

УДК 621.317.4

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТОДОМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ГАРМОНИЧЕСКОГО БАЛАНСА

Ланкин А.М., Ланкин М.В., Гречихин В.В., Шайхутдинов Д.В.

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

В статье описан метод получения гистерезисных вебер-амперных характеристик электромагнитных устройств переменного тока с помощью решения обратной задачи гармонического баланса. В ходе диагностики электротехнических устройств переменного тока зачастую необходимо получать гистерезисную вебер-амперную характеристику. При намагничивании магнитного материала переменным полем петля гистерезиса, характеризующая затраты энергии за один цикл перемагничивания, расширяется за счет возникновения потерь на вихревые токи и потерь на последствие. Целью исследования является разработка методики определения гистерезисных вебер-амперных характеристик на основе решения обратной задачи гармонического баланса для электромагнитных устройств. Методика базируется на проведенных ранее исследованиях по получению вебер-амперных характеристик электротехнических изделий, а также вебер-амперных характеристик рабочего цикла электромагнитных устройств переменного тока.

**Ключевые слова:** гистерезисная вебер-амперная характеристика, электротехнические устройства, метод гармонического баланса, решение обратных задач

## DETERMINATION HYSTERESIS MAGNETIC CHARACTERISTICS METHOD FOR INVERSE PROBLEMS OF HARMONIC BALANCE

Lankin A.M., Lankin M.V., Grechikhin V.V., Shaykhutdinov D.V.

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

This article describes a method for obtaining hysteresis weber-ampere characteristics of electromagnetic devices using AC inversion harmonic balance. During diagnostics AC electrical devices often need to receive weber-ampere hysteresis characteristic. When the magnetization of the magnetic material to the alternating field hysteresis loop that characterizes the energy consumption per cycle of magnetization reversal is expanding due to the appearance eddy current losses and loss-effect. The aim of the study is to develop a methodology for determining the hysteresis voltage weber-ampere characteristics of an inversion harmonic balance for electromagnetic devices. The procedure is based on previous studies conducted by obtaining weber-ampere characteristics of electrical products, as well as the weber-ampere characteristics of the operating cycle AC electromagnetic devices.

**Keywords:** hysteresis weber-ampere characteristic, electrical devices, harmonic balance, the solution of inverse problems

Важной частью производственного процесса электротехнических устройств являются системы автоматического управления производством, позволяющие повысить эффективность использования материалов и эксплуатационные параметры продукции [13]. Но никакая система управления производственным процессом не актуальна без эффективных методов диагностики.

Проведены исследования [4, 5, 8–10], подтверждающие, что вебер-амперная характеристика рабочего цикла является важной диагностической характеристикой электротехнических устройств, позволяющей определять не только их состояние, но и тип неисправности. Предложено для получения такой характеристики использовать решение обратной задачи гармонического баланса [2, 3, 14, 15]. Проведен математический анализ решения обратной задачи гармонического баланса, проведены

вычислительный и натурный эксперименты с использованием математической модели и ряда электротехнических устройств (электромагнитного реле, электродвигателя и тороидального трансформатора), результаты которых позволяют утверждать, что предложенный метод измерения ВАХ, основанный на решении обратной задачи гармонического баланса, позволяет получить характеристику электротехнического устройства с погрешностью не превышающей 3% [6]. Данный метод может быть использован для испытания электротехнических устройств как при их производстве, так и в ходе их эксплуатации.

В качестве еще одного метода определения вебер-амперных характеристик электротехнических устройств предложен метод натурно-модельных испытаний [7]. Для исследования данного подхода разработана программа, реализующая модель электротехнического устройства и оптимизационная

программа на основе симплекс-планирования. Как и в случае с применением решения обратной задачи гармонического баланса, метод позволяет получить характеристику с погрешностью, не превышающей 3%.

Проведено [7] исследование влияния погрешности измерения гармоник тока на точность методов определения вебер-амперных характеристик. Значения гармоник тока варьировались в интервале  $\pm 4,4\%$ , дополнительная погрешность получения вебер-амперных характеристик не превысила 1%.

В ходе диагностики электротехнических устройств переменного тока зачастую необходимо получать гистерезисную вебер-амперную характеристику (ГВАХ).

При намагничивании магнитного материала переменным полем петля гистерезиса, характеризующая затраты энергии за один цикл перемагничивания, расширяется (увеличивает свою площадь) за счет возникновения потерь на вихревые токи и потерь на последствие. Такая петля называется гистерезисной [1].

Аналогичным образом вебер-амперная характеристика (ВАХ), полученная при перемагничивании переменным током, является гистерезисной ВАХ.

При измерении ГВАХ необходимо учитывать два явления: искажение формы кривой и сдвиг по фазе между магнитным потоком  $\Phi$  и током в катушке  $I$ , создающим этот поток.

Зависимость между  $\Phi$  и  $I$  определяется формой динамической петли, поэтому при синусоидальном изменении одной из рассматриваемых величин в общем случае вторая будет изменяться не синусоидально (появятся высшие гармоники). Одновременное синусоидальное изменение  $\Phi$  и  $I$  возможно лишь в случае эллипсоидальной петли.

Отставание по фазе кривой потока от кривой тока объясняется действием вихревых токов и магнитной вязкостью. Угол отставания  $\delta$  называется углом потерь [12].

Для учета явлений искажения формы кривой и наличия сдвига по фазе в зависимости  $\Phi = f(I)$  при намагничивании переменным полем В.К. Аркадьевым [1] было предложено заменить реальную динамическую петлю эквивалентным эллипсом, в случае ДВАХ уравнение которого в координатах  $\Phi$  и  $I$  имеет вид

$$i(t) = I_{\max} \sin(\omega t); \quad (1)$$

$$\Phi(t) = \Phi_{\max} \sin(\omega t - \delta). \quad (2)$$

Если ввести в составляющую потока  $\Phi_{\max 1} = \Phi_{\max} \cos \delta$ , совпадающую по фазе с направлением  $I$ , и составляющую  $\Phi_{\max 2} = \Phi_{\max} \sin \delta$ , отстающую на  $90^\circ$  от на-

правления  $I$ , тогда [11]  $\Phi_{\max 1}$  связана с обратимыми процессами превращения энергии при перемагничивании, а  $\Phi_{\max 2}$  – с необратимыми. Выражение (2) примет вид

$$\Phi(t) = \Phi_{\max 1} \sin(\omega t) - \Phi_{\max 2} \cos(\omega t). \quad (3)$$

При магнитных измерениях в переменных полях [12] получают зависимости  $B_{\max} = f(H_{\max})$  при одновременном измерении угла сдвига фаз  $\delta$  между кривыми. Пользуются и другими зависимостями, например,

$$B_{1\max} = f(H_{1\max}),$$

где  $B_{1\max}$ ,  $H_{1\max}$  – амплитудные значения первых гармоник.

Мы предлагаем метод определения петли  $\Phi = f(I) + \Phi_{\max 2} \cos(\omega t)$ , в котором учитывается ее гистерезисный характер.

Решение обратной задачи гармонического баланса позволяет определить форму петли  $\Phi = f(I) + \Phi_{\max 2} \cos(\omega t)$ , по известному протекающему через катушку электротехнического устройства току, заданному в виде разложения в ряд Фурье:

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

где  $I_{(2m-1)}$  – амплитуда  $(2m-1)$ -й гармоники тока и по известной форме и амплитуда  $U_a$  напряжения приложенного к катушке электротехнического изделия:

$$u(t) = U_a \sin(\omega t). \quad (5)$$

Обратимая составляющая гистерезисной вебер-амперная характеристика электротехнического изделия, задана аппроксимирующим выражением

$$\Phi(i) = \sum_{m=1}^n k_{(2m-1)} i^{2m-1}, \quad (6)$$

где  $\Phi$  – значение магнитного потока;  $k_{(2m-1)}$  – коэффициенты аппроксимирующего выражения вебер-амперной характеристики,  $m = (1, n)$ ;  $n$  – количество слагаемых в аппроксимирующем выражении;  $i$  – сила тока, протекающего через катушку электротехнического изделия.

Обратная задача гармонического баланса для определения гистерезисной вебер-амперной характеристики электротехнического устройства формируется следующим образом. Имеется электротехническое устройство с неизвестной гистерезисной вебер-амперной характеристикой, известны законы изменения напряжения (5), приложенного к нелинейной индуктивности, и протекающего по ней тока (4). Требуется определить коэффициенты  $k_{(2m-1)}$  выражения (6), аппроксимирующего гистерезисную вебер-амперную характеристику и амплитуду необратимой составляющей потока  $\Phi_{\max 2}$ .

Запишем уравнение цепи электротехнического устройства:

$$u(t) = Ri + \frac{d\Phi}{dt}.$$

Перепишем его с учетом известных законов изменения тока (4) и напряжения (5):

$$U_a \sin \omega t = R \left( \sum_{m=1}^n I_{(2m-1)} \sin((2m-1)\omega t) \right) + \frac{d \sum_{m=1}^n k_{(2m-1)} \sum_{m=1}^n (I_{(2m-1)} \sin((2m-1)t\omega))^{2m-1}}{dt} + \Phi_{\max 2} \sin(\omega t). \quad (7)$$

Задавшись степени  $(2n - 1)$  аппроксимирующего обратимую составляющую гистерезисной вебер-амперной характеристики выражения, определим  $n$  значений аргумента функции синуса для выражения (7). Значения аргумента берем из интервала  $]0; \pi/2[$ .

Таким образом, получаем систему из  $n$  линейных уравнений. Для подстановки в полученную систему уравнений могут быть измерены: амплитуда напряжения  $U_a$ , амплитуды гармоник тока  $I_{(2m-1)}$ , значение активного сопротивления  $R$  и значение круговой частоты протекающего тока  $\omega$ . Решая эту систему уравнений, получаем коэффициенты  $k_{(2m-1)}$  и амплитуду необратимой составляющей потока  $\Phi_{\max 2}$ .

Подводя итог, можно утверждать, что предложенный метод измерения ГВАХ, основанный на решении обратной задачи метода гармонического баланса, является актуальным для систем диагностики и его возможно использовать для получения гистерезисных магнитных характеристик электротехнических устройств.

*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» ЮРГПУ (НПИ).*

#### Список литературы

1. Аркадьев В.К. Электромагнитные процессы в металлах. Часть 2. – М.-Л.: Главная редакция энергетической литературы, 1936. – 303 с.
2. Ланкин А.М., Ланкин М.В. Метод измерения вебер-амперной характеристики электротехнических устройств // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1; URL: <http://www.science-education.ru/115-12186>.

3. Ланкин А.М., Ланкин М.В., Наракидзе Н.Д. Метод измерения вебер – амперной характеристики базирующей на решении обратной задачи МГБ // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4. – URL: <http://www.science-education.ru/118-13942>.

4. Ланкин М.В., Наракидзе Н.Д., Ланкин А.М. Топография магнитного поля в окрестностях образца из магнитомягкого материала // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – URL: <http://www.science-education.ru/119-14696>.

5. Ланкин А.М., Ланкин М.В., Наракидзе Н.Д., Наугольнов О.А. Управление магнитным состоянием изделий из магнитомягких материалов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–5. – С. 1005–1009.

6. Ланкин А.М., Ланкин М.В. Определение погрешности измерения вебер-амперной характеристики. Св. № 2015610308 Россия. – Заявл. 06.11.2014 Зарег. 12.01.2015.

7. Ланкин А.М., Ланкин М.В., Кучеров В.А., Наугольнов О.А. Применение алгоритма натурно-модельных испытаний для диагностики электротехнических систем // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – URL: <http://www.science-education.ru/125-19975>.

8. Ланкин М.В. Методика метрологической аттестации устройств автоматического контроля // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2003. – № 1. – С. 69–72.

9. Ланкин М.В. Метрологическое обеспечение процессорных средств испытания постоянных магнитов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2004. – № 3. – С. 69–73.

10. Наракидзе Н.Д., Ланкин А.М., Ланкин М.В. Адаптивный алгоритм управления магнитным состоянием изделия из магнитомягкого материала при определении основной кривой намагничивания // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – URL: <http://www.science-education.ru/119-14704>.

11. Поливанов К.М. Ферромагнетики: Основы теории технического применения. – Л.: Энергоиздат, 1957. – 256 с., Мишин Д.Д. Магнитные материалы. – М.: Высш. шк., 1991. – 384 с.

12. Преображенский А.А., Бишард Е.Г. Магнитные материалы и элементы. – М.: Высш. шк., 1986. – 352 с.

13. Шайхутдинов Д.В., Горбатенко Н.И., Широков К.М., Гречихин В.В., Ланкин А.М. Адаптивная подсистема автоматического управления производством интеллектуальных электроприводов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – URL: <http://www.science-education.ru/125-20095>.

14. Getting weber – voltage characteristics using the method of harmonic balance Lankin A.M., Lankin M.V. // The Second International Conference on Eurasian scientific development Proceedings of the Conference. – 2014. – С. 264–270.

15. Gorbatenko N.I., Lankin A.M., Lankin M.V., Shayhutdownov D.V. Determination Of Weber-Ampere Characteristic For Electrical Devices Based On The Solution Of Harmonic Balance Inverse Problem // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 3. – P. 6509–6519; Research India Publications.

#### References

1. Arkadev V.K. Elektromagnitnye protsessy v metallah. Chast 2. Moskva-Leningrad, Glavnaya redaktsiya ehnergeticheskoy literatury, 1936, 303 p.
2. Lankin A.M., Lankin M.V. Metod izmereniya veber-ampernoy harakteristiki ehlektrotekhnicheskikh ustroystv // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. no. 1; URL: <http://www.science-education.ru/115-12186>.
3. Lankin A.M., Lankin M.V., Narakidze N.D. Metod izmereniya veber ampernoy harakteristiki baziruyushchiysya na reshenii obratnoy zadachi MGB // Sovremennye problemy nauki i

- obrazovaniya. 2014. no. 4. URL: <http://www.science-education.ru/118-13942>.
4. Lankin M.V., Narakidze N.D., Lankin A.M. Topografiya magnitnogo polya v okrestnostyah obraztsa iz magnitomyagkogo materiala // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014. no. 5. URL: <http://www.science-education.ru/119-14696>.
5. Lankin A.M., Lankin M.V., Narakidze N.D., Naugolnov O.A. Upravlenie magnitnym sostoyaniem izdeliy iz magnitomyagkih materialov // *Fundamentalnye issledovaniya*. 2014. no. 11–5. pp. 1005-1009.
6. Lankin A.M., Lankin M.V. Opredelenie pogreshnosti izmereniya veber-ampernoy harakteristiki. Sv. no. 2015610308 Rossiya. Zayavl. 06.11.2014 Zareg. 12.01.2015.
7. Lankin A.M., Lankin M.V., Kucherov V.A., Naugolnov O.A. Primenenie algoritma naturno-modelnyh ispytaniy dlya diagnostiki ehlektrotekhnicheskikh sistem // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015. no. 1. URL: <http://www.science-education.ru/125-19975>.
8. Lankin M.V. Metodika metrologicheskoy attestatsii ustroystv avtomaticheskogo kontrolya // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. EHlektromekhanika*. 2003. no. 1. pp. 69–72.
9. Lankin M.V. Metrologicheskoe obespechenie protsessornykh sredstv ispytaniya postoyannykh magnitov // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. EHlektromekhanika*. 2004. no. 3. pp. 69–73.
10. Narakidze N.D., Lankin A.M., Lankin M.V. Adaptivnyy algoritm upravleniya magnitnym sostoyaniem izdeliya iz magnitomyagkogo materiala pri opredelenii osnovnoy krivoy namagnichivaniya // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014. no. 5. URL: <http://www.science-education.ru/119-14704>.
11. Polivanov K.M. Ferromagnetiki: Osnovy teorii tekhnicheskogo primeneniya / K. M. Polivanov. L. : Energoizdat, 1957. 256 p., Mishin D.D. Magnitnye materialy. M.: Vyssh. shk., 1991. 384 p.
12. Preobrazhenskiy A.A., Bishard E.G. Magnitnye materialy i ehlementy. M.: Vyssh. shk., 1986. 352 p.
13. Shayhutdinov D.V., Gorbatenko N.I., Shirokov K.M., Grechihin V.V., Lankin A.M. Adaptivnaya podsystema avtomaticheskogo upravleniya proizvodstvom intellektualnykh ehlektroprivodov // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015. no. 1. URL: <http://www.science-education.ru/125-20095>.
14. Getting weber voltage characteristics using the method of harmonic balance Lankin A.M., Lankin M.V. V sbornike: The Second International Conference on Eurasian scientific development Proceedings of the Conference. 2014. pp. 264–270.
15. Gorbatenko N.I., Lankin A.M., Lankin M.V., Shayhutdinov D.V. De-termination Of Weber-Ampere Characteristic For Electrical Devices Based On The Solution Of Harmonic Balance Inverse Problem // *International Journal of Applied Engineering Research*. Vol. 10, no. 3 (2015) pp. 6509–6519; Research India Publications.

---

**Рецензенты:**

Горбатенко Н.И., д.т.н., профессор кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии», ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова», г. Новочеркасск;

Ковалев О.Ф., д.т.н., профессор кафедры «Автоматика и телемеханика», ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск.