



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar

SCHIFFER ÁDÁM

VIBRÁCIÓANALÍZIS ÉS NEMLINEÁRIS HISZTERETIKUS
RENDSZEREK VIZSGÁLATA ÉS MODELLEZÉSE
(VIBRATION AND NONLINEAR HYSTERETIC SYSTEM
ANALYSIS WITH MODELLING)

Tézisfüzet

Témavezető

PROF. EMERITUS IVÁNYI AMÁLIA

Budapest, 2012

1. Bevezetés

A nemlineáris *hiszterézis* jelenség vizsgálatával számos kutatómunka illetve tudományos vizsgálat foglalkozott. Számos hiszterézis modell áll rendelkezésre a gyakorlatban (mint a Stoner-Wohlfarth, Preisach illetve a Chua modell) mind a mérnöki, fizikusi, gazdasági stb. problémák modellezéséhez, bár a paletta nem teljes. Több mérnöki eljárás, mint a végeelem módszer (Finite Element Method, FEM) esetén a nemlineáris hiszterézis jelenség applikálása egy gyors és identifikálható modell megvalósítását igényli a nagy számítási igény miatt.

A jelenlegi kutatási gyakorlat során a végeelem módszer általánossá kezd válni, a szimpóziumokon a figyelem az olyan kulcsszavakon van, mint az „applied nonlinearity” (alkalmazott nemlinearitás) illetve a „multiphysics” (kapcsolt analízis).

A másik kevésbé tárgyalt, de még nyitott kérdés a nemlinearitás vizsgálata frekvenciatartományban.

Kutatómunkám célja a nemlineáris hiszterézis modellezés, ennek mérése, vizsgálata idő- és frekvencia tartományban, valamint applikációja csatolt végeelem modellek (elektromágneses, strukturális analízis és deformált végeelem háló) esetén.

2. A kutatómunka céljai, az alkalmazott módszerek

A kutatómunkán belül megmutatom egy általam fejlesztett, újszerű hiszterézis modell viselkedését és hatékonyságát számos példán keresztül. Bemutatom a mágneses, akusztikus és rezonancia jelenségek mérését tekercselt transzformátorlemezek esetén, illetve ezen jelenségek modellezését végeelem módszer segítségével. Végezetül a nemlineáris rendszer viselkedését vizsgálom többféle gerjesztés esetén frekvenciatartományban egy általam kifejlesztett dekompozíciós eljárás segítségével, és amellyel megmutatom a major hurkok egy igen egyszerű és hatékony előállítását a kapott segédfüggvény segítségével. Az előzőeket különböző példákon keresztül mutatom be.

Az implementációk elsősorban a MATLAB[®] fejlesztőkörnyezet felhasználásával készültek el. A megvalósult méréseket a National Instrument cég LabVIEW 2010 szoftverével végeztem. A komplexebb feladatokat, mint a végeelem modellezést COMSOL MulytPhysics[®] és MATLAB[®] összekapcsolásával valósítottam meg.

2.1. Mérési eredményeken alapuló hatékony hiszterézis modell

A fejlesztés során kidolgoztam a már meglévő, a gyakorlatban sokszor alkalmazott diszkrét Preisach hiszterézis modell átdolgozását és fejlesztését, amely folytonos kimenetet ad, és számítási hatékonyságában jelentősen felülmúlja a klasszikus modellt. A kutatómunka során kifejlesztettem a Preisach modellhez egy jóval hatékonyabb globális memória reprezentációt illetve egy wavelet alapú interpolációs módszert, amely lehetővé teszi a modell folytonos kimenetének előállítását. A modell hatékonyságára és pontosságára példákat mutatok be.

A térszámítási feladatok hatékony megoldásához azonban a Preisach modell számítási sebessége nem volt elég, így kidolgoztam egy mérési pontokon alapuló skalár- és két dimenziós hiszterézis vektoroperátort, amely egy újfajta szemlélet alapján határozza meg a nemlineáris rendszer kimenetét. A modell egy speciális, úgynevezett Ψ^*

„módosító vektormezőn” alapszik, mely a mért belső permabilitás vektorok segítségével határozható meg. A modell hatékonysága az egyszerűségében, kiemelkedő számítási sebességében illetve egyszerű identifikációjában rejlik, mindemellett rendelkezik a nemlineáris hiszterézis karakterisztikák akkomodációs tulajdonságával.

A szakirodalomból kiindulva, a skalár modelltől kifejlesztettem ennek kétdimenziós vektoriális kiterjesztését, amelyben két fontos tulajdonságot is megvizsgállok: az akkomodációs tulajdonság hatását, illetve a kezdeti értékek megválasztását a térvektoroknál.

Tézis:

Kidolgoztam a klasszikus Preisach modell gyorsabb, hatékonyabb és folytonos változatát, amelyet számos példán keresztül demonstráltam, illetve identifikáltam mérési adatok alapján. Kifejlesztettem egy mérési pontokon alapuló teljesen újszerű skalár és két dimenziós vektoriális hiszterézis modellt amely egy speciális Ψ^ „módosító vektormezőn” alapszik. A kutatómunka során fejlesztett modell egyszerűségét és számítási hatékonyságát számos példán keresztül mutattam be.*

2.2. Gerjesztett transzformátorlemezek vibrációjának mérése és modellezése

Második tézisemben bemutatom a kutatómunkám eredményét, amely tekercselt transzformátor lemezek elektromágneses, akusztikus és rezonancia jelenségeinek mérésével és végeelem modellezésével foglalkozik.

A számítógéppel segített mérés során féldoldalasan befogott, egyik harmadán tekercselt transzformátor lemezeket különböző amplitúdójú és frekvenciájú harmonikus áramjellel gerjesztettem a primer tekercsen, hogy meg tudjam vizsgálni a különböző frekvenciájú és amplitúdójú gerjesztőjelek hatását a mért jellemzőkre. A szekunder tekercsen „üresjárás” feszültséget mérve a mágneses karakterisztika H mágneses térerősség és B mágneses fluxussűrűség változói a hiszterézis karakterisztikához meghatározhatóak és kiszámíthatóak idő- és frekvenciatartományban. A referencia jelet a primer tekercshez NI PCI6024E DAQ kártyával állítottam elő, amelyet egy Kikusui PBX 20-20 programozható erősítővel alakítottam áramjellé.

A vibráció mechanikai méréséhez egy CTC AC102 gyorsulásmérőt használtam, melynek jelét jelerősítőn illetve DAQ kártyán keresztül olvastam le. Az akusztikus mérésekhez dinamikus mikrofont illetve NI PCI 4472 kártyát használtam fel. A mérési adatok számos példát mutatnak a gerjesztési frekvencia és amplitúdó hatásaira mind a $H - B$ görbe, mind a vibrációs és akusztikus jellemzők esetén idő- és frekvencia tartományban.

A tézisben bemutatom az előzőekben mért transzformátor lemezek végeelem analízisét alkalmazott nemlinearitás illetve kapcsolt elektromágneses és mechanikai modellek esetén. A fejlesztett modell céljai:

- kiszámítani a H mágneses térerősség illetve B fluxussűrűség, és a J_i indukált áramsűrűség értékeit az alkalmazott hiszterézis modell segítségével a lemezek belsejében;

- kiszámítani a lemezek között fellépő F Lorentz erőt minden pontban, illetve az ennek hatására keletkezett feszültséget;
- kiszámítani a feszültség hatására a generált végelem háló deformálódását.

A szimulációs eredmények feldolgozásából következtek a lemezek vibrációjára, adott harmonikus gerjesztés esetén.

Tézis:

Megvizsgáltam két, harmonikus áramjellel gerjesztett nemlineáris mágneses transzformátorlemez viselkedését idő- és frekvenciatartományban. Meghatároztam és mérési eredményekkel igazoltam a mágneses erők változását a Lorentz erőhatást figyelembe véve, a magnetostrikció és az inhomogén permeabilitás elhanyagolásával. A gerjesztett lemezek elektromágneses, mechanikai és deformációs tulajdonságainak meghatározására végelem modelleket kapcsoltam össze (multiphysics), és applikáltam az általam fejlesztett nemlineáris hiszterézis modellt .

2.3. Hiszterézis görbék új dekompozíciós eljárása illetve spektrális vizsgálata

A kutatómunka harmadik tézisében bemutatom a nemlineáris hiszteretikus rendszer viselkedésének vizsgálatát frekvenciatartományban egy általam kidolgozott, új dekompozíciós eljárás segítségével.

Először bemutatom a kifejlesztett frekvenciatartománybeli dekompozíciós eljárást, amely a nemlineáris jelet *páros* és *páratlan* összetevőkre bontja. Az eljárást felhasználva bemutatom ennek előnyeit és ezen keresztül a nemlineáris rendszer viselkedését frekvenciatartományban. A nemlineáris rendszer viselkedését háromféle gerjesztőjel esetén mutatom be:

- harmonikus gerjesztés egyetlen frekvencián;
- a gerjesztőjel felharmonikusokat is tartalmaz;
- a gerjesztőjel különböző erősségű Gauss-féle zajjal terhelt.

A vizsgálat után célom a dekompozíciós eljárás során definiált páros segédgörbe segítségével két új eljárást mutatni a külső (major) hiszterézishurok előállítására. Ahhoz, hogy a kifejlesztett eljárás segítségével a külső hiszterézis görbe előállítható legyen, először megvizsgálom a kapott páros-páratlan összetevők adott hibahatáron belüli előállításához mekkora releváns sáv szélességre van szükség az amplitúdóspektrumukból. A fentiek után a külső (major) hiszterézishurok előállítására két módszert mutatok be:

- egy egyszerű differenciáláson alapuló eljárást;
- egy lineáris approximáción alapuló spektrális közelítést.

Tézis:

Bemutattam az előnyeit a kifejlesztett új dekompozíciós eljárásnak, amely a nemlineáris jelet páros és páratlan összetevőkre bontja. Megvizsgáltam a nemlineáris rendszer viselkedését a dekompozíciós eljárás segítségével különböző gerjesztések esetén. Kidolgoztam két új eljárást, amely egy előzetesen meghatározott páros segédgörbe alapján képes előállítani a nemlineáris külső (major) hiszterézisgörbét.

3. Új tudományos eredmények

1. Tézis

Kidolgoztam a klasszikus Preisach modell gyorsabb, hatékonyabb és folytonos változatát, amelyet számos példán keresztül demonstráltam, illetve identifikáltam mérési adatok alapján. Kifejlesztettem egy mérési pontokon alapuló teljesen újszerű skalár és két dimenziós vektoriális hiszterézis modellt amely egy speciális Ψ^* „módosító vektormezőn” alapszik. A kutatómunka során fejlesztett modell egyszerűségét és számítási hatékonyságát számos példán keresztül mutattam be [3],[8],[5],[13],[9],[6],[1],[2].

I have shown the improved faster and continuous Preisach model that is demonstrated and identified on discrete measurement data. I have also developed a measurement based novel scalar and two dimensional vector models that are based on a special field of the modification vector Ψ^ . Its simplicity and very efficient calculating property has been demonstrated through many examples [3],[8],[5],[13],[9],[6],[1],[2].*

1.1 Kifejlesztettem a klasszikus Preisach modell folytonos változatát, amely a kifejlesztett memória reprezentáció miatt a folytonos kimenet mellett sokkal gyorsabb számítási sebességet garantál. Kidolgoztam és alkalmaztam egy wavelet interpolációs eljárást, amely egy folytonos Preisach eloszlásfüggvényt állít elő a mért diszkrét adatpontok alapján. A módosított Preisach modellt számos példán keresztül mutatom be [8].

1.2 A Preisach modell hátrányait látva kidolgoztam egy más szemlélet alapján működő, mérési pontokon alapuló skalár és vektor hiszterézisoperátort. A kifejlesztett modellben a $\hat{\mu}_{diff}$ differenciális permeabilitás és a speciális, úgynevezett Ψ^* „módosító vektormező” kiszámítható a mért pozitív és negatív visszatérő görbék segítségével. A modell egyszerűsége és rendkívüli gyorsasága mellett rendelkezik az akkomodációs tulajdonsággal is, amelyek lehetővé teszik térszámítási feladatokba való implementálását. A modell pontosságát és egyszerűségét számos példán keresztül mutatom be [5],[13].

1.3 A skalár modellből kiindulva kifejlesztettem a modell kétdimenziós vektoriális kiterjesztését. Az izotróp és anizotróp vektor modell a skalár modell kiterjesztése a két dimenziós tér adott irányába. Két fontos tulajdonságot vizsgálok meg a vektor modell kapcsán: az akkomodációs tulajdonság hatását illetve a kezdeti értékek megválasztását a kimeneti térvektoroknál [9],[6].

2. Tézis

Megvizsgáltam két, harmonikus áramjellel gerjesztett nemlineáris mágneses transzformátorlemez viselkedését idő- és frekvenciatartományban. Meghatároztam és mérési eredményekkel igazoltam a mágneses erők változását a Lorentz erőhatást figyelembe véve, a magnetostríció elhanyagolásával, és a homogenitás feltételezése mellett. A gerjesztett lemezek elektromágneses, mechanikai és deformációs tulajdonságainak meghatározására végesem modelleket kapcsoltam össze (multiphysics), és applikáltam az általam fejlesztett nemlineáris hiszterézis modellt [20],[17],[7],[16],[14],[15],[18],[21],[19].

I have analysed the time and the frequency domain behaviour of two non-linear magnetic sheets under harmonic excitation. I have determined and proved with measurement the variation of the magnetic force through the Lorentz relations and neglected the permeability inhomogeneity in the material and the magnetostriction. I have coupled multiphysical models together with non-linear hysteresis and deformed mesh models to calculate electromagnetic, structural mechanics and displacement results from the Finite Element Model [20],[17],[7],[16],[14],[15],[18],[21],[19].

2.1 Megvizsgáltam alkalmas harmonikus áramjellel gerjesztett, vékony, tekercselt transzformátorlemezek elektromágneses, vibrációs és akusztikus viselkedését. Az előző tulajdonságokat megmértem és megvizsgáltam különböző gerjesztési frekvenciákon és különböző amplitúdókon. Kielemeztem a mért jelek spektrális tulajdonságait. Megmutattam, hogy az amplitúdó növelése a primer tekercsben lévő áramjelnél a szekunder tekercsen mért mágneses fluxussűrűség B spektrumában magasabb rendű harmonikusokat eredményez, hasonlóan, mint a mért vibrációs jeleknél. Ez a hiszterézis görbénél belső hurkok megjelenéséhez vezet. Az akusztikus mérések alapján számított spektrogrammok igazolják azt a feltevésemet, miszerint a páros és a páratlan harmonikusok különböznek, a páros harmonikusok amplitúdója periodikusan változik, még hozzá a gerjesztési frekvencia kétszeresével.

2.2 A jelenlegi végeselemes kutatási irányokban a kapcsolt analízis (multiphysics) egy fontos irányvonalat képvisel. Kidolgoztam egy eljárást, amely összekapcsolja az elektromágneses, mechanikai végelem számításokat, így pontosabban tudom modellezni a gerjesztett tekercselt lemezek vibrációját. A mágneses erők változását modellezve a Lorentz erőhatást vettem figyelembe, mivel ehhez képest a magnetostríció és az inhomogenitásból származó erőkomponensek elhanyagolhatóak. A kifejlesztett hiszterézismodell beillesztésével az elektromágneses tér modellezését elvégezve kiszámítottam a lemezek között fellépő Lorentz erőt, illetve az ennek hatására keletkezett feszültséget minden végelem pontban. Ebből számítottam a végelem háló deformációját. A kapott eredmények alapján számítottam a lemezek vibrációját.

3. Tézis

Bemutattam az előnyeit a kifejlesztett új dekompozíciós eljárásnak, amely a nemlineáris jelet *páros* és *páratlan* összetevőkre bontja. Megvizsgáltam a nemlineáris rendszer viselkedését a dekompozíciós eljárás segítségével különböző gerjesztések esetén. Kidolgoztam két új eljárást, amely egy előzetesen meghatározott páros segédgörbe alapján képes előállítani a nemlineáris külső (major) hiszterézisgörbét [10],[13],[4],[11],[12].

I have presented the advantages of the developed novel decomposition method that splits the non-linear signal into odd and even parts. I have also worked out two different preparation methods to produce the major loop from previously prepared auxiliary even function [10],[13],[4],[11],[12].

3.1 Megvizsgáltam a nemlineáris hiszteretikus rendszer viselkedését frekvenciatartományban egy általam kidolgozott, új dekompozíciós eljárás segítségével. A kifejlesztett frekvenciatartománybeli dekompozíciós eljárás a nemlineáris jelet *páros* és *páratlan* összetevőkre bontja. Az eljárást felhasználva bemutatom ennek előnyeit és ezen keresztül a nemlineáris rendszer viselkedését frekvenciatartományban. A nemlineáris rendszer viselkedését különböző gerjesztések esetén (egyetlen frekvencián, felharmonikus tartalommal illetve Gauss-féle zajjal terhelt gerjesztés) mutatom be.

3.2 Megvizsgáltam a major hiszterézishurok felharmonikusainak levágásának hatását, vagy másképpen megfogalmazva kiszámítottam a nemlineáris rendszer szükséges sávszélességét a továbbiakban tárgyalt külső (major) hiszterézis hurkok előállításához. Kidolgoztam két eljárást a major hurkok előállítására egy adott páros segédgörbe segítségével: egy egyszerű differenciáláson alapuló eljárást illetve egy lineáris approximáción alapuló spektrális közelítést.

4. További kutatási tervek

Az elvégzett kutatás során kidolgoztam egy új nemlineáris hiszterézis modellt, illetve igazoltam ennek gyorsaságát, pontosságát, könnyű identifikálhatóságát. Bemutattam az identifikáció menetét többféle viselkedésű hiszterézisgörbe esetén, azonban nem fejlesztettem ki, de a modellben benne rejlik a frekvenciafüggő dinamikus viselkedés, amely során a módosító mező egy új paraméter bevezetésével változtatható lenne a gerjesztési frekvencia szerint.

A másik fontos fejlesztési lehetőség a folytonos módosító mező kidolgozása, amely lehetőséget adna a modell differenciálegyenlet formájában történő definiálására. Ez nagy előrelépés lenne a végeselemes implementáció esetén.

A skalár modell két dimenziós vektoriális kiterjesztése a szakirodalmi viselkedés alapján került kidolgozásra, azonban itt szükségesek lennének a megfelelő mérések, amelyek sajnos főként anyagi problémák miatt nem kerültek elvégzésre.

A kutatás során kidolgoztam egy mérési eljárást az akusztikus, elektromágneses és vibrációs mérésekhez. Mindegyik mérésnél nem kívánt zajok kerültek be a mért adatsorba, amelyek kiküszöbölhetőek lennének egy sokkal pontosabb és akusztikailag izoláltabb mérőrendszer esetén. Ugyancsak jövőbeli terv a mágneses mérés áramjelének szabályozása, amely sokkal jobban feldolgozható méréseket eredményez.

A kapcsolt analízis (multiphysics) egy nagyon jó hívószó a jelenlegi végeselemes kutatások terén. A konferencia előadásaim visszajelzései alapján úgy látom, hogy a több fizikai terület kapcsolt analízisét igénylő számítások, amelybe a nemlinearitást is applikálni kell nagy kihívást jelent számos nemzetközi kutatócsoport részére. A feladatom, hogy alkalmazzam a kapcsolt analízis és nemlinearitás terén nyert tapasztalatokat az ipari és egyéb alkalmazások területén, illetve kapcsolódjam nemzetközi kutatócsoportokhoz.

A nemlineáris rendszer frekvenciatartománybeli vizsgálatához egy új, általam kidolgozott dekompozíciós eljárást használtam. Az ezzel, illetve a hiszterézis modellezéssel kapcsolatos tapasztalataim megerősítik azt az elképzelésemet, miszerint egy segédgörbe segítségével, mint például az anhiszteretikus görbe, előállítható a külső major hurok, illetve az elsőrendű visszatérő görbék. Ebben az esetben a kidolgozott hiszterézis modell illetve a dekompozíciós eljárás összekapcsolható lenne, mivel a segédgörbe definiálná a hiszterézis modellben használt módosító mezőt.

Publikációk

- [1] Schiffer A., Ivanyi A., New dynamical hysteresis model, *ISEF'03 Proceedings of the XII. International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering* (Edited by X.M.L.F. Andrzej Krawczyk Sławomir Wiak), Baiona, Spain, 2005, pp. 1–6.
- [2] Schiffer A., Ivanyi A., New dynamical hysteresis model, *First International PhD Symposium in Engineering*, University of Pecs, Faculty of Engineering, Pecs, Hungary, 2005, p. 50.
- [3] Schiffer A., Ivanyi A., Preisach distribution function approximation with wavelet interpolation technique, *Abstract Book of International Symposium on Hysteresis Modeling and Micromagnetics*, 2005, pp. 108–109.
- [4] Schiffer A., Ivanyi A., Effect of noise in nonlinear field problem, *Abstracts of the Second International PhD Symposium in Engineering*, Pecs, Hungary, 2006, p. 50.
- [5] Schiffer A., Ivanyi A., New dynamical hysteresis model, *Electromagnetic Field in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering*, 2006, pp. 90–95.
- [6] Schiffer A., Ivanyi A., New hysteresis vector model, *Proceedings of the 10th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2006*, 2006, pp. 15–22.
- [7] Schiffer A., Ivanyi A., Non-linear field computation with hysteresis, *Proceedings of the fifth international conference on engineering computational technology*, Civil-Comp Press, 2006, pp. 449–450.
- [8] Schiffer A., Ivanyi A., Preisach distribution function approximation with wavelet interpolation technique, *Physica B*, vol. 372, 2006, pp. 101–105.
- [9] Schiffer A., Ivanyi A., Two-dimensional vector hysteresis model, *Pollack Periodica*, vol. 1, no. 2, 2006, pp. 83–97.
- [10] Schiffer A., Ivanyi A., Noise analysis in non-linear system, *Proceedings of the XXV. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium: Science in Practice, XXV. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium: 'Science in Practice'*, 2007, pp. 139–144.
- [11] Schiffer A., Ivanyi A., Spectral property of a hysteresis model, *Abstracts of the Third International PhD Symposium in Engineering*, Pecs, Hungary, 2007, p. 43.
- [12] Schiffer A., Ivanyi A., Preparation method of the anhysteretic curve, *Abstracts of the Fourth International PhD Symposium in Engineering*, Pecs, Hungary, 2008, p. 51.
- [13] Schiffer A., Ivanyi A., Spectral property of a novel hysteresis model with additive noise, *Physica B*, , no. 403, 2008, pp. 500–504.

- [14] Schiffer A., Ivanyi A., Harmonic vibration analysis of transformer sheets, *Abstracts of the 19th International Conference on Soft Magnetic Materials*, Torino, Italy, 2009, pp. G2–15.
- [15] Schiffer A., Ivanyi A., Measurement and processing of the vibration signal of transformer sheets, *Abstracts of the 15th International PhD Symposium in Engineering*, Pecs, Hungary, 2009, pp. 60–61.
- [16] Schiffer A., Ivanyi A., Modelling the harmonic vibration of two transformer sheets, *Proceeding of the 27th Scientific Electrotechnical Conference "Science in Practice"*, Pecs, Hungary, 2009.
- [17] Schiffer A., Ivanyi A., Harmonic vibration calculation of transformer sheet, *Proceedings of the 14th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering*, 2010, pp. 412–417.
- [18] Schiffer A., Ivanyi A., Numerical modeling of vibration of transformer sheets applying multi-field analyses, *Engineering Research: Abstract of the Sixth International PhD & DLA Symposium*, Pecs, Hungary, 2010, pp. 88–89.
- [19] Schiffer A., Ivanyi A., Vibration of transformer sheets using non-linear characteristics, *Abstract book of the MURPHYS 5th Workshop*, University of Pecs, Faculty of Engineering, Pecs, Hungary, 2010, p. 45.
- [20] Schiffer A., Ivanyi A., Vibration of transformer sheets using non-linear characteristics, *Journal of Physics*, , no. 268, 2011, pp. 012–027.
- [21] Schiffer A., Ivanyi A., Finite element modelling of the vibration of the plates with hysteresis, *Digest book of the 4th symposium on applied electromagnetics*, Sopron, Hungary, 2012, pp. 65–66.