

**Б.М. МАМИКОНЯН, С.А. КАЗАРЯН**

**ИЗМЕРЕНИЕ ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ КАТУШЕК  
ФАЗОВЫМ МЕТОДОМ  
(Гюмри)**

Рассмотрена задача измерения взаимной индуктивности ( $M$ ) магнитно-связанных катушек на переменном токе. Представлен объект измерения, изложен принцип измерения  $M$  фазовым методом. Выполнено экспериментальное исследование метода на примере измерения  $M$  тороидального трансформатора тока. Получены зависимости  $M$  от индукции  $B$  магнитного поля в магнитопроводе в различных режимах его намагничивания.

**Ключевые слова:** взаимная индуктивность, измерение, фазовый метод, угол фазового сдвига, магнитная индукция, режим намагничивания.

**Введение.** Взаимная индуктивность двух магнитно-связанных катушек с числами витков  $w_1$  и  $w_2$  определяется выражением

$$M = w_1 w_2 / R_M, \quad (1)$$

где  $R_M$  - магнитное сопротивление замкнутого контура, по которому замыкается общий для обеих катушек магнитный поток. Из выражения (1) следует, что всегда  $M_{12} = M_{21} = M$ , т.е. взаимная индуктивность двух катушек не зависит от того, какой катушкой создается магнитный поток. Если катушки имеют ферромагнитный сердечник, то в цепях переменного тока из-за явления гистерезиса и вихревых токов магнитное сопротивление  $R_M$  становится комплексной величиной  $Z_M = R_M + jX_M$  с активной  $R_M$  и реактивной  $X_M$  составляющими [1]. При этом вследствие нелинейности кривой намагничивания сердечника  $R_M$  и  $X_M$  нелинейно зависят от магнитной индукции и режимов намагничивания, поэтому значение  $M$  также зависит нелинейно от указанных факторов.

Для измерения взаимной индуктивности используются все методы измерения индуктивности: косвенный, мостовой, резонансный и др. Выбор того или иного метода зависит от значения измеряемой величины и требуемой точности; они подробно рассмотрены в [2]. Здесь рассматривается фазовый метод измерения, который позволяет сравнительно просто реализовать цифровое измерение, автоматизировать процессы измерения и обработки результатов измерений.

**Объект исследования.** Схема реализации фазового метода измерения  $M$  и векторная диаграмма тока и напряжений изображены на рис. 1 [2, 3]. Здесь катушки 1 и 2 образуют обмотки трансформатора, к общему выводу которых подключен опорный резистор  $R_N$ . Первичная обмотка питается синусоидальным током  $I_1$  генератора  $\Gamma$  (непосредственно или через токоограничивающий резистор  $R$ ), а вторичная обмотка работает в режиме холостого хода. Выходным сигналом измерительной цепи является угол фазового сдвига  $\varphi$  между напряжениями  $u_s$  и  $u_N$ .

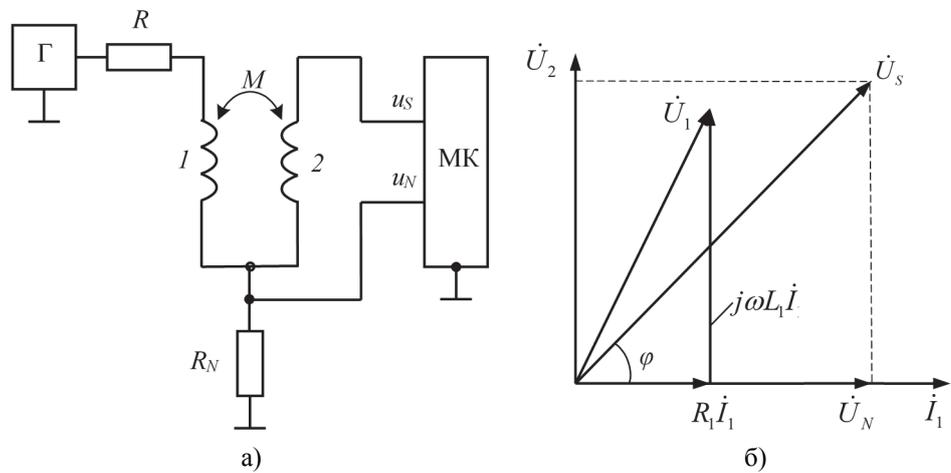


Рис. 1. Измерение взаимной индуктивности фазовым методом: а – схема измерительной цепи; б – векторная диаграмма тока и напряжений

В векторной диаграмме (рис. 1б) через  $R_1$ ,  $L_1$  и  $U_1$  обозначены активное сопротивление, индуктивность и напряжение первичной обмотки трансформатора соответственно,  $\dot{U}_N = \dot{I}_1 R_N$ ,  $\dot{U}_2 = -\dot{E}_2 = j\omega M \dot{I}_1$ ,  $\dot{U}_s = \dot{U}_N + \dot{U}_2$ ,

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_2}{U_N} = \frac{\omega M I_1}{I_1 R_N} = \frac{\omega M}{R_N}, \text{ следовательно,}$$

$$M = (R_N \cdot \operatorname{tg} \varphi) / \omega. \quad (2)$$

Из (2) видно, что необходимо измерить только угол  $\varphi$ , что можно выполнить с высокой точностью современными средствами цифровой измерительной техники, например, с помощью программируемого микроконтроллера, на аналоговые входы которого поступают напряжения  $u_s$  и  $u_N$ . Показано [3], что чувствительность преобразования  $M$  в угол  $\varphi$  уменьшается по мере уве-

личения угла  $\varphi$ , поэтому при заданном пределе измерения  $M = 0 \dots M_{max}$  необходимо выбрать значение  $R_N$  таким, чтобы угол  $\varphi$  не выходил за пределы  $\varphi = 0 \dots 30^\circ$ . Показано, что при прочих равных условиях сопротивление  $R_N$  оказывается прямо пропорциональным частоте тока намагничивания.

**Сущность исследования.** В настоящей работе изложены методика и результаты экспериментального исследования фазового метода измерения взаимной индуктивности  $M$ . Схема экспериментальной установки (рис. 2) содержит:

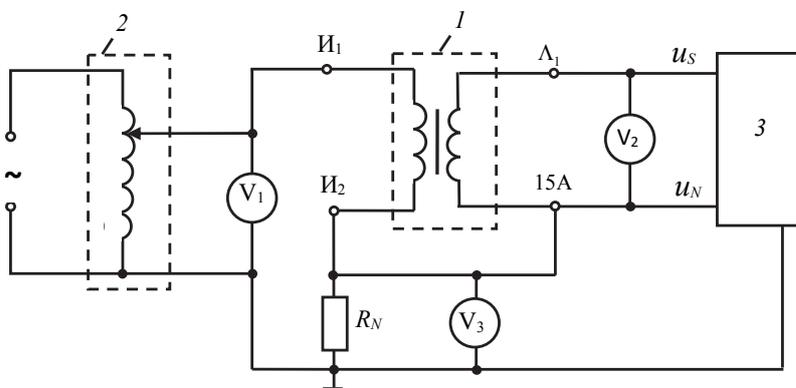


Рис. 2. Схема установки экспериментального исследования фазового метода измерения взаимной индуктивности

- объект исследования  $I$  (тороидальный трансформатор тока (ТТ) УТТ-5М);
- регулятор 2 напряжения  $U_1$  питания установки (лабораторный автотрансформатор регулировочный РМО-250/0,5М, на 220 В, 2 А), включенный в сеть напряжением 220 В, частотой  $f = 50$  Гц;
- измеритель 3 временного сдвига  $\Delta t$  между синусоидальными напряжениями  $u_S$  и  $u_N$  (двухканальные цифровые осциллографы DSO5102P фирмы Hantek и SDS1202X-E фирмы SIGLENT);
- опорное сопротивление  $R_N$  (магазин сопротивления Р4834);
- вольтметр  $V_1$  для установки напряжения питания измерительной цепи;
- вольтметр  $V_2$  для измерения напряжения  $U_2$  вторичной обмотки трансформатора тока ТТ;
- вольтметр  $V_3$  для измерения напряжения  $U_N$  опорного резистора.

В качестве вольтметров использованы цифровые вольтметры В7-38. В качестве первичной обмотки ТТ выбрана обмотка  $I_1 - I_2$  с числом витков  $w_1 = 120$ , в качестве вторичной – обмотка  $L1 - 15A$  с числом витков  $w_2 = 40$ .

Тороидальный магнитопровод ТТ имеет размеры 91x72x21 мм, намотан из ленты толщиной 0,2 мм прецизионного магнитно-мягкого сплава марки 80НХС, ГОСТ 10160. Режим намагничивания трансформатора изменяли значениями тока первичной обмотки регулировкой напряжения или сопротивления на магазине Р4834.

Таким образом, в процессе проведения экспериментов снимались показания вольтметров  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ , значения сопротивления  $R_N$ . Значения  $\Delta t$  брались из диаграммы на экране цифрового осциллографа (рис. 3, из которого видно, что в данном случае  $\Delta x = -1,420$  мс, т.е. напряжение  $u_S$  опережает  $u_N$  по времени на эту величину).

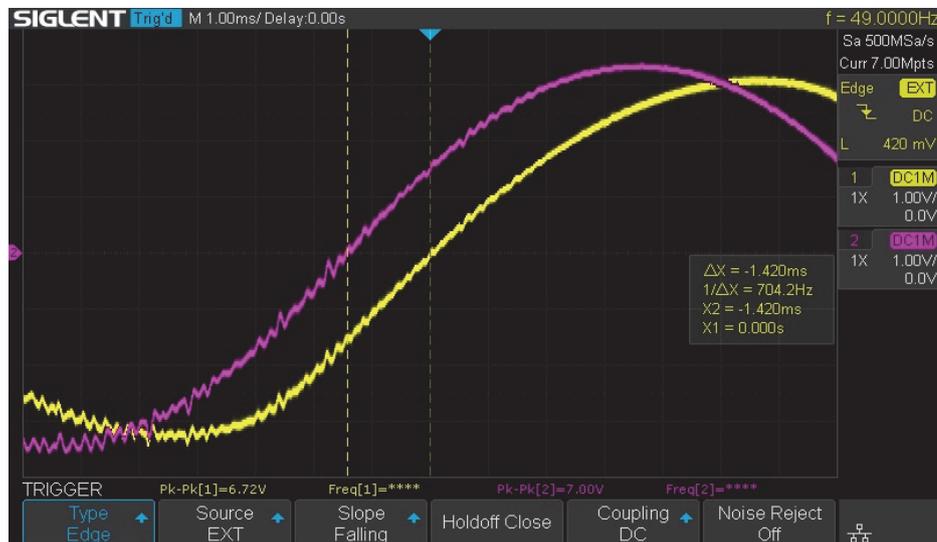


Рис. 3. Вид диаграммы напряжений на экране цифрового осциллографа:  
 $u_S$  - фиолетовый,  $u_N$  - желтый

По измеренным значениям вычислялись:

- ток намагничивания сердечника ТТ по формуле  $I_1 = U_N / R_N$  ;
- угол сдвига фаз  $\varphi$  в градусах между напряжениями  $u_S$  и  $u_N$  по формуле  $\varphi = \omega \cdot \Delta t \cdot (180/\pi) = 18 \cdot \Delta t$ , где значения  $\Delta t$  подставляются в миллисекундах;
- индукция (действующее значение) магнитного поля в сердечнике ТТ по формуле  $B = \frac{U_2}{\omega w_2 S}$ , где  $S = \frac{D-d}{2} \cdot H = \frac{91-72}{2} \cdot 21 = 199,5$  мм<sup>2</sup>, в результате получаем  $B \approx 0,3991 \cdot U_2$ .

Измерялись  $M$  при изменении сопротивления опорного резистора в пределах  $R_N = 100 \dots 1500 \text{ Ом}$  при двух разных значениях напряжения питания цепи  $U_1 = 1,25 \text{ В}$  и  $U_1 = 2,5 \text{ В}$ . Соответствующие кривые зависимости  $M = F_1(R_N)$  показаны на рис. 4.

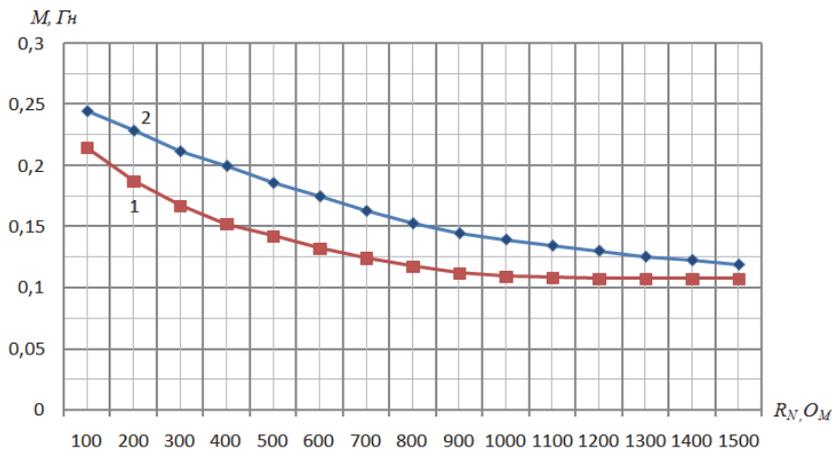


Рис. 4. Кривые зависимости  $M = F_1(R_N)$ : 1 - при  $U_1 = 1,25 \text{ В}$ ; 2 - при  $U_1 = 2,5 \text{ В}$

Видно, что с увеличением сопротивления  $R_N$  значение  $M$  экспоненциально уменьшается, поскольку уменьшаются ток намагничивания сердечника и индукция магнитного поля в нем. Следует отметить, что за пределами указанных значений  $R_N$  искажения формы синусоид  $u_s$  или  $u_N$  усиливаются, что обусловлено нелинейностью кривой намагничивания сердечника ТТ. Это препятствует корректному измерению угла  $\varphi$  с помощью цифровых осциллографов. При этом при малых значениях  $R_N$  больше искажается синусоида  $u_N$ , а при больших значениях  $R_N$  больше искажается синусоида  $u_s$  вследствие искажения синусоиды  $u_2$ . Объясняется это тем, что при малых значениях  $R_N$  режим намагничивания сердечника ближе к режиму заданной индукции, а при больших значениях  $R_N$  - к режиму заданной напряженности магнитного поля.

Измерялись значения  $M$  в зависимости от индукции магнитного поля в сердечнике при двух постоянных режимах намагничивания, задаваемых значениями сопротивления опорного резистора  $R_N = 200 \text{ Ом}$  и  $R_N = 510 \text{ Ом}$ . Построенные по измеренным значениям кривые  $M = F_2(B)$  представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

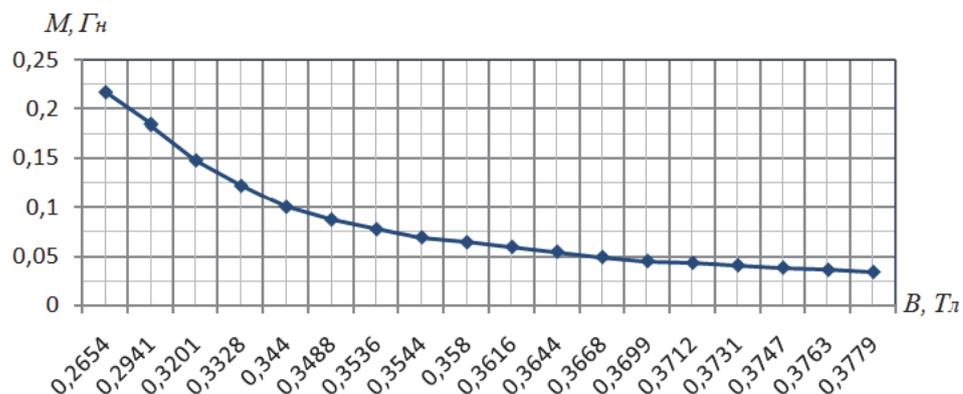


Рис. 5. Кривые зависимости  $M = F_2(B)$  при  $R_N = 200 \text{ Ом}$

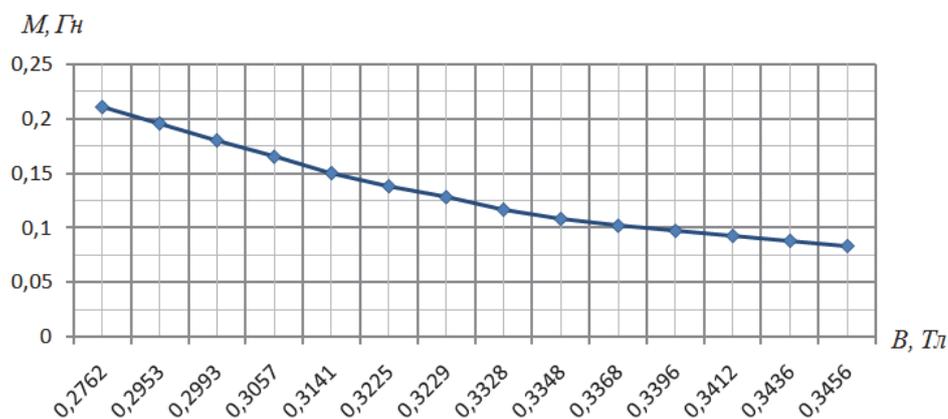


Рис. 6. Кривые зависимости  $M = F_2(B)$  при  $R_N = 510 \text{ Ом}$

Анализ кривых показывает, что обстоятельства, изложенные относительно режимов намагничивания сердечника ТТ по кривым рис. 4, подтверждаются также в результате анализа кривых рис. 5 и 6.

**Заклучение.** Фазовый метод измерения взаимной индуктивности магнитно-связанных катушек позволяет существенно упростить процесс измерения, обеспечивает получение помехоустойчивого информативного сигнала в виде временного сдвига между двумя синусоидальными напряжениями. Результаты экспериментального исследования фазового метода позволяют оценить влияние режимов намагничивания ферромагнитного сердечника на значение  $M$  и выбрать наиболее целесообразные режимы измерения в зависимости от конструктивных параметров объекта измерения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. В 3-х т. - Том 1. - СПб.: Питер, 2003. - 463 с.
2. Мамиконян Б.М., Егорян А.А., Казарян С.А. Методы и средства измерения взаимной индуктивности // Вестник НПУА: Электротехника, энергетика. – 2023. - №1. – С. 9-37.
3. Мамиконян Б.М., Меликян Т.А. Измерение взаимной индуктивности катушек фазовым методом // Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН. – 2019. – Том 72, №4. - С. 491-502.

Բ.Մ. ՄԱՄԻԿՈՆՅԱՆ, Ս.Ա. ԴԱԶԱՐՅԱՆ

### ԿՈՃԵՐԻ ՓՈՆԱԴԱՐՁ ԻՆԴՈՒԿՏԻՎՈՒԹՅԱՆ ՉԱՓՈՒՄԸ ՓՈՒԼԱՅԻՆ ՄԵԹՈՂՈՎ

Դիտարկված է փոփոխական հոսանքով մագնիսակապակցված կոճերի փոխադարձ ինդուկտիվության ( $M$ ) չափման խնդիրը: Ներկայացված է չափման օբյեկտը, շարադրված է փուլային մեթոդով  $M$ -ի չափման սկզբունքը: Իրականացվել է մեթոդի փորձարարական հետազոտություն՝ տորոիդային կառուցվածքով հոսանքի տրանսֆորմատորի ( $\langle S \rangle$ )  $M$ -ի չափման օրինակով: Ստացվել են  $M$ -ի կախվածությունները  $\langle S \rangle$ -ի մագնիսատարում մագնիսական դաշտի  $B$  ինդուկցիայից՝ դրա մագնիսացման տարբեր ռեժիմներում:

**Առանցքային բաներ.** փոխադարձ ինդուկտիվություն, չափում, փուլային մեթոդ, փուլային շեղման անկյուն, մագնիսական ինդուկցիա, մագնիսացման ռեժիմ:

B.M. MAMIKONYAN, S.A. GHAZARYAN

### MEASUREMENT OF MUTUAL INDUCTANCE OF COILS BY THE PHASE METHOD

The problem of measuring the mutual inductance ( $M$ ) of magnetically coupled coils on alternating current is considered. The object of measurement is presented, the principle of measurement of  $M$  by the phase method is outlined. An experimental study of the method was performed using the example of measuring of the  $M$  toroidal current transformer (CT). Dependences of the  $M$  on induction  $B$  of the magnetic field in the magnetic circuit in various modes of its magnetization are obtained.

**Keywords:** mutual inductance, measurement, phase method, phase shift angle, magnetic induction, magnetization mode.