

6. Джураев Д. С., Сафаров М. М., Зоиров Х. А., Неъматов Г. Н. Влияние магнитных полей на изменение температуропроводности и теплоемкости магнитных жидкостей // Магнитные фазовые переходы // Сб. науч. трудов IX Междунар. семинара. Махачкала, 2009. С. 35—37.

7. Джураев Д. С., Сафаров М. М., Зоиров Х. А., Зарипова М. А. Экспериментальная установка для определения влияния магнитного поля на изменение температуропроводности магнитных жидкостей // Теплофизические исследования и изменения в энергосбережении, при контроле, управлении и улучшении качества продукции, процессов и услуг. Материалы международной теплофизической школы. Тамбов, 2010. С. 49—51.

8. Клименко А. В., Зорина В. М. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. М.: Издательство МЭИ, 2001.

9. Фокин В. М., Ковылин А. В., Чернышов В. Н. Энергоэффективные методы определения теплофизических свойств строительных материалов и изделий. М.: Спектр, 2011.

10. Кондратьев Г. М., Дульнев Г. Н., Платунов Е. С., Ярышев Н. А. Прикладная физика. Теплообмен в приборостроении. СПб: СПбГУ ИТМО, 2003.

Дата принятия 27.02.2015 г.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317.4:517.925

Определение вебер-амперных характеристик электротехнических устройств методом натурно-модельного эксперимента

Н. И. ГОРБАТЕНКО, В. В. ГРЕЧИХИН, М. В. ЛАНКИН, А. М. ЛАНКИН

Южно-Российский государственный политехнический университет им. М. И. Платова, Новочеркасск, Россия, e-mail: vgrech@mail.ru

Рассмотрен алгоритм определения вебер-амперных характеристик электротехнических устройств, основанный на экспериментальных исследованиях и математическом моделировании. Для построения математической модели использованы методы гармонического баланса и симплекс-оптимизации.

Ключевые слова: вебер-амперная характеристика, натурно-модельный эксперимент, метод гармонического баланса, симплекс-оптимизация, электротехническое устройство.

An algorithm for determining the weber-ampere characteristics of electrical devices on the basis of experimental studies and mathematical modeling. To construct a mathematical model of the electrical device used methods of harmonic balance and the simplex optimization.

Key words: weber-ampere characteristic, natural-model experiment, method of harmonic balance, simplex optimization, electrotechnical device.

Технические и эксплуатационные характеристики электротехнических устройств (ЭУ) в значительной степени определяются магнитными свойствами ферромагнитных материалов. Существуют специальные нормативные документы, регламентирующие порядок измерений магнитных характеристик в ходе приёмосдаточных испытаний. Проведение работ в условиях, близких к предельно допустимым, сопровождается изменениями магнитных свойств ферромагнитных деталей и характеристик ЭУ. Поэтому при эксплуатации особо ответственных приборов необходимо выполнять их диагностику. Для применения известных методов определения магнитных характеристик требуется демонтаж и разборка устройств, а также использование специальных измерительных преобразователей магнитных величин. Решить

проблему можно с помощью метода натурно-модельного эксперимента, основанного на объединении экспериментальных исследований и математического моделирования [1—4]. Этот подход позволяет получить модель, адекватную конкретному испытываемому устройству, что необходимо для его диагностики в процессе производства и эксплуатации.

Алгоритм метода натурно-модельного эксперимента применительно к задаче определения вебер-амперной характеристики ЭУ переменного тока заключается в следующем. На внешние клеммы питания рабочей обмотки прибора подают синусоидальное напряжение и измеряют зависимость силы тока i_n от времени t . Далее выполняют математическое моделирование, измеряют зависимость силы тока $i_m(t)$ и вычисляют уровень расхождений $i_n(t)$, $i_m(t)$ за заданный про-

межутков времени. Для этого находят функционал J , показывающий различия между $i_n(t)$, $i_m(t)$, и проверяют выполнение условия

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

где ε — погрешность измерений силы тока $i_n(t)$.

Если условие (1) не выполняется, то математическую модель устройства, позволяющую рассчитывать вид функции тока в рабочей обмотке, изменяют. Вновь измеряют зависимость $i_m(t)$ и вычисляют функционал J . Если же условие (1) выполняется, то вебер-амперная характеристика ЭУ определена.

Использование математических моделей на основе теории электромагнитного поля приводит к необходимости решения сложной полевой задачи, для которой требуются значительные вычислительные мощности и временные затраты, что затрудняет реализацию рассматриваемого метода [4].

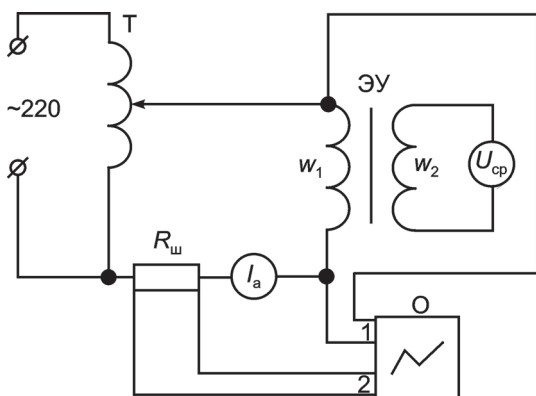


Рис. 1. Схема измерительной установки:

T — автоматотрансформатор; O — осциллограф; ЭУ — электротехническое устройство

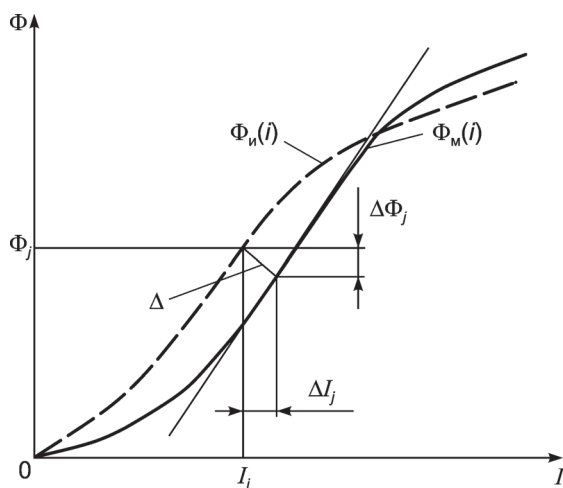


Рис. 2. Методика оценки погрешности при определении вебер-амперных характеристик:

$\Phi_n(i)$ — образцовая вебер-амперная характеристика; $\Phi_m(i)$ — вебер-амперная характеристика, измеренная на модели; Δ — погрешность между двумя вебер-амперными характеристиками; $\Delta\Phi_j$ — проекция погрешности на ось потока; ΔI_j — проекция погрешности на ось тока

Поэтому для построения математической модели воспользуемся методом гармонического баланса, основанном на разложении периодических функций напряжения, приложенного к нелинейной индуктивности, и тока, протекающего через рабочую обмотку, в ряд Фурье [5—7]. Метод гармонического баланса позволяет определить вид функции тока при условии, что известны вебер-амперная характеристика, амплитуда и форма питающего напряжения. Запишем уравнение электрической цепи для рабочей обмотки ЭУ, представив её в виде обмотки с нелинейной индуктивностью:

$$u(t) = R_i(t) + w \frac{d\Phi(i)}{dt}, \quad (2)$$

где $u(t)$, $i(t)$ — соответственно напряжение и сила тока в обмотке; R — активная составляющая сопротивления обмотки; w — число витков обмотки; $\Phi(i)$ — зависимость магнитного потока от силы тока в обмотке.

Зависимости $u(t)$, $i(t)$, $\Phi(i)$ определяют из формул:

$$u(t) = U_a \sin(\omega t); \quad (3)$$

$$i(t) = \sum_{m=1}^n I_{(2m-1)} \sin[(2m-1)\omega t]; \quad (4)$$

$$\Phi(i) = \sum_{m=1}^n k_{(2m-1)} i^{2m-1}, \quad (5)$$

где U_a — амплитуда напряжения, приложенного к обмотке; ω — круговая частота; $I_{(2m-1)}$ — амплитуда $(2m-1)$ -й гармоники тока; n — количество учитываемых гармоник тока; $k_{(2m-1)}$ — коэффициент аппроксимации вебер-амперной характеристики.

Уравнения (2)—(5) образуют математическую модель ЭУ.

Функционал J , отражающий расхождения между $i_n(t)$, $i_m(t)$, имеет вид

$$J = \frac{\int_0^{T/2} [i_m(t) - i_n(t)] dt}{\int_0^{T/2} i_n(t) dt}.$$

Так как в методе гармонического баланса сила тока задана выражением (4), можно перейти к дискретной форме представления функционала J :

$$J = \sum_{m=1}^n \left[I_{(2m-1)_m} - I_{(2m-1)_n} \right] / \sum_{m=1}^n I_{(2m-1)_n}, \quad (6)$$

где $I_{(2m-1)_n}$, $I_{(2m-1)_m}$ — амплитуды $(2m-1)$ -х гармоник соответственно измеренного и вычисленного на модели (2)—(5) токов в обмотке ЭУ.

Итерационный алгоритм натурно-модельного эксперимента для определения вебер-амперных характеристик ЭУ реализован в программном пакете Labview. В модель, представленную уравнениями (2)—(5), вводят измеренные значения R , U_a , ω , $I_{(2m-1)_n}$, ε , $i_n(t)$ и начальные значения $k_{(2m-1)}$.

На основании этих данных вычисляют амплитуды гармоник тока $I_{(2m-1)m}$. По формуле (6) определяют функционал J и проверяют выполнение условия (1). Если оно не выполняется, то для минимизации функционала (6) используют симплекс-оптимизацию, в ходе которой рассчитывают новые коэффициенты аппроксимации вебер-амперной характеристики $k_{(2m-1)}$ и проводят следующую итерацию [8]. Итерационный процесс продолжают до выполнения условия (1).

Описанный алгоритм применяют для определения вебер-амперных характеристик с помощью средства измерений (СИ), реализующего метод натурно-модельного эксперимента. Его погрешность оценивают при испытаниях ЭУ — тороидального трансформатора генератора ГЗ-33-СТТ-12А, магнитопровод которого изготовлен из трансформаторной стали 3412 (Э320), толщина ленты 0,35 мм, ширина 40 мм, наружный диаметр 76 мм, внутренний 40 мм. Рабочая обмотка w_1 трансформатора содержит 750 витков провода ПЭВ-2 диаметром 0,2 мм.

Образцовую вебер-амперную характеристику трансформатора определяли на частоте 50 Гц с помощью специально нанесённой измерительной обмотки w_2 , содержащей 37 витков провода ПЭВ-2 диаметром 0,8 мм. Измерения проводили по схеме (рис. 1) с преобразователями средневыпрямленного напряжения $U_{ср}$ и амплитудного тока I_a , в качестве которых использовали мультиметры Fluke 289 [9]. Погрешности измерений переменного напряжения и сила тока составили соответственно $\pm 0,4$ и $\pm 0,7$ %. В схему были подключены лабораторный автотрансформатор (Т) Wusley tdgc 8А и цифровой осциллограф (О) Tektronix 2024b. Погрешность измерений амплитуд гармоник тока равнялась ± 3 %. Входы 1, 2 использовали соответственно для измерения напряжения, приложенного к обмотке, и амплитуд гармоник тока

$I_{(2m-1)m}$. Токовый шунт ($R_{ш}$) на 2 А Fluke A40-2А имел погрешность $\pm 0,02$ % в диапазоне частот 5—100 кГц. Для оценки погрешности СИ использовали методику, аналогичную рекомендуемой в стандарте [10] при испытаниях магнитотвёрдых материалов для определения погрешности рабочих СИ. За погрешность принимали наибольшее относительное расстояние между образцовой и полученной характеристиками. Это расстояние измеряли по нормали к касательной, проведённой в анализируемой точке, взятой на образцовой характеристике [10]:

$$\delta = \max_{j=1,l} \left[\sqrt{(\Delta\Phi_j/\Phi_j)^2 + (\Delta I_j/I_j)^2} \right] \cdot 100,$$

где l — количество анализируемых точек ($l \geq 7$); $\Delta\Phi_j$ — проекция погрешности на ось потока; Φ_j — значение потока в выбранной точке; ΔI_j — проекция погрешности на ось тока; I_j — значение силы тока в выбранной точке (рис. 2).

На рис. 3 приведены образцовая $\Phi_{и}(i)$ и полученная с помощью математической модели $\Phi_{м}^{(1)}(i)$ вебер-амперные характеристики на первой итерации реализации алгоритма натурно-модельного эксперимента, на рис. 4 — зависимости от времени t силы токов измеренного $i_{и}(t)$ и определённого $i_{м}^{(1)}(t)$ в результате математического моделирования работы ЭУ. Из рис. 4 следует, что силы токов существенно различаются.

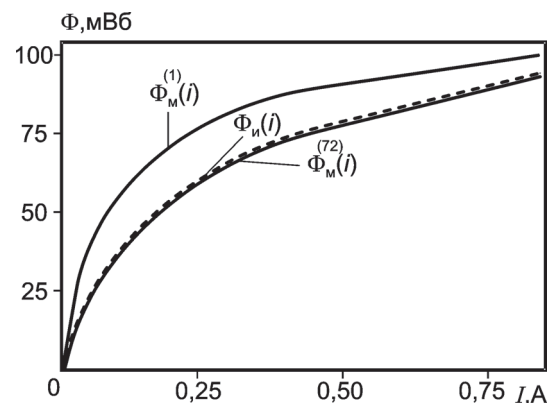


Рис. 3. Оценка погрешности при определении вебер-амперных характеристик разработанным методом:

$\Phi_{и}(i)$ — образцовая вебер-амперная характеристика; $\Phi_{м}^{(1)}(i)$ — вебер-амперная характеристика, измеренная на модели при первой итерации; $\Phi_{м}^{(72)}(i)$ — вебер-амперная характеристика, измеренная на модели при семьдесят второй итерации

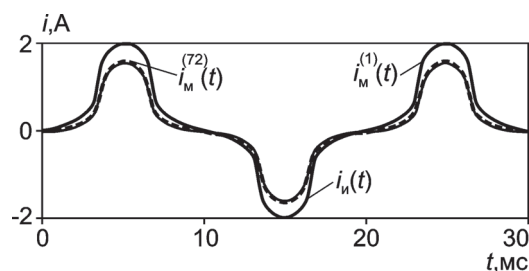


Рис. 4. Измеренные и полученные на модели формы токов:

$i_{и}(t)$ — сила тока, соответствующая образцовой вебер-амперной характеристике; $i_{м}^{(1)}(t)$ — сила тока, соответствующая вебер-амперной характеристике, измеренной на модели при первой итерации; $i_{м}^{(72)}(t)$ — сила тока, соответствующая вебер-амперной характеристике, измеренной на модели при семьдесят второй итерации

При определении вебер-амперной характеристики методом натурно-модельного эксперимента с применением математической модели (2)—(5) потребовалось 72 итерации. Для моделирования использовали персональный компьютер с процессором AMD A10×4 2,8 ГГц. Время вычислений не превысило 1,5 с. В результате итерационного процесса и выполнения условия (1) (см. рис. 4), расхождения $\Phi_{и}(i)$ и $\Phi_{м}^{(72)}(t)$ составили не более $\pm 1,5$ % (см. рис. 3). Для оценки влияния погрешности измерений амплитуд гармоник тока провели вычислительный эксперимент. Найденные гармоники тока искусственно «зашумлялись» сигналом, имеющим амплитуду $\pm 4,4$ % от их абсолютных значений. В этом случае погрешность исследуемого СИ, определённая по приведённой выше методике, не превышала $\pm 2,5$ %.

Таким образом, применение метода натурно-модельного эксперимента позволяет определять вебер-амперные характеристики ЭУ с достаточной для целей диагностики таких устройств точностью и быстродействием. Достоинством рассмотренного подхода является возможность определения характеристик в процессе производства и при эксплуа-

тации устройств без использования специальных измерительных преобразователей магнитных величин.

Работа выполнена в рамках проектной части гос. задания № 1.2690.2014/К «Методы решения обратных задач диагностики сложных систем (в технике и медицине) на основе натурно-модельного эксперимента» с использованием оборудования ЦКП «Диагностика и энергоэффективное электрооборудование» ЮРГПУ (НПИ).

Литература

1. **Pat. 19944779A1 DE.** Int.Cl.: G01N27/72 Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung magnetischer Eigenschaften von Proben / Gorbatenko N., Bachwalov J., Lankin M., Kallenbach E., Beyer F. Offenlegungstag, 2001.
2. **Горбатенко Н. И., Ланкин М. В.** Информационно-измерительная система для испытания постоянных магнитов // Электротехника. 2004. № 8. С. 55—58.
3. **Горбатенко Н. И., Ланкин М. В.** Information and measuring system for permanent-magnet tests // Russian Electrical Engineering. 2004. Т. 75. № 8. С. 63—66.
4. **Бахвалов Ю. А., Горбатенко Н. И., Гречихин В. В.** Метод решения обратных задач магнитных измерений // Измерительная техника. 2015. № 3. С. 58—60.

5. **Song Xing, Suting Chen, Zhanming Wei, Jingming Xia.** Unifying Electrical Engineering and Electronics Engineering. Springer Science & Business Media, 2013.

6. **Gorbatenko N. I., Lankin A. M., Lankin M. V., Shayhutdinov D. V.** Determination Of Weber-Ampere Characteristic For Electrical Devices Based On The Solution Of Harmonic Balance Inverse Problem // Int. J. Applied Engineering Research. 2015. V. 10. N. 3. P. 6509—6519.

7. **Lankin A. M., Lankin M. V., Aleksanyan G. K., Narakidze N. D.** Development Of Principles Of Computer Appliance Functioning, Determination Of Characteristics Of The Biological Object // Int. J. Applied Engineering Research. 2015. V. 10. N. 3. P. 6489—6498.

8. **Glenn Hurlbert** Linear Optimization: The Simplex Workbook. Springer Science & Business Media, 2009.

9. **Антонов В. Г., Петров Л. М., Щелкин А. П.** Средства измерений магнитных параметров материалов. Л.: Энергоатомиздат, 1986.

10. **ГОСТ 8.268—77.** ГСИ. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик магнитотвёрдых материалов.

Дата принятия 28.09.2015 г.

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317.08

Фазовый метод компарирования мгновенных значений частот квазигармонических сигналов

В. К. ИГНАТЬЕВ, А. А. ОРЛОВ, Д. А. СТАНКЕВИЧ

Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия, e-mail: orlwork@inbox.ru

Рассмотрен метод фазового компарирования мгновенных значений частот квазигармонических сигналов с медленно меняющимися параметрами, в основе которого лежит параметрический алгоритм оценивания угла сдвига фаз. Показано, что погрешности указанного метода сопоставимы с погрешностями классического метода квадратурного гетеродинирования при компарировании сигналов с постоянной разностью частот. Преимущество предложенного метода — сокращение вычислительных операций в 4 раза. Теоретические выводы подкреплены численными и натурными экспериментами.

Ключевые слова: фазовый компаратор, мгновенное значение частоты, аналого-цифровой преобразователь, цифровой синтез сигналов, параметрический метод.

The proposed instantaneous frequencies comparison method of quasi-harmonic signals with slowly varying parameters is based on parametric phase shift angle estimation algorithm. It is shown, that the error of the method is comparable to the quadrature heterodyne classical method for the signals with a constant frequency difference. The described method has the advantage in execution 4 times less computing operations. The theoretical conclusions are supported by numerical and natural experiments.

Key words: phase comparator, instantaneous frequency, value analog-digital converter, digital signal synthesis, parametric method.

Развитие комплексов автоматизированных систем, разнесенных в пространстве, но активно взаимодействующих в процессе работы, ставит перед разработчиками задачу взаимной синхронизации часов. Долговременная относитель-

ная нестабильность современных эталонов частоты достигает уровня 10^{-16} в сутки и менее [1]. В настоящее время сравнение частот эталонов осуществляется электронно-счётными частотомерами, из которых наиболее точными явля-