

УДК 621.317

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

© 2014 В.С. Мелентьев, В.В. Муратова, Ю.М. Иванов

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 05.12.2014

В статье рассматривается новый метод, позволяющий определять параметры периодических сигналов в процессе контроля усилительных трактов радиоэлектронной аппаратуры и обеспечивающий значительное сокращение времени измерения. Приводятся результаты анализа погрешности измерения параметров из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели.

Ключевые слова: *контроль, усилительный тракт, периодический процесс, гармоническая модель, фазосдвигающий блок, высшие гармоники, погрешность*

В связи с постоянным совершенствованием радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) происходит их непрерывное усложнение. По мере увеличения сложности РЭА во все большей степени затрудняется определение и поддержание их работоспособности. Определение действительного состояния сложной РЭА в процессе производства и эксплуатации требует создание автоматизированных систем контроля их параметров, обеспечивающих получение и обработку информации, устанавливающей соответствие состояния объекта предъявляемым требованиям и обеспечивающих принятие решения или выдачу управляющих воздействий. Для оценки качества усилительных трактов РЭА широко используется метод контроля, основанный на сравнении параметров сигналов на входе и выходе усилительного тракта с помощью двухканальных измерительных систем, осуществляющих одновременное определение параметров [1]. При этом производится измерение частоты, амплитудных значений входного и выходного сигналов, а также угол сдвига фаз между ними. Для этого на вход системы и на контролируемый усилительный тракт РЭА обычно подают гармонический сигнал с генератора переменного тока, а на другой вход системы – сигнал с выхода РЭА. Контроль параметров усилительного тракта проводят во всем диапазоне рабочих частот.

В настоящее время успешно развивается направление, связанное с определением параметров периодических сигналов, включая и частоту, по отдельным мгновенным значениям

сигналов, не связанным с их периодом, что позволяет значительно сократить время измерения [2]. При определении параметров гармонических сигналов (ПГС) дальнейшее сокращение времени измерения достигается за счет формирования дополнительных сигналов, сдвинутых по фазе относительно входных, и определении ПГС по мгновенным значениям как входных, так и дополнительных сигналов [3]. Одним из основных факторов, ограничивающих точность средств измерений, использующих формирование дополнительных сигналов является погрешность по напряжению (погрешность по модулю) фазосдвигающих блоков (ФБ). Наличие данного вида погрешности приводит к различию амплитуд входного и дополнительного сигналов [4]. В статье рассматривается новый метод, который обеспечивает повышение точности измерения ПГС за счет исключения данного вида погрешности.

**Метод измерения параметров сигналов с пространственным и временным разделением мгновенных значений.** Метод заключается в том, что на вход системы и на контролируемый усилительный тракт РЭА подают гармонический сигнал. В момент перехода через ноль дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол  $\Delta\alpha$ , измеряют мгновенное значение входного напряжения. В момент перехода входного сигнала напряжения через ноль одновременно измеряют мгновенные значения дополнительного напряжения и напряжения, поступающего с выхода усилительного тракта. Через интервал времени  $\Delta t$  одновременно измеряют мгновенные значения входного, дополнительного и выходного напряжений. Амплитудные значения входного и выходного сигналов, а также угол сдвига фаз между ними определяют по измеренным значениям.

*Мелентьев Владимир Сергеевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой. E-mail: vs\_mel@mail.ru*  
*Муратова Вера Владимировна, преподаватель. E-mail: muratova1991@yandex.ru*

*Иванов Юрий Михайлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. E-mail: fuego27@rambler.ru*

Для измерения частоты может быть использован аналогичный подход, предложенный авторами в [5], согласно которому в момент перехода дополнительного сигнала через ноль измеряют мгновенное значение входного напряжения; в момент перехода входного сигнала через ноль измеряют мгновенное значение дополнительного сигнала; через образцовый интервал времени  $\Delta t$  одновременно измеряют мгновенные значения обоих сигналов и определяют частоту по измеренным значениям. Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 1.

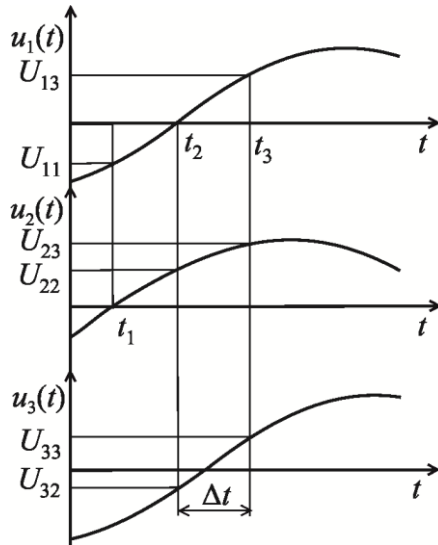


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Входной и дополнительный сигналы напряжения и напряжение на выходе РЭА, имеющие гармонические модели, соответствуют следующим выражениям:

$$u_1(t) = U_{m1} \sin \omega t; \quad u_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \Delta\alpha); \\ u_3(t) = U_{m3} \sin(\omega t + \varphi),$$

где  $U_{m1}, U_{m2}, U_{m3}$  – амплитудные значения входного, дополнительного и выходного напряжений;  $\omega$  – угловая частота входного сигнала;  $\varphi$  – угол сдвига фаз между выходным и входным сигналами.

В момент времени  $t_1$ , когда дополнительный сигнал напряжения переходит через ноль, мгновенное значение входного напряжения примет вид:

$$U_{11} = U_{m1} \sin(-\Delta\alpha).$$

В момент времени  $t_2$ , когда входное напряжение переходит через ноль, мгновенные значения дополнительного и выходного сигналов будут равны:

$$U_{22} = U_{m2} \sin \Delta\alpha; \quad U_{32} = U_{m3} \sin \varphi.$$

Через образцовый интервал времени  $\Delta t$  (в момент времени  $t_3$ ) мгновенные значения сигналов примут вид:

$$U_{13} = U_{m1} \sin \omega \Delta t; \quad U_{23} = U_{m2} \sin(\Delta\alpha + \omega \Delta t); \\ U_{33} = U_{m3} \sin(\varphi + \omega \Delta t).$$

Погрешность по напряжению ФСБ может быть оценена коэффициентом

$$k_m = \frac{U_{m1}}{U_{m2}} = \left| \frac{U_{11}}{U_{22}} \right|.$$

С помощью данного коэффициента, можно скорректировать мгновенные значения дополнительного напряжения:

$$U'_{22} = k_m U_{22} = U_{m1} \sin \Delta\alpha; \\ U'_{23} = k_m U_{23} = U_{m1} \sin(\Delta\alpha + \omega \Delta t).$$

Используя скорректированные мгновенные значения сигналов, после преобразований можно получить выражения для определения информативных параметров в случае, если  $\Delta\alpha \leq 90^\circ$ :

- амплитудные значения входного и выходного напряжений

$$U_{m1} = \frac{2|U_{13}U'_{22}U'_{23}|}{\sqrt{[4U'^2_{22}U'^2_{23} - (U'^2_{22} - U'^2_{13} + U'^2_{23})^2]}}; \quad (1)$$

$$U_{m3} = \left\{ \frac{2|U'_{22}U'_{23}|}{4U'^2_{22}U'^2_{23} - (U'^2_{22} - U'^2_{13} + U'^2_{23})^2} \times \right. \\ \left. \times [2U'_{22}U'_{23}(U'^2_{32} + U'^2_{33}) - U_{32}U_{33}(U'^2_{22} - U'^2_{13} + U'^2_{23})] \right\}^{1/2}; \quad (2)$$

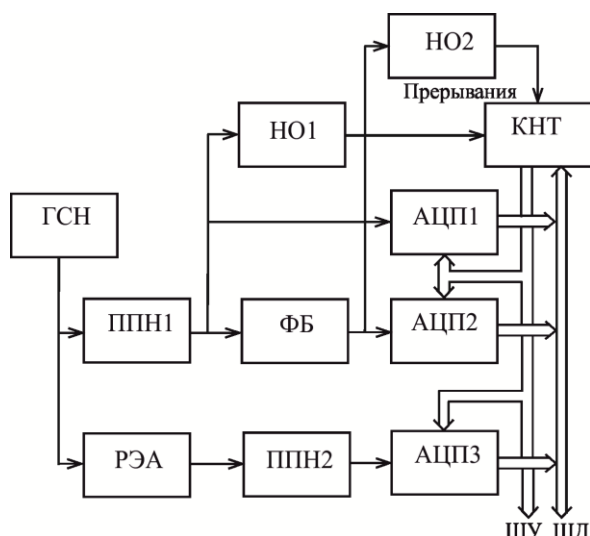
- частота сигнала

$$f = \frac{1}{2\pi\Delta t} \arccos \left| \frac{U'^2_{23} - U'^2_{13} + U'^2_{22}}{2U'_{22}U'_{23}} \right|; \quad (3)$$

- угол сдвига фаз между выходным и входным сигналами

$$\varphi = \arctg \left\{ U_{32} [4U'^2_{22}U'^2_{23} - (U'^2_{22} - U'^2_{13} + U'^2_{23})^2]^{1/2} / \right. \\ \left. / [2U_{33}U'_{22}U'_{23} - U_{32}(U'^2_{22} - U'^2_{13} + U'^2_{23})] \right\}. \quad (4)$$

Схема системы контроля и испытаний РЭА, реализующей данный метод, представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема системы, реализующей метод

В состав системы входят: генератор синусоидального напряжения ГСН, первичные преобразователи напряжения ППН1 и ППН2, нуль-органы НО1 и НО2, фазосдвигающий блок ФБ, аналого-цифровые преобразователи АЦП1 – АЦП3, контроллер КНТ, шины управления ШУ и данных ШД.

Рассматриваемый метод предназначен для определения параметров гармонических сигналов. Если усилительный тракт РЭА вносит нелинейные искажения, то при гармоническом входном сигнале неизбежно возникает погрешность, обусловленная наличием высших гармоник. При этом амплитудное значение входного сигнала и частота в соответствии с выражениями (1) и (3) определяются без методической погрешности.

**Анализ погрешности метода из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели.** Проведем оценку погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели, используя методику оценки погрешности результата измерения параметра как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению реального сигнала от модели [2]. Если абсолютные погрешности аргументов соответствуют наибольшему отклонению модели от реального сигнала, то предельные значения абсолютных погрешностей определения амплитудного значения выходного напряжения и угла сдвига фаз между выходным и входным сигналами в соответствии с (2) и (4) примут вид:

$$\Delta U_m = \left( \left| \frac{\partial U_{m3}}{\partial U_{32}} \right| + \left| \frac{\partial U_{m3}}{\partial U_{33}} \right| \right) \Delta U_{\max} \quad ; \quad (5)$$

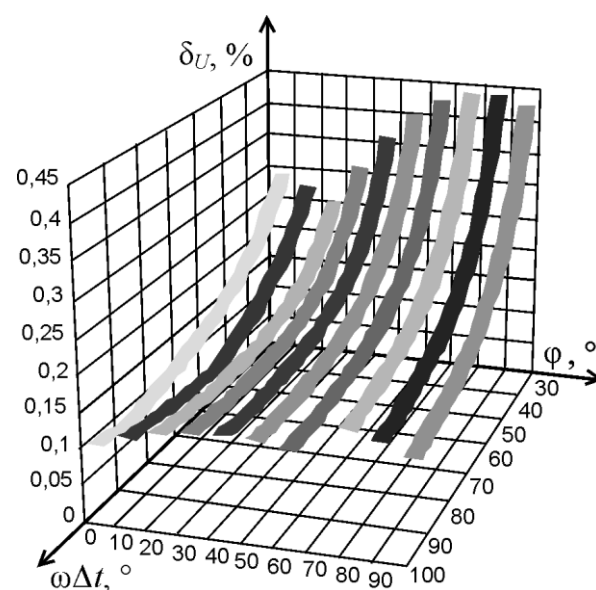
$$\Delta\varphi = \left( \left| \frac{\partial\varphi}{\partial U_{32}} \right| + \left| \frac{\partial\varphi}{\partial U_{33}} \right| \right) \Delta U_{\max} \quad (6)$$

где  $\Delta U_{\max} = U_{m3} \sum_{k=2}^{\infty} h_k$  - предельная абсолютная погрешность аргумента, соответствующая наибольшему отклонению гармонической модели от реального выходного сигнала РЭА;  $h_k = \frac{U_{km}}{U_{m3}}$  - коэффициент  $k$ -той гармоники напряжения.

Используя предельные значения абсолютных погрешностей (5) и (6) и выражения (2) и (4), можно определить относительную погрешность определения амплитудного значения напряжения и приведенную погрешность измерения угла сдвига фаз:

$$\delta_U = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{2\pi \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2 \sin^2 \omega \Delta t}} \times \\ \times [\sin \varphi - \cos(\varphi + \omega \Delta t) \sin \omega \Delta t] + \\ + |\sin(\varphi + \omega \Delta t) + \cos \varphi \sin \omega \Delta t|, \quad (7)$$

$$\gamma_\varphi = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} [|\sin \varphi| + |\sin(\varphi + \omega \Delta t)|]}{2\pi \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2 |\sin \omega \Delta t|}}. \quad (8)$$



**Рис. 3.** Графики зависимости погрешности  $\delta_U$  от  $\omega\Delta t$  и  $\varphi$

Анализ выражений (7) и (8) показывает, что погрешности измерения данных параметров

зависят от спектра сигнала, угла сдвига фаз  $\varphi$  и интервала времени  $\Delta t$ . На рис. 3 и 4 представлены графики зависимости относительной погрешности измерения амплитудного значения выходного напряжения и приведенной к  $360^\circ$  погрешности определения угла сдвига фаз от  $\omega\Delta t$  и  $\varphi$  при наличии в сигнале напряжения 1-ой и 3-ей гармоники с коэффициентом  $h_3=0,1\%$ .

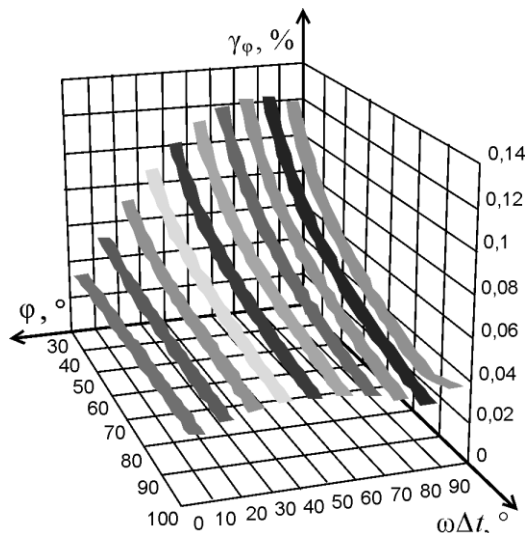


Рис. 4. Графики зависимости погрешности  $\gamma_\varphi$  от  $\omega\Delta t$  и  $\varphi$

Анализ рис. 3 и 4 показывает, что при увеличении интервала времени  $\Delta t$  погрешности измерения амплитуды и угла сдвига фаз снижаются и достигают минимальных значений при  $\omega\Delta t=90^\circ$ , однако это приводит к возрастанию общего времени измерения. Из рис. 3 и 4 также следует, что метод целесообразно использовать при углах сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi$ , близких к нулю.

**Выводы:** разработанный метод измерения параметров гармонических сигналов использует формирование только дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого на произвольный угол относительно входного. Это позволяет исклю-

чить частотную погрешность фазосдвигающих блоков и погрешность из-за отличия углов сдвига фаз в измерительных каналах контроля. Кроме того, за счет коррекции мгновенных значений дополнительного сигнала исключается погрешность по напряжению (погрешность по модулю) ФБ. Проведенный анализ показывает, что наличие в сигналах высших гармоник приводит к существенному увеличению погрешности измерения ПГС. Полученные результаты позволяют подбирать оптимальные параметры измерительного процесса, исходя из требований по точности и времени измерения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-08-00173-а)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Мелентьев, В.С. Метод измерения параметров сигналов для систем контроля и испытаний радиоэлектронной аппаратуры / В.С. Мелентьев, В.В. Муратова, Ю.М. Иванов // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Том 15, № 6(2). С. 417-420.
2. Мелентьев, В.С. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов / В.С. Мелентьев, В.И. Батищев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 240 с.
3. Мелентьев, В.С. Методы измерения интегральных характеристик на основе формирования дополнительных сигналов / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, А.Е. Сеницын // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Технические науки. 2013. № 2 (38). С. 56-63.
4. Мелентьев, В.С. Анализ влияния погрешностей формирования дополнительных сигналов на погрешность измерения интегральных характеристик гармонических сигналов / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, А.Е. Сеницын, В.В. Муратова // Информационные технологии в науке и производстве: Матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. С. 86-90.
5. Мелентьев, В.С. Исследование метода измерения частоты гармонических сигналов / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, А.А. Миронов // Ползуновский вестник. 2013. №2. С. 198-201.

## IMPROVEMENT THE CONTROL METHODS OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT PARAMETERS

© 2014 V.S. Melentyev, V.V. Muratova, Yu.M. Ivanov

Samara State Technical University

In article the new method allowing to determine the parameters of periodic signals in the course of control the amplification paths of radio-electronic equipment and providing considerable reduction of time in measurement is considered. Results of analysis the error of parameters measurement due to deviation of a real signal from harmonic model are given.

Key words: control, amplification path, periodic process, harmonic model, phase shifting unit, highest harmonics, error

Vladimir Melentyev, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department. E-mail: vs\_mel@mail.ru; Vera Muratova, Teacher. E-mail: muratova1991@yandex.ru; Yuriy Ivanov, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow. E-mail: fuego27@rambler.ru