

*М. В. Чернецов*

## ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

*M. V. Chernetsov*

## THE USE OF PHASE-FREQUENCY CHARACTERISTICS FOR THE IDENTIFICATION OF EQUIVALENT CIRCUITS OF PARAMETRIC SENSORS

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** Объектом исследования являются методы идентификации схем замещения параметрических датчиков в виде двухполюсной электрической цепи. Известные методы идентификации, основанные на анализе спектральных характеристик, в качестве промежуточных величин используют интенсивность составляющих выходного сигнала, которые зависят от напряжения, тока и других факторов, включая помехи. Более высокая точность достигается при использовании в качестве промежуточных величин частоты и фазы, которые более устойчивы к воздействию помех, а точность эталона частоты (времени) на порядок выше. Поэтому разработка методов идентификации схем замещения параметрических датчиков по их фазным характеристикам, несомненно, актуальна. Целью работы является разработка методов, условий, а также выявление характерных признаков, упрощающих идентификацию схем замещения в виде двухполюсных электрических цепей на основе исследования фазочастотных характеристик. **Материалы и методы.** Предложено при идентификации двухполюсных цепей использовать не только фазочастотные характеристики, но и дифференциальные фазочастотные характеристики, что позволяет уточнить особенности топологии электрических цепей и повысить достоверность результата. Показана возможность получения неоднозначного решения для схем цепей, содержащих параллельно соединенные конденсатор и индуктивность, изготовленную из провода, имеющего сопротивление. При анализе использованы известные положения теории электрических цепей и программное обеспечение MatLab. **Результаты.** Разработаны методы идентификации схем замещения в виде двухполюсных электрических цепей параметрических датчиков, основанные на анализе фазочастотных и дифференциальных фазочастотных характеристик. Предложены алгоритмы анализа и проведено исследование на примере схемы замещения индуктивного датчика. Выявлены условия, при которых возможно принятие неоднозначного решения при идентификации схемы замещения. **Выводы.** Развита теория идентификации схем замещения параметрических датчиков, описываемых двухполюсной электрической схемой, путем использования при принятии решения результатов анализа фазочастотных и дифференциальных фазочастотных характеристик. Исследования алгоритмов принятия решений и полученные результаты совпадают с основными положениями теории электрических цепей.

**A b s t r a c t. Background.** Object of research are methods for the identification of equivalent circuits of parametric sensors in the form of a bipolar electric circuit. Known methods of identification based on the analysis of the spectral characteristics, as use of intermediate values of the intensity components of the output signal, which depend on voltage, current and other factors, including noise. Higher accuracy is achieved by using intermediate values of frequency

and phase, which are more resistant to interference, and the accuracy of the frequency standard (time) is much higher. Therefore, the development of methods for the identification of equivalent circuits of parametric sensors for their phase characteristics, of course, relevant. The aim of this work is to develop methods, conditions, and identifying the characteristic features that facilitate the identification of equivalent circuits in the form of a bipolar electric chains on the basis of the study of the phase-frequency characteristics. **Materials and methods.** Proposed in the identification of bipolar circuits to use not only the phase-frequency characteristics, but also differential phase frequency characteristics, which allows to clarify the features of topology of electrical circuits and increase the reliability of the result. It is possible to obtain ambiguous solutions for circuits containing parallel connected condenser and inductance, is made of wire having a resistance. The analysis uses known principles of the theory of electrical circuits and MatLab software. **Results.** Developed methods of identifying circuits in the form of a bipolar electric circuits parametric sensors based on the analysis of the phase-frequency and differential phase-frequency characteristics. The proposed algorithms and conducted a study on the example of the equivalent circuit of the inductive sensor. The conditions under which the adoption of controversial decisions in the identification of the equivalent circuit. **Conclusions.** Developed the theory of identification of equivalent circuits of parametric sensors, the described two-pole electrical circuit, by the use of in deciding the results of the analysis of the phase-frequency and differential phase-frequency characteristics. The study of decision algorithms and the obtained results are consistent with the basic provisions of the theory of electrical circuits.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** идентификация двухполюсных электрических цепей, комплексное сопротивление, фазочастотные характеристики, дифференциальные фазочастотные характеристики, параметрический датчик, схема замещения.

**Key words:** identification bipolar electrical circuits, impedance, phase-frequency characteristics differential phase frequency characteristics, parametric transducer, equivalent circuit.

При идентификации схем замещения параметрических объектов исследования, представляемых схемой замещения (СЗ) в виде двухполюсной электрической цепи (ДЭЦ), широкое применение получили методы, основанные на анализе спектральных характеристик выходного сигнала, т.е. либо спектра Фурье, либо спектральной плотности. При этом в качестве промежуточной измеряемой величины используется интенсивность сигналов, которая зависит от напряжения, тока, напряженности магнитного поля и других параметров, включая помехи и наводки [1]. Повышение достоверности результата идентификации можно достичь при использовании в качестве промежуточных величин частоты и фазы, параметры которых более устойчивы к воздействию помех и наводок, а точность эталонной меры частоты (времени) на порядок выше [2]. В связи с изложенным развитие положений использования фазочастотных методов анализа ДЭЦ для целей идентификации СЗ параметрических объектов, и в частности параметрических датчиков (ПД), представляется, несомненно, актуальной задачей.

При исследованиях ограничимся рассмотрением структурных схем ДЭЦ, представленных на рис. 1. При этом учтем, что реактивные элементы  $L$  и  $C$  ДЭЦ представляют собой реальные объекты, а именно: катушку индуктивности, имеющую последовательную СЗ из индуктивности  $L$  и сопротивления потерь  $R_L$ , и конденсатор, имеющий параллельную СЗ из емкости  $C$  и сопротивления утечки  $R_C$ , по сути, аналоги индуктивного и емкостного ПД с двухэлементной схемой замещения.

Следовательно, комплексное сопротивление катушки индуктивности (индуктивного ПД) будет равно

$$Z_L(\omega) = R_L + j\omega L, \quad (1)$$

а конденсатора (емкостного ПД)

$$Z_C(\omega) = \frac{R_C}{1 + j\omega R_C C}. \quad (2)$$

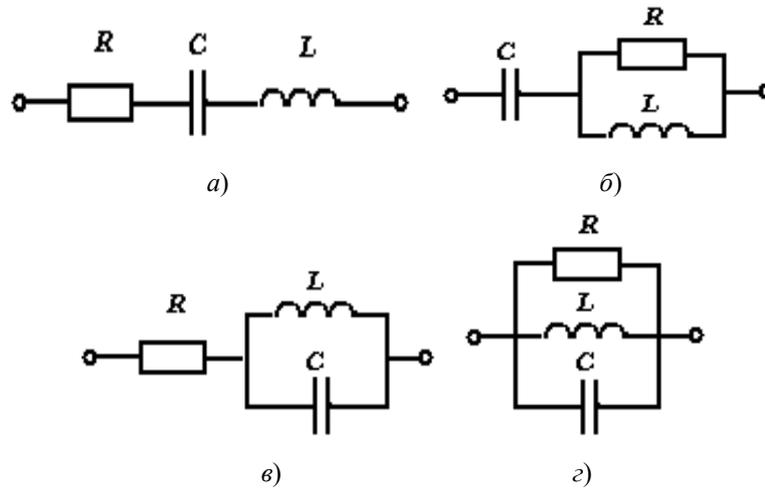


Рис. 1. Исследуемые схемы ДЭЦ

Идентификацию будем проводить по комплексному сопротивлению ДЭЦ в режиме заданного тока. Уравнения комплексного сопротивления рассматриваемых ДЭЦ запишем в удобном для анализа виде

$$Z_{LRCs}(\omega) = R + Z_L(\omega) + Z_C(\omega) \quad (\text{рис. 1, а}); \quad (3)$$

$$Z_{CsRLp}(\omega) = Z_C(\omega) + \frac{RZ_L(\omega)}{R + Z_L(\omega)} \quad (\text{рис. 1, б}); \quad (4)$$

$$Z_{RsLCP}(\omega) = R + \frac{Z_C(\omega)Z_L(\omega)}{Z_C(\omega) + Z_L(\omega)} \quad (\text{рис. 1, в}); \quad (5)$$

$$Z_{RLCP}(\omega) = \frac{R \frac{Z_C(\omega)Z_L(\omega)}{Z_C(\omega) + Z_L(\omega)}}{R + \frac{Z_C(\omega)Z_L(\omega)}{Z_C(\omega) + Z_L(\omega)}} \quad (\text{рис. 1, г}), \quad (6)$$

где  $s$  (serial) и  $p$  (parallel) в индексах комплексных сопротивлений обозначают способ соединения элементов в ДЭЦ.

Для исследований предлагается использовать фазочастотные характеристики (ФЧХ), а также первые производные от ФЧХ (назовем ее дифференциальной фазочастотной характеристикой – ДФЧХ), причем выполняется сравнение со способами анализа по амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ) в наиболее информативной области частот близкой к резонансной. Вычисление ФЧХ и ДФЧХ будет проводиться по формулам

$$\Phi(\omega) = \arg(Z(\omega)); \quad (6)$$

$$\Phi_d(\omega) = \frac{d}{d\omega} \Phi(\omega). \quad (7)$$

Далее для удобства анализа и сокращения промежуточных вычислений при построении графических представлений исследуемых функций используются возможности, предлагаемые средствами MatLab [3, 4].

При построении графиков для схем ДЭЦ (рис. 1) принято  $R = 1000$  Ом,  $L = 0,001$  Гн,  $C = 10^{-7}$  Ф, сопротивление потерь катушки индуктивности равно  $R_L = 10$  Ом, а сопротивление утечки конденсатора равно  $R_C = 10^6$  Ом.

Соответствующие рассматриваемым комплексным сопротивлениям частотные характеристики приведены на рис. 2.

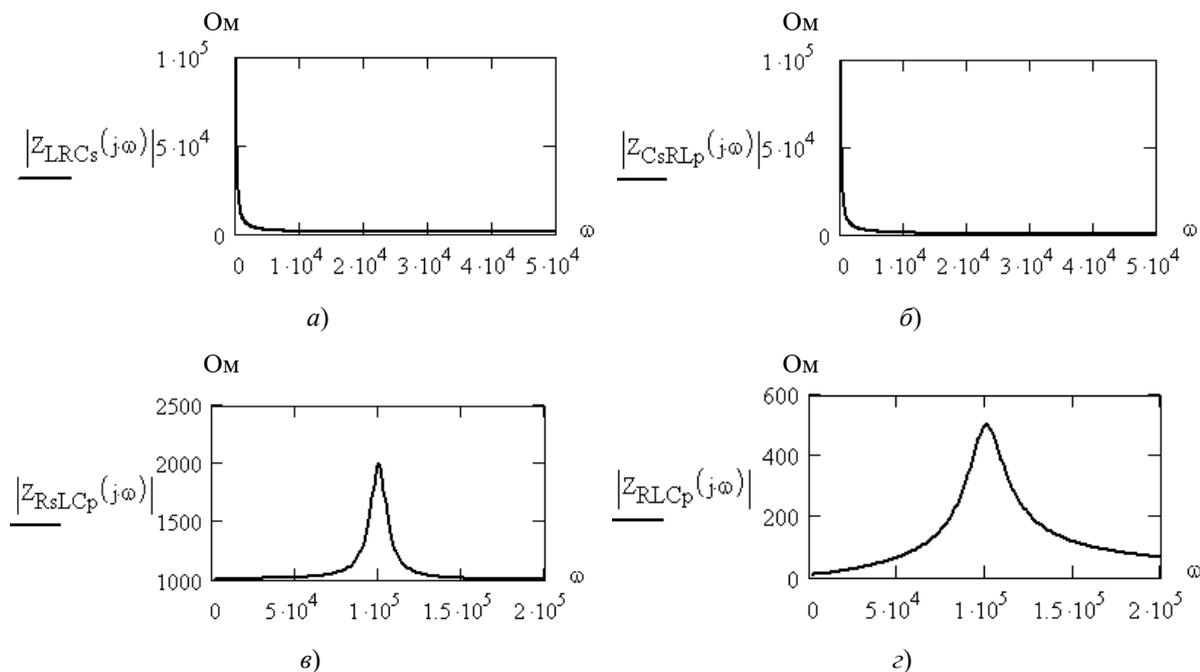


Рис. 2. Зависимости модулей комплексных сопротивлений ДЭЦ от частоты

Из анализа графиков следует, что зависимости, представленные на рис. 2, *a* и *б*, а также на рис. 2, *в* и *г*, практически идентичны, и идентификация схем ДЭЦ не может быть выполнена однозначно.

Однако при анализе ФЧХ и ДФЧХ, представленных на рис. 3 и 4, выявляются отличия, которые предоставляют возможности более четкого структурирования топологии рассмотренных ДЭЦ.

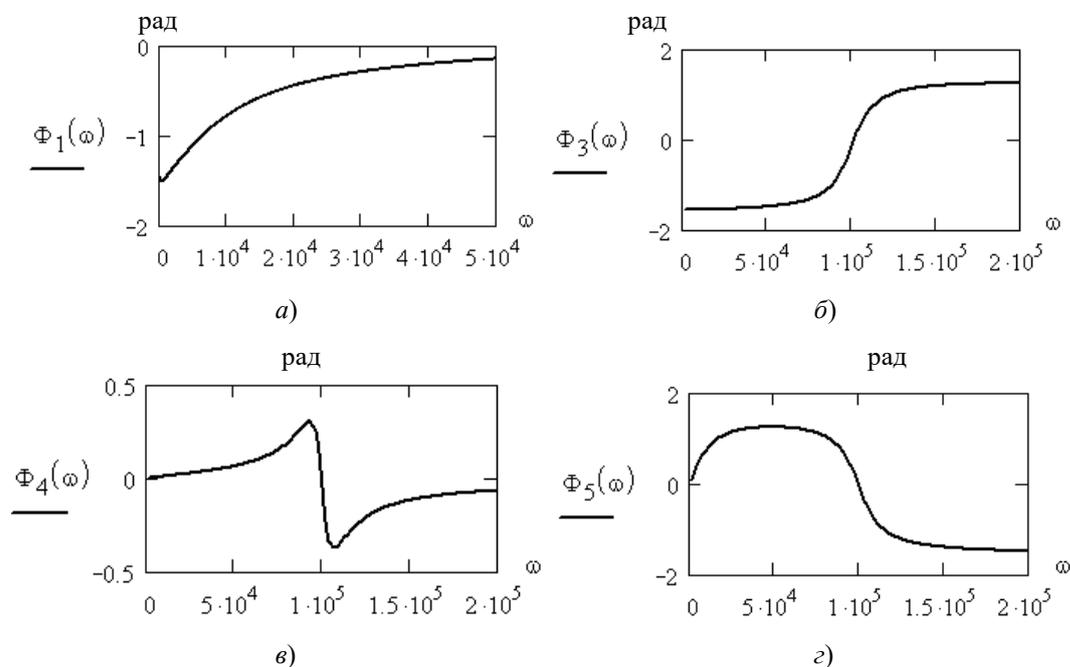


Рис. 3. ФЧХ для ДЭЦ (см. рис. 1)

Таким образом, благодаря использованию ФЧХ и ДФЧХ появляются дополнительные возможности для уточнения результатов идентификации.

Однако при проведении идентификации по фазочастотным характеристикам ДЭЦ в некоторых случаях невозможно принять однозначное решение. Поясним эту ситуацию на при-

мере решения задачи идентификации ДЭЦ (см. рис. 1,б), которая, по сути, представляет собой многоэлементную СЗ индуктивного ПД (рис. 5), где  $L$  индуктивность,  $R_L$  – сопротивление провода катушки индуктивности ПД,  $C$  – межвитковая емкость и емкость между соединительными проводами, подключающими ПД к измерительной цепи (ИЦ) и имеющих общее сопротивление  $R$ . В данной СЗ не учтено сопротивление  $R_C$  (см. рис. 1,б), так как принято бесконечно большим, потому что, по сути, характеризует сопротивление изоляции между соединительными проводами ПД и входное сопротивление нагрузки ИЦ, что соответствует реальным условиям эксплуатации ПД.

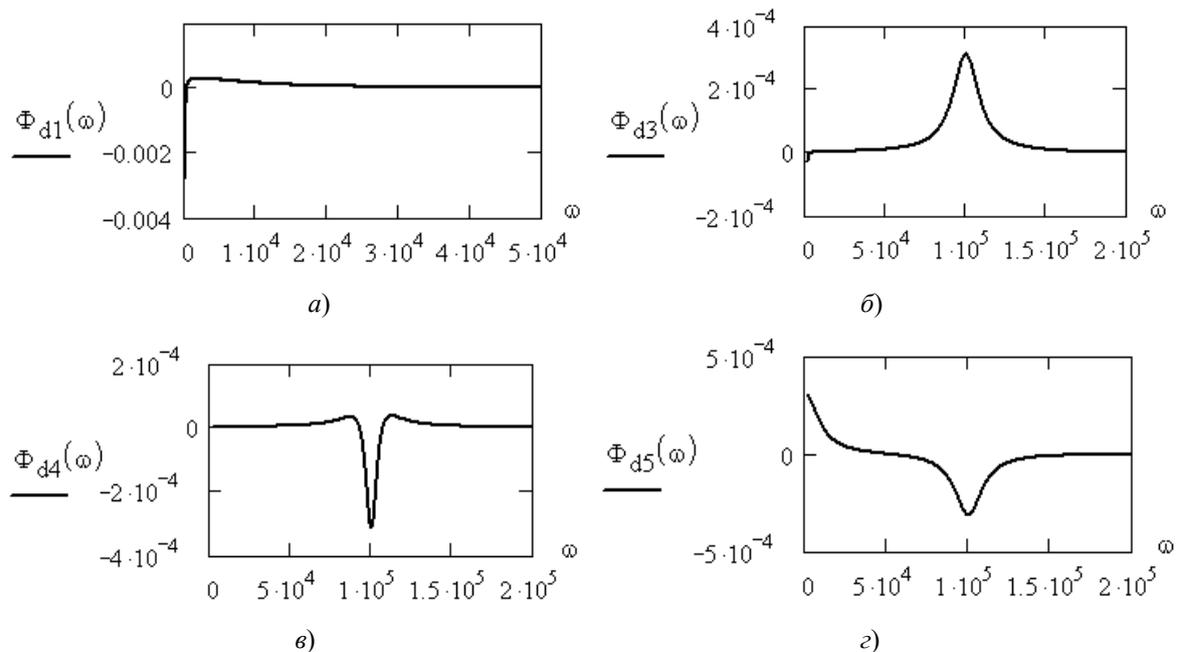


Рис. 4. ДФЧХ для ДЭЦ

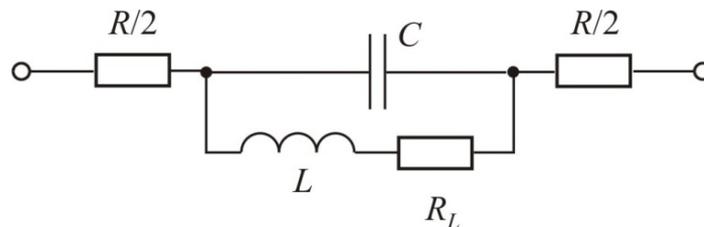


Рис. 5. Схема замещения индуктивного ПД

Комплексное сопротивление ПД (см. рис. 5) описывается уравнением

$$Z(\omega) = R + \frac{R_L + j\omega L - j\omega(\omega^2 L^2 C) - j\omega R_L^2 C}{(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 R_L^2 C^2}, \quad (8)$$

а соответствующая ФЧХ в виде

$$\Phi(\omega) = \arctg \frac{\omega(L - R_L^2 C - \omega^2 L^2 C)}{R_L + R \left[ (1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 R_L^2 C^2 \right]}. \quad (9)$$

Графики зависимости модуля комплексного сопротивления и ФЧХ от частоты (рис. 6 и 7) получены при следующих вполне реальных значениях элементов СЗ индуктивного ПД:  $L = 10^{-3}$  [Гн],  $C = 10^{-8}$  [Ф],  $R_L = 10$  [Ом],  $R = 20$  [Ом].

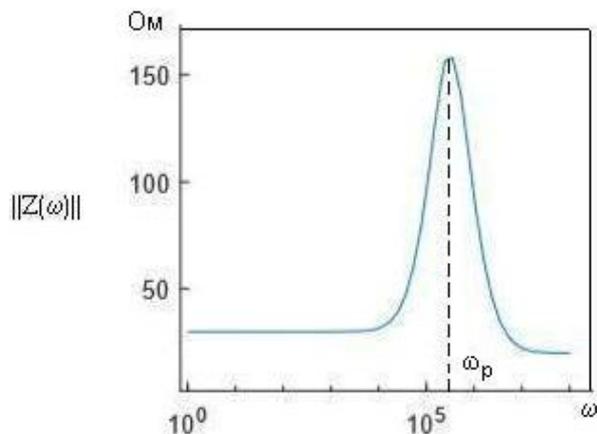


Рис. 6. Зависимость комплексного сопротивления ПД от частоты

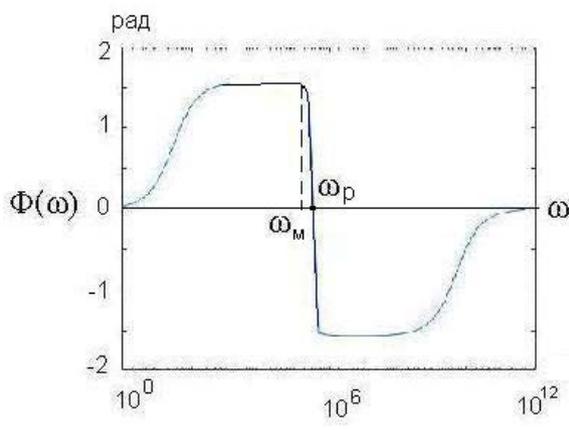


Рис. 7. ФЧХ индуктивного ПД

Для построения графика зависимости ДФЧХ, представленного на рис. 8, использованы возможности MatLab. На графике более четко выделяется резонансная частота в сравнении с графиком зависимости комплексного сопротивления от частоты.

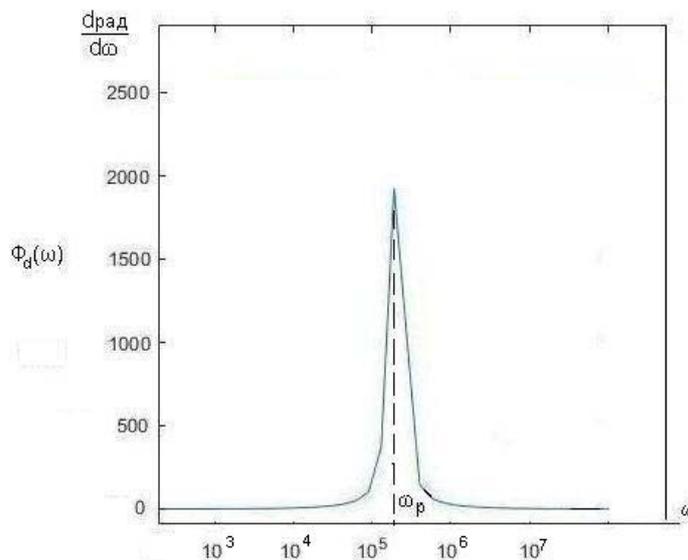


Рис. 8. ДФЧХ для индуктивного ПД

Таким образом, имея экспериментальные данные по ФЧХ или ДФЧХ легко измерить точное значение резонансной частоты.

Для выявления взаимосвязи экспериментальных данных и идентификационных признаков определим значение резонансной частоты из условия равенства нулю уравнения (9), описывающего ФЧХ, которое может быть переписано в виде

$$L - R_L^2 C - \omega_p^2 L^2 C = 0. \quad (10)$$

В результате из (10) получаем реальное значение частоты резонанса

$$\omega_p = \sqrt{\frac{L - R_L^2 C}{L^2 C}}. \quad (11)$$

На практике у параметрических датчиков индуктивного типа межвитковая емкость обычно не превышает  $10^{-8}$  [Ф]. В этом случае, как показали расчеты, знаменатель уравнения (9) изменяется незначительно (не более 20 %) при изменении частоты в пределах до резонансной. Это дает возможность рассчитать приближенное значение частоты  $\omega_m$ , при которой ФЧХ

достигнет максимального значения, из условия равенства нулю первой производной от выражения в числителе формулы (9), которое описывается уравнением

$$L - 3\omega_m^2 L^2 C - R_L^2 C \approx 0. \quad (12)$$

Соответственно, получаем

$$\omega_m \approx \sqrt{\frac{L - R_L^2 C}{3L^2 C}}. \quad (13)$$

В уравнениях (11) и (13) присутствует составляющая  $R_L^2 C$ , которая искажает результат идентификации, так как воспринимается как индуктивность. Эта составляющая для подавляющего большинства индуктивных ПД не превышает 0,1 % от значения  $L$  и в большинстве случаев ею можно пренебречь. В этом случае можно принять, что  $\omega_p = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ , что соответствует классическому уравнению [5], а из (13) следует, что  $\omega_m \approx \sqrt{\frac{1}{3LC}}$ , или  $\omega_m \approx \omega_p / \sqrt{3}$ .

Таким образом, по результатам эксперимента для  $\text{ФЧХ} = 0$  легко найти точное значение резонансной частоты или частоты, при которой  $\text{ФЧХ}$  достигает максимального значения в диапазоне частот от 0 до резонансной. Далее производится выбор значений элементов  $L$  и  $C$ , используя одно из ранее полученных уравнений ((11) или (13)), что упрощает идентификацию СЗ для ПД. Однако при решении задач идентификации СЗ параметрических объектов исследования, имеющих параллельно соединенные емкость и индуктивность с сопротивлением потерь, будет иметь место неточность идентификации, обусловленная наличием составляющей  $R_L^2 C$ , которая неотличима от индуктивности. В результате будет идентифицирована индуктивность, равная  $L' = L + R_L^2 C$ .

Вместе с тем следует отметить, что использование фазочастотных характеристик позволяет не только более четко фиксировать резонанс, но и выявлять топологические особенности СЗ в виде ДЭЦ для параметрических объектов исследования (включая ПД) [6]. Кроме того, благодаря использованию высокоточных и простых в применении мер частоты, измерения фазы могут быть выполнены с более высокой точностью [7, 8]. Поэтому предложенная методика идентификации СЗ объектов исследования в виде ДЭЦ по фазочастотным характеристикам обеспечивает более высокую достоверность результата, чем при использовании методов анализа, основанных на анализе спектральных характеристик выходного сигнала ИЦ, например спектра Фурье, спектральной плотности или амплитудно-частотных характеристик.

#### Библиографический список

1. *Афонский, А. А.* Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2009. – 248 с.
2. *Новицкий, П. В.* Цифровые приборы с частотными датчиками / П. В. Новицкий, В. Г. Кнорринг, В. С. Гутников. – Л. : Энергия, 1970. – 420 с.
3. *Любимов, Э. В.* Mathcad. Теория и практика проведения электротехнических расчетов в среде Mathcad и Multisim (+ DVD-ROM) / Э. В. Любимов. – М. : Наука и техника, 2012. – 400 с.
4. *Гуляев, А. К.* MATLAB 5.3. Имитационное моделирование в среде Windows : практ. пособие / А. К. Гуляев. – СПб. : КОРОНА принт, 2001. – 400 с.
5. *Бессонов, Л. А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 1996. – 578 с.
6. *Михотин, П. В.* Использование фазовых спектров для идентификации и измерения параметров линейных систем / П. В. Михотин, М. В. Чернецов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2007. – Т. 1. – С. 354–355.
7. *Варламов, Ю. В.* Способ измерения фазового сдвига с использованием биспектральных представлений / Ю. В. Варламов, В. Д. Михотин, М. В. Чернецов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2007. – Т. 1. – С. 329–330.
8. *Чернецов, М. В.* Идентификация топологии двухполюсных электрических цепей МДП-структур / М. В. Чернецов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2009. – Т. 1. – С. 452–453.

**Чернецов Михаил Владимирович**

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой технического  
управления качеством,  
Пензенский государственный  
технологический университет  
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова /  
ул. Гагарина, 1а/11)  
E-mail: kafedratuk@yandex.ru

**Chernetsov Mikhail Vladimirovich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
head of sub-department of technical  
quality management,  
Penza State Technology University  
(1a/11 Baydukova avenue/Gagarin street,  
Penza, Russia)

УДК 621.317.08

**Чернецов, М. В.**

**Применение фазочастотных характеристик для идентификации схем замещения параметрических датчиков** / М. В. Чернецов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 2 (24). – С. 26–33. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-4.