PhD tézisek

Neurális vektor hiszterézis modell és a roncsolásmentes anyagvizsgálat

szerző

Kuczmann Miklós
okleveles villamosmérnök

konzulens

prof. Iványi Amália

Budapest
2004

1. A kitűzött kutatási feladat és előzményei

1.1. Előzmények

A ferromágneses anyagok hiszterézis karakterisztikájának ismerete és minél pontosabb szimulációja rendkívüli fontossággal bír a villamosmérnöki gyakorlatban. A mágneses anyagok széleskörű elterjedése az energetikai iparban (például a transzformátorokban, villamos gépekben) egyre pontosabb és precízebb mérési eljárásokat, valamint szimulációs technikákat igényelnek. A megnövekedett minőségi követelmények a számítógéppel támogatott tervezés (CAD–Computer Aided Design) igényét támasztják alá. A számítógéppel támogatott tervezés és analízis lehetővé teszi az adott berendezés vagy eszköz viselkedésének szimulációját még a gyártási folyamatok előtt, a tervezési fázisban, nagyban hozzájárulva a termék tökeletesítéséhez. A számítástechnika rohamos fejlődésével egyre pontosabb, minden igényt kielégítő tervező és fejlesztő rendszerek látnak napvilágot, melyek alkalmasak a legkülönfélébb berendezések numerikus szimulációjára, esetleg extrém körülmények között is. A mágneses anyagok viselkedését leíró hiszterézis karakterisztika matematikai és mérnöki megközelítésben egy nemlineáris és többértékű függvénykapcsolatot realizál a mágneses térerősség és a mágnesezettség között, azaz $\boldsymbol{M} = \mathscr{H}\{\boldsymbol{H}\}$. Ezen jelenséget fizikusok, matematikusok és anyagtudománnyal foglalkozó mérnökök kutatják és próbálják a minél tökéletesebb modellt megalkotni. Az egyes kutatási irányok más–más szempontokat tartanak szem előtt; a fizikusok például az anyag mikroszkópikus leírásán dolgoznak, a matematikusok szemszögéből ez egy érdekes nemlineáris rendszer kutatását és matematikai modellezését jelenti. Mérnöki szempontból a hiszterézis karakterisztika modellezése egy olyan matematikai modell kidolgozását jelentheti, amelynek mérési adatokhoz történő illesztése, azaz identifikációja viszonylag egyszerű és azt elektromágneses térszamítást igénylő problémák numerikus szimulációja során minél hatékonyabban lehessen alkalmazni.

A mágnesesség jelenségének alapvető oka az lehet, hogy az elektronok az atommag körül különböző energiaállapotú pályákon keringenek. Ezen mozgások mágneses dipólusokkal is leírható elemi áramhurkokkal modellezhetők. Egy infinitezimálisan kicsi térfogatban összegzett mágneses momentumok dipólus nyomatékainak eredménye a mágneses anyag mágnesezettsége. Az elemi áramhurkok feltételezése a makroszkópikus leírási mód és a doménstruktúra elméletének alapja is. A mikroszkópikus modellek bizonyos energiák összegének minimalizálásán alapszanak, úgy mint például a lemágnesezési, az anizotrópiából származó, stb. energiák. A mikroszkópikus modellek pontos fizikai leírást adnak az anyag viselkedéséről, ugyanakkor a nagy számításigény bizonyos esetekben korlátozza az alkalmazási lehetőségeket.

A hiszterézis jelensége nagyon sok tudományterületen jelentkezik és egyre több kutató foglalkozik a témával. A hiszterézis karakterisztika szimulációja –köszönhetően az egyre gyorsabb és olcsóbb számítógépeknek– egyre pontosabban, egyre több fizikai jelenség figyelembevételével megvalósítható. A kidolgozott módszerek és modellek implementálhatók a nemlineáris elektromágneses térszámítást végző eljárásokban, s így egy adott berendezés vagy eszköz viselkedése mind pontosabban szimulálható. Több hiszterézis modell is ismert, mint például a klasszikus Preisach modell és annak módosításai, a Jiles–Atherton modell, a Stoner–Wohlfarth modell, stb. és az utóbbi időben kitüntetett szerepet játszó és rohamosan fejlődő neurális hálózatokon alapuló modellek.

A neurális hálózatokat elsősorban folytonos függvények approximációjára alkalmazzák. Legfontosabb előnyük az egyszerű identifikációs eljárás, amely a mérési adatokra támaszkodva gyakorlatilag egy tanítási folyamat, és az így előálló modell képes a mérési eredmények folytonos approximációjára. Mindezen előnyök mellett egy fontos hátránnyal is bírnak, nevezetesen, hogy a neurális hálózat alapú modellek fekete dobozként viselkednek, azaz nincs kapcsolat a modellezett jelenség és a hálózat súlyai között. A szimulációs eljárások célja egy berendezés vagy eszköz viselkedésének minél pontosabb megközelítése, de az atomi szinten történő fizikai folyamatok sok esetben érdektelenek. A neurális hálózat alapú modellek tehát az adott fizikai folyamatok matematikai leírására alkalmasak és a mérnöki tervezésben legtöbbször ezek kerülnek előtérbe.

Dolgozatomban összefoglaltam az irodalomból ismert neurális hálózatokon alapuló skalár hiszterézis modelleket. Ezen modellek a klasszikus Preisach modell viselkedését írják le neurális hálózat segítségével; vagy az eloszlásfüggvény approximációjára, vagy a mágneses anyagok előéletének szimulációjára összpontosítanak. A neurális hálózatok előnyös tulajdonságait szem előtt tartva, nagy kihívást jelent egy pontos, a mérési eredményeket hűen követő hiszterézis modell kidolgozása. A mágneses térerősség és a mágnesezettség között fennálló vektoriális kapcsolatot sok esetben figyelembe kell venni. Ezen jelenség leírása a vektoriális hiszterézis modellek alkalmazásához vezet, mely témakörben az utóbbi években intenzív kutatások indultak meg. Az anizotróp anyagok viselkedésének megértése, matematikai megfogalmazása és modellezése rendkívül nehéz feladat, különösen a háromdimenziós anizotróp modell megalkotása nehézkes, mivel a háromdimenziós vektor hiszterézis karakterisztika mérése jelenleg is nyitott kérdés. Ezen okok vezéreltek a témában való elmélyülésre.

A mérnöki gyakorlatban előforduló elektromágneses térszámítást igénylő problémák szimulációja a Maxwell egyenletek és az anyagmodellek összekapcsolásán és azok numerikus megoldásán alapulnak. Sok esetben szükség lehet a mágneses anyag minél pontosabb modellezésére, azaz a hiszterézis karakterisztikát figyelembe kell venni. Bizonyos feltételek mellett számolni kell a mágneses térerősség és a mágnesezettség vektoriális jellegével is, azaz a vektor hiszterézis modell alkalmazása elkerülhetetlen. Egyszerűbb esetekben elegendő lehet a konstans permeabilitás alkalmazása (lineáris anyagok), vagy egyértékű (például arkusz tangens) függvénnyel törénő modellezés. A hiszterézis karakterisztikát figyelembe kell venni azon esetekben, ha például fontos a remanencia figyelembevétele, vagy ha veszteségeket kell számolni. Az elektomágneses térszámítást igénylő problémák megoldása a Maxwell egyenletekből levezethető parciális differenciálegyenletek megoldásához vezet. A feladat megoldása során figyelembe kell venni a peremfeltételeket is. A parciális differenciálegyenletek valamely alkalmasan megválasztott potenciálformalizmussal kaphatók meg, alapvetően skalár és vektor potenciálok alkalmazhatók.

A végeselem–módszer egyike a legnépszerűbb és a leggyorsabban fejlődő szimulációs technikáknak. A Maxwell egyenletekből levezethető parciális differenciálegyenletek a reziduum elvnek megfelelően a gyenge alak előállításával, a vizsgált tartomány diszkretizálásával (például háromszögekkel, tetraéderekkel), majd a bázisfüggvények felhasználásával oldhatók meg. A fentiek elvégzése után egy lineáris egyenletrendszer adódik, melynek megoldása szolgáltatja az ismeretlen potenciálfüggvény végeselemes közelítését. Amennyiben a mágneses anyag nemlineáris karakterisztikáját is figyelembe kell venni, akkor a linearizált (egyébként nemlineáris) egyenletrendszert egy alkalmasan választott iterációs sémán keresztül össze kell kapcsolni a karakterisztikával.

Az elektromágneses elven alapuló roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek intenzív kutatása és fejlesztése figyelhető meg az évről–évre növekvő számú publikáció alapján. A cél a módszer minél tökéletesebb és megbízhatóbb alkalmazása és lehetőség szerint teljes automatizálása. Ennek érdekében egy–egy feladatot több módszerrel is megoldanak, majd az eredmények összevetésével és mérésekkel történő összehasonlításokkal minősíthetők az egyes szimulációs technikák. A roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek fejlesztése kisebb részfeladatokra bontható, melyek azonban egymásra épülnek: például a mérőfejek tökéletesítése, különböző mérési elrendezések vizsgálata. A szimulációs eljárások tökéletesítése az inverz feladat megoldását célozza meg, melynek eredményeképp mérési eredményekből meg lehet határozni a repedés helyét, alakját és geometriáját.

1.2. A kutatási feladat

A kutatási feladat tárgya a mágneses anyagok hiszterézis karakterisztikájának és vektoriális viselkedésének neurális hálózattal történő modellezése és ezen modell háromdimenziós végeselem–programrendszerbe történő illesztése. A cél egy általam készített roncsolásmentes anyagvizsgálatra alkalmas mérési elrendezés numerikus szimulációja és ezen keresztül a szimulációs eljárás és a modell hatékonyságának és működésének ellenőrzése és bemutatása.

A neurális hálózatok nagyon hatékonyan alkalmazhatók folytonos függvények approximációjára. Ezen oknál fogva, egy új, a neurális hálózatok előnyeit kihasználó hiszterézis modell kidolgozása nagy kihívást jelent. Célul tűztem ki egy, a skalár hiszterézis karakterisztika felvételére alkalmas mérési elrendezés kidolgozását, amely lehetővé teszi a mérési eredmények és a szimulációs eljárás összehasonlításán keresztül a modell ellenőrzését és igazolását. A méréseket egy torroid alakú próbatesten kívánom elvégezni, mert abban a mágneses térerősség és a mágnesezettség vektorok párhuzamosan futnak és a skalár hiszterézis karakterisztika feltételezése nagyon jó közelítést biztosít. Célom a skalár hiszterézis modellt alapul véve egy vektor hiszterézis modell kidolgozása, amely alkalmas a mágneses térerősség és a mágnesezettség vektorok között fennálló vektoriális viselkedés leírására is. A két- és háromdimenziós vektor modellek identifikációjára az Everett függvényekből kiindulva egy új, saját ötleteken alapuló módszert ajánlok. Sajnos a vektor hiszterézis karakterisztika mérése meglehetősen nehéz, további kutatásokat igénylő feladat (különösen három dimenzióban), ezért a vektor méréseket a Preisach modellel állítom elő, mint elméleti mérési eredményeket.

Célom egy roncsolásmentes anyagvizsgálatra alkalmas mérési elrendezés vizsgálata és a repedéseknek megfelelő jeleket a FluxSet és a Hall szenzorokkal kívánom mérni. A próbatestek jól definiált geometriájú lyukakat, réseket tartalmaznak. Célom nem egy új mérési elrendezés kidolgozása, hanem a mérési eredmények és az elrendezés végeselem–módszerrel történő szimulációja után az eredmények összehasonlításával a nemlineáris számítási módszer ellenőrzése.

A fenti mérési elrendezés háromdimenziós numerikus analízisét a végeselem–módszerrel kívánom elvégezni. Célom az elrendezés háromdimenziós végeselemes modelljének kidolgozása, az anyag hiszterézis karakterisztikájának figyelembevétele és a szimulációs eredmények mérésekkel történő összevetése. A feladat megoldása során a $\boldsymbol{T}, \Psi - \Psi$ potenciálformalizmust fogom alkalmazni, mert az közvetlenül a mágneses térerősség vektort adja, ami a neurális vektor hiszterézis modell bemenete, s így a direkt modell alkalmazása kézenfekvő. Az anyag hiszterézis viselkedését izotrópnak feltételezve, ugyanazon anyagból készített torroid alakú próbatesten skalár mérésekkel kívánom identifikálni a háromdimenziós vektor hiszterézis modellt. A karakterisztikát a polarizációs módszerrel kezelve, a fixpontos iterációs sémával kívánom megoldani a linearizált, egyébként nemlineáris egyenletrendszert. A bevezetett potenciálok approximációjára a kombinált csomóponti– és élelemeket kívánom alkalmazni, mert az élelemek segítségével a repedés felületén a folytonossági feltételek előírása könnyedén megtehető. Az irodalomból ismeretes, hogy a csomóponti bázisfüggvények alkalmazása szinguláris helyek környezetében (sarkok) problémát jelent.

1.3. A vizsgálatoknál alkalmazott módszerek

Neurális hálózattal történő függvényapproximáció során nehézségek merülnek fel, ha többértékű függvénykapcsolat közelítéséről van szó. A hiszterézis karakterisztika többértékűségét egy új változó bevezetésével kezeltem és ezt ξ–vel jelölöm (előfeldolgozás). Minden mért elsőrendű visszatérő görbéhez a ξ változó egy értékét rendelve a visszatérő görbék egy kétdimenziós felülettel reprezentálhatók. Ezen felület két független változó (H és ξ) függvénye, amely egy alkalmasan választott előrecsatolt neurális hálózattal approximálható. A mágneses anyagok előéletét a modell memóriájával vettem figyelembe, amely a mágnesezési folyamat szimulációja során tárolja a visszatérési pontokat. A hiszterézis karakterisztika viselkedését egy tudásbázissal modelleztem, amely ha–akkor típusú szabályokat fogalmaz meg például a minor hurkok viselkedéséről, a koncentrikus hiszterézis hurkok szimmetriájáról, stb. [2, 5, 6, 12, 15]. A skalár modell működését mérésekkel igazoltam [1, 4]. Kidolgoztam egy mérési eljárást a skalár hiszterézis karakterisztika felvételére, amely a LabVIEW programcsomagra támaszkodik és tetszőleges görbe mérésére alkalmas egy torroid alakú próbatesten. A mérési eredmények és a szimulációk nagyon jó egyezést mutatnak.

A két- és háromdimenziós vektor modelleket több neurális skalár hiszterézis modell szuperpozíciójaként állítottam elő [3, 8, 9, 14]. Kidolgoztam egy saját ötleteken alapuló identifikációs eljárást, amely a mért Everett függvényeken alapszik. Felismertem, hogy az Everett függvények diszkretizálásával az ismeretlen Everett függvény rekurzív módon számítható a mért Everett függvény ismeretében, és erre algoritmikus megoldást javasoltam. Izotróp anyagok szimulációja esetén minden skalár hiszterézis karakterisztika egyforma, anizotróp anyagok esetén a mért Everett függvények függenek a mérés irányától. Az anizotrópiára vonatkozóan bizonyos megkötésekkel élve ezen irányfüggést az Everett függvények Fourier sorfejtésével kezeltem és az izotróp modell identifikációjánal alkalmazott eljárást kis módosítással használtam. Az eljárást háromdimenziós anizotróp viselkedés leírására is sikerrel általánosítottam. Megmutattam a kidolgozott vektor modellek viselkedését lineáris és forgó mágneses térben, valamint összehasonlítottam a méréssel és szimulációval kapott karakterisztikákat, továbbá elemeztem az izotróp és anizotróp modellek viselkedését. Az Everett felületre alapoztam az identifikációs eljárást, mert az közvetlen kapcsolatban áll az elsőrendű visszetérő görbékkel, és ezen görbék ismerete a neurális hálózat tanításának alapja.

Az elektromágneses térszámításban alkalmazott skalár és vektor potenciálok approximációjára a csomóponti és vektor bázisfüggvényeket alkalmaztam egy általam készített végeselem–programrendszerben. A Maxwell egyenletekből kapott parciális differenciálegyenleteket az időtartományban oldottam meg, mert figyelembe kívántam venni az anyag hiszterézis karakterisztikáját. A $\boldsymbol{T}, \Psi - \Psi$ potenciálformalizmussal a mágneses térerősség vektor közvetlenül megkapható, s így a direkt vektor hiszterézis modell alkalmazható a mágneses indukció vektor számítására, $\boldsymbol{B} = \mathscr{H}\{\boldsymbol{H}\}$. Megoldottam egy magnetosztatika feladatot és egy örvényáramú feladatot, melyekbe implementáltam az izotróp vektor hiszterézis modellt. Elemeztem az örvényáramok hatását, összehasonlítottam a magnetosztatika és az örvényáramú feladatok megoldásait. A hiszterézis karakterisztikát a polarizációs módszerrel kezeltem és az így kapott linearizált egyenletrendszert a fixpontos iterációs módszerrel oldottam meg [10, 13].

Mágneses Laboratóriumunkban kidolgoztam egy roncsolásmentes anyagvizsgálatra alkalmas mérési elrendezést [7, 11]. Célom nem egy új roncsolásmentes anyagvizsgálati technika kidolgozása volt, hanem a végeselemes szimuláció és a hiszterézis karakterisztika összekapcsolásából adódó nemlineáris számítási technika megoldásának ellenőrzése, saját mérésekkel történő összevetése. A mérési elrendezés egy U alakú jármot tartalmaz, melynek pofái közé szorított próbatest adott geometriájú lyukainak, réseinek mágneses térre gyakorolt hatását mértem a FluxSet és a Hall szenzorokkal. A próbatest és a járom ugyanazon anyagból készült. A gerjesztést egy, a járomra erősített tekercsben folyó áram biztosította. A próbatest felületének letapogatása és eközben a mágneses tér mérése alkalmas a próbatest felületi inhomogenitásainak detektálására. Egyszerű elrendezéseken elvégeztem a szenzorok kalibrációját, amit a szimulációk során felhasználtam.

Az elkészített lyukak és rések mérete nagyon kicsi az elrendezés teljes méretéhez képest: például egy lyuk átmérője maximum 2.5 mm, maximális mélysége 5 mm, ugyanakkor a járom mérete $320 \times 240 \times 5$ mm, ami kb. 2 nagyságrenddel nagyobb, mint a vizsgált lyuk mérete. A generált végeselem–háló nem alkalmas a felületi repedések hatásának szimulációval történő kimutatására. Ha a rács nagyon sűrű, akkor az egyenletrendszer nagyon nagy lehet, amely időigényes megoldáshoz vezethet, különösen a nemlineáris feladat megoldása során. Ha a rács nagyon ritka, akkor az ismeretlenek száma nem túl nagy, azonban a megoldás a repedés környezetében nem kielégítő. Ezen oknál fogva egy globális–lokális modellt (tartomány–dekompozíció) fogalmaztam meg az időtartományban [13]. Első lépésben a globális modellt alkalmaztam, amely a teljes mérési elrendezést tartalmazza, azonban a repedés geometriáját nem veszi figyelembe. A globális modell a lokális tartomány peremfeltételeit hivatott előállítani minden szimulációs időpillanatban. A lokális modell a repedés közvetlen környezetét tartalmazza, beleértve a repedés geometriáját is. Ezáltal a repedés környezetében alkalmas végeselem–háló állítható elő. A lokális modell peremfeltételei tehát mesterséges peremfeltételek, és a számítás sokkal pontosabb megoldást szolgáltat. A lokális modell esetében a súlyozott maradék elvnek megfelelő felületi integrálok nem hagyhatók el, azokat az egyenletrendszer asszemblálása során figyelembe kell venni, hiszen a lokális tartomány nem bír szimmetriával. Végezetül elvégeztem a teljes szkennelési folyamat szimulációját és azokat a Hall szenzorral mért eredményekkel hasonlítottam össze. A számított jel alakja kicsit szűkebb, mint a mérési eredmény, azonban a jelek csúcsértékeke és jellege nagyon közel esnek egymáshoz. Ebből arra következtettem, hogy a mérés sajnos zajjal terhelt: a mozgató szerkezet szervóhajtása, a szenzort rögzítő eszköz és híd nagy valószínűséggel hatással van a mérési eredményekre. Ezen hatások azonban csak egy meglehetősen drága, precíziós eszközzel eliminálhatók vagy csökkenthetők.

2. Új tudományos eredmények

1. Tézis. A ferromágneses anyagok viselkedését leíró hiszterézis karakterisztika szimulációjára kidolgoztam egy új, a neurális hálózatok függvény-approximációs képességén alapuló skalár hiszterézis modellt. A ξ változó bevezetésével az elsőrendű visszatérő görbéket egy felületté konvertáltam és ezen felületet neurális hálózattal approximáltam. A karakterisztika viselkedését ha–akkor típusú szabályokkal a modell tudásbázisában foglaltam össze. A modell működését saját mérési eredményekkel igazoltam. Figyelembe vettem a mágneses térerősség és a mágneses indukció vektoriális jellegét az izotróp és az anizotróp vektor hiszterézis modellek segítségével és egy új identifikációs eljárást dolgoztam ki a modellek felépítésére. Az anizotróp modellt háromdimenzióban általánosítottam és elvégeztem a vektor modellek analízisét.

1.a Kidolgoztam a skalár hiszterézis karakterisztika neurális hálózat alapú matematikai modelljét. A karakterisztika többértékűségét az újonnan bevezetett ξ változó segítségével kezeltem, amely az elsőrendű visszatérő görbéket egy felületté konvertálja. Ez az előfeldolgozó algoritmus tetszőleges alakú karakterisztikán elvégezhető. Egyszerű szabályok formájában foglaltam össze a hiszterézis karakterisztika viselkedését, mely szabályok ha–akkor alakban a modell tudásbázisában foglalnak helyet. Így az anyag előélete is figyelembe vehető. A modell identifikációja a neurális hálózat tanítását jelenti. Kidolgoztam a skalár hiszterézis karakterisztika felvételére alkalmas mérési elrendezést, és a modell működését mérési eredményekkel történő összevetéssel igazoltam. A méréseket egy torroid alakú, C19-es szerkezeti acélból készült próbatesten végeztem el.

1.b Kidolgoztam a két- és háromdimenziós izotróp vektor hiszterézis modellt, amely a neurális skalár hiszterézis modellen alapszik. Egy új, saját ötleteken alapuló identifikációs eljárást ajánlok a vektor hiszterézis modell felépítésére, amely a mért Everett felületen alapszik. A szimulációs eredményeket mérésekkel hasonlítottam össze, majd megvizsgáltam a modell működését lineáris és forgó mágneses terekben.

1.c Kidolgoztam a két- és háromdimenziós anizotróp vektor hiszterézis modellt, amely a neurális skalár hiszterézis modellen alapszik. A mért Everett felületek irányfüggését a Fourier sorfejtéssel kezeltem és az anizotróp modell felépítését az izotróp modell identifikációjára vezettem vissza. A kétdimenziós modellt általánosítottam a háromdimenziós anizotróp viselkedés leírására is. A szimulációs eredményeket mérésekkel hasonlítottam össze, majd megvizsgáltam a modell működését lineáris és forgó mágneses terekben. Végezetül összehasonlítottam az izotróp és az anizotróp modellek viselkedését.

2. Tézis. A kidolgozott neurális vektor hiszterézis modellt a végeselemes numerikus szimulációs módszerrel kapcsoltam össze. A numerikus analízisre a Ψ és a $\boldsymbol{T}, \Psi - \Psi$ potenciálformulákat alkalmaztam, mert így a direkt hiszterézis modell beépítését tudtam realizálni. A potenciálokat a csomóponti- és a vektoriális bázisfüggvényekel approximáltam. A neurális vektor hiszterézis karakterisztikát a polarizációs módszer B–alakjával kezeltem és az így kapott linearizált egyenletrendszert a fixpontos iterációs technikával oldottam meg. A konvergencia gyorsítását egy alulrelaxációs eljárással valósítottam meg, amely mind stacionárius mágneses tér, mind örvényáramú feladatok megoldása során kellő pontosságú megoldáshoz vezetett és egy jól alkalmazható, megbízható és pontos numerikus módszert bizonyít.

3. Tézis. A kidolgozott háromdimenziós nemlineáris szimulációs technika igazolását saját mérésekkel történő összevetéssel végeztem el. Kidolgoztam egy mérési elrendezést, amely egy próbatest szenzoroldali repedéseinek detektálására alkalmas és elvégeztem annak numerikus szimulációját. Kidolgoztam az elrendezés globális–lokális (tartomány–dekompozíció) modelljét az időtartományban. A lokális modellnek a globális modellhez történő kapcsolását a peremfeltételek illesztésén keresztül végeztem el. A szimulációs és a Hall szenzorral végzett mérési eredmények összevetésével, és az eredmények jó korrelációjával igazoltam a nemlineáris szimuláció alkalmazhatóságát és helyességét.

3.a Kidolgoztam egy mérési elrendezést, amely a FluxSet és a Hall típusú szenzorok segítségével képes egy próbatest felületi repedéseinek detektálására. Vizsgáltam a repedések alakjának és méreteinek a szenzorok kimeneti jelére gyakorolt hatását. Egyszerű elrendezések segítségével elvégeztem a szenzorok kalibrációját és a mérésre LabVIEW programot dolgoztam ki.

3.b A roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer numerikus szimulációjára egy háromdimenziós nemlineáris végeselemes eljárást dolgoztam ki a $\boldsymbol{T}, \Psi - \Psi$ potenciálformulát felhasználva. A feladatot az időtartományban oldottam meg. Kidolgoztam az elrendezés globális–lokális (tartomány–dekompozíció) modelljét. A globális modell a teljes elrendezést tartalmazza, de nem veszi figyelembe a felületi hibákat. Ezen modell a lokális modell peremfeltételeinek előállítását hivatott szolgálni. A lokális modell a felületi hiba közvetlen környezetét írja le, és alkalmas a repedés által okozott változások pontosabb szimulációjára. A lokális modell alkalmazásakor figyelembe vettem a gyenge alakból származó, nem elhanyagolható felületi integrálokat. Az anyag hiszterézis karakterisztikáját az identifikált háromdimenziós vektor hiszterézis modell írja le, melyet a polarizációs módszer B–alakjával kezeltem és az egyenletrendszert a fixpontos iterációs sémával oldottam meg. A szimulációs és a Hall szenzorral végzett mérési eredmények összevetésével igazoltam a módszer alkalmazhatóságát és helyességét.

3. Összefoglalás, további kutatási lehetőségek

Ezen munkában egy új neurális hiszterézis modellt mutattam be. A skalár modell identifikációja egy neurális hálózat tanítását jelenti, amely hálózat az előfeldolgozáson átesett elsőrendű visszaterő görbéket nagyon kis hibával képes közelíteni. A bemutatott két- és háromdimenziós vektor hiszterézis modellek izotróp és anizotróp anyagok viselkedését írják le. A skalár hiszterézis karakterisztika felvétele egy viszonylag egyszerű művelet, ugyanakkor a vektor hiszterézis karakterisztika mérése nehéz feladat [16], és ezen munka egy jövőbeni kutatás alapjait is képezi. A háromdimenziós vektor hiszterézis mérése egy nyitott kérdés, az irodalomból csak kétdimenziós mérések és eredmények ismeretesek. A háromdimenziós vektor modell kidolgozása egy lehetséges elméleti modell megalkotását jelenti, és úgy gondolom, hogy van lehetőség a modell általánosítására, bonyolultabb anizotróp viselkedések leírására.

A végeselem–módszer és a kidolgozott vektor hiszterézis modell összekapcsolása a fixpontos iterációs sémán keresztül alkalmas számítási eljárás tetszőleges elrendezés szimulációjára, amely elektromágneses térszámítást igényel.

A MATLAB programcsomag hatékonyan alkalmazható mérnöki problémák megoldására, azonban sok esetben nagyon lassú eljárásokat eredményezhet. Egy C nyelven megírt program hatékonyabb lehet ezen a téren, különösen a párhuzamos számítástechnikát biztosító számítógépek kisebb futási időt biztosíthatnak. A magasabb rendű bázisfüggvények jobb approximációt adnak, azonban ezek alkalmazása előtt célszerű lehet TEAM feladatok megoldásával ellenőrizni és megismerni ezen módszereket.

Hivatkozások

[1] P. Kis, M. Kuczmann, and A. Iványi. Hysteresis measurement in LabVIEW. *Physica B*, 343:357–363, 2004.

[2] M. Kuczmann and A. Iványi. Neural network based scalar hysteresis model. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, pages 225–230, 2001/2002.

[3] M. Kuczmann and A. Iványi. Isotropic and anisotropic vector hysteresis model based on neural networks. *Journal of Electrical Engineering 9/s*, pages 73–76, 2002.

[4] M. Kuczmann and A. Iványi. Measuring and identification of scalar hysteresis characteristics applying neural network based hysteresis (in Hungarian). *Híradástechnika*, LVII:4–9, 2002.

[5] M. Kuczmann and A. Iványi. Neural network model of magnetic hysteresis. *COMPEL*, pages 367–376, 2002.

[6] M. Kuczmann and A. Iványi. A new neural-network-based scalar hysteresis model. *IEEE Trans. on Magn.*, pages 857–860, 2002.

[7] M. Kuczmann and A. Iványi. Calibration and measurement with 3D FluxSet sensor (in Hungarian). *Híradástechnika*, pages 34–37, 2003.

[8] M. Kuczmann and A. Iványi. Neural network model for scalar and vector hysteresis. *Journal of Electrical Engineering 1-2*, pages 12–21, 2003.

[9] M. Kuczmann and A. Iványi. Vector hysteresis model based on neural network. *COMPEL*, pages 730–743, 2003.

[10] M. Kuczmann and A. Iványi. Nonlinear 2D edge element based FEM in $\boldsymbol{T}, \psi - \psi$ formulation. *Proceedings of the 9th OPTIM Conference, Brasov, Romania*, pages 41–48, 2004.

[11] M. Kuczmann and A. Iványi. Calibration of FluxSet sensor. *Proceedings of the 12th International Symposium on Theoretical and Electrical Engineering, Warsaw, Poland*, pages 389–392, July 16-19, 2003.

[12] M. Kuczmann and A. Iványi. Neural network based scalar hysteresis model. *Proceedings of the 10th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, Tokyo, Japan*, pages 493–494, May 13-16, 2001.

[13] M. Kuczmann and A. Iványi. Simulation of a nondestructive testing measurement system. *Proceedings of the 11th IGTE Symposium, Seggau Castle, Austria*, pages 376–381, September 13-15, 2004.

[14] M. Kuczmann and A. Iványi. Vector hysteresis model based on neural network. *Proceedings of the 10th International IGTE Symposium, Graz, Austria*, pages 453–458, September 16-18, 2002.

[15] M. Kuczmann and A. Iványi. Neural network based simulation of scalar hysteresis. *Proceedings of the 10th International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering, Cracow, Poland*, pages 413–416, September 20-22, 2001.

[16] M. Kuczmann, P. Kis, A. Iványi, and J. Füzi. Vector hysteresis measurement. *Physica B*, 343:390–394, 2004.