

Метод определения кривой размагничивания высококоэрцитивных постоянных магнитов

В.И. Король, М.В. Ланкин

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

Аннотация: Работа посвящена разработке нового метода определения кривой размагничивания высококоэрцитивных постоянных магнитов, например, магнитов из сплава *NeFeB*. Ожидается, что новый метод даст возможность более точно определять кривую размагничивания постоянных магнитов за счёт применения измерителей напряжения и тока вместо классических индукционных датчиков, что позволит избежать накопления ошибки, возникающей при интегрировании сигнала с индукционных датчиков. В работе подробно описан алгоритм работы нового метода определения кривой размагничивания, даны ссылки на методы и алгоритмы, применяющиеся при разработке нового метода. Метод опробован на мультифизической модели постоянного магнита и намагничивающей установки, построенной в программном пакете *COMSOL Multiphysics*.

Ключевые слова: постоянный магнит, неодимовый магнит, высококоэрцитивный материал, магнитный материал, разложение Фурье-Бесселя, аппроксимация, импульс, оптимизация, симплекс, алгоритм Нелдера-Мида, математическая модель, коэрцитивная сила, гистерезис.

Определение кривой размагничивания высококоэрцитивных постоянных магнитов является важной задачей в современной инженерии и технологии. Это связано с тем, что высококоэрцитивные магниты широко применяются в различных устройствах, включая электродвигатели, генераторы, трансформаторы, сенсоры и др.

Важность определения кривой размагничивания заключается в том, что она позволяет точно определить характеристики магнита, такие, как максимальное значение магнитной индукции, коэрцитивную силу, максимальную энергию и другие параметры, которые очень важны для эффективного использования магнитов в конкретных устройствах.

Точно измеренная кривая размагничивания может помочь в выборе подходящего типа магнита для конкретной задачи, что может повысить эффективность работы устройства и снизить его стоимость. Также метод определения кривой размагничивания может быть полезен в задаче контроля качества

производимых магнитов и обеспечения их характеристик в соответствии с требованиями заказчика.

Кроме того, результаты исследования могут быть использованы для разработки новых материалов с более высокими характеристиками, что приведет к созданию более эффективных и экономически выгодных изделий.

Классические методы подразумевают процедуру импульсного намагничивания в одновитковых индукторах с последующим перемещением образца магнита в измерительное устройство, которое обычно представляет собой импульсную установку трансформаторного или бестрансформаторного типа на основе батарей емкостных накопителей энергии [1-3], разряжающихся на индуктор, и измерительные преобразователи напряженности магнитного поля и индукции. Использование таких преобразователей увеличивает погрешность из-за накопления ошибки при операции интегрирования и усложняет обработку сигнала.

Вместо таких датчиков предлагается [4] использовать измерители напряжения и тока, что позволит на основе измеренных импульсов напряжения и тока строить математическую модель, включающую в себя параметры намагничивающей системы и постоянного магнита.

Для разработки нового метода определения магнитных характеристик, среди прочих, используются: метод гармонического баланса, метод симплекс-оптимизации Нелдера-Мида [5-7] и метод разложения функций в ряд Фурье-Бесселя [8,9]. Исследование аппроксимации функций в ряд Фурье-Бесселя в задаче измерения магнитных характеристик описано в статье [10].

Новый способ измерения характеристик постоянных магнитов, алгоритм которого показан на рис. 1, заключается в определении магнитной индукции и напряженности магнитного поля в разомкнутой цепи при воздействии на постоянный магнит импульсного двухполярного магнитного поля, создаваемого путем разряда емкостного накопителя энергии на индуктор.

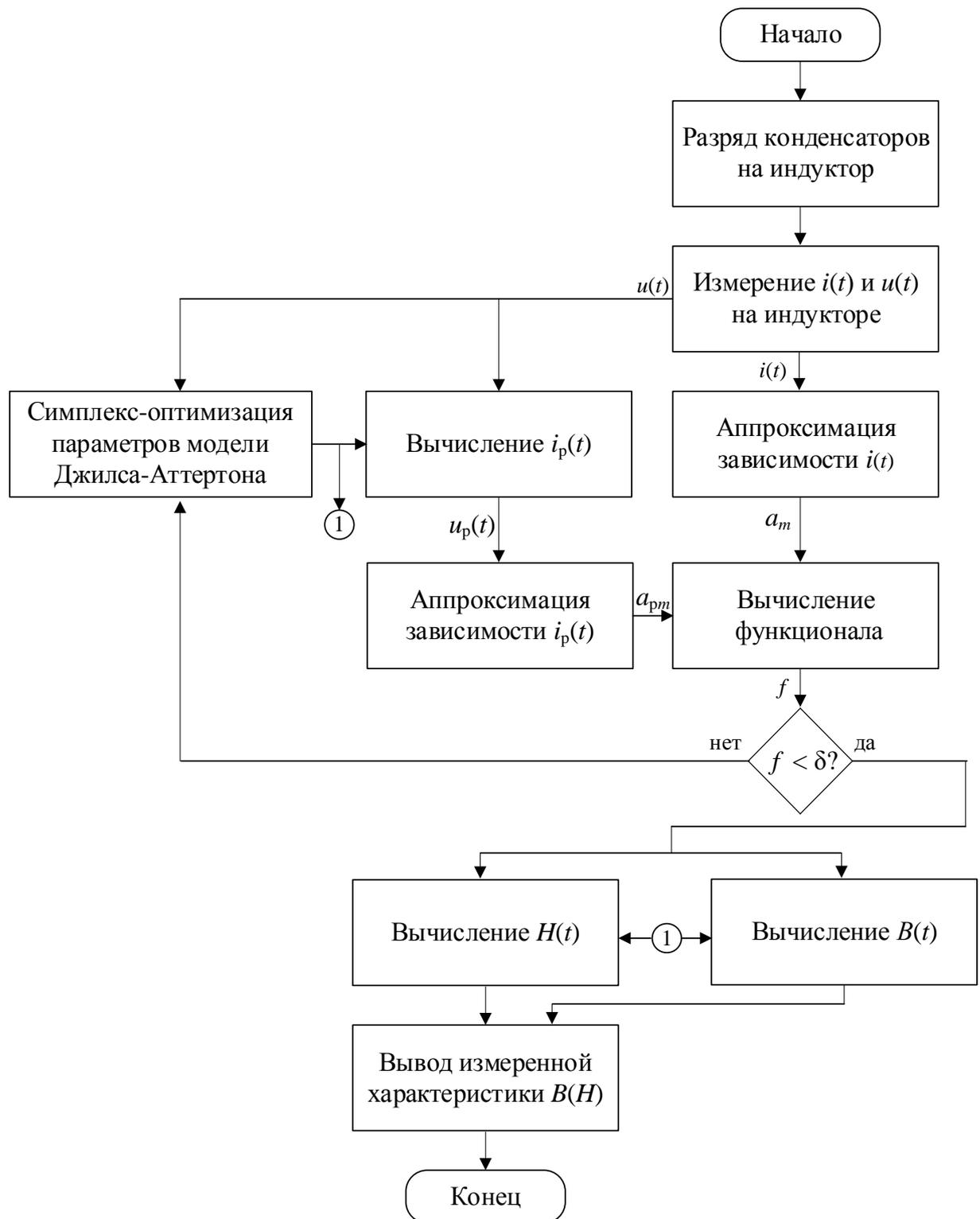


Рис. 1. – Алгоритм метода

Индуктор оснащен системой датчиков, сигналы с выхода которой оцифровывают и обрабатывают программным обеспечением с возможностью решения системы параметрических уравнений вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_e(t) = H(t) + \alpha \cdot M(t), \\ H(t) = \frac{w \cdot i(t)}{l}, \\ \frac{dM}{dH} = \frac{c}{c+1} \cdot \frac{dM_{an}}{dH} + \frac{\tilde{\delta}}{c+1} \cdot \frac{M_{an} - M}{k\delta - \alpha(M_{an} - M)}, \\ M_{an}(t) = M_s \cdot \left[\operatorname{ctg} \left(\frac{H_e(t)}{A} \right) - \frac{A}{H_e(t)} \right], \\ \delta = \operatorname{sgn}(H), \\ B(t) = \mu_0(H(t) + M(t)), \\ i_p(t) = \frac{u(t) - S \frac{dB(t)}{dt}}{R}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $H_e(t)$ – поле сил, действующих на домен ферромагнетика, учитывающего воздействие на него смежных доменов, «эффективная» напряженность магнитного поля; $H(t)$ – напряженность намагничивающего поля; α – коэффициент междоменной связи, экспериментально определяемый параметр модели Джилса-Аттертона [11]; $M(t)$ – намагниченность магнита; w – количество витков намагничивающего индуктора; $i_p(t)$ – зависимость от времени рассчитанного моделью тока; l – длина индуктора; c – постоянная упругого смещения доменных границ магнитного материала; M_{an} – безгистерезисная кривая, соответствует минимальной энергии доменов; δ – число 1 со знаком текущего значения H ; M_s – намагниченность насыщения, экспериментально определяемый параметр модели Джилса-Аттертона; A – коэффициент формы безгистерезисной кривой намагничивания; R – электрическое сопротивление намагничивающего индуктора; $u(t)$ – зависимость от времени напряжения, приложенного к индуктору; $\tilde{\delta}$ – коэффициент, исключаяющий смену знака намагниченности при достижении насыщения, определяется как

$$\tilde{\delta} = \begin{cases} 1, \{dH > 0 \cup M < M_{an}\} \cap \{dH < 0 \cup M > M_{an}\} \\ 0, \{else\} \end{cases}.$$

Вместе с тем, производится аппроксимация методом разложения в ряд Фурье-Бесселя зависимостей от времени токов: измеренного $i(t)$ и $i_p(t)$, рассчитанного системой параметрических уравнений, и определяется уровень различия между зависимостями $i_p(t)$ и $i(t)$ по неравенству

$$\frac{\sum_{y=0}^{x-1} \left| \sum_{m=1}^n \left((a_m - a_{pm}) \cdot J_0 \left(\mu_m \cdot \frac{y}{x} \right) \right) \right|}{\sum_{y=0}^{x-1} \left| \sum_{m=1}^n \left(a_m \cdot J_0 \left(\mu_m \cdot \frac{y}{x} \right) \right) \right|} \cdot 100 \leq \delta, \quad (2)$$

где n – количество учитываемых членов при разложении в ряд Фурье-Бесселя; x – количество моментов времени, в которые происходит расчёт координат точек; $J_0(t)$ – функция Бесселя нулевого порядка; μ_m – положительные нули функции Бесселя нулевого порядка, пронумерованные в порядке их возрастания от 1 до n ; δ – относительная погрешность измерения тока на индукторе, в процентах; y – номер точки; a_m и a_{pm} – коэффициенты ряда Фурье-Бесселя, получаемые в ходе разложения $i(t)$ и $i_p(t)$ с помощью выражений

$$a_m = \frac{2}{(\Delta t \cdot x)^2 \cdot J_0'(\mu_m)} \sum_{y=0}^{x-1} \left(\Delta t^2 \cdot y \cdot i_y \cdot J_0 \left(\mu_m \cdot \frac{y}{x} \right) \right),$$
$$a_{pm} = \frac{2}{(\Delta t \cdot x)^2 \cdot J_0'(\mu_m)} \sum_{y=0}^{x-1} \left(\Delta t^2 \cdot y \cdot i_{py} \cdot J_0 \left(\mu_m \cdot \frac{y}{x} \right) \right),$$

где Δt – шаг дискретизации.

Если неравенство (2) не выполняется, то с помощью симплекс-оптимизации изменяются параметры модели Джилса-Аттертона (K , α), определяющие параметры формы гистерезисной зависимости $B(H)$, и, соответственно, форму зависимости $i_p(t)$. После этого вновь определяется полученное в результате решения системы параметрических уравнений (1) напряжение $i_p(t)$, которое сравнивается с измеренным на индукторе $i(t)$.

Если же неравенство выполняется, то магнитную характеристику постоянного магнита, полученную в результате решения системы параметрических уравнений (1), считают измеренной в виде выражения $B = f(H)$, и выводят в виде графика.

Всё вышесказанное означает, что на практике, если путём корректировки параметров модели Джилса-Аттертона удаётся свести к минимуму разницу показанных на рис. 2 двух отрицательных полувольт импульсов токов – намагничивающего $i(t)$ для испытуемого магнита и произвольного импульса тока $i_p(t)$, основанного на произвольных параметрах модели Джилса-Аттертона, то искомая размагничивающая характеристика будет найдена.

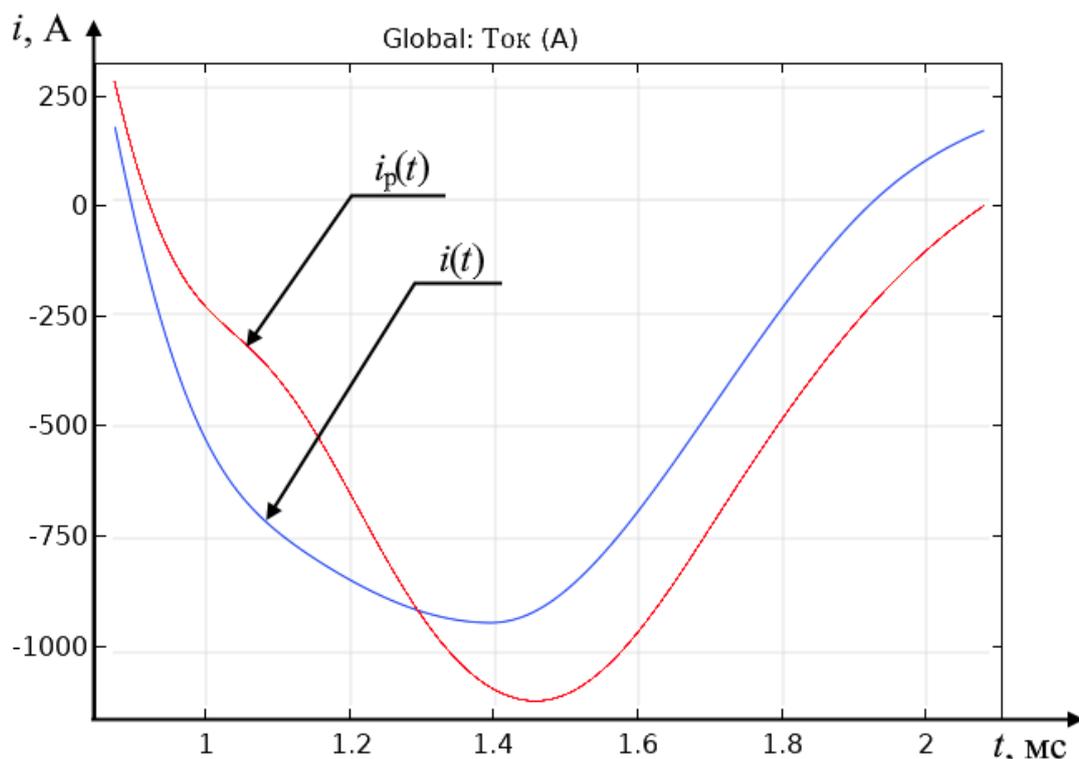


Рис. 2. – Импульсы тока $i(t)$ и $i_p(t)$

При разнице токов, показанных на рисунке 3, менее 1%, измеренная с помощью нового метода кривая размагничивания высококоэрцитивного постоянного магнита в сравнении с кривой размагничивания испытуемого магнита, выглядит так, как показано на рисунке 4.

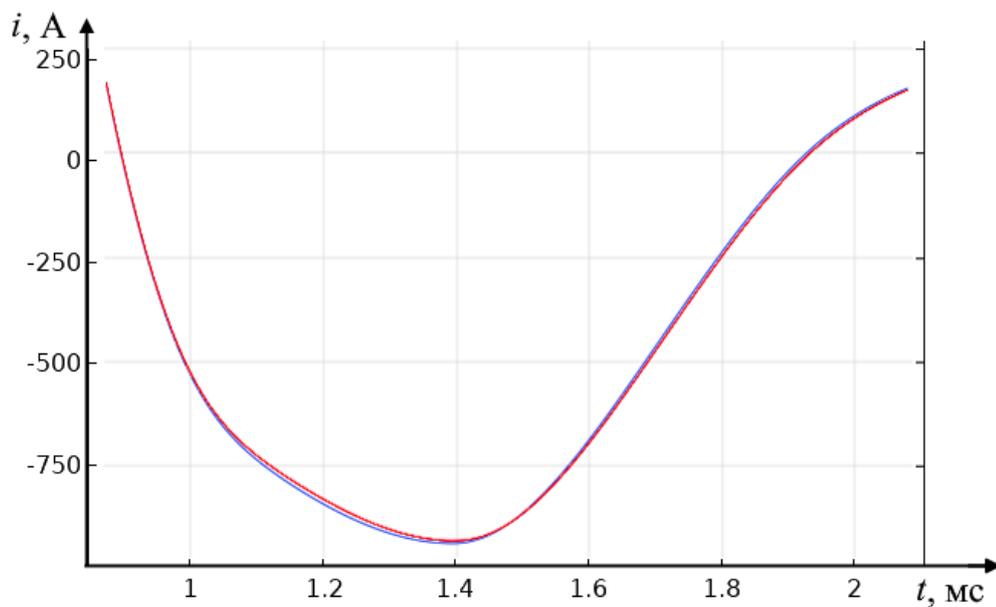


Рис. 3. – Импульсы тока $i(t)$ и $i_p(t)$ с различием менее 1%

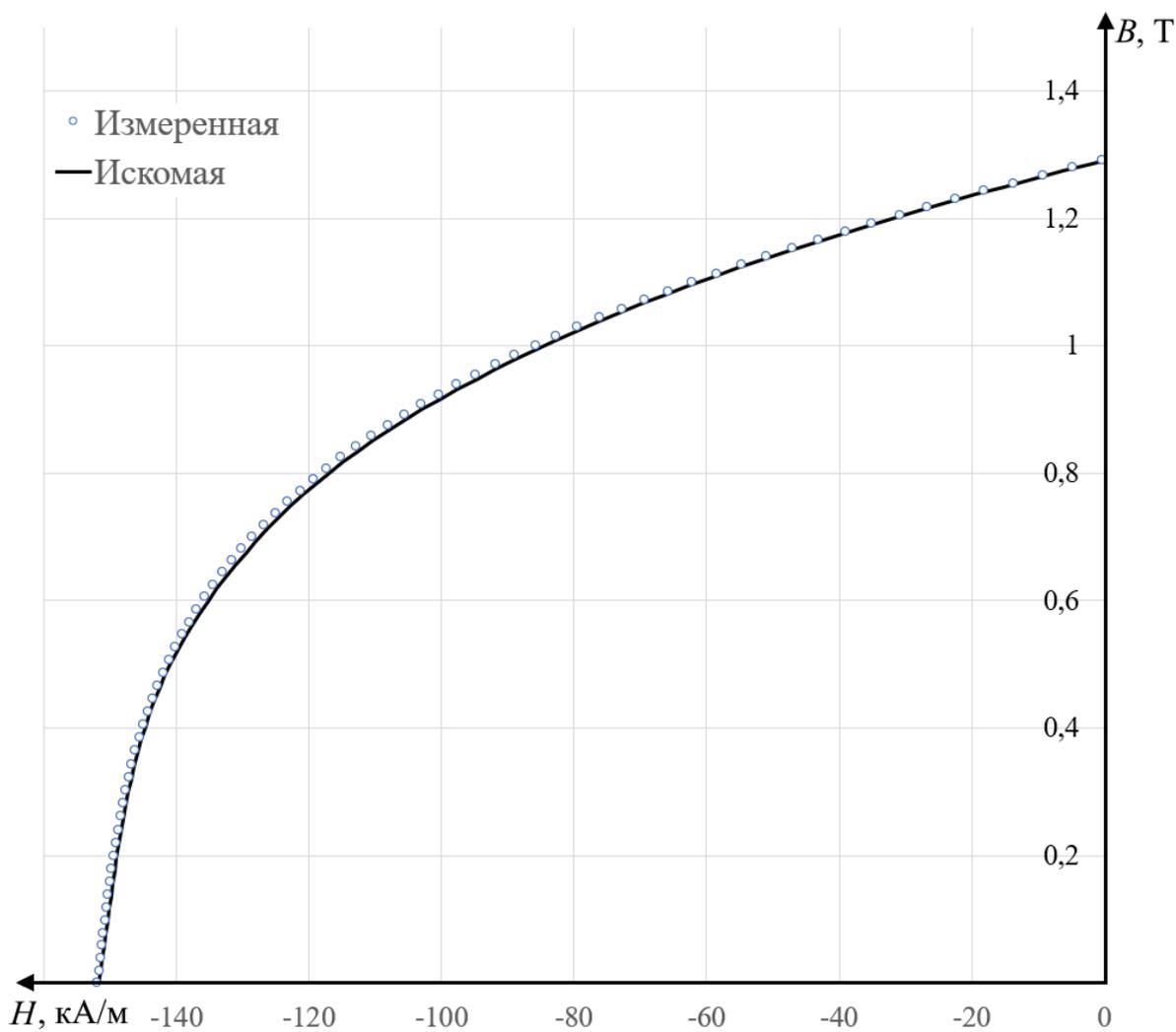


Рис. 4. – характеристики $B(H)$ – искомая и вычисленная моделью

Заключение

Таким образом, за счёт применения натурно-модельного подхода, а также использования математической модели намагничивающей установки и магнита, алгоритма симплекс-оптимизации и алгоритма разложения функций в ряд Фурье-Бесселя становится возможным отказаться от индукционных датчиков в пользу измерителей тока и напряжения, вследствие чего достигается определение кривой размагничивания высококоэрцитивного материала с большей точностью.

Работоспособность метода подтверждается исследованиями моделей в программном пакете *COMSOL Multiphysics*.

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, №10, 1999, С. 44–46.
4. Король В.И., Ланкин М.В., Ланкин А.М. Метод определения магнитных характеристик высококоэрцитивных постоянных магнитов с применением вейвлет-преобразования // Инженерный вестник Дона, 2021, № 6. URL: www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_5__6_Korol_Lankin_Lankin.pdf_41e278648c.pdf
5. Li Z., Zhan Y. “A revised stochastic Nelder-Mead algorithm for numerical optimization,” 2014 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology, 2014, pp. 821-824.
6. Yanvarev S. G., Baklanov A. N., and Shepeleva A. O., “The Nelder-Mead optimization method,” in 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.

7. Бакланов А. Н., Клименко О. Д., Менькин В. А. Исследование метода и алгоритма Нелдера-Мида / Информационные и измерительные системы и технологии: Сборник научных статей по материалам Международной научно-технической конференции, Новочеркасск, 01 февраля 2016 года. – Новочеркасск: ООО «Лик», 2016. – С. 178-184.

8. Коренев Б.Г. Введение в теорию бесселевых функций // М.: Наука, 1971. – 288 с.

9. Ляхов Л.Н., Рощупкин С.А. Полное преобразование Фурье-Бесселя некоторых основных функциональных классов. Воронеж, Научные ведомости №12, 2013, С. 85-92.

10. Король В.И., Ланкин М.В., Горбатенко Н.И. Регрессионная модель погрешностей аппроксимации кривой тока для измерения магнитных характеристик // Инженерный вестник Дона, 2022, № 7. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_1__7_Korol_Lankin_Gorbatenko__1_.pdf_7e8fd4d3a8.pdf

11. Гречихин В.В. Применение математического моделирования в задачах определения петель гистерезиса электротехнических материалов // Известия вузов. Электромеханика, 3'2010. – С. 13-18.

References

1. Nesterin V. A. Oborudovanie dlya impul'snogo namagnichivaniya i kontrolya postoyannyh magnetov [Equipment for pulsed magnetization and control of permanent magnets]. Moskva: Energoatomizdat, 1986. P. 88.

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., Toideryakov A.A., and Andreev V.N. Elektrotehnika, vol. 10, 1999, pp. 44-46.

4. Korol V.I., Lankin M.V., Lankin A.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, № 6. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_5__6_Korol_Lankin_Lankin.pdf_41e278648c.pdf



5. Li Z., Zhan Y. “A revised stochastic Nelder-Mead algorithm for numerical optimization,” 2014 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology, 2014, pp. 821-824.
6. Yanvarev S. G., Baklanov A. N., and Shepeleva A. O., “The Nelder-Mead optimization method,” in 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.
7. Baklanov A. N., Klimenko O. D., Monkin V. A. Information and measuring systems and technologies: Sbornik nauchnyh statej po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Novochoerkassk, February 01, 2016. Novochoerkassk: LLC "Lik", 2016. pp. 178-184.
8. Korenev B.G. Vvedenie v teoriyu besselevykh funkcion [Introduction to the theory of Bessel functions] Moskva: Nauka, 1971. 288 p.
9. Lyakhov L.N., Roshchupkin S.A. Nauchnye vedomosti, Voronezh, No. 12, 2013, pp. 85-92.
10. Korol V.I., Lankin M.V., Gorbatenko N.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 7, URL:ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_1__7_Korol_Lankin_Gorbatenko__1_.pdf_7e8fd4d3a8.pdf
11. Grechikhin V.V. Izvestiya vuzov. E`lektromekhanika, 3'2010. pp. 13-18.