

Устройство определения магнитных характеристик ферромагнитных материалов с эффектом памяти формы

*М.С. Чумаков, И.О. Блажко, А.И. Киллер, П.В. Кременской, О.Р. Сторчак,
Д.В. Шахов*

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М. И. Платова, Новочеркасск*

Аннотация: В данной статье рассмотрена одна из частей разработки устройства определения магнитных характеристик ферромагнитных материалов с эффектом памяти формы. Разработана функциональная схема устройства. Проведено моделирование работы устройства и исследование поведения сплава с эффектом памяти формы. Погрешность определения магнитной характеристики ФМПФ с использованием намагничивающей установки разрабатываемого устройства не превысила 0,25 %.

Ключевые слова: магнитоотрицательные материалы, основная кривая намагничивания, магнитный шунт, магнитный поток.

Перспективным направлением развития технических систем является использование интеллектуальных материалов в измерительных и исполнительных устройствах [1, 2]. Их разработка несет огромный потенциал для развития различных отраслей промышленности, медицины, нанотехнологий и прочих не менее важных направлений. Для создания эффективных устройств на основе ферромагнитных материалов необходимо исследовать их магнитные свойства [3, 4].

Разработана функциональная схема устройства определения магнитных характеристик ферромагнитных материалов с эффектом памяти формы (рисунок 1). Она включает: управляемый источник тока; намагничивающую катушку; образец исследования; датчик индукции (катушка); первый и второй масштабирующие усилители; интегратор; датчик напряженности R ; мультиплексор; АЦП – аналого- цифровой преобразователь; УС – узел связи с ЭВМ; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь. Управляемый источник тока под управлением сигнала, поступающего с выхода ЭВМ и преобразуемый ЦАП, создает в намагничивающей катушке форму и импульсы тока, обеспечивающие перемещение исследуемого образца по

основной кривой намагничивания.

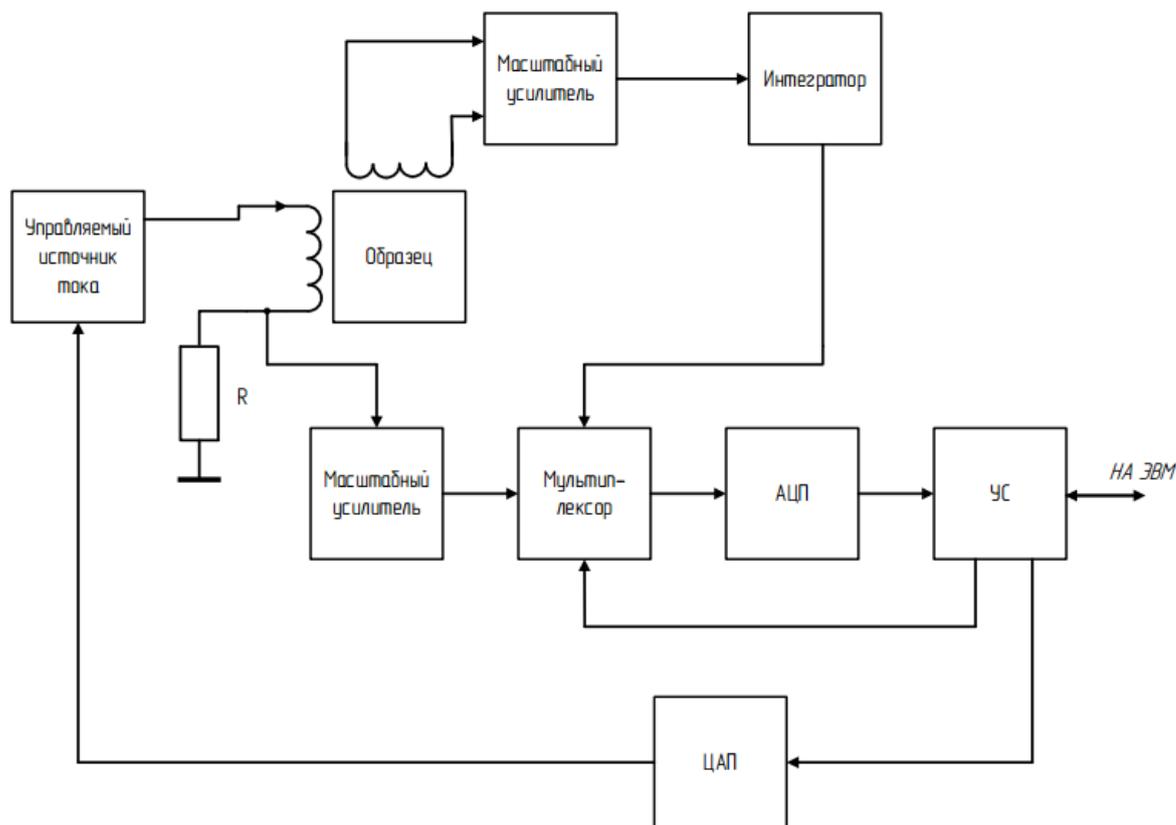


Рисунок 1. Функциональная схема устройства

При этом на выходе датчика индукции, представляющей собой измерительную катушку, нанесенную на полюс намагничивающей системы, индуцируется напряжение, пропорциональное скорости изменения магнитной индукции в полюсе. Это напряжение после усиления первым масштабным усилителем, интегрируется и подается на первый вход мультиплексора. Сигналы с датчика напряженности магнитного поля, в качестве которого выступает шунт R , усиливаются вторым масштабным усилителем и подаются на второй вход мультиплексора. С выхода мультиплексора сигналы, преобразованные АЦП в цифровой код, поступают на узел связи ЭВМ.

Проведено моделирование работы устройства и исследование поведения сплава с эффектом памяти [5, 6]. Намагничивающая установка представляет собой электромагнит, содержащий магнитопровод 1 с

намагничивающей катушкой 2 и немагнитным зазором 3, в который помещается образец (рис. 2). Эскиз электромагнита приведен на рис. 3.

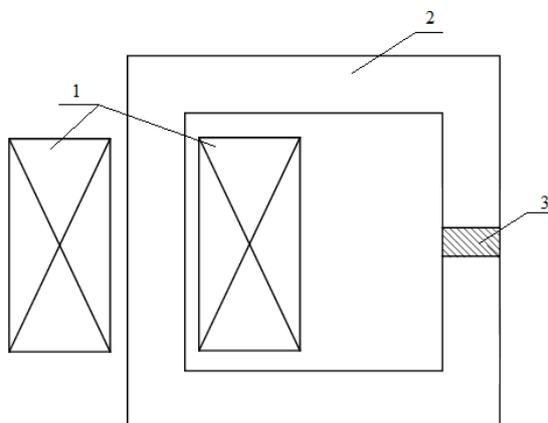


Рисунок 2. Намагничивающая установка

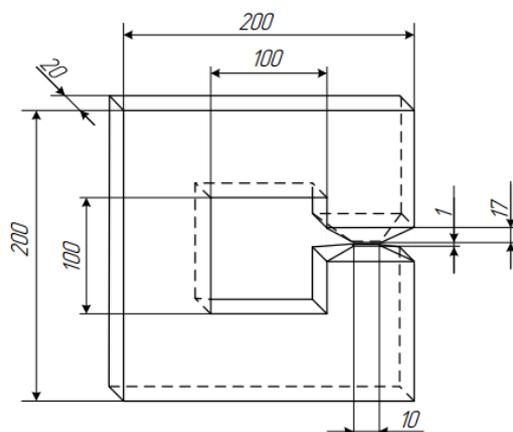


Рисунок 3. Эскиз электромагнита с геометрическими размерами

Выполнялось моделирование намагничивающей установки с помощью пакета моделирования *COMSOL Multiphysics*. Была построена 3D-модель электромагнита с образцом ФМПФ, помещенным в зазор (рисунок 4).

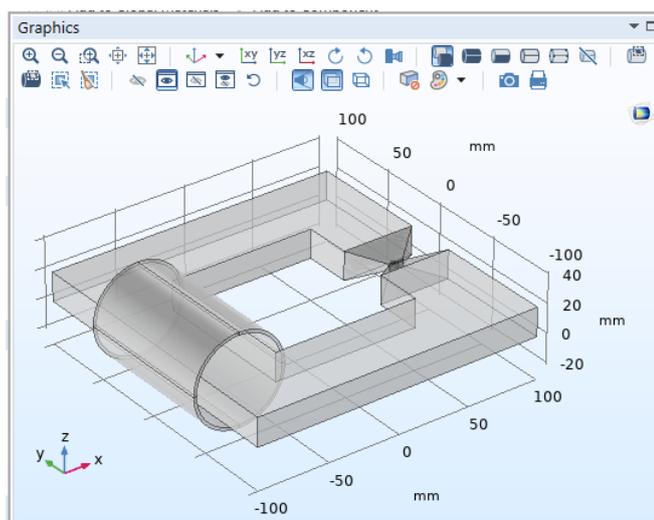


Рисунок 4. 3D-модель электромагнита

Результаты моделирования и распределение магнитной индукции в намагничивающей установке с помещенным в зазор ферромагнитным материалом с эффектом памяти представлены на рис. 5. Значения магнитной индукции и напряженности поля в зазоре приведены на рис. 6 и 7. Среднее время получения расчета значения данных параметров составляет примерно от 20 минут до 1,5 часа, из-за большой размерности вычисления и количества дифференциальных уравнений методом конечных элементов.

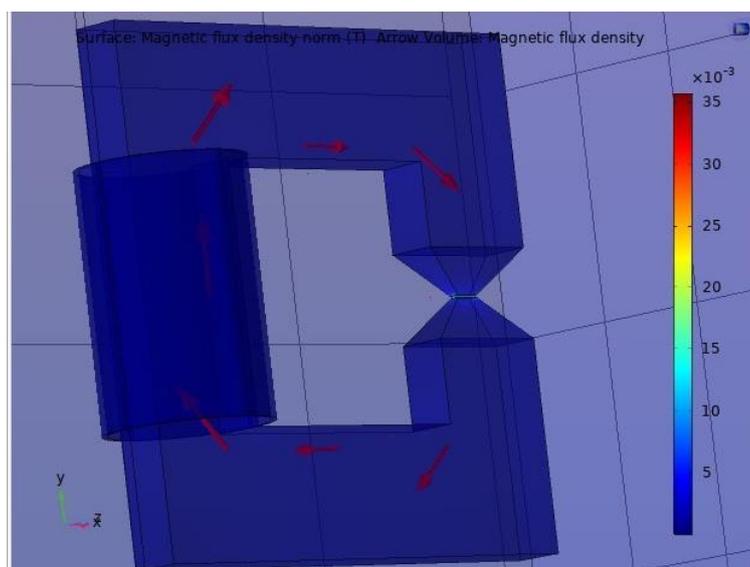


Рисунок 5. 3D-модель электромагнита

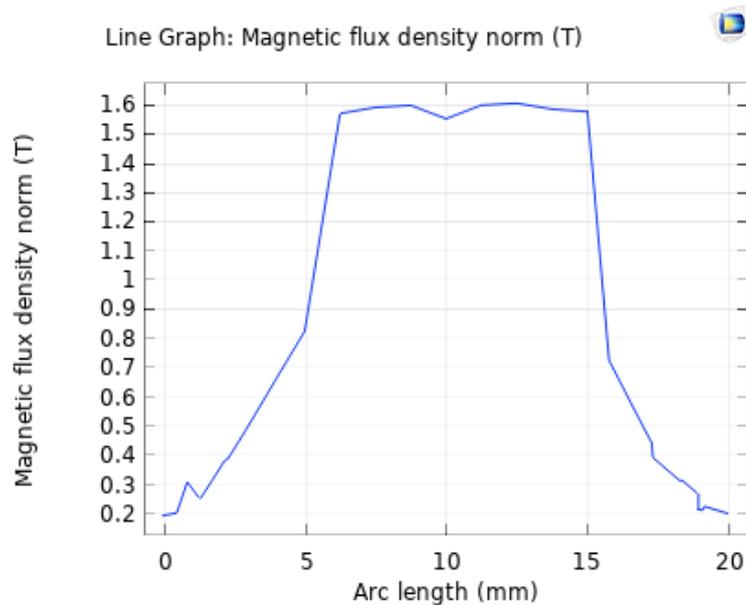


Рисунок 6. График зависимости магнитной индукции от расстояния на линии измерения

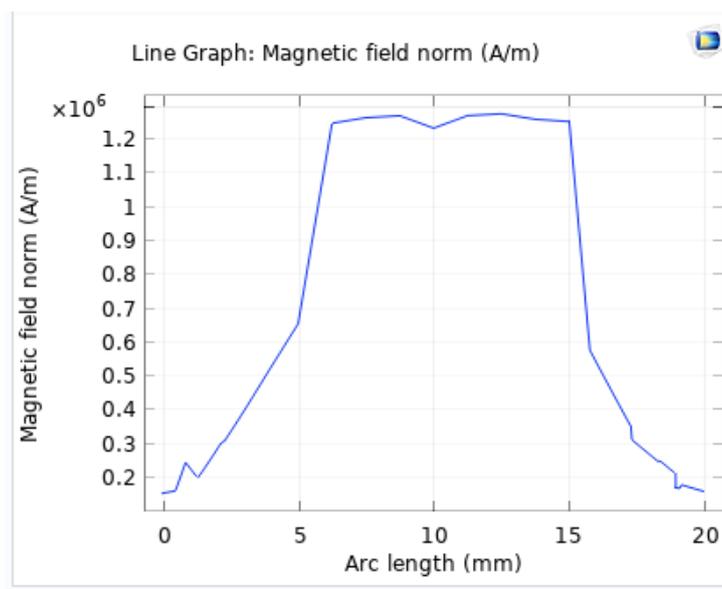


Рисунок 7. График зависимости напряженности поля от расстояния на линии измерения

Напряженность поля в воздушном зазоре составила, при максимальной силе тока $I = 7$ А и количестве витков $w = 200$, были $H = 1310$ кА/м и магнитная индукция $B = 1,65$ Тл. Необходимое значение напряженности было достигнуто, модель является верной [7, 8]. В результате проведения моделирования, получили магнитную характеристику ФМПФ – основную кривую намагничивания $B(H)$ [9, 10]. Сравним полученную характеристику с действительной характеристикой (рисунок 8).

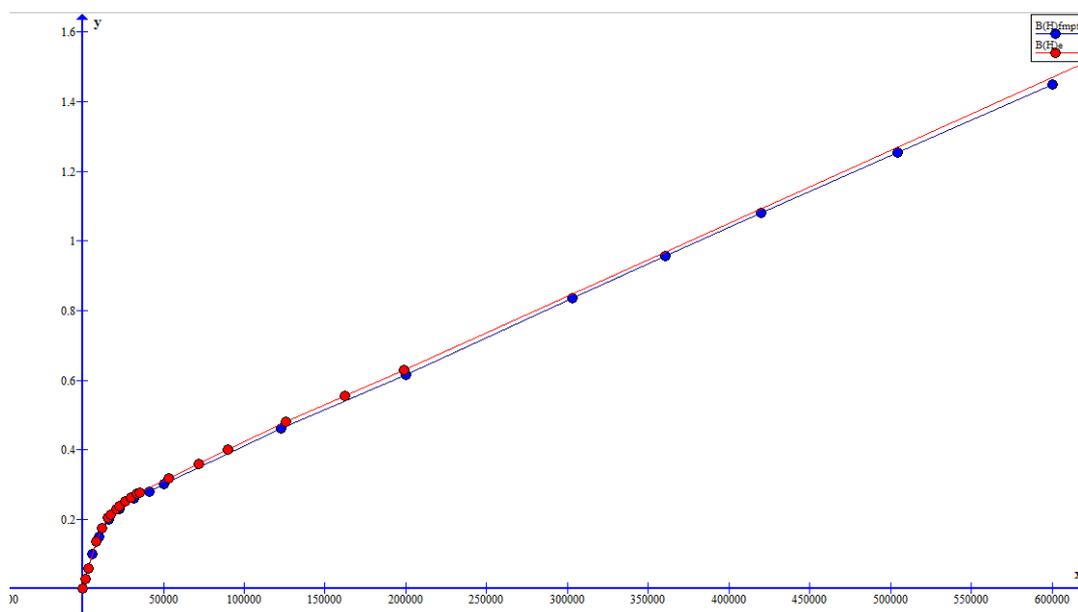


Рисунок 8. Характеристики кривых $B-H$ ферромагнитного материала с эффектом памяти

$$B_k = 0,628 \text{ Тл}; \Delta B_k = |0,628 - 0,6122| = 0,0158 \text{ Тл};$$

$$H_k = 0,628 \text{ А/м}; \Delta H_k = |0,628 - 0,6122| = 0,0158 \text{ А/м};$$

Погрешность средства измерения будет равна:

$$\delta_k = \frac{0,0158 \cdot 412}{0,628 \cdot 198610} \cdot 100\% = 0,002067 \cdot 100\% = 0,2067 \%$$

$$\sqrt{\left(\frac{412}{198610}\right)^2 + \left(\frac{0,0158}{0,628}\right)^2}$$

Таким образом погрешность определения магнитной характеристики ФМПФ с использованием намагничивающей установки разрабатываемого устройства не превышает 0,25 %.

Литература

1. Шихин А. Я. Автоматические магнитоизмерительные системы. – М.: Энергия, 1977. – 136 с.
2. Уорден К., Новые интеллектуальные материалы и конструкции. Свойства и применение. – М.: Техносфера, 2006. – 224 с.
3. Li J., Dong S., Yue W., Yuan Z., Xiao Z., Lyu Y. Wang T., Li C., Wang C., Xu W., Dong Y., Wang H., Wu P., Kwok W., Wang Y. Tailoring

magnetization reversal of a single-domain bar nanomagnet via its end geometry. *AIP Advances* 11, 045010 (2021), pp. 1-6.

4. Тиунов В. Ф. О влиянии неоднородности перемагничивания анизотропной электротехнической стали Fe–3% Si на магнитные потери во вращающихся магнитных полях // *Физика металлов и металловедение*. – 2018. – Т. 119. – № 9. – С. 876-881.

5. Горбатенко Н.И., Гречихин В.В., Ланкин М.В., Ланкин А.М. Определение вебер-амперных характеристик электротехнических устройств методом натурно-модельного эксперимента. *Измерительная техника*. 2016. № 7. С. 45-48.

6. Гречихин В.В., Январёв С.Г., Лозин О.И., Шайхутдинов Д.В., Методика метрологической оценки степени достоверности результатов натурно-модельных испытаний исполнительных систем на основе материалов с памятью формы. // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 5. URL: science-education.ru/ru/article/view?id=15240.

7. Буль О.Б., Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 336 с.

8. Клюев В.В., Мужижкий В.Ф., Горкунов Э.С., Щербинин В.Е. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: Магнитные методы контроля. – М.: Машиностроение, 2006. – С. 30-36.

9. Khodayari-Rostamabad A., Reilly J. P., Nikolova N. K., Hare J. R., Pasha S. Machine Learning Techniques for the Analysis of Magnetic Flux Leakage Images in Pipeline Inspection. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 8, 2009, pp. 3073-3084.

10. Yoo J., Kikuchi N., Volakis J. L. Structural optimization in magnetic devices by the homogenization design method. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 36, no. 3, 2000, pp. 574-580.

References

1. Shihin A. Ja. Avtomaticheskie magnitoizmeritel'nye sistemy [Automatic magneto-measuring systems]. M.: Jenergija, 1977. 136 p.

2. Uorden K., Novye intellektual'nye materialy i konstrukcii. Svoystva i primenenie [New intellectual materials and designs. Properties and applications]. M.: Tehnosfera, 2006. 224 p.

3. Li J., Dong S., Yue W., Yuan Z., Xiao Z., Lyu Y. Wang T., Li C., Wang C., Xu W., Dong Y., Wang H., Wu P., Kwok W., Wang Y. AIP Advances 11, 045010 (2021), pp. 1-6.

4. Tiunov V. F. Fizika metallov i metallovedenie. 2018. T. 119. № 9. pp. 876-881.

5. Gorbatenko N.I., Grechihin V.V., Lankin M.V., Lankin A.M. Izmeritel'naja tehnika. 2016. № 7. pp. 45-48.

6. Grechihin V.V., Janvarjov S.G., Lozin O.I., Shajhutdinov D.V., Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2014. № 5. URL: science-education.ru/ru/article/view?id=15240

7. Bul' O.B. Metody rascheta magnitnyh sistem jelektricheskikh apparatov: Magnitnye cepi, polja i programma FEMM [Methods for calculating the magnetic systems of electrical devices: Magnetic circuits, fields and the FEMM software]. M.: Izdatel'skij centr «Akademija», 2005. 336 p.

8. Kljuev V.V., Muzhickij V.F., Gorkunov Je.S., Shherbinin V.E. Nerazrushajushhij kontrol': Spravochnik: V 8 t. T. 6: V 3 kn. Kn. 1: Magnitnye metody kontrolja [Non-destructive testing: Handbook: In 8 volumes. Vol. 6: In 3 books. Book. 1: Magnetic control methods]. M.: Mashinostroenie, 2006. pp. 30-36.



9. Khodayari-Rostamabad A., Reilly J. P., Nikolova N. K., Hare J. R., Pasha S. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 8, 2009, pp. 3073-3084.
10. Yoo J., Kikuchi N., Volakis J. L. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 36, no. 3, 2000, pp. 574-580.