

3. Лукашин, Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов [Текст] / Ю.П. Лукашин. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 416 с.
4. Четыркин, Е.М. Статистические методы прогнозирования [Текст] / Е.М. Четыркин. – М.: Статистика, 1977. – 200 с.

УДК 621.382.08(035.5)

## ИЗМЕРЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИНДУКТИВНОГО ИМПЕДАНСА МЕТОДОМ ТРЁХ ВОЛЬТМЕТРОВ

**Н.И. Твердоступ**

кандидат технических наук, доцент кафедры электронных вычислительных машин, Днепрпетровский национальный университет имени Олеся Гончара, г. Днепрпетровск, Украина, e-mail: [tnik72@mail.ru](mailto:tnik72@mail.ru)

**Аннотация.** Исследованы возможности метода трех вольтметров для измерения индуктивности, активного сопротивления, а также их частотных характеристик. Установлено, что в диапазоне частот до 100 кГц погрешность измерения индуктивности составляет не более 0,3%, активного сопротивления – 8,65%.

*Ключевые слова:* индуктивность, сопротивление, импеданс, метод трёх вольтметров, измерение, частотная характеристика, добротность, погрешность, образцовая мера.

## MEASURING OF CONSTITUENTS OF INDUCTIVE IMPEDANCE BY THE METHOD OF THREE VOLTMETERS

**Nikolay Tverdostup**

Ph.D. in engineering sciences, Associate Professor of Electronic Calculable Machines Department, Dnepropetrovsk National University of the name Olesya Gonchara, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: [tnik72@mail.ru](mailto:tnik72@mail.ru)

**Abstract.** Possibilities of method of three voltmeters are investigational for measuring of inductance of pure resistance, and also their frequency descriptions. It is set that in the range of frequencies to 100 kHz the error of measuring of inductance makes no more than 0,3%, pure resistance - 8,65%.

*Keywords:* inductance, resistance, impedance, method of three voltmeters, measuring, frequency description, good quality, error, exemplary measure.

**Введение.** Среди методов измерения индуктивного импеданса [1] выделяется метод трех вольтметров [2], который используют на промышленных частотах (50, 400 Гц) для определения мощности, потребляемой приемником электрической энергии, его активного сопротивления, реактанса

и полного сопротивления. Сравнение методов Q-метра и мостового, используемых для измерения составляющих импеданса в широком диапазоне частот, с методом трех вольтметров показывает, что последний обладает несомненным достоинством – эксплуатационная простота и удобство, заключающееся в том, что для измерения параметров приёмника достаточно всего лишь определить напряжения на трёх участках электрической цепи, состоящей из приёмника электрической энергии с последовательно включенным образцовым активным сопротивлением.

**Цель работы.** Оценить возможности метода трёх вольтметров для измерения составляющих индуктивного импеданса, а также определения их частотных характеристик в диапазоне выше промышленных частот.

**Материалы и результаты исследований.** На рис.1 представлена эквивалентная схема измерительной цепи (а) для определения составляющих индуктивного импеданса методом трёх вольтметров и её векторная

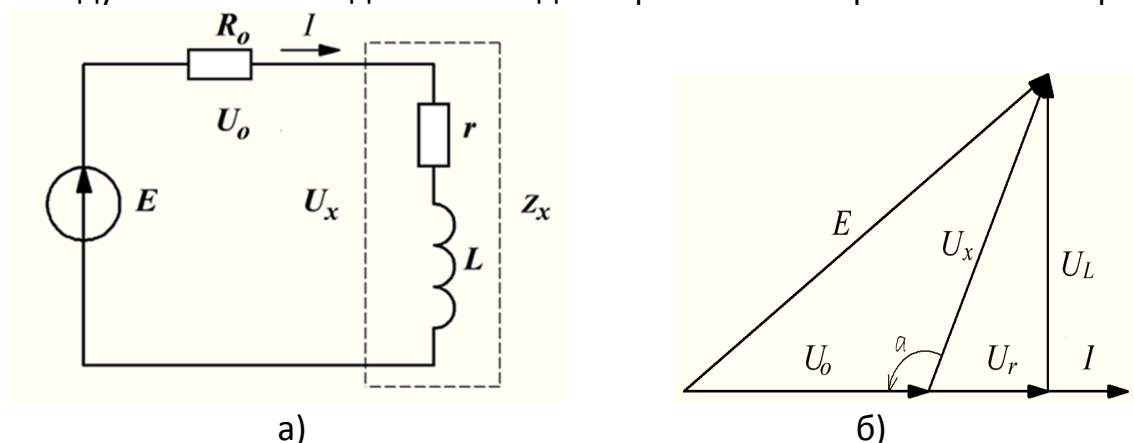


Рисунок 1 – Измерительная цепь для метода трёх вольтметров (а) и её векторная диаграмма напряжений и тока (б)

диаграмма (б), где  $E$  – напряжение генератора гармонических колебаний;  $R_o$  – образцовое сопротивление;  $L, r$  – индуктивность и активное сопротивление измеряемого импеданса  $z_x$ ;  $U_o, U_x$  – падения напряжения на образцовом сопротивлении и измеряемом импедансе;  $U_L, U_r$  – реактивная и активная составляющие напряжения  $U_x$ ;  $I$  – ток в измерительной цепи. Импедансы измеряемой индуктивности  $z_x$  и измерительной цепи  $z$  имеют вид

$$z_x = \sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}, \quad (1)$$

$$z = \sqrt{(R_o + r)^2 + \omega^2 L^2}, \quad (2)$$

где  $\omega$  – частота колебаний гармонического генератора  $E$ . Для последовательной цепи значения импедансов можно представить как

$$z_x = R_o U_x / U_o, \quad z = R_o E / U_o. \quad (3)$$

Из (1) – (3) следует система уравнений

$$\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2} = R_o U_x / U_o, \quad (4)$$

$$\sqrt{(R_o + r)^2 + \omega^2 L^2} = R_o E / U_o, \quad (5)$$

решение которой позволяет получить выражения для активной составляющей индуктивного импеданса

$$r = \frac{R_o}{2} \left( \frac{E^2 - U_x^2}{U_o^2} - 1 \right) \quad (6)$$

и его индуктивности

$$L = \frac{R_o}{\omega} \sqrt{\frac{U_x^2}{U_o^2} - \frac{1}{4} \left( \frac{E^2 - U_x^2}{U_o^2} - 1 \right)^2}. \quad (7)$$

Из двух последних выражений следует, что величины  $r$  и  $L$  можно найти измерением напряжений  $E$ ,  $U_x$  и  $U_o$  с последующим вычислением по (6) и (7). Следует отметить, что найденные составляющие индуктивного импеданса  $r$  и  $L$  будут действительными и положительными только при выполнении условия

$$U_x^2 + U_o^2 \leq E^2 \leq (U_x + U_o)^2, \quad (8)$$

на векторной диаграмме (рис. 1б) это означает, что угол  $\alpha$  может принимать значения в ограниченном диапазоне  $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ .

Для определения возможности измерения составляющих индуктивного импеданса была собрана измерительная схема согласно рис.1а. В качестве измеряемого импеданса использованы катушки из набора образцовых мер индуктивности типа L-0170 III разряда класса 0,2. Измерения проводились на частоте 1 кГц вольтметром В7-27А/1 с использованием генератора гармонических колебаний ГЗ-118. Образцовым сопротивлением  $R_o$  был выбран резистор типа МЛТ-2 с активным сопротивлением 1475 Ом (на частоте 1 кГц).

В таблице 1 представлены результаты измерений, где  $L_o$  – номинальные значения образцовых мер индуктивности;  $L_d$ ,  $r_d$  – действительные значения индуктивностей и активного сопротивления мер, полученные мостовым измерителем Е7-8;  $L$ ,  $r$  – индуктивность и активное сопротивление образцовых мер, определенные методом трех вольтметров.

Таблица 1 – Результаты измерения образцовых мер индуктивности

$L_0$ , мГн	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200
$L_\partial$ , мГн	0,201	0,501	1	1,999	4,997	10	20,01	49,99	100	199,9
$r_\partial$ , Ом	1,612	1,944	2,97	4,73	9,98	20,6	75,2	125,5	294	241
$L$ , мГн	0,225	0,518	0,997	1,984	4,907	9,992	19,9	49,98	99,97	200,5
$r$ , Ом	1,499	1,995	2,987	4,948	11,67	20,68	76,92	125,6	292,7	217,6

Используя метод наименьших квадратов получены уравнения линейной регрессии для индуктивности  $L = f(L_\partial)$

$$L = -0,0641 + 1,0026L_\partial \quad (9)$$

и активного сопротивления  $r = \varphi(r_\partial)$

$$r = 1,0182 + 0,9601r_\partial; \quad (10)$$

при уровне значимости 0,001 коэффициенты корреляции составили для индуктивности  $r_L \approx 1$ , для активного сопротивления  $r_r \approx 0,9983$ ; среднеквадратическое отклонение отдельного измерения индуктивности  $\sigma_L = 0,1168$  мГн, активного сопротивления  $\sigma_r = 6,5419$  Ом, средняя относительная погрешность измерения индуктивности составила 0,3%, активного сопротивления – 8,65%.

Результаты исследования частотных характеристик показаны на рис. 2. Экспериментальные частотные зависимости индуктивности  $L$ , активного сопротивления  $r$  и добротности  $Q$  определены в диапазоне 0,1 – 100 кГц. В качестве исследуемого индуктивного импеданса использовалась образцовая мера с индуктивностью  $L_0 = 5$  мГн, омическим сопротивлением 8,8 Ом и добротностью 140. Из полученных зависимостей видно, что в диапазоне частот от 0.1 до 30 кГц активное сопротивление  $r$  и индуктивность  $L$  остаются практически неизменными с отклонениями в пределах погрешности эксперимента. После 30 кГц активное сопротивление  $r$  начинает увеличивать свое значение, что можно объяснить возрастающим влиянием эффекта близости и скин-эффекта. Также наблюдается увеличение индуктивности  $L$  из-за шунтирующего влияния распределённой ёмкости катушки и измерительной цепи в целом, которые образуют с индуктивностью параллельный контур с некоторой частотой собственного резонанса  $f_0$ . С ростом частоты  $f$  при  $f < f_0$  импеданс параллельного контура увеличивается, что

приводит к кажущемуся увеличению индуктивности  $L$ . Это явление вносит погрешность в определение индуктивности на частотах, приближающихся к частоте собственного резонанса катушки. Погрешность можно уменьшить при условии учета величины распределенной емкости, для этого потребуются рассмотрение несколько другой эквивалентной схемы измерительной цепи, в которой учитывается межвитковая емкость измеряемой катушки, входные емкости измерительных приборов и соединительных проводников.

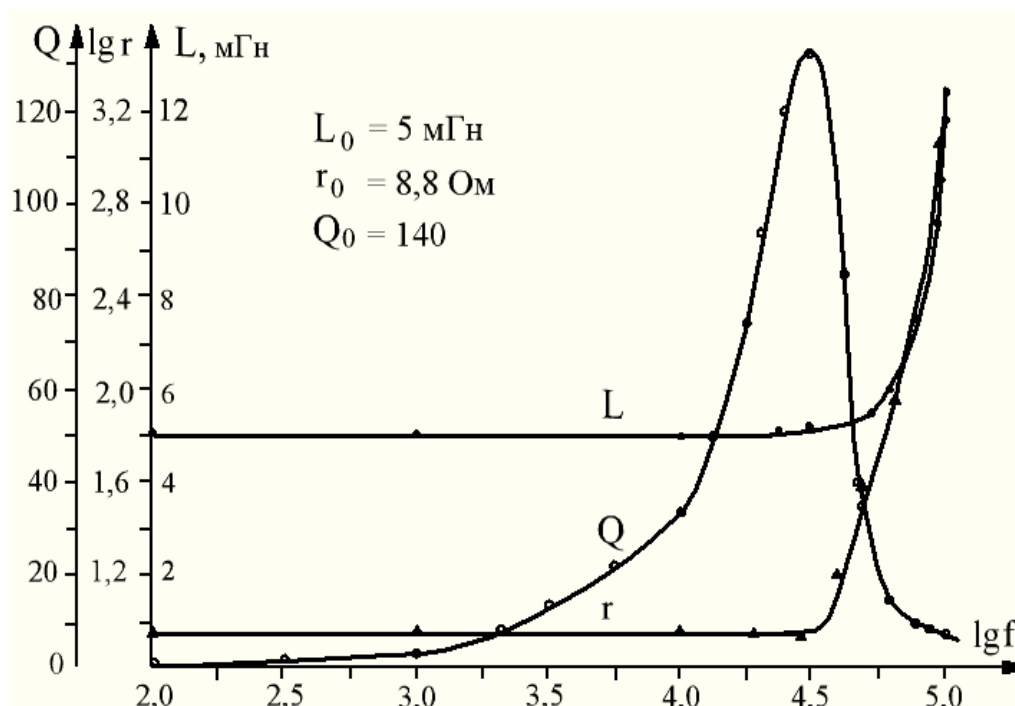


Рисунок 2 – Частотные характеристики индуктивности  $L$ , активного сопротивления  $r$  и добротности  $Q$  образцовой меры индуктивности ( $L_0 = 5 \text{ мГн}$ )

Частотная зависимость добротности  $Q = 2\pi fL/r$  исследуемой образцовой меры индуктивности имеет максимум  $Q = 133$  на частоте  $f = 30 \text{ кГц}$ , величина которого отличается на 5% от добротности, указанной в паспорте образцовой меры.

**Выводы.** Анализ результатов исследования позволяет сделать следующие выводы о возможностях метода трех вольтметров для измерения составляющих индуктивного импеданса:

- методом трех вольтметров довольно просто измерять составляющие индуктивного импеданса на фиксированных частотах выше промышленных; в

диапазоне до 100 кГц относительная погрешность определения индуктивности составляет не более 0,3%, активного сопротивления – 8,65%, что соответствует классу точности использованных измерительных приборов;

- метод позволяет получать информативную характеристику в виде частотных зависимостей активного сопротивления и индуктивности; это дает возможность выбрать диапазон частот, в котором мешающее влияние распределенной емкости незначительное, а также найти оптимальную частоту, при которой добротность индуктивности максимальна;
- дальнейшее повышение точности определения действительных значений составляющих индуктивного импеданса возможно при условии проведения анализа эквивалентной схемы измерительной цепи, учитывающей шунтирующее влияние распределенной емкости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Измерения в электронике: Справочник [Текст] / В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Колесник и др. / Под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.
2. Круг, К.А. Основы электротехники. Теория переменных токов [Текст] / К.А. Круг. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1946. – 635 с.

УДК 681.51

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЯЖЕЛОСРЕДНЫХ УСТАНОВОК УГЛЕБОГАЩЕНИЯ КАК ОБЪЕКТОВ С РЕЦИКЛОМ<sup>2</sup>

**А.В. Циряпкина<sup>1</sup>, Л.П. Мышляев<sup>2</sup>, К.А. Ивушкин<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>аспирант кафедры автоматизации и информационных систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Кемеровская обл., Россия, e-mail: [asya1990\\_90@mail.ru](mailto:asya1990_90@mail.ru)

<sup>2</sup>доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и информационных систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Кемеровская обл., Россия, e-mail: [nicsu@ngs.ru](mailto:nicsu@ngs.ru)

<sup>3</sup>кандидат экономических наук, заместитель генерального директора, ООО «Объединенная компания «Сибшахтострой», г. Новокузнецк, Россия, e-mail: [info@okssh.ru](mailto:info@okssh.ru)

**Аннотация.** Даны особенности комплексов тяжелосредных сепараторов и гидроциклонов углеобогащения как объектов управления с рециклом. Приведены структурные схемы систем управления, результаты модельных и натурно-модельных исследований.

<sup>2</sup> Работа выполнена в рамках Гранта РФФИ № НК 15-07-01972\15