), pp. 1–5.
- [55] L. C. Davis and D. F. Wilkie. „Analysis of motion of magnetic levitation systems: implications for high-speed vehicles”. In: *Journal of Applied Physics* 42.12 (1971), pp. 4779–4793.

- [56] D. Rodger, P. J. Leonard, and T. Karaguler. „An optimal formulation for 3D moving conductor eddy current problems with smooth rotors”. In: *IEEE T Magnetics* 26.5 (1990), pp. 2359–2363.
- [57] F. Henrotte, H. Heumann, E. Lange, and K. Hameyer. „Upwind 3-D vector potential formulation for electromagnetic braking simulations”. In: *IEEE T Magnetics* 46.8 (2010), pp. 2835–2838.
- [58] M. Zec, R. P. Uhlig, M. Ziolkowski, and H. Brauer. „Fast technique for Lorentz force calculations in non-destructive testing applications”. In: *IEEE T Magnetics* 50.2 (2014), pp. 133–136.
- [59] H. Heumann and S. Kurz. „Modeling and finite-element simulation of the Wilson&Wilson experiment”. In: *IEEE T Magnetics* 50.2 (2014), pp. 65–68.
- [60] J. Van Bladel. *Relativity and engineering*. Springer-Verlag, 1984.
- [61] T. Ivezić. „The constitutive relations and the magnetoelectric effect for moving media”. In: *Int J Modern Physics B* 26.08 (2012), pp. 1–18.
- [62] J. Vehmas, S. Hrbar, and S. Tretyakov. „Transmission lines emulating moving media”. In: *New Journal of Physics* 16.9 (2014), p. 093065.
- [63] X. Cheng, H. Chen, B. I. Wu, and J. A. Kong. „Cloak for bianisotropic and moving media”. In: *Progress In Electromagnetics Research, PIER* 89 (2009), pp. 199–212.