

Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии
Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева»
Уральский научно-исследовательский институт метрологии – филиал
Федерального государственного унитарного предприятия
«Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева»
(УНИИМ - филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»)

СОГЛАСОВАНО



Директор УНИИМ – филиала
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

Е.П. Соби́на

« 16 » октября 2025 г.

**«ГСИ. ГИСТЕРЕЗИГРАФЫ АМТ-4А.
МЕТОДИКА ПОВЕРКИ»**

МП 80-261-2025

г. Екатеринбург
2025 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

1 РАЗРАБОТАНА:

Уральским научно-исследовательским институтом метрологии – филиалом Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева» (УНИИМ – филиалом ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»).

2 ИСПОЛНИТЕЛИ

И.о. зав. лабораторией 261

Цай И.С.

Ведущий инженер лаб. 261

Никова Е.С.

Ведущий инженер лаб. 261

Конева В.В.

3 СОГЛАСОВАНА директором УНИИМ – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в 2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1	Общие положения.....	4
2	Нормативные ссылки.....	4
3	Перечень операций поверки средств измерений	7
4	Требования к условиям проведения поверки.....	7
5	Требования к специалистам, осуществляющим поверку	7
6	Метрологические и технические требования к средствам поверки	8
7	Требования (условия) по обеспечению безопасности проведения поверки.....	10
8	Внешний осмотр средства измерений	10
9	Подготовка к поверке и опробование средства измерений	11
10	Проверка программного обеспечения средства измерений	12
11	Определение метрологических характеристик и подтверждение соответствия средства измерений метрологическим требованиям.....	12
12	Оформление результатов поверки	14

1 Общие положения

1.1 Настоящая методика поверки (далее – МП) распространяется на гистерезисграфы АМТ-4А (далее – гистерезисграфы), предназначенные для измерений магнитных характеристик (остаточной намагниченности, остаточной индукции, коэрцитивной силы по намагниченности и индукции, максимального энергетического произведения и др.) образцов магнитотвердых материалов (далее – МТМ) различных типов в режиме перемагничивания квазистатическим магнитным полем в замкнутой магнитной цепи.

1.2 Поверка гистерезисграфов должна производиться в соответствии с требованиями настоящей методики.

1.3 При определении метрологических характеристик гистерезисграфов в рамках проводимой поверки обеспечивается передача:

- единиц индукции постоянного магнитного поля и магнитного потока прямым методом в соответствии с поверочной схемой, утвержденной приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 2816 от 29.12.2018 г., подтверждающей прослеживаемость к ГЭТ 198-2017 «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»;

- единиц магнитного потока прямым методом в соответствии с поверочной схемой, утверждённой приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 2230 от 16.10.2025 г., подтверждающей прослеживаемость к ГЭТ 12-2025 «Государственный первичный эталон единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции».

- единиц электрического сопротивления прямым методом в соответствии с поверочной схемой, утвержденной приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 3456 от 30.12.2019 г. подтверждающей прослеживаемость к ГЭТ-14 «Государственный первичный эталон единицы электрического сопротивления»

1.4 Настоящая МП применяется для поверки гистерезисграфов, используемых в качестве средств измерений. В результате поверки должны быть подтверждены метрологические требования, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Метрологические характеристики

Наименование характеристики	Значение для исполнения с электромагнитом			
	DCT-140	DCT-200	DCT-264	DCT-330Y
Максимальное устанавливаемое значение индукции магнитного поля в центре рабочего пространства электромагнита, Тл, не более:				
– для зазора 50 мм	1,55	1,05	2,50	2,68
– для зазора 35 мм	1,81	1,20	2,80	2,94
– для зазора 25 мм	2,08	1,32	2,85	3,15
– для зазора 20 мм	2,20	1,39	2,91	3,24
– для зазора 15 мм	2,40	1,50	2,95	3,34
– для зазора 10 мм	2,63	1,63	3,10	3,45
– для зазора 5 мм	3,00	1,83	3,30	3,54
Диапазон измерений напряженности постоянного магнитного поля для зазора 10 мм, кА/м	от 1 до 2100	от 1 до 1300	от 1 до 2500	от 1 до 2500

Наименование характеристики	Значение для исполнения с электромагнитом			
	DCT-140	DCT-200	DCT-264	DCT-330Y
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений напряженности постоянного магнитного поля для зазора 10 мм, %	$\pm 2,0$			
Диапазон измерений магнитного потока, Вб	от 0,001 до 0,1			
Пределы допускаемой относительной погрешности измерения магнитного потока, %	$\pm 1,0$			
Диапазон измерений остаточной намагниченности образца, кА/м (кГс)	от 1 до 1590,8 (от 0,01 до 20)			
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений остаточной намагниченности образца, %	$\pm 3,5$			
Предел допускаемого СКО случайной составляющей относительной погрешности измерений остаточной намагниченности образца, %	1,0			
Диапазон показаний остаточной индукции образца, Тл	от 0,02 до 1,6			
Диапазон измерений остаточной индукции образца, Тл	от 0,2 до 1,4			
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений остаточной индукции образца, %	$\pm 3,5$			
Предел допускаемого СКО случайной составляющей относительной погрешности измерений остаточной индукции образца, %	1,0			
Диапазон показаний коэрцитивной силы по индукции, кА/м	от 4 до 1890			
Диапазон измерений коэрцитивной силы по индукции, кА/м	от 100 до 1890			
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений коэрцитивной силы по индукции, %	$\pm 4,5$			
Предел допускаемого СКО случайной составляющей относительной погрешности коэрцитивной силы по индукции, %	1,5			
Диапазон показаний коэрцитивной силы по намагниченности, кА/м	от 40 до 2500			

Наименование характеристики	Значение для исполнения с электромагнитом			
	DCT-140	DCT-200	DCT-264	DCT-330Y
Диапазон измерений коэрцитивной силы по намагниченности, кА/м	от 100 до 2500			
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений коэрцитивной силы по намагниченности, %	$\pm 4,5$			
Предел допускаемого СКО случайной составляющей относительной погрешности коэрцитивной силы по намагниченности, %	1,5			
Диапазон показаний максимального энергетического произведения, кДж/м ³	от 0,1 до 510			
Диапазон измерений максимального энергетического произведения, кДж/м ³	от 30 до 500			
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений максимального энергетического произведения, %	$\pm 5,5$			
Предел допускаемого СКО случайной составляющей относительной погрешности измерений максимального энергетического произведения, %	2,0			

2 Нормативные ссылки

2.1 В настоящей МП использованы ссылки на документы:

Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 2816 от 29.12.2018 г. «Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений мощности магнитных потерь магнитомягких материалов и магнитных характеристик магнитотвердых материалов»;

Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 3456 от 30.12.2019 г. «Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений электрического сопротивления постоянного и переменного тока»;

ГОСТ 8.030-2013 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции»;

ГОСТ 12.2.003-91 «Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Общие требования безопасности».

Примечание – При пользовании настоящим документом целесообразно проверить действие ссылочных документов по соответствующему указателю стандартов, составленному по состоянию на 1 января текущего года, и по соответствующим информационным указателям, опубликованным в текущем году. Если ссылочный документ заменен (изменен), то при пользовании настоящим документом следует руководствоваться замененным (измененным) стандартом. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Перечень операций поверки средств измерений

3.1 При проведении поверки гистерезисграфов должны выполняться операции согласно таблице 2.

Таблица 2 – Операции поверки

Наименование операции	Обязательность проведения операций поверки при		Номер раздела (пункта) МП, в соответствии с которым выполняется операция поверки
	первичной поверке	периодической поверке	
Внешний осмотр средства измерений	Да	Да	8
Подготовка к поверке и опробование средства измерений	Да	Да	9
Проверка программного обеспечения средства измерений	Да	Да	10
Определение метрологических характеристик и подтверждение соответствия средства измерений метрологическим требованиям:			11
- определение относительной погрешности измерения магнитного потока	Да	Нет	11.1
- проверка максимального значения устанавливаемой индукции магнитного поля в зазоре электромагнита	Да	Нет	11.2
- определение относительной погрешности измерений напряженности постоянного магнитного поля	Да	Нет	11.3
- определение относительной погрешности и СКО случайной составляющей относительной погрешности измерений магнитных характеристик образцов МТМ	Да	Да	11.4

3.2 Если при выполнении той или иной операции выявлено несоответствие установленным требованиям, поверку прекращают, выдают извещение о непригодности.

3.3 На основании письменного заявления владельца СИ, оформленного в произвольной форме, допускается проводить периодическую поверку гистерезисграфов для меньшего числа измеряемых величин. Сведения об объеме проведенной поверки должны быть переданы в Федеральный информационный фонд, и соответствующая запись должна быть сделана в свидетельстве о поверке (оформляется по запросу).

4 Требования к условиям проведения поверки

4.1 При проведении поверки должны соблюдаться следующие условия:

- температура окружающего воздуха, °С от +15 до +25;
- относительная влажность воздуха, %, не более 75.

5 Требования к специалистам, осуществляющим поверку

5.1 К проведению поверки допускаются лица из числа специалистов, допущенных к поверке, работающих в организации, аккредитованной на право поверки средств измерений в соответствующей области, и ознакомившиеся с руководством по эксплуатации (далее – РЭ) на гистерезисграфы, средства поверки и настоящей МП.

6 Метрологические и технические требования к средствам поверки

6.1 При проведении поверки применяют оборудование согласно таблице 3.

6.2 Эталоны, применяемые для поверки, должны быть поверены (аттестованы), средства измерений должны быть поверены. Стандартные образцы должны иметь действующие паспорта.

Таблица 3 – Средства поверки

Операции поверки, требующие применение средств поверки	Метрологические и технические требования к средствам поверки, необходимые для проведения поверки	Перечень рекомендуемых средств поверки
п. 9 Подготовка к поверке и опробование средства измерений	Средство измерений температуры и влажности окружающей среды, диапазон измерений температуры от 0 °С до плюс 50 °С, пределы допускаемой абсолютной погрешности не более $\pm 0,7$ °С; диапазон измерений влажности от 0 % до 90 %, пределы допускаемой абсолютной погрешности не более ± 2 %	Термогигрометр автономный ИВА-6 модификации ИВА-6Н-Д, рег. № 82393-21
	Средство измерений с диапазоном измерений магнитного потока ($1 \cdot 10^{-3} - 0,1$) Вб, $\delta = \pm 0,2$ %	Флюксметр электронный EF 5, рег. № 60133-15
	Средство измерений постоянного напряжения с диапазоном измерений (5 – 30) мВ, ПГ ± 1 %; (30 – 100) мВ, ПГ $\pm 0,2$ %; (0,1 – 3,5) В, ПГ $\pm 0,06$ %	Вольтметр универсальный цифровой GDM-8246, рег. № 34295-07
	Испытательное оборудование с диапазоном создаваемых значений индукции магнитного поля от 0,1 до 2,0 Тл	Электромагнит
	Вспомогательное оборудование с характеристиками: $U_{\text{вых}} (0 - 125)$ В, $I_{\text{вых}} (0 - 120)$ А.	Источник питания TDK-Lambda GEN 125–120–MD–3P400
	Катушка измерительная круглая: $K_{\text{sw}} = 0,002087$ Вб/Тл, $\delta(K_{\text{sw}}) = \pm 1,8$ % Высота катушки не более 3,5 мм, внешний диаметр обмотки не более 30 мм.	–
п. 11 Определение метрологических характеристик и подтверждение соответствия средства измерений метрологическим требованиям	Рабочий эталон электрического сопротивления 3-го разряда по поверочной схеме, утвержденной приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30.12.2019 г. №3456 с номинальными значениями 1 и 0,1 Ом	Катушка электрического сопротивления измерительная P321, рег. № 1162-58
	Рабочий эталон единицы магнитного потока 2-го разряда по ГОСТ 8.030-2013 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента	Катушка взаимной индуктивности P-536 (катушка магнитного потока), рег. № 1269-59

Операции поверки, требующие применение средств поверки	Метрологические и технические требования к средствам поверки, необходимые для проведения поверки	Перечень рекомендуемых средств поверки
	<p>границы допускаемых значений относительной погрешности $\pm 4,0 \%$</p> <p>Интервал допускаемых значений остаточной магнитной индукции от 0,1 до 2,5 Тл, границы допускаемых значений относительной погрешности $\pm 2,0 \%$</p> <p>Интервал допускаемых значений коэрцитивной силы по индукции от 80 до 1890 кА/м, границы допускаемых значений относительной погрешности $\pm 3,0 \%$</p> <p>Интервал допускаемых значений коэрцитивной силы по намагниченности от 80 до 1890 кА/м, границы допускаемых значений относительной погрешности $\pm 3,0 \%$</p>	
	Образцы МТМ, изготовленные на основе сплавов NdFeB, AlNiCo, SmCo и ферритов: диаметр не более 2/3 диаметра полюсных наконечников	—
Примечание – Допускается использовать при поверке другие утвержденные и аттестованные эталоны единиц величин, средства измерений утвержденного типа и поверенные, удовлетворяющие метрологическим требованиям, указанным в таблице..		

7 Требования (условия) по обеспечению безопасности проведения поверки

7.1 При проведении поверки гистерезисграфов должны соблюдаться требования по обеспечению безопасности предприятия, на территории которого проводится поверка, требования ГОСТ 12.2.003, а также требования по безопасности согласно РЭ на гистерезисграфы и средства поверки.

8 Внешний осмотр средства измерений

8.1 Провести визуальную проверку внешнего вида гистерезисграфов:

- четкость обозначений и маркировки;
- токопроводящие кабели не должны иметь механических повреждений электроизоляции;
- наличие заземления;
- отсутствие видимых повреждений гистерезисграфов и их составных частей, отсутствие следов коррозии на металлических частях.

В случае если при внешнем осмотре выявлены повреждения или дефекты, способные оказать влияние на безопасность проведения поверки или результаты измерений, поверка может быть продолжена только после устранения этих повреждений или дефектов.

8.2 Комплектность проверяют на соответствие требованиям РЭ.

9 Подготовка к поверке и опробование средства измерений

9.1 Проводят контроль условий поверки с помощью термогигрометра. Условия поверки должны соответствовать требованиям п. 4.1 настоящей МП.

9.2 Определение значения постоянной калибровочных катушек

9.2.1 Определение значения постоянной K_{sw} проводят для калибровочной катушки из состава гистерезисграфа (далее – катушка), указанной в РЭ.

9.2.2 Катушку подключают к флюксметру ЕФ 5. С помощью источника питания в межполюсном пространстве электромагнита устанавливают постоянное магнитное поле, равное 1 Тл. Значение магнитной индукции в зазоре электромагнита контролируют с помощью ШИ-9.

9.2.3 Катушку помещают соосно в геометрический центр межполюсного пространства электромагнита, так чтобы геометрический центр катушки совпал с геометрическим центром межполюсного пространства электромагнита.

9.2.4 Сбрасывают магнитный поток, показываемый флюксметром. Извлекают катушку из межполюсного пространства на расстояние не менее чем 30 см. Не изменяя скорости, поворачивают её на 180° и так же медленно возвращают в межполюсное пространство электромагнита. Записывают значение магнитного потока (Φ_{2Pi} , Вб).

9.2.5 Рассчитывают значение постоянной катушки (K_{sw} , Вб/Тл) по формуле

$$K_{swi} = \frac{\Phi_{2Pi}}{2 \cdot B_{эмi}} \quad (1)$$

где Φ_{2Pi} – магнитный поток, измеренный флюксметром, Вб;

$B_{эм}$ – магнитная индукция постоянного магнитного поля, измеренная ШИ-9, Тл.

9.2.6 Повторяют измерения не менее 6 раз.

9.2.7 Рассчитывают среднее арифметическое результатов расчета постоянной катушки по формуле

$$\overline{K_{sw}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{swi} \quad (2)$$

где K_{swi} – i -ый результат расчета постоянной катушки, Вб/Тл;

n – количество измерений при расчете постоянной катушки.

9.2.8 Полученное значение постоянной калибровочной катушки должно соответствовать значению, указанному на самой катушке.

9.3 Проводят подготовку гистерезисграфа в следующем порядке:

- перед проведением поверки к одному встроенному веберметру гистерезисграфа подключают измерительную катушку, а к другому – датчик Холла;

- включают гистерезисграф, запускают программное обеспечение и подают питание с помощью красного выключателя;

- выдерживают гистерезисграф во включенном состоянии не менее 10 минут.

9.4 Проводят опробование в следующем порядке:

- опробование проводят с помощью контрольного образца AlNiCo (далее – КО), входящего в комплект гистерезисграфа. Измерение КО выполняют согласно п. 2 РЭ;

- при отсутствии показаний гистерезисграф признают непригодным к применению, дальнейшие операции не производятся.

9.4 Проводят подготовку измерительной катушки в следующем порядке:

9.4.1 Обмотку измерительной катушки присоединяют непосредственно ко входу флюксметра электронного ЕФ 5.

9.4.2 С помощью источника питания в межполюсном пространстве электромагнита устанавливают постоянное магнитное поле. Измеряют значение магнитной индукции

($B_{эмi}$, Тл) в зазоре электромагнита измерителем напряженности магнитного поля Gauss-/Teslameter FH 54 (далее – измеритель магнитного поля).

9.4.3 Измерительную катушку помещают соосно в геометрический центр межполюсного пространства электромагнита, так чтобы геометрический центр катушки совпал с геометрическим центром межполюсного пространства электромагнита.

9.4.4 Сбрасывают магнитный поток, показываемый флюксметром. Извлекают измерительную катушку из межполюсного пространства на расстояние не менее чем 30 см. Не изменяя скорости, поворачивают её на 180° и так же медленно возвращают в межполюсное пространство электромагнита. Записывают значение магнитного потока (Φ_{2Pi} , Вб).

9.4.5 Рассчитывают постоянную измерительной катушки (K_{swi} , Вб/Тл) по формуле

$$K_{swi} = \frac{\Phi_{2Pi}}{2 \cdot B_{эмi}}, \quad (3)$$

где Φ_{2Pi} – магнитный поток, измеренный флюксметром, Вб;

$B_{эм}$ – магнитная индукция постоянного магнитного поля, измеренная измерителем магнитного поля, Тл.

9.4.6 Повторяют операции 9.4.1 – 9.4.5 для трех значений магнитной индукции постоянного магнитного поля в зазоре электромагнита.

9.4.7 За значение постоянной измерительной катушки (K_{sw} , Вб/Тл) принимают среднее арифметическое значение результатов измерений.

10 Проверка программного обеспечения средства измерений

10.1 Проводят проверку идентификационных данных программного обеспечения (далее – ПО) гистерезисграфа. Данные в ПО на рабочем столе персонального компьютера должны соответствовать данным, приведенным в таблице 4.

Таблица 4 - Идентификационные данные ПО

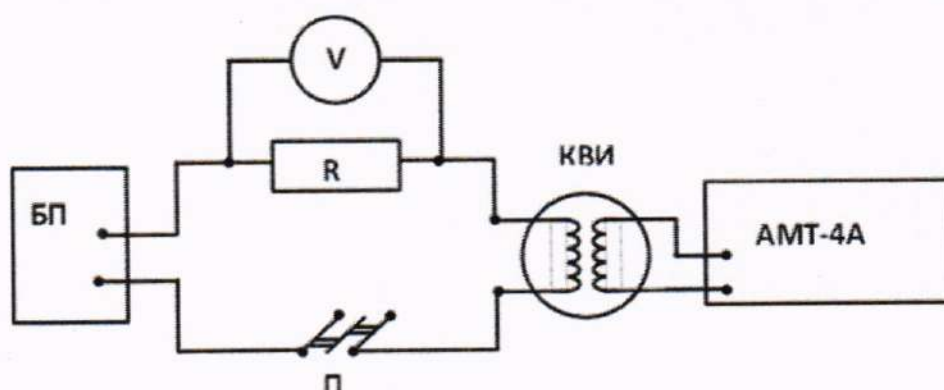
Идентификационные данные (признаки)	Значение
Идентификационное наименование ПО	хрО-XXXXXX*
Номер версии (идентификационный номер) ПО	–
Цифровой идентификатор ПО	–
* «XXXXXX» - порядковый номер предприятия-изготовителя, не относится к метрологически значимой части ПО, каждый из «X» принимает значения от 0 до 9	

11 Определение метрологических характеристик и подтверждение соответствия средства измерений метрологическим требованиям

11.1 Определение относительной погрешности измерений магнитного потока

11.1.1 Определение относительной погрешности измерения магнитного потока провести для каждого веберметра из состава гистерезисграфа.

11.1.2 Для определения относительной погрешности измерения магнитного потока проводят методом прямых измерений значения магнитного потока, создаваемого катушкой взаимной индуктивности (далее – КВИ) при переключении направления тока. Для этого собирают схему в соответствии с рисунком 1.



БП – источник напряжения и тока стабилизированный (далее – блок питания);
 V – вольтметр постоянного напряжения;
 R – катушка электрического сопротивления Р321;
 КВИ – катушка взаимной индуктивности;
 П – переключатель направления тока;
 АМТ-4А – гистерезисграф автоматический АМТ-4А.

Рисунок 1 – Схема измерений магнитного потока

11.1.3 Подключают первичную обмотку КВИ к блоку питания, а вторичную обмотку – к разъему гистерезисграфа. Включают блок питания и подают напряжение на первичную обмотку КВИ. Корректируют дрейф показаний, обнуляют показания веберметра и проводят измерения потока веберметром при переключении направления тока ($\Phi_{и+}$, Вб). Для уменьшения воздействия внешних магнитных полей провести измерения магнитного потока для противоположного направления тока ($\Phi_{и-}$, Вб). За результат измерения магнитного потока ($\Phi_{и}$, Вб) принимается среднее из этих значений

$$\Phi_{и} = \frac{\Phi_{и+} + \Phi_{и-}}{2}. \quad (4)$$

11.1.4 Для каждого значения напряжения проводят не менее 5 измерений магнитного потока и вычисляют среднее арифметическое значение результатов измерений и среднее квадратическое отклонение результата измерений по формулам 3 и 4 соответственно:

$$\overline{\Phi_{и}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Phi_{иi}, \quad (5)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Phi_{иi} - \overline{\Phi_{и}})^2}, \quad (6)$$

где $\overline{\Phi_{и}}$ – среднее арифметическое значение измеренного магнитного потока, Вб;
 $\Phi_{иi}$ – i -ое измеренное значение магнитного потока, Вб;
 S – оценка среднего квадратического отклонения результата измерений, Вб;
 n – число измерений, $n \geq 5$.

11.1.5 Рассчитывают магнитный поток, создаваемый КВИ, по формуле

$$\Phi_{расч} = 2 \cdot K_{\Phi} \cdot \frac{U}{R}, \quad (7)$$

где K_{Φ} – действительное значение взаимной индуктивности КВИ, Вб/А;
 U – напряжение тока, В;
 R – действительное значение сопротивления катушки электрического сопротивления, Ом.

11.1.6 Вычисляют отклонение измеренного магнитного потока от рассчитанного ($\Delta\Phi$, %) по формуле

$$\Delta\Phi = \left| \frac{\Phi_{\text{и}} - \Phi_{\text{расч}}}{\Phi_{\text{расч}}} \right| \cdot 100. \quad (8)$$

11.1.7 Вычисляют неисключенную систематическую составляющую ($\theta_{\text{п}}$, Вб) погрешности результата измерений магнитного потока, обусловленную используемыми средствами измерений, по формуле

$$\theta_{\text{п}} = \frac{\Phi_{\text{и}}}{100} \sqrt{\delta_U^2 + \delta_{\text{КВИ}}^2 + \delta_R^2 + \Delta\Phi^2} \quad (9)$$

где δ_U – погрешность измерения напряжения, %;

$\delta_{\text{КВИ}}$ – погрешность действительного значения взаимной индуктивности КВИ, %;

δ_R – погрешность действительного значения сопротивления катушки электрического сопротивления, %;

$\Delta\Phi$ – отклонение измеренного магнитного потока от рассчитанного, %.

11.1.8 Вычисляют величину относительной погрешности измерения магнитного потока (δ_{Φ} , %) для доверительной вероятности 0,95 по формуле

$$\delta_{\Phi} = 2 \sqrt{\frac{s^2}{n} + \frac{\theta_{\text{п}}^2}{3} \cdot \frac{100}{\Phi_{\text{и}}}} \quad (10)$$

11.1.9 Измерения провести не менее чем в трех точках равномерно распределенных по диапазону. Относительная погрешности измерения магнитного потока должна быть в пределах $\pm 1,0$ %.

11.1.10 Если перечисленные требования не выполняются, гистерезисграф признают непригодным к применению, дальнейшие операции поверки не проводятся.

11.2 Проверка максимального значения устанавливаемой индукции магнитного поля в зазоре электромагнита

11.2.1 Подготавливают измерительную катушку в соответствии с п. 9.4 настоящей МП.

11.2.2 Устанавливают между полюсами электромагнита зазор 50 мм. Задают максимальную напряженность постоянного магнитного поля в зазоре электромагнита и зафиксировать значение напряженности постоянного магнитного поля, измеренное гистерезисграфом ($H_{\text{max уст}}$, кА/м).

11.2.3 Обмотку измерительной катушки присоединяют ко входу флюксметра. Измерительную катушку помещают соосно в геометрический центр межполюсного пространства электромагнита и фиксируют её. Извлекают измерительную катушку из межполюсного пространства на расстояние не менее чем 30 см. Не изменяя скорости, поворачивают её на 180° и так же медленно возвращают в межполюсное пространство электромагнита. Снимают показания магнитного потока с табло флюксметра (Φ , Вб).

11.2.4 Рассчитывают измеренное значение индукции постоянного магнитного поля (B_+ , Тл) в зазоре электромагнита по формуле

$$B_+ = \frac{\Phi}{K_{\text{sw}}}, \quad (11)$$

где Φ – магнитный поток, измеренный флюксметром, Вб;

K_{sw} – постоянная измерительной катушки, определенная в соответствии с п.4.4.1, Вб/Тл.

11.2.5 Изменяют направление магнитного поля в зазоре электромагнита на противоположное, повторяют операции п.п. 11.2.2 – 11.2.4 и рассчитывают измеренное значение напряженности постоянного магнитного поля (B_- , Тл) по формуле

$$B_- = \frac{\Phi}{K_{sw}}, \quad (12)$$

11.2.6 За максимальное значение индукции постоянного магнитного поля (B_{max} , Тл) принимают значение, рассчитанное по формуле

$$B_{max} = \frac{|B_+| + |B_-|}{2}, \quad (13)$$

где $|H_{p+}|, |H_{p-}|$ – абсолютные значения индукции магнитного поля, полученные по п.п 11.2.4 – 11.2.5 Тл.

11.2.7 Повторяют операции п.п. 11.2.2 – 11.2.6 для остальных зазоров в соответствии с таблицей 1.

11.2.8 Максимальное значение устанавливаемой индукции магнитного поля в зазоре электромагнита должно быть не менее значений, указанных в таблице 1.

11.2.9 Если перечисленные требования не выполняются, гистерезисграф признают непригодным к применению, дальнейшие операции поверки не проводятся.

11.3 Определение относительной погрешности измерений напряженности постоянного магнитного поля

11.3.1 Определение диапазона и относительной погрешности измерений напряженности постоянного магнитного поля провести не менее чем при двух значениях зазоров между полюсами электромагнита. Для диапазона измерений напряженности постоянного магнитного поля свыше 1600 кА/м измерения провести с помощью измерительной катушки и флюксметра (аналогично п. 4.4), для диапазона до 1600 кА/м включит. – с помощью измерителя магнитной напряженности.

11.3.2 Для диапазона измерений напряженности постоянного магнитного поля до 1600 кА/м включ.

Поместить датчик измерителя напряженности магнитного поля в центр межполюсного пространства электромагнита. Установить в зазоре электромагнита постоянное магнитное поле напряженностью $H_{уст}=1591$ кА/м и выполнить измерение напряженности постоянного магнитного поля измерителем ($H_{изм}$, кА/м).

Повторить измерения для следующих значений напряженности магнитного поля: 1194 кА/м, 796 кА/м, 398 кА/м, 79,6 кА/м, 39,8 кА/м. Допускается отклонение установленных значений напряженности постоянного магнитного поля от указанных в пределах $\pm 20\%$.

11.3.3 Для диапазона измерений напряженности постоянного магнитного поля свыше 1600 кА/м.

Установить в зазоре электромагнита постоянное магнитное поле напряженностью $H_{уст}=1670$ кА/м. Измерительную катушку, подключенную к флюксметру, поместить соосно в геометрический центр межполюсного пространства электромагнита и зафиксировать её. Извлечь измерительную катушку из межполюсного пространства на расстояние не менее чем 30 см. Не изменяя скорости, повернуть её на 180° и так же медленно возвратить в межполюсное пространство электромагнита. Снять показания магнитного потока с табло флюксметра (Φ , Вб). Рассчитать значение напряженности постоянного магнитного поля (H , кА/м) по формуле

$$H_{изм} = \frac{\Phi}{1000 \cdot \mu_0 \cdot K_{sw}}, \quad (14)$$

где Φ – магнитный поток, измеренный флюксометром, Вб;

μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Тл·м/А = $12,5664 \cdot 10^{-7}$ Тл·м/А [согласно «CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014»];

K_{sw} – постоянная измерительной катушки, определенная в соответствии с п.4.5.1, Вб/Тл.

Повторить измерение для следующих значений напряженности магнитного поля: 1989 кА/м, 2228 кА/м, 2500 кА/м. Допускается отклонение установленных значений напряженности постоянного магнитного поля от указанных в пределах ± 20 %.

11.3.4 Поменять направление магнитного поля в зазоре электромагнита на противоположное, повторить операции п.п. 11.3.2 – 11.3.3 настоящей МП.

11.3.5 Вычислить отклонение установленного значения напряженности магнитного поля от измеренного значения ($\delta_{отк}$, %) по формуле

$$\delta_{отк} = \left| \frac{H_{уст} - H_{изм}}{H_{изм}} \right| \cdot 100, \quad (15)$$

где $H_{уст}$ – установленное значение напряженности постоянного магнитного поля, создаваемого в зазоре электромагнита гистерезисграфа, кА/м;

$H_{изм}$ – измеренное значение напряженности постоянного магнитного поля, кА/м.

11.3.6 Рассчитать относительную погрешность установки напряженности постоянного магнитного поля в зазоре электромагнита в относительном виде (δ_H , %)

для значений напряженности постоянного магнитного поля до 1600 кА/м вкл.

$$\delta_H = |\delta_{FH}| + |\delta_{отк}|, \quad (16)$$

где δ_{FH} – относительная погрешность измерителя напряженности магнитного поля, %;

$\delta_{отк}$ – отклонение устанавливаемого значения напряженности магнитного поля от измеренного, %.

для значений напряженности постоянного магнитного поля свыше 1600 кА/м

$$\delta_H = 1,1 \cdot \sqrt{2 \cdot \delta_F^2 + \delta_B^2 + \delta_{отк}^2}, \quad (17)$$

где δ_F – относительная погрешность измерения магнитного потока флюксометром, %

δ_B – относительная погрешность измерения магнитной индукции, %;

$\delta_{отк}$ – отклонение устанавливаемого значения напряженности магнитного поля от измеренного, %.

11.3.7 Рассчитанные значения относительной погрешности напряженности постоянного магнитного поля должны быть в пределах $\pm 2,0$ %.

11.3.8 Если перечисленные требования не выполняются, гистерезисграф признают непригодным к применению, дальнейшие операции поверки не проводятся.

11.4 Определение относительной погрешности и СКО случайной составляющей относительной погрешности измерений магнитных характеристик образцов МТМ

11.4.1 Определение диапазона и относительной погрешности измерений магнитных характеристик проводят с использованием не менее двух образцов на основе сплава NdFeB (ГСО 11059- 2018 / ГСО 11062- 2018) и не менее двух образцов на основе сплава SmCo (ГСО 11148-2018 / ГСО 11151-2018) (далее - ГСО) и др. Общее количество образцов должно быть не менее пяти.

11.4.2 Измерение магнитных характеристик (остаточной намагниченности (M_r , кА/м), остаточной индукции (B_r , Тл), коэрцитивной силы по индукции (H_{CB} , кА/м),

коэрцитивной силы по намагниченности (H_{C_M} , кА/м), максимального энергетического произведения $((BH)_{max}$, кДж/м³) образцов проводят один раз¹.

11.4.3 Вычисляют относительную погрешность измерений магнитных характеристик на каждом ГСО по формуле

$$\delta_{X_i} = \frac{|X_{изм_i} - X_{ПС_i}| + \Delta X_{ПС}}{X_{ПС_i}} \cdot 100, \quad (18)$$

где $X_{изм_i}$ – магнитная характеристика i -го ГСО, измеренная на гистерезисграфе, (M_r , кА/м), (B_r , Тл), (H_{C_B} , кА/м), (H_{C_M} , кА/м), $((BH)_{max}$, кДж/м³);

$X_{ПС_i}$ – аттестованное значение магнитной характеристики i -го ГСО, указанное в паспорте, (M_r , кА/м), (B_r , Тл), (H_{C_B} , кА/м), (H_{C_M} , кА/м), $((BH)_{max}$, кДж/м³);

$\Delta X_{ПС}$ – абсолютная погрешность аттестованного значения магнитной характеристики i -го ГСО, указанное в паспорте, (M_r , кА/м), (B_r , Тл), (H_{C_B} , кА/м), (H_{C_M} , кА/м), $((BH)_{max}$, кДж/м³).

11.4.4 Значения относительной погрешности измерений магнитных характеристик образцов не должны превышать значений, указанных в таблице 1.

11.4.5 Определение СКО случайной составляющей относительной погрешности измерений магнитных характеристик проводят с использованием не менее трех образцов на основе сплавов NdFeB, AlNiCo, SmCo, ферритов и др. (далее – образец).

11.4.6 Измерение магнитных характеристик (остаточной намагниченности (M_r , кА/м), остаточной индукции (B_r , Тл), коэрцитивной силы по индукции (H_{C_B} , кА/м), коэрцитивной силы по намагниченности (H_{C_M} , кА/м), максимального энергетического произведения $((BH)_{max}$, кДж/м³)) образцов проводят не менее 5 раз.

11.4.7 Для полученных рядов измеренных значений каждой характеристики и каждого образца вычисляют среднее арифметическое значение результата измерений и СКО случайной составляющей относительной погрешности по формулам:

$$\overline{X}_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij_i}, \quad (19)$$

$$S_{X_{ij}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{ij_i} - \overline{X}_{ij})^2}{(n-1)}} \cdot \frac{100}{\overline{X}_{ij}}, \quad (20)$$

где \overline{X}_{ij} – среднее арифметическое значение результата измерений магнитной характеристик j -го образца, (M_r , кА/м), (B_r , Тл), (H_{C_B} , кА/м), (H_{C_M} , кА/м), $((BH)_{max}$, кДж/м³);

X_{ij} – магнитная характеристика j -го образца, измеренная на гистерезисграфе, (M_r , кА/м), (B_r , Тл), (H_{C_B} , кА/м), (H_{C_M} , кА/м), $((BH)_{max}$, кДж/м³);

$S_{X_{ij}}$ – СКО случайной составляющей относительной погрешности измерений магнитной характеристик j -го образца, %;

n – число измерений, $n \geq 5$.

11.4.8 Значения СКО случайной составляющей относительной погрешности измерений магнитных характеристик образцов не должны превышать значений, указанных в таблице 1.

11.4.9 Если перечисленные требования не выполняются, гистерезисграф признают непригодным к применению, дальнейшие операции поверки не проводятся.

¹ Образцы МТМ на основе сплавов NdFeB и SmCo должны быть предварительно намагничены до насыщения

12 Оформление результатов поверки

12.1 Результаты поверки оформляют протоколом произвольной формы.

12.2 При положительных результатах поверки гистерезисграф признают пригодным к применению и оформляют результаты поверки в соответствии с действующими нормативно-правовыми актами в области обеспечения единства измерений.

12.3 Знак поверки на средство измерений не наносят.

12.4 При отрицательных результатах поверки гистерезисграф признают непригодным к применению в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений и оформляют результаты в соответствии с действующими нормативно-правовыми актами в области обеспечения единства измерений.

12.5 Сведения о результатах проведенной поверки передают в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений в соответствии с нормативно-правовыми актами в области обеспечения единства измерений. В сведениях о результатах поверки приводят данные об объеме проведенной поверки.

Разработчики:

И.о. зав. лабораторией 261



И.С. Цай

Ведущий инженер лаб. 261



Е.С. Никова

Ведущий инженер лаб. 261



В.В. Конева