



11. Гурский, Д.А. Вычисления в Mathcad 12 [Текст] / Д.А. Гурский, Е.С. Турбин. – СПб.: Питер, 2006. – 544 с.
12. Дьяконов, В.П. Вейвлеты. От теории к практике [Текст] / В. П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2010. – 400 с.
13. Закиров, Р.Г. Прогнозирование технического состояния бортового радиоэлектронного оборудования [Электронный ресурс] / Р.Г. Закиров // Труды МАИ. – 2016. – № 85. – Режим доступа: [http://mai.ru/upload/iblock/682/zakirov\\_rus.pdf](http://mai.ru/upload/iblock/682/zakirov_rus.pdf) (19.03.2018)
14. Захарова, Т. В. Вейвлет-анализ и его приложения [Текст] / Т. В. Захарова, О. В. Шестаков. – М.: Инфра-М, 2012. – 157 с.
15. Мироновский, Л.А. Функциональное диагностирование динамических систем [Текст] / Л.А. Мироновский. – СПб.: МГУ – ГРИФ, 1998. – 256 с.
16. Нестационарные системы автоматического управления. Анализ, синтез, оптимизация [Текст] / под ред.: К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 631 с.
17. Основы технической диагностики. В 2-х книгах. Кн. I. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза [Текст] / под ред.: П.П. Пархоменко. – М.: Энергия, 1976. – 464 с.
18. Розенвассер, Е.Н. Чувствительность систем управления [Текст] / Е. Н. Розенвассер, Р.М. Юсупов. – М: Наука, 1981. – 464 с.
19. Шаронов, А.В. Методы и алгоритмы обработки результатов экспериментальных исследований [Текст] / А.В. Шаронов. – М.: Изд-во МАИ, 2004. – 243 с.
20. Яковлев, А.Н. Введение в вейвлет-преобразования [Текст] : учебное пособие / А.Н. Яковлев. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – 104 с.; То же [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://window.edu.ru/resource/328/29328/files/nstu68.pdf> (19.03.2018)

В.Р. Крашенинников, А.Ю. Субботин

## ДВАЖДЫ СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ВИДЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ЦИЛИНДРЕ

(Ульяновский государственный технический университет)

Процессы, происходящие в технических, экономических, медицинских, социальных и других объектах часто имеют квазипериодический характер. Для эффективного решения задач, связанных с обработкой таких процессов, необходима их математическая постановка, включающая в себя математическое описание, то есть модель процесса. При этом процесс обычно представляется в виде системы случайных величин, то есть случайного процесса, в рассматриваемом случае – квазипериодического.

Имеется ряд подходов к описанию квазипериодичности: наложение на основную гармонику шума или более высоких частот, периодическая нестаци-



онарность (флуктуация моментов и других свойств) и так далее. Общим проявлением подобных представлений является высокая корреляция значений процесса на расстояниях, кратных периоду, то есть флуктуация корреляционной функции (КФ) процесса. В настоящей работе это свойство взято за основу, то есть в качестве основного свойства квазипериодического процесса.

В качестве квазипериодов процесса можно взять строки некоторого прямоугольного изображения: требуемая коррелированность будет обеспечиваться коррелированностью изображения по вертикали. Рассмотрим, например, изображение на прямоугольнике размеров  $K \times T$ , заданное моделью Хабиби [1]:

$$x_{k,l} = \rho x_{k,l-1} + r x_{k-1,l} - \rho r x_{k-1,l-1} + \beta \xi_{k,l}, \quad (1)$$

где  $k$  – номер строки;  $l$  – номер столбца;  $\xi_{k,l}$  – совокупность независимых стандартных гауссовских случайных величин. Параметры  $r$  и  $\rho$  влияют на коррелированность изображения по вертикали и горизонтали соответственно;  $\beta$  влияет на дисперсию изображения. Порождаемый процесс имеет КФ

$$V(m,n) = M[x_{k,l} x_{k+m,l+n}] = \beta^2 r^{|m|} \rho^{|n|}. \quad (2)$$

Корреляционные связи между элементами изображения, как это следует из (2), убывают вдоль строк и столбцов. Соседние строки изображения при  $r \approx 1$  имеют высокую корреляцию между собой, поэтому при объединении строк в последовательность можно получить модель квазипериодического процесса. На рис. 1,а показан пример изображения, имитированного с помощью этой модели. Однако начало и конец каждой строки, находясь на значительном расстоянии друг от друга, практически независимы между собой, что хорошо заметно на приставленном к этому изображению нескольких его первых столбцов. Поэтому на стыках периодов полученного процесса будет слабая корреляция соседних значений, несвойственная относительно непрерывным процессам.

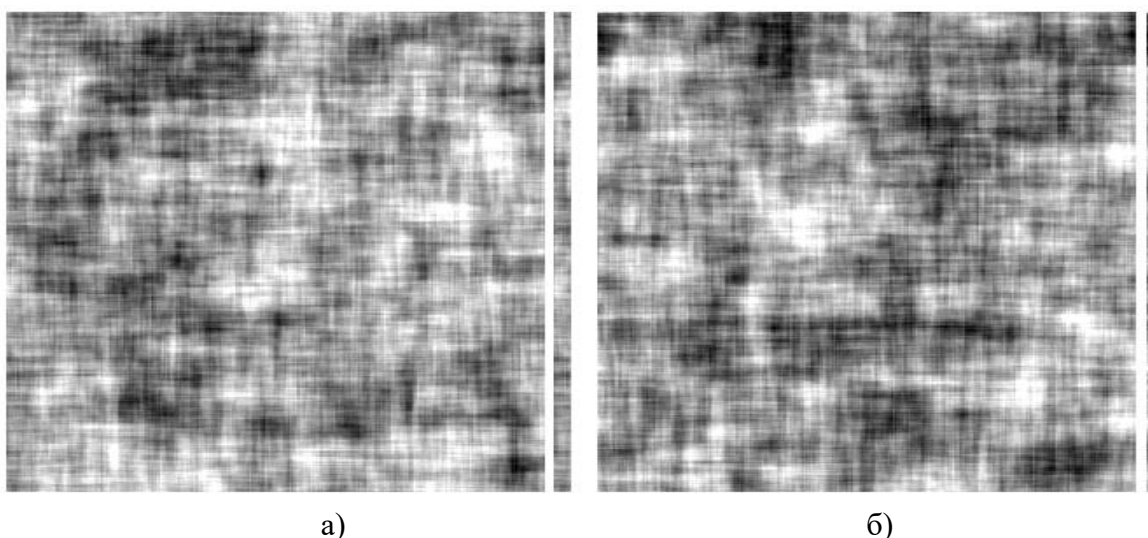


Рис.1. Изображения, имитированное моделью (1): а) изображение на прямоугольнике; б) развертка изображения на цилиндре



Рассмотрим теперь спиралевидную сетку на цилиндре (рис. 2). Строки этой сетки представляют собой витки спирали (винтовой линии). Для описания изображения, заданного на этой сетке, применим аналог авторегрессионной модели Хабиби (1), в которой  $k$  – номер витка спирали и  $l$  – номер узла в витке,  $T$  – период, то есть количество точек в одном витке. Эта модель может быть представлена в эквивалентном виде как развёртка изображения вдоль спирали:

$$x_n = \rho x_{n-1} + r x_{n-T} - \rho r x_{n-T-1} + \beta \xi_n, \quad (3)$$

где  $n$  – номер точки изображения при сквозной нумерации по этой спирали. Дисперсия этого изображения равна  $\sigma^2 = \beta^2 (1 + r\rho^T) / [(1 - \rho^2)(1 - r^2)(1 - r\rho^T)]$ . Разрез изображения, полученного с помощью этой модели, показан на рис. 1,б. Характерной особенностью является непрерывность вдоль линии разреза, что заметно на приставленных к этому изображению его нескольких первых строк. Поэтому модели вида (3) могут быть использованы как модели квазипериодических процессов, например, в [2] они были применены для представления и обработки речевых сигналов, а в [3] для колебаний технического объекта.

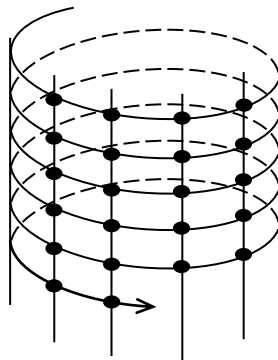


Рис. 2. Спиралевидная сетка отсчётов цилиндрического изображения

Однако изображения, порождаемые моделями (1) и (3) однородны, что ограничивает область их применения, так как многие изображения и процессы в сложных технических системах имеют существенную и случайную неоднородность, что требует математического описания. В работах [4-7] предложено представлять неоднородность изображений в виде «дважды стохастических» моделей. В этом представлении несколько обычных «управляющих» изображений задают *случайные* параметры «управляемого» итогового изображения. Неоднородность итогового изображения определяется локальными особенностями управляющих изображений. В работах [5-7] управляющие и управляемые изображения являлись авторегрессионными, заданными на прямоугольных сетках.

Для представления неоднородных цилиндрических изображений применим дважды стохастические модели, подобные рассмотренным в [5-7]. Для этого возьмём в качестве управляющих два изображения  $R = \{r_n\}$  и  $P = \{\rho_n\}$ , заданные моделями (3) со своими значениями параметров. Управляемое итоговое изображение  $X$  также задаётся моделью (3) с переменными параметрами

$$\rho_n = \bar{\rho} + a\varphi_n, \quad r_n = \bar{r} + b\psi_n, \quad (4)$$



где  $\bar{r}$ ,  $\bar{\rho}$  – средние значения параметров  $r$ ,  $\rho$ ;  $\varphi_n, \psi_n$  – независимые стандартные гауссовские случайные величины;  $a$ ,  $b$  – постоянные коэффициенты.

На рис. 3 показан пример применения этой модели для имитации изображения на цилиндре. Управляющее изображение здесь одно ( $P=R$ ). Оно показано на рис. 3,а. Итоговое изображение на рис. 3,б имеет ярко выраженную неоднородность, вызванную именно изменчивостью параметров корреляции. Тёмные участки изображения 3,а соответствуют малым значениям  $\rho_n$  и  $r_n$ , поэтому на этих местах изображение 3,б коррелировано меньше.

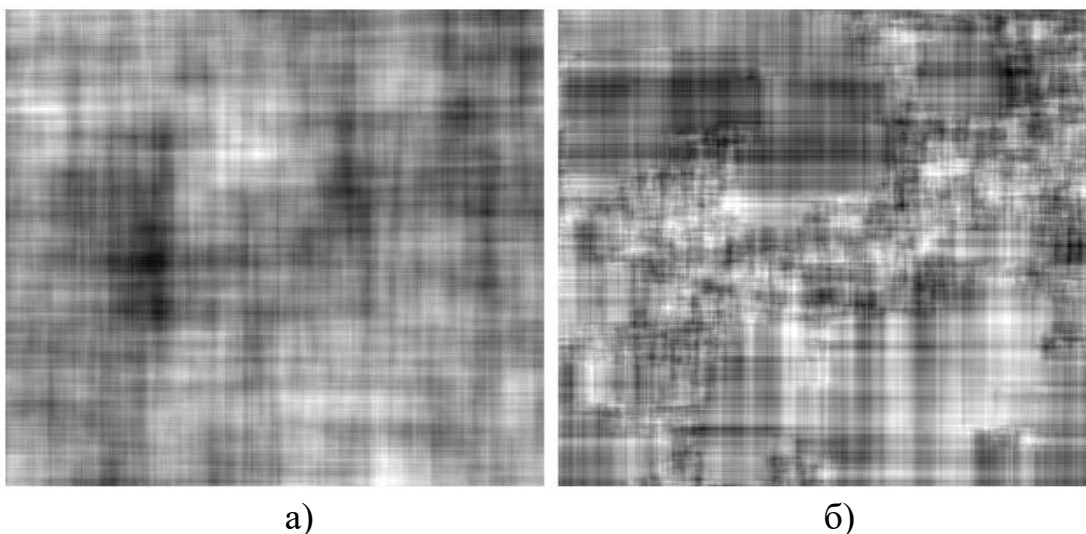


Рис. 3. Имитация дважды стохастического изображения на цилиндре: а) управляющее изображение, б) итоговое изображение.

На рис. 4 показаны графики двух отрезков квазипериодического сигнала, имитированного с помощью описанной дважды стохастической модели с периодом  $T=25$ . Квазипериоды на рисунке разделены вертикальными линиями.

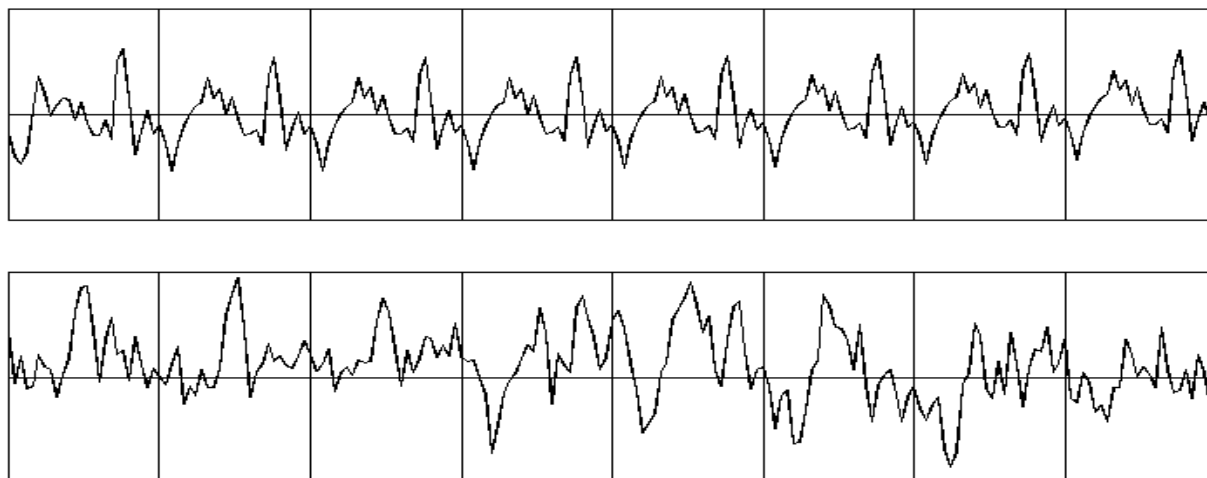


Рис. 4. Графики участков имитированного квазипериодического процесса.



Параметры  $\rho_n$  и  $r_n$  изменяются со временем, поэтому меняются и корреляционные свойства итогового процесса. Верхний график соответствует большим значениям этих параметров, поэтому процесс близок к чисто периодическому. При малых значениях параметров периодичность слабее (нижний график).

Таким образом, описанные дважды стохастические модели цилиндрических изображений могут служить основой для моделирования и имитации квазипериодических процессов с различными видами нестационарности путём подходящего набора параметров моделей.

### Литература

1. Васильев, К.К. Статистический анализ последовательностей изображений / К.К. Васильев, В.Р. Крашенинников. – М.: Радиотехника, 2017. – 248 с.
2. Крашенинников, В.Р. Статистические методы обработки изображений / В.Р. Крашенинников. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2015. – 167 с.
3. Крашенинников, В.Р. Прогнозирование динамики объекта с использованием авторегрессионных моделей на цилиндре / В.Р. Крашенинников, Ю.Е. Кувайскова // Радиотехника. – 2016. – №9. – С. 36-39.
4. Woods, J.W. Image Estimation Using Doubly Stochastic Gaussian Random Field Models / J.W. Woods, S. Dravida, R. Mediavilla // Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1987. – Iss. 2. – Vol. 9. – P. – 245-253.
5. Васильев, К.К. Представление и обработка спутниковых многозональных изображений / К.К. Васильев, В.Е. Дементьев. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2017. – 251 с.
6. Krasheninnikov, V.R. Multidimensional Image Models and Processing / V.R. Krasheninnikov, K.K. Vasiliev // Intelligent Systems Reference Library 135. Springer International Publishing. – 2018. – P. 11-64.
7. Vasiliev, K.K. Filtration and Restoration of Satellite Images Using Doubly Stochastic Random Fields / K.K. Vasiliev, V.E. Dementiev, N.A. Andriyanov // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 1814. – P. 10-20.

К.С. Кульга, Э.Р. Асбапов

## МЕТОДИКА СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА КОМПОНОВОК МЕХАТРОННЫХ СТАНКОВ С ПОМОЩЬЮ САД/САЕ-СИСТЕМ

(ФГБОУ ВО Уфимский государственный авиационный технический  
университет «УГАТУ»)

**Актуальность проблемы.** Компоновка мехатронного станка (далее, станок), как правило, состоит из одного стационарного (постоянно неподвижного) и нескольких подвижных элементов, разделённых соединениями (стыками). Создание (синтез) компоновки осуществляется на ранней стадии проектирования станка после определения его характеристик, выбора метода и