

2. ГОСТ 8.585-2001. Термопары.
3. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.

**Ս.Վ. ՄԵԼԲՈՒՄՅԱՆ, Կ.Ջ. ՄԻՐԶԱԲԵԿՅԱՆ**

**ԹԵՐՄՈՂՈՒՅՊԵՐԻ ՇԱՀԱԳՈՐԾՄԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ  
ԱՏՈՄԱՅԻՆ ԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱՅԻ ԲՆԱԳԱՎԱՌՈՒՄ**

Դիտարկված են թերմոզույգերի (ջերմաէլեկտրական կերպափոխիչ) շահագործման առանձնահատկությունները արդյունաբերությունում, ինչպես նաև դրանց կիրառությունը զիտական հետազոտություններում և ջերմաստիճանի չափման ավտոմատ կառավարման համակարգերում:

**Առանցքային բաներ.** թերմոզույգ, թերմոէլշու, պարբերական ստուգաչափման միջակայք, տրամաչափարկում, ջերմաստիճանային միջակայք:

**S.V. MELKUMYAN, K.J. MIRZABEKYAN**

**OPERATIONAL FEATURES OF USING THERMOCOUPLES  
IN NUCLEAR POWER INDUSTRY**

Operational features of using thermocouples (thermoelectric converter) in the industry, as well as in scientific research and automatic control systems for measuring temperature are considered.

**Keywords:** thermocouple, thermo-EMF, periodic calibration interval, calibration, temperature range.

УДК 621.317.43

**Б.М. МАМИКОНЯН, С.А. КАЗАРЯН**

**ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ АМПЛИТУДНО-  
ФАЗОВЫМ МЕТОДОМ  
(Гюмри)**

Исследованы особенности применения амплитудно-фазового метода для измерения составляющих комплексного магнитного сопротивления ферромагнитных материалов, описана экспериментальная установка, представлены результаты измерений.

**Ключевые слова:** магнитопровод, магнитное сопротивление, магнитная индукция, измерение, амплитудно-фазовый метод.

**Введение.** В электромагнитных устройствах переменного тока в магнитопроводе из ферромагнитного материала возникают потери электрической энергии от гистерезиса и вихревых токов, вследствие чего между вектором

намагничивающей силы и вектором магнитного потока появляется угол фазового сдвига, называемый *углом магнитного запаздывания* [1]. Магнитное сопротивление магнитопровода становится комплексной величиной:

$$Z_M = R_M + jX_M = \frac{l}{S}(\rho_R + \rho_X),$$

где  $l$  и  $S$  - длина и площадь поперечного сечения магнитопровода,  $\rho_R$  и  $\rho_X$  - удельная активная и реактивная составляющие магнитного сопротивления материала магнитопровода. Для сравнительно точного расчета электромагнитных устройств переменного тока необходимо иметь значения  $\rho_R$  и  $\rho_X$ . Этими параметрами определяются активная и реактивная мощности перемагничивания сердечника, комплексная магнитная проницаемость, напряженность магнитного поля, сдвиг фаз между векторами напряженности и магнитной индукции. При заданной частоте перемагничивания  $\rho_R$  и  $\rho_X$  зависят от физических свойств материала магнитопровода и от значения индукции. В справочных данных магнитных материалов значения  $\rho_R$  и  $\rho_X$  не приводятся: при необходимости, их определяют экспериментально, используя кольцевые образцы [2].

Разработано несколько методов и способов измерения  $\rho_R$  и  $\rho_X$  [2, 3], наиболее распространенными из которых являются ваттметровый [4] и мостовой [5] методы. Однако устройства, с помощью которых реализуются эти методы, не приспособлены для сопряжения с вычислительными средствами, что не позволяет автоматизировать процессы измерения и обработки результатов измерений. Целью настоящего исследования является устранение указанного недостатка.

**Объект исследования.** Испытуемый образец ферромагнитного материала выполняется в виде кольцевого сердечника и служит магнитопроводом катушки. По всей окружности кольца равномерно наматываются две обмотки: первичная (намагничивающая) и вторичная (измерительная) с одинаковым числом витков:  $w_1 = w_2 = w$ . Первичная обмотка подключается к синусоидальному напряжению  $U$  (рис. 1а), вторичная обмотка не изображена: она находится в режиме холостого хода. Через  $r$  обозначено активное сопротивление первичной обмотки (сопротивление, измеренное постоянным током), через  $x$  - индуктивное (сопротивление рассеяния). Магнитопровод представлен в виде электрической цепочки, состоящей из эквивалентной активной проводимости  $g_0$  и эквивалентной реактивной проводимости  $b_0$  (параллельная схема замещения магнитопровода) или  $R_0$  и  $X_0$  (последовательная схема замещения) [1]. Напряжение  $\dot{U}_0$  этой цепочки (рис. 1б) затрачивается на компенсацию ЭДС самоиндукции обмотки:

$$\dot{U}_0 = -\dot{E} = j\omega w\dot{\Phi}, \quad (1)$$

где  $\omega$  - угловая частота перемагничивания;  $\dot{\Phi}$  - вектор магнитного потока.

**Постановка задачи и обоснование методики.** Связь между  $Z_M$  и комплексным электрическим сопротивлением  $Z_\vartheta = R_\vartheta + jX_\vartheta$  устанавливается с учетом выражения (1):

$$Z_M = \frac{\dot{I}w}{\dot{\Phi}} = \frac{\dot{I}w \cdot j\omega w}{\dot{U}_0} = \frac{j\omega w^2}{\dot{U}_0/\dot{I}} = \frac{j\omega w^2}{Z_\vartheta}. \quad (2)$$

Преобразуем (2) следующим образом:

$$\begin{aligned} Z_M &= \frac{j\omega w^2}{\dot{U}_0/\dot{I}} = \frac{j\omega w^2}{U_0/I \cdot e^{j\varphi_0}} = \frac{j\omega w^2 I}{U_0 (\cos \varphi_0 + j \sin \varphi_0)} = \\ &= \frac{\omega w^2 I}{U_0} (\sin \varphi_0 + j \cos \varphi_0) = R_M + jX_M = \frac{l}{S} (\rho_R + j\rho_X), \end{aligned}$$

следовательно, получаем

$$\rho_R = K \cdot \frac{I}{U_0} \cdot \sin \varphi_0, \quad \rho_X = K \cdot \frac{I}{U_0} \cdot \cos \varphi_0, \quad (3)$$

где  $K = \omega w^2 S/l$ .

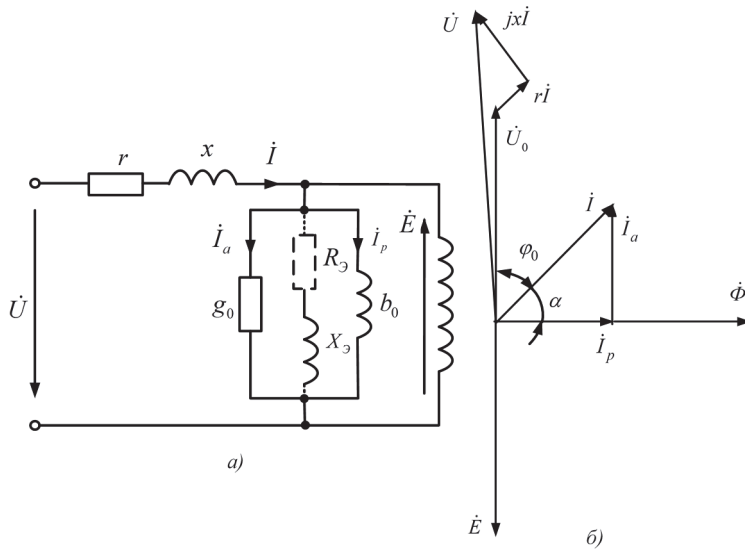


Рис. 1. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) катушки с сердечником из ферромагнитного материала в цепи переменного тока

Исследован образец кольцевого магнитопровода размерами  $40 / 50 \times 20$  мм, намотанный лентой толщиной  $0,05$  мм из пермаллоя марки 79НП. Упрощенная функциональная схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Измерительная цепь (ИЦ) (рис. 2а) содержит исследуемую катушку  $L$ , операционный усилитель ОУ1, включенный по схеме инвертирующего усилителя, во входной цепи которого включены последовательно первичная обмотка катушки, генератор синусоидального напряжения, токоограничивающее устройство  $R_A$ . Опорный резистор  $R_N$  образует цепочку обратной связи ОУ1. Выходными сигналами ИЦ являются два напряжения относительно общей точки: напряжение  $U_N$  опорного резистора  $R_N$  и напряжение вторичной обмотки катушки в режиме холостого хода  $U_0 = E$ . В качестве ОУ1 использован прецизионный ОУ типа ICL7650, коэффициент усиления которого  $A = 10^6$ , входное сопротивление  $R_{IN} = 10^{12}$  Ом, поэтому практически инвертирующий вход ОУ виртуально “заземлен“, а измерительный ток  $I$  целиком течет через  $R_N$ . Следовательно, напряжение  $U_N = IR_N$  и служит мерой тока  $I$ . Выходные напряжения ИЦ через прецизионные повторители напряжения с большим входным сопротивлением (буферы) на ОУ2 и ОУ3 поступают на входы электронного модуля (рис. 2б).

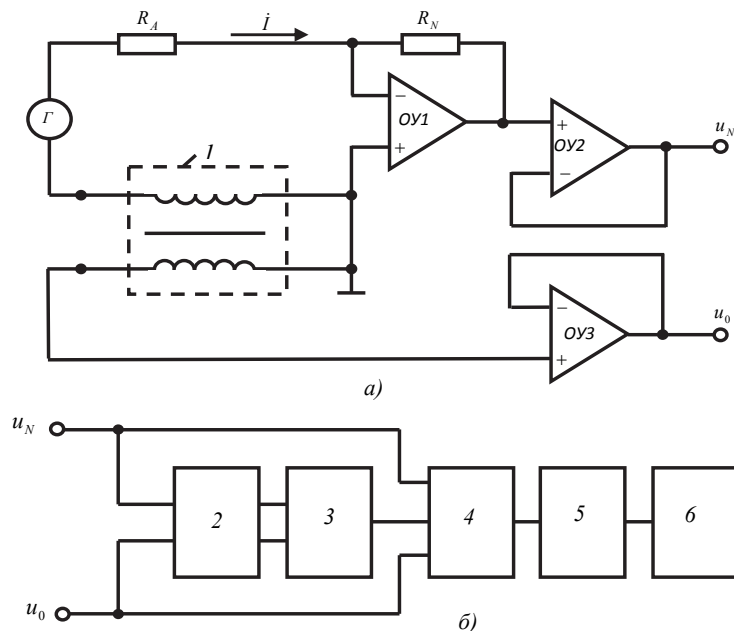


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема измерительной цепи (а); блок-схема электронного модуля (б)

Электронный модуль содержит двоянный быстродействующий компаратор 2, логический элемент “Исключающее ИЛИ” 3, мультиплексор 4, преобразователь 5, который преобразует среднеквадратические значения входных напряжений в напряжения постоянного тока, и микроконтроллер (МК) 6.

Угол  $\varphi_0$  необходимо преобразовать в пропорциональное напряжение, чтобы использовать для всех трех измеряемых величин один и тот же измеритель. Поэтому синусоидальные напряжения  $u_N$  и  $u_0$  поступают непосредственно на входы мультиплексора, а также на входы компаратора, в котором они преобразуются в прямоугольно-импульсные напряжения  $u_1$  и  $u_2$  соответственно (рис. 3). Эти напряжения поступают на входы логического элемента 3, на выходе которого получается напряжение  $u_3$  в виде периодической последовательности однополярных прямоугольных импульсов, длительность которых изменяется пропорционально фазовому сдвигу  $\varphi_0$ , которое также поступает на вход мультиплексора. С выхода мультиплексора постоянные напряжения  $U_N$ ,  $U_0$  и  $U_3 = U_\varphi$  поступают на вход МК.

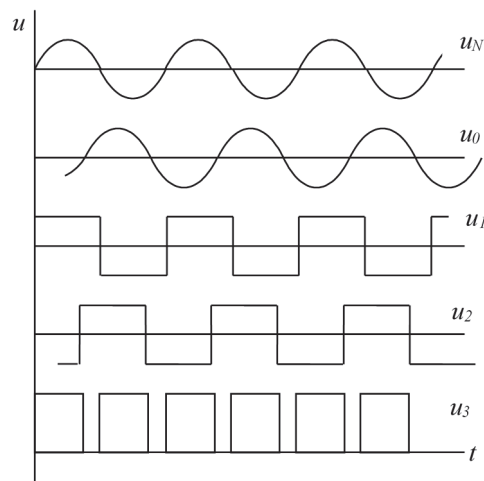


Рис. 3. Кривые напряжений в электронном модуле преобразования и обработки сигналов

МК измеряет ток  $I$  по формуле  $I = U_N / R_N$ , напряжение  $U_0$  и угол  $\varphi_0$ , определяет по формулам (3)  $\rho_R$  и  $\rho_X$ , а также индукцию  $B$  в магнитопроводе по формуле  $B = \frac{U_0}{\omega w S}$  для построения зависимостей  $\rho_R = f_1(B)$ ,  $\rho_X = f_2(B)$ .

В реализованном образце экспериментальной установки использованы в качестве:

- буферов – микросхема ОР27;
- двояного компаратора – микросхема AD9698;
- логического элемента “Исключающее ИЛИ” - микросхема 74НС4052М, которая может работать как элемент XOR, если входы собрать в определенную комбинацию;
- мультиплексора - микросхема 74НС4052, адресные входы которой управляются от МК;
- преобразователя среднеквадратического значения – микросхема AD637;
- МК - программируемый микроконтроллер dsPIC30F3013, имеющий в своем составе два компаратора и один аналого-цифровой преобразователь разрядностью 10 (1024 точки по шкале Y) и производительностью 1 миллион измерений в секунду, таймер работает на частоте 40 МГц.

Для индикации результата измерений использованы семисегментные светодиодные индикаторы. В качестве резистора  $R_N$  использован высокоточный металлофольговый резистор типа С5-61 с минимальным отклонением  $\pm 0,005\%$  от номинального сопротивления и минимальным значением температурного коэффициента сопротивления  $\alpha_t = \pm 10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , номиналом  $R_N = 1,56 \text{ кОм}$ .

**Результаты исследования.** В ходе испытаний в магнитопроводе катушки создавалась индукция в пределах  $B = 0,1 \dots 0,2 \text{ Тл}$ , чему соответствовали значения тока в пределах  $I = 0,8 \dots 1,6 \text{ мА}$ . Напряжения  $U_0$  и  $U_N$  не превышали 2,5 В. Результаты измерений представлены в таблице.

Таблица

Значения магнитных параметров материала магнитопровода при различных значениях индукции

$B, \text{ Тл}$	0,1	0,125	0,15	0,175	0,2
$\rho_R, \text{ м/Гн}$	22,5	20,1	19,2	18,5	18,8
$\rho_X, \text{ м/Гн}$	14,95	14,2	13,1	12,3	11,6
$\rho_Z, \text{ м/Гн}$	27,01	26,61	22,59	22,22	22,1

Выше индукции  $B = 0,2 \text{ Тл}$   $\rho_R$  начинает увеличиваться,  $\rho_X$  продолжает уменьшаться с той же крутизной; выше значения  $B = 0,3 \text{ Тл}$  измерения не проводились.

**Заклучение.** Амплитудно-фазовый метод экспериментального определения магнитных параметров ферромагнитных материалов позволяет упростить установку, автоматизировать процесс измерения и обработки результатов измерений, обеспечивает приемлемую для практики точность измерения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. Том 2. - СПб.: Питер, 2003. - 576 с.
2. Кифер И.И. Испытание ферромагнитных материалов.—М.: Энергия, 1968.-360 с.
3. Антонов В.Г., Петров Л.М., Щелкин А.П. Средства измерения магнитных параметров материалов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
4. ГОСТ 12119.4-98. Межгосударственный стандарт. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения удельных магнитных потерь и действующего значения напряженности магнитного поля. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998. – 9 с.
5. ГОСТ 12119.6-98. Межгосударственный стандарт. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения относительной магнитной проницаемости и удельных магнитных потерь мостом переменного тока. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998. – 8 с.

## Բ.Մ. ՄԱՄԻԿՈՆՅԱՆ, Ս.Ա. ԴԱԶԱՐՅԱՆ

### ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԶԱՓՈՒՄԸ ԱՄՊԼԻՏՈՒԴԱՓՈՒԼԱՅԻՆ ՄԵԹՈՂՈՎ

Հետազոտվել են ֆերոմագնիսական նյութերի կոմպլեքս մագնիսական դիմադրության բաղադրիչների չափման համար ամպլիտուդափուլային մեթոդի կիրառման առանձնահատկությունները: Նկարագրված է փորձարարական սարքավորումը, ներկայացված են չափումների արդյունքները:

**Առանցքային բաներ.** մագնիսահաղորդակ, մագնիսական դիմադրություն, մագնիսական ինդուկցիա, չափում, ամպլիտուդափուլային մեթոդ:

## B.M. MAMIKONYAN, S.A. GHAZARYAN

### MEASUREMENT OF MAGNETIC PARAMETERS BY THE AMPLITUDE-PHASE METHOD

The principles of the amplitude-phase method application for measuring the components of complex magnetic resistance of ferromagnetic materials have been studied, the experimental setup has been described and the measurement results have been presented.

**Keywords:** magnetic core, magnetic resistance, magnetic induction, measurement, amplitude-phase method.