

УДК 621.318.1
doi:10.21685/2307-5538-2022-4-8

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАНАЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е. А. Печерская¹, Д. Е. Тузова², П. Е. Голубков³

^{1,2,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹pea1@list.ru, ²diana.tuzova.02@bk.ru, ³dmitrartamon@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются измерительные каналы магнитной индукции и напряженности магнитного поля, входящие в состав программно-аппаратного комплекса для измерения параметров магнитных материалов. Предметом исследования являются метрологические характеристики каналов измерения параметров магнитных материалов, с целью улучшения которых в работе выполнен функциональный и метрологический анализ измерительных каналов. Цель работы – улучшение метрологических характеристик измерения параметров магнитных материалов. *Материалы и методы.* Рассмотрена структура программно-аппаратного комплекса для исследования параметров магнитных материалов с целью проведения функционального и метрологического анализа измерительных каналов магнитной индукции и напряженности магнитного поля. *Результаты.* Разработаны структурные и функциональные метрологические модели измерительных каналов магнитной индукции и напряженности магнитного поля. *Выводы.* Получены аналитические выражения и модели преобразования измерительных каналов. Модели имеют ограничения (потери на перемагничивание, нагрев магнитопровода), устранение которых является объектом дальнейших исследований.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс, функциональный и метрологический анализ измерительных каналов, измерения параметров магнитных материалов, модели преобразования измерительных каналов

Для цитирования: Печерская Е. А., Тузова Д. Е., Голубков П. Е. Функциональный и метрологический анализ каналов измерения параметров магнитных материалов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 58–63. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-8

FUNCTIONAL AND METROLOGICAL ANALYSIS OF MEASURING CHANNELS OF MAGNETIC MATERIALS PARAMETERS

E.A. Pecherskaya¹, D.E. Tuzova², P.E. Golubkov³

^{1,2,3} Penza State University, Penza, Russia
¹pea1@list.ru, ²diana.tuzova.02@bk.ru, ³dmitrartamon@yandex.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is measuring channels of magnetic induction and magnetic field strength, as part of a software and hardware complex for measuring the parameters of magnetic materials. The subject of the research is the development of functional and metrological analysis of measuring channels of parameters of magnetic materials. The aim of the work is to improve the metrological characteristics of measuring the parameters of magnetic materials. *Materials and methods.* The structure of a hardware and software complex for studying the parameters of magnetic materials is considered, in order to conduct a functional and metrological analysis of measuring channels of magnetic induction and magnetic field strength according to the methodology of G.P.Shlykov. *Results.* Structural and functional metrological models of measuring channels of magnetic induction and magnetic field strength have been developed. *Conclusions.* Analytical expressions and models of transformation of measuring channels are obtained. The models have limitations (losses on remagnetization, heating of the magnetic circuit), the elimination of which is the object of further research.

Keywords: hardware and software complex, functional and metrological analysis of measuring channels, measurement of magnetic materials parameters, models of measuring channel conversion

For citation: Pecherskaya E.A., Tuzova D.E., Golubkov P.E. Functional and metrological analysis of measuring channels of magnetic materials parameters. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):58–63. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-8

Введение

Магнитные материалы представляют собой вещества, которые заметно изменяют свою намагниченность при воздействии на них возбуждающего внешнего магнитного поля. В настоящее время они нашли широкое применение в современной технике. Магнетики используются в разных сферах – приборостроении, электронике, радиотехнике, вычислительной технике [1–5]. Из них изготавливаются магнитные усилители, магнитопровода, трансформаторы, сердечники дросселей и другие элементы технических устройств. Производство компонентов и изделий на основе магнитомягких материалов обязательно включает в себя процессы измерения их параметров. Измерение этих параметров в основном производится косвенно, посредством обработки результатов измерений петель намагничивания (петель гистерезиса) при различных частотах переменного магнитного поля. В настоящее время методики выполнения измерений параметров магнитных материалов регламентируются по ГОСТ 8.377-80¹. На российском рынке электронных средств измерения имеется ряд установок, реализующих данные методики измерения. К ним относятся, к примеру, магнитоизмерительная установка МК-3Э отечественного производства и итальянская установка MATS-2010H. Обе установки имеют достаточно крупные габариты и диапазон тока намагничивания образцов не более 20 А. Помимо этого, данные установки обладают большой погрешностью при измерениях. Например, метрологические характеристики отечественной установки МК-3Э приведены в табл. 1 [6]. Для изготовления компонентов и изделий из магнитных материалов на производстве требуются приборы, обладающие более низкими погрешностями, что в целом способствует улучшению технико-экономических показателей готовой продукции. Таким образом, исследование метрологических характеристик с целью повышения точности измерений параметров магнитных материалов является актуальной задачей.

Таблица 1

Метрологические характеристики магнитоизмерительной установки МК-3Э

Параметр магнитного материала	Значение относительной погрешности при измерении, %
Точки магнитной петли гистерезиса и основной кривой намагничивания по индукции	±3
Коэрцитивная сила по индукции	±2
Остаточная индукция	±3
Начальная магнитная проницаемость	±8
Максимальная магнитная проницаемость	±5

На кафедре «Информационно-измерительная техника и метрология» Пензенского государственного университета разработан программно-аппаратный комплекс для измерения параметров магнитных материалов. В данной работе предложены структурные и функциональные модели измерительных каналов напряженности и индукции магнитного поля, а также их функции преобразования, что способствует минимизации погрешности измерений.

Материалы и методы

Для выполнения экспериментов применен программно-аппаратный комплекс, позволяющий проводить измерение следующих параметров магнитных материалов:

- напряженность магнитного поля H ;
- магнитная индукция B ;
- начальная μ_n и дифференциальная μ_d магнитная проницаемость;
- предельная и частные петли гистерезиса, основная кривая намагничивания (строятся на основе измеренных значений B и H).

Структура измерительных каналов параметров магнитных материалов (напряженности магнитного поля и магнитной индукции) показана на рис. 1. Исследуемый образец представ-

¹ ГОСТ 8.377-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик.

ляет собой трансформатор, намотанный на тороидальном сердечнике из магнитного материала, параметры которого необходимо измерить. Число витков первичной и вторичной обмоток известно. Синусоидальное напряжение регулируемой частоты в диапазоне от 10 Гц до 2 кГц с цифрового синтезатора сигналов масштабируется усилителем намагничивания и поступает на первичную обмотку трансформатора, в которой начинает протекать ток намагничивания. Этот ток измеряется датчиком тока, который представляет собой низкоомный резистор, подключенный последовательно к первичной обмотке трансформатора. На вторичной обмотке при этом наводится ЭДС индукции, пропорциональная производной от магнитного потока через образец. Этот сигнал поступает на интегрирующий усилитель, который выполняет линеаризацию. Выходные сигналы интегрирующего усилителя и датчика тока через коммутатор подаются на вход АЦП, и полученный цифровой код через COM-порт поступает на компьютер для дальнейшей обработки.

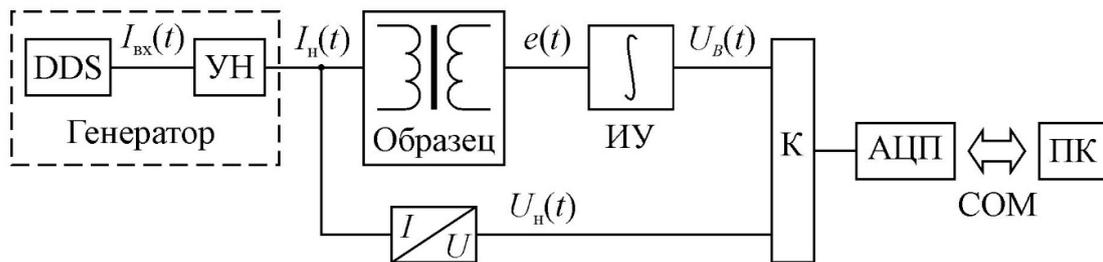


Рис. 1. Структура измерительных каналов параметров магнитных материалов: *DDS* – цифровой синтезатор сигналов; *УН* – усилитель намагничивания; *ИУ* – интегрирующий усилитель; *I/U* – преобразователь тока в напряжение; *К* – коммутатор; *АЦП* – аналого-цифровой преобразователь

Функциональный и метрологический анализ измерительных каналов программно-аппаратного комплекса выполнялся согласно методике, предложенной в работе [7].

Результаты

Структурные функциональные модели измерительных каналов

Измерительный канал магнитной индукции. Пренебрегая потерями на перемагничивание и нагрев магнитопровода, при расчете функции преобразования магнитной индукции будем принимать во внимание только вторичную обмотку.

На вторичную обмотку трансформатора подается магнитный поток Φ , создаваемый током первичной обмотки. Этот магнитный поток пропорционален магнитной индукции $B(t)$:

$$\Phi = B(t)S_{mp}, \quad (1)$$

где S_{mp} – площадь поперечного сечения магнитопровода.

Магнитный поток Φ наводит во вторичной обмотке ЭДС индукции:

$$e(t) = w_2 \frac{d\Phi}{dt} = w_2 S_{mp} \frac{dB(t)}{dt}, \quad (2)$$

где w_2 – число витков вторичной обмотки. Таким образом, вторичная обмотка трансформатора представляет собой дифференцирующее звено по отношению к магнитной индукции. Чтобы привести выходной сигнал измерительного канала к линейному виду, используется интегрирующий операционный усилитель, выходной сигнал которого равен

$$U_B(t) = \frac{w_2 S_{mp}}{\tau} \int \frac{dB(t)}{dt} dt = \frac{w_2 S_{mp}}{R_i C_i} B(t), \quad (3)$$

где $\tau = R_i C_i$ – постоянная времени интегратора. Выражение (3) представляет собой идеальную функцию преобразования измерительного канала магнитной индукции, приведенную ко входу АЦП.

Структурные функциональные модели измерительных каналов магнитной индукции и напряженности магнитного поля представлены на рис. 2.

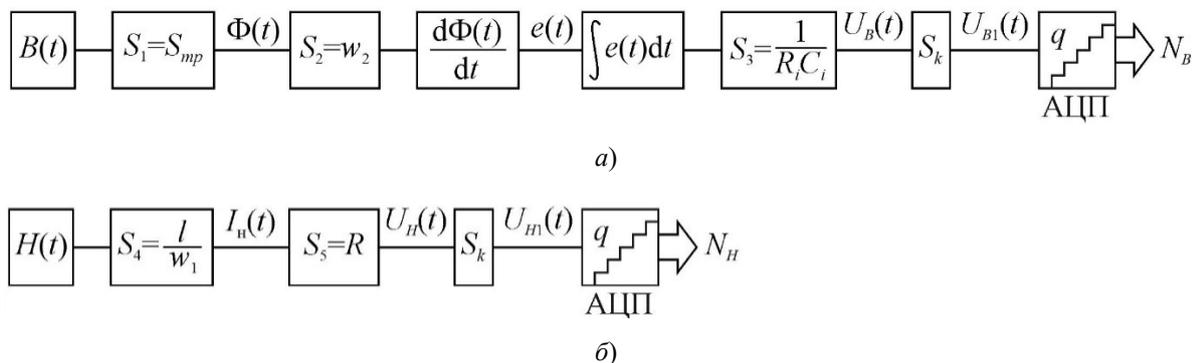


Рис. 2. Структурные функциональные модели измерительных каналов магнитной индукции (а) и напряженности магнитного поля (б)

Измерительный канал напряженности магнитного поля. На вход измерительного канала подается ток намагничивания $I_n(t)$, пропорциональный напряженности магнитного поля $H(t)$:

$$I_n(t) = H(t) \frac{l}{w_1}, \quad (4)$$

где w_1 – число витков первичной обмотки; l – длина средней линии магнитопровода. Ток намагничивания датчиком тока преобразуется в напряжение:

$$U_H = I_n(t)R = H(t) \frac{l}{w_1} R, \quad (5)$$

где R – сопротивление датчика тока.

Выходные сигналы измерительных каналов преобразуются в код N с помощью АЦП по формуле

$$N = Ent \left(\frac{X + 0,5q}{q} \right), \quad (6)$$

где X – выходной сигнал измерительных каналов (UB или UH); q – номинальная ступень квантования. Таким образом, идеальные функции преобразования измерительных каналов магнитной индукции и напряженности магнитного поля, приведенные к выходу, определяются выражениями (3), (6) и (5), (6) соответственно.

Заключение

В ходе проведенного исследования получены следующие основные результаты:

- разработаны структурные и функциональные модели измерительных каналов магнитной индукции и напряженности магнитного поля, которые дают удобный способ для анализа представленного метода измерения с метрологической точки зрения и упрощают получение функций преобразования измерительных каналов;
- получены аналитические выражения для расчета функций преобразования параметров магнитных материалов, которые позволяют выполнить расчет погрешности измерения.

Предложенные модели имеют ограничения. В частности, при выводе функций преобразования не учитывались потери на перемагничивание и нагрев магнитопровода, что может приводить к возникновению погрешностей. Учет этих факторов будет выполнен в ходе дальнейшей работы.

Список литературы

1. Мишин Д. Д. Магнитные материалы : учеб. пособие для студентов физических специальностей высш. учеб. заведений. М. : Высш. шк., 1981. 333 с.
2. Чечерников В. И. Магнитные измерения : учеб. для студентов вузов. М. : МГУ, 1969. 387 с.
3. Volik A. V., Pecherskaya E. A., Varenik Y. A. et al. Metrological aspects of an automated method for measuring electrophysical parameters of soft magnetic materials // Journal of Physics: Conference Series. «8th International School and Conference «Saint Petersburg OPEN 2021»: Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, SPbOPEN 2021». 2021. P. 012072.
4. Печерская Е. А., Бобошко А. В., Соловьев В. А. Методики принятия решений как составная часть интеллектуальной системы поддержки исследований материалов функциональной электроники // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. 2011. № 1. С. 229–231.
5. Печерская Е. А. Математические модели предметной области при исследовании параметров материалов нано- и микроэлектроники // Университетское образование : сб. ст. XV Междунар. науч.-метод. конф., посвящ. 50-летию полета первого космонавта Ю. А. Гагарина / под ред. В. И. Волчихина, Р. М. Печерской. Пенза, 2011. С. 436–438.
6. ЗАО «НПО Интротест» // Руководство по применению магнитоизмерительной установки МК-3Э. URL: https://vk.com/doc394867190_643848086?hash=6Zb2RSV4LdUP8a6Y199SptLDnrQfzyYjyIqkIaYnVck&dl=bZ6sP1cgSPK0MRRQ6GgelW57ZazRzodiPv63kDeIRZL (дата обращения: 03.10.2022).
7. Шлыков Г. П. Функциональный и метрологический анализ средств измерений и контроля : учеб. пособие. Пенза : ПГУ, 1998. 91 с.

References

1. Mishin D.D. *Magnitnye materialy: ucheb. posobie dlya studentov fizicheskikh spetsial'nostey vyssh. ucheb. zavedeniy* = *Magnetic materials: textbook for students of physical specialties of higher educational institutions*. Moscow: Vyssh. shk., 1981:333. (In Russ.)
2. Chechernikov V.I. *Magnitnye izmereniya: ucheb. dlya studentov vuzov* = *Magnetic measurements : textbook for university students*. Moscow: MGU, 1969:387. (In Russ.)
3. Volik A.V., Pecherskaya E.A., Varenik Y.A. et al. Metrological aspects of an automated method for measuring electrophysical parameters of soft magnetic materials. *Journal of Physics: Conference Series*. «8th International School and Conference «Saint Petersburg OPEN 2021»: *Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, SPbOPEN 2021*». 2021:012072.
4. Pecherskaya E.A., Boboshko A.V., Solov'ev V.A. Decision-making methods as an integral part of the intellectual system for supporting research of functional electronics materials. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologiy* = *Innovations based on information and communication technologies*. 2011;(1):229–231. (In Russ.)
5. Pecherskaya E.A. Mathematical models of the subject area in the study of parameters of nano- and microelectronics materials. *Universitetskoe obrazovanie: sb. st. XV Mezhdunar. nauch.-metod. konf., posvyashch. 50-letiyu poleta pervogo kosmonavta Yu. A. Gagarina* = *University education : sat. art. XV International scientific method. conf., dedicated. 50th anniversary of the flight of the first cosmonaut Yu. A. Gagarin*. Penza, 2011:436–438. (In Russ.)
6. NPO Introtest CJSC. *Rukovodstvo po primeneniyu magnitoizmeritel'noy ustanovki MK-ZE* = *Guidelines for the use of the MK-ZE magnetic measuring unit*. (In Russ.). Available at: https://vk.com/doc394867190_643848086?hash=6Zb2RSV4LdUP8a6Y199SptLDnrQfzyYjyIqkIaYnVck&dl=bZ6sP1cgSPK0MRRQ6GgelW57ZazRzodiPv63kDeIRZL (accessed 03.10.2022).
7. Shlykov G.P. *Funktsional'nyy i metrologicheskiy analiz sredstv izmereniy i kontrolya: ucheb. posobie* = *Functional and metrological analysis of measuring and control instruments : textbook*. Penza: PGU, 1998:91. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Екатерина Анатольевна Печерская

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: peal@list.ru

Ekaterina A. Pecherskaya

Doctor of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Диана Евгеньевна Тузова

студентка,

Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: diana.tuzova.02@bk.ru

Diana E. Tuzova

Student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Павел Евгеньевич Голубков

инженер кафедры информационно-

измерительной техники и метрологии,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: dmitrartamon@yandex.ru

Pavel E. Golubkov

Engineer of the sub-department of information

and measuring equipment and metrology,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 21.03.2022

Поступила после рецензирования/Revised 26.04.2022

Принята к публикации/Accepted 17.05.2022