

УДК 621.317

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И ИСПЫТАНИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

© 2016 В.С. Мелентьев, В.В. Муратова, А.С. Пескова

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 26.02.2016

В статье рассматривается новый метод, позволяющий определять параметры периодических сигналов усилительных трактов в процессе контроля и испытаний радиоэлектронной аппаратуры. Метод позволяет начинать измерение в произвольный момент времени. Реализация метода обеспечивает значительное сокращение времени и увеличение точности измерения. Приводятся результаты анализа погрешности измерения параметров из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели. Полученные результаты позволяют выбирать оптимальное соотношение между образцовым интервалом времени и периодом сигнала, исходя из требований по точности и времени измерения.

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

Существуют объекты контроля, представляющие собой многоканальные линейные приемно-усилительные тракты радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). К системам автоматического контроля таких объектов предъявляются повышенные требования по выполнению большого количества контрольных операций в течение ограниченного времени. При этом должна быть обеспечена требуемая достоверность результатов контроля. В настоящее время для такого класса объектов широко используется метод контроля, основанный на одновременном определении параметров сигналов на входе и выходе тракта и их сравнении с помощью двухканальных измерительных систем [1]. Для этого на один из входов измерительной системы и на контролируемый усилительный тракт РЭА обычно подают гармонический сигнал с генератора переменного тока, а на другой вход системы – сигнал с выхода РЭА. При этом одновременно определяют частоту сигнала, амплитудные значения входного и выходного напряжений, а также угол сдвига фаз между ними [2]. В настоящее время широкое распространение получили методы и средства измерения параметров гармонических сигналов (ПГС) по их отдельным мгновенным значениям, не связанным с периодом входного сигнала. Это приводит к тому, что общее время определения параметров может быть значительно меньше длительности периода [3]. Возможны 2 основных способа разделения мгновенных значений: во времени и в пространстве. Второй способ требует формирования дополнительных сигналов, сдвинутых по фазе относительно входных, и обеспечивает в общем случае сокращение времени измерения. Одним из основных факторов, ограничивающих точность средств измерений, использующих формирование дополнительных сигналов, является погрешность по напряжению (погрешность по модулю) фазосдвигающих блоков. Наличие данного вида погрешности приводит к различию амплитуд входного и дополнительного сигналов [4].

В статье рассматривается новый метод, использующий разделение мгновенных значений во времени

и обеспечивающий повышение точности измерения ПГС за счет исключения данного вида погрешности. Кроме того, реализация метода сокращает общее время определения параметров, поскольку позволяет начинать процесс измерения в произвольный момент времени.

Метод измерения параметров с временным разделением мгновенных значений сигналов заключается в том, что на вход системы и на контролируемый усилительный тракт РЭА подают гармонический сигнал; в произвольный момент времени одновременно измеряют мгновенные значения входного напряжения и выходного напряжения, поступающего с выхода усилительного тракта; через образцовый интервал времени Δt одновременно измеряют мгновенные значения входного и выходного напряжений; через такой же интервал времени снова одновременно измеряют мгновенные значения входного и выходного сигналов. Частоту, амплитудные значения входного и выходного сигналов, а также угол сдвига фаз между ними определяют по измеренным значениям. Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 1.

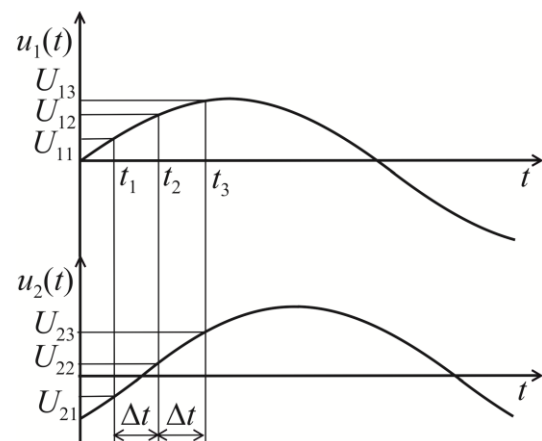


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Входное напряжение и напряжение на выходе РЭА, имеющие гармонические модели, соответствуют следующим выражениям:

$$u_1(t) = U_{m1} \sin \omega t ; u_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \varphi),$$

Мелентьев Владимир Сергеевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой. E-mail: vs_mel@mail.ru
 Муратова Вера Владимировна, преподаватель. E-mail: muratova1991@yandex.ru
 Пескова Анастасия Сергеевна, аспирантка. E-mail: kalaschnikova_90@mail.ru

где U_{m1} и U_{m2} – амплитудные значения входного напряжения и выходного напряжения усилительного тракта; ω – угловая частота входного сигнала; φ – угол сдвига фаз между выходным и входным сигналами усилительного тракта.

В произвольный момент времени t_1 мгновенные значения сигналов на входе и выходе РЭА примут вид:

$$U_{11} = U_{m1} \sin \alpha_1; U_{21} = U_{m2} \sin \alpha_2,$$

где α_1 и α_2 – начальные фазы сигналов в момент времени t_1 .

Через образцовый интервал времени Δt (в момент времени t_2) мгновенные значения напряжений будут соответствовать:

$$U_{12} = U_{m1} \sin(\alpha_1 + \omega \Delta t); \\ U_{22} = U_{m2} \sin(\alpha_2 + \omega \Delta t).$$

Через интервал времени Δt (в момент времени t_3) мгновенные значения сигналов будут равны:

$$U_{13} = U_{m1} \sin(\alpha_1 + 2\omega \Delta t); \\ U_{23} = U_{m2} \sin(\alpha_2 + 2\omega \Delta t).$$

Используя мгновенные значения сигналов, после преобразований можно получить следующие выражения:

$$\cos \alpha_1 = \frac{2U_{12}^2 - U_{13}U_{11} - U_{11}^2}{2U_{12}\sqrt{U_{12}^2 - U_{13}U_{11}}}; \quad (1)$$

$$\sin \alpha_1 = \sqrt{1 - \frac{(2U_{12}^2 - U_{13}U_{11} - U_{11}^2)^2}{4U_{12}^2(U_{12}^2 - U_{13}U_{11})}}; \quad (2)$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{2U_{22}^2 - U_{23}U_{21} - U_{21}^2}{2U_{22}\sqrt{U_{22}^2 - U_{23}U_{21}}}; \quad (3)$$

$$\sin \alpha_2 = \sqrt{1 - \frac{(2U_{22}^2 - U_{23}U_{21} - U_{21}^2)^2}{4U_{22}^2(U_{22}^2 - U_{23}U_{21})}}; \quad (4)$$

$$\cos \omega \Delta t = \frac{U_{13} + U_{11}}{2U_{12}}. \quad (5)$$

Из выражений (2) и (4) можно определить амплитудные значения сигналов на входе и выходе усилительного тракта РЭА:

$$U_{m1} = \frac{|U_{11}|}{\sin \alpha_1}; \quad (6)$$

$$U_{m2} = \frac{|U_{21}|}{\sin \alpha_2}. \quad (7)$$

Из выражения (5) следует, что частота входного сигнала равна:

$$f = \frac{1}{2\pi \Delta t} \arccos\left(\frac{U_{13} + U_{11}}{2U_{12}}\right). \quad (8)$$

Угол сдвига фаз между выходным и входным сигналами φ можно определить, используя выражения (1) и (3)

$$\varphi = \alpha_2 - \alpha_1 = \arccos(\cos \alpha_2) - \arccos(\cos \alpha_1). \quad (9)$$

В рассматриваемом методе время измерения не зависит от момента начала измерения, угла сдвига фаз между входным и выходным напряжениями и периода сигнала, а определяется в основном длительностью

временного интервала Δt . Анализ (1) – (5) показывает, что знаменатели данных выражений обращаются в ноль или принимают некорректные значения, если $U_{12} = U_{m1} \sin(\alpha_1 + \omega \Delta t) = 0$ и (или) $U_{22} = U_{m2} \sin(\alpha_2 + \omega \Delta t) = 0$. Для того, чтобы устранить возможность деления на ноль, необходимо проводить анализ мгновенных значений U_{12} и U_{22} и, если хотя бы одно из них равно нулю, следует измерять четвертые мгновенные значения напряжений U_{14} и U_{24} через временной интервал $\Delta t = t_4 - t_3$ (рис. 2). Если, например, $U_{12} = 0$, а $U_{22} \neq 0$, то выражения (1), (2) и (5) преобразуются к виду:

$$\cos \alpha_1 = \frac{2U_{13}^2 - U_{14}U_{11} - U_{11}^2}{2U_{13}\sqrt{U_{13}^2 - U_{14}U_{11}}}; \\ \sin \alpha_1 = \sqrt{1 - \frac{(2U_{13}^2 - U_{14}U_{11} - U_{11}^2)^2}{4U_{13}^2(U_{13}^2 - U_{14}U_{11})}}; \\ \cos \omega \Delta t = \frac{U_{14} + U_{11}}{2U_{13}}.$$

Выражения (3) и (4) остаются без изменения.

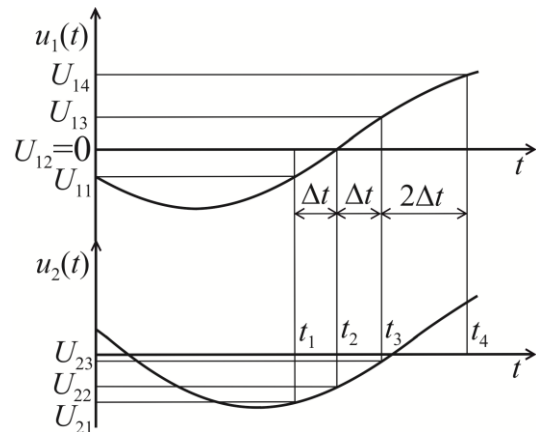


Рис. 2. Временные диаграммы при $U_{12}=0$ и $U_{22} \neq 0$

Из выражений (6) и (7) следует, что для того, чтобы устранить некорректные результаты, необходимо проводить анализ мгновенных значений U_{11} и U_{21} и, если хотя бы одно из них равно нулю, следует измерять четвертые мгновенные значения напряжений U_{14} и U_{24} через временной интервал $\Delta t = t_4 - t_3$ (рис. 3).

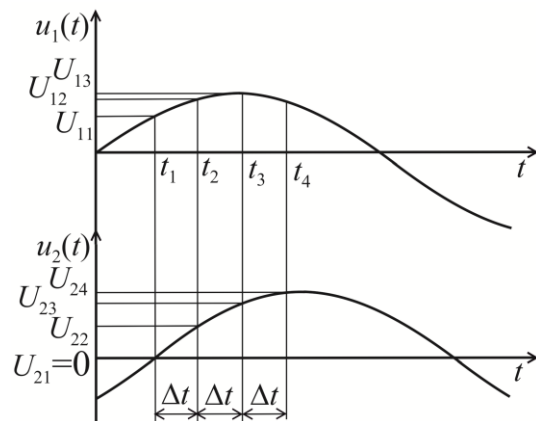


Рис. 3. Временные диаграммы при $U_{21}=0$ и $U_{11} \neq 0$

Если, например, $U_{21}=0$, а $U_{11} \neq 0$, то выражения (3), (4) и (7) преобразуются к виду:

$$\cos \alpha_2 = \frac{2U_{23}^2 - U_{24}U_{22} - U_{22}^2}{2U_{23}\sqrt{U_{23}^2 - U_{24}U_{22}}};$$

$$\sin \alpha_2 = \sqrt{1 - \frac{(2U_{23}^2 - U_{24}U_{22} - U_{22}^2)^2}{4U_{23}^2(U_{23}^2 - U_{24}U_{22})}};$$

$$U_{m2} = \frac{|U_{22}|}{\sin \alpha_2}.$$

Выражения (1), (2) и (5) остаются без изменения. Схема системы контроля и испытаний РЭА, реализующей данный метод, представлена на рис. 4. В состав системы входят: генератор синусоидального напряжения ГСН, первичные преобразователи напряжения ППН1 и ППН2, аналого-цифровые преобразователи АЦП1 и АЦП2, контроллер КНТ, шины управления ШУ и данных ШД.

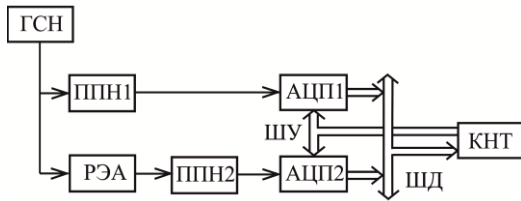


Рис. 4. Схема системы, реализующей метод

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 и частота входного сигнала в соответствии с выражениями (6) и (8) 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 [5]. Пусть предельные абсолютные погрешности аргументов соответствуют наибольшему отклонению моделей от реальных сигналов

$$\Delta U_{\max} = \sup \left| \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \sin(k\omega t + k\alpha_2 + \psi_{1uk}) - U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_2) \right|, \quad (10)$$

где ψ_{1uk} – угол сдвига фазы k -той гармоники напряжения относительно первой; U_{km} – амплитудное значение k -той гармонической составляющей выходного напряжения; U_{1m} – амплитуда первой гармоники выходного напряжения.

Если параметры первой гармоники реального сигнала совпадают с параметрами сигнала, соответствующего гармонической модели, то (10) примет вид

$$\Delta U_{\max} = \sup \left| U_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \sin(k\omega t + k\alpha_2 + \psi_{1uk}) \right|, \quad (11)$$

Выражение (11) принимает максимальное значение $U_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}$, если $|\sin(k\omega t + k\alpha_2 + \psi_{1uk})| = 1$, т.е. при

$\psi_{1uk} = \frac{\pi}{2}(2q+1) - k\alpha_2$, где $h_{uk} = \frac{U_{km}}{U_{1m}}$ – коэффициент k -той гармонической составляющей напряжения; $q = 0; 1$. Предельное значение абсолютной погрешности определения амплитуды сигнала в соответствии с (4) и (7) будет равно

$$\Delta U_{m2} = \left[\left| \frac{\partial U_{m2}}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial U_{m2}}{\partial U_{22}} \right| + \left| \frac{\partial U_{m2}}{\partial U_{23}} \right| \right] \Delta U_{\max}. \quad (12)$$

Частные производные в выражении (12) с учетом (4), (7) и (11) приводятся к следующему виду:

$$\frac{\partial U_{m2}}{\partial U_{21}} = \frac{\text{ctg} \alpha_2}{2 \sin \omega \Delta t} \left[\frac{\text{ctg} \alpha_2 \sin(\alpha_2 + 2\omega \Delta t)}{\sin \omega \Delta t} - \frac{\sin(\alpha_2 + 2\omega \Delta t) + 2 \sin \alpha_2}{\sin \alpha_2 \sin(\alpha_2 + \omega \Delta t)} \right] + \frac{1}{\sin \alpha_2};$$

$$\frac{\partial U_{m2}}{\partial U_{22}} = \frac{\text{ctg} \alpha_2}{\sin \alpha_2} \left[\frac{2}{\sin \omega \Delta t} - \frac{\cos \alpha_2}{\sin(\alpha_2 + \omega \Delta t)} - \frac{\cos \alpha_2 \sin(\alpha_2 + \omega \Delta t)}{\sin^2 \omega \Delta t} \right];$$

$$\frac{\partial U_{m2}}{\partial U_{23}} = \frac{1}{2 \sin \alpha_2 \sin \omega \Delta t} \times \left[\frac{\cos \alpha_2}{\sin \omega \Delta t} - \frac{1}{\sin(\alpha_2 + \omega \Delta t)} \right].$$

В общем случае относительная погрешность измерения амплитуды выходного напряжения будет равна

$$\delta_U = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2}} \left[\left| \frac{\partial U_{m2}}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial U_{m2}}{\partial U_{22}} \right| + \left| \frac{\partial U_{m2}}{\partial U_{23}} \right| \right]. \quad (13)$$

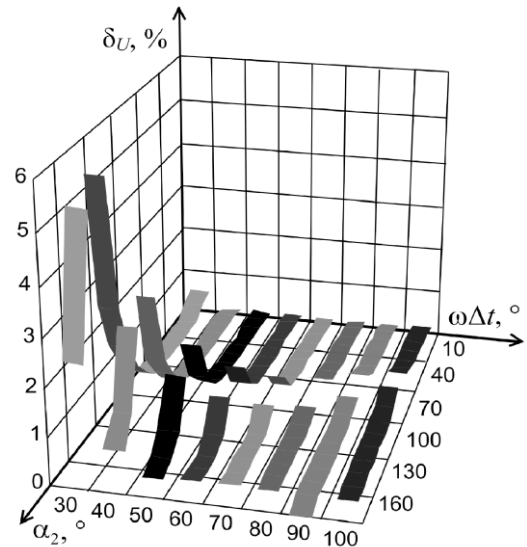


Рис. 5. Графики зависимости погрешности δ_U от α_2 и $\omega \Delta t$

На рис. 5 представлены графики зависимости погрешности δ_U от начальной фазы сигнала α_2 и $\omega \Delta t$ в соответствии с (13) при наличии в сигнале 1-й и 3-й гармоник для $h_{u3} = 0,1\%$.

Если абсолютные погрешности аргументов соответствуют наибольшему отклонению модели от реального сигнала, то предельное значение абсолют-

ной погрешности определения угла сдвига фазы между сигналами на входе и выходе РЭА в соответствии с (3) и (9) примет вид:

$$\Delta\varphi = \left[\left| \frac{\partial\varphi}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial\varphi}{\partial U_{22}} \right| + \left| \frac{\partial\varphi}{\partial U_{23}} \right| \right] \Delta U_{\max}. \quad (14)$$

Частные производные в выражении (14) с учетом (3), (9) и (11) приводятся к следующему виду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial\varphi}{\partial U_{21}} &= \frac{0,5[\sin 2\omega\Delta t - \sin(2\alpha_2 + 2\omega\Delta t)]}{\sin \omega\Delta t} + \\ &+ \frac{\sin \alpha_2}{\sin \omega\Delta t \sin(\alpha_2 + \omega\Delta t)}; \\ \frac{\partial\varphi}{\partial U_{22}} &= \frac{4}{\sin \omega\Delta t} - \frac{2 \cos \alpha_2}{\sin(\alpha_2 + \omega\Delta t)} - \\ &- \frac{2 \cos \alpha_2 \sin(\alpha_2 + \omega\Delta t)}{\sin^2 \omega\Delta t}; \\ \frac{\partial\varphi}{\partial U_{23}} &= \frac{\sin^2 \alpha_2 \cos(\alpha_2 + \omega\Delta t)}{\sin(\alpha_2 + \omega\Delta t) \sin^2 \omega\Delta t}. \end{aligned}$$

В общем случае приведенная погрешность измерения фазы между входным и выходным напряжениями будет равна

$$\gamma_{\varphi} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{2} \left[\left| \frac{\partial\varphi}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial\varphi}{\partial U_{22}} \right| + \left| \frac{\partial\varphi}{\partial U_{23}} \right| \right]. \quad (15)$$

На рис. 6 представлены графики зависимости погрешности γ_{φ} от начальной фазы сигнала α_2 и $\omega\Delta t$ в соответствии с (15) при наличии в сигнале 1-й и 3-й гармоник для $h_{u3} = 0,1\%$.

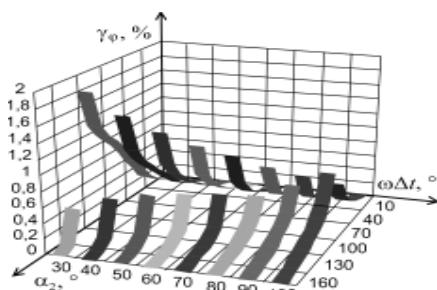


Рис. 6. Графики зависимости погрешности γ_{φ} от α_2 и $\omega\Delta t$

Анализ рис. 5 и 6 показывает, что при увеличении образцового интервала времени Δt по сравнению с периодом сигнала погрешности измерения амплитуды

и угла сдвига фазы снижаются и достигают минимальных значений при $\omega\Delta t = 90^\circ$, однако это приводит к возрастанию общего времени измерения. При дальнейшем увеличении угла сдвига $\omega\Delta t$ погрешности снова возрастают. Разрывы графиков обусловлены значениями начальной фазы α_2 и $\omega\Delta t$, при которых знаменатели в соответствующих выражениях обращаются в ноль.

Выводы: разработанный метод определения параметров гармонических сигналов не использует дополнительные сигналы, что позволяет повысить точность измерения. В рассматриваемом методе время измерения не зависит от момента начала измерения, угла сдвига фаз между входным и выходным напряжениями и периода сигнала, а определяется в основном длительностью временного интервала Δt . Проведенный анализ показывает, что наличие в сигналах высших гармоник приводит к существенному увеличению погрешности измерения ПГС. Полученные результаты позволяют подбирать оптимальное соотношение между образцовым интервалом времени Δt и периодом сигнала исходя из требований по точности и времени измерения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-08-00252 А)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Мелентьев, В.С. Метод автоматического контроля параметров радиоэлектронной аппаратуры в процессе производства / В.С. Мелентьев, В.В. Муратова, Ю.М. Иванов // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Том 17, № 2(4). С. 822-826.
2. 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.
3. Мелентьев, В.С. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов / В.С. Мелентьев, В.И. Батищев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 240 с.
4. Мелентьев, В.С. Исследование погрешности формирования дополнительных сигналов при измерении параметров гармонических сигналов / В.С. Мелентьев, Е.В. Павленко, А.С. Пескова // Современные тенденции развития науки и технологий: Сборник научных трудов по матер. V Междунар. науч.-практ. конф. – Белгород, 2015. Ч. 2. С. 49-51.
5. Мелентьев, В.С. Анализ методов измерения параметров периодических процессов / В.С. Мелентьев, Д.В. Рудаков, А.В. Симонов // Татищевские чтения: Актуальные проблемы науки и практики: Матер. IX междунар. науч.-практ. конф. – Тольятти: Волжский ун-т им. В.Н. Татищева, 2012. С. 167-173.

IMPROVEMENT THE METHODS OF MEASUREMENT THE SIGNALS PARAMETERS FOR CONTROL AND TEST SYSTEMS OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT

© 2016 V.S. Melentyev, V.V. Muratova, A.S. Peskova
Samara State Technical University

In article the new method allowing to determine the parameters of amplifying paths periodic signals in the course of control and testing the radio-electronic equipment is considered. The method allows to start the measurement in any timepoint. Realization of method provides considerable reduction of time and increase in accuracy of measurement. Results of the analysis of measurement error of parameters because of deviation of a real signal from harmonious model are given. The received results allow to select an optimum ratio between a model interval of time and the period of a signal, proceeding from requirements for accuracy and time of measurement.

Key words: control, amplifying path, periodic process, harmonious model, highest harmonicas, error