

## Метод определения магнитных характеристик высококоэрцитивных постоянных магнитов с применением вейвлет-преобразования

*В.И. Король, М.В. Ланкин, А.М. Ланкин*

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова*

**Аннотация:** Предложен метод измерения магнитных характеристик высококоэрцитивных постоянных магнитов из редкоземельных материалов, таких, как неодим-железо-бор и самарий-кобальт. Суть метода заключается в следующем: данные об измеренном питающем напряжении и характеристиках намагничивающей установки основывают математическую модель; измеренная форма импульса намагничивающего тока поступает в математическую модель и сравнивается со смоделированным импульсом тока в устройстве сравнения; далее, если различие характеристик тока не удовлетворяет точности измерения, то вносятся корректировки в математическую модель. Таким образом, математическая модель определяет магнитные характеристики постоянного высококоэрцитивного магнита. Метод разработан на основе натурно-модельных испытаний с использованием мультифизической компьютерной модели. Реализация метода измерения базируется на современных IT-решениях, мультифизическая модель строится в программном пакете *COMSOL Multiphysics*.

**Ключевые слова:** магнит, магнитный параметр, мультифизическая модель, намагничивание, высококоэрцитивный материал, неодим, вейвлет, Фурье, анализ, COMSOL.

Постоянные магниты (ПМ) находят широкое применение в электротехнических устройствах. Электрогенераторы и электродвигатели, в которых используются высококоэрцитивные постоянные магниты, обладают высокими эксплуатационными характеристиками. Магнитные свойства высококоэрцитивных ПМ позволяют создавать эффективные электрогенераторы и электродвигатели с высоким коэффициентом полезного действия. Кроме того, ПМ применяются во многих других сферах жизни человека. Эксплуатационные характеристики электротехнических устройств в значительной степени зависят от магнитных параметров постоянных магнитов. Использование ПМ с заведомо известными магнитными параметрами позволяет оптимизировать процесс производства электротехнических устройств и иных приборов, а также улучшить качество изделий, в создании которых применяются постоянные магниты.

В настоящее время, контроль качества высококоэрцитивных ПМ подразумевает процедуру импульсного намагничивания в одновитковых индукторах с последующим перемещением ПМ в измерительное устройство, которое представляет собой размагничивающий электромагнит и измерительные преобразователи индукции и напряженности магнитного поля. В системах производственного контроля, реализующих этот метод, обычно используют [1-3] схемы импульсного намагничивания ПМ бестрансформаторного или трансформаторного типа на базе емкостных накопителей энергии, обеспечивающие получение двухполярных импульсов.

Измерительные каналы магнитной индукции в существующих системах производственного контроля (рис. 1) построены с применением индукционных датчиков магнитного потока, что усложняет обработку сигнала. Данный тип датчиков требует наличия измерительного интегратора, который имеет целый ряд недостатков, приводящих к росту погрешности измерения.

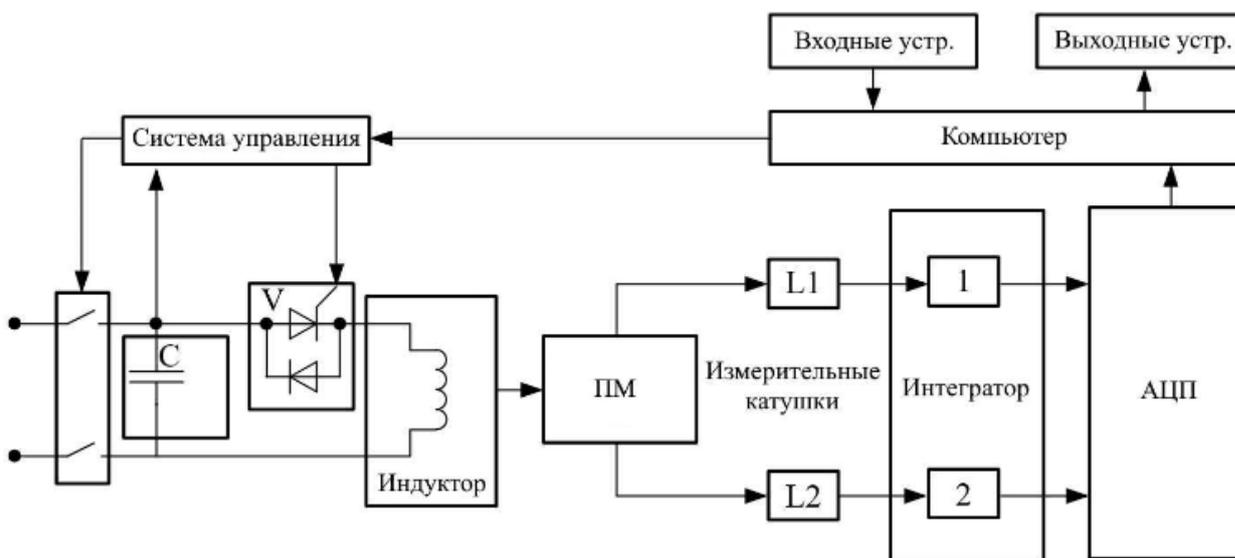


Рис.1 – Схема устройства определения магнитных характеристик ПМ.

Такая процедура измерения магнитных параметров ПМ энерго- и времязатратна, в связи с чем предлагается внедрить современные ИТ-решения, которые заключаются в использовании компьютерного

мультифизического моделирования для построения имитационной математической модели ПМ, находящегося в перемещающемся индукторе. В свою очередь, математическая модель позволит на основании измеренных кривых импульсов тока и напряжения, протекающих в контуре индуктора, строить магнитную характеристику образца постоянного магнита.

Для разработки нового метода определения магнитных характеристик используются методы натурно-модельного эксперимента, конечных элементов, преобразования Фурье [4], оптимизационные методы Нелдера-Мида [5], гармонического баланса [6] и вейвлет-преобразования [7-8].

Алгоритм (рис. 2) натурно-модельного подхода применительно к этой задаче состоит в том, что на индуктор подается двухполярный импульс тока, возникающий в ходе разряда конденсаторов, и измеряется зависимость тока  $i_{meas}$ , протекающего в индукторе, от времени  $t$ .

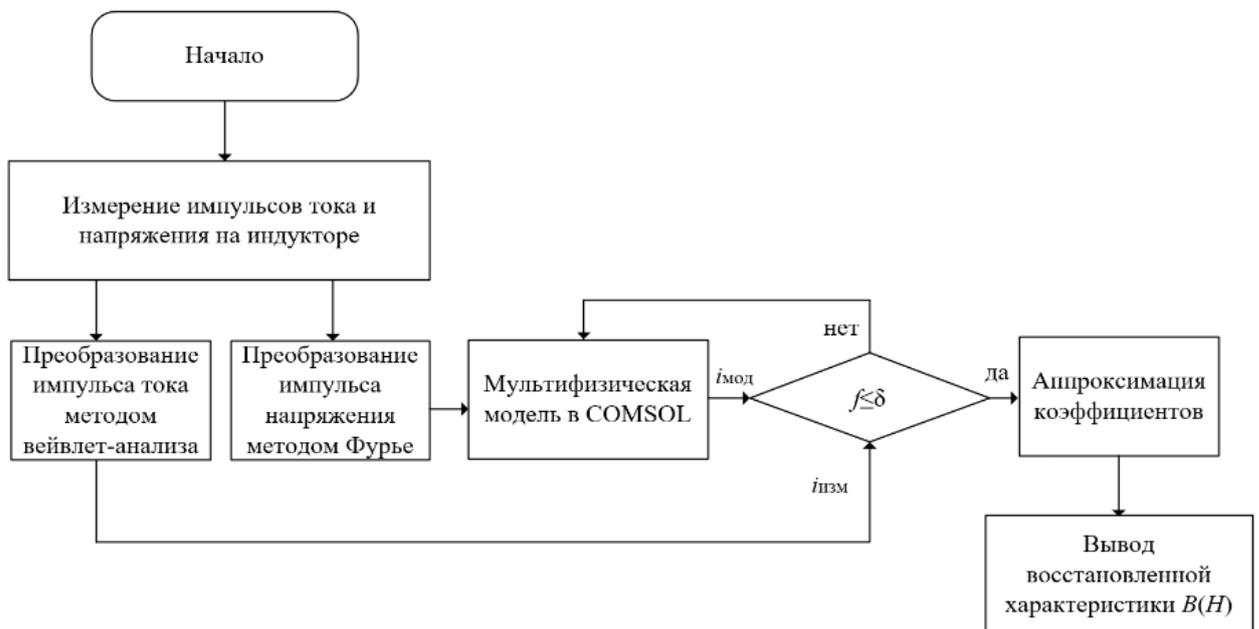


Рис.2 – Алгоритм нового метода определения магнитных характеристик

Информация об измеренном импульсе проходит этап сжатия – для импульса напряжения это преобразование Фурье, а для импульса тока – вейвлет-преобразование. Затем, сжатые данные о напряжении поступают в

модель, а сжатые данные о токе поступают в устройство сравнения. Далее, определяется уровень различия измеренного тока  $i_{meas}(t)$  с током  $i_{model}(t)$ , полученным в результате математического моделирования электрических процессов, протекающих в индукторе. Для этого вычисляется значение функционала  $f$ , количественно характеризующего степень различия между коэффициентами вейвлетов, и проверяется выполнение условия:

$$f \leq \delta, \quad (1)$$

где  $\delta$  – относительная погрешность измерения.

Если условие (1) не выполняется, то изменяют параметры математической модели, определяющие форму искомой магнитной характеристики, и вновь определяют  $i_{model}(t)$ , а также проводят вычисление функционала  $f$ . Если условие (1) выполняется, то магнитная характеристика ПМ найдена.

Измерение происходит на ниспадающем участке петли гистерезиса. Для вычисления зависимости  $i_{model}(t)$  используем метод гармонического баланса, в соответствии с которым математическая модель представляется в виде системы уравнений [6,9]:

$$u_c = u_v + Ri + L \frac{di}{dt}; \quad (2)$$

$$i = i_{V1} - i_{V2} = -C \frac{du_c}{dt}; \quad (3)$$

$$B(i) = A_0 + \sum_{m=1}^{n1} K_{(2m-1)} i^{2m-1}, \frac{di}{dt} \leq 0; \quad (4)$$

$$u_v = u_{direct}, 0 < t \leq 0.5T_{pulse}; \quad (5)$$

$$u_v = -u_{direct}, 0.5T_{pulse} < t \leq T_{pulse} \quad (6)$$

где  $C$  – емкость БК;  $R$  – суммарное сопротивление разрядной цепи;  $i$ ,  $u_c$ ,  $u_v$  – мгновенные значения тока, напряжения на конденсаторе и вентиле соответственно;  $i_{V1}$  – ток вентиля  $V_1$ ;  $i_{V2}$  – ток вентиля  $V_2$ ;  $U_{direct}$  – прямое

падение напряжения на открытом вентиле;  $T_{pulse}$  – продолжительность двухполярного импульса тока;  $B(i)$  – зависимость магнитной индукции ПМ от тока в индукторе;  $n_1$  – количество коэффициентов уравнения регрессии в выражении (4);  $K_{(2m-1)}$  – коэффициент уравнения регрессии в выражении;  $A_0$  – свободный член уравнения регрессии в выражении (4).

Измерение происходит на ниспадающем участке петли гистерезиса.

Уравнения (2) –(6) образуют математическую модель ПМ, которая реализована в среде графического программирования *LabView*, имеющей встроенные математические модули и позволяет осуществлять связь между компьютером и датчиками напряжения и тока для реализации натурно-модельного подхода к задаче технологического контроля высококоэрцитивных постоянных магнитов.

Дискретная форма представления функции  $f$ , отражающая разницу между коэффициентами вейвлетов, имеет вид:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k |C_{a_i b_j}^{model} - C_{a_i b_j}^{meas}|}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k |C_{a_i b_j}^{meas}|},$$

где  $i, j$  – числа коэффициента масштабирования  $a$  и коэффициента временного сдвига  $b$ , соответственно,  $k$  – число вейвлетов в функции преобразования,  $C^{model}$  и  $C^{meas}$  – коэффициенты вейвлетов для моделируемых и измеряемых сигналов соответственно.

В этом случае множества  $a$  и  $b$  выглядят следующим образом:

$$a = \{a_1, a_2, \dots, a_k\},$$

$$b = \{b_1, b_2, \dots, b_k\},$$

На основании всего вышесказанного, была разработана функциональная схема устройства (рис. 3).

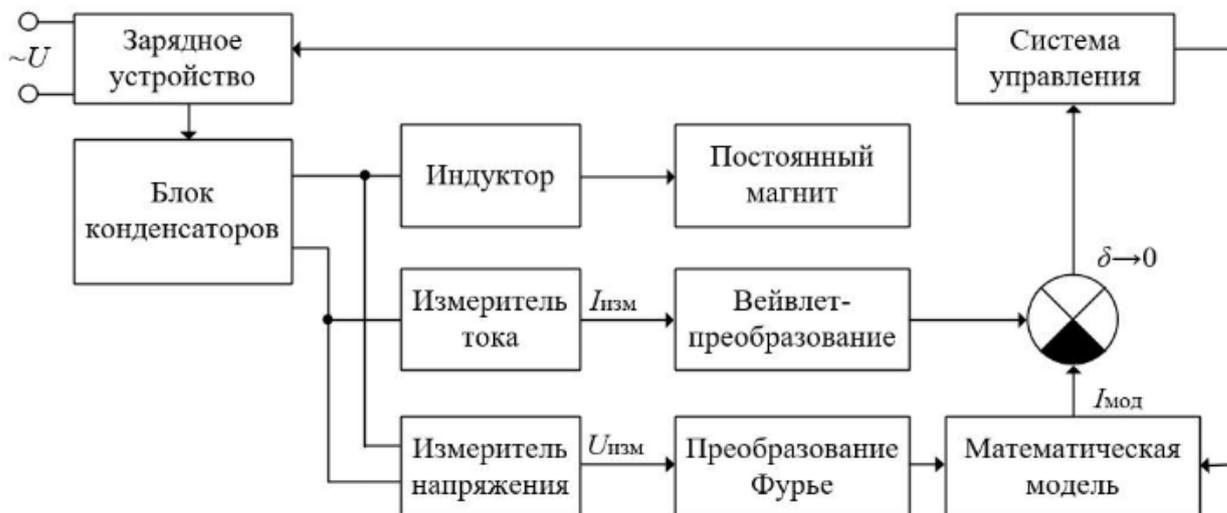


Рис.3 - Функциональная схема устройства

В основе системы лежит устройство импульсного намагничивания, в составе которого имеется батарея конденсаторов, которая заряжается от специального зарядного устройства, обычно представляющего собой повышающий трансформатор, выпрямитель и регулятор зарядного тока. Зарядное устройство подключено к сети. Процессы включения и отключения зарядного устройства от сети, заряда блока конденсаторов, разряда на индуктор, а также изменения параметров математической модели, регулируются системой управления.

Натурно-модельный метод осуществляется на основе корректировки математической модели, которая строится на основании данных с системы управления, данных, снятых измерителем напряжения ИН и измерителем тока ИТ, и преобразованных через блоки вейвлет-преобразования или преобразования Фурье. Корректируемая модель передаёт информацию на устройство сравнения, которое стремится снизить разницу между измеренным и смоделированным импульсом тока путем изменения работы системы управления до уровня установленной погрешности. Как только различие между измеренным и смоделированным током удовлетворит условию погрешности, магнитная характеристика будет найдена.

Проиллюстрируем на модели работу бестрансформаторного намагничивающего устройства, а именно - разряд конденсатора на намагничивающий индуктор, в котором находится один из двух образцов постоянных магнитов из материалов с разной характеристикой гистерезиса. Моделирование проводится в среде *Micro-Cap 12* по следующим параметрам:  $U(t)$  на ЕНЭ и  $I(t)$  на индукторе с количеством витков 450 штук. Ёмкость ЕНЭ принята равной 7,2 мФ. Электрическая схема модели показана на рис. 4.

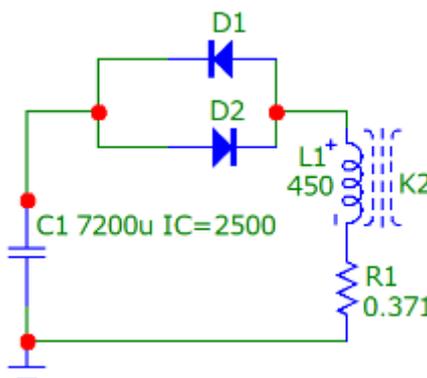


Рис.4 – Модель электрической схемы в среде *Micro-Cap 12*

Анализ переходных процессов даёт нижеследующую характеристику (рис. 5) напряжения разряда конденсатора и тока на индукторе. В верхней части рисунка изображены кривые напряжения для двух намагничиваемых материалов, а в нижней – кривые импульса тока для них же.

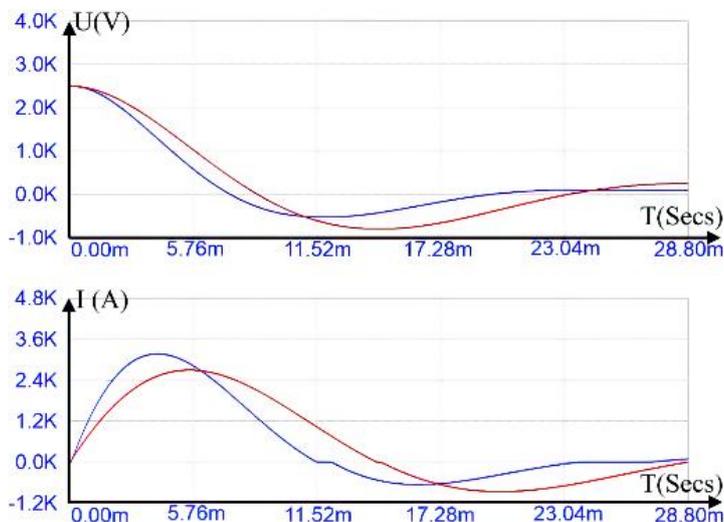


Рис.5 – Импульсы напряжения и тока

Применим вейвлет-сжатие для сигнала тока, чтобы выделить детализирующие коэффициенты. Сжатие седьмого уровня с базисной функцией Мейера обеспечивает 145 коэффициентов при сохранении формы импульса с точностью 99,73 %.

Корректировкой коэффициентов с помощью симплексного метода оптимизации Нелдера-Мида [10,11] достигается восстановление формы кривой намагничивания. Итоговым результатом работы метода является характеристика  $B(H)$  образца высококоэрцитивного постоянного магнита (рис. б), восстановленная [12-14] из измеренного импульса тока и напряжения, питающего индуктор. Полученное уравнение регрессии выглядит следующим образом:

$$B = 1,14665 + 0,815 \cdot 10^{-3} \cdot H + 0,379 \cdot 10^{-8} \cdot H^3$$

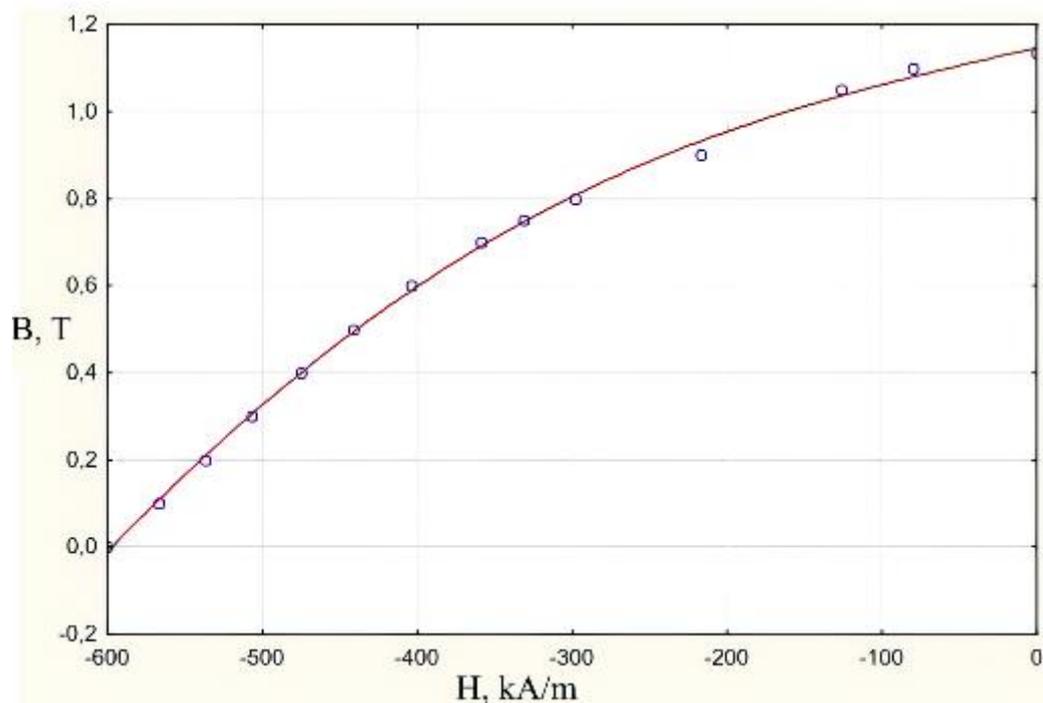


Рис. 6 – Восстановленная характеристика  $B(H)$

Мультифизическая модель магнита и индуктора построена в среде *COMSOL*. После подачи импульса напряжения мы можем выбрать

определенный временной промежуток, и увидеть, как происходит намагничивание образца магнитного материала (Рис. 7).

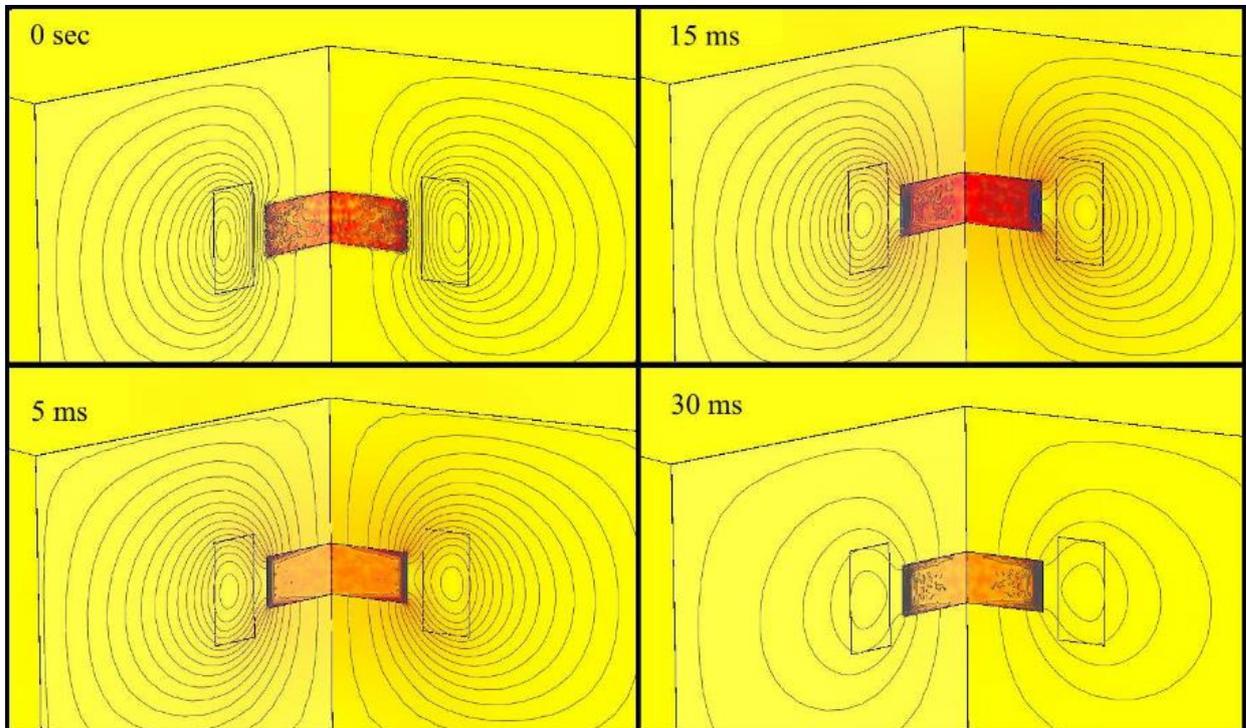


Рис.7 – Распределение индукции магнита

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: предложен метод измерения магнитных характеристик высококоэрцитивных постоянных магнитов, включающий в себя объектно-ориентированное программирование, системы симуляции электрических схем и мультифизических моделей и позволяющий восстанавливать магнитную характеристику по измеренным импульсам намагничивающего тока в намагничивающем индукторе и напряжения, приложенного к последнему.

### Литература

1. Нестерин В. А. Оборудование для импульсного намагничивания и контроля постоянных магнитов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 88 с.

2. Nesterin V. A., Andreev V. N., Nesterina A. D., Toyderiakov A. A. Pulse equipment with improved accuracy for magnetisation and measurement of magnets // Intern. XI Symp. on Micromachines and Servodrives. Malbork: Poland. 1998. V. 2. PP. 314 – 319.

3. Нестерин В. А., Тойдеряков А. А., Андреев В. Н. Импульсный коэрцитиметр с улучшенными точностными параметрами // Электротехника. 1999. № 10. С. 44 – 46.

4. Zhurkin A., Matyunina Y. and Rashevskaya M., "Application of the Short Time Fourier Transform for Calculating Electric Energy Losses under the Conditions of a Non-Sinusoidal Voltage," 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2020, PP. 230-234.

5. Yanvarev S.G., Baklanov A.N., Shepeleva A.O., "The Nelder-Mead optimization method." In the collection: Computer technologies in science, production, social and economic processes. Proceedings of the 16th International Scientific and Practical Conference dedicated to the 110th anniversary of Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) of the M.I. Platov. 2016. PP. 67-71.

6. Ланкин А.М., Ланкин М.В., Ланкин И.М. Применение метода гармонического баланса для контроля состояния постоянных магнитов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2019. № 9 (771). PP. 43-45.

7. Есаулов В.А. Итерационный метод решения системы линейных уравнений с использованием вейвлет-фильтров // Инженерный вестник Дона, 2015, № 2, ч.2. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_70\\_esaulov.pdf\\_a4fd2036ab.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_70_esaulov.pdf_a4fd2036ab.pdf)

8. Земцов А.Н., Аль-Макреби И.М. Об оценке вносимых искажений методом маркирования в низкочастотной области вейвлет-спектра изображения // Инженерный вестник Дона, 2015, № 2, ч.2. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_88\\_zemtsov.pdf\\_ee94dc3ee6.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_88_zemtsov.pdf_ee94dc3ee6.pdf)

9. Borovoy V.V., Kucher A.I., Grechikhin V.V., "Mathematical models of reconstruction of principal magnetization curve in rapid control of magnetic characteristics of electrical steel." *Metal Science and Heat Treatment*. 2018. Т. 60. № 7-8. PP. 516-521.

10. Лемешко Б.Ю. Методы оптимизации: Конспект лекций. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 126 с.

11. Baklanov A.N., Klimenko O.D., Monkin V.A., "Investigation of the method of the Nelder-Mead Algorithm." In the collection: Information and measurement systems and technologies. Collection of scientific articles based on the materials of the International Scientific and Technical Conference. 2016. PP. 178-184.

12. Lankin A.M., Lankin M.V., Lankina M.Y. Approximation of dynamic characteristics of the magnetization for electromagnets // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. 012075 p.

13. Lankin M.V., Lankin A.M. Determination of error measurement by means of the basic magnetization curve // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. 012031 p.

14. Lankin A.M., Lankin M.V. The study of the current form influence on measurement of the weber-ampere characteristics // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. 012032 p.

### References

1. Nesterin V. A. *Oborudovanie dlja impul'snogo namagnichivaniija i kontrolja postojannyh magnitov* [Devices for pulsed magnetization and control of permanent magnets]. M.: Jenergoatomizdat, 1986. 88 p.

2. Nesterin V. A., Andreev V. N., Nesterina A. D., Toyderiakov A. A. Intern. XI Symp. on Micromachines and Servodrives. Malbork: Poland. 1998. V. 2. PP. 314 – 319.

3. Nesterin V. A., Tojderjakov A. A., Andreev V. N. *Jelektrotehnika*. 1999. № 10. PP. 44 – 46.

4. Zhurkin A., Matyunina Y. and Rashevskaya M., International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2020, PP. 230-234.

5. Yanvarev S.G., Baklanov A.N., Shepeleva A.O., In the collection: Computer technologies in science, production, social and economic processes. Proceedings of the 16th International Scientific and Practical Conference dedicated to the 110th anniversary of Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) of the M.I. Platov. 2016. PP. 67-71.

6. Lankin A.M., Lankin M.V., Lankin I.M. Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov. 2019. № 9 (771). PP. 43-45.

7. Esaulov V.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, № 2, p.2 URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_70\\_esaulov.pdf\\_a4fd2036ab.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_70_esaulov.pdf_a4fd2036ab.pdf)

8. Zemcov A.N., Al'-Makrebi I.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, № 2, p.2 URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_88\\_zemtsov.pdf\\_ee94dc3ee6.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_88_zemtsov.pdf_ee94dc3ee6.pdf)

9. Borovoy V.V., Kucher A.I., Grechikhin V.V., Metal Science and Heat Treatment. 2018. T. 60. № 7-8. PP. 516-521.

10. Lemeshko B. Ju. Metody optimizacii: Konspekt lekcij [Optimization methods: Lecture notes]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2009. 126 p.

11. Baklanov A.N., Klimenko O.D., Monkin V.A., Collection of scientific articles based on the materials of the International Scientific and Technical Conference. 2016. PP. 178-184.

12. Lankin A.M., Lankin M.V., Lankina M.Y. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. 012075 p.

13. Lankin M.V., Lankin A.M. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. 012031 p.

14. Lankin A.M., Lankin M.V. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. 012032 p.