

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-235-245>

УДК 629.7

Учет инструментальных погрешностей при контроле обмоток электрических машин с использованием квазипериодических тестовых сигналов

А. А. Шейников¹⁾, Ю. В. Суходолов²⁾, В. В. Зеленко²⁾

¹⁾Военная академия Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Решение задач диагностирования обмоток электрических машин связано с необходимостью селекции квазипериодических тестовых сигналов на фоне шумов. Для выделения полезных сигналов, как правило, используют различия спектральных составов сигналов и шумов. В идеальном случае форма частотной характеристики оптимального фильтра должна совпадать с формой спектра полезного сигнала, что определяет сложность выполнения такого фильтра. Цель исследований – увеличение точности измерений и упрощение алгоритмического обеспечения измерительных систем за счет разработки математического аппарата, позволяющего однозначно определять и учитывать при обработке погрешности, обусловленные конечностью интервалов измерений. В условиях постоянного роста вычислительных возможностей средств измерений резервом повышения чувствительности методов обработки квазипериодических сигналов представляется установление однозначной зависимости между локальными вариациями временных параметров сигнала и изменениями параметров его спектра. Вариации значений параметров сигналов приводят к нарушению исходного распределения гармонических составляющих, при котором одни из них подвергаются наибольшему изменению, а другие – наименьшим. Точность измерений предлагается увеличить за счет замены малочувствительной регистрации изменений временных параметров сигналов, регистрацией изменений параметров характерных гармонических составляющих спектра, обладающих максимальной чувствительностью к отклонениям контролируемого параметра и минимальной чувствительностью к отклонениям, обусловленным нестабильностью работы измерительной аппаратуры. Разработан соответствующий практике математический аппарат, позволяющий однозначно определять погрешности, обусловленные конечностью интервалов измерений квазипериодических сигналов. Автоматический учет этих погрешностей позволяет обойтись без сложной корреляционной обработки квазипериодических сигналов, требующей больших вычислительных ресурсов (время и скорость обработки данных, объем оперативной памяти), и обеспечить точность измерений.

Ключевые слова: диагностика обмоток, электрические машины, квазипериодический измерительный сигнал, гармонические составляющие спектра, спектральная плотность, базис разложения

Для цитирования: Шейников, А. А. Учет инструментальных погрешностей при контроле обмоток электрических машин с использованием квазипериодических тестовых сигналов / А. А. Шейников, Ю. В. Суходолов, В. В. Зеленко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 3. С. 235–245. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-235-245>

Адрес для переписки

Суходолов Юрий Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-71-93
suhodolov@bntu.by

Address for correspondence

Suchodolov Yurii V.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-71-93
suhodolov@bntu.by

Accounting of Instrumental Errors in the Control of Windings of Electrical Machines with the Use of Quasi-Periodic Test Signals

A. A. Sheinikov¹⁾, Yu. V. Suchodolov²⁾, V. V. Zelenko²⁾

¹⁾Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The solution of problems of diagnostics of windings of electric machines is associated with the necessity of selection of quasi-periodic test signals against the background noise. In order to highlight useful signals, as a rule, the differences in spectral compositions of signals and noises are used. Ideally, the shape of the optimal filter frequency response should coincide with the shape of the spectrum of the useful signal, which determines the complexity of such a filter. The aim of the research is to increase the accuracy of measurements and simplify the algorithmic support of measuring systems by developing a mathematical tool that makes it possible to uniquely identify and take into account errors caused by the finiteness of the measurement intervals in the processing. Determining a one-to-one relationship between local variations of signal time parameters and alterations in its spectrum parameters is believed to be the reserve of increase of sensitivity of methods of processing of quasi-periodic signals in the conditions of constant growth of computing capabilities of measuring instruments. Variations in the values of the parameters of the signals lead to a violation of the original distribution of the harmonic components, some of the latter being subjected to the greatest alterations changes, and the some other – to the smallest ones. It is proposed to increase the accuracy of measurements due to the replacement the low-sensitivity registration of alterations in the time parameters of signals with the registration of alterations in the parameters of the characteristic harmonic components of the spectrum, which have a maximum sensitivity to deviations of the controlled parameter and a minimum sensitivity to deviations caused by the instability of the measuring equipment. The mathematical tool corresponding to the practice has been developed, that makes it possible to determine unambiguously the errors caused by finiteness of measurement intervals of quasi-periodic signals. Automatic accounting of these errors makes it possible to do without complex correlation processing of quasi-periodic signals that require large computing resources (time and speed of data processing, the amount of RAM) and to ensure the accuracy of measurements.

Keywords: diagnostics of windings, electrical machines, quasi-periodic measuring signal, harmonic components of the spectrum, spectral density, decomposition basis

For citation: Sheinikov A. A., Suchodolov Yu. V., Zelenko V. V. (2018) Accounting of Instrumental Errors in the Control of Windings of Electrical Machines with the Use of Quasi-Periodic Test Signals. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (3), 235–245. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-235-245> (in Russian)

Введение

Носителями информации о значениях физических величин в рамках измерительной системы являются измерительные сигналы. Эта информация может заключаться в совокупности отдельных мгновенных значений основного параметра сигнала, в статистических параметрах, если сигнал случаен и т. д. В импульсных измерительных системах, таких как системы тестового диагностирования обмоток электрических машин, наиболее часто используются частотные параметры сигнала. При этом для анализа и синтеза измерительных сигналов применяется спектральный метод.

Из теории преобразования Фурье следует, что отображение сигнала в частотной области справедливо для стационарного сигнала, т. е. для сигнала, который полностью определен на интервале ортогональности, и не зависит от выбранного номера этого интервала на временной оси. Считается, что спектральная характеристика такого сигнала не является функцией времени и спектр – это множество фиксированных значений амплитуд и начальных фаз гармонических колебаний, составляющих временную функцию. На практике спектральный анализ применяется, во-первых, на конечном интервале времени [1] и, во-вторых, связан с квазистационарными измерительными сигналами или сигналами с динамическими параметрами [2].

Математическим инструментом, имеющим преимущество перед преобразованием Фурье (в том числе и перед оконным преобразованием Фурье) при анализе реальных (конечных и нестационарных) сигналов, является вейвлет-преобразование [3], однако теория этого преобразования также содержит некоторые упрощения, обуславливающие неполное соответствие практике. Так, при вейвлет-преобразовании, равно как и при оконном преобразовании Фурье, для разложения квазипериодических сигналов используются ортогональные базисные системы, являющиеся математическими абстракциями. Динамика параметров тестовых сигналов в системах диагностики обмоток электрических машин обусловлена, прежде всего, нестабильностью функционирования элементов измерительных контуров [4]. Она проявляется в нарушении периодичности и локальных вариациях одного или нескольких участков измерительного сигнала с течением времени. При разработке алгоритмов автоматического подавления «шумов», обусловленных динамикой параметров сигналов, необходимое условие – установление однозначной зависимости между локальными вариациями сигнала и изменениями значений компонентов его спектра.

Анализ путей решения задачи

В процессе исследований было установлено, что вариации значений параметров сигналов приводят к нарушению исходного распределения гармонических спектральных составляющих, при котором одни из них подвергаются наибольшему изменению, а другие – наименьшему [5]. При этом увеличение точности измерений предлагается обеспечить за счет замены малочувствительной регистрации изменений временных параметров сигналов, регистрацией изменений параметров характерных гармонических составляющих спектра, обладающих максимальной чувствительностью к отклонениям измеряемого параметра и минимальной чувствительностью к отклонениям, обусловленным нестабильностью функционирования элементов измерительных контуров. Целесообразным при этом является применение математического аппарата, обеспечивающего работу с дискретным спектром сигнала. Так, регулируя амплитуду, период следования, длительность импульсов и время задержки, можно математически обоснованно управлять параметрами спектра (перемещать положение нулей амплитудного спектра, изменять амплитуду и чувствительность характерных

спектральных составляющих) [6]. Знание номеров характерных гармонических составляющих позволит «отстроится» от помех, обусловленных нестабильностью функционирования элементов измерительных контуров. Определение номеров гармонических составляющих, обладающих минимальной чувствительностью к нестабильности параметров измерительного сигнала, предусматривает исследование динамических особенностей его спектра путем анализа частных производных выражений для расчета амплитуд характерных гармоник [5].

Учитывая, что спектральный анализ в реальности может применяться только на конечных интервалах времени, требуется разработка математического аппарата, обеспечивающего единый подход к описанию спектров периодических и непериодических сигналов (спектров квазипериодических сигналов). Таким образом, целью исследований являются увеличение точности и обеспечение автоматизации измерений за счет замены малочувствительной регистрации изменений временных параметров сигналов, регистрации изменений параметров характерных гармонических составляющих спектра, обладающих максимальной чувствительностью к отклонениям контролируемого параметра и минимальной чувствительностью к отклонениям, обусловленным нестабильностью работы измерительной аппаратуры. Кроме того, точность измерений планировалось увеличить за счет разработки математического аппарата, учитывающего погрешности, обусловленные конечностью интервалов времени измерений.

Квазипериодические сигналы – самый распространенный вид сигналов, использующихся в практике измерений, в том числе в системах тестовой диагностики обмоток электрических машин. Они занимают промежуточное положение между непериодическими и периодическими сигналами и отражают процесс преобразования спектральной плотности в дискретный спектр. Отличительной особенностью квазипериодических сигналов является их ограниченность во времени. Разный подход к описанию спектров периодического и непериодического сигналов создает определенные трудности при рассмотрении квазипериодических сигналов. Моделирование процесса формирования дискретного спектра из спектральной плотности предусматривает общее описание обоих типов спектров. Один из путей достижения поставленной цели – рассмотрение процесса формирования дискретного спектра из спектральной плотности при периодизации сигнала. При этом существует несколько подходов к представлению этого процесса. Так, из теоремы Котельникова [7] известно, что спектр непериодического сигнала можно получить, умножая спектр периодического сигнала на прямоугольную функцию в частотной области. Однако практически реализовать точное преобразование спектральной плотности в дискретный спектр с помощью ряда Котельникова невозможно. Дело в том, что сигнал с ограниченным спектром – это сигнал, длящийся бесконечно долго. При дискретизации такого сигнала будет получено бесконечное число отсчетов. Для восстановления исходного непрерывного сигнала, а значит, и для получения дискретного спектра этого сигнала необходимо учесть все отсчеты сигнала, что невозможно ввиду неограниченной его длительности.

Второй подход к решению поставленной задачи заключается в получении периодической последовательности импульсов, представляющей собой сумму одиночных сигналов, одинаково задержанных во времени относительно друг друга [8]. Однако рассмотрение реального сигнала как периодического приведет к ненормируемой погрешности из-за конечности длительности измерительных процессов. Соответственно необходимым является определение влияния погрешности формирования дискретного спектра в зависимости от числа повторений N при периодизации. При периодизации с увеличением числа импульсов в спектральной плотности сигнала образуется все больше нулей [8]. Поскольку каждый ноль спектральной плотности находится на строго определенной частоте, он является спектральной составляющей дискретного спектра, а сам спектр квазипериодического сигнала можно считать комбинированным, т. е. состоящим из участков спектральной плотности, разделенных спектральными составляющими с нулевой амплитудой. При увеличении числа нулей уменьшается расстояние между ними и повышается спектральная плотность в области частот, кратных частоте периодизации, т. е. формируются составляющие будущего дискретного спектра. Таким образом, при периодизации происходит процесс перерождения спектральной плотности в дискретный спектр.

Представим анализируемый сложный сигнал в виде линейной комбинации заданных функций, ограниченных по времени длительностью рассматриваемого сигнала. Известно, что наиболее удобное и имеющее физический смысл – это разложение сигнала в ряд Фурье [9] по гармоническим составляющим бесконечной длительности. Однако следует учесть, что бесконечный гармонический сигнал является математической абстракцией и не может отражать реальный процесс. В частности, такой сигнал нельзя использовать для разложения ограниченного во времени квазипериодического сигнала. При выборе базиса разложения целесообразным представляется максимальное использование преимуществ гармонического сигнала (простое математическое описание; инвариантность к линейным преобразованиям; отработанная техника генерирования гармонических функций [9]) с учетом ограничений, накладываемых практикой. Решение, одновременно удовлетворяющее обоим требованиям, – применение в качестве базиса гармонических сигналов, ограниченных во времени, часто встречающихся в реальных процессах, например, радиоимпульсов. При этом придется отказаться от спектрального метода анализа сигналов в его обычном представлении. Разложение сигнала будет производиться на радиоимпульсы с различной несущей частотой. Причем несущая частота отдельного радиоимпульса будет соответствовать частоте отдельной гармоники спектра периодического (бесконечного во времени) сигнала, разложенного в ряд Фурье. Такое разложение для удобства предлагается назвать квастром (рис. 1).

Следует заметить, что отдельная составляющая квастра имеет физический смысл, так как является радиоимпульсом, параметры которого можно измерить. Сам же квастр при этом отражает реальный процесс и соответствует практике. В связи с тем, что составляющие квастра (радиоимпульсы) не являются периодическими функциями, в частотной области они описываются спектральной плотностью. Причем спектральная плотность

каждой составляющей квастра, так же как и спектральная плотность остальных составляющих, распределена по всему диапазону частот. Кроме того, значение спектральной плотности сигнала суммы всех радиоимпульсов на определенной частоте можно рассчитать, поскольку параметры каждого радиоимпульса известны.

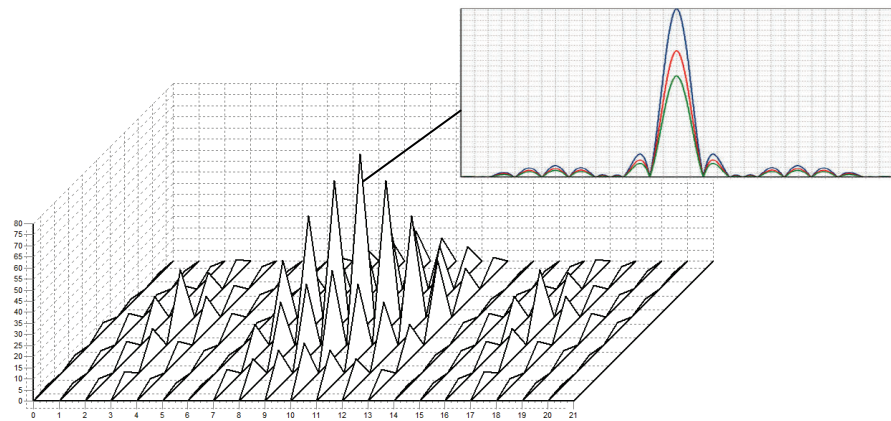


Рис. 1. Квастр измерительного сигнала

Fig. 1. Measuring signal kvastr

Таким образом, выигрыш при переходе от спектра к квастру связан с появляющейся возможностью расчета, а значит, и возможностью локализации погрешностей, обусловленных особенностями функционирования отдельных элементов измерительных контуров. Например, в практике измерений достаточно широкий класс представляют квазипериодические сигналы с нарушениями периодичности, обусловленными локальными вариациями одного или нескольких участков с течением времени. Появившаяся возможность установления однозначной зависимости между локальными вариациями сигнала и изменениями компонентов спектра позволит разработать алгоритмы автоматического подавления «шумов», обусловленных нестабильностью работы элементов измерительного контура.

Разработка математического аппарата анализа квазипериодических измерительных сигналов в частотной области

Рассмотрим процесс разложения сигнала в квастр более подробно. Ограниченный во времени (существующий во временном интервале $[t_1, t_2]$) квазипериодический сигнал $S(t_1, t_2)$ можно записать как сумму составляющих квастра, ограниченных во времени $\varphi_k(t_1, t_2)$, которые представляют собой непериодические сигналы – радиоимпульсы, описываемые в частотной области спектральной плотностью:

$$S(t_1, t_2) = \sum_{k=0}^K C_k \varphi_k(t_1, t_2), \tag{1}$$

где C_k – коэффициент разложения, определяющий спектр квазипериодического сигнала.

Разложение единичного разнополярного прямоугольного импульса на ограниченные во времени составляющие спектра – радиоимпульсы показано, например, на рис. 2.

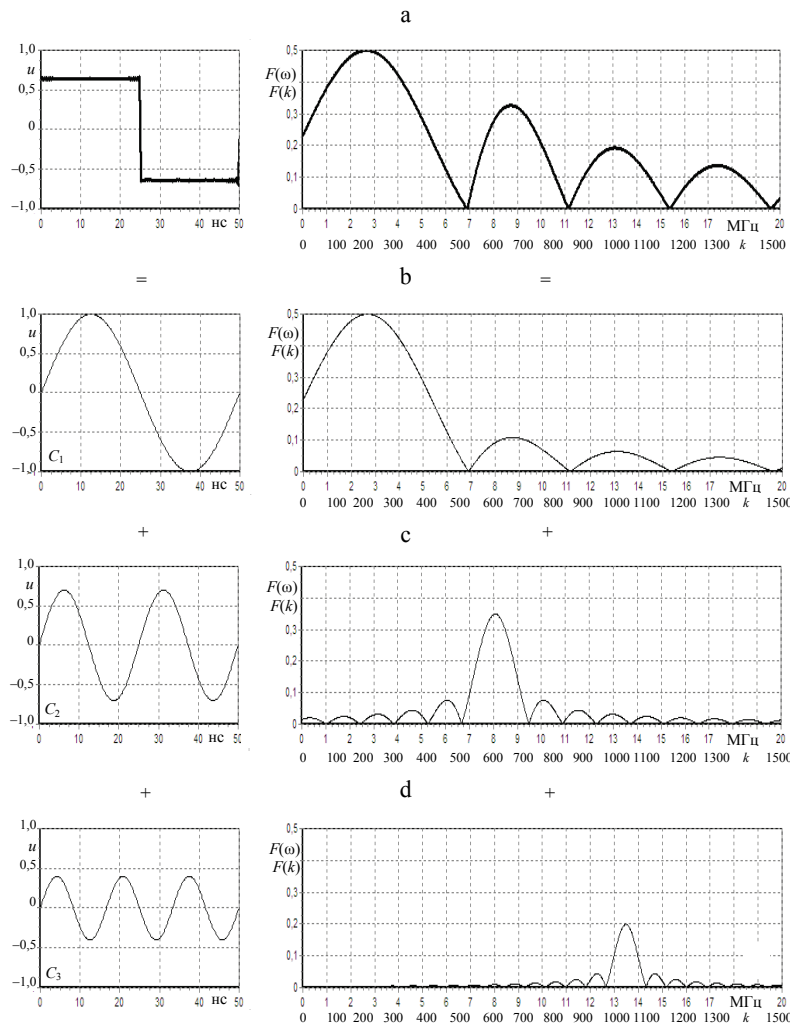


Рис. 2. Представление спектральной плотности ограниченного непериодического сигнала суммой спектральных плотностей одиночных радиоимпульсов той же длительности с изменяющейся несущей частотой: а – разнополярный прямоугольный импульс и его спектральная плотность; б, с, д – радиоимпульсы с различной несущей частотой и их спектральные плотности

Fig. 2. Representation of the spectral density of a bounded non-periodic signal by the sum of the spectral densities of single radio pulses of the same duration with varying carrier frequency: а – a multi-polar rectangular pulse and its spectral density; б, с, д – radio pulses with different carrier frequency and their spectral densities

Для аналитического описания спектральной плотности квазипериодического сигнала через сумму спектральных плотностей одиночных радиоимпульсов рассмотрим последние более подробно.

Спектральная плотность одиночного радиоимпульса (отрезка синусоиды) рассчитывается по формуле

$$S_1(\omega) = \frac{2E\omega}{|\omega^2 - \omega_0^2|} \left| \sin\left(\frac{n\pi\omega}{\omega_0}\right) \right|, \quad (2)$$

где E – амплитуда радиоимпульса; ω , ω_0 – текущая и несущая частота; n – количество периодов гармонического колебания (определяет длительность радиоимпульса).

При периодизации сигналов, а вместе с ними и составляющих их радиоимпульсов следует учитывать, что их последовательность является частным случаем амплитудно-модулированных сигналов. Соответственно последовательность из нескольких радиоимпульсов можно рассматривать как один амплитудно-модулированный сигнал, удлиняющийся с прибавлением очередного радиоимпульса на его длительность.

Амплитудно-частотный спектр сигнала из двух радиоимпульсов, задержанных по времени на t_3 [8], представлен на рис. 3.

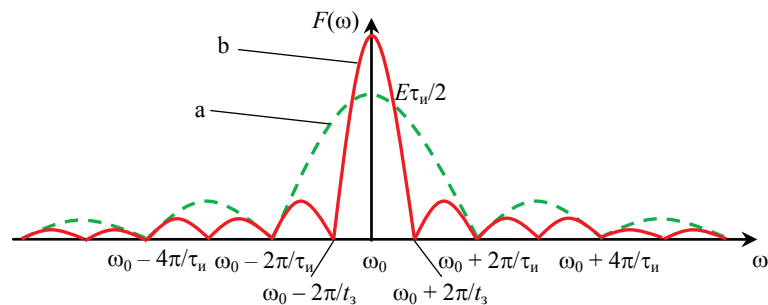


Рис. 3. Спектральные плотности: а – одиночного радиоимпульса; б – сигнала из двух радиоимпульсов

Fig. 3. Spectral densities: a – of a single radio pulse; b – of a signal of two radio pulses

Из рис. 3 видно, что при периодизации сигнала кроме нулей, определяемых длительностью импульсов τ_n , появляются нули, определяемые временем задержки между импульсами t_3 . Очевидно, что при дальнейшей периодизации количество нулей второго типа будет расти. Соответственно спектральная плотность будет все больше расщепляться на отдельные лепестки. Причем в случае постоянства периода следования импульсов T изменение длительности импульса τ_n приводит к изменению ширины спектра, а также к изменению амплитуд гармоник, но не влияет на их местоположение. Другими словами, при периодизации сигнала образуются места формирования будущих спектральных составляющих, жестко привязанные к определенным частотам спектра.

В соответствии с теоремой о смещении, спектральную плотность сигнала суммы из двух радиоимпульсов $S_2(j\omega)$, задержанных относительно

друг друга на время t_3 , можно представить как произведение спектральной плотности исходного одиночного радиоимпульса $S_1(j\omega)$ и коэффициента, учитывающего задержку между импульсами $[1 + e^{j\omega t_3}]$. Соответственно для спектральной плотности сигнала суммы из трех радиоимпульсов имеем $S_3(j\omega) = S_1(j\omega)[1 + e^{j\omega t_3} + e^{j\omega 2t_3}]$ (рис. 4), а для спектральной плотности сигнала суммы из m радиоимпульсов $S_m(j\omega) = S_1(j\omega)[1 + e^{j\omega t_3} + e^{j\omega 2t_3} + \dots + e^{j\omega(K-1)t_3}]$.

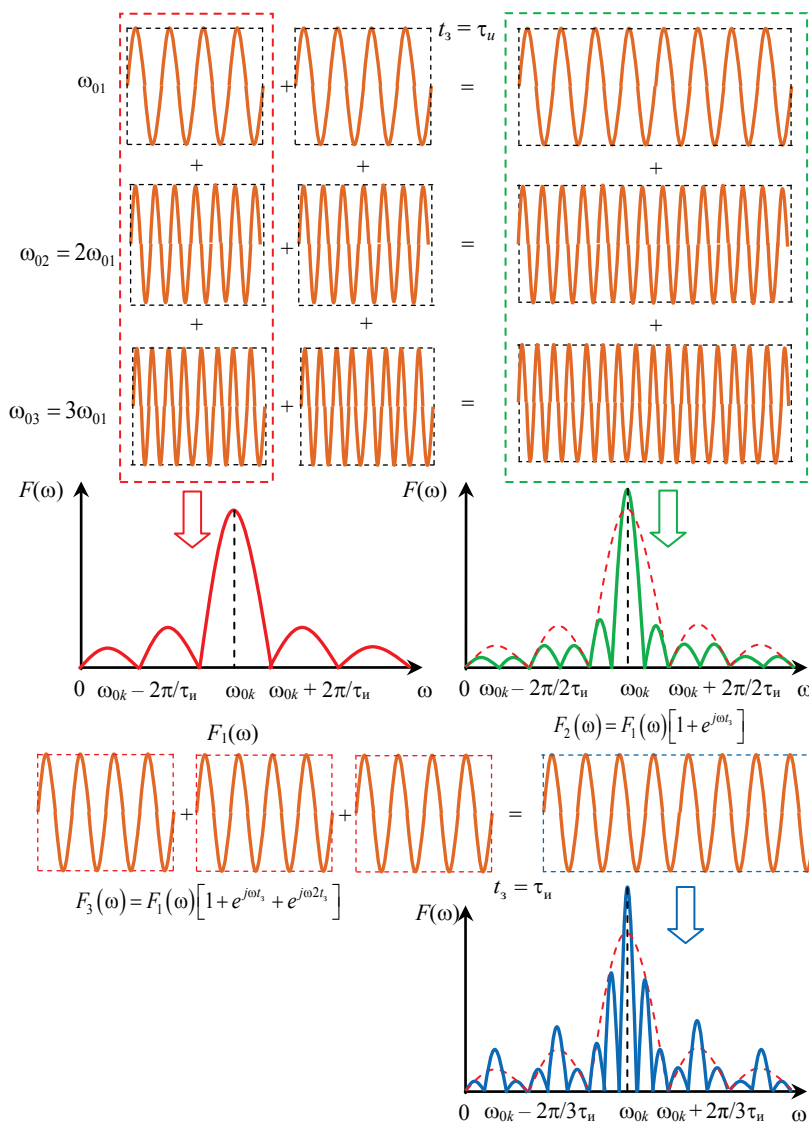


Рис. 4. Изменение формы спектральной плотности сигнала суммы задержанных по времени радиоимпульсов при увеличении их количества

Fig. 4. Alteration of the shape of the spectral density of the signal of the sum of radio pulses delayed in time with an increase in their number

Определим, воспользовавшись принципом наложения, спектральный состав последовательности радиоимпульсов, представив их в виде суммы из m радиоимпульсов, задержанных по времени на t_3 относительно друг друга:

$$S_m(\omega) = \frac{E\tau_n}{2} \left[\left| \frac{\sin\left((\omega - \omega_0)\frac{\tau_n}{2}\right)}{(\omega - \omega_0)\frac{\tau_n}{2}} \right| \left| \frac{\sin\left(m(\omega - \omega_0)\frac{t_3}{2}\right)}{\sin\left((\omega - \omega_0)\frac{t_3}{2}\right)} \right| + \right. \\ \left. + \left| \frac{\sin\left(m(\omega + \omega_0)\frac{\tau_n}{2}\right)}{\sin\left((\omega + \omega_0)\frac{\tau_n}{2}\right)} \right| \left| \frac{\sin\left(m(\omega + \omega_0)\frac{t_3}{2}\right)}{\sin\left((\omega + \omega_0)\frac{t_3}{2}\right)} \right| \right]. \quad (3)$$

Из (3) следует, что изменение параметров последовательности радиоимпульсов влияет на скорость формирования дискретного спектра. Путем установки параметров последовательности радиоимпульсов (подбора значений τ_n и t_3) можно максимально сократить количество периодов m при периодизации сигнала, требуемое для достижения заданной точности преобразования спектральной плотности в дискретный спектр. Кроме того, увеличение отношения сигнал/шум предлагается получить за счет обоснованного выбора характерных частотных составляющих сигнала, обладающих одновременно максимальной чувствительностью к изменению информативного параметра измерительного сигнала и минимальной чувствительностью к случайным отклонениям параметров сигнала, обусловленным нестабильностью функционирования элементов измерительных контуров.

Определение номера характерной частотной составляющей сигнала предусматривает исследование динамических особенностей его спектра путем анализа частных производных выражения для расчета амплитуд его частотных составляющих [10]

$$\Delta U_{nE\omega\tau} = \frac{d|U_n|}{dE} \Delta E + \frac{d|U_n|}{d\omega} \Delta\omega + \frac{d|U_n|}{d\tau} \Delta\tau + \frac{d|U_n|}{dt_3} \Delta t_3, \quad (4)$$

где ΔE , $\Delta\omega$, $\Delta\tau$, Δt_3 – изменение параметров E , ω , τ , t_3 .

Первые три члена выражения (4) являются абсолютной погрешностью при изменении информативного параметра сигнала Δt_3 . Другими словами, несовпадения областей минимальной чувствительности к изменениям E , ω , τ и t_3 определяют возможность подавления влияния шумов, обусловленных нестабильностью функционирования элементов измерительных контуров.

ВЫВОДЫ

1. Разработан соответствующий практике математический аппарат анализа квазипериодических измерительных сигналов в частотной области, позволяющий перейти от малочувствительной регистрации изменений временных параметров измерительных сигналов к регистрации изменений параметров отдельных составляющих спектра, для которых отношение сигнал/шум имеет максимальное значение.

2. Применение математического аппарата позволит значительно упростить алгоритмическое обеспечение систем тестовой диагностики обмоток электрических машин за счет отказа от сложной корреляционной обработки сигнала, требующей больших вычислительных ресурсов (время и скорость обработки данных, объем оперативной памяти). Кроме того, практическая реализация предложенной методики позволит сократить время измерений, уменьшить мощность, вес и габариты генераторов импульсов, входивших в состав измерительных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глинченко, А. С. Цифровая обработка сигналов: в 2 ч. / А. С. Глинченко. Красноярск: Изд-во КГТУ, 2001. Ч. 1. 199 с.
2. Клаассен, К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике / К. Б. Клаассен. М.: Постмаркет, 2000. 352 с.
3. Грибунин, В. Г. Введение в вейвлет-преобразование / В. Г. Грибунин. СПб.: АВТЭК, 2009. 70 с.
4. Панфилов, В. А. Электрические измерения / В. А. Панфилов. М.: Академия, 2008. 288 с.
5. Суходолов, Ю. В. Повышение помехоустойчивости контроля межвитковой изоляции коллекторных электрических машин постоянного тока с помощью волновых затухающих колебаний / Ю. В. Суходолов, А. А. Шейников, А. Н. Малашин // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. 2010. № 19. С. 67–72.
6. Шейников, А. А. Измерение малых изменений параметров импульсных последовательностей / А. А. Шейников, Ю. В. Суходолов, А. Е. Каледя // Вестник Воен. акад. Респ. Беларусь. 2016. № 1. С. 153–158.
7. Гутников, В. С. Фильтрация измерительных сигналов / В. С. Гутников. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 192 с.
8. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский. М.: Дрофа, 2006. 719 с.
9. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. М.: Высш. шк., 2000. 462 с.
10. Шейников, А. А. Совершенствование метода импульсного контроля обмоток авиационных коллекторных генераторов постоянного тока / А. А. Шейников, Ю. В. Суходолов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2013. № 1. С. 24–32.

Поступила 10.10.2017 Подписана в печать 12.12.2017 Опубликовано онлайн 30.05.2018

REFERENCES

1. Glinchenko A. S. (2001) *Digital Signal Processing. Part 1*. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Technical University. 199 (in Russian).
2. Klaassen K. B. (2000) *Fundamentals of Measurement. Electronic Methods and Devices in Measuring Techniques*. Moscow, Postmarket Publ. 352 (in Russian).
3. Gribunin V. G. (2009) *Introduction to Wavelet-Transformation*. St.-Petersburg, AVTEKS. 70 (in Russian).
4. Panfilov V. A. (2008) *Electrical Measurement*. Moscow, Akademiya Publ. 288 (in Russian).
5. Sukhodolov Yu. V., Sheinikov A. A., Malashin A. N. (2010) Increase of Noise Immunity of Control of Inter-Turn Insulation of DC Collector Electric Machines by Means of Wave Damping Vibrations. *Sbornik Nauchnykh Statei Voennoi Akademii Respubliki Belarus'* [Collected Papers of the Military Academy of the Republic of Belarus], (19), 67–72 (in Russian).
6. Sheinikov A. A., Sukhodolov Yu. V., Kaleda A. E. (2016) Measurement of Small Changes in Pulse Sequence Parameters, *Vestnik Voennoi Akademii Respubliki Belarus'* [Herald of the Military Academy of the Republic of Belarus], (1), 153–158 (in Russian).
7. Gutnikov V. S. (1990) *Filtering of Measuring Signals*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 192 (in Russian).
8. Gonorovskii I. S. (2006) *Electronic Circuits and Signals*. Moscow, Drofa Publ. 719 (in Russian).
9. Baskakov S. I. (2000) *Radiotechnical Circuits and Signals*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 462 (in Russian).
10. Sheinikov A. A., Sukhodolov Yu. V. (2013) Improvement of a Method of the Pulse Windings Control of Aviation Direct Current Collector Generators. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 24–32 (in Russian).

Received: 10 October 2017

Accepted: 12 December 2017

Published online: 30 May 2018