

В. Н. РЯБЦЕВ

В. Н. БУСЬКО, канд. техн. наук, доц.

Институт прикладной физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДЛЯ ПОДБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ БАРКГАУЗЕНА К СПЕЦИФИКЕ РЕШАЕМЫХ ЗАДАЧ

Аннотация. Статья посвящена использованию методов цифровой обработки магнитошумового сигнала для создания цифровой сигнатуры преобразователей Баркгаузена различной конструкции из частотных, частотно-временных и энтропийных характеристик для их подбора к специфике решаемых задач.

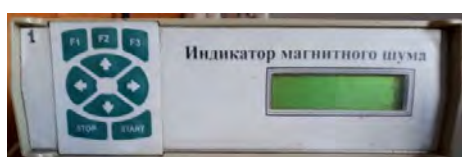
Ключевые слова: магнитный шум и эффект Баркгаузена, цифровая обработка сигнала, спектр мощности, вейвлет-анализ, скейлограмма, цифровая сигнатура сигнала.

Магнитошумовой (МШ) метод, основанный на методе эффекта Баркгаузена (МЭБ) [1] относится к магнитным методом неразрушающего контроля (ГОСТ 18353 -79) и находит широкое применение для оценки структуры ферромагнитных материалов, деталей, изделий [2 – 4], выявления нарушения их сплошности (трещины) [5], а также оценки внутренних и приложенных напряжений [6 – 9]. Полученная с помощью МЭБ, благодаря тесной связи его параметров с доменной структурой ферромагнитного материала, информация может быть использована для разбраковки сталей по маркам при входном контроле, оценке напряжённно-деформированного состояния материала в различных точках поверхности изделия и степени повреждённости материала. Для каждого из видов исследования желательно использовать специализированные датчики [10] в наибольшей степени соответствующие целям конкретного исследования. Вместе с тем сигнал, полученный с использованием различных датчиков, должен в неизменном виде сохранять параметры, обладающие высокой чувствительностью к изменениям структурного состояния, внутренним напряжениям или другим контролируемым параметрам материала.

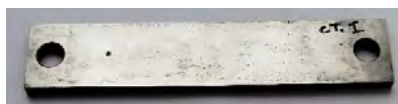
Целью настоящего исследования являлось изучение характера МШ сигнала, полученного с использованием датчиков различной конструкции, и оценка вариации его параметров, наиболее чувствительных к изменениям структуры материала в зависимости от типа датчика, являющегося важнейшим элементом.

Для получения набора характеристик МШ сигнала, чувствительного к физико-механическим свойствам материала использовались 4 датчика или преобразователя Баркгаузена (ПБ), отличающиеся габаритами, конструкцией, характеристиками ярма и катушек и др.

На рисунке 1 а, б, в показаны лицевая панель прибора типа ИМШ (индикатора магнитного шума) для измерения в образце уровня магнитного шума, исследуемый образец в виде пластины размером 150 x 30 x 4 мм из стали 09Г2С и используемые датчики накладного типа. С целью снижения мешающих факторов на уровень магнитного шума и повышения достоверности измерений поверхность образца подвергалась полированию с помощью пасты ГОИ. Магнитошумовой сигнал снимался с выхода прибора ИМШ, оцифровывался с использованием осциллографа Aligent DSO-X 2012A и переносился на компьютер в виде файла размером в 2000 показаний, записанных с частотой дискретизации 40 кГц.



а

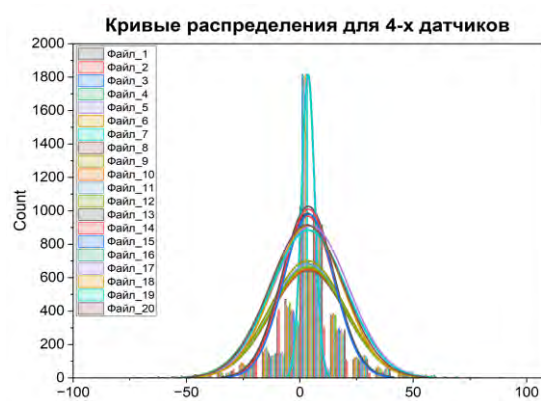
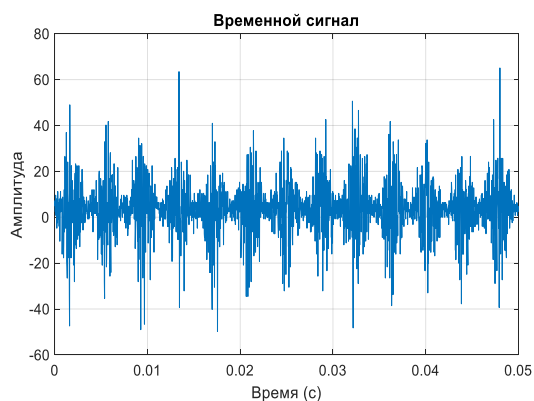


б



в

Рис. 1. Лицевая панель прибора ИМШ (а), испытуемый образец (б) и 4 используемых сменных датчиков (в)



В таблице 1 показан ряд конструкционных и технических характеристик рассматриваемых и используемых в работе датчиков.

Табл. 1. Номера и основные конструкционно-эксплуатационные характеристики представленных на рис 1в используемых датчиков

Номер датчика	Габариты (длина, ширина, высота), мм	Расстояние между полюсами магнитопровода, мм	Площадь (S) измерительной катушки, мм ²	Вес (с кабелем к прибору), г
Датчик 1	ø21,5 x 22	5,5	15,2	50
Датчик 2	30 x 17 x 30	8,4	30,2	88
Датчик 3	36 x 18 x 50	4	18,8	126
Датчик 4	40 x 30 x 36	9	32,2	162

Для каждого датчика измерения повторялись 5 раз, для каждого массива вычислялись их статистические, спектральные и энтропийные характеристики и полученные результаты усреднялись для каждого типа датчика.

Типичный для МШ характер сигнала, его частотная, статистическая и частотно-временная характеристики показаны на рисунке 2. На графике кривых распределения данные из файлов 1-5 получены с использованием датчика № 1, данные из файлов 6-10 – с использованием датчика № 2, данные из файлов 11-15 – с использованием датчика № 3, данные из файлов 16-20 – с использованием датчика № 4.

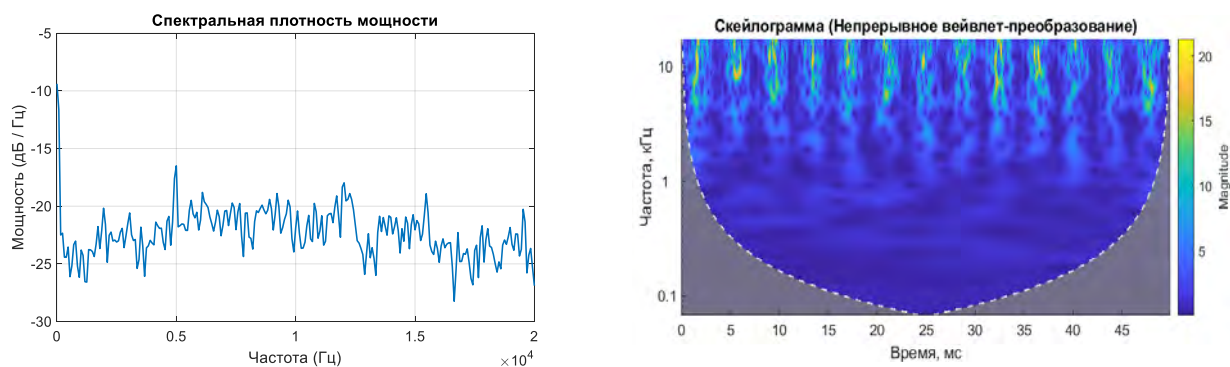


Рис. 2. Временной график сигнала, его спектральная плотность мощности, гистограммы и кривые распределения данных, а также скейлограмма для всех 4-х датчиков

Как следует из рисунка 2, сигнал МШ не имеет отдельных ярко выраженных частот, что подтверждается его спектральной плотностью мощности и скейлограммой. Также видно, что гистограммы сигналов и кривые распределения, полученные с использованием различных типов датчиков, отличаются, в основном, амплитудой и дисперсией.

Для количественной оценки различий в сигналах, полученных с использованием различных типов датчиков, были вычислены усреднённые значения дисперсии, средней энергии сигналов и средней энтропии для каждого из 4-х датчиков. Результаты вычислений приведены в таблице 2, где для примера представлены три наиболее важные характеристики случайного процесса, каковым и является магнитный шум (поток скачков намагниченности).

Табл. 2. Наиболее чувствительные к структуре материала характеристики магнитошумового сигнала в зависимости от типа датчика

	Дисперсия	Средняя энергия	Средняя энтропия
Датчик 1	57,596	71,02	5,18
Датчик 2	166,9399	180,57	6,34
Датчик 3	181,6767	195,29	8,42
Датчик 4	266,0385	280,62	8,50

Как видно из таблицы 2, характеристики сигналов, полученных от датчиков разного типа, имеют различные количественные значения параметров, которые могут отличаться между собой в несколько раз, и являются индивидуальными и характерными для каждого типа датчика. Так, наименьшая дисперсия (разброс показаний прибора ИМШ для датчика 1 в сравнении с другими датчиками) составляет меньше от 3,0 до 4,6 раз, средняя энергия – меньше от 1,23 до 3,95 раза, а средняя энтропия- меньше от 1,2 до 1,6 раза. В итоге оптимальным датчиком оказался датчик 1.

Таким образом, набор характеристик сигнала, чувствительных к конструкции датчика может использоваться в качестве его цифровой сигнатуры и позволяет использовать её для выбора подходящего датчика в зависимости от специфики конкретного исследования.

Заключение

Магнитошумовой метод, аппаратура, преобразователи, основанные на эффекте Баркгаузена, могут быть использованы для неразрушающего контроля физико-механических свойств в ферромагнитных образцах, материалах, готовых деталях и изделиях (включая полученные по аддитивным технологиям), разбраковки сталей по маркам, анализа доменной и кристаллической структуры, режимов термообработки, оценки внутренних и приложенных напряжений, усталостной долговечности и других задач.

В зависимости от целей и задач исследования, магнитошумовую аппаратуру целесообразно комплектовать датчиком с учетом его оптимальных габаритов, конструкции и селективности к контролируемому параметру, тем самым значительно снизив погрешность измерения и неопределенность уровня магнитного шума, что, например, особенно важным является при оценке степени неоднородности поверхностных свойств. Выбранный датчик необходимо предварительно протестировать и проанализировать полученные результаты, например, по таким параметрам, как дисперсия получаемых данных, селективность сигнала к контролируемому параметру, амплитудно-частотная характеристика, спектральная плотность мощности магнитного шума, пространственное распределение в зависимости от магнитного поля возбуждения и т.д.

Для количественной оценки выбранных характеристик регистрируемого скачкообразного процесса для каждого датчика могут эффективно применяться методы цифровой обработки сигнала при условии его представления в виде массива данных, записанных с заданной частотой дискретизации. Набор рассмотренных для МШ характеристик сигнала специфичен для каждого из датчиков и может служить для однозначной идентификации в качестве его цифровой сигнатуры, позволяющей производить обоснованный выбор для каждого из видов и задач исследований.

Список литературы

1. Рудяк В.М. Эффект Баркгаузена // Успехи физических наук. - 1970. - Т. 101, № 3. - С. 429–462.
2. Nahak B. Material Characterization using Barkhausen Noise Analysis Technique - A Review // Indian J. Sci. Technol. - 2017. - Т. 10, № 14. - С. 1–10.
3. Maciusowicz M., Psuj G., Kochmański P. Identification of Grain Oriented SiFe Steels Based on Imaging the Instantaneous Dynamics of Magnetic Barkhausen Noise Using Short-Time Fourier Transform and Deep Convolutional Neural Network // Materials. - 2021. - Т. 15, № 1. - С. 118.

4. Горкунов Э.С., Драгошанский Ю.Н., Миховски М. Эффект Баркгаузена и его использовании в структуроскопии ферромагнитных материалов // Дефектоскопия. - 1999. - № 6. - С. 3–32.
5. Busko V. N., Nichipuruk A. P., Stashkov A. N. The method of mechanical testing and investigation of the possibility of fatigue strength control by the magneto-noise method of steel samples manufactured by additive technology // Kontrol'. Diagnostika. - 2024. - № 310. - С. 54–63.
6. Bahleda F. и др. Barkhausen Noise Emission as a Function of Tensile Stress in Low-Alloyed Steels: Influence of Corrosion and Steel Strength // Applied Sciences. - 2023. - Т. 13, № 11. - С. 6574.
7. Gur C. H. Review of Residual Stress Measurement by Magnetic Barkhausen Noise Technique // Mater. Perform. Charact. - 2018. - Т. 7, № 4. - С. 504–525.
8. Franco Grijalba F. A., Mello Galvão M., Barbosa Tuão L. Measurement of torsional stresses via Magnetic Barkhausen Noise // Nondestructive Testing and Evaluation. - 2025. - С. 1–21.
9. Зайдес. С.А., Хо Минь Куан. Использование шумов Баркгаузена для оценки остаточного напряженного состояния // Сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении». - 2023. - С. 153–158.
10. Santaaho S. и др. Barkhausen Noise Probes and Modelling: A Review // J. Nondestr. Eval. - 2019. - Т. 38, - № 4. - С. 94.

Контакты:

grieves@yandex.ru (Рябцев Владимир Николаевич)

УДК 624:004.946

Е. Н. САВИНА¹

А. А. ЯКОВЛЕВ²

А. В. КУЛАН¹

Е. А. МОЙСЕЙЧИК¹, докт. техн. наук, доцент

¹Белорусский национальный технический университет (Минск, Беларусь)

²ООО «СимТех» (Минск, Беларусь)