

В. М. ЕФИМЕНКО, Д. К. ПИСКУНОВ, В. Ю. СЕЛЕЗНЕВ

(Омск)

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ БАЗИСНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОСЕРДЕЧНИКОВ

Контроль магнитных свойств ферромагнитных материалов и изделий из них осуществляется на основе анализа совокупности магнитных параметров и характеристик [1], определяемых по семейству петель гистерезиса (СПГ). При этом переход от СПГ к традиционным магнитным параметрам сопровождается потерей части информации о магнитных свойствах, что обуславливает невозможность восстановления по ним исходного СПГ.

Вопрос выбора некоторой совокупности обобщенных характеристик, однозначно отражающей физические процессы в ферросердечнике, до настоящего времени не решен [2]. По своей постановке данная задача соответствует сжатию экспериментальных данных [3], решается путем выбора оптимального в некотором смысле базиса исходного пространства описаний и может быть сформулирована в двух вариантах: 1) задача минимизации спектральной размерности модели (количества базисных функций) при заданной ее точности; 2) задача минимизации погрешности модели при заданной ее спектральной размерности. При выборе методики формирования спектральной модели целесообразно учитывать следующие требования: пригодность методики для решения указанной задачи в двух вариантах ее постановки и возможность использования различных критериев выбора погрешности модели. Последнее требование вызвано тем, что на практике, наряду со среднеквадратичной погрешностью, находят широкое применение средняя арифметическая, максимальная и другие виды погрешностей.

Вопросу выбора базиса функционального пространства посвящен целый ряд работ. Наибольший интерес представляют следующие.

В [4] показано, что существует разложение Карунена — Лоэва, при котором система базисных функций представляет собой решение интегрального уравнения Фредгольма 2-го рода. Однако применимость этого подхода ограничивается первым из данных выше вариантов постановки задачи при среднеквадратичном критерии погрешности.

Известен процесс ортогонализации Шмидта [5] для системы, состоящей из конечного числа линейно-независимых функций. Этот процесс не может быть непосредственно применен для решения поставленной задачи в силу следующих причин: во-первых, процесс ортогонализации не предусматривает снижения размерности модели, во-вторых, в этом процессе не выработан критерий выбора очередности функций при ортогонализации.

В настоящей работе приводится методика расчета системы базисных функций для идентификации нелинейных характеристик феррообразцов при различных критериях выбора погрешности. В основу методики положен указанный выше процесс ортогонализации, при котором вопрос установления очередности функций в силу их конечного числа решается методом перебора.

Представим каждую из исходных петель гистерезиса в виде вектора гильбертова пространства. Эти векторы образуют подпространство, базис которого необходимо определить. Будем искать базисные векторы последовательно. В качестве первого базисного вектора естественно принять вектор, наиболее «близко» расположенный ко всем векторам исходного подпространства. Эта задача может быть сведена к решению системы линейных уравнений, однако решение такой системы уравнений затруд-

нено из-за высокого ее порядка, а также плохой обусловленности. Учитывая тот факт, что исходные векторы близко расположены вследствие подобия формы петель гистерезиса, авторам предстояло выбрать из исходной совокупности первый базисный вектор, наиболее «близко» расположенный ко всем остальным векторам. Основное преимущество данного подхода заключается в свободе выбора понятия близости (нормы), определяемого требуемым критерием погрешности восстановления исходной совокупности векторов. Эта погрешность определяется той частью каждого из исходных векторов, которая ортогональна к первому базисному вектору. Поэтому для уменьшения погрешности следующий базисный вектор ищется аналогичным образом в подпространстве, ортогонально дополненном к предыдущему базисному вектору.

Алгоритм расчета базисных функций. Пусть задано семейство петель гистерезиса $\{B_i(H)\}$, где $i = 1, 2, \dots, n$; B — индукция; H — напряженность магнитного поля. Так как эти кривые определяются обычно при заданном законе изменения индукции [6] (например, синусоидальном), то, не ограничивая общности дальнейших рассуждений, исходное множество петель гистерезиса можно преобразовать в семейство периодических кривых $\{H_i(t)\}$ изменения напряженности магнитного поля от времени. Полученные кривые будем использовать для расчета базисных функций, алгоритм которого заключается в следующем.

1. Выбирается первая кривая $H_1(t)$ семейства $\{H_i(t)\}$ и для каждой кривой этого семейства рассчитывается функция

$$H_{i,1} = H_i - [(H_i, H_1)/(H_1, H_1)]H_1,$$

где (H_i, H_1) — скалярное произведение.

2. Для каждой функции $H_{i,1}$ вычисляется норма

$$Q_i = \|H_{i,1}\| = \left(\int_0^T |H_{i,1}(t)|^p dt \right)^{1/p}, \quad (1)$$

где p характеризуется критерием выбора погрешности.

3. Аналогично рассчитывается норма вектора $L_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$:

$$\|L_1\| = \left(\sum_{i=1}^n (Q_i)^q \right)^{1/q}. \quad (2)$$

Таким образом, кривой $H_1(t)$ поставлена в соответствие норма $\|L_1\|$.

4. Шаги 1—3 повторяются над исходным семейством $\{H_i(t)\}$ для каждой кривой $H_i(t)$.

5. Среди всех чисел $\|L_i\|$ ($i = 1, 2, \dots, k, \dots, n$) выбирается минимальное. Пусть это будет $\|L_k\|$. Тогда $H_k(t)$ и есть первая базисная функция $\varphi_1(t)$.

6. Семейство $\{H_i(t)\}$ заменяется семейством $\{H_{i,k}(t)\}$.

Дальнейшая работа алгоритма зависит от варианта постановки задачи. Цикл 1..6 повторяется до тех пор, пока не выполнится условие

$$\|L_k\| < \Delta,$$

где Δ — заданная погрешность воспроизведения (I вариант постановки задачи), либо указанный цикл повторяется число раз, равное заданной спектральной размерности модели (II вариант), причем при выходе из цикла величина $\|L_k\|$ равна погрешности модели.

Заметим, что рассчитанная по приведенной выше методике система базисных функций не обладает свойством полноты. В этом случае для любой функции, не принадлежащей исходной совокупности, сколь угодно качественное воспроизведение с помощью рассчитанного базиса не гарантируется. Однако в силу единого характера физических процессов, протекающих в ферромагнетиках, их петли гистерезиса имеют подобный вид, а семейство $\{H_i(t)\}$, связанное с ними, принципиально не может не принадлежать подпространству, базис которого мы определяем. Поэтому любая кривая этого семейства может быть представлена с по-

мощью рассчитанного базиса. Это подтверждается экспериментальными исследованиями авторов.

Структура семейства $\{\varphi_i(t)\}$ соответствует введению «пространства над пространством», а задание в них норм по (1), (2) — «нормированного пространства над нормированным пространством» [7].

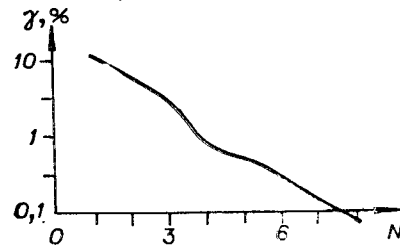
Выбор значений p и q , входящих в нормы $\|H_{i,j}\|$, $\|L_j\|$, соответственно диктуется заданным определением погрешности воспроизведения каждой кривой семейства $\{H_i(t)\}$, которое в зависимости от конкретных требований может быть различным. Наибольшее распространение на практике получили нормы, для которых $p, q = 1, 2, \infty$ [8]. Учитывая, что p и q могут принимать по три значения, число возможных вариантов равно 9, причем вопрос о том, какому из вариантов следует отдать предпочтение, обуславливается практическими соображениями. Например, при оптимизации среднеквадратичной погрешности воспроизведения следует выбирать p и q равными двум, а в задачах, где требуется гарантировать величину максимального отклонения от исходной кривой, p и q выбираются бесконечно большими, при этом нормы (1) и (2) будут приведены к виду

$$\|H_{i,j}\| = \max |H_{i,j}(t)|, \quad \|L_j\| = \max |Q_i|.$$

Пример расчета. Для нахождения базисных функций в качестве исходных данных было взято сто петель гистерезиса ферромагнитного образца. В ходе расчета определялась норма $\|L_j\|$, отражающая погрешность модели. Характер изменения нормы в зависимости от спектральной размерности модели n показан на рисунке. Исходное семейство петель гистерезиса, состоящее из ста кривых, было сведено к пяти базисным кривым, при этом каждой петле семейства поставлен в соответствие набор из пяти чисел — гармонических составляющих в выбранном базисе, по которым она может быть восстановлена с погрешностью не более 0,2%.

Следует отметить, что описанный алгоритм, возможно, не всегда обеспечивает оптимальное решение. Аналитическое сравнение найденной модели с оптимальной затруднено, особенно при учете разных критериев выбора погрешности модели. Поэтому для оценки близости полученной модели к оптимальной сделана попытка расчета последней путем нахождения минимума функционала ошибки при вариации компонент базисных функций. В качестве начального приближения была взята система функций, рассчитанная по предложенному алгоритму. Авторами опробовано несколько способов минимизации функционала, однако быстрой сходимости целевой функции не было достигнуто вследствие сложного характера поведения последней. Наилучшие результаты дал метод случайного поиска. Результаты расчета позволяют сделать следующий вывод: предложенный авторами алгоритм формирования спектральной модели обеспечивает значительный в (10—30 раз) выигрыш во времени по сравнению с методами, основанными на минимизации функционала ошибки, при этом погрешности получаемых моделей имеют величины одного порядка.

Применение. Рассчитанная система базисных функций может быть использована не только для сжатого представления информации о магнитных свойствах образца, но и для повышения точности расчета электромагнитных устройств, а также цепей, содержащих ферромагнитные элементы. Кроме того, применение нового функционального базиса открывает новые возможности для построения магнитоизмерительной аппаратуры, предназначенной для определения магнитных свойств ферромагнитных образцов. Например, при формировании заданного режима перемагничивания феррообразца вместо генераторов синусоидального сигнала [9] можно использовать генераторы рассчитанных базисных



функций, при этом их число окажется значительно меньшим, чем в первом случае. Такой подход позволит упростить процесс достижения заданного режима намагничивания и одновременно обеспечит решение задачи сжатого представления информации о магнитных свойствах испытуемого феррообразца, поскольку при достижении заданного режима становится известным спектральный состав намагничивающего сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дружинин В. В. Магнитные свойства электротехнической стали.— М.: Энергия, 1974.
2. Шрамков Е. Г. Задачи, связанные с оценкой свойств ферромагнитных материалов.— В кн.: Новые методы и аппаратура для испытания ферромагнитных материалов: Труды институтов комитета. М.— Л.: Стандартгиз, 1962, вып. 64.
3. Ольховский Ю. Б., Новоселов О. Н., Мановцев А. П. Сжатие данных при телеизмерениях.— М.: Сов. радио, 1971.
4. Перов В. П. Прикладная спектральная теория оценивания.— М.: Наука, 1982.
5. Люстерник Л. А., Соболев В. И. Краткий курс функционального анализа.— М.: Наука, 1982.
6. Векслер А. З., Дружинин В. В. Стандартизованные испытания электротехнической стали на переменном токе.— Электротехника, 1965, № 2.
7. Талдыкин А. Т. Элементы прикладного функционального анализа.— М.: Высшая школа, 1982.
8. Воеводин В. В. Линейная алгебра.— М.: Наука, 1980.
9. Маслов Ю. Н., Музюкин В. П. К вопросу разработки устройств для получения синусоидальной магнитной индукции в ферромагнитных образцах.— В кн.: Электротехника и приборостроение: Сб. науч. трудов. Владимир: ВПИ, 1970, вып. 10.

*Поступила в редакцию 16 декабря 1982 г.;
окончательный вариант — 23 августа 1983 г.*

УДК 681.3.068

Е. Г. БРЫНДИН

(Новосибирск)

СХЕМОПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДУЛЕЙ ИНТЕРПРЕТАТОРА ЦЕЛЕВОЙ ЭВМ

В этой статье делается попытка подойти к рассмотрению вопроса частичной автоматизации процесса построения модулей интерпретатора ЭВМ. Полностью автоматизировать этот процесс не удастся из-за того, что трудно построить, во-первых, унифицированный интерпретатор, который включал бы систему алгоритмов, имитирующих команды различных ЭВМ, во-вторых, конструктор, который настроил бы унифицированный интерпретатор на имитацию произвольной ЭВМ.

Общий взгляд на процесс интерпретации показывает, что практически невозможно полностью автоматизировать проектирование интерпретаторов для всего многообразия ЭВМ. Если теоретически и удастся придумать подобную систему, то вряд ли она окажется продуктивной.

Создание интерпретаторов имеет большое практическое значение. Одним из основных требований, предъявляемых к ним, является обеспечение большой скорости интерпретации программ целевой ЭВМ. Универсальные методы, как правило, снижают эффективность интерпретации. Универсальные интерпретирующие программы перегружены дополнительными, причем не касающимися целевой ЭВМ, интерпретирующими алгоритмами из-за того, что эти программы должны учитывать одновременно все многообразие принципов, привлекаемых для проектирования функциональных блоков различных ЭВМ.