

## **МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ОСНОВЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ**

***В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, А.Е. Сеницын***

Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: vs\_mel@mail.ru

*Рассматривается классификация методов измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям с использованием дополнительных гармонических сигналов, сдвинутых относительно входных на произвольный угол. Предлагается новый подход к синтезу таких методов. Рассматриваются три метода, синтезированные на основе данного подхода.*

**Ключевые слова:** *интегральные характеристики, гармонические сигналы, мгновенные значения, фазосдвигающий блок, сравнение сигналов, время измерения*

### **Введение**

В настоящее время широкое распространение получили методы измерения интегральных характеристик гармонических сигналов (ИХГС) по отдельным мгновенным значениям, не связанным с периодом входного сигнала. Существенное сокращение времени измерения характерно для методов, основанных на формировании дополнительных сигналов, сдвинутых по фазе относительно входных, и определении ИХГС по мгновенным значениям входных и дополнительных сигналов [1].

Значительное упрощение реализации обеспечивают методы измерения ИХГС, в которых применяются ортогональные составляющие сигналов (ОСС) [2].

Однако использование ОСС приводит к значительной частотной погрешности фазосдвигающих блоков (ФСБ), осуществляющих формирование дополнительных сигналов. В результате этого при изменении частоты ФСБ производят сдвиг сигнала на угол, отличный от  $\pi/2$ .

Исключение влияния частотной погрешности ФСБ обеспечивают методы, основанные на формировании дополнительных сигналов напряжения и тока, сдвинутых относительно входных на произвольный в общем случае угол.

В статье приводится классификация и синтезируются методы измерения ИХГС, основанные на данном принципе.

### **Классификация методов измерения ИХГС по мгновенным значениям с использованием дополнительных сигналов**

На рис. 1 представлена разработанная классификация методов измерения ИХГС по мгновенным значениям с использованием дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входных на произвольный угол.

---

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 13-08-00173-а).*

*Владимир Сергеевич Мелентьев (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника».*

*Юрий Михайлович Иванов (к.т.н.), ст. научный сотрудник.*

*Антон Евгеньевич Сеницын, аспирант.*

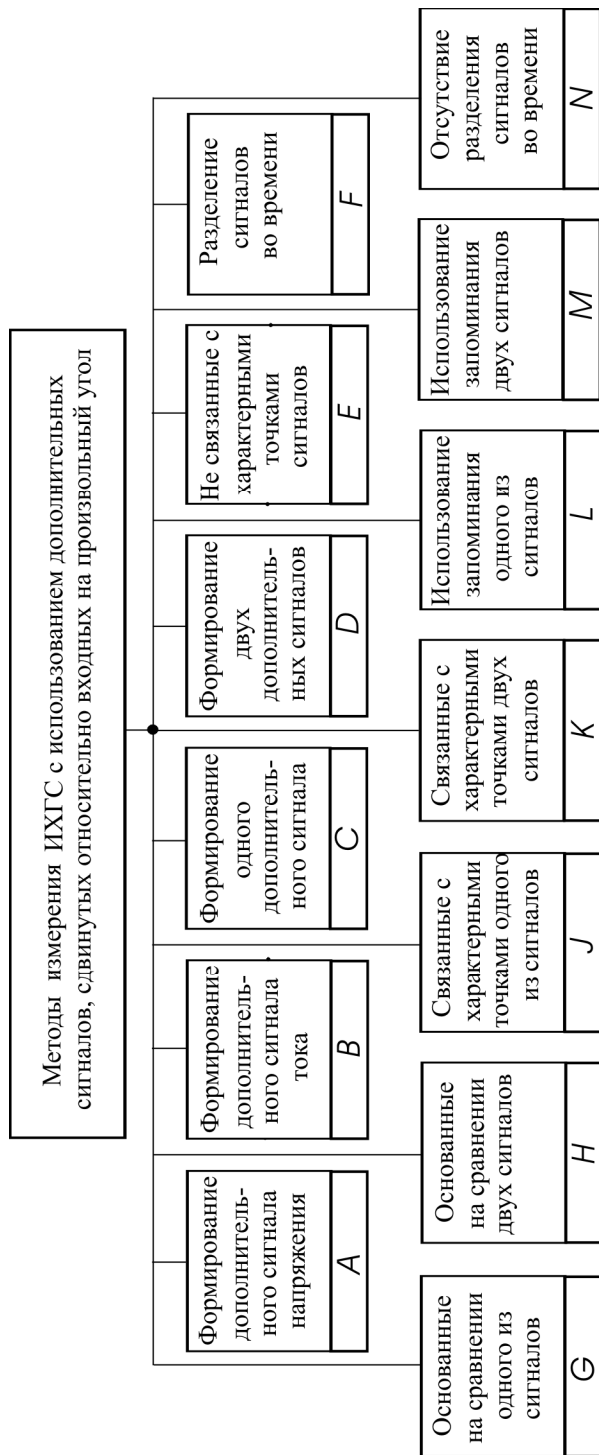


Рис. 1. Классификация методов измерения ИХГС с использованием дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входных на произвольный угол

Исключая противоположные операции (связь или отсутствие связи с характерными точками сигналов; использование или отсутствие разделения во времени; формирование одного или двух дополнительных сигналов; сравнение одного или двух сигналов; использование запоминания одного или двух сигналов), а также учитывая тот факт, что запоминание мгновенных значений сигналов производится только с их последующим сравнением, по аналогии с методами, основанными на формировании ОСС [2], можно условно выделить три группы, характеризующие принципы синтеза методов.

К первой группе относятся методы, основанные на сравнении основного и дополнительного сигналов напряжения. Для этой группы можно синтезировать следующие методы: *ACEGN; ACEFG; ACEGLN; ACEFGL; ACGJN; ACFGJ; ACGKN; ACFGK; ABCEGN; ABCEFG; ABCEGLN; ABCEFGL; ABCGJN; ABCFGJ; ABCGKN; ABCFGK; ADEGN; ADEFG; ADEGLN; ADEFGL; ADGJN; ADFGJ; ADGKN; ADFGK; ABDEGN; ABDEFG; ABDEGLN; ABDEFGL; ABDGJN; ABDFGJ; ABDGKN; ABDFGK.*

Вторую группу составляют методы, основанные на сравнении основного и дополнительного сигналов и напряжения и тока. Для этой группы можно синтезировать следующие методы: *ABCEHN; ABCEFH; ABCEHMN; ABCEFHM; ABCHJN; ABCFHJ; ABCHKN; ABCFHK; ABDEHN; ABDEFH; ABDEHMN; ABDEFHM; ABDHJN; ABDFHJ; ABDHKN; ABDFHK.*

Наконец, третью группу составляют методы, не использующие сравнение основного и дополнительного сигналов. Для этой группы можно синтезировать следующие методы: *ACEN; ACEF; ACJN; ACFJ; ACKN; ACFK; ABCEN; ABCEF; ABCJN; ABCFJ; ABCKN; ABCFK; ADEN; ADEF; ADJN; ADFJ; ADKN; ADFK; ABDEN; ABDEF; ABDJN; ABDFJ; ABDKN; ABDFK.*

Таким образом, представленная классификация позволяет в общем случае синтезировать 72 метода.

### **Синтез методов измерения ИХГС с использованием дополнительных сигналов**

Рассмотрим примеры синтеза методов.

Разработанный авторами метод *ABCFGJ* относится к первой группе и заключается в том, что в момент перехода входного сигнала напряжения через ноль одновременно измеряют первое мгновенное значение дополнительного напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол  $\Delta\alpha$ , и первое мгновенное значение тока; в момент равенства входного и дополнительного напряжений одновременно измеряют вторые мгновенные значения дополнительного напряжения и тока и определяют ИХГС по измеренным значениям [3].

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 2.

Если сигналы имеют гармонические модели, то входные напряжение и ток и дополнительный сигнал напряжения соответствуют выражениям:

$$u_1(t) = U_m \sin \omega t; \quad (1)$$

$$u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha), \quad (2)$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (3)$$

где  $U_m$ ,  $I_m$  – амплитудные значения напряжения и тока;  $\omega$  – угловая частота входного сигнала;  $\varphi$  – угол сдвига фазы между напряжением и током.

В момент времени  $t_1$  перехода сигнала напряжения через ноль мгновенные значения сигналов напряжения и тока равны  $U_{21} = U_m \sin \Delta\alpha$ ;  $I_{11} = I_m \sin \varphi$ .

В момент времени  $t_2$ , когда входной и дополнительный сигналы напряжения будут равны ( $U_{12} = U_{22}$ ), мгновенные значения сигналов примут вид

$$U_{12} = U_m \sin \omega \Delta t; U_{22} = U_m \sin(\Delta \alpha + \omega \Delta t); I_{12} = I_m \sin(\varphi + \omega \Delta t),$$

где  $\Delta t$  – интервал времени между моментом перехода входного сигнала напряжения через ноль и моментом равенства входного и дополнительного напряжений.

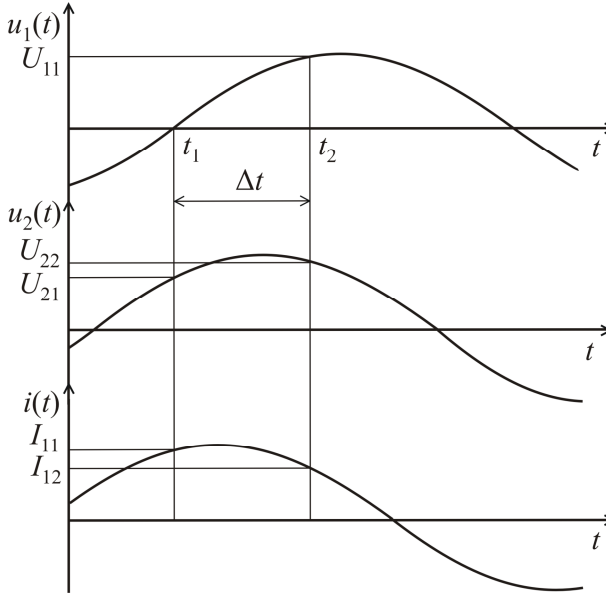


Рис. 2. Временные диаграммы, поясняющие первый метод

Так как  $U_{12} = U_{22}$ , то  $\sin \omega \Delta t = \sin(\Delta \alpha + \omega \Delta t)$ . Это равенство выполняется, если  $\Delta \alpha = \pi - 2\omega \Delta t$ . Отсюда  $\omega \Delta t = \frac{\pi}{2} - \frac{\Delta \alpha}{2} + \pi l$ , где  $l = 0; 1$ .

В этом случае

$$U_{22} = U_m \sin \omega \Delta t = U_m \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\Delta \alpha}{2}\right) = U_m \cos \frac{\Delta \alpha}{2},$$

$$I_{12} = I_m \sin(\varphi + \omega \Delta t) = I_m \cos\left(\varphi - \frac{\Delta \alpha}{2}\right).$$

Используя мгновенные значения сигналов, можно определить основные ИХГС: – среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока

$$U_{СКЗ} = \frac{\sqrt{2U_{22}^2}}{\sqrt{4U_{22}^2 - U_{21}^2}}; I_{СКЗ} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ I_{11}^2 + \frac{(2U_{22}I_{12} - I_{11}U_{21})^2}{4U_{22}^2 - U_{21}^2} \right]};$$

– активную (АМ) и реактивную (РМ) мощности

$$P = \frac{2U_{22}^2(2U_{22}I_{12} - I_{11}U_{21})}{4U_{22}^2 - U_{21}^2}; Q = \frac{U_{22}^2 I_{11}}{\sqrt{4U_{22}^2 - U_{21}^2}}.$$

Время измерения ИХГС в данном методе определяется интервалом времени между моментом начала измерения и моментом перехода сигнала напряжения через ноль, а также интервалом времени с момента перехода сигнала через ноль и

моментом равенства входного и дополнительного напряжений, т. е. пропорционального углу сдвига дополнительного сигнала  $\Delta\alpha$ . Максимальное время измерения соответствует  $T_{\max} = \frac{T}{2} + T_{\Delta\alpha}$ , где  $T$  – период входного сигнала;  $T_{\Delta\alpha}$  – интервал времени, пропорциональный углу  $\frac{\pi - \Delta\alpha}{2}$ .

Следующий метод *ABDEHN* относится ко второй группе методов, поскольку использует сравнение входных и дополнительных сигналов и напряжения и тока. Метод заключается в том, что в момент равенства мгновенных значений входного и сдвинутого относительно него на  $2\Delta\alpha$  дополнительного сигнала напряжения измеряют мгновенное значение напряжения, сдвинутого относительно входного сигнала на угол  $\Delta\alpha$ . В этот же момент времени измеряется мгновенное значение дополнительного тока, сдвинутого относительно входного сигнала на  $\Delta\alpha$ . В момент равенства мгновенных значений входного и сдвинутого относительно него на  $2\Delta\alpha$  дополнительного тока измеряют мгновенное значение сигнала тока, сдвинутого относительно входного на угол  $\Delta\alpha$ . ИХГС определяются по измеренным мгновенным значениям сигналов напряжения и тока [4].

Временные диаграммы, поясняющие метод, приведены на рис. 3.

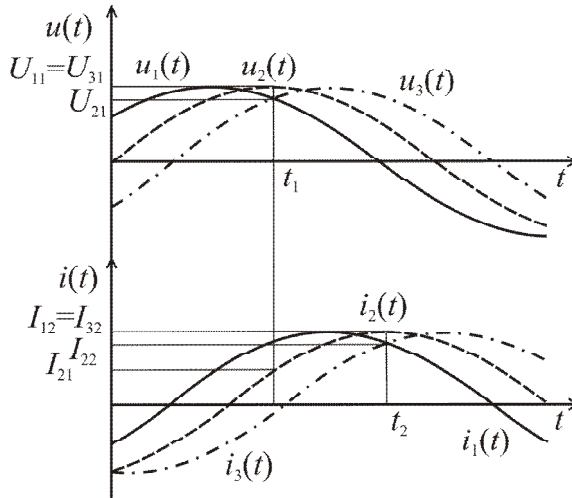


Рис. 3. Временные диаграммы, поясняющие второй метод

Входной и первый дополнительный сигналы напряжения и входной ток соответствуют выражениям (1) – (3). Второй дополнительный сигнал напряжения, первый и второй дополнительные сигналы тока равны

$$u_3(t) = U_m \sin(\omega t + 2\Delta\alpha); i_2(t) = I_m \sin(\omega t + \Delta\alpha + \varphi); i_3(t) = I_m \sin(\omega t + 2\Delta\alpha + \varphi).$$

В момент времени  $t_1$ , когда  $U_{11} = U_{31}$ , мгновенное значение входного напряжения  $U_{11} = U_m \sin \omega \Delta t_1$  (где  $\Delta t_1$  – интервал времени между переходом сигнала  $u_1(t)$  через ноль и моментом времени  $t_1$ ), а мгновенные значения первого и второго дополнительных сигналов будут равны  $U_{21} = U_m \sin(\omega \Delta t_1 + \Delta\alpha)$  и  $U_{31} = U_m \sin(\omega \Delta t_1 + 2\Delta\alpha)$ .

Равенство мгновенных значений  $U_{11} = U_{31}$  выполняется в том случае, если

$\omega\Delta t_1 + 2\Delta\alpha = \omega\Delta t_1$  ( $\Delta\alpha \neq 0$ ), то есть когда  $2\Delta\alpha = \pi + 2\pi k - 2\omega\Delta t_1$  или  $\omega\Delta t_1 = \frac{\pi}{2}(2k+1) - \Delta\alpha$ , где  $k = 0, 1$ . Отсюда  $U_{21} = U_m \sin\left[\frac{\pi}{2}(2k+1)\right] = \pm U_m$ .

В момент времени  $t_1$  мгновенное значение дополнительного тока  $i_2(t)$  равно  $I_{21} = I_m \sin(\omega\Delta t_1 + \Delta\alpha + \varphi) = I_m \sin\left[\frac{\pi}{2}(2k+1) + \varphi\right] = \pm I_m \cos \varphi$ .

В момент времени  $t_2$ , когда  $I_{12} = I_{32}$ , по аналогии с сигналом напряжения мгновенные значения входного и дополнительного сигналов тока примут вид  $I_{12} = I_m \sin(\omega\Delta t_2 + \varphi)$ ;  $I_{22} = I_m \sin(\omega\Delta t_2 + \Delta\alpha + \varphi)$  и  $I_{32} = I_m \sin(\omega\Delta t_2 + 2\Delta\alpha + \varphi)$  (где  $\Delta t_2$  – интервал времени между переходом сигнала  $i_1(t)$  через ноль и моментом времени  $t_2$ ).

Равенство мгновенных значений сигналов  $I_{12} = I_{32}$  выполняется в том случае, если  $\omega\Delta t_2 + 2\Delta\alpha + \varphi = \omega\Delta t_2 + \varphi$ , то есть когда  $2\Delta\alpha = \pi + 2\pi k - 2\omega\Delta t_2 - 2\varphi$  или  $\omega\Delta t_2 = \frac{\pi}{2}(2k+1) - \Delta\alpha - \varphi$ . Отсюда  $I_{22} = I_m \sin\left[\frac{\pi}{2}(2k+1)\right] = \pm I_m$ .

СКЗ напряжения и тока будут равны

$$U_{СКЗ} = \frac{|U_{21}|}{\sqrt{2}}; I_{СКЗ} = \frac{|I_{22}|}{\sqrt{2}}.$$

АМ и РМ определяются следующими выражениями:

$$P = \frac{U_{21}I_{21}}{2}; Q = \frac{U_{21}\text{sign}(I_{21})}{2} \sqrt{I_{22}^2 - I_{21}^2}.$$

Время измерения ИХГС достаточно велико и зависит в общем случае от интервала времени между моментом начала измерения и переходом сигнала напряжения через ноль, а также интервала времени, пропорционального углу сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi$ . Максимальное время измерения соответствует

$$T_{\max} = \frac{T}{2} + \frac{T}{4} + T_{\varphi}, \text{ где } T_{\varphi} \text{ – интервал времени, пропорциональный } \varphi.$$

Метод измерения ИХГС *ACFJ* относится к третьей группе, поскольку не использует сравнение сигналов. Метод заключается в том, что в момент перехода входного сигнала напряжения через ноль одновременно измеряют мгновенное значение дополнительного напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол  $\Delta\alpha$ , и мгновенное значение тока; через интервал времени  $\Delta t$  одновременно измеряют мгновенные значения входного и дополнительного сигналов напряжения и тока. Интегральные характеристики гармонических сигналов определяют по измеренным значениям [5].

Временные диаграммы, поясняющие метод, приведены на рис. 4.

Входной и дополнительный сигналы напряжения и входной ток соответствуют выражениям (1) – (3).

В момент времени  $t_1$ , когда сигнал напряжения переходит через ноль, выражения для мгновенных значений примут вид  $U_{21} = U_m \sin \Delta\alpha$ ;  $I_{11} = I_m \sin \varphi$ .

Через образцовый интервал времени  $\Delta t$  (в момент времени  $t_2$ ) мгновенные значения сигналов будут равны  $U_{12} = U_m \sin \omega\Delta t$ ;  $U_{22} = U_m \sin(\Delta\alpha + \omega\Delta t)$ ;

$$I_{12} = I_m \sin(\varphi + \omega \Delta t).$$

Используя мгновенные значения сигналов, после преобразований можно получить выражения для определения основных ИХГС:

– СКЗ напряжения и тока

$$U_{СКЗ} = \frac{2|U_{12}U_{21}U_{22}|}{\sqrt{2\left[4U_{21}^2U_{22}^2 - (U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)^2\right]}},$$

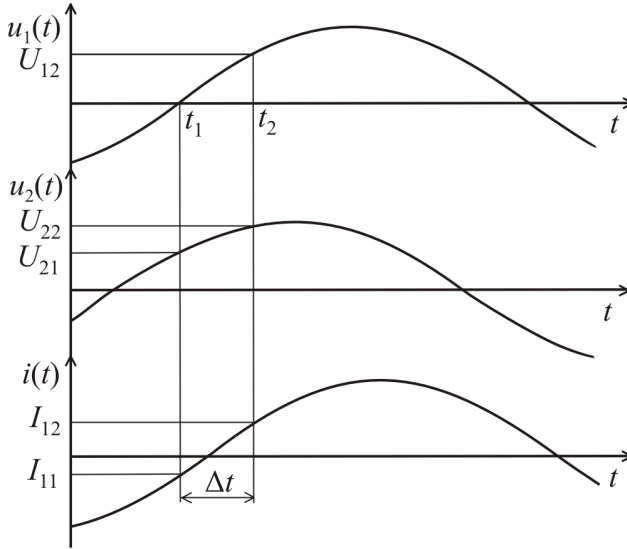


Рис. 4. Временные диаграммы, поясняющие третий метод

$$I_{СКЗ} = \sqrt{\frac{2U_{21}U_{22}\left[2U_{21}U_{22}(I_{11}^2 + I_{12}^2) - I_{11}I_{12}(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)\right]}{2\left[4U_{21}^2U_{22}^2 - (U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)^2\right]}};$$

– активная и реактивная мощности

$$P = \frac{2U_{12}U_{21}U_{22}\left[2I_{12}U_{21}U_{22} - I_{11}(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)\right]}{2\left[4U_{21}^2U_{22}^2 - (U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)^2\right]};$$

$$Q = \frac{I_{11}U_{12}U_{21}U_{22}}{\sqrt{4U_{21}^2U_{22}^2 - (U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)^2}}.$$

Время измерения ИХГС в данном методе определяется интервалом времени между моментом начала измерения и моментом перехода сигнала напряжения через ноль, а также интервалом времени  $\Delta t$ , длительность которого может быть произвольной. Максимальное время измерения соответствует  $T_{\max} = \frac{T}{2} + \Delta t$ .

Рассмотренные методы исключают частотную погрешность ФСБ. Однако общим недостатком средств измерений, реализующих данные методы, является погрешность по напряжению (погрешность по модулю) фазосдвигающих блоков, которая приводит к тому, что амплитуды входного и дополнительного сигналов могут различаться.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мелентьев В.С., Батищев В.И. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов. – М.: Физматлит, 2011. – 240 с.
2. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Синицын А.Е. Синтез методов измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих гармонических сигналов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 3(35). – С. 84-89.
3. Мелентьев В.С., Камышишникова А.Н., Леонович Г.И. Новый подход к измерению интегральных характеристик гармонических сигналов по мгновенным значениям, распределенным в пространстве // Информационные, измерительные и управляющие системы (ИИУС-2010): Мат. Междунар. науч.-техн. конф. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – С. 186-191.
4. Мелентьев В.С., Лычев А.О. Метод измерения интегральных характеристик на основе сравнения мгновенных значений гармонических сигналов, распределенных в пространстве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 4(32). – С. 236-239.
5. Мелентьев В.С., Батищев В.И., Иванов Ю.М. Исследование метода измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям сигналов // Датчики и системы: методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации (Датчики и системы – 2012): Труды Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. – С. 11-16.

*Статья поступила в редакцию 13 марта 2013 г.*

## THE MEASUREMENT METHODS OF INTEGRAL CHARACTERISTICS ON THE BASE OF CAPACITOR GAUGES PARAMETERS

*V.S. Melentiev, Ju.M. Ivanov, A.E. Sinitsyn*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

*The classification of measurement methods of capacitor gauges parameters according to momentary values with the help of the additional harmonic signals shifted to unspecified angle with respect to input ones. New approach to such methods synthesis is given. Three methods created on the base of that approach are described.*

**Keywords:** *transient, instant values, a measuring circuit, an error, quantization*

---

*Vladimir S. Melentiev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Yurie M. Ivanov (Ph. D. (Techn.)).  
Anton E. Sinitsyn, Postgraduate Student.*