

## Краткие сообщения

УДК 621.317

### АНАЛИЗ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПО МГНОВЕННЫМ ЗНАЧЕНИЯМ ИХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

**Ю.М. Иванов**

Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Исследуется метод измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям с использованием ортогональных составляющих гармонических сигналов. Приводятся результаты анализа погрешности метода, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели.*

**Ключевые слова:** интегральные характеристики, гармонические сигналы, мгновенные значения, ортогональные составляющие сигналов, сравнение сигналов, погрешность.

В настоящее время широко используются методы измерения интегральных характеристик гармонических сигналов (ИХГС) по отдельным мгновенным значениям. Значительно сократить время измерения можно за счет формирования дополнительных ортогональных составляющих сигналов и определения ИХГС по мгновенным значениям входного и дополнительных сигналов [1].

В [2] предложен метод измерения ИХГС, основанный на том, что формируют дополнительные сигналы напряжения и тока, сдвинутые относительно основных на  $90^\circ$ ; в момент равенства основного и дополнительного сигналов напряжения одновременно измеряют мгновенные значения основных сигналов напряжения и тока; в момент равенства основного и дополнительного сигналов тока измеряют мгновенные значения основных сигналов тока и напряжения и определяют ИХГС по измеренным значениям.

В случае, когда после начала измерения сначала происходит равенство мгновенных значений основного и дополнительного сигналов напряжения, временные диаграммы будут иметь следующий вид (рис. 1).

Для входного напряжения  $u_1(t) = U_m \sin \omega t$  и тока  $i_1(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$  и дополнительных сигналов напряжения  $u_2(t) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \cos \omega t$  и тока

$i_2(t) = I_m \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) = I_m \cos(\omega t + \varphi)$  в момент времени  $t_1$ , когда основной и дополнительный сигналы напряжения будут равны, выражения для мгновенных значений сигналов примут вид

---

Юрий Михайлович Иванов (к.т.н.), младший научный сотрудник кафедры «Информационно-измерительная техника».

$$U_{11} = U_m \sin \alpha_1; U_{21} = U_m \cos \alpha_1; I_{11} = I_m \sin \alpha_2,$$

где  $U_m, I_m$  – амплитудные значения напряжения и тока;  
 $\alpha_1, \alpha_2$  – фазы сигналов напряжения и тока в момент времени  $t_1$ ;  
 $\varphi = \alpha_2 - \alpha_1$  – угол сдвига фаз между сигналами напряжения и тока;  
 $\omega$  – угловая частота входного сигнала.

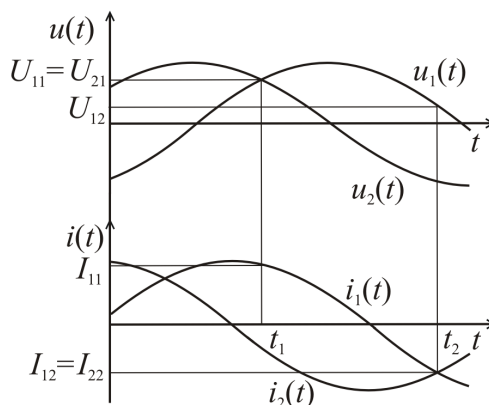


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод в случае первоначального равенства сигналов напряжения

В момент времени  $t_2$ , когда будут равны основной и дополнительный сигналы тока, выражения для мгновенных значений сигналов будут иметь следующий вид:

$$I_{12} = I_m \sin \alpha_3; I_{22} = I_m \cos \alpha_3; U_{12} = U_m \sin(\alpha_3 - \varphi),$$

где  $\alpha_3$  – фаза сигнала тока в момент времени  $t_2$ .

Основные ИХГС можно определить с помощью выражений:  
– среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока

$$U_{\text{СКЗ}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = |U_{11}|; \quad (1)$$

$$I_{\text{СКЗ}} = |I_{12}|; \quad (2)$$

– активная (АМ) и реактивная (РМ) мощность

$$P = \frac{U_{11} \left[ I_{11} + \text{sign}(U_{11}) \text{sign}(U_{12}) \text{sign}(I_{12}) \sqrt{2I_{12}^2 - I_{11}^2} \right]}{2}; \quad (3)$$

$$Q = \frac{U_{11} \left[ I_{11} - \text{sign}(U_{11}) \text{sign}(U_{12}) \text{sign}(I_{12}) \sqrt{2I_{12}^2 - I_{11}^2} \right]}{2}. \quad (4)$$

В случае, когда после начала измерения сначала происходит равенство мгновенных значений основного и дополнительного сигналов тока, выражения для ИХГС будут иметь следующий вид:

$$U_{CKЗ} = |U_{12}|; I_{CKЗ} = |I_{11}|; P = \frac{I_{11} \left[ U_{11} + \text{sign}(I_{11}) \text{sign}(U_{12}) \text{sign}(I_{12}) \sqrt{2U_{12}^2 - U_{11}^2} \right]}{2};$$

$$Q = \frac{I_{11} \left[ \text{sign}(I_{11}) \text{sign}(U_{12}) \text{sign}(I_{12}) \sqrt{2U_{12}^2 - U_{11}^2} - U_{11} \right]}{2}.$$

Метод предназначен для определения интегральных характеристик сигналов с гармоническими моделями. Проведем оценку предельного значения методической погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели. Для этого используем предложенную в [1] методику оценки погрешности результата измерения интегральной характеристики как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала.

В этом случае предельные значения абсолютных погрешностей определения интегральных характеристик сигналов будут равны:

$$\Delta U_{CKЗ} = \left| (U_{CKЗ})'_{U_{11}} \right| \Delta U_{\max}; \Delta I_{CKЗ} = \left| (I_{CKЗ})'_{I_{12}} \right| \Delta I_{\max};$$

$$\Delta P = \left| (P)'_{U_{11}} \right| \Delta U_{\max} + \left| (P)'_{I_{11}} \right| \Delta I_1 + \left| (P)'_{I_{12}} \right| \Delta I_{\max};$$

$$\Delta Q = \left| (Q)'_{U_{11}} \right| \Delta U_{\max} + \left| (Q)'_{I_{11}} \right| + \left| (Q)'_{I_{12}} \right| \Delta I_{\max},$$

где  $\Delta U_{\max} = U_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}$  и  $\Delta I_{\max} = I_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}$  – предельные абсолютные погрешности аргументов, соответствующие наибольшим отклонениям моделей от реальных сигналов;

$h_{uk}$  и  $h_{ik}$  – коэффициенты  $k$ -тых гармоник напряжения и тока;

$U_{1m}$  и  $I_{1m}$  – амплитуды первых гармоник сигналов.

Используя предельные значения абсолютных погрешностей и выражения (1) – (4), можно определить относительные погрешности определения СКЗ напряжения и тока и приведенные погрешности определения АМ и РМ:

$$\delta_{U_{CKЗ}} = \frac{\sqrt{2} \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2}}; \delta_{I_{CKЗ}} = \frac{\sqrt{2} \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}}; \quad (5)$$

$$\gamma_P = \gamma_Q = \frac{\sqrt{2} \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} |\sin \alpha_2 \pm \cos \alpha_2| \cos \alpha_2 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} (|\sin \alpha_2 \pm \cos \alpha_2| + \sqrt{2})}{\sqrt{2} |\cos \alpha_2| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}}. \quad (6)$$

Из выражений (5) следует, что относительные погрешности определения СКЗ напряжения и тока зависят только от гармонического состава сигналов.

На рис. 2 приведен график зависимости приведенной погрешности определения АМ (РМ) от  $\varphi$ , полученный в соответствии с (6), при наличии в сигналах первой и третьей гармоник с коэффициентами  $h_{u3} = h_{i3} = h_3 = 1\%$ .

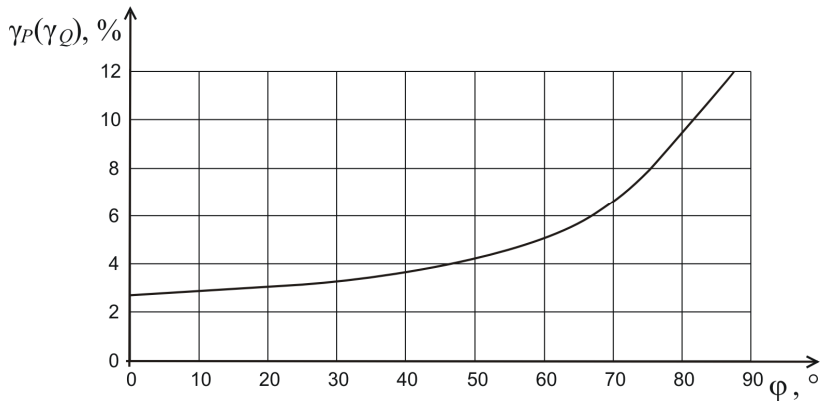


Рис. 2. Графики зависимости  $\gamma_P$  ( $\gamma_Q$ ) от  $\varphi$  при оценке погрешности по наибольшему отклонению значений реального сигнала и модели

Проведем оценку значения методической погрешности в случае, когда предельные абсолютные погрешности аргументов соответствуют отклонению модели от реального сигнала, определяемому через среднеквадратическую погрешность [1].

Если параметры первой гармоники реального сигнала совпадают с параметрами сигнала, соответствующего гармонической модели, то среднеквадратические погрешности для сигналов напряжения и тока примут вид

$$\sigma_u = \frac{U_{1m}}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2}; \quad \sigma_i = \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}.$$

В этом случае предельные значения абсолютной погрешности определения интегральных характеристик сигналов будут равны:

$$\Delta U_{СКЗ} = \left| (U_{СКЗ})'_{U_{11}} \right| \sigma_u; \quad \Delta I_{СКЗ} = \left| \left[ (I_{СКЗ})'_{I_{12}} \right] \right| \sigma_i;$$

$$\Delta P = \left| (P)'_{U_{11}} \right| \sigma_u + \left[ \left| (P)'_{I_{11}} \right| \Delta I_1 + \left| (P)'_{I_{12}} \right| \right] \sigma_i; \quad \Delta Q = \left| (Q)'_{U_{11}} \right| \sigma_u + \left[ \left| (Q)'_{I_{11}} \right| + \left| (Q)'_{I_{12}} \right| \right] \sigma_i.$$

Сравнивая выражения для абсолютных погрешностей, можно сделать вывод, что при наличии в сигналах первой и третьей гармоник с коэффициентами  $h_{u3} = h_{i3} = h_3 = 1\%$  относительные погрешности определения СКЗ напряжения и тока и приведенные погрешности определения АМ и РМ в  $\sqrt{2}$  раз меньше аналогичных погрешностей, вычисленных согласно выражениям (4) и (5).

Результаты анализа показывают, что наличие в сигналах высших гармоник приводит к существенному увеличению погрешности измерения интегральных характеристик. Поэтому рассматриваемый метод следует использовать в цепях, в которых сигналы напряжения и тока близки к гармоническим.

## 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., Рудаков Д.В. Методы измерения интегральных характеристик гармонических сигналов, основанные на сравнении ортогональных составляющих сигналов // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвуз. сборник. – Вып. 1. – Бийск: Изд-во Алтайского гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова, 2011. – С. 129-131.

*Статья поступила в редакцию 20 августа 2012 г.*

## THE ANALYSIS OF THE METHOD OF MEASUREMENT OF PARAMETERS OF HARMONIOUS SIGNALS ON INSTANT VALUES OF THEIR ORTHOGONAL COMPONENTS

***Ju. M. Ivanov***

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

*The method of measurement of integrated characteristics on instant values with use of orthogonal making harmonious signals is investigated. Results of the analysis of an error of the method caused by a deviation of a real signal from harmonious model are resulted.*

***Keywords:*** *integrated characteristics, harmonious signals, instant values, orthogonal components of signals, comparison of signals, an error.*

## **СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИЛЬНОТОЧНЫХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ПРИ ПОМОЩИ ПЛАСТИЧНОГО ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕГО МАТЕРИАЛА**

***А.А. Казанцев, И.А. Косорлуков***

Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: kazantzev@63.ru

*Рассматривается способ сокращения потерь электроэнергии в высоковольтных контактных соединениях уменьшением в них переходного сопротивления путем нанесения на контактирующие поверхности электропроводящего материала. Исследуется электропроводящий материал, его состав, методика изготовления, результаты применения.*

**Ключевые слова:** *контактное соединение, переходное сопротивление, электропроводный материал, электролиз, ошиновка.*

В настоящее время в крупных технологических установках используются многоамперные токопроводы, которые выполняются, как правило, с использованием медных или алюминиевых шин. Соединения шин между собой осуществляются либо сваркой, в результате чего получается неразборная контактная конструкция, либо с помощью болтовых соединений, которые позволяют значительно проще выполнять работы по ремонту и обслуживанию токопроводов.

В процессе эксплуатации таких контактных соединений в энергоемких технологических установках химической, металлургической промышленности в условиях повышенных температур и агрессивной среды происходит их старение за счет окисления контактирующих поверхностей, что приводит к повышению сопротивления контактного перехода [1].

Наиболее распространенными методами повышения надежности контактных соединений в настоящее время являются лужение поверхности контактного перехода, плакирование контактной поверхности, покрытие поверхности контакта различными порошками путем напыления. Лужение является наиболее распространенным способом защиты контактной поверхности от окисления под воздействием внешней среды. Лужению подвергаются как медные, так и алюминиевые шины. Помимо того, что процесс лужения требует дополнительных трудозатрат и наличия специального оборудования, отрицательным моментом является то, что после лужения контактное переходное сопротивление как медных, так и алюминиевых шин существенно увеличивается. Плакирование алюминиевых шин медным покрытием существенно снижает контактное сопротивление. Но в условиях агрессивной химической среды, например в цехах хлорного производства, плакированная поверхность часто отслаивается, что влечет за собой катастрофическое ухудшение контактного перехода. Напыление на контактные переходы алюминиевых шин медного порошка позволяет снизить переходное сопротивление и поддерживать его длительное время в стабильном состоянии. Существенным недостатком напыления является высокая стоимость этой процедуры [2].

---

*Александр Андреевич Казанцев, студент.  
Игорь Андреевич Косорлуков, аспирант.*

Одним из способов снижения потерь электрической энергии является использование электропроводящих смазок, когда между твердометаллическими контактирующими поверхностями помещается промежуточный электропроводный материал, который позволяет значительно увеличить площадь контактирования и тем самым снизить сопротивление контактного перехода [3, 4].

Известен электропроводный композиционный углеродосодержащий материал на основе малопроводящего материала, смешанного с электропроводной углеродной добавкой (А.С. № 2398312, 2008 г.).

Но использование этого материала возможно только на малых токах и только при добавлении определенной электропроводной углеродной добавки.

Известна пластичная смазка ЦИАТИМ-221 (ГОСТ 9433-80) на основе полиорганосилоксановой жидкости 132-25, загущенной кальциевым мылом стеариновой кислоты с добавлением церезина-80 и пакета присадок.

Недостаток этого материала заключается в том, что его трибометрические свойства очень низкие, недостаточен температурный предел работоспособности (+150 °С). При его использовании в сильноточных контактных соединениях в условиях агрессивной среды и повышенной влажности со временем происходит окисление материала и пригорание контактных поверхностей, что приводит к повышению сопротивления контактного соединения и изменению его физико-химических свойств.

Техническим результатом исследуемого материала является повышение долговечности, термостойкости материала, улучшение его электропроводных свойств.

Технический результат достигается тем, что, используя материал на основе полиорганосилоксановой жидкости 132-25, загущенной кальциевым мылом стеариновой кислоты с добавлением церезина-80 и пакета присадок в качестве основы, в него добавляют интерметаллид FeGa<sub>4</sub>, затем в полученную смесь вводят эвтектический сплав «галлий – индий – олово», а после перемешивания с порошком железным распыленным – химический и гранулометрический составы, средний размер частиц которых колеблется от 20 до 400 мкм, содержание основного металла не ниже 98...99 %, а насыпная плотность равна 2,3...2,9 г/см<sup>3</sup>, общее соотношение исходного и добавленного материалов: 60 % – исходного, 40 % – добавленного

Для создания пластичного электропроводного материала используют интерметаллид FeGa<sub>4</sub>, количественное содержание металла и галлия в котором определяется по формулам:

$$\beta_{Fe} = \frac{\gamma_{Fe}}{\gamma_{Fe} + \gamma_{Ga} \cdot 4} \cdot 100\%;$$

$$\beta_{Ga} = \frac{\gamma_{Ga} \cdot 4}{\gamma_{Fe} + \gamma_{Ga} \cdot 4} \cdot 100\%,$$

где  $\beta_{Fe}$ ,  $\beta_{Ga}$  – процентное содержание в интерметаллическом порошке железа и галлия;

$\gamma_{Fe}$ ,  $\gamma_{Ga}$  – атомные веса железа и галлия.

Коррозия стали в галлий-индиевом расплаве сопровождается образованием бинарного галлида FeGa<sub>4</sub> с объемноцентрированной кубической решеткой. На диаграмме состояния Fe–Ga в области с относительно небольшим содержанием галлия в зависимости от термической обработки может существовать несколько фаз (5...6). Общее соотношение в полученном электропроводном материале: 60 % – исходного, 40 % – добавленного материала.

Полученный пластичный электропроводный материал наносится на контактирующие поверхности со средней толщиной 0,2 мм.

Проведены стендовые испытания модуля контактного соединения в условиях хлорного производства при диапазоне температур 100...250 °С.

Средние значения падений напряжения по результатам 500 измерений в течение трехлетней эксплуатации для контактов размером 0,05×0,1 м и током 2 кА равны 45 мВ для площадок «медь – медь» и 64 мВ для площадок «медь – сталь». Стендовые испытания модуля контактного соединения электролизера с током нагрузки  $I_H = 3000$  А показали падение напряжения на контактном соединении с применением материала ЦИАТИМ-221, которое составило  $18,3 \cdot 10^{-3}$  В, что соответствует переходному сопротивлению  $R_0 = 6,1 \cdot 10^{-6}$  Ом; после применения полученного электропроводного пластичного материала в контактном соединении падение напряжения составило  $12,3 \cdot 10^{-3}$  В, что соответствует переходному сопротивлению  $R_0 = 4,1 \cdot 10^{-6}$  Ом.

Испытания показали, что при нормальной температуре переходные сопротивления болтовых медных контактов с использованием пластичного электропроводного материала близки к переходным сопротивлениям сварных контактов. Введение полученного материала в межконтактный промежуток болтовых соединений снижает переходное сопротивление в 2...4 раза. При тех же условиях снижение переходного сопротивления в паре «сталь – графит» наблюдалось в 10 раз.

Таким образом, по результатам проведенных экспериментов было выявлено, что использование материала на основе полиорганосилоксановой жидкости 132-25, загущенной кальциевым мылом стеариновой кислоты с добавлением церезина-80 и пакета присадок в качестве основы, добавление в него интерметаллида  $FeGa_4$  и эвтектического сплава «галлий – индий – олово», перемешивание с порошком железным распыленным с общим соотношением исходного и добавленного материалов: 60 % – исходного, 40 % – добавленного позволяют снизить сопротивление сильноточных контактных соединений до 25–30 %. Таким образом, использование данного материала в межконтактных промежутках болтовых соединений позволяет существенно снизить переходное сопротивление в контактной паре «медь – медь» и «медь – сталь».

Также испытания показали, что зависимость величины переходного сопротивления от плотности токопроводящей смазки и величины затяжки болтов выражается соотношением

$$R_{пер} = f(\gamma_{см}, M_{зат}),$$

где  $\gamma_{см}$  – плотность токопроводящей смазки, кг/м<sup>3</sup>;  $M_{зат}$  – величина крутящего момента при затяжке болтов контактного соединения, Н·м.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Косорлуков И.А.* Снижение потерь электроэнергии в сильноточных контактных соединениях // Материалы докладов конкурса программы У.М.Н.И.К., IV Всероссийская студенческая научная конференция «Студенческая наука и медицина XXI века: Традиции, инновации и приоритеты». – Самара, 2010. – С. 82-83.
2. *Воронин А.А., Добросотских А.С., Кулаков П.А., Приходченко В.И.* Повышение надежности разборных контактных соединений // Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Тезисы докладов VI Международной конф. – Крым, Украина, 2010. – С. 351.



3. Воронин А.А., Добросотских А.С., Косорлуков И.А., Кулаков П.А., Шевченко В.Б. Снижение потерь и повышение надежности силовых контактных соединений // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – №3. – 2011. – С. 62-63.
4. Воронин А.А., Кулаков П.А., Приходченко В.И. Интерметаллическое покрытие электрических контактов и токоведущих частей силовых устройств // Тезисы докладов V Международной конф. «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологические технологии производства и утилизации изделий». – Киев, 2008. – С. 177.

*Статья поступила в редакцию 1 октября 2012 г.*

## **REDUCTION OF ELECTRICAL ENERGY LOSSES IN THE HIGH-CURRENT CONNECTIONS WITH PLASTIC ELECTROCONDUCTIVE MATERIALS**

***A.A. Kazantzev, I.A. Kosorlukov***

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

*The way of reducing power losses in high-current connections are transient decrease in resistance by applying a conductive material contact surfaces. Investigate the electrically conductive material, composition, method of manufacture, the results of use.*

***Keywords:*** contact connection, contact resistance, electrically conductive material, electrolysis, bracket.

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ\*

*А.Е. Сеницын*

Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Приводятся результаты анализа метода измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям гармонических сигналов, разделенных как в пространстве, так и во времени.*

**Ключевые слова:** интегральные характеристики, гармонические сигналы, мгновенные значения, характерные точки.

Определение параметров периодических процессов в течение периода сигнала находит широкое применение при контроле и испытаниях электромеханических систем, электротехнического оборудования, в системах автоматизированного управления.

В большинстве случаев периодические процессы различной физической природы преобразуются в электрические сигналы, удобные для измерения и обработки.

Особенно следует отметить гармонические сигналы, которые широко используются в измерительной технике для анализа и синтеза измерительных сигналов.

В настоящее время успешно развивается направление, связанное с разработкой методов и средств измерения интегральных характеристик по отдельным мгновенным значениям гармонических и дополнительных сигналов, сдвинутых по фазе относительно входного сигнала [1].

В [2] предложен метод определения ИХГС, использующий как пространственное, так и временное разделение мгновенных значений сигналов и отличающийся от известных использованием характерных точек (переход сигнала через ноль).

В соответствии с данным методом 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 первые мгновенные значения входного сигнала тока и сдвинутого относительно него по фазе на угол  $\Delta\alpha$  дополнительного сигнала тока; через интервал времени  $\Delta t$  одновременно измеряют вторые мгновенные значения входного и дополнительного сигналов напряжения и определяют ИХГС по измеренным значениям.

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рисунке.

Если сигналы напряжения и тока в исследуемой цепи имеют гармонические модели, то входные и дополнительные сигналы напряжения и тока имеют вид

$$u(t) = U_m \sin \omega t; \quad i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi); \quad u'(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha); \\ i'(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi + \Delta\alpha),$$

где  $U_m, I_m$  – амплитудные значения сигналов напряжения и тока;

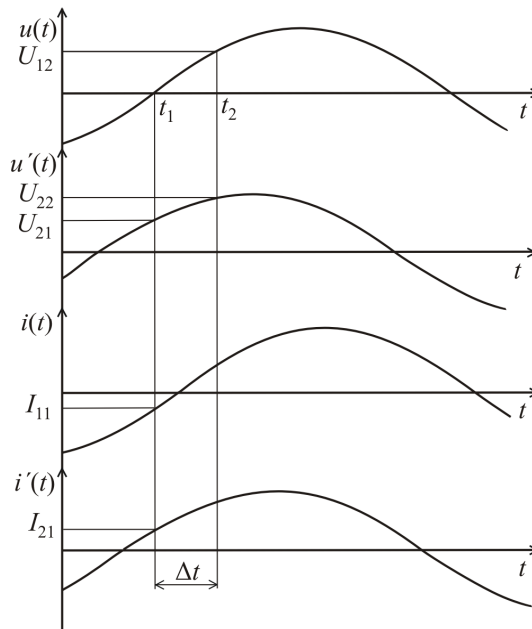
$\omega$  – угловая частота входного сигнала;

$\varphi$  – угол сдвига фаз между входными сигналами напряжения и тока.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11-08-00039-а).

Антон Евгеньевич Сеницын, аспирант.



Временные диаграммы, поясняющие метод

Согласно методу мгновенные значения сигналов напряжения и тока равны:

$$\begin{cases} U_{21} = U_m \sin \Delta\alpha; \\ U_{12} = U_m \sin \omega\Delta t; \\ U_{22} = U_m \sin(\Delta\alpha + \omega\Delta t); \\ I_{11} = I_m \sin \varphi; \\ I_{21} = I_m \sin(\varphi + \Delta\alpha). \end{cases} \quad (1)$$

В соответствии с (1) ИХГС определяются согласно выражениям:  
– среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока

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

$$I_{СКЗ} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ I_{11}^2 + \frac{\left( I_{21} - I_{11} \frac{U_{22}^2 - U_{21}^2 + U_{12}^2}{2U_{22}U_{12}} \right)^2}{\sqrt{1 - \left( \frac{U_{22}^2 - U_{21}^2 + U_{12}^2}{2U_{22}U_{12}} \right)^2}} \right]}; \quad (3)$$

– активная (АМ) и реактивная (РМ) мощности

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

$$Q = \frac{U_{12}I_{11}}{2 \sqrt{1 - \left( \frac{U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2}{2U_{22}U_{21}} \right)^2}}. \quad (5)$$

Рассматриваемый метод предназначен для определения интегральных характеристик сигналов с гармоническими моделями. При наличии в сигналах высших гармоник неизбежно возникает погрешность.

Проведем оценку методической погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели. Для этого используем предложенную в [1] методику оценки погрешности результата измерения интегральной характеристики как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала. Как известно, погрешность вычисления значения какой-либо функции, аргументы которой заданы приближенно, может быть оценена с помощью дифференциала этой функции. Погрешность функции есть не что иное, как возможное приращение функции, которое она получит, если ее аргументам дать приращения, равные их погрешностям.

Пусть предельные абсолютные погрешности аргументов соответствуют наибольшему отклонению моделей от реальных сигналов. В этом случае предельные значения абсолютных погрешностей определения интегральных характеристик сигналов в соответствии с (2) – (5) будут равны:

$$\Delta U_{CK3} = \left[ \left| (U_{CK3})'_{U_{21}} \right| + \left| (U_{CK3})'_{U_{12}} \right| + \left| (U_{CK3})'_{U_{22}} \right| \right] \Delta U_{\max}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta I_{CK3} = & \left[ \left| (I_{CK3})'_{I_{11}} \right| + \left| (I_{CK3})'_{I_{21}} \right| \right] \Delta I_{\max} + \\ & + \left[ \left| (I_{CK3})'_{U_{21}} \right| + \left| (I_{CK3})'_{U_{12}} \right| + \left| (I_{CK3})'_{U_{22}} \right| \right] \Delta U_{\max}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\Delta P = \left[ \left| (P)'_{I_{11}} \right| + \left| (P)'_{I_{21}} \right| \right] \Delta I_{\max} + \left[ \left| (P)'_{U_{21}} \right| + \left| (P)'_{U_{12}} \right| + \left| (P)'_{U_{22}} \right| \right] \Delta U_{\max}; \quad (8)$$

$$\Delta Q = \left| (Q)'_{I_{11}} \right| \Delta I_{\max} + \left[ \left| (Q)'_{U_{21}} \right| + \left| (Q)'_{U_{12}} \right| + \left| (Q)'_{U_{22}} \right| \right] \Delta U_{\max}; \quad (9)$$

где  $\Delta U_{\max}$ ,  $\Delta I_{\max}$  – предельные абсолютные погрешности аргументов, соответствующие наибольшим отклонениям моделей от реальных сигналов.

В общем случае  $\Delta U_{\max} = U_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}$  и  $\Delta I_{\max} = I_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}$ , где  $h_{uk}$  и  $h_{ik}$  – коэффициенты  $k$ -тых гармоник напряжения и тока;  $U_{1m}$  и  $I_{1m}$  – амплитуды первых гармоник сигналов.

Используя выражения (2) – (5) и предельные значения абсолютных погрешностей (6) – (9), можно определить относительные погрешности определения СКЗ напряжения и тока и приведенные погрешности определения АМ и РМ:

$$\delta_{U_{СКЗ}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \{ \cos \omega \Delta t [ |\cos(\Delta\alpha + \omega\Delta t)| + |\cos \Delta\alpha| ] + 0,5 |\cos(2\Delta\alpha + \omega\Delta t)| \}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2 |\sin \omega \Delta t \sin \Delta\alpha \sin(\Delta\alpha + \omega\Delta t)|}}; \quad (10)$$

$$\delta_{I_{СКЗ}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} [ |\cos \varphi| + |\cos(\varphi - \omega\Delta t)| ]}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2 |\sin \omega \Delta t|}} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} [ |\cos \varphi| + |\cos(\varphi - \omega\Delta t)| ]}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2 |\sin \omega \Delta t \sin \Delta\alpha \sin(\Delta\alpha + \omega\Delta t)|}} \times \{ |\sin \varphi \sin(\varphi + \omega\Delta t) - 0,5| + |\cos \varphi \cos(\varphi + \omega\Delta t) - 0,5| [ |\cos(\Delta\alpha + \omega\Delta t)| + |\cos \Delta\alpha| ] \}; \quad (11)$$

$$\gamma_P = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2 |\sin \omega \Delta t|}} \left\langle \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} (|\cos \omega \Delta t| + 1) + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{|\sin \Delta\alpha \sin(\Delta\alpha + \omega\Delta t)|} \right\rangle \times \{ |\cos \varphi \cos \Delta\alpha \cos(\Delta\alpha + \omega\Delta t) + \cos(\varphi + \omega\Delta t)| + |\cos \varphi \cos \omega\Delta t + \cos(\varphi + \omega\Delta t)| \} \times [ |\cos(\Delta\alpha + \omega\Delta t)| + |\cos \Delta\alpha| ]; \quad (12)$$

$$\gamma_Q = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} \left\langle \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} |\sin \varphi|}{|\sin \Delta\alpha \sin \omega \Delta t \sin(\Delta\alpha + \omega\Delta t)|} \right\rangle \times \{ \cos(2\Delta\alpha + \omega\Delta t) + \sin^2 \omega \Delta t |\cos \omega \Delta t| [ |\cos \Delta\alpha| + |\cos(\Delta\alpha + \omega\Delta t)| ] \}. \quad (13)$$

Анализ выражений (10) – (13) показывает, что относительные погрешности определения СКЗ напряжения и тока и приведенные погрешности определения АМ и РМ зависят от гармонического состава сигналов, угла сдвига фаз  $\Delta\alpha$  и интервала времени  $\Delta t$ . Кроме того, погрешности  $\delta_{I_{СКЗ}}$ ,  $\gamma_P$  и  $\gamma_Q$  зависят от угла сдвига фаз  $\varphi$ .

Полученные результаты позволяют выбирать области использования метода в зависимости от предъявляемых требований по точности измерения.

#### 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., Рудаков Д.В. Методы измерения интегральных характеристик гармонических сигналов, основанные на сравнении ортогональных составляющих сигналов // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвуз. сборник. – Вып. 1. – Бийск: Изд-во Алтайского гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова, 2011. – С. 129-131.
3. Батищев В.И., Мелентьев В.С. Аппроксимационные методы и системы промышленных измерений, контроля, испытаний, диагностики. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 393 с.

4. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Синицын А.Е. Метод измерения интегральных характеристик гармонических сигналов по мгновенным значениям их ортогональных составляющих // Современные инновации в науке и технике: Матер. II-й Междунар. науч.-практ. конф. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2012. – С. 123, 124.

*Статья поступила в редакцию 20 августа 2012 г.*

## **THE SYNTHESIS OF METHODS OF MEASUREMENT OF INTEGRATED CHARACTERISTICS ON INSTANT VALUES OF ORTHOGONAL MAKING HARMONIOUS SIGNALS**

***A.E. Sinitsyn***

*Classification of methods of measurement of integrated characteristics by instant values with use of orthogonal harmonious signals is considered. The new approach to the synthesis of such methods is offered. Four methods synthesized on the basis of the given approach are examined.*

***Keywords:*** *integrated characteristics, harmonious signals, instant values, orthogonal components of signals, comparison of signals, characteristic points.*

---

*Anton E. Sinitsyn, Postgraduate Student.*

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Представленная в журнал работа должна быть законченным научным исследованием и содержать новые научные результаты, нигде ранее не публиковавшиеся и не представленные к публикации в других изданиях. В журнале предполагается публикация статей объемом до 7 страниц (включая рисунки и таблицы), а также кратких сообщений по соответствующим разделам (объем 2-4 стр. вместе с рисунками и таблицами). Объем заказных статей устанавливается редколлегией.

В приоритетном порядке будут рассматриваться заказные и обзорные статьи, а также материалы докторских и кандидатских диссертаций. Аспирантские работы рекомендуются представлять в форме кратких сообщений.

### **Требования к оформлению статей находятся на сайте университета**

[www.samgtu.ru](http://www.samgtu.ru) → Наука → Вестник СамГТУ → Серия «Технические науки».

К статье прилагаются:

- экспертное заключение;
- авторская справка;
- договор передачи авторского права на публикацию;
- акт приема-передачи к договору;
- направление от организации (если авторы не работают в СамГТУ).

***Статьи, не удовлетворяющие указанным правилам оформления, будут возвращены авторам без рассмотрения.***

Статьи и краткие сообщения должны быть переданы ответственному секретарю серии «Технические науки» И.Г. Минаковой (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, корп. 8, комн. 519).

Справки по телефонам:

337 07 00 – Эдгар Яковлевич Рапопорт

337 03 42 – Ирина Григорьевна Минакова (e-mail: [vest\\_teh@samgtu.ru](mailto:vest_teh@samgtu.ru))

Редколлегия журнала