

## Симплекс-оптимизация в задаче определения магнитных характеристик высококоэрцитивных постоянных магнитов

*В.И. Король, М.В. Ланкин*

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

**Аннотация:** Работа посвящена применению алгоритма симплекс-оптимизации в области магнитных измерений, а именно в измерении кривой размагничивания высококоэрцитивных магнитных материалов. Алгоритм нашёл своё место в реализации нового метода, основанного на натурно-модельном подходе и модели гистерезиса Джилса-Аттертона, суть которого также описана в работе. Ожидается, что новый метод даст возможность более точно определять кривую размагничивания постоянных магнитов за счёт применения измерителей напряжения тока вместо классических индукционных датчиков, что позволит избежать накопления ошибки. Алгоритм симплекс-оптимизации позволяет оптимизировать параметры модели Джилса-Аттертона таким образом, чтобы смоделированная математическая модель высококоэрцитивного магнитного материала наиболее соответствовала измеряемому магнитному материалу. Метод опробован на мультифизической модели, построенной в программном пакете *COMSOL Multiphysics*, и включает в себя расчёты индуктора и постоянного высококоэрцитивного магнита.

**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.

Высококоэрцитивные постоянные магниты отличаются тем, что они имеют очень высокие магнитные свойства (остаточную индукцию, коэрцитивную силу, энергетическое произведение) и сохраняют их на протяжении длительного времени. Поэтому они широко используются в различных устройствах, где требуется постоянное магнитное поле, например, в электромоторах, генераторах, датчиках, медицинских приборах и множестве других электротехнических устройств. Заведомо известные магнитные характеристики позволяют выбрать оптимальный высококоэрцитивный материал для конкретной технической задачи, тем самым достигается улучшение качества и увеличение эффективности производимой продукции.

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 описаны в [1-3], их недостатки, как и преимущества предлагаемого способа, описаны в статье [4]. Наиболее подробно суть предлагаемого метода изложена в реферате патента [5].

Для разработки нового метода определения магнитных характеристик, среди прочих, используются: натурно-модельный подход [6], метод симплекс-оптимизации Нелдера-Мида [7-9] и метод разложения функций в ряд Фурье-Бесселя [10-12]. Исследование аппроксимации функций в ряд Фурье-Бесселя в задаче измерения магнитных характеристик описано в статье [13].

Рассмотрим работу симплекс-оптимизации на конкретном примере, задавшись погрешностью определения характеристики тока  $\delta = 1\%$ .

Допустим, искомый магнитный материал обладает следующими корректируемыми параметрами модели Джилса-Аттертона [14]: постоянная необратимой деформации доменных стенок  $K = 178$  кА/м; коэффициент, определяющий междоменную связь в магнитном материале,  $\alpha = 0,25$ ; характеристика  $B(H)$  показана на рис. 1.

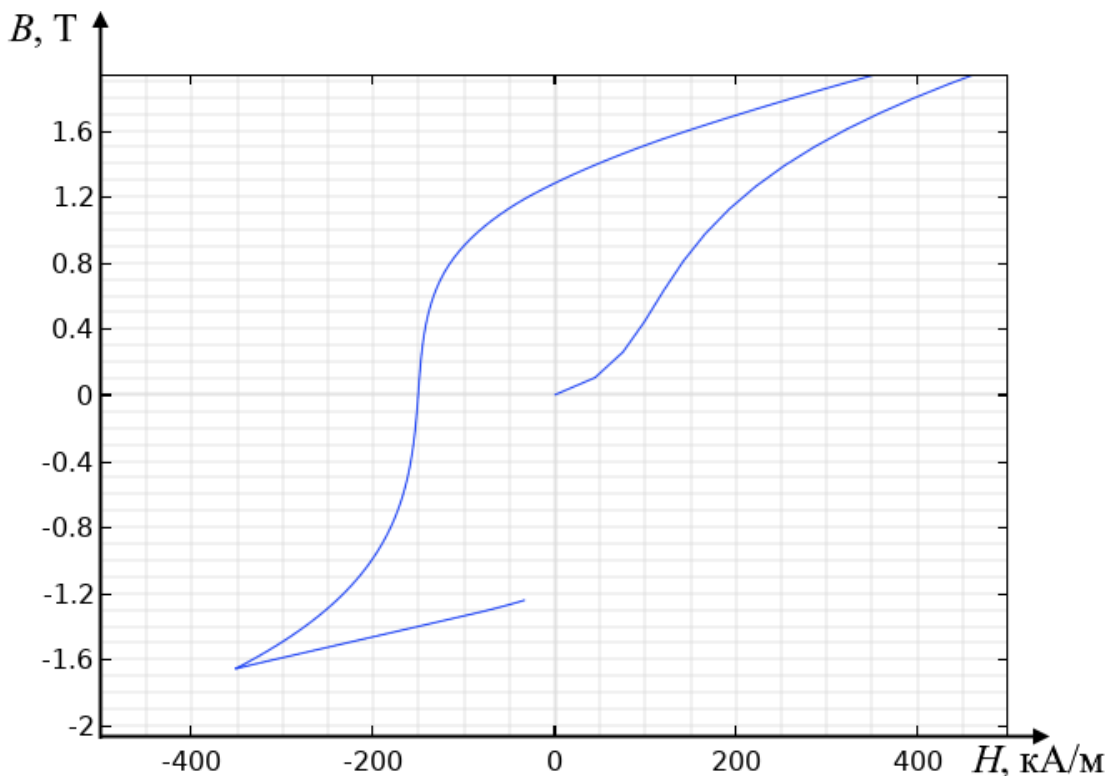


Рис.1 – Характеристика  $B(H)$  искомого магнита

Измерим отрицательную полуволну намагничивающего импульса тока  $i(t)$  для искомого магнита. Теперь зададимся произвольными параметрами  $K$  и  $\alpha$  в математической модели, допустим,  $K = 53$  кА/м,  $\alpha = 0,21$ , и для магнита с произвольными параметрами получим рассчитанный намагничивающий импульс тока  $i_p(t)$ . Импульсы тока  $i(t)$  и  $i_p(t)$  показаны на рис. 2.

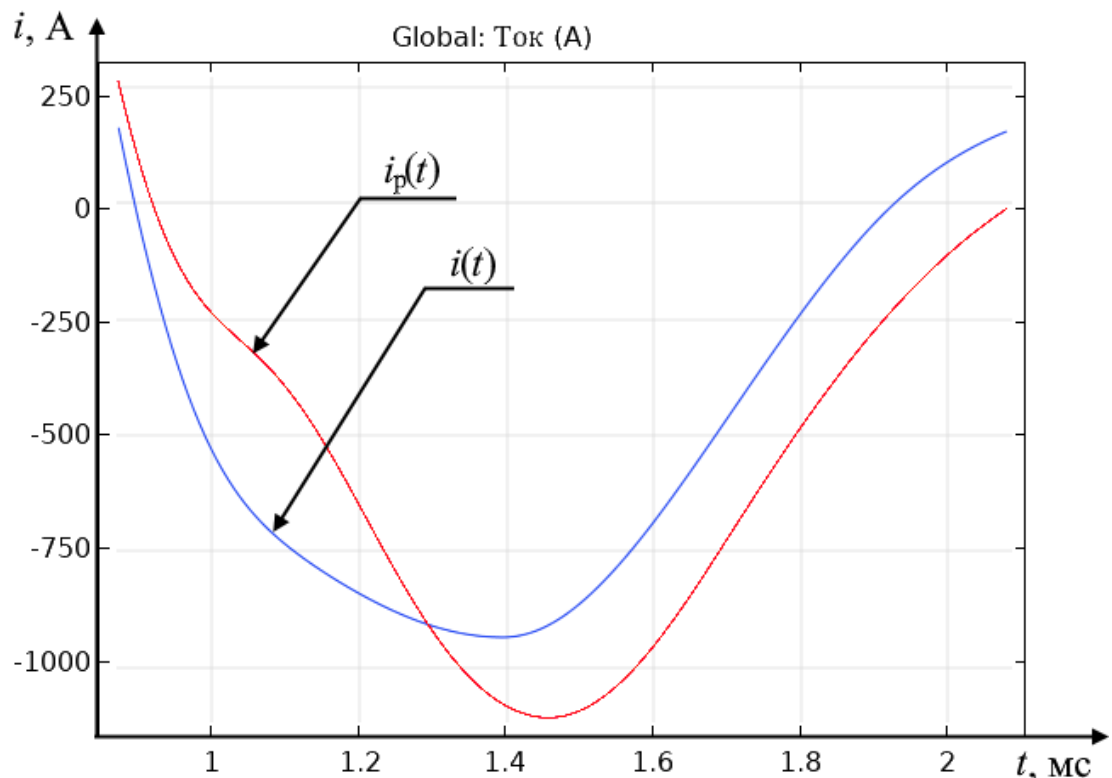


Рис. 2 – Отрицательная полуволна импульсов тока  $i(t)$  и  $i_p(t)$

Теперь, с помощью описанного в [11] алгоритма разложения характеристик в ряд Фурье-Бесселя, обработаем сигналы токов и найдём численное различие между ними. Для этих двух импульсов различие составляет более 35%, что значительно больше заданной погрешности  $\delta = 1\%$ .

На этом этапе вступает в работу симплекс оптимизация, которая вокруг произвольно заданной точки генерирует комбинацию из трёх точек с координатами  $(K_1; \alpha_1)$ ,  $(K_2; \alpha_2)$ ,  $(K_3; \alpha_3)$ , образующих треугольник. В каждой точке рассчитывается импульс тока  $i_p(t)$ , который сравнивается с измеренным  $i(t)$ , что даёт три показателя различия, каждый из которых соответствует своей вершине треугольника. Для того, чтобы алгоритм мог стремиться к сниже-

нию различия между токами, задаётся вектор движения параметров  $K$  и  $\alpha$  путём назначения каждой из трёх сгенерированных точек качественного параметра. Точка, показывающая минимальное различие токов, является «лучшей», максимальное – «худшей», и оставшаяся точка является «хорошей». Задача симплекс-оптимизации состоит в том, чтобы на каждой итерации избавляться от «худшей» точки путём преобразования треугольника следующими операциями: отражение «худшей» точки, растяжение отраженной точки, сжатие отраженной точки и глобальное сокращение симплекса. Преобразование треугольника происходит до тех пор, пока в новой сгенерированной точке различие между импульсами не окажется меньше заданной погрешности  $\delta = 1\%$ .

Движение симплекса в пространстве параметров модели Джилса-Аттертона показано на рис. 3. Отдельно стоящей точкой указаны искомые координаты  $K = 53$  кА/м,  $\alpha = 0,21$ .

Координаты вершин симплексов, различие характеристик токов в соответствии с этими координатами, а также вид деформации симплекса, указаны в таблице 1.

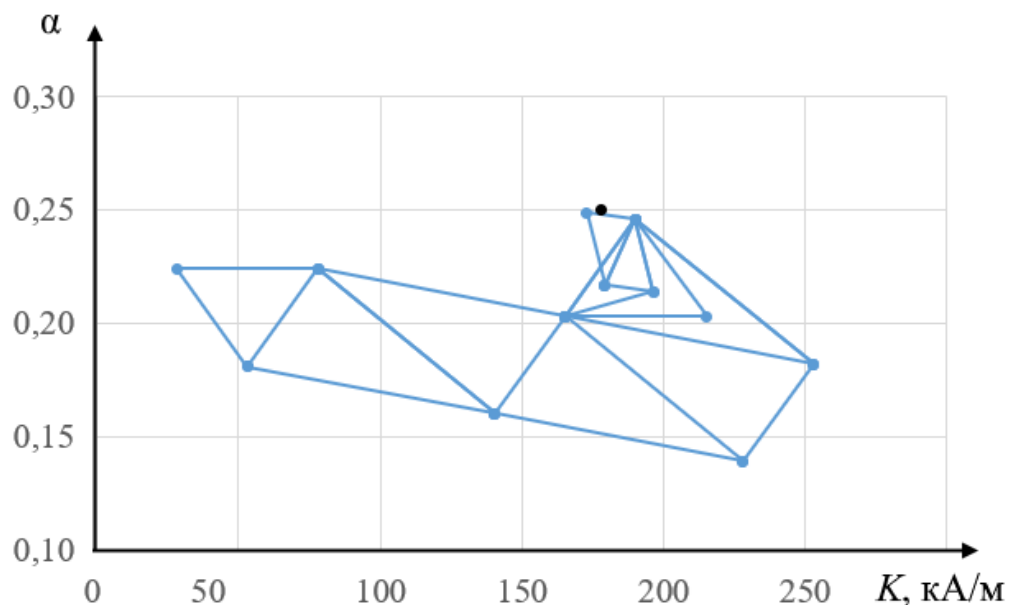


Рис. 3 – Движение симплекса.

Таблица №1

Координаты движения симплекса

№ симпл.	1			2			3		
$K$ , кА/м	78,000	28,00	53,00	140,50	53,00	78,000	140,50	78,00	140,50
$\alpha$	0,224	0,224	0,181	0,160	0,181	0,224	0,160	0,224	0,160
$F$	28,935	45,194	33,950	13,588	33,950	28,935	13,588	28,935	13,588
Операция	растяжение			отражение			отражение		
№ симпл.	4			5			6		
$K$ , кА/м	140,50	228,00	165,50	228,00	253,00	165,50	165,50	190,00	253,00
$\alpha$	0,160	0,139	0,203	0,139	0,182	0,203	0,203	0,246	0,182
$F$	13,588	12,053	6,332	12,053	11,750	6,332	6,332	3,676	11,750
Операция	отражение			отражение			отражение		
№ симпл.	7			8			9		
$K$ , кА/м	253,00	190,00	215,37	196,56	190,00	165,50	179,39	190,00	196,56
$\alpha$	0,182	0,246	0,203	0,214	0,246	0,203	0,217	0,246	0,214
$F$	11,750	3,676	7,350	4,932	3,676	6,332	3,636	3,676	4,932
Операция	сжатие			сжатие			отражение		
№ симпл.	10								
$K$ , кА/м	179,39	190,00	<b>172,83</b>						
$\alpha$	0,217	0,246	<b>0,249</b>						
$F$	3,636	3,676	<b>0,941</b>						
Операция	результат								

На последней, десятой, итерации различие токов составляет 0,941%, что удовлетворяет условию погрешности. На рисунке 4 показаны импульсы тока, полученные при рассчитанных и искомым параметрах  $K$  и  $\alpha$ .

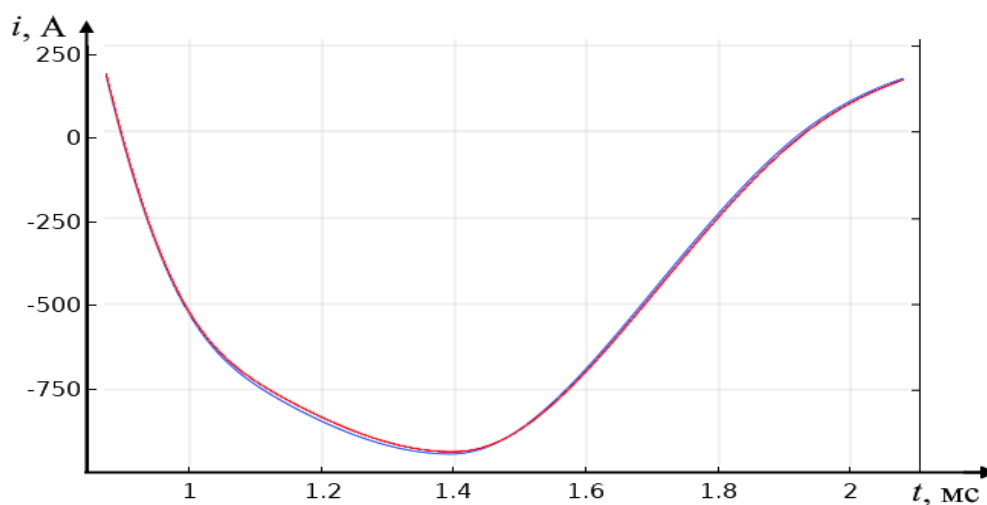


Рис. 4 – Импульсы тока – измеренный и смоделированный

На рисунке 5 показано сравнение характеристик  $B(H)$  искомого и рассчитанного материалов во втором квадранте петли гистерезиса.

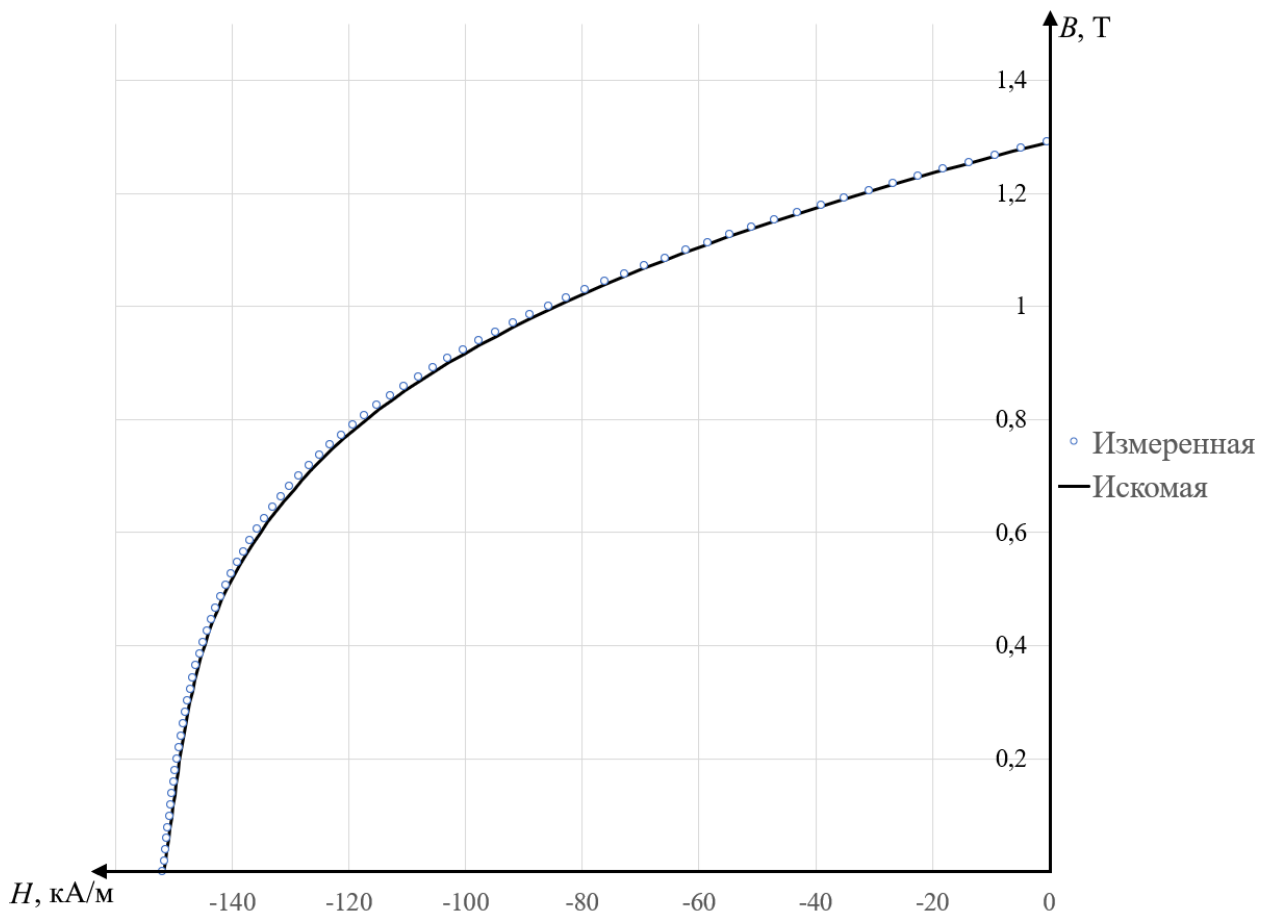


Рис. 5 – характеристики  $B(H)$  – искомая и вычисленная моделью

### Заключение

Таким образом, за счёт применения натурно-модельного подхода, 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. Симплекс-оптимизация показала себя в данной задаче, как точное и гибкое средство минимизации по погрешности. Работоспособность метода подтверждается исследованиями моделей в 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: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_5\\_\\_6\\_Korol\\_Lankin\\_Lankin.pdf\\_41e278648c.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_5__6_Korol_Lankin_Lankin.pdf_41e278648c.pdf) 3
5. Король В.И., Ланкин М.В. Способ измерения ВН-характеристик постоянных магнитов. Патент на изобретение RU2793154C1, Бюл. №10, 2023. – 12 с.
6. Lankin A. M., Lankin M. V., and Lankin I. M., “Use of the method of harmonic balance for controlling the condition of permanent magnets,” *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 61, no. 9-10, 2020, pp. 569-571.
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. 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.
9. 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 16<sup>th</sup> International Scientific and Practical*

Conference Dedicated to the 110<sup>th</sup> Anniversary of Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) of the M.I. Platov, 2016, pp. 67–71.

10. Зубов В.И. Функции Бесселя // Учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2007. – С. 40.

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

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

13. 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](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_1__7_Korol_Lankin_Gorbatenko__1_.pdf_7e8fd4d3a8.pdf)

14. Гречихин В.В. Применение математического моделирования в задачах определения петель гистерезиса электротехнических материалов // Известия вузов. Электромеханика, 2010. №3. – 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. Elektrotekhnika, 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](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_5__6_Korol_Lankin_Lankin.pdf_41e278648c.pdf)



5. Korol V.I., Lankin M.V. Sposob izmereniya VN-xarakteristik postoyanny`x magnitov. [A method for measuring the BH-characteristics of permanent magnets]. Patent RU2793154C1, 2023. 12 p.
  6. Lankin A. M., Lankin M. V., and Lankin I. M. Metal Science and Heat Treatment, vol. 61, № 9-10, 2020, pp. 569-571.
  7. Baklanov A. N., Klimenko O. D., Monkin V. A. Sbornik nauchnyh statej po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii. Novoчеркаск, February 01, 2016. LLC "Lik", 2016. pp. 178-184.
  8. Li Z., Zhan Y. A revised stochastic Nelder-Mead algorithm for numerical optimization, 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology, 2014, pp. 821-824.
  9. Yanvarev S. G., Baklanov A. N., and Shepeleva A. O., Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 110<sup>th</sup> Anniversary of Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) of the M.I. Platov, 2016, pp. 67-71.
  10. Zubov V.I. Funkcii Besselya [Bessel functions] Uchebno-metodicheskoe posobie. Moskva: MFTI, 2007. P. 40.
  11. Korenev B.G. Vvedenie v teoriyu besselevykh funkciy [Introduction to the theory of Bessel functions] Moskva: Nauka, 1971. 288 p.
  12. Lyakhov L.N., Roshchupkin S.A. Nauchnye vedomosti, Voronezh, 2013, № 12, pp. 85-92.
  13. 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](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_1__7_Korol_Lankin_Gorbatenko__1_.pdf_7e8fd4d3a8.pdf)
  14. Grechixin V.V. Izvestiya vuzov. E`lektromekhanika, 2010. №3. pp. 13-18.
-