

ИЗМЕРЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ФАЗОВЫМ МЕТОДОМ

Б.М. Мамиконян

Национальный политехнический университет Армении, Гюмрийский филиал

Фазовый метод измерения параметров электрических цепей позволяет реализовать раздельное определение составляющих комплексного электрического сопротивления, существенно упростить процесс измерения и повысить его точность. При этом обеспечивается единственный выходной сигнал, что позволяет сопрягать измерительное устройство со средствами вычислительной техники для автоматизированной обработки измерительной информации. Сущность метода заключается в следующем. Для каждой конкретной задачи разрабатывается соответствующая схема измерительной цепи, которая подключается к источнику переменного синусоидального тока требуемой частоты. Информативным параметром выходного сигнала измерительной цепи является угол фазового сдвига между двумя напряжениями, снимаемыми с ее соответствующих участков. Этот угол измеряется, и по его значению с помощью разработанного алгоритма определяется измеряемая величина. Если исследуемый объект имеет два измеряемых параметра (например, в случае катушки индуктивности – активное сопротивление и индуктивность обмотки), то в процессе измерения производится изменение структуры измерительной цепи и временное разделение канала измерения. Управление процессом измерения, измерение угла фазового сдвига и определение измеряемых параметров по заданным алгоритмам производятся программируемым микроконтроллером. Представлены новые схемные решения для измерения параметров электрических цепей с применением фазового метода. Рассмотрены разработанные автором измерительные цепи для измерения параметров катушек индуктивности, взаимной индуктивности двух магнитно-связанных катушек, тангенса угла диэлектрических потерь электроизоляционных материалов. Для катушек индуктивности разработаны две измерительные цепи, предназначенные для незаземленных и заземленных катушек. Проведен анализ представленных измерительных цепей, получены алгоритмы избирательного (раздельного) определения измеряемых параметров.

Ключевые слова: измерение, фазовый метод, алгоритм, индуктивность, взаимная индуктивность, диэлектрические потери.

Введение. Структурно-алгоритмический метод измерения параметров электрических цепей широко применяется в информационно-измерительной технике для избирательного измерения составляющих комплексного сопротивления

активно-индуктивных и активно-емкостных двухполюсников [1-4]. Использование при этом фазовых сигналов вместо аналоговых (потенциально-токовых) позволяет существенно упростить схему и повысить точность измерения [5, 6]. Для всех реализаций данного метода измерения управление процессом измерения, обработка результатов измерений и определение измеряемых параметров по заданному алгоритму производятся программируемым микроконтроллером (МК); они отличаются друг от друга лишь схемой измерительной цепи [7]. Для каждой конкретной задачи схема ИЦ разрабатывается таким образом, чтобы обеспечивалась возможность избирательного (раздельного) определения искомых параметров.

Объекты и методы исследования. Типовая схема ИЦ измерения параметров катушек индуктивности (КИ) представлена на рис. 1а, в которой используется временное разделение канала измерения [8].

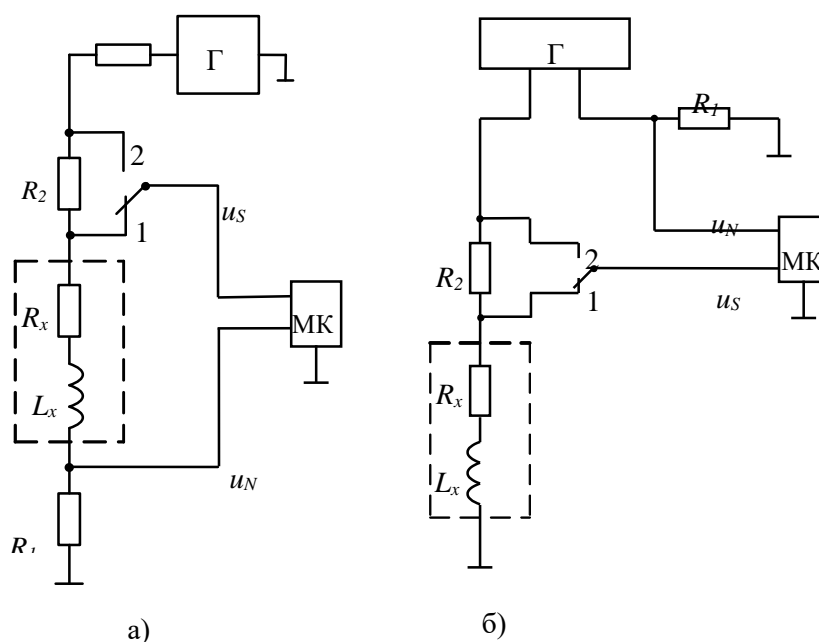


Рис. 1. Схемы ИЦ для измерения параметров КИ: а – незаземленной КИ; б – заземленной КИ

ИЦ образована последовательным соединением КИ с неизвестными параметрами R_x , L_x , образцовых резисторов - опорного R_1 и дополнительного R_2 . ИЦ подключена (непосредственно или через токоограничивающий элемент) к микросхеме генератора Γ синусоидального переменного тока, частота которого может программироваться от МК. Выходным сигналом ИЦ является угол фазового

сдвига φ между напряжениями u_s и u_N относительно общего провода схемы. Этот угол измеряется в двух положениях переключателя, встроенного в МК, по значениям которых вычисляются параметры R_x и L_x с помощью формул, получаемых следующим образом:

$$\dot{U}_N = iR_1, \dot{U}_{s1} = i(R_1 + R_x + j\omega L_x), \dot{U}_{s2} = i(R_1 + R_2 + R_x + j\omega L_x),$$

$$\operatorname{ctg}\varphi_1 = \frac{R_1 + R_x}{\omega L_x}, \operatorname{ctg}\varphi_2 = \frac{R_1 + R_2 + R_x}{\omega L_x},$$

откуда после несложных преобразований получаем

$$L_x = \frac{R_2}{\omega(\operatorname{ctg}\varphi_2 - \operatorname{ctg}\varphi_1)}, \quad R_x = \frac{R_2}{\frac{\operatorname{ctg}\varphi_2}{\operatorname{ctg}\varphi_1} - 1} - R_1, \quad (1)$$

где φ_1 и φ_2 - значения угла φ в положениях 1 и 2 переключателя соответственно; ω - угловая частота генератора.

Формулы (1) показывают, что обеспечивается раздельное измерение параметров R_x и L_x . В общем случае результаты измерения параметров КИ зависят также от частоты питающего тока, поэтому в качестве генератора Γ используется программируемый генератор синусоидальных сигналов (например, микросхема AD9833). При каждом измерении МК задает частоту генератора и использует это значение при расчете параметров КИ, вследствие чего изменение частоты генератора не влияет на точность измерения. Стабильность напряжения генератора не существенна, поскольку в формулах (1) напряжение генератора не фигурирует. Таким образом, точность определения параметров КИ зависит только от точности измерения угла φ , что выполняется в МК методом дискретного счета, поэтому точность измерения оказывается существенно выше по сравнению с методами, использующими аналоговые сигналы.

В МК угол φ преобразовывается в интервал времени τ , измеряются τ и период T , по формуле

$$\varphi = \frac{\tau}{T} \cdot 360^\circ = \frac{n f_0}{N f_0} \cdot 360^\circ = \frac{n}{N} \cdot 360^\circ,$$

вычисляется угол φ , где f_0 - частота квантующих импульсов, и по формулам (1) определяются R_x и L_x .

В случае необходимости, можно из МК оцифрованные сигналы угла φ через преобразователь интерфейса ввести в компьютер, там их обработать, результаты измерения вывести на монитор компьютера и сохранить базу результатов измерений.

В схеме рис. 1а КИ не имеет общей точки с нулевым проводом, поэтому она не применима для заземленных КИ; в этом случае следует применять ИЦ по схеме рис. 1б. Здесь опорный резистор R_1 подключен между общим проводом и вторым зажимом генератора, и через него протекает ток, обратный по направлению с током КИ. Аналогично вышеприведенным формулам, в этом случае получаем

$$\begin{aligned} \dot{U}_N &= -\dot{I}R_1, \quad \dot{U}_{S1} = \dot{I}(R_X + j\omega L_X), \quad \dot{U}_{S2} = \dot{I}(R_2 + R_X + j\omega L_X), \\ \operatorname{ctg}\varphi_1 &= \frac{R_X}{\omega L_X}, \quad \operatorname{ctg}\varphi_2 = \frac{R_2 + R_X}{\omega L_X}, \\ L_X &= \frac{R_2}{\omega(\operatorname{ctg}\varphi_2 - \operatorname{ctg}\varphi_1)}, \quad R_X = \frac{R_2}{\frac{\operatorname{ctg}\varphi_2}{\operatorname{ctg}\varphi_1} - 1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Из (2) видно, что в данном случае результаты определения параметров КИ не зависят также от сопротивления R_1 .

Фазовый метод использован для измерения взаимной индуктивности M двух магнитно-связанных катушек. В настоящее время известны два классических метода измерения M . Первый из них – это метод амперметра, вольтметра и ваттметра [9]. Исследуемые две катушки соединяют последовательно-согласно и последовательно-встречно; в обоих случаях измеряют ток I , напряжение U и активную мощность P цепи. По результатам измерений определяют реактивное сопротивление цепи:

$X = \sqrt{z^2 - R^2} = \sqrt{(U/I)^2 - P^2/I^4}$ и, используя зависимости $X_A = \omega(L_1 + L_2 + 2M)$, $X_B = \omega(L_1 + L_2 - 2M)$, где X_A - значение X при согласном включении катушек, а X_B - при встречном, вычисляют взаимную индуктивность:

$$M = (X_A - X_B)/4\omega, \quad (3)$$

где ω - угловая частота тока питания цепи; L_1 и L_2 - индуктивности первой и второй катушек соответственно.

Метод сложен и трудоемок, имеет низкую точность из-за необходимости измерения многих величин, каждая из которых, естественно, сопровождается своей погрешностью; не обеспечивается единственный выходной сигнал при сопряжении ИЦ со средствами вычислительной техники для автоматизированной обработки измерительной информации.

Более прост метод трансформатора в режиме холостого хода [9]. С помощью исследуемых катушек образуют первичную и вторичную обмотки трансформатора. Первичную обмотку питают переменным током I_1 , измеряют этот ток и напряжение $U_2 = E_2$ зажимов вторичной обмотки в режиме холостого хода и определяют взаимную индуктивность катушек по формуле

$$M = U_2 / \omega I_1 . \quad (4)$$

Как видно из (4), в этом случае также не удастся обеспечить единственный выходной сигнал для передачи на расстояние или сопряжения ИЦ со средствами обработки информации. Для устранения этого недостатка разработана схема ИЦ измерения взаимной индуктивности фазовым методом (рис. 2а). Здесь катушки 1 и 2 также образуют обмотки трансформатора, к общему выводу которых подключен опорный резистор R_0 . Первичная обмотка 1 трансформатора питается синусоидальным током I генератора (непосредственно или через токоограничивающий резистор R), а вторичная обмотка 2 работает в режиме холостого хода. Выходным сигналом ИЦ является угол фазового сдвига φ между напряжениями u_s и u_N относительно общего провода схемы, которые приложены ко входу МК (непосредственно или через буферы).

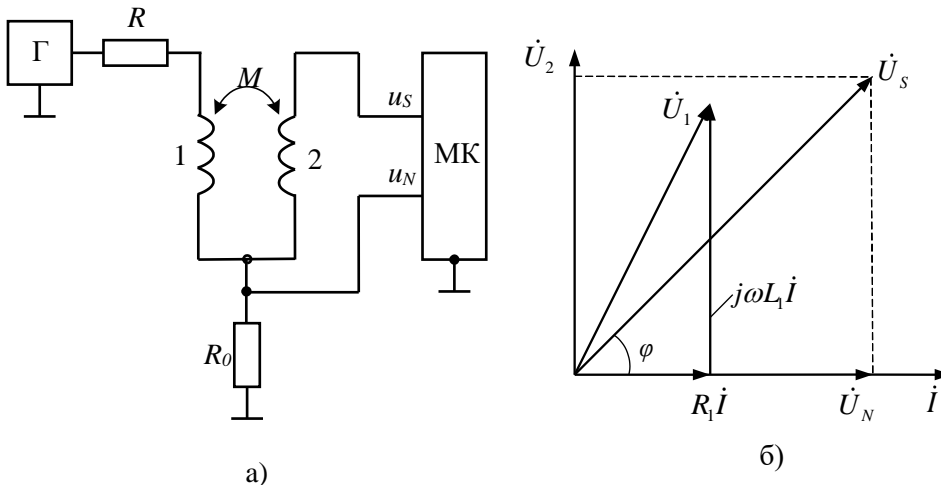


Рис. 2. ИЦ для измерения параметров взаимной индуктивности фазовым методом: а – схема ИЦ; б – векторная диаграмма тока и напряжений

В векторной диаграмме (рис. 2б) через R_1 , L_1 и U_1 обозначены активное сопротивление, индуктивность и напряжение первичной обмотки трансформатора соответственно, $\dot{U}_N = \dot{I}R_0$, $\dot{U}_2 = j\omega MI$, $\dot{U}_s = \dot{U}_N + \dot{U}_2$, $\operatorname{tg}\varphi = \frac{U_2}{U_N} = \frac{\omega MI}{IR_0} = \frac{\omega M}{R_0}$, следовательно,

$$M = \frac{R_0}{\omega} \cdot \operatorname{tg}\varphi ,$$

откуда видно, что результат измерения не зависит от напряжения генератора и тока питания ИЦ.

Известно применение фазового метода для измерения и определения высоковольтным напряжением тангенса угла диэлектрических потерь электроизоляционных материалов [10]. Устройство (рис. 3) содержит источник питания синусоидального переменного напряжения 1; высоковольтный трансформатор 2, высоковольтная обмотка которого имеет дополнительный низковольтный вывод для подключения измерительной аппаратуры; испытуемый объект 3, представленный своей емкостью C_x ; опорный резистор R_1 и МК, который выполняет роль измерителя разности фаз двух переменных напряжений и вычислительного устройства.

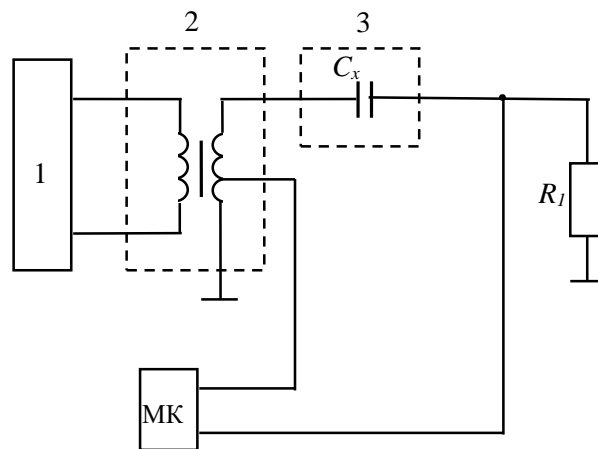


Рис. 3. Схема измерения тангенса угла диэлектрических потерь фазовым методом с опорным резистором

Для последовательной схемы замещения испытуемого объекта $tg\delta = R_x/X_x = \omega R_x C_x$, где R_x отображает активные потери энергии в объекте.

Измеряется угол φ между напряжениями $\dot{U} = i \left(R_x + R_1 - j \frac{1}{\omega C_x} \right)$ и $\dot{U}_2 = i R_1$, который

соответствует выражению $|tg\varphi| = \frac{1}{\omega(R_x + R_1)C_x}$. Поэтому из-за присутствия

сопротивления R_1 в формуле определения $tg\delta$ добавляется угол γ :

$$tg\delta = tg \left(\frac{\pi}{2} - \varphi - \gamma \right).$$

Полагается, что в данной схеме угол γ имеет фиксированное значение, и погрешность измерения из-за присутствия сопротивления R_1 незначительна. Отметим, что γ - это угол сдвига фаз между напряжениями \dot{U} и \dot{U}_1 , определяемый по выражению

$$\gamma = \arcsin \left(\frac{U_2}{U_x} \cdot \sin \varphi \right). \quad (5)$$

Из (5) видно, что угол γ не имеет фиксированного значения, его значение зависит от самого измеряемого угла δ , от которого зависят как напряжение U_1 , так и угол φ . Пренебрежение этой зависимостью приводит к дополнительной систематической погрешности при определении $tg\delta$ по формуле (6), о чем справедливо указано в [11].

В схеме рис. 3 резистор R_1 необходим для формирования опорного напряжения U_2 , имеющего фазу измерительного тока \dot{I} . Однако его включение в схему изменяет не только величину тока, но и его фазу, чем и обусловлено возникновение дополнительной погрешности измерения.

Этого недостатка схемы рис. 3 можно избежать, если вместо опорного резистора R_1 использовать резонансный контур, образованный последовательным соединением индуктивности L_0 и емкости C_0 , настроенный в резонанс на частоте источника питания ИЦ, а опорное напряжение U_0 снять с емкости C_0 (рис. 4).

Измерительный ток определяется формулой

$$\dot{I} = \dot{U} / \left[\left(R_x - j \frac{1}{\omega C_x} \right) + j \left(\omega L_0 - \frac{1}{\omega C_0} \right) \right] = \dot{U} / \left(R_x - j \frac{1}{\omega C_x} \right),$$

так как при резонансе $\omega L_0 = 1/\omega C_0$, и включение резонансного контура не влияет на измерительный ток (активными потерями в резонансном контуре пренебрегаем). Вектор \dot{U}_0 опорного напряжения отстает от вектора тока на 90° (рис. 4б), поэтому обеспечивается условие $\varphi = \delta$, т.е. МК непосредственно измеряет угол диэлектрических потерь δ и определяет $tg\delta$ по формуле $tg\delta = tg\varphi$.

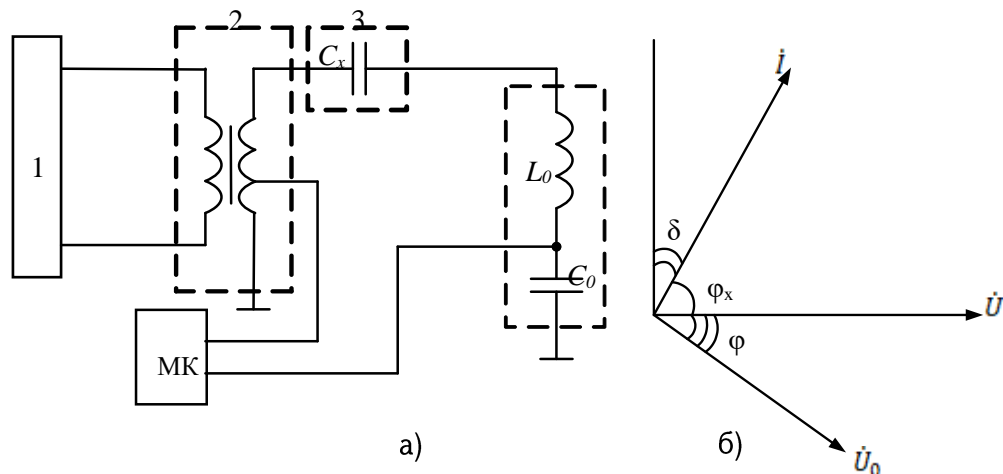


Рис. 4. ИЦ для измерения тангенса угла диэлектрических потерь фазовым методом с резонансным контуром: а – схема; б – векторная диаграмма тока и напряжений

Выводы. Рассмотренные здесь примеры показывают, что фазовый метод измерения параметров электрических цепей может при соответствующем выборе схемы ИЦ существенно упростить процесс измерения и повысить его точность.

Литература

1. Арутюнов П.А. Теория и применение алгоритмических измерений. - М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. Кнеллер В.Ю. Средства измерений параметров цепей переменного тока: тенденции развития и актуальные задачи // Приборы и системы управления. – 1998. - №1. - С. 64-68.
3. Свистунов Б.Л. Структурно-алгоритмические методы синтеза средств инвариантного измерения параметров электрических цепей: Дис. ... докт. техн. наук. – Пенза, 2004. – 360 с.
4. Мамиконян Б.М., Мамиконян Х.Б. Методы и средства раздельного измерения параметров катушек индуктивности на переменном токе // Вестник ГИУА. Серия “Электротехника, энергетика”. - 2014. - Вып. 17, №2. – С. 9-24.
5. Mamikonyan V.M. Phase Method of Invariant Measurement of Active-Inductive Measuring Two-Pole Parameters // Sensors & Transducers. – 2017. - Vol. 211, issue 4. - P. 38-42.
6. Мамиконян Б.М. Измерение параметров пассивных электрических двухполюсников фазовым методом // Вестник НПУА: Электротехника, энергетика. – 2017. - №1. – С. 67-76.
7. Мамиконян Б.М., Мамиконян Х.Б. Измерительные цепи индуктивных и емкостных первичных преобразователей с фазовыми выходными сигналами // Приборы. – 2015.- №7. – С. 11-16.

8. Патент 2930 АМ, МКИ G01R 27/00. Способ измерения параметров катушки индуктивности / **Б.М. Мамиконян, Х.Б. Мамиконян.** - 2015.
9. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.
10. Патент 2115131 RU, МКИ G01R 27/26. Устройство для определения тангенса угла диэлектрических потерь / **Г.М. Михеев.** - 1998.
11. Патент 2215296 RU по кл. G01R 27/26. Устройство для определения тангенса угла диэлектрических потерь / **Г.М. Михеев.** - 2003.

*Поступила в редакцию 12.09.2018.
Принята к опубликованию 14.12.2018.*

ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՇՂԹԱՆԵՐԻ ՈՐՈՇ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՉԱՓՈՒՄԸ ՓՈՒԼԱՅԻՆ ՄԵԹՈԴՈՎ

Բ.Մ. Մամիկոնյան

Ներկայացված են նոր սխեմային լուծումներ՝ էլեկտրական շղթաների պարամետրերը փոլային մեթոդով չափելու համար, որոնք թույլ են տալիս անջատ որոշել կոմպլեքս էլեկտրական դիմադրությունների բաղադրիչները, էապես պարզեցնել չափման գործընթացը և բարձրացնել չափման ճշգրտությունը: Ընդ որում, ապահովվում է միակ ելքային ազդանշան, ինչը թույլ է տալիս լծորդել չափման սարքը հաշվողական տեխնիկայի միջոցների հետ՝ չափողական ինֆորմացիայի ավտոմատացված մշակման նպատակով: Մեթոդի էությունը հետևյալն է: Յուրաքանչյուր որոշակի խնդրի համար մշակվում է չափման շղթայի համապատասխան սխեմա, որը միացվում է պահանջվող հաճախության փոփոխական սինուսոիդային հոսանքի աղբյուրին: Չափման շղթայի ելքային ազդանշանի ինֆորմատիվ պարամետրը երկու ելքային լարումների միջև փոլային շեղման անկյունն է, որոնք հանվում են դրա համապատասխան տեղամասերից: Չափվում է այդ անկյունը, և դրա արժեքով որոշվում է չափվող մեծությունը՝ մշակված ալգորիթմի միջոցով: Եթե հետազոտվող օբյեկտն ունի երկու չափվող պարամետր (օրինակ, ինդուկտիվության կոճի դեպքում՝ փաթույթի ակտիվ դիմադրությունը և ինդուկտիվությունը), ապա չափման ընթացքում կատարվում են չափման շղթայի կառուցվածքի փոփոխություն և չափման կապուղու ժամանակային բաժանում: Չափման գործընթացի կառավարումը, փոլային շեղման անկյան չափումը և չափվող պարամետրերի որոշումը՝ տրված ալգորիթմներով, կատարվում է ծրագրավորվող միկրոկոնտրոլերի միջոցով: Ներկայացված են նոր սխեմային լուծումներ՝ էլեկտրական շղթաների պարամետրերը փոլային մեթոդով չափելու համար: Դիտարկված են հեղինակի կողմից մշակված չափման շղթաներ, որոնք նախատեսված են ինդուկտիվության կոճի պարամետրերի, մագնիսական կապով երկու կոճերի փոխադարձ ինդուկտիվության, էլեկտրամեկուսիչ նյութերի դիէլեկտրական կորուստների անկյան տանգենսի չափման համար: Ինդուկտիվության կոճերի համար մշակված է չափման երկու շղթա, որոնք նախատեսված են չհողանցված և հողանցված կոճերի համար: Կատարված է չափման բոլոր շղթաների վերլուծությունը, ստացվել են չափվող պարամետրերի ընտրողական (անջատ) որոշման ալգորիթմները:

Առանցքային բաներ. չափում, փուլային մեթոդ, ալգորիթմ, ինդուկտիվություն, փոխադարձ ինդուկտիվություն, դիէլեկտրական կորուստներ:

MEASUREMENT OF SOME PARAMETERS OF ELECTRICAL CIRCUITS BY THE PHASE METHOD

B.M. Mamikonyan

The phase method of electrical circuit parameter measurement allows to realize the separate determination of the components of comprehensive electrical resistance, significantly simplify the measurement process and improve its accuracy. In doing so, a single output signal is ensured, which allows to conjugate the measuring device with computing devices for automated processing of the measuring information. The essence of the method is as follows. For each specific task, an appropriate measuring circuit scheme is developed, which is connected to the source of alternating sinusoidal current of the required frequency. The informative parameter of the output signal of the measuring circuit is the phase shift angle between two voltages, taken from the corresponding sections of the measuring circuit. This angle is measured, and by its value, by means of the developed algorithm, the measured value is determined. If the object under examination has two measurable parameters (for example, in the case of an inductance coil – active resistance and coil inductance), the measuring circuit structure is changed and the measurement channel time division is fulfilled during the measurement process. The measurement process control, the phase shift angle measurement, and the measured parameter determination by the specified algorithms are performed by a programmable microcontroller. New circuit solutions for measuring the parameters of electrical circuits using the phase method are represented. The measuring circuits developed by the authors for measuring the parameters of inductance coils, mutual inductance of two magnetically connected coils, and the tangent of the dielectric loss angle of electro-insulating materials are considered. Two measuring circuits are developed for inductance coils and intended for ungrounded and grounded coils. The analysis of all the presented measuring circuits is set out, the algorithms of selective (separate) determination of the measured parameters are obtained.

Keywords: measurement, phase method, algorithm, inductance, mutual inductance, dielectric losses.