

УДК 621.317.4

МЕТОД И УСТРОЙСТВО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАМАГНИЧИВАНИЯ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

Ланкина М.Ю., Бакланов А.Н., Шепелева А.О.

ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова», Новочеркасск, e-mail: lankinjohn@rambler.ru

В статье описаны разработанные метод и устройство определения динамических характеристик намагничивания пропорциональных электромагнитов. Обосновано применение динамической характеристики намагничивания в качестве интегральной характеристики пропорционального электромагнита. В разработанном методе динамическая характеристика намагничивания описывается степенным полиномом, при таком допущении погрешность не превышает 3%. Целесообразность данного подхода заключается в сокращении объема данных, используемых для описания характеристики. Разработанный метод основан на натурно-модельном эксперименте, в соответствии с которым с помощью оптимизационного алгоритма изменяются параметры модели до тех пор, пока модель не будет полностью описывать реальный пропорциональный электромагнит. Проведена оценка погрешности разработанного метода, которая по результатам экспериментальных исследований не превысила требуемые 3%. Разработанное устройство основано на технологии виртуальных приборов LabView и на оборудовании National Instruments и реализует предложенный метод.

Ключевые слова: динамическая характеристика намагничивания, полиномиальная аппроксимация, пропорциональные электромагниты, оценка погрешности

METHOD AND DEVICE FOR DETERMINING DYNAMIC MAGNETIZATION CHARACTERISTIC OF PROPORTIONAL SOLENOIDS

Lankina M.Y., Baklanov A.N., Shepeleva A.O.

Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Educational «Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)», Novocherkassk, e-mail: lankinjohn@rambler.ru

This article describes a method and apparatus designed to determine the dynamic characteristics of the magnetization proportional solenoids. The application of the dynamic characteristics of the magnetization as the integral characteristic of the proportional solenoid. The developed method of dynamic characteristic of the magnetization is described by a power polynomial, with this assumption, the error does not exceed 3%. The feasibility of this approach is to reduce the amount of data used to describe the characteristics. The developed method is based on natural-model experiment, according to which, with the help of an optimization algorithm for changing the model parameters as long as the model is not fully describe the real proportional solenoid. The estimation error of this method, which is based on the results of experimental studies did not exceed 3% required. The developed device based on virtual instrument technology LabView and National Instruments hardware and implements the proposed method.

Keywords: dynamic characteristic magnetization, polinomial approximation, proportional electromagnets, error evaluation

Тренд на миниатюризацию и снижение материалоемкости современных электромагнитов, предъявляет повышенные требования к их качеству. Основными регламентируемыми характеристиками для оценки эксплуатационных параметров электромагнитов являются:

1. Статическая тяговая характеристика $F = f(\delta)$.
2. Динамическая тяговая характеристика $F = f(\delta)$.
3. Движение якоря во времени $\delta = f(t)$.
4. Ток в обмотке во времени $i = f(t)$.
5. Зависимость магнитного потока от тока $\Phi = f(i)$ при фиксированных значениях зазора δ .

Каждая группа показателей требует применения своих методов и средств испытания пропорциональных электромагнитов.

Данная ситуация стимулирует поиск интегральных характеристик электромагнитов, позволяющих сделать выводы о качестве его отдельных частей и эксплуатационных свойствах всего изделия.

В работах ряда авторов [1–3] показано, что, зная динамическую характеристику намагничивания электромагнита (ДХН) (рис. 1) можно определить тяговые, временные и энергетические характеристики, следовательно, ее можно использовать в качестве интегральной характеристики пропорционального электромагнита.

После подачи питания ток в обмотке достигает значения тока трогания, которому соответствует точка 1. В это мгновение якорь приходит в движение, в процессе которого рабочий зазор δ уменьшается, индуктивность обмотки растет, а ток в ней

падает до тех пор, пока якорь не притянется к сердечнику, чему соответствует точка 2. Во время движения якоря связь между магнитным потоком Φ и током I определяется кривой 1-2. По окончании движения якоря ток опять начинает возрастать, достигая установившегося значения в точке 3. После отключения питания электромагнита, ток в обмотке падает и при достижении значения тока отпуска $I_{\text{отп}}$ (точка 4), якорь приходит в движение, а рабочий зазор увеличивается от минимального δ_{min} до максимального δ_{max} . Точка 5 соответствует оконча-

нию движения якоря электромагнита. Далее ток спадает до нуля, чему соответствует точка 6. Из-за остаточной намагниченности магнитопровода поток, соответствующий точке 6, больше нуля.

В основе разработанного метода определения динамических характеристик намагничивания лежит математическая модель пропорционального электромагнита, основанная на методе гармонического баланса. Модель содержит уравнение цепи с нелинейной индуктивностью и аппроксимирующий ДХН степенной полином:

$$\begin{cases} \Phi = \int (u - iR) dt \\ i(\Phi) = \sum_1^m k_q \Phi^q, \text{ при } \frac{d\Phi}{dt} \geq 0 \text{ и } i(\Phi) = \sum_1^l k_p \Phi^p, \text{ при } \frac{d\Phi}{dt} < 0 \end{cases}$$

где u – напряжение, приложенное к рабочей обмотке электромагнита, i – сила тока, протекающего через рабочую обмотку электромагнита, R – сопротивление рабочей обмотки электромагнита, Φ – значение магнитного потока, k – коэффициенты аппроксимации степенного полинома, m – максимальная степень аппроксимирующего полинома.

Полученная система уравнений реализована в программном пакете MicroCap (рис. 2).

С выхода интегратора *integrator* на вход блока умножителей поступает текущее зна-

чение магнитного потока Φ , блок умножителей X1-X15 реализует зависимость тока от магнитного потока, на выходе блока сумматоров X16-X17 получаем текущее значение тока i , далее значение тока умножается на известное значение активной составляющей сопротивления рабочей обмотки R , и получаем $-iR$. С источника напряжения прямоугольной формы U сигнал поступает на сумматор, на выходе которого получаем разность $U - iR$, интегрирование которой дает магнитный поток Φ .

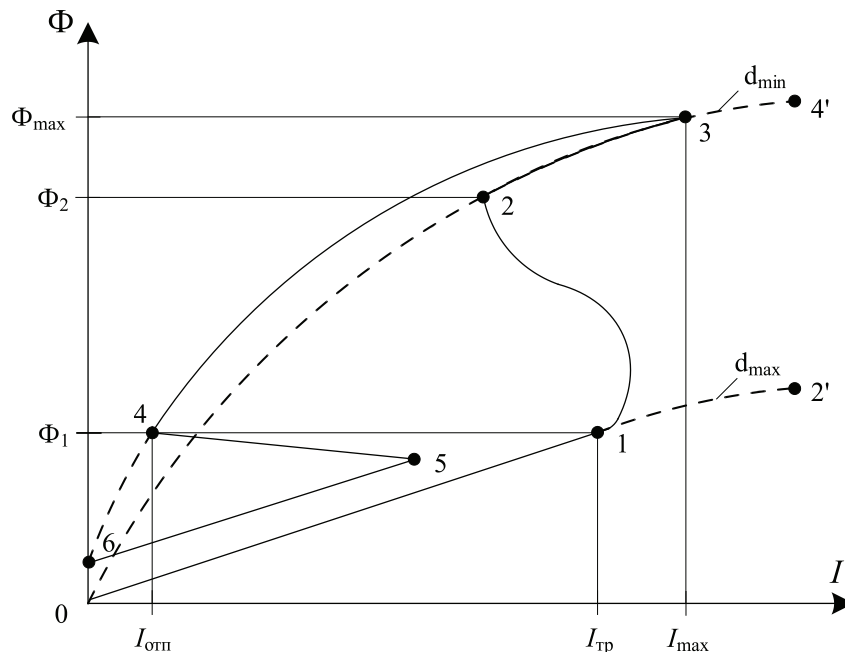


Рис. 1. Динамическая характеристика намагничивания электромагнита

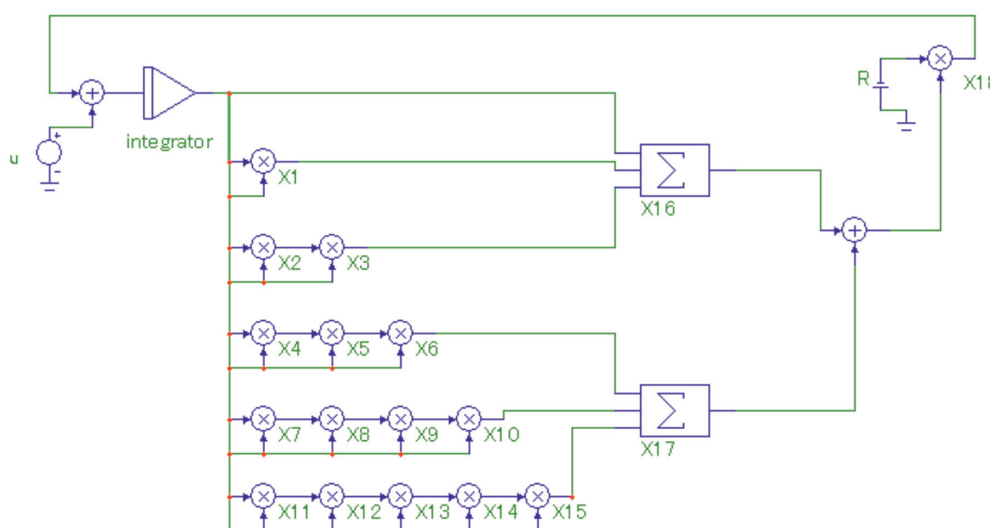


Рис. 2. Модель пропорционального электромагнита в программном пакете MicroCap

При использовании данной программы в модель, описывающую работу пропорционального электромагнита, заносятся полученные на физической модели данные: амплитуда питающего напряжения, сопротивление рабочей обмотки, значения коэффициентов аппроксимации ДХН k_q . В качестве выходных данных получаем смоделированный ток $i_m(t)$, из которого средствами MicroCap выделяем значения гармоник. Данная модель удобна для проведения вычислительных экспериментов.

Для определения ДХН пропорциональных электромагнитов будем использовать метод натурно-модельных испытаний, объединяющий измерение на физическом объекте и вычисление на модели электромагнита.

Алгоритм натурно-модельных испытаний представлен на рис. 3.

Применительно к поставленной задаче алгоритм состоит в следующем: на электромагнит подается напряжение: прямоугольной формы и с помощью датчиков напряжения и тока измеряются приложенное к рабочей катушке напряжение и ток в ней. Результаты измерения поступают в персональный компьютер, где в модель электромагнита вводится напряжение и рассчитанное сопротивление, а ею моделируется выходной ток в виде ряда гармоник. Ток, полученный с датчика тока, раскладывается в ряд Фурье и определяются амплитуды гармоник измеренного тока. С помощью оптимизационного алгоритма добиваются совпадения измеренных и смоделированных гармоник токов.

В качестве основы построения оптимизационного алгоритма используется метод симплекс-оптимизации. Под симплексом подразумевается правильный многогранник, имеющий $n + 1$ вершину, где n – число факторов, влияющих на процесс. Если, например, факторов два, то симплексом является равносторонний треугольник. Сущность симплексного метода оптимизации иллюстрирует рис. 4.

Первые опыты соответствуют вершинам исходного симплекса (точки 1, 2 и 3). Условия этих первых опытов берутся из области значений факторов, соответствующих наиболее благоприятным из известных режимов оптимизируемого процесса. Сравнивая между собой результаты опытов в точках 1, 2 и 3, находят среди них самый «плохой», с точки зрения выбранного критерия оптимальности. Пусть, например, самым «неудачным» оказался опыт в точке 1. Этот опыт исключают из рассмотрения, а вместо него в состав симплекса вводят опыт в точке 4, которая симметрична точке 1 относительно противоположной стороны треугольника, соединяющей точки 2 и 3. Расчет координат отраженной точки проводят по формуле

$$x^* = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n+1} x^i - \left[\frac{2}{n} + 1 \right] x^j,$$

где n – количество факторов, j – номер вершины исходного симплекса с наименьшим значением отклика, i – номера вершин полученных симплексов, x^* – координата новой точки.



Рис. 3. Алгоритм разработанного метода

Далее сравнивают между собой результаты опытов в вершинах нового симплекса, отбрасывают самый «неудачный» из них и (точка 3) переносят соответствующую вершину симплекса в точку 5. Затем рассмотренная процедура повторяется в течение всего процесса оптимизации. Если экстремум достигнут, то дальнейшее движение симплекса прекращается.

Для реализации метода оптимизации необходимо значение отклика, позволяющего определять уровень различия измеренного тока $i_n(t)$ и тока $i_m(t)$, полученного в результате математического моделирования работы пропорционального электромагнита. Для этого используем функционал J и проверяем выполнение условия:

$$J \leq \varepsilon, \quad (1)$$

где ε – погрешность измерения тока $i_n(t)$.

Функционал J , отражающий различие между токами $i_n(t)$ и $i_m(t)$, представленных в виде гармонических рядов Фурье имеет вид

$$J = \frac{\sum_{m=1}^n |I_{q_m} - I_{q_n}|}{\sum_{m=1}^n I_{q_n}},$$

где I_{q_n} и I_{q_m} – q -е гармоники измеренного и вычисленного на модели токов в рабочей катушке пропорционального электромагнита.

Если условие (1) не выполняется, то изменяются параметры математической модели (коэффициенты k), определяющие форму ДХН, вновь определяется зависимость $i_m(t)$, и проводится вычисление функционала J . Если условие (1) выполняется, то ДХН пропорционального электромагнита найдена.

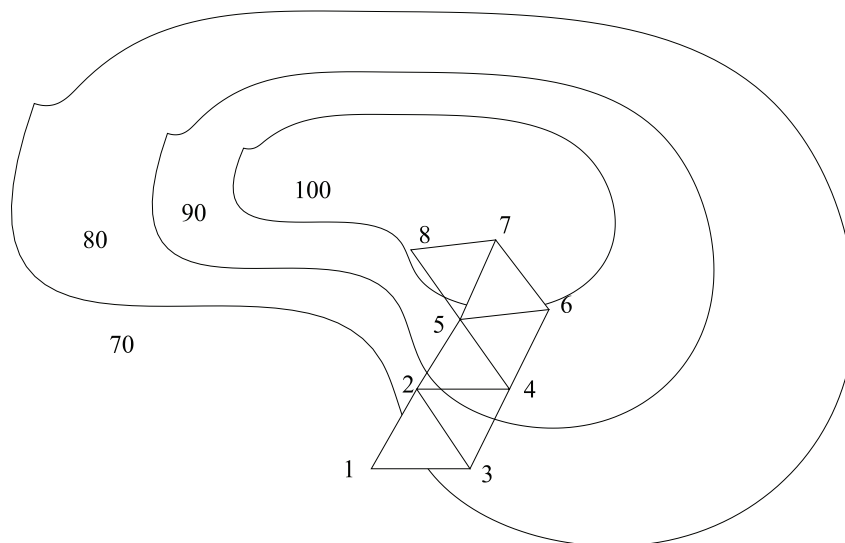


Рис. 4. Оптимизация симплексным методом

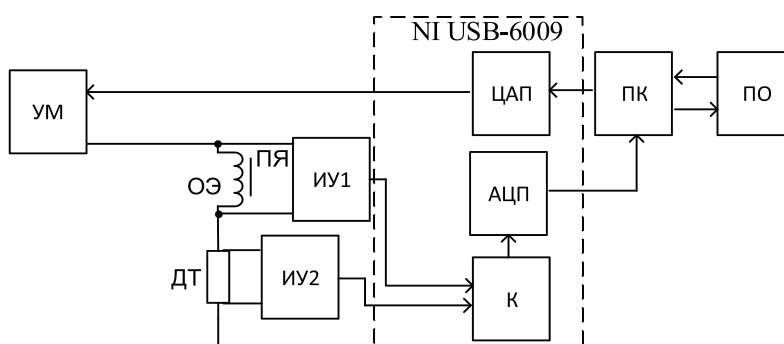


Рис. 5. Структурная схема устройства определения ДХН пропорциональных электромагнитов

Было разработано устройство, позволяющее реализовать предложенный метод. В настоящее время фирмами L-CARD и National Instrument (NI) разработан широкий спектр устройств ввода-вывода информации, позволяющих решить практически любые задачи оцифровки измерительных сигналов и формирования аналоговых сигналов управления. В сфере технологий разработки программного обеспечения NI предложена среда визуального и графического программирования LabVIEW, позволяющая реализовать концепцию виртуальных приборов. Эти приборы используют всю вычислительную мощь, производительность, графические и сетевые возможности современных ПК. Их функциональность в основном определяется возможностями программного обеспечения. Программирование в LabVIEW осуществляется на уровне функциональных блок-диаграмм. Сочетание графического языка программи-

рования и современного компилятора позволяет значительно сократить время разработки сложных систем при сохранении высокой скорости выполнения программ.

Применение устройства ввода-вывода фирмы NI и программного обеспечения LabVIEW фирмы NI позволило создать определения ДХН пропорциональных электромагнитов. Структурная схема устройства (рис. 5) включает в себя усилитель мощности УМ; обмотку испытуемого электромагнита ОЭ с подвижным якорем ПЯ; измерительные усилители ИУ1 и ИУ2; датчик тока ДТ; плату сбора данных NI USB-6009, содержащую коммутатор К, АЦП и ЦАП; персональный компьютер ПК. Программная часть ПО в пакете LabView обеспечивает реализацию метода определения ДХН.

Устройство работает следующим образом: с помощью ПО формируется сигнал заданной формы в цифровом виде и по-

дается на ЦАП, напряжение с выхода которого усиливается до требуемого уровня с помощью УМ. С УМ напряжение заданной формы подается на рабочую обмотку очередного испытуемого электромагнита ОУ и на ИУ1, где происходит его измерение. С ДТ измеренное значение тока поступает на ИУ2. С измерительных усилителей ИУ1 и ИУ2 сигналы подаются на К, а после оцифровки с помощью АЦП поступают в ПК, где в ПО производится определение ДХН и осуществляется контроль испытуемого электромагнита.

В качестве ДТ используется шунт калиброванный стационарный 75ШС, рассчитанный на номинальный ток 10А. Управление процессом измерения и ввод измерительной информации в ПК осуществляется при помощи блоков АЦП/ЦАП интерфейсной платы NI USB-6009. Выбор платы этого типа обусловлен необходимостью осуществлять в реальном масштабе времени ввод/вывод измерительной информации и ее обработку в среде LabVIEW. Таким образом предложен метод определения ДХН пропорциональных электромагнитов, позволяющий получить искомую характеристику с погрешностью не более $\pm 3\%$ [4–6] и устройство для его реализации, основанное на технологии виртуальных приборов LabView и на оборудовании NI.

Результаты работы получены при поддержке проекта № 1.2690.2014/К «Методы решения обратных задач диагностики сложных систем (в технике и медицине) на основе натурно-модельного эксперимента», выполняемого в рамках проектной части государственного задания с использованием оборудования ЦКП «Диагностика и энергоэффективное электрооборудование» ЮРГТУ (НПИ).

Список литературы

1. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока – М.: Государственное энергетическое издательство, 1960. – 447 с.
2. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. – М.: Энергия, 1972. – 248 с.
3. Ковалев О.Ф. Комбинированные методы моделирования магнитных полей в электромагнитных устройствах. – Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2001. – 220 с.
4. Антонов В.Г., Петров Л.М., Щелкин А.П. Средства измерений магнитных параметров материалов. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
5. Ланкин А.М., Ланкин М.В. Программа нахождения погрешности измеренных вебер-амперных характеристик электротехнических устройств // Компьютерные технологии в науке, производстве, социальных и экономических процессах : материалы XV Междунар. науч.-практ. конф., Новочеркасск, 12 дек. 2014 г. / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2015. – С. 57–61.
6. Ланкин А.М., Ланкин М.В. Определение погрешности измерения вебер-амперной характеристики. Св. № 2015610308 Россия. – Заявл. 06.11.2014. Запат. 12.01.2015.