

Ivan I. Kanatov – Ph.D. in Engineering (1974), Associate Professor (1980) of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: mathematical system theory; digital signal processing.

E-mail: iikanatov@etu.ru

Dmitry M. Klionskiy – Ph.D. in Engineering (2013), Associate Professor of the Department of Software and Computer Application of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: wavelet-analysis; spectral analysis; MATLAB modeling.

E-mail: klio2003@list.ru

Alena B. Khachatryan – Ph.D. in Engineering (2014), Associate Professor of the Department of Radio Equipment Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 20 scientific publications. Area of expertise: signal theory, statistical signal processing methods, remote sensing of water and earth surface, scattering of radio waves by rough surfaces, mathematical simulation of radar systems.

E-mail: khachatryan.al@gmail.com

Denis N. Butusov – Ph.D. in Engineering (2012), Associate Professor of the Department of Computer-Aided Design of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 70 scientific publications. Area of expertise: mathematical models; applied and computational mathematics; numerical methods; nonlinear dynamics; numerical modelling; finite-difference schemes; recurrence analysis; bifurcation analysis; ODE solvers; computer-aided design; chaos theory; scientific computation; cloud computing; parallel algorithms; embedded systems; data acquisition and processing.

E-mail: dnbutusov@mail.ru

Vladimir F. Lapizkiy – Ph.D. in Engineering (2000), Associate Professor (2001). Head of the Department for PJSC "Inteltech" (Saint Petersburg). The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: information and telecommunication systems; digital communication.

E-mail: lvf333@ya.ru

Vadim I. Bobrovskiy – D.Sc. in Engineering (2009), Associate Professor (2010), Head of Department of PJSC "Inteltech" (Saint Petersburg). The author of 139 scientific publications. Area of expertise: information and telecommunication systems; digital communication.

E-mail: v.bobrovskiy@ntcl.inteltech.ru

УДК 681.5+612.13

С. А. Пыко, Н. С. Пыко, О. А. Маркелов, Ю. Д. Ульяницкий, М. И. Богачев
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Исследование взаимной динамики стохастических нормально распределенных процессов при аддитивной амплитудной расстройке между ними¹

Функционирование сложных систем возможно характеризовать совместными статистическими характеристиками порождаемых этими системами сигналов. Рассмотрены три подхода к оцениванию стабильности взаимного поведения двух тестовых процессов. Первый подход основан на расчете коэффициента фазовой синхронизации (КФС) между процессами. Второй метод базируется на определении взаимной условной энтропии (ВУЭ) процессов. Согласно третьему методу для оценивания стабильности взаимной динамики процессов используется среднее значение функции когерентности (ФК). Исследована чувствительность указанных методов к аддитивной амплитудной расстройке между процессами. Рассмотрены два типа процессов: с кратковременной зависимостью и заданным временем корреляции (ВК) и с долговременной зависимостью, определяемой значением показателя Херста. В исследованиях генерировались две копии процесса с известными корреляционными свойствами. Затем в одну из копий вносилась аддитивная амплитудная помеха с независимыми отсчетами, подчиняющимся равномерному или нормальному распределению с одинаковой дисперсией. Для каждого типа помехи и каждого значения ее интенсивности оценивались статистические характеристики КФС, ВУЭ и ФК. Выявлено, что чувствительность рассмотренных методов к нормально распределенной расстройке выше, чем к равномерной. При этом

¹ Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (исследовательский проект № 16-19-00172).

процессы с долговременной зависимостью активнее реагируют на аддитивную амплитудную расстройку, чем процессы с кратковременной зависимостью. Влияние показателя Херста для процессов с долговременной зависимостью выражено для КФС и ФК. ВК процессов с кратковременной зависимостью влияет на КФС и ВУЭ. Полученные результаты позволяют обоснованно выбрать необходимый метод анализа взаимной динамики процессов, принадлежащий к рассмотренным в настоящей статье типам.

Коэффициент фазовой синхронизации, время корреляции, показатель Херста, функция когерентности, относительная условная энтропия

В последнее десятилетие анализ поведения сложных систем в биологии, физиологии, технике, при исследовании геоинформационных, климатических систем, а также во многих других областях науки базируется на совместном изучении нескольких сигналов, порождаемых данными системами. Такой подход открывает новые возможности для понимания принципов, определяющих поведение сложных систем [1]–[5]. Настоящая статья продолжает исследование, отраженное в публикациях [6]–[8]. Рассмотрены несколько подходов к оцениванию стабильности взаимного поведения двух тестовых процессов, в отношении которых авторами выявлена чувствительность к аддитивной амплитудной расстройке.

Тестовые нормально распределенные случайные процессы (СП) моделировались в среде программирования Matlab. Рассмотрены два типа процессов: с кратковременной и долговременной зависимостью.

Случайные процессы с кратковременной зависимостью характеризуются автокорреляционной функцией (АКФ) вида $K(\tau) = \sigma^2 \exp(-\lambda|\tau|)$, где σ – среднеквадратическое отклонение (СКО) процесса; λ – коэффициент, определяющий скорость спада АКФ. Как показано в [7], эти процессы могут быть получены с помощью авторегрессионного фильтра первого порядка с переходной функцией $x_{i+1} = ax_i + \xi_i$, где $a = \exp(-1/\tau_k)$, τ_k – время корреляции (ВК); ξ_i – отсчеты "белого" шума.

Процессы с долговременной зависимостью, задаваемой значениями показателя Хёрста (H), формировались фильтром с амплитудным коэффициентом передачи $B(f) = \sigma^2 f^{-(1-\gamma)/2}$, $\gamma = 2 - 2H$. Значение $H = 0.5$ соответствует "белому" шуму, $H = 1.5$ – винеровскому случайному процессу. Для стационарных процессов, характеризующихся значениями $0.5 < H < 1$, АКФ имеет вид $K(\tau) = \sigma^2 |\tau|^{-\gamma}$, $\tau \neq 0$. Далее приведены результаты анализа совместного поведения процессов с $H = 0.5 \dots 1.5$.

Модель исследования. При выполнении исследований генерировались две копии тестовых процессов с заданными корреляционными свойствами. Затем в одну из копий вносилась аддитивная амплитудная помеха с независимыми отсчетами, подчиняющаяся равномерному в интервале $[-A, A]$ либо нормальному закону распределения. Для удобства сопоставления получаемых результатов СКО помехи при различных законах распределения устанавливались одинаковыми, для чего СКО нормально распределенной помехи задавалось равным $2A/\sqrt{12}$. Для каждого типа помехи и каждого значения A , определяющего интенсивность помехи, моделирование проводилось 1000 раз. В каждой процедуре моделирования значение A увеличивалось до тех пор, пока значения оцениваемых коэффициентов, характеризующих взаимную динамику процессов, не стабилизировались. По результатам серий экспериментов рассчитывались коэффициенты стабильности взаимного поведения процессов и оценивались их статистические характеристики.

Рассмотренные далее коэффициенты оказались чувствительны к значению и статистическим параметрам амплитудной расстройки между анализируемыми процессами. Они позволяют количественно характеризовать стабильность взаимной динамики процессов.

Коэффициент фазовой синхронизации (КФС) определяется на основе анализа разности фаз двух процессов [6]–[8]. Расчет КФС опирается на мгновенные значения фаз процессов, вычисляемые с использованием преобразования Гильберта, определяющего на основе вещественного сигнала $s(t)$ преобразованный сигнал:

$$s_{\perp}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau.$$

При этом мгновенные значения фазы определяются следующим образом:

$$\Phi(t) = \arctg[s_{\perp}(t)/s(t)].$$

После определения мгновенных фаз, принадлежащих обрабатываемым процессам, формируется их разность, которая затем обрабатывается в скользящем окне. При обработке выделяются интервалы синхронного поведения процессов. Соседние фазовые точки считаются принадлежащими интервалу синхронизации, если СКО разности фаз в окне не превышает заданного порога.

КФС вычисляется как доля интервалов синхронизации в общей последовательности данных.

Второй метод базируется на вычислении **взаимной условной энтропии (ВУЭ)** двух нормализованных анализируемых процессов $x(t)$ и $y(t)$, заданных последовательностями отсчетов $x(i)$ и $y(i)$ соответственно ($i = \overline{1, N}$).

ВУЭ определяет количество информации, содержащееся в отсчете $y(i)$ при условии, что непосредственно перед ним получен определенный фрагмент первой последовательности f_x [9]. Она принимает нулевое значение, если фрагмент процесса $x(t)$ несет в себе всю информацию о поведении $y(t)$. Если процессы $x(t)$ и $y(t)$ независимы, ВУЭ принимает некоторое положительное значение. В этом случае знание $x(t)$ позволяет в некоторой степени прогнозировать поведение процесса $y(t)$.

Согласно [9] для определения ВУЭ в первой последовательности выделяются фрагменты f_x длиной $L - 1$ отсчетов, после чего ВУЭ определяется в соответствии с выражением

$$CE(L) = - \sum_{k=1}^M p(fx_k) \times \sum_{i=1}^N p[y(i)|fx_k] \log p[y(i)|fx_k],$$

где $k = \overline{1, M}$ – номер вхождения фрагмента f_x в последовательность отсчетов процесса $y(t)$ (M – число таких вхождений); $p(fx_k)$ – вероятность появления k -го фрагмента f_x в последовательности отсчетов процесса $y(t)$; $p[y(i)|fx_k]$ – условная вероятность появления k -го фрагмента f_x непосредственно перед отсчетом $y(i)$ процесса $y(t)$.

Третий метод основан на использовании **среднего значения функции когерентности (ФК)** двух процессов в качестве оценки стабильности их взаимного поведения [7]. ФК процессов $x(t)$ и

$y(t)$ принимает значения в интервале $[0, 1]$ и определяется выражением

$$C(f) = \frac{|P_{xy}(f)|^2}{P_x(f)P_y(f)},$$

где $P_x(f)$ и $P_y(f)$ – спектральные плотности мощности процессов; $P_{xy}(f)$ – их взаимная спектральная плотность. В отличие от КФС и ВУЭ функция когерентности позволяет оценить особенности совместного поведения процессов не во временной, а в частотной области. Однако ФК отражает лишь особенности линейной связи между процессами, в то время как КФС учитывает более сложные механизмы их взаимодействия. В качестве важного преимущества КФС по сравнению с другими мерами степени взаимодействия процессов следует отметить, что для его оценивания не требуется стационарность наблюдаемых данных.

Результаты эксперимента. На рис. 1–3 представлены результаты оценивания медиан коэффициентов $\text{med}S(A)$, $\text{med}CE(A)$ и $\text{med}C(A)$ соответственно, характеризующих стабильность взаимного поведения тестовых СП, в один из которых внесена случайная аддитивная помеха, подчиняющаяся равномерному распределению в интервале $[-A, A]$. Графики на рис. 1–3, а иллюстрируют изменения медиан оценок коэффициентов для процессов с кратковременной зависимостью при различных значениях ВК τ_k , рис. 1–3, б характеризуют влияние на оценки коэффициентов значений показателя Херста (H) для процессов с долговременной зависимостью.

Рис. 4–6 иллюстрируют зависимости $\text{med}S(A)$, $\text{med}CE(A)$ и $\text{med}C(A)$, полученные для тестовых данных с кратковременной (а) и долговременной (б) зависимостями для аддитивной помехи, подчиняющейся нормальному распределению с тем же СКО, что и для помехи с равномерным распределением.

В результате экспериментальных исследований установлено, что оценки коэффициентов, представленные в настоящей статье, характеризуются крайне малым разбросом, не превышающим 1–2 % от значений их медиан.

Как можно видеть из рис. 1 и 4, по мере возрастания интенсивности аддитивной помехи S уменьшается до нуля, причем его чувствительность в отношении помехи с нормальным распре-

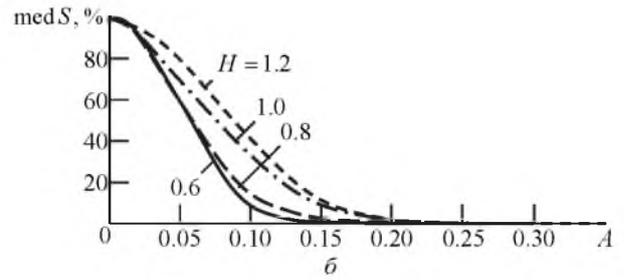
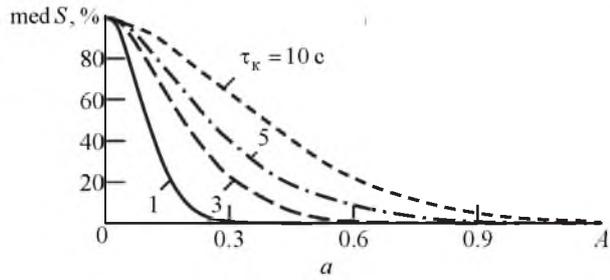


Рис. 1

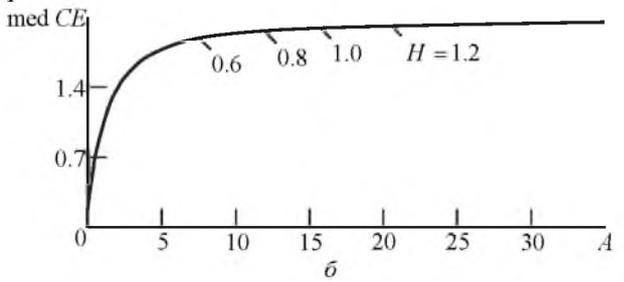
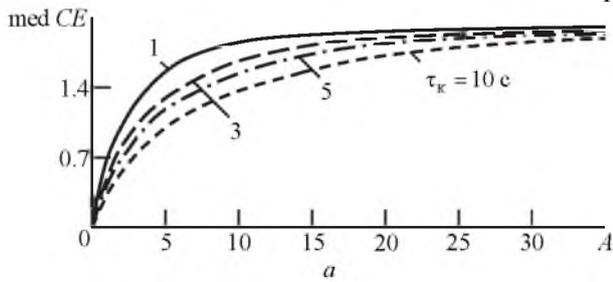


Рис. 2

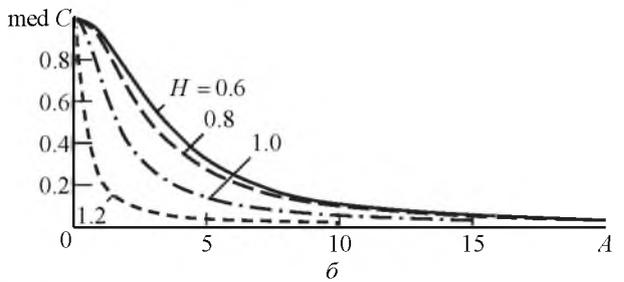
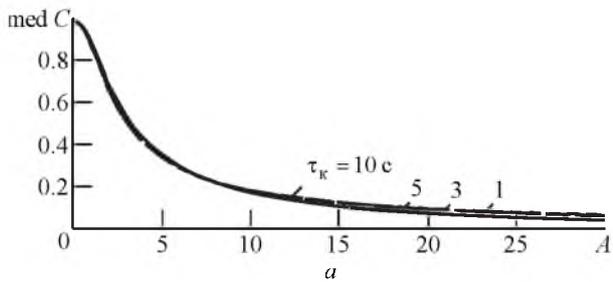


Рис. 3

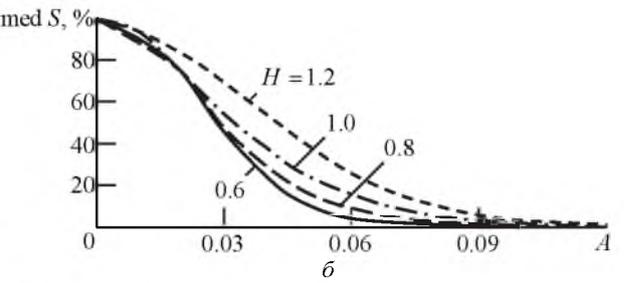
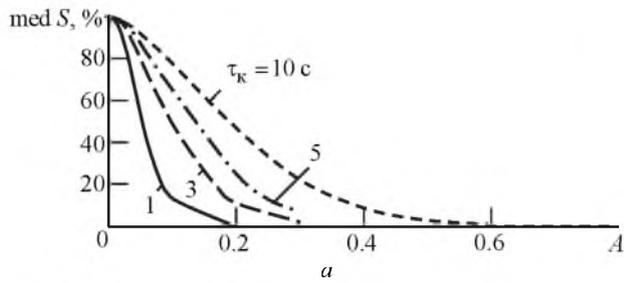


Рис. 4

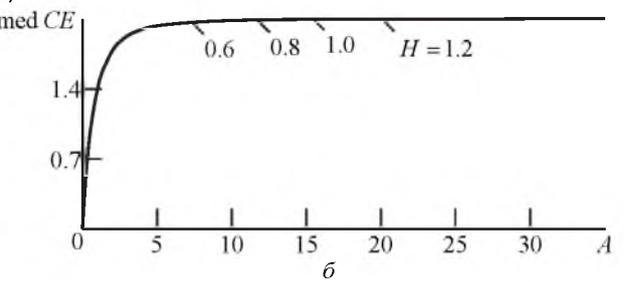
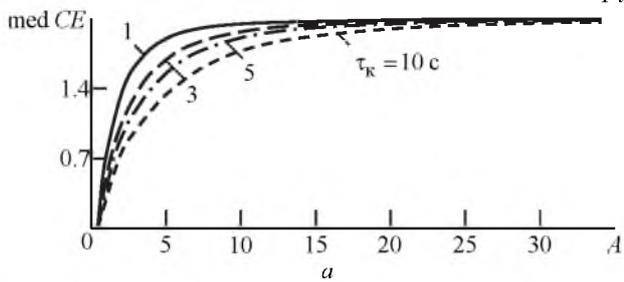


Рис. 5

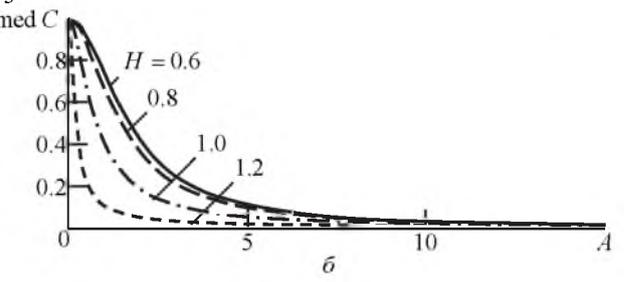
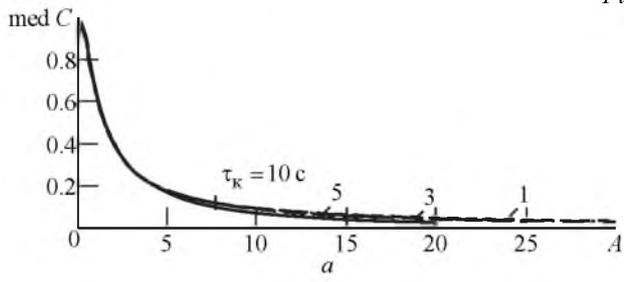


Рис. 6

делением существенно выше, чем в отношении помехи с равномерным распределением отсчетов. Процессы с долговременной зависимостью значительно активнее реагируют на добавление аддитивной помехи к одному из них, чем процессы с кратковременной зависимостью, однако влияние значения показателя Херста на получаемые оценки коэффициента синхронизации не так велико. У процессов с кратковременной зависимостью при увеличении ВК чувствительность КФС к амплитудной помехе снижается.

ВУЭ CE при увеличении амплитудной расстройки возрастает от 0 до предельного значения, определяемого свойствами обрабатываемых данных, для рассматриваемых процессов несколько превышающего 2, причем по мере увеличения расстройки скорость возрастания коэффициента уменьшается (рис. 2, 5). Для процессов с кратковременной зависимостью увеличение ВК приводит к уменьшению ВУЭ. Для процессов с долговременной зависимостью по мере увеличения параметра амплитудной рандомизации A значение ВУЭ CE возрастает быстрее, чем для процессов с кратковременной зависимостью, причем значение показателя Херста практически не влияет на оценки CE . Для нормально распределенной помехи чувствительность метода выше, чем при равномерной помехе.

Среднее значение ФК процессов C (рис. 3 и 6) уменьшается от 1 до 0 по мере увеличения ампли-

тудной расстройки. При этом для процессов с кратковременной зависимостью ВК практически не влияет на значения оценок ФК. Для сигналов с долговременной зависимостью при увеличении расстройки коэффициент C спадает заметно быстрее, чем для данных с кратковременной зависимостью, а увеличение показателя Херста приводит к уменьшению значения C при тех же значениях параметра амплитудной рандомизации A .

Чувствительность метода, основанного на вычислении среднего значения ФК, к нормально распределенной расстройке выше, чем к равномерной.

На основании полученных результатов можно утверждать, что все рассмотренные методы адекватно реагируют на увеличение интенсивности аддитивной амплитудной расстройки, демонстрируя большую чувствительность в случае нормального распределения последней. Влияние показателя Херста для процессов с долговременной зависимостью явно выражено для показателей КФС S и ФК C . Влияние значения ВК для процессов с кратковременной зависимостью проявилось в отношении КФС и ВУЭ.

Полученные результаты позволяют обоснованно выбрать приемлемый метод анализа взаимной динамики процессов, принадлежащих к рассмотренным в настоящей статье типам, в зависимости от их корреляционных свойств и распределения аддитивной амплитудной расстройки между процессами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Network Physiology: How Organ Systems Dynamically Interact / R. P. Bartsch, K. K. L. Liu, A. Bashan, P. Ch. Ivanov // PLoS ONE. 2015. Vol. 10, № 11. P. 1–34.
2. Bartsch R. P., Ivanov P. Ch. Coexisting Forms of Coupling and Phase-Transitions in Physiological Networks // Communications in Computer and Information Science. 2014. Vol. 438. P. 270–287.
3. Complex Network Approach for Recurrence Analysis of Time Series / N. Marwan, J. F. Donges, Y. Zou, R. V. Donner, J. Kurths // Phys. Lett. A. 2009. Vol. 373, iss. 46. P. 4246–254.
4. Network Physiology Reveals Relations between Network Topology and Physiological Function / A. Bashan, R. P. Bartsch, J. W. Kantelhardt, S. Havlin, P. Ch. Ivanov // Nature Communications. 2012. Vol. 3, art. 702. P. 1–9.
5. Improved El Niño Forecasting by Cooperativity Detection / J. Ludescher, A. Gozolchiani, M. I. Bogachev, A. Bunde, Sh. Havlin, H. J. Schellnhuber // Proc. of the National Academy of Science of the USA. 2013. Vol. 110, № 29. P. 11742–11745.
6. Two Approaches to Estimating the Relative Dynamic Stability of Physiological Processes / N. S. Pyko, S. A. Pyko, O. A. Markelov, Yu. D. Uljanitski, M. I. Bogachev, O. V. Mamontov // Soft Computing and Measurements

(SCM), 2016 XIX IEEE Int. Conf. St. Petersburg, 25–27 May 2016. URL: <http://doi.org.10.1109/SCM.2016.7519684> (дата обращения: 25.12.2017).

7. Assessment of the Mutual Stability of Two Correlated Stochastic Signals: The Effects of Phase Randomization / N. S. Pyko, S. A. Pyko, O. A. Markelov, Yu. D. Uljanitski, M. I. Bogachev // 2017 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg, 1–3 Febr. 2017. URL: <http://doi.org.10.1109/EIConRus.2017.7910659> (дата обращения: 25.12.2017).

8. Assessment of the Mutual Synchronization of Two Stochastic Data Sets: the Effects of Additive and Multiplicative White Noise / N. S. Pyko, S. A. Pyko, O. A. Markelov, Yu. D. Uljanitski // Proc. of 2017 20th IEEE Int. Conf. on Soft Computing and Measurements (SCM'2017), St. Petersburg, 24–26 May, 2017. URL: <http://doi.org.10.1109/SCM.2017.7970495> (дата обращения: 25.12.2017).

9. Conditional Entropy Approach for the Evaluation of the Coupling Strength / A. Porta, G. Baselli, F. Lombardi, S. Cerutti // Biological Cybernetics. 1999. Vol. 81, № 2. P. 119–129.

Статья поступила в редакцию 10 ноября 2017 г.

Для цитирования: Исследование взаимной динамики стохастических нормально распределенных процессов при аддитивной амплитудной расстройке между ними / С. А. Пыко, Н. С. Пыко, О. А. Маркелов, Ю. Д. Ульяницкий, М. И. Богачев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 6. С. 21–27.

Пыко Светлана Анатольевна – кандидат технических наук (2000), доцент (2003) кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), почетный работник ЛЭТИ (2015). Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – методы обработки медико-биологической информации.

E-mail: svet.pyko@gmail.com

Пыко Никита Сергеевич – бакалавр по направлению "Радиотехника" (2015), студент 1-го курса магистратуры по кафедре радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 17 научных работ. Сфера научных интересов – статистический анализ временных рядов.

E-mail: goststalker13@gmail.com

Маркелов Олег Александрович – кандидат технических наук (2015), доцент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – статистический анализ временных рядов.

E-mail: olegmarkelov@gmail.com

Ульяницкий Юрий Дмитриевич – кандидат технических наук (1968), профессор (1992) кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), заслуженный работник высшей школы Российской Федерации (2003). Автор более 120 научных работ, более 30 изобретений. Сфера научных интересов – применение методов теории вероятности и математической статистики в задачах обработки биологических сигналов в спортивных и медицинских системах.

Тел.: 8 (812) 234-05-96.

Богачев Михаил Игоревич – кандидат технических наук (2006), доцент (2011), ведущий научный сотрудник кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 120 научных работ. Сфера научных интересов – теория сложных систем, статистический анализ данных.

E-mail: rogex@yandex.com

S. A. Pyko, N. S. Pyko, O. A. Markelov, Yu. D. Uljanitski, M. I. Bogachev
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Investigation of Mutual Behavior of Stochastic Normally Distributed Processes with Additive Amplitude Randomization

Abstract. *The joint analysis of several signals is essential for better understanding of the principles underlying the complex systems dynamics. We consider three methods for estimating the stability of the relative dynamics of two surrogate processes. The first one is based on calculation of the phase synchronization coefficient S and the second one on estimation of the cross-conditional entropy CE . The third approach uses the average value of the coherence function of the two processes – the coherence coefficient C . We study the sensitivity of these methods in relation to the amplitude randomization between test processes. All methods are applied to analyze two types of normally distributed random stochastic processes, with either short-term correlations characterized by finite correlation time or long-term correlations with theoretically infinite correlation time characterized by Hurst exponents. In our research, we generate two copies of the surrogate process with either short-term or long-term correlations. Then we attribute the additive white noise to one of these copies at first with the uniform distribution and then with the Gaussian distribution and the same variance. Next, we calculate the coefficients that characterize the mutual behavior of the two test processes and estimate their statistical characteristics. It is found that the sensitivity of all methods to Gaussian additive noise is higher than that of uniform one. We show that processes with long-term correlation react more actively to the additive amplitude noise than processes with short-term correlation. The influence of Hurst exponent value for the processes with long-term correlation is expressed for the coefficients S and C . The influence of correlation time is demonstrated for the coefficients S and CE . Our results may be useful in investigations of the mutual dynamics of two processes belonging to the considered types.*

Key words: Phase Synchronization Coefficient, Correlation Time, Hurst Coefficient, Coherence Function, Cross-Conditional Entropy

REFERENCES

1. Bartsch R. P., Liu K. K. L., Bashan A., Ivanov P. Ch. Network Physiology: How Organ Systems Dynamically Interact. PLoS ONE. 2015, vol. 10, no. 11, pp. 1–34.
2. Bartsch R. P., Ivanov P. Ch. Coexisting Forms of Coupling and Phase-Transitions in Physiological Networks. Communications in Computer and Information Science. 2014, vol. 438, pp. 270–287.

3. Marwan N., Donges J. F., Zou Y., Donner R. V., Kurths J. Complex Network Approach for Recurrence Analysis of Time Series. *Physics Letters A*. 2009, vol. 373, iss. 46, pp. 4246–254.

4. Bashan A., Bartsch R. P., Kantelhardt J. W., Havlin S., Ivanov P. Ch. Network Physiology Reveals Relations between Network Topology and Physiological Function. *Nature Communications*. 2012, vol. 3, art. 702, pp. 1–9.

5. Ludescher J., Gozolchiani A., Bogachev M. I., Bunde A., Havlin Sh., Schellnhuber H. J. Improved El Niño Forecasting by Cooperativity Detection. *Proc. of the National Academy of Science of the USA*. 2013, vol. 110, no. 29, pp. 11742–11745.

6. Pyko N. S., Pyko S. A., Markelov O. A., Uljanitski Yu. D., Bogachev M. I., Mamontov O. V. Two Approaches to Estimating the Relative Dynamic Stability of Physiological Processes. *Soft Computing and Measurements (SCM)*, 2016 XIX IEEE Int. Conf. St. Petersburg, 25–27 May 2016. Available at: <http://doi.org.10.1109/SCM.2016.7519684> (accessed: 25 December 2017).

Received November, 10, 2017

For citation: Pyko S. A., Pyko N. S., Markelov O. A., Uljanitski Yu. D., Bogachev M. I. Investigation of the Mutual Behavior of Stochastic Normally Distributed Processes with Additive Amplitude Randomization. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 6, pp. 21–26. (In Russian)

Svetlana A. Pyko – Ph.D. in Engineering (2000), Associate Professor (2003) of the Department of Radio Equipment Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". Honored Worker of the University (2015). The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: methods of processing of biomedical information.

E-mail: svet.pyko@gmail.com

Nikita S. Pyko – Bachelor's Degree in Radio Engineering (2015), 1st year Master's Degree student of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 17 scientific publications. Area of expertise: statistical analysis of time series.

E-mail: goststalker13@gmail.com

Oleg A. Markelov – Ph.D. in Engineering (2015), Associate Professor of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: statistical analysis of time series.

E-mail: OlegMarkelov@gmail.com

Yuri D. Uljanitskiy – Ph.D. in Engineering (1968), Professor (1992) of the Department of Radio Equipment Systems of Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI". Honored High School Worker of RF (2003). The author of more than 120 scientific publications. Area of expertise: application of the methods of probability theory and mathematical statistics in biological signal processing tasks in sports and health systems.

Phone: 8 (812) 234-05-96.

Michael I. Bogachev – Ph.D. in Engineering (2006), Associate Professor (2011), Leading Scientist of the Department of Radio Equipment Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 120 scientific publications. Area of expertise: theory of complex systems; statistical analysis of data.

E-mail: rogex@yandex.ru