

УДК 621.396.96

Спектральный метод измерения изменений временных интервалов между периодическими последовательностями импульсов

А.А. Шейников¹, А.В. Исаев², В.В. Зеленко², Ю.В. Суходолов²

¹Военная академия Республики Беларусь,
пр. Независимости, 220, г. Минск 220057, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 11.02.2019

Принята к печати 29.05.2019

Методы измерений времени задержки между периодическими последовательностями импульсов основаны в большинстве своем на непосредственном измерении рассматриваемого параметра. Главным недостатком такого подхода является трудность обеспечения точности измерений в условиях шумов. Целью данной работы являлась разработка метода, обеспечивающего возможность точного измерения малых изменений временных интервалов, основанного на анализе динамических свойств спектра суммы задержанных измерительных сигналов.

Суть разработанного метода заключается в замене малочувствительной регистрации изменений времени задержки между периодическими последовательностями импульсов, регистрацией изменений параметров характерных гармонических составляющих спектра результирующей суммы этих сигналов. При этом в рассмотрение принимались только те гармонические составляющие, которые обладают максимальной чувствительностью к отклонениям времени задержки и минимальной чувствительностью к некоррелированным изменениям параметров сигналов. Для достижения максимального эффекта исследовалось влияние формы импульсов периодических последовательностей на точность измерений. При этом за базовую принималась трапециевидная форма импульсов – как наиболее общая, в которую могут перерождаться все остальные формы импульсов (треугольная, прямоугольная, синусоидальная и т. д.).

Результаты расчетов показали эффективность применения предлагаемого метода с целью снижения погрешности измерений малых изменений интервалов времени. При этом коэффициент ослабления погрешности по сравнению с существующим методом измерения составил $K_{we} = 4,78$.

Использование предложенного подхода открывает возможность совершенствования алгоритмического обеспечения средств измерений в целях их автоматизации и увеличения точности измерений.

Ключевые слова: периодическая последовательность импульсов, измерительный сигнал, гармонические составляющие спектра, время задержки.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-178-184

Адрес для переписки:

А.А. Шейников
Военная академия Республики Беларусь,
пр. Независимости, 220, г. Минск 220057, Беларусь
e-mail: af.varb@yandex.ru

Address for correspondence:

A.A. Sheinikov
Military Academy of the Republic of Belarus,
Nezavisimosty Ave., 220, Minsk 220057, Belarus
e-mail: af.varb@yandex.ru

Для цитирования:

А.А. Шейников, А.В. Исаев, В.В. Зеленко, Ю.В. Суходолов.
Спектральный метод измерения изменений временных интервалов между периодическими последовательностями импульсов. Приборы и методы измерений. 2019. – Т. 10, № 2. – С. 178–184.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-178-184

For citation:

A.A. Sheinikov, A.V. Isaev, V.V. Zelenko, Yu.V. Sukhodolov.
[Spectral Method of Measuring of Changes in Time Intervals between Periodic Pulse Sequences].
Devices and Methods of Measurements. 2019, vol. 10, no. 2, pp. 178–184.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-178-184

Spectral Method of Measuring of Changes in Time Intervals between Periodic Pulse Sequences

A.A. Sheinikov¹, A.V. Isaev², V.V. Zelenko², Yu.V. Sukhodolov²

¹Military Academy of the Republic of Belarus,
Nezavisimosty Ave., 220, Minsk 220057, Belarus

²Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 11.02.2019

Accepted for publication 29.05.2019

Abstract

Methods of measuring delay time between periodic sequences of pulses are mostly based on the considered parameter direct measurement. The main disadvantage of this approach is the difficulty of ensuring the measurements accuracy in the noise conditions. The aim of this work was to develop a method that provides the ability to accurately measure small changes in time intervals, based on the analysis of the dynamic properties of the spectrum of the delayed measurement signals sum.

The developed method essence is to replace the insensitive registration of changes in the delay time between periodic pulses sequences, registration of changes in the parameters of the characteristic harmonic components of the spectrum of the resulting sum of these signals. In this case, only those harmonic components were taken into consideration that have a maximum sensitivity to delay time deviations and a minimum sensitivity to uncorrelated signal parameters changes.

To achieve the maximum effect, the influence of the pulse shape of periodic sequences on the measurement accuracy was investigated. Moreover, the trapezoidal form of impulses was taken as the basic - as the most common, into which all other forms of impulses can be reborn (triangular, rectangular, sinusoidal, etc.).

The calculation results showed the effectiveness of the proposed method in order to reduce the measurement error of small changes in time intervals. In this case, the attenuation error coefficient compared with the existing measurement method amounted to $K_{we} = 4,78$. Using the proposed approach opens up the possibility of improving the algorithmic support of measuring instruments in order to automate them and increase the measurements accuracy.

Keywords: periodic pulse sequence, measuring signal, spectrum harmonic components, delay time.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-178-184

Адрес для переписки:

А.А. Шейников
Военная академия Республики Беларусь,
пр. Независимости, 220, г. Минск 220057, Беларусь
e-mail: af.varb@yandex.ru

Address for correspondence:

A.A. Sheinikov
Military Academy of the Republic of Belarus,
Nezavisimosty Ave., 220, Minsk 220057, Belarus
e-mail: af.varb@yandex.ru

Для цитирования:

А.А. Шейников, А.В. Исаев, В.В. Зеленко, Ю.В. Суходолов.
Спектральный метод измерения изменений временных интервалов между периодическими последовательностями импульсов. Приборы и методы измерений. 2019. – Т. 10, № 2. – С. 178–184.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-178-184

For citation:

A.A. Sheinikov, A.V. Isaev, V.V. Zelenko, Yu.V. Sukhodolov.
[Spectral Method of Measuring of Changes in Time Intervals between Periodic Pulse Sequences].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 2, pp. 178–184 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-178-184

Введение

Трудность обеспечения высокой стабильности работы генерирующей аппаратуры обуславливает флуктуацию параметров измерительных сигналов в некоторых пределах с течением времени [1]. Сами же сигналы при этом можно считать динамическими, что предусматривает их анализ как во временной, так и в частотной областях. Наблюдение формы импульсов осуществляется во временной области (с помощью осциллографа), тогда как в частотной области изучают спектральный состав сигналов (с помощью спектроанализаторов) [2]. Однако на сегодняшний день известные методы позволяют проводить измерение временных интервалов между периодическими последовательностями импульсов в основном во временной области, а точность этих методов в некоторых случаях не достаточна для решения измерительных задач. Так, например, трудности возникают при измерении изменений временных параметров сигналов за малый интервал времени, величина которого не превышает порога дискретизации цифровых средств измерения.

В этих условиях целесообразной является разработка метода измерения временных интервалов между периодическими последовательностями импульсов путем анализа в частотной области, позволяющего с достаточной для практики точностью оценивать их изменения во времени.

В настоящее время различают две основные группы методов измерения временных интервалов: осциллографические, электронно-счетные [3]. К осциллографическим методам измерения временных интервалов относятся методы с линейной разверткой и со спиральной разверткой [4]. Основными недостатками этих методов являются: невозможность регистрации малых изменений временных интервалов и невозможность обеспечения автоматизации измерений. К электронно-счетным методам измерения временных интервалов относятся: метод последовательного счета, метод задержанных совпадений, нониусный метод, метод преобразования время-амплитуда и метод преобразования масштаба времени (цифровой метод) [5–8]. Основными недостатками электронно-счетных методов являются: сложность измерения временных интервалов, меньших чем период квантования, необходимость обеспечения высокой стабильности работы электронных элементов источника сигналов для обеспечения точности измерений, большая инерционность

измерений, сложность регистрации малых изменений временных интервалов. Из проведенного анализа следует, что основным общим недостатком существующих методов измерения временных интервалов является невозможность определения малых изменений временных интервалов. Целью работы являлась разработка метода, обеспечивающего возможность точного измерения малых изменений временных интервалов, основанного на анализе динамических свойств спектра суммы задержанных измерительных сигналов.

Основная часть

В большинстве рассмотренных методов измерения временных интервалов в качестве базовой формы импульсов используется прямоугольная форма. Однако в реальности, из-за особенностей работы генерирующей аппаратуры, измерительные импульсы имеют фронты. Наличие этих фронтов обуславливает погрешность, значение которой может достигать достаточно большой величины, особенно если длительность фронта импульса соизмерима с длиной измеряемого временного интервала. Очевидно, что для снижения погрешности измерений следует учитывать эту особенность и рассматривать при расчетах измерительные импульсы в общем случае как импульсы трапециевидной формы. При этом, трапециевидный импульс может быть представлен как результирующая сумма задержанных и урезанных по времени прямоугольных, треугольных или синусоидальных импульсов (рисунок 1).

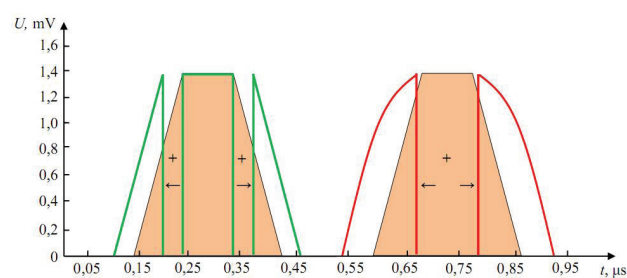


Рисунок 1 – Разделение трапециевидного импульса на импульсы треугольной, прямоугольной и синусоидальной формы

Figure 1 – Trapezoidal pulse separation into triangular, rectangular and sinusoidal pulses

Кроме того, изменяя угол наклона фронтов трапециевидного импульса, можно получить импульсы треугольной и прямоугольной формы, а изменяя кривизну фронтов – импульсы синусоидальной и другой формы (рисунок 2).

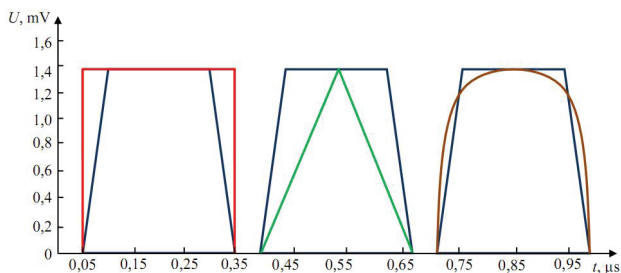


Рисунок 2 – Преобразование трапециевидной формы сигнала в прямоугольную, треугольную и синусоидальную форму

Figure 2 – Trapezoidal waveform conversion to a rectangular, triangular and sinusoidal shape

Следует отметить, что спектры рассматриваемых сигналов (рисунок 2) имеют схожую структуру. Так на рисунке 3 показаны спектры прямоугольного, треугольного и трапециевидного импульсов при одинаковых основных параметрах сигналов: амплитуда – 1,4 мВ; длительность импульсов – 0,3 мкс; период следования импульсов – 7,5 мкс (скважность – 25), (длительность фронта трапециевидных импульсов – 0,1 мкс, длительность фронта треугольных импульсов – 0,15 мкс).

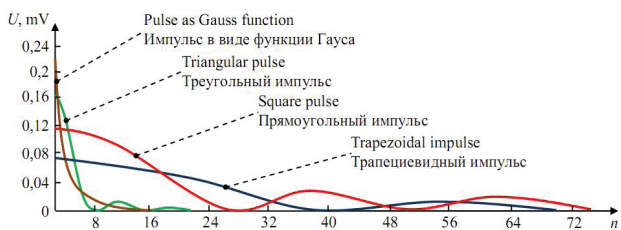


Рисунок 3 – Спектры периодических последовательностей импульсов треугольной, прямоугольной и трапециевидной формы

Figure 3 – Periodic pulse sequence spectra of triangular, rectangular and trapezoidal shape

Результаты анализа спектров рассмотренных сигналов позволяют говорить о возможности применения для их исследования единого математического аппарата на основе выражений, описывающих последовательности трапециевидных импульсов. Прежде всего, переход к рассмотрению трапециевидных импульсов необходим при измерении временных интервалов малой длительности между периодическими последовательностями прямоугольных импульсов, когда существенное влияние на форму их фронтов начинает оказывать нестабильность генерирующей аппаратуры [9].

Для определения времени задержки между двумя импульсными последовательностями предлагается использовать параметры спектра суммы этих сигналов. Так, например, амплитуды гармонических составляющих спектра суммы двух задержанных импульсных последовательностей трапециевидных импульсов (рисунок 4) можно рассчитать в соответствии с выражением:

$$|\dot{U}_n| = \frac{2ET_0}{\pi^2 n^2 \tau_f} \left| \sin\left(\frac{\pi n \tau_f}{T_0}\right) \right| \left| \sin\left(\frac{\pi n (\tau - \tau_f)}{T_0}\right) \right| \left| \cos\left(\frac{\pi n t_z}{T_0}\right) \right|, \quad (1)$$

где $|\dot{U}_n|$ – модуль амплитуды гармонической составляющей с номером n ; E – амплитуда сигнала; τ – длительность импульса; T_0 – период следования трапециевидных импульсов; τ_f – длительность фронтов трапециевидного импульса (в случае когда $\tau_{f1} = \tau_{f2} = \tau_f$); t_z – время задержки между двумя импульсными последовательностями.

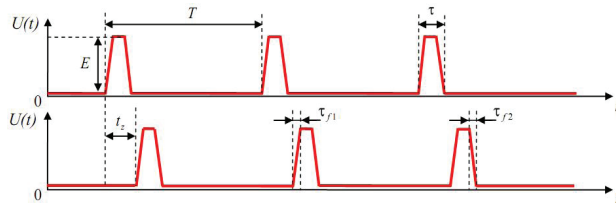


Рисунок 4 – Задержанные периодические последовательности трапециевидных импульсов

Figure 4 – Delayed periodic trapezoidal pulse sequences

Выражение (1) показывает, что степень изменения значений отдельных спектральных составляющих при изменении значения t_z различна. Следовательно, задавая τ , T_0 , τ_f можно найти те гармонические составляющие, чувствительность которых к изменению t_z будет максимальной, а к изменениям остальных параметров импульсов, обусловленным нестабильностью генерирования, – минимальна [10]. Определение номера частотной составляющей сигнала, наиболее чувствительной к изменению t_z , предусматривает исследование его спектра путем анализа частных производных выражения для расчета амплитуд его частотных составляющих [11]:

$$\Delta U_{n\tau T} = \frac{d|U_n|}{d\tau_f} \Delta\tau_f + \frac{d|U_n|}{dT_0} \Delta T_0 + \frac{d|U_n|}{d\tau} \Delta\tau + \frac{d|U_n|}{dt_z} \Delta t_z, \quad (2)$$

где ΔT_0 , $\Delta\tau_f$, $\Delta\tau$ – изменения параметров сигналов (T_0 , τ_f , τ), обусловленные нестабильностью генерирования, Δt_z – определяемое изменение

времени задержки t_z . Причем первые три члена выражения (2) являются абсолютной погрешностью при измерении информативного параметра сигнала (Δt_z). Другими словами, поиск областей спектра, имеющих одновременно минимальную чувствительность к изменениям T_0 , τ_f , τ и максимальную чувствительность к изменениям t_z

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d|U_n|}{d\tau_f} &= \frac{2ET_0}{\pi^2 n^2 \tau_f} \left| \cos\left(\frac{\pi n t_z}{T_0}\right) \right| \left(\left| \sin\left(\frac{\pi n \tau_f}{T_0}\right) \right| \left| \cos\left(\frac{\pi n (\tau - \tau_f)}{T_0}\right) \right| + \left| \sin\left(\frac{\pi n (\tau - \tau_f)}{T_0}\right) \right| \left| \cos\left(\frac{\pi n \tau_f}{T_0}\right) \right| \right); \\ \frac{d|U_n|}{d\tau} &= \frac{2ET_0}{\pi^2 n^2 \tau_f} \left| \sin\left(\frac{\pi n \tau_f}{T_0}\right) \right| \left| \cos\left(\frac{\pi n t_z}{T_0}\right) \right| \left| \cos\left(\frac{\pi n (\tau - \tau_f)}{T_0}\right) \right|; \\ \frac{d|U_n|}{dT_0} &= \frac{ET_0}{\pi^2 n^2 \tau_f} \left| \sin\left(\frac{\pi n (\tau - \tau_f)}{T_0}\right) \right| \left(2 + \left| \sin\left(\frac{2\pi n t_z}{T_0}\right) \right| \left(\left| \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi n (\tau - \tau_f)}{T_0}\right) \right| + 1 \right) \right); \\ \frac{d|U_n|}{dt_z} &= \frac{2ET_0}{\pi^2 n^2 \tau_f} \left| \sin\left(\frac{\pi n \tau_f}{T_0}\right) \right| \left| \sin\left(\frac{\pi n (\tau - \tau_f)}{T_0}\right) \right| \left| \sin\left(\frac{\pi n t_z}{T_0}\right) \right|. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Анализ выражений (3) показывает, что экстремумы функций производных не совпадают (рисунок 5).

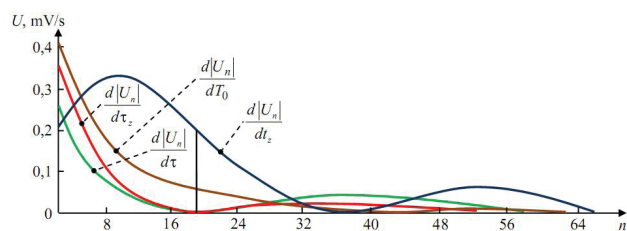


Рисунок 5 – Графики зависимости значений частных производных от номера гармонической составляющей спектра сигнала

Figure 5 – Graphs of partial derivatives values depending on the signal spectrum harmonic component number

Анализ графиков на рисунке 5 показывает, что существуют гармонические составляющие, имеющие одновременно минимальную чувствительность к нестабильности генерирующей аппаратуры (к изменениям параметров импульсов измерительных последовательностей ($\Delta\tau_f$, $\Delta\tau$)) и максимальную чувствительность к изменениям полезного сигнала (Δt_z) (например, гармоническая составляющая с номером 19 зависит в основном от изменений полезного сигнала ($\frac{d|U_{19}|}{dt_z} \gg 0$) и слабо зависит от изменений параметров импульсов измерительных последовательностей ($\frac{d|U_{19}|}{d\tau_f} \rightarrow 0$, $\frac{d|U_{19}|}{d\tau} \rightarrow 0$, $\frac{d|U_{19}|}{dT_0} \ll \frac{d|U_{19}|}{dt_z}$).

позволит обеспечить возможность подавления влияния дестабилизирующих факторов, обусловленных нестабильностью функционирования элементов измерительных устройств.

Система уравнений, частных производных спектра суммы двух задержанных трапециевидных импульсных последовательностей имеет вид:

Обоснованный таким образом выбор параметров измерительного сигнала позволяет добиться высокой чувствительности амплитуд некоторых гармонических составляющих к Δt_z при значительном снижении влияния $\Delta\tau$, $\Delta\tau_f$, ΔT_0 и повышении точности измерения временных интервалов.

Для определения номеров гармонических составляющих, обладающих минимальной чувствительностью к нестабильности параметров τ , T_0 , τ_f , ($n_{\tau \min}$, $n_{\tau_f \min}$, $n_{T_0 \min}$), и максимальной чувствительностью к t_z ($n_{t_z \max}$), представляют интерес экстремумы функций $\frac{d|\dot{A}_n|}{dT}$, $\frac{d|\dot{A}_n|}{d\tau_f}$, $\frac{d|\dot{A}_n|}{d\tau}$, $\frac{d|\dot{A}_n|}{dt_z}$ (особенно

минимальные значения $\frac{d|\dot{A}_n|}{dT}$, $\frac{d|\dot{A}_n|}{d\tau_f}$, $\frac{d|\dot{A}_n|}{d\tau}$ и максимальное значение $\frac{d|\dot{A}_n|}{dt_z}$ в области определения функций).

Их можно найти путем анализа знака вторых производных рассматриваемых функций

$$\frac{d^2|\dot{A}_n|}{dT^2}, \frac{d^2|\dot{A}_n|}{d\tau_f^2}, \frac{d^2|\dot{A}_n|}{d\tau^2}, \frac{d^2|\dot{A}_n|}{dt_z^2}.$$

Таким образом, рассматриваемый подход позволяет получить дополнительное повышение точности измерения временных интервалов между периодическими последовательностями импульсов за счет учета погрешностей, обусловленных нестабильностью работы измерительной аппаратуры, и их ослабления.

К примеру, генераторы сигналов ГЗ-131, Г4-221, Г6-46 производства ОАО «МНИПИ»

(Республика Беларусь) обеспечивают длительность фронта прямоугольных импульсов 100 нс; генератор сигналов функциональный Г6-46 имеет погрешность скважности для сигналов прямоугольной формы 5 %, генераторы сигналов Г3-131, Г6-46 имеют погрешность установки частоты ± 1 %, а генератор сигналов Г4-221 – $\pm (0,012 + 0,0001f)$ Гц, измеритель временных интервалов В-471 (УП «Унитехпром БГУ», Республика Беларусь) имеет следующие погрешности, характеризующие стабильность параметров сигналов: $\Delta\tau = \Delta T_0 = 1 \cdot 10^{-7}$ с (погрешность установки действительного значения частоты встроенного опорного генератора измерителя), $\Delta\tau_f = 2,5 \cdot 10^{-9}$ с (разрешающую способность измерителя), погрешность измерения времени задержки $\Delta t_z = 10 \cdot 10^{-9}$ с (минимальное значение диапазона измерения временных интервалов). Соответственно общую погрешность можно рассчитать по формуле (4):

$$\Delta U_{pr} = \Delta\tau_f + \Delta T_0 + \Delta\tau + \Delta t_z = 2,125 \cdot 10^{-7} \text{ с.} \quad (4)$$

В случае измерения времени задержки между периодическими последовательностями импульсов с помощью предлагаемого метода можно частично уменьшить составляющие общей погрешности (4). Так, в случае выбора в качестве характерной гармонической составляющей с номером 19: $\Delta\tau_f = 0$, $\Delta T_0 = 0$, $\frac{\Delta T_0}{\Delta t_z} = 0,15$ (рисунок 5).

Соответственно, для рассматриваемого случая можно записать:

$$\Delta U_{sp} = 0 \cdot \Delta\tau_f + 0,15 \cdot \Delta T_0 + 0 \cdot \Delta\tau + 1 \cdot \Delta t_z = 1,015 \cdot 10^{-8} \text{ с.} \quad (5)$$

Анализ выражений (4) и (5) показывает эффективность применения предлагаемого метода с целью снижения погрешности измерений малых изменений интервалов времени. При этом коэффициент ослабления погрешности по сравнению с существующим методом измерения может составлять $K_{we} = \frac{\Delta U_{sp}}{\Delta U_{pr}} = \frac{1,015 \cdot 10^{-8}}{0,2125 \cdot 10^{-8}} = 4,78$.

Заключение

Представленная методика обоснованного выбора параметров периодических импульсных последовательностей отличается учетом погрешностей от некоррелированных отклонений параметров измерительных сигналов, что способствует увеличению точности измерения малых изменений временных интервалов. Применение

такого подхода открывает возможность совершенствования алгоритмического обеспечения средств измерений в целях их автоматизации и увеличения точности измерений.

Список использованных источников

1. Афонский, А.А. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике / А.А. Афонский, В.П. Дьяков. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 688 с.
2. Клаассен, К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике / К.Б. Клаассен. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
3. Зайцев, С.А. Цифровые методы время-частотных измерений / С.А. Зайцев // Современная электроника, 2009. – № 6. – С. 20–23.
4. Панфилов, В.А. Аналоговые методы и средства электрических измерений / В.А. Панфилов. – М.: Энергопрогресс, 2006. – 112 с.
5. Ратхор, Т.С. Цифровые измерения. Методы и схемотехника: пер. с англ. / Т.С. Ратхор. – М.: Техносфера, 2004. – 370 с.
6. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов. Второе издание / Р. Лайонс. – М.: Бином, 2015. – 641 с.
7. Раннев, Г.Г. Информационно-измерительная техника и электроника / Г.Г. Раннев. – М.: Академия, 2006. – 512 с.
8. Kalisz, J. Review of methods for time interval measurements with picosecond resolution / J. Kalisz // Metrologia. – 2004. – No. 41. – P. 17–32.
9. Глинченко, А.С. Исследование случайных погрешностей спектрально-веса измерения параметров сигналов / А.С. Глинченко, В.А. Комаров, О.А. Тронин // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 1. – С. 7–11.
10. Шейников, А.А. Измерение малых изменений параметров импульсных последовательностей / А.А. Шейников, Ю.В. Суходолов, А.Е. Каледя // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2016. – № 1. – С. 125–130.
11. 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.

References

1. Afonskiy A.A., Diakov V.P. *EHlektronnyye izmereniya v nanotekhnologiyakh i mikroelektronike* [Electronic measurements in nanotechnology and microelectronics]. Moscow, DMC Press Publ., 2012, 688 p.
2. Claassen K.B. *Osnovy izmerenij. EHlektronnyye metody i pribory v izmeritel'noj tekhnike* [Basics of

measurement. Electronic methods and instruments in measurement technology]. Moscow, Postmarket Publ., 2000, 352 p.

3. Zaitsev S.A. [Digital methods of time-frequency measurements]. *Sovremennaya ehlektronika* [Modern electronics], 2009, no. 6, pp. 20–23 (in Russian).

4. Panfilov V.A. *Analogovye metody i sredstva ehlektricheskikh izmerenij* [Analog methods and means of electrical measurements]. Moscow, Energoprogress Publ., 2006, 112 p.

5. Rathor T.S. *TSifrovye izmereniya. Metody i skhemotekhnika* [Digital measurements. Methods and circuitry]. Moscow, Technosphere Publ., 2004, 370 p.

6. Lyons R. *TSifrovaya obrabotka signalov* [Digital Signal Processing]. Moscow, Binom Publ., 2015, 641 p.

7. Rannev G.G. *Informatsionno-izmeritel'naya tekhnika i ehlektronika* [Information and measuring equipment and electronics]. Moscow, Academy Publ., 2006, 512 p.

8. Kalisz J. Review of methods for time interval measurements with picosecond resolution. *Metrologia*, 2004, no. 41, pp 17–32.

9. Glinchenko A.S., Komarov V.A., Tronin O.A. [Investigation of random errors of spectral-weighted measurement of signal parameters]. *TSifrovaya obrabotka signalov* [Digital Signal Processing], 2012, no. 1, pp. 7–11 (in Russian).

10. Sheinikov A.A., Sukhodolov Yu.V., Caleda A.E. [Measurement of small changes in the parameters of pulse sequences]. *Vestnik Voennoj akademii Respubliki Belarus'* [Messenger of Military Academy of the Republic of Belarus], 2016, no. 1, pp. 125–130 (in Russian).

11. Sukhodolov Yu.V., Sheinikov A.A., Malashin A.N. [Improving the noise immunity of the control of inter-turn insulation of collector electric machines of direct current using wave damped oscillations]. *Sbornik naunykh statej Voennoj akademii Respubliki Belarus'* [Digest of Military Academy of the Republic of Belarus], 2010, no. 19, pp. 67–72 (in Russian).