

УДК 620.179.14

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ РАССЕЙНИЯ ДЕФЕКТОВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Шведчикова И. А., Шевченко А. И., Путкардзе Н. Л.

THE EXPERIMENTAL SETUP FOR THE STUDY MAGNETIC STRAY FIELDS OF DEFECTS OF FERROMAGNETIC ITEMS

Shvedchikova I. A., Shevchenko A. I., Putkaradze N. L.

В статье описана экспериментальная установка для измерения магнитных полей рассеяния дефектов типа нарушения сплошности ферромагнитных деталей. Определены метрологические характеристики магнитометрического канала. Выполнена апробация на натуральных образцах. Произведена оценка общей погрешности эксперимента.

Ключевые слова: дефект, несплошность, магнитное поле рассеяния, феррозонд, импульсное возбуждение, магнитометрический канал, погрешность.

Введение. В настоящее время феррозондовый метод контроля дефектов является широко распространенным и имеет такие достоинства, как высокая чувствительность, производительность и возможность автоматизации процесса контроля. Однако недостаточная селективность феррозондов (отношение амплитуды полезного сигнала к помехе), вызванная негладкостью контролируемой поверхности (ступенчатые переходы, края детали и т.д.), в ряде случаев существенно снижает достоверность контроля и ограничивает область применения данного вида контроля. Для решения научно-технической задачи повышения помехоустойчивости, а именно, селективности феррозондовых дефектоскопов, требуются теоретические и экспериментальные исследования магнитных полей как дефектов, так и магнитных полей рассеяния, индуцированных неровностью контролируемой поверхности изделий, а также локальной магнитной неоднородностью ферромагнитного материала.

Целью работы является создание установки для экспериментальных исследований магнитных полей рассеяния, вызванных дефектами несплошности, а также неровностями и магнитной неоднородностью контролируемой поверхности ферромагнитных изделий. Экспериментальные исследования на

натурных образцах позволят установить корректность разработанных математических моделей магнитных полей рассеяния дефектов, выполнить измерение топографии магнитного поля помехи, создаваемого намагниченностью контролируемой детали конечных размеров и негладкой поверхностью, а также заложить основу для разработки и изготовления промышленных образцов систем диагностирования. Поэтому разработка и определение метрологических характеристик данной установки является актуальной и перспективной задачей.

Материал и результаты исследования. В состав разработанной экспериментальной установки входят феррозондовый магнитометр, устройство намагничивания, образцы с дефектами, регистрационная аппаратура, аппаратура для тарировки феррозондового полемера.

Феррозондовый магнитометрический канал, блок-схема которого приведена на рис. 1, состоит из амплитудного детектора 1, дифференциального усилителя 2, преобразователя напряжение – ток (ПНТ) 3, масштабирующего усилителя 4, цифрового вольтметра 5, источника опорного напряжения 6, генератора возбуждения 7.

Феррозонд выполнен из аморфного сплава пермаллоя 10НСР, размеры его сердечника $3 \times 0,5 \times 0,25$ мм. Обмотка возбуждения имеет $W_1 = 100$ витков, выходная обмотка $W_2 = 200$, обмотка обратной связи $W_{oc} = 100$, обмотка компенсации $W_k = 100$ витков, соответственно. Феррозонд возбуждается прямоугольными импульсами амплитудой 15

В, частотой 25 кГц и длительностью 1 мкс со скоростью нарастания переднего фронта 3 В/нс [1].

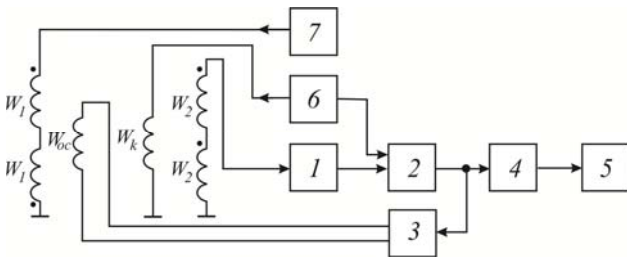


Рис. 1. Блок-схема магнитометрического канала феррозонда: 1 – амплитудный детектор; 2 – дифференциальный усилитель; 3 – преобразователь напряжение – ток; 4 – масштабирующий усилитель; 5 – цифровой вольтметр; 6 – источник опорного напряжения; 7 – генератор возбуждения феррозонда

После детектирования амплитудным детектором 1 (рис. 1) амплитуды импульса первой гармоники сигнал поступает на вход дифференциального усилителя 2 с коэффициентом усиления $K_{\text{дф}} = 10$. Для линеаризации статической характеристики магнитометра и увеличения её стабильности в устройстве обработки выходных сигналов феррозонда предусмотрена отрицательная обратная связь, которая состоит из преобразователя напряжение – ток (ПНТ) 3 с коэффициентом передачи $K_{\text{пнт}} = 0,03 \text{ А/В}$ и обмотки обратной связи $W_{\text{ос}}$ феррозонда.

Коэффициент передачи цепи обратной связи равен

$$K_{\text{ос}} = K_{\text{пнт}} \cdot K_{\text{вос}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{вос}} (C_k) = W_{\text{ос}} / l_k$ – коэффициент передачи (постоянная) катушки обратной связи; l – длина сердечника феррозонда.

При числе витков обмотки обратной связи $W_{\text{ос}} = 100$ и длине сердечника $l = 3 \text{ мм}$ коэффициент передачи обмотки обратной связи равен $K_{\text{вос}} = 3,33 \cdot 10^4 \text{ 1/мм}$.

Коэффициент передачи устройства обработки выходных сигналов феррозонда определяется как

$$K = \frac{K_{\text{ф}} K_{\text{ад}} K_{\text{дф}}}{1 + K_{\text{ф}} K_{\text{ад}} K_{\text{дф}} K_{\text{ос}}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{ф}}$ – коэффициент передачи феррозонда по амплитудному значению сигнала, определялся в соответствии с [2] ($K_{\text{ф}} = 0,0175 \text{ Вм/А}$); $K_{\text{ад}} \approx 1$ – коэффициент передачи амплитудного детектора.

Таким образом, коэффициент передачи магнитометрического канала имеет величину $K = 5,025 \cdot 10^{-4} \text{ Вм/А}$.

Регистрационная аппаратура (рис.1) состоит из масштабирующего усилителя напряжения 4 с регулируемым коэффициентом усиления в пределах $K_{\text{му}} = 50 - 100$ и цифрового вольтметра 5 (типа В7-35), имеющего основную погрешность измерения

постоянного напряжения $\delta_v = \pm(0,1 + 0,1 \frac{x_K}{x})$ (x_K –

номинальное значение установленного предела измерения, x – измеренное значение напряжения).

Общий коэффициент передачи магнитометрического канала находится в пределах $2,52 \cdot 10^{-2} \div 5,025 \cdot 10^{-2} \text{ Вм/А}$. Таким образом, при измерении напряженности H полей рассеяния дефектов в диапазоне $H = (1 \dots 200) \text{ А/м}$, выходное напряжение U магнитометрического канала изменяется в пределах (при максимальном коэффициенте усиления) $U = (5,025 \cdot 10^{-2} \dots 10,5) \text{ В}$. Максимальная погрешность измерения напряжения вольтметром В7-35 в данных пределах составляет $\delta_v = 1,1\%$.

Режим однополярного импульсного возбуждения [3] характеризуется тем, что при отсутствии напряженности измеряемого поля на выходе феррозонда имеется аддитивная помеха, обусловленная неидентичностью полуэлементов феррозонда. Значение и полярность этой помехи, которая определяет порог чувствительности феррозонда, заранее предсказать трудно. Поэтому для снижения порога чувствительности, а также для обеспечения измерения полей разной полярности феррозонд преднамеренно разбалансировался при помощи тока I_k , подаваемого от источника опорного напряжения в обмотку компенсации W_k . Величина компенсационного поля H_k , а следовательно, и величина тока I_k выбирается из условия равенства напряжения на выходе феррозонда U_0 половине напряжения, определяющего рабочий диапазон феррозонда без обратной связи.

$$U_0 = 0,5(U_{\text{вых.маг}} - U_{\text{нач}}), \quad (3)$$

где $U_{\text{вых.маг}}$ – максимальная амплитуда выходного сигнала; $U_{\text{нач}}$ – начальное напряжение, определяемое неидентичностью полуэлементов феррозонда (аддитивной помехой).

Напряжение U_0 компенсируется напряжением источника опорного напряжения, подаваемого на второй вход дифференциального усилителя. Вследствие чего на его выходе формируется точка искусственного нуля, определяемая серединой рабочего диапазона феррозонда [4]. Порог чувствительности феррозонда в этом случае определяется стабильностью компенсирующего напряжения источника опорного напряжения.

При $U_0 = 1,5 \text{ В}$ и коэффициенте нестабильности напряжения источника $\delta_{u_{\text{он}}} = 0,2\%$, $\Delta U_0 = 3 \text{ мВ}$. Это напряжение, приведенное к входу феррозонда, составит

$$\Delta H_0 = \frac{\Delta U_0}{K_{\text{ф}} K_{\text{ад}} K_{\text{дф}}} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ А/м}. \quad (4)$$

Оценим результирующую погрешность магнитометрического канала по погрешностям входящих в него узлов.

Погрешность δ_k , вызванная нестабильностью коэффициента преобразования устройства, охваченного отрицательной обратной связью, определяется выражением [5]

$$\delta_k = \frac{\Delta K}{K} = \frac{1}{1 + K_{np}K_{oc}} \frac{\Delta K_{np}}{K} - \frac{K_{np}K_{oc}}{1 + K_{np}K_{oc}} \frac{\Delta K_{oc}}{K_{oc}} \quad (5)$$

где $K_{np} = K_{\phi}K_{ad}K_{dy}$ – коэффициент преобразования прямой цепи; K_{oc} – коэффициент преобразования цепи обратной связи.

Следовательно, погрешность от нелинейности коэффициента преобразования прямой цепи уменьшается в $1 + K_{np}K_{oc} = 296$ раза и ею можно пренебречь. Тогда, при $K_{np}K_{oc} = 296 \gg 1$

$$K = \frac{1}{K_{oc}} = \frac{1}{K_{nnt}K_{woc}} = \frac{R_{\Sigma}}{C_k}, \quad (6)$$

где $K_{nnt} = \frac{1}{R_{\Sigma}}$ – коэффициент передачи ПНТ; R_{Σ} – сопротивление, определяющее коэффициент передачи ПНТ.

Относительная погрешность коэффициента преобразования

$$\delta_k = \frac{\Delta K}{K} = \frac{\Delta R_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} - \frac{\Delta C_k}{C_k}, \quad (7)$$

где $\frac{\Delta R_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}$ – относительная погрешность изменения коэффициента передачи ПНТ.

При выбранной схеме ПНТ и резисторов обратной связи с допуском $\pm 0,5\%$ относительная погрешность $\frac{\Delta R_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = 1\%$.

Согласно [6] катушки, у которой витки намотаны плотно друг к другу,

$$\frac{\Delta C_k}{C_k} = \frac{\Delta l_k}{l_k} = 1,7 \cdot 10^{-5} \quad 1^{\circ}\text{C}.$$

При изменении температуры на 40°C $\frac{\Delta l_k}{l_k} = 0,1\%$.

Далее оценим погрешность начальной компенсации поля. Напряженность компенсирующего поля H_k определяется выражением

$$H_k = I_k C_{kn} = \frac{U_{on}}{R_k} C_k, \quad (8)$$

где I_k – ток компенсации; C_{kn} – постоянная катушки компенсации; U_{on} – напряжение источника

опорного напряжения; R_k – суммарное сопротивление цепи компенсации.

Погрешность начальной компенсации поля с учётом неконтролируемого интервала температур 1°C

$$\delta_{комп} = \frac{\Delta H_k}{H_k} = \sqrt{\delta_{C_{kn}}^2 + \delta_{on}^2 + \delta_{R_k}^2} = 0,02\%, \quad (9)$$

где $\delta_{C_{kn}} = \frac{\Delta C_{kn}}{C_{kn}} = 1,2 \cdot 10^{-5}$; $\delta_{on} = \frac{\Delta U_{on}}{U_{on}} = 2 \cdot 10^{-4}$

(для стабилизатора К142ЕН8); $\delta_{R_k} = \frac{\Delta R_k}{R_k} = 4 \cdot 10^{-5}$

(для резисторов типа С2-29В).

Погрешность измерения поля зависит также от смещения и дрейфа нуля как собственно феррозонда, так и устройства обработки выходного сигнала, которая в основном сосредоточена в дифференциальном усилителе (ДУ). При начальной коррекции нуля ДУ его погрешность будет вызываться в основном температурным дрейфом. Приведенная к входу феррозонда погрешность будет равна

$$\delta_{dy} = \frac{TKu_{cm}}{K_{\phi}K_{ad}H_{I\max}} \Delta\Theta^0 = 0,026\%, \quad (10)$$

где $TKu_{cm} = 20$ мкВ/К – температурный коэффициент напряжения смещения (для ОУ типа К140УД17А [7]); $H_{I\max} = 200$ А/м – максимальное значение напряжённости измеряемого поля.

Дрейф нуля феррозонда определялся экспериментально, так как он зависит от многих факторов. В рассматриваемом диапазоне температур $\delta_{cp} = 0,2\%$.

Результирующая погрешность магнитометрического канала:

$$\delta_m = \sqrt{\delta_k^2 + \delta_{комп}^2 + \delta_{dy}^2 + \delta_{cp}^2} = 1,8\%. \quad (11)$$

Погрешность магнитометрического канала проверялась на тарировочной установке, схема которой показана на рис. 2.

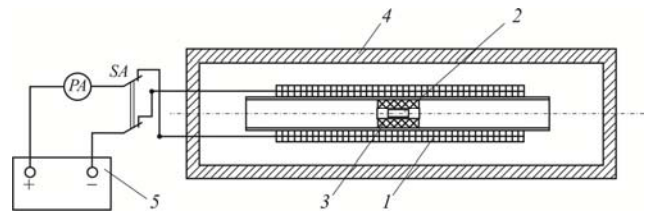


Рис. 2. Схема тарировочной установки: 1 – соленоид; 2 – феррозонд; 3 – центрирующая втулка; 4 – ферромагнитный экран; 5 – регулируемый источник тока

Феррозонд 2 размещался в геометрическом центре соленоида 1 с помощью центрирующей втулки 3, питание обмотки соленоида осуществлялось от регулируемого источника тока типа Б5-47, работающего в режиме стабилизации

тока. Основная погрешность установки выходного тока не превышала $\delta_I = \pm(1\%I_{уст} + 0,2\%I_{max})$.

Величина тока I регулировалась в пределах $I = (1...100)$ мА. Влияние внешних магнитных полей приводилось к уровню $H = 0,01$ А/м при помощи ферромагнитного экрана 4. Ток соленоида контролировался амперметром РА. Изменение полярности измеряемого магнитного поля осуществлялось переключателем SA. Выходные обмотки феррозонда подключались к магнитоизмерительному каналу, выходной сигнал которого регистрировался цифровым вольтметром В7-35. Измерения проводились в нормальных условиях. Установлено, что основная погрешность магнитометрического канала не превышала 2,7%.

Погрешность тарировочной установки составила

$$\delta_m = \sqrt{\delta_C^2 + \delta_I^2} = \sqrt{1,2^2 + 1^2} = 1,56\%, \quad (12)$$

где δ_C – относительная погрешность соленоида; δ_I – относительная погрешность источника тока.

Погрешность измерения магнитного поля в нормальных условиях δ_n можно оценить величиной

$$\delta_n = \sqrt{\delta_m^2 + \delta_{\phi}^2} = \sqrt{1,8^2 + 2,5^2} = 3\%. \quad (13)$$

Поскольку феррозонд измеряет поле не в точке, а усреднённое по длине сердечника значение H_{cp} напряжённости поля, то следует учитывать эту погрешность. Усреднённое значение напряжённости поля в сердечнике феррозонда определяется как

$$H_{cp} = \frac{1}{l} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} H(x) dx. \quad (14)$$

Величина $H(x)$ рассчитывалась теоретически. Установлено, что при измерении вертикальной составляющей напряжённости поля погрешность не превышает $\delta_{cp} = 1,8\%$, если значение измеряемого поля брать на высоте $F = 0,3F_0$ (рис.3). При измерении горизонтальной составляющей – не более $\delta_{\phi} = 2,2\%$.

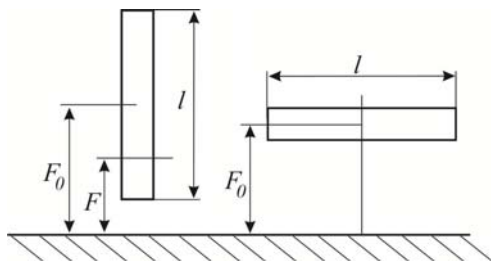


Рис. 3. К расчету погрешности измерения поля феррозонда

Общая относительная погрешность δ_{mk} магнитометрического канала экспериментальной

установки с учётом погрешности регистрирующей аппаратуры ($\delta_p = 1\%$) составляла

$$\delta_{mk} = \sqrt{\delta_m^2 + \delta_n^2 + \delta_{\phi}^2 + \delta_p^2} = 3,8\%. \quad (15)$$

В качестве установки намагничивания образцов использовалась баллистическая установка БУ-3, позволяющая изменять намагниченность в пределах $M = (1000...5000)$ А/м. Погрешность установки намагничивания оценивается величиной $\delta_n = 4,5\%$.

Для перемещения феррозондов при исследовании топографии магнитного поля рассеяния дефекта использовалось устройство, приведенное на рис. 4. Феррозонд 1 крепился к гайке 3, которая перемещалась по направляющей 4 при вращении микрометрического винта 2. Зазор между сердечником феррозонда и поверхностью металла составлял $F = 0,5$ мм, а шаг перемещения $\Delta x = 0,5$ мм, соответственно. Следует отметить, что на каждом шаге могут фиксироваться как величины горизонтальной составляющей H_x , так и вертикальной составляющей H_y напряжённости магнитного поля, а также отношение приращения напряжённости поля к величине шага перемещения, то есть градиент поля – $gradH_x = \Delta H_x / \Delta x$, $gradH_y = \Delta H_y / \Delta x$.

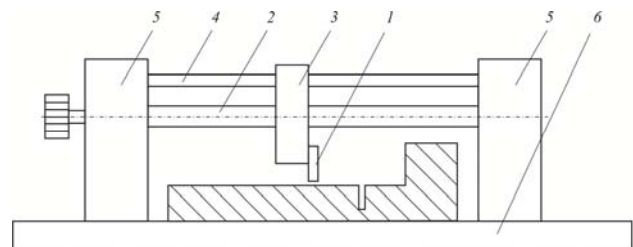


Рис. 4. Установка для исследования поля рассеяния дефекта: 1 – феррозонд; 2 – винт; 3 – гайка; 4 – направляющая; 5 – стойки; 6 – основание

Погрешность отсчёта перемещения не превышала $\delta_{n\phi} = 1,5\%$. Общая погрешность эксперимента была равной

$$\delta_{\phi} = \sqrt{\delta_{mk}^2 + \delta_n^2 + \delta_{n\phi}^2} = 6,1\%. \quad (16)$$

Апробация экспериментальной установки выполнялась путем измерения магнитных полей рассеяния имитации дефекта в виде прямоугольного паза (шириной $2b$ и глубиной h), выполненного электроискровым способом в середине образца с одной его стороны во всю ширину. В качестве образцов использовались прямоугольные бруски размерами $60 \times 100 \times 100$ мм из стали Ст.45 с коэрцитивной силой $H_c = 500$ А/м (рис.5).

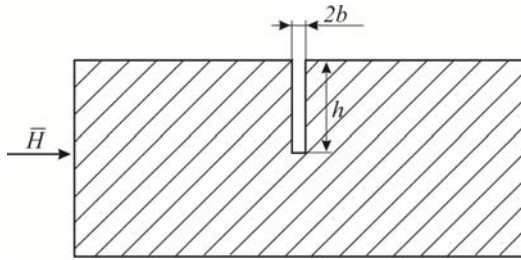


Рис. 5. Образец для экспериментальных исследований полей рассеяния дефектов

На рис. 6 сплошной линией показаны зависимости, полученные в результате теоретических расчетов [8], а пунктиром – зависимости, полученные в результате эксперимента. Расхождение результатов теоретических расчетов и экспериментальных данных в среднем не превысило 8...10%.

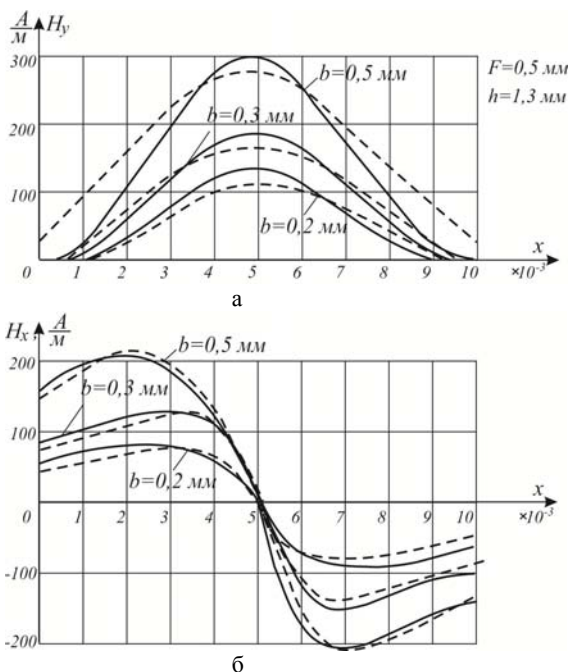


Рис. 6. Вертикальная H_y (а) и горизонтальная H_x (б) составляющие вектора напряженности поля рассеяния дефектов, полученные расчетным путем и в результате экспериментов

Выводы.

Представленная в работе экспериментальная установка позволяет с приемлемой погрешностью измерять магнитные поля рассеяния дефектов и различных магнитных неоднородностей, что обеспечивает возможность установления корректности разработанных математических моделей и может служить основой для разработки промышленных феррозондовых дефектоскопов.

Главная причина расхождения результатов теоретических исследований и полученных экспериментальных данных заключается в неточном определении намагниченности в образцах, так как

при расчете коэффициента размагничивания использовались эмпирические формулы. В то же время необходимо отметить высокую повторяемость результатов эксперимента, которая составляет 97%, что дает возможность идентифицировать дефекты при работе на реальном объекте.

Литература

1. Шевченко А.И., Рубинская И.Ю. Схемотехника феррозондовых магнитометров с однополярным импульсным возбуждением // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2012. – № 18 (189). – С. 304-310.
2. Яковенко В.В. Магнитные датчики механических величин (в книге «Датчики и методы повышения их точности») – К. Вища школа, 1989. – 215с.
3. Шаповаленко Т.В., Яковенко В.В., Шведчикова И.А., Шевченко А.И. Расчет функции преобразования феррозондов при различных способах возбуждения // Вісник Східноукраїнського державного університету. – 1996. – С. 38-43.
4. Пат. 39325А Україна, МПК⁷ G 01 N 27/90. Феррозондовий магнітовимірювальний канал / Мирошников В.В., Шевченко О.І., Романенко А.В., Калашникова О.М. (Україна); Східноукраїнський державний університет. – № 2000031600; Заявл. 21.03.2000; Опубл. 15.06.2001. – 3 с.
5. Семенов Н.М., Яковлев Н.И. Цифровые феррозондовые магнитометры. – Л.: Энергия, 1978. – 168с.
6. Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Хорев В.Н., Чечурина Е.Н., Щелкин А.П. Средства измерений магнитного поля. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 320 с.
7. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: Справочник / под ред. С.В. Якубовского. – М.: Радио и связь, 1989. – 496 с.
8. Мужицкий В.Ф. К расчету магнитостатических полей рассеяния от поверхностных дефектов конечной глубины. // Дефектоскопия. – 1987. – №7. – С.8-13.

References

1. Shevchenko A.I., Rubinskaja I.Yu. Shemotekhnika ferrozondovyh magnitometrov s odnopoljarnym impul'snym vozbuзhdeniem // Visnik SNU im. V. Dalja. – 2012. – № 18 (189). – S. 304-310.
2. Jakovenko V.V. Magnitnye datchiki mehanicheskikh velichin (v knige «Datchiki i metody povyshenija ih tochnosti») – K. Vysha shkola, 1989. – 215s.
3. Shapovalenko T.V., Jakovenko V.V., Shvedchikova I.A., Shevchenko A.I. Raschet funkcii preobrazovanija ferrozondov pri razlichnyh sposobah vozbuзhdenija // Visnik Shidnoukraїns'kogo derzhavnogo universitetu. – 1996. – S. 38-43.
4. Pat. 39325A Ukraїna, MPK⁷ G 01 N 27/90. Ferrozondovii magnitovimiryuval'nii kanal / Miroshnikov V.V., Shevchenko O.I., Romanenko A.V., Kalashnikova O.M. (Ukraїna); Shidnoukraїns'kii derzhavnyi universitet. – № 2000031600; Zajavl. 21.03.2000; Opubl. 15.06.2001. – 3s.
5. Semenov N.M., Jakovlev N.I. Cifrovye ferrozondovye magnitometry. – L.: Yenergija, 1978. – 168s.
6. Afanas'ev Yu.V., Studencov N.V., Horev V.N., CHEchurina E.N., SH'elkin A.P. Sredstva izmerenii magnitnogo polja. – L.: Yenergija. Leningr. otd-nie, 1979. – 496 s.

7. Cifrovye i analogovye integral'nye mikroshemy: Spravochnik / pod. red. S.V. Jakubovskogo. – M.: Radio i svjaz', 1989. – 496 s.
8. Muzhickii V.F. К расчету магнитостатических полей рассеяния от поверхностных дефектов конечной глубины. // Defektoskopiya. – 1987. – №7. – S. 8-13.

**Шведчикова І.О., Шевченко О.І.,
Путкардзе Н.Л. Експериментальна установка для
дослідження магнітних полів розсіювання дефектів
феромагнітних виробів**

У статті описана експериментальна установка для вимірювання магнітних полів розсіювання дефектів типу порушення суцільності феромагнітних деталей. Визначено метрологічні характеристики магнітометричного каналу. Виконана апробація на натурних зразках. Здійснено оцінку загальної похибки експерименту.

Ключові слова: дефект, несуцільність, магнітне поле розсіювання, ферозонд, імпульсне збудження, магнітометричний канал, похибка.

**Shvedchikova I. A., Shevchenko A. I.,
Putkaradze N. L. The experimental setup for the study
magnetic stray fields of defects of ferromagnetic items**

The article describes experimental setup for measuring the magnetic stray fields of defects such as discontinuities of ferromagnetic parts. It is shown that development and metrological characteristics definition of setup is relevance and perspective task. Block diagram of flux-gate

magnetometric channel and installation calibration designed. Experimental setup testing with application of rectangular bars samples done. Established that inaccurate determination of samples magnetization is main cause of results difference between theoretical research and experimental data, as in demagnetization coefficient calculation used empirical formula. Determined metrological characteristics of the magnetic measuring channel. Performed testing with real samples. The total error of the experiment is 6.1%.

Keywords: defect, inconsistent, magnetic stray field, the flux-gate, pulse excitation, magnetic measuring channel, an error.

Шведчикова Ірина Олексіївна – д.т.н., професор, завідувач кафедри електричної інженерії, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля (м. Северодонецьк), ishved@i.ua

Шевченко Олександр Іванович – к.т.н., доцент, доцент кафедри електричної інженерії, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля (м. Северодонецьк), alexshev2014@i.ua

Путкардзе Нана Лайсманівна – студентка групи ЕТ-351м, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля (м. Северодонецьк), nana-tesla@mail.ru

Рецензент: д.т.н., професор **Горбунов М.І.**

Стаття подана 1.02.2017