

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ

*Обоснована необходимость разработки подсистем автоматизированного формирования аналитических математических моделей параметров электротехнических сталей для исследовательского проектирования электротехнических устройств. Сформулированы требования к этим моделям и предложен алгоритм их формирования на основе пологих аппроксимирующих функций с экспоненциальным ядром, удовлетворяющих заданным требованиям по точности аппроксимации и дифференцируемости.*

*Обґрунтовано необхідність розробки підсистем автоматизованого формування аналітичних математичних моделей параметрів електротехнічних сталей для дослідницького проектування електротехнічних пристроїв. Сформульовані вимоги до цих моделей та запропоновано алгоритм їх формування на основі пологих апроксимуючих функцій з експоненціальним ядром, які задовольняють заданим вимогам за точністю апроксимації та диференційованості.*

*The necessity of electrotechnical steels descriptions mathematical models development automate forming analytical subsystems is grounded for the research planning of electrotechnical devices. Requirements are formulated to these models and the algorithm of their forming is offered on the basis of declivous approximating functions with an exponential kernel, satisfying set requirements on exactness of approximation and differentiability.*

Современная электротехническая промышленность производит множество различных видов электротехнических устройств (ЭУ), в которых используются самые разнообразные виды магнитных систем (МС) из электротехнической стали (ЭТС). Одним из важнейших направлений совершенствования ЭУ являются снижение потерь и расхода электротехнических материалов [6].

Необходимость снижения уровня потерь в МС потребовала от мировой электротехнической промышленности создания новых марок ЭТС с существенно улучшенными магнитными свойствами и со сниженными удельными потерями [3]. Сейчас в мире производится несколько десятков марок ЭТС, которые применяются в производстве ЭУ.

Существенное снижение потерь энергии в МС и расхода ЭТС в ЭУ возможно только при эффективном использовании электромагнитных и энергетических свойств используемой ЭТС.

Однако производители ЭТС приводят в каталожных данных только минимальную информацию об их характеристиках. Это, как правило, представленные в табличной форме для промышленной частоты зависимости: индукции  $B$  от напряженности магнитного поля  $H$ , т.е.  $B(H)$ ; удельных потерь  $p_{y\delta} = \psi_1(B)$  и намагничивающей мощности  $q_{y\delta} = \psi_2(B)$  от индукции [4]. При исследовательском проектировании, проектном синтезе, анализе и оптимизации ЭУ необходим значительно больший объем дополнительной информации. Эта информация должна быть представлена в виде аналитических зависимостей (непрерывных и дифференцируемых функций).

Проблема совершенствования методов и средств адекватного математического моделирования характеристик ЭТС становится все более актуальной, а вследствие своей трудоемкости обуславливает

необходимость создания в системах автоматизированного проектирования ЭУ подсистем автоматизированного математического моделирования электромагнитных свойств ЭТС (ПАМЭСЭС). Основное назначение такой подсистемы – автоматизированное формирование на основе каталожных данных (или данных производителя) и хранение в базе данных адекватных математических моделей характеристик ЭТС, описывающих их необходимые электромагнитные и другие свойства ЭТС при различной частоте магнитного поля, с учетом физических свойств стали, состава, технологических особенностей производства, процесса обработки, прокатки, направления намагниченности, вида и способа покрытия и т.д.

Задача моделирования характеристик ЭТС в настоящее время решается на основе применения различных аппроксимационных и интерполяционных методов для аппроксимации прежде всего зависимости  $B(H)$ . Для этого предлагаются (и реализуются) два подхода:

интерполяционный [1,2,5], при котором для каждого сегмента напряженности  $H \in [H_i, H_{i+1}]$  кривую  $B(H)$  интерполируют кубическим сплайном;

аналитический, с помощью одной формулы [4], когда аппроксимацию выполняют на всем диапазоне напряженности  $H \in [H_{\min}, H_{\max}]$ .

Однако используемые подходы не обеспечивают возможности получения многократно дифференцируемых математических моделей (ММ) ЭТС.

Эта проблема исключается при использовании аппроксимации с помощью пологих функций с экспоненциальным ядром, что позволяет получать семейство непрерывных дифференцируемых функций  $B(H)$  и  $H(B)$ .

Идея такой аппроксимации состоит в замене временной искомой функции (в данном случае  $H(B)$ ) на новую  $\psi = \psi_1(H)$ , которая, во-первых, нивелировала бы крутизну исходной кривой  $B(H)$ , во-вторых,

нормировала бы диапазон изменения аргумента к единичному отрезку, т.е.  $\psi \in [0,1]$ . В итоге, задача поиска приближения зависимости  $B(H)$ ,  $H \in [H_{\min}, H_{\max}]$ , сводится к поиску приближения зависимости  $B(\psi) = \varphi(\psi)$ ,  $\psi \in [0,1]$ .

Для регулирования формы зависимости и снижения ее крутизны целесообразно воспользоваться логарифмической функцией нормирования

$$\psi_{\text{лог}}(H) = \frac{\ln(1 + H - H_{\min})}{\ln(1 + H_{\max} - H_{\min})}. \quad (1)$$

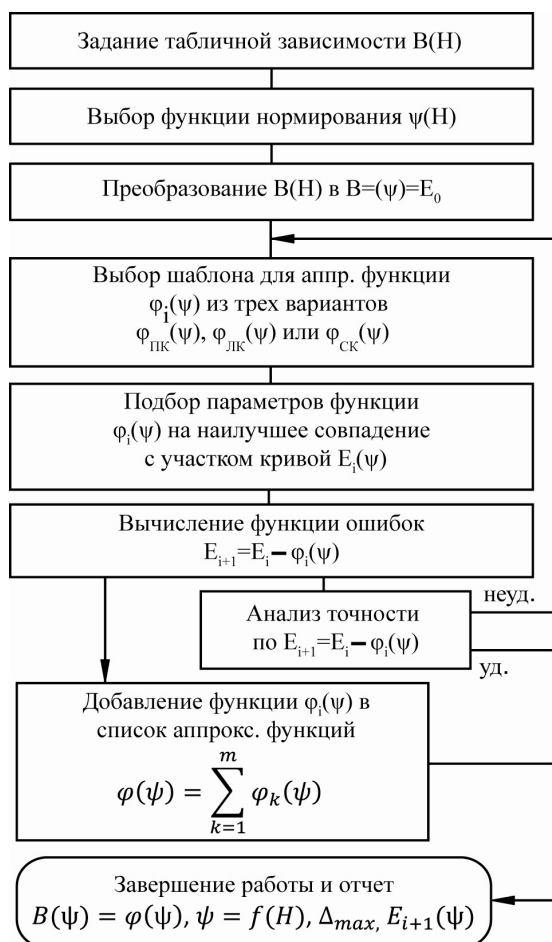
Функция (1) регулирует крутизну практически любой зависимости, делая ее более пригодной для визуального анализа и подбора аппроксимирующих функций.

По подобию преобразованной зависимости  $B(\psi)$  предложена пологая экспоненциальная функция с постоянным масштабом по оси  $Y$

$$\varphi(x) = M_{yx}(x) \cdot M_y \cdot E(x); \quad x \in [0,1], \quad (2)$$

где  $M_{yx}(x)$  – функция искажения амплитуды по оси  $Y$ ;  $E(x) = \exp[-(M_x(x - x_{sm}))^{2n}]$  – ядро аппроксимирующей функции, определяющее пологость, крутизну и форму кривой в целом.

Процесс автоматизированного формирования ММ по таблично заданной функции  $B(H)$  представлен виде блок-схемы на рисунке.



Блок-схема процесса формирования ММ по исходной зависимости  $B(H)$

Предложенный подход создает возможность обеспечить точность аппроксимации таблично заданных характеристик ЭТС до 0,5 %.

#### Список использованной литературы

1. Борзик В.Л. Апроксимация кривой намагничивания стали в смещенных электрических машинах / В.Л. Борзик // Электротехника та електромеханіка. – 2003. – № 2. – С.11-12.
2. Зубрицкий С.М. Аппроксимация основной кривой намагничивания магнитомягких материалов / С.М. Зубрицкий // – Спец. вып.: Материалы ежегодн. науч.-теоретич. конф. молодых ученых. – Вестн. Иркутск. ун-та. – Иркутск, 2002. – С.28-29.
3. Молотилов Б.В. Холоднокатаные электротехнические стали / Б.В.Молотилов – М.: Металлургия, 1989. – 168 с.
4. Пентегов И.В. Универсальная аппроксимация кривых намагничивания электротехнических сталей / И.В. Пентегов, А.В. Красножон // Электротехника та електромеханіка. – 2006. – № 1. – С.66-70.
5. Представление кривых намагничивания в численных расчетах магнитного поля /В.В. Гололобов, В.В. Рымша, И.В. Меркулов, А.С. Порайко // Электромашинобуд. та електрообладн. – 1999. – № 5. – С.81-85.
6. Пуйло Г. В. Современные тенденции совершенствования силовых трансформаторов / Г.В.Пуйло, И.С.Кузьменко, В.В.Тонгалюк // Электротехника та електромеханіка. – 2008. – № 2. – С.48-52.

Получено 05.07.2011



Пуйло Глеб Васильевич,  
д-р техн. наук, проф.  
каф. электрич. машин Одес. нац.  
политехн. ун-та,  
тел. (+38048) 734-8479



Левин Дмитрий Михайлович,  
магистр каф. электрич. машин  
Одес. нац. политехн. ун-та



Насыпаная Елена Петровна,  
аспирантка каф. электрич. машин  
Одес. нац. политехн. ун-та