




СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Научная статья
УДК 006.9:621.318.13
<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-4-73-81>



Разработка стандартных образцов динамических магнитных свойств стали электротехнической холоднокатаной изотропной

С. В. Сердюков , Т. И. Маслова, И. С. Цай, Е. А. Волегова 

УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», г. Екатеринбург, Россия
 serdyukovsv@uniim.ru

Аннотация: Электротехническая сталь – это магнитомягкий материал, применяемый при изготовлении различного электротехнического оборудования, предназначенного для передачи и преобразования электроэнергии и используемого преимущественно в переменных магнитных полях промышленных частот. Ключевыми характеристиками такого материала являются динамические магнитные свойства, которые нормируются при оценке соответствия материала требованиям, предъявляемым как российскими, так и зарубежными стандартами.

В статье представлены сведения об аспектах разработки стандартных образцов динамических магнитных свойств стали электротехнической холоднокатаной изотропной, выполненных в форме полос для аппарата Эпштейна. Главной особенностью этих стандартных образцов является то, что величина одной из двух аттестуемых характеристик – удельной мощности магнитных потерь – передается напрямую от государственного первичного эталона, а другой – амплитуды магнитной индукции – определяется в соответствии с аттестованной методикой измерений. Их применение позволит обеспечить возможность полного и достоверного определения магнитных характеристик образцов изотропной электротехнической стали, нормируемых в соответствии с требованиями действующих стандартов.

Ключевые слова: магнитомягкие материалы, изотропная электротехническая сталь, аппарат Эпштейна, динамические магнитные свойства, удельная мощность магнитных потерь, магнитная индукция, стандартные образцы

Используемые сокращения: ГОСТ – государственный стандарт; ГСО – стандартный образец утвержденного типа; ГЭТ – государственный первичный эталон; КВИ – катушка взаимной индуктивности; МММ – магнитомягкий материал; СО – стандартный образец.

Ссылка при цитировании: Разработка стандартных образцов динамических магнитных свойств стали электротехнической холоднокатаной изотропной / С. В. Сердюков [и др.] // Эталоны. Стандартные образцы. 2023. Т. 19, № 4. С. 73–81. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-4-73-81>

Статья поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 15.01.2023; принята к публикации 25.05.2023.

REFERENCE MATERIALS

Research Article

Development of Reference Materials for AC Magnetic Properties of Cold-rolled Non-oriented Electrical Steel

Sergey V. Serdjukov ✉, Tatiana I. Maslova, Irina S. Tsay, Ekaterina A. Volegova 

UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology, Yekaterinburg, Russia

✉ serdyukovsv@uniim.ru

Abstract: Electrical steel is a soft magnetic material used in the manufacture of various electrical equipment intended for the transmission and conversion of electricity and used mainly in alternating magnetic fields of industrial frequencies. The key properties of such a material are AC magnetic properties, which are standardized when assessing the compliance of the material with the requirements of both Russian and foreign standards. The article presents information about the aspects of the development of reference materials for AC magnetic properties of electrical cold-rolled non-oriented steel made in the form of strips for the Epstein frame. The main feature of these reference materials is that the value of one of the two certified characteristics (specific power of magnetic losses) is transmitted directly from the State primary standard, and the other (magnetic induction amplitude) is determined in accordance with a certified measurement procedure. Their use will provide the possibility of a comprehensive and reliable determination of the magnetic characteristics of samples of non-oriented electrical steel normalized in accordance with the requirements of current standards.

Keywords: soft magnetic materials, non-oriented electrical steel, Epstein frame, AC magnetic properties, specific power of magnetic losses, magnetic induction, reference materials

Abbreviations used in the article: GOST – National standard; GSO – Certified reference material; GET – State primary standard; SMM – Soft magnetic material; RM – Reference material.

For citation: Serdjukov S. V., Maslova T. I., Tsay I. S., Volegova E. A. Development of reference materials for ac magnetic properties of cold-rolled non-oriented electrical steel. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2023;19(4):73–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-4-73-81>

The article was submitted 10.10.2022; approved after reviewing 15.01.2023; accepted for publication 25.05.2023.

Введение

Электротехнические стали – магнитомягкий материал (далее – МММ), широко применяемый в промышленности для изготовления генераторов, трансформаторов, различных электродвигателей и прочего электротехнического оборудования, предназначенного для передачи и преобразования электрической энергии. Важнейшими характеристиками МММ, определяющими их потребительское качество, являются динамические магнитные свойства: удельная мощность магнитных потерь при заданных значениях амплитуды магнитной индукции и частоты перемагничивания, а также амплитуда магнитной индукции при заданных значениях амплитуды напряженности магнитного поля и частоты перемагничивания [1–7]. Обе эти величины определяют

качество материала и нормируются в стандартах, регламентирующих технические требования к материалам. Технические условия для проката из электротехнической стали в РФ представлены в стандартах технических требований ГОСТ 21427.2–83, ГОСТ 32482–2013, ГОСТ 33212–2014.

Объем выработки и, соответственно, потребления электроэнергии в России в 2021 году составил 1,131 трлн кВт·ч. Если сократить потери энергии при производстве, передаче и потреблении электрической энергии хотя бы в размере долей процента, можно сэкономить миллиарды кВт·ч электроэнергии. Добиться этого можно, улучшая качество выпускаемых МММ путем применения новых технологических процессов (например, на Новолипецком металлургическом комбинате

готовится к запуску новый комплекс для лазерной обработки трансформаторной электротехнической стали мощностью 54 тыс. тонн в год). Другой способ сокращения потерь – повышение точности контроля качества динамических магнитных характеристик МММ.

Традиционно измерения динамических магнитных характеристик проводятся на образцах, выполненных в форме колец, листов или наборов полос для аппарата Эпштейна. Общий принцип заключается в пропуске переменного тока заданной величины через первичную (намагничивающую) обмотку и измерении напряжения со вторичной (измерительной) обмотки. Материал образца выступает в качестве магнитопровода. При этом заданная величина намагничивающего тока определяет напряженность магнитного поля в образце, а измеряемое напряжение пропорционально магнитной индукции, возникающей в исследуемом материале при его перемагничивании. При измерении образцов кольцевой формы обмотки наносятся непосредственно на сам образец, а для проведения измерений характеристик полосовых и листовых образцов используются специальные намагничивающие аппараты. Способ измерения образцов полосовой формы в аппарате Эпштейна получил наиболее широкое применение для определения свойств МММ и, как правило, в нормативных документах указывается в качестве арбитражного метода при установлении характеристик испытываемого материала.

Анализ ФИФ ОЕИ показал, что в настоящий момент в России зарегистрировано несколько утвержденных типов стандартных образцов (далее – СО) динамических магнитных свойств, изготовленных из анизотропной электротехнической стали. Например, выполненных в виде колец (ГСО 10270–2013), листов (ГСО 2129–89) и полос для аппарата Эпштейна (ГСО 10271–2013). Основной аттестуемой характеристикой для данных СО является величина удельной мощности магнитных потерь, воспроизводимая Государственным первичным эталоном единиц мощности магнитных потерь, магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне от 0,1 до 2,5 Тл и магнитного потока в диапазоне от $1 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ Вб ГЭТ 198–2017. В соответствии с Государственной поверочной схемой для средств измерений мощности магнитных потерь МММ и магнитных характеристик магнитотвердых материалов величина удельных магнитных потерь передается непосредственно от ГЭТ 198–2017 к ГСО.

Актуальность разработки нового типа СО динамических магнитных свойств стали электротехнической холоднокатаной изотропной, выполненных в форме полос

для аппарата Эпштейна, обусловлена тем, что они смогут использоваться для метрологического обеспечения средств измерений магнитных свойств МММ сразу по обеим динамическим магнитным характеристикам (удельная мощность магнитных потерь и амплитуда магнитной индукции).

Таким образом, целью настоящего исследования являлась разработка СО, которые смогут обеспечить возможность полного и достоверного определения магнитных характеристик образцов изотропной электротехнической стали в соответствии с требованиями, предъявляемыми к этим характеристикам, обеспечивая при этом достаточную стабильность магнитных свойств во времени.

Задачами исследования стали анализ и учет характерных особенностей материала, определение требований к подготовке материала и геометрическим размерам образцов, изготовление опытной партии СО, установление метрологических характеристик СО.

Материалы и методы

Одним из основных критериев при разработке новых типов СО является обеспечение прослеживаемости аттестованных значений к эталонам единиц величин. Поэтому важная особенность материала для разрабатываемого типа СО заключается в том, что при аттестации СО необходимо характеризовать изотропную электротехническую сталь сразу по двум магнитным величинам.

Было принято решение о том, что передача размера единицы величины удельной мощности магнитных потерь будет проводиться путем прямых измерений на ГЭТ 198–2017. В качестве кандидата СО были выбраны образцы стали электротехнической холоднокатаной изотропной, выполненные в форме полос для аппарата Эпштейна. Сталь изготовлена по ГОСТ 21427.2–83.

Для определения аттестованных значений СО по величине амплитуды магнитной индукции была разработана и аттестована методика измерения магнитной индукции в переменных магнитных полях образцов МММ индукционным методом М.261.0059/RA.RU.311866/2022. В основе методики измерений лежит индукционный метод с аналого-цифровым преобразованием мгновенных значений напряжения на измерительной обмотке образца (намагничивающего устройства) и напряжения на вторичной обмотке катушки взаимной индуктивности, первичная обмотка которой включена последовательно с первичной обмоткой образца (намагничивающего устройства), в цифровые коды с последующим вычислением магнитных характеристик.

Определение метрологических характеристик

При оценке неопределенности результатов измерений амплитуды магнитной индукции использованы подходы, изложенные в ГОСТ 34100.3–2017/ISO/IEC Guide 98–3:2008. Стандартную неопределенность типа А, u_A , Тл, измерений амплитуды магнитной индукции рассчитывали как среднее квадратическое отклонение среднего значения

$$u_{Aj} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2}, \quad (1)$$

где X_{ij} – результат определения j -той магнитной характеристики, Тл;

\bar{X}_j – среднееарифметическое значение результатов измерений амплитуды магнитной индукции при j -тых условиях измерений (заданные значение частоты перемагничивания и амплитуды напряженности магнитного поля), Тл;

n – число измерений на образце амплитуды магнитной индукции при j -тых условиях измерений (заданные значение частоты перемагничивания и амплитуды напряженности магнитного поля).

Стандартную неопределенность типа В, u_B , Тл, оценивали как композицию составляющих неопределенности, обусловленных неопределенностью результатов используемых средств измерений и влиянием применяемого метода измерений.

Стандартную неопределенность типа В результата измерений амплитуды магнитной индукции рассчитывали по формуле

$$u_B = \sqrt{\sum_{z=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_z} \right)^2 \cdot u^2(x_z)} = \sqrt{\sum_{z=1}^m c^2(x_z) \cdot u^2(x_z)}, \quad (2)$$

где x_z – оценка z -той входной величины, вносящей вклад в стандартную неопределенность типа В;

$u(x_z)$ – стандартная неопределенность оценки z -той входной величины;

$c(x_z)$ – коэффициент чувствительности, описывающий изменение выходной величины при изменении z -той входной величины.

Коэффициенты чувствительности $c(x_z)$ для каждой входной величины x_z , вносящей вклад в u_B , определяли как частные производные модели измерений. Для расчета численных значений коэффициентов чувствительности использовали экспериментальные данные измерений образцов МММ.

Суммарную стандартную неопределенность аттестованных значений СО рассчитывали по формуле

$$u_C = \sqrt{u_{char}^2 + u_{stab}^2}, \quad (3)$$

где u_{char} – относительная стандартная неопределенность от характеристики, %;

u_{stab} – относительная стандартная неопределенность от нестабильности, %.

Расширенную неопределенность рассчитывали по формуле

$$U = k \cdot u_C, \quad (4)$$

где k – коэффициент охвата, $k = 2$ для $P = 0,95$.

Межэкземплярная и внутриэкземплярная неоднородность СО не исследовались, так как проводится поэкземплярная аттестация СО, при этом аттестованное значение присваивается всему образцу.

Уравнение измерений амплитуды магнитной индукции, Тл, при заданном значении частоты перемагничивания и амплитуды напряженности магнитного поля

$$B_m = \frac{U_{cp}}{4fSW_2} + \Delta(B_m)_{\Delta H_m}, \quad (5)$$

где $\Delta(B_m)_{\Delta H_m}$ – составляющая неопределенности изменения амплитуды магнитной индукции, обусловленная неопределенностью установления амплитуды напряженности магнитного поля, Тл;

U_{cp} – среднее значение напряжения на вторичной обмотке образца или намагничивающего устройства, В;

f – частота перемагничивания, Гц;

S – площадь поперечного сечения образца, определяемая формой и геометрическими размерами образца, м²;

W_2 – число витков вторичной (измерительной) обмотки образца или намагничивающего устройства.

Стандартную неопределенность типа В рассчитывали по формуле

$$u_B = \sqrt{\left(\frac{u(U_{cp})}{4fSW_2} \right)^2 + \left(\frac{u(f)U_{cp}}{4f^2SW_2} \right)^2 + \left(\frac{u(S)U_{cp}}{4fS^2W_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial B_m}{\partial H_m} u(H_m) \right)^2}, \quad (6)$$

где $u(U_{cp})$ – стандартная неопределенность измерения переменного напряжения переменного тока синусоидальной формы на вторичной обмотке, В;

$u(f)$ – стандартная неопределенность установления частоты перемагничивания, Гц;

$u(S)$ – стандартная неопределенность определения площади поперечного сечения образца, м²;
 $u(H_m)$ – неопределенность установления заданного значения H_m , определяемая по формуле

$$u(H_m) = \sqrt{\left(\frac{u(U_{cpM})W_1}{4fM_{cp}}\right)^2 + \left(\frac{U_{cpM}W_1u(f)}{4f^2M_{cp}}\right)^2 + \left(\frac{U_{cpM}W_1u(M)}{4fM^2l_{cp}}\right)^2}, \quad (7)$$

где $u(U_{cpM})$ – стандартная неопределенность измерения напряжения переменного тока на первичной обмотке катушки взаимной индуктивности (далее – КВИ), соответствующего заданному значению H_m , В;

$u(M)$ – неопределенность определения коэффициента взаимной индуктивности КВИ, определенная при калибровке, Гн;

$u(f)$ – стандартная неопределенность установления частоты перемангничивания, Гц;

l_{cp} – средняя линия магнитного пути, определяемого формой и размерами образца, м;

$\frac{\partial B_m}{\partial H_m}$ – изменение амплитуды магнитной индукции

при изменении амплитуды напряженности магнитного поля образца вблизи измеряемого значения B_m , Тл·А⁻¹·м, определяемое из экспериментально определенных динамических кривых намагничивания образцов различных партий МММ.

При этом неопределенности входных величин (частота, напряжение на первичной обмотке, напряжение на вторичной обмотке, коэффициент взаимной индуктивности КВИ, геометрические размеры образца) определялись из результатов калибровки применяемых средств измерений. Пример бюджета неопределенности результата измерений амплитуды магнитной индукции полосового образца при заданной частоте перемангничивания $f = 400$ Гц и амплитуде напряженности $H_m = 40$ А/м приведен в табл. 1.

При оценке неопределенности результатов измерений удельной мощности магнитных потерь,

Таблица 1. Бюджет неопределенности результата измерений амплитуды магнитной индукции полосового образца при $f = 400$ Гц, $H_m = 40$ А/м

Table 1. Uncertainty budget of the measurement result of the magnetic flux density amplitude of a strip sample at $f = 400$ Hz, $H_m = 40$ A/m

Тип	Источник	Оценка величины	Оценка стандартной неопределенности		Коэффициент влияния		Закон распр.	Число степ. своб., ν_j	Вклад в неопределенность	
			u_j	ед. изм.	$c_j = \frac{\partial f}{\partial x_j}$	ед. изм.			$c_j u_j$	ед. изм.
A	u_A	0,8052	$0,63 \cdot 10^{-3}$	Тл	1	–	N	9	$0,63 \cdot 10^{-3}$	Тл
B	U_{cpM}	0,8594	$0,43 \cdot 10^{-3}$	В	46,542	$\frac{A/M}{B}$	R	∞	$0,20 \cdot 10^{-1}$	А/м
B	f	400	$1 \cdot 10^{-6}$	Гц	0,750	$\frac{A/M}{Гц}$	R	∞	$0,75 \cdot 10^{-6}$	А/м
B	M	0,01	$2,5 \cdot 10^{-6}$	Гн	4131,7	$\frac{A/M}{Гн}$	R	∞	$1,03 \cdot 10^{-2}$	А/м
B	H_m	40	$1,05 \cdot 10^{-2}$	А/м	0,01525	$\frac{Тл}{A/M}$	R	∞	$0,16 \cdot 10^{-3}$	Тл
B	S	$0,593 \cdot 10^{-4}$	$0,12 \cdot 10^{-7}$	м ²	$12,94 \cdot 10^4$	$\frac{Тл}{M^2}$	R	∞	$1,54 \cdot 10^{-3}$	Тл
B	U_{cp}	53,487	$0,449 \cdot 10^{-2}$	В	0,1230	$\frac{Тл}{B}$	R	∞	$0,55 \cdot 10^{-3}$	Тл
Стандартная неопределенность типа A, u_A									$0,63 \cdot 10^{-3}$	Тл
Стандартная неопределенность типа B, u_B									$1,64 \cdot 10^{-3}$	Тл
Суммарная стандартная неопределенность, u_C									$1,76 \cdot 10^{-3}$	Тл
Расширенная неопределенность, U ($k = 2, P = 0,95$)									$3,52 \cdot 10^{-3}$	Тл
Относительное значение расширенной неопределенности, \tilde{U}									0,44	%

полученных путем прямых измерений на ГЭТ 198–2017, руководствовались методикой расчета неопределенности воспроизведения единиц мощности магнитных потерь МРН 02-ГЭТ 198–2016. Методика устанавливает порядок расчета неопределенности воспроизведения единиц мощности и удельной мощности магнитных потерь на государственном первичном эталоне. В эталоне реализован индукционный метод измерений с аналого-цифровым преобразованием мгновенных значений напряжения на измерительной обмотке образца и напряжения на образцовом резисторе в намагничивающей цепи в цифровые коды, записываемые в память и используемые для вычисления магнитных характеристик.

Исследование стабильности свойств кандидата СО проводили согласно алгоритмам, приведенным в ГОСТ ISO Guide 35–2015, с использованием результатов измерений, полученных в период с 2018 по 2022 гг. Для исследований были отобраны 5 образцов различной толщины полос со значениями магнитных характеристик во всех интервалах допускаемых значений аттестуемых характеристик.

Результаты и обсуждение

По результатам проведенных исследований для разрабатываемого типа СО были получены метрологические характеристики, приведенные в таблице 2.

Величина погрешности (неопределенности) зависит от величины напряженности магнитного поля и частоты перемагничивания. Значения аттестуемых характеристик СО могут быть определены в диапазоне частот перемагничивания от 50 до 5000 Гц. Предполагаемая периодичность повторного определения метрологических характеристик составляет 2 года.

Кроме этого, установлен ряд требований к геометрическим размерам полос: длина от 280 до 350 мм, ширина $(30 \pm 0,2)$ мм, толщина от 0,1 до 0,5 мм. Полосы не должны различаться по длине более чем на $\pm 0,5$ мм. Площадь поперечного сечения образца должна быть в интервале от $0,5 \cdot 10^{-4}$ до $1,5 \cdot 10^{-4}$ м².

После нарезания полосы должны быть подвергнуты отжигу для снятия механических напряжений. Для стабилизации магнитных свойств полосы после отжига должны быть подвергнуты старению. Количество полос в образце должно быть кратно 4, одна половина полос нарезана вдоль направления прокатки (предельный угол между направлением реза и направлением прокатки не более $\pm 5^\circ$), другая половина – поперек направления прокатки.

Полученные результаты позволяют включить в назначение данного типа СО применение их для аттестации методик измерений, для проведения калибровки и поверки средств измерений, а также для контроля метрологических характеристик средств измерений при проведении испытаний в целях утверждения типа.

Заключение

В ходе исследования предложен и апробирован подход к созданию СО для метрологического обеспечения динамических магнитных свойств стали электротехнической холоднокатаной изотропной, выполненных в форме полос для аппарата Эпштейна. По результатам исследования авторы разработали практические рекомендации к геометрическим размерам образцов и процессу подготовки материала СО. Отмечено, что величина погрешности (неопределенности) напрямую зависит от величины напряженности магнитного поля и частоты перемагничивания.

Таблица 2. Метрологические характеристики разрабатываемого типа СО
Table 2. Metrological characteristics of the developed RMs

Аттестуемые характеристики СО		Полученный результат
Удельная мощность магнитных потерь	диапазон допускаемых значений аттестуемой характеристики	от 0,1 до 100,0 Вт/кг
	допускаемые значения относительной расширенной неопределенности	от 0,3 до 1,5 %
	границы допускаемых значений относительной погрешности	от $\pm 0,3$ до $\pm 1,5$ %
Амплитуда магнитной индукции	диапазон допускаемых значений аттестуемой характеристики	от 0,01 до 2,0 Тл
	допускаемые значения относительной расширенной неопределенности	от 0,5 до 1,5 %
	границы допускаемых значений относительной погрешности	от $\pm 0,5$ до $\pm 1,5$ %

Установлены метрологические характеристики исследуемого типа СО:

– удельная мощность магнитных потерь в диапазоне от 0,1 до 100,0 Вт/кг с допускаемыми значениями относительной расширенной неопределенности от 0,3 до 1,5 % и границами допускаемых значений относительной погрешности от $\pm 0,3$ до $\pm 1,5$ %;

– амплитуда магнитной индукции в диапазоне от 0,01 до 2,0 Тл с допускаемыми значениями относительной расширенной неопределенности от 0,5 до 1,5 % и границами допускаемых значений относительной погрешности от $\pm 0,5$ до $\pm 1,5$ %.

Изготовлена опытная партия СО. Главной особенностью СО является то, что величина одной из двух аттестуемых характеристик – удельной мощности магнитных потерь – передается напрямую от ГЭТ 198–2017, а другой – амплитуды магнитной индукции – определяется в соответствии с аттестованной методикой измерений.

Достиженные результаты обладают практической значимостью, потому что разработанные СО могут обеспечить возможность полного и достоверного определения магнитных характеристик образцов изотропной электротехнической стали в соответствии с требованиями, предъявляемыми действующими стандартами.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку СО динамических магнитных свойств, выполненных в форме колец и листов, изготовленных для нужд более широкого круга потребителей и производителей различных МММ.

Благодарности: Это исследование не получало финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора. Все измерения проводились с использованием оборудования ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

Acknowledgments: The research did not receive financial support in the form of a grant from any organization in the public, commercial or non-profit sector. All measurements

were performed using the equipment of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology.

Вклад соавторов: Сердюков С. В. – проведение исследовательских работ, написание чернового варианта статьи, подготовка визуальных материалов для представления результатов на конференции; Маслова Т. И. – разработка концепции исследования, разработка методологии, проведение исследовательских работ; Цай И. С. – планирование, руководство и контроль исследовательской деятельности; Волегова Е. А. – контроль проведения исследований, проверка и редакция текста статьи.

Contribution of the authors: Serdjukov S. V. – conducting research work, writing a draft version of the article, preparing visual materials for presenting the results at the conference; Maslova T. I. – development of the research concept, methodology development, conducting research work; Tsay I. S. – planning, management, and control of research activities; Volegova E. A. – control of research, manuscript revision and editing.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Материал статьи подготовлен на основе доклада, представленного на V Международной научной конференции «Стандартные образцы в измерениях и технологиях» (Екатеринбург, 13–16 сентября 2022 г.). Переводная версия статьи на английском языке планируется к публикации в книге Sobina E. et al. (eds.). Reference Materials in Measurement and Technology. RMMT 2022. Switzerland: Springer, Cham.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest. The material of the article was prepared on the basis of the report presented at the V International Scientific Conference «Reference Materials in Measurement and Technology» (Yekaterinburg, September 13–16, 2022). A translated version of the article in English is planned for publication in the book Sobina E. et al. (eds.). Reference Materials in Measurement and Technology. RMMT 2022. Switzerland: Springer, Cham.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- 1337 EURAMET.EM.M-S2: Supplementary comparison of national standard facilities in the field of measuring the polarization and specific total power loss in soft magnetic materials / M. Albrecht [et al.] // Metrologia. 2018. Vol. 55, № 1A. P. 01006. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/55/1A/01006>
- Корзунин Г. С. Современное состояние контроля некоторых магнитных характеристик анизотропной электротехнической стали (обзор) // Дефектоскопия. 2005. № 10. С. 23–57.
- Дидик Ю. И., Малюк В. П. Метрологическое обеспечение контроля качества магнитомягких материалов // Законодательная и прикладная метрология. 1997. № 6. С. 36.
- Sievert J. The measurement of magnetic properties of electrical sheet steel – survey on methods and situation of standards // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2000. Vol. 215–216. P. 647–651. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(00\)00251-1](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(00)00251-1)

5. Sievert J., Ahlers H. The magnetic metrology of materials – A review // *Bulletin of Materials Science*. 1994. Vol. 17, № 7. P. 1393–1399. <https://doi.org/10.1007/BF02747236>
6. Magnetic measurements on electrical steels using Epstein and SST methods. Technical Report / J. Sievert [et al.]. Germany: PTB, 2001.
7. Вдовин Ю. А., Векслер А. З., Конева З. А. Стандартные образцы – эффективное средство контроля качества электротехнической стали // *Измерительная техника*. 1979. № 6. С. 54–56.
8. GET 198-2017, State Primary Standard of Unit of Power of Magnetic Losses and Unit of Magnetic Induction of Constant Magnetic Field in Range from 0.1 to 2.5 T and Magnetic Flux from $1 \cdot 10^{-5}$ to $3 \cdot 10^{-2}$ Wb / E. A. Volegova [et al.] // *Measurement Techniques*. 2018. Vol. 61, № 3. P. 199–202. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1409-2>

REFERENCES

1. Albrecht M., Malygin M. A., Kupec J., Ulvr M., Appino C., Hall M. et al. 1337 EURAMET.EM.M-S2: Supplementary comparison of national standard facilities in the field of measuring the polarization and specific total power loss in soft magnetic materials. *Metrologia* 2018;55(1A):01006. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/55/1A/01006>
2. Korzunin G. S. The modern status of inspection of certain magnetic characteristics of anisotropic electrical steel (review). *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2005;(10):23–57. (In Russ.).
3. Didik Iu. I., Maliuk V. P. Metrological assurance of quality control of soft magnetic materials. *Zakonodatelnaia i Prikladnaia Metrologiia*. 1997;(6):36. (In Russ.).
4. Sievert J. The measurement of magnetic properties of electrical sheet steel – survey on methods and situation of standards. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2000;215–216:647–651. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(00\)00251-1](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(00)00251-1)
5. Sievert J., Ahlers H. The magnetic metrology of materials – A review. *Bulletin of Materials Science*. 1994;17(7):1393–1399. <https://doi.org/10.1007/BF02747236>
6. Sievert J., Ahlers H., Fiorillo F., Hall M., Henderson L., Rocchino L. Magnetic measurements on electrical steels using Epstein and SST methods. Technical Report. Germany: PTB; 2001.
7. Vdovin Iu. A., Veksler A. Z., Koneva Z. A. Reference materials – an effective means of quality control of electrical steel. *Izmeritel'naia Tekhnika*. 1979;(6):54–56. (In Russ.).
8. Volegova E. A., Malygin M. A., Maslova T. I., Volegov A. S. GET 198-2017, State Primary Standard of Unit of Power of Magnetic Losses and Unit of Magnetic Induction of Constant Magnetic Field in Range from 0.1 to 2.5 T and Magnetic Flux from $1 \cdot 10^{-5}$ to $3 \cdot 10^{-2}$ Wb. *Measurement Techniques*. 2018;61(3):199–202. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1409-2>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- ГОСТ 21427.2–83 Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия (с Изменениями N1–5, с Поправкой). М.: ИПК Издательство стандартов, 2003, 120 с.
- ГОСТ 32482–2013 Прокат тонколистовой холоднокатаный из электротехнической анизотропной стали для трансформаторов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 14 с.
- ГОСТ 33212–2014 Прокат тонколистовой холоднокатаный из электротехнической изотропной стали. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2015, 14 с.
- ГОСТ ISO Guide 35–2015 Стандартные образцы. Общие и статистические принципы сертификации (аттестации). М.: Стандартинформ, 2017. 60 р
- ГСО 10270–2013 Стандартный образец динамических магнитных свойств стали электротехнической холоднокатаной анизотропной // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/19/items/389912> (дата обращения: 28.07.2022).
- ГСО 10271–2013 Стандартный образец динамических магнитных свойств стали электротехнической холоднокатаной анизотропной (СОТЭС) // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/19/items/389911> (дата обращения: 28.07.2022).
- ГСО 2129–89 Стандартный образец удельных магнитных потерь (сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная) комплект СОТЭСЛ // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/19/items/393998> (дата обращения: 28.07.2022).
- ГЭТ 198 Государственный первичный эталон единиц мощности магнитных потерь, магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне от 0,1 до 2,5 Тл и магнитного потока в диапазоне от $1 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ Вб / институт-хранитель УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/397884> (дата обращения: 28.07.2022).
- M.261.0059/RA.RU.311866/2022 Методика измерений магнитной индукции в переменных магнитных полях образцов магнитомягких материалов индукционным методом // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/16/items/1400432> (дата обращения: 28.07.2022).

МРН 02-ГЭТ 198–2016 (2 редакция) Методика расчета неопределенности воспроизведения единиц мощности магнитных потерь на ГЭТ 198. Екатеринбург, 2016.

Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений мощности магнитных потерь магнитомягких материалов и магнитных характеристик магнитотвердых материалов: приказ Росстандарта от 29.12.2018 № 2816 // Росстандарт : официальный сайт. URL: www.gost.ru (дата обращения: 28.07.2022).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сердюков Сергей Владимирович – научный сотрудник лаборатории метрологии магнитных измерений и неразрушающего контроля УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

Россия, 620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4

E-mail: serdyukovsv@uniim.ru

Researcher ID: AAE-5131–2022

Маслова Татьяна Ивановна – старший научный сотрудник лаборатории метрологии магнитных измерений и неразрушающего контроля УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

Россия, 620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4

E-mail: maslova@uniim.ru

Researcher ID: AAE-5161–2022

Цай Ирина Сергеевна – и. о. зав. лабораторией метрологии магнитных измерений и неразрушающего контроля УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

Россия, 620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4

E-mail: tsay@uniim.ru

Researcher ID: AAE-5173–2022

Волегова Екатерина Александровна – научный сотрудник лаборатории метрологии магнитных измерений и неразрушающего контроля УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

Россия, 620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4

E-mail: maslova@uniim.ru

Researcher ID: O-5295–2018

<https://orcid.org/0000-0002-3754-0743>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. Serdjukov – Researcher, Laboratory of Metrology of Magnetic Measurements and Non-Destructive Testing, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology

4 Krasnoarmeyskaya str., Yekaterinburg, 620075, Russia

e-mail: serdyukovsv@uniim.ru

Researcher ID: AAE-5131–2022

Tatiana I. Maslova – Senior Researcher, Laboratory of Metrology of Magnetic Measurements and Non-Destructive Testing, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology

4 Krasnoarmeyskaya str., Yekaterinburg, 620075, Russia

e-mail: maslova@uniim.ru

Researcher ID: AAE-5161–2022

Irina S. Tsay – Acting Head of the Laboratory of Metrology of Magnetic Measurements and Non-Destructive Testing, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology

4 Krasnoarmeyskaya str., Yekaterinburg, 620075, Russia

e-mail: tsay@uniim.ru

Researcher ID: AAE-5173–2022

Ekaterina A. Volegova – Researcher, Laboratory of Metrology of Magnetic Measurements and Non-Destructive Testing, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology.

4 Krasnoarmeyskaya str., Yekaterinburg, 620075, Russia

e-mail: maslova@uniim.ru

Researcher ID: O-5295–2018

<https://orcid.org/0000-0002-3754-0743>