

# **Modeling and analyzing of the electromagnetic devices with nonlinear magnetic materials**

## **Abstract**

Magnetic materials are component part of any electronic and electrotechnics device. Scientific research and technology have gained momentum in recent decades, and the pace of development in all areas is very fast. From the most important systems for the production and transmission of electricity (electric generators, electric transformers), to the most common electromagnetic devices, magnetic materials have been, are and will be an essential part in their operation.

For any electromagnetic devices' manufacturer as well as for any research scientist it is very important to comprehend the aspects about each magnetic materials behaviour at industrial frequency. Nowadays, devices operating at high frequencies in the area of switching and automation are widely developed.

This thesis aims to present the behaviour of nonlinear magnetic materials at industrial frequencies and very high frequencies, parts of electromagnetic devices, representing the author's concerns in the years following his doctoral activities. It is organized in three major chapters preceded by an introduction and followed by a review of the author's developmental perspectives on the scientific and didactic lines.

**Chapter 2** is dedicated to nonlinear magnetic materials used mainly in electric transformers, as well as in electric motors. It starts from an extensive characterization of NO type electrotechnical sheets, providing complete data obtained with the help of a Single Sheet Tester. This device from the endowment of the Technical Magnetism Laboratory within the POLITEHNICA University of Bucharest has a limitation of the experimental determinations to 200 Hz. Therefore, using a parallel between the Steinmetz and Bertotti methods, I've made an estimate of the losses from this material up to frequencies of 1 kHz.

The second part of this chapter is dedicated to Sigmoidal models. A preliminary study on a comparison between the areas of the experimental cycles and those modelled using 6 sigmoidal functions, led to the reduction of variants to 2 functions with acceptable results (Elliot transfer function and algebraic function). With the help of these 2 functions, we subsequently made an estimate of the losses at higher frequencies of up to 1 kHz through a procedure for fitting the parameters of the models. The obtained results open the possibility of extending the applicability of the models to other types of soft magnetic materials.

**Chapter 3** addresses issues regarding the characterization and modelling of planar transformers. These transformers are used at frequencies of hundreds of kHz in the fields of switching and telecommunications. Therefore, the first aspect studied was the determination of conductive losses in the windings of such a device fed with various types of signals (sinusoidal, rectangular, triangular, trapezoidal, etc.). The results showed a direct correlation between the crest factor and the conductive losses in the windings of these transformers: at a lower crest factor and the losses are smaller.

The special construction of these transformers considers an interleaving of the windings to reduce losses and for optimal operation. From this point of view, the second part of this study focused on the analysis of the resistance, the leakage inductance and the stray capacity of the planar transformer considering the non-intercalation of the windings, the intercalation in pairs and the complete intercalation. The analytical study was extended with aspects of numerical analysis with the help of two specialized programs determining the losses in the core of the device. Complete intercalation leads to reduced resistance, dispersion inductance, and core losses. Only the stray capacity increases, but it is a minor difference, which determines the widespread acceptance of the solution with complete intercalation.

The final part of this chapter is dedicated to the analysis of the core of the planar transformer. First, I've performed a complete analysis from the morphological, chemical and magnetic point of view of the ferrite which is the standard material used in the construction of these transformers. Subsequently, I've performed an analysis of a fictitious composite material made by inserting ferromagnetic wires in a non-magnetic matrix. The 2D and 3D numerical analysis also considered a new formula for calculating the homogenization of composite cores, which represents an original achievement of the author of this thesis.

**The last chapter** of the thesis presents some theoretical aspects regarding the analysis and definition of the inrush current of single-phase transformers. The core of this chapter is represented by the extensive description of an experimental device made in order to measure and visualize this connection current. This device represents the result of a research project whose director was in 2018 the author of this thesis. Made with quite low costs, this device was taken over by the beneficiary of the CEC innovation and implemented in industry. It is able to capture this connection current on transformers up to 2kVA considering important aspects such as the magnetization curve of the transformer core. For reduction or connection in difficult conditions, the device is also equipped with a relay to adjust the connection angle. The experimental determinations are presented in detail at the end of this chapter.

**Chapter 5** describes the development perspectives of the author of this thesis both from a scientific and didactic point of view. The combination of the didactic activity with the students from the bachelor's and master's degrees by attracting them to the doctoral studies will represent for the author a desideratum in the coordination of some doctoral

theses of high scientific quality. In the next period I want to continue the activities with the university students. Because the doctoral studies are an integral part of the training of an engineer, I propose the coordination of the research activities of some students from the completion of the license, the dissertation and later the doctoral thesis. Also, I propose that in the next period, together with the students, I will improve the platforms in the faculty laboratories and update them. I believe that their professional development can be clearly improved by engaging in practical activities.

The development of the scientific career in the post-habilitation period will involve the coordination of doctoral theses in the field of Electrical Engineering that will have as subject the analysis and modelling of magnetic materials from an engineering point of view, the analysis of electromagnetic devices works at industrial frequencies (over 100 kHz), homogenization techniques of composite magnetic materials that offer superior technical solutions. Also, based on the collaboration relations I have with Research Institutes in the country and abroad, I can increase the possibility for PhD students to broaden their spectrum by conducting internships within these institutions.

Conf.dr.ing. Lucian-Gabriel PETRESCU





# **Modelarea și analiza dispozitivelor electromagnetice cu materiale magnetice neliniare**

## **Rezumat**

Materialele magnetice sunt parte componentă a oricărui dispozitiv electronic și electrotehnic. Cercetarea științifică și tehnologia au luat avânt în ultimele decenii, iar ritmul de dezvoltare în toate domeniile este foarte rapid. De la cele mai importante sisteme pentru producerea și transmiterea energiei electrice (generatoare electrice, transformatoare electrice), până la cele mai comune dispozitive electromagnetice, materialele magnetice au fost, sunt și vor fi o parte esențială în funcționarea lor.

Pentru orice producător de dispozitive electromagnetice, dar și pentru orice cercetător, este foarte important să se înțeleagă aspectele legate de comportamentul fiecărui material magnetic la frecvența industrială. În prezent, dispozitivele care funcționează la frecvențe înalte în zona de comutare și automatizare sunt dezvoltate pe scară largă.

Această teză își propune să prezinte comportamentul materialelor magnetice neliniare la frecvențe industriale și frecvențe foarte înalte, părți ale dispozitivelor electromagnetice, reprezentând preocupările autorului în anii care urmează activităților sale de doctorat. Aceasta este organizată în trei capitole majore, precedate de o introducere și urmată de o revizuire a perspectivelor de dezvoltare ale autorului atât din punct de vedere științific, precum și didactic.

**Capitolul 2** este dedicat materialelor magnetice neliniare utilizate în principal în transformatoarele electrice, precum și în motoarele electrice. Prezentarea debutează cu o caracterizare extinsă a tolelor electrotehnice de tip NO, oferind date complete obținute cu ajutorul unui tester Unitolă. Acest dispozitiv din dotarea Laboratorului de Magnetism Tehnic din cadrul Universității POLITEHNICA din București are o limitare a determinărilor experimentale la 200 Hz. Prin urmare, folosind o paralelă între metodele Steinmetz și Bertotti, am făcut o estimare a pierderilor din acest material până la frecvențe de 1 kHz.

A doua parte a acestui capitol este dedicată modelelor sigmoidale. Un studiu preliminar privind o comparație între ariile ciclurilor experimentale și cele modelate folosind 6 funcții sigmoidale, a condus la reducerea variantelor la 2 funcții cu rezultate acceptabile (Funcția de Transfer Elliot și Funcția Algebrică). Cu ajutorul acestor 2 funcții, am făcut ulterior o estimare a pierderilor la frecvențe mai mari de până la 1 kHz printr-o procedură de fitare a parametrilor modelelor. Rezultatele obținute deschid posibilitatea extinderii aplicabilității modelelor la alte tipuri de materiale magnetice moi.

**Capitolul 3** abordează probleme legate de caracterizarea și modelarea transformatoarelor plane. Aceste transformatoare sunt utilizate la frecvențe de sute de kHz în domeniul automatizărilor și al telecomunicațiilor. Prin urmare, primul aspect studiat a fost determinarea pierderilor conductive în înfășurările unui astfel de dispozitiv alimentat cu diferite tipuri de semnale (sinusoidale, dreptunghiulare, triunghiulare, trapezoidale etc.). Rezultatele au arătat o corelație directă între factorul de vârf și pierderile conductive din înfășurările acestor transformatoare: la un factor de vârf mai mic și pierderile sunt mai mici.

Construcția specială a acestor transformatoare are în vedere o intercalare a înfășurărilor pentru a reduce pierderile și pentru o funcționare optimă. Din acest punct de vedere, a doua parte a acestui studiu s-a concentrat pe analiza rezistenței, a inductanței de dispersie și a capacității parazite a transformatorului plan, având în vedere neintercalarea înfășurărilor, intercalarea în perechi și intercalarea completă. Studiul analitic a fost extins cu aspecte ale analizei numerice cu ajutorul a două programe specializate care determină pierderile din miezul dispozitivului. Intercalarea completă conduce la reducerea rezistenței, a inductanței de dispersie și a pierderilor magnetice din miez. Numai capacitatea parazită crește, dar este o diferență minoră, care determină acceptarea pe scară largă a soluției cu intercalare completă.

Ultima parte a acestui capitol este dedicată analizei nucleului transformatorului plan. În primul rând, am efectuat o analiză completă din punct de vedere morfologic, chimic și magnetic al feritei, care este materialul standard utilizat în construcția acestor transformatoare. Ulterior, am efectuat o analiză a unui material compozit fictiv realizat prin introducerea firelor feromagnetice într-o matrice nemagnetică. Analiza numerică 2D și 3D a considerat, de asemenea, o nouă formulă pentru calcularea omogenizării miezurilor compozite, care reprezintă o realizare originală a autorului acestei teze.

**Ultimul capitol** al tezei prezintă câteva aspecte teoretice referitoare la analiza și definirea curentului de conectare a transformatoarelor monofazate. Nucleul acestui capitol este reprezentat de descrierea extinsă a unui dispozitiv experimental realizat pentru a măsura și vizualiza acest curent de conectare (*inrush current, engl.*). Acest dispozitiv reprezintă rezultatul unui proiect de cercetare al cărui director a fost în 2018 autorul acestei teze. Fabricat cu costuri destul de mici, acest dispozitiv a fost preluat de către beneficiarul inovației CEC și implementat în industrie. Este capabil să capteze acest curent de conectare pe transformatoare de până la 2kVA având în vedere aspecte importante, cum ar fi curba de magnetizare a miezului transformatorului. Pentru reducere sau conectare în condiții dificile, dispozitivul este echipat și cu un releu pentru reglarea unghiului de conectare. Determinările experimentale sunt prezentate în detaliu la sfârșitul acestui capitol.

**Capitolul 5** descrie perspectivele de dezvoltare ale autorului acestei teze atât din punct de vedere științific, cât și din punct de vedere didactic. Combinarea activității didactice cu studenții de la licență și masterat prin atragerea lor la studiile doctorale va

reprezenta pentru autor un deziderat în coordonarea unor teze de doctorat de înaltă calitate științifică. În perioada următoare vreau să continui activitățile cu studenții universitari. Deoarece studiile doctorale fac parte integrantă din pregătirea unui inginer, îmi propun coordonarea activităților de cercetare ale unor studenți de la finalizarea licenței, disertația și ulterior teza de doctorat. De asemenea, îmi propun ca în perioada următoare, împreună cu studenții, să îmbunătățesc platformele din laboratoarele facultății și să le actualizez. Cred că dezvoltarea lor profesională poate fi clar îmbunătățită prin angajarea în activități practice.

Dezvoltarea carierei științifice în perioada de post-abilitare va implica coordonarea tezelor de doctorat în domeniul Ingineriei electrice care vor avea ca subiect analiza și modelarea materialelor magnetice din punct de vedere ingineresc, analiza dispozitivelor electromagnetice funcționează la frecvențe industriale (peste 100 kHz), tehnici de omogenizare a materialelor magnetice compozite care oferă soluții tehnice superioare. De asemenea, pe baza relațiilor de colaborare pe care le am cu institutele de cercetare din țară și din străinătate, pot oferi posibilitatea doctoranzilor de a-și lărgi spectrul prin efectuarea de stagii în cadrul acestor instituții.

Conf.dr.ing. Lucian-Gabriel PETRESCU



