

УДК 621.317 (076)

## МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

**Б.М. Мамиконян, А.А. Егорян, А.Р. Аветисян**

*Национальный политехнический университет Армении*

Рассмотрена проблема отдельного измерения параметров катушек индуктивности. Описаны конструктивные и схемные исполнения применяемых в электрических аппаратах катушек индуктивности. Изложены особенности построения схемы замещения катушки индуктивности, указаны возможные пределы изменения параметров этой схемы. Проведен сравнительный анализ методов измерения параметров катушки, обоснована необходимость их измерения на переменном токе. Рассмотрены схемы измерения параметров катушки, основанные на применении амплитудно-фазового метода, проведен их сравнительный анализ. Получены и проанализированы формулы расчета параметров катушки по результатам измерений. Описаны условия выполнения и результаты экспериментального измерения.

**Ключевые слова:** катушка индуктивности, индуктивность, активное сопротивление, измерительный двухполюсник, фазовый метод, измерение.

**Введение.** Катушки индуктивности (КИ) широко применяются в большинстве электротехнических и радиоэлектронных устройств. Они являются обязательными и основными компонентами реле, контакторов, трансформаторов, электрических машин, дросселей. Большую группу устройств с КИ составляют индуктивные датчики, являющиеся доступным, простым, надежным, дешевым элементом систем управления приводами, станками, автоматическими линиями, систем измерения физических величин [1]. Широкое применение КИ требует создания быстродействующих, простых и надежных измерителей параметров КИ, совместимых с современными микроконтроллерными устройствами обработки информации и управления процессом измерения.

**Методы исследования.** КИ, за исключением дросселей, предназначенных для использования в цепях питания, не являются комплектующими изделиями, как, например, резисторы и конденсаторы. Их изготавливают по индивидуальным заданиям с требуемыми конструкцией и параметрами, необходимыми для конкретного применения. Основной особенностью КИ является применение в них магнитных сердечников. В переменных магнитных полях в магнитопроводе КИ возникают активные потери электрической энергии,

обусловленные явлениями гистерезиса и вихревых токов, вследствие чего относительная магнитная проницаемость магнитопровода становится комплексной величиной, имеющей действительную ( $\mu'$ ) и мнимую ( $\mu''$ ) составляющие:  $\dot{\mu} = \mu' - j\mu''$ . Поэтому сопротивление катушки определяется выражением

$$Z = R + j\omega L = R + j\omega \frac{W^2 \mu_0 \dot{\mu} S}{l} = R + j\omega \frac{W^2 \mu_0 S}{l} (\mu' - j\mu'') = R_{\Sigma} + j\omega L_{\Sigma}, \quad (1)$$

где  $R_{\Sigma} = R + \omega W^2 \mu_0 \mu'' S / l$  - активная составляющая комплексного сопротивления катушки, отображающая активные потери энергии, возникающие от переменного тока в проводе катушки с сопротивлением  $R$  и в магнитопроводе;  $L_{\Sigma} = W^2 \mu_0 \mu' S / l$  - индуктивность катушки, характеризующая способность катушки накапливать магнитную энергию;  $W$  - число витков обмотки;  $\omega$  - угловая частота тока через катушку;  $l$  - средняя длина магнитной силовой линии;  $S$  - площадь поперечного сечения магнитных силовых линий;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  - абсолютная магнитная проницаемость вакуума (воздуха) – физическая постоянная.

Для большинства КИ индуктивность является полезным параметром, а активное сопротивление – паразитным, в связи с чем качество таких КИ характеризуется добротностью:  $Q = \omega L_{\Sigma} / R_{\Sigma}$ . Исключение составляют вихретоковые индуктивные датчики, индукционные счетчики электроэнергии и др., в которых в воздушном зазоре магнитопровода помещается немагнитное проводящее тело. В последнем от переменного магнитного поля, создаваемого катушкой, индуцируются вихревые токи, вызывающие активные потери электрической энергии и, следовательно, увеличение активного сопротивления катушки.

КИ имеют, как правило, цилиндрическую или спиральную форму витков и выполняются как однослойными, так и многослойными. Если обмотка КИ содержит большое количество витков и существует разность потенциалов между отдельными витками и слоями витков, то КИ будет иметь некоторую собственную емкость  $C_0$ , образующую с индуктивностью катушки параллельный колебательный контур, резонансная частота  $f_0 = 1 / 2\pi \sqrt{L_{\Sigma} C_0}$  которого и является частотой собственного резонанса КИ. Как правило, подавляющее большинство КИ работает при частотах, намного ниже резонансной. Собственная емкость снижает добротность ИК, внося дополнительное сопротивление потерь  $R_C$ , приводящее к выделению в диэлектрической изоляции обмотки активной мощности:

$$P_C = I^2 R_C = U^2 \omega C_0 \operatorname{tg} \delta = I^2 \omega^3 L_0^2 C_0 \operatorname{tg} \delta,$$

где  $U = I \omega L_0$ ;  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь изоляции провода и каркаса ИК.

Отсюда следует формула для расчета последовательного сопротивления потерь  $R_C$  в собственной емкости катушки:

$$R_C = \omega^3 L_0^2 C_0 \operatorname{tg} \delta.$$

Величина  $R_C$  относительно невелика, например, на частоте  $f = 5 \text{ кГц}$  при  $L_0 = 1,0 \text{ Гн}$ ,  $C_0 = 5 \text{ нФ}$ ,  $\operatorname{tg} \delta = 10^{-2}$  значение  $R_C = (6,28 \cdot 5000)^3 \cdot 1,0^2 \cdot 5 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-2} \approx 1,25 \text{ Ом}$ .

В ряде случаев при определенных ограничениях использование априорной информации о модели объекта исследования позволяет свести двухполюсные электрические цепи к линейной двухэлементной двухполюсной электрической цепи, что значительно упрощает раздельное определение ее параметров [2]. В случае с КИ при сравнительно невысокой частоте тока (до нескольких сотен килогерц) полную эквивалентную схему замещения КИ можно заменить упрощенной схемой замещения в виде последовательного соединения резистора  $R_x$  и индуктивности  $L_x$  (рис. 1).

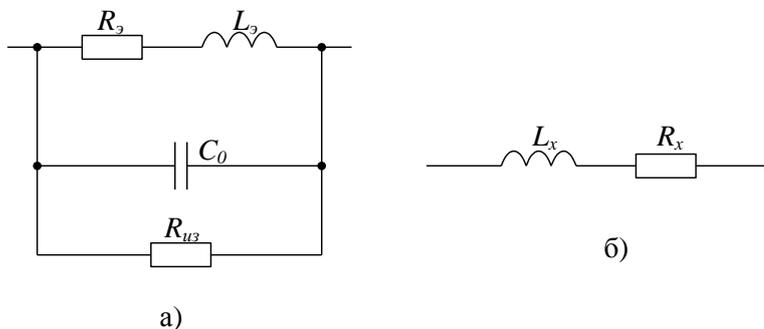


Рис. 1. Электрические схемы замещения КИ: а - полная, б - упрощенная

Возможные значения индуктивности катушек колебательных контуров, дросселей, обмоток трансформаторов, электрических машин и других электромагнитных устройств лежат в пределах примерно от 1 нГн до 10 кГн. В частности, для силовых трансформаторов типичные значения индуктивности и сопротивления первичной обмотки составляют  $L_x = 10 \dots 100 \text{ Гн}$ ,  $R_x = 50 \dots 200 \text{ Ом}$  [3]. Мощные дроссели (катушки фильтров выпрямителей и т.п.), предназначенные для небольших усилителей, имеют, как правило,

индуктивность 10...15 Гн и рассчитаны на токи 100...250 мкА. Для таких дросселей резонансная частота составляет от 3 до 12 кГц. На частотах, превышающих значение резонансной, дроссели не могут обеспечить эффективный барьер для шумов, генерируемых при выпрямлении переменного тока, или для ВЧ шумов, поступающих по сети питания. Высокочастотные КИ имеют добротность порядка 300...400 [4]. Тонкопленочные миниатюрные КИ с сердечниками из ферритов используются в гибридных интегральных схемах, они имеют частотный диапазон 10...100 МГц, выполняются в виде круглой или квадратной спирали и имеют на площади 1 см<sup>2</sup> число витков не более 10, их добротность порядка 20...50.

Из формулы (1) видно, что активное сопротивление  $R_x$  КИ зависит также от частоты питающего катушку тока, следовательно, параметры КИ необходимо измерить переменным током той частоты, на которой предусмотрено применение КИ. Более того, учитывая нелинейность кривой намагничивания магнитопровода, измерительный (тестовый) ток также желательно выбрать равным рабочему току КИ. И поскольку схема замещения КИ представляет собой комплексное сопротивление, то измерительная цепь (ИЦ) должна обеспечить раздельное измерение параметров  $R_x$  и  $L_x$ .

Для раздельного измерения параметров двухэлементной схемы замещения КИ наибольшее распространение получили уравновешенные мосты переменного тока и некоторые схемы резонансного метода [5], однако их отличает сложность реализации, большое время измерения и неудобство автоматизации с применением средств вычислительной техники.

Сравнительно новым направлением в области измерения параметров пассивных электрических двухполюсников является использование делителей напряжения переменного тока с применением амплитудно-фазового метода. Такое техническое решение использовано для раздельного измерения параметров параллельной схемы замещения емкостного датчика [6, 7] и измерения параметров последовательной схемы замещения КИ [8]. Сущность измерителя [8] поясняется схемой рис. 2. Последовательно с КИ соединен образцовый резистор  $R_0$ ; полученный этим соединением измерительный двухполюсник в виде делителя напряжения подключен через токоограничивающий элемент к генератору переменного тока с угловой частотой  $\omega$ . Измеряются напряжение  $U_x$  на зажимах КИ, напряжение  $U_0$  на резисторе  $R_0$ , угол  $\varphi$  фазового сдвига между этими напряжениями. Параметры КИ вычисляются по формулам

$$R_x = \frac{U_x R_0 \cos \varphi}{U_0}, \quad L_x = \frac{U_x R_0 \sin \varphi}{U_0 \omega}.$$

Недостатком схемы рис. 2 является отсутствие у напряжения  $U_0$  общей точки с заземлением схемы, что создает определенные неудобства в выборе последующих схемных решений для обработки выходных напряжений цепи. Нами разработана модифицированная схема делителя напряжения, в которой устранен указанный недостаток (рис. 3). Здесь выходными напряжениями являются напряжение  $U_0$  образцового резистора и общее напряжение  $U_s$  измерительного двухполюсника  $\dot{U}_s = \dot{U}_x + \dot{U}_0$ . Параметры КИ определяются из следующих соотношений:

$$R_x = z_s \cos \varphi_s - R_0 = \frac{U_s \cos \varphi_s}{I} - R_0 = \frac{U_s R_0 \cos \varphi_s}{U_0} - R_0 = \left( \frac{U_s \cos \varphi_s}{U_0} - 1 \right) \cdot R_0, \quad (2)$$

$$L_x = \frac{z_s \sin \varphi_s}{\omega} = \frac{U_s R_0 \sin \varphi_s}{U_0 \omega}, \quad (3)$$

где  $I$  - измерительный ток;  $z_s$  - модуль полного сопротивления измерительного двухполюсника;  $\varphi_s$  - угол сдвига фаз между напряжением  $U_s$  и током  $I$ .

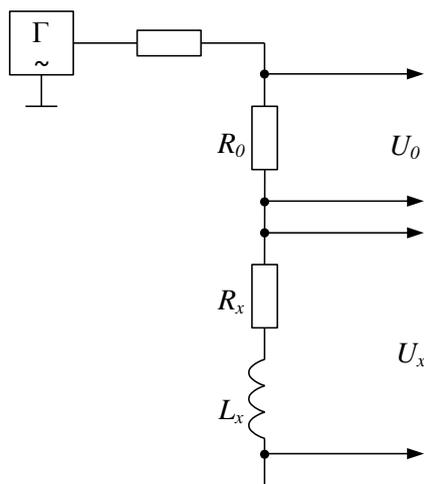


Рис. 2. Схема делителя напряжения для измерения параметров КИ

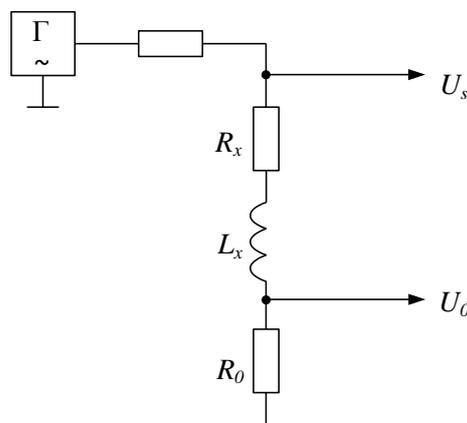


Рис. 3. Схема делителя с общей точкой заземления выходных напряжений

**Результаты исследования.** Разработана схема измерителя параметров КИ с ИЦ (рис. 3). Выходные напряжения цепи поочередно подаются через буферные усилители на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП), выход которого подключен ко входу микроконтроллера, производящего управление коммутационным узлом, измерение сигналов и математическую обработку полученных данных. Измерительный ток равен  $10 \text{ мА}$ , частота -  $2 \text{ кГц}$ , предел

измеряемых индуктивностей -  $5 \text{ мГн}$ , сопротивлений -  $20 \text{ Ом}$ . Для повышения точности измерений в приборе осуществляется усреднение результатов измерений. Из выражений (2) и (3) видно, что точность измерения параметров КИ определяется погрешностью измерения комплексного напряжения, стабильностью сопротивления образцового резистора и частоты генератора. Так как стабильность частоты генератора в данном приборе очень высока (определяется стабильностью частоты кварцевого резонатора и находится на уровне порядка  $0,0001\%$ ), то основная погрешность определяется только первыми двумя составляющими. Стабильность образцового резистора составляет  $0,1\%$ , погрешность измерения комплексного напряжения определяется параметрами АЦП и в данном случае составляет величину порядка  $0,03 \dots 0,1\%$ , что даёт суммарную погрешность измерения порядка  $0,2\%$ . Интервал времени, в течение которого производится измерение комплексных напряжений, выбирается с учетом частоты промышленного тока и составляет  $20 \text{ мс}$ , что позволяет максимально снизить влияние наводок и, соответственно, повысить точность измерений.

**Заключение.** Применение амплитудно-фазового метода для измерения параметров пассивных электрических двухполюсников, в частности – для отдельного измерения параметров катушек индуктивности на переменном токе, позволяет обеспечить инвариантность результата измерения от влияния изменения напряжения питающего генератора и требуемую точность измерения.

#### Литература

1. **Щепетов А.Г.** Теория, расчет и проектирование измерительных устройств. Часть 2. – М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2008. - 344 с.
2. **Мелентьев В.С., Костенко Е.В., Миронов Д.А.** Аппроксимационные методы отдельного определения параметров двухэлементных двухполюсных электрических цепей // Ползуновский вестник. - 2011. - № 3/1. – С. 47-50.
3. **Васильченко Е.** Измерение параметров магнитопроводов резонансным методом. - М.: Солон-Пресс, 2003. – 10 с.
4. **Миронов Э.Г.** Методы и средства измерений: Учебное пособие. – Екатеринбург: ГОУ ВПО “Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина”. - 2009. - 463 с.
5. **Атамалян Э.Г.** Приборы и методы измерения электрических величин: Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Высшая школа, 1989. – 384 с.
6. US Patent № 6703847. G01R 27/26. Determining the dielectric properties of wood / **L. Venter, J. Viljoen.** - 2004.
7. **Мамиконян Б.М., Аветисян А.Р.** Измерение емкости датчика диэлькометрического влагомера древесины // Вестник ГИУА. Серия “Электротехника, энергетика”. - 2013. - Вып. 16. - №1. – С. 65-74.

8. Прецизионный измеритель индуктивностей с интерфейсом USB // <http://www.samm.zp.ua/Lmeter>.

*Поступила в редакцию 10.11.2014.  
Принята к опубликованию 22.05.2015.*

## **ՓՈՓՈԽԱԿԱՆ ՀՈՍԱՆՔՈՎ ԻՆԴՈՒԿՏԻՎՈՒԹՅԱՆ ԿՈՃԵՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՉԱՓՄԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԸ**

**Բ.Մ. Մամիկոնյան, Ա.Ա. Եգորյան, Ա.Ռ. Ավետիսյան**

Դիտարկված է ինդուկտիվության կոճերի պարամետրերի անջատ չափման հիմնախնդիրը: Նկարագրված են էլեկտրական ապարատներում կիրառվող ինդուկտիվության կոճերի կառուցվածքային և սխեմային կատարումները: Շարադրված են ինդուկտիվության կոճի փոխարինման սխեմայի կառուցման առանձնահատկությունները, նշված են այդ սխեմայի պարամետրերի փոփոխման հնարավոր սահմանները: Կատարված է կոճի պարամետրերի չափման մեթոդների համեմատական վերլուծությունը, հիմնավորված է դրանց՝ փոփոխական հոսանքով չափման անհրաժեշտությունը: Դիտարկված են կոճի պարամետրերի չափման սխեմաները, որոնք հիմնված են ամպլիտուդափուլային մեթոդի վրա, կատարված է դրանց համեմատական վերլուծությունը: Ստացված և վերլուծված են չափումների արդյունքերով կոճի պարամետրերի որոշման բանաձևերը: Նկարագրված են փորձարարական չափման կատարման պայմանները և ստացված արդյունքները:

**Ստանդարտային բաներ.** ինդուկտիվություն, կոճ, ինդուկտիվություն, ակտիվ դիմադրություն, չափողական երկբևեռանի, փուլաչափային մեթոդ, չափում:

## **METHODS OF INDUCTOR PARAMETER MEASUREMENT WITH ALTERNATING CURRENT**

**B.M. Mamikonyan, A.A. Egoryan, A.R. Avetisyan**

The problem of separate measurement of the inductor parameters is considered. The structural and circuit performance used in electrical devices of inductors are described. The peculiarities of designing are stated, an equivalent circuit inductor, the possible range of variation of the parameters of the scheme are mentioned. A comparative analysis of the methods for measuring the coil parameters is carried out, the necessity of their measurement with alternating current is substantiated. The measurement circuit parameters of the coil based on the use of amplitude-phase method are considered, their comparative analysis is carried out. Formulas for calculating the parameters of the coil by the measurement results are obtained and analyzed. The conditions for implementation and the results of experimental measurements are described.

**Keywords:** inductor, inductance, resistance, measuring two-pole, phase method, measurement.